

Marko Ruotsalainen

Suurjännite- ja keskijännitejohtojen impedanssimittaukset

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

15.12.2014

| | |
|---|--|
| Tekijä Otsikko | Marko Ruotsalainen Suurjännite- ja keskijännitejohtojen impedanssimittaukset |
| Sivumäärä Aika | 79 sivua + 3 liitettä 15.12.2014 |
| Tutkinto | Insinööri (AMK) |
| Koulutusohjelma | Sähkötekniikka |
| Suuntautumisvaihtoehto | Sähkövoimatekniikka |
| Ohjaaja | Lehtori Sampsa Kupari |
| <p>Tässä insinöörityössä analysoitiin vuosina 2004 - 2014 tehtyjä suurjännitejohtojen impedanssimittauksia vertaamalla mitattuja myötä- ja nollaverkon impedansseja laskettuihin arvoihin. Keskijännitejohtoja ei analysoitu aineiston pienuuden vuoksi.</p> <p>Työssä perehdyttiin avojohtojen ja kaapelien ominaisuuksiin sekä impedanssien laskemiseen. Tämän jälkeen esiteltiin sekä perinteinen Voltti-Ampeeri-mittarimenetelmä että parannettu taajuusselektiivinen mittaumenetelmä. Seuraavaksi tutustuttiin taajuusselektiiviseen menetelmään perustuvaan mittauslaitteistoon, sen käyttöön ja työturvallisuuteen. Mittauslaitteisto koostui Omicron CPC 100-primäärikoestuslaitteesta, kytkentäyksiköstä CP CU1 ja maadoitusyksiköstä CP GB1.</p> <p>Analysoitavat suurjännitejohdot jaettiin ominaisuuksien mukaan avojohtoihin, kaapeleihin sekä niiden yhdistelmiin. Analyysissä selvitettiin laskettujen arvojen virheprosentit sekä niiden tilastollinen merkitsevyys. Analyysin perusteella johdon lajilla ei ollut merkittävää vaikutusta laskettujen arvojen virheen suuruuteen. Laskettujen myötäverkon impedanssien keskimääräiset virheprosentit olivat pieniä, mutta nollaverkon impedanssien keskimääräiset virheprosentit olivat suuria.</p> <p>Impedanssimittausten vertailu laskettuihin arvoihin sekä tilastollinen analyysi osoitti, että impedanssimittaukset ovat välttämättömiä distanssireleiden luotettavan toiminnan varmistamiseksi erityisesti lyhyillä johdoilla.</p> | |
| Avainsanat | impedanssimittaus, myötäimpedanssi, nollaimpedanssi, taajuusselektiivinen menetelmä, avojohto, suurjännitekaapeli, distanssirele |

| | |
|---|---|
| Author Title | Marko Ruotsalainen High and Medium Voltage Line Impedance Measurements |
| Number of Pages Date | 79 pages + 3 appendices 15 December 2014 |
| Degree | Bachelor of Engineering |
| Degree Programme | Electrical Engineering |
| Specialisation option | Electrical Power Engineering |
| Instructor | Sampsa Kupari, Senior Lecturer |
| <p>In this thesis, the high voltage line impedance measurement results made between 2004 and 2014 are analyzed by comparing measured positive- and zero-sequence impedances with the calculated values. The medium voltage lines are not analyzed due to a limited size of available data.</p> <p>In this work, features of the overhead line and power cables are introduced, and this is followed by explanation of calculation methods of their positive and zero-sequence impedances. Then, conventional Volt-Ampere method and improved frequency selective impedance measurement method are introduced. The frequency selective measuring device, operation of measuring system and safety issues are also discussed. The used measuring system consisted of Omicron CPC 100 primary testing device, CP CU1 coupling unit, and CP GB1 grounding box.</p> <p>Analyzed high voltage lines were divided into different classes according to their type: overhead lines, power cables and their combinations. On analysis, error percentage of the calculated values were determined as well as their statistical significance. According to the analysis the type of line had no significant effect on error percentages of calculated values. The mean error percentages of calculated positive-sequences were small, but mean error percentages of zero-sequences were of significance.</p> <p>Comparison of impedance measurements with the calculated values and their statistical analysis shows that performing of impedance measurements is necessary, particularly in the case of short overhead lines and power cables.</p> | |
| Keywords | impedance measurement, positive and zero sequence impedance, frequency selective method, overhead line, underground cable, distance relay |

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet ja symbolit

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Distanssireleet | 2 |
| 2.1 | Mittausperiaate | 2 |
| 2.2 | Vikasilmukat | 3 |
| 2.3 | Suojausvyöhykkeet ja monikulmio impedanssikuvaaja | 3 |
| 2.4 | Maasulkuimpedanssisuhde | 5 |
| 3 | Maasulkuvirran käyttäytyminen | 6 |
| 3.1 | Maasulkuvirran jakautuminen | 7 |
| 3.2 | Maapiirin resistanssi | 8 |
| 3.3 | Reduktiovaikutus | 9 |
| 3.3.1 | Avojohto ukkosjohtimilla | 10 |
| 3.3.2 | Suurjännite- ja keskijännitekaapelit | 10 |
| 4 | Sähköjohdot | 12 |
| 4.1 | Suurjänniteavojohdot | 14 |
| 4.1.1 | Suurjännitejohdin | 15 |
| 4.1.2 | Suurjänniteavojohdon impedanssien laskeminen | 16 |
| 4.2 | Keskijänniteavojohdot | 20 |
| 4.2.1 | Keskijännitejohdin | 20 |
| 4.2.2 | Keskijänniteavojohdon impedanssien laskeminen | 21 |
| 4.3 | Suurjännitekaapelit | 22 |
| 4.4 | Keskijännitekaapelit | 27 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5 | Impedanssimittausmenetelmät | 29 |
| 5.1 | Voltti-Ampeeri-mittarimenetelmä | 29 |
| 5.1.1 | Pulssimenetelmä | 29 |
| 5.1.2 | Napaisuudenvaihtomenetelmä | 32 |
| 5.2 | Taajuusselektiivinen menetelmä | 33 |
| 6 | Impedanssimittauslaitteisto | 35 |
| 6.1 | Omicron CPC 100-primäärikoestuslaite | 35 |
| 6.2 | Omicron CP CU1-kytkentäyksikkö | 37 |
| 6.3 | Omicron CP GB1-maadoitusyksikkö | 38 |
| 7 | Impedanssimittaus | 39 |
| 7.1 | Impedanssimittausten valmistelu | 39 |
| 7.1.1 | Verkonhaltijan toimenpiteet | 40 |
| 7.1.2 | Mittaajan toimenpiteet | 40 |
| 7.1.3 | Rinnakkaisen johdon häiriövaikutuksen tarkistaminen | 42 |
| 7.2 | Impedanssimittausten suorittaminen | 43 |
| 7.2.1 | Vaiheiden välinen impedanssimittaus | 44 |
| 7.2.2 | Vaiheen ja maan välinen impedanssimittaus | 44 |
| 7.2.3 | Kaikkien vaiheiden ja maan välinen impedanssimittaus | 45 |
| 7.3 | Mittaustulosten arviointi mittausten aikana | 45 |
| 7.4 | Mittausten suorittaminen kaasueristeisestä kytkinlaitoksesta | 47 |
| 7.5 | Mittaustulosten käsittely | 48 |
| 8 | Työturvallisuus | 51 |
| 8.1 | Häiriöiden kytkeytyminen | 51 |
| 8.1.1 | Kapasitiivinen kytkeytyminen | 52 |
| 8.1.2 | Induktiivinen kytkeytyminen | 54 |

| | | |
|-------|---|----|
| 9 | Mittaustulosten analysointi | 55 |
| 9.1 | Avojohtojen impedanssimittaukset | 56 |
| 9.1.1 | Avojohtojen maapiirin impedanssi | 56 |
| 9.1.2 | Myötä- ja nollaverkon tulosten vertailu | 58 |
| 9.2 | Suurjännitekaapelien impedanssimittaukset | 59 |
| 9.2.1 | Suurjännitekaapelin maapiirin impedanssi | 59 |
| 9.2.2 | Myötä- ja nollaverkon tulosten vertailu | 60 |
| 9.3 | Yhdistelmäjohtojen impedanssimittaukset | 61 |
| 9.3.1 | Yhdistelmäjohtojen maapiirin impedanssi | 61 |
| 9.3.2 | Myötä- ja nollaverkon tulosten vertailu | 62 |
| 9.4 | Mittaustulosten tilastollinen analysointi | 63 |
| 9.4.1 | Tilastollisen testin valinta | 64 |
| 9.4.2 | Verrannollisten parien t-testi | 65 |
| 9.4.3 | Tilastollisen analyysin yhteenveto | 72 |
| 10 | Yhteenveto | 75 |
| | Lähteet | 77 |

Liitteet

Liite 1. Impedanssimittaukset 2004 - 2014

Liite 2. Omicron-mittauslaitteiston tekniset tiedot

Liite 3. Avojohtimien ja ajolankojen sekä voimakaapelien tekniset ominaisuudet

Lyhenteet ja symbolit

| | |
|-----------------|---|
| ACSR | Aluminium Conductor Steel Reinforced; teräsvahvisteinen alumiinijohdin |
| ADC | Analog Digital Converter; analogia-digitaalimuunnin |
| CENELEC | Comité Européen de Normalisation Electrotechnique/European Committee for Electrotechnical Standardization; eurooppalainen sähköalan standardisoimisjärjestö |
| CPC 100 | Universal testing device for electrical diagnostics; primäärikoestuslaite |
| CP CU1 | Multifunctional coupling unit for the CPC 100; kytkentäyksikkö, jolla erotetaan primäärikoestuslaite testattavasta kohteesta |
| CP GB1 | Grounding Unit; maadoitusyksikkö |
| DSP | Digital Signal Processor; digitaalinen signaaliprosessori |
| ePC | embedded Personal Computer; sulautettu tietokone |
| GIS | Gas Insulated Switchgear; kaasueristeinen kytkinlaitos |
| IEC | International Electrotechnical Commission; kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio |
| MIX | Mixed line; esimerkiksi sarjaan kytketyn avojohdon ja kaapelin yhdistelmä |
| MS | Microsoft Corporation; yhdysvaltalainen ohjelmistoalan yritys |
| SFS | Suomen Standardoimisliitto SFS ry |
| SF ₆ | Rikkiheksafluoridi. Käytetään eristekaasuna sähkötekniisissä laitteissa. |
| SMPS | Switched-mode Power Supply; hakkuriteholähde |
| OHL | Overhead Line; avojohto |
| PAS | Päällystetty avojohto suurjännitteille |
| UGC | Underground Cable; maan alle asennettu kaapeli |
| USB | Universal Serial Bus; sarjaväyläarkkitehtuuri oheislaitteiden liittämiseksi tietokoneeseen |
| XLT | Microsoft Excel Template file; Excel-taulukkolaskennan mallitiedosto |
| XML | Extensible Markup Language; merkintäkielien yläkäsite tai standardi, jolla tiedon merkitys on kuvattavissa tiedon sekaan |

| | |
|------------------------|---|
| A, A_e | johdinnipun geometria |
| ρ_{20} | johdinmateriaalin resistiivisyys lämpötilassa +20 °C [$\Omega \cdot \text{km}$] |
| α_{20} | johdinmateriaalin resistiivisyyden lämpötilakerroin lämpötilassa +20 °C |
| b_e | kolmivaihejohtimien ja ukkosjohtimien välinen ekvivalenttietäisyys |
| d_c | johtimen halkaisija |
| ϵ_0 | tyhjiön suhteellinen permittiivisyys 8,85 pF/m |
| f | verkon taajuus |
| H | maavirran ekvivalenttisyvyys |
| h | johtimen ja maan välinen etäisyys |
| H_0 | nollahypoteesi |
| H_1 | vaihtoehtoinen hypoteesi |
| l | (=s) johdon pituus |
| $I_{u(f)}$ | ukkosjohtimen maadoituksesta mitattu virta |
| $I_{\text{syöttö}(f)}$ | koestuslaitteen syöttämä virta |
| K | johtimien säikeiden lukumäärästä riippuva vakio |
| k | k -kerroin, maasulkuimpedanssisuhde |
| k_0 | k_0 -kerroin, kompleksinen maasulkuimpedanssisuhde |
| k_s | ukkosjohtimen reduktiokerroin |
| I_{mit} | vaihejohtimesta mitattu virta |
| l_{johdo} | mitattavan johdon pituus kilometreissä |
| I_f | rinnakkaisessa johdossa kulkeva vikavirta |
| M, M_{ba} | keskinäisinduktanssi |
| μ_{ru} | ukkosjohdinaineen suhteellinen permeabiliteetti |
| μ_1 | johdinmateriaalin suhteellinen permeabiliteetti |
| μ_0 | ilman permeabiliteetti $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m |
| n | johdinnipun osajohdinmäärä |
| n_u | ukkosjohtimien lukumäärä |
| ω | kulmataajuus |
| R | resistanssi |
| R_0 | nollaverkon resistanssi |
| R_1 | myötäverkon resistanssi |
| R_c | johtimen resistanssi |
| r_c | johtimen ekvivalenttisäde |
| R_{dc} | johtimen tasavirtaresistanssi lämpötilassa +20 °C |
| R'_{dc} | johtimen tasavirtaresistanssi käyttölämpötilassa |
| R_e | (= R_E), (= R_m) maapiirin resistanssi |

| | |
|--------------------|--|
| $R_{\acute{e}}$ | maapiirin resistanssi [Ω/km] |
| r_e, r_0 | johdinnipun ekvivalenttisäde, tavallisessa johdossa vaihejohtimen säde |
| R_k | ($=R_L$), ($=R_1$) myötäverkon resistanssi |
| R'_k | johtimen resistanssi [Ω/km] |
| R_m | maapiirin resistanssi |
| R_u | yhden ukkosjohtimen resistanssi |
| r_u | kaikki ukkosjohtimet käsittävän nipun ekvivalenttisäde |
| S | johtimen poikkipinta-ala |
| s | ($=l$) johdon pituus |
| s' | vaihejohtimien keskipisteiden välinen etäisyys |
| θ | johtimen käyttölämpötila |
| X | reaktanssi |
| X_0 | nollaverkon reaktanssi |
| X_1 | myötäverkon reaktanssi |
| X_k | ($=X_L$), ($=X_1$) myötäverkon reaktanssi |
| X_e | ($=X_E$), ($=X_m$) maapiirin reaktanssi |
| $X_{\acute{e}}$ | maapiirin reaktanssi [Ω/km] |
| Z_0 | nollaverkon impedanssi |
| Z'_0 | kolmivaihejohdon nollaimpedanssi [Ω/km] |
| Z_1 | myötäverkon impedanssi |
| Z_u | ukkosjohtimen impedanssi |
| Z_{ab} | ukkosjohtimien ja kolmivaihejohdon keskinäinen impedanssi |
| Z_e | ($=Z_E$), ($=Z_m$) maapiirin impedanssi |
| $Z_{\acute{e}}$ | maapiirin impedanssi [Ω/km] |
| Z_k | ($=Z_L$), ($=Z_1$) myötäverkon impedanssi |
| Z_{johto} | johtimen impedanssi |
| U_2 | mitattavaan johtoon indusoitunut jännite |
| U_{est} | arvioitu jännite |
| y_s | pintavaikutusilmiötä eli virranahtoa kuvaava tekijä |
| y_p | lähivaikutusilmiötä kuvaava tekijä |

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tavoitteena on antaa selkeä, käsikirjan omainen kokonaiskuva suurjännite- ja keskijännitejohtojen impedanssimittauksista. Työssä perehdytään impedanssimittausten kannalta oleellisiin teoreettisiin taustatietoihin, mm. distanssireleen toimintaperiaatteeseen ja maavirran käyttäytymiseen. Insinööriyön toisena tavoitteena on analysoida laskettuja myötä-, ja nollaverkon impedansseja vertaamalla niitä vastaaviin vuosina 2004 - 2014 mitattuihin impedansseihin. Analysoinnin tavoitteena on osoittaa, että impedanssimittaukset ovat tarpeellisia.

Tässä työssä esitetyt mittaustulokset ja käyttökokemukset on saatu Siemens Osakeyhtiön hankkimilla mittalaitteilla. Yhtiö on tarjonnut suurjännite- ja keskijännitejohtojen impedanssimittauksia palveluna jo yli 10 vuoden ajan. Patentoidut mittalaitteet on suunnitellut ja valmistanut Itävaltalainen Omicron electronics GmbH, jota Suomessa edustaa Siemens Osakeyhtiö.

Tässä työssä käytetyn mittalaitteen mittauseriaate perustuu taajuusselektiiviseen menetelmään. Mittalaitteen tarkkuus ja käytettävyys ovat paremmat kuin perinteisessä Voltti-Ampeeri-mittari-menetelmässä. Perinteisessä menetelmässä tarvitaan suuritehoista varavoimakonetta vähintään 50 A:n mittausrvirran syöttämiseksi. Taajuusselektiivisessä menetelmässä tavallinen maadoitettu 230 Vac pistorasia 16 A:n sulakkeella riittää. Myös mittaustulosten käsittely on helppoa, sillä kaikki mittaukset tallennetaan mittalaitteen muistiin. Mittaustuloksia jatko käsitellään erikseen tietokoneella ja lopulliset tulokset saadaan lähes automaattisesti.

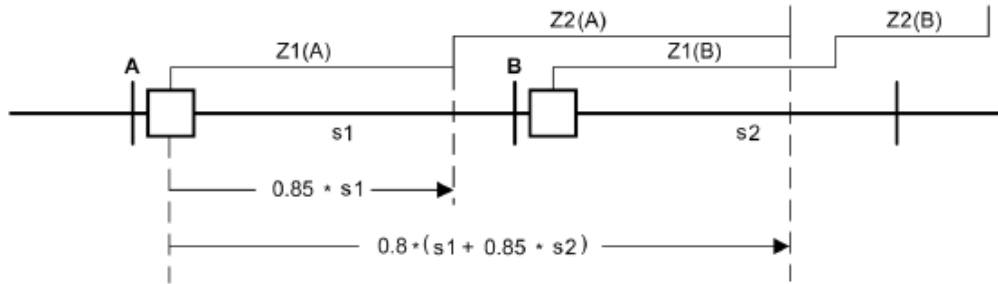
2 Distanssireleet

Distanssireleitä käytetään 400 kV:n siirtoverkossa normaali tilanteissa pääsuojina. 220 kV:n ja 110 kV:n siirtoverkoissa pääsuoja voi olla joko distanssirele tai ylivirtarele. Distanssirele on johdon ja verkon suojauksen kannalta tärkein rele. Distanssireleet ovat monipuolisuutensa vuoksi vaativia releitä ottaa käyttöön, joka ilmenee mm. releen asetteluiden suurena määränä.

2.1 Mittausperiaate

Yksinkertaisimmillaan distanssirele määrittää vikaimpedanssin mitatusta vikajännitteestä ja -virrasta, releen sijoituspisteestä katsottuna. Mitattua vikaimpedanssia verrataan releeseen ennalta aseteltuun johdon ominaisimpedanssiin. Mikäli mitattu vikaimpedanssi on johdon impedanssia pienempi, distanssirele antaa laukaisukäskyn johdon katkaisijalle ilman hidastusta. Käytännössä distanssireleet eivät ole aivan näin yksinkertaisia, vaan luotettavan toiminnan saavuttamiseksi perusmittausperiaatteen ympärille tarvitaan monia luotettavuutta parantavia toimintoja ja asetteluja.

Etäisyyden mittaustarkeus riippuu virtamuuntajien tarkkuudesta sekä ennalta määritetyn impedanssiarvon tarkkuudesta, joka useissa tapauksissa perustuu laskettuihin eikä mitattuihin arvoihin. Paremman virtamuuntajatarkkuuden saavuttamiseksi Suomen kantaverkossa käytetään aina ns. lineaarisoituja (saadaan aikaan ilmavälillä) virtamuuntajia, jolloin tarkkuusraja-kerroin nousee jopa arvoon 500. Virtamuuntajien lineaarisoinnilla voidaan kyllästymisen aiheuttamia haittoja vähentää. Edellä mainituista syistä distanssireleelle joudutaan asettelemaan ns. *turvamarginaali*, joka on yleensä 15 % koko johdon pituudesta. Puhutaan vyöhykeulottumista, joita siirtoverkossa on käytössä kolme. Ensimmäisen vyöhykkeen aliulottumaksi (turvamarginaali) asetellaan yleensä asetteluarvo $X_L \times 0,85$ (ks. seur. s., kuva 1). Seuraava vyöhyke on ns. *yliulottuva*, joka selektiivisyyden varmistamiseksi on oltava aikahidastettu vasta-aseman releen asetukseen sovitettuna. [1; 2; 3, s. 20.]



Kuva 1. Ulottuman asettelut esimerkkinä distanssireleelle A [2, s. 101]

Distanssisuojaus ei välttämättä vaadi yhteyttä vasta-asemien releisiin. Mikäli halutaan parantaa suojauksen luotettavuutta ja selektiivisyyttä entisestään, johdon molemmissa päissä olevilta distanssireleiltä on rakennettava nopea viestiyhteys releiden välille. Näin toimimalla aikaansaadaan erittäin luotettava, nopea ja selektiivinen laukaisu. Joissakin poikkeustapauksissa, esimerkiksi silloin, kun johto on lyhyt ($0 \dots 5 \Omega$), voi olla järkevämpää käyttää viestiyhteyksiin perustuvaa suojausta. Nykyaikaisilla numeerisilla distanssireleillä voidaan teoriassa suojata jopa alle 200 m:n pituisia johtoja ja kaapeleita. Näin lyhyillä johdoilla impedanssimittaus on välttämätöntä, jotta suojaus voisi toimia luotettavasti. Distanssireleen etuna voidaan pitää sitä, että se näkee myös takana olevat viat, johon taas esimerkiksi johtovertosuoja ei sovellu. [3, s. 213 - 214.]

2.2 Vikasilmukat

Mahdollisia vikasilmukoita on kuusi $L1-E$, $L2-E$, $L3-E$, $L1-L2$, $L2-L3$ ja $L3-L1$. Numeerisia suojareleitä käytettäessä jokaiselle silmukalle on varattu oma mittausjärjestelmä. Kaikki mittausjärjestelmät toimivat keskenään rinnakkain. [2, s. 72.]

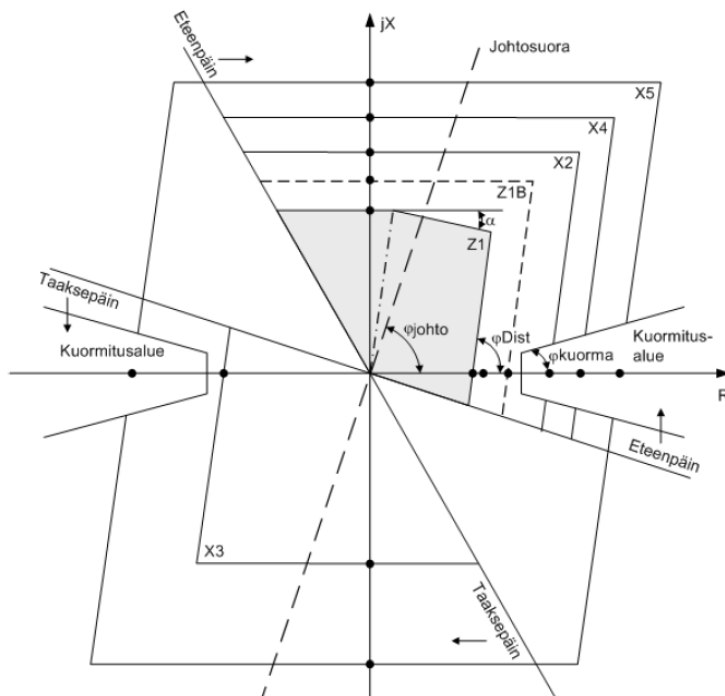
2.3 Suojausvyöhykkeet ja monikulmio impedanssikuvaaja

Numeeriset releet mahdollistavat monikulmio vyöhyke asettelun. Perinteisissä releissä tämä ei ollut mahdollista. Monikulmio vyöhykeasettelun etuna on, että reaktanssi- ja resistanssiasettelut voidaan määrittää itsenäisesti. Johdon suurin kuormitusvirta määrää resistanssiasettelun maksimiarvon.

Jokaiselle vikasilmukalle on käytävissä viisi toisistaan riippumatonta vyöhykettä ja lisäksi yksi ohjattu vyöhyke. Kuvassa 2 on esimerkki monikulmion havahtumiskoordinaatistosta. Ensimmäinen vyöhyke Z_1 on tummennettu ja eteenpäin suunnattu. Kolmas vyöhyke X_3 on suunnattu taaksepäin.

Monikulmio on määritelty yleisesti samansuuntaisten R - ja X -akseleiden avulla ja kääntökulmalla ϕ_{Dist} . Parametrien R_{Kuorma} ja ϕ_{Kuorma} avulla voidaan monikulmiosta leikata alue kuormitusimpedanssin huomioimista varten. Akselit voidaan määrittellä kullekin vyöhykkeelle toisistaan riippumattomasti; ϕ_{Dist} , R_{Kuorma} ja ϕ_{Kuorma} ovat kaikille vyöhykkeille yhteisiä. Monikulmio on symmetrinen R - X -koordinaattijärjestelmässä, mutta se on rajattu suuntasuoralla eri neljänneksiin. R -akseli voidaan määrittellä vaihe-vaihe-violla ja vaihe-maa-violla toisistaan riippumattomasti, jolloin maasulkuvioille voidaan sallia suurempi resistanssi-reservi (ks. kuva 2).

Vyöhykkeellä Z_1 on lisäksi lohko α , jonka avulla voidaan estää yliulottuminen tilanteissa, jotka aiheutuvat kulmatoleransseista ja/tai kahdesta suunnasta syötetyillä oikosuluilla, joissa on vikaresistanssia. Vyöhykkeillä Z_{1B} ja sitä suuremmilla vyöhykkeillä ei tätä leikkausta ole (ks. kuva 2). [2.]



Kuva 2. Monikulmio-ominaisuuskäyrä [2, s.95]

2.4 Maasulkuimpedanssisuhde

Myötä- ja nollaverkon resistanssit ja reaktanssit voivat poiketa toisistaan hyvin paljon. Jotta distanssirele voisi laskea vikatilanteessa vikapaikan etäisyyden oikein, pitää suojattavan johdon maasulkuimpedanssisuhde asetella distanssireleelle.

Niin sanotun k -kertoimen laskemiseksi on kehitetty monia eri laskentatapoja relevalmistajasta ja relesukupolvesta riippuen. Nykyaikaisissa numeerisissa suoja-releissä suositetaan menetelmää, jossa kompleksiset impedanssit Z_E ja Z_L on hajoitettu reaali- ja imaginääriosiin ja määrittämällä osien väliset resistanssi- ja reaktanssisuhteet erikseen (yhtälöt 1 ja 2).

$$\frac{R_E}{R_L} = \frac{1}{3} \cdot \left[\frac{R_0}{R_1} - 1 \right] \quad ja \quad \frac{X_E}{X_L} = \frac{1}{3} \cdot \left[\frac{X_0}{X_1} - 1 \right] \quad (1; 2)$$

jossa

| | |
|-------|---------------------------|
| R_0 | = nollaverkon resistanssi |
| X_0 | = nollaverkon reaktanssi |
| R_1 | = myötäverkon resistanssi |
| X_1 | = myötäverkon reaktanssi. |

Käytettäessä resistanssisuhdetta R_E/R_L ja reaktanssisuhdetta X_E/X_L , lasketaan maaimpedanssisuhteet erikseen, eivätkä ne enää vastaa Z_E/Z_L suureen reaali- ja imaginääri-komponentteja. Menetelmän ansiosta vältetään kompleksiselta laskennalta.

Toinen k -kertoimen asettelutapa on käyttää kompleksista maasulkukerrointa k_0 . Tässä menetelmässä maasulkuimpedanssin sovitusta tehdään yhtälön 3 mukaisesti kompensointiosoitimen ja kulman avulla: [2, s. 51; 4., s. 43.]

$$k_0 = \frac{Z_E}{Z_L} = \frac{1}{3} \cdot \left[\frac{Z_0}{Z_1} - 1 \right] \quad (3)$$

jossa

| | |
|-------|---------------------------|
| Z_0 | = nollaverkon impedanssi |
| Z_1 | = myötäverkon impedanssi. |

Menetelmässä joudutaan käyttämään kompleksista laskentaa ja kulmaa määritettäessä on lisäksi selvitettävä kulman neljännes sekä valittava oikea kulman laskutapa sen perusteella. [2, s. 52 – 53.]

Edellä esitellyistä menetelmistä ensimmäinen on selkeästi yksinkertaisempi tapa määrittää maasulkuiмпedanssin sovitus. Tässä työssä käytetyn taajuusselektiivisen impedanssimittausmenetelmän tuloksena saadaan kertoimet automaattisesti molemmille menetelmille.

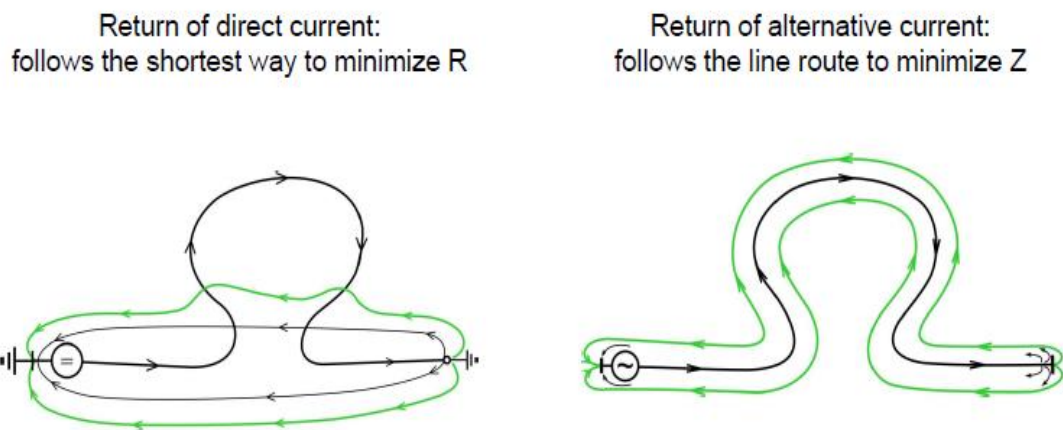
3 Maasulkuvirran käyttäytyminen

Yhdysvaltalainen sähköinsinööri John R. Carson ja Itävaltalainen matemaatikko F. Pollaczek tutkivat 1920-luvulla toisistaan riippumatta virranjakoa maassa. He onnistuivat johtamaan yhtälöt virran jakautumiselle maan pinnalla eri etäisyydellä johdosta. Carson julkaisi tutkimuksistaan artikkelin *Bell System Technical Journal* lehdessä vuonna 1926, jossa esitellään menetelmät avojohdon käyttöimpedanssin ja keskinäisimpedanssin laskemiseksi ottamalla huomioon maaperä virran paluutienä. Menetelmää voidaan soveltaa myös maahan asennetuille kaapeleille. Alan kirjallisuudessa ja artikkeleissa viitataan usein juuri Carsonin tekemiin havaintoihin ja yhtälöihin. Pollaczek julkaisi oman artikkelinsa saksankielisenä *Elektrische Nachrichtentechnik* lehdessä vuonna 1926. Hänen johtama yhtälö kahden johtimen väliselle keskinäisimpedanssille sisältää Carsonin yhtälön tapaan myös integraaliosan, josta käytetään yleisesti nimitystä *Pollaczekin integraali*.

Johdetut yhtälöt ovat hyvin monimutkaisia ja käytännön sovellukissa tyydytäänkin usein yksinkertaistettuihin menetelmiin. Teorian perusolettamus on, että tarkasteltava maa on ääretön, yhtenäinen ja homogeeninen sekä tasainen pinta, jonka ominaisresistanssi on vakio. Käytännössä maaperän resistiivisyys ei ole sen heterogeenisen luonteen takia koskaan vakio, joten käytännön laskelmissa päästään vain likimääräiseen tarkkuuteen. Carsonin johtamista yhtälöistä selviää, että verkon nimellistaajuudella 50 Hz maavirta jakautuu maassa siten, että sen kohtaama maapiirin resistanssi R_m on noin $0,050 \Omega/\text{km}$ (ks. s. 8, yhtälö 4). Väljän diplomityössä [5, s. 9] todetaan, että maapiirin resistanssin R_m tarkka arvo vaihtelee tyypillisesti välillä $\pm 10 \%$ maan ominaisresistiivisyyden ρ_m todella pienillä ja suurilla arvoilla. [6; 7, s. 81, 84-85; 8.]

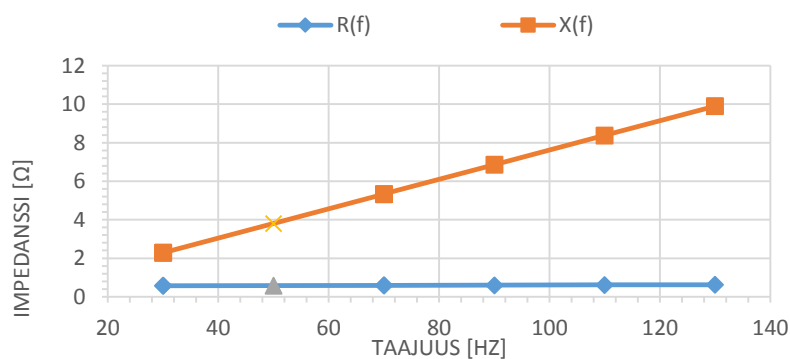
3.1 Maasulkuvirran jakautuminen

Maasulkuvirta jakaantuu maassa niin, että nolapiirin impedanssi saavuttaa miniminsä. Täydellisessä johteessa maasulkuvirta kulkisi tiiviisti maan pinnassa johdon alapuolella. Todellisessa maassa maasulkuvirta leviää laajemmalle alas sekä sivuille, koska piirin maosan resistanssi silloin pienenee. Samalla kuitenkin nolapiiri levenee ja sen induktanssi ja reaktanssi suurenevat. Nollaimpedanssin minimiä vastaa maan resistiivisyyden ja taajuuden määräämä maasulkuvirran jakauma, joka resistiivisyyden kasvaessa laajenee ja taajuuden kasvaessa supistuu. Kun kysymyksessä on vaihtosähköpiirin maasulku, maassa kulkeva maasulkuvirta seuraa syöttävän voimajohdon kulkureittiä hyvin tarkasti (ks. kuva 3). [8, s. 6; 9, s. 234.]



Kuva 3. Tasavirta kulkee maassa lyhintä reittiä pyrkiessään vastuksen minimiin (kuva vasemmalla). Vaihtovirta seuraa hyvin tarkasti johdon kulkureittiä (kuva oikealla) [8]

Kuvasta 4 havaitaan selvästi reaktanssin lineaarinen kasvu mittaustaajuuden funktiona:



Kuva 4. Impedanssimittaus vaiheen L1 ja maan väliltä taajuuden funktiona (30 - 130 Hz)

3.2 Maapiirin resistanssi

Maapiirin resistanssi R_m voidaan laskea maan heterogeenisyyden takia ainoastaan likimääräisesti yhtälöstä 4 (ks. ed. s.):

$$R_m \approx \frac{\omega \mu_0}{8} s \quad (4)$$

jossa

μ_0 = ilman permeabiliteetti $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m

s = johdon pituus.

Maavirran ekvivalenttisyvyys H voidaan ratkaista yhtälöllä 5. Suomen maaperässä, jonka resistiivisyyden keskiarvoksi arvioidaan $\rho_m \approx 2\,300 \, \Omega\text{m}$ on maavirran ekvivalenttisyvyys H verkon nimellistaajuudella on noin 4 470 m. [8, s. 10; 9, s. 234 – 235.]

$$H \approx 658 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (5)$$

Koska maavirta tunkeutuu Suomen maaperässä näin syväälle sekä laajalle alueelle, pelkkä maan pintakerroksen ominaisresistiivisyyden tunteminen ei riitä luotettavien likiarvojen laskemiseksi. Laskenta algoritmeissä on huomioitava myös syvempien kerrostumien resistiivisyysarvot. Yhtälö 5 pätee kun maaperä on homogeeninen ja kun virran maassa kulkema matka on pitkä. Tässä työssä tutkitun pisimmän johdon pituus on 13 km, jota voidaan pitää lyhyenä (ks. liite 1). [5, s. 10; 10, s. 452; 11, s. 6.]

Suomen heikkojen maadoitusolosuhteiden takia maaimpedanssin laskeminen tarkasti edellä kuvattujen tietojen perusteella pelkästään laskemalla on hyvin vaikeaa. Taajamissa maaimpedanssiin vaikuttaa myös maaperässä olevat johtavat rakenteet.

3.3 Reduktiovaikutus

Suurjännitevoimajohdot on yleensä suojattu salaman iskujen ja niiden aiheuttamien korkeiden syöksyjännitteiden varalta ukkosjohtimilla. Maasulkutilanteissa ukkosjohtimet otavat vastaan osan maasulkuvirrasta, jolloin osa maan kautta palaavasta virrasta kulkee ukkosjohtimien kautta. Samalla maasulkuvirran vaara- ja häiriövaikutukset pienenevät, puhutaan reduktiovaikutuksesta. Reduktiovaikutusta käsitellään standardissa CENELEC HD637 S: 1999, *Power installations exceeding 1 kV a.c.*, jonka suomalainen vastine on SFS 6001+A1+S2 *Suurjännitesähköasennukset*. Reduktiovaikutuksen suuruuteen voidaan vaikuttaa ukkosjohtimien määrällä ja ukkosjohtimen materiaalin valinnalla. Keskijänniteavojohdoilla ukkosjohtimien käyttöä rajoittavat Suomen heikot maadoitusolosuhteet. [10, s. 32; 12; 14, s. 224.]

Reduktiovaikutusta voidaan arvioida reduktiokerroimen k_s avulla. Ukkosjohtimen reduktiokerroin voidaan laskea yhtälöllä 6: [5, s. 22.]

$$k_s = \frac{R_u + j \cdot (X_u + X_m)}{R_m + R_u + j \cdot X_u} \quad (6)$$

Maapiirin resistanssi R_m laskettiin yhtälöllä 4 (ks. ed. s.). Ukkosjohtimen tasavirtaresistanssi R_u saadaan johdinvalmistajien taulukoista. Reaktanssit X_u ja X_m (ks. 4.1.2). Reduktiovaikutus on mahdollista mitata tarkasti tässä työssä esitellyllä ja käytetyllä mittauslaitteistolla. Mittauksessa mitattavaan johtoon, joka on maadoitettu vastapäätä, syötetään esimerkiksi 75 Hz taajuinen 20 A:n virta. Ukkosjohtimen kautta palaava virta mitataan johdon alkupäässä portaalin ukkosjohtimen maadoituksesta taajuusselektiivisen virtamittarin avulla. Reduktiokerroin saadaan yhtälöllä 7: [4. s. 58.]

$$k_s = 1 - \frac{I_{u(f)}}{I_{syöttö(f)}} \quad (7)$$

jossa

- k_s = reduktiokerroin (0,01–1)
- $I_{u(f)}$ = ukkosjohtimen maadoituksesta mitattu virta ($f \neq 50$ Hz)
- $I_{syöttö(f)}$ = koestuslaitteen syöttämä virta ($f \neq 50$ Hz).

Erilaisille ukkosjohtimilla varustetuille johtopylväille löytyy kirjallisuudesta valmiita suuntaa antavia reduktiokertoimia. Reduktiokertoimet vaihtelevat ukkosjohtimen materiaalin, lukumäärän ja pylvään rakenteen perusteella tyypillisesti välillä 0,20 - 0,96. Mitä pienempi reduktiokertoimen arvo on, sitä suurempi on reduktiovaikutus. Johdon nollaimpe-danssin laskennan sekä pienen reduktiokertoimen kannalta portaali pylväät ovat parempia, sillä niissä reduktiokertoimen vaihteluväli ukkos- ja vaihejohtimen välisen edullisemman geometrian takia on pienempi.

Suurjännitekaapeleiden vaipalla on reduktio-ominaisuus. Jos kosketussuoja on maadoitettu molemmista päistä, maasulkutilanteessa kosketussuojaan indusoitunut virta kiertää maan ja vaipan kautta. Myös suurjännitekaapelin mahdollisella lisämaadoituksella on reduktio-ominaisuus. Muita reduktioon vaikuttavia tekijöitä ovat maaperään asennetut johtavat rakenteet, kuten putkistot, maadoitusverkot ja johtimet sekä rautatiekiskot. [5, s. 23, 27–28; 10, s. 327.]

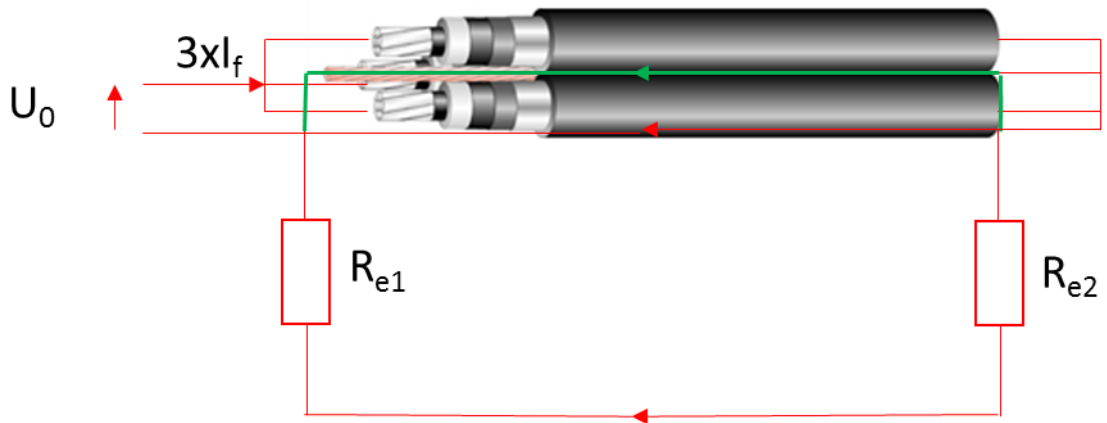
3.3.1 Avojohto ukkosjohtimilla

Suurjänniteavojohdon ukkosjohtimet on maadoitettu johtopylväissä, joissa maadoitetaan myös eristinten kiinnitysorret ja muut metalliosat. Reduktion vaikutuksesta virta siirtyy ukkosjohtimiin indusoitumalla. Pylväällä tapahtuvassa maasulussa maasulkuvirrasta osa siirtyy ukkosjohtimiin myös johtumalla. Reduktiovaikutuksen voidaan katsoa olevan yksi induktiivisen kytkeytymisen ilmenemismuoto (ks. 8.1.2 *Induktiivinen kytkeytyminen*). [5, s. 21; 10, s. 441.]

3.3.2 Suurjännite- ja keskijännitekaapelit

Suurjännitekaapelien reduktiokertoimet voivat olla kaapelin rakenteesta ja asennustavasta riippuen merkittävän pieniä, luokkaa 0,05 – 0,15. Maasulkuvirta jakaantuu maan ja kaapelin vaipan välillä reduktiokertoimen mukaisesti. [5. 26 – 27.]

Pekkala [16, s. 32] on selvittänyt diplomityössään keskijänniteverkon kaapelointiin liittyviä haasteita maaseutuverkossa. Yksi käsiteltävistä ongelmista liittyi keskijännitekaapelin nollaverkon impedanssin laskentaan. Kuva 5 (ks. seur. s.) selvittää maasulkuvirran mahdollisia paluuteitä kaapelissa.



Kuva 5. Keskijännitekaapelin maasulkuvirran paluureitti (AHXAMK-W) [16, s. 32]

Kuten kuvasta 5 nähtiin, maasulkuvirrat kulkevat reduktion vaikutuksesta sekä kaapelin kosketussuojaa että maata pitkin. Mikäli kaapelilla on lisäksi erillinen maadoitusjohdin, kulkisi maasulkuvirta myös sitä pitkin. Kaikki edellä esitetyt maasulkuvirran paluureitit vaikuttavat kaapelin ominais- ja keskinäisimpedansseihin sekä nolaimpedanssiin. Pekkalan selvitystyössä esiteltiin seuraava yhtälö kolmivaiheisen keskijännitekaapelin nolaimpedanssin laskemiseksi: [16, s. 19.]

$$Z_0 = l \left(R_c + 3 \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_s}{\sqrt[3]{r_c^l \cdot d^2}} \right) + \frac{3lR_s \left[R_{e1} + R_{e2} + l \left(R_g + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{r_s} \right) \right]}{R_{e1} + R_{e2} + l \left(R_s + R_g + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{r_s} \right)} \quad (8)$$

Yhtälö 8 pohjautuu perus rakenteeltaan (geometrinen osa) kirjallisuudessa ja tieteellisissä artikkeleissa usein viitattuun Carsonin yhtälöihin. Yhtälössä on otettu huomioon kaapelin alku- ja loppupään maadoitusresistanssit. Yhtälö sisältää paljon muuttujia, joten oikeaan todelliseen arvoon pääseminen pelkästään laskemalla on vaikeaa. [3; 8.]

Tässä työssä esiteltävää impedanssimittauslaitteistoa on käytetty myös maaseutuverkossa olevan pitkän (> 20 km) 20 kV:n keskijännitekaapelin impedanssien mittaamiseen syksyllä 2013. Mitattujen tulosten vertailuun ei ole käytettävissä laskettuja arvoja.

4 Sähköjohdot

Sähköjohtoon kuuluu järjestelmästä riippuen kaksi tai useampia johtimia. Johdot, jotka ovat galvaanisesti yhteydessä keskenään ja joilla on sama nimellisjännite, muodostavat johtoverkon. Verkon sisällä johtojen solmupisteissä on jännitetasosta riippuen usein avo-kytkinlaitos, kaasueristeinen kytkinlaitos tai kojeisto. Impedanssimittauksissa tarkastellaan normaalisti kahden solmupisteen välistä johdon impedanssia. [9, s. 14.]

Johtoverkko voidaan jakaa käyttötarkoituksen mukaan siirto-, alue- ja jakeluverkkoihin. Siirtojohdoista käytetään myös nimitystä *Suomen kantaverkko*, jota hallinnoi Fingrid Oyj. Siirtojohtojen jännitetasot ovat 400, 220 ja 110 kV. Jakeluverkkoyhtiöillä on halussaan myös alueellisia 110 ja 45 kV:n johtoja ja niistä käytetään nimitystä *alueverkkojen johdot*. Jakeluverkot koostuvat pääosin alle keskijännitteestä ja 110 kV:n johdoista.

Avojohdot ovat tavallisimpia Suomessa käytettyjä sähkön siirtoon tarkoitettuja johtoja. Kaapeleita käytetään, mikäli avojohdon rakentaminen ei ole mahdollista, mm. tiheästi rakennetuilla kaupunkialueilla. Nyky-yhteiskunta on entistä riippuvaisempi sähköstä. Tämän seurauksena sähkönjakelun toimitusvarmuuteen on alettu kiinnittämään entistä enemmän huomioita. Toimitusvarmuutta voidaan parantaa monin eri keinoin, mm. jakeluverkon verkostoautomaatiota ja kaapelointiastetta lisäämällä. Taulukossa 1 näkyvät siirto-, alue- ja jakeluverkkojen käytössä olevat avojohdot Energiaviraston vuoden 2012 tilastoihin perustuen [19]:

Taulukko 1. Siirto-, alue- ja jakeluverkkojen asennetut avojohdot vuonna 2012 [19]

| <i>Verkko</i> | <i>400kV/km</i> | <i>220kV/km</i> | <i>110kV/km</i> | <i>1-70kV/km</i> |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Siirtoverkko | 4 608 | 2 557 | 7 453 | 0 |
| Alueverkot | 37 | 0 | 1 586 | 0 |
| Jakeluverkot | 0 | 0 | 6 483 | 120 638 |
| Yhteensä | 4 645 | 2 557 | 15 522 | 120 638 |

Taulukossa 2 (ks. seur. s.) näkyvät siirto-, alue- ja jakeluverkkojen käytössä olevat kaapelit Energiaviraston vuoden 2012 tilastoihin perustuen [19]:

Taulukko 2. Siirto-, alue- ja jakeluverkkojen asennetut kaapelit vuonna 2012 [19]

| <i>Verkko</i> | <i>400kV/km</i> | <i>220kV/km</i> | <i>110kV/km</i> | <i>1-70kV/km</i> |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Siirtoverkko | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Alueverkot | 0 | 0 | 21 | 0 |
| Jakeluverkot | 0 | 0 | 205 | 18 376 |
| Yhteensä | 0 | 0 | 226 | 18 376 |

Avoimet, päällystämättömistä johtimista rakennetut keskijänniteverkot ovat herkkiä ulkoisille häiriöille, joita voivat aiheuttaa mm. tuulen ja myrskyn seurauksena avojohtojen päälle kaatuneet puut ja raskas lumi. Kiristyneet toimitusvarmuusvaatimukset nostavat erityisesti maaseutuverkkojen kaapelointiastetta tulevana vuosina. Syksyllä 2013 astui voimaan uusi sähkömarkkinalaki, jonka keskeisenä tavoitteena on ohjata jakeluverkko-yhtiöitä investoimaan entistä luotettavampaan sähköverkkoon. Energiateollisuus ry kiitteyttää sähkömarkkinalain sisällön seuraavasti (Sähköverkkotoiminnan tulevaisuuden visio 2030) [20]:

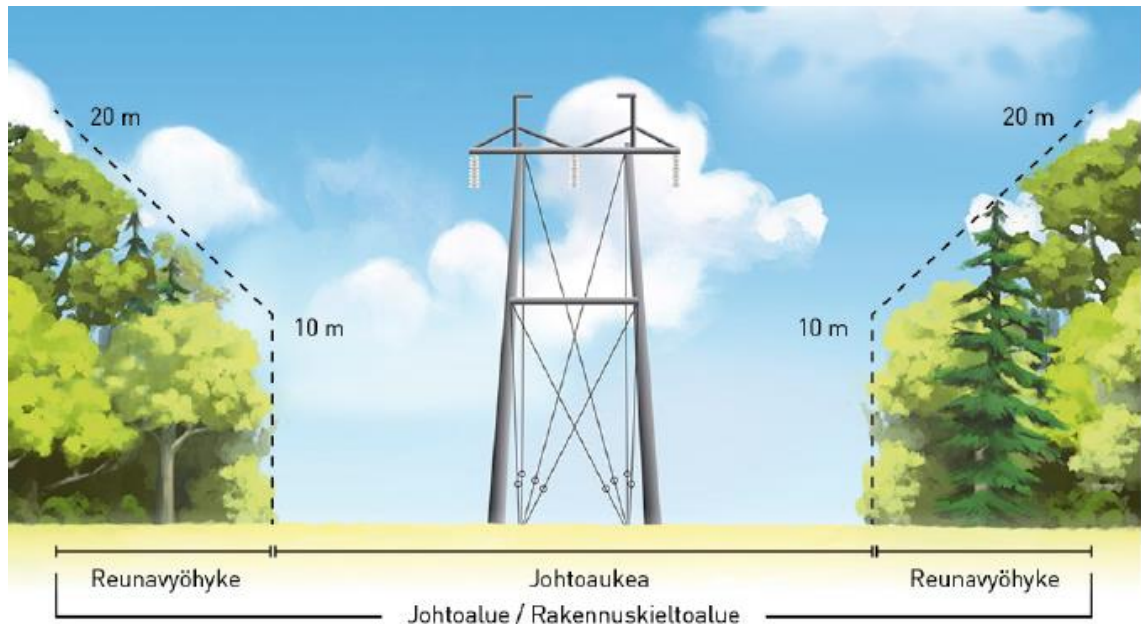
Jakeluverkko on suunniteltava, rakennettava ja sitä on ylläpidettävä siten, että jakeluverkon vioittuminen myrskyn tai lumikuorman seurauksena ei aiheuta tiettyjä poikkeuksia lukuun ottamatta asemakaava-alueella verkon käyttäjälle yli 6 tuntia kestävää ja muulla alueella yli 36 tuntia kestävää sähkönjakelun keskeytystä. [20.]

Jakeluverkkoyhtiöiden on täytettävä toimitusvarmuusvaatimukset 50 %:lla jakeluverkon asiakkaista vuoden 2019 loppuun mennessä, 75 % vuoden 2023 loppuun mennessä ja kaikilla käyttäjillä vuoteen 2028 mennessä, joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta.

Ylivoimaisesti suurin sähkönjakelun keskeytyksien aiheuttaja on tuuli ja myrskyt (69 %). Suurimmassa osassa tapauksista tehokkain keino tavoitteisiin pääsemiseksi onkin jakeluverkon kaapelointiasteen merkittävä lisääminen erityisesti maaseudulla ja taajama-alueilla, joissa avojohtot ovat yleisiä. Jakeluverkon kaapelointiasteen nostaminen saattaa lisätä impedanssimittauksien tarvetta myös keskijännitteellä. Toistaiseksi keskijännitekaapelien impedanssimittauksia on tehty tilauksesta ainoastaan tutkimuskäyttöön. [20.]

4.1 Suurjänniteavojohdot

Suurjännite avojohtoja käytetään siirto-, alue- ja jakeluverkoissa, kun jännitetaso on 110 kV tai suurempi. Suurjänniteavojohtojen johtokadut tarvitsevat paljon tilaa. Asutuskeskusten ulkopuolella käytetään lähes poikkeuksetta portaalirakenteisia harustettuja voimajohtoja jännitetasosta riippumatta (kuva 6).



Kuva 6. Tyypillinen avojohtolinjan portaalirakenne [21]

Johtoaukean leveydet jännitetasosta riippuen ovat

- 110 kV, noin 26 - 30 m
- 220 kV, noin 32 - 38 m
- 400 kV, noin 36 - 42 m.

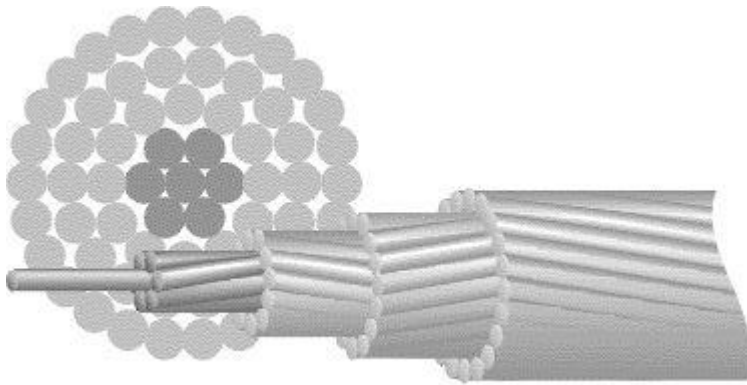
Reunavyöhykkeen leveys on johdon molemmin puolin 10 m ja aina yhteensä 20 m. [21.]

Lähempänä kaupunkialueita johtopylväät ovat usein vapaasti seisovia ns. *tannenbaum* pylväitä rajallisen tilan vuoksi. Vapaasti seisovissa johtopylväissä on usein myös rinnakkainen johto. Rinnakkaisen johdon vaikutus on otettava huomioon impedanssimittauksia tehdessä (ks. 8 *Työturvallisuus*). Johdon impedanssien ja symmetrian kannalta edullisin

johtimien sijoitustapa olisi kolmioasennus, mutta taloudellisista syistä johtimet on asennettu portaalipylväisiin rinnakkain. Asennustavasta johtuvaa johtimien keskinäistä epäsymmetriaa ja johdon kapasitanssin lisääntymistä ehkäistään johtimien vuorottelulla, siten että kaikki johtimet kulkevat keskellä yhtä pitkän matkan. [3, s. 174; 9; 10.]

4.1.1 Suurjännitejohdin

Suomessa suurjännitteellä käytetään yleisimmin teräsvahvisteisia alumiinijohtimia. Teräsvahvisteisten alumiinijohtimien (ACSR) lajit tunnetaan yleisesti niiden markkinointinimillä, jotka esitetään taulukossa 3 (ks. seur. s.). Kuvasta 7 selviää erään ACSR-johtimen fyysinen rakenne:



Kuva 7. Teräsvahvisteinen alumiinijohdin ACSR 305/39 Duck [22]

Suurjännite avojohdoissa on sekä taloudellisesti että teknisesti järkevää käyttää teräsvahvisteisia alumiinijohtimia. Alumiinijohtimien suurehko poikkipinta on koronahäviöiden ennalta ehkäisyn kannalta hyvä ominaisuus. Koronahäviöitä voidaan tarvittaessa minimoida käyttämällä nippujohtimia. Toinen teräsvahvisteisten alumiinijohtimien hyvä ominaisuus on vaihtovirran synnyttämän virranahdon vähäinen vaikutus johtimen resistanssiin alumiinin epämagneettisesta ominaisuudesta johtuen. [9, s. 25; 14, s. 134.]

Taulukkoon 3 (ks. seur. s.) on kerätty yleisimpiä Suomessa käytettyjä teräsvahvisteisia alumiinijohtimia. Liitteessä 3 esittää tarkempia tietoja tavallisimmista ACSR- ja AACSR-johtimista.

Taulukko 3. Teräsvahvisteiset alumiinijohtimet. Uj=ukkosjohdin, *) =erikoisluja

| <i>Laji</i> | <i>Tunnus</i> | <i>Nimitys</i> | <i>Tyypillinen käyttö</i> |
|-------------|---------------|----------------|---------------------------|
| ACSR | 34/6 | Sparrow | 1-70 kV |
| ACSR | 54/9 | Raven | 1-70 kV |
| ACSR | 85/14 | Pigeon | 1-70 kV |
| ACSR | 106/25 | Suursavo | 110 kV, Uj |
| ACSR | 148/67 | Kuopio | 110 kV |
| ACSR | 152/25 | Ostrich | 110 kV |
| ACSR | 243/39 | Hawk | 110 kV, Uj |
| ACSR | 305/39 | Duck | 110 kV |
| ACSR | 402/52 | Condor | 400 kV |
| ACSR | 565/72 | Finch | 400 kV |
| ACSR | 42/25 | Savo *) | Uj |
| ACSR | 89/52 | Dotterel *) | Uj |
| ACSR | 93/39 | Imatra *) | Uj |

4.1.2 Suurjänniteavojohdon impedanssien laskeminen

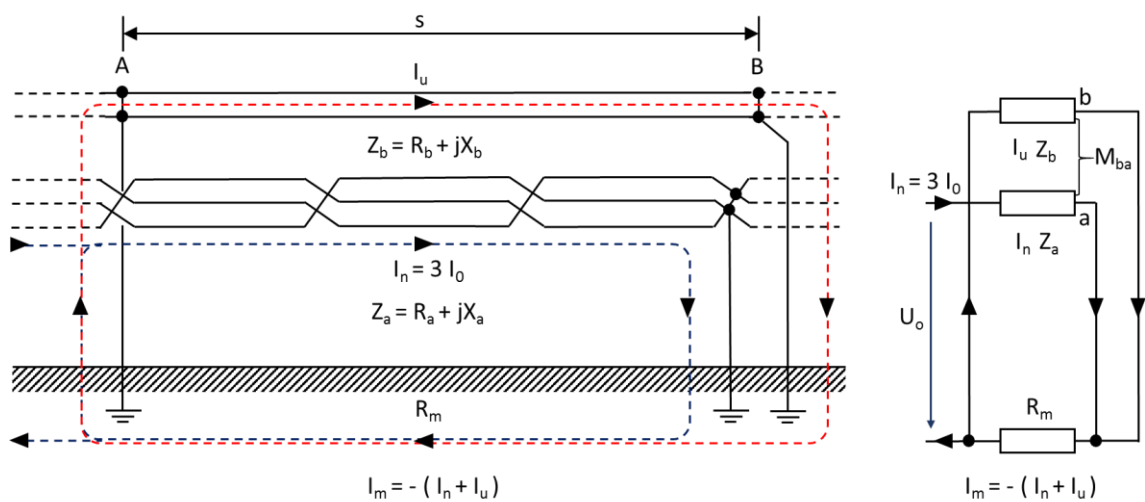
Suurjänniteavojohdon impedanssilaskut voidaan jakaa kahteen osaan: normaalitilaan (myötäverkko) ja vikatilaa (nollaverkko). Vastaverkon impedanssi oletetaan yleensä samaksi kuin myötäverkon impedanssi. Suurjänniteavojohdon impedanssien laskemiseksi tarvitaan tietoja avojohdon sähköisistä arvoista, fyysisestä rakenteesta, käytetyistä materiaaleista sekä maaperän ominaisuuksista.

Avojohtot sisältävät resistanssia, induktanssia, kapasitanssia ja konduktanssia tasaisesti johdon pituudelle jakaantuneena. Avojohtoilla induktanssi on pituusyksikköä kohden suurempi, sillä vaihejohtimet on asennettava etäälle toisistaan. Laskuissa on otettava huomioon johtimien välinen geometria ja johtimen tai nippujohtimen säde. Avojohtojen resistanssi riippuu pääasiassa käytetyn johdinmateriaalin ominaisresistanssista, käyttölämpötilasta, poikkipinnasta ja pituudesta. Ominaisresistanssi pituusyksikköä kohden saadaan johtimen valmistajan taulukoista (tasavirtaresistanssi Ω/km).

Avojohtojen johtimien välinen väliaine on ilma. Käytännössä ilma on aina jonkin verran ionisoitunutta, joten eristeaineessa tapahtuu ns. vuotoa, aiheuttaen kapasitiivista vuotovastusta. Poikittaisadmittansseissa syntyvä vuotovastus on otettava huomioon 110 kV

suuremmilla jännitteillä. Suurjänniteavojohdoilla reaktanssi on huomattavasti suurempi kuin resistanssi, joka voidaan havaita myös tämän työn tuloksia vertaamalla (liite 1). [9; 14.]

Suurjänniteavojohdon myötaverkon laskennan perus oletus on, että vaihejohtimet vuorottelevat tasaisesti. Täysvuorottelua suositellaan 110 kV:n johdoille, kun johto on pidempi kuin 10 - 15 km. Edellä mainittua lyhyemmällä johdoilla vuorottelu pyritään järjestämään niin, että muista lähellä olevista johdoista aiheutuva epäsymmetria pienenee. Tässä työssä käytettyä impedanssimittauslaitteistoa voidaan käyttää myös johdon epäsymmetrian selvittämiseen ongelmatilanteissa (ks. 7.5 *Mittaustulosten käsittely*). Suurjänniteavojohdon nollaverkon impedanssin laskeminen tarkasti on vaikeaa, sillä laskeissa on otettava huomioon maapiirin resistiivisyys sekä ukkosjohtimien reduktiovaikutus. [9. s. 235; 10, s. 285]



Kuva 8. Suurjänniteavojohdon nollapiiri ja sijaiskytkentä ukkosjohtimilla [9, s. 236]

Kuva 8 esitti suurjänniteavojohdot, jossa on ukkosjohtimet. Oikean tuloksen saamiseksi ukkosjohtimet on maadoitettu vuorottelujakson molemmista päistä. Kuvassa 8 Z_b esitti ukkosjohtimen oikosulkupiirin impedanssia ilman maapiirin resistanssia R_m ja vastavasti Z_a esitti nollapiirin impedanssia ilman maapiirin resistanssia R_m . Kuvan 8 sijaiskytkennästä nähtiin, että piirien välillä vaikuttaa keskinäisimpedanssi M_{ba} . [9. s. 236.]

Kuvan 8 (ks. ed. s.) mukaisen johtimen myötäimpedanssi voidaan laskea yhtälöllä:

$$Z'_1 = R_c + j \cdot \omega \cdot 10^{-4} \left(2 \cdot \ln \frac{A_e}{r_e} + \frac{\mu_1}{2 \cdot n} \right) [\Omega/km] \quad (9)$$

jossa

- R_c = johtimen resistanssi [Ω/km]
 A_e = johdinnipun geometria [m] (yhtälö 10)
 r_e = johdinnipun ekvivalenttisäde [m],
 tavallisessa johdossa vaihejohtimen säde
 n = johdinnipun osajohdinmäärä. [9, s. 230.]

Tarkastelevan johtimen resistanssi R_c ja halkaisija saadaan johdinvalmistajan taulukoista. Alumiinin ja kuparin suhteellinen permeabiliteetti $\mu_1 = 1$. Vaihejohtimien välinen geometria A_e voidaan ratkaista yhtälöllä:

$$A_e = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{23} \cdot a_{31}} [m] \quad (10)$$

jossa muuttujat a_{12} , a_{23} ja a_{31} ovat vaihejohtimien välisiä keskinäisiä etäisyyksiä.

Kuvan 8 (ks. ed. s.) mukaisen suurjänniteavojohdon nolлайmpedanssi, jossa on ukkosjohtimet, voidaan laskea yhtälöllä:

$$Z_0 = Z'_0 - \frac{3 \cdot Z_{ab}^2}{Z_u} \quad (11)$$

jossa

- Z'_0 = kolmivaihejohdon nolлайmpedanssi (ks. s. 24, yhtälö 16)
 Z_u = ukkosjohtimen impedanssi (ks. seur. s., yhtälö 13)
 Z_{ab} = ukkosjohtimien ja kolmivaihejohdon impedanssi (ks. seur. s., yhtälö 13);
 [9, s. 236.]

Ukkosjohtimen impedanssi Z_u saadaan yhtälöllä:

$$Z_u = \frac{R_u}{n_u} + R_m + j \cdot \omega \cdot 10^{-4} \left(2 \cdot \ln \frac{H}{r_u} + \frac{\mu_{ru}}{2 \cdot n_u} \right) [\Omega/km] \quad (12)$$

jossa

| | |
|------------|---|
| R_u | = yhden ukkosjohtimen resistanssi [Ω/km] |
| n_u | = ukkosjohtimien lukumäärä |
| R_m | = maapiirin resistanssi [Ω/km] (ks. s. 8, yhtälö 4) |
| H | = maavirran ekvivalenttisyvyys [m] (ks. s. 8, yhtälö 5) |
| r_u | = kaikki ukkosjohtimet käsittävän nipun ekvivalenttisyvyys [m] |
| μ_{ru} | = ukkosjohdinaineen suhteellinen permeabiliteetti. [9, s. 236.] |

Ukkosjohtimien ja kolmivaihejohdon impedanssi saadaan yhtälöllä 13. Yhtälön imaginääriosaa vastaa kolmivaihejohdon ja ukkosjohtimien välistä keskinäisinduktanssia $j \cdot \omega \cdot M_{ba}$.

$$Z_{ab} = R_m + j \cdot \omega \cdot 10^{-4} \left(2 \cdot \ln \frac{H}{b_e} \right) [\Omega/km] \quad (13)$$

jossa

| | |
|-------|---|
| H | = maavirran ekvivalenttisyvyys [m] (ks. s. 8, yhtälö 5) |
| b_e | = kolmivaihejohtimien ja ukkosjohtimien välinen ekvivalenttietäisyys [m] (ks. s. 24, yhtälö 15); [9, s. 237.] |

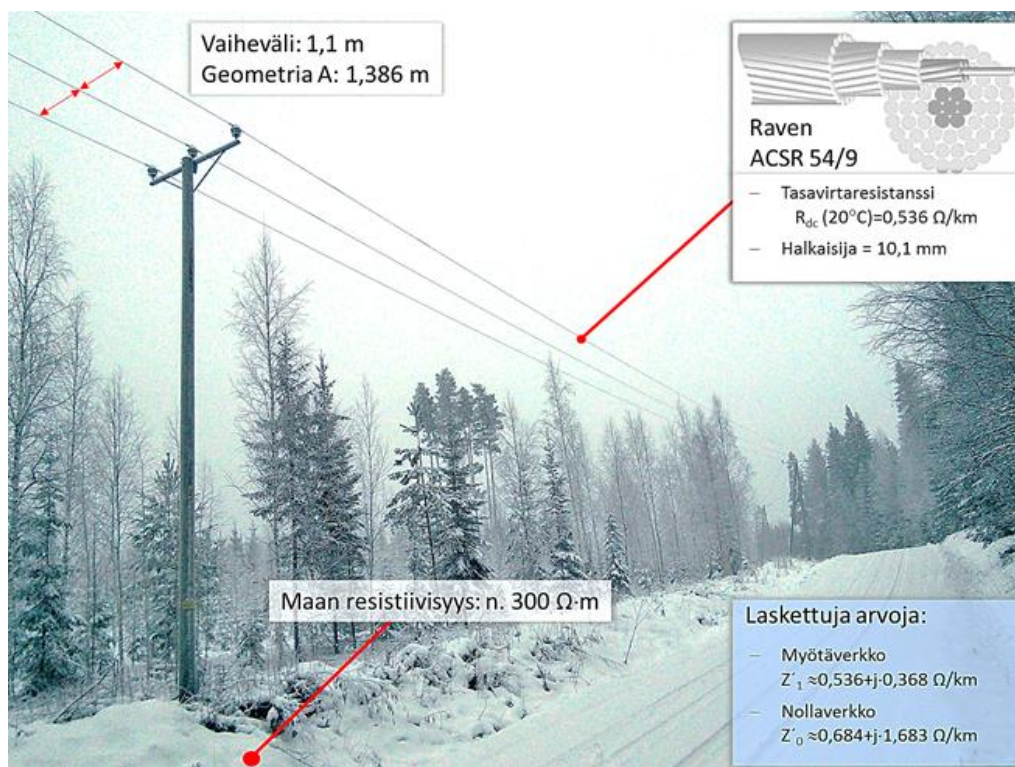
Edellä viitatus yhtälöt (ks. s. 22, yhtälöt 10 ja 15) johdon geometrian laskemiseksi pätevät kun kysymyksessä on esimerkiksi portaalirakenteinen johto, jossa vaihejohtimet on asennettu vaakatasoon. Pylväsrakenteisilla johdoilla geometrian laskeminen on hieman työläämpää. [9, s. 229.]

4.2 Keskijänniteavojohdot

Keskijänniteavojohtoja käytetään paljon taajamien ja maaseutujen jakeluverkoissa. Keskijänniteavojohdot on yleensä asennettu puupylväisiin. Keskijännitejohtoilla ei yleensä ole ukkosjohtimia, jota rajoittaa Suomen huonot maadoitusolosuhteet [14, s. 224]. Suurin osa edelleen käytössä olevasta keskijänniteverkosta on rakennettu 1950 - 1970 luvuilla. Verkoston uusiminen on juuri nyt ajankohtaista. Osa nykyisestä avojohtoverkosta tullaan siirtämään parempien kulkuyhteyksien varrelle, mm. maanteiden varsille. Samalla osa nykyisestä avojohtoverkosta korvataan kaapeleilla.

4.2.1 Keskijännitejohdin

Keskijännitejohtojen yleisin johdinmateriaali on seosalumiini (AlMgSi) tai teräsvahvistettu alumiini (ACSR). Myös puhtaasta alumiinista valmistettuja johtimia käytetään. Kuvassa 9 näkyy yleisesti käytetyn Raven ACSR 54/9 -johtimen sähköiset ominaisuudet tyypillisellä keskijänniteavojohton rakenteella (ks. liite 3).



Kuva 9. Keskijänniteavojohto. Raven ACSR 54/9 johtimen sähköiset ominaisuudet tyypillisessä johdinasennuksessa.

Nykyään rakennetaan keskijänniteverkkoja myös osittain eristetyillä PAS-johtimilla, jotka mahdollistavat tiiviimmän asennustavan ja parantavat jakeluverkon luotettavuutta. Eristetyt PAS-johtimet ovat ongelmallisia johdon suojauksen kannalta, joten niitä on käytettävä harkitusti, vaikka niiden käytölle ei enää ole rajoituksia. PAS-eristeisiä keskijännitejohtoja on rakennettu myös taajama-alueille. [10, s. 288.]

4.2.2 Keskijänniteavojohdon impedanssien laskeminen

Keskijänniteavojohdon impedanssit voidaan laskea samoilla periaatteilla kuin mitä suurjänniteavojohdoille on aikaisemmin esitetty. Koska keskijänniteavojohdoilla ei ole ukkosjohtimia voidaan reduktiovaikutus jättää huomioimatta. Keskijänniteavojohdoilla resistanssi pituusyksikköä kohden on yleensä suurempi kuin reaktanssi.

Kuvan 9 (ks. ed. s.) mukaisen johtimen myötäimpedanssi voidaan laskea yhtälöllä:

$$Z'_1 = R_c + j \cdot \omega \cdot 10^{-4} \left(2 \cdot \ln \frac{A}{r_c} + \frac{1}{2} \mu_1 \right) [\Omega/km] \quad (14)$$

jossa

| | |
|---------|--|
| R_c | = johtimen resistanssi [Ω/km] |
| A | = johdinnipun geometria [m] (yhtälö 15) |
| r_c | = johtimen ekvivalenttisäde [m] |
| μ_1 | = johdinmateriaalin suhteellinen permeabiliteetti. [3; 9.] |

Tarkastelevan johtimen resistanssi R_c ja halkaisija saadaan johdinvalmistajan taulukoista. Alumiinin ja kuparin suhteellinen permeabiliteetti $\mu_1 = 1$. Johtimien välinen geometria A voidaan ratkaista yhtälöllä:

$$A = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{23} \cdot a_{31}} [m] \quad (15)$$

jossa muuttujat a_{12} , a_{23} ja a_{31} ovat vaihejohtimien välisiä keskinäisiä etäisyyksiä. Kuvan 9 (ks. ed. s.) mukaisessa esimerkissä on oletettu, että vaihejohtimet on asennettu rinnakkain vaakatasoon.

Kuvan 9 (ks. s. 20) mukaisen keskijänniteavojohdon nolaimpedanssi ilman ukkosjohdinta voidaan laskea yhtälöllä:

$$Z'_0 = R_c + 3 \cdot R_m + j \cdot \omega \cdot 10^{-4} \left(6 \cdot \ln \frac{H}{\sqrt[3]{r_c \cdot A^2}} + \frac{1}{2} \mu_1 \right) [\Omega/km] \quad (16)$$

jossa

| | |
|---------|--|
| R_c | = johtimen resistanssi [Ω/km] |
| R_m | = maapiirin resistanssi [Ω/km] (ks. s. 8, yhtälö 4) |
| H | = maavirran ekvivalenttisyvyys [m] (ks. s. 8, yhtälö 5) |
| r_c | = johtimen ekvivalenttisäde [m] |
| A | = johdinnipun geometria [m] (ks. ed. s., yhtälö 15) |
| μ_1 | = johdinmateriaalin suhteellinen permeabiliteetti. [9; 3, s. 175.] |

Kuvassa 9 (ks. s. 20) esitettiin esimerkijohdolle lasketut myötä- ja nolaimpedanssit kilometriä kohden.

4.3 Suurjännitekaapelit

Suomessa suurjännitekaapeleita käytetään 110 kV:n jännitetasolle asti. Sitä suuremmille jännitteille Suomessa ei ole otettu käyttöön kaapeleita (ks. s. 13, taulukko 2). Tavallisimmat suurjännitekaapelit ovat yksijohtimisia alumiinikaapeleita poikkipinnaltaan joko 500, 800 tai 1 200 mm². Kuvassa 10 näkyy yksijohtimisen AHXCHBMK-W-kaapelin rakenne.



Kuva 10. 110 kV alumiinivoimakaapelin AHXCHBMK-W 1x800-35 ominaisuudet [23]

Taulukossa 4 esitetään 110 kV alumiinivoimakaapelin rakenteelliset ominaisuudet:

Taulukko 4. AHXCHBMK-W -alumiinivoimakaapelin rakenteelliset ominaisuudet [23]

| <i>Muuttuja</i> | <i>Selitys</i> |
|-------------------|---|
| Standardit | IEC 60840; CENELEC HD 632 |
| Johdin | Vesitiivis, kerrattu pyöreä alumiiniköysi |
| Erikoisominaisuus | Pitkittäin ja poikittain vesitiivis |
| Paloluokka | F1 |
| Johdinsuoja | Puolijohtava muovi |
| Eristys | PEX-muovi |
| Hohtosuoja | Puolijohtava muovi |
| Vesitiivistys | Puolijohtava vesitiiveysnauhoitus kosketussuojan alla ja päällä toimii pitkittäisenä vesisulkuna. Vaippaan kiinnitetty alumiinilaminaatti varmistaa poikittaisen vesitiiveyden. |
| Kosketussuoja | Kerros kuparilankoja ja kuparinauhasidos |
| Vaippa | Musta säänkestävä PE-muovi |
| Käsittely | - 20 °C |
| Käyttö | + 90 °C |
| Oikosulku | + 250 °C |

Taulukossa 5 esitetään alumiinivoimakaapelin tasavirta-, ja vaihtovirtaresistanssit eri poikkipinnoille:

Taulukko 5. AHXCHBMK-W Alumiinivoimakaapelin sähköiset ominaisuudet [21]

| Poikkipinta | Vaihejohtimen maksimi tasavirtaresistanssi, +20°C [Ω/km] | Vaihejohtimen vaihtovirtaresistanssi, 3 kaapelia kolmiossa +65°C [Ω/km] |
|-------------|--|---|
| 1 x 300/35 | 0,1000 | 0,1300 |
| 1 x 500/35 | 0,0605 | 0,0830 |
| 1 x 800/35 | 0,0367 | 0,0560 |
| 1 x 1200/35 | 0,0247 | 0,0430 |

Taulukossa 5 esitetyt tasavirtaresistanssit voidaan johtaa standardin IEC 60287-1-1 Ed. 2.0 *Electric cables - Calculation of the current rating - Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General* mukaan yhtälöllä [24]:

$$R_{dc} = \frac{1,02 \cdot 10^6 \cdot \rho_{20}}{s} \cdot (1 + \alpha_{20} (\theta - 20)) [\Omega/km] \quad (17)$$

jossa

| | |
|---------------|---|
| R_{dc} | = johtimen tasavirtaresistanssi lämpötilassa +20 °C [Ω/km] |
| ρ_{20} | = johdinmateriaalin resistiivisyys lämpötilassa +20 °C [$\Omega \cdot \text{km}$] |
| S | = johtimen poikkipinta-ala [mm^2] |
| α_{20} | = johdinmateriaalin resistiivisyyden lämpötilakerroin lämpötilassa +20 °C |
| θ | = johtimen käyttölämpötila [°C]. [24; 25; 26.] |

Taulukosta 5 (ks. ed. s.) havaittiin, että kaapelin vaihtosähköresistanssi on suurempi kuin tasasähköresistanssi. Tämä johtuu pintavaikutusilmiöstä (engl. *skin effect*) ja lähivaikutusilmiöstä (engl. *proximity effect*). Pintavaikutusilmiö johtuu virranahdosta. Lähivaikutuksella tarkoitetaan ilmiötä, jossa virtaa kuljettavan johtimen virrantiheyden jakauma muuttuu lähellä olevan toisen virrallisen johtimen aiheuttaman magneettikentän vuoksi. [26, s. 14.]

Suurjännitekaapelin impedanssien laskeminen

Suurjännitekaapelin myötä- ja nollaimpedanssien tarkka laskeminen on vaikeampaa kuin avojohdoilla, koska johtimet ovat lähellä toisiaan. Lisäksi kaapelin vaippaan indusoituu virtoja, jotka vaikuttavat impedanssiarvoihin ja häviöihin [10, s. 323].

Kaapelivalmistajien taulukoissa annetut arvot pätevät kun kaapelit on asennettu tasoon taikka kolmioon ja kun kosketussuoja on maadoitettu johdon molemmista päistä. Taulukosta 5 (ks. ed. s.) havaittiin, että vaihtosähköresistanssit lämpötilassa 65 °C ovat huomattavasti suuremmat kuin tasasähköresistanssit lämpötilassa 20 °C. Mittaustuloksia analysoitaessa havaittiin, että 110 kV:n alumiini AHXLMK-kaapelilla (800 mm²) myötäverkon resistanssi vaihtelee hyvin lähellä kaapelivalmistajien ilmoittamaa vaihtovirtaresistanssia 0,053 Ω/km (ks. s. 59, taulukko 13 ja liite 3). Arvojen vertailussa oletettiin, että kaapelit on asennettu kolmioon ja käyttölämpötilan ollessa 65°C.

Standardissa IEC 60287-1-1 Ed. 2.0 on määritetty yhtälöt kaapelin vaihtovirtaresistanssin ja reaktanssin laskemiseksi [24]. Vaihtovirtaresistanssi voidaan laskea yhtälöllä:

$$R_{ac} = R'_{dc} \cdot (1 + y_s + y_p) [\Omega/\text{km}] \quad (18)$$

jossa

R'_{dc} = johtimen tasavirtaresistanssi käyttölämpötilassa [Ω/km]
(ks. s. 23, yhtälö 17)

y_s = pintavaikutusilmiötä eli virranahtoa kuvaava tekijä

y_p = lähivaikutusilmiötä kuvaava tekijä. [24; 25; 26.]

Pinta- ja lähivaikutusilmiöitä kuvaavien yhtälöiden käyttö edellyttää kaapelin tarkkoja rakenne ja mittatietoja, joten niiden tarkempi esittely tässä yhteydessä on jätetty pois.

Myötaverkon reaktanssi voidaan laskea yhtälöllä:

$$X_c = 2\pi f \left[K + 0,2 \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot s'}{d_c} \right) \right] \cdot 10^{-3} [\Omega/\text{km}] \quad (19)$$

jossa

f = nimellistaajuus [Hz]

s' = vaihejohtimien keskipisteiden välinen etäisyys [mm]

d_c = johtimen halkaisija [mm]

K = johtimien säikeiden lukumäärästä riippuva vakio (liikiarvo = 0,05). [25.]

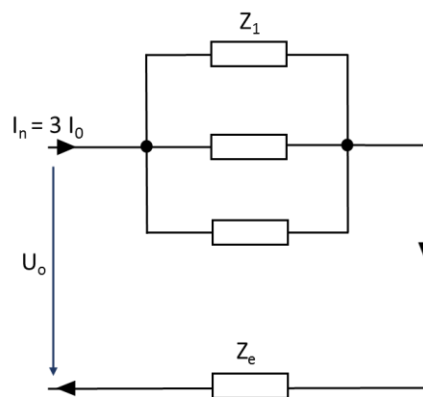
Kaapelin nollaimpedanssin laskeminen tarkasti on vaikeaa. Impedanssin suuruuteen vaikuttavat kaapelin rakenteen lisäksi mahdollinen erillinen maadoitusjohdin sekä muut maassa olevat johtavat rakenteet. Kaapelien nollaimpedanssien laskemiseksi on johdettu paljon laskentamenetelmiä, jotka perustuvat pääosin Carsonin ja Pollaczekin johtamiin hyvin monimutkaisiin yhtälöihin. Monista epävarmuustekijöistä johtuen kaapelin nollaimpedanssin laskumenetelmien tarkempi esittely jätetään tässä yhteydessä käsittelemättä. [10, s. 327.]

Uusiseelantilainen insinööri Ashok Parsotam (1997-2003) on julkaissut internetissä oppaan *Fundamentals of calculation of earth potential rise in the underground power distribution cable network*, jossa käsitellään laajasti niin kaapeleiden kuin avojohtojen myötä- ja nollaverkon impedanssien, sekä niiden yhdistelmien laskumenetelmiä käytännössä. William H. Kersting (2007) esittelee kirjassaan *Distribution System Modeling and Analysis* kehittyneempiä matriisimenetelmiä, jotka perustuvat Carsonin johtamiin yhtä-

löihin. Kirjassa esitetyt yhtälöt ovat työläitä käyttää ilman matemaattisia tietokoneohjelmia ja laskuvirheiden mahdollisuus ilman huolellista tapauskohtaista testausta on suuri. Käytännössä johdon nollaimpedanssi on varmintä mitata. [7; 10, s.327; 27.]

Kaapelin nollaimpedanssin sisältämä maapiirin resistanssi, reaktanssi ja impedanssi pituusyksikköä kohden voidaan ratkaista myös tässä työssä esitettyjen mittaustulosten perusteella (ks. 9.2.1 *Suurjännitekaapelin maapiirin impedanssi*).

Kuvassa 11 esitetään nollaimpedanssin määritelmä:



Kuva 11. Nollaimpedanssin määritelmä [4, s. 43]

Kuvan 11 perusteella nollaimpedanssi Z_0 voidaan ratkaista yhtälöllä:

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0} = Z_1 + 3 \cdot Z_e \quad (20)$$

Johdon, kaapelin tai niiden yhdistelmän maapiirin resistanssi R_e , reaktanssi X_e ja impedanssi Z_e voidaan mittaustulosten perusteella ratkaista yhtälöillä (21; 22 ja 23): [4, s. 43, 54.]

$$R_e = \frac{R_0 - R_k}{3} [\Omega], \quad R'_e = \frac{R_e}{s} [\Omega/km] \quad (21)$$

$$X_e = \frac{X_0 - X_k}{3} [\Omega], \quad X'_e = \frac{X_e}{s} [\Omega/km] \quad (22)$$

$$Z_e = \frac{Z_0 - Z_k}{3} [\Omega], \quad Z'_e = \frac{Z_e}{s} [\Omega/km] \quad (23)$$

Yhtälöissä käytetyt merkinnät poikkeavat lähteestä riippuen. Tässä yhteydessä on laskutoimitusten helpottamiseksi päätetty käyttää samoja merkintöjä kuin mittaustulosten yhteenvedossa ja koestuslaitteen valmistajan ohjeissa:

| | |
|-----------------------|--------------------------------|
| $R_k, (=R_L), (=R_1)$ | = myötäverkon resistanssi |
| $X_k, (=X_L), (=X_1)$ | = myötäverkon reaktanssi |
| $Z_k, (=Z_L), (=Z_1)$ | = myötäverkon impedanssi |
| $R_e, (=R_E), (=R_m)$ | = maapiirin resistanssi |
| $X_e, (=X_E), (=X_m)$ | = maapiirin reaktanssi |
| $Z_e, (=Z_E), (=Z_m)$ | = maapiirin impedanssi |
| s | = johdon/kaapelin pituus [km]. |

4.4 Keskijännitekaapelit

Nykyisin yleinen maahan ja ilmaan asennettava alumiininen keskijännitekaapeli on rakenteeltaan kolmivaiheinen ja kierretty maadoitusjohtimen ympärille (ks. kuva 12).



Kuva 12. 12/20 (24) kV alumiinivoimakaapelin AHXAMK-W rakenne [28]

Taulukossa 6 esitetään (ks. seur. s.) kaapelin rakenteelliset ominaisuudet:

Taulukko 6. AHXAMK-W Alumiinivoimakaapelin rakenteelliset ominaisuudet [28]

| <i>Muuttuja</i> | <i>Selitys</i> |
|------------------------|--|
| Standardit | SFS 5636; HD 620 S2:2010 Part 10 Section F |
| Johdin | Vesitiivis, pyöreä alumiiniköysi |
| Erikoisominaisuus | Pitkittäin ja poikittain vesitiivis |
| Paloluokka | F1 |
| Johdinsuoja | Puolijohtava muovi |
| Eristys | PEX-muovi |
| Hohtosuoja | Puolijohtava muovi |
| Vesitiivistys | Puolijohtava nauha, joka paisuu veden vaikutuksesta ja muodostaa esteen veden pitkittäiselle etenemiselle. |
| Kosketussuoja | Alumiini-muovilaminaatti, joka toimii myös vesitiivistyksenä poikittais-suunnassa |
| Vaihevaippa | Musta säänkestävä PE-muovi |
| Keskusköysi | Pyöreä kupariköysi |
| Kertaus | Kolme vaipattua vaihejohtinta on kerrattu keskusköyden ympärille |
| Käsittely | -20 °C |
| Käyttö | +90 °C |
| Oikosulku | +250 °C |

Taulukossa 7 esitetään keskijännitteelle tarkoitettun alumiinivoimakaapelin sähköiset ominaisuudet eri poikkipinnoille:

Taulukko 7. AHXAMK-W Alumiinivoimakaapelin sähköiset ominaisuudet [28]

| Tunnus | Vaihejohtimen vaihtovirtaresistanssi, +65°C [ohm/km] | Induktanssi, kolmioasennus [mH] | Käyttökapasitanssi [µF/km] |
|----------|--|---------------------------------|----------------------------|
| 3x70+35 | 0,52 | 0,41 | 0,18 |
| 3x95+35 | 0,38 | 0,39 | 0,20 |
| 3x120+35 | 0,30 | 0,38 | 0,23 |
| 3x150+35 | 0,24 | 0,36 | 0,24 |
| 3x185+35 | 0,19 | 0,35 | 0,26 |
| 3x240+70 | 0,15 | 0,34 | 0,29 |
| 3x300+70 | 0,12 | 0,33 | 0,32 |

5 Impedanssimittausmenetelmät

Voimajohtojen impedanssimittaukset ovat pitkään olleet hankalia ja kalliita toteuttaa. Mittausten hankalan toteutuksen vuoksi tyydytään usein pelkkiin laskettuihin arvoihin. Tietoa johdon impedanssiarvoista on saatu myöskin tutkimalla häiriötallenteista saatuja tietoja, jolloin releiden ns. *oikeat* asetteluarvot on saatu virheistä oppimalla. Impedanssimittaus voidaan tehdä perinteisellä Voltti-Ampeeri-mittarimenetelmällä tai nykyaikaisella taajuusselektiivisellä menetelmällä. Nykyaikainen mittausmenetelmä on sekä erittäin tarkka että käytännöllinen (ks. liite 2). Molemmat menetelmät ovat ns. *offline* mittausmenetelmiä ja ne tehdään mitattavan johdon ollessa jännitteetön.

5.1 Voltti-Ampeeri-mittarimenetelmä

Impedanssin mittaaminen häiriöttömissä olosuhteissa käyttäen Voltti-Ampeeri-mittarimenetelmää on yksinkertaista. Mitattavaan impedanssi silmukkaan syötetään vakiona pysyvää vaihtovirtaa I_m ja samalla mitataan virran aiheuttama maadoitusjännite U_m käyttäen nelipiste-mittausmenetelmää. Nelipiste-mittausmenetelmässä mittausvirta syötetään mitattavaan piiriin omilla johtimilla sekä jännitteen mittaus tehdään omilla johtimilla.

Käytännössä laajan järjestelmän impedanssin mittaaminen edellä mainitulla tavalla johtaa suurella todennäköisyydellä epäluotettaviin tuloksiin verkkotaajuudella esiintyvien häiriöjännitteiden vuoksi. Häiriöjännitteiden eliminoimiseksi on kehitetty useita eri menetelmiä, joista SFS 6001+A1+A2 standardissa mainitaan pulssi- ja napaisuudenvaihtomenetelmät [12].

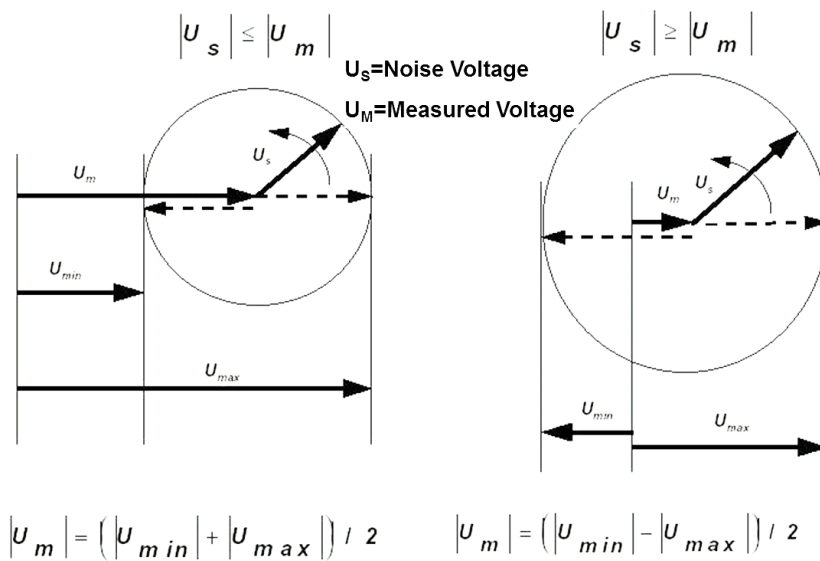
5.1.1 Pulssimenetelmä

Pulssimenetelmää (*engl. beat-frequency method*) käytettäessä mitattavaan silmukkaan syötetään virtaa taajuudella, joka poikkeaa hieman verkon nimellistaajuudesta (n. 1/10 Hz). Tähän tarkoitukseen sopii yleensä riittävän suuritehoinen varavoimakone (ks. seur. s., kuva 13), jolla aikaan saadaan riittävän suuri vähintään 50A:n mittausvirta.



Kuva 13. Tyypillinen varavoimakone (300 kVA) [29]

Mittausvirran aiheuttamat jännitteet summautuvat osoitinsuureina mahdollisiin häiriöjännitteisiin U_s , joiden itsearvoa ja vaihekulmaa voidaan pitää vakiona riittävän lyhyen mittausjakson aikana. Koska osoitinsuureet U_{min} ja U_{max} ovat eritaajuisia, jännitemittarin lukema heilahtelee näiden välillä (ks. kuva 14).



Kuva 14. Pulssimenetelmän osoitinsuureet [29]

Pulssimenetelmä on hyvä ratkaisu impedanssimittauksiin käytettäessä analogisia mitta-reita. Mittaustarkkuus on riippuvainen analogisen volttimittarin luentatarkkuudesta sekä mittarin aikavakiosta eli mittaustaajuus alle 1 Hz:n erolla on järkevä.

Mittaamalla osoittimen minimi (U_{min}) ja maksimi (U_{max}) mittaustaajuudella, voidaan laskea maadoitusjännite (U_m).

Selvyyden vuoksi kolme eri tuloksiin liittyvää tulkinnallista tapausta on syytä eritellä käytettäessä pulssimenetelmää (ks. ed. s., kuva 14):

- Jos häiriöjännitteen U_s osoitin on pienempi kuin mittaustaajuuden U_{max} osoitin, mittaussvirran aiheuttama maadoitusjännite voidaan laskea yhtälöllä:

$$U_m = \frac{U_{max} + U_{min}}{2} \quad (24)$$

- Jos häiriöjännite U_s on suurempi kuin mittaustaajuuden U_{max} osoitin, mittaussvirran aiheuttama maadoitusjännite voidaan laskea yhtälöllä:

$$U_m = \frac{U_{max} - U_{min}}{2} \quad (25)$$

- Jos häiriöjännite U_s on yhtä suuri kuin mittaustaajuuden U_{max} osoitin, mittaussvirran aiheuttama maadoitusjännite voidaan laskea yhtälöllä:

$$U_m = \frac{U_{max}}{2} \quad (26)$$

Pulssimenetelmän ongelmana on, että saadut mittaustulokset eivät aina ole yksikäsitteisiä. Aina ei ole täysin selvää, ovatko häiriöjännitteet suurempia vai pienempiä kuin mittaustaajuuden osoitin U_{max} . Muita tunnettuja pulssimenetelmän ongelmia ovat epäluotettavat tulokset, mikäli verkossa esiintyy mitta- ja nimellistaajuuden lisäksi muita häiriötaajuuksia. Näitä mahdollisia lisähäiriöitä ei pulssimenetelmällä pystytä eliminoimaan. [4; 12, 13.]

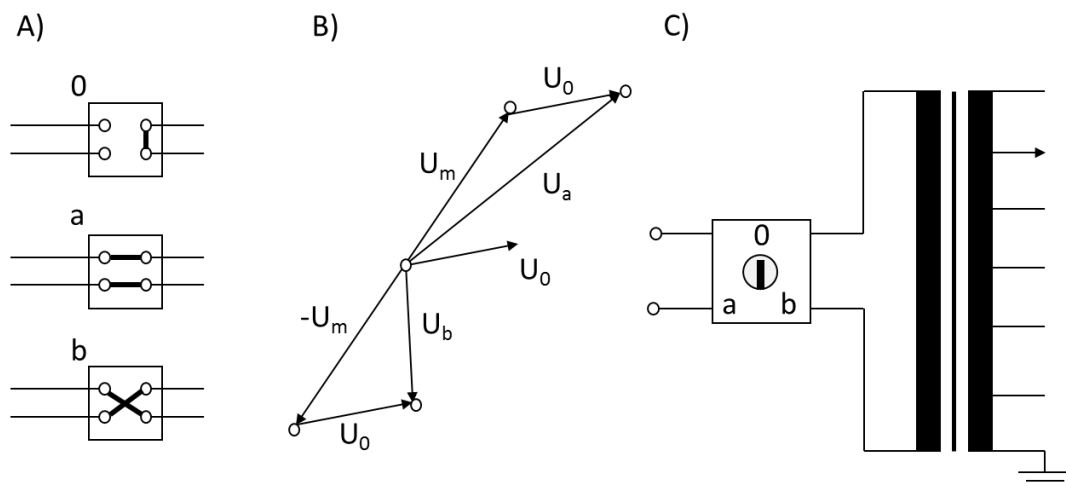
Pulssimenetelmässä tarvitaan suurta ja hankalasti siirrettävää varavoimakonetta riittävän suuren, vähintään 50 A:n mittausvirran aikaansaamiseksi. Lisäksi menetelmän mitaustarkkuus häiriöalttiissa ympäristössä ei ole kovin suuri ja tulosten arviointi vaatii kokemusta. Mittaustulokset on kirjattava ja laskettava käsin. Menetelmässä ei voida käyttää kovin suurta erotaajuutta, koska käytettävät mittarit eivät kykene seuraamaan, mikäli poikkeama on liian suuri. Vaihekulma voidaan selvittää ainoastaan tehomittauksella.

5.1.2 Napaisuudenvaihtomenetelmä

Napaisuudenvaihtomenetelmässä (engl. *reverse polarity method*) käytetään järjestelmän kanssa synkronista jännitelähdettä (erikoismuuntaja). Ensin mitataan jännite U_a mittausvirralla I_m . Seuraavaksi mittausvirta lasketaan arvoon nolla ja syöttöjännitteen vaihe käännetään 180 astetta alkuperäiseen nähden. Mittausvirralla I_m saadaan nyt maadoitusjännite U_b . Lisäksi mitataan häiriöjännite U_0 , kun mittausvirta on kytketty pois päältä ja syöttömuuntajan ensiöliittimet on oikosuljettu. Häiriötön maadoitusjännite U_m voidaan ratkaista yhtälöllä: [5; 12.]

$$U_m = \sqrt{\frac{U_a^2 + U_b^2}{2}} - U_0^2 \quad (27)$$

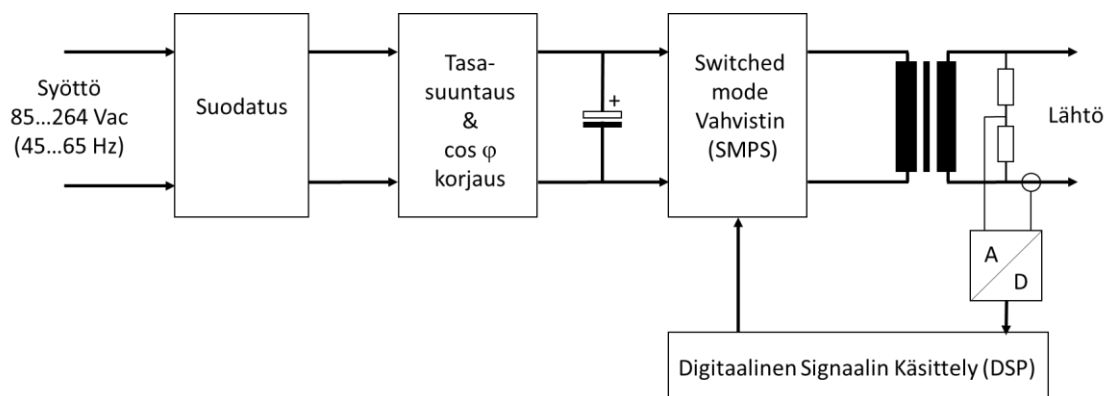
Kuvassa 15 esitetään napaisuudenvaihtomenetelmän periaate:



Kuva 15. Napaisuudenvaihtomenetelmä: A) kytkimen asentokaaviot, B) osoitindigrammi ja C) jännitelähde [10, s. 459]

5.2 Taajuusselektiivinen menetelmä

Omicron CPC 100-primäärikoestuslaite hyödyntää monipuolisesti modernia elektroniikkaa. Primäärikoestuslaitteen keskeinen komponentti on ns. *switched-mode* vahvistin (SMPS), jolla aikaansaadaan haluttu ulostulotaajuus. Mittaustaajuuden läheisyydessä olevat häiriösignaalit suodatetaan tehokkaasti. Menetelmästä käytetään nimitystä taajuusselektiivinen menetelmä (engl. *frequency-selective method*). Impedanssimittaus tehdään Voltti-Ampeeri-menetelmällä ja nimellisestä taajuudesta poikkeavilla taajuuksilla. Kuvassa 16 esitetään primäärikoestuslaitteessa käytetyn SMPS vahvistimen lohkokaavio. SMPS tekniikka mahdollistaa sekä edullisten että keveiden teholähteiden suunnittelun. Samalla niiden syöttöjännitteen toiminta-alue voi olla hyvin laaja. Primäärikoestuslaitteen referenssi manuaalissa [30, s. 14-8] ilmoitetaan syöttöjännitteen sallituksi jännitealueeksi 85 - 264 Vac ja taajuuden sallituksi alueeksi 45 - 65 Hz. Laajasta syöttöjännitteen alueesta on hyötyä esimerkiksi käytettäessä aggregaattia koestuslaitteen virtalähteenä.



Kuva 16. Omicron CPC 100 koestuslaitteen Switched-Mode (SMPS) vahvistimen lohkokaavio [28, s. 2-13]

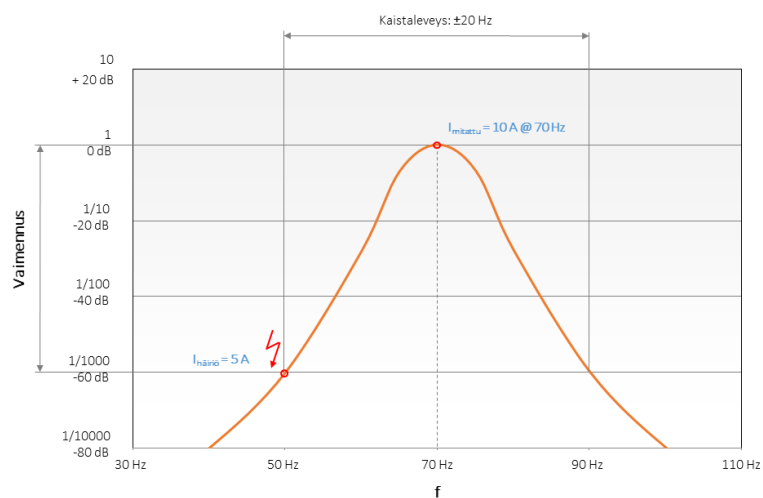
CPC 100-primäärikoestuslaitetta voidaan varauksin käyttää myös pienillä siirrettävillä generaattoreilla, esimerkiksi mitattaessa keskijännitekaapeleita. Maasto-olosuhteissa ongelmana voi olla aggregaatin ja mittalaitteiston riittävän hyvän maadoituksen aikaansaaminen. Keskijännitekaapelin mittausta maasto-olosuhteissa kokeiltiin maaseutuverkossa ensimmäisen kerran vuonna 2013 (ks. seur. s., kuva 17). Kokeissa havaittiin, että käytössä olleen bensiinikäyttöisen aggregaatin suurin ulostuloteho 4 200 VA ei ollut optimaalinen ylikuormituksen vuoksi, mutta mittaukset saatiin tehtyä.



Kuva 17. Pitkän keskijännitekaapelin impedanssimittaus maasto-olosuhteissa. Mittauslaitteiston tarvitsema virta saatiin bensiinikäyttöisestä aggregaatista [31]

Valmistajan ilmoittama suurin ulostuloteho CPC 100 ja CP CU1 yhdistelmälle on 5 000 VA (45 - 70 Hz), liite 2. Impedanssimittauksessa käytetään myös edellä esitettyjä suurempia mittaustaajuuksia (> 100 Hz).

Mahdolliset häiriösignaalit suodatetaan primäärikoestuslaitteessa tehokkaasti, jotta mahdollisten häiriösignaalien vaikutus mittaustuloksiin on mahdollisimman pieni. Kuvassa 18 esitetään häiriösuodatuksen toiminta-alue (± 20 Hz, 60 dB:n vaimennuksella).



Kuva 18. Häiriösignaalien suodatus [18]

Kuvan 18 (ks. ed. s.) perusteella voidaan laskea, että jos häiriösignaalin $I_{\text{häiriö}}$ suuruus verkon nimellistaajuudella on 5 A, on sen vaikutus mittaustulokseen I_{mitattu} ainoastaan 0,005 A (5 A/1000; 60dB).

6 Impedanssimittauslaitteisto

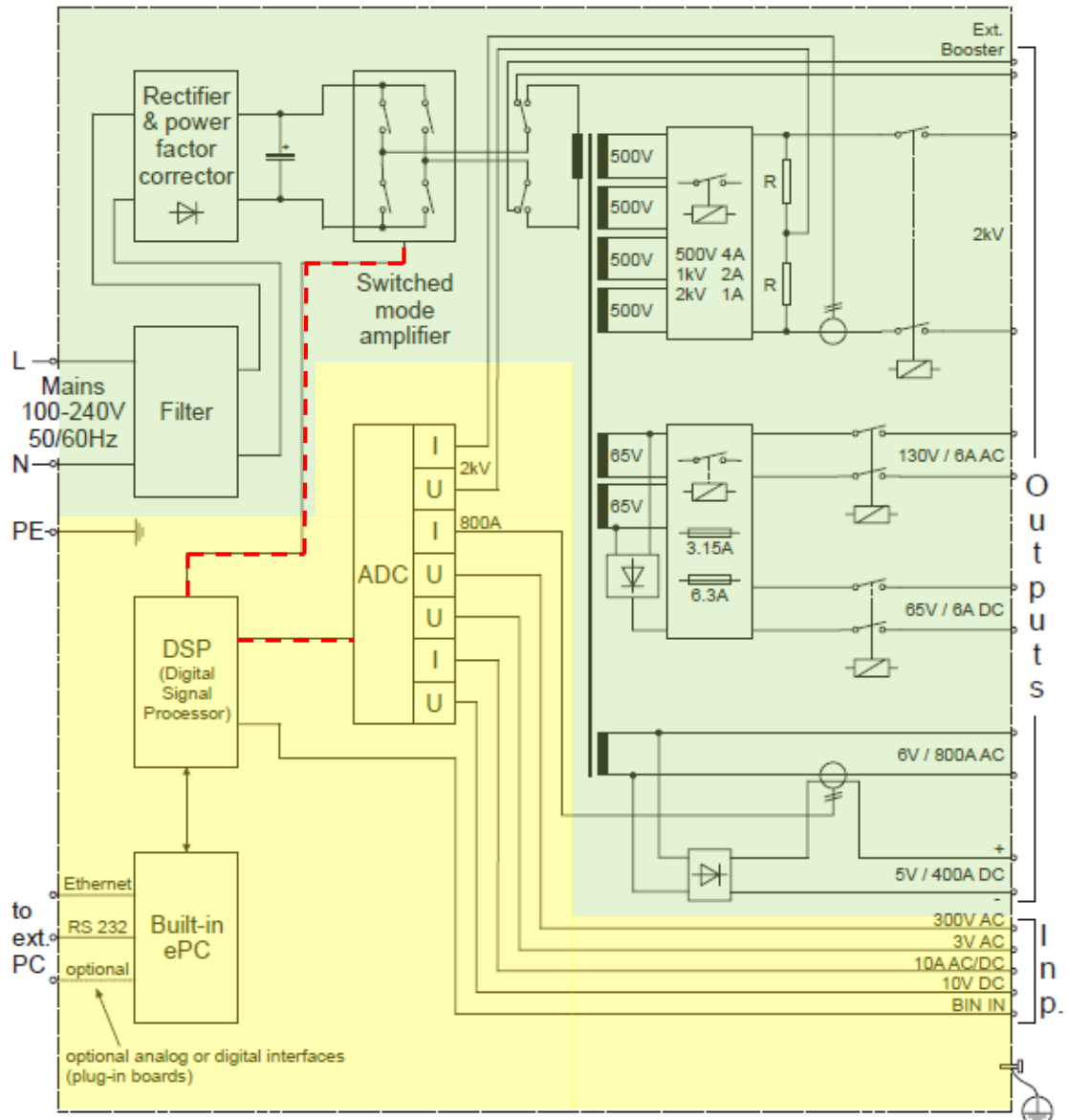
Tässä työssä analysoidut impedanssimittaukset on tehty Omicron electronics GmbH yrityksen kehittämällä ja patentoimilla mittalaitteilla. Mittalaitteet tulivat markkinoille vuonna 2002. Impedanssimittauksissa käytetään CPC 100-primäärikoestuslaitetta, CP CU1-kytkentäyksikköä sekä CP GB1-maadoitusyksikköä (ks. kuva 19). Mittauslaitteiston tärkeimmät tekniset ominaisuudet esitetään liitteessä 2.



Kuva 19. Omicron impedanssimittauslaitteisto; vasemmalta oikealle: CPC 100-primäärikoestuslaite, CP CU1-kytkentäyksikkö ja CP GB1-maadoitusyksikkö [4]

6.1 Omicron CPC 100-primäärikoestuslaite

Omicron CPC 100-primäärikoestuslaite kattaa monipuoliset mittaukset, joten jokaista mittausta varten ei välttämättä tarvita omaa erillistä laitetta. Tavallisimpia käyttökohteita ovat muuntajien, mittamuuntajien, kojeistojen, katkaisijoiden ja pyörivien koneiden eri mittaukset sekä maadoitusjärjestelmien, kaapelien- ja avojohtojen impedanssimittaukset.

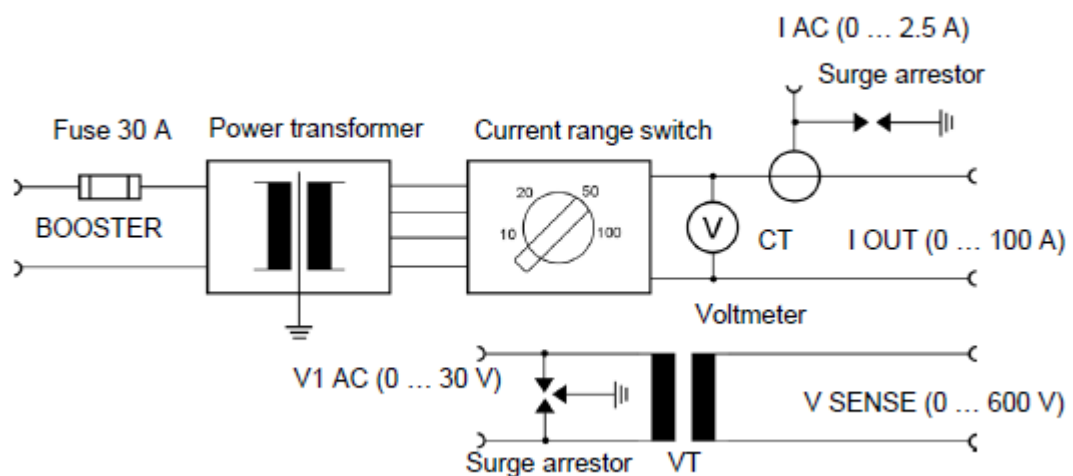


Kuva 20. Omicron CPC-100 primäärikoestuslaitteen lohkokkaavio [30]. Vihreä alue: Generaattori, Keltainen alue: Signaalin generointi ja mittaus.

CPC 100-primäärikoestuslaitteen muunneltava ulostulotaajuus (15 - 400 Hz) mahdollistaa mittaukset verkon nimellisestä taajuudesta poikkeavilla taajuuksilla. Menetelmän ansiosta verkon häiriösignaalien vaikutus mittaustulokseen voidaan eliminoida tehokkaasti (ks. s. 34, kuva 18). Menetelmän etuna on saatujen mittaustulosten suuri tarkkuus jopa hyvin häiriöalttiissa ympäristössä (ks. liite 2). Valmistajan mukaan toinen merkittävä etu käytettäessä muuttuvaa taajuutta on mitattavasta kohteesta saatava suurempi informaation määrä. Kuvassa 20 esitettiin CPC 100-primäärikoestuslaitteen lohkokkaavio.

6.2 Omicron CP CU1-kytkentäyksikkö

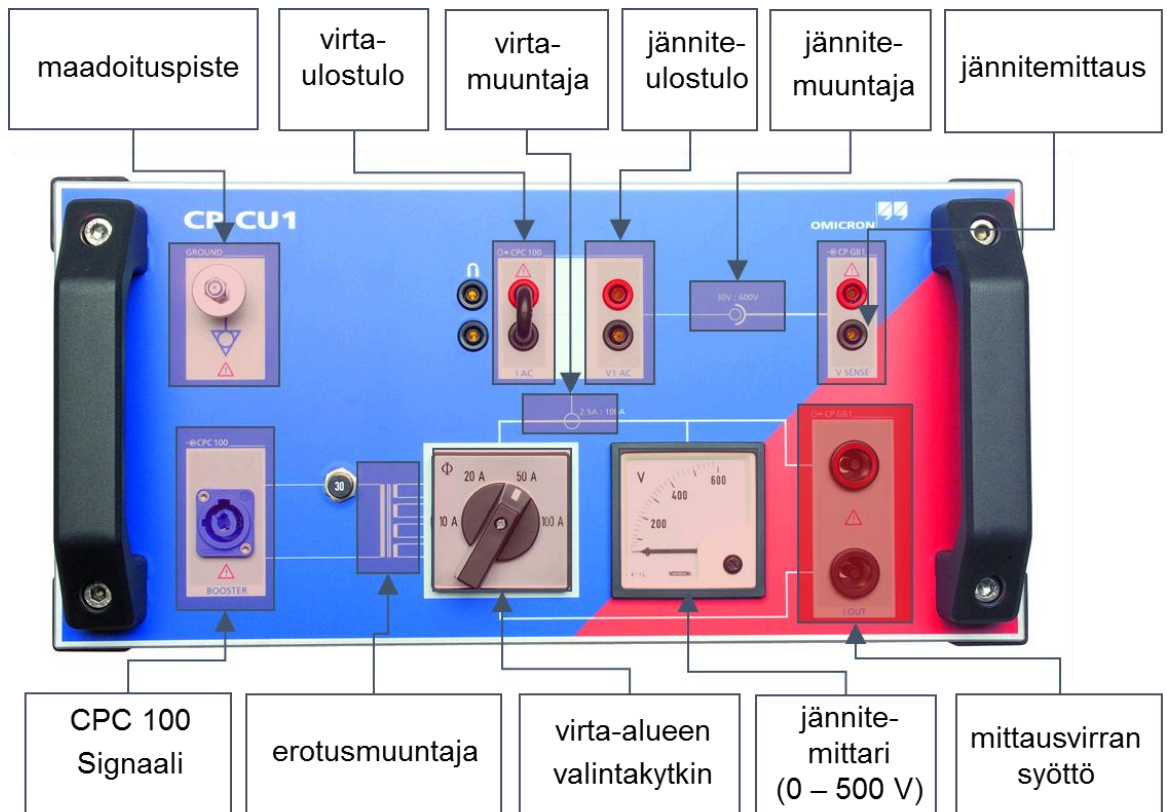
Omicron CP CU1-kytkentäyksikkö erottaa CPC 100-primäärikoestuslaitteen erotusmuuntajan avulla mitattavasta kohteesta lisäten työturvallisuutta. Erotusmuuntajan maksimi jännitekestoisuus on 600 Vac. Kaikki mittauskytkennät primäärikoestuslaitteen ja mitattavan kohteen välillä tehdään kytkentäyksikön kautta. KytKentäyksikön kytkentäkaavio esitetään kuvassa 21. KytKentäyksikön tarkemmat tekniset ominaisuudet esitetään liitteessä 2.



Kuva 21. CP CU1-kytkentäkaavio [4]

Mittausten kannalta tärkein huomioitava asia on CP CU1-kytkentäyksikön virransyötön valintakytkin. Valitun virta-alueen on vastattava mittalaitteessa käytettävää mittausohjelmaa (ks. kuva 21).

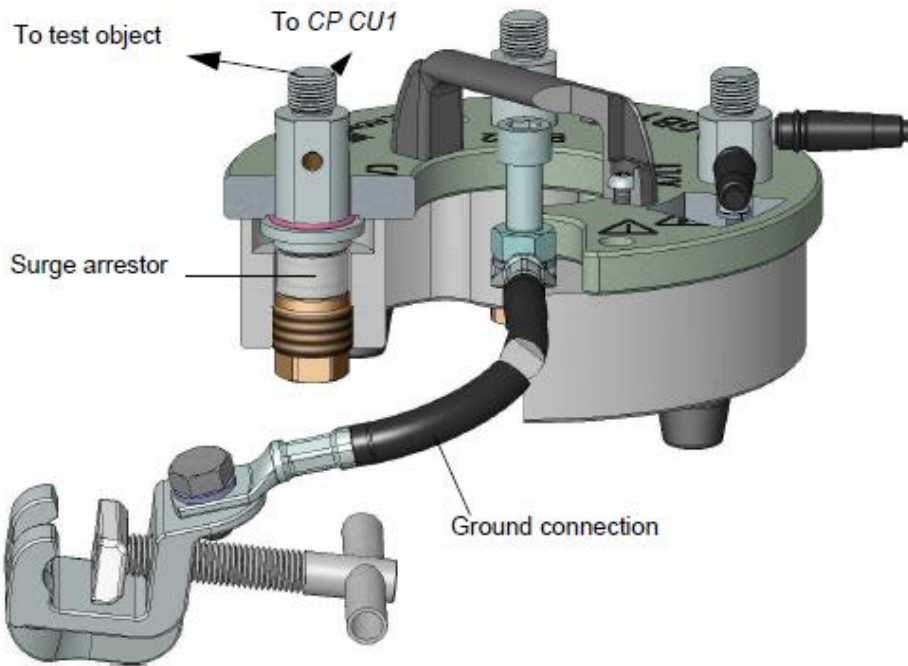
Kuvassa 22 esitetään CP CU1-kytkentäyksikön liitännöiden, valintakytkimen selitykset. Jännitenäyttö havainnollistaa mittausjännitettä. Jännitettä voi esiintyä myös mitattavan johdon maadoituserottimen ollessa auki mittauspäässä vaikka mittausa ei tehdä. Näissä tapauksissa on oltava erityisen varovainen, koska tällainen häiriöjännite aiheutuu kytkentäyksikön kytkeymisestä (ks. 8 *Työturvallisuus*).



Kuva 22. CP CU1-kytkentäyksikkö [4]

6.3 Omicron CP GB1-maadoitusyksikkö

Omicron CP GB1-maadoitusyksikön käyttö on valmistajan käyttöohjeiden mukaan pakollista kun mitataan suurjännitejohtojen ja -kaapeliin impedansseja [4]. Maadoitusyksikössä on 1 000 V:n ylijännitesuojat jokaiselle vaiheelle. Maadoitusyksikkö kytetään aina mitattavan kohteen ja maan välille. Mikäli mitattavan kohteen ja maadoitusyksikön välille syntyy lyhytaikainen ylijännite, valokaari purkaa jännitteen, maadoitusyksikön vahingoittumatta. Mikäli valokaari kestää pitkään, ylijännitesuoja sulaa ja jousiliittimet oikosulkeutuvat, varmistaen CPC 100-primäärikoestuslaitteen turvallisen käytön. Maadoitusyksikön toiminta on testattu testilaboratoriossa 31,5 kA:n oikosulkuvirralla.



Kuva 23. CP GB1-maadoitusyksikkö [4; 15, s. 20]

Kuvassa 23 näkyi maadoitusyksikön rakenne. Kaikki mittauskytkennät tehdään CP CU1-maadoitusyksikön liittimillä. Laitteiston mukana toimitetaan laaja valikoima maadoitustappeja, jotka sopivat yleisimmille maadoitusvälineille. Maadoitusyksikön tarkemmat tekniset ominaisuudet esitetään liitteessä 2.

7 Impedanssimittaus

Tässä kappaleessa esitellään impedanssimittauksen eri vaiheet mittauksen suunnittelusta aina toteutukseen ja tulosten käsittelyyn asti. Impedanssimittaus tehdään ns. *offline* mittauksena, joten mitattavan johdon oltava jännitteetön mittauksen suorituksen ajan. Tämä vaatii ennakoivaa johdon käyttökäytöksen suunnittelua, jotta sähkön jakelulle aiheutuva haitta olisi mahdollisimman pieni.

7.1 Impedanssimittauksen valmistelu

Ennen varsinaisten impedanssimittauksen aloittamista selvitetään edellytykset mittauksen suorittamiselle. Verkonhaltijan on varmistettava ennakkoon, että mitattavan johdon vaiheisiin pääsee käsiksi, mikäli kysymyksessä on kaasueristeinen kytkinlaitos. Avokytinlaitoksissa kytkentäongelmia ei pääasiassa ole.

7.1.1 Verkonhaltijan toimenpiteet

Verkonhaltija vastaa kaikista verkkoon liittyvistä käyttötoimenpiteistä. Ennen varsinaista impedanssimittausten ajankohtaa tehdään keskeytysuunnitelma mitattavalle johdolle ja selvitetään mitattavan johdon lasketut arvot tulosten vertailemiseksi heti mittausten jälkeen. Mitattavan johdon vasta-aseamalla johto maadoitetaan mittausten ajaksi, joten myös vasta-aseamalla tarvitaan miehitys. Mittauspaikalla mitattava johto maadoitetaan kytkentätöiden ajaksi. Jos kysymyksessä on avokytkinlaitos, aseman oikosulkuvirtaa vastaavat maadoitusköydet kytketään mitattavan johdon jokaiseen vaiheeseen (L1-L2-L3) ja liitetään mittauslaitteiston CP GB1 liitäntäyksikön vastaaviin vaiheisiin (L1-L2-L3). Kokemus on osoittanut, että useimmat ongelmat liittyvät mittauspaikalla tarjolla oleviin maadoitusvälineisiin sekä niissä oleviin liittimiin.

Mittauslaitteisto tarvitsee vähintään 16 A/230Vac maadoitetun pistorasian. Avokytkinlaitoksilla tällainen saadaan yleensä lähistöllä olevasta jakokeskuksesta taikka erillisestä pistorasiakeskuksesta.

Mittausten aikana verkkonhaltija huolehtii maadoituserottimen käyttötoimenpiteistä. Maadoituserotin avataan, kun halutaan tehdä impedanssimittaus. Maadoituserotin palautetaan maadoitusasentoon välittömästi mittauksen valmistuttua. Impedanssimittauksessa tehdään seitsemän eri mittausta.

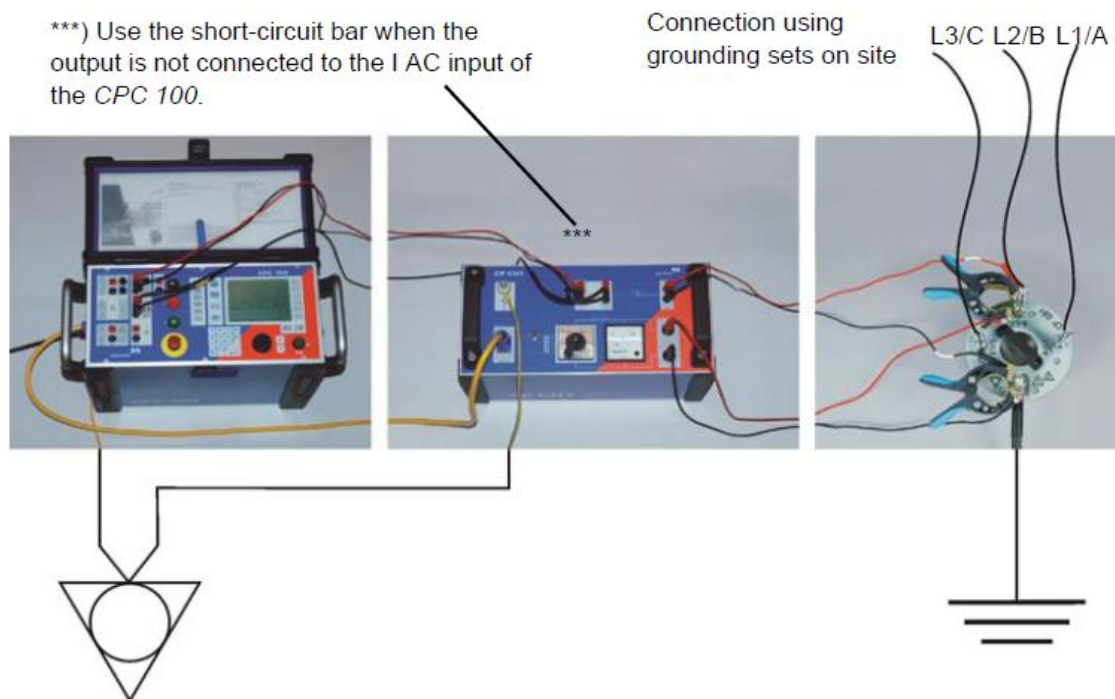
Mittauksiin liittyy paljon rutiinin omaisia toistuvia toimenpiteitä. Mikäli mittauksia tehdään saman päivän aikana useita, saattaa siitä pahimmassa tapauksessa olla seurauksena kontrollin herpaantuminen. Mittauksiin on aina varattava riittävästi aikaa (ks. 8 *Työturvallisuus*).

7.1.2 Mittaajan toimenpiteet

Mittaaja tarkastaa mittalaitteiden sekä välineiden kunnon ennen mittauspaikalle siirtymistä. Mittauspaikalla puutteiden tai vikojen korjaaminen voi olla myöhäistä.

Kun mitattava johto on todettu jännitteettömäksi ja se on työmaadoitettu, voidaan aloittaa mittausten valmistelut. Mikäli mitattavalla johdolla on rinnakkainen jännitteisenä oleva johto, aloitetaan impedanssimittausten valmistelut mittaamalla ensin mahdollinen in-

duoituneen virran suuruus avoimesta mittauspiiristä ja laskemalla siitä syntyvä häiriöjännitteen suuruus (ks. 7.1.3 *Rinnakkaisen johdon vaikutuksen tarkistaminen*). Pitkät rinnakkaiset johdot voivat aiheuttaa mitattavaan johtoon vaarallisen suuren jännitteen kytkeytymällä (ks. 8 *Työturvallisuus*).



Kuva 24. Impedanssimittauslaitteiden kytkentä [4, s. 39]

Impedanssimittauslaitteiden kytkennät aloitetaan aina ensimmäisenä maadoituksista. Sekä primäärikoestuslaite CPC 100 että kytkinyksikkö CP CU1 on pyrittävä mahdollisten häiriöjännitteiden eliminoimiseksi kytkemään samaan potentiaaliin (ks. kuva 24) [17, s. 30]. Sähköasemilla yleensä riittää, kun kunkin mittalaitteen osan maadoitusjohdin kytketään lähimpään maadoitusverkon osaan. Joissakin harvoissa tapauksissa mittalaite on onnistuttu kytkemään sellaiseen maadoitusverkon osaan, jossa on myöhemmin havaittu epäjatkuvuutta. Tämä näkyy viimeistään mittauksia suoritettaessa epänormaalina mittaustuloksena (ks. 7.3 *Mittaustulosten arviointi mittausten aikana*).

Impedanssimittauslaitteistoa voidaan käyttää myös maadoitusverkon epäjatkuuuksien ja ukkosjohtimen reduktiokerroimen (ks. 3.3 *Reduktiovaikutus*) selvittämiseen käyttäen apuna HGT1 Fourier -mittaria tai liittämällä ns. *Rogowski* sensori suoraan CPC 100-primäärikoestuslaitteen sisääntuloon V1 AC [4, s. 58]. Kun kaikki mittalaitteet on maadoitettu, voidaan aloittaa mittajohtimien kytkentä haluamassaan järjestyksessä kuvan 24 mukaisesti. Kytkentöjen tekemistä helpottaa kun primäärikoestuslaite on kytketty päälle

ja impedanssimittauksiin tarkoitettu mittauskortti on ladattuna. Mittaukseen tarvittavat liittännät näkyvät mittauskortilla ja ne on merkitty selkeästi primäärikoestuslaitteen liittimillä punaisin merkkivaloin.

CP CU1-kytkinyksikössä on mittausvirran valintakytkin (10A, 20A, 50A ja 100A). Mittausvirran valinta riippuu mitattavan johdon impedanssista. Tämä voidaan valmistajan ohjeiden mukaisesti tarkistaa ennen mittausten aloittamista [4]. Suurimmassa osassa mittauksia oletuksena riittää 20 A:n mittausvirta.

7.1.3 Rinnakkaisen johdon häiriövaikutuksen tarkistaminen

Ennen varsinaisia mittauskytkentöjä tehdään johdolle normaali työmaadoitus. Tämän jälkeen maadoituserotin avataan ja pihtivirtamittarilla mitataan yksitellen jokaisen vaiheen virta työmaadoituksesta. Tulokset kirjataan muistiin ja maadoituserotin palautetaan kiinni asentoon. Mikäli johdolla ei ole jännitteisenä olevaa rinnakkaista johtoa, pitäisi mitatun vaihtovirran olla nolla ampeeria. Jos näin ei ole, lasketaan johdon avoimen silmukan jännite yhtälöllä:

$$U_{est} = I_{mit.} \cdot Z_{johto} \cdot 2 \cdot l_{johto} \quad (28)$$

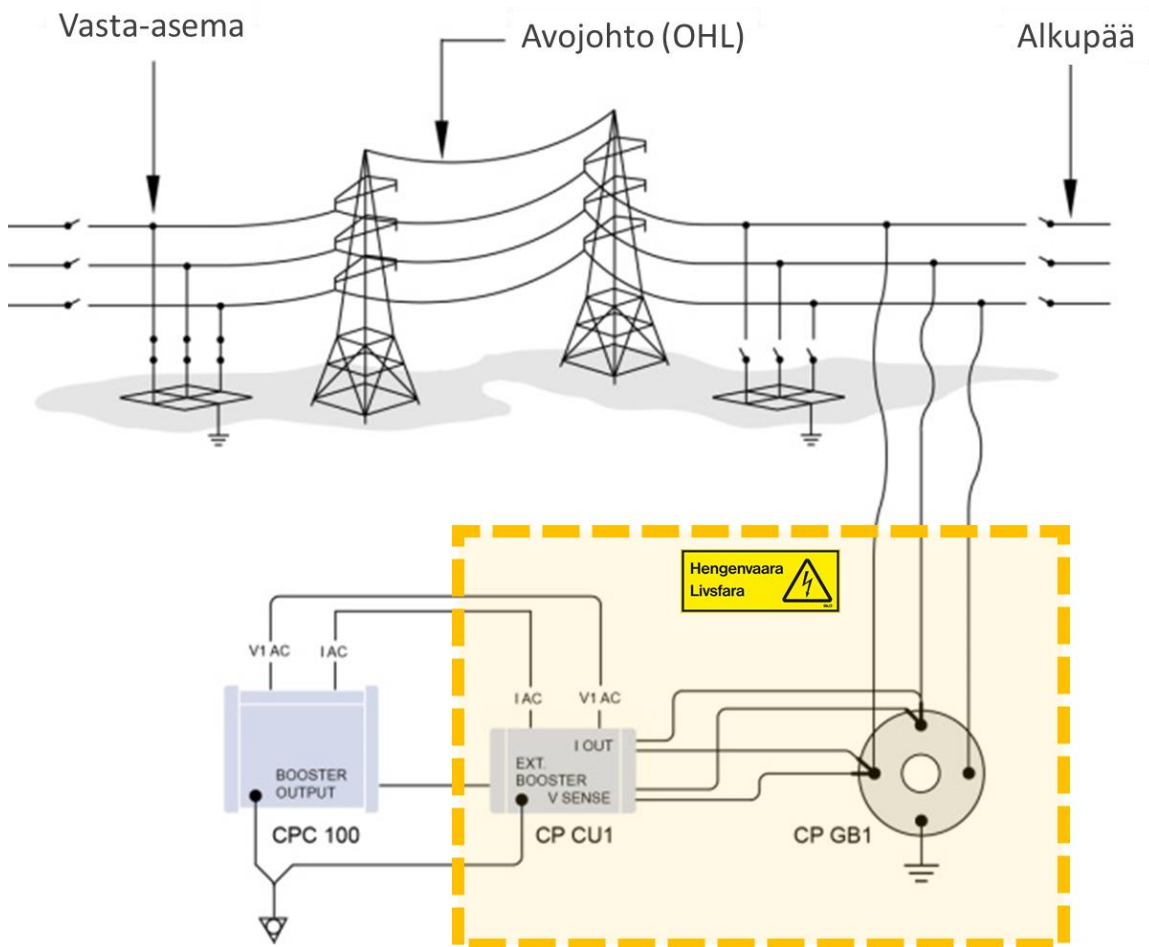
jossa

| | |
|-------------|--|
| U_{est} | = arvioitu jännite [V _{ac}] |
| I_{mit} | = vaihejohtimesta mitattu virta [A] |
| Z_{johto} | = johtimen impedanssi [Ω/km]. Valmistajan käyttöohjeen mukaan käytetään arvoa 0,4 Ω/km |
| l_{johto} | =mitattavan johdon pituus kilometreissä. [4, s. 36 - 37.] |

Jos avoimen silmukan jännite (yhtälö 28) on suurempi kuin 500 V on mittaukset keskeytettävä. Syksyllä 2014 mitattiin pääkaupunkiseudulla erään 9,3 km pitkän 110 kV:n johdon silmukkavirrat ja lukemiksi saatiin $L_1=2,2$ A, $L_2=3,0$ A ja $L_3=4,6$ A. Mitattavalla johdolla oli samassa pylväässä rinnakkainen jännitteisenä oleva 110 kV johto. Kun suurin mitattu virta syötettiin yhtälöön 28, saatiin tulokseksi noin 35 V. Koska saatu tulos on reilusti alle 500 V, impedanssimittauksia voitiin jatkaa.

7.2 Impedanssimittausten suorittaminen

Mittausjärjestelyt aloitetaan aina maadoituskytkennöistä. Mittauspaikkaa valittaessa pitää muistaa, että CPC 100-primäärikoestuslaite viedään riittävän kauas vaaravyöhykkeeltä. Riittävä turvaväli saadaan suoristamalla CPC 100 ja CP CU1-yksiköiden väliset johdot. Tarpeeton oleskelu vaaralliseksi merkityllä alueella ei ole sallittua mittausten suorittamisen aikana. Vaarallinen alue merkitään selvästi esim. turvanaruja käyttäen (kuva 25).



Kuva 25. Mittausjärjestelyt. Mittausten suorittamisen aikana vaarallinen alue on merkitty keltaisella [18].

Ennen varsinaisia mittauksia kirjataan ylös mittausajankohdan säätiedot, esim. Ulkolämpötila +8 °C, sää aurinkoinen. Johtojen nimelliset impedanssiarvot annetaan ympäristön lämpötilan ollessa +20 °C. Jos mittauslämpötila poikkeaa merkittävästi,

on tämäkin huomioitava tuloksia analysoitaessa. Näiden lisäksi on suositeltavaa kirjata muistiin avojohtopylvään rakenne ja kaapeleita mitattaessa asennus ja maadoitustapa.

7.2.1 Vaiheiden välinen impedanssimittaus

Mitataan yksitellen vaiheiden L1-L2, L2-L3 ja L3-L1 -väliset impedanssit taajuuksilla 30, 30, 70, 70, 90, 110 ja 130 Hz seuraavasti:

- Varmista, että maadoituserottimet ovat kiinni.
- Tee mittauskytkentä.
- Avaa mittauspään maadoituserotin ja suorita mittaus. Seuraa mittausten kulkua ja arvioi saatujen tulosten järkevyyttä. Selvitä tarvittaessa mittausvirheen syy ja toista mittaus uudelleen.
- Kytke maadoituserotin kiinni.

Toista kunnes kaikkien vaihejohtimien väliset silmukkaimpedanssit on mitattu.

7.2.2 Vaiheen ja maan välinen impedanssimittaus

Mitataan yksitellen vaiheiden L1, L2 ja L3 ja maan väliset impedanssit taajuuksilla 30, 30, 70, 70, 90, 110 ja 130 Hz seuraavasti:

- Varmista, että maadoituserottimet ovat kiinni.
- Tee mittauskytkentä.
- Avaa mittauspään maadoituserotin ja suorita mittaus. Seuraa mittausten kulkua ja arvioi saatujen tulosten järkevyyttä. Selvitä tarvittaessa mittausvirheen syy ja toista mittaus uudelleen.
- Kytke maadoituserotin kiinni.

Toista kunnes kaikkien vaiheiden ja maan väliset silmukkaimpedanssit on mitattu.

7.2.3 Kaikkien vaiheiden ja maan välinen impedanssimittaus

Mitataan kaikkien vaiheiden L1-L2-L3 ja maan väliset impedanssit taajuuksilla 30, 30, 70, 70, 90, 110 ja 130 Hz seuraavasti:

- Varmista, että maadoituserottimet ovat kiinni.
- Tee mittauskytkentä (Huom! L1-L2-L3 mittaus tehdään oikosulkemalla vaiheet CP GB1 yksikössä).
- Avaa mittauspään maadoituserotin ja suorita mittaus. Seuraa mittauksen kulkua ja arvioi saatujen tulosten järkevyyttä. Selvitä tarvittaessa mittausvirheen syy ja toista mittaus uudelleen.
- Kytke maadoituserotin kiinni.

Kuten mittausohjelmasta havaittiin, mittauksissa käytetyt mittaustaajuudet poikkeavat nimellistaajuuden monikerroista ($f = 50, 100, 150$ Hz, jne). Mahdolliset häiriöjännitteet ovat yleensä suurimmillaan juuri näillä taajuuksilla. Kun kaikki tarvittavat mittaukset on tehty, tallennetaan mittaustulokset normaalisti käyttäen mitattavan johdon tunnuksia.

7.3 Mittaustulosten arviointi mittausten aikana

Mittausten aikana voidaan Omicron CPC 100-primäärikoestuslaitteen näytöltä valvoa taulukon 8 mukaisia arvoja. Taulukoissa 8 ja 9 näkyvät samalta johdolta mitattu epänormaali sekä normaali tulos.

Taulukko 8. Mittaustulosten arviointi (epänormaali tulos)

| CTsel | | VTsel | | R, X | | Binary | Time |
|----------|------|---------|---------|-------------|--------------|--------|------|
| 19,9494A | 0,0° | 0,1842V | -5,32° | 0,00919349Ω | -0,00085609Ω | OPEN | 2,0s |
| 19,9497A | 0,0° | 0,1839V | -5,33° | 0,00917837Ω | -0,0008563Ω | OPEN | 2,0s |
| 19,9636A | 0,0° | 0,1884V | -15,73° | 0,00908375Ω | -0,00255846Ω | OPEN | 2,0s |
| 19,9636A | 0,0° | 0,1884V | -15,72° | 0,0090842Ω | -0,00255688Ω | OPEN | 2,0s |
| 19,9672A | 0,0° | 0,1888V | -20,62° | 0,00884976Ω | -0,00332993Ω | OPEN | 2,0s |
| 19,968A | 0,0° | 0,1889V | -25,05° | 0,0085703Ω | -0,00400551Ω | OPEN | 2,0s |
| 19,9645A | 0,0° | 0,189V | -28,91° | 0,00828709Ω | -0,00457661Ω | OPEN | 2,0s |

Taulukko 9. Mittaustulosten arviointi (normaali tulos)

| CT sel | | VT sel | | R, X | | Binary | Time |
|----------|------|----------|--------|-------------|-------------|--------|------|
| 19,9239A | 0,0° | 21,4135V | 68,13° | 0,40034982Ω | 0,9974102Ω | OPEN | 2,0s |
| 19,9235A | 0,0° | 21,413V | 68,12° | 0,40052258Ω | 0,99733705Ω | OPEN | 2,0s |
| 19,9358A | 0,0° | 47,0153V | 79,98° | 0,41032719Ω | 2,32234046Ω | OPEN | 2,0s |
| 19,9354A | 0,0° | 47,0141V | 79,98° | 0,41033318Ω | 2,32237437Ω | OPEN | 2,0s |
| 19,9346A | 0,0° | 60,0652V | 82,06° | 0,41621524Ω | 2,98419703Ω | OPEN | 2,0s |
| 19,9232A | 0,0° | 73,1155V | 83,38° | 0,4230766Ω | 3,64539876Ω | OPEN | 2,0s |
| 19,903A | 0,0° | 86,1339V | 84,29° | 0,43058043Ω | 4,30625452Ω | OPEN | 2,0s |

Taulukoita vertaamalla nähtiin, että taulukossa 9 mitatut vaihekulmat ja resistanssin R sekä reaktanssin X arvot eivät ole järkeviä. Joissakin poikkeustapauksissa reaktanssi voi todellisuudessa saada negatiivisen arvon. Näin voi tapahtua, kun mitataan yksivaiheisten, toisistaan etäällä olevien, kaapeleiden impedansseja. Tällöin vaiheiden välinen reaktanssi voi olla suurempi kuin maan ja vaiheen välinen reaktanssi (ks. s. 26, yhtälö 23), johtaen negatiiviseen mittaustulokseen. [4, s. 54.]

Kokemusperäisesti virheellisen tuloksen syynä voi olla jokin seuraavista:

- i) Kelvin pihdit eivät ole kunnollisesti kiinni mittauspisteen CP GB1-maadoituspalloissa. Varmista, että maadoitusveitsi on kytkettynä ja korjaa mittauskytkeä. Tarkista myös maadoituspallojen ja -köysien kiinnitys.
- ii) Mittauspään maadoituserotin on kiinni. Avaa maadoituserotin ja toista mittaus.
- iii) Vasta-aseman maadoituserottimen tartuntapinnoissa on huono kontakti. Tee kiinni-auki ohjaus muutaman kerran. Toista mittaus.
- iv) Maadoitusyksikön CP GB1 ja sähköaseman maadoitusverkon välillä on epäjatkuvuus. Varmista, että maadoitusveitsi on kytkettynä ja vaihda CP GB1-maadoitusyksikön maadoituspistettä.

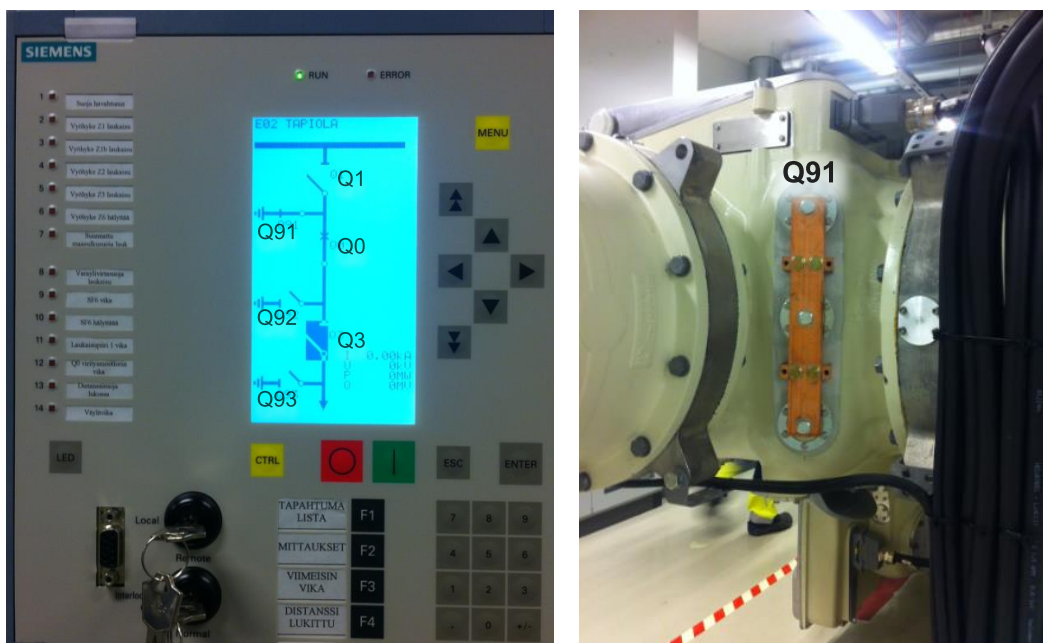
Edellä esitetyt häiriöt ovat tavallisimpia mittauksissa havaittuja ongelmia, ja ne on korjattavissa nopeasti ilman suurta viivettä.

7.4 Mittausten suorittaminen kaasueristeisestä kytkinlaitoksesta

Kaasueristeisissä (SF_6) kytkinlaitoksissa (GIS) ei päästä suoraan käsiksi kaapelien johtimiin. Impedanssimittaus voidaan kuitenkin tehdä, mikäli kytkinlaitteistossa on sopiva ulostulo mittajohtimien kytkemiseksi. Kaikissa kytkinlaitoksissa ulosottoon ei ole varauduttu säästö tai muista syistä. Kuvan 26 esimerkissä mittaus on mahdollista toteuttaa erottimen Q91 ulostulon kautta. Mittausten ajaksi kuparilatta (oikosulku) poistetaan, jotta päästään tekemään vaihekohtaiset mittaukset.



Kuva 26. Kaasueristeinen 110 kV kytkinlaitos (Siemens). Impedanssimittausten valmistelut käynnissä.



Kuva 27. Erottimen Q91 ulosottoliitäntä, jonka kautta päästään käsiksi 110 kV kaapelin vaihejohtimiin.

Kuvan 26 (ks. ed. s.) mukaisessa kojeistossa impedanssimittauslaitteistolla syötetään haluttu mittausvirta erottimen Q91 kautta (ks. kuva 27). Mittauskytkentöjen muutosten ajaksi erotin Q3 avataan ja vastaavasti suljetaan, kun halutaan tehdä mittausta. Kaikki kytkinlaitoksen ohjaustoimenpiteet tehdään ohjauskaaviolla varustetun distanssireleen kautta (kuvassa Siemens 7SA6).

Kaasueristeisten kytkinlaitosten toteutus vaihtelee asiakkaan tarpeista ja kojeiston valmistajasta riippuen, joten yllä esitettyä esimerkkiä ei voi soveltaa sellaisenaan, vaan mittausten toteutuksen suunnittelu on tehtävä tapauskohtaisesti.

7.5 Mittaustulosten käsittely

CPC 100-primäärikoestuslaitteella mitattuja tuloksia jatkokäsittellään tietokoneella. Tulokset voidaan siirtää tietokoneelle joko ethernet yhteydellä *CPC Explorer*-ohjelman avulla taikka USB-muistitikulla. Käytännössä nopein ja helpoin tapa on siirtää mittaustulokset tietokoneelle käyttäen muistitikkuja. Jos tiedonsiirtoon päätetään käyttää muistitikkuja, kannattaa varmistaa, että käytettävä muistitikku on tyhjä. Nykyaikaiset paljon dataa sisältävät muistitikut hidastavat käsittelynopeutta, joka on käyttöjärjestelmän ominaisuus. CPC 100-primäärikoestuslaitteen käyttöjärjestelmä on *Windows Embedded CE*. Mikäli koneeseen on vahingossa laittanut muistitikun, johon on

tallennettu paljon dataa, voi muistitikon lukeminen ja siihen tallentaminen kestää useita minutteja. Jos näin käy, ei koestuslaitetta saa sammuttaa taikka muistitikkua poistaa laitteesta kesken prosessin, jotta tiedot eivät katoa.

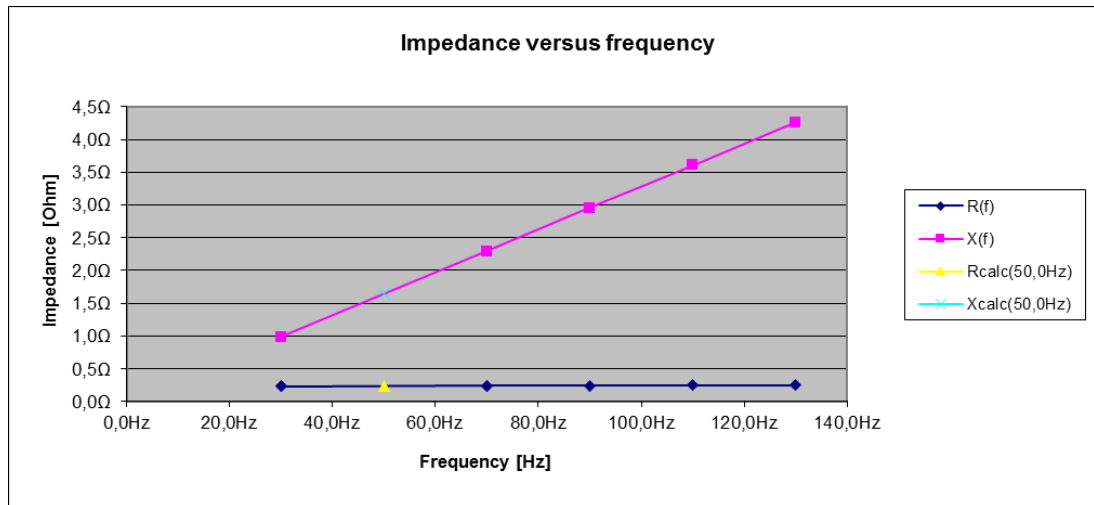
Omicron CPC 100-primäärikoestuslaite tallentaa mittausdatan XML-muodossa. Mittausdata ladataan tietokoneelle *Microsoft Excel* taulukkolaskennalle koodatulla *LineImp.xlt* makrolla. Makro muokkaa mittausdatan automaattisesti taulukkolaskennalle sopivaan muotoon. Muokkauksen jälkeen tulokset ovat heti analysoitavissa.

Mitatuista arvoista saadaan selville paljon tietoa, esimerkiksi mitattavan johdon geometriasta. Oletuksena vain keskeiset tiedot näkyvät taulukossa. Impedanssi-mittauksen kannalta kiinnostavimmat tulokset näkyvät kuvan 28 riveillä 52 ja 53. Lisää tietoja saadaan tarvittaessa avaamalla esiin piilotetut rivit.

| | | | | | |
|----|---|--------------|--------------|---------------|----------------|
| 24 | | | | | |
| 25 | Temperature Correction: | | | | |
| 26 | Material | Al | | | |
| 27 | Measurement Temperature | -10°C | | | |
| 28 | Reference Temperature | 25°C | | | |
| 29 | Temperature Correction Factor | 1,163 | | | |
| 30 | | | | | |
| 31 | Measurements: | R [Ω] | X [Ω] | Z [Ω] | Phi (°) |
| 32 | L1-L2: $Z_{L1} + Z_{L2}$ | 0,678 | 3,811 | 3,871 | 79,92° |
| 33 | L2-L3: $Z_{L2} + Z_{L3}$ | 0,697 | 4,356 | 4,412 | 80,91° |
| 34 | L3-L1: $Z_{L3} + Z_{L1}$ | 0,682 | 3,789 | 3,850 | 79,80° |
| 35 | L1-E: $Z_{L1} + Z_E$ | 0,638 | 3,014 | 3,081 | 78,05° |
| 36 | L2-E: $Z_{L2} + Z_E$ | 0,626 | 3,125 | 3,187 | 78,68° |
| 37 | L3-E: $Z_{L3} + Z_E$ | 0,669 | 2,849 | 2,926 | 76,78° |
| 38 | L1L2L3-E: $Z_{L1}/Z_{L2}/Z_{L3} + Z_E$ | 0,422 | 1,659 | 1,711 | 75,72° |
| 39 | Intermediate Results | | | | |
| 51 | Impedance results: | R [Ω] | X [Ω] | Z [Ω] | Phi (°) |
| 52 | Positive sequence impedance Z_1 | 0,343 | 1,993 | 2,022 | 80,24° |
| 53 | Zero sequence impedance Z_0 | 1,266 | 4,976 | 5,134 | 75,72° |
| 54 | | | | | |
| 55 | $k_L = Z_E / Z_L$ | | | | |
| 73 | R_E / R_L and X_E / X_L | | | | |
| 74 | | | | $R_E/R_L [1]$ | $X_E/X_L [1]$ |
| 75 | Residual Compensation Factor | | | 0,898 | 0,499 |
| 76 | Individual Factors for the different phases: | | | | |
| 77 | | | | $R_E/R_L [1]$ | $X_E/X_L [1]$ |
| 78 | L1: | | | 0,925 | 0,858 |
| 79 | L2: | | | 0,805 | 0,428 |
| 80 | L3: | | | 0,908 | 0,315 |
| 81 | L1 to L3 average: | | | 0,880 | 0,533 |

Kuva 28. Mittaustulosten käsittely

Mittaustulokset esitetään erillisillä välilehdillä myös graafisesti (kuva 29):



Kuva 29. Mittaustulosten esitys graafisesti

Mittaustuloksia voidaan verrata laskettuihin arvoihin joko tehtaan valmistamassa taulukossa tai erikseen laaditulla taulukolla, kuten taulukossa 10 esitetään:

Taulukko 10. Mitattujen arvojen vertaaminen laskettuihin arvoihin

| <i>Myötäimpedanssi Z_1</i> | | | | | |
|---|------------|-----------------|------------|------------------|-------------|
| <i>Mitattu</i> | | <i>Laskettu</i> | | <i>Poikkeama</i> | |
| R/Ω | X/Ω | R/Ω | X/Ω | $R_{dif}\%$ | $X_{dif}\%$ |
| 0,449 | 1,715 | 0,348 | 1,32 | 29 | 29,9 |

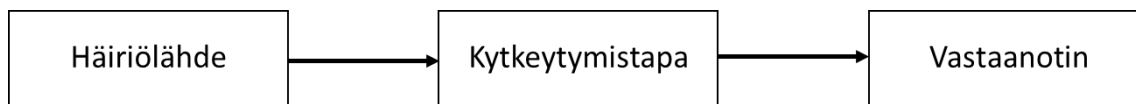
| <i>Nollaimpedanssi Z_o</i> | | | | | |
|---|--------------|-----------------|--------------|------------------|---------------|
| <i>Mitattu</i> | | <i>Laskettu</i> | | <i>Poikkeama</i> | |
| R_o/Ω | X_o/Ω | R_o/Ω | X_o/Ω | $R_o_{dif}\%$ | $X_o_{dif}\%$ |
| 1,277 | 3,789 | 1,221 | 3,216 | 4,6 | 17,8 |

8 Työturvallisuus

Impedanssimittaus tehdään jännitteettömänä. Mitattavassa johdossa saattaa kuitenkin esiintyä hengenvaarallisia jännitteitä mittaussilmukan ollessa auki. Vaarallisia jännitteitä voi kytkeytyä mitattavan johdon silmukkaan joko kapasitiivisesti, induktiivisesti tai galvaanisesti. Edellä mainituista erityisesti induktiivinen kytkeytyminen on otettava huomioon sen suuren vaikutusalueen vuoksi. Galvaaninen johtuminen voi tapahtua jonkin vian seurauksena, esim. toisen ristikkäisen johdon katkettua ja pudottua mitattavan johdon päälle.

8.1 Häiriöiden kytkeytyminen

Sähkömagneettisessa ympäristössä olevat häiriöt eivät aiheuta sähkölaitteille ongelmaa, elleivät ne pääse kytkeytymään sähkölaitteisiin. Suurjännitejohdot ovat alttiina monille ulkoisille häiriöille, koska niitä ei ole häiriösuojattu (lukuun ottamatta ukkosjohtimia). Kun kuvan 30 häiriöketju katkaistaan, sähkömagneettisista häiriöistä ei aiheudu haittaa. Suurjännitejohdoilla häiriöiden kytkeytyminen on estetty, kun johto on luotettavasti maadoitettu molemmista päistään. Häiriöiden kytkeytyminen voi tapahtua suurjännitejohdon ollessa jännitteinen tai sen ollessa maadoitettu ainoastaan toisesta päästään. [32, s. 21.]

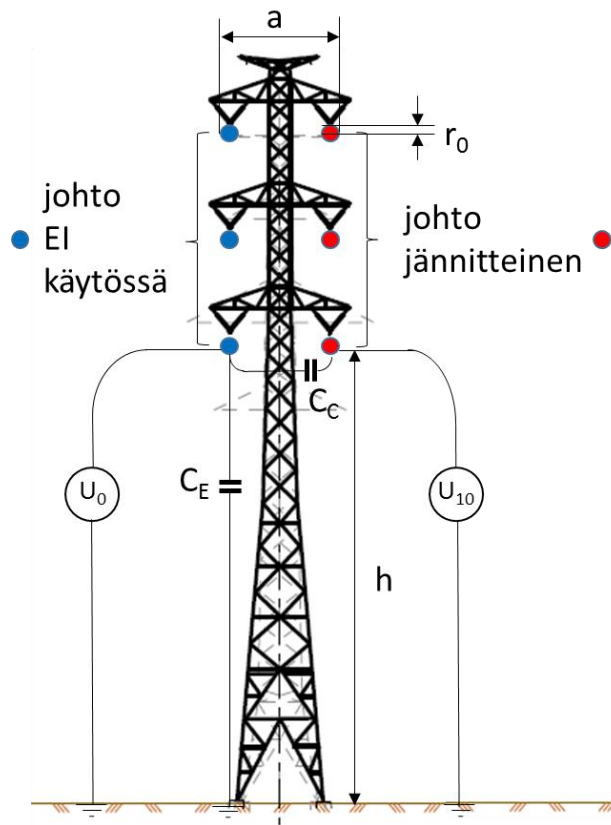


Kuva 30. Häiriön kytkeytymisketju [32, s. 21]

Impedanssimittaukselle haitallinen kytkeytyminen voi tapahtua, kun mitattavalla johdolla on rinnakkainen jännitteisenä oleva johto (ks. 7.1.3 *Rinnakkaisen johdon häiriövaikutuksen tarkistaminen*).

8.1.1 Kapasitiivinen kytkeytyminen

Kahden eri potentiaalissa olevan pisteen välillä on aina sähkökenttä. Siten kahden eri potentiaalissa olevan johtimen välillä on aina sähkökenttä, ja tällainen johdinpari toimii kuten kondensaattori. Esimerkiksi jännitteellisen voimajohdon kulkiessa rinnakkain toisen voimajohdon kanssa syntyy näiden välille sähkökenttä. Sähkökentän vaikutuksesta voimajohdossa mahdollisesti esiintyvät häiriöt kytkeytyvät rinnakkaiseen johtoon. Kuvan 31 esimerkissä esitetään kapasitiivinen kytkeytyminen kahden johtimen välillä. Todellisuudessa kaikkien johtimien keskinäiset suhteet, mukaan lukien ukkosjohtimet, tulisi ottaa huomioon todellisen kapasitanssin määrittämiseksi. Tässä esimerkissä tyydytään yksinkertaistettuun laskutapaan, koska ainostaan kapasitiivisen kytkeytymisen aiheuttama vaara halutaan osoittaa. Jos halutaan laskea todelliset arvot mahdollisimman tarkasti, silloin tässä yhteydessä esitetyt suuntaa antavat yhtälöt eivät päde. [29, s. 22.]



Kuva 31. Kaapasitiivinen kytkeytymen kahden johtimen välillä (johdon molemmissa päissä maadoituserotin on auki)

Järjestelmässä, jossa on yksi johdin, kapasitanssille maata vasten pätee yhtälö 29 (ks. seur. s.):

$$C_E \approx \frac{2\pi l \varepsilon_0}{\ln(2\frac{h}{r_0})} \quad (29)$$

jossa

- $l =$ johdon pituus
 $\varepsilon_0 =$ tyhjiön suhteellinen permittiivisyys 8,85 pF/m (ilman suhteellinen permittiivisyys on likimain sama)
 $h =$ johtimen ja maan välinen etäisyys
 $r_0 =$ johtimen/johdinnipun ekvivalenttisäde. [33, s. 42.]

Jännitteettömän ja jännitteisen johtimen välinen keskinäiskapasitanssi C_C voidaan laskea likimääräisesti yhtälöllä:

$$C_C \approx \frac{\pi l \varepsilon_0}{\ln(\frac{a}{r_0})} \quad (30)$$

Häiriöjännite U_0 voidaan ratkaista likimääräisesti yhtälöllä: [10, s. 467.]

$$U_0 \approx U_{10} \cdot \frac{C_C}{C_E + C_C} \quad (31)$$

Kun yhtälöihin 29 ja 30 sijoitetaan lähtöarvot $U_{10} = 110 \text{ kV} / \sqrt{3}$, $a = 7 \text{ m}$, $h = 27 \text{ m}$, $l = 1000 \text{ m}$, $r_0 = 0,05 \text{ m}$ ja sijoittamalla saadut tulokset yhtälöön 31, saadaan häiriöjännitteeksi U_0 :

$$U_0 = \frac{110000 \text{ V}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{7,82 \cdot 10^{-9} \text{ F}}{9,93 \cdot 10^{-9} \text{ F} + 7,82 \cdot 10^{-9} \text{ F}} \approx 26 \text{ kV} \quad (32)$$

Keskinäiskapasitanssin C_C läpi kulkeva virta voidaan laskea yhtälöllä:

$$I_C \approx U_{10} \cdot \omega \cdot C_C \quad (33)$$

Kun yhtälöön 33 sijoitetaan edellä lasketut arvot, saadaan keskinäiskapasitanssin C_C läpi kulkevaksi virraksi 112 mA/km. [29.]

Kuten edellä esitetystä esimerkistä havaittiin, maadoittamattoman johdon kapasitiivisesta kytkeytymisestä johtuva häiriöjännite U_0 voi olla hyvin suuri. Impedanssimittauksissa mitattavan johdon vasta-aseman maadoituserotin pidetään kiinni koko mittauksen ajan, jolloin kapasitiivista jännitettä ei *pitäisi* esiintyä. Mittauksia suoritettaessa kapasitiivisesta kytkeytymisestä mahdollisesti aiheutuva häiriöjännite on aina otettava huomioon. Impedanssimittauksia tehdessä on noudatettava tarkasti laitevalmistajan, verkonhaltijan sekä viranomaisten antamia turvallisuusohjeita.

8.1.2 Induktiivinen kytkeytyminen

Virrallinen johdin aiheuttaa ympärilleen magneettikentän, joka voi ulottua rinnakkaisen johdon johtimille asti. Induktiivisesti kytkeytyvän jännitteen suuruus on suoraan verrannollinen häiritsevän johdon virran voimakkuuteen ja taajuuteen sekä kääntäen verrannollinen rinnakkaisten johtojen keskinäiseen etäisyyteen. Jännitteen suuruuteen vaikuttaa edellä esitetyn lisäksi rinnakkain kulkevien johtojen pituus. [34, s. 172.]

Induktion vaikutus on merkittävää 110 kV suuremmilla jännitteillä, joissa kuormitus- ja maasulkuvirrat ovat riittävän suuria induktion aikaansaamiseksi. Keskijänniteverkon pienistä maasulkuvirroista johtuen niiden induktiovaikutuksista ei ole normaalissa käyttötilanteessa vaaraa.

Johdon normaali kuormitusvirta indusoi harvoin vaarallisen suuria häiriöjännitteitä. Vaarallisen suuria häiriöjännitteitä voi syntyä lähinnä johdon vikatilanteiden seurauksena. Induktiivisen kytkeytymisen kannalta pahin tapaus on vaiheen ja maan välillä tapahtuva 1-vaiheinen oikosulku. Sen suuri indusoiva vaikutus syntyy hyvin syvälle maahan menevästä oikosulkuvirrasta sekä sen muodostamasta hyvin laajasta virtasilmukasta. [5, s.11 - 13.]

Oletetaan, että rinnakkaisen johdon vikavirta on 3 000 A luokkaa ja johtojen keskinäisinduktanssi noin 0,44 mH/km sekä johdon pituus 10 km. Näiden olettamusten perusteella voidaan rinnakkaiseen johtoon indusoituva jännite helposti laskea yhtälöllä:

$$U_2 = I_f \cdot \omega \cdot M \quad (34)$$

jossa

U_2 = mitattavaan johtoon indusoitunut jännite

I_f = rinnakkaisessa johdossa kulkeva vikavirta

ω = kulmataajuus

M = keskinäisinduktanssi.

Syöttämällä edellä annetut lähtötiedot yhtälöön 34 (ks. ed. s.) saadaan indusoituneeksi häiriöjännitteeksi 4,15 kV. Impedanssimittauksia tehdessä on noudatettava erityistä varovaisuutta myös mahdollisen indusoitumalla kytkeytyvän häiriöjännitteen vuoksi.

9 Mittaustulosten analysointi

Laskettuja myötä- ja nollaverkon verkon impedansseja (Z_1/Z_0) verrataan mittaamalla saatuihin tuloksiin sekä lasketaan niiden virheprosentit. Mitattuja ja laskettuja impedansseja analysoidaan myös tilastollisilla menetelmillä (ks. 9.4 *Mittaustulosten tilastollinen analysointi*). Mitatuista impedansseista lasketaan seuraavat parametrit:

R'_k = johtimen resistanssi [Ω/km]

R_e = maapiirin resistanssi [Ω/km]

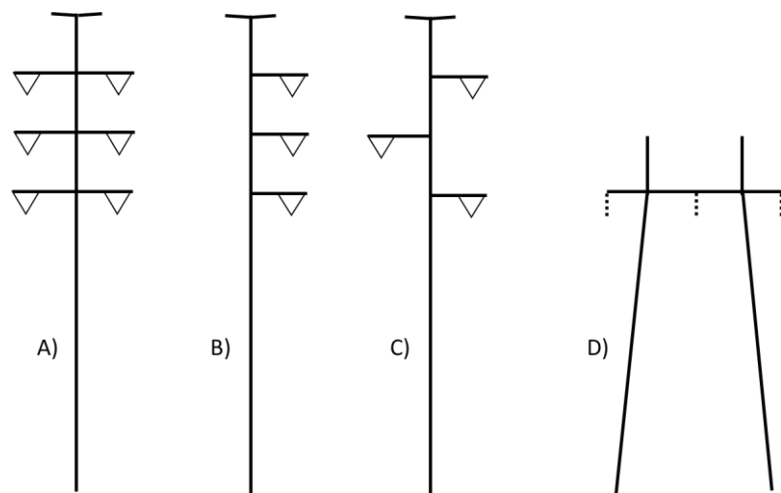
X_e = maapiirin reaktanssi [Ω/km]

Z_e = maapiirin impedanssi [Ω/km].

Analysoitavat mittaukset on tehty vuosina 2004 - 2014 neljän eri kaupunkiverkkoyhtiön alueella. Pääosa mitatuista avojohdoista on rakenteeltaan tilaa säästäviä *tannenbaum* tyyppisiä johtoja, joissa voi olla myös rinnakkainen johto. Liitteessä 1 esitetyt johtotiedot on järjestetty pituuden ja lajin mukaan. Mitatut johdot on lajiteltu avojohdoin, kaapeleihin ja niiden yhdistelmiin, niiden erilaisten fyysisten ominaisuuksien vuoksi. Mittauksia on tehty lähes kaikille 110 kV:n johdoille ja kaapeleille sekä niiden yhdistelmille.

9.1 Avojohtojen impedanssimittaukset

Mitatut 110 kV:n avojohdot (OHL) ovat rakenteeltaan *tannenbaum* tyyppisiä vapaasti seisovia pylväitä, jotka on suojattu ukkosjohtimilla. *Tannenbaum*-pylväillä reduktiokerroin k_s vaihtelee suuremmissa rajoissa kuin portaalipyväillä (ks. 3.3 *Reduktiovaikutus*). Suurempi vaihtelu johtuu siitä, että *tannenbaum*-pylväissä vaihejohtimet on usein asennettu pylvääseen vertikaalisesti, mikä johtaa suurempaan epäsymmetriaan suhteessa ukkosjohtimiin. Kuvassa 32 esitetään tavallisimpia Suomessa käytettyjä suurjännite avojohdosten pylväsrakenteita. Epäsymmetrian vaikutusta vaihejohtimien impedansseihin on mahdollista tutkia Omicron CPC 100-primäärikoestuslaitteella saatujen mittaustulosten perusteella. Avojohtojen mitatut ja lasketut impedanssit esitetään liitteessä 1.



Kuva 32. Erilaisia johtopylväitä. a) vapaasti seisova tannenbaum-pylväs, kaksi johtoa, b) vapaasti seisova tannenbaum -pylväs, yksi johto, c) Vapaasti seisova tannenbaum-pylväs, kolmioasennus, d) harustettu portaalipiiri.

9.1.1 Avojohtojen maapiirin impedanssi

Taulukossa 11 (ks. seur. s.) näkyvät avojohdoille lasketut johdon maapiirin resistanssit, reaktanssit ja impedanssit [Ω/km]. Lisäksi taulukossa näkyvät vastaavat parametrit johdon koko pituudelle laskettuna.

Taulukko 11. Mittaustuloksista lasketut suurjänniteavojohtojen maapiirin parametrit

| LASKETUT PARAMETRIT | | | | | | | |
|---------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| Nro | OHL | | | | | | |
| | R'_k [Ω/km] | R_e [Ω] | X_e [Ω] | Z_e [Ω] | $R_é$ [Ω/km] | $X_é$ [Ω/km] | $Z_é$ [Ω/km] |
| 1 | 0,090 | 0,465 | 1,829 | 1,887 | 0,036 | 0,141 | 0,145 |
| 2 | 0,049 | 0,498 | 1,665 | 1,732 | 0,038 | 0,128 | 0,134 |
| 3 | 0,096 | 0,392 | 1,508 | 1,558 | 0,038 | 0,146 | 0,151 |
| 4 | 0,056 | 0,199 | 1,005 | 1,024 | 0,021 | 0,107 | 0,109 |
| 5 | 0,081 | 0,413 | 1,457 | 1,514 | 0,044 | 0,156 | 0,162 |
| 6 | 0,092 | 0,301 | 1,242 | 1,278 | 0,040 | 0,163 | 0,168 |
| 7 | 0,050 | 0,308 | 0,994 | 1,037 | 0,045 | 0,146 | 0,153 |
| 8 | 0,057 | 0,294 | 1,004 | 1,044 | 0,043 | 0,148 | 0,154 |
| 9 | 0,116 | 0,304 | 0,995 | 1,041 | 0,045 | 0,149 | 0,156 |
| 10 | 0,082 | 0,228 | 0,899 | 0,927 | 0,035 | 0,139 | 0,144 |
| 11 | 0,050 | 0,284 | 1,080 | 1,115 | 0,044 | 0,167 | 0,173 |
| 12 | 0,048 | 0,212 | 0,893 | 0,917 | 0,034 | 0,142 | 0,146 |
| 13 | 0,051 | 0,202 | 0,803 | 0,827 | 0,034 | 0,134 | 0,138 |
| 14 | 0,062 | 0,209 | 0,706 | 0,737 | 0,040 | 0,137 | 0,142 |
| 15 | 0,056 | 0,337 | 0,716 | 0,776 | 0,066 | 0,140 | 0,152 |
| 16 | 0,106 | 0,230 | 0,755 | 0,789 | 0,045 | 0,148 | 0,155 |
| 17 | 0,098 | 0,149 | 0,581 | 0,600 | 0,036 | 0,142 | 0,147 |
| 18 | 0,060 | 0,173 | 0,601 | 0,626 | 0,043 | 0,149 | 0,155 |
| 19 | 0,051 | 0,164 | 0,497 | 0,521 | 0,059 | 0,177 | 0,186 |
| 20 | 0,083 | 0,176 | 0,478 | 0,508 | 0,065 | 0,177 | 0,188 |
| 21 | 0,102 | 0,102 | 0,331 | 0,347 | 0,047 | 0,152 | 0,159 |
| 22 | 0,077 | 0,075 | 0,298 | 0,307 | 0,051 | 0,206 | 0,212 |
| max= | | | | | 0,066 | 0,206 | 0,212 |
| ka.= | | | | | 0,043 | 0,150 | 0,156 |
| min= | | | | | 0,021 | 0,107 | 0,109 |

Taulukossa 11 esitetyille maapiirin resistanssin, reaktanssin ja impedanssin arvoille laskettiin myös minimi ja maksimit sekä keskiarvot. Tulosten perusteella vaihteluvälit suhteessa keskiarvoon olivat:

- maapiirin resistanssi $R_é$ +0,023 Ω/km / -0,022 Ω/km
- maapiirin reaktanssi $X_é$ +0,056 Ω/km / -0,043 Ω/km
- maapiirin impedanssi $Z_é$ +0,056 Ω/km / -0,047 Ω/km.

Mikäli impedanssimittausten arviointiin ei ole käytettävissä laskentaohjelmilla saatuja laskettuja arvoja, voidaan taulukossa 11 esitettyjä keskiarvoja käyttää maapiirin impedanssin likimääräiseen arviointiin. Likiarvot pätevät kun kysymyksessä on mitattuja johdot ja ominaisuuksia vastaavat olosuhteet. Likiarvoja ei saa käyttää distanssireleen asetteluarvojen laskemiseen.

9.1.2 Myötä- ja nollaverkon tulosten vertailu

Taulukossa 12 näkyvät myötä- ja nollaverkon laskettujen arvojen virheprosentit suhteessa mitattuihin arvoihin.

Taulukko 12. Laskettujen myötä- ja nollaverkon resistanssi-, reaktanssi- ja impedanssiarvojen virheprosentit (itseisarvo)

| LASKETUT VIRHEPROSENTIT | | | | | | |
|-------------------------|-------------|--------|--------|-------------|--------|--------|
| Johto Nro | Myötäverkko | | | Nollaverkko | | |
| | R_k | X_k | Z_k | R_0 | X_0 | Z_0 |
| 1 | 7,33 | 1,20 | 1,52 | 26,07 | 23,98 | 24,10 |
| 2 | 1,75 | 0,20 | 0,14 | 11,87 | 0,73 | 1,38 |
| 3 | 11,45 | 3,29 | 3,81 | 28,99 | 12,42 | 13,53 |
| 4 | 3,41 | 3,45 | 3,45 | 52,14 | 18,78 | 20,51 |
| 5 | 3,31 | 0,69 | 0,81 | 3,76 | 2,48 | 2,11 |
| 6 | 10,47 | 1,74 | 2,25 | 15,70 | 2,35 | 1,26 |
| 7 | 3,79 | 0,65 | 0,74 | 1,26 | 0,92 | 0,95 |
| 8 | 5,40 | 5,70 | 5,69 | 20,47 | 18,31 | 18,44 |
| 9 | 1,54 | 0,11 | 0,22 | 6,57 | 20,36 | 19,31 |
| 10 | 0,38 | 1,58 | 1,52 | 3,96 | 5,02 | 4,96 |
| 11 | 3,25 | 2,07 | 2,11 | 24,67 | 12,57 | 13,21 |
| 12 | 3,65 | 5,61 | 5,56 | 38,59 | 19,10 | 19,96 |
| 13 | 10,93 | 4,46 | 4,64 | 31,82 | 22,39 | 22,84 |
| 14 | 4,02 | 15,60 | 14,73 | 14,74 | 7,84 | 8,38 |
| 15 | 1,75 | 0,05 | 0,01 | 9,79 | 4,48 | 3,25 |
| 16 | 11,87 | 7,36 | 7,71 | 16,26 | 9,39 | 9,97 |
| 17 | 2,26 | 0,12 | 0,24 | 0,59 | 5,47 | 5,12 |
| 18 | 0,83 | 1,14 | 0,97 | 16,95 | 18,69 | 18,55 |
| 19 | 2,78 | 3,26 | 3,25 | 7,38 | 0,09 | 0,41 |
| 20 | 1,79 | 3,81 | 3,52 | 5,73 | 14,17 | 13,43 |
| 21 | 3,60 | 3,84 | 3,83 | 7,95 | 3,13 | 3,48 |
| 22 | 17,12 | 27,02 | 26,43 | 4,48 | 10,32 | 9,37 |
| Virhe% max= | 17,117 | 27,021 | 26,433 | 52,135 | 23,983 | 24,100 |
| Virhe% ka.= | 5,122 | 4,226 | 4,234 | 15,897 | 10,590 | 10,660 |
| Virhe% min= | 0,379 | 0,052 | 0,014 | 0,592 | 0,085 | 0,409 |

Taulukon 12 tuloksista havaittiin, että myötäverkon impedanssin keskimääräinen virhe on 4,234 %. Myötäverkon impedanssin maksimi virhe on 26,433 % ja minimi 0,014 %. Nollaverkon impedanssin keskimääräinen virhe on 10,660 %. Nollaverkon impedanssin maksimi virhe on 24,100 % ja minimi 0,409 %. Virheprosentit ovat itseisarvoja.

9.2 Suurjännitekaapelien impedanssimittaukset

Suurjännitekaapeleilla (UGC) tarkoitetaan tässä yhteydessä maan alle asennettuja kaapeleita. Kaapelit ovat yksivaiheisia ja ne on asennettu mahdollisuuden mukaan kolmioon. Mitattujen suurjännitekaapelien yleisin johdinmateriaali on alumiini, mutta muutamia alumiini/kupari yhdistelmiä on myös mitattu. Suurjännitekaapelien mitatut ja lasketut impedanssit esitetään liitteessä 1.

9.2.1 Suurjännitekaapelin maapiirin impedanssi

Taulukossa 13 näkyvät suurjännitekaapeleille lasketut maapiirin resistanssit, reaktanssit ja impedanssit [Ω/km]. Lisäksi taulukossa näkyvät vastaavat parametrit johdon koko pituudelle laskettuna. Huomautuksena mainittakoon, että lasketut AHXLMK-W 800 -johdon resistanssit R'_k vastaavat hyvin tarkasti kaapelivalmistajien taulukoissa (ks. liite 3) ilmoitettua vaihtovirtaresistanssin arvoa 0,053 Ω/km +65 °C asteen lämpötilassa (kolmioasennus).

Taulukko 13. Mittaustuloksista lasketut suurjännitekaapelien maapiirin parametrit

| LASKETUT PARAMETRIT | | | | | | | |
|---------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Nro | UGC - AHXLMK 800/AL | | | | | | |
| | R'_k [Ω/km] | R_e [Ω] | X_e [Ω] | Z_e [Ω] | R'_e [Ω/km] | X'_e [Ω/km] | Z'_e [Ω/km] |
| 23 | 0,054 | 0,452 | 0,079 | 0,389 | 0,100 | 0,017 | 0,086 |
| 26 | 0,053 | 0,405 | 0,077 | 0,363 | 0,112 | 0,021 | 0,101 |
| 27 | 0,053 | 0,345 | 0,037 | 0,289 | 0,104 | 0,011 | 0,087 |
| 29 | 0,054 | 0,221 | 0,023 | 0,181 | 0,085 | 0,009 | 0,070 |
| 31 | 0,054 | 0,196 | 0,018 | 0,158 | 0,085 | 0,008 | 0,069 |
| max= | | | | | 0,112 | 0,021 | 0,101 |
| ka.= | | | | | 0,097 | 0,013 | 0,082 |
| min= | | | | | 0,085 | 0,008 | 0,069 |
| Nro | UGC - AHXLMK 1200/AL | | | | | | |
| | R'_k [Ω/km] | R_e [Ω] | X_e [Ω] | Z_e [Ω] | R'_e [Ω/km] | X'_e [Ω/km] | Z'_e [Ω/km] |
| 25 | 0,046 | 0,351 | 0,034 | 0,291 | 0,095 | 0,009 | 0,079 |
| 28 | 0,046 | 0,292 | 0,035 | 0,241 | 0,091 | 0,011 | 0,075 |
| 30 | 0,051 | 0,230 | 0,029 | 0,189 | 0,091 | 0,012 | 0,075 |
| max= | | | | | 0,095 | 0,012 | 0,079 |
| ka.= | | | | | 0,092 | 0,010 | 0,076 |
| min= | | | | | 0,091 | 0,009 | 0,075 |

Taulukossa 13 (ks. ed. s.) esitetyille maapiirin resistanssin, reaktanssin ja impedanssin arvoille laskettiin myös minimi ja maksimit sekä keskiarvot. Tulosten perusteella vaihteluvälit suhteessa keskiarvoon olivat:

i) Alumiinikaapeli AHXLMK-W 800/110 kV

- maapiirin resistanssi $R_{\epsilon} +0,015 \Omega/\text{km} / -0,012 \Omega/\text{km}$
- maapiirin reaktanssi $X_{\epsilon} +0,008 \Omega/\text{km} / -0,005 \Omega/\text{km}$
- maapiirin impedanssi $Z_{\epsilon} +0,019 \Omega/\text{km} / -0,013 \Omega/\text{km}$.

ii) Alumiinikaapeli AHXLMK-W 1200/110 kV

- maapiirin resistanssi $R_{\epsilon} +0,003 \Omega/\text{km} / -0,001 \Omega/\text{km}$
- maapiirin reaktanssi $X_{\epsilon} +0,002 \Omega/\text{km} / -0,001 \Omega/\text{km}$
- maapiirin impedanssi $Z_{\epsilon} +0,003 \Omega/\text{km} / -0,001 \Omega/\text{km}$.

Mikäli impedanssimittausten arviointiin ei ole käytettävissä laskentaohjelmilla saatuja laskettuja arvoja, voidaan taulukossa 13 (ks. ed. s.) esitettyjä keskiarvoja käyttää varauksin maapiirin impedanssin likimääräiseen arviointiin, koska saadut tulokset perustuvat pieneen joukkoon mittauksia. Likiarvot pätevät kun kysymyksessä on mitattuja johtoja ja ominaisuuksia vastaavat olosuhteet. Likiarvoja ei saa käyttää distanssireleen asettelu-arvojen laskemiseen.

9.2.2 Myötä- ja nollaverkon tulosten vertailu

Taulukossa 14 (ks. seur. s.) esitetään myötä- ja nollaverkon laskettujen arvojen virheprosentit suhteessa mitattuihin arvoihin:

Taulukko 14. Mitattujen ja laskettujen myötä- ja nollaverkon resistanssi-, reaktanssi- ja impedanssiarvojen virheprosentit.

| LASKETUT VIRHEPROSENTIT | | | | | | |
|-------------------------|-------------|--------|--------|-------------|--------|--------|
| Johto | Myötäverkko | | | Nollaverkko | | |
| Nro | R_k | X_k | Z_k | R_0 | X_0 | Z_0 |
| 23 | 0,41 | 3,95 | 3,41 | 12,11 | 16,95 | 13,09 |
| 24 | 9,18 | 1,09 | 1,80 | 12,51 | 2,72 | 9,48 |
| 25 | 6,98 | 3,98 | 4,39 | 25,00 | 7,20 | 20,52 |
| 26 | 4,71 | 5,98 | 4,21 | 19,79 | 6,47 | 14,58 |
| 27 | 2,81 | 1,18 | 0,59 | 8,73 | 33,08 | 13,05 |
| 28 | 2,70 | 1,56 | 1,71 | 36,49 | 9,00 | 29,27 |
| 29 | 0,71 | 2,52 | 2,00 | 4,49 | 34,79 | 10,87 |
| 30 | 17,69 | 13,23 | 13,83 | 26,95 | 19,85 | 18,98 |
| 31 | 4,03 | 1,37 | 1,78 | 7,59 | 14,53 | 3,01 |
| 32 | 0,63 | 8,58 | 6,79 | 6,75 | 6,54 | 6,70 |
| 33 | 15,04 | 0,43 | 3,21 | 12,99 | 5,19 | 10,87 |
| Virhe% max= | 17,692 | 13,231 | 13,832 | 36,488 | 34,794 | 29,269 |
| Virhe% ka.= | 5,899 | 3,989 | 3,974 | 15,763 | 14,211 | 13,675 |
| Virhe% min= | 0,407 | 0,435 | 0,592 | 4,489 | 2,716 | 3,008 |

Taulukon 14 tuloksista havaittiin, että myötäverkon impedanssin keskimääräinen virhe on 3,974 %. Myötäverkon impedanssin maksimi virhe on 13,832 % ja minimi 0,592 %. Nollaverkon impedanssin keskimääräinen virhe on 13,675 %. Nollaverkon impedanssin maksimi virhe on 29,269 % ja minimi 3,008 %. Virheprosentit ovat itseisarvoja.

9.3 Yhdistelmäjohtojen impedanssimittaukset

Yhdistelmäjohtojen (MIX) tarkoitetaan tässä yhteydessä avojohdon ja kaapelin yhdistelmää. Mittausten suorittamisen kannalta työskentely ei poikkea puhtaan avojohdon tai kaapelin mittaamisesta. Yhdistelmäjohtojen mitatut ja lasketut impedanssit esitetään liitteessä 1.

9.3.1 Yhdistelmäjohtojen maapiirin impedanssi

Taulukossa 15 (ks. seur. s.) näkyvät yhdistelmäjohtojen lasketut maapiirin resistanssit, reaktanssit ja impedanssit [Ω/km]. Lisäksi taulukossa näkyvät vastaavat parametrit johdon koko pituudelle laskettuna.

Taulukko 15. Mittaustuloksista lasketut yhdistelmäjohtojen maapiirin parametrit.

| LASKETUT PARAMETRIT | | | | | | | |
|---------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| Nro | MIX | | | | | | |
| | R'_k [Ω/km] | R_e [Ω] | X_e [Ω] | Z_e [Ω] | $R_ē$ [Ω/km] | $X_ē$ [Ω/km] | $Z_ē$ [Ω/km] |
| 34 | 0,086 | 0,350 | 1,080 | 1,134 | 0,047 | 0,144 | 0,151 |
| 35 | 0,087 | 0,265 | 0,979 | 1,014 | 0,040 | 0,149 | 0,154 |
| 36 | 0,073 | 0,439 | 0,515 | 0,650 | 0,068 | 0,080 | 0,101 |
| 37 | 0,096 | 0,243 | 0,766 | 0,803 | 0,045 | 0,141 | 0,147 |
| 38 | 0,077 | 0,403 | 0,529 | 0,647 | 0,087 | 0,115 | 0,140 |
| 39 | 0,085 | 0,291 | 0,632 | 0,692 | 0,071 | 0,155 | 0,169 |
| max= | | | | | 0,087 | 0,155 | 0,169 |
| ka.= | | | | | 0,060 | 0,131 | 0,144 |
| min= | | | | | 0,040 | 0,080 | 0,101 |

Taulukossa 15 esitetyille maapiirin resistanssin, reaktanssin ja impedanssin arvoille laskettiin myös minimit ja maksimit sekä keskiarvot. Tulosten perusteella vaihteluvälit suhteessa keskiarvoon olivat:

- maapiirin resistanssi $R_ē$ +0,027 Ω/km / -0,020 Ω/km
- maapiirin reaktanssi $X_ē$ +0,024 Ω/km / -0,051 Ω/km
- maapiirin impedanssi $Z_ē$ +0,025 Ω/km / -0,043 Ω/km.

Mikäli impedanssimittausten arviointiin ei ole käytettävissä laskentaohjelmilla saatuja laskettuja arvoja, voidaan taulukossa 15 esitettyjä keskiarvoja varauksin käyttää maapiirin impedanssin likimääräiseen arviointiin. Likiarvot pätevät kun kysymyksessä on mitattuja johtoja ja ominaisuuksia vastaavat olosuhteet. Likiarvoja ei saa käyttää distanssi-releen asetteluarvojen laskemiseen.

9.3.2 Myötä- ja nollaverkon tulosten vertailu

Taulukossa 16 (ks. seur. s.) esitetään myötä- ja nollaverkon laskettujen arvojen virheprosentit suhteessa mitattuihin arvoihin.

Taulukko 16. Laskettujen myötä- ja nollaverkon resistanssi-, reaktanssi- ja impedanssiarvojen virheprosentit.

| LASKETUT VIRHEPROSENTIT | | | | | | |
|-------------------------|-------------|--------|--------|-------------|--------|--------|
| Johto | Myötäverkko | | | Nollaverkko | | |
| Nro | R_k | X_k | Z_k | R_0 | X_0 | Z_0 |
| 34 | 8,70 | 1,40 | 1,79 | 15,70 | 17,24 | 17,12 |
| 35 | 7,21 | 1,49 | 1,80 | 26,93 | 14,18 | 15,00 |
| 36 | 1,91 | 0,25 | 0,08 | 7,72 | 1,33 | 2,84 |
| 37 | 0,76 | 2,64 | 2,52 | 1,04 | 3,23 | 2,89 |
| 38 | 1,70 | 0,40 | 0,25 | 24,76 | 5,09 | 9,31 |
| 39 | 29,02 | 29,92 | 29,87 | 4,59 | 17,82 | 16,23 |
| Virhe% max= | 29,023 | 29,924 | 29,866 | 26,926 | 17,817 | 17,125 |
| Virhe% ka.= | 8,217 | 6,018 | 6,050 | 13,456 | 9,815 | 10,567 |
| Virhe% min= | 0,765 | 0,248 | 0,080 | 1,038 | 1,331 | 2,845 |

Taulukon 16 tuloksista havaittiin, että myötäverkon impedanssin keskimääräinen virhe on 6,050 %. Myötäverkon impedanssin maksimi virhe on 29,866 % ja minimi 0,080 %. Nollaverkon impedanssin keskimääräinen virhe on 10,567 %. Nollaverkon impedanssin maksimi virhe on 17,125 % ja minimi 2,845 %. Virheprosentit ovat itseisarvoja.

9.4 Mittaustulosten tilastollinen analysointi

Mittaustulosten ja laskettujen virheprosenttien perusteella voitiin havaita, että johtojen, kaapelien sekä niiden yhdistelmien myötäverkon impedanssit on mahdollista laskea kohtuullisella noin 5 %:n tarkkuudella. Mittaustulokset osoittavat, että nollaverkon impedansseissa on selvää hajontaa poikkeaman keskiarvon ollessa noin 15 %. Mittaustuloksia voidaan analysoida tilastollisilla menetelmillä ja selvittää onko saaduilla tuloksilla myös tilastollista merkitystä.

9.4.1 Tilastollisen testin valinta

Tilastollinen testaus koostuu karkeasti seuraavista vaiheista:

- hypoteesin asettaminen
- otoksen poimiminen
- tunnuslukujen tai havaittujen frekvenssien laskeminen otoksesta
- testin valinta
- testimuuttujan arvon laskeminen
- testimuuttujan arvon vertaaminen todennäköisyysjakauman kriittisiin arvoihin
- tuloksen tulkinta ja johtopäätösten tekeminen.

Tilastollisen testin tärkein vaihe on tapaukseen sopivan testin valinta. Impedanssimitauksissa kiinnostavat mitattujen ja laskettujen arvojen väliset erot. Tutkittavia parametreja ovat perusjoukon keskiarvo ja keskihajonta. Tutkittavan aineiston koko on yhteensä 39 kpl ja se on jaettu edelleen kolmeen eri alaluokkaan: 110 kV:n johdot (22 kpl), 110 kV:n kaapelit (11 kpl) ja 110 kV:n yhdistelmä johdot (6 kpl, kaapelien ja johtojen yhdistelmät). Koska tutkittavan aineiston koko on näin pieni, voidaan kokeilla verrannollisten pariin t-testiä. Impedanssimittausten tulokset on kerätty *MS Excel*-taulukkoon. Taulukkolaskenta sisältää tilastollisia analysointityökaluja, joilla tarvittavat testit on helppo tehdä. Analysointityökalun avulla voidaan automaattisesti laskea kaikki tunnusluvut sekä testimuuttuja. Tulosten analysointi on tehtävä saatujen analyysien ja graafisten esitysten perusteella.

Koska laskettuja arvoja halutaan verrata mitattuihin arvoihin voivat arvot olla joko yhtä suuria, pienempiä tai suurempia kuin mitatut arvot. Testiksi on valittava kaksisuuntainen t-testi. Tällöin testin nollahypoteesiksi voidaan asettaa H_0 : *Lasketut myötä- tai nollaverkon impedanssit eivät poikkea mitatuista*. Nollahypoteesi ja vaihtoehtoinen hypoteesi ovat: $H_0: \mu_1 = \mu_2$ ja $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$. [35, s. 190, 204.]

9.4.2 Verrannollisten parien t-testi

Verrannollisten parien t-testi tehdään *MS Excel* -taulukkokaskennan tilastollisten analysointi työkalujen avulla (kuva 33). Työkaluun syötetään esimerkiksi myötaverkon mitatut ja lasketut arvot muuttujan alueisiin 1. ja 2. Arvioitu keskiarvojen ero asetetaan oletuksena nolaksi. Alfa-arvoksi eli merkitsevyytasoksi asetetaan 1 % eli lukuarvo 0,01.

Kuva 33. *MS Excel* tietojen analysointityökalu (Parittainen kahden otoksen t-testi keskiarvoille)

A. Parittainen kahden otoksen t-testi johtojen myötaverkon impedansseille

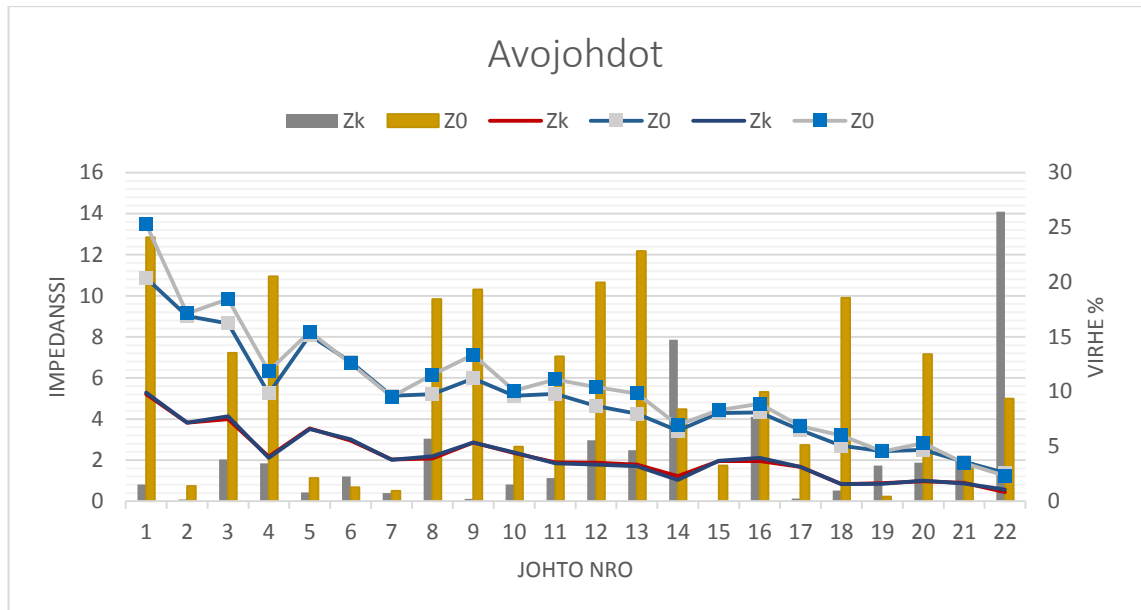
Tehdään parittainen kahden otoksen t-testi avojohtojen myötaverkon impedansseille. Kun tarvittavat tiedot on syötetty analysointityökalun ikkunaan, saadaan seuraava taulukon 17 (ks. seur. s.) mukainen tilastollinen tuloste johtojen myötaverkon mitatuille ja lasketuille impedansseille:

Taulukko 17. Parittainen kahden otoksen t-testi johtojen myötäverkon impedansseille (mukautettu)

| <i>Parametri</i> | <i>Z_k</i> | <i>Z_k</i> |
|------------------------------|----------------------|----------------------|
| Keskiarvo | 2,15 | 2,16 |
| Varianssi | 1,40 | 1,46 |
| Havainnot | 22 | 22 |
| Pearsonin korrelaatio | 1,00 | |
| Vapausaste (va) | 21 | |
| t Tunnusluvut | -0,47 | |
| P(T<=t) kaksisuuntainen | 0,65 | |
| t-kriittinen kaksisuuntainen | 2,83 | |

Taulukossa 17 parametri *Keskiarvo* kertoo mikä on kunkin otoksen keskiarvo. Parametrilla *Varianssi* tarkoitetaan keskihajonnan neliötä ja sillä kuvataan otoksen tiheyttä. Mitä pienempi on varianssin arvo sitä lähempänä pariin arvot ovat toisiaan. Parametri *Havainnot* kertoo otoksien lukumäärän. Parametri *Pearsonin korrelaatio* ilmaisee, kuinka lineaarinen arvojoukko on. Pearsonin luku vaihtelee välillä $-1 \leq r \leq +1$. Luku -1 ilmaisee laskevaa ja luku $+1$ nousevaa otosten suoraa. Parametri *t Tunnusluvut* (testisuure) on hyvin tärkeä johtopäätösten teon kannalta. Jos testisuure on suurempi kuin kriittinen arvo, on hypoteesi H_0 hylättävä. Taulukon 17 tapauksessa Hypoteesi H_0 jää voimaan 1 %:n merkitsevyystasolla.

Parametrilla *va* tarkoitetaan vapausastetta, joka saadaan vähentämällä havaintojen lukumäärästä arvo 1 ($f = n - 1$). Vapausasteen ja merkitsevyysasteen avulla voidaan taulukokirjasta selvittää t-testin kriittinen *t-kriittinen kaksisuuntainen* arvo. Parametri *P(T<=t) kaksisuuntainen* (p-arvo) ilmaisee erehtymisen todennäköisyyttä, kun hypoteesi H_0 hylätään. Jos taulukon 17 perusteella hypoteesi H_0 : *Lasketut myötäverkon impedanssit eivät poikkea mitatuista* hylätään, on erehtymisen todennäköisyys 65 %. Tilastollisen analyysin perusteella laskettuja myötäverkon impedansseja Z_k voidaan pitää jokseenkin luotettavina. [35, s. 233.]



Kuva 34. Mitattujen ja laskettujen johdon impedanssien kuvaajat. Palkit kuvaavat myötä- ja nol-laverkon impedanssien virheprosentteja

B. Parittainen kahden otoksen t-testi johtojen nol-laverkon impedansseille

Tehdään parittainen kahden otoksen t-testi avojohtojen nol-laverkon impedansseille. Lähtötiedot syötetään analysointi työkaluun ja tulokseksi saadaan taulukon 18 mukaiset arvot:

Taulukko 18. Parittainen kahden otoksen t-testi johtojen nol-laverkon impedansseille (mukautettu)

| <i>Parametri</i> | <i>Z0</i> | <i>Z0</i> |
|------------------------------|-----------|-----------|
| Keskiarvo | 5,03 | 5,56 |
| Varianssi | 5,96 | 8,13 |
| Havainnot | 22 | 22 |
| Pearsonin korrelaatio | 0,98 | |
| Vapausaste (va) | 21 | |
| t Tunnusluvut | -3,89 | |
| P(T<=t) kaksisuuntainen | 0,0009 | |
| t-kriittinen kaksisuuntainen | 2,83 | |

Taulukosta 18 (ks. ed. s.) havaittiin, että otosten keskiarvot ja varianssit poikkeavat keskenään selvästi. Koska testisuureen itseisarvo $|-3,89|$ on suurempi kuin kriittinen arvo (2,83) on hypoteesi H_0 hylättävä 1 %:n merkitsevyystasolla. Parametri $P(T \leq t)$ kaksisuuntainen (p-arvo) on vain 0,09 %, joten tulos on tilastollisesti erittäin merkittävä. Jos hypoteesi H_0 : *Lasketut nollaverkon impedanssit eivät poikkea mitatuista* hylätään, on erehtymisen todennäköisyys 0,09 %. Tilastollisen analyysin perusteella johdoille lasketut nollaverkon impedanssit poikkeavat huomattavasti lasketuista. Kuvassa 34 näkyi selvästi mitattujen ja laskettujen nollaverkon impedanssien hajonta. Lisäksi nollaverkon impedanssien Z_0 virheprosentit (itseisarvoja) olivat suuria.

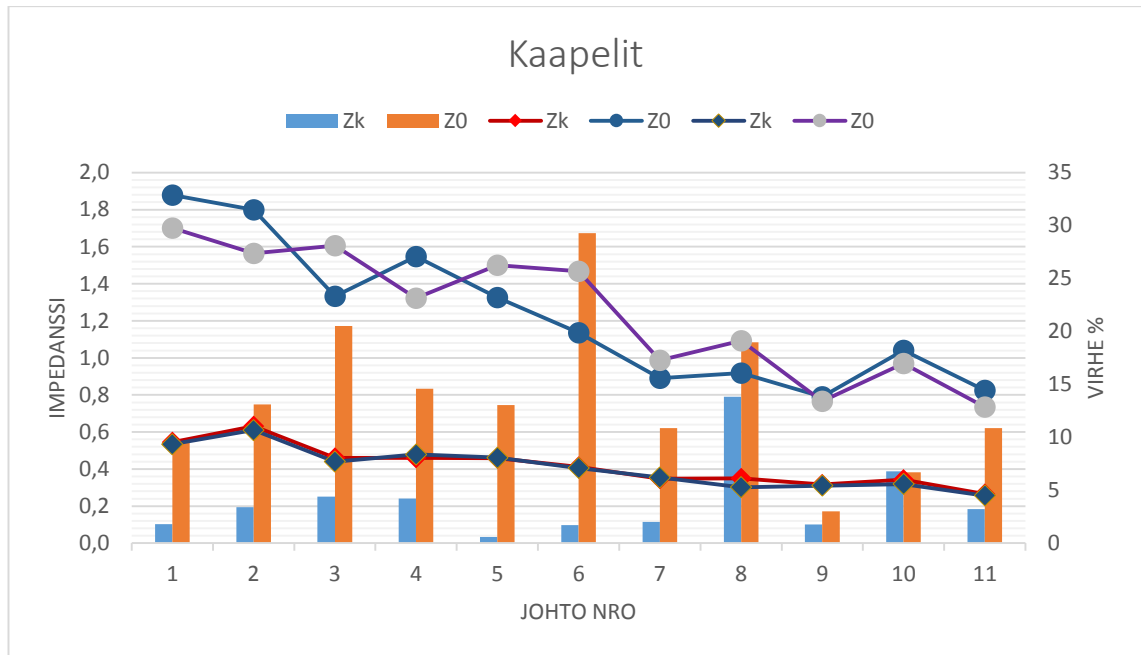
C. Parittainen kahden otoksen t-testi kaapelien myötäverkon impedansseille

Tehdään parittainen kahden otoksen t-testi kaapelien myötäverkon impedansseille. Lähtötiedot syötetään analysointi työkaluun ja tulokseksi saadaan taulukon 19 mukaiset arvot:

Taulukko 19. Parittainen kahden otoksen t-testi kaapelien myötäverkon impedansseille (mukautettu)

| <i>Parametri</i> | Z_k | Z_k |
|-------------------------------|-------|-------|
| Keskiarvo | 0,42 | 0,41 |
| Varianssi | 0,01 | 0,01 |
| Havainnot | 11 | 11 |
| Pearsonin korrelaatio | 0,99 | |
| Vapausaste (va) | 10 | |
| t Tunnusluvut | 1,94 | |
| $P(T \leq t)$ kaksisuuntainen | 0,08 | |
| t-kriittinen kaksisuuntainen | 3,17 | |

Taulukosta 19 havaittiin, että otosten varianssi on erittäin pieni. Koska testisuureen arvo (1,94) on pienempi kuin kriittinen arvo (3,17), jää hypoteesi H_0 voimaan 1 %:n merkitsevyystasolla. Parametri $P(T \leq t)$ kaksisuuntainen (p-arvo) on 8 %. Jos hypoteesi H_0 : *Lasketut myötäverkon impedanssit eivät poikkea mitatuista* hylätään, on erehtymisen todennäköisyys 8 %. Laskettuja myötäverkon impedansseja Z_k voidaan tilastollisesti pitää melko luotettavina. Kuvasta 35 (ks. seur. s.) nähdään, että kaapelien lasketut myötäverkon impedanssit ovat lähellä mitattuja arvoja. Yhtä tulosta (johto nro 8) lukuun ottamatta myötäverkon keskimääräinen virhe on alle 5 %.



Kuva 35. Mitattujen ja laskettujen myötä- ja nollaverkon impedanssien kuvaajat. Palkit kuvaavat myötä- ja nollaverkon impedanssien virheprosentteja

D. Parittainen kahden otoksen t-testi kaapelien nollaverkon impedansseille

Tehdään parittainen kahden otoksen t-testi kaapelien nollaverkon impedansseille. Lähtötiedot syötetään analysointi työkaluun ja tulokseksi saadaan taulukon 20 mukaiset arvot:

Taulukko 20. Parittainen kahden otoksen t-testi kaapelien nollaverkon impedansseille (mukautettu)

| <i>Parametri</i> | <i>Z0</i> | <i>Z0</i> |
|------------------------------|-----------|-----------|
| Keskiarvo | 1,23 | 1,25 |
| Varianssi | 0,15 | 0,12 |
| Havainnot | 11 | 11 |
| Pearsonin korrelaatio | 0,85 | |
| Vapausaste (va) | 10 | |
| t Tunnusluvut | -0,34 | |
| P(T<=t) kaksisuuntainen | 0,74 | |
| t-kriittinen kaksisuuntainen | 3,17 | |

Taulukosta 20 (ks. ed. s.) havaittiin, että otosten varianssi on pientä ja otosten keskiarvo on lähes sama. Koska testisuureen itseisarvo $|-0,34|$ on pienempi kuin kriittinen arvo (3,17), hypoteesi H_0 jää voimaan 1 %:n merkitsevyystasolla. Parametri $P(T \leq t)$ kaksisuuntainen (p-arvo) on 74 %. Jos hypoteesi H_0 : *Lasketut nollaverkon impedanssit eivät poikkeaa mitatuista* hylätään, on erehtymisen todennäköisyys 74 %. Tässä tapauksessa saatu tulos on outo, vaikka se on matemaattisesti oikea. Tämä johtuu siitä, että t-testissä tutkitaan otosten keskiarvoja ja variansseja, jotka olivat taulukon 20 perusteella keskenään lähes identtisiä. Tulosten perusteella voidaan kuitenkin sanoa, että mitatuilla ja lasketuilla arvoilla on olemassa vahva keskinäinen riippuvuus. Tässä tapauksessa lopulliset johtopäätökset on tehtävä kuvan 35 perusteella (ks. ed. s.). Kuvassa näkyy selvästi nollaverkon mitattujen ja laskettujen impedanssien hajonta. Lisäksi nollaverkon impedanssien Z_0 virheprosentit ovat suuria. Tulosten perusteella nollaimpedanssien varmentaminen mittausten avulla on perusteltua.

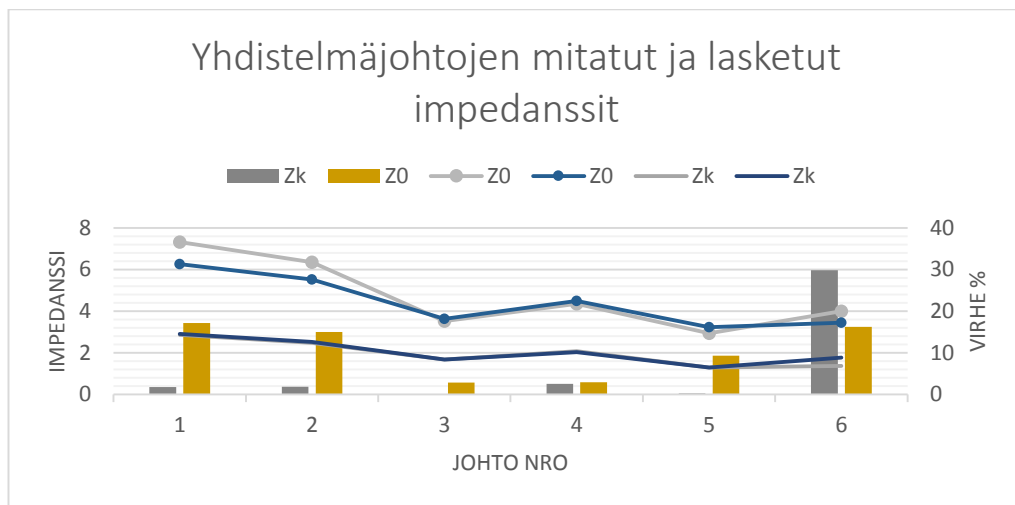
E. Parittainen kahden otoksen t-testi yhdistelmäjohtojen myötäverkon impedansseille

Tehdään parittainen kahden otoksen t-testi yhdistelmäjohtojen myötäverkon impedansseille. Yhdistelmäjohtojen tarkoitetaan avojohtojen ja kaapelien yhdistelmää. Lähtötiedot syötetään analysointi työkaluun edellä kuvatulla tavalla. Tulokseksi saadaan taulukon 21 mukaiset arvot:

Taulukko 21. Parittainen kahden otoksen t-testi yhdistelmäjohtojen myötäverkon impedansseille (mukautettu)

| <i>Parametri</i> | <i>Z_k</i> | <i>Z_k</i> |
|------------------------------|----------------------|----------------------|
| Keskiarvo | 1,96 | 2,03 |
| Varianssi | 0,39 | 0,35 |
| Havainnot | 6 | 6 |
| Pearsonin korrelaatio | 0,96 | |
| Arvioitu keskiarvojen ero | 0,00 | |
| Vapausaste (va) | 5 | |
| t Tunnusluvut | -1,12 | |
| P(T<=t) kaksisuuntainen | 0,32 | |
| t-kriittinen kaksisuuntainen | 4,03 | |

Taulukosta 21 (ks. ed. s.) havaittiin, että otosten keskiarvojen ja varianssien poikkeamat ovat pieniä. Koska testisuureen itseisarvo $|-1,12|$ on pienempi kuin kriittinen arvo (4,03), jää hypoteesi H_0 voimaan 1 %:n merkitsevyystasolla. Parametri $P(T \leq t)$ kaksisuuntainen (p-arvo) on 32 %. Jos hypoteesi H_0 : *Lasketut myötaverkon impedanssit eivät poikkea mitatuista* hylätään, on erehtymisriski 32 %. Tulokseen voidaan suhtautua varoen, koska otannan koko on pieni ($n=6$). Lopulliset johtopäätökset tehdään graafisen esityksen perusteella. Kuvasta 36 nähdään, että yhdistelmäjohtojen lasketut myötaverkon impedanssit ovat lähellä mitattuja arvoja. Yhtä tulosta (johto nro 6) lukuun ottamatta myötaverkon keskimääräinen virhe on alle 3 %.



Kuva 36. Mitattujen ja lasketujen myötä- ja nollaverkon impedanssien kuvaajat. Palkit kuvaavat myötä- ja nollaverkon impedanssien virheprosentteja.

F. Parittainen kahden otoksen t-testi yhdistelmäjohtojen nollaverkon impedansseille

Tehdään parittainen kahden otoksen t-testi yhdistelmäjohtojen nollaverkon impedansseille. Lähtötiedot syötetään analysointi työkaluun ja tulokseksi saadaan taulukon 22 (ks. seur. s.) mukaiset arvot:

Taulukko 22. Parittainen kahden otoksen t-testi yhdistelmäjohtojen nollaverkon impedansseille (mukautettu)

| <i>Parametri</i> | <i>Z0</i> | <i>Z0</i> |
|------------------------------|-----------|-----------|
| Keskiarvo | 4,43 | 4,75 |
| Varianssi | 1,52 | 2,95 |
| Havainnot | 6 | 6 |
| Pearsonin korrelaatio | 0,98 | |
| Arvioitu keskiarvojen ero | 0,00 | |
| Vapausaste (va) | 5 | |
| t Tunnusluvut | -1,37 | |
| P(T<=t) kaksisuuntainen | 0,23 | |
| t-kriittinen kaksisuuntainen | 4,03 | |

Taulukosta 22 havaittiin, että otosten keskiarvot ovat melko suuria. Varianssien keskinäiset erot ovat melko pieniä. Koska testisuureen itseisarvo $|-1,37|$ on pienempi kuin kriittinen arvo (4,03), hypoteesi H_0 jää voimaan 1 %:n merkitsevyystasolla. Parametri $P(T \leq t)$ kaksisuuntainen (p -arvo) on 23 %. Jos hypoteesi H_0 : *Lasketut nollaverkon impedanssit eivät poikkea mitatuista* hylätään, on erehtymisriski 23 %. Tulokseen voidaan suhtautua varoen, koska otannan koko on pieni ($n=6$). Myös tässä tapauksessa lopulliset johtopäätökset on tehtävä graafisen esityksen perusteella. Kuvassa 36 (ks. ed. s.) näkyi jonkin verran nollaverkon mitattujen ja laskettujen impedanssien hajontaa. Myös nollaverkon impedanssien Z_0 virheprosenttien välillä on suuria eroja. Tulosten perusteella nollaverkon impedanssien varmentaminen mittausten avulla on perusteltua, koska kuudesta mitattusta yhdistelmäjohtosta, neljässä virheen suuruus oli yli 10 %.

9.4.3 Tilastollisen analyysin yhteenveto

Parittainen kahden otoksen t-testi tehtiin erikseen 110 kV:n johdoille, kaapeleille ja yhdistelmäjohtojen (ks. 9.4.1 - 9.4.2). Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että kaikissa tapauksissa myötäverkon impedanssien lasketut arvot ovat kohtalaisen hyviä lukuun ottamatta joitakin yksittäisiä tapauksia. Vastaavasti nollaverkon impedansseissa näyttää olevan johtotyypistä riippumatta huomattavia eroja mitattujen ja laskettujen ar-

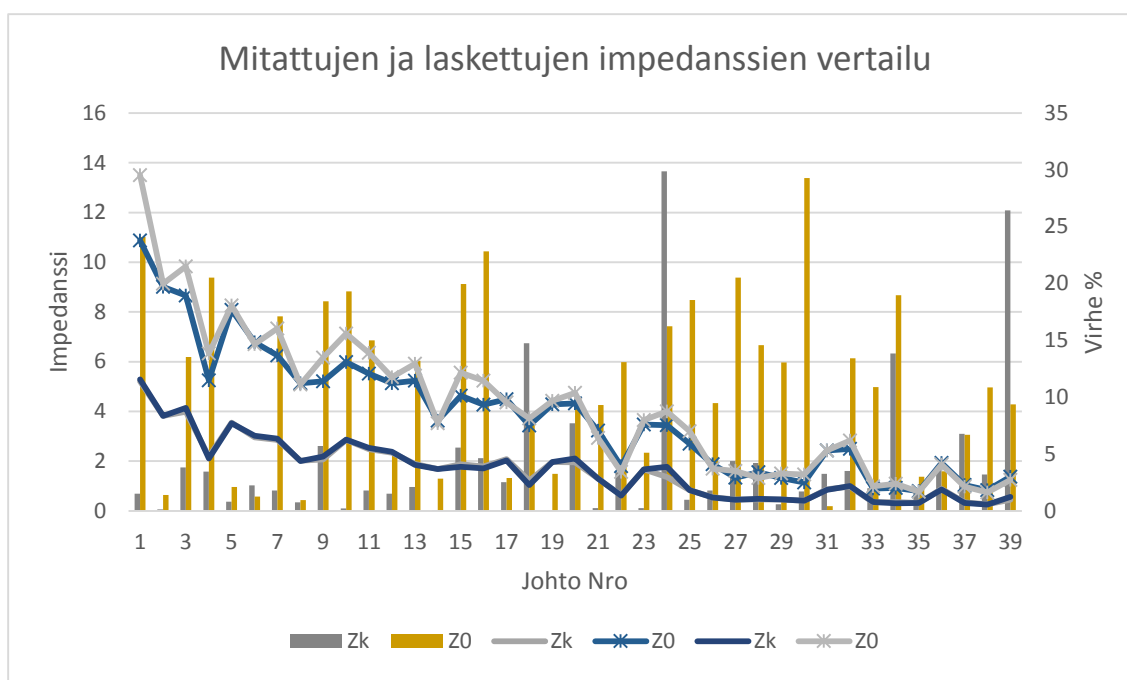
vojen välillä. Koska havainnot olivat hyvin samanlaiset johdon lajista riippumatta, voidaan tilastollinen analyysi tehdä koko aineistolle, jolloin tilastollinen merkitsevyys paranee.

Tehdään lopuksi parittainen kahden otoksen t-testi koko aineistolle. Aineiston koko käsittää yhteensä 39 mitattua johtoa. Ensin testaan aineiston myötäverkon impedanssit. Tulokseksi saadaan taulukon 23 mukaiset arvot:

Taulukko 23. Parittainen kahden otoksen t-testi myötäverkon impedansseille (mukautettu)

| <i>Parametri</i> | <i>Z_k</i> | <i>Z_k</i> |
|------------------------------|----------------------|----------------------|
| Keskiarvo | 1,63 | 1,65 |
| Varianssi | 1,43 | 1,48 |
| Havainnot | 39 | 39 |
| Pearsonin korrelaatio | 1,00 | |
| Arvioitu keskiarvojen ero | 0,00 | |
| Vapausaste (va) | 38 | |
| t Tunnusluvut | -0,91 | |
| P(T<=t) kaksisuuntainen | 0,37 | |
| t-kriittinen kaksisuuntainen | 2,71 | |

Taulukosta 23 havaittiin, että otosten keskiarvojen ja varianssien poikkeamat ovat melko pieniä. Koska testisuureen itseisarvo $|-0,91|$ on pienempi kuin kriittinen arvo (2,71), jää hypoteesi H_0 voimaan 1 %:n merkitsevyystasolla. Parametri $P(T \leq t)$ kaksisuuntainen (p-arvo) on 37 %. Jos hypoteesi H_0 : *Lasketut myötäverkon impedanssit eivät poikkea mitatuista* hylätään, on erehtymisriski 37 %. Tulosta voidaan pitää tilastollisesti luotettavana, koska otannan koko on suuri ($n=39$). Kuvasta 37 (ks. ed. s.) nähdään selvästi, että lasketut myötäverkon impedanssit ovat lähes samoja kuin mitatut.



Kuva 37. Mitattujen ja laskettujen myötä- ja nollaverkon impedanssien kuvaajat. Palkit kuvaavat myötä- ja nollaverkon impedanssien virheprosentteja.

Seuraavaksi tehdään parittainen kahden otoksen t-testi nollaverkon impedansseille. Lähtötiedot syötetään analysointi työkaluun ja tulokseksi saadaan taulukon 24 mukaiset arvot:

Taulukko 24. Parittainen kahden otoksen t-testi nollaverkon impedansseille

| | Z0 | Z0 |
|------------------------------|---------|------|
| Keskiarvo | 3,86 | 4,22 |
| Varianssi | 6,38 | 8,55 |
| Havainnot | 39 | 39 |
| Pearsonin korrelaatio | 0,99 | |
| Arvioitu keskiarvojen ero | 0,00 | |
| Vapausaste (va) | 38 | |
| t Tunnusluvut | -3,85 | |
| P(T<=t) kaksisuuntainen | 0,00044 | |
| t-kriittinen kaksisuuntainen | 2,71 | |

Taulukosta 24 havaittiin, että otosten keskiarvojen ja varianssien arvot ovat suuria. Koska testisuureen itseisarvo $|-3,85|$ on suurempi kuin kriittinen arvo (2,71), hypoteesi H_0 hylätään 1 %:n merkitsevyystasolla. Parametri $P(T \leq t)$ kaksisuuntainen (p-arvo) on 0,044 %. Jos hypoteesi H_0 : *Lasketut nollaverkon impedanssit eivät poikkea mitatuista* hylätään, on erehtymisriski ainoastaan 0,044 %. Tulos on tilastollisesti erittäin merkitsevää. Kuvasta 37 havaittiin myös, että nollaverkon impedanssien virheprosentit ovat

poikkeuksetta hyvin suuria. Tuloksen perusteella nollaimpedanssien varmentaminen mittausten avulla johdon lajista riippumatta on hyvin perusteltua.

JOHTOPÄÄTÖS

Tilastollinen analyysi osoitti, että nollaverkon impedanssin tarkka laskeminen on erittäin vaikeaa, koska maa toimii vikatilanteissa joko osittain tai kokonaan maasulkuvirran paluutienä (ks. 3 *Maasulkuvirran käyttäytyminen*). Tilastollisen analyysin perusteella impedanssimittaukset tässä insinööriyössä analysoiduille johdoille oli erittäin perusteltua.

10 Yhteenveto

Tämän insinööriyön tavoitteena oli antaa selkeä, käsikirjan omainen kokonaiskuva suurjännite- ja keskijännitejohtojen impedanssimittauksista. Aihepiiriä käsiteltiin laajasti sekä käytännön mittausten että teorian kannalta. Maasulkuvirran käyttäytymistä käsiteltiin nollaimpedanssin laskennan näkökulmasta. Myötä- ja nollaverkon impedanssien yhtälöt esiteltiin harustetulle suurjännitejohdolle sekä tavalliselle keskijänniteavojohdolle. Yhtälöt suurjännitekaapelien myötäverkon resistanssin ja reaktanssin laskemiseksi esiteltiin yleisellä tasolla. Yhtälöitä kaapelin nollaverkon impedanssin laskemiseksi ei käsitelty, sillä maapiirin tarkka resistanssi R_e ja reaktanssi X_e voitiin ratkaista helposti mittaustulosten perusteella.

Insinööriyön toisena tavoitteena oli analysoida laskettuja myötä-, ja nollaverkon impedansseja vertaamalla niitä vastaaviin vuosina 2004 - 2014 mittaamalla saatuihin impedansseihin. Insinööriyön edetessä saatuja tuloksia päätettiin analysoida myös tilastollisesti. Mittaustulosten analysointi osoitti, että lasketun nollaimpedanssin virheen suuruus oli keskimäärin noin 10 % ja joissakin yksittäisissä tapauksissa jopa yli 20%. Mikäli johtoa suojaavan distanssireleen maasulkuimpedanssisuhde asetellaan pelkästään laskettujen impedanssien perusteella, voi se joissakin tapauksissa pahimmillaan johtaa distanssireleen suojausvyöhykkeen ali- tai yliulottumaan. Tilastollisen analyysin perusteella impedanssimittaukset olivat perusteltuja tässä insinööriyössä analysoiduille johdoille. (ks. 9.4.3 *Tilastollisen analyysin yhteenveto.*)

Tässä insinööriyössä analysoidut suurjännitejohtojen ja -kaapelien impedanssit on mitattu taajuusselektiivisellä impedanssimittausmenetelmällä. Menetelmää on käytetty Suomessa jo yli 10 vuoden ajan ja mittauksista saadut kokemukset ovat olleet hyviä. Mittausmenetelmä on osoittautunut myös luotettavaksi ja helppokäyttöiseksi. Toistaiseksi keskijännitteellä impedanssimittauksia on tehty hyvin vähän. Jakeluverkon kiristävät luotettavuusvaatimukset saattavat lisätä monipuolisempien impedanssin mittaamiseen perustuvien suojausvaatimusten tarvetta vikapaikan laskemiseksi myös keskijännitteellä. Keski-euroopassa, mm. distanssireleitä on käytetty jakeluverkoissa jo pitkään. Tarvittaessa tässä työssä esiteltyä impedanssimittauslaitteistoa voidaan käyttää varauksin myös maasto-olosuhteissa jakeluverkon johtojen mittauksiin. (ks. 5.2 *Taajuusselektiivinen menetelmä*.)

Jos mitatun johdon olosuhteissa ei tapahdu muutoksia, ei mittauksista ole tarpeen toistaa määräajoin. Tiedetään, että kaupunkisähköverkoissa maaimpedanssi voi parantua vähitellen ympäristön rakentamisen seurauksena. Rakentamisen vaikutusta maaimpedanssiin ei ole toistaiseksi tutkittu mittaamalla, mutta joidenkin verkkoyhtiöiden kanssa asiasta on käyty keskusteluita. Vertaileva mittaus voitaisiin tehdä johdoille, jonka ympäristössä on tapahtunut voimakasta rakentamista viimeisen kymmenen vuoden aikana sekä sellaiselle johdolle, jonka ympäristössä ei ole tapahtunut merkittäviä muutoksia. Tarkastelu kannattaa tehdä samoja laitteita ja asetteluja käyttäen, jotta tulosten vertailu olisi luotettavaa. Saatujen tulosten perusteella voidaan päätellä, että onko voimajohtojen impedanssimittaukset tietyissä olosuhteissa syytä uusida määräajoin.

Lähteet

- [1] Ristimäki, M., 2007. Distanssisuojausten koordinointi. Saatavissa. Viitattu 26.9.2014. Saatavissa: http://butler.cc.tut.fi/~repo/Opetus/Projektityot/mika_ristimaki_distanssisuojaus.pdf
- [2] Siemens AG, 2005. SIPROTEC Distanssisuoja 7SA6 Käyttöohje V4.61. C53000-G1173-C156-1. Luettu 5.9.2014
- [3] Ziegler, G., 2006. Numerical Distance Protection. Publicis Corporate Publishing. ISBN 3-89578-266-1. Luettu 18.9.2014
- [4] © OMICRON electronics GmbH, 2010, CP CU1 Reference Manual. Article Number VESD0671, Version CPCU1.AE.5. Luettu 23.9.2014
- [5] Väljä, J., 2010, Voimajohtojen induktiovaarajännitteet. Diplomityö. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Viitattu 10.10.2014. Saatavissa http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20tyot/Valja_Jukka_julk.pdf
- [6] Carson, J., R., 1926, Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. Bell System Technical Journal, 5. Viitattu 23.11.2014. Saatavissa https://uwaterloo.ca/power-energy-systems-group/sites/ca.power-energy-systems-group/files/uploads/files/wave_propagation.pdf
- [7] Kersting, W., H., 2007. Distribution System Modeling and Analysis (2nd ed.). CRC Press. ISBN 0-8493-5806-X. Luettu 21.10.2014
- [8] Varju, G., Earth return, phenomena and impedance. Budapest University of Technology & Economics. Viitattu 12.10.2014. Saatavissa http://superlife.info/okt/val/nt/emc/tananyag/07_earth-return_imped-v1.pdf
- [9] Paavola, M., 1975, Sähköjohdot. WSOY, Porvoo. ISBN 951-0-06635-4. Luettu 21.10.2014
- [10] Elovaara, J., Haarla, L., 2011. Sähköverkot II. Otatieto. ISBN 978-951-672-363-4. Luettu 5.11.2014.
- [11] Seppänen, J., Ukkosjohtimettoman 110 kV:n avojohdon käyttömahdollisuudet Suomessa, Diplomityö. Aalto yliopisto. Viitattu 18.10.2014. Saatavissa <http://lib.tkk.fi/Dipl/2011/urn100520.pdf>
- [12] Suomen Standardisoimisliitto, 2009, Suurjännitesähköasennukset, SFS 6001+A1+A2. Luettu 15.10.2014.

- [13] Lindinger, M., J., Renner, H., Schmutzger, E., 2011, New Optimized Analysis Method for Measuring Extended Grounding Systems. CIRED. Paper No 0085. Viitattu 18.10.2014. Saatavissa http://www.cired.net/publications/cired2011/part1/papers/CIRED2011_0085_final.pdf
- [14] Aura, L., Tonteri, A., J., 1993. Sähkölaitostekniikka, WSOY, ISBN 951-0-18558-2. Luettu 27.11.2014.
- [15] © OMICRON electronics GmbH, 2014, CPC 100 User Manual, Article Number VESD0601, Version CPC100LITE.ENU.10. Luettu 4.11.2014.
- [16] Pekkala, H.-M., 2010. Challenges in Extensive Cabling of the Rural Area Networks and Protection in Mixed Networks. Diplomityö. Tampere University of Technology. Viitattu 19.10.2014, Saatavissa http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20dyot/Pekkala_Hanna_Mari_julk.pdf
- [17] Wallin, P., 1995. Sähkömittaustekniikan perusteet 535, Otatieto Oy, ISBN 951-672-203-2. Luettu 12.11.2014.
- [18] © OMICRON electronics GmbH, 2014. Universal testing device for electrical diagnostics. Presentation. Luettu 7.11.2014.
- [19] Energiavirasto, 2014. Sähköverkkotoiminnan tunnusluvut vuodelta 2012. [WWW]. Viitattu 13.12.2014. Saatavissa. <http://www.energiavirasto.fi/sahkoverkkotoiminnan-tunnusluvut-vuodelta-20121>
- [20] Energiateollisuus ry, 2014. Verkkoyhtiöt haluavat eroon pitkistä sähkökatkoista. [WWW]. Viitattu 13.12.2014. Saatavissa. <http://energia.fi/sahkomarkkinat/sahkoverkko/sahkokatkot-ja-jakelun-keskeytykset/tavoite-sahkoverkkojen-uudistamisesta>
- [21] Fingrid Oyj, 2014. Johtoalue. [WWW]. Viitattu 10.10.2014. Saatavissa <http://www.fingrid.fi/fi/verkkohankkeet/kunnossapito/johtoalue/Sivut/default.aspx>
- [22] Prysmian Group Oyj, 2014, Avojohtimet ja ajolangat, [WWW], Viitattu 14.10.2014. Saatavissa http://fi.prysmiangroup.com/en/business_markets/markets/pd/products/avojohtimet-ja-ajolangat/
- [23] Reka Kaapeli Oy, 2014. Alumiinivoimakaapeli AHXCHBMK-W. [WWW]. Viitattu 19.10.2014. Saatavissa http://www.reka.fi/products/dryrex/AHXCHBMK-W_64_Alumiinivoimakaapeli
- [24] International Electrotechnical Commission (IEC), 2006. Electric cables - Calculation of the current rating - Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses - General, IEC 60287-1-1 ed2.0. Luettu 11.10.2014

- [25] Open Electrical, 2014. Cable Impedance Calculations. [WWW]. Viitattu 20.12.2014. Saatavissa http://www.openelectrical.org/wiki/index.php?title=Cable_Impedance_Calculations
- [26] Suomi, M., 2010. Kosketussuojan poikkipinnan vaikutus 60-400 kV suurjännitekaapelin kuormitettavuuteen. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Viitattu 9.12.2014. Saatavissa <http://www.theseus.fi/handle/10024/12841>
- [27] Parsotam, A., March 1997. Fundamentals of Calculation of Earth Potential Rise in the Underground Power Distribution Cable Network., Paper. Viitattu 1.11.2014. Saatavissa <http://www.nzccpts.co.nz/publications/Cable%20Sheath%20Bonding%20Application%20Guide%20Companion.pdf>
- [28] Reka Kaapeli Oy, 2014. Alumiinivoimakaapeli AHXAMK-W, [WWW] Viitattu 19.10.2014. Saatavissa http://www.reka.fi/products/dryrex/AHXAMK-W_12_Alumiinivoimakaapeli
- [29] © OMICRON electronics GmbH, 2002, Impedance and Coupling Measurements, Presentation. Luettu 27.10.2014.
- [30] © OMICRON electronics GmbH, 2014, CPC 100 Reference Manual, Article Number VESD0600, Version CPC100.ENU.14. Luettu 27.10.2014.
- [31] HSA Oy, 2014, Pramac – mallisto. [WWW]. Viitattu 3.11.2014. Saatavissa <http://hsaoy.com/aggregaatit/pramac/index.htm>
- [32] Rajamäki, J., 2000. EMC-Direktiivin ensimmäiset kymmenen vuotta Suomessa. TUKES-julkaisu. Viitattu 29.9.2014. Saatavissa <http://www.tukes.fi/Tiedostot/julkaisut/6-2000.pdf#page=21&zoom=auto,-62,574>
- [33] Flosdorff, R., Hilgarth, G., 2000. Elektrische Energieverteilung, 7. Auflage. B.G. Teubner Stuttgart, ISBN 3-519-16424-8. Luettu 28.10.2014.
- [34] ABB Strömberg, 1990. Teknisiä Tietoja ja Taulukoita. Vaasa Oy. ISBN 951-99366-0-2. Luettu 6.11.2014.
- [35] Holopainen, M., Pulkkinen, P., 1993. Tilastolliset menetelmät, Sanoma Pro Oy, ISBN 978-952-63-2000-7. Luettu 15.11.2014.

Impedanssimittaukset 2004-2014

Taulukko I. Mitattujen 110kV johtojen lähtötiedot

| LÄHTÖTIEDOT | | | | | | | | | |
|-------------|--------|----------------|-----------|----------------|-----------|--------------|-----------|---------|---------------|
| Nro | Tyyppi | Johto, osa A | Pituus km | Johto, osa B | Pituus km | Johto, osa C | Pituus km | Yht. km | Mitattu Vuosi |
| 1 | OHL | 2xDuck | 13,000 | | | | | 13,000 | 2006 |
| 2 | OHL | 2xDuck | 12,970 | | | | | 12,967 | 2007 |
| 3 | OHL | Duck | 10,300 | Hawk | | | | 10,300 | 2006 |
| 4 | OHL | 2*Hawk, 242/39 | | 2*Duck, 305/39 | | | | 9,430 | 2014 |
| 5 | OHL | 2xDuck | | Duck | | 2xDuck | | 9,317 | 2014 |
| 6 | OHL | Duck | 7,600 | Hawk | | | | 7,600 | 2006 |
| 7 | OHL | 2xDuck | 6,800 | | | | | 6,800 | 2012 |
| 8 | OHL | Duck | | 2xDuck | | | | 6,773 | 2007 |
| 9 | OHL | Hawk | 6,690 | | | | | 6,690 | 2007 |
| 10 | OHL | 2xDuck | | Duck | | 2xDuck | | 6,450 | 2014 |
| 11 | OHL | 2xDuck | 6,450 | | | | | 6,450 | 2007 |
| 12 | OHL | 2xDuck | 6,300 | | | | | 6,300 | 2007 |
| 13 | OHL | 2xDuck | 6,000 | | | | | 6,000 | 2007 |
| 14 | OHL | 2*Hawk, 242/39 | 5,173 | | | | | 5,173 | 2014 |
| 15 | OHL | Finch 565/72 | 5,113 | | | | | 5,113 | 2014 |
| 16 | OHL | Hawk | 4,790 | Duck | 0,300 | | | 5,090 | 2006 |
| 17 | OHL | Duck | 4,090 | | | | | 4,090 | 2014 |
| 18 | OHL | 2*Hawk, 242/39 | 4,036 | | | | | 4,036 | 2014 |
| 19 | OHL | 2xDuck | 2,800 | | | | | 2,800 | 2012 |
| 20 | OHL | 2xDuck | | Duck | | | | 2,700 | 2007 |
| 21 | OHL | Duck 305/39 | 2,185 | | | | | 2,185 | 2014 |
| 22 | OHL | Duck | 1,450 | | | | | 1,450 | 2007 |
| 23 | UGC | AHXMLK 800/AL | 4,350 | | | | | 4,542 | 2006 |
| 24 | UGC | AHXMLK 800/AL | 9,124 | OHPLKM 300/Cu | 3,613 | | | 3,895 | 2006 |
| 25 | UGC | AHXMLK 1200 AL | 3,700 | | | | | 3,700 | 2006 |
| 26 | UGC | AHXMLK 800/AL | 3,603 | | | | | 3,603 | 2006 |
| 27 | UGC | AHXMLK 800 AL | 3,335 | | | | | 3,335 | 2007 |
| 28 | UGC | AHXMLK 1200 AL | 3,209 | | | | | 3,209 | 2006 |
| 29 | UGC | AHXMLK 800/AL | 2,586 | | | | | 2,586 | 2006 |
| 30 | UGC | AHXMLK 1200 AL | 2,530 | | | | | 2,530 | 2007 |
| 31 | UGC | AHXMLK-W800AL | 2,293 | | | | | 2,293 | 2006 |
| 32 | UGC | AHXMLK 800/AL | 0,146 | OHPLKM 300/Cu | 1,948 | | | 2,094 | 2006 |
| 33 | UGC | AHXMLK 800/AL | 0,016 | OHPLKM 400/Cu | 1,894 | | | 1,950 | 2006 |
| 34 | MIX | Duck | 6,980 | AHXMLK-W800AL | 0,540 | | | 7,520 | 2006 |
| 35 | MIX | Duck | 6,030 | AHXMLK-W800AL | 0,540 | | | 6,570 | 2006 |
| 36 | MIX | AHXMLK 1200 AL | 3,210 | Duck 305/39 | 3,199 | | | 6,409 | 2014 |
| 37 | MIX | AHXMLK 800 AL | 0,460 | Duck 305/39 | 3,000 | Duck 305/39 | 1,986 | 5,446 | 2014 |
| 38 | MIX | Duck | 2,514 | AHXMLK-W800AL | 2,100 | | | 4,614 | 2004 |
| 39 | MIX | Duck | 3,024 | AHXMLK-W800AL | 1,060 | | | 4,084 | 2004 |

OHL = avojohto, UGC = maanalainen kaapeli, MIX = yhdistelmäjohto.

Taulukko II. 110kV johtojen mitatut ja lasketut impedanssit sekä virheprosentit

| Nro | MITATUT IMPEDANSSIT | | | | | | | | | | LASKETUT IMPEDANSSIT | | | | | | | | | | Virhe% | |
|-----|---------------------|-------|-------|--------|-------|--------------|--------|--------|-------|-------|----------------------|--------|-------|-------|--------|--------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | Myytäverikko | | | | | Nollaverikko | | | | | Myytäverikko | | | | | Nollaverikko | | | | | Rk | Zk |
| | Rk | Xk | Zk | kulma | R0 | X0 | Z0 | kulma | R0 | X0 | Z0 | kulma | R0 | X0 | Z0 | kulma | R0 | X0 | Z0 | kulma | | |
| 1 | 1,174 | 5,079 | 5,213 | 76,98° | 2,57 | 10,566 | 10,874 | 76,33° | 1,26 | 5,14 | 5,292 | 76,23° | 3,24 | 13,1 | 13,495 | 76,11° | 1,20 | 26,07 | 23,98 | 1,52 | 24,10 | |
| 2 | 0,641 | 3,763 | 3,817 | 80,33° | 2,136 | 8,756 | 9,013 | 76,29° | 0,630 | 3,770 | 3,822 | 80,51° | 2,390 | 8,820 | 9,138 | 74,84° | 0,20 | 11,87 | 12,42 | 0,14 | 1,38 | |
| 3 | 0,987 | 3,863 | 3,987 | 75,67° | 2,163 | 8,388 | 8,662 | 75,54° | 1,1 | 3,99 | 4,139 | 74,59° | 2,79 | 9,43 | 9,834 | 73,52° | 3,29 | 28,99 | 17,42 | 3,81 | 13,53 | |
| 4 | 0,528 | 2,113 | 2,178 | 75,97° | 1,124 | 5,127 | 5,249 | 77,63° | 0,510 | 2,040 | 2,103 | 75,96° | 1,710 | 6,090 | 6,326 | 74,32° | 3,41 | 3,45 | 52,14 | 18,78 | 3,45 | 20,51 |
| 5 | 0,755 | 3,464 | 3,545 | 77,70° | 1,995 | 7,836 | 8,086 | 75,72° | 0,730 | 3,440 | 3,517 | 78,02° | 1,920 | 8,030 | 8,256 | 76,55° | 0,69 | 3,76 | 2,48 | 0,81 | 2,11 | |
| 6 | 0,697 | 2,87 | 2,953 | 76,35° | 1,599 | 6,595 | 6,786 | 76,37° | 0,77 | 2,92 | 3,020 | 75,23° | 1,85 | 6,44 | 6,700 | 73,97° | 1,74 | 15,70 | 2,35 | 2,25 | 1,26 | |
| 7 | 0,343 | 1,993 | 2,022 | 80,23° | 1,266 | 4,976 | 5,135 | 75,73° | 0,330 | 1,980 | 2,007 | 80,54° | 1,250 | 4,930 | 5,086 | 75,77° | 0,65 | 1,26 | 0,92 | 0,74 | 0,95 | |
| 8 | 0,389 | 2,034 | 2,071 | 79,17° | 1,270 | 5,046 | 5,203 | 75,87° | 0,410 | 2,150 | 2,189 | 79,20° | 1,530 | 5,970 | 6,163 | 75,63° | 5,40 | 20,47 | 18,31 | 5,69 | 18,44 | |
| 9 | 0,778 | 2,747 | 2,855 | 74,19° | 1,689 | 5,733 | 5,977 | 73,58° | 0,790 | 2,750 | 2,861 | 73,97° | 1,800 | 6,900 | 7,131 | 75,38° | 1,54 | 0,11 | 6,57 | 20,36 | 0,22 | 19,31 |
| 10 | 0,528 | 2,284 | 2,344 | 76,98° | 1,212 | 4,980 | 5,125 | 76,32° | 0,530 | 2,320 | 2,380 | 77,13° | 1,260 | 5,230 | 5,380 | 76,45° | 1,58 | 3,96 | 5,02 | 1,52 | 4,96 | |
| 11 | 0,320 | 1,858 | 1,886 | 80,22° | 1,171 | 5,099 | 5,232 | 77,06° | 0,310 | 1,820 | 1,846 | 80,33° | 1,460 | 5,740 | 5,923 | 75,73° | 2,07 | 24,67 | 12,57 | 2,11 | 13,21 | |
| 12 | 0,301 | 1,854 | 1,878 | 80,78° | 0,938 | 4,534 | 4,630 | 78,31° | 0,290 | 1,750 | 1,774 | 80,59° | 1,300 | 5,400 | 5,554 | 76,46° | 3,65 | 5,61 | 38,59 | 19,10 | 5,56 | 19,96 |
| 13 | 0,303 | 1,758 | 1,784 | 80,22° | 0,910 | 4,167 | 4,265 | 77,68° | 0,270 | 1,680 | 1,702 | 80,87° | 1,200 | 5,100 | 5,239 | 76,76° | 10,93 | 4,46 | 31,82 | 22,39 | 4,64 | 22,84 |
| 14 | 0,323 | 1,173 | 1,217 | 74,60° | 0,950 | 3,292 | 3,426 | 73,90° | 0,310 | 0,990 | 1,037 | 72,61° | 1,090 | 3,550 | 3,714 | 72,93° | 4,02 | 15,60 | 14,74 | 7,84 | 14,73 | 8,38 |
| 15 | 0,285 | 1,939 | 1,960 | 81,64° | 1,297 | 4,087 | 4,288 | 72,39° | 0,280 | 1,940 | 1,960 | 81,79° | 1,170 | 4,270 | 4,427 | 74,68° | 1,75 | 0,05 | 9,79 | 4,48 | 0,01 | 3,25 |
| 16 | 0,539 | 1,876 | 1,952 | 73,97° | 1,23 | 4,141 | 4,320 | 73,46° | 0,603 | 2,014 | 2,102 | 73,33° | 1,43 | 4,53 | 4,750 | 72,48° | 11,87 | 7,36 | 16,26 | 9,39 | 7,71 | 9,97 |
| 17 | 0,399 | 1,622 | 1,670 | 76,18° | 0,845 | 3,366 | 3,470 | 75,91° | 0,390 | 1,620 | 1,666 | 76,46° | 0,840 | 3,550 | 3,648 | 76,69° | 0,83 | 1,14 | 16,95 | 18,69 | 0,97 | 18,55 |
| 18 | 0,242 | 0,791 | 0,827 | 72,99° | 0,761 | 2,595 | 2,704 | 73,66° | 0,240 | 0,800 | 0,835 | 73,30° | 0,890 | 3,080 | 3,206 | 73,88° | 0,26 | 0,12 | 0,59 | 5,47 | 0,24 | 5,12 |
| 19 | 0,144 | 0,858 | 0,870 | 80,47° | 0,637 | 2,348 | 2,433 | 74,82° | 0,140 | 0,830 | 0,842 | 80,43° | 0,590 | 2,350 | 2,423 | 75,91° | 2,78 | 3,26 | 7,38 | 0,09 | 3,25 | 0,41 |
| 20 | 0,224 | 0,944 | 0,970 | 76,65° | 0,751 | 2,379 | 2,495 | 72,48° | 0,220 | 0,980 | 1,004 | 77,35° | 0,794 | 2,716 | 2,830 | 73,70° | 1,79 | 3,81 | 5,73 | 14,17 | 3,52 | 13,43 |
| 21 | 0,222 | 0,859 | 0,887 | 75,51° | 0,528 | 1,853 | 1,927 | 74,10° | 0,214 | 0,826 | 0,853 | 75,48° | 0,486 | 1,795 | 1,860 | 74,85° | 3,60 | 3,84 | 7,95 | 3,13 | 3,83 | 3,48 |
| 22 | 0,111 | 0,433 | 0,447 | 75,62° | 0,335 | 1,327 | 1,369 | 75,83° | 0,130 | 0,550 | 0,565 | 76,70° | 0,350 | 1,190 | 1,240 | 73,61° | 17,12 | 27,02 | 4,48 | 10,32 | 26,43 | 9,37 |
| 23 | 0,246 | 0,582 | 0,632 | 67,09° | 1,602 | 0,82 | 1,800 | 27,11° | 0,245 | 0,559 | 0,610 | 66,33° | 1,408 | 0,681 | 1,564 | 25,81° | 0,41 | 3,95 | 12,11 | 16,95 | 3,41 | 13,09 |
| 24 | 0,294 | 0,458 | 0,544 | 57,30° | 1,695 | 0,81 | 1,879 | 25,54° | 0,267 | 0,463 | 0,534 | 60,03° | 1,483 | 0,832 | 1,700 | 29,29° | 9,18 | 1,09 | 12,51 | 2,72 | 1,80 | 9,48 |
| 25 | 0,172 | 0,427 | 0,460 | 68,06° | 1,224 | 0,528 | 1,333 | 23,33° | 0,160 | 0,410 | 0,440 | 68,68° | 1,530 | 0,490 | 1,607 | 17,76° | 6,98 | 3,98 | 25,00 | 7,20 | 4,39 | 20,52 |
| 26 | 0,191 | 0,418 | 0,460 | 65,44° | 1,405 | 0,649 | 1,548 | 24,79° | 0,182 | 0,443 | 0,479 | 67,67° | 1,127 | 0,691 | 1,322 | 31,51° | 4,71 | 5,98 | 19,79 | 6,47 | 4,21 | 14,58 |
| 27 | 0,178 | 0,423 | 0,459 | 67,18° | 1,214 | 0,535 | 1,327 | 23,78° | 0,173 | 0,428 | 0,462 | 67,99° | 1,320 | 0,712 | 1,500 | 28,34° | 2,81 | 1,18 | 8,73 | 33,08 | 0,59 | 13,05 |
| 28 | 0,148 | 0,385 | 0,412 | 68,97° | 1,025 | 0,489 | 1,136 | 25,50° | 0,144 | 0,379 | 0,405 | 69,20° | 1,399 | 0,445 | 1,468 | 17,65° | 2,70 | 1,56 | 36,49 | 9,00 | 1,71 | 29,27 |
| 29 | 0,14 | 0,318 | 0,347 | 66,24° | 0,802 | 0,388 | 0,891 | 25,82° | 0,139 | 0,326 | 0,354 | 66,91° | 0,838 | 0,523 | 0,988 | 31,97° | 0,71 | 2,52 | 4,49 | 34,79 | 2,00 | 10,87 |
| 30 | 0,130 | 0,325 | 0,350 | 68,20° | 0,820 | 0,413 | 0,918 | 26,73° | 0,107 | 0,282 | 0,302 | 69,22° | 1,041 | 0,331 | 1,092 | 17,64° | 17,69 | 13,23 | 26,95 | 19,85 | 13,83 | 18,98 |
| 31 | 0,124 | 0,291 | 0,316 | 66,92° | 0,711 | 0,344 | 0,790 | 25,82° | 0,119 | 0,287 | 0,311 | 67,48° | 0,657 | 0,394 | 0,766 | 30,95° | 4,03 | 1,37 | 7,59 | 14,53 | 1,78 | 3,01 |
| 32 | 0,16 | 0,303 | 0,343 | 62,16° | 0,934 | 0,459 | 1,041 | 26,17° | 0,159 | 0,277 | 0,319 | 60,14° | 0,871 | 0,429 | 0,971 | 26,22° | 0,63 | 8,58 | 6,75 | 6,54 | 6,79 | 6,70 |
| 33 | 0,133 | 0,23 | 0,266 | 59,96° | 0,708 | 0,424 | 0,825 | 30,92° | 0,113 | 0,231 | 0,257 | 63,93° | 0,616 | 0,402 | 0,736 | 33,13° | 15,04 | 0,43 | 12,99 | 5,19 | 3,21 | 10,87 |
| 34 | 0,644 | 2,781 | 2,855 | 76,96° | 1,694 | 6,022 | 6,256 | 74,29° | 0,7 | 2,82 | 2,906 | 76,06° | 1,96 | 7,06 | 7,327 | 74,48° | 8,70 | 1,40 | 15,70 | 17,24 | 1,79 | 17,12 |
| 35 | 0,569 | 2,414 | 2,480 | 76,74° | 1,363 | 5,351 | 5,522 | 75,71° | 0,61 | 2,45 | 2,525 | 76,02° | 1,73 | 6,11 | 6,350 | 74,19° | 7,21 | 1,49 | 26,93 | 14,18 | 1,80 | 15,00 |
| 36 | 0,470 | 1,610 | 1,677 | 73,73° | 1,787 | 3,155 | 3,626 | 60,47° | 0,461 | 1,614 | 1,679 | 74,06° | 1,649 | 3,113 | 3,523 | 62,09° | 1,91 | 0,25 | 7,72 | 1,33 | 0,08 | 2,84 |
| 37 | 0,523 | 2,009 | 2,076 | 75,41° | 1,253 | 4,306 | 4,485 | 73,78° | 0,519 | 1,956 | 2,024 | 75,14° | 1,266 | 4,167 | 4,355 | 73,10° | 0,76 | 2,64 | 1,04 | 3,23 | 2,52 | 2,89 |
| 38 | 0,353 | 1,241 | 1,290 | 74,12° | 1,563 | 2,829 | 3,292 | 61,08° | 0,347 | 1,246 | 1,293 | 74,44° | 1,176 | 2,685 | 2,931 | 66,35° | 1,70 | 0,40 | 24,76 | 5,09 | 0,25 | 9,31 |
| 39 | 0,348 | 1,32 | 1,365 | 75,23° | 1,221 | 3,216 | 3,440 | 69,21° | 0,449 | 1,715 | 1,773 | 75,33° | 1,277 | 3,789 | 3,998 | 71,37° | 29,02 | 29,92 | 4,59 | 17,82 | 29,87 | 16,23 |

Omicron mittauslaitteiston tekniset tiedot**Omicron CP CU1 Kytkenäyksikön tekniset ominaisuudet**

Virran syötön alueet [4]

| Alue | Virta | Jännite > 45 Hz |
|-------|--------------|-----------------|
| 10 A | 0...10 Arms | 500 Vrms |
| 20 A | 0...20 Arms | 250 Vrms |
| 50 A | 0...50 Arms | 100 Vrms |
| 100 A | 0...100 Arms | 50 Vrms |

Mittamuuntajat [4]

| Muuntaja | Muuntosuhde | Tarkkuusluokka 50/60 Hz |
|-----------------|-------------|-------------------------|
| Jännitemuuntaja | 600 / 30 V | Luokka 0,1 |
| Virtamuuntaja | 100 / 2,5 A | Luokka 0,1 |

Sisääntulot [4]

| | Selitys | Luokka |
|---|---------------------|---|
| Jännitteenmittaus (V SENSE) | Ylijännitekategoria | CAT III (IEC 61010-1) |
| | Jännitealue | 0...600 Vrms |
| BOOSTER -liitäntä (CPC 100 ja CP CU1 välinen tehonsyöttö) | Ylijännitekategoria | CAT I |
| | Jännitealue | 0...200 Vrms |
| | Virta-alue | 0...30 Arms |
| | Taajuusalue | 15...400 Hz |
| | Sulake | 30 A nopea, automaattinen katkaisija |

Omicron CP GB1 Maadoitusyksikön tekniset ominaisuudet

Maadoitusyksikkö [4]

| Selitys | Muuntosuhde |
|--|------------------------------|
| Nimellinen AC kipinä ylijännite | < 1000 Vrms |
| Impulssi kipinä ylijännite | < 2000 Vpeak |
| Oikosulkukestoisuus: | |
| 16 mm sylinteri- tai 20 mm pallotappi | 26,5 kA (<100 ms)/ 67 kApeak |
| 25 mm- tai 1 tuuman pallotappi | 30 kA (<100ms)/ 75 kApeak |
| Ylijännitesuojien kiinnityspultin kiristysmomentti | yli 15 Nm |

Ulostuloteho

Omicron CPC100 primäärikoestuslaitteen ja CP CU1 kytkentäyksikön ulostuloteho [4]

| Selitys | Muuntosuhde ¹⁾ |
|--------------|---|
| Maksimi teho | 5000 VA (45...70 Hz), $\cos\varphi < 1,0$; maks. 8 sekuntia/ 230 Vac |
| Jatkuva teho | 0...1600 VA |
| Taajuus | 15...400 Hz (15...45 Hz alennetulla jännitteellä) |

1) Ympäristön lämpötila 23 °C ±5 °C

Tarkkuusluokka

Omicron CPC100 primäärikoestuslaitteen ja CP CU1 kytkentäyksikön tarkkuusluokka [4]

| Impedanssi- alue [Ω] | Tyypillinen tarkkuus ¹⁾ Z [%] | Tyypillinen tarkkuus ¹⁾ Vaihek. [°] | Jännitealue (V SENSE) [V] | Virta-alue (I OUT) [A] | Virta-alue [A] |
|----------------------------|--|--|---------------------------------|------------------------------|-------------------|
| 0,05...0,2 | 1,0...0,5 | 1,5...0,8 | 5...20 | 100 | 100 |
| 0,2...2,0 | 0,5...0,3 | 0,8...0,5 | 20...50 | 100...25 | 100 |
| 2...5 | 0,3 | 0,5 | 100 | 50...20 | 50 |
| 5...25 | 0,3 | 0,5 | 100...250 | 20...10 | 20 |
| 25...300 | 0,3...1,0 | 0,5...1,5 | 250...500 | 10...1,5 | 10 |

1) Ympäristön lämpötila 23 °C ±5 °C

Mekaaniset ominaisuudet

Omicron CPC 100 primäärikoestuslaitteen, CP CU1 kytkentäyksikön ja CP GB1 maadoitusyksikön mekaaniset ominaisuudet. [4; 30]

| Laite | Selitys | Arvo |
|---------|-------------------|---|
| CPC 100 | Mitat (l x k x s) | 468 x 394 x 233 mm (ilman kantta ja kantokahvoja) |
| | Paino | 29 kg |
| CP CU1 | Mitat (l x k x s) | 450 x 220 x 220 mm |
| | Paino | 28,5 kg |
| CP GB1 | Mitat (φ x k) | 200 x 190 mm |
| | Paino | n. 6,8 kg |

Avojohtimet ja ajolangat ACSR ja AACSR

OMINAISUUDET

| TUOTTEEN NIMI | | ACSR 34/6 Sparrow | ACSR 54/9 Raven | ACSR 85/14 Pigeon | ACSR 305/39 Duck | ACSR 565/72 Finch | AACSR 106/25 Sustrong | | |
|--|-----------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------|
| Tuotteen IEC:n mukainen nimitys | | 34-A1/S1A-6/1 | 54-A1/S1A-6/1 | 85-A1/S1A-6/1 | 305-A1/S1A-54/7 | 565-A1/S1A-54/19 | 91-A3/S1A-30/7 | | |
| Tuotteen EN:n mukainen nimitys | | 34-AL1/6-ST1A | 54-AL1/9-ST1A | 85-AL1/14-ST1A | 305-AL1/39-ST1A | 565-AL1/72-ST1A | 106-AL2/25-ST1A | | |
| Sähkönumero | | 0120202 | 0120205 | 0120209 | 0120221 | 0120224 | 0120152 | | |
| RAKENNETIETOJA | | | | | | | | | |
| Alumiini | lankalukumäärä | 6 | 6 | 6 | 54 | 54 | 30 | | |
| | lankahalkaisija | 2,68 | 3,37 | 4,25 | 2,68 | 3,65 | 2,12 | | |
| | poikkipinta | 33,8 | 53,5 | 85,1 | 305 | 565 | 106 | | |
| | massa (5) | 93 | 147 | 234 | 842 | 1562 | 293 | | |
| Teräs | lankalukumäärä | 1 | 1 | 1 | 7 | 19 | 7 | | |
| | lankahalkaisija | 2,68 | 3,37 | 4,25 | 2,68 | 2,19 | 2,12 | | |
| | poikkipinta | 5,64 | 8,92 | 14,2 | 39,5 | 71,6 | 24,7 | | |
| | massa (5) | 44 | 69 | 110 | 309 | 561 | 193 | | |
| Johdin | lankalukumäärä | 7 | 7 | 7 | 61 | 73 | 37 | | |
| | halkaisija | 8,04 | 10,1 | 12,8 | 24,1 | 32,9 | 14,8 | | |
| | poikkipinta | 39,5 | 62,4 | 99,3 | 344 | 637 | 131 | | |
| | massa (5) | 137 | 216 | 344 | 1151 | 2123 | 486 | | |
| TOIMITUSTIETOJA | | | | | | | | | |
| Vakiotoimituspituus | | m | 2500 | 2200 | 2000 | 2500 | 1400 | 2500 | |
| Toimituskela | | | 9FV | 11GV | 11GV | K22 | K22 | K14 | |
| Massa (1) | | kaapeli+kela | kg | 395 | 560 | 775 | 3290 | 3380 | 1330 |
| MEKAANISIA ARVOJA | | | | | | | | | |
| Pienin sallittu taiputussäde asennusvedossa | | m | 0,12 | 0,15 | 0,19 | 0,36 | 0,49 | 0,22 | |
| Pienin sallittu taiputussäde lopullisessa asennuksessa (6) | | m | 0,08 | 0,11 | 0,13 | 0,25 | 0,34 | 0,15 | |
| Johtimen nimellinen murtolujuus | | kN | 12,2 | 18,6 | 29,2 | 96,8 | 174 | 63,3 | |
| Johtimen alkukimmomoduli | | N/mm ² | 64 000 | 64 000 | 64 000 | 50 000 | 46 000 | 66 000 | |
| Johtimen loppukimmomoduli | | N/mm ² | 78 000 | 78 000 | 78 000 | 67 000 | 63 000 | 78 000 | |
| Johtimen lämpöpitäenäkkeroin | | 1/K | 19,2 x 10 ⁻⁶ | 19,2 x 10 ⁻⁶ | 19,2 x 10 ⁻⁶ | 19,3 x 10 ⁻⁶ | 19,3 x 10 ⁻⁶ | 17,8 x 10 ⁻⁶ | |
| SÄHKÖISIÄ ARVOJA (2) | | | | | | | | | |
| Johtimen tasavirtaresistanssi (3) (5) | | johdin 20°C | Ω/km | 0,848 | 0,536 | 0,337 | 0,0949 | 0,0512 | 0,317 |
| KUORMITETTAVUUS (2) | | | | | | | | | |
| Ilmassa | | johdin 80°C | A | 210 | 280 | 360 | 845 | 1250 | 400 |
| TERMINEN OIKOSULKUKESTOISUUS (2) | | | | | | | | | |
| Suurin sallittu 1 sekunnin oikosulkuvirta (4) | | kA | 3,7 | 5,8 | 9,2 | 32,5 | 60,1 | 11,2 | |

(1) Likiarvo

(2) Katso taulukkoarvojen lähtöoletukset kappaleesta Yleistä tuotetietoa.

(3) Teräksen osuus johtimen resistanssia laskettaessa on jätetty huomioon ottamatta.

(4) Johtimen lämpötila on ennen oikosulkuä 40°C ja oikosulun päättyessä 200°C.

(5) Standardin mukaan laskettu nimellisarvo.

(6) Taiputus on tehtävä varovaisena ja tasaisena kertataivutuksena.

Voimakaapelit 110 - 400 kV AHXLMK-W ja HXLMK-W 110 kV

OMINAISUUDET

| TUOTTEEN NIMI | | AHXLMK-W lx300 110 kV | AHXLMK-W lx500 110 kV | AHXLMK-W lx800 110 kV | AHXLMK-W lx1200 110 kV | HXLMK-W lx1600 110 kV | HXLMK-W lx2000 110 kV |
|--|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Sähkönumero | | 062447 | 0624418 | 0624419 | 0624421 | 0624431 | 0624432 |
| RAKENNETIETOJA (1) | | | | | | | |
| Johtimen halkaisija | mm | 20,3 | 26,0 | 33,4 | 40,8 | 48,8 | 55,0 |
| Kosketussuojan ulkohalkaisija | mm | 63 | 69 | 75 | 83 | 92 | 99 |
| Kaapelin ulkohalkaisija | mm | 70 | 77 | 83 | 92 | 101 | 109 |
| Massa | alumiini | kg/km | 810 | 1340 | 2210 | 3300 | - |
| | kupari | kg/km | - | - | - | - | 14350 |
| | lyijy | kg/km | 4600 | 5300 | 6100 | 7400 | 8200 |
| | kaapeli | kg/km | 8200 | 9900 | 11900 | 14900 | 27700 |
| MEKAANISIA ARVOJA (3) | | | | | | | |
| Pienin sallittu taiputusääde asennusvedossa | m | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,7 | 1,8 | 2,0 |
| Pienin sallittu taiputusääde lopullisessa asennuksessa (4) | m | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 |
| Suurin sallittu asennusvetovoima vetosukalla | kN | 4,5 | 7,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |
| Suurin sallittu asennusvetovoima vetopäällä | kN | 15 | 20 | 24 | 36 | 80 | 100 |
| SÄHKÖISIÄ ARVOJA (3) | | | | | | | |
| Vaihejohtimen maks. tasavirtaresistanssi | johdin 20°C | Ω/km | 0,100 | 0,0605 | 0,0367 | 0,0247 | 0,0113 |
| Vaihejohtimen vaihtovirtaresistanssi (2) • 3 kaapelia tasossa • 3 kaapelia kolmiossa | johdin 65°C | Ω/km | 0,15 | 0,10 | 0,073 | 0,064 | 0,048 |
| | johdin 90°C | Ω/km | 0,15 | 0,11 | 0,075 | 0,065 | 0,048 |
| | johdin 65°C | Ω/km | 0,13 | 0,080 | 0,053 | 0,041 | 0,023 |
| | johdin 90°C | Ω/km | 0,14 | 0,085 | 0,056 | 0,043 | 0,023 |
| Kosketussuojan tasavirtaresistanssi (1) | kosketussuoja 20°C | Ω/km | 0,60 | 0,52 | 0,45 | 0,38 | 0,33 |
| Induktanssi vaihetta kohti (1) • 3 kaapelia tasossa • 3 kaapelia kolmiossa | | mH/km | 0,62 | 0,60 | 0,56 | 0,54 | 0,52 |
| | | mH/km | 0,44 | 0,41 | 0,37 | 0,35 | 0,34 |
| Käyttökapasitanssi (1) | | µF/km | 0,15 | 0,18 | 0,23 | 0,26 | 0,30 |
| Varausvirta (1) | | A/km | 3,1 | 3,6 | 4,5 | 5,2 | 6,1 |
| Maasulkuvirta (1) | | A/km | 9,2 | 10,7 | 13,6 | 15,7 | 18,2 |
| KUORMITETTAVUUS (3) | | | | | | | |
| Maassa • 3 kaapelia tasossa | johdin 65°C (5) | A | 425 | 565 | 740 | 900 | 1360 |
| | johdin 65°C (2) | A | 400 | 500 | 605 | 670 | 800 |
| Maassa • 3 kaapelia kolmiossa | johdin 65°C (5) | A | 410 | 540 | 700 | 840 | 1230 |
| | johdin 65°C (2) | A | 405 | 530 | 670 | 780 | 1085 |
| Ilmassa • 3 kaapelia tasossa | johdin 65°C (5) | A | 515 | 695 | 945 | 1180 | 1835 |
| | johdin 65°C (2) | A | 485 | 625 | 785 | 895 | 1150 |
| Ilmassa • 3 kaapelia kolmiossa | johdin 65°C (5) | A | 465 | 625 | 840 | 1040 | 1590 |
| | johdin 65°C (2) | A | 460 | 615 | 810 | 980 | 1430 |
| Ilmassa • 3 kaapelia tasossa | johdin 90°C (5) | A | 640 | 870 | 1180 | 1490 | 2325 |
| | johdin 90°C (2) | A | 610 | 795 | 1010 | 1160 | 1515 |
| Ilmassa • 3 kaapelia kolmiossa | johdin 90°C (5) | A | 585 | 790 | 1060 | 1320 | 2035 |
| | johdin 90°C (2) | A | 580 | 780 | 1030 | 1260 | 1850 |
| TERMINEN OIKOSULKUKESTOISUUS (3) | | | | | | | |
| Suurin sallittu 1 sekunnin oikosulkuvirta | vaihejohdin (6) | kA | 28,3 | 47,2 | 75,6 | 113 | 228 |
| | kosketussuoja (7) | kA | 10,9 | 12,5 | 14,3 | 17,2 | 19,0 |

(1) Likiaivo

(2) Kosketussuojat kytketty yhteen yhteyden molemmissa päissä.

(3) Katso taulukkoarvojen lähtöolettamukset kappaleesta Yleistä tuotetietoa.

(4) Taiputus on tehtävä varovaisena ja tasaisena kertataivutuksena.

(5) Kosketussuojat kytketty yhteen vain yhteyden toisessa päässä.

(6) Johtimen lämpötila on ennen oikosulkua 90°C ja oikosulun päättyessä 250°C.

(7) Kosketussuojan lämpötila on ennen oikosulkua 70°C ja oikosulun päättyessä 210°C.

© Prysmian Group 2013. Kaikki oikeudet pidätetään.

Tämän asiakirjan sisältämää tietoa ei saa kopioida tai käyttää missään muodossa osaksi tai kokonaan ilman Prysmian Groupin kirjallista lupaa. Informaation uskotaan olevan ajan tasalla julkaisujankohdanta. Prysmian Group pidättää itselleen oikeuden korjata asiakirjan sisältämää tietoa ilman erillistä ilmoitusta. Spesifikaatio ei ole juridisesti pätevä ilman Prysmian Groupin erillistä sitoumusta.

Prysmian
Group