



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Antero Timo Tapani Fränti
Sähköradan suojaus impedanssimittauksella

Tekniikka ja liikenne
2010

ALKUSANAT

Tarkoituksena tässä työssä oli tutustua sähköradan toimintaan ja käyttäytymiseen etenkin vikatilanteessa. Työssä tehtyjä mittauksia ja laskelmia voidaan käyttää apuna sähköradan suojausta suunniteltaessa.

Haluan esittää kiitokseni Ari Wahlroosille, joka on ollut mukana tässä työssä ABB Oy:n puolelta. Lisäksi haluan kiittää erityisesti valvojaani Olavi Mäkistä, jolta olen saanut asiantuntevaa ja laadukasta ohjausta.

Vaasassa 18.1.2010

Antero Fränti

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkötekniikan koulutusohjelma

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Antero Fränti
Opinnäytetyön nimi	Sähköradan suojaus impedanssimittauksella
Vuosi	2010
Kieli	Suomi
Sivumäärä	92 + 1 liite
Ohjaaja	Olavi Mäkinen

Tämän työn tavoitteena on ollut selvittää miten sähkörata käyttäytyy vikatilanteessa ja millä tavalla sähköradan suojaus tulisi toteuttaa. Lisäksi työssä on ollut tarpeen tutustua sähköradan kahden erilaisen järjestelmän toimintaan. Toinen järjestelmä, eli 2x25 kV:a on ollut tämän päättöyön keskeisenä tutkittavana kohteena.

Työn alussa oleva teoriaosuus käsittelee kahta erilaista sähköradoilla olevaa järjestelmää. Toinen on 1x25 kV:n järjestelmä ja toinen 2x25 kV:n järjestelmä. Kummastakin järjestelmästä selvitetään teoriaosuudessa toimintaperiaate. Siirryttäessä tutkimaan tarkemmin sähköradan toimintaa vikatilanteessa, käytetään laskelmissa 2x25 kV:n järjestelmää, jonka pohjalta tämä työ on tehty.

Tämän päättöyön tulosten perusteella voidaan todeta se, että kyseinen rataosuus on suojattavissa kaikissa vikatilanteissa, vaikka vikaresistanssin arvo vaihtelisikin nollan ja viidenkymmenen ohmin välillä.

Asiasanat sähkörata, järjestelmä, suojaus

SISÄLLYS

ALKUSANAT	2
TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT	4
SÄHKÖRATAJÄRJESTELMÄN KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT	7
1 JOHDANTO	9
1.1 Työn tarkoitus ja tavoitteet	9
1.2 Laajuus ja alueen rajaus.....	10
2 ABB OY.....	11
2.1 ABB lyhyesti.....	11
2.2 Tarkemmin ABB:stä.....	11
3 SÄHKÖRADAN YLEISKUVAUS.....	13
3.1 Sähkörata	13
3.2 Euroopan sähköjärjestelmät	13
3.3 Sähköradan toimintaperiaate.....	14
3.3.1 Tarkempi kuvaus järjestelmistä 1x25 kV ja 2x25 kV	20
3.3.2 Johtimet	21
4 KÄYTTÖKESKUS.....	25
4.1 Käyttökeskukset	25
4.2 Peruskytkentä.....	25
4.3 Oikosulku ratajohdossa.....	26
4.3.1 Automaattinen pikajälleenkytkentä	27
5 RADAN TOIMINTAA YLLÄPITÄVÄT LAITTEET	28
5.1 Radan suojaus-, käyttö- ja valvontalaitteet.....	28
5.2 R-X-koordinaatisto.....	31
6 SÄHKÖRADAN MALLINNUS PSCAD-OHJELMALLA.....	35
6.1 2x25 kV sähköradan mallinnus PSCAD- ohjelmalla	35
6.2 Simulointimallin kuvaus.....	35

6.3 Laskelmat simulointimallilla	39
6.3.1 Ajojohtimen ja M-johtimen välinen vika.....	40
6.3.2 Vastajohtimen ja M-johtimen välinen vika.....	49
6.3.3 Ajojohtimen ja vastajohtimen välinen vika.....	56
6.3.4 Vikaresistanssin vaikutus impedanssimäärityksen tarkkuuteen	65
6.3.5 Impedanssin tarkastelu kahden automuuntajan väliltä	79
7 YHTEENVETO.....	87
LÄHDELUETTELO.....	90
LIITE.....	93

SÄHKÖRATAJÄRJESTELMÄN KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT

Ajojohdin	On ajolangan ja kannattimen tai vain ajolangan muodostama johdin.
Ajolanka	On ajojohtimen alempi osajohdin, josta virroitin ottaa tehoa.
Erotusjakso (EJ)	On rakenne, jossa ajojohdin on vierekkäisten syöttöalueiden rajalla eristetty pituussuunnassa kahdesta peräkkäisestä kohdasta, joiden väliin jää maadoitettu osa.
Imumuuntaja (IM)	On muuntaja, jonka ensiökäämi on sarjassa ajojohtimen kanssa ja toisiokäämi paluujohtimen kanssa ja jonka tarkoitus on pakottaa paluuvirta kulkemaan paluujohtimessa.
Imumuuntajaväli	On kahden peräkkäisen imumuuntajan väli.
Kannatin	On ajojohtimen koostuessa ajolangasta ja kannattimesta sen ylempiosajohdin, joka kannattaa ripustimien välityksellä ajolankaa.
Katkaisija	On kytkinlaite, joka pystyy katkaisemaan, sulkemaan ja johtamaan kuormitusvirran lisäksi myös oikosulkuvirran.
Käyttökeskus	On keskus, jossa käyttöpäivystäjä tekee keskitetysti sähköradan kytkentämuutoksia ja valvoo energian käyttöä.
Kääntöorsi	On pylvääseen tai vastaavaan kannatusrakenteeseen kiinnitetty, eristimillä varustettu ajojohdinta kannattava rakenne, joka pääsee kääntymään vaakatasossa.
M-johdin	On yleensä ilmassa oleva maadoitusjohdin, jota käytetään ratajohto-pylväiden ja muiden rakenteiden maadoittamiseen paluukiskoon.
M-johtimen kiskoonliitännä (MKL)	On M-johtimen liitännä paluukiskoon. /10/

Paluujohdin	On paluuvirtaa varten oleva johdin, joka liitetään paluukiskoon jokaisen imumuuntajavälin keskivaiheilla.
Paluukisko	On paluuvirtatien osana toimiva metallisesti yhtenäinen ratakisko.
Paluuvirta	On kuormituskohdasta tai vikapaikasta syöttöasemalle palaava virta.
Paluuvirtatie	On osa sähköradan virtapiiriä, jota pitkin virta palaa kuormitus- tai vikapaikasta syöttöasemalle.
Portaali	On kannatusrakenne, jonka muodostavat jalkoina olevat pylvää ja niitä yhdistävät orret (portaaliorret).
Säästömuuntaja (AM)	On sähköistysjärjestelmässä 2x25 kV radanvarteen noin 7 km välein sijoitettu muuntaja, jonka tarkoitus on pakottaa paluuvirta palaamaan vastajohtimessa.
Syöttöasema	On kytkinlaitos, josta syötetään teho sähköradalle.
Sähköistysjärjestelmä 25 kV	On Suomessa yleisesti käytetty sähköistysjärjestelmä, jossa 25 kV käyttöjännite syötetään ajojohtimen ja paluukiskon väliin.
Sähköistysjärjestelmä 2x25 kV	On Sähköistysjärjestelmä, jossa 25 kV käyttöjännite syötetään ajojohtimen ja paluukiskon väliin ja samansuuruinen, mutta vastakkaismerkkinen jännite -25 kV vastajohtimen ja paluukiskon väliin.
Vastajohdin	On järjestelmään 2x25 kV kuuluva johdin, jolla on yhtä suuri, mutta vaiheeltaan vastakkainen jännite maata vastaan kuin ajojohtimella.
Virroitin	On osa, jonka kautta sähköveturi tai -juna ottaa ajolangasta tehoa.
Välilytkinasema	On muu katkaisijoita sisältävä sähköradan kytkinlaitos kuin syöttöasema. /10/

1 JOHDANTO

Nykyaikainen teollistunut yhteiskunta on hyvin riippuvainen monista palveluista. Yksi niistä on VR, eli Valtion Rautatiet. Suomessa VR hallinnoi täysin rautatieliikennettä. Toisin kuin muissa maissa joissa yrityksiä voi olla useitakin. Sekä tavarankuljetukseen että henkilöliikenteeseen joudutaan panostamaan nykypäivänä yhä enemmän. Tämä taas johtuu kasvavasta globalisaatiosta ja Suomen teollistuneesta yhteiskunnasta. VR onkin hyvin tärkeä tavaran sekä ihmisten kuljettajana paikasta toiseen. Jotta VR pystyy toteuttamaan toimintaansa luotettavasti ja turvallisesti, on siihen myös panostettava. Tätä varten sähköradoilla on käytössä erilaiset suojausjärjestelmät joiden tarkoituksena on suojata sähkörataa ja turvata virheetön toiminta erilaisissa tilanteissa. Tämän virheettömyyden ja radan toiminnan ylläpitämisen vuoksi tämäkin päättötyö on tehty.

1.1 Työn tarkoitus ja tavoitteet

Tämän työn tarkoituksena on selvittää miten sähkörata käyttäytyy erilaisissa vikatilanteissa. On tärkeää tietää millaisia sähköisiä arvoja radalla vikatilanteissa tulee. Tässä työssä on perehdytty tutkimaan 45 km:n rataosuutta. Rataosuudella on käytössä 2x25 kV:n järjestelmä. Työn tavoitteena on selvittää miten rata käyttäytyy eri vikatilanteissa. Saatuja mittausarvoja puolestaan voidaan hyödyntää suojausten asettelemisessä. Jotta rataosuus pystyy toimimaan ilman turhia keskeytyksiä, on radalla oltava riittävä suojaus. Rataosuuden suojaus toteutetaan suojarieleillä. Jotta suojarieleet toimivat oikein, luotettavasti ja suojaavat rataosuutta, täytyy reileiden asetteluarvot tehdä oikein. Tästä syystä on tiedettävä miten rata vikatilanteissa käyttäytyy ja millaisia sähköisiä arvoja vikatilanteet aiheuttavat radalla. Näistä arvoista pystytään sitten laskemaan suojarieleille tietyt asetteluarvot, jotta reieleet pystyvät suojaamaan rataa mahdollisimman tehokkaasti.

1.2 Laajuus ja alueen raja

Tässä työssä tutkitaan siis sähköradan käyttäytymistä vikatilanteessa. Kyseisessä työssä on tutkittu 2x25 kV:n järjestelmää. Työ on rajattu käsittelemään nimenomaan tätä kyseistä järjestelmää, eikä 1x25 kV:n järjestelmästä ole tehty simuloitteja. Kyseisestä järjestelmästä on ainoastaan mainittu toimintaperiaatteet ja muutenkin käsitelty järjestelmää yleisellä tasolla. Työn laajuus olisi varmasti paisunut suureksi, mikäli myös toinen järjestelmä olisi otettu tutkittavaksi.

2 ABB OY

2.1 ABB lyhyesti

ABB perustettiin vuonna 1988, kun sveitsiläinen BBC Brown Boveri ja ruotsalainen ASEA yhdistyivät. Tällä hetkellä ABB:n pääjohtajana toimii amerikkalainen Joseph Hogan. Hän on toiminut yhtiön pääjohtajana 17.7.2008 alkaen. /1/

ABB toimii Suomessa usealla paikkakunnalla, mutta merkittävimmät niistä ovat Helsingin Pitäjänmäki sekä Vaasa. Henkilöstöä Suomessa on yli 6000. /1/

”ABB on yksi alansa johtavista sähkövoima- ja automaatio-teknologiayhtymistä, jonka tuotteet, järjestelmät ja palvelut pyrkivät parantamaan teollisuus- ja energiayhtiöasiakkaiden kilpailukykyä ympäristömyönteisesti. ABB:n visiona on auttaa asiakkaitaan hyödyntämään sähköä tehokkaasti, tuottavasti ja ympäristöystävällisesti. ABB:n palveluksessa työskentelee noin 100 maassa yli 120 000 henkilöä.” /2/

2.2 Tarkemmin ABB:stä

ABB:n ydinliiketoiminta jakautuu viiteen eri divisioonaan. Nämä divisioonat ovat: Sähkövoimatuotteet, Sähkövoimajärjestelmät, Automaatiotuotteet, Prosessiautomaatio ja Robotit. Sähkövoimatuotteet-divisioonaan kuuluu mm. muuntajien, kojeistojen, releiden, katkaisijoiden yms. valmistus. Sähkövoimajärjestelmät-divisioona tarjoaa mm. sähkönjakeluun ja voimansiirtoon liittyviä palveluja. Automaatiotuotteisiin kuuluu mm. taajuusmuuttajia, moottoreita ja tehoelektroniikkaa. Prosessiautomaatioon luokitellaan mm. sellaisia laitteita joilla pyritään parantamaan tuottavuutta ja energiatehokkuutta. Robotit-divisioonassa luonnollisestikin valmistetaan robotteja sekä niiden tarvitsemia oheislaitteita. /2/3/

Tämä päättötyö on tehty ABB:n sähköjakeluautomaatio-yksikköön. Kyseinen yksikkö tuottaa asema-automaation, suojaukseen sekä käytönvalvontaan tarkoitettuja laitteita. Tämä kyseinen yksikkö on tärkeässä asemassa, kun puhutaan sähköverkon suojarleiden, hälytyslaitteiden, paikallisautomaation ja kaukokäyttöjärjestelmien valmistuksesta, kehityksestä sekä markkinoinnista. /4/

Kuvassa 1 on esitettyä ABB- yhtymän avainlukuja vuodelta 2008.

ABB-yhtymän avainluvut 2008 (MUSD)

(31.12.2008)

	Vuosi 2008	Vuosi 2007
Tilaukset	38 282	34 348
Liikevaihto	34 912	29 183
Tulos ennen korkoja ja veroja	4 522	4 023
Nettotulos	3 118	3 757
Operatiivinen kassavirta	3 958	3 054
Henkilöstö	120 000	112 000

Kuva 1. Avainluvut /5/

3 SÄHKÖRADAN YLEISKUVAUS

3.1 Sähkörata

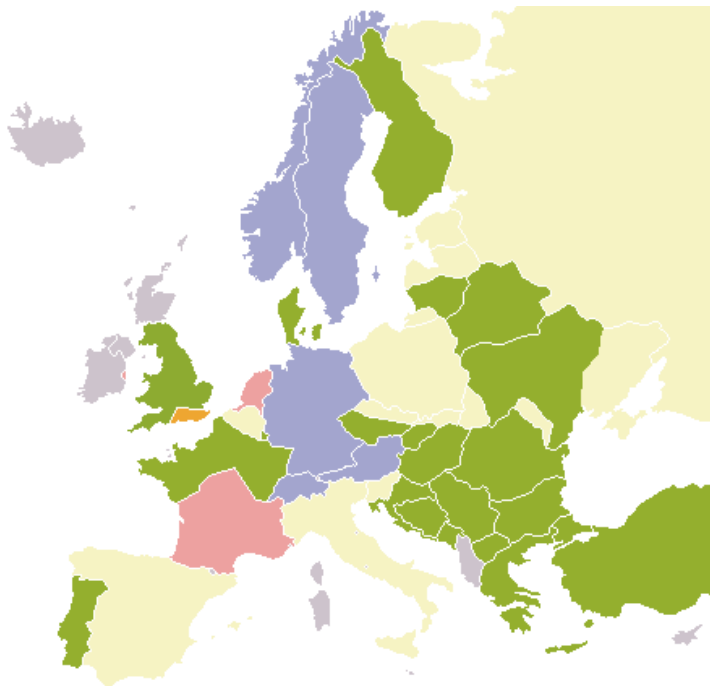
Suomessa sähköradalla on käytössä kaksi sähköistysjärjestelmää. Toinen on 1x25 kV:a ja toinen 2x25 kV:a. Ratahallintokeskus vastaa näistä järjestelmistä Suomessa. Sähkörata itsessään koostuu monista osatekijöistä. Seuraavassa listattuna sähköratarakenteeseen kuuluvia osia: Ratajohdon johtimet ja niiden kannatusrakenteet (pylväät, portaalit, kääntöorret), syöttö- ja välilytkinasemat, imumuuntajat, radanvarsisäästömuuntajat, eristimet ja erottimet. Sähköratarakenne ei pelkästään koostu näistä edellä mainituista komponenteista, vaan sen lisäksi listaan on syytä lisätä sähköistettyjen raiteiden kiskot sekä erilaiset suojamaadoitusjohtimet, joiden tarkoituksena on maadoittaa sähköradan läheisyydessä olevat metallirakenteet. /6/

Imumuuntajia käytetään 1x25 kV:n järjestelmässä ja säästömuuntajia 2x25 kV:n järjestelmässä. Myös syöttöasemien kaukokäyttökeskukset, jotka ovat Suomessa Kouvolassa, Helsingissä, Tampereella ja Oulussa kuuluvat sähköratarakenteeseen. /7/

3.2 Euroopan sähköjärjestelmät

Eurooppa on jakautunut sähköjärjestelmissään varsin moninaisesti. Suomessa sähköjärjestelmiä on kaksi. Tällä hetkellä yleisin järjestelmä on 1x25 kV:a. Toinen järjestelmä on uudempi 2x25 kV:a. Suomessa käytetty taajuus on 50 Hz:ä. Uudempi järjestelmä ei vielä ole kovin laajalti käytössä sen uutuuden vuoksi, mutta sen käyttöä lisätään tulevaisuudessa. Kuvasta 2 voidaan todeta, miten erilaiset järjestelmät ovat jakautuneet Euroopan mittakaavassa. 25 kV:n järjestelmä on selvästi käytetyin Euroopassa. 15 kV:n sekä 3 kV:n järjestelmät ovat myös kohtuullisen yleisiä. Muut järjestelmät eivät ole niin yleisiä ja niiden käyttö onkin rajoittunut vain muutamiin Euroopan maihin. Sähköjärjestelmissä käytetään yleisesti 50 Hz taajuutta. On kuitenkin olemassa järjestelmiä joissa on eri taajuus, kuten esim. $16\frac{2}{3}$ Hz:ä. Kyseinen taajuus on 15 kV AC -järjestelmässä.

/8/



Kuva 2. Euroopan rautateiden sähköjärjestelmiä /7/



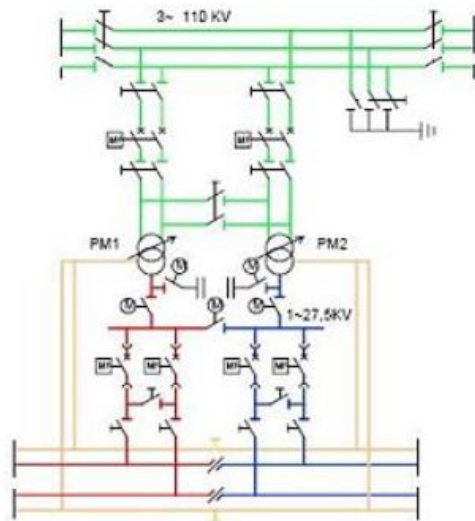
Jos puhutaan sähköjärjestelmistä Euroopan ulkopuolella, eivät järjestelmät kovin paljoa poikkea Eurooppalaisista. Yleisimpiä järjestelmiä ovat myös muualla maailmassa 1500 V DC, 3 kV DC sekä 25 kV AC. Taajuuksissa on tietysti olemassa pieniä eroja. Yleisimmin käytetyt taajuudet ovat 50 Hz:ä ja 60 Hz:ä.

/8/9/

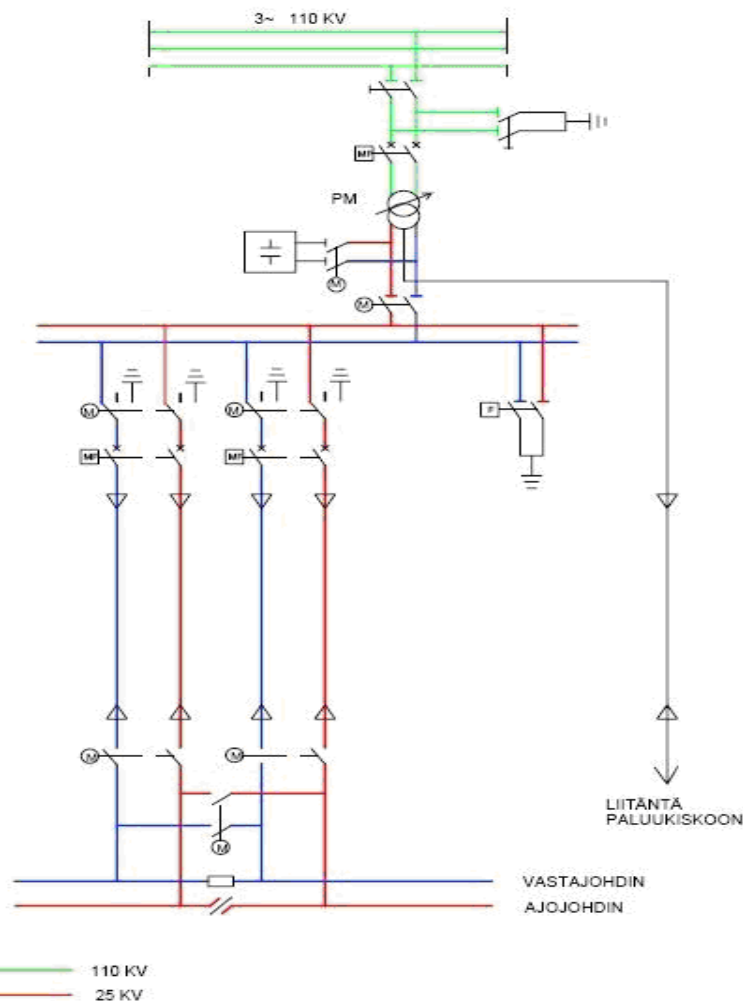
3.3 Sähköradan toimintaperiaate

Sähköistetyn radan määritelmiin kuuluu normaalin radan rakenteiden lisäksi laitteet ja rakenteet, joita tarvitaan vetokaluston toiminnoissa. Näitä toimintoja ovat toiminnan turvaaminen, vaaratekijöiden poistaminen, sähköisen energian muuntaminen sekä siirto. Käyttöenergia sähköistettyyn rataan otetaan 110 kV:n

kantaverkosta. Tässä apuna käytetään syöttöasemia. Syöttöasemien kautta syötetään 1x25 kV järjestelmässä ajojohtimeen 25 kV:a. Jännite on tällöin taajuudeltaan 50 Hz:ä ja on yksivaiheista. 2x25 kV:n järjestelmässä sen sijaan syötetään lisäksi vastajohtimeen -25 kV:a, taajuudeltaan edelleen 50 Hz:ä. Tällöinkin kyseessä on yksivaihejännite. Erotusjaksoa tarvitaan, koska 110 kV:n syöttö lukee eri vaiheista erotusjakson eri puolille. Erotusjakso on asennettu ajojohtimeen. Tavallisesti nämä erotusjaksot sijoitetaan syöttöasemavälin keskelle ja asemien kohdalle. Kuvassa 3 on esitettyä järjestelmän 1x25 kV:a syöttöasema. Kuvassa 4 on esitettyä järjestelmän 2x25 kV:a syöttöasema. /10/



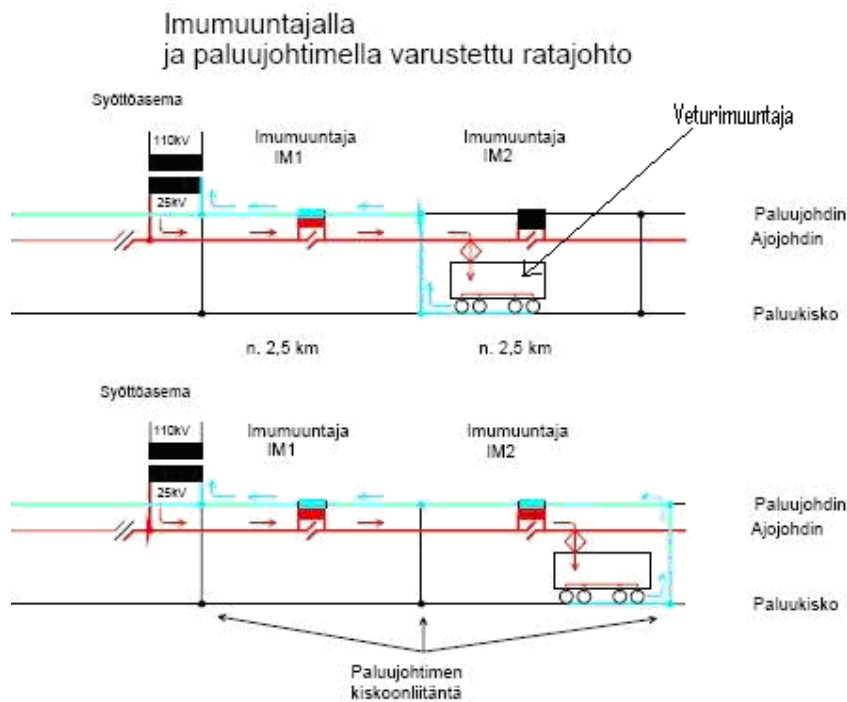
Kuva 3. Järjestelmän 1x25 kV:a syöttöasema /7/



Kuva 4. Järjestelmän 2x25 kV syöttöasema /7/

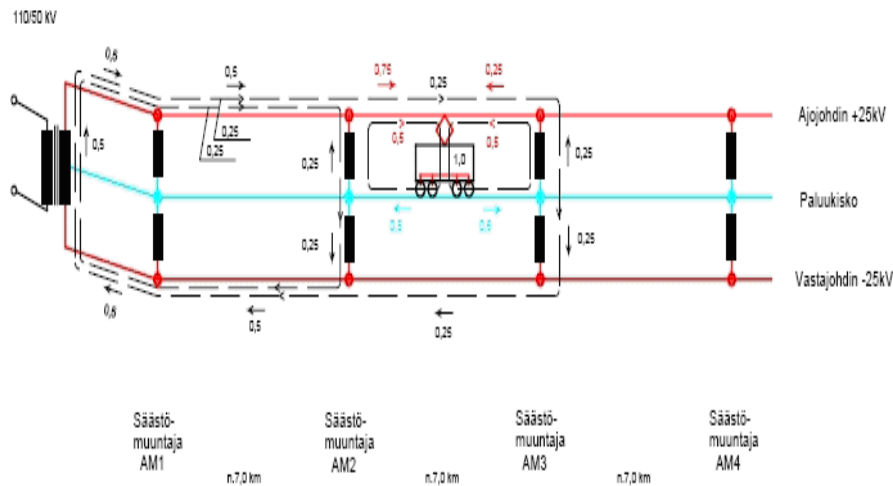
Sähkövetokalusto tarvitsee tehoa. Tarvittava teho otetaan syöttöasemalta. Virran kulkutie sähkömoottoreihin tapahtuu ajolankaa pitkin virroittimen kautta. Paluuvirta kulkeutuu takaisin syöttöasemalle. Aluksi virta etenee kalustosta kiskoihin, jonka jälkeen imumuuntajia hyväksikäyttäen virta siirretään paluujohtimeen. Tästä virta etenee takaisin syöttöasemalle. Tämä kyseinen menetelmä toimii siis 1x25 kV:n järjestelmässä. Puhuttaessa 2x25 kV:n järjestelmästä toimitaan hiukan toisin. Imumuuntajien sijasta käytetään säästömuuntajia, joiden avulla paluuvirta saadaan kuljetettua vastajohtimeen ja edelleen syöttöasemalle. Koska Suomen maaperä on heikosti johtava, voi tämän seurauksena aiheutua vaara- ja häiriöjännitteitä, jotka ylittävät sallitut arvot. Näiden syiden takia on ratajohto varustettava säästömuuntajilla ja vastajohtimella tai imumuuntajilla ja paluujohtimella. Kuvassa 5 havainnollistetaan virran kulkua

järjestelmässä 1x25 kV:a. /10/



Kuva 5. Virran kulkutie syöttöaseman ja vetokaluston välillä järjestelmässä 1x25 kV /7/

Imumuuntajien käyttöönotolle on selkeä syy. Imumuuntajien tarkoituksena on vähentää paluuvirran aiheuttamia häiriöitä ja vaaroja. Puhuttaessa näiden imumuuntajien kytkennöistä, voidaan todeta niiden olevan sarjamuuntajia. Tarkemmin sanottuna ensiö on sarjassa ajojohtimen kanssa ja toisiö on sarjassa paluujohtimen kanssa. Muuntosuhde on tällöin 1:1. Aiemmin on jo käynyt selväksi, että järjestelmässä 2x25 kV:a käytetään imumuuntajien asemesta säästömuuntajia. Säästömuuntajien etäisyys toisistaan saa olla enintään noin 7 km:ä. Tämä siksi, että muussa tapauksessa vaara- ja häiriöjännitteet tulisivat liian suuriksi. On myös tärkeää ottaa huomioon säästömuuntajien sijoitukseen liittyvät asiat. Muuntajat eivät saisi aiheuttaa näköesteitä tasoristeyksissä ym. paikoissa. Kuvassa 6 on esitettyä virran kulkutie järjestelmässä 2x25 kV:a. /10/



Kuva 6. Virran kulkutie syöttöaseman ja vetokaluston välillä järjestelmässä 2x25 kV /7/

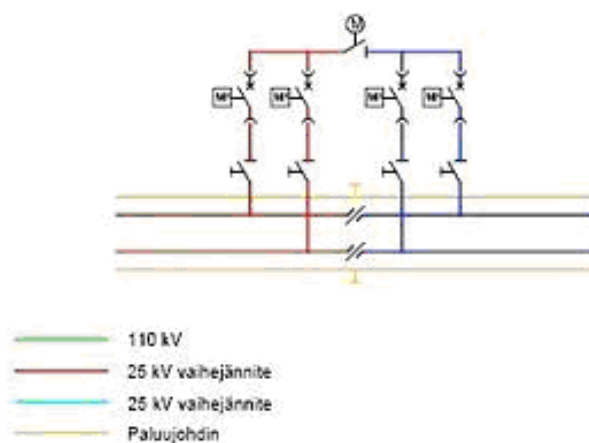
Käyttökeskuksen avulla pystytään ohjaamaan sähkölaitteita. On olemassa erilaisia ohjaustauluja, joiden avulla pystytään ohjaamaan sekä syöttö- ja välilytkin- asemien toimintaa että erottimien toimintaa. Erottimia pystytään ohjaamaan paikallisohjaustaulusta tai käsiohjauksella. Tämä tapahtuu joko moottorilla tai käsikammella erottimen luota. /10/

Puhuttaessa sähköratajärjestelmästä on syytä todeta, että raiteet toimivat paluukiskoina. Tämä on mahdollista molemmilta kiskoilta tai vain toiselta. Paluukisko on siis osa paluuvirtatietä. Paluukiskosta on hyvä tietää se, että katkeaman yli vallitsee potentiaaliero. Toiselta nimeltään tätä kutsutaan katkeamajännitteeksi. Kyseinen jännite voi olla hengenvaarallinen. /10/

Kun puhutaan syöttöasemasta ja välilytkinasemasta, voidaan niistä käyttää yhteisnimeä kytkinasema. Sähköratajärjestelmä tarvitsee toimiakseen sähköenergiaa. Tämän kyseisen sähköenergian syöttö toteutetaan syöttöasemien kautta. Toiselta nimeltään niitä kutsutaan muuntoasemiksi. Nämä syöttöasemat

sijaitsevat noin 35-50 km:n välein radan varressa. Tämä välimatka on järjestelmässä 1x25 kV:a. Kun puhutaan järjestelmästä 2x25 kV:a, on syöttöasemaväli hiukan toinen. Se saattaa olla noin 90 km:ä. Puhuttaessa näin pitkistä etäisyyksistä on mahdollista, että syöttöasemien väliin sijoitetaan välilytkinasema. Tämän välilytkinaseman tarkoituksena on parantaa sähköradan sähköistä suojausta ja radan käyttöominaisuuksia. Välilytkinasema ei ole välttämätön ratkaisu, sillä se on korvattavissa. Tähän tarkoitukseen käytetään kauko-ohjattavaa erotinta. /10/

Mikäli ajojohdinten välillä tehtävät kytkennät ovat eri ryhmää, toteutetaan kytkennät tässä tapauksessa erottimilla. Erotintyyppiä on monia ja näin ollen myös paluujohtimelle on oma erottimensa. Tämä mahdollistaa sen, että vierekkäisten raiteiden paluujohtimet on mahdollista kytkeä rinnan. Erottimen paikka on joko imumuuntajatelineessä tai – pylväässä. Jos käytetään 2x25 kV:n järjestelmää, on tällöin käytössä kaksinapainen erotin. Se mahdollistaa ajojohtimen ja vastajohtimen kytkentöjen tekemisen samanaikaisesti. Kuvassa 7 on havainnollistettu järjestelmän 1x25 kV:a välilytkinasema. /10/



Kuva 7. Järjestelmän 1x25 kV välilytkinasema /7/

Kytettäessä syöttöaseman päämuuntajat 110 kV:n kantaverkon eri vaiheisiin, syntyy vierekkäisten syöttöalueiden jännitteiden välille vaihe-ero. Tämän takia syöttöalueiden tulisi olla sähköisesti erotuttuna toisistaan. Kyseinen erotus voidaan toteuttaa asentamalla kyseisten alueiden rajalle erotuskenttä, jonka keskiosa on maadoitettu. Koska virransyöttö katkeaa erotuskentän kohdalla, on paikka valittava niin, että juna voi rullata sen ohi. /10/

3.3.1 Tarkempi kuvaus järjestelmistä 1x25 kV:a ja 2x25 kV:a

1x25 kV:n järjestelmä ottaa sähkövirtansa 110 kV:n kantaverkosta. Jotta kantaverkon 110 kV:a voitaisiin muuttaa 25 kV:n jännitteeksi, tarvitaan siihen muuntajaa. Tähän tarkoitukseen on asennettu 110 kV/25 kV:n syöttömuuntaja. Suomessa syöttömuuntajan koko on n. 10 MVA. Sähkövirta lähtee etenemään edellä mainitun muuntajan toisiokäämityksestä eteenpäin. Siitä sähkövirta etenee muuntajan suojauksen ja erottimien läpi aina ajojohtimeen. Tästä sähkövirta kulkeutuu edelleen, tässä tapauksessa junan virroittimeen, josta edelleen junan virtapiireihin. Sähkövirran kulku ei pääty junan virtapiireihin, vaan se jatkaa matkaansa junan pyöristä ratakiskoon, josta se kulkeutuu edelleen imumuuntajalle. Imumuuntajan kautta virta puolestaan menee paluujohtimeen ja sieltä päättyy takaisin syöttömuuntajan toisiokäämitykseen. /7/

Imumuuntajien ja paluujohtinten käyttö on perusteltua, sillä niiden käyttö estää mahdollisten potentiaalierojen muodostumisen ratakiskoon. Myös paluuvirran kulkeutuminen takaisin syöttömuuntajan toisiokäämitykseen pystytään paremmin takaamaan. Normaaleissa olosuhteissa imumuuntajaväli on 2,5 km:ä. /7/

Järjestelmässä 2x25 kV:a sähkövirta kulkee eteenpäin 110 kV/50 kV:n syöttömuuntajasta. Tässä käytetään maadoitetun keskipisteen väliulosottoa, jolloin toisioon kuuluu paluukisko, +25 kV:n sekä -25 kV:n jännite. Imumuuntajia ei ole käytetty tässä järjestelmässä ollenkaan, vaan ne on korvattu säästömuuntajilla. Näin ollen erillistä paluujohtinta ei tarvita. Paluuvirta kulkee näin ollen ratakiskossa kahden säästömuuntajan välillä. Säästömuuntajalla on samoja

ominaisuuksia kuin imumuuntajallakin. Säästömuuntaja kykenee tasaamaan kiskojen potentiaalieroja, estämään häiriöitä ja varmistamaan paluuvirran kulkutien. Kuvassa 8 on nähtävissä imumuuntaja ja säästömuuntaja. /7/



Kuva 8. Imumuuntaja ja säästömuuntaja /11/

3.3.2 Johtimet

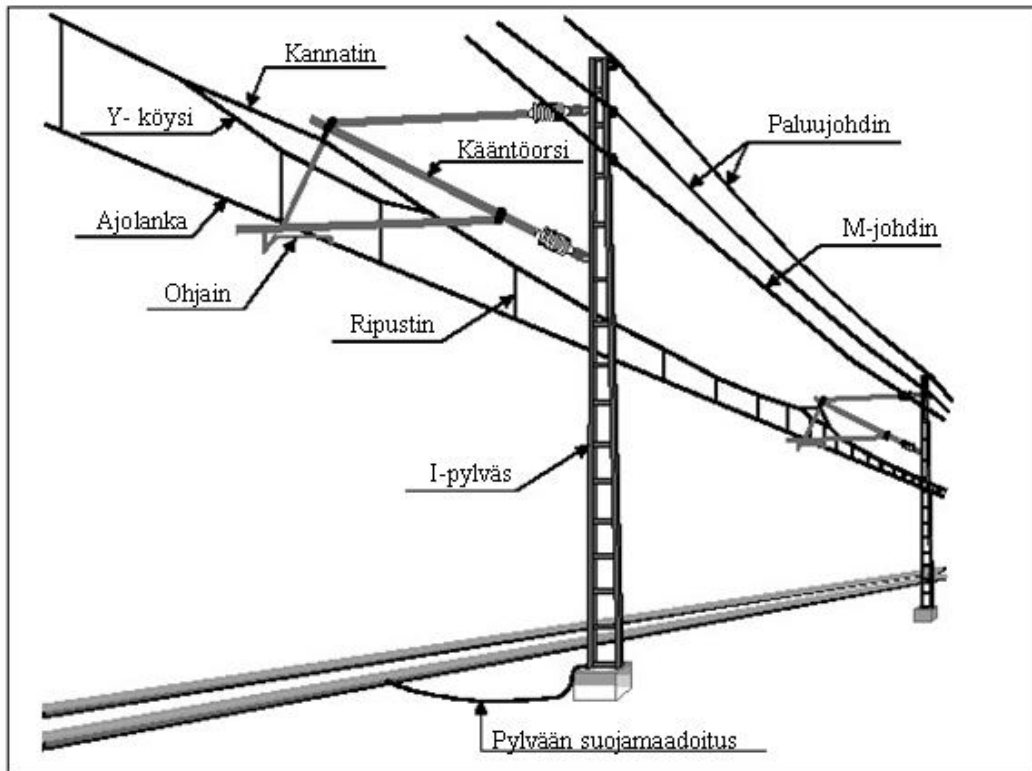
Paluujohdin muodostuu kahdesta osajohtimesta. Osajohtinten välinen etäisyys tulee olla vähintään 80 cm:ä toisistaan. Paluujohtimen kytkentä on tehtävä sarjaan kytkentänä imumuuntajan toisiopuolen kanssa ja tämän jälkeen liitettävä paluukiskoon. Etäisyys imumuuntajasta saa olla enintään 1,3 km:ä. /7/

Radan sähköistyksessä ei aina välttämättä tarvita imumuuntaja/paluujohdin tai säästömuuntaja/vastajohtin-järjestelmää. Tällöin käytetään reduktiojohtinta. Reduktiojohtin yhdistetään paluukiskoon. Yhdistäminen tapahtuu mikäli

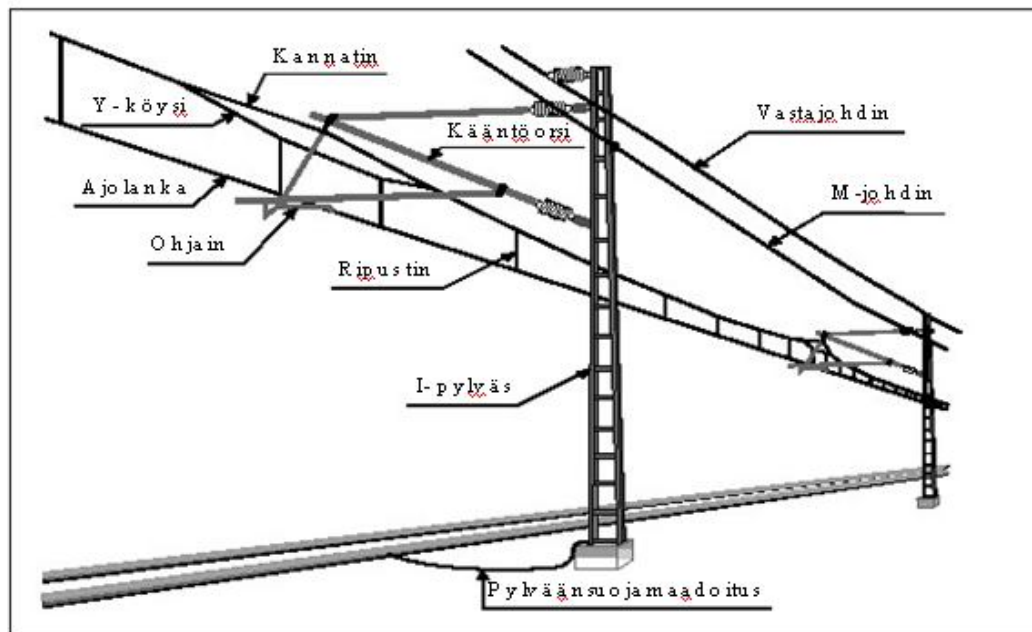
mahdollista, 300...500 m välein. Se onko yhdistäminen mahdollista, riippuu raidevirtapiireistä. /7/

M-johtimen käyttö ei ole sähköistysjärjestelmäriippuvainen. Toisin sanoen, sitä käytetään pylvään maadoitukseen. Tämä on turvallisuussy. Toinen syy löytyy ajojohtimen ja pylvään mahdollisesta koskettamisesta toisiinsa. Tällöin M-johtimella varmistetaan se, että syötön automaattinen poiskytkentä suorittaa tehtävänsä sille kuuluvalla nopeudella ja vaaraa aiheuttamatta. M- johdin ja paluukisko yhdistetään toisiinsa noin 200 m:n välein. Tämä tapahtuu silloin, kun raidevirtapiirit puuttuvat. Toinen mahdollinen tilanne tulee eteen jos kyseessä on eristetty yksikiskoinen raidevirtapiirin alue. /7/

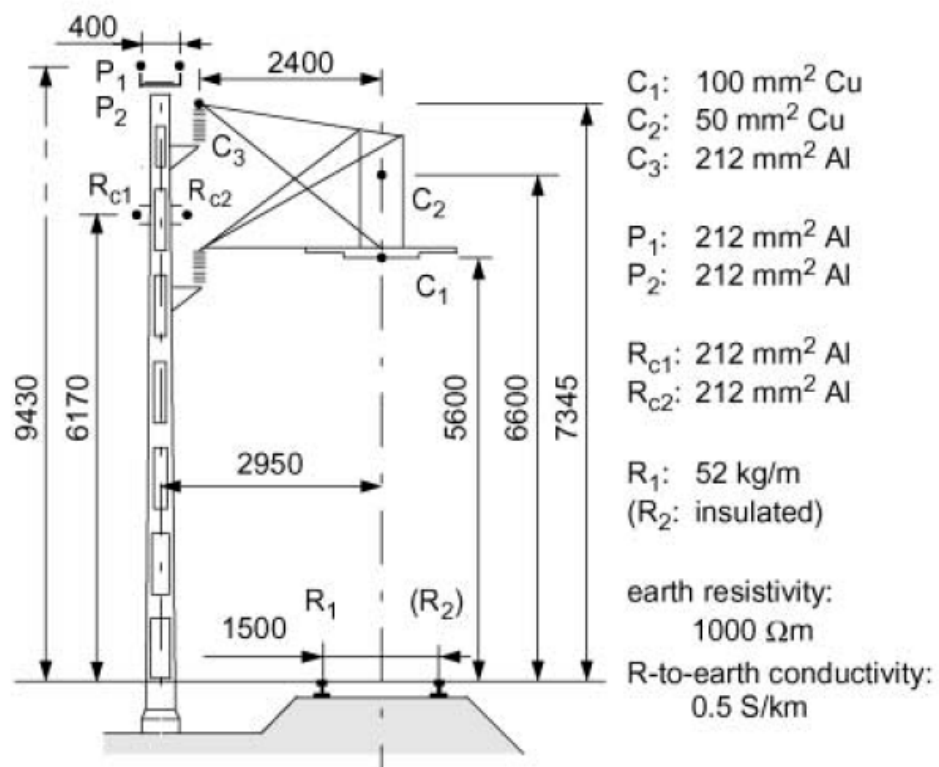
Ne rata-alueet jotka on varustettu ainoastaan yhdellä paluukiskolla, eivätkä sisällä M- johdinta, vaativat hieman erilaisen ratkaisumallin. Tällöin käytettäväksi tulee kiskonvarmistusjohdin, jota kutsutaan myös toiselta nimeltä K- johtimeksi. Tällaisia rata-alueita ovat mm. eristetyt raideosuudet joilla on imumuuntaja. Radan yksiraiteisuus ja yksikiskoisuus vaikuttaa myös asiaan. Kyseisiä alueita esiintyy pääopastimen ja tulovaihteen välissä. Toinen paikka jossa kyseenomaisia alueita mahdollisesti esiintyy, on tasoristeysten lähiympäristöt. Oikein sijoitettu kiskonvarmistusjohdin on normaalisti paluujohtimen alapuolella, aivan samalla tapaa kuin M- johdin. Kiskonvarmistusjohdin liitetään paluukiskoon. Kuvissa 9, 10 ja 11 on perehdytty ratalinjan sekä ratajohtojen rakenteeseen. /10/



Kuva 9. Ratajohto avoradalla, järjestelmä 1x25 kV /10/



Kuva 10. Ratajohto avoradalla, järjestelmä 2x25 kV /10/



Kuva 11. Ratalinjan rakenne /11/

4 KÄYTTÖKESKUS

4.1 Käyttökeskukset

Käyttökeskusten tarkoituksena on hoitaa sähköradan kaukovalvonta ja kaukokäyttö. Käyttökeskuksen tehtäviin kuuluu mm. seuraavia toimenpiteitä: sähkötekniisten järjestelmien valvonta ja käytön valvonta ja kytkentöjen suorittaminen, sähköturvallisuuteen liittyvien tietojen antaminen työskenneltäessä sähköistetyllä radalla, tiedon saaminen sähkötekniisten järjestelmien ja-laitteiden käytettävyydestä, sähkö- ja turvalaitteita koskevien häiriöilmoitusten vastaanotto ja viallisten kohteiden rajaaminen sekä korvaavan toiminnan kytkeminen mahdollisuuksien mukaan, viankorjaustoiminnan käynnistäminen, neuvottelut korjauskiireellisyydestä liikenteenohjauksen ja palvelutuotannon kanssa, onnettomuustilanteissa yhteydenpito pelastuslaitoksiin ja muihin viranomaisiin, sähkö- ja turvalaitteivioista johtuvien liikennehäiriöiden selvittäminen liikenteenohjauksen kanssa. /6/

4.2 Peruskytkentä

Kun puhutaan peruskytkennästä, on tällöin ratajohto jännitteinen. Kyseinen kytkentätilanne on nähtävillä valvontataululta. Tämä valvontataulu on käyttökeskuksessa. Kytkentä tulee aina olla merkittynä valvontataululle. Taululta on mahdollista näin ollen seurata missä asennossa esim. erottimet ja katkaisimet ovat. Myös kytkentäryhmät joissa ei ole jännitettä pystytään katsomaan valvontataululta. /6/

Kuten kaikissa muissakin järjestelmissä, myös tässä valvontajärjestelmässä tulee olla jokaista kytkintä koskevat poikkeukselliset tiedot, mikäli järjestelmään tulee häiriöitä. Näihin poikkeuksellisiin tietoihin lukeutuu mahdollinen ohjauskielto. Jos kytkimen asento poikkeaa peruskytkennästä, kuuluu sekin näihin poikkeuksellisiin tietoihin. Tässä on yleisimmät mainittuina. /6/

Pyrkimyksenä on pitää ratajohdon kytkentä sellaisena, että sähköenergian syöttöalueet ovat peruskytkennän mukaiset. Käyttökeskuksia on ohjeistettu keskuskohtaisilla ohjeilla sallituista kytkentätilanteista. On tärkeää huolehtia suojarleistyksen toiminnasta myös muutetulla syöttöalueella sattuvissa vioissa, mikäli peruskytkennän mukaisista syöttöalueista joudutaan poikkeamaan. Toiminta on tarkastettava ennen jännitteen kytkemistä. Releasetteluiden muuttamiselle on aina saatava lupa. Luvan voi antaa joko sähkölaitteiston käytön johtaja tai hänen nimeämänsä henkilö. /6/

4.3 Oikosulku ratajohdossa

Käyttökeskus vastaa siitä, että mahdollisessa vikatilanteessa pystytään analysoimaan vian laatu, syy, laajuus ja seuraukset. On myös pystyttävä määrittelemään kuinka kauan mahdollinen korjaus tulee kestämään. Korjauksen aikataulu on hyvä olla tiedossa, mikäli vika aiheuttaa häiriötä liikenteeseen. /6/

Kun jollain rataosuudella tapahtuu oikosulku, tulee siitä aina hälytys käyttökeskukseen. Hälytyksen keskukseen aiheuttavat katkaisijat, jotka syöttävät sitä avojohdon osaa johon oikosulku on tapahtunut. Kun käyttökeskus saa ilmoituksen katkaisijan laukeamisesta, ilmoittaa se liikenteenohjaukselle jännitteettömän alueen. Samalla tiedustellaan, onko ko. alueella kenties sattunut junaonnettomuutta tai jotain muuta vakavaa vauriota, joka aiheuttaa oikosulkulaukaisun. Jos edellä mainituista asioista ei ole tietoa, käyttökeskus antaa ongelmallisella rataosuudella mahdollisesti liikkuville veturinkuljettajille määräyksen laskea virroitin. Määräys annetaan liikenteenohjauksen välityksellä. Tämän jälkeen käyttökeskuksen tehtävänä on suorittaa kokeilukytkentä. Sillä pystytään selvittämään onko vika ratajohdossa vai sähkövetokalustossa. Katkaisijan lauetessa voidaan todeta vian olevan ratajohdossa. Tämän seurauksena käyttökeskus ryhtyy paikallistamaan vikaa suorittamalla jälleenkytkentöjä niin paljon kuin on tarpeen. Kytkennän onnistuessa käyttökeskus antaa luvan virroitimien nostamiseen. Mikäli vikaa ei mainituilla keinoilla löydetä, käyttö jatkuu normaalina. /6/

4.3.1 Automaattinen pikajälleenkytkentä

Katkaisijat, jotka syöttävät ratajohtoa, on varustettu pikajälleenkytkentä-automatiikalla. Tämä tarkoittaa sitä, että mikäli automatiikka on otettu käyttöön, suorittaa se asetellun ajan kuluttua pikajälleenkytkennän. Mikäli pikajälleenkytkentä onnistuu, tarkoittaa tämä sitä, että vika on poistunut ratajohdosta ja käyttö jatkuu normaalina. Mikäli kuitenkin käy niin, että katkaisija laukeaa uudelleen, kaukokäyttöjärjestelmä tekee käyttökeskukselle hälytyksen katkaisijan laukeamisesta. Tämän jälkeen toimitaan kuten normaalissa oikosulkutilanteessa. Ne rataosuudet, jotka on varustettu distanssireleillä, antavat hälytyksen myös onnistuneista pikajälleenkytkennöistä. /6/

5 RADAN TOIMINTAA YLLÄPITÄVÄT LAITTEET

5.1 Radan suojaus-, käyttö- ja valvontalaitteet

Sähköradan suojaukseen käytetään distanssisuojausta. Sähkörata saa tarvitsemansa energian 110 kV:n kantaverkosta, jolloin on järkevää käyttää distanssisuojausta. Yleensä kaikki 110 kV:n ja sitä suurempijännitteisten johtojen suojaukset toteutetaan nimenomaan distanssisuojauksella. Distanssisuojauksen toimintaperiaate perustuu siihen, että rele mittaa johdon vikavaiheen impedanssia, joka muodostuu releen asennuspaikan ja vikapaikan välille. Kun asetusarvo alittuu, rele laukeaa. Tällöin selviää myös vikapaikan etäisyys impedanssimittauksen avulla. /12/

Sähköradalla on olemassa aina se riski, että voi syntyä jonkinlainen vikatilanne. Näitä vikatilanteita varten on kehitetty erilaisia suojareleitä, joista kerrotaan seuraavassa.

Radan suojaukseen, käyttöön ja valvontaan on kehitetty useita laitteita. Yksi niistä on ABB:n kehittämä REO 517-terminaali. Se pystyy toimimaan 16, 50 ja 60 Hz:n järjestelmissä. Kyseisellä laitteella pystytään toteuttamaan rautatien suojaus, käyttö ja monitorointi koko rautatien sähköistysjärjestelmässä. Laitteesta on kuvassa 12 esitettynä mallikuva. /13/

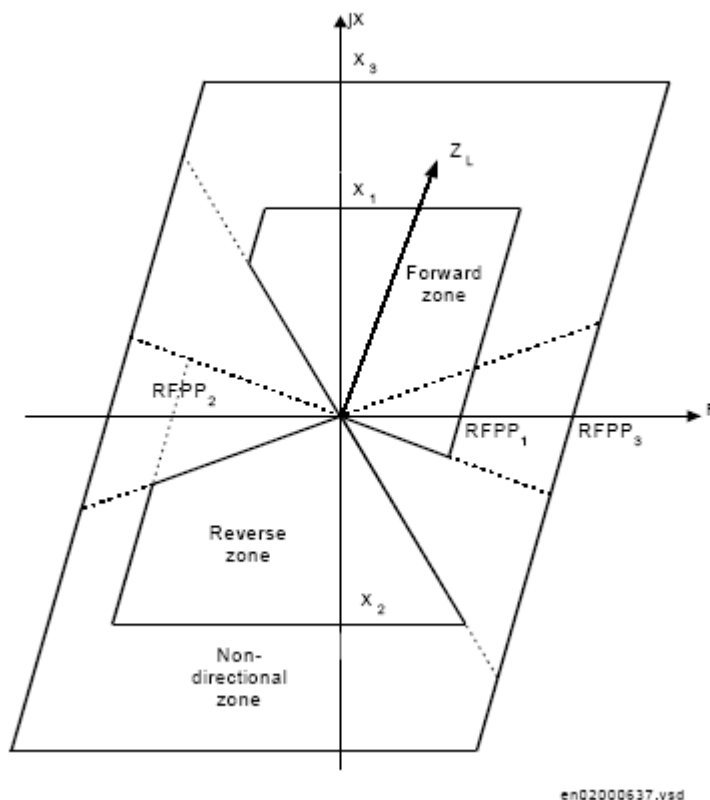


Kuva 12. REO 517 terminaali /13/

Seuraavassa on kerrottu tarkemmin suojareleen ominaisuuksista. Tarkastelun pääkohteenä on distanssisuojaus. Suojareleessä on myös muita suojatoimilohkoja kuten ylivirta.

REO 517 kykenee tarjoamaan kolmivyöhykkeisen impedanssisuojauksen. Suojaus pystytään toteuttamaan riittävän nopeasti ja luotettavasti sekä yksi- että kaksivaiheisissa järjestelmissä. Kolme impedanssivyöhykettä pystyy toimimaan eteenpäin suunnattuna, taaksepäin suunnattuna tai kokonaan suuntaamattomana. Tämän lisäksi vyöhykkeiden ei tarvitse olla riippuvaisia toisistaan, vaan ne kykenevät toimimaan itsenäisesti. Reaktiivisen ja resistiivisen suunnan ulottuma voidaan asettaa toimimaan toistensa asetuksista riippumatta sekä riippumatta muiden vyöhykkeiden asetuksista. Kaikille vyöhykkeille on yhteinen maadoituspaluujohtimen kompensointitekijä. Reaktiivisen ja resistiivisen suunnan ulottuma on sama riippumatta siitä, onko vyöhyke suunnattu eteenpäin vai taaksepäin. Kuvassa 13 Z1 on suunnattu eteenpäin, Z2 suunnattu taaksepäin ja Z3 on suuntaamaton vyöhyke.

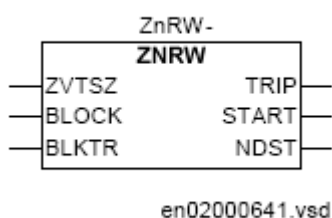
/13/14/15/



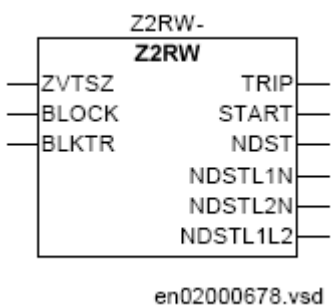
Kuva 13. Impedanssivyöhykkeet suunnattuna eteenpäin ja taaksepäin /16/

Saatavilla oleva kommunikointilogiikka, joka on tarkoitettu distanssisuojaukseen, lisää vikojen selvittämisen mahdollisuutta koko linjalla. Lisäksi se tarjoaa mahdollisuuden kasvaneeseen lisäresistanssiin vikapaikalla. Tehollisarvot jännitteelle ja virralle mitataan joka millisekunti.

Jokaisen vyöhykkeen toimilohko sisältää binääri inputit ja outputit, jotka voidaan konfiguroida ulkoisilla toiminnoilla. Näitä ovat logiikkapiirit, ajastimet sekä binääri inputit ja outputit. Kuvissa 14 ja 15 on esitettyä toimilohkoja eri vyöhykkeille. /13/14/15/



Kuva 14. Vyöhykkeiden 1 ja 3 toimilohkot (yksi- ja kaksivaiheinen) ja vyöhyke 2 (yksivaiheinen) /16/



Kuva 15. Toimilohko vyöhykkeelle 2 (kaksivaiheinen) /16/

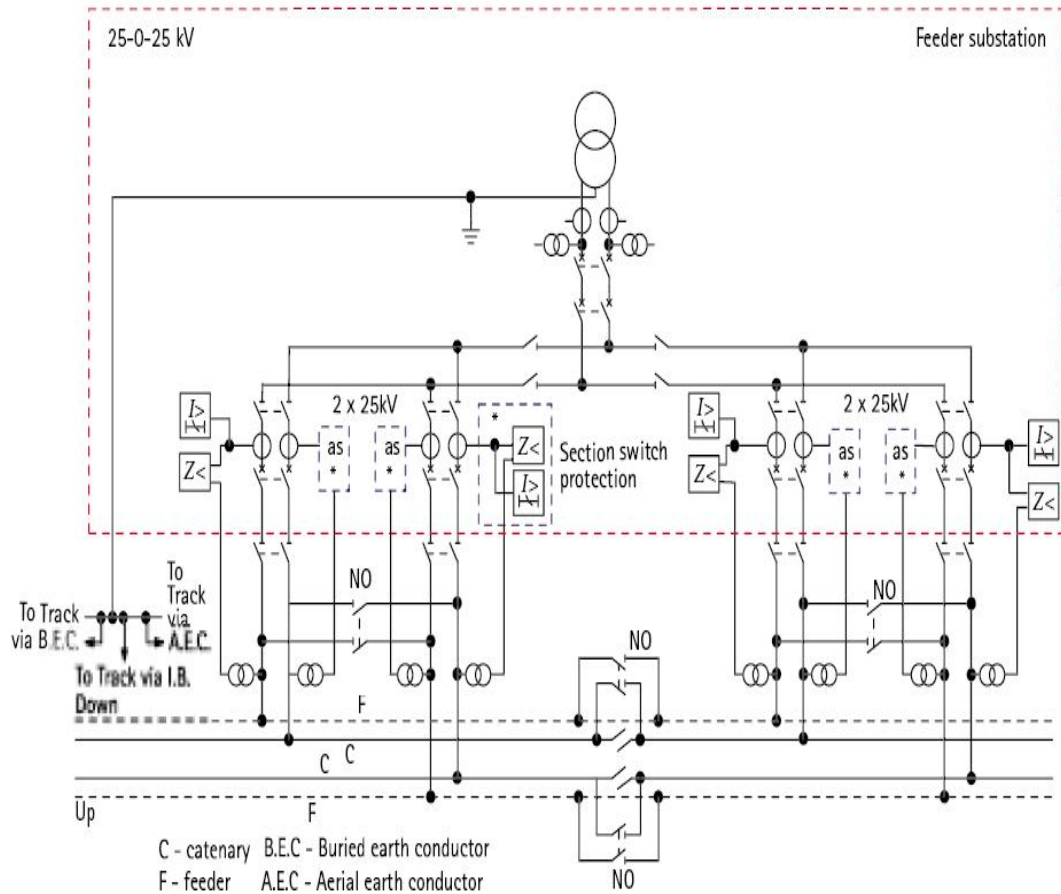
Itse releen asettelu tapahtuu tietokoneen avulla käyttäen apuna CAP 540-ohjelmaa. Rele yhdistetään tarkoitukseen sopivalla kaapelilla tietokoneeseen jotta kommunikointi näiden laitteiden välillä onnistuu. Ohjelmalla pystytään tekemään releeseen tarvittavat asetukset ja syöttämään tiedot itse releeseen. Asetusarvojen tulee vastata suojattavan linjan arvoja, jotta rele pystyisi suojaamaan sitä verkon osaa johon se on tarkoitettu. /14/17/16/

ABB:n releen lisäksi on saatavilla esimerkiksi Arevan kaksi suojarlettä, jotka on myös tarkoitettu nimenomaan rautateiden sähköistyksen suojaamiseen. Nämä kaksi relettä ovat MiCOM P436 sekä MiCOM P438. P436-malli on tarkoitettu suojaamaan $16\frac{2}{3}$ Hz:n rautatiesovelluksia. P438 malli puolestaan on tarkoitettu suojaamaan 20, 40 sekä 60 Hz:n rautatiesovelluksia. Kummassakin releessä on neljä asetteluryhmää. Distanssisuojaukseen on kolme vyöhykettä. Jokainen vyöhyke pystyy toimimaan eteenpäin suunnattuna, taaksepäin suunnattuna sekä suuntaamattomana. Ulottumat eteenpäin sekä taaksepäin pystytään toteuttamaan itsenäisesti. /15/

5.2 R-X -koordinaatisto

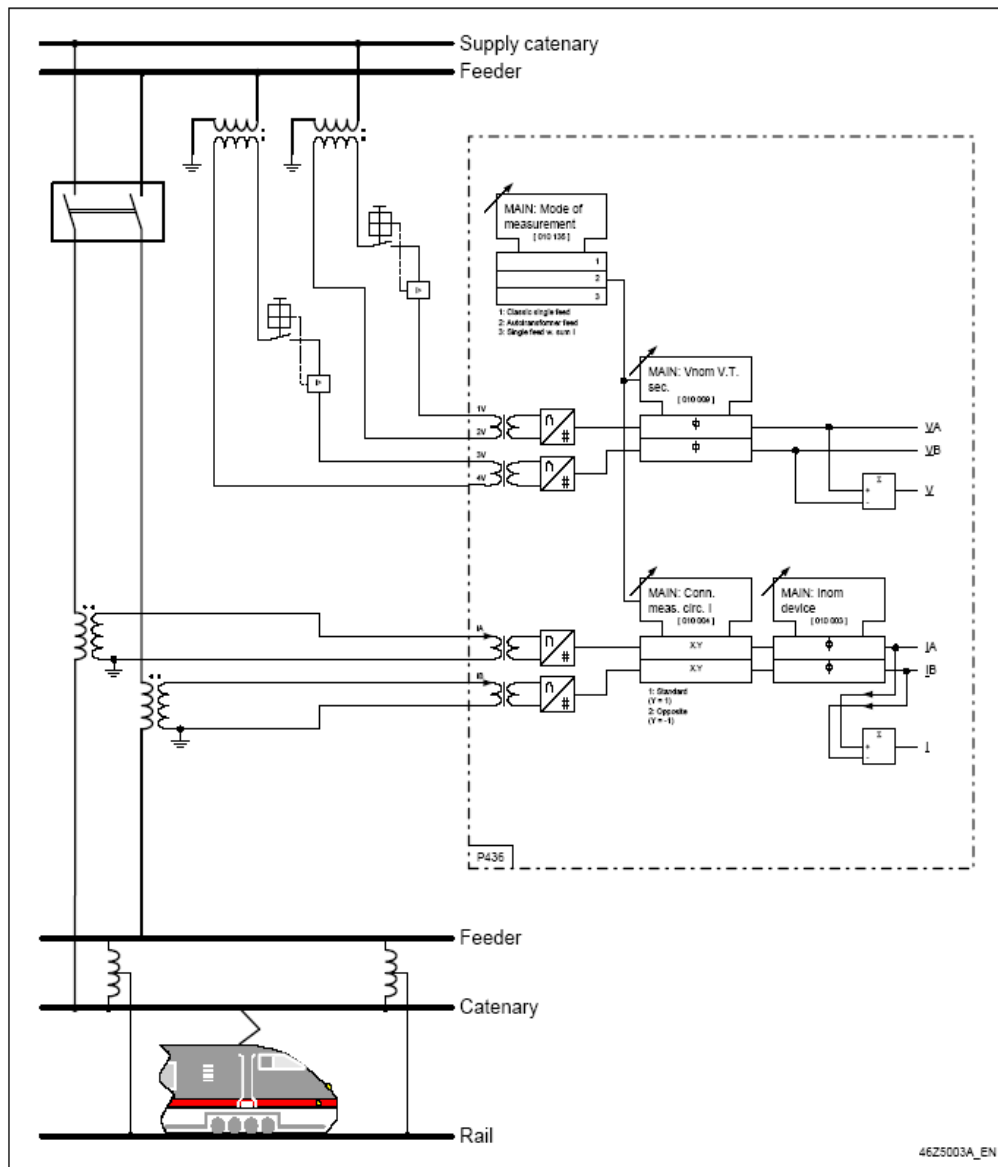
R-X -koordinaatistossa rele on sijoitettu origoon. Suojattavaksi tarkoitettu johto näkyy koordinaatistossa origosta lähtevänä suorana. Koordinaatiston jX-akseli kuvastaa reaktanssia ja R-akseli resistanssia. Vian sijaitessa lähellä relettä on impedanssi sitä pienempi mitä lähempänä relettä vika on. Mikäli vikalaukaisu tapahtuu vyöhykkeellä yksi, on kyseessä nopea vyöhyke. Nopea vyöhyke on kaikista vyöhykkeistä tärkein. Tällöin laukaisu tapahtuu välittömästi. Vyöhyke yksi kattaa 85 % suojauksesta. Vyöhyke kaksi on tarkoitettu hoitamaan jäljelle jäävä 15 %. Mikäli vika on toisella tai kolmannella vyöhykkeelle tapahtuu vikalaukaisu portaittain tietyn ajan kuluessa. Vyöhykkeen kaksi ulottuma on hyvä säätää niin, että se on minimissään 115 %, jotta kaikki mahdolliset vikatilanteet tulee huomioiduksi Tyypillinen minima aika, jonka sisällä laukaisu tapahtuu vyöhykkeelle kaksi, on noin 150–200 ms. Vyöhykkeellä kolme tyypillinen laukaisuaika on noin 400 ms. Koordinaatistossa on erikseen määritelty kuormitusalue, jonka tarkoituksena on varmistaa se, että rele ei laukaise normaalin kuormituksen aikaansaamilla impedanssin arvoilla. Asetteluarvot on pyrittävä tekemään niin, että suojaus toimii koko suojattavan verkon alueella luotettavasti ja selektiivisesti. /12/18/

Kuvassa 16 on esitettyä järjestelmän 2x25 kV suojauskaavio. Suojauskaaviosta voidaan nähdä miten distanssireleet sijoitetaan suojattavaan järjestelmään.



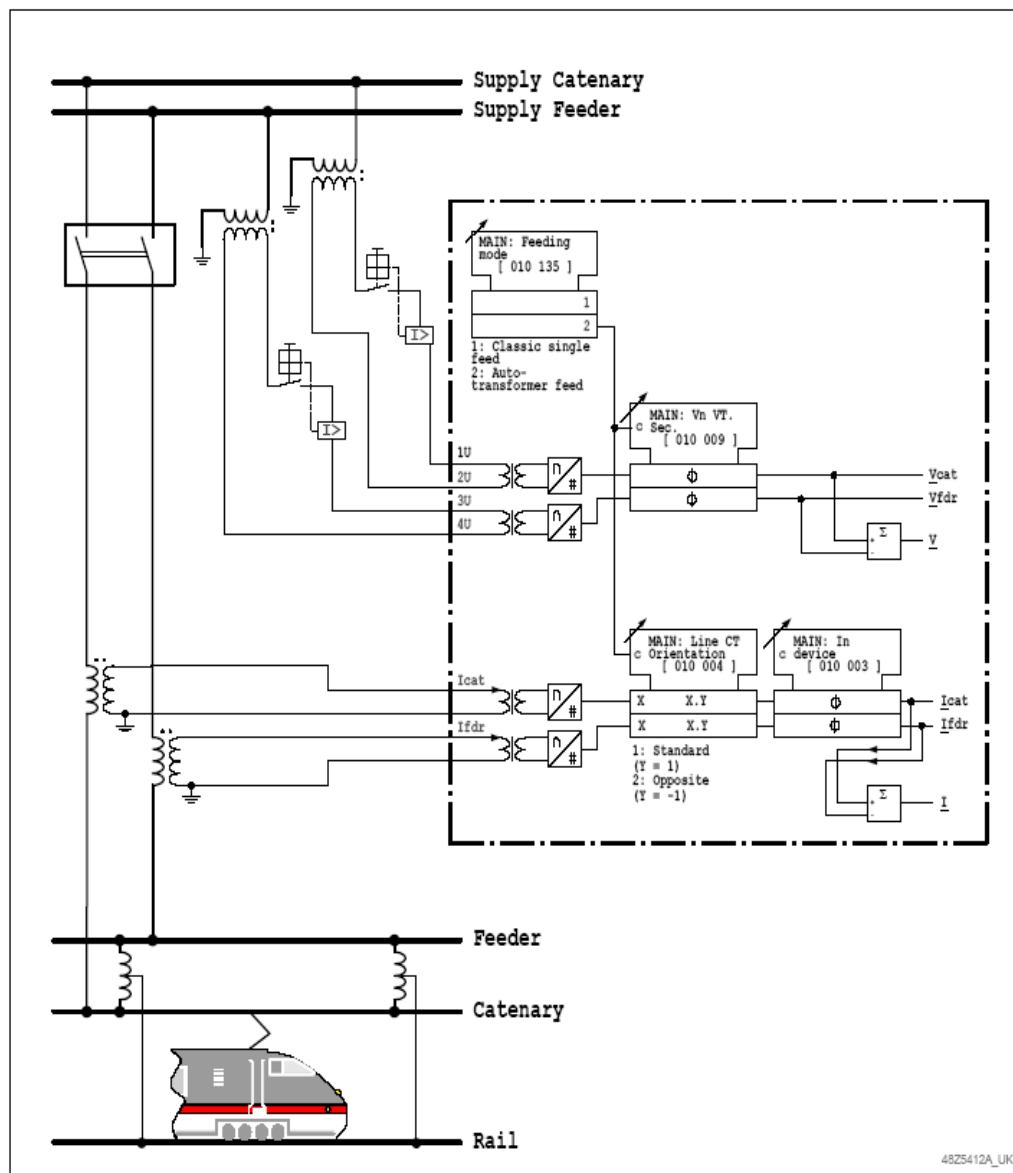
Kuva 16. Sähköradan suojuksen periaatekaavio /18/

Kuvat 17 ja 18 havainnollistavat miten MiCOM P436 sekä MiCOM P438-suojareleet kytketään 2x25 kV järjestelmän suojaksi. Kuvista voidaan nähdä kuinka suojareleisiin kytketään ajojohtimen ja paluujohtimen jännitteenmittaus, sekä molempien johtojen virranmittaus.



5-16 Connection of measuring circuits to the P436, fitted with transformer module 3xI, 2xV,
Autotransformer feed mode

Kuva 17. MiCOM P436-suojareleen kytkentäkaavio /19/



5-17 Connecting the P438 measuring circuits in the 'Autotransformer feed' operating mode

Kuva 18. MiCOM P438-suojareleen kytkentäkaavio /20/

6 SÄHKÖRADAN MALLINNUS PSCAD-OHJELMALLA

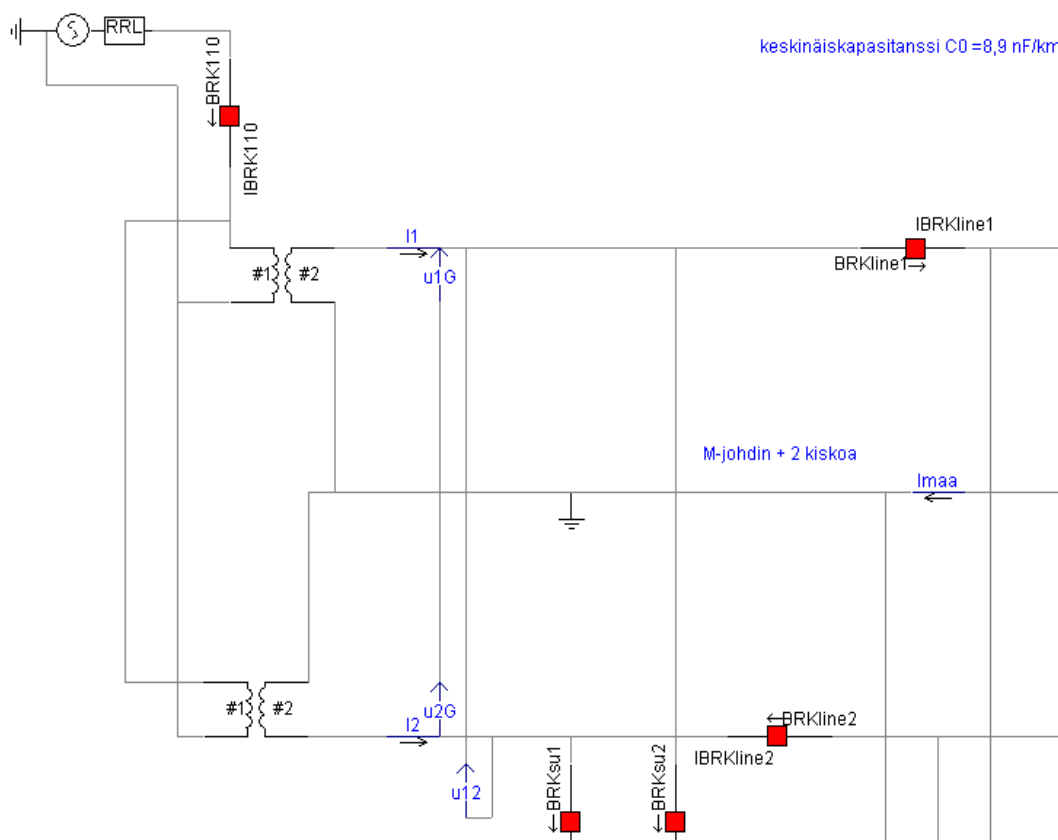
6.1 2x25 kV Sähköradan mallinnus PSCAD- ohjelmalla

2x25 kV sähköradan mallintamisessa käytetään apuna PSCAD nimistä ohjelmaa. Kyseisellä ohjelmalla on mahdollista tehdä erilaisia laskelmia ja määrittää muuttujien arvoja simulointimallista. Toisin sanoen ohjelma mahdollistaa sähköradan simuloimisen. Kyseisellä ohjelmalla pystytään siis jäljittelemään oikeaa sähkörataa. Kuten jokaisessa sähköverkossa, myös sähköradalla on tärkeää tietää miten sähkörata käyttäytyy vikatilanteissa. Tämän selvittämiseksi PSCAD-ohjelmalla mallinnetaan pätkä sähkörataa, johon sitten pyritään aiheuttamaan erilaisia vikatilanteita. Tässä päättötyössä selvitetään nimenomaan virtoja ja rataosuuksien käyttäytymistä vikatilanteissa. Laskelmien tekemiseen apuna käytetään PSCAD- ohjelmaa sekä valmista mallia, johon pyritään järkevällä mitoituksella asettelemaan erilaisia vikatilanteita.

6.2 Simulointimallin kuvaus

Tarkoituksena on selvittää 2x25 kV sähköradan virrat, tehollisarvot, impedanssit, reaktanssit ja resistanssit vikatilanteessa. Mallinnettu sähkörata on pituudeltaan 45 km:ä. Vikapaikkojen etäisyys on noin 6,43 km:ä, jolloin vikapaikkoja tulee olemaan yhteensä 7. Koejärjestelynä suoritetaan PSCAD- ohjelmalla tarvittava määrä laskelmia. Viat tulevat olemaan ajojohtimen ja M-johtimen välillä, vastajohtimen ja M-johtimen välillä sekä ajojohtimen ja vastajohtimen välillä. Laskelmissa käytetään 7 MVA:n kuormaa, jonka tarkoitus on kuvastaa junaa radalla. Mittaukset tehdään aluksi ilman junaa, jolloin 7 MVA:n kuorma on kytkettyä pois. Seuraavat laskelmat tehdään junan ollessa 19 km:n ja 45 km:n päässä asemalta. Jokaisessa vikapaikassa mallinnetaan kolme erilaista johdinten välistä vikaa, kolmella erilaisella kuormalla. Kaikkien mahdollisten variaatioiden saamiseksi, on mittauksia tehtävä yhteensä 63. Kyseisten simulointien laskelmat löytyvät päättötyön lopusta liitteinä. Mittauksista tehdään myös Excel-taulukot, jotka löytyvät seuraavasta kappaleesta.

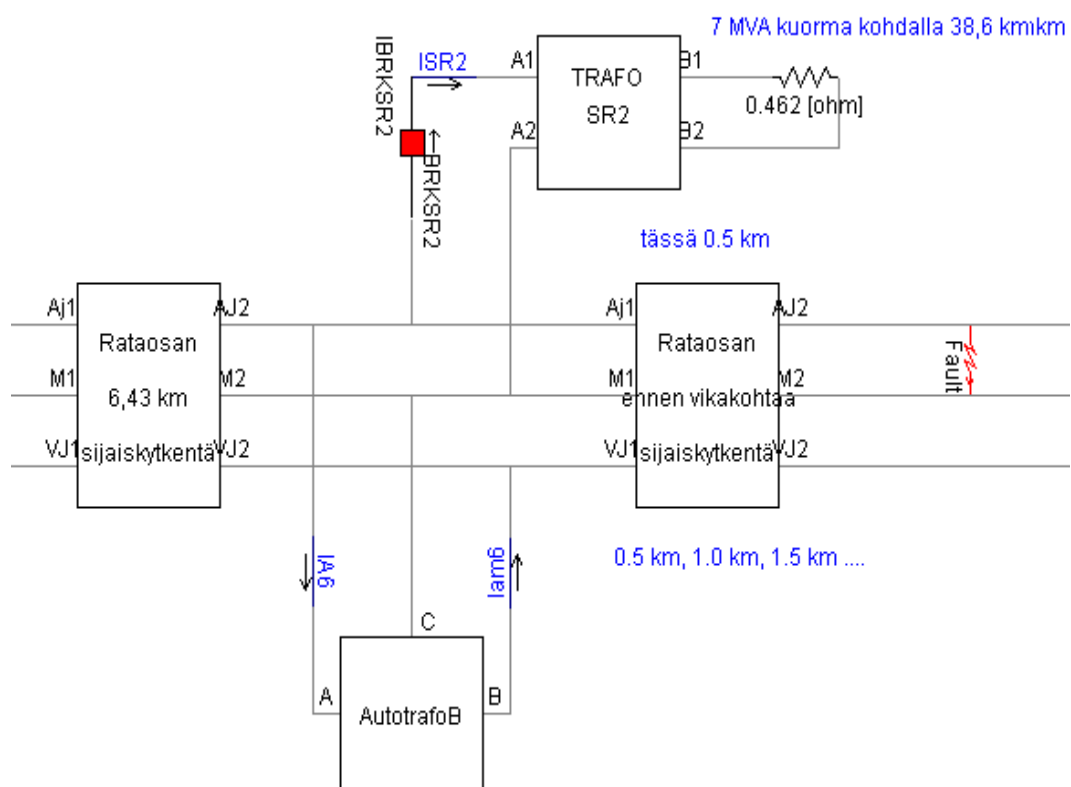
Kuvassa 19 on ote simulointimallista. Kuvasta voidaan nähdä miten rata saa syöttönsä 110 kV:n verkosta. BRkline1 kuvastaa ajojohtimen katkaisijaa. IBRkline1 kuvastaa virtaa, jota malli käyttää. U1G on jännitteen mittauspiste. Näistä mitataan jännite ja virta, joista pystytään laskemaan tunnuslukuja ja selvittämään millaisia sähköisiä suureita radalla on. BRkline2 on vastajohtimen katkaisija. IBRkline2 on virta, jota malli käyttää. U2G on vastaavasti jännitteenmittaus. Keskellä on M-johdin.



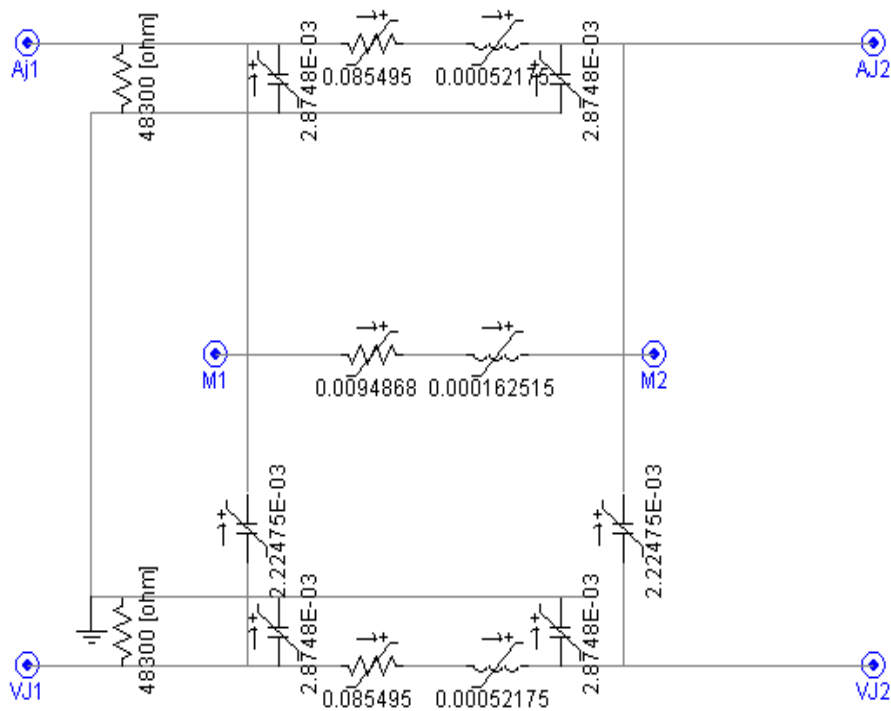
Kuva 19. Simulointimalli

Kuvassa 20 on pätkä valmiista mallista jota on käytetty simulointien tekemiseen. Kuvasta näkyy automuuntajien sijoittuminen radalle. Mallissa automuuntajia on 7 ja ne ovat noin 6,43 km:n etäisyydellä toisistaan. Automuuntaja on kytketty mallissa ajojohtimeen, M-johtimeen sekä vastajohtimeen. Kuvasta voidaan myös havaita pii-sijaiskytkentä. Tarkempi kuva sijaiskytkennän rakenteesta on kuvassa 21. Kytkennän tarkoituksena on helpottaa simulointien tekemistä. Tämä korostuu varsinkin tehtäessä simulointeja kahden automuuntajan välistä. Vikakohtat

sijaitsevat 6,43 km:n etäisyydellä toisistaan. Kuvassa näkyy hyvin myös ajojohdin, M-johdin sekä vastajohdin. Kuvassa on myös 7 MVA:n kuorma joka kuvastaa junaa. Junaa pystytään liikuttelemaan helposti radalla. Kun junaa ei haluta kuormaksi mittaukseen, kytketään katkaisija kiinni tai erotetaan juna radasta poistamalla junan ja radan yhdistävä johdin. Kuvassa vikakohta on ajojohtimen ja M-johtimen välissä ja näkyy kuvassa punaisena salamana. Jos halutaan, että vikakohta on vastajohtimen ja M-johtimen välissä, siirretään punaista vikaa kuvastavaa merkkiä näiden johtimien väliin. Ajojohtimen ja vastajohtimen välisessä viassa vikaa markkeeraava merkki puolestaan laitetaan ajojohtimen ja vastajohtimen väliin. Mikäli vikakohtaa halutaan muuttaa, on vikaa kuvastava merkki helppo siirtää haluamalle etäisyydelle.

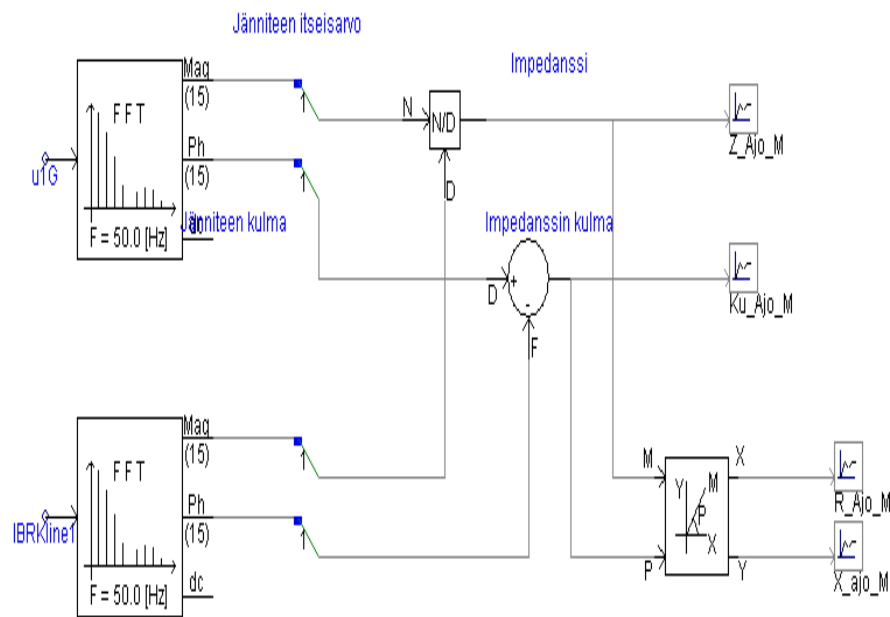


Kuva 20. Rataosan rakenne



Kuva 21. Pii-sijaiskytkentä

Kuvassa 22 on esitettyä tunnuslukujen laskentakomponentit. Kyseinen kuva edustaa komponenttia, jolla pystytään laskemaan ajojohtimen ja M-johtimen välisen silmukan impedanssi, impedanssin kulma, resistanssi sekä reaktanssi. Vastajohtimen ja M-johtimen sekä ajojohtimen ja vastajohtimen laskentaan tarkoitetut silmukat ovat samantyyllisiä. Kyseisiin komponentteihin syötetään radan alkupään jännitemittaus sekä virtamittaus radalta. Niistä saadaan laskettua impedanssi sekä impedanssin kulma. Impedanssista komponentit pystyvät laskemaan impedanssin resistiivisen ja reaktiivisen osan. Laskenta tapahtuu käytännössä siten, että radalla sijaitsevilta mittauspisteiltä laskentakomponentteihin saadaan tiedot jännitteen ja virran suuruudesta. Laskentakomponenteissa jännitteen arvot jaetaan virran arvoilla, jolloin saadaan selville kunkin silmukan impedanssi. Tällä tavalla on mahdollista laskea ajojohtimen ja M-johtimen sekä vastajohtimen ja M-johtimen välinen vikatilanne. Ajojohtimen ja vastajohtimen välisessä vikatilanteessa sen sijaan on mahdollista laskea impedanssi hieman eri tavalla. Tällöin laskentasilmukka muodostuu ajojohtimesta ja vastajohtimesta. Tässä tapauksessa ajo- ja vastajohtimen jännitteiden erotus jaetaan virralla.



Kuva 22. Laskentakomponentit

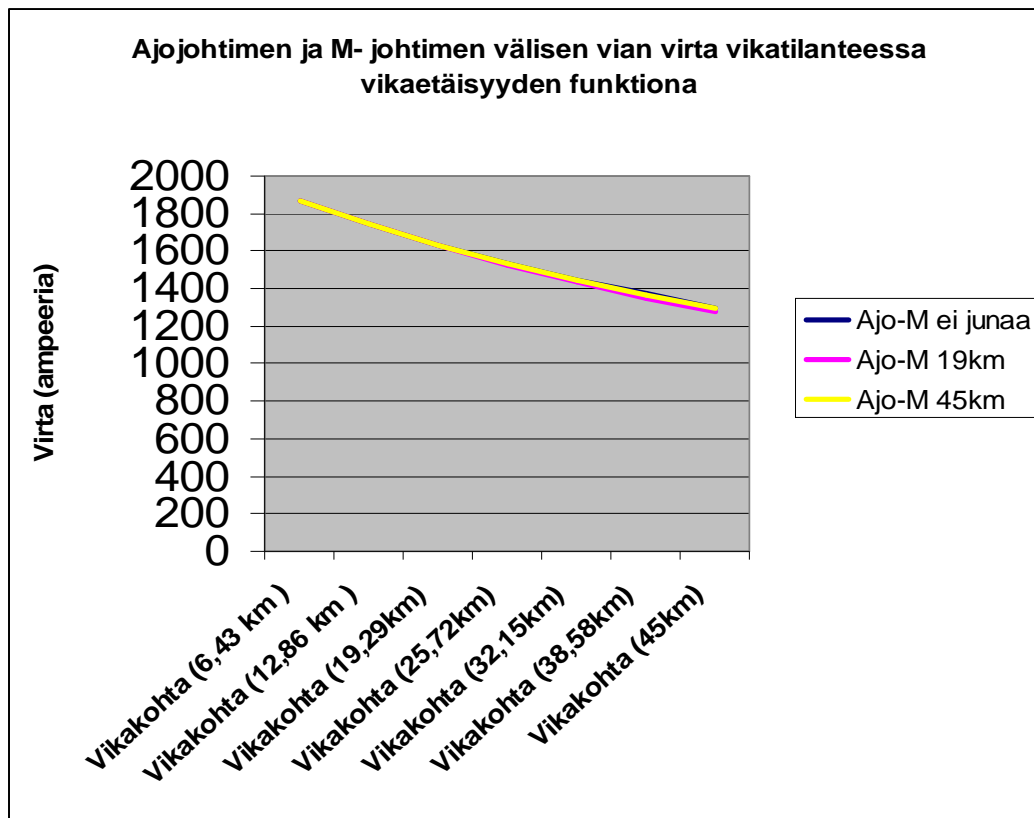
6.3 Laskelmat simulointimallilla

Mittaukset on jaettu kolmeen eri ryhmää. Ensimmäinen ryhmä käsittelee ajojohtimen ja M-johtimen välistä vikaa. Toinen ryhmä käsittelee vastajohtimen ja M-johtimen välistä vikaa ja kolmas ryhmä ajojohtimen ja vastajohtimen välistä vikaa. Ajojohtimen ja M-johtimen sekä vastajohtimen ja M-johtimen väliset mittaukset on suoritettu samalla mittaustavalla. Ajojohtimen ja vastajohtimen väliset mittaukset on puolestaan tehty hieman eri tavalla. Mittaustavan ero vaikuttaa siihen, että impedanssi, reaktanssi ja resistanssi saavat ajojohtimen ja vastajohtimen välisissä mittauksissa noin kaksi kertaa suuremman arvon kuin tilanteessa, jossa mittaukset suoritettaisiin samalla tavalla kuin ajojohtimen ja M-johtimen sekä vastajohtimen ja M-johtimen välisissä mittauksissa. Itse kuvaajien käyttäytymistapaan mittausten tavalla ei ole vaikutusta, sillä numeeriset arvot vain kasvavat noin kaksinkertaisesti. Jokaisessa kuvaajassa vikakohtia on 7 erilaista ja ne on jaoteltu noin 6,43 km:n etäisyydelle toisistaan, kattaen koko rataosuuden. Parametreja on 3. Parametrit kuvastavat junan sijoittumista rataosuudelle. Parametreja edustaa 3 väriä. Musta kuvaaja edustaa vikatilannetta, jossa juna ei ole radalla. Violetti kuvaaja puolestaan edustaa vikatilannetta, jossa juna on noin

19 km:n etäisyydellä asemasta. Keltainen kuvaaja edustaa vikatilannetta, jossa juna on radan lopussa, eli noin 45 km:n päässä asemalta.

6.3.1 Ajojohtimen ja M-johtimen välinen vika

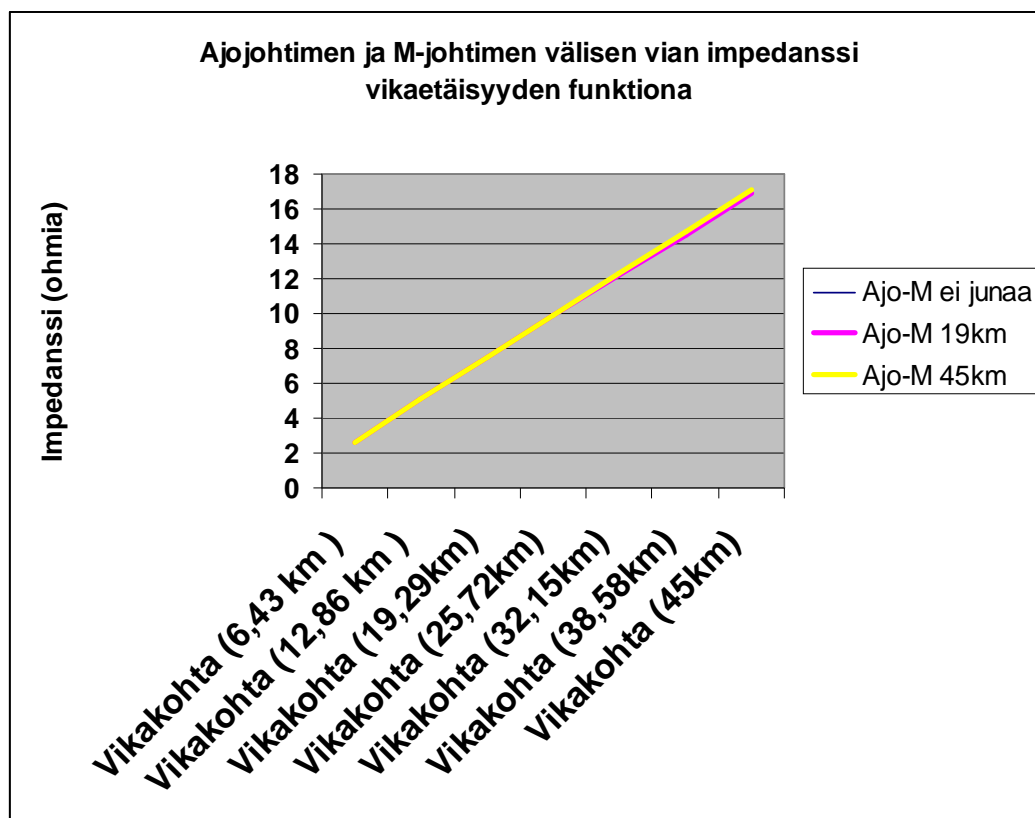
Kuvan 23 kuvaajasta voidaan havainnollistaa ajojohtimen ja M-johtimen välistä vikaa. Vikaresistanssi on kyseisessä tilanteessa lähes nolla. Kuvaajasta voidaan päätellä, että vikapaikan ollessa rataosuuden alkupuolella junan sijainnilla rataosuudella ei näytä olevan kovin suurta merkitystä. Kuvaajasta käy ilmi, että vikakohdan edetessä rataosuuden loppuun, merkitys junan sijoittumiselle rataosuudella kasvaa. Myös huomionarvoista on se, että vikakohdan ollessa rataosuuden alussa, saa virta suuremman arvon kuin mitä se saa silloin, kun vikakohta sijaitsee rataosuuden loppupuolella. Virran arvo putoaa radan alkuosasta radan loppuun mentäessä jokaisella parametrilla reilusti yli 550 ampeeria. Näin voidaan todeta se, että vikakohdalla on suuri merkitys siihen, millaisia virtoja rataosuudelle syntyy vikatilanteissa. Myös junan etäisyydellä asemasta näyttäisi olevan pieni merkitys, mutta ei läheskään niin suuri kuin vikakohdan sijainnilla rataosuudella. Kyseisissä mittauksissa voidaan todeta, että junan ollessa vikatilanteessa 19 km:n etäisyydellä asemasta, saavutetaan pienin vikavirran arvo rataosuuden lopussa. Vikavirta on noin 24,5 ampeeria pienempi kuin tilanteessa jossa juna on radan lopussa, eli 45 km:n etäisyydellä asemasta. Tilanne on sama parametrilla, jossa juna ei ole radalla. Syy, miksi loppuosassa rataa junan sijainnilla näyttäisi olevan hieman suurempi merkitys kuin alkupuolella rataa, johtuu jännitteestä. Tilanne, jossa vikakohta ja juna sijaitsevat molemmat radan lopussa, aiheuttaa tilanteen jossa syntyy pieni jännitteen kohoama, joka puolestaan vaikuttaa siihen, että junan sijainnilla näyttäisi loppuosassa rataa olevan suurempi merkitys kuin radan alussa.



Kuva 23. Ajojohtimen ja M-johtimen välisen vian virta vikatilanteessa

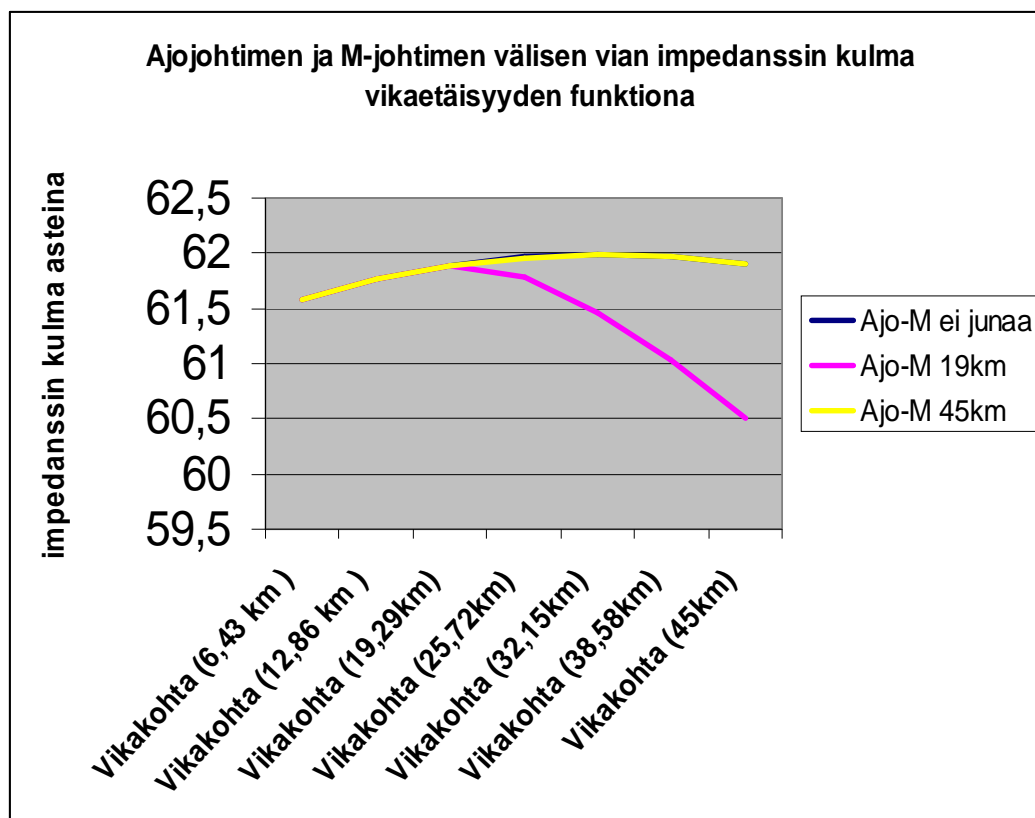
Kuvasta 24 voidaan havainnollistaa ajojohtimen ja M-johtimen välisen vian impedanssia vikaetäisyyden funktiona. Vikaresistanssi on lähes nolla tässä tilanteessa. Kuvaaja on hyvin lineaarinen. Kuvaajasta voidaan päätellä, että vikakohtan sijainnilla rataosuudella on selvästi merkitystä. Mitä kauemmas vikakohta asemalta sijoittuu, sitä suuremmaksi impedanssin arvot nousevat. Kuvaajasta voidaan myös havainnoida se, että junan sijainnilla radalla ei ole radan alkuosassa suurtakaan merkitystä. Impedanssin arvot pysyttelevät kaikilla kolmella parametrilla suunnilleen samansuuruisina. Radan loppuosassa kuitenkin on havaittavissa pientä eroa näiden kolmen parametrin välillä. Mikäli juna on 45 km:n päässä asemalta, impedanssin arvo kohoaa hiukan suuremmaksi kuin mitä se on silloin kun juna on 19 km:n etäisyydellä asemalta. Impedanssin suuruuteen ei vaikuta se, onko juna radalla ollenkaan vai 45 km:n päässä asemalta, sillä näillä kahdella parametrilla on lähestulkoon samat arvot. Kuvaajasta käy näin ollen selvästi ilmi se, että vikaetäisyydellä on selvä vaikutus vikakohtan impedanssin suuruuteen. Junan sijainnilla rataosuudella sen sijaan ei näyttäisi olevan niin suurta merkitystä ja se jääkin hyvin marginaaliseksi. Kuvaajasta käy ilmi, että

impedanssien arvot ovat kaikkein suurimmat silloin kun vikakohta on radan lopussa. Tämä ilmenee myös lukuina, sillä vian ollessa radan alussa impedanssit saavat arvon, joka on noin 2,5 ohmin luokkaa. Sen sijaan radan lopussa impedanssin arvot nousevat yli 16 ohmin. Impedanssin muodostumiseen vaikuttaa ratkaisevasti myös säästömuuntajat. Säästömuuntajia on rataosuudella kaiken kaikkiaan 7. Kyseiset säästömuuntajat ovat 1:1 muuntajia. Vikatilanteessa säästömuuntaja aiheuttaa oikosulun. Oikosulku sulkee osan piiristä, jolloin se on toimintakyvytön ja näin ollen kykenemätön vaikuttamaan impedanssiin. Tämä puolestaan selittää sen miksi eri vikatilanteissa impedanssit käyttäytyvät samalla tavalla. Oli vika sitten ajojohtimen ja M-johtimen välissä, paluujohtimen ja M-johtimen välissä tai ajojohtimen ja paluujohtimen välissä, oikosulkutilanne vaikuttaa kaikissa. Näin ollen impedanssit antavat jokaisessa tilanteessa samanlaisia lineaarisia arvoja. Syy miksi radan loppuosassa junan sijainnilla näyttäisi olevan merkitystä, johtuu jo aiemmin mainitusta jännitteestä.



Kuva 24. Ajojohtimen ja M-johtimen välisen vian impedanssi

Kuvan 25 kuvaajasta voidaan havainnollistaa ajojohtimen ja M-johtimen välisen vian impedanssin kulmaa vikaetäisyyden funktiona. Kyseisessä tilanteessa vikaresistanssi on lähes nolla. Kuvaajasta voidaan päätellä, että junan ollessa 45 km:n päässä asemalta ja toisaalta kun juna ei ole radalla, käyttäytyy impedanssin kulma hyvin samanlaisesti. Sen sijaan junan ollessa 19 km:n päässä asemalta kuvaaja käyttäytyy poikkeavasti. Radan alkuosassa impedanssin kulma kasvaa kaikilla parametreilla tasaisesti aina noin 22 km:iin saakka. Tässä kohdassa tapahtuu muutos. Kuvaaja, joka edustaa junan sijoittumista 19 km:n kohdalle vikahetkellä, lähtee jyrkkään laskuun. Kuvaajasta voidaan tulkita, että vikakohtan sijainnilla on keskeinen merkitys impedanssin kulman arvoon. Myös junan sijainnilla radalla näyttäisi olevan hieman merkitystä. Kaikkein tasaisin tilanne näyttäisi olevan, jos juna ei ole radalla, tai juna on 45 km:n päässä asemalta. Vikakohtan ollessa rataosuuden alussa saa impedanssin kulma kaikilla parametreilla noin 61,5 asteen kulman arvon. Radan lopussa parametreilla on selkeä ero impedanssin kulman suhteen. Korkeimman ja matalimman kulman arvo on radan loppuosassa noin 1,4 astetta.



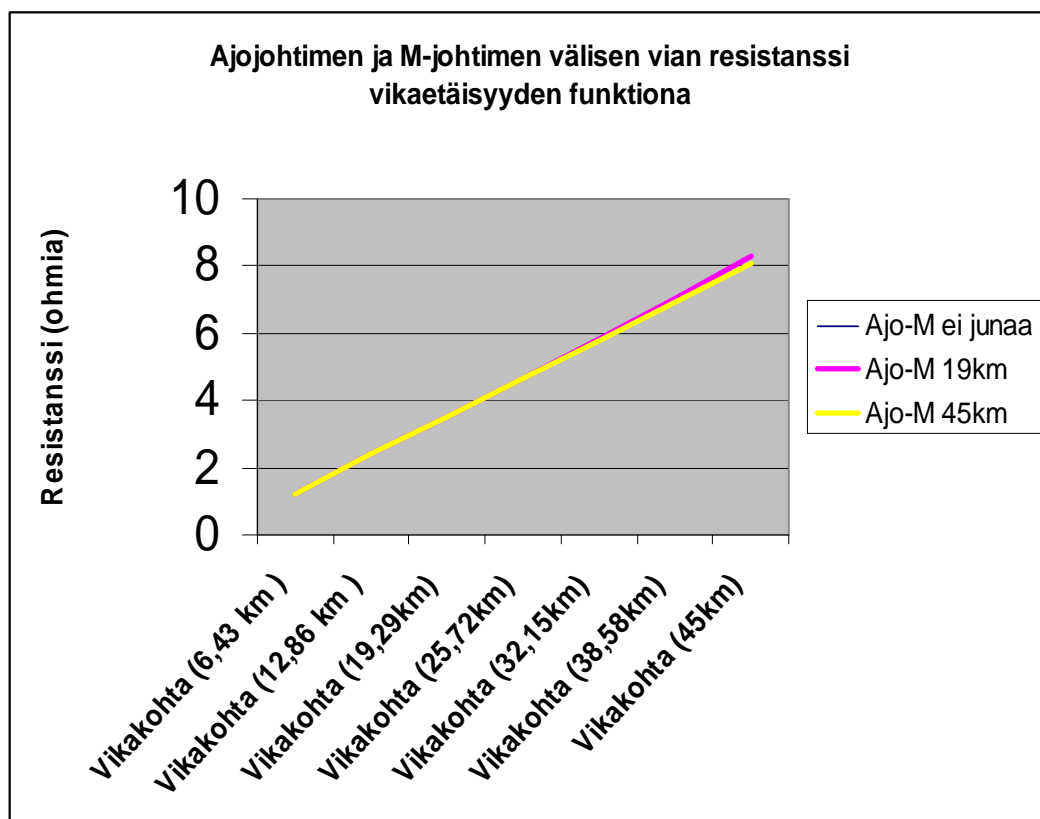
Kuva 25. Ajojohtimen ja M-johtimen välisen vian impedanssin kulma

Kuvan 26 kuvaajassa selvitetään ajojohtimen ja M-johtimen välisen vian resistanssia vikaetäisyyden funktiona. Kuvaajasta voidaan todeta, että resistanssi on varsin pieni radan alkuosassa, mutta kasvaa lineaarisesti jokaisella parametrilla mentäessä radan loppuosaa kohden. Resistanssi saavuttaa huippuarvonsa radan lopussa. Vikaresistanssi on tilanteessa noin nolla. Kuvassa 27 tehdään vertailua vikatilanteen ja normaalin tilanteen välillä. Niissä selvitetään tarkka resistanssin arvo jokaisella vikakohtalla sellaisessa tilanteessa jolloin vikaa ei ole radalla. Näin saadaan siis resistanssin arvot normaalissa käyttötilanteessa. Selvitetään mitkä ovat resistanssin arvot kullakin parametrilla vikatilanteessa. Niissä lasketaan mikä on normaalin tilanteen ja vikatilanteen välinen virhe. Tällä tavalla saadaan selville miten tilanne muuttuu vikatilanteen syntyessä.

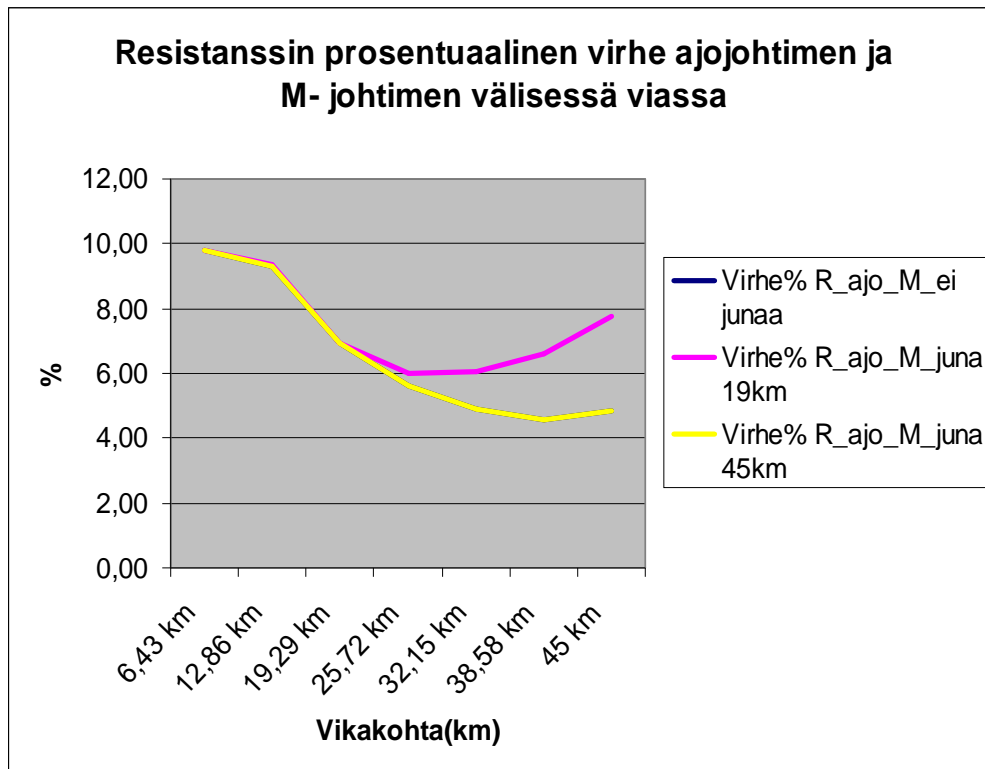
Lasketaan siis suhteellinen virhe vertaamalla vikaetäisyyden tarkkaan arvoon. Tarkka arvo lasketaan seuraavalla tavalla. Jokaiselle vikakohtalle lasketaan tarkka arvo normaalissa tilanteessa. Radalla 6,43 km:n etäisyydellä toisistaan on mallissa ilmoitettu sen paikan normaali resistanssin arvo. Tässä tapauksessa se on 1,0995 ohmia. Kun luku kerrotaan seitsemällä, saadaan tietää, paljonko normaali resistanssi on radan lopussa. Tässä tapauksessa se on noin 7,69 ohmia. Kun halutaan tietää kaikkien vikapaikkojen tarkka resistanssi, jaetaan 7,69 ohmia luvulla 45 jolloin saadaan tietää mikä on kilometrin kohdalla tarkka resistanssin arvo. Tämän jälkeen kerrotaan saatu luku sillä vikapaikan kilometrimäärällä joka halutaan laskea. Näin saadaan tietää jokaisen vikapaikan tarkka resistanssin arvo normaalissa tilanteessa.

Kuvasta 27 voidaan todeta millä tavalla vikatilanne vaikuttaa prosentuaalisesti resistanssin arvoon, jos verrataan normaaliin käyttötilanteeseen joka yleensä vallitsee radalla. Keltainen ja musta parametri saavat samat arvot. Näin ollen voidaan todeta, ettei ole eroa sillä onko juna radalla ollenkaan vai onko juna noin 45 km:n päässä asemalta. Nämä kaksi parametria saavat radan alkuosassa suurimmat arvonsa. Arvot ovat noin 9,81 % suuremmat kuin normaalissa tilanteessa. Vikakohtan siirtyessä rataosuuden loppuun, virheen suuruus pienenee. Näin ollen näille kahdelle parametrille voidaan todeta se, että vikakohtan

siirtyessä kauemmaksi, myös virheen suuruus pienenee. Violetti kuvaaja puolestaan saa radan alkuosassa samat arvot kuin edellä mainitut kaksi muuta kuvaajaa. Siirryttäessä radalla noin 19 km:n kohtaan, alkaa parametri erottua muista parametreista. Parametrin arvot laskevat hieman voimakkaammin ja saavuttavat noin 6 prosentin arvon. Tämän jälkeen kuvaaja käyttäytyy stabiilisti, jonka jälkeen alkaa voimakas kasvu. Kasvu jatkuu aina radan loppuun asti saavuttaen arvon 7,77 %. Näin ollen voidaan todeta se, että virheen suuruus on tällä parametrilla huipussaan vikakohtan sijaitessa radan alussa. Virheen suuruus on sen sijaan pienimmillään vikakohtan sijaitessa radan keskivaiheilla, mutta kasvaa jälleen radan loppua kohti mentäessä. Prosentuaalisesti eroa parametrien välissä syntyy eniten vikakohtan ollessa aivan radan lopussa jolloin eroksi syntyy noin 2,95 prosenttia.



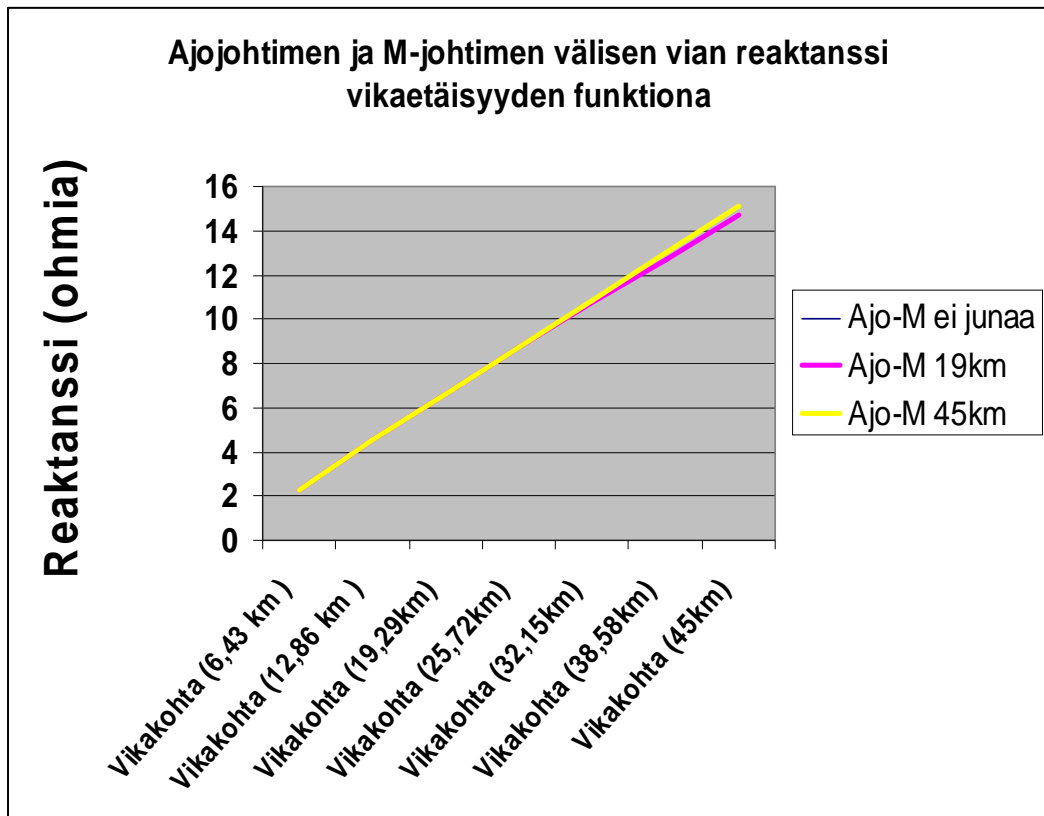
Kuva 26. Ajojohtimen ja M-johtimen välisen vian resistanssi



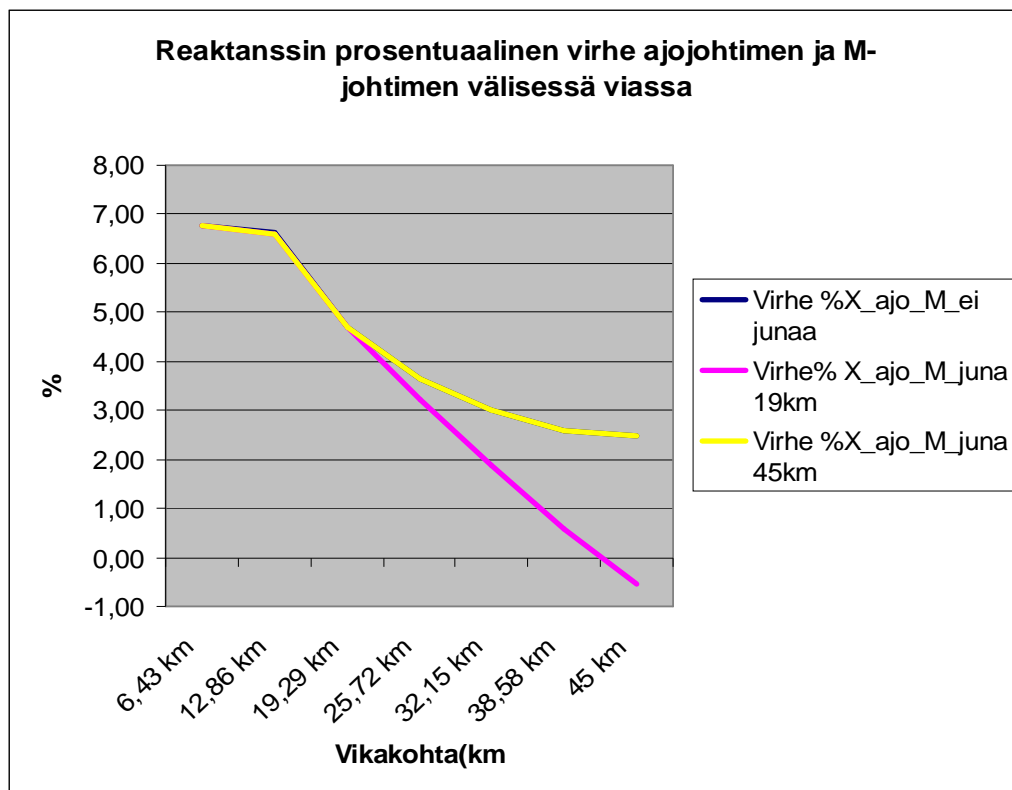
Kuva 27. Resistanssin prosentuaalinen virhe

Kuvan 28 kuvaajasta voidaan tarkastella ajojohtimen ja M-johtimen välisen vian reaktanssia vikaetäisyyden funktiona. Kuvaajasta voidaan lukea, että reaktanssi kasvaa lineaarisesti jokaisella parametrilla. Reaktanssi saavuttaa huippuarvonsa rataosuuden lopussa. Kuvaajan tilanteessa vikaresistanssi on noin nolla. Kuvasta 29 voidaan tehdä vertailua vikatilanteen ja normaalitilanteen välillä. Tilanteessa käytetään samoja menetelmiä kuin resistanssin virhettä määriteltäessä. Reaktanssin tarkan arvon laskeminen tapahtuu tosin hieman toisella tavalla. Kaava on $2 * \pi * L * f$. Induktanssin arvo on 0.00671 Henryä ja taajuus on 50Hz:ä. Kun arvot sijoitetaan kaavaan, saadaan reaktanssin tarkka arvo 6,43 km:n kohdalla. Tässä tapauksessa tarkka reaktanssin arvo mainitussa vikapaikassa on noin 2,1 ohmia. Kun halutaan tietää reaktanssin tarkka arvo radan lopussa, kerrotaan äsken saatu arvo seitsemällä, jolloin saadaan tulokseksi noin 14,7 ohmia. Kun saatu arvo jaetaan luvulla 45, saadaan tietää mikä on reaktanssin tarkka arvo kilometrin kohdalla. Kun halutaan tietää tietyn vikapaikan tarkka reaktanssin arvo, kerrotaan edellisestä laskutoimituksesta saatu luku halutun vikapaikan kilometrimäärällä.

Tässäkin kuvaajassa keltainen ja musta parametri käyttäytyvät samansuuntaisesti. Tästä voidaan todeta se, ettei ole väliä onko juna radalla ollenkaan tai onko juna 45 km:ä asemalta. Vikakohdan sijaitessa radan alkuosassa saavat kaikki parametrit suurimmat arvonsa. Tällöin ne saavat noin 6,77 prosenttien arvon. Tämä tarkoittaa siis sitä, että vikatilanteessa reaktanssin arvo kasvaa tuon verran. Keltaisen ja mustan parametrin arvot alkavat pienentyä jyrkästi vikakohdan siirtyessä noin 13 km:n kohdalle. Vikakohdan siirtyessä radan loppuun, pienenee virheen suuruus. Virheen suuruus saavuttaa pienimmän arvonsa vikakohdan sijaitessa rataosuuden aivan lopussa. Tällöin virheen prosentuaalinen suuruus on näillä kahdella parametrilla noin 2,49 prosenttia. Tästä voidaan todeta se, että vikakohdan sijaitessa radan alussa on resistanssin virhe suurimmillaan. Radan lopussa se on puolestaan pienimmillään. Tämä pätee siis keltaisella ja mustalla parametrilla. Violetti parametri käyttäytyy alussa samalla tavalla kuin keltainen ja musta. Se saa suurimman arvonsa vikakohdan sijaitessa rataosuuden alussa. Noin 25 km:n kohdalla parametri, jossa juna sijaitsee noin 19 km:n kohdalla, alkaa erottua. Parametri laskee erittäin jyrkästi saavuttaen pienimmän arvonsa aivan radan lopussa. Erotuksena kahteen muuhun parametriin, tämä parametrin arvo saavuttaa negatiivisen arvon. Tämä tarkoittaa sitä, että vikatilanteessa prosentuaalinen virhe on pienempi jos verrataan normaaliin tilanteeseen. Arvo on lopussa -0,56 %. Parametrien erotus on suurin vikatilanteen ollessa radan lopussa. Tällöin eroa on noin 3,05 %. Kuvaajasta voidaan todeta se, että vikakohdan ollessa loppuosassa rataa, on virheen suuruus pienimmillään jokaisella parametrilla.



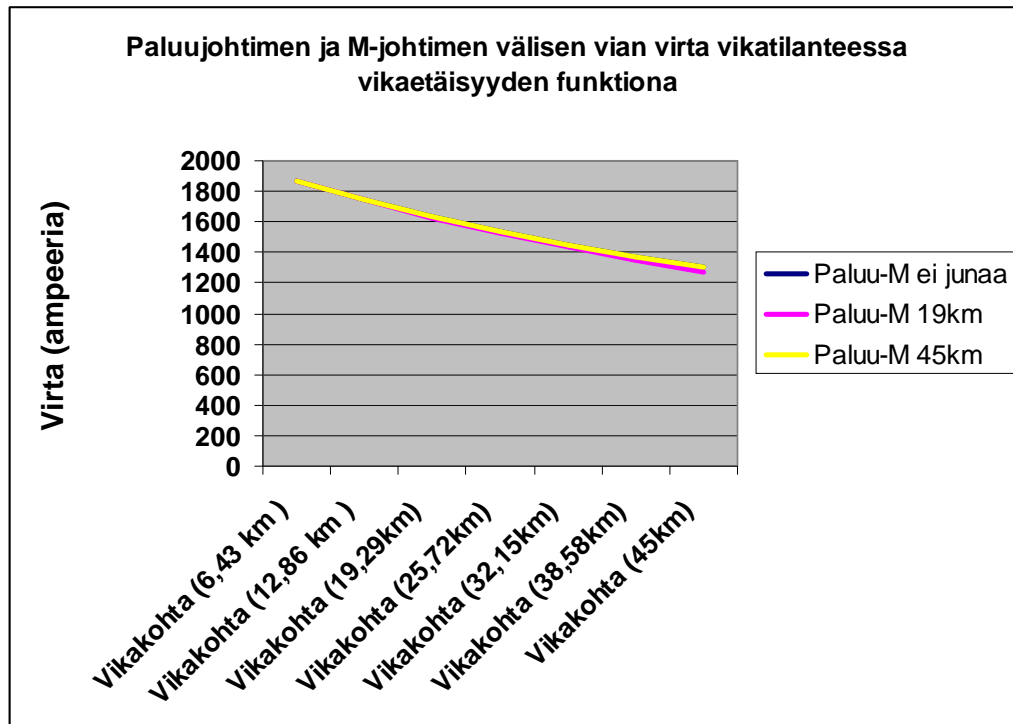
Kuva 28. Ajojohtimen ja M-johtimen välisen vian reaktanssi



Kuva 29. Reaktanssin prosentuaalinen virhe

6.3.2 Vastajohtimen ja M-johtimen välinen vika

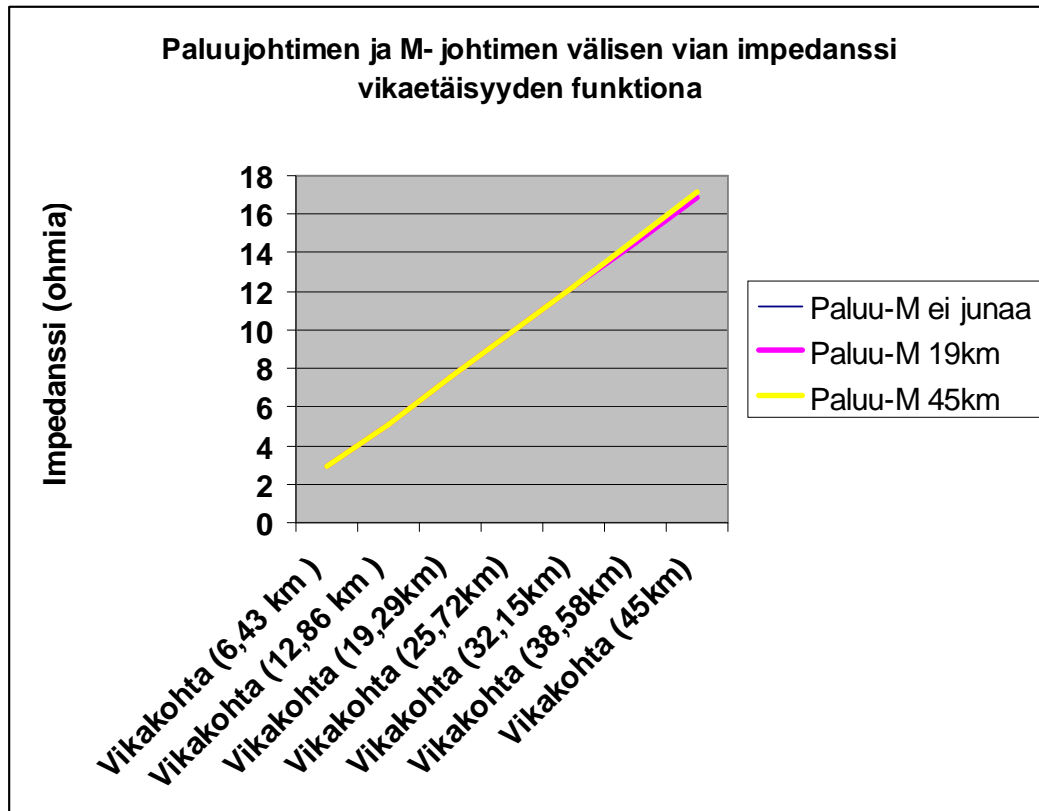
Kuvan 30 kuvaajassa on esitettyä vastajohtimen ja M-johtimen välisen vian virta vikatilanteessa vikaetäisyyden funktiona. Vikaresistanssi on tilanteessa noin nolla. Kuvaajasta voidaan todeta, että alkuosassa rataa virta saa korkeimmat arvot jokaisella parametrilla. Vikakohdan siirtyessä kohti radan loppuosaa saavat virran arvot yhä pienempiä arvoja, saavuttaen pienimmät arvonsa aivan radan loppuosassa. Vikakohdan siirtyessä rataosuuden alusta rataosuuden loppuun virran arvot putoavat jokaisella parametrilla yli 550 ampeeria. Junan sijainnilla radalla ei alussa näyttäisi olevan kovinkaan suurta merkitystä, sillä kuvaajat ovat alussa varsin identtisiä. Kuitenkin vikakohdan ollessa noin 26 km:n kohdalla, on havaittavissa pientä eroavaisuutta parametrien välillä. Tästä vikakohdasta aina radan loppuun asti, junan sijoittumisella radalla näyttäisi olevan jonkin verran merkitystä. Vikakohdan ollessa aivan radan lopussa, jolloin juna sijaitsee 19 km:n päässä asemalta, on tällöin virta selvästi pienin. Virta on noin 24,65 ampeeria pienempi kuin tilanteessa, jossa juna olisi radan lopussa, eli 45 km:n etäisyydellä asemasta. Sama pätee tilanteeseen, jossa junaa ei ole radalla. Kuvaajasta voidaan todeta, että vikapaikan sijainnilla on selvä merkitys virran suuruuteen. Tässäkin kuvaajassa junan sijainnin merkityksen kasvaminen rataosuuden lopussa johtuu jännitteestä, josta on mainittu jo aiemmin.



Kuva 30. Vastajohtimen ja M-johtimen välisen vian virta vikatilanteessa

Kuvan 31 kuvaajassa tarkastellaan vastajohtimen ja M-johtimen välisen vian impedanssia vikaetäisyyden funktiona. Kuvaajasta voidaan päätellä, että impedanssi kasvaa kutakuinkin lineaarisesti. Rataosuuden alussa impedanssi saa pienimmät arvonsa. Jokaisella parametrilla impedanssin arvoksi tulee rataosuuden alussa noin 2,94 ohmia. Vikakohtaan siirryessä kohti rataosuuden loppua impedanssi kasvaa selvästi saavuttaen huippuarvonsa radan lopussa. Impedanssien arvot kasvavat rataosuuden lopussa yli 16 ohmiin. Kuvaajasta voidaan todeta se, että radan alkuosassa kaikkien parametrien arvot ovat samaa luokkaa, eli eivät eroa merkittävästi toisistaan. Noin 22 km:n kohdalla alkaa kuitenkin tulla pientä eroa kuvaajien välillä. Lopussa kuitenkin suurimman arvon saa vikatilanne, jossa juna on radan loppuosassa. Saman arvon saa myös tilanne, jossa junaa ei ole radalla. Suurimman ja pienimmän impedanssin erotus loppuosassa rataa on noin 0,28 ohmia. Kuvaajista voidaan todeta se, että vikakohtalla on suuri merkitys siihen, millaisia impedanssin arvoja tässä kyseisessä vikatilanteessa syntyy. Junan sijainnilla ei ole niin näkyvää merkitystä radan alkuosassa, mutta merkitys korostuu mitä kauemmas rataosuus etenee. Merkitys on suurimmillaan aivan rataosuuden lopussa. Junan sijainnin merkityksen kasvu rataosuuden lopussa on

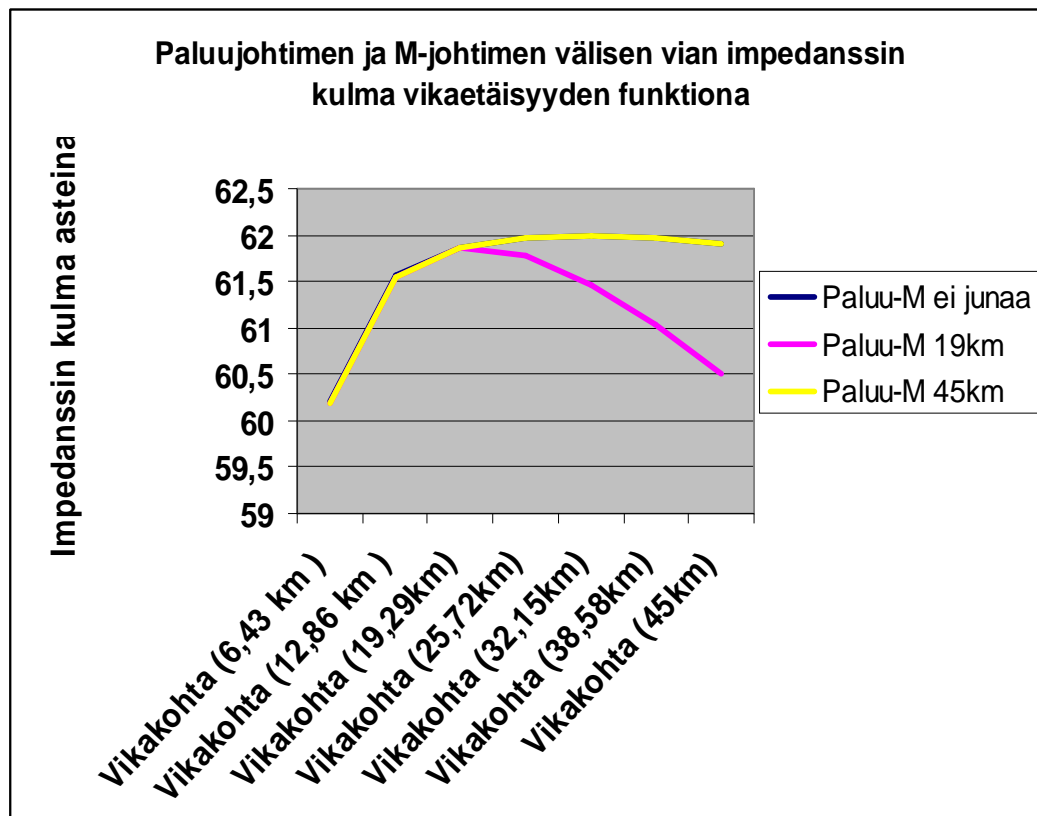
selitettävissä jo edellä mainitulla jänniteasialla. Impedanssiin vaikuttaa olennaisesti myös edellä mainitun säästömuuntajan aiheuttama oikosulku.



Kuva 31. Vastajohtimen ja M-johtimen välisen vian impedanssi

Kuvan 32 kuvaajassa tarkastellaan vastajohtimen ja M-johtimen välisen vian impedanssin kulmaa vikaetäisyyden funktiona. Kuvaajasta voidaan todeta, että impedanssin kulman arvo on alussa hyvin riippuvainen vikapaikasta. Impedanssin kulma kasvaa kaikilla parametreilla huomattavasti noin 22 km:iin asti. Tämän jälkeen parametrit, jossa junaa ei ole radalla sekä juna 45 km:n etäisyydellä asemasta, alkavat tasaantua. Impedanssin kulma ei enää kasva niin voimakkaasti kuin alussa, vaan se tasaantuu selvästi radan loppua kohti mentäessä. Parametri, jossa juna on 19 km:n päässä asemalta, sen sijaan alkaa 22 km:n kohdalla laskea hyvin voimakkaasti. Impedanssin kulma saavuttaa tällä parametrilla pienimmän arvonsa aivan radan lopussa. Suurimman ja pienimmän impedanssin kulman ero on radan lopussa ja se on tällöin noin 1,4 astetta. Kuvaajasta voidaan todeta, että vikapaikalla on selkeästi merkitystä siihen, miten impedanssin kulma käyttäytyy. Tietyn pisteen jälkeen, tässä tapauksessa noin 22 km:n kohdalla, myös junan

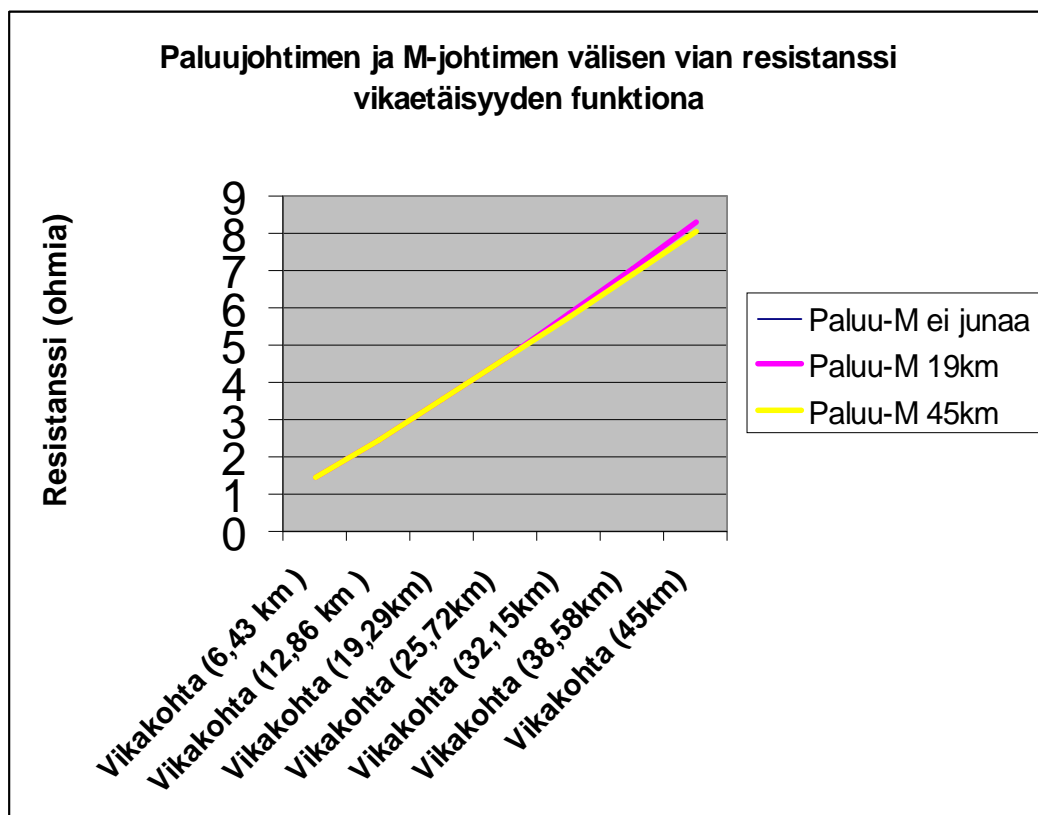
etäisyydellä alkaa olla jonkinlaista merkitystä. Junan sijainnin merkitys korostuu eniten radan loppuosassa.



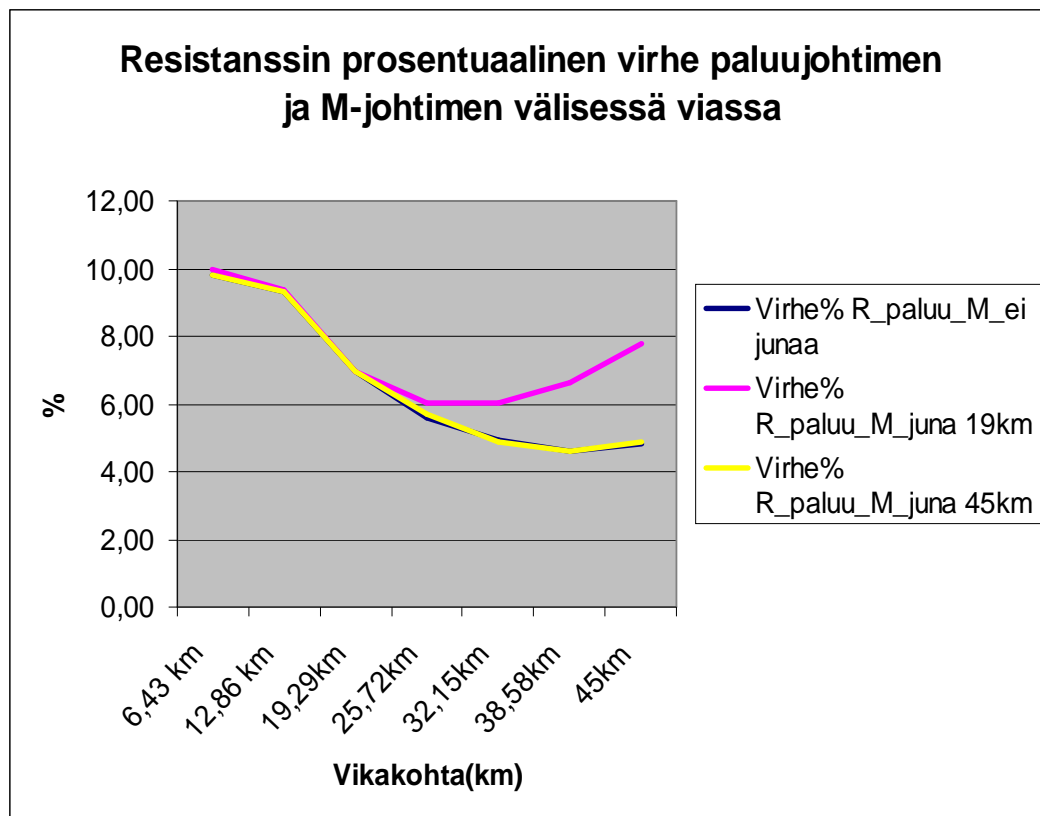
Kuva 32. Vastajohtimen ja M-johtimen välisen vian impedanssin kulma

Kuvan 33 kuvaajassa käsitellään vastajohtimen ja M-johtimen välisen vian resistanssia vikaetäisyyden funktiona. Kuvaajasta voidaan todeta, että resistanssin arvot kasvavat lineaarisesti jokaisella parametrilla. Resistanssin huippuarvo saavutetaan radan loppuosassa. Vikaresistanssi on tilanteessa noin nolla. Kuvan 34 kuvaajalla voidaan havainnollistaa vikatilanteen ja normaalin tilanteen prosentuaalista eroa. Virheprosentin selvittämiseen on käytetty samoja menetelmiä kuin aikaisemmassa resistanssin virheprosentin selvittämisessä. Keltainen ja musta parametri käyttäytyvät samalla tavalla tässä kuvaajassa. Tämä tarkoittaa sitä, että ei näytä olevan merkitystä sillä onko juna radalla ollenkaan vai onko juna 45 km:n päässä. Kumpikin parametrin arvo antaa samat tulokset. Kaikki parametrit saavat suurimmat arvonsa vikatilanteen ollessa radan alussa. Tällöin arvot ovat luokkaa 10 %. Tämä siis tarkoittaa sitä, että laskennallisesta resistanssista vikatilanteen resistanssi on tuon prosenttiosuuden verran isompi.

Vikapaikan siirtyessä radan alusta noin 19 km:n päähän, pienenee kaikkien parametrien arvot. Vikapaikan sijaitessa noin 25 km:n kohdalla violetti parametri alkaa erottua muista hieman. Tällöin parametri myös saa pienimmän arvonsa. Parametrin arvo kasvaa lopussa hiukan saavuttaen lopussa noin 7,77 % arvon. Kahden muun parametrin arvot laskevat lopussa hieman hitaammin. Parametrit saavuttavat pienimmät arvonsa vikakohtan ollessa aivan radan lopussa. Tällöin prosentuaaliset arvot sekä keltaisella että mustalla parametrilla ovat noin 4,90 %. Näiden kahden parametrin ja violetin parametrin ero on suurin radan lopussa. Tällöin ero on noin 2,90 %. Kuvaajista voidaan todeta se, että vikakohtan sijaitessa rataosuuden alussa, on resistanssin prosentuaalinen osuus suurimmillaan kun verrataan normaaliin tilanteeseen. Vikakohtan siirtyessä radan loppuun jokaisella parametrilla resistanssin virheen prosenttiosuus pienenee. Radan loppuosassa vikatilanteen aiheuttama muutos normaaliin tilanteeseen on pienempi kuin alkuosassa rataa. Kuvaaja käyttäytyy samalla tavalla kuin ajojohtimen ja M-johtimen välisen vian kuvaaja.



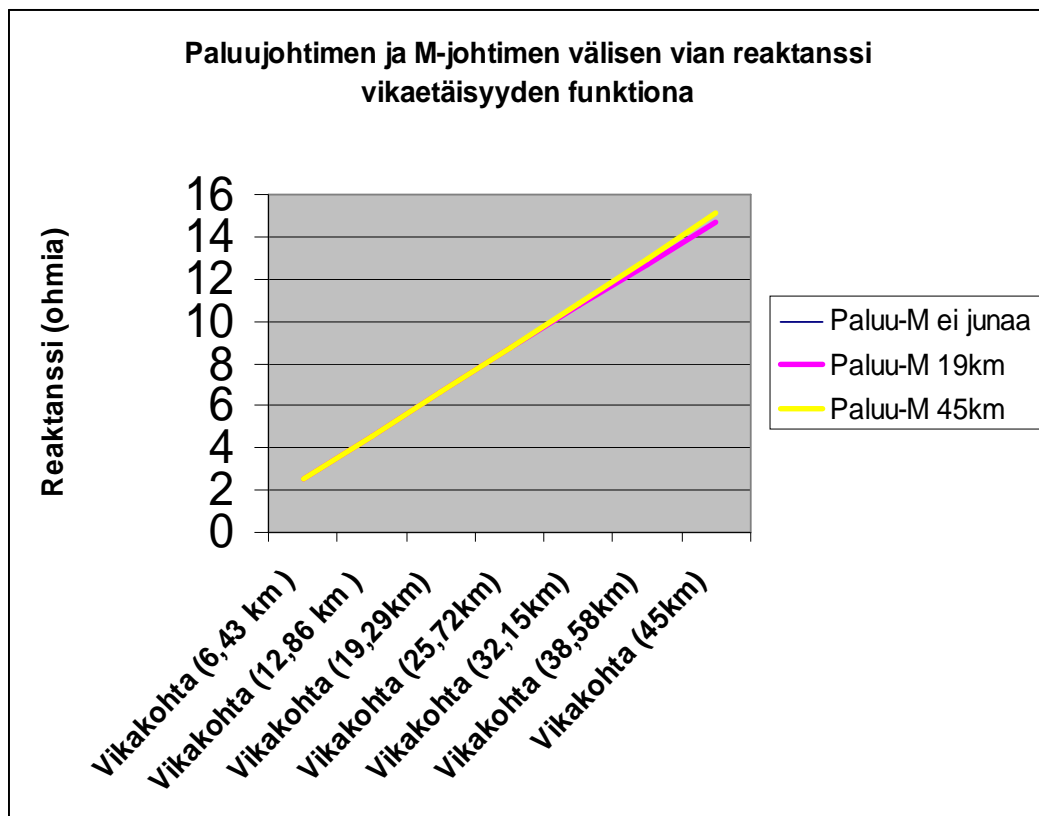
Kuva 33. Vastajohtimen ja M-johtimen välisen vian resistanssi



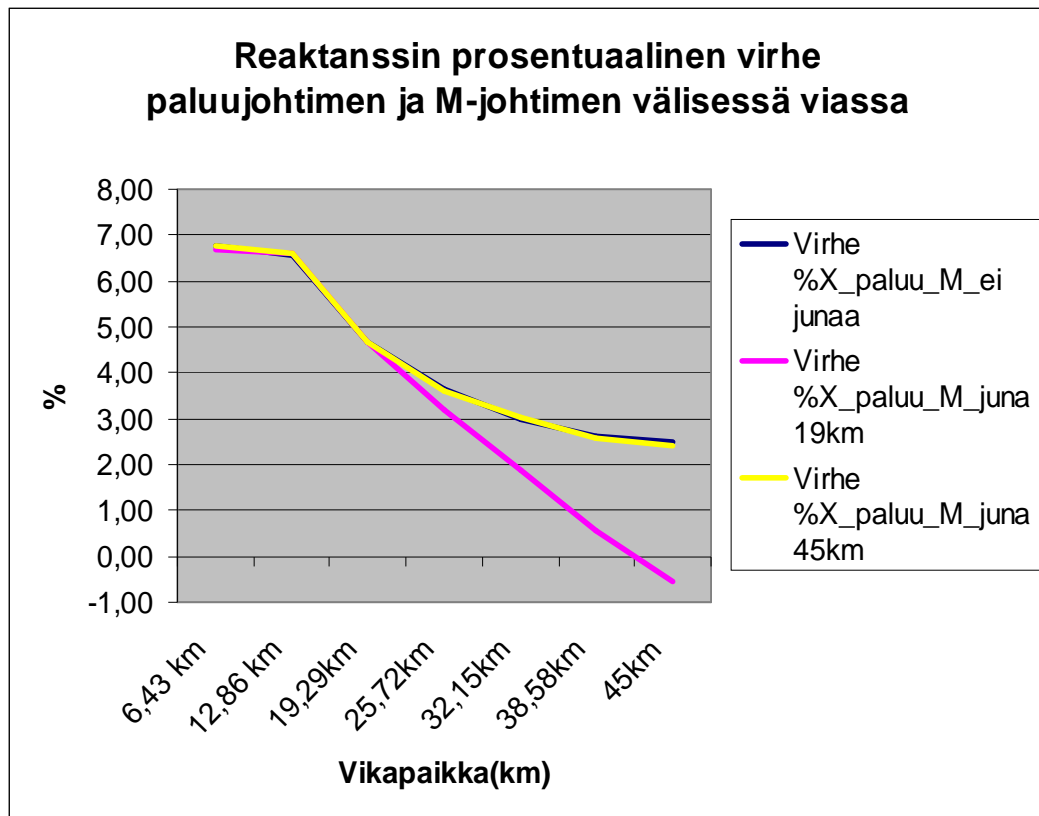
Kuva 34. Resistanssin prosentuaalinen virhe

Kuvan 35 kuvaajassa on esitetty vastajohtimen ja M-johtimen välisen vian reaktanssi vikaetäisyyden funktiona. Kuvaajasta voidaan todeta, että reaktanssin arvot kasvavat lineaarisesti jokaisella parametrin arvolla. Reaktanssi saavuttaa huippunsa vikakohtaan ollessa aivan radan lopussa. Vikaresistanssi on tilanteessa noin nolla. Kuvan 36 kuvaajasta voidaan havainnollistaa vikatilanteen ja normaalin tilanteen prosentuaalista eroa reaktanssin osalta. Tässäkin kuvaajassa keltainen ja musta parametri saavat samat arvot. Näin ollen ei näytä olevan eroa sillä, onko juna radalla ollenkaan vai onko juna 45 km:n päässä. Kaikki parametrit saavat radan alkuosassa samat arvot, noin 6,8 %. Vikakohtaan siirtyessä radalla eteenpäin kaikkien parametrien arvot alkavat laskea voimakkaasti. Keltainen ja musta parametri saavat pienimmät arvonsa radan lopulla. Kumpikin saa noin 2,42 prosentin arvon. Violetti parametri puolestaan käyttäytyy hyvin samantyyllisesti kuin muutkin parametrit. Sen arvo laskee kuitenkin loppuun asti jyrkästi. Violetti parametri saavuttaa pienimmän arvonsa radan lopussa. Arvo on tällöin noin -0,56 %. Tämä tarkoittaa sitä, että normaaliin arvoon verrattuna

vikatilanteen reaktanssin arvo on prosentuaalisesti pienempi kuin normaalitilanteen arvo. Violetin parametrin ero lopussa kahteen muuhun parametriin on luokkaa 3,0 %. Kuvaajasta voidaan päätellä, että kaikkien parametrien arvot laskevat vikakohtaan siirtyessä radan loppua kohti. Tällöin vikatilanteen aiheuttama muutos normaaliin tilanteeseen nähden on kaikkein pienimmillään. Kuvaaja käyttäytyy samalla tavalla kuin ajojohtimen ja M-johtimen välisen vian kuvaaja.



Kuva 35. Vastajohtimen ja M-johtimen välisen vian reaktanssi

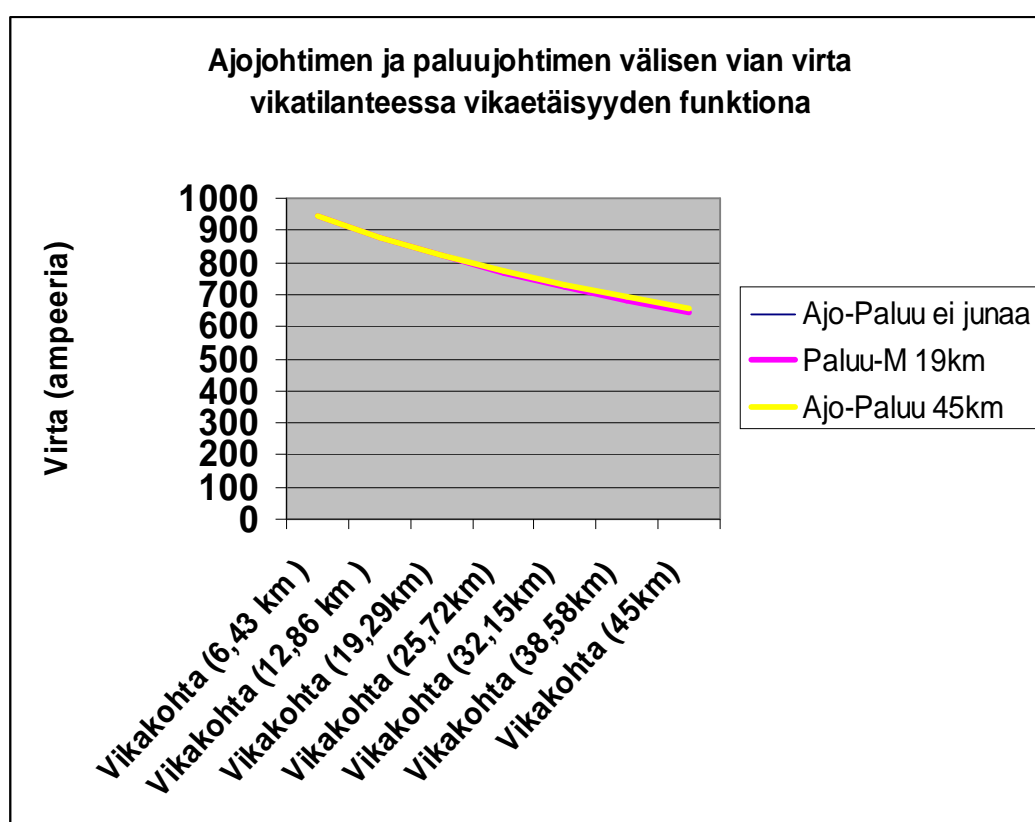


Kuva 36. Reaktanssin prosentuaalinen virhe

6.3.3 Ajojohtimen ja vastajohtimen välinen vika

Kuvan 37 kuvaajassa on esitettyä ajojohtimen ja vastajohtimen välisen vian virta vikatilanteessa vikaetäisyyden funktiona. Vikaresistanssi on tilanteessa noin nolla. Kuvaajasta voidaan todeta, että vikakohtaan ollessa rataosuuden alussa, on virran arvo suurin jokaisella parametrilla. Vikakohtaan siirryessä kohti radan loppua, romahtaa virran arvot huomattavasti. Aivan rataosuuden lopussa arvot saavat pienimmät arvonsa. Vian ollessa rataosuuden alussa, ei junan sijainnilla rataosuudella ole käytännössä juurikaan merkitystä, sillä kaikki parametrit käyttäytyvät samansuuntaisesti. Vasta vikakohtaan saavuttaessa noin 22 km:n kohdan, pientä eroavaisuutta kuvaajissa alkaa olla havaittavissa. Parametrit, joissa juna on 45km:n päässä asemalta sekä parametri jossa juna ei ole radalla, saavat lopussakin suunnilleen samat arvot. Sen sijaan parametri, jossa juna sijaitsee 19 km:ä asemalta, saa hiukan erilaisen arvon. Lopussa parametrien välinen ero on kaikkein suurimmillaan, noin 11,9 ampeeria. Vikatilanteessa, jossa juna on asemalta 19 km:n päässä antaa radan lopussa kaikkein pienimmän virran arvon.

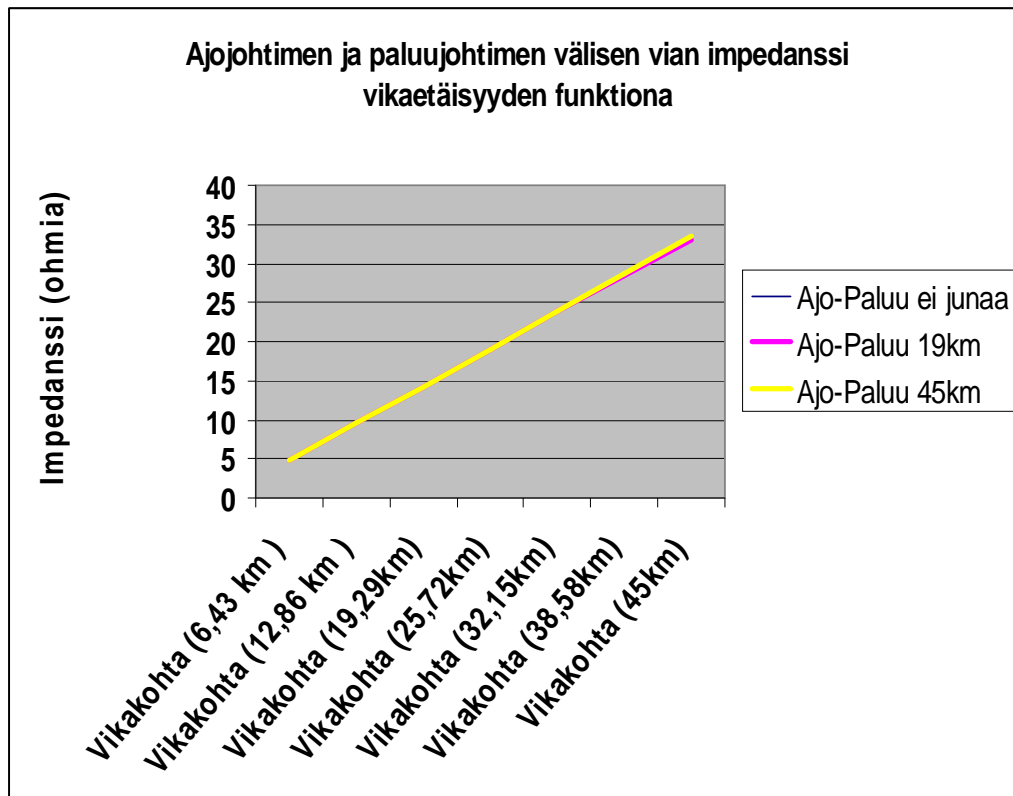
Vikavirta laskee vikakohtan siirtyessä radan alusta radan loppuun peräti noin 288 ampeeria. Pudoten alun reilusta 940 ampeerista rataosuuden lopun reiluun 640 ampeeriin. Kuvaajista voidaan näin ollen päätellä, että vikakohtalla on suurin merkitys virran suuruuteen. Radan alkuosuudella virran arvo ei ole riippuvainen junan sijainnista radalla. Vasta noin 22 km:n päässä asemalta alkaa junan sijainnilla olla merkitystä. Merkitys korostuu selvimmin radan lopussa. Tällöin virran suuruuteen vaikuttavat sekä vikakohta että junan sijainti. Syy miksi junan sijainti vaikuttaa vasta radan lopussa johtuu jo aiemmin mainitusta jännitteestä.



Kuva 37. Ajojohtimen ja vastajohtimen välisen vian virta vikatilanteessa

Kuvan 38 kuvaajassa tarkastellaan ajojohtimen ja vastajohtimen välisen vian impedanssia vikaetäisyyden funktiona. Vikaresistanssi on tilanteessa noin nolla. Kuvaajasta voidaan havaita, että vikakohtan sijaitessa rataosuuden alussa saa impedanssi kaikilla parametreilla pienimmät arvonsa. Vikakohtan siirtyessä kohti rataosuuden loppua, myös impedanssi kasvaa voimakkaasti. Kasvua voidaan kuvata lineaarisesti. Junan sijainnilla ei näytä olevan suurta merkitystä vikakohtan sijaitessa rataosuuden alussa. Sen sijaan junan sijainnin merkitys

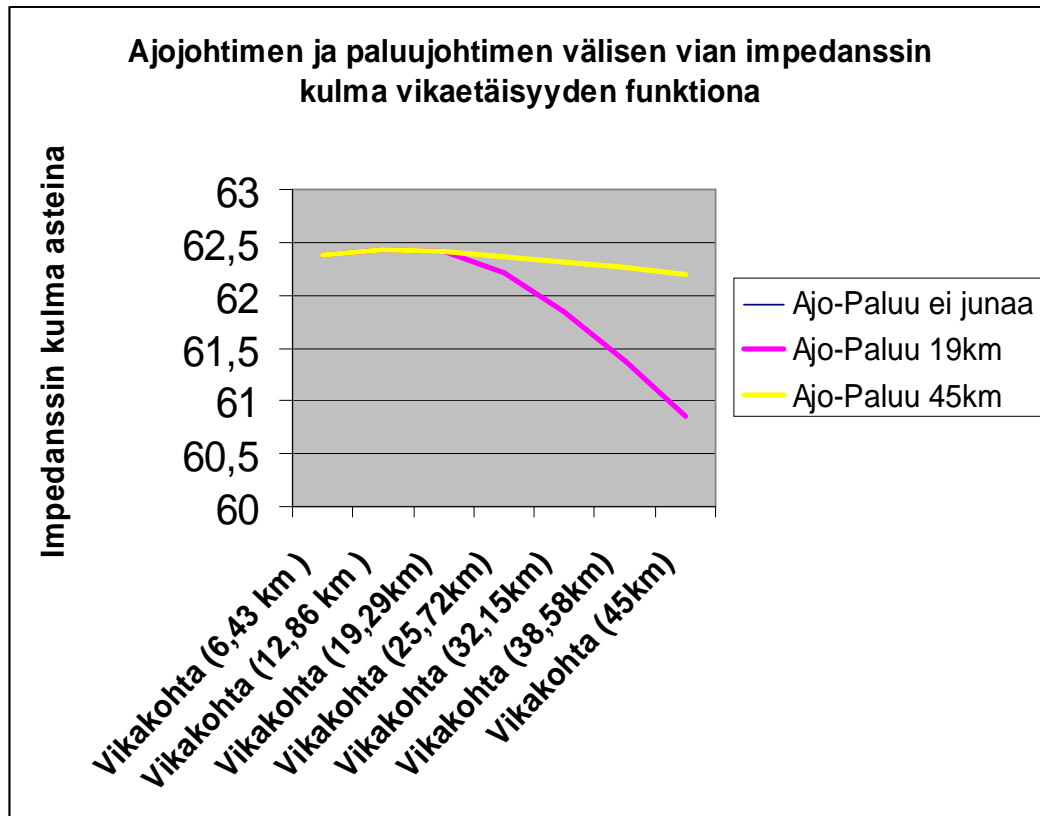
korostuu hiukan vikakohdan siirtyessä radan loppuosaan. Noin 32 km:n kohdalla on huomattavissa kuvaajissa pientä hajontaa. Parametrit, joissa junan sijainti on 45 km:ä sekä parametri jossa junaa ei ole radalla, näyttävät kutakuinkin yhtä suurilta koko rataosuudella. Ne saavat radan loppuosassa suurimmat impedanssin arvot. Impedanssin kasvu on varsin voimakasta näillä kahdella parametrilla siirryttäessä rataosuuden loppuun, sillä kasvua tapahtuu noin 28,7 ohmia. Vian sijaitessa rataosuuden alussa impedanssin arvo on jokaisella parametrilla luokkaa 4,76 ohmia. Rataosuuden lopussa impedanssi kipuaa jo yli 30 ohmin. Sen sijaan parametri, jossa junan sijainti on 19 km:ä asemalta, saavuttaa lopussa hiukan pienemmän arvon kuin muut parametrit. Erotus pienimmän ja suurimman arvon välillä loppuosassa rataa on noin 0,6 ohmia. Voidaankin päätellä, että suurin vaikutus impedanssiin on vikakohdalla. Junan sijainnilla rataosuudella ei ole niin suurta merkitystä. Rataosuuden alussa merkitys on käytännössä olematon, mutta vikakohdan edetessä rataosuuden loppuun, myös junan sijainnilla alkaa olla merkitystä. Syy miksi merkitys korostuu juuri rataosuuden lopussa, johtuu jo aiemmin mainitusta jännitteestä. Impedanssiin vaikuttaa myös säästömuuntaja, joka oikosulkee osan piiristä.



Kuva 38. Ajojohtimen ja vastajohtimen välisen vian impedanssi

Kuvan 39 kuvaajassa tarkastellaan ajojohtimen ja vastajohtimen välisen vian impedanssin kulmaa vikaetäisyyden funktiona. Vikaresistanssi on tilanteessa noin nolla. Kuvaajasta voidaan havaita, että vikakohtan sijaitessa radan alkuosuudella käyttäytyvät kaikki parametrit varsin samansuuntaisesti. Alkuosassa rataa impedanssin kulma saa suurimmat arvonsa. Vikakohtan siirtyessä rataosuutta eteenpäin, alkaa impedanssin kulma laskea. Tasaisimmin laskevat parametrit, jossa juna on 45 km:n päässä asemalta ja jossa junaa ei ole radalla ollenkaan. Näiden parametrien alkuarvo on 62,37 astetta radan alussa, ja 62,18 astetta radan lopussa. Kuvaajasta voidaan havaita, että impedanssin kulma hieman alussa jopa kasvaa, mutta alkaa sitten laskea rataosuuden edetessä. Parametri, jossa juna on 19 km:n päässä asemalta, käyttäytyy toisin. Vikakohtan ollessa noin 22 km:n kohdalla, alkaa tämä kyseinen parametrin arvo laskea jyrkästi. Kyseisen parametrin impedanssin kulma saavuttaa lopussa arvon 60,85 astetta. Näin ollen se on selvästi alhaisempi kuin kahdella muulla parametrilla radan lopussa. Kuvaajasta voidaan päätellä, että vian ollessa radan alkuosassa ei junan sijainnilla radalla ole kovin paljoa merkitystä impedanssin kulmaan. Suurin merkitys on

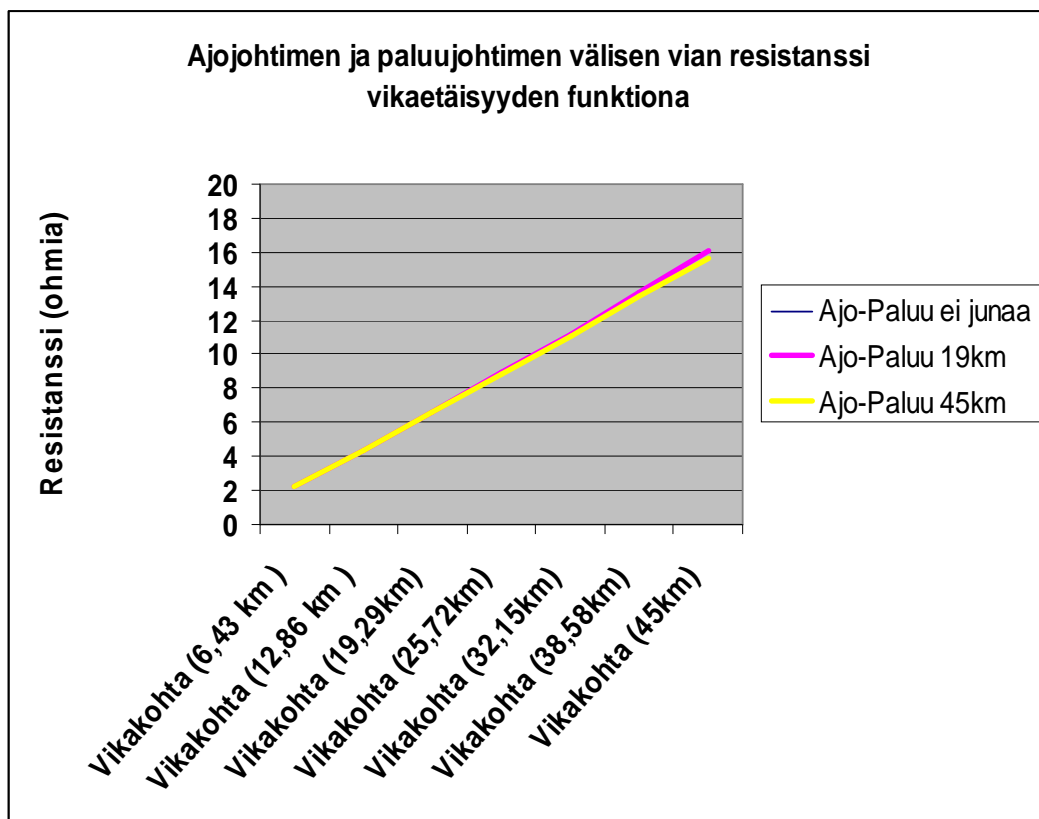
vikakohtan sijainnilla. Loppuosassa rataa junan sijainnin merkitys kuitenkin korostuu ja se selvimmin huomattavissa parametrilla, jossa juna sijaitsee 19 km:n päässä asemalta.



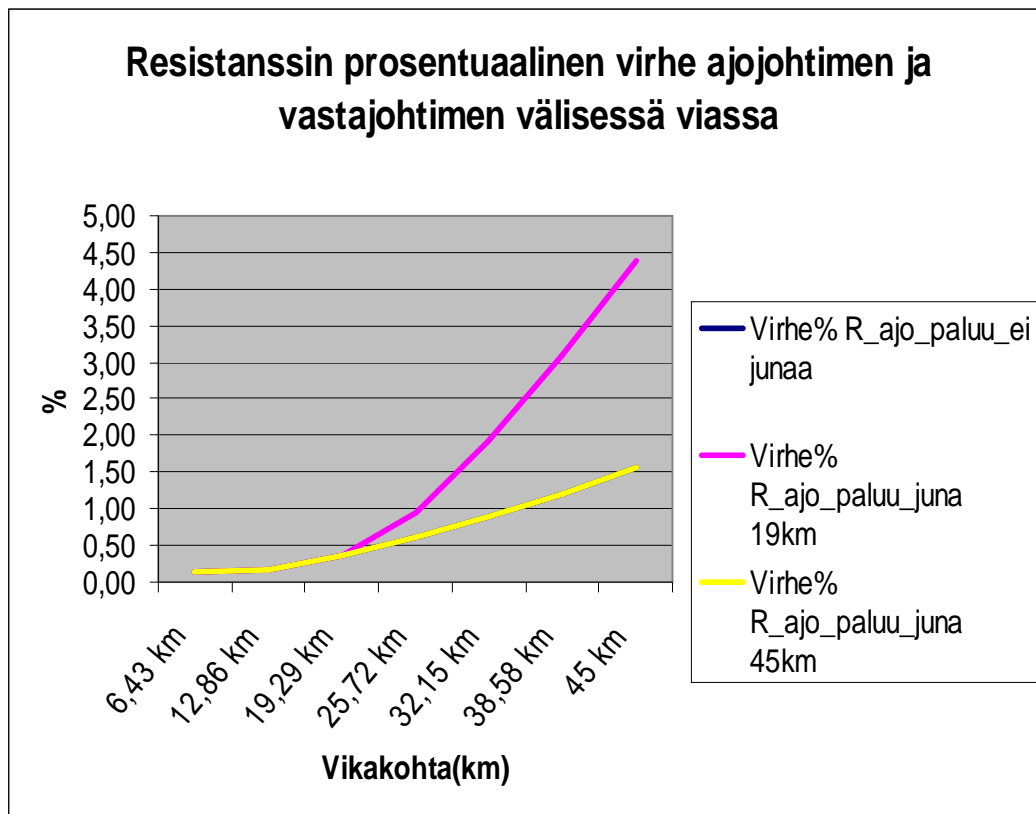
Kuva 39. Ajojohtimen ja vastajohtimen välisen vian impedanssin kulma

Kuvan 40 kuvaajassa tarkastellaan ajojohtimen ja vastajohtimen välisen vian resistanssia vikaetäisyyden funktiona. Kuvaajasta voidaan havaita, että resistanssin arvot kasvavat lineaarisesti. Resistanssin arvot saavuttavat huippunsa rataosuuden lopussa jokaisella parametrilla. Vikavastuksen arvo tilanteessa on noin nolla. Kuvan 41 kuvaajasta voidaan tarkastella vikatilanteen ja normaalitilanteen prosentuaalista eroa resistanssin osalta. Keltainen ja musta parametri saavat samansuuntaiset arvot. Tämä tarkoittaa sitä, että ei näytä olevan merkitystä sillä onko juna 45 km:n päässä radalla vai onko juna radalla ollenkaan. Kaikki parametrit saavat radan alkuosassa samanlaiset arvot, jotka ovat noin 0,14 %. Keltainen ja musta parametri kasvavat molemmat loivasti vikakohtaan siirryessä radan loppua kohti. Molemmat parametrit saavuttavat lopussa 1,57 prosentin arvon. Violetti parametri käyttäytyy noin 25 km:iin asti

samantyyliisesti kuin kaksi muutakin parametria. Tämän jälkeen tämä parametri alkaa kasvamaa hyvin jyrkästi ja saavuttaa suurimman arvonsa radan loppuosassa. Tällöin prosentuaalinen arvo on noin 4,40 %. Parametrien suurin ero on vikakohtan sijaitessa rataosuuden lopussa. Tällöin eroksi muodostuu noin 2,83 %. Kuvaajasta voidaan todeta se, että kaikkien parametrien arvot kasvavat vikakohtan siirtyessä kohti radan loppua. Suurimman arvon saa violetti parametri, eli tilanne jossa juna on noin 19 km:n päässä asemalta. Lisäksi resistanssin virhe on pienimmillään vikakohtan ollessa radan alussa.



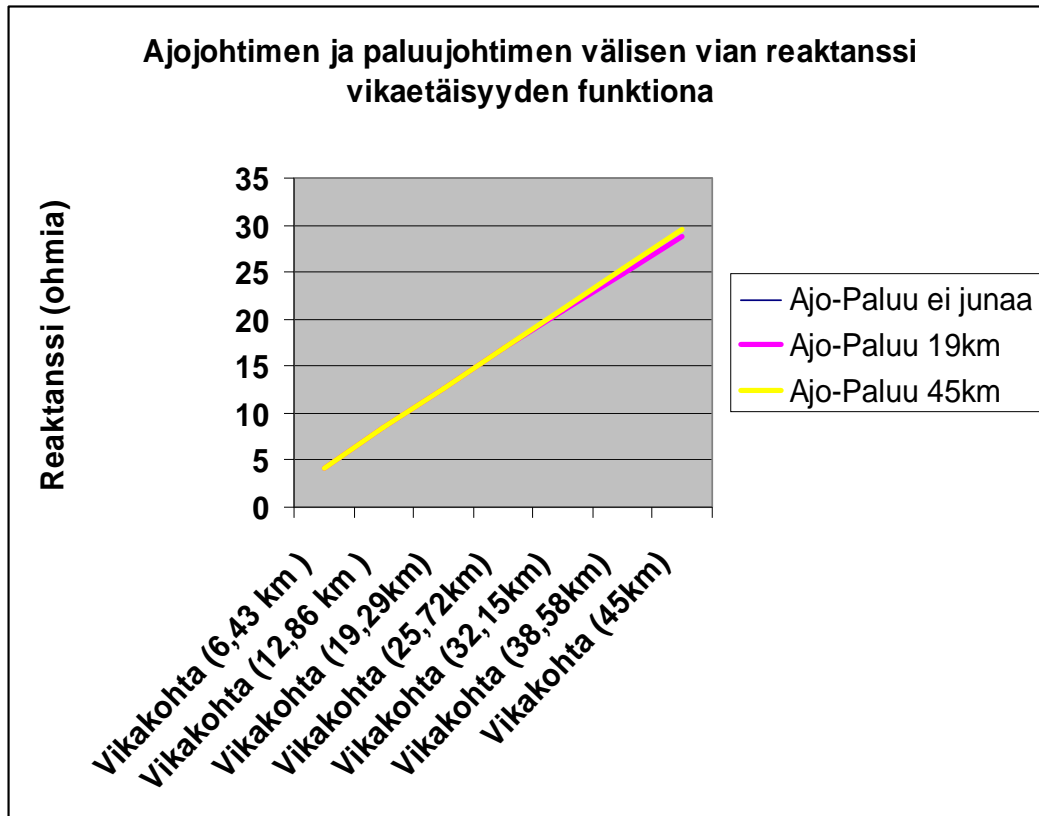
Kuva 40. Ajojohtimen ja vastajohtimen välisen vian resistanssi



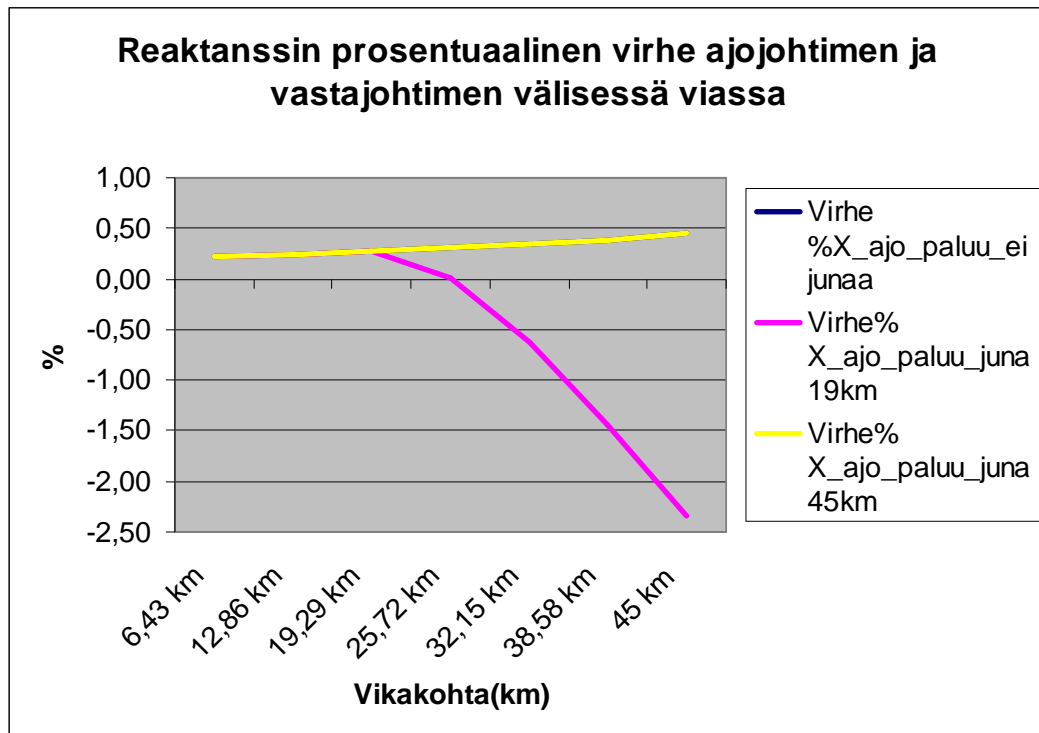
Kuva 41. Resistanssin prosentuaalinen virhe

Kuvan 42 kuvaajassa tarkastellaan ajojohtimen ja vastajohtimen välisen vian reaktanssia vikaetäisyyden funktiona. Kuvaajasta voidaan havaita, että reaktanssin arvot kasvavat lineaarisesti jokaisella parametrilla. Reaktanssi saa suurimmat arvonsa radan loppussa. Vikaresistanssi on tilanteessa noin nolla. Kuvan 43 kuvaajasta voidaan puolestaan tarkastella normaalitilanteen ja vikatilanteen prosentuaalista eroa reaktanssin osalta. Tässäkin kuvaajassa keltainen ja musta parametri saavat samoja arvoja, eikä niitä pysty erottamaan toisistaan. Näin ollen voidaan todeta, ettei ole merkitystä onko juna radalla ollenkaan vai onko se 45 km:n päässä. Keltainen kuvaaja käyttäytyy varsin stabiilisti. Se kasvaa hiukan vikapaikan siirtyessä radan loppua kohden. Se saa koko ajan alle yhden prosentin arvon. Violetti parametri käyttäytyy alussa samalla tavalla kuin muutkin parametrit ja se saa noin 0,21 % arvon vikakohdan sijaitessa radan alussa. Kuitenkin noin 25 km:n kohdalla se alkaa laskea hyvin jyrkästi. Parametri saavuttaa pienimmän arvonsa vikakohdan sijaitessa aivan rataosuuden loppussa, samoin kuin muutkin parametrit. Lopullinen arvo sillä on noin -2,34 %. Eroa sillä

ja muilla parametreilla on suurimmillaan 2,79 prosenttia, joka tulee tilanteessa jossa vikakohta on aivan radan lopussa.

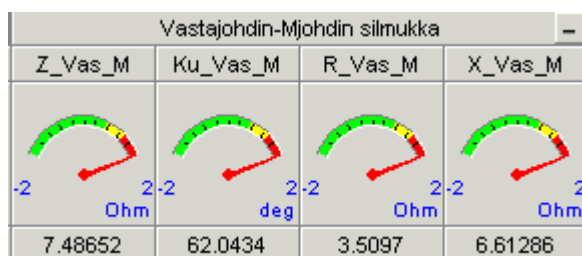


Kuva 42. Ajojohtimen ja vastajohtimen välisen vian reaktanssi

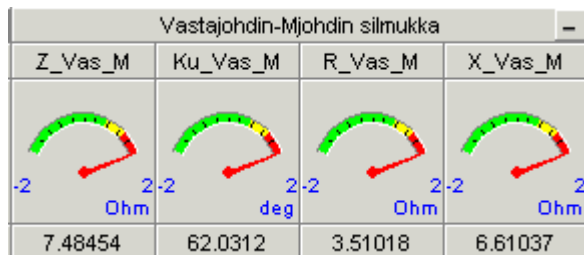


Kuva 43. Reaktanssin prosentuaalinen virhe

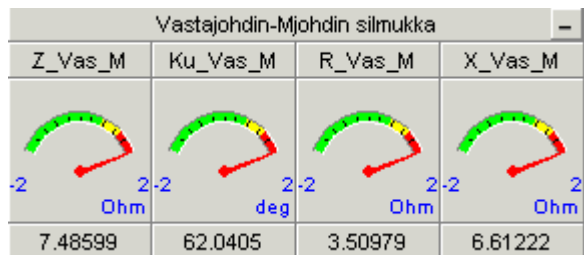
Näihin mittauksiin liittyen on käytetty paluujohtimen ja M-johtimen mittauksissa puolittaista silmukkamittausta. Tulos tulee kuitenkin olemaan sama vaikka mittaus suoritettaisiin kokonaisella silmukkamittauksella. Seuraavassa esitettynä täydennysmittaukset, jotka on otettu vikapaikan ollessa noin 19,29 km:n päässä asemalta. Mittauksina ovat olleet paluujohtimen ja M-johtimen välinen vika. Vikaparametreina toimivat juna 19 km:n päässä asemalta, juna 45 km:n päässä asemalta sekä tilanne jossa junaa ei ollut radalla ollenkaan. Kuvat 44, 45 ja 46 ovat kyseisiin mittauksiin liittyvät mittarit.



Kuva 44. Vastajohtimen ja M-johtimen välinen vika, kun juna ei radalla.



Kuva 45. Vastajohtimen ja M- johtimen välinen vika, kun juna on noin 19 km:n etäisyydellä.



Kuva 46. Vastajohtimen ja M- johtimen välinen vika, kun juna on noin 45 km:n etäisyydellä.

Tuloksista voidaan todeta, että ne ovat yhtenevät puolittaisella silmukkamittauksella tehtyjen tulosten kanssa.

6.3.4 Vikaresistanssin vaikutus impedanssimäärityksen tarkkuuteen

Seuraavissa mittauksissa tarkastellaan reaktanssin sekä resistanssin virhettä. Lähtökohtana on, että vikatilanteessa saatuja reaktanssin ja resistanssin arvoja verrataan normaalissa käyttötilanteessa saatuihin arvoihin. Radan jokaiselta vikapaikalta lasketaan resistanssin ja reaktanssin arvot, jotka ovat normaalissa tilanteessa. Tässä listataan malliksi simuloinneissa käytettyjen vikapaikkojen arvot normaalissa tilanteessa. Laskelmat suoritetaan samalla tavalla kuin aikaisemmissa virhelaskelmissa. Simulointimallissa on ilmoitettu 6,43 km:n välein normaaliksi resistanssiksi 1,0955 ohmia. Kun tämä luku kerrotaan luvulla seitsemän, saadaan tietää normaali resistanssi radan lopussa, eli 45 km:n päässä asemalta. Näin ollen saadaan tulokseksi noin 7,69 ohmia. Vastaavasti noin 19,29 km:n kohdalla oleva normaali arvo saadaan jakamalla 7,69 ohmia luvulla 45. Näin saadaan tietää mikä on kilometrin tarkka resistanssin arvo. Sen jälkeen kerrotaan saatu luku 19,29 ja saadaan toisen vikapaikan tarkka resistanssin arvo normaalissa

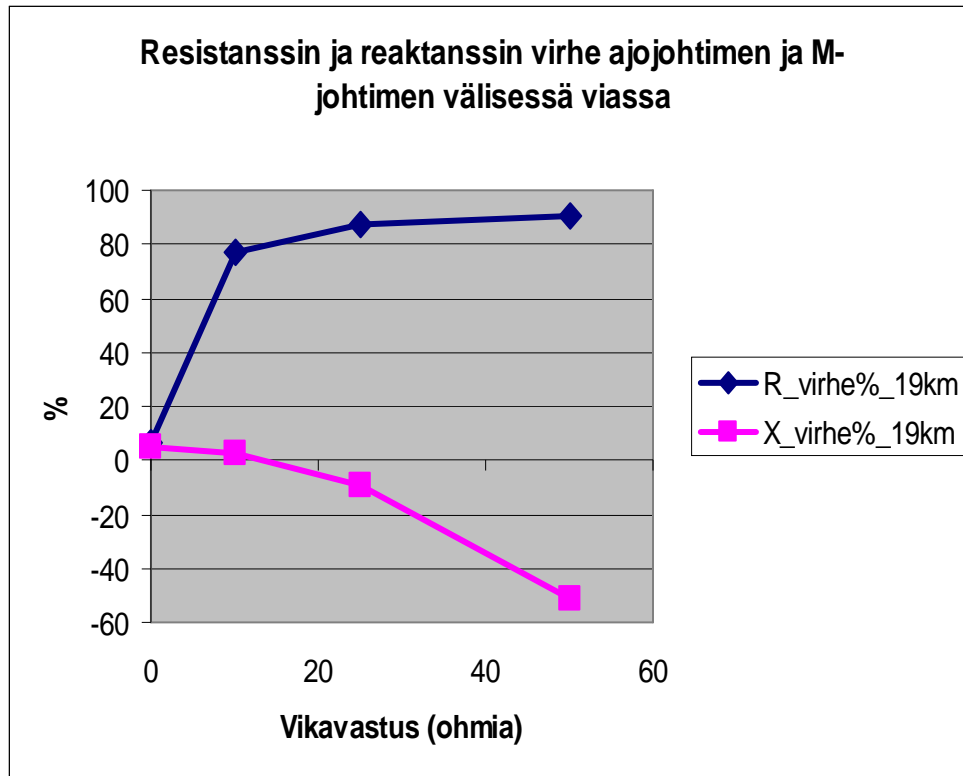
tilanteessa. Tässä tapauksessa arvoksi saadaan noin 3,29 ohmia. Reaktanssin tarkan arvon laskeminen tapahtuu seuraavalla tavalla. Kaava on $2 * \pi * L * f$. Induktanssin arvo on 0.00671 Henryä ja taajuus on 50Hz:ä. Kun arvot sijoitetaan kaavaan, saadaan reaktanssin tarkka arvo 6,43 km:n kohdalla. Tässä tapauksessa tarkka reaktanssin arvo mainitussa vikapaikassa on noin 2,1 ohmia. Kun halutaan tietää reaktanssin tarkka arvo radan lopussa, kerrotaan äsken saatu arvo seitsemällä, jolloin saadaan tulokseksi noin 14,7 ohmia. Kun halutaan tietää vikapaikan 19,29 km:n tarkka reaktanssi, jaetaan 14,7 ohmia luvulla 45 ja saadaan tietää mikä on kilometrin tarkka reaktanssin arvo. Kun saatu luku kerrotaan luvulla 19,29 saadaan tietää tämän vikapaikan tarkka reaktanssin arvo. Tässä tapauksessa arvo on noin 6,32 ohmia. Näin ollen vikapaikan 19,29 km:ä tarkka resistanssin arvo on 3,29 ohmia ja reaktanssi 6,32 ohmia. Vikapaikan 45 km:ä resistanssin tarkka arvo on puolestaan 7,69 ohmia ja reaktanssi 14,7 ohmia.

Vikatilanteessa mitataan resistanssin ja reaktanssin arvot eri vikavastuksilla. Vikavastusten suuruudet ovat noin nolla ohmia, 10 ohmia, 25 ohmia sekä 50 ohmia. Tuloksista lasketaan normaaleihin arvoihin verrattuna virheprosentti. Näin saadaan tietää miten suuri on vikatilanteen prosentuaalinen virhe verrattaessa normaaliin tilanteeseen. Vikavastusta muuttamalla pystytään havainnollistamaan vikavastuksen suuruuden vaikutusta normaaliin tilanteeseen.

Tarkastellaan kahta erilaista vikapaikkaa. Vikapaikat sijaitsevat 19 km:ä asemalta sekä noin 45 km:ä asemalta. Vikatilanteessa junaa ei ole radalla.

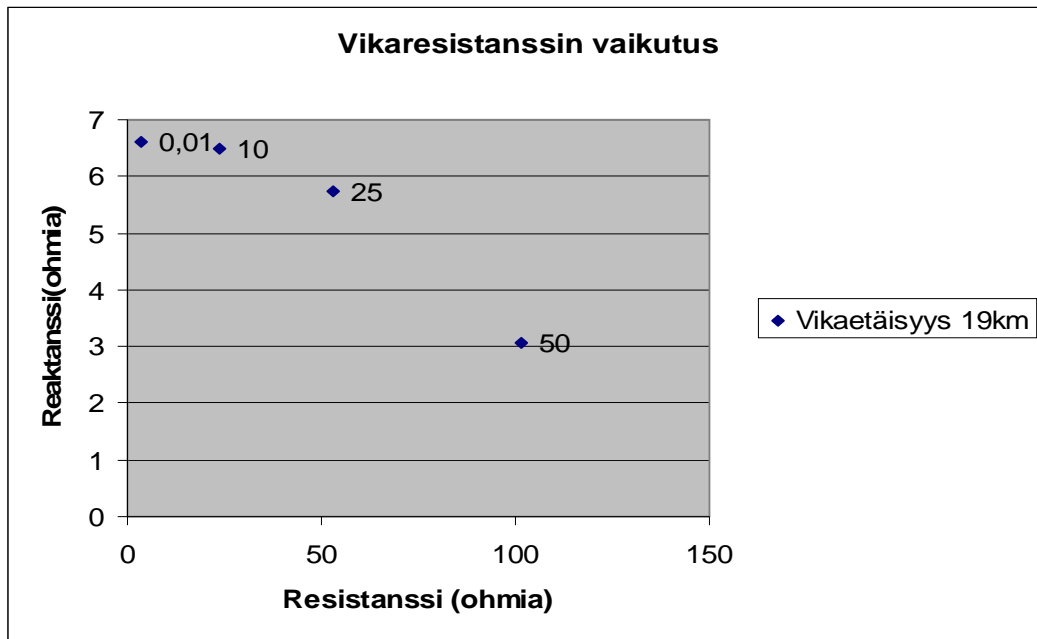
Kuvassa 47 tarkastellaan resistanssin ja reaktanssin virhettä ajojohtimen ja M-johtimen välisessä viassa. Vikapaikka on 19 km:ä ja junaa ei ole radalla. Kuvaajasta voidaan todeta, että vikavastuksen arvon kasvaessa virheen suuruus selvästi kasvaa. Reaktanssin virhe kasvaa negatiiviseen suuntaan, kun taas resistanssin virhe kasvaa positiiviseen suuntaan. Resistanssin virhe saavuttaa noin 90 % arvon. Reaktanssin virhe puolestaan saavuttaa noin -50 % arvon. Reaktanssin arvo laskee huomattavasti voimakkaammin kuin resistanssin arvo. Näin ollen voidaan todeta se, että vikaresistanssin suuruudella on suuri merkitys

virheen suuruuteen. Suurin virhe tulee vikavastuksen arvon ollessa 50 ohmia. Pienin arvo tulee vikavastuksen ollessa noin nolla ohmia.



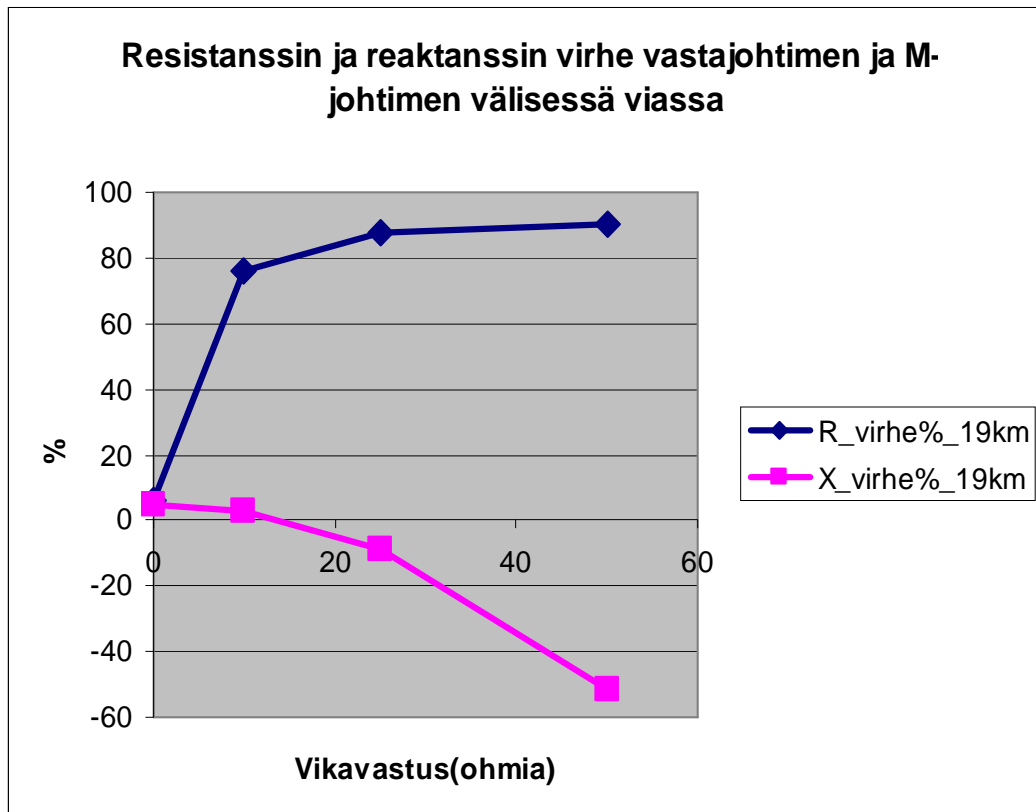
Kuva 47. Resistanssin ja reaktanssin virhe ajojohtimen ja M-johtimen välisessä viassa

Kuvan 48 kuvaajalla voidaan havainnollistaa vikaresistanssin vaikutusta reaktanssin ja resistanssin suuruuteen. Tämäkin mittaus on ajojohtimen ja M-johtimen välisestä viasta. Voidaan todeta, että vikavastuksen arvon kasvaessa resistanssin arvo suurenee ja reaktanssin arvo vastaavasti laskee. Resistanssi saa suurimman arvonsa vikavastuksen arvolla 50 ohmia. Samalla vikavastuksen arvolla reaktanssi puolestaan saavuttaa pienimmän arvonsa. Vikavastuksen ollessa pienimmillään, eli noin nolla ohmia, saavuttaa reaktanssi suurimman arvonsa. Tällöin resistanssi puolestaan saavuttaa pienimmän arvonsa. Näin ollen on selvää, että vikavastuksen merkitys on varsin suuri. Resistanssi ja reaktanssi käyttäytyvät päinvastaisesti vikavastuksen arvoa suurennettaessa ja pienennettäessä. Käytännössä kuvaajaan syntyy impedanssin arvo, joka on kasvava, eli vikaresistanssin arvoa kasvattamalla impedanssin arvo kasvaa. Tässä tapauksessa 50 ohmin vikavastuksella impedanssin arvo saavuttaa yli sadan ohmin arvon.



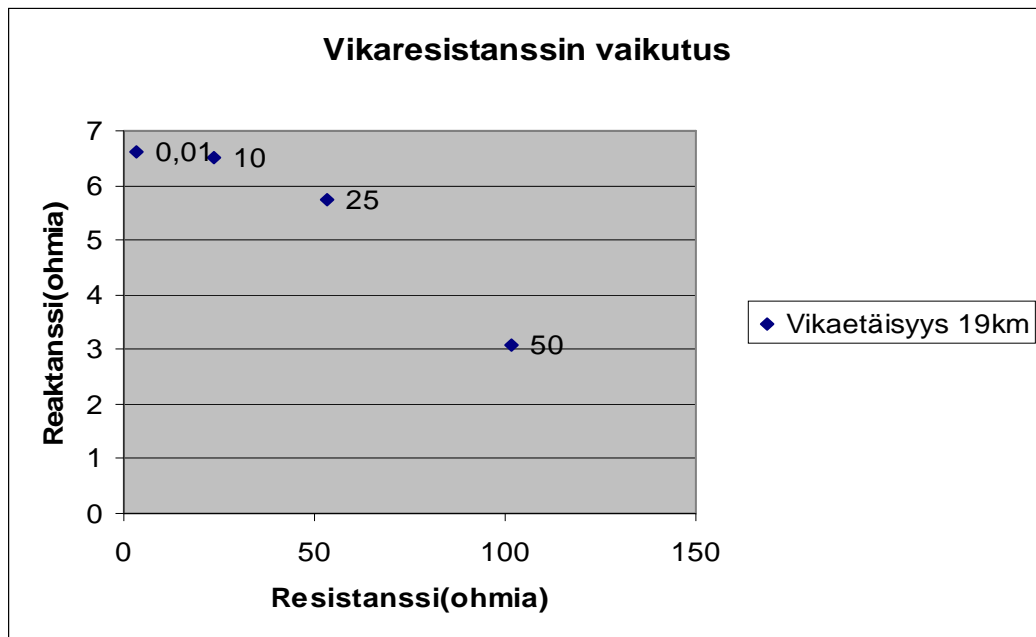
Kuva 48. Vikaresistanssin vaikutus impedanssin määrittämiseen ajojohtimen ja M-johtimen välisessä viassa

Kuvan 49 kuvaajassa tarkastellaan resistanssin ja reaktanssin virhettä vastajohtimen ja M-johtimen välisessä viassa. Vikakohta on 19 km:ä. Vikaresistanssien arvot ovat samat kuin edellä. Kuvaajasta voidaan todeta, että reaktanssi ja resistanssi käyttäytyvät samalla tavalla kuin ajojohtimen ja M-johtimen välisessä viassa. Resistanssin arvot kasvavat vikavastuksen arvoa nostamalla. Reaktanssin arvot pienenevät vikavastuksen arvoa kasvattamalla. Prosentuaaliset arvot ovat myös samansuuntaisia kuin ajojohtimen ja M-johtimen välisessä viassa. Tämä ei ole mikään yllätys, sillä ajojohtimen ja vastajohtimen ovat käytännössä peilikuvia toisistaan ja ne käyttäytyvät samalla tavalla.



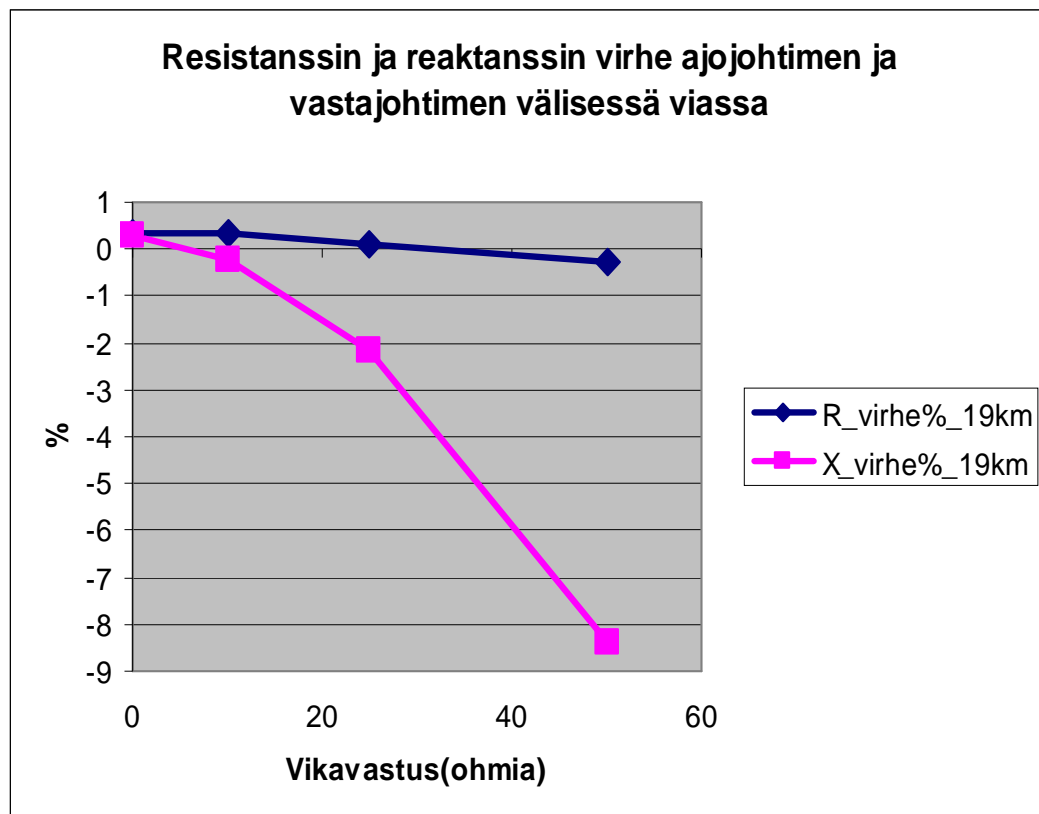
Kuva 49. Resistanssin ja reaktanssin virhe vastajohtimen ja M-johtimen välisessä viassa

Kuvan 50 kuvaajassa on esitetty vikaresistanssin vaikutus. Vika on vastajohtimen ja M-johtimen välillä. Kuvaaja käyttäytyy samalla tavalla kuin ajojohtimen ja M-johtimen välisessä viassa. Resistanssin arvot kasvavat vikavastusta suurentamalla. Reaktanssin arvot puolestaan pienenevät. Tässäkin kuvassa on mahdollista nähdä impedanssin käyttäytyminen. Vikavastusta kasvattamalla impedanssin suuruus kasvaa. Tässä tapauksessa samalla tavalla kuin aikaisemmassakin kuvaajassa tapahtuu.



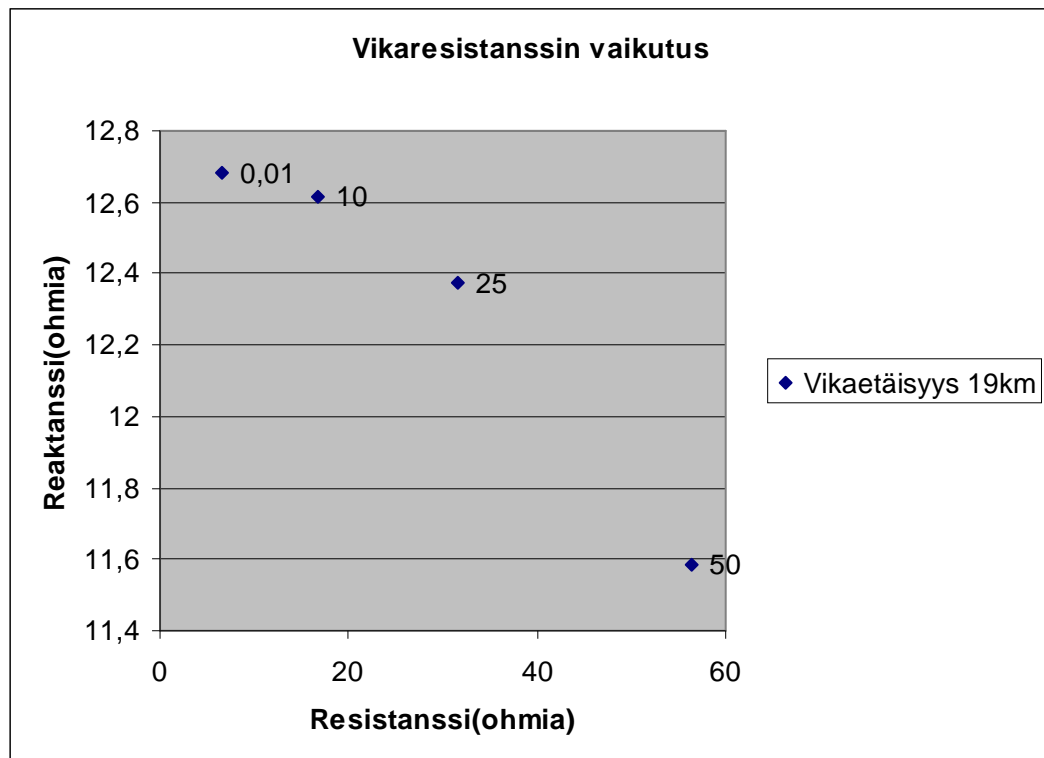
Kuva 50. Vikaresistanssin vaikutus impedanssin määrittämiseen vastajohtimen ja M-johtimen välisessä viassa

Kuvan 51 kuvaajassa esitetään resistanssin ja reaktanssin prosentuaalinen virhe ajojohtimen ja vastajohtimen välisessä viassa. Vikapaikka on 19 km:ä ja vikaresistanssien arvot ovat samat kuin edellä. Kuvaajasta voidaan todeta, että resistanssin ja reaktanssin arvot pienenevät molemmat kasvatettaessa vikavastusta. Resistanssin arvo laskee erittäin loivasti. Reaktanssin arvo puolestaan laskee erittäin jyrkästi. Pienimmät arvonsa molemmat saavat vikaresistanssin ollessa 50 ohmia. Reaktanssi saa lopussa noin -8,38 % arvon. Resistanssi puolestaan saa noin -0,29 % arvon. Näin ollen voidaan todeta, että ajojohtimen ja paluujohtimen välisessä viassa vikavastuksen suuruudella on suurempi vaikutus reaktanssiin kuin resistanssiin.



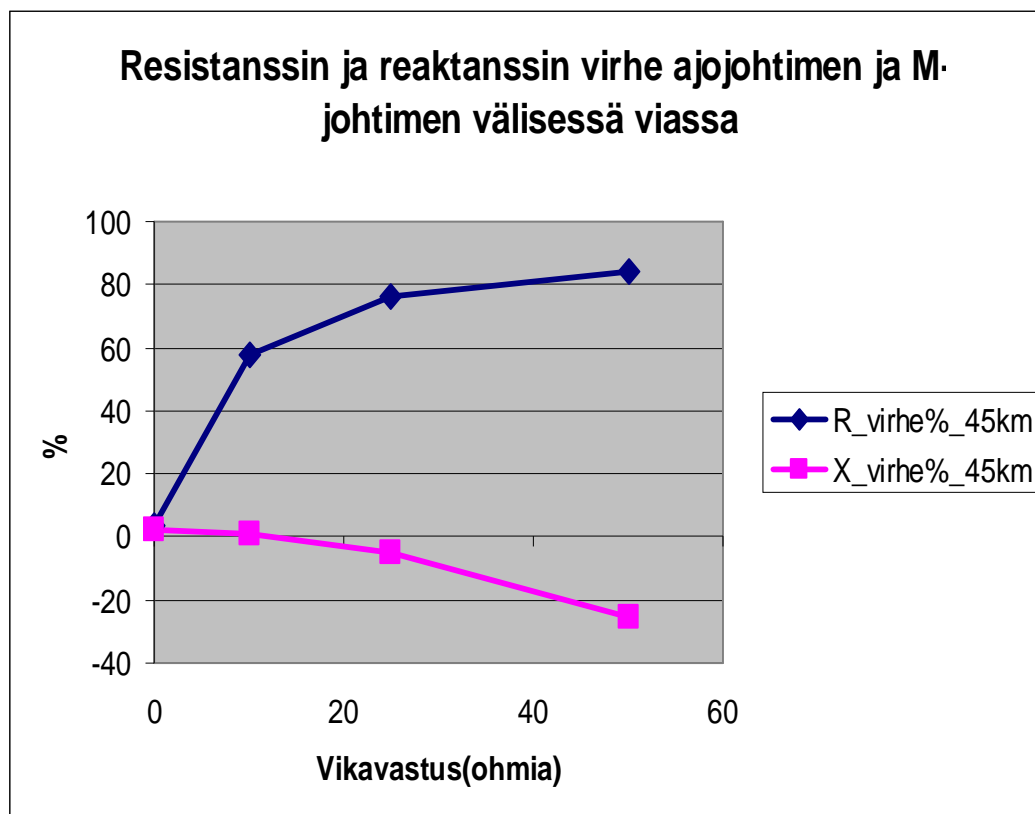
Kuva 51. Resistanssin ja reaktanssin virhe ajojohtimen ja vastajohtimen välisessä viassa

Kuvan 52 kuvaajassa on esitetty vikaresistanssin vaikutus resistanssiin ja reaktanssiin ajojohtimen ja vastajohtimen välisessä viassa. Kuvaajasta voidaan todeta, että arvot käyttäytyvät samansuuntaisesti kuin ajojohtimen ja M-johtimen ja ajojohtimen ja paluujohtimen välisessä viassa. Vaikka virhekuvaajissa olikin suurta heittoa aiempaan, saadaan tarkasteltaessa ohmeina tilannetta, erilainen kuva asiasta. Vikaresistanssin kasvaessa resistanssin ohmimäärä kasvaa. Tällöin reaktanssin arvo pienenee. Vikaresistanssin arvon pienentyessä myös resistanssi pienenee, tällöin reaktanssin arvo kasvaa. Huomionarvoista on, että reaktanssin arvo pienenee suhteessa vähemmän kuin ajojohtimen ja M-johtimen ja paluujohtimen ja M-johtimen välisissä vioissa. Tässäkin kuvaajassa on mahdollista havaita impedanssin käyttäytyminen vikaresistanssia kasvattamalla. Tässäkin tapauksessa 50 ohmin vikavastuksen arvo antaa suurimman impedanssin arvon.



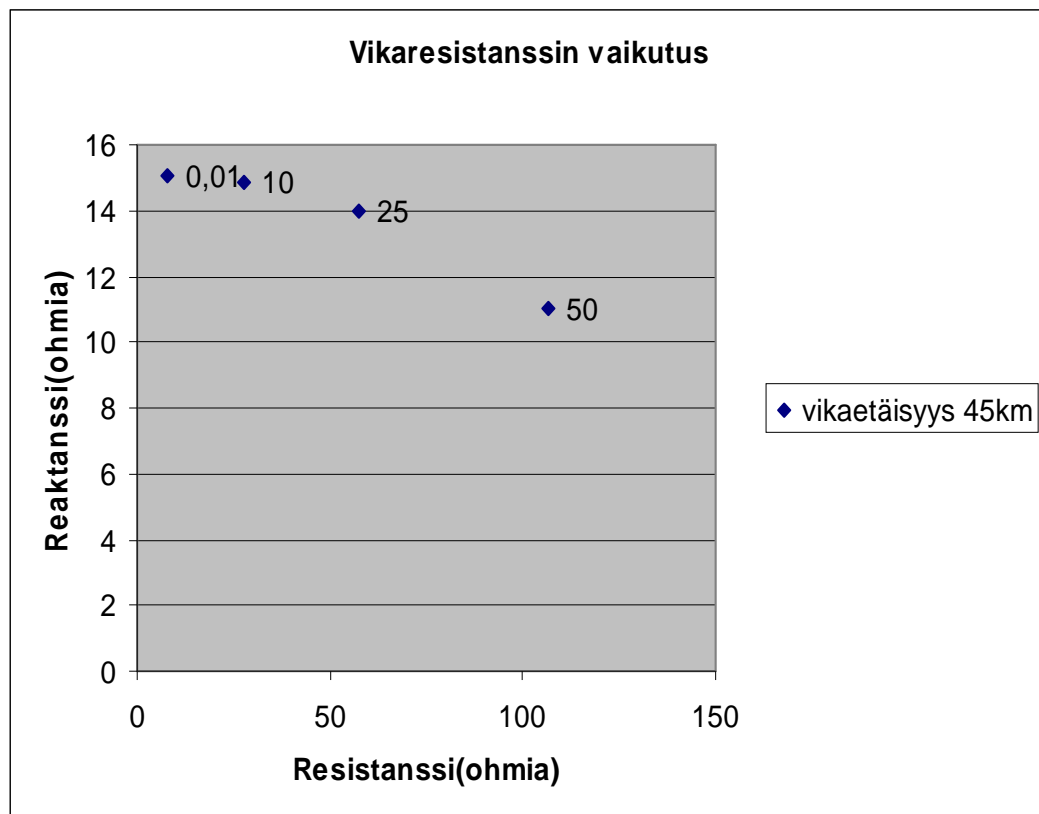
Kuva 52. Vikaresistanssin vaikutus impedanssin määrittämiseen ajojohtimen ja vastajohtimen välisessä viassa

Kuvan 53 kuvaajassa on esitetty tilanne jossa tutkitaan resistanssin ja reaktanssin prosentuaalista virhettä vikapaikan ollessa 45 km:ä. Vika on ajojohtimen ja M-johtimen välillä. Junaa ei edelleenkään ole radalla ja vikavastusten arvot ovat samat kuin edellä. Kuvaajasta voidaan todeta, että reaktanssin ja resistanssin arvot käyttäytyvät vastakkaisesti vikavastuksen suuretessa. Resistanssin prosentuaalinen virhe kasvaa positiiviseen suuntaan, kun taas reaktanssin vastaava pienenee negatiiviseen suuntaan vikavastusta kasvatettaessa. Resistanssi saa suurimman arvonsa vikavastuksen ollessa 50 ohmia. Tällöin prosentuaalinen virhe on noin 84 %. Reaktanssi puolestaan saa pienimmän arvonsa vastaavasti vikavastuksen ollessa 50 ohmia. Tällöin prosentuaalinen virhe on noin -25,3 %. Vikavastuksen ollessa lähes nolla, saavat reaktanssi ja resistanssi lähes yhtä suuret prosentuaaliset virhearvot. Suurimmillaan ero näiden parametrien välillä on silloin, kun vikaresistanssi on 50 ohmia. Tällöin prosentuaalisesti ero resistanssin ja reaktanssin virheen välillä on noin 110 prosenttia.



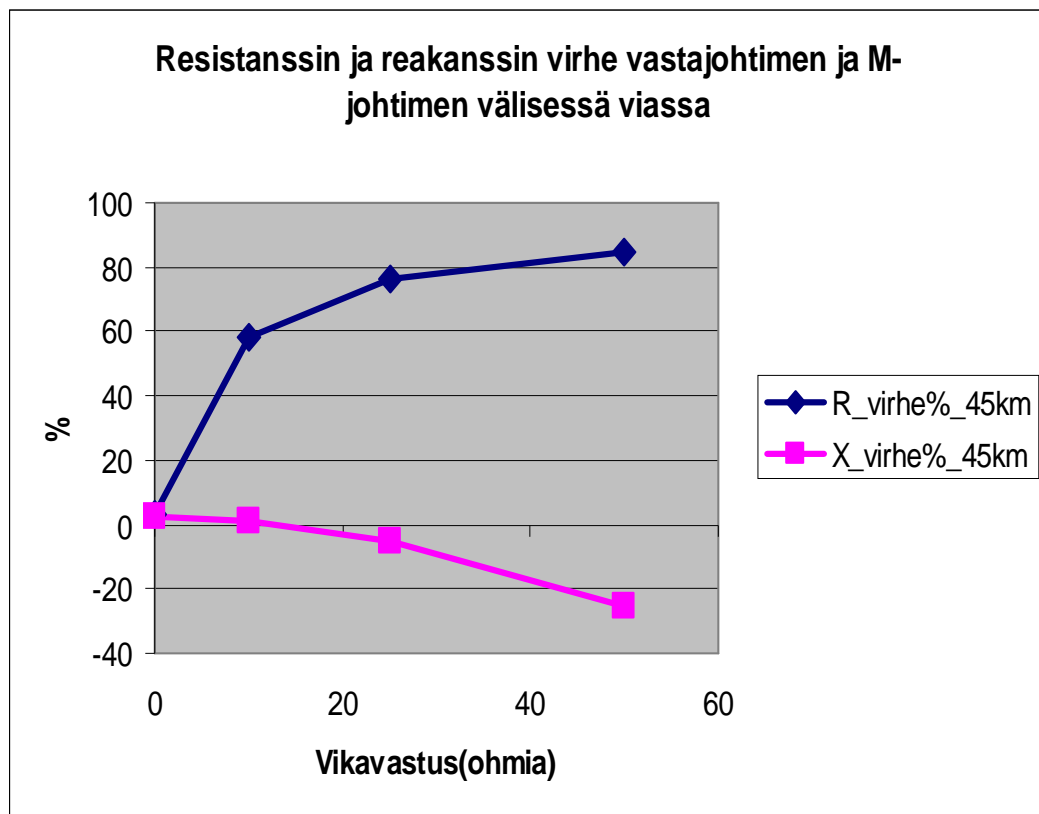
Kuva 53. Resistanssin ja reaktanssin virhe ajojohtimen ja M-johtimen välisessä viassa

Kuvan 54 kuvaajassa tarkastellaan vikaresistanssin vaikutusta resistanssin ja reaktanssin ohmimäärään. Tilanteessa vika on ajojohtimen ja M-johtimen välillä. Kuvaajasta voidaan todeta, että vikavastuksen kasvaessa resistanssin ohmimäärä kasvaa ja vastaavasti reaktanssin ohmimäärä pienenee. Tästäkin kuvaajasta voidaan havaita miten impedanssi käyttäytyy vikavastuksen arvoa kasvattamalla. Tulos on sama kuin aikaisemminkin eli mitä suurempi vikavastuksen arvo, sitä suurempi on impedanssin arvo.



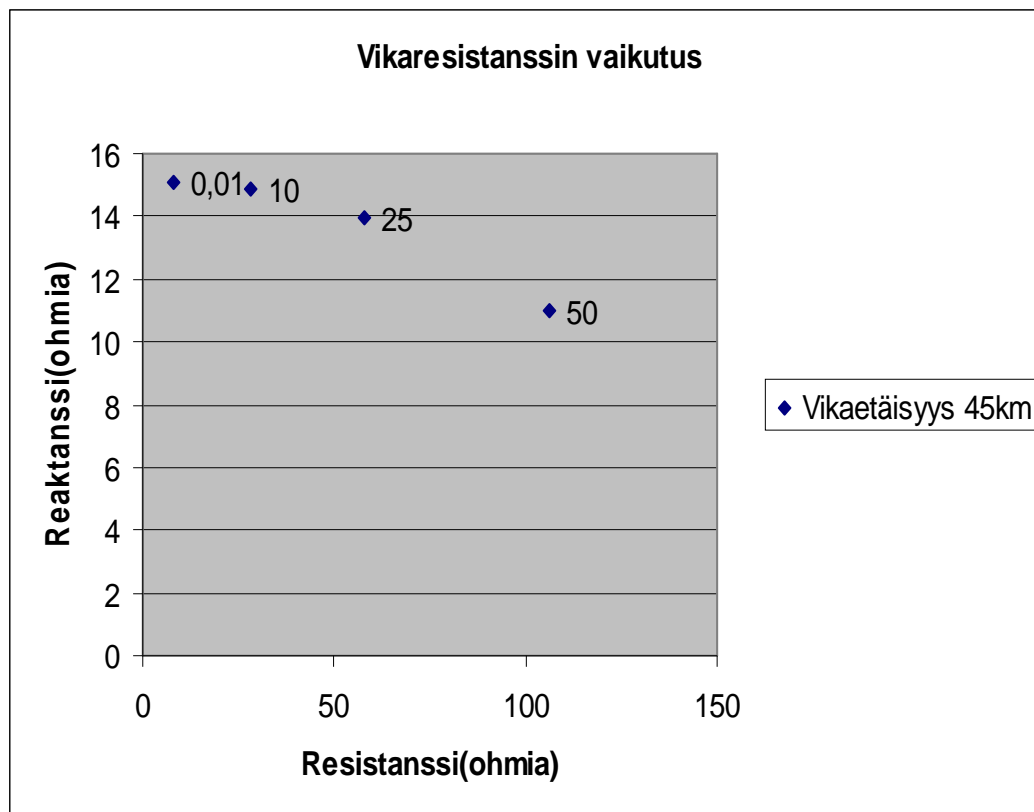
Kuva 54. Vikaresistanssin vaikutus impedanssin määrittämiseen ajojohtimen ja M-johtimen välisessä viassa

Kuvan 55 kuvaajassa tarkastellaan resistanssin ja reaktanssin virhettä vastajohtimen ja M-johtimen välisessä viassa. Vikapaikka on 45 km:ä, junaan ei ole radalla. Kuvaaja käyttäytyy samalla tavalla kuin aiemminkin. Resistanssin prosentuaalinen virhe kasvaa kun vikavastus suurenee. Reaktanssin prosentuaalinen arvo puolestaan pienenee vikavastusta kasvatettaessa. Kuvaaja käyttäytyy samanlaisesti kuin ajojohtimen ja M-johtimen välisessä viassa ja saa samanlaisia arvoja. Tämä johtuu siitä, että ajojohdin ja vastajohdin ovat pitkälti peilikuvat toisistaan.



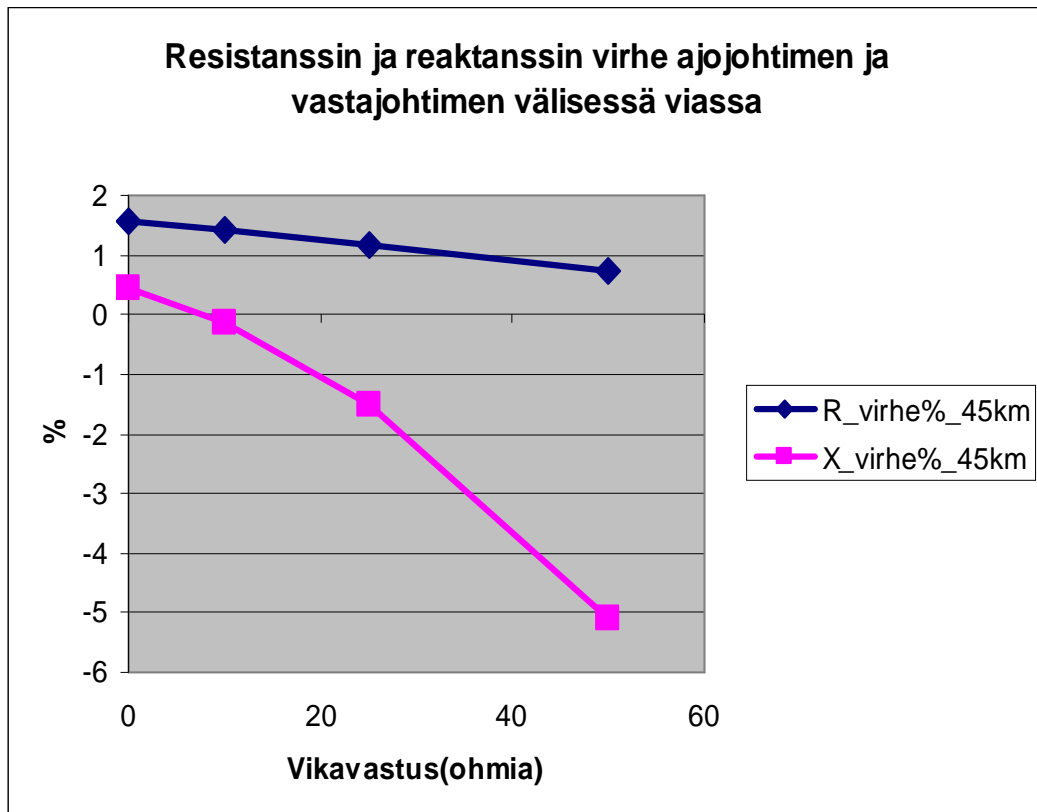
Kuva 55. Resistanssin ja reaktanssin virhe vastajohtimen ja M-johtimen välisessä viassa

Kuvan 56 kuvaajassa tarkastellaan vikaresistanssin vaikutusta resistanssin ja reaktanssin ohmimääriin vastajohtimen ja M-johtimen välisessä viassa. Kuvaaja käyttäytyy samalla tavalla kuin edellä. Vikaresistanssia kasvattamalla resistanssin arvo kasvaa ja reaktanssin arvo puolestaan pienenee. Tästäkin kuvasta on mahdollista tarkastella impedanssin käyttäytymistä vikaresistanssia muuttamalla. On selvää, että kun vikavastuksen arvo kasvaa, myös impedanssin arvo kasvaa. Suurimman arvon impedanssi saavuttaa vikavastuksen ollessa 50 ohmia.



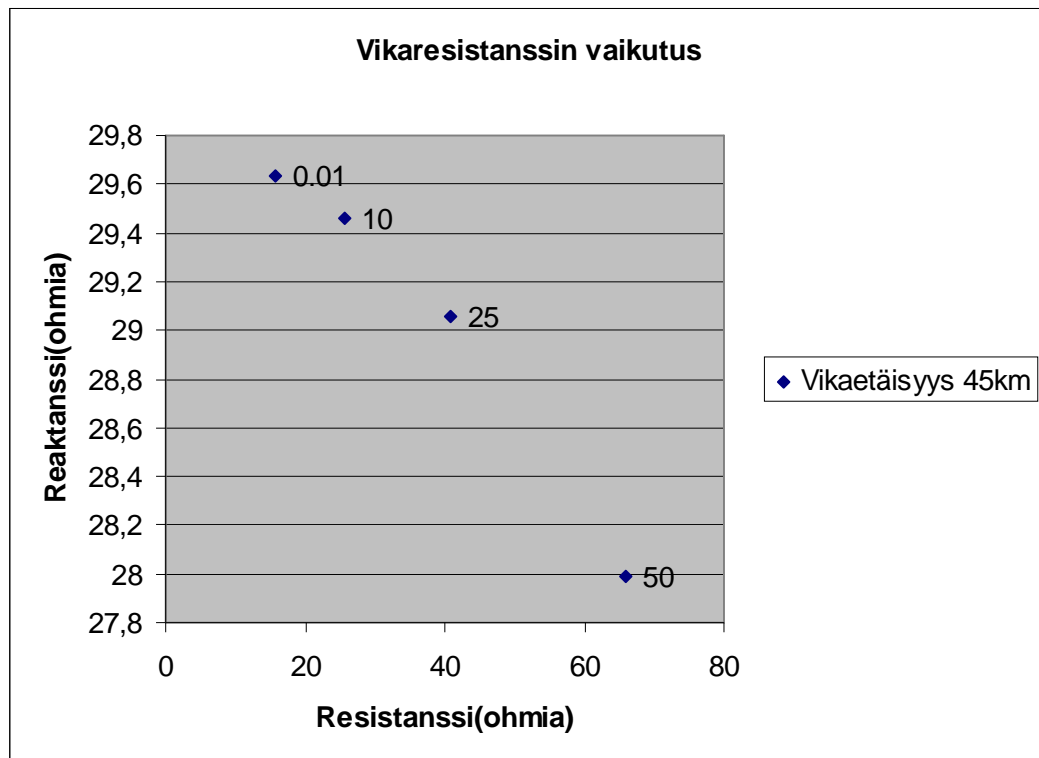
Kuva 56. Vikaresistanssin vaikutus impedanssin määrittämiseen vastajohtimen ja M-johtimen välisessä viassa

Kuvan 57 kuvaajassa tarkastellaan resistanssin ja reaktanssin virhettä ajojohtimen ja vastajohtimen välisessä viassa. Vikapaikka on 45 km:ä, junaa ei ole radalla. Kuvaajasta voidaan todeta se, että tässä tilanteessa reaktanssin ja resistanssin prosentuaalinen virhe käyttäytyy eri tavalla kuin ajojohtimen ja M-johtimen ja vastajohtimen ja M-johtimen välisessä viassa. Tässä tapauksessa sekä resistanssin että reaktanssin prosentuaaliset arvot pienenevät. Reaktanssin arvot pienenevät jyrkemmin. Resistanssin arvot pienenevät hieman hitaammin. Resistanssin prosentuaalinen arvo on pienimmillään kun vikaresistanssi on 50 ohmia. Prosentuaalinen arvo on tällöin noin 0,73 %. Reaktanssin vastaava arvo on noin -5,11 %. Kuvaajista voidaan todeta, että virhe on suurimmillaan vikavastuksen arvon ollessa 50 ohmia. Vikavastuksen arvon ollessa pienimmillään myös virheen suuruus on pienimmillään.



Kuva 57. Resistanssin ja reaktanssin virhe ajojohtimen ja vastajohtimen välisessä viassa

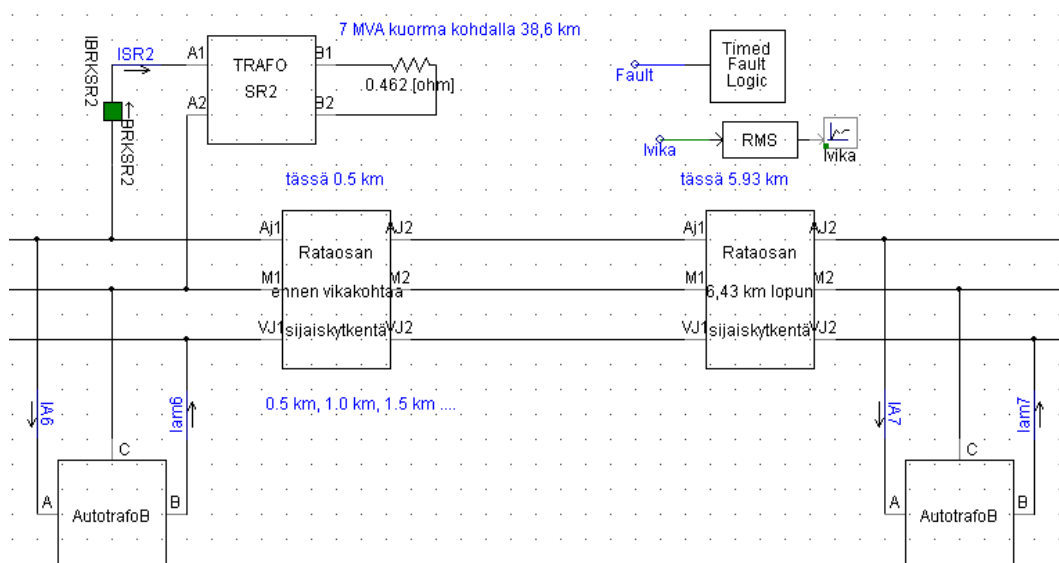
Kuvan 58 kuvaajassa on esitetty vikaresistanssin vaikutus. Tilanteessa on ajojohtimen ja vastajohtimen välinen vika. Vikaresistanssin kasvaessa reaktanssin arvo pienenee ja resistanssin arvo suurenee. Huomionarvoista on se, että reaktanssin arvo pienenee suhteessa vähemmän kuin ajojohtimen ja M-johtimen sekä vastajohtimen ja M-johtimen välisessä viassa. Tämä kuva voidaan tulkita myös siten, että sen voidaan ajatella kuvastavan impedanssin käyttäytymistä. Kun vikavastuksen arvoa kasvatetaan, myös impedanssin arvo kasvaa. Tässä tapauksessa 50 ohmin vikavastusarvo antaa suurimman impedanssin arvon.



Kuva 58. Vikaresistanssin vaikutus impedanssin määrittämiseen ajojohtimen ja vastajohtimen välisessä viassa

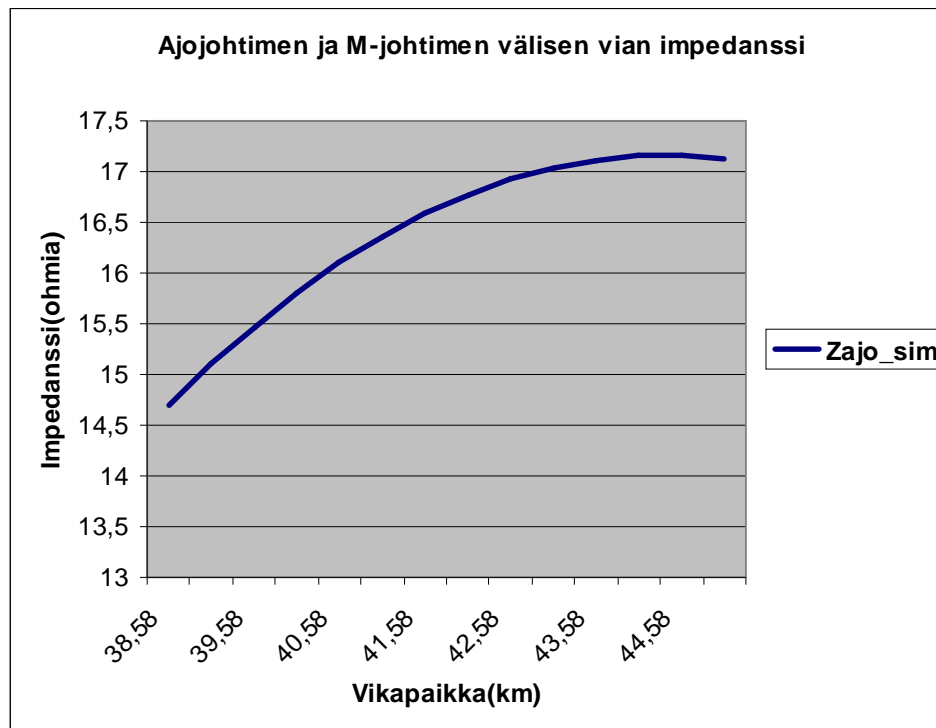
6.3.5 Impedanssin tarkastelu kahden automuuntajan väliltä

Aiemmissa kuvaajissa on erilaisia tarkasteluja tehty vikapaikkojen sijaitessa noin 6,43 km:n etäisyydellä toisistaan. Nyt otetaan uusi tilanne käsiteltäväksi. Sijoitetaan vikapaikka kahden automuuntajan väliin. Vikapaikka sijaitsee radan lopussa. Vikapaikka on sijoitettu 38,58 - 45,08 km:n väliselle alueelle. Vikapaikkojen etäisyys on puoli kilometriä. Vikavastus on noin nolla. Junaa ei ole radalla, eli rata on kuormittamaton. Mittauksia tulee yhteensä 14. Sijoitettaessa vikapaikat näin tiiviistä saadaan aikaan kaareva käyrä. Aiemmin vikapaikan ollessa 6,43 km:n välein saatiin impedanssin kuvaajaksi lineaarinen kuvaaja. Nyt tilanne on toinen, sillä vikapaikkojen sijoittaminen näin tiiviisti kahden automuuntajan välille antaa kuvaajalle toisenlaisen muodon. Impedanssin arvo kasvaa edelleen, mutta lineaarisuus on häipynyt. Näin ollen voidaan todeta se, että tutkittaessa impedanssin arvoa vikapaikkojen ollessa hyvin lähellä toisiaan saadaan aikaan tarkempia mittauksia. Jos kuvaajan pienimmän arvon ja suurimman arvon välille vedettäisiin lineaarinen suora, se olisi kutakuinkin sama kuin se arvo, joka saadaan vikapaikkojen ollessa noin 6,43 km:n etäisyydellä toisistaan. Siitä voidaan päätellä miten selvä muutos on kun vikapaikat ovat hyvin lähekkäin toisiaan. Kuvassa 59 on esitettyä periaatekuva laskentamallista.



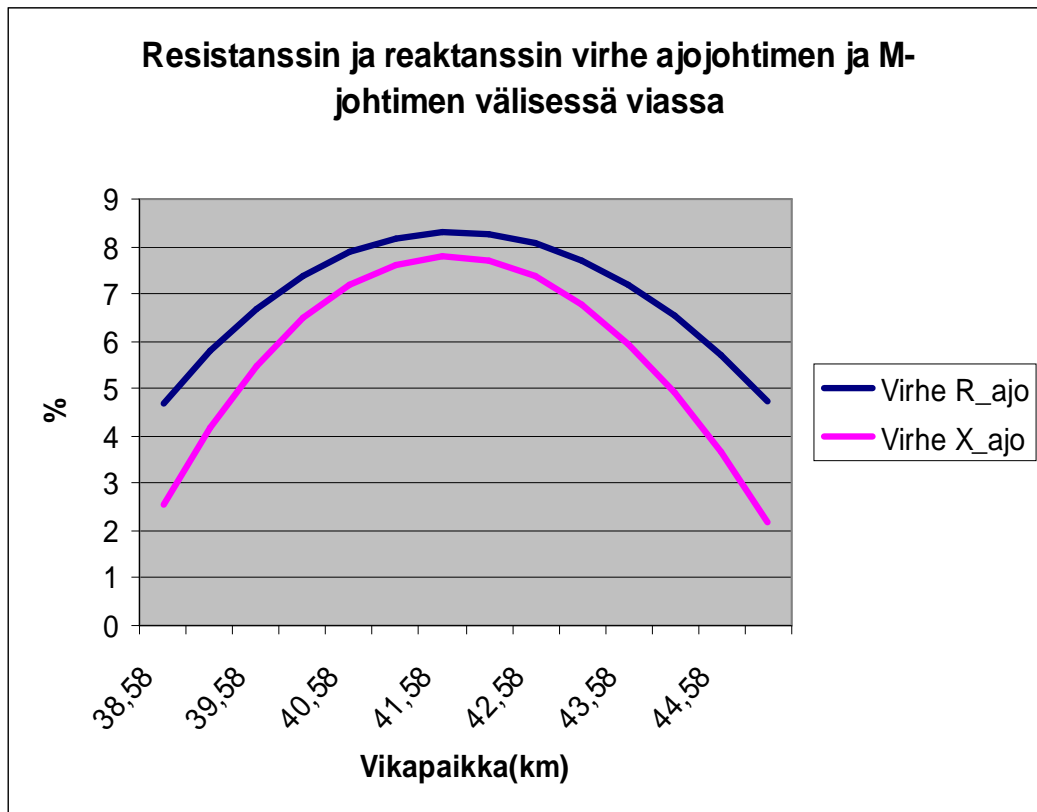
Kuva 59. Periaatekuva laskentamallista

Kuvassa 60 on esitettyä ajojohtimen ja M-johtimen välisen vian impedanssin kuvaaja.



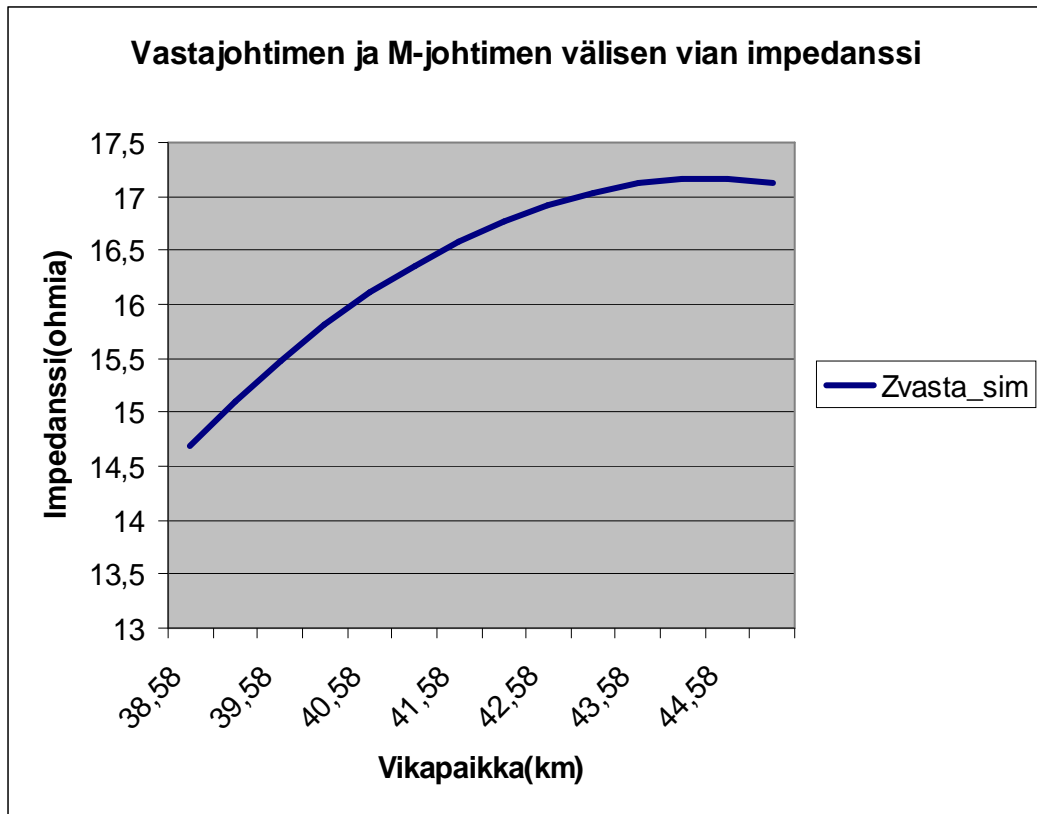
Kuva 60. Ajojohtimen ja M-johtimen välisen vian impedanssi

Kuvan 61 kuvaajassa on esitetty resistanssi ja reaktanssin virhe ajojohtimen ja M-johtimen välisessä viassa. Juna ei ole tilanteessa radalla. Tämä mittausta on tehty kahden automuuntajan väliltä. Vikapaikkojen etäisyys toisistaan on puoli kilometriä. Kuvaajasta voidaan todeta, että reaktanssin ja resistanssin virhe muodostaa alas aukeavan paraabelin. Resistanssi ja reaktanssi saavat suurimmat arvonsa vikapaikan sijaitessa kutakuinkin automuuntajien keskellä. Pienimmät arvonsa ne saavat aivan automuuntajien vieressä. Resistanssin paraabeli on huomattavasti loivempi kuin reaktanssin vastaava.



Kuva 61. Resistanssin ja reaktanssin virhe kun vikapaikka on kahden automuuntajan välissä

Kuvan 62 kuvaajassa tarkastellaan vastajohtimen ja M-johtimen välisen vian impedanssia kahden automuuntajan välillä. Vikapaikka on puolen kilometrin välein. Vikakohta sijaitsee radan lopussa. Kuvaajasta voidaan todeta, että se käyttäytyy samanlaisesti kuin ajojohtimen ja M-johtimen välisessä viassa. Arvot ovat kutakuinkin samat. Tämä selittyy sillä, että ajojohdin ja vastajohdin ovat käytännössä peilikuvat toisistaan. Tässäkin tapauksessa tuloksena on kaareva käyrä. Tässäkin tapauksessa voidaan todeta, että tehtäessä mittauksia vikapaikkojen sijaitessa hyvin lähekkäin, saadaan kuvaajaan tuotua selvästi jotain uutta. Näin ollen kuvaaja ei ole pelkkä suora viiva, vaan siinä selvästi tapahtuu vaihtelua.



Kuva 62. Vastajohtimen ja M-johtimen välisen vian impedanssi

Kuvan 63 kuvaajassa on eräästä tutkimuksesta otettu kuvaaja, josta käy hyvin ilmi kuinka impedanssi käyttäytyy pitemmällä vikavälillä. Kuvaaja muodostaa samanlaista aaltoilevaa käyrää kuin tässäkin työssä on kuvaajissa ollut. Vikaväli on pitempi, jonka seurauksena käyriä syntyy monta peräkkäistä. Kuvaajasta voidaan kuitenkin todeta se, että edellä esitetyt impedanssikuvaajat on tehty oikein, sillä niiden synnyttämä kuvio on samanlaista aaltoilevaa käyrää kuin kuvan 63 kuvaajassa.

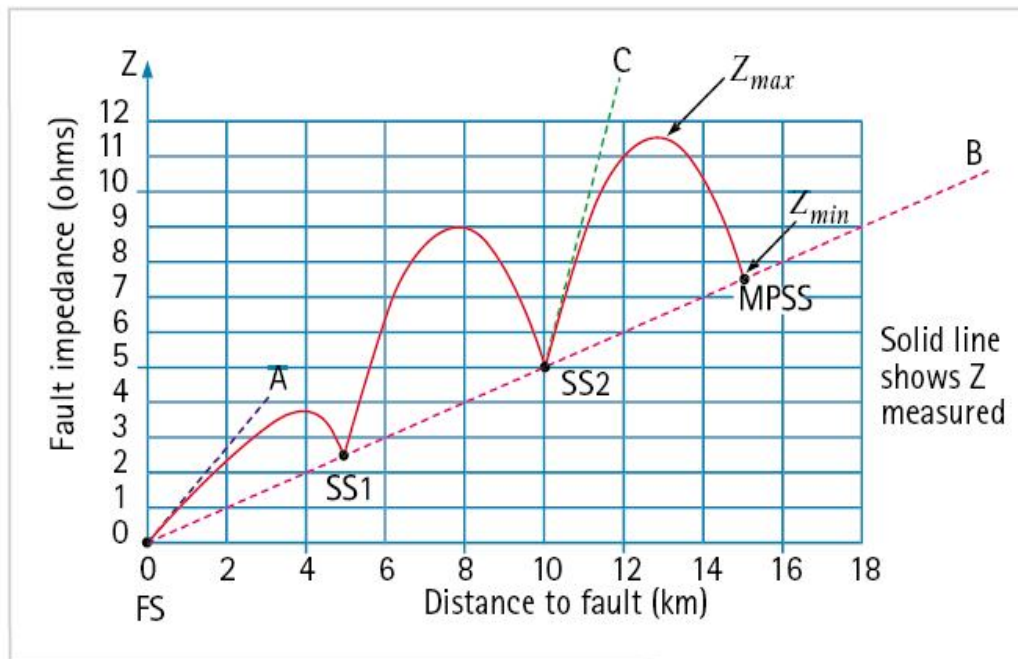
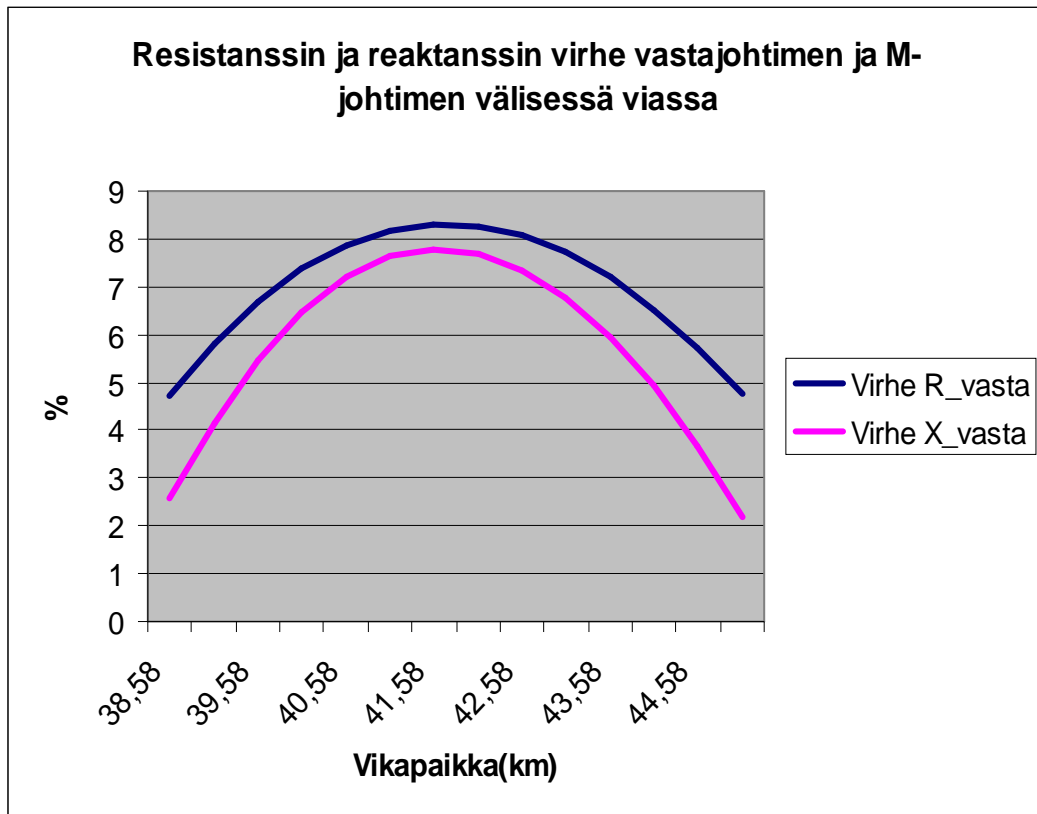


Figure 20.16: Variation of impedance measurement with fault location along track

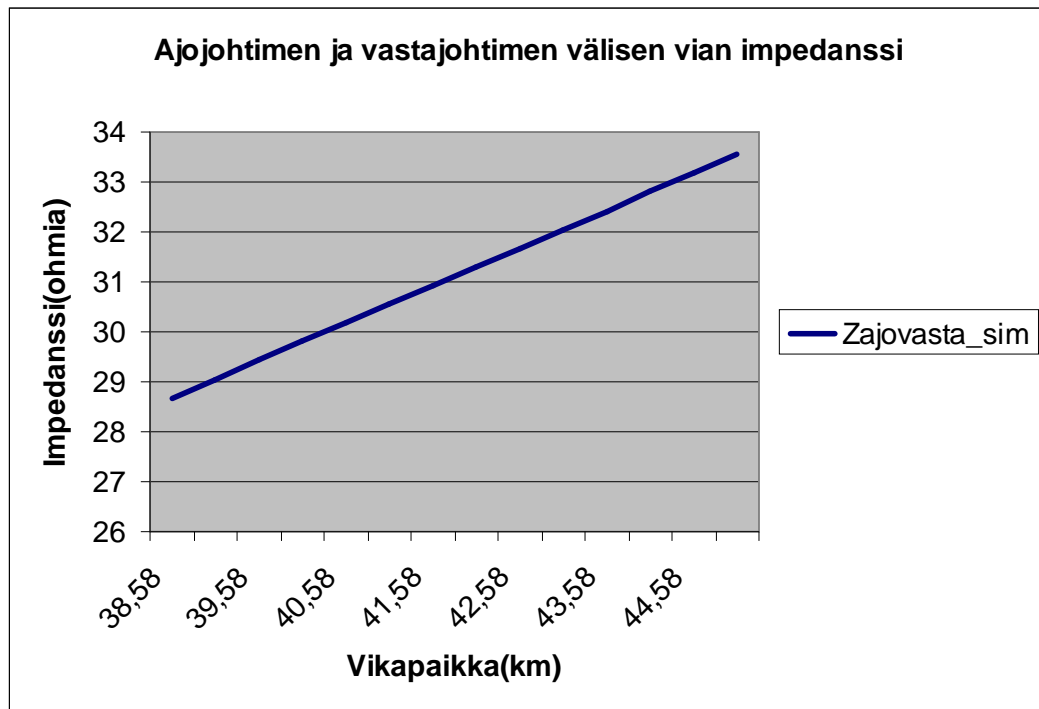
Kuva 63. Impedanssin käyttäytyminen vikaetäisyyden funktiona /18/

Kuvan 64 kuvaajassa tarkastellaan reaktanssin ja resistanssin virhettä ajojohtimen ja vastajohtimen välisessä viassa. Kuten ajojohtimen ja M-johtimen välisessä viassa, myös tässä tapauksessa kuvaaja muistuttaa alaspäin avautuvaa paraabelia. Sekä resistanssi että reaktanssi saavat suurimmat arvonsa kutakuinkin kahden automuuntajan välissä. Pienimmät arvonsa ne saavat vikapaikan sijaitessa automuuntajien läheisyydessä. Resistanssin paraabeli on huomattavasti loivempi kuin reaktanssin vastaava.



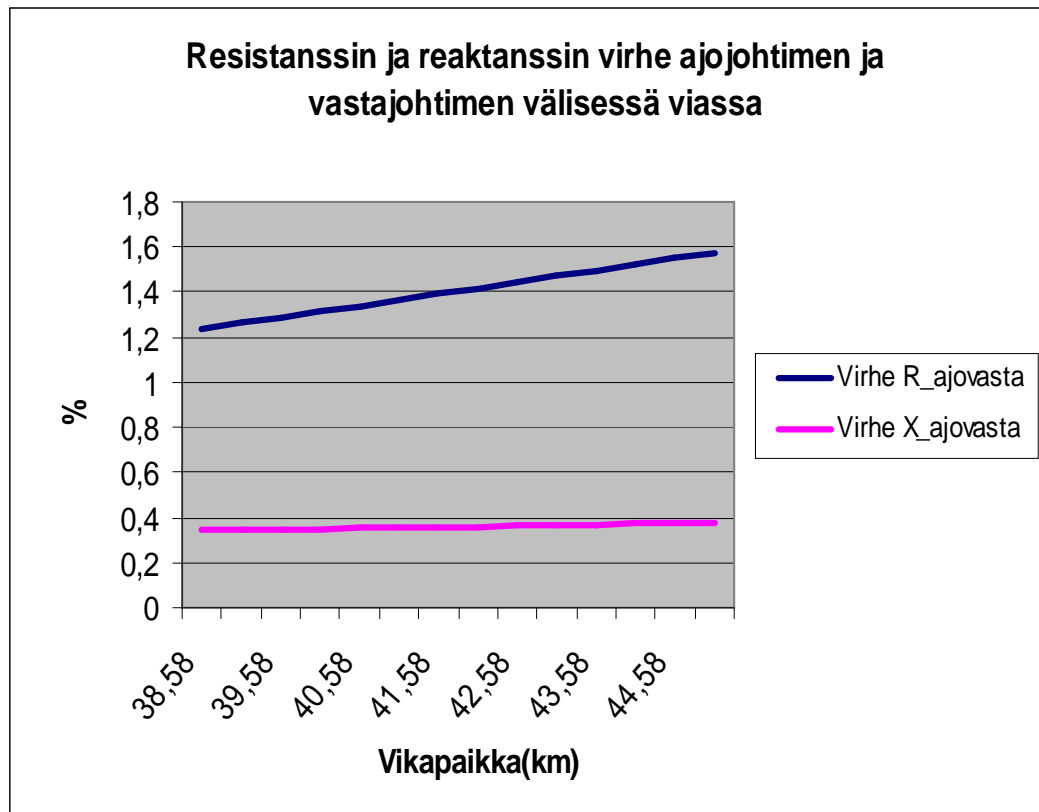
Kuva 64. Resistanssin ja reaktanssin virhe kun vikapaikka on kahden automuuntajan välissä

Kuvan 65 kuvaajassa on esitettyä ajojohtimen ja vastajohtimen välisen vian impedanssi. Tulokset tähän kuvaajaan on saatu kahden automuuntajan välisestä mittauksesta. Vikapaikat on sijoitettu puolen kilometrin välein. Kuvaajasta voidaan sanoa, että se poikkeaa aikaisemmista kuvaajista täysin. Siitä tulee samanlainen lineaarinen suora kuin tilanteessa, jossa vikapaikka on asetettu 6,43 km:n välein. Näin ollen voidaan todeta se, että tämä tarkastelu ei sovellu ajojohtimen ja vastajohtimen välillä, sillä impedanssin arvo kasvaa niin voimakkaasti, ettei se aiheuta samanlaista kohoavaa kuvaajaa kuin edelliset kuvaajat.



Kuva 65. Ajojohtimen ja vastajohtimen välisen vian impedanssi

Kuvan 66 kuvaajassa on esitetty resistanssin ja reaktanssin virhe ajojohtimen ja vastajohtimen välisessä viassa. Kuvaajasta voidaan todeta, että resistanssin virhe kasvaa lineaarisesti. Reaktanssin virhe puolestaan on lähes suora viiva. Verrattaessa ajojohtimen ja M-johtimen sekä vastajohtimen ja M-johtimen väliseen vikaan, tilanne on täysin erilainen. Jos aiemmin muodostui paraabelia muistuttava kuvia, tämä ei ole lähelläkään sitä. Tässä tapauksessa virhe jää pieneksi eikä se ole riippuvainen vikapaikan sijainnista. Näin ollen tilanne tässä kuvaajassa on hyvä.



Kuva 66. Resistanssin ja reaktanssin virhe kun vikapaikka on kahden automuuntajan välissä

Tähän kappaleeseen liittyviä mittaustuloksia on esitettyä liite-osiossa.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyössäni Sähköradan suojaus impedanssimittauksella selvitetään vikatilanteen vaikutuksia sähkörataan. Työn tavoitteena oli selvittää miten erilaiset vikatilanteet vaikuttivat sähköradan toimintaan. Työn alkuosassa on selvitetty sähköradan rakennetta, toimintaa sekä erilaisten sähköjärjestelmien yleisyyttä Euroopassa. Suomessa käytössä olevien järjestelmien, 2x25 kV:a ja 1x25 kV:a toimintaperiaate on selvitetty työssä. Tässä työssä kuitenkin on painotettu 2x25 kV:n järjestelmää ja kaikki simuloinnit ja saadut tulokset ovat tehty kyseisestä järjestelmästä.

Työssä tutkitaan oikosulun vaikutuksia impedanssiin, impedanssin kulmaan, resistanssiin, reaktanssiin sekä virran suuruuteen. Vikatilanteita on kolme: ajojohtimen ja M-johtimen välinen vika, vastajohtimen ja M-johtimen välinen vika sekä ajojohtimen ja vastajohtimen välinen vika. Lisäksi vikapaikkoja on 7 erilaista. Tämän lisäksi laskelmissa on junan sijainnille kolme erilaista sijaintia. Näin ollen variaatioita tulee kaiken kaikkiaan 63. Kyseisistä tapauksista on tässä työssä Excel-taulukoita. Kyseiset tulokset eivät kuitenkaan anna kovin selkeää kuvaa siitä, miten eri tilanteissa eri parametrit käyttäytyvät, sillä parametrien arvot ovat lähes samat joka tilanteessa. Tästä johtuen tässä työssä on myös laskettu prosentuaalinen virhe tärkeimmille arvoille, kuten resistanssille ja reaktanssille. Tätä työtä tehdessä on tullut esiin monenlaisia tuloksia ja niistä nyt seuraavassa yhteenvetoa.

Vikatilanteessa virran arvo pienenee lineaarisesti siirryttäessä rataosuuden loppua kohden. Tämä tapahtuu jokaisella vikatilanteella ja on riippumaton junan sijainnista. Resistanssin ja reaktanssin arvot sitä vastoin kasvavat lineaarisesti vikakohdan siirtyessä rataosuuden loppua kohti. Myös tässä tapauksessa tilanne on riippumaton junan sijainnista.

Vikavastuksen ollessa noin nolla, sekä resistanssin että reaktanssin prosentuaalisen virheen suuruus pienenee ajojohtimen ja M-johtimen sekä

vastajohtimen ja M-johtimen välisissä vioissa vikakohtaan siirtyessä kohti radan loppua. Ajojohtimen ja vastajohtimen välisessä viassa sekä reaktanssin että resistanssin virheprosentti sen sijaan kasvaa. Ajojohtimen ja M-johtimen sekä vastajohtimen ja M-johtimen välisessä viassa on radan lopussa suojauksen kannalta paras tilanne. Ajojohtimen ja vastajohtimen välisessä viassa sen sijaan paras tilanne on rataosuuden alussa.

Tarkasteltaessa virheen suuruutta muuttamalla vikavastusta on tilanne toinen. Ajojohtimen ja M-johtimen sekä vastajohtimen ja M-johtimen välinen vika aiheuttaa 19 km:n kohdalla huonoimman tilanteen, sillä 50 ohmin vikavastuksella virhe on noin -50 %. Radan lopussa samat vikatilanteet saavat paremmat arvot, jolloin virheen suuruus on enää noin -25 %. Suojauksen kannalta paras tilanne on jossa ajojohtimen ja vastajohtimen välille tulee vika. Vian ollessa 19 km:n kohdalla virheen suuruus on 50 ohmilla vain noin -8 % ja radan lopussa ainoastaan noin -5 %. Ajojohtimen ja vastajohtimen vika on siis suojauksen kannalta ajateltuna selvästi helpoin tilanne. Mainittakoon, että ajojohtimen ja vastajohtimen välisen vian resistanssin laskemiseen on käytetty tarkkana arvona radan resistanssi + vikaresistanssi kuten muissakin vikatyypeissä. Kuitenkin ajojohtimen ja vastajohtimen laskenta toimii tarkimmin, jolloin resistanssin virhe jää yllättävän pieneksi.

Tutkittaessa vikakohtaa, joka sijaitsee kahden automuuntajan välissä, saadaan aikaan tarkempia tuloksia. Impedanssin käyrämuoto muuttuu lineaarisesta kaarevaksi. Ajojohtimen ja M-johtimen sekä vastajohtimen ja M-johtimen välisissä vioissa resistanssin ja reaktanssin prosentuaalisen virheen kuvaaja muuttuu paraabeliksi. Tällöin resistanssi ja reaktanssi saavat suurimmat arvonsa vikakohtaan ollessa kutakuinkin automuuntajien keskellä. Resistanssin ja reaktanssin arvot käyttäytyvät hyvin poikkeavasti ja ovat riippuvaisia pitkälti vikapaikan sijainnista. Tämä on suojauksen kannalta huono asia, sillä vaihtelua on niin paljon. Sen sijaan tarkasteltaessa ajojohtimen ja vastajohtimen välistä vikatilannetta voidaan havaita, että prosentuaalisen virheen kuvaaja käyttäytyy paljon tasaisemmin. Näin ollen ajojohtimen ja vastajohtimen välisessä viassa

suojauksen asetteleminen on helpompaa, sillä prosentuaalinen virhe on tasainen koko ajan.

LÄHDELUETTELO

[1] ABB [viitattu 11.1.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL:
<http://fi.wikipedia.org/wiki/ABB>

[2] ABB lyhyesti [viitattu 11.1.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL:
<http://www.abb.fi/cawp/fiabb251/5b3b47abc1e9e75dc2256b20003f96db.aspx>

[3] ABB lyhyesti [viitattu 11.1.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL:
<http://www.abb.fi/cawp/fiabb251/657DFDCF6E344CC7C1256B20003149AE.aspx>
x

[4] ABB lyhyesti [viitattu 11.1.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL:
<http://www.abb.fi/cawp/fiabb251/1045e15945432a49c2256b36004b149a.aspx#S%C3%A4hk%C3%B6jakeluautomaatio>

[5] ABB lyhyesti [viitattu 11.1.2010]. Saatavilla www-muodossa: <URL:
<http://www.abb.fi/cawp/fiabb251/b23b1eb7a45bc7b3c2256b200045bd29.aspx>

[13] ABB REO 517 [viitattu 11.9.2009]. Saatavilla www-muodossa: <URL:
<http://www.abb.fi/product/db0003db004281/c12573e700330419c1256b960046a6d9.aspx>

[16] Application manual REO 517 [viitattu 25.11.2009]. Saatavilla www-muodossa:<URL:
[http://library.abb.com/global/scot/scot296.nsf/veritydisplay/c1256d32004634bac1256e2f0077bb5c/\\$File/1MRK506132-UEN_-_en_Multi-function_terminal_for_railway_application_REO_517__2.4.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot296.nsf/veritydisplay/c1256d32004634bac1256e2f0077bb5c/$File/1MRK506132-UEN_-_en_Multi-function_terminal_for_railway_application_REO_517__2.4.pdf)

[15] Areva MiCOM P436/438 technical data sheet [viitattu 27.11.2009]. Saatavilla
www-muodossa: <URL:

[http://www.aveva-](http://www.aveva-td.com/solutions/liblocal/docs/P436_P438_TechnicalDataSheet_EN_07_06_a.pdf)

[td.com/solutions/liblocal/docs/P436_P438_TechnicalDataSheet_EN_07_06_a.pdf](http://www.aveva-td.com/solutions/liblocal/docs/P436_P438_TechnicalDataSheet_EN_07_06_a.pdf)

[19] Areva MiCOM P436 technical manual [viitattu 27.11.2009]. Saatavilla www-
muodossa: <URL:

http://www.aveva-td.com/solutions/liblocal/docs/P436_EN_M_A42.pdf

[20] Areva MiCOM P438 technical manual [viitattu 27.11.2009]. Saatavilla www-
muodossa: <URL:

http://www.aveva-td.com/solutions/liblocal/docs/P438_EN_M_A41.pdf

[17] Installation and comissioning manual REO 517 [viitattu 25.11.2009].
Saatavillawww-muodossa:<URL:

[http://library.abb.com/global/scot/scot296.nsf/veritydisplay/c1256d32004634bac1256e2f0077bc37/\\$File/1MRK506133-UEN_-_en_Multi-function_terminal_for_railway_application_REO_517__2.4.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot296.nsf/veritydisplay/c1256d32004634bac1256e2f0077bc37/$File/1MRK506133-UEN_-_en_Multi-function_terminal_for_railway_application_REO_517__2.4.pdf)

[9] List of current systems for electric rail traction [viitattu 11.9.2009]. Saatavilla
www-muodossa:<URL:

http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_current_systems_for_electric_rail_traction#15_kV_AC.2C_162.E2.81.843_Hz_overhead

[12] Mäkinen Olavi: Relesuojaus [viitattu 25.11.2009] Luentomateriaali

[18] Protection of AC electrified railways [viitattu 27.11.2009]. Saatavilla www-
muodossa: <URL:

http://files.engineering.com/download.aspx?folder=924eca57-db47-4bfe-95be-b9737271f272&file=20-Protection_of_AC_elec_rail.pdf

[8] Railway electrification system [viitattu 11.9.2009]. Saatavilla www-muodossa:
<URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Railway_electrification_system

[10] Ratatekniset määräykset ja ohjeet [viitattu 25.8.2009]. Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://rhk-fi-bin.directo.fi/@Bin/93805664e69badb9cab009f3cd785cb/1250586337/application/pdf/1704849/RAMO%205%20S%C3%A4hk%C3%B6istetty%20rata.pdf>

[7] Suomen rautateiden sähköistysjärjestelmä [viitattu 25.8.2009]. Saatavilla www-muodossa:<URL:
http://fi.wikipedia.org/wiki/Suomen_rautateiden_s%C3%A4hk%C3%B6istysj%C3%A4rjestelm%C3%A4

[6] Sähköratamääräykset [viitattu 25.8.2009]. Saatavilla www-muodossa: <URL:
<http://rhk-fi-bin.directo.fi/@Bin/bd9b9f447715f2100fbc6b6be097bb5c/1249883568/application/pdf/32551/Rhk-b16.pdf>

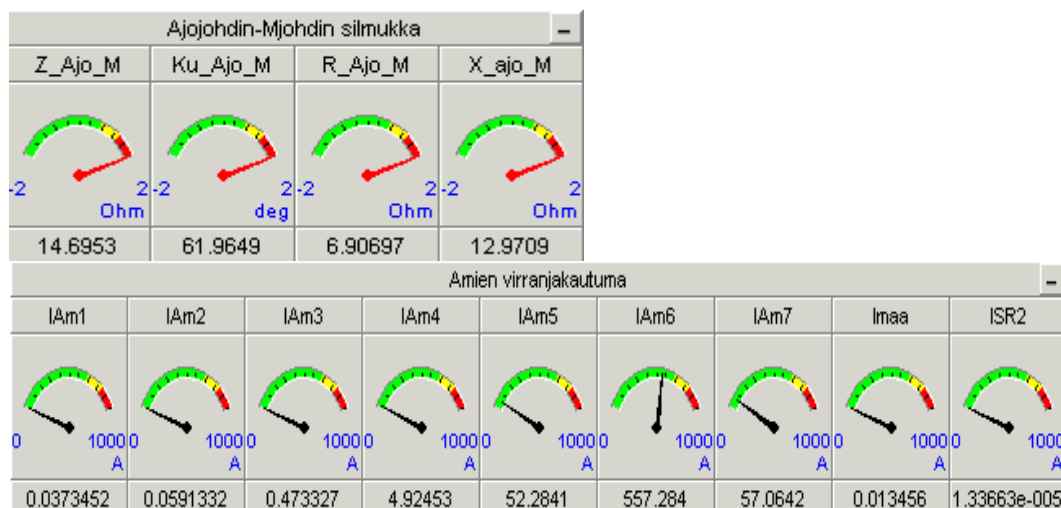
[14] Technical reference manual REO 517 [viitattu 25.11.2009]. Saatavilla www-muodossa: <URL:
[http://library.abb.com/global/scot/scot296.nsf/veritydisplay/c1256d32004634bac1256e2f0077b936/\\$File/1MRK506131-UEN_-_en_Multi-function_terminal_for_railway_application_REO_517__2.4.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot296.nsf/veritydisplay/c1256d32004634bac1256e2f0077b936/$File/1MRK506131-UEN_-_en_Multi-function_terminal_for_railway_application_REO_517__2.4.pdf)

[11] Varju-comparison-booster-transformer pdf [viitattu 24.9.2009]. Saatavilla www-muodossa:<URL:
<http://www.yorkemc.co.uk/conferences/emcYork2004/papers/varju-comparison-booster-transformer.pdf>

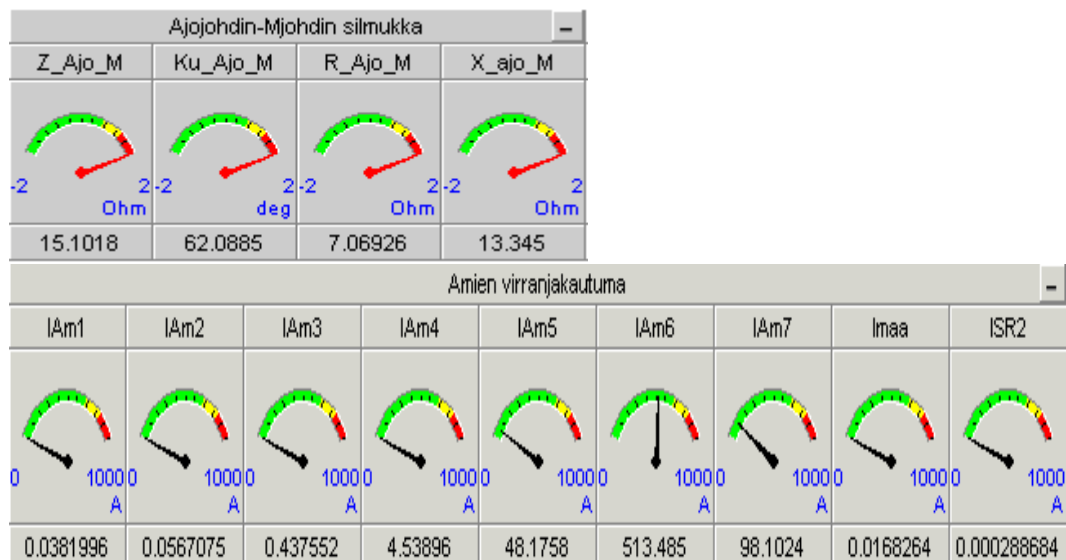
LIITE

MITTAUKSET KAHDEN AUTOMUUNTAJAN VÄLISTÄ

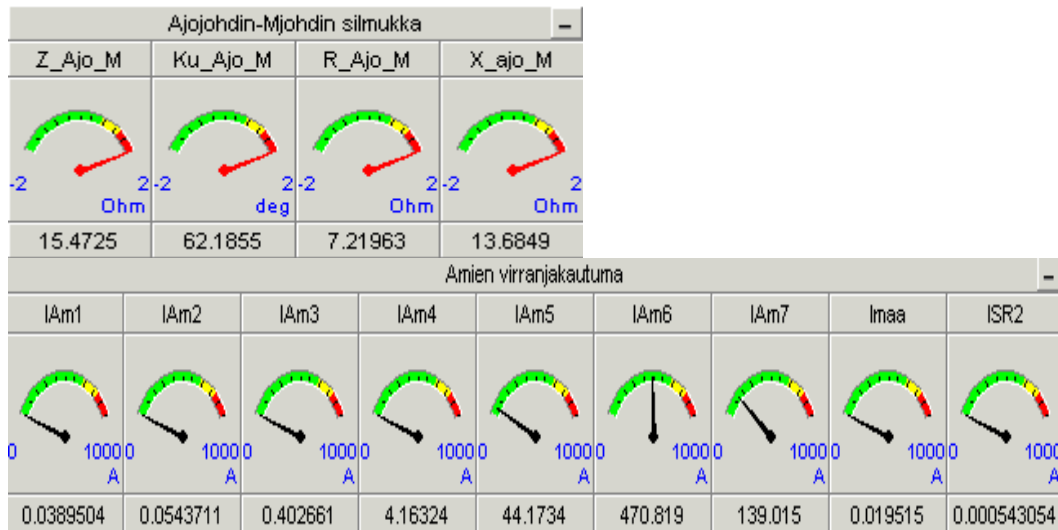
Ajojohtimen ja M-johtimen välinen vika



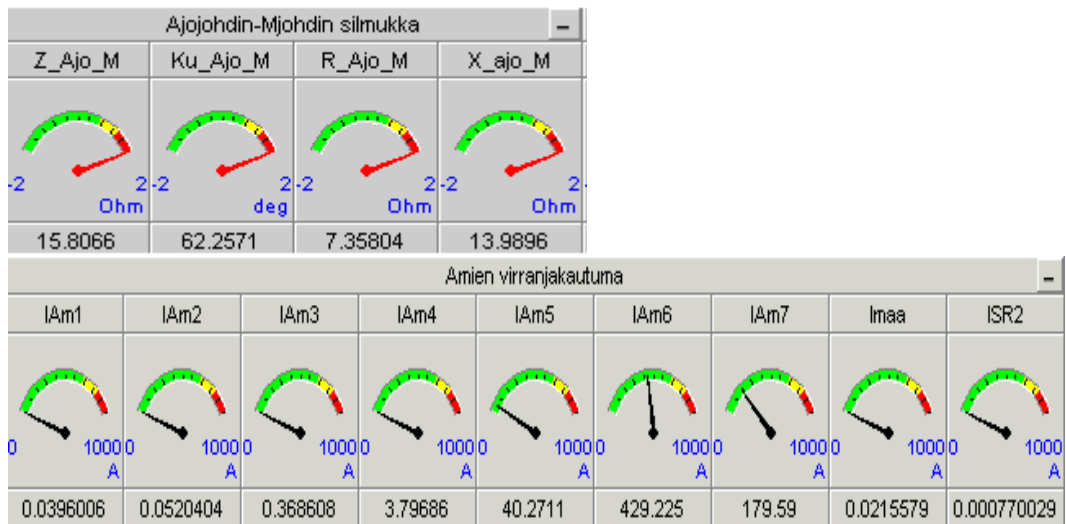
Vikapaikka 38,58 km:ä



Vikapaikka 39,08 km:ä



Vikapaikka 39,58 km:ä



Vikapaikka 40,08 km:ä

Ajojohdin-Mjohdin silmukka			
Z_Ajo_M	Ku_Ajo_M	R_Ajo_M	X_ajo_M
16.104	62.3056	7.48443	14.2591

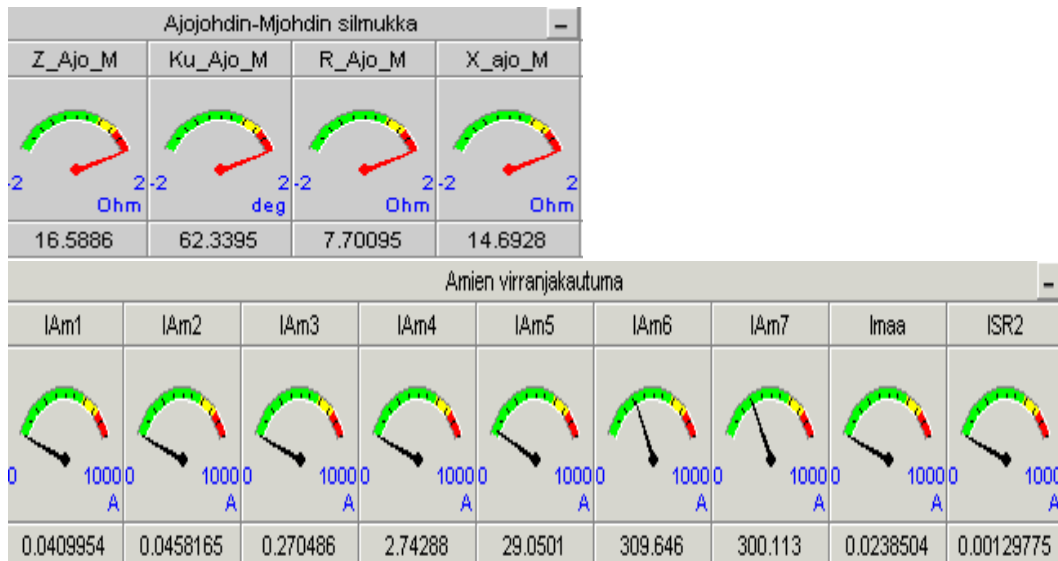
Amien virranjakautuma								
I _{Am1}	I _{Am2}	I _{Am3}	I _{Am4}	I _{Am5}	I _{Am6}	I _{Am7}	I _{maa}	ISR2
0.040154	0.0498752	0.335291	3.4387	36.4572	388.576	220.045	0.0229505	0.000970808

Vikapaikka 40,58 km:ä

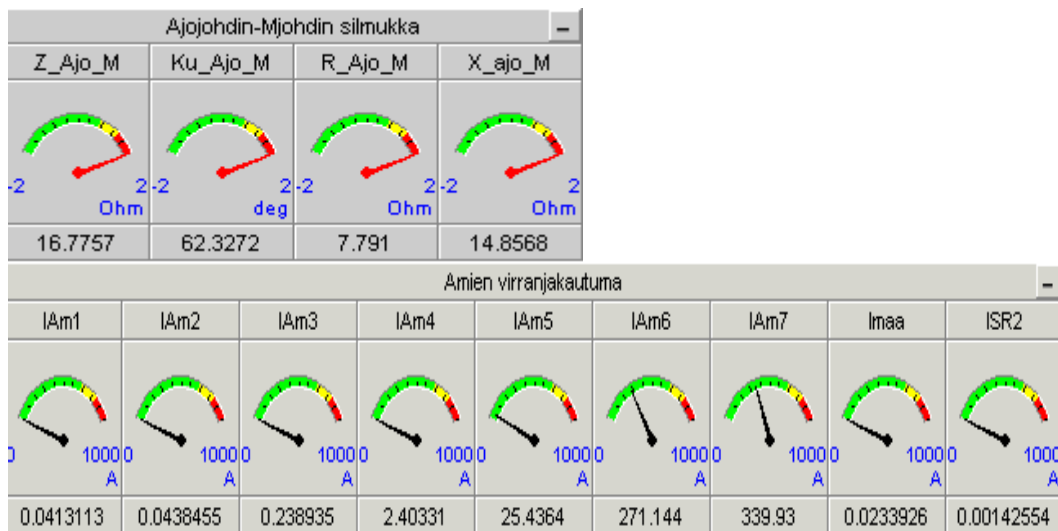
Ajojohdin-Mjohdin silmukka			
Z_Ajo_M	Ku_Ajo_M	R_Ajo_M	X_ajo_M
16.3647	62.3326	7.59875	14.4935

Amien virranjakautuma								
I _{Am1}	I _{Am2}	I _{Am3}	I _{Am4}	I _{Am5}	I _{Am6}	I _{Am7}	I _{maa}	ISR2
0.0406143	0.0478371	0.302612	3.0877	32.7204	348.754	260.186	0.0237096	0.00114642

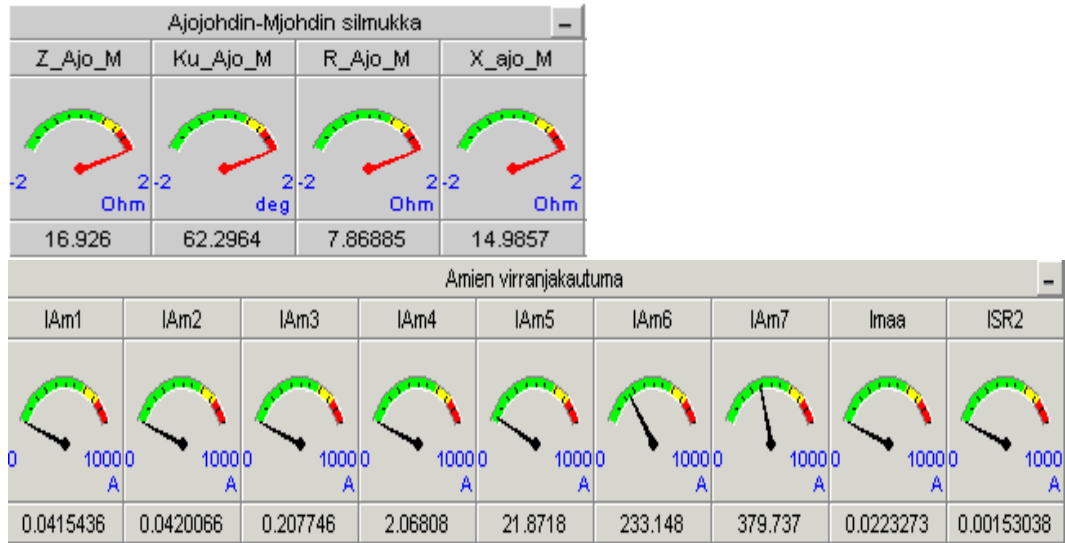
Vikapaikka 41,08 km:ä



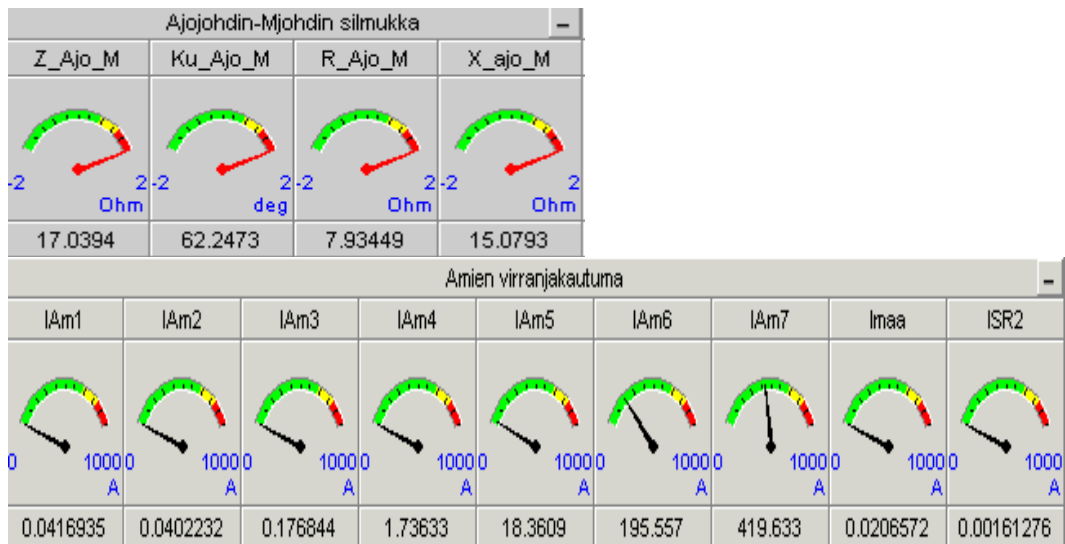
Vikapaikka 41,58 km:ä



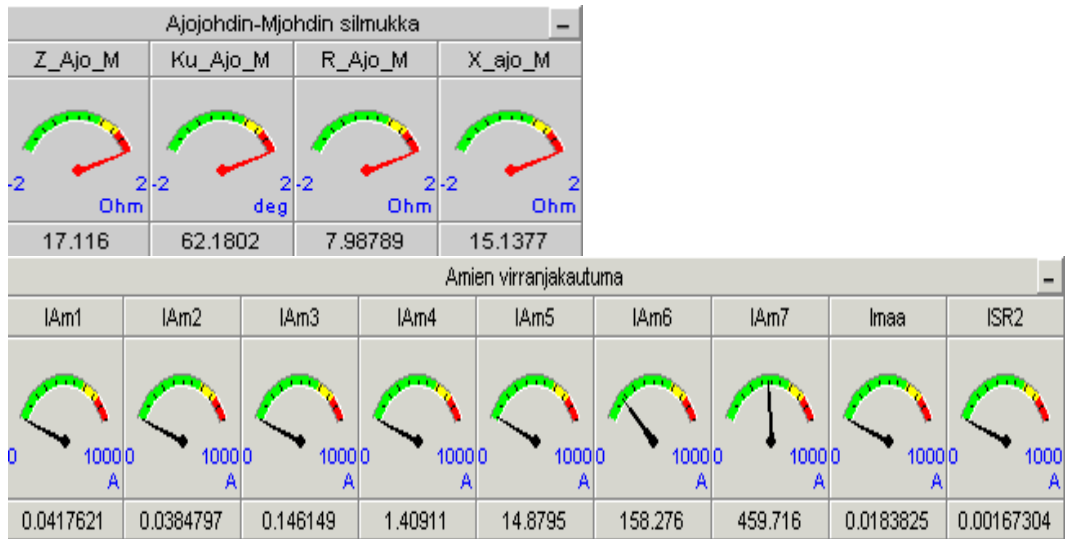
Vikapaikka 42,08 km:ä



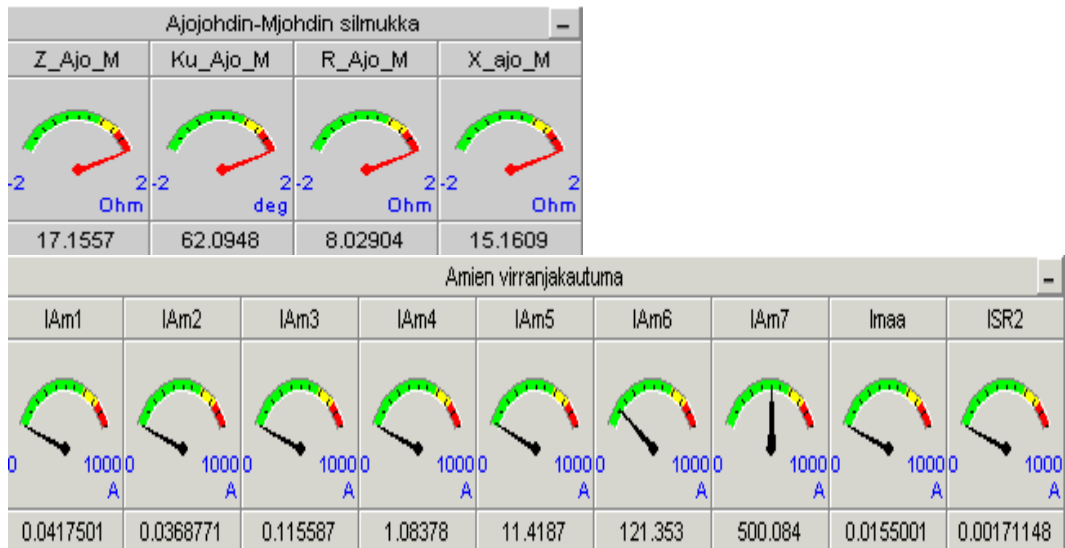
Vikakohta 42,58 km:ä



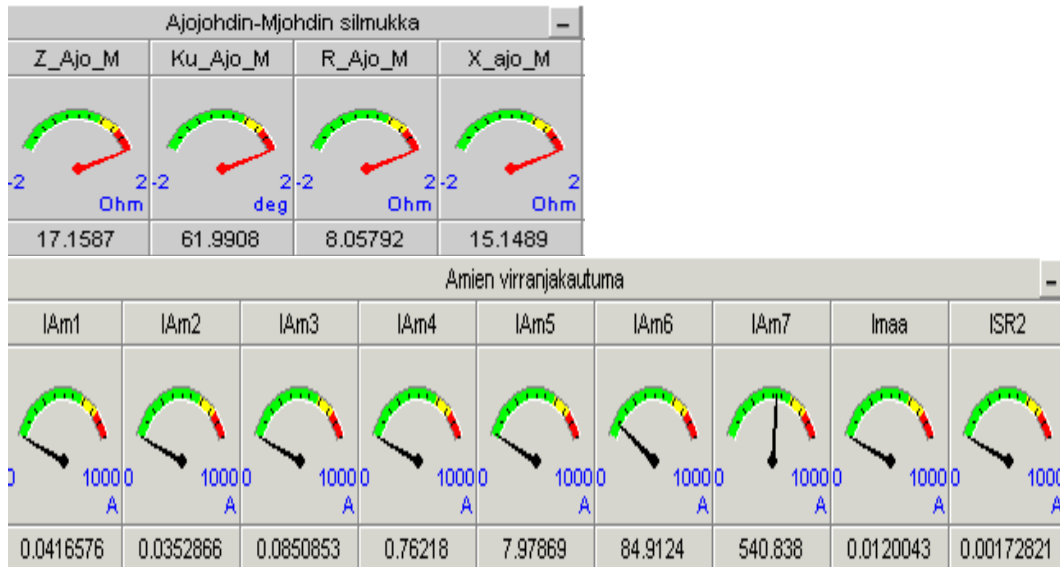
Vikapaikka 43,08 km:ä



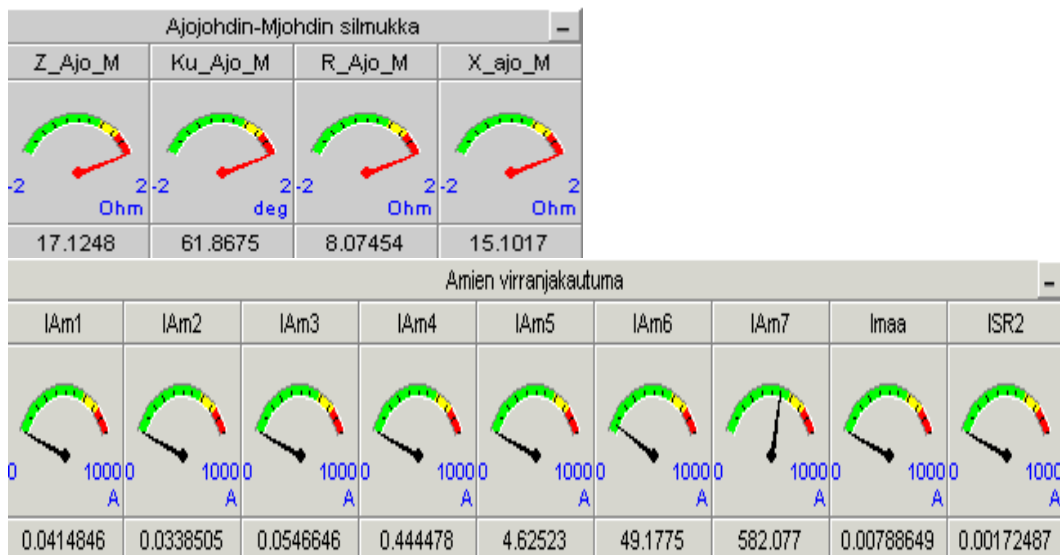
Vikapaikka 43,58 km:ä



Vikapaikka 44,08 km:ä

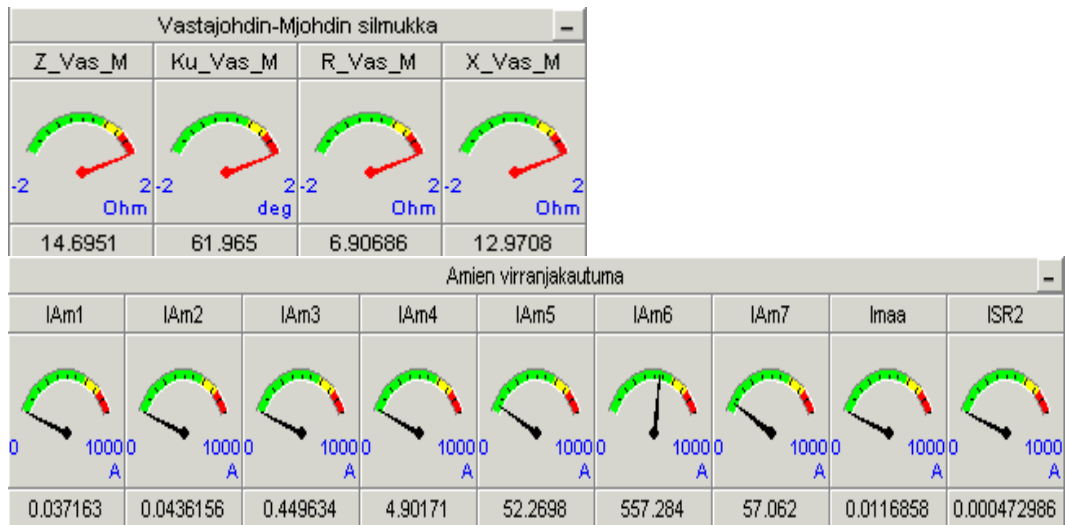


Vikapaikka 44,58 km:ä

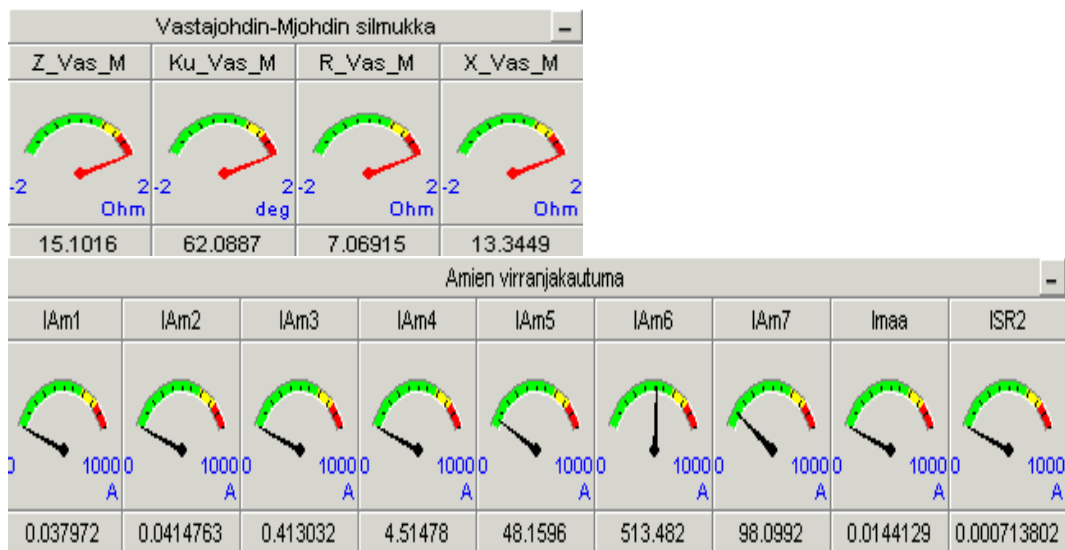


Vikapaikka 45,08 km:ä

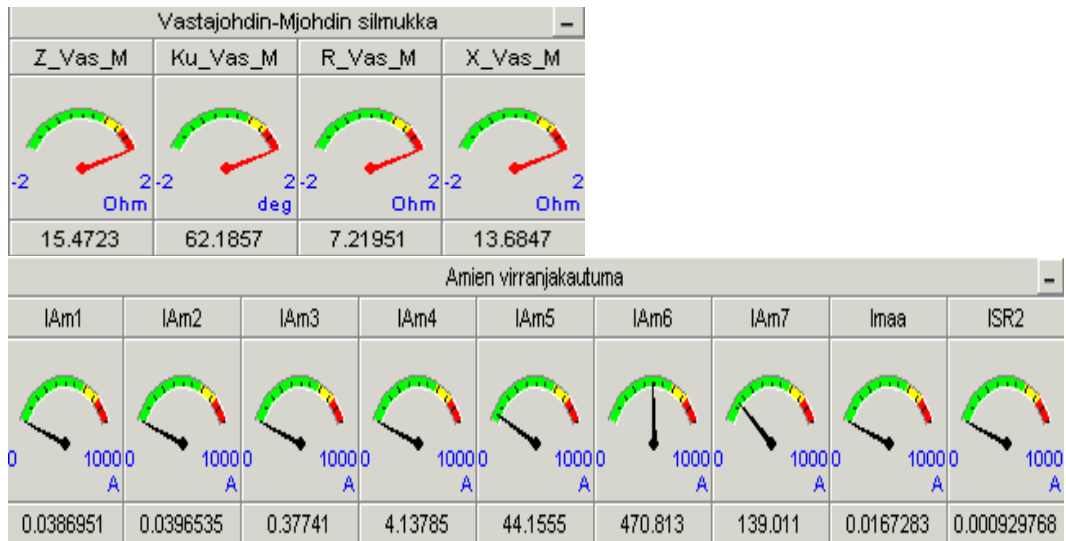
Vastajohtimen ja M-johtimen välinen vika



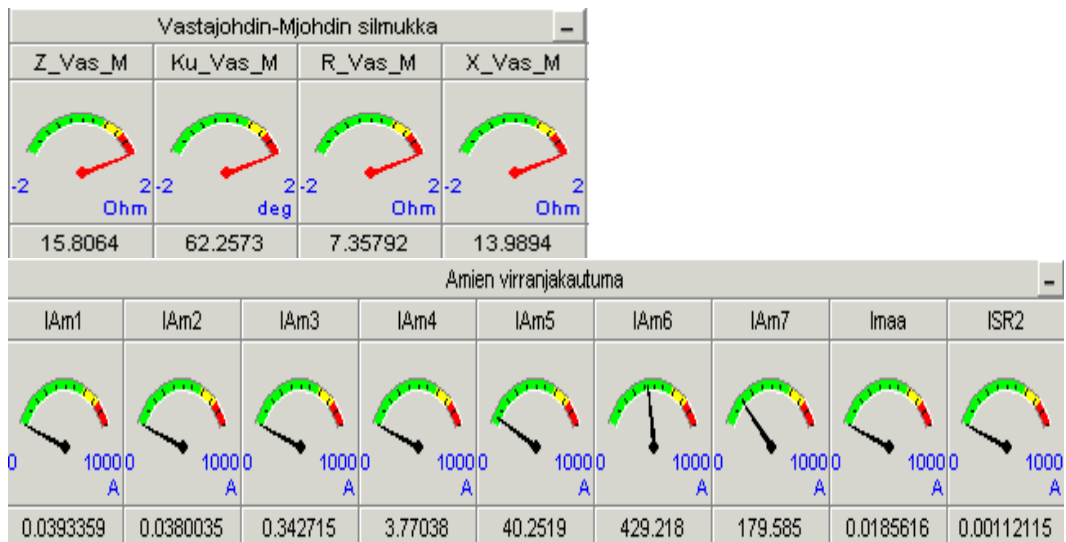
Vikapaikka 38,58 km:ä



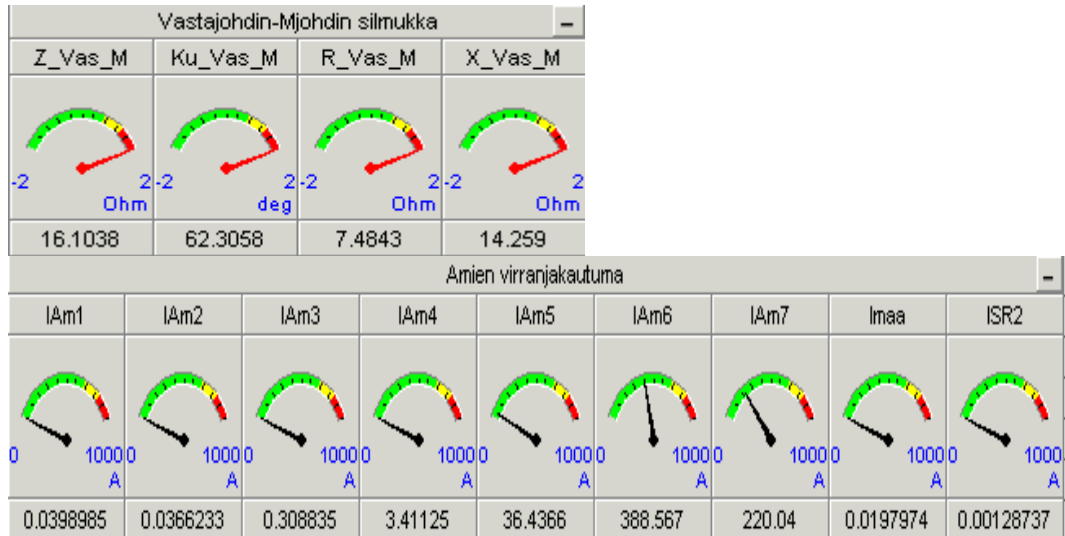
Vikapaikka 39,08 km:ä



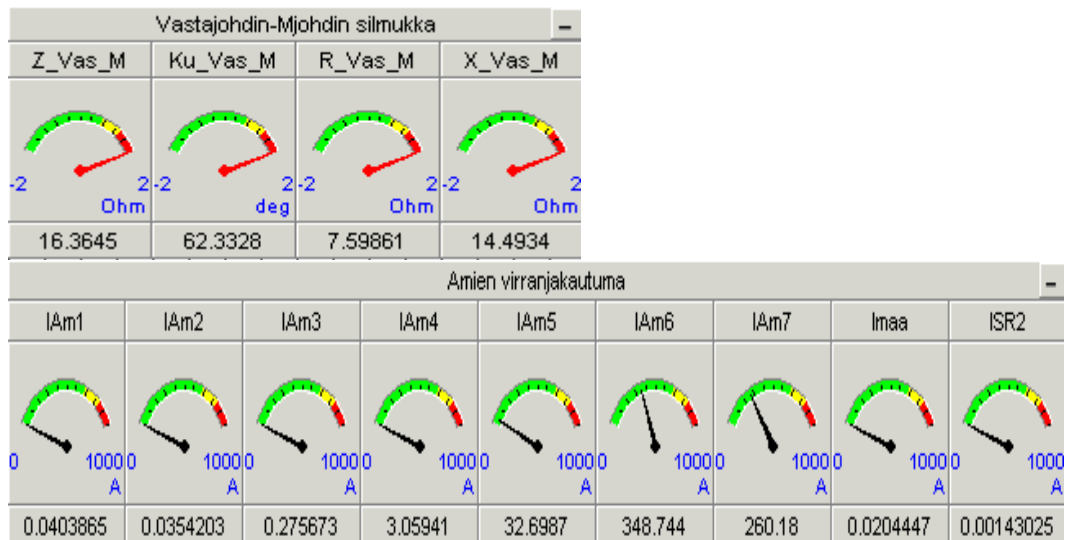
Vikapaikka 39,58 km:ä



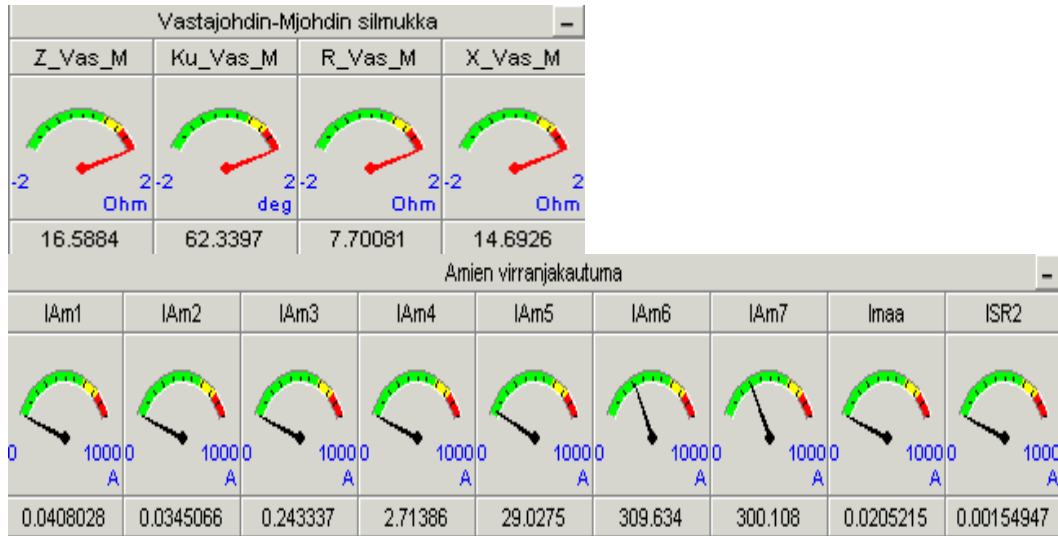
Vikapaikka 40,08 km:ä



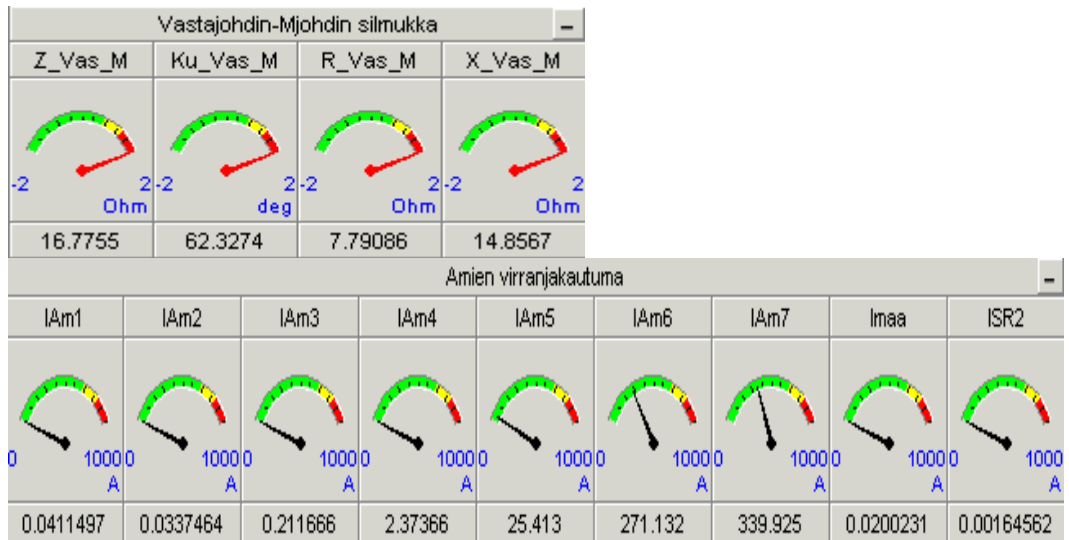
Vikapaikka 40,58 km:ä



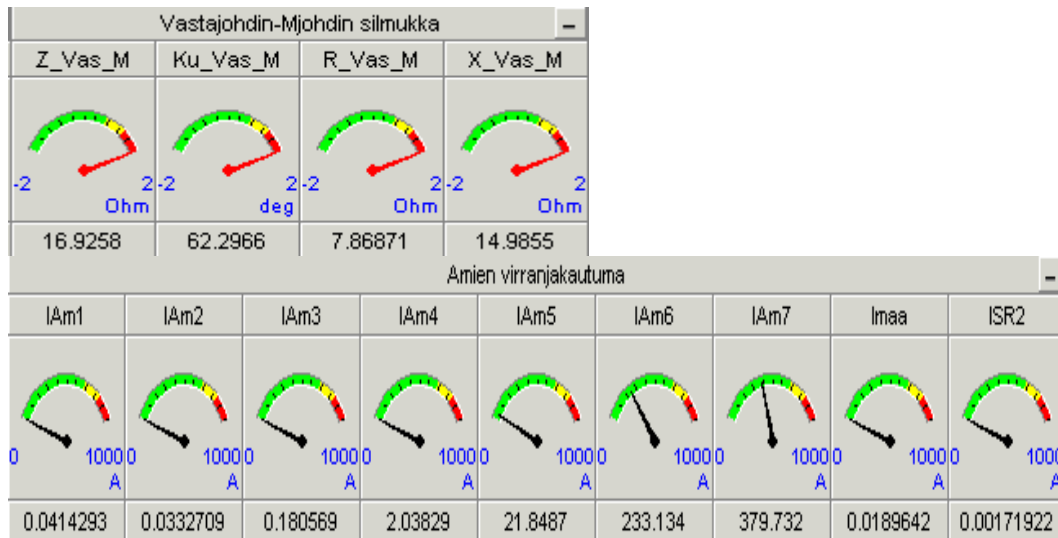
Vikapaikka 41,08 km:ä



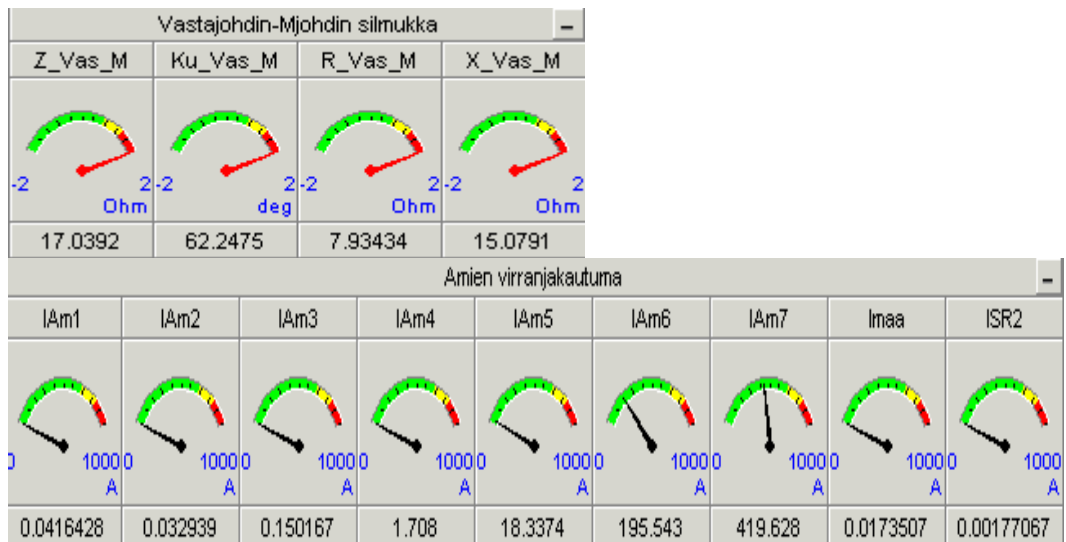
Vikapaikka 41,58 km:ä



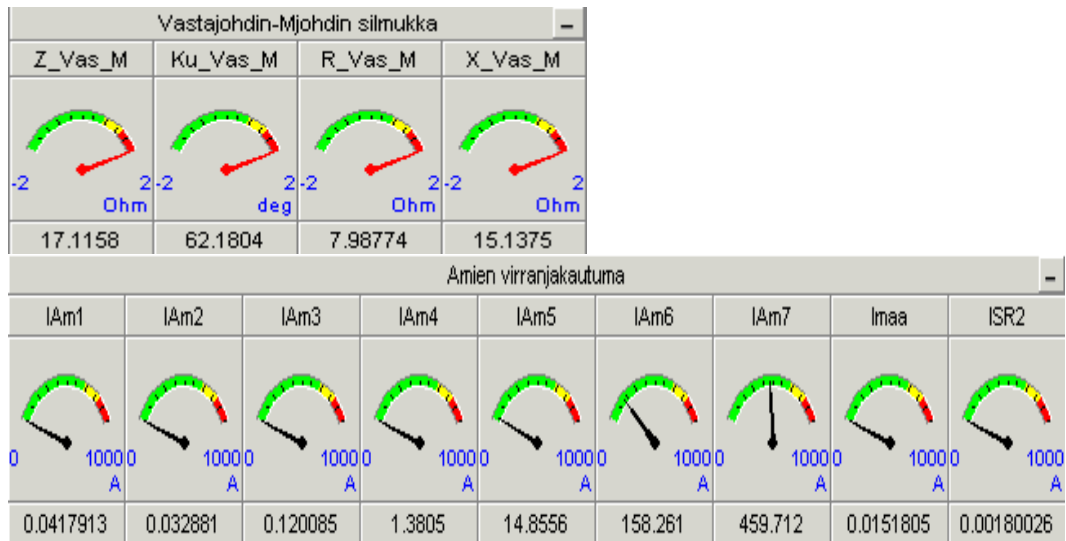
Vikapaikka 42,08 km:ä



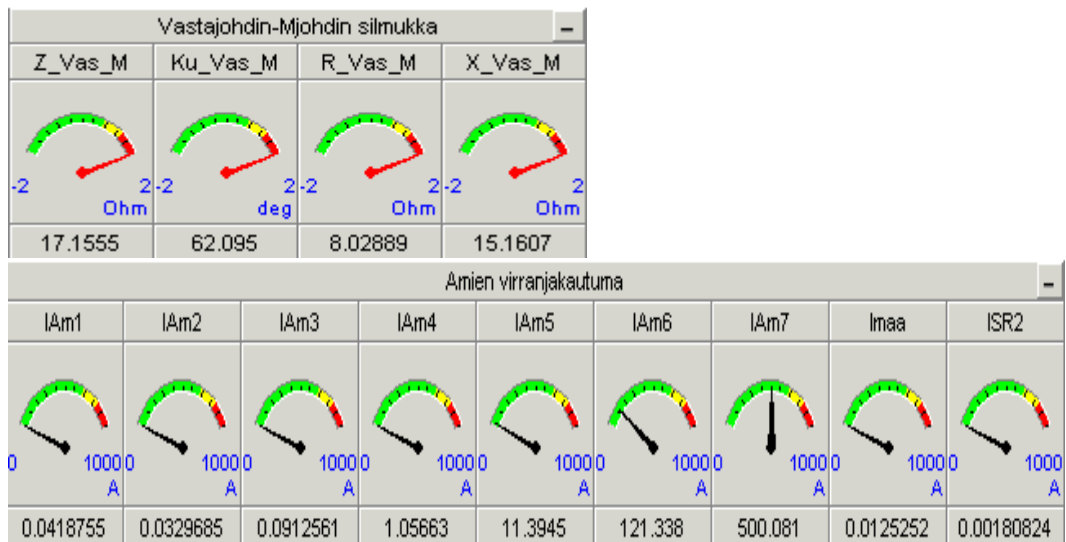
Vikapaikka 42,58 km:ä



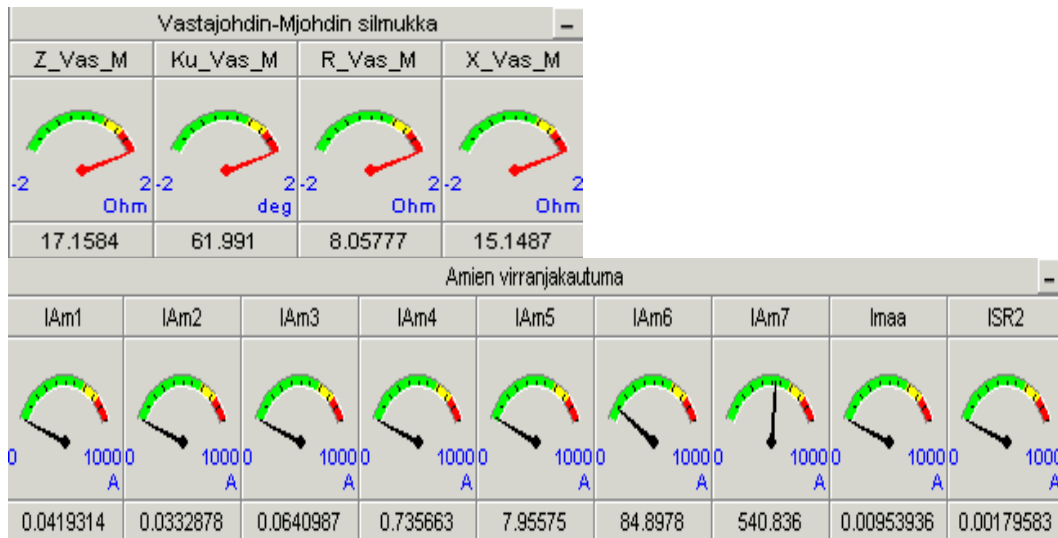
Vikapaikka 43,08 km:ä



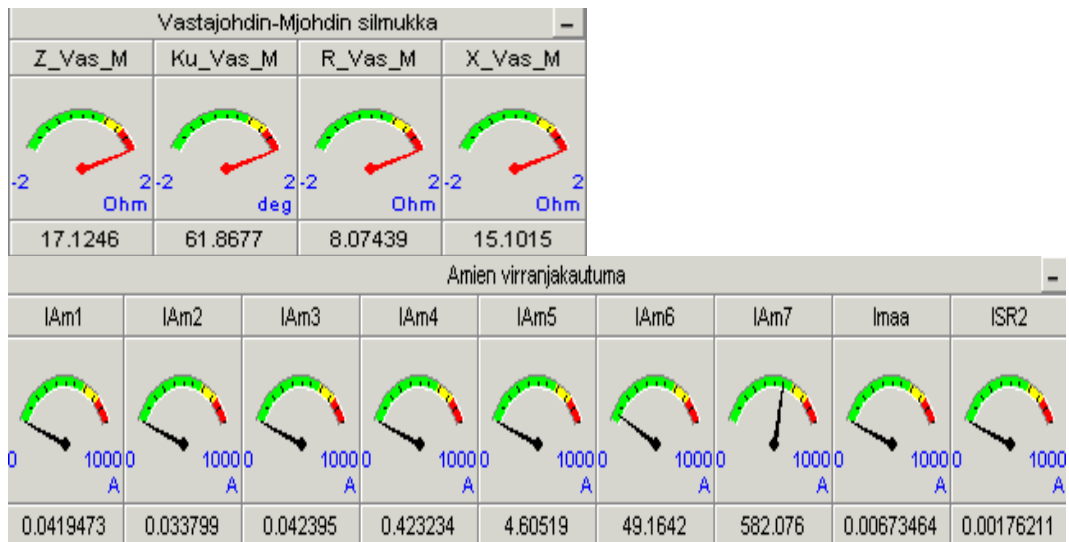
Vikapaikka 43,58 km:ä



Vikapaikka 44,08 km:ä

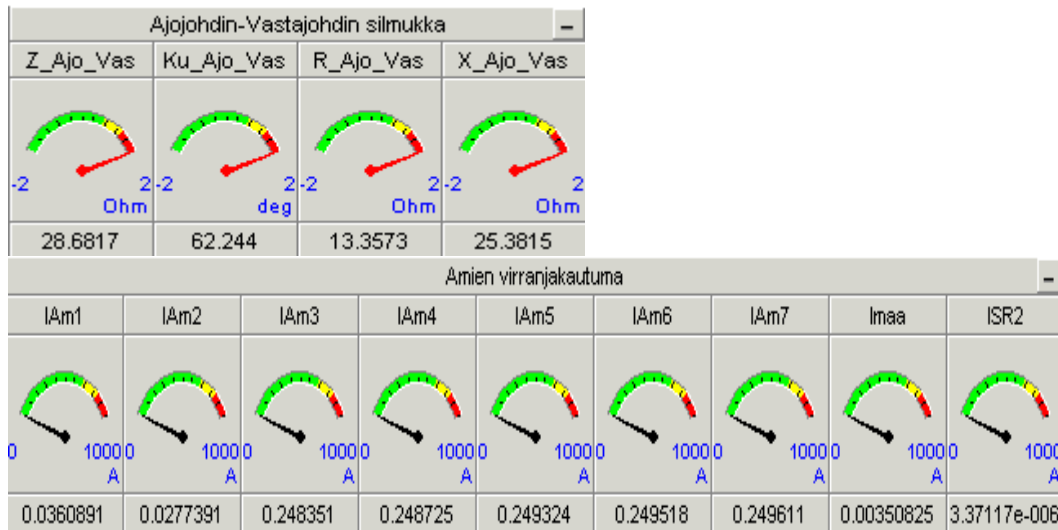


Vikapaikka 44,58 km:ä

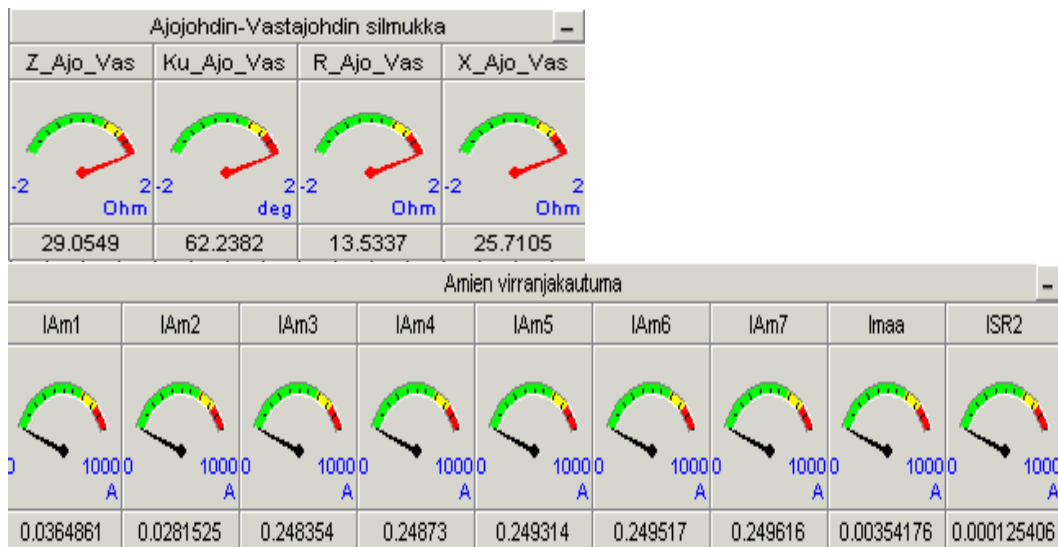


Vikapaikka 45,08 km:ä

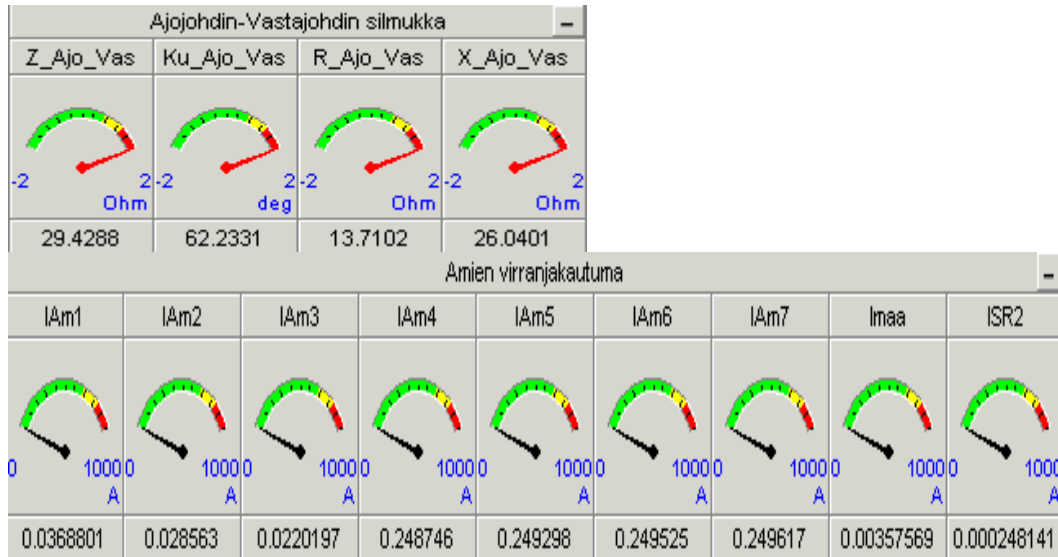
Ajojohtimen ja vastajohtimen vika



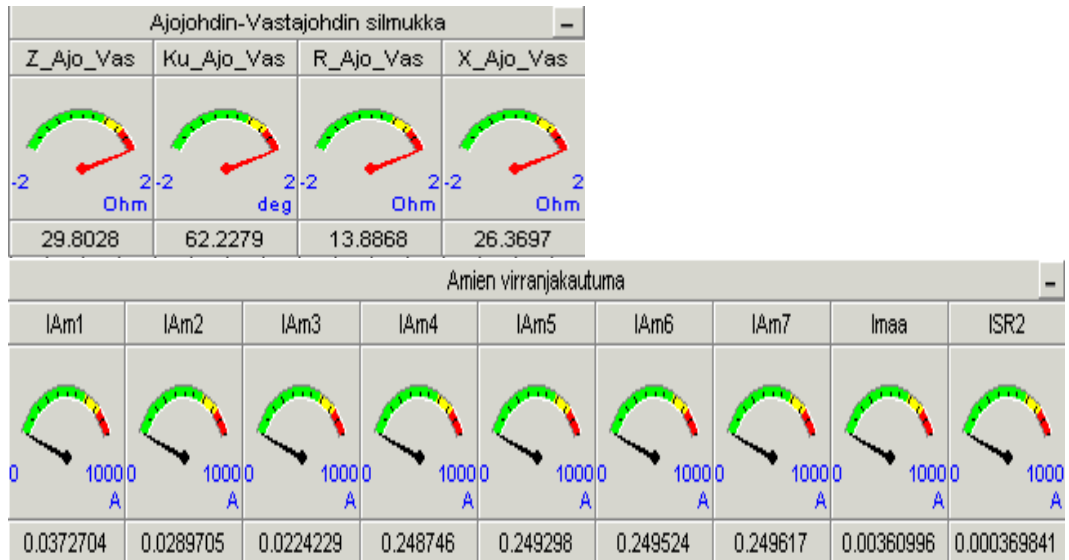
Vikapaikka 38,58 km:ä



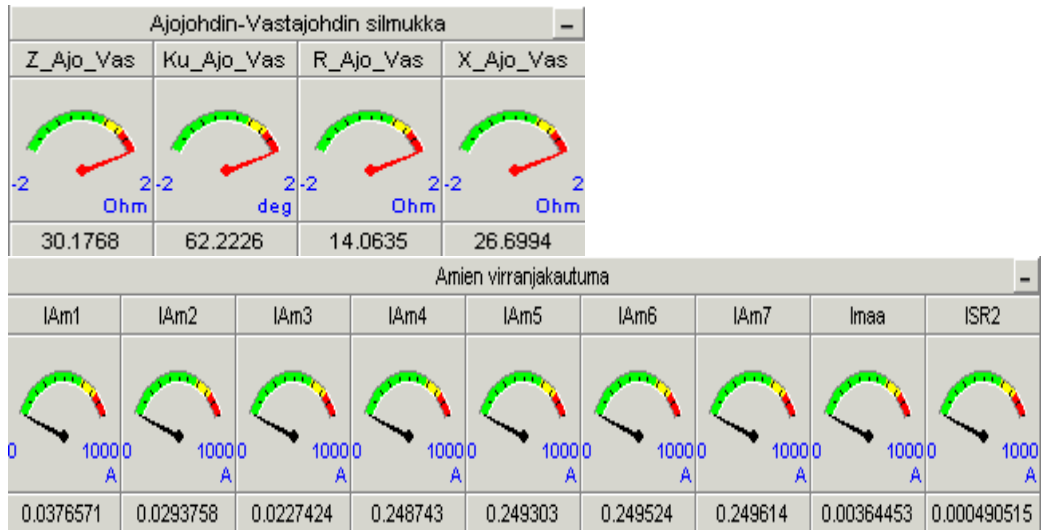
Vikapaikka 39,08 km:ä



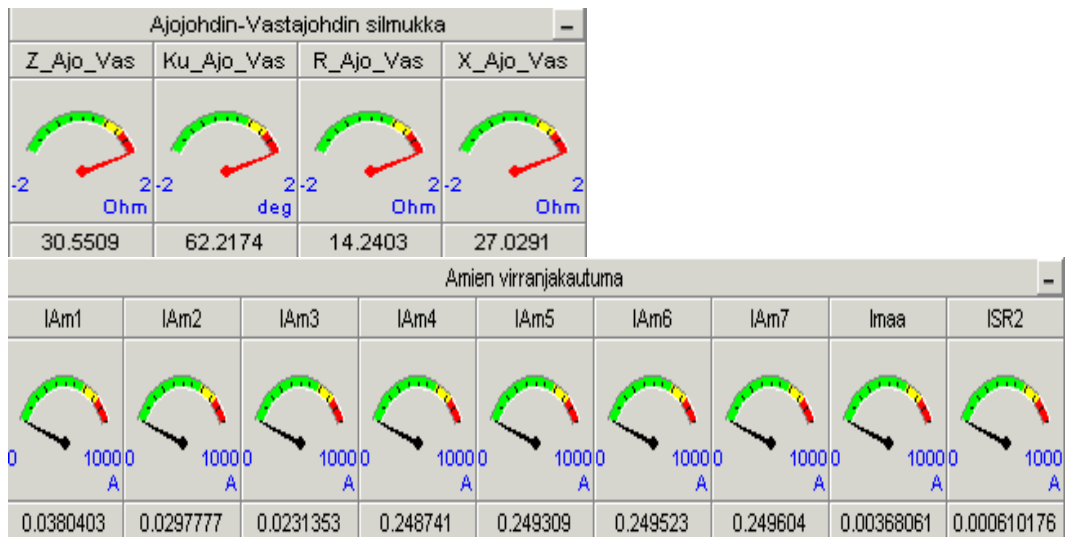
Vikapaikka 39,58 km:ä



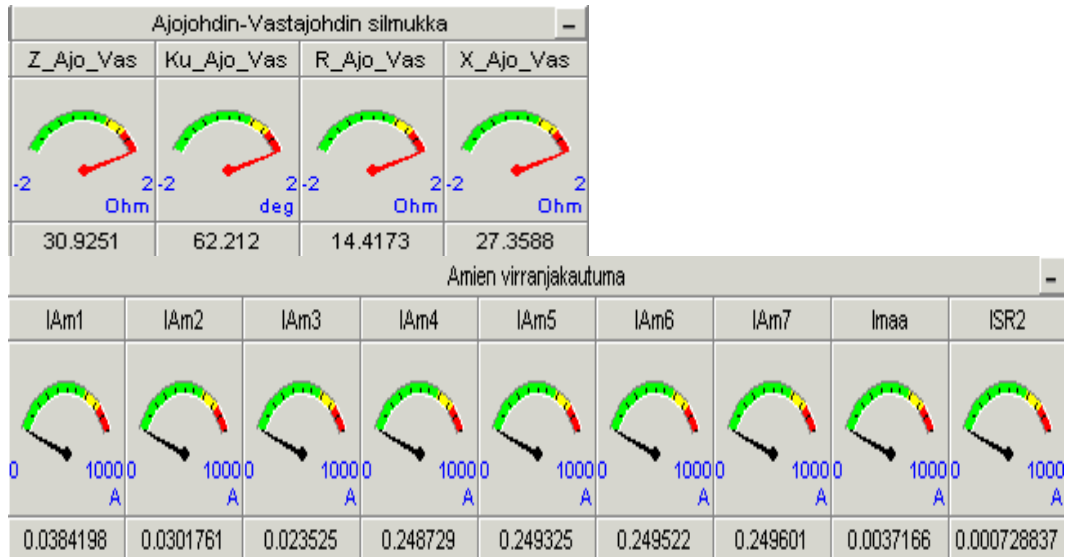
Vikapaikka 40,08 km:ä



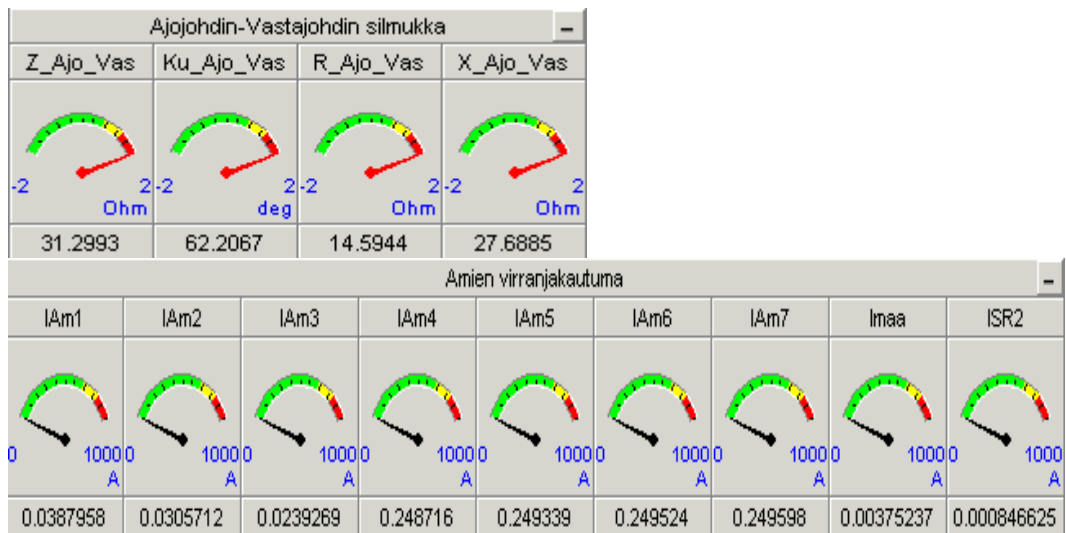
Vikapaikka 40,58 km:ä



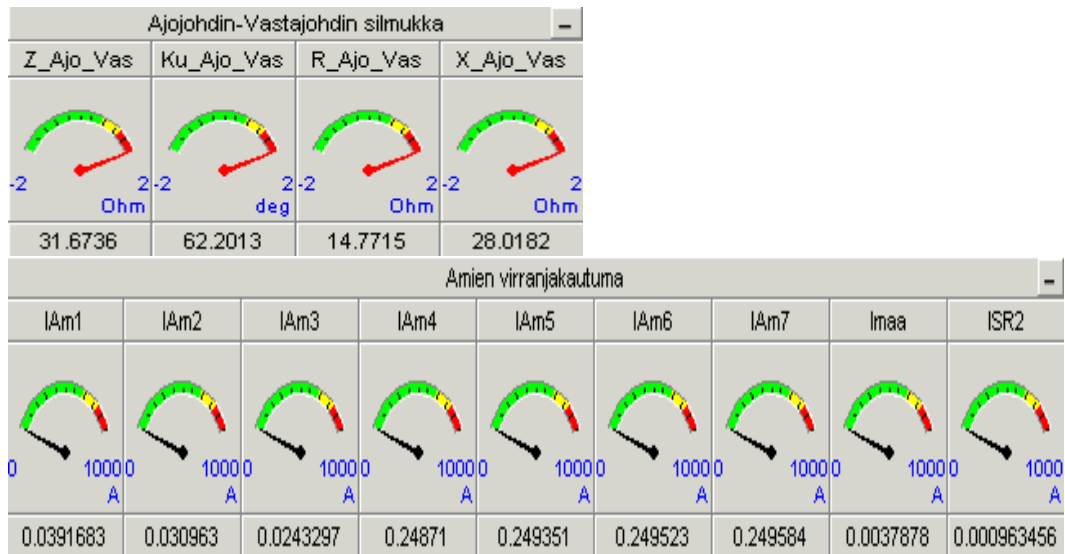
Vikapaikka 41,08 km:ä



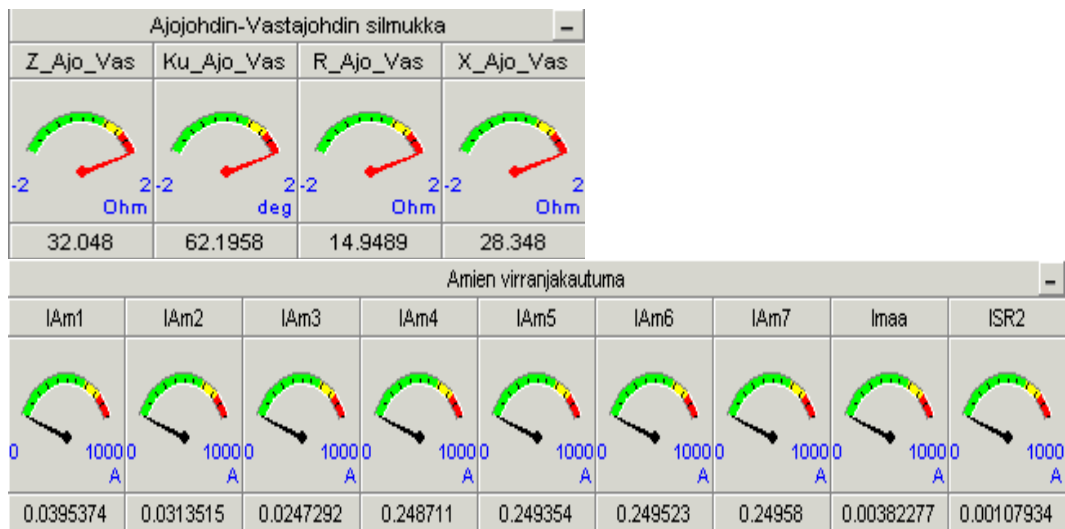
Vikapaikka 41,58 km:ä



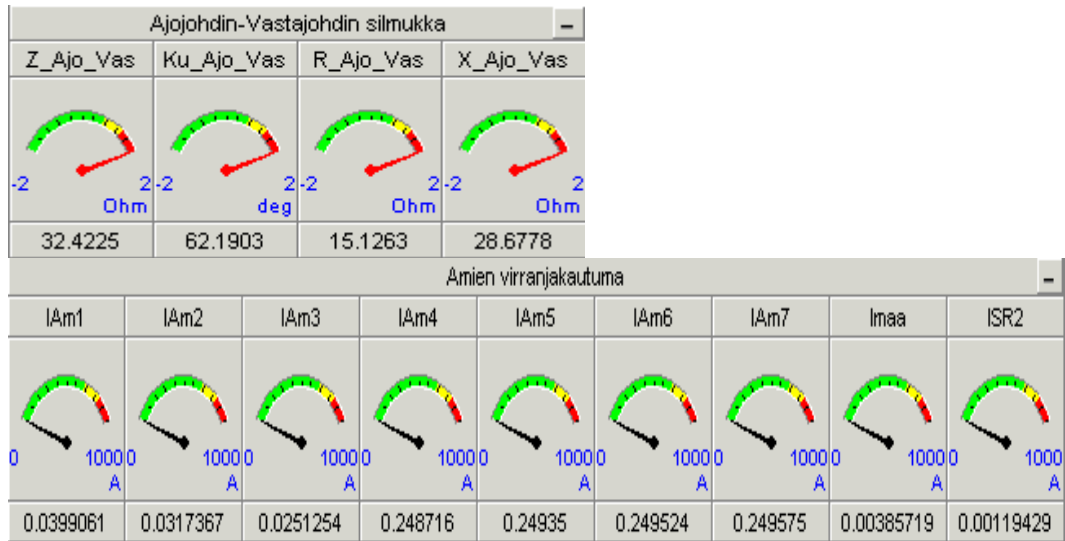
Vikapaikka 42,08 km:ä



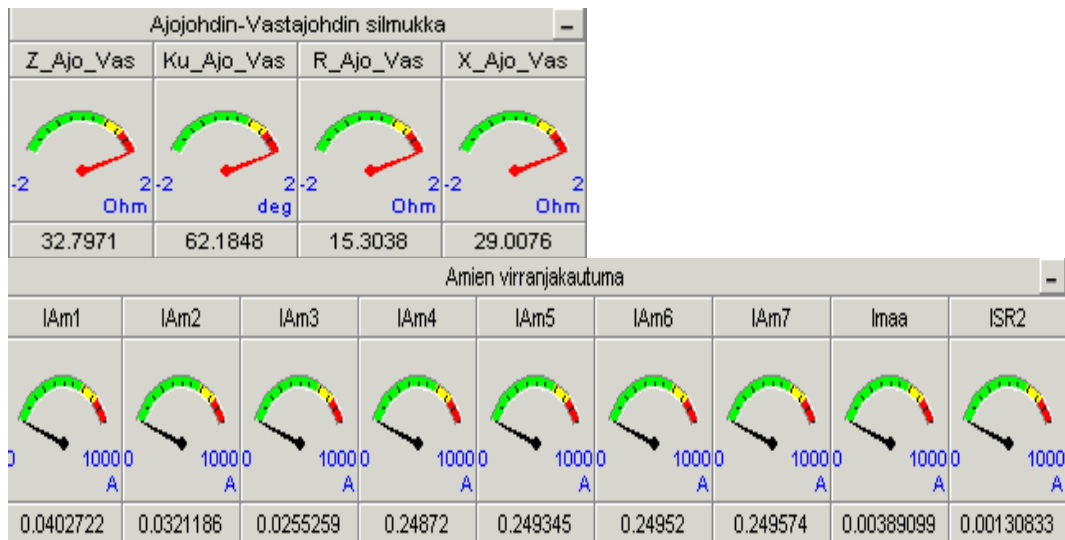
Vikapaikka 42,58 km:ä



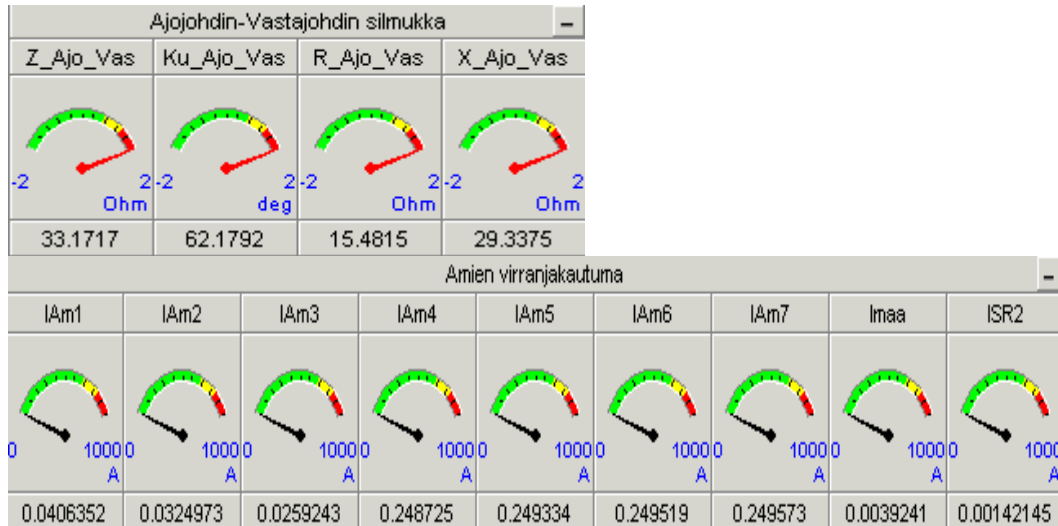
Vikapaikka 43,08 km:ä



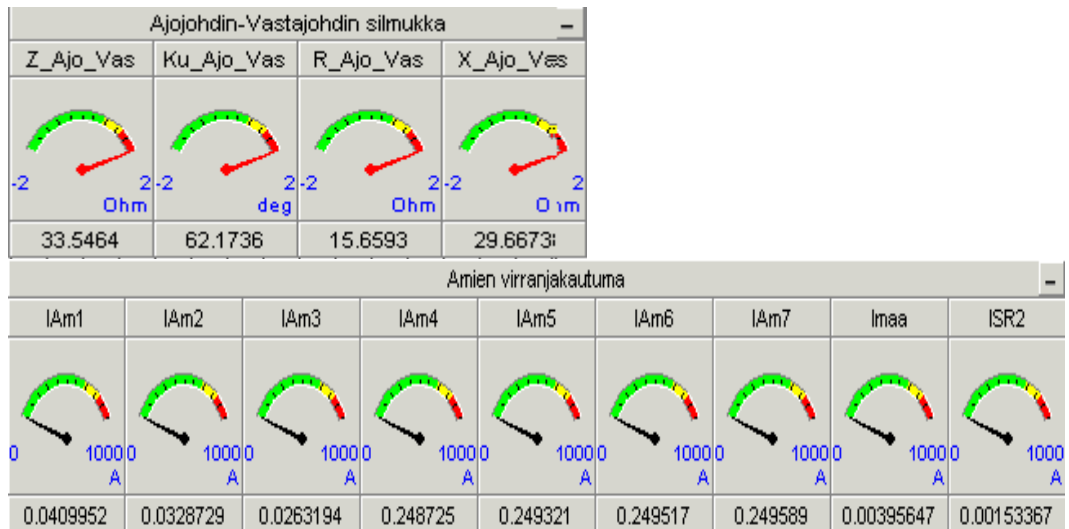
Vikapaikka 43,58 km:ä



Vikapaikka 44,08 km:ä



Vikapaikka 44,58 km:ä



Vikapaikka 45,08 km:ä