

Yliaaltojen arviointi, vaikutukset ja merkitys kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkutilanteissa

Ari Nikander, Pertti Pakonen

ALKUSANAT

Tämä raportti esittelee Tampereen yliopiston (TAU) Sähkötekniikan yksikössä tehdyn tutkimushankkeen ”Yliaaltojen arviointi, vaikutukset ja merkitys kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkutilanteissa (Yliaaltoarvio)” keskeisiä tuloksia. Tutkimus on tehty Sähkötutkimuspoolin rahoituksella.

Esitämme kiitokset hankkeen ohjausryhmälle hyvästä yhteistyöstä. Lisäksi osoitamme erityiskiitokset Elenia Oy:lle kenttäkokeisiin liittyvistä järjestelyistä sekä kaikille mittausaineistoja hankkeen käyttöön toimittaneille yhtiöille.

Hankkeen ohjausryhmään kuuluivat:

Petri Hovila, ABB Oy, puheenjohtaja

Sami Viiliäinen, Savon Voima Verkko Oy / R4

Tuukka Heikkilä, Energiateollisuus ry, Sähkötutkimuspooli

Petteri Kangasluoma, Elenia Verkko Oyj

Ari Wahlroos, ABB Oy

Mika Loukkalahti, Helen Sähköverkko Oy

Timo Kiiski, Savon Voima Verkko Oy / R4

Asmo Karvinen, Kymenlaakson Sähköverkko Oy / R4

Jenny Martiskainen, Savon Voima Verkko Oy

Tutkimuksen toteutus Tampereen yliopistossa:

Pertti Järventausta, hankkeen vastuullinen johtaja

Ari Nikander, projektipäällikkö, tutkija

Pertti Pakonen, asiantuntija

Tampere 2022

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	i
SISÄLLYSLUETTELO	ii
1 JOHDANTO JA TUTKIMUSONGELMAN KUVAUS	1
1.1 Tavoitteet ja tutkimuskysymykset	2
1.1.1 Yliaaltojen muodostuminen maasulun aikana mitattaviin suureisiin	3
1.1.2 Maasulkuvirran paluureitti	4
1.1.3 Harmonisten yliaaltojen mittaukset	4
1.1.4 Hankkeen kokonaistavoite	4
2 HARMONISTEN YLIAALTOJEN MUODOSTUMINEN MAASULUN AIKANA MITATTAVIIN SUUREISIIN	5
2.1 Harmonisen jännitesärön muodostuminen verkon normaalissa käyttötilanteessa	5
2.2 Harmonisen virran verkossa kohtaama impedanssi	6
2.3 PSCAD verkkomalli	6
2.4 Kaapeloidun verkon tarkastelu	7
2.4.1 Harmonisen virran kohtaama impedanssi ja jännitesärön muodostuminen kaapeliverkossa	7
2.4.2 Maasulkuvirran kohtaama harmoninen kokonaisimpedanssi	9
2.4.3 Maasulkuvirran ja nollajännitteen särö	10
2.5 Sekaverkon tarkastelu	11
2.5.1 Harmonisen virran kohtaama impedanssi ja jännitesärön muodostuminen sekaverkossa	12
2.5.2 Maasulkuvirran kohtaama harmoninen kokonaisimpedanssi	13
2.5.3 Maasulkuvirran ja nollajännitteen särö	17
2.5.4 Johtopäätöksiä sekaverkon tarkastelusta	18
2.6 Ilmajohtoverkon tarkastelu	18
2.6.1 Harmonisen virran kohtaama impedanssi ja jännitesärön muodostuminen ilmajohtoverkossa	19
2.6.2 Maasulkuvirran kohtaama harmoninen kokonaisimpedanssi	20
2.6.3 Maasulkuvirran ja nollajännitteen särö	22
3 HARMONISEN MAASULKUVIRRRAN ARVIOINTI TODELLISESSA VERKOSSA	24
3.1 Haasteet ja reunaehdot	25
3.2 Suurimman harmonisen maadoitusjännitteen arviointi	26
4 MAAKAPELIN VIRTAREDUKTIOKERROIN	30
4.1 Virtareduktiokertoimeen vaikuttavat tekijät	31
4.2 Kaapeleiden reduktiokertoimien määrittäminen	33
4.2.1 Maadoitusresistanssin ja maan resistiivisyyden vaikutus	35
4.2.2 Kaapelin pituuden vaikutus	36
4.2.3 Kaapelityypin vaikutus	36
4.2.4 Maasulkuvirran taajuuden vaikutus virtareduktioon	37
4.3 Johtopäätöksiä kaapeleiden virtareduktiosta	38
5 VERKOSSA ESIINTYVIEN HARMONISTEN JÄNNITESÄRÖJEN SELVITTÄMINEN MITTAUKSIN	39
5.1 Yliaaltojännitteiden tilastollinen tarkastelu sähköasemilla	39
5.2 Yliaaltojännitteiden kehitys pidemmällä aikavälillä	44
5.3 Yliaaltojännitteet ja -virrat maasulkukokeissa – maaseutuverkko 1	46
5.3.1 Vikapaikka 3 km sähköasemalta	48
5.3.2 Vikapaikka 16 km sähköasemalta	52
5.3.3 Vikapaikka 24 km sähköasemalta	58
5.4 Yliaaltojännitteet ja -virrat maasulkukokeissa – maaseutuverkko 2	61
5.4.1 Mittaukset sähköasemalla	62
5.4.2 Mittaukset muuntamolla 1 (5 A kompensointi)	68
5.4.3 Mittaukset muuntamolla 2 (15 A kompensointi)	71

6 YHTEENVETO.....	74
7 LÄHDELUETTELO	77
LIITE A: KAUPUNKIVERKON SÄHKÖASEMIEN YLIAALTOJÄNNITTEET	78
LIITE B: MAASEUTUVERKON SÄHKÖASEMIEN YLIAALTOJÄNNITTEET	80
LIITE C: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 1, SÄHKÖASEMA.....	88
LIITE D: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 1, MUUNTAMO 1.....	92
LIITE E: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 1, MUUNTAMO 2.....	94
LIITE F: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 2, SÄHKÖASEMA	96
LIITE G: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 2, MUUNTAMO 1.....	100
LIITE H: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 2, MUUNTAMO 2.....	102
LIITE I: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 3, SÄHKÖASEMA	103
LIITE J: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 3, MUUNTAMO 1.....	107
LIITE K: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 3, MUUNTAMO 2.....	109
LIITE L: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 4, SÄHKÖASEMA	110
LIITE M: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 4, MUUNTAMO 1	114
LIITE N: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 4, MUUNTAMO 2.....	116

1 JOHDANTO JA TUTKIMUSONGELMAN KUVAUS

Keskijänniteverkkojen rakenne ja ominaisuudet muuttuvat, kun maakaapeleita asennetaan yhä enemmän myös laajoihin haja-asutusalueiden verkkoihin taajamien ulkopuolella, missä sähköjakelu on perinteisesti hoidettu ilmajohtoilla. Kaapeloinnin seurauksena verkkojen kapasitiiviset maasulkuvirrat kasvavat nopeasti. Kaapelointiasteen kasvaessa kosketusjännitevaatimusten täyttäminen edellyttää yleensä maasulkuvirran kompensointia, joka toteutetaan haja-asutusalueilla tyypillisesti keskitetyn Petersenin kelan ja hajautettujen kompensointiyksiköiden avulla. Termi ”sammutettu verkko” liitetään yleensä maasulkuvalokaaren sammumiseen ilmajohto-osan maasulussa. Kaapeliverkkojen maasulut eivät ole yleensä sammutettavissa kompensoinnin avulla. Raportissa käytetään kuitenkin joissain yhteyksissä myös termiä ”sammutettu verkko”, koska se esiintyy mm. standardissa SFS 6001 riippumatta verkon tyypistä [1].

Kosketusjännitevaatimusten perustana on maadoitusjännite vikakohdassa, joka määritetään jäännösmaasulkuvirran ja maadoitusresistanssin tulona [1]. Kaapeloinnin myötä verkon maadoitukset yhdistyvät, mutta ilmajohto-osille jää myös erillismaadoituksia. Maadoitusjännitteen kannalta erillismaadoitukset ovat haastavimpia, koska vikavirta kulkee kokonaisuudessaan maadoituksen läpi. Kaapeliverkon yhdistettyjen maadoitusten tapauksessa virtareduktio pienentää maan kautta kulkevaa vikavirtaa. Vikakohdassa maasulun aikana kulkeva jäännösvirta muodostuu seuraavien komponenttien summana.

- a) kompensoinnin 50 Hz vinovirityksestä riippuva reaktiivinen jäännösvirta ($I_C + I_L$)
- b) 50 Hz resistiivinen virtakomponentti I_R
 - lisäkuormitusvastuksen tuottama resistiivinen komponentti I_{RN}
 - kaapeliverkon nollaimpedanssista ja vikavirrasta riippuva resistiivinen komponentti I_{RO}
- c) yli 50 Hz taajuiset yliaaltovirrat, joiden edustama harmoninen kokonaisuusmaasulkuvirta I_H muodostuu harmonisten virtakomponenttien tehollisarvojen summana
 - maasulussa 3., 5. ja 7. ovat tyypillisesti merkittävimmät harmoniset virtakomponentit

Tyypillisesti ainoastaan verkon kapasitiivinen 50 Hz maasulkuvirta kompensoidaan. Standardin SFS 6001 perusteella sammutetun verkon jäännösmaasulkuvirta määritetään kompensoinnin vinovirityksen määräämän reaktiivisen virran sekä lisäkuormitusvastuksen virran I_{RN} perusteella [1]. Virtakomponenttien I_{RO} ja I_H määrittämiseen ei ole annettu ohjeita. Standardissa on myös ohjeet sellaisia tilanteita varten, jolloin sammutetun verkon jäännösvikavirta ei ole tiedossa. Tällöin sen voidaan olettaa olevan 10 % verkon tuottamasta kapasitiivisesta maasulkuvirrasta I_C [1]. Seuraavassa on tarkasteltu maasulkuvirran komponenttien määrittämiseen liittyviä epävarmuustekijöitä lähinnä harmonisten taajuuksien osalta.

Sammutetun järjestelmän jäännösmaasulkuvirta sisältää reaktiiviseen komponentin lisäksi vikavirran resistiivisen virtakomponentin sekä harmonisen vikavirtakomponentin I_H , joka sisältää eri taajuuksia. Vikavirran resistiivinen komponentti on määritelty sisältyvän kapasitiiviseen virtaosoittimeen I_C ja induktiiviseen virtaosoittimeen I_L [1].

Epälineaaristen kuormien ja tuotantolaitteiden verkkoon liittämiseen käytettävien suuntaajien synnyttämät yliaaltovirrat aiheuttavat säröä keskijänniteverkon jännitteisiin. Harmoninen yliaaltojännite U_h on sinimuotoinen jännite, jonka taajuus on jakelujännitteen perusaallon taajuus kokonaisluvulla h kerrottuna. Kerroin h on harmonisen komponentin järjestysluku. Yliaaltojännitteeseen viitataan joko järjestysluvulla h tai taajuudella. Esimerkiksi 5. yliaallon taajuus on $5 \times 50 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz}$.

Harmonista taajuutta h vastaava vikavirtakomponentti voidaan laskea, kun vikakohtassa ennen vikaa vallinnut harmoninen yliaaltojännite \underline{U}_h (järjestysluku h) ja vikakohtasta näkyvät vastaavaa järjestyslukua h edustavat harmoniset myötä-, vasta- ja nollaimpedanssit (\underline{Z}_{1h} , \underline{Z}_{2h} ja \underline{Z}_{0h}) tunnetaan [2].

Jakelujännitteen harmoniset yliaallot johtuvat pääasiassa jakelujärjestelmän kaikille jännitetasoille kytketyistä sähkökäyttäjien epälineaarista kuormista tai tuotantoyksiköistä, jotka on liitetty verkkoon suuntaajan välityksellä. Myös 110 kV verkon jännitteen yliaallot voivat näkyä keskijännitteen särönä. Harmoniset yliaaltovirrat aiheuttavat verkon impedanssien kautta kulkiessaan yliaaltojännitteitä. Yliaaltojännitteiden suuruudet riippuvat epälineaaristen kuormien tai tuotantoyksiköiden verkkoon syöttämistä harmonisista virroista sekä niiden kohtaamista impedansseista. Harmoniset yliaaltovirrat ja siten myös harmoniset yliaaltojännitteet liittämiskohdassa vaihtelevat ajan suhteen. Kyseessä on siis tilastollisesti kuormitusten tai tuotannon mukaan vaihteleva suure. Harmonisen yliaaltojännitteen suuruus vaihtelee tyypillisesti verkon eri osissa, koska harmoniset virtainjektiot ovat yleensä epätasaisesti jakautuneita ja verkon eri osista näkyvät harmoniset impedanssit ovat erisuuruiset. Harmonisia virtakomponentteja voi siirtyä keskijänniteverkkoon myös 110 kV järjestelmästä. Standardin SFS-EN 50160 mukaan harmoninen kokonaissärö THD lasketaan kaavasta 1.1, jossa u_h on yliaallon suhteellinen amplitudi verrattuna perustaajuuden jännitteen amplitudiin u_1 [3].

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (u_h)^2} \quad (1.1)$$

Suurimmat sallitut harmoniset jännitesäröt ovat tyypillisimpiä taajuuksia edustavien järjestyslukujen (3., 5. ja 7.) osalta 5 – 6 % perustaajuudesta jännitteestä. 20,5 kV jännitteellä 5 – 6 % jännitesärö tarkoittaa noin 592 – 710 V harmonista vaihejännitettä. Lisäksi jakelujännitteen kokonaissärökertoimen (mukaan lukien kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka) tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 % [3]. Edellä mainitut raja-arvot koskevat suureiden 10 minuutin keskiarvoja eli hetkellisesti ne voivat ylittyäkin ilman, että rikotaan standardin raja-arvoja. Harmoniset jännitesäröt ovat sähköjakeluverkoissa todennäköisesti enimmäkseen selvästi standardin raja-arvojen alapuolella, koska standardi määrittelee jännitteen vähimmäislaadun.

Jakelumuntajien keskijännitepuolen käämitykset ovat yleensä kolmiokytkettyjä. Siksi parittomien kolmella jaollisten kertalukujen harmoniset eivät merkittävässä määrin siirry keskijänniteverkkoon. Maasulun aikana nollajännitteessä ja vikavirrassa esiintyy tyypillisimmin parittomia harmonisia komponentteja, joiden järjestysluku on 5. ja 7. Maasulkuvirran harmonisten virtakomponenttien arvioimisen kannalta keskeinen suure on vikakohtan harmoninen yliaaltojännite tai harmoninen kokonaissärö. Viitteessä [2] esitetty menetelmä harmonisen yliaaltojännitteen vaikutuksen huomioimiseksi maadoitusjännitteen määrittämisessä ns. pahimmassa tilanteessa perustuu sähköaseman jännitesärön määrittämiseen. Menetelmän verifiointi ja jäännösvirran sisältämien harmonisten yliaaltovirtojen merkityksen arviointi edellyttävät todellisista verkoista mitattua aineistoa. SFS-EN 50160 standardin sallimat suurimmat harmoniset yliaaltojännitteet synnyttävät merkittävästi harmonisia yliaaltovirtoja jäännösvirtaan erityisesti kaapeliverkoissa. Olennainen kysymys on, kuinka paljon pienempiä harmoniset yliaaltojännitteet ovat todellisissa verkoissa standardin sallimiin suurimpiin arvoihin verrattuna? Hankkeessa yliaaltojännitteiden suuruuksia selvitettiin verkkoyhtiöiden kenttämittauksista saatujen aineistojen avulla.

1.1 Tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Vikakohtan jäännösmaasulkuvirta tulee tuntea sähköverkon käyttöturvallisuuden takaamiseksi ja se tulisi olla myös arvioitavissa verkostolaskennan avulla. Haja-asutusalueiden osittain kaapeloiduissa sähköverkoissa suoritetuissa kenttämittauksissa on havaittu, että maasulkuvirrat saattavat sisältää harmonisia yliaaltoja siinä määrin, että

kosketusjännitevaatimusten toteutumisesta ei voida olla varmoja. Ongelmana on se, että maasulkusuureiden yliaaltojen syntymisen taustalla olevia mekanismeja ei tunneta riittävän hyvin eikä yliaaltojen arviointiin ole käytettävissä verkostolaskentatyökaluja. Harmonisten yliaaltovirtojen vähentämisellä voidaan pienentää maadoitusten parantamisesta aiheutuvia kustannuksia ja vaikuttaa jännitteen laatuun.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää maasulkusuureiden yliaaltojen syntymekanismit ja arvioida niiden vaikutusta. Eräs tällainen tekijä on verkkoon liitettyjen epälineaaristen kuormien tai tuotantolaitteiden verkkoon synnyttämä harmoninen jännitesärö ja sen vaikutus maasulun aikana esiintyviin suureisiin. Tältä osin on olennaista, kuinka suuria harmonisia jännitesäröjä verkossa normaalisti esiintyy ja kuinka paljon ne vaihtelevat kuormitusvaihtelun mukana. Myös verkon kaapeloinnin ja kaapelointiasteen vaikutus syntyvään harmoniseen maasulkuvirtaan on hyvä tuntea. Lähtökohtaisesti maasulkuvirran kompensointikelat ja -laitteet eivät saisi kyllästyä maasulkutilanteessa. Jos näin kuitenkin tapahtuisi, myös sillä olisi vaikutusta harmoniseen maasulkuvirtaan.

Maasulkuvirran paluureitti on esiintyvien kosketusjännitteiden kannalta olennainen kysymys. Ilmajohtoverkossa maasulkuvirta kulkee kokonaisuudessaan pistemäisen maadoituksen kautta maahan, jolloin maadoitusjännite muodostuu kokonaisvikavirran ja maadoitusresistanssin tulona. Sekaverkoissa kaapeliosuuksilla on toisiinsa kytkeytyneitä, ketjuuntuneita maadoituksia, mutta ilmajohto-osilla myös pistemäisiä maadoituksia. Tällöin molemmat tulisi huomioida kosketusjännitteitä tarkasteltaessa. Kaapeliosuuksilla virtareduktio vaikuttaa merkittävästi maahan menevän virran suuruuteen. Haasteena on kosketusjännitteiden kannalta keskeisen maahan menevän maasulkuvirran arvioiminen laskennallisesti.

1.1.1 Yliaaltojen muodostuminen maasulun aikana mitattaviin suureisiin

Tutkimuksen tavoitteena oli määrittää mekanismit, jotka vaikuttavat harmonisten taajuuksien esiintymiseen maasulun aikana verkosta mitattavissa suureissa, kuten maasulkuvirrassa ja nollajännitteessä. Harmonisten taajuuksien esiintymiseen maasulkuvirrassa vaikuttavat verkon jännitteissä normaalitilassa esiintyvät harmoniset jännitesäröt. Toinen mahdollinen harmonisten syntymekanismi on rautasydämisten kompensointilaitteiden mahdollinen kyllästyminen maasulkutilanteessa. Lähtökohtana on kuitenkin, että kelat eivät saa kyllästyä.

Harmonisiin maasulkusuureisiin liittyvän teorian selvittämisessä käytettiin tyyppiverkoista tehtyjä PSCAD malleja, kun verkossa oli harmonisia virtalähteitä. Tyyppiverkkoina olivat kaapeli-, seka- ja ilmajohtoverkko. Maasulkuvirtaan muodostuvien harmonisten komponenttien kannalta on olennaista, kuinka suuri on jännitesärö vikakohdassa ennen vikaa. Siksi on olennaista, millaisen jännitesärön tiettyyn verkon kohtaan tehtävä harmoninen virtainjektio synnyttää kyseiseen kohtaan ja miten sen vaikutus näkyy verkon muissa osissa. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös maasulun aikana mitattavan nollajännitteen harmonisen särön syntymistä ja siihen vaikuttavia tekijöitä.

Haasteena oikeita verkkoja ajatellen on se, että harmonisia jännitteitä ei tunneta, koska verkossa ei ole tyypillisesti pysyviä jännitteenlaatumittauksia muuta kuin korkeintaan sähköasemilla. Siksi harmonisiin taajuuksiin perustuvaa yksityiskohtaista verkostolaskentaa ei voida tehdä. Kosketusjännitevaatimuksissa (SFS 6001) varmallalla puolella olevan maadoitusjännitteen arviointi perustuu suurimman maasulkuvirran (vikaimpedanssi 0Ω) ja todelliseen maadoitusresistanssin tuloon. Siksi myös harmonista maasulkuvirtaa voidaan lähestyä ns. ”pahimman tilanteen” määrittelyn kautta. Pahimman tilanteen määrittelyssä lähtökohtana oli suurin maasulunaikainen harmoninen maadoitusjännite vikakohdassa. Tähän vaikuttaa myös vikakohdan sijainti (esim. lähdön alussa/lähdön lopussa).

1.1.2 Maasulkuvirran paluureitti

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten maasulkuvirran paluupiiri muodostuu ja kuinka suuri osa vikavirrasta kulkee kaapeleiden maadoitetuissa rakenteissa kuten kosketussuojissa ja mahdollisessa keskusköydessä. Tältä kannalta olennainen tekijä on maakaapelin virtareduktiokerroin. Kaapelin virtareduktiokerroin riippuu mm. kaapelin ominaisuuksista, maadoituksista ja vikavirran taajuudesta. Maakaapeleiden virtareduktion avulla voidaan arvioida sekä perustaaajuisen että harmonisen vikavirran vaikutusta maadoitusjännitteeseen ja kosketusjännitteisiin. Hankkeessa arvioitiin kaapeleiden virtareduktiokertoimia ja niihin vaikuttavia tekijöitä.

Aikaisemmissa tutkimuksissa on esitetty viitteitä siitä, että maasulun paluuvirta kulkisi pääasiassa kaapeleiden maadoitetuissa osissa [4]. On esitetty havaintoja, että merkittävä osa vikavirrasta voisi siirtyä kaapelin tapauksessa vaihejohtimista suoraan kaapelin kosketussuojiiin indusoitumalla Lenzin lain mukaisesti [4]. Perinteisesti on ajateltu, että kysymys on lähinnä vikavirran paluureitin impedanssisuhteista, joihin maadoitukset vaikuttavat. Myös tältä kannalta on oletettavaa, että vikavirta kulkee merkittävilta osin kaapelin maadoitetuissa osissa.

1.1.3 Harmonisten yliaaltojen mittaukset

Tavoitteena oli selvittää sähköjakeluverkoissa esiintyvien harmonisten yliaaltojännitteiden suuruuksia ja vaihtelua verkon normaalissa käyttötilanteessa. Tässä työssä hyödynnettiin verkkoyhtiöiltä saatuja mittausaineistoja. Hankkeessa tehtiin myös maasulkukokeet, joiden tavoitteena oli vikavirran ja nollajännitteen harmonisten taajuuksien selvittäminen sekä vikavirran paluureitin ja maadoitusten virtareduktion määrittäminen. Tavoitteena oli myös varmentaa, että kompensointilaitteet eivät kyllästy maasulun aikana.

Vikakohdan harmoninen yliaaltojännite ja harmoninen kokonaissärö vaihtelevat koko ajan epälineaaristen kuormitusten mukaan. Standardi SFS-EN 50160 sallii maasuluille tyypillisille harmonisille komponenteille jännitesärön, jonka suuruus on 5 – 6 % perustaaajuisesta jakelujännitteestä. SFS-EN 50160 standardin sallimat suurimmat harmoniset yliaaltojännitteet muodostaisivat merkittävästi harmonisia yliaaltovirtoja jäännösvirtaan. Tavoitteena oli muodostaa yleiskuva harmonisten jännitteiden suuruusluokista ja ajallisesta vaihtelusta erityyppisissä verkoissa, jotta niiden merkitystä voidaan arvioida harmonisen maasulkuvirran ja kosketusjännitteiden kannalta. Myös tutkimuksessa tehdyissä simuloinneissa käytetyt jännitesäröt saatiin mitoitettua realistisen suuruiseksi mittaustulosten perusteella.

1.1.4 Hankkeen kokonaistavoite

Hankkeen kokonaistavoitteena oli selvittää mallintamalla ja mittauksin mekanismit, jotka vaikuttavat harmonisten yliaaltojen syntymiseen ja esiintymiseen maasulun aikaisissa suureissa, kuten maasulkuvirrassa ja nollajännitteessä. Tämän tavoitteen kannalta on myös olennaista, miten maasulun vikavirran paluureitti muodostuu, miten virta siirtyy kosketussuojiiin ja miten kaapeleiden virtareduktio vaikuttaa harmonisilla taajuuksilla. Tavoite on keskeinen, jotta osittain tai kokonaan kaapeloidun verkon maasulun aikaista maadoitusjännitettä voitaisiin arvioida tulevaisuudessa nykyistä paremmin, tarvittaessa myös yliaallot huomioiden. Siten voidaan varmistaa kosketusjännitevaatimusten toteutuminen. Tuloksena saadaan myös arvio harmonisten yliaaltojen merkityksestä kosketusjännitteiden kannalta.

2 HARMONISTEN YLIAALTOJEN MUODOSTUMINEN MAASULUN AIKANA MITATTAVIIN SUUREISIIN

Verkon eri yliaaltolähteiden vikakohtaan synnyttämien yliaaltovirtojen suhteellinen osuus jäännösmaasulkuvirrasta kasvaa, kun perustaajuinen maasulkuvirta kompensoidaan hyvin pieneksi. Keskijänniteverkon normaalitilan jännitteisiin voivat aiheuttaa jännitesäröjä mm.

- syöttävän verkon, tyypillisesti 110 kV jännitetason jännitteen yliaallot,
- verkkoon liitetyt epälineaariset kuormitukset,
- suuntaajalaitteiden välityksellä verkkoon liitetyt sähkön tuotantoyksiköt,
- mahdolliset resonanssiipiirit ja
- rautasydämisten verkkokomponenttien epälineaarisuudet.

Tyypillisiä epälineaarisia kuormituksia ja tuotantolaitteita ovat mm.

- tasa- ja vaihtosuuntaajakäytöt, tehollähteet, taajuusmuuttajat
- yleisesti elektroniikkalaitteet (televisiot, tietokoneet, ...),
- hitsauslaitteet ja valokaariunit,
- aurinkosähköjärjestelmät,
- loistelamput ja led valaistus (liitäntälaitteet), purkauslamput ja
- tuulivoimalat ja -puistot (verkkoon liityntä).

Kun keskijänniteverkkoon syntyy yksivaiheinen maasulku, myös harmoniset jännitteet synnyttävät harmonisia vikavirtoja ja aiheuttavat säröjä nollajännitteeseen. Vaikka harmoniset jännitesäröt ovat yleensä verkon normaalissa käyttötilanteessa pieniä ja selvästi standardin SFS-EN 50160 määrittelemien raja-arvojen alapuolella, verkon impedanssisuhteet ovat korkeammilla taajuuksilla erilaiset perustaajuuteen verrattuna. Tästä seuraa, että suhteellisen pienikin normaalitilan jännitesärö voi aiheuttaa merkittävän harmonisen virtakomponentin jäännösmaasulkuvirtaan perustaajuiseen vikavirtaan verrattuna. Turvallisuuden kannalta vikavirtojen aiheuttamat vaarajännitteet eivät saa aiheuttaa vaaraa. Turvallisuutta voidaan parantaa rajoittamalla vikavirtoja, parantamalla maadoitusjärjestelmiä, lyhentämällä vikojen vaikutusaikojä sekä standardissa SFS 6001 esitetyillä erityistoimenpiteillä [1].

Hankkeessa tarkasteltiin harmonisen yliaaltojännitteen synnyttämää harmonista maasulkuvirtaa maasulun aikana sekä jännitesärön vaikutusta maasulun aikaiseen nollajännitteeseen. Verkkoon liitetyn epälineaarisen kuorman tai tuotantolaitteen verkkoon syöttämä virta on epäsinimuotoista. Vääristynyt virran käyrämuoto voidaan yleensä mallintaa harmonisten yliaaltojen avulla. Tällöin virran käyrämuoto muodostuu perustaajuuden ja harmonisten komponenttien summana. Jos tarkastellaan virran eri taajuuskomponentteja erikseen, voidaan ajatella, että jokainen virran harmoninen komponentti kohtaa verkossa kyseiselle taajuudelle ominaiset impedanssit. Erilaisia kuormia ei tarkasteltu erikseen, vaan kuormat tai kuormaryhmät mallinnettiin harmonisina virtainjektioina, jotka aiheuttavat verkon jännitteisiin harmonisia säröjä. Myös resistiivisen kuormituksen suuruus vaikuttaa hieman harmonisen virran verkossa kohtaamaan impedanssiin. Esimerkkitarkasteluissa käytettiin 250 Hz taajuutta eli kertaluvun 5. harmonista virtaa, koska se on usein merkittävin harmoninen komponentti jännitteessä. Vastaavat tarkastelut voitaisiin tehdä myös muilla keskeisillä harmonisilla taajuuksilla saman teorian mukaisesti.

2.1 Harmonisen jännitesärön muodostuminen verkon normaalissa käyttötilanteessa

Epälineaaristen kuormien synnyttämät harmoniset virrat aiheuttavat jännitehäviöitä verkon sarjaimpedansseissa sekä päämuuntajan impedanssissa. Nämä jännitehäviöt aiheuttavat verkon pääjännitteiden vääristymisen. Mikäli verkon kapasitanssit ovat symmetriset, verkon normaalitilan nollajännitteessä ei ole kuormista aiheutuvia harmonisia komponentteja eikä

harmonista virtaa kulje kompensointikelan tai maan kautta. Verkon jännitteiden harmonisiin jännitteisiin vaikuttaa merkittävästi päämuuntajassa tapahtuva harmoninen jännitehäviö ja siksi jännitteet säröytyvät koko verkossa riippumatta epälineaaristen kuormien sijainnista.

Maasulkutilanteessa vikavirtaan syntyvien harmonisten virtojen suuruus riippuu pääasiassa vikakohdassa ennen vikaa vaikuttavan jännitteen harmonisesta kokonaissäröstä sekä vikakohdasta näkyvistä kullekin taajuudelle ominaisista komponentti-impedansseista. Siksi verkon normaalitilan jännitesärö on olennainen tekijä maasulkuvirran harmonisten komponenttien kannalta. Jännitesärön suuruuteen vaikuttavat merkittävimmät tekijät ovat harmonisen virtainjektion suuruus ja sen verkossa kohtaama impedanssi, joka riippuu myös virtainjektion sijainnista verkossa. Verkon tietyn kohdan jännitesärö muodostuu kaikkien harmonisten virtainjektioiden yhteisvaikutuksesta. Myös verkkotyyppi eli onko kyseessä kaapeli-, seka- vai ilmajohtoverkko, vaikuttaa impedanssisuhteisiin ja sitä kautta syntyviin harmonisiin jännitesäröihin ja harmoniseen vikavirtaan.

2.2 Harmonisen virran verkossa kohtaama impedanssi

Verkkoon injektoitu 250 Hz harmoninen virta, kohtaa verkossa sille ominaisen impedanssin, jossa reaktanssit määräytyvät 250 Hz taajuutta vastaavasti. Harmonisen virran kohtaama impedanssi riippuu merkittävästi myös injektiokohdan sijainnista verkossa. Samansuuruinen harmoninen virta aiheuttaa suuremman jännitesärön sähköisesti kaukana sähköasemalta, esimerkiksi pitkän lähdön loppupäässä, kuin lähellä sähköasemaa. Harmonisen virran kohtaama impedanssi riippuu merkittävästi keskijännitejohdon tyypistä ja poikkipinnasta. Maakaapelin kapasitanssi on noin 30 – 50 kertainen ilmajohtoon verrattuna riippuen kaapelityypistä ja poikkipinnasta. Tällöin käyttökapasitanssin edustama impedanssi on huomattavasti pienempi kuin ilmajohtolla. Taajuuden kasvaessa kyseinen impedanssi pienenee edelleen kääntäen verrannollisesti taajuuteen. Kaapelin pitkäinen reaktanssi on yleensä suuremmasta poikkipinnasta johtuen myös selvästi pienempi kuin ilmajohtolla. Em. seikoista johtuen harmonisen virran kohtaama kokonaisimpedanssi on yleensä kaapeliverkossa pienempi kuin vastaavassa ilmajohtoverkossa, mikä pienentää jännitteen säröytymistä ilmajohtoverkkoon verrattuna.

2.3 PSCAD verkkomalli

Harmonisen jännitesärön sekä maasulkuvirran ja nollajännitteen harmonisten komponenttien muodostumista tarkasteltiin PSCAD simuloinnin avulla. Tavoitteena ei ollut todellista verkkoa vastaavan verkon mallintaminen vaan lähinnä yliaaltoteorian ja sen eri mekanismien selvittäminen keskijänniteverkon yksivaiheisessa maasulussa. Siksi valitut verkkokonfiguraatiot olivat yksinkertaisia. Hankkeessa tarkasteltiin kolmea eri verkkotyyppiä:

- Kompensoitu maakaapeliverkko
- Kompensoitu sekaverkko
- Maasta erotettu ilmajohtoverkko

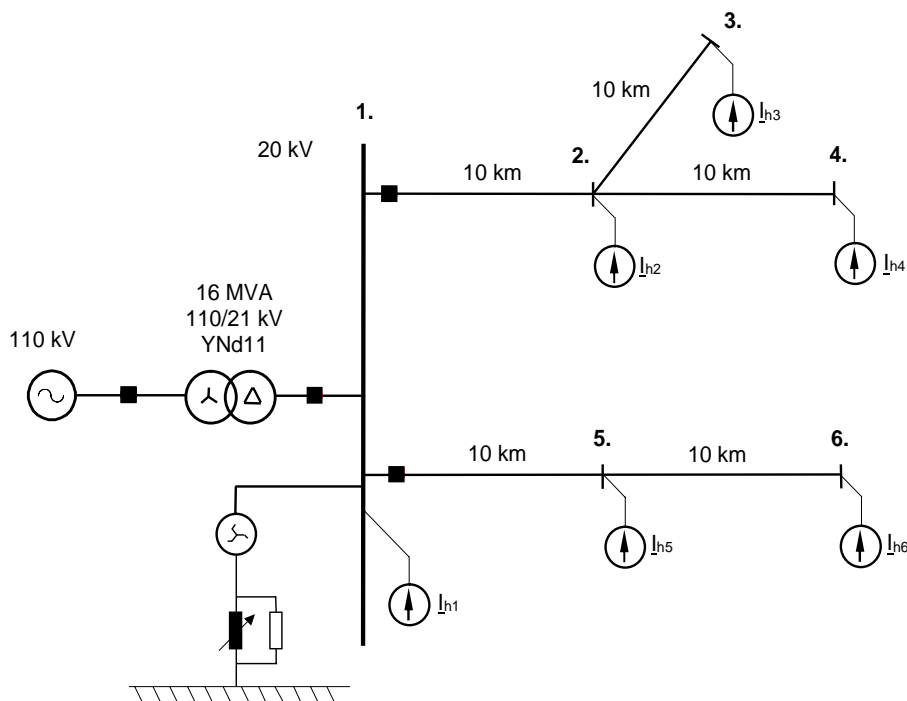
Maasulkuvirran kompensoinnin tai sen toteutustavan vaikutusta ei tarkasteltu. Korkeammilla harmonisilla taajuuksilla kompensointikeloilla ei ole juurikaan vaikutusta verkon viritysasteen kannalta, koska kelan reaktanssi kasvaa suoraan verrannollisesti taajuuteen. Verkon kapasitiiviset reaktanssit pienenevät kääntäen verrannollisesti suhteessa taajuuteen. Verkon kuormituksen vaikutus harmoniseen jännitesäröön on kahtalainen. Verkon kuormituksen ollessa suuri, verkossa on yleensä paljon myös epälineaarisia kuormia, jotka synnyttävät harmonisia virtoja ja siten kasvattavat jännitesäröjä. Perinteinen resistiivinen kuorma, esimerkiksi sähkölämmityskuorma, pienentää hieman harmonisia jännitesäröjä kuormittamattomaan verkkoon verrattuna. Simuloimalla saatiin määritettyä esimerkkiverkkojen taajuusvasteet impedansseina eri solmupisteissä.

2.4 Kaapeloidun verkon tarkastelu

Kaapeloidun keskijänniteverkon jännitesäröjen ja maasulkusuureiden harmonisten taajuuksien syntyminen vaikuttavia tekijöitä ja syntymekanismeja tarkasteltiin kuuden solmupisteen verkon avulla. Tällöin simulointitulokset voitiin myös verifioida laskennallisesti. Kuormat mallinnettiin jakelumuuntajien toisioon kytkettyinä impedansseina, mutta verkkoa tarkasteltiin pääasiassa ilman resistiivistä kuormaa. Kuormittamattoman verkon tarkastelu edustaa jännitesärön kannalta pahinta tilannetta. Tämä tarkoittaa sitä, että verkossa on yliaaltolähteitä, mutta ei resistiivistä kuormitusta. Kompensointikuristimen vaikutus maasulkuvirtaan on 250 Hz:llä on hyvin pieni. Todellisen verkon tai sen osan mallintaminen ei ollut perusteltua, koska kuormia ja niiden syöttämiä harmonisia taajuuksia ei kuitenkaan tunneta, eikä verkoissa ole myöskään riittävästi pysyviä jännitteen laatumittauksia. Siksi mallin verifiointi olisi ollut hankalaa eikä suuresta mallinnustyöstä olisi saatu vastaavaa hyötyä. Sammutetun kaapeliverkon mallin (kuva 2.1) rakenne oli seuraava.

- Kaksi kaapeloitua keskijännitelähtöä, yhteensä 50 km, AHXAMK-WP 3x95
- Keskitetty kompensointi ja lisäkuormitusvastus (5 A)
- Vakiosuuruinen harmoninen virtainjektio yksittäiseen tai useampaan solmupisteeseen
- Yksivaiheinen maasulku haluttuun verkon solmupisteeseen

Halutun suuruisia harmonisia virtoja voitiin injektoida verkon solmupisteisiin, joko yhteen tai muutamaan kerrallaan tai kaikkiin samanaikaisesti. Virtainjektioissa pyrittiin siihen, että verkon jännitteen särö olisi realistinen suhteessa verkoista tehtyihin mittauksiin ja niiden perusteella muodostuneeseen kokonaiskuvaan verrattuna. Tyypillisesti jännitesäröt vaihejännitteissä olivat 1 - 3 % perustaajuisesta jännitteestä.

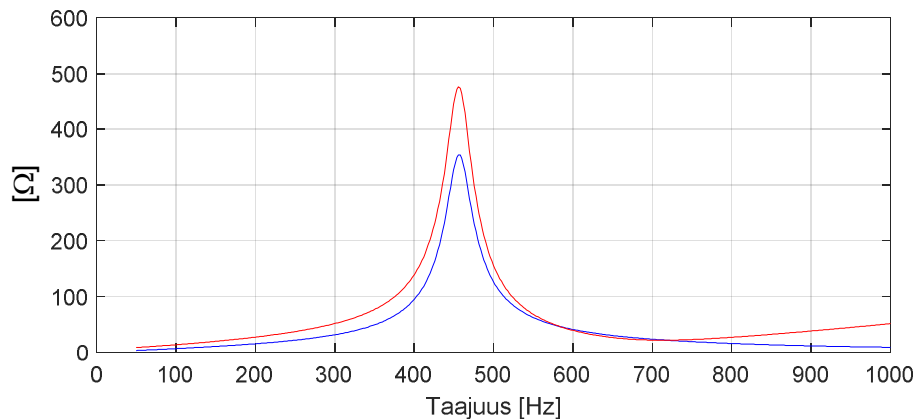


Kuva 2.1 Simuloinneissa käytetyn kaapeliverkon konfiguraatio.

2.4.1 Harmonisen virran kohtaama impedanssi ja jännitesärön muodostuminen kaapeliverkossa

Harmonisen jännitesärön muodostumiseen vaikuttaa myös harmonisen virran kohtaama impedanssi, joka riippuu virtainjektion sijainnista verkossa. Kuvassa 2.2 on esitetty virran kohtaama impedanssi taajuuden funktiona verkon (kuva 2.1) solmupisteissä 1 ja 6 eli

sähköasemalla ja kaapelilähdön loppupäässä. Tarkastelu tehtiin kuormittamattomalle verkolle. Resistiivinen kuormitus lähinnä madaltaa resonanssipeikkiä. Todellisessa verkossa kyseisiin impedansseihin vaikuttaa myös syöttävän 110 kV verkon impedanssi varsinkin silloin, kun syöttävä 110 kV johto on pitkä. Harmoninen myötäimpedanssi on pienimmillään perustaajuudella ja hyvin suurilla taajuuksilla. Suurimmillaan harmoninen impedanssi on resonanssikohdassa noin 450 Hz kohdalla. Harmonisen virran kohtaaman impedanssin lisäksi syntyvään jännitesäröön vaikuttaa harmonisen virran suuruus.



Kuva 2.2 Virran kohtaama impedanssi verkon solmupisteissä 1 (sin.) ja 6 (pun.).

Verkon solmupisteistä näkyvät harmoniset impedanssit voidaan myös laskea halutuilla taajuuksilla. Taulukossa 2.1 on esitetty verkon solmupisteiden myötä- ja nollaimpedanssit 250 Hz taajuudella sekä simuloituna että laskettuna. Jos verkkoon tehdään kolmivaiheinen symmetrinen 5 A, 250 Hz virtainjektio solmupisteeseen 1, saadaan verkon eri solmupisteissä taulukon 2.2 mukaiset 250 Hz vaihejännitteiden säröt. Nollaimpedanssi vaikuttaa 250 Hz maasulkuvirran suuruuteen, mitä tarkastellaan jäljempänä. Jännitesäröt olivat hieman alle 1 % perustaajuisesta vaihejännitteestä.

Taulukko 2.1 Verkon solmupisteiden 250 Hz:n myötä- ja nollaimpedanssit.

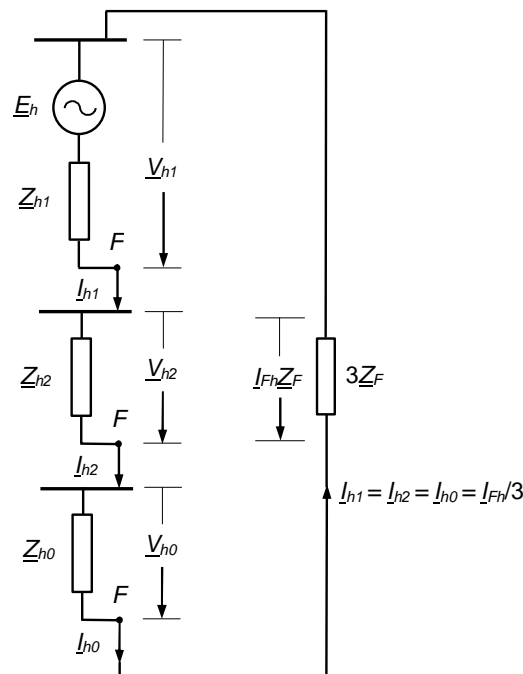
Solmupisteistä näkyvät impedanssit 250 Hz				
Solmupiste	Simuloitu		Laskettu	
	\underline{Z}_1 / Ω	\underline{Z}_0 / Ω	\underline{Z}_1 / Ω	\underline{Z}_0 / Ω
1	$0,55 + j21,65$	$9,19 - j60,42$	$0,60 + j21,90$	$8,71 - j60,73$
2	$6,24 + j30,21$	$8,71 - j61,42$	$6,33 + j30,51$	$8,20 - j61,70$
3	$10,49 + j36,90$	$25,32 - j57,24$	$10,62 + j37,23$	$24,58 - j58,02$
4	$10,50 + j36,90$	$25,32 - j57,24$	$10,62 + j37,23$	$24,58 - j58,02$
5	$5,37 + j29,21$	$17,70 - j59,74$	$5,46 + j29,49$	$17,03 - j60,26$
6	$9,60 + j35,89$	$34,58 - j56,15$	$9,71 + j36,21$	$33,65 - j57,16$

Taulukko 2.2 Solmupisteiden jännitesäröt (250 Hz), kun solmupisteeseen 1 tehdään symmetrinen kolmivaiheinen 5 A, 250 Hz virtainjektio.

Solmupisteiden jännitesäröt 250 Hz (vaihe A)		
Solmupiste	U_{250} / V (simuloitu)	U_{250} / V (laskettu)
1	108,5	109,5
2	114,2	115,3
3	115,3	116,5
4	115,3	116,5
5	111,8	112,9
6	112,9	114,1

2.4.2 Maasulkuvirran kohtaama harmoninen kokonaisimpedanssi

Tietyn taajuinen virta kohtaa verkossa tätä taajuutta vastaavat symmetristen komponenttien mukaiset komponentti-impedanssit. Siten kutakin taajuutta voidaan tarkastella erikseen. Symmetristen komponenttien käyttöön perustuvat vikavirtojen kaavat riippuvat vikatyypistä. Verkon yksivaiheinen maasulkuvirta voidaan määrittää yleisesti sijaiskytkennän avulla, jossa myötä-, vasta- ja nollaverkot kytkeytyvät sarjaan. Kuvassa 2.3 on esitetty komponenttiverkkojen kytkeytyminen yksivaiheisessa maasulussa. Jännite \underline{E}_h on järjestysluvultaan h , vikakohdassa ennen vikaa vallinnut harmoninen yliaaltojännite. Impedanssit \underline{Z}_{h1} , \underline{Z}_{h2} ja \underline{Z}_{h0} ovat vikakohdasta näkyvät harmoniset myötä-, vasta- ja nollaimpedanssit vastaten järjestyslukua h . Usein voidaan olettaa, että vikaimpedanssi \underline{Z}_F on taajuudesta riippumaton resistanssi. Komponenttijännitteiden säröt \underline{V}_{h1} , \underline{V}_{h2} ja \underline{V}_{h0} riippuvat siitä, kuinka suuren osan kokonaisimpedanssista kukin komponentti-impedanssi muodostaa.



Kuva 2.3 Komponenttiverkkojen kytkeytyminen yksivaiheisessa maasulussa.

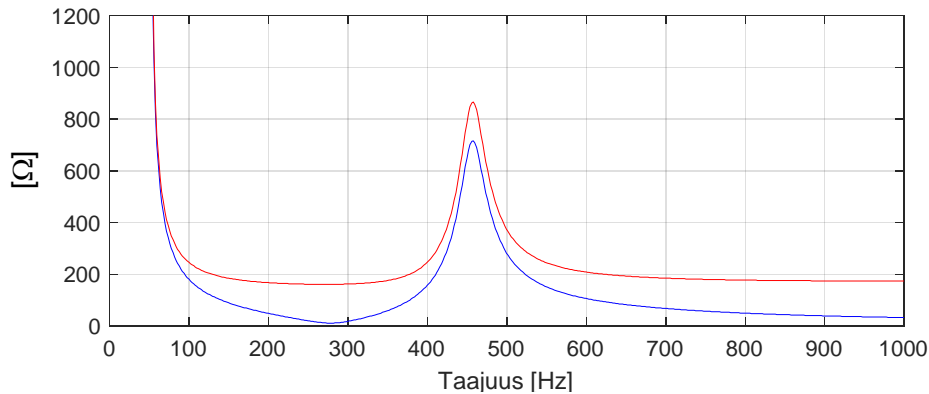
Kuvan 2.3 sijaiskytkennän mukaisesti harmonista taajuutta h vastaava vikavirtakomponentti \underline{I}_{Fh} voidaan laskea kaavan 2.1 avulla. Laskentamenetelmä on sama kuin 50 Hz maasulkuvirralla. Maasulkuvirta kohtaa verkossa komponentti-impedanssien summan ja vikaimpedanssin kolmella kerrottuna.

$$\underline{I}_{Fh} = \frac{3\underline{E}_h}{\underline{Z}_{h1} + \underline{Z}_{h2} + \underline{Z}_{h0} + 3\underline{Z}_F} \quad (2.1)$$

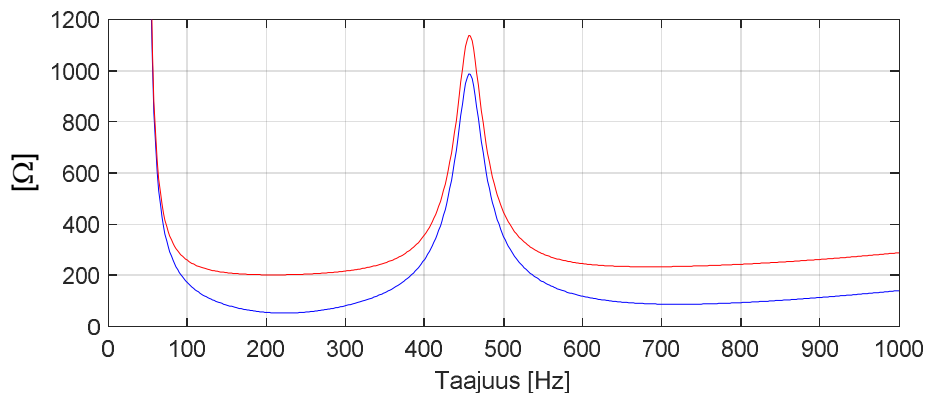
Kun lähdejännitteen taajuus kasvaa ollen esimerkiksi 250 Hz, verkon kapasitiiviset reaktanssit pienenevät siinä määrin, että myös johtojen pitkittäisten reaktanssien merkitys kasvaa. Myöskään myötä- ja vastaverkkoa ei voida jättää huomiotta. Käytännössä laskenta muodostuu haasteelliseksi, koska kaikkia komponentti-impedansseja ei tunneta todellisissa verkoissa. Kaapeleiden nollaimpedanssit riippuvat myös maadoituksista. Kaapeliverkon tapauksessa vain osa kaavan 2.1 mukaisesta kokonaisvikavirrasta palaa maan kautta. Osa siitä palaa kosketussuojien ja muiden mahdollisten maadoitettujen rakenteiden kautta kaapeleiden virtareduktion määräämällä tavalla.

Maasulkuvirran kohtaama kokonaisimpedanssia ja harmonisia vikavirtoja tarkasteltiin kuvan 2.1 mukaisessa esimerkkiverkossa. Kuvissa 2.4 ja 2.5 on esitetty vikavirtapiiriin impedanssit

myötä-, vasta- ja nollaverkon sarjakytkennälle vikaresistanssin R_F arvoilla 0Ω ja 50Ω solmuissa 1 ja 6, vastaavasti. 50Ω maadoitusresistanssi on kaapeliverkossa suuri arvo ja edustaa haja-asutusalueen verkon vaikeaa maadoitusolosuhdetta [5]. Sitä käytettiin lähinnä havainnollistamaan vikaresistanssin vaikutusta impedanssikuvaajiin. Tarkastelu tehtiin kuormittamattomalle verkolle. Kuvaajiin vaikuttavat kaapelipoikkipinnan ja -tyypin sekä verkon laajuuden lisäksi mm. verkon konfiguraatio.



Kuva 2.4 Maasulkuvirran kohtaama impedanssi esimerkkiverkon solmupisteessä 1, kun vikaresistanssi on 0Ω (sin.) ja 50Ω (pun.).



Kuva 2.5 Maasulkuvirran kohtaama impedanssi esimerkkiverkon solmupisteessä 6 kun vikaresistanssi on 0Ω (sin.) ja 50Ω (pun.).

Edellä olevista kuvista nähdään, että maasulkuvirran näkemä kokonaisimpedanssi on esimerkkiverkon kaltaisessa kaapeliverkossa pienimmillään välillä 150 – 350 Hz. Siksi 250 Hz:n jännitesärö ja sen synnyttämä harmoninen maasulkuvirta ovat keskeisiä. Verkolle ominaiset resonanssitaajuudet vaikuttavat oleellisesti kyseisiin kokonaisimpedansseihin. 50Ω vikaresistanssi kasvattaa merkittävästi kokonaisimpedanssia ja pienentää siten vikavirtaan muodostuvia harmonisia virtoja. Impedanssikäyriin ja resonanssikohtaan vaikuttaa myös verkon konfiguraatio eli onko verkossa muutama pitkä lähtö vai useita rinnakkaisia lyhyempiä lähtöjä.

2.4.3 Maasulkuvirran ja nollajännitteen särö

Kuvan 2.1 esimerkkiverkossa 250 Hz harmoninen jännitesärö muodostettiin tekemällä kolmivaiheinen 5 A, 250 Hz virtainjektio solmupisteeseen 1. Tämän seurauksena harmoninen jännitesärö jäi kaikissa verkon solmupisteissä hieman alle 1 %:iin taulukon 2.2 mukaisesti. Taulukossa 2.3 on esitetty solmupisteiden simuloitut ja lasketut 50 Hz ja 250 Hz maasulkuvirrat, kun vikaresistanssi oli 1Ω . 250 Hz harmoninen maasulkuvirta riippuu vian sijainnista selvästi enemmän kuin perustaajuinen vikavirta, joka pysyy lähes samana eri

solmupisteissä. 250 Hz vikavirta on suurimmillaan sähköasemalla, vaikka vikaa edeltäneen tilan harmoninen jännitesärö on pienin solmussa 1. Komponentti-impedansseista muodostuva kokonaisimpedanssi on merkittävämpi tekijä harmonisen vikavirran suuruuden kannalta kuin vikakohdan jännitesärön suuruus esimerkkiverkossa 250 Hz taajuudella.

Taulukko 2.3 Esimerkkiverkon maasulkuvirrat.

Maasulkuvirrat 50 Hz / 250 Hz				
Solmupiste	Simuloitu		Laskettu	
	I_{E50} / A	I_{E250} / A	I_{E50} / A	I_{E250} / A
1	10,34	15,06	10,23	15,44
2	10,03	14,17	9,94	14,49
3	9,96	6,65	9,87	6,79
4	9,96	6,64	9,87	6,79
5	10,14	10,66	10,04	10,95
6	10,07	5,75	9,97	5,89

Taulukosta 2.1 nähdään, että nollaimpedanssit ovat itseisarvoltaan selvästi suurempia kuin myötäimpedanssit ja niiden kanssa samansuuruiset vastaimpedanssit. Nollareaktanssit ovat negatiivisia, jolloin ne kompensoivat merkittävältä osin positiivisia myötä- ja vastareaktansseja komponentti-impedanssien summassa. Tällöin vikaresistanssin osuus korostuu. Esimerkkiverkossa 250 Hz komponentti-impedanssien ja vikaimpedanssin summa ($Z_{h1} + Z_{h2} + Z_{h0} + 3Z_F$) on pienempi kuin nollaimpedanssi Z_{h0} silloin, kun vikaimpedanssi on pieni. Tästä seuraa, että maasulunaikaisen nollajännitteen särö on suurempi kuin ennen vikaa vikakohdassa vaikuttavassa vaihejännitteessä. Harmonisten komponentti-impedanssien summaan vaikuttaa merkittävästi verkon tyyppi (kaapeliverkko / sekaverkko / ilmajohtoverkko). Taulukossa 2.4 on esitetty solmupisteiden 50 Hz ja 250 Hz nollajännitteet, kun maasulku on esimerkkiverkon solmupisteessä 3. 250 Hz nollajännitteet ovat hieman suurempia kuin vastaava harmoninen särö vikakohdan jännitteessä ennen vikaa (vrt. taulukko 2.2).

Taulukko 2.4 Esimerkkiverkon nollajännitteet, kun maasulku on solmussa 3.

Nollajännitteet 50 Hz / 250 Hz				
Solmupiste	Simuloitu		Laskettu	
	$U_{0,50} / V$	$U_{0,250} / V$	$U_{0,50} / V$	$U_{0,250} / V$
1	11652	142,1	11669	144,7
2	11832	139,1	11841	142,1
3	11876	139,0	11884	142,5
4	11869	140,6	11873	143,4
5	11754	145,8	11765	148,0
6	11788	147,3	11797	149,4

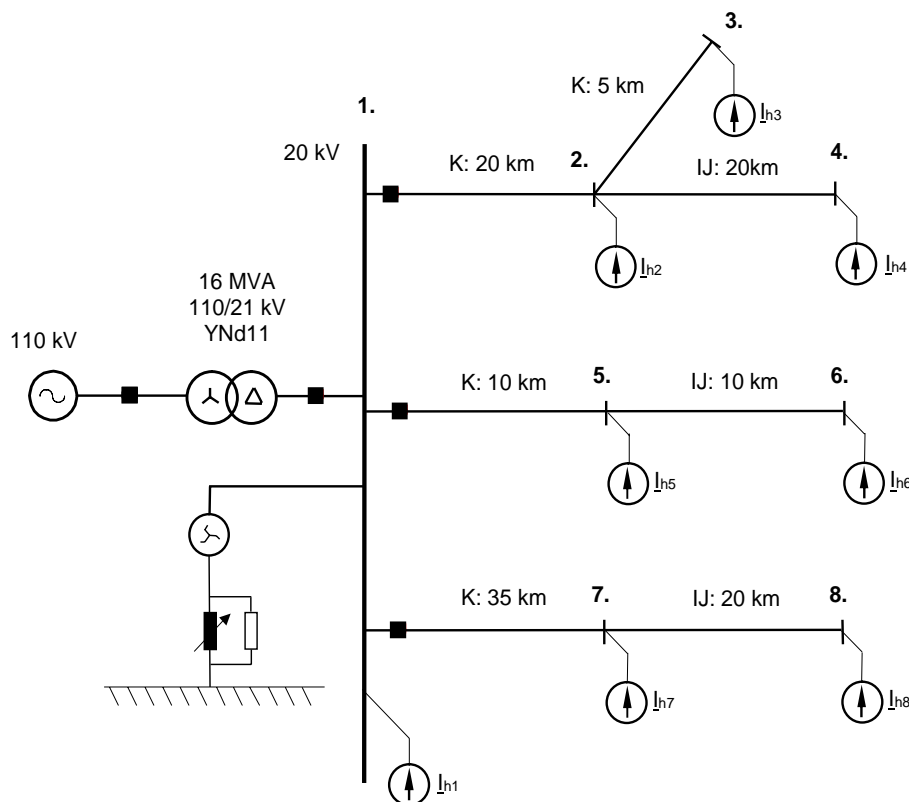
2.5 Sekaverkon tarkastelu

Sekaverkko sisältää sekä kaapeloituja johto-osuuksia että ilmajohto-osuuksia. Yleensä siirtymä ilmajohtoverkosta kaapeliverkkoon tapahtuu sekaverkkovaiheen kautta. Haja-asutusalueilla suuri osa verkoista myös jää sekaverkoiksi, koska 100 % kaapelointi ei ole välttämättä kustannustehokkain ratkaisu. Kaapelointi alkaa tyypillisesti lähtöjen alkupäistä runkojohdoilta, koska siten saadaan nopeimmin ja kustannustehokkaimmin parannettua verkon luotettavuutta. Siitä kaapelointi etenee yleensä kohti lähdön loppupäätä ja myös osa haaroista kaapeloidaan. Haja-asutusalueilla lähtöjen loppupäät ja osa haaroista saattavat jäädä ilmajohto-osiksi. Ilmajohto-osia voi jäädä myös kaapeloitujen johto-osien keskelle esimerkiksi varasyöttötilanteissa. Sekaverkko sisältää sekä kaapeliverkolle että ilmajohtoverkolle

tyypillisiä vikoja. Kaapeloiduilla johto-osilla verkon maadoitukset ketjuuntuvat, mikä pienentää kunkin maadoituksen resuloivaa impedanssia. Kaapeliosuuksilla osa maasulkuvirrasta palaa kaapelin maadoitetuissa rakenteissa ja vain osa kulkee maan kautta synnyttäen maadoitusjännitteen. Ilmajohto-osilla maadoitukset ovat pistemäisiä, mikä tulee ottaa huomioon kosketusjännitetarkasteluissa, koska reduktiovaikutusta ei ole.

Keskijännitteisen sekaverkon jännitesäröjen ja maasulkusuureiden harmonisten taajuuksien syntymiseen vaikuttavia tekijöitä ja syntymekanismeja tarkasteltiin 8 solmupisteen esimerkkiverkon avulla. Myös verkon kuormitukset mallinnettiin, mutta kuormittamattoman verkon tarkastelu edustaa jännitesärön kannalta pahinta tilannetta. Kompensointikuristimen vaikutus 250 Hz:llä on hyvin pieni. Sammutetun sekaverkon 8 solmupisteen mallin (kuva 2.6) rakenne oli seuraava.

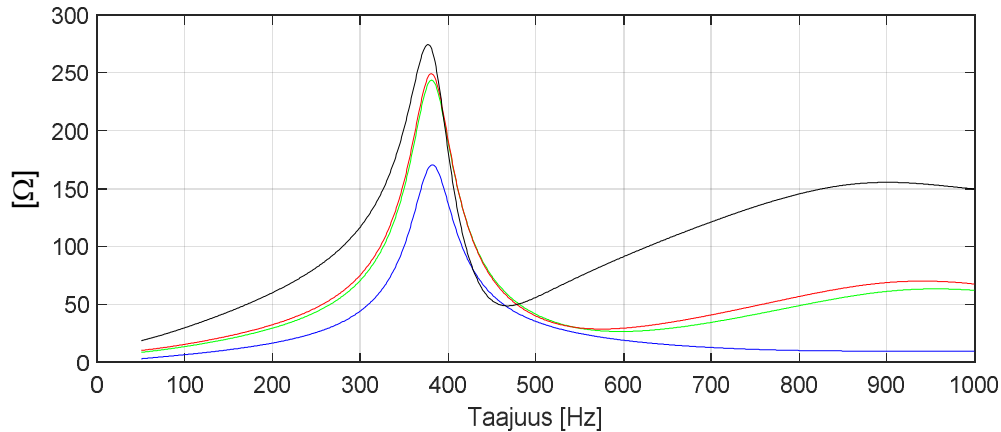
- Kaapelia yhteensä 70 km, AHXAMK-WP 3x95
- Ilmajohtoa yhteensä 50 km, Pigeon
- Keskitetty kompensointi ja lisäkuormitusvastus (5A)
- Vakiosuuruinen harmoninen virtainjektio yksittäiseen tai useampaan solmupisteeseen
- Yksivaiheinen maasulku haluttuun verkon solmupisteeseen



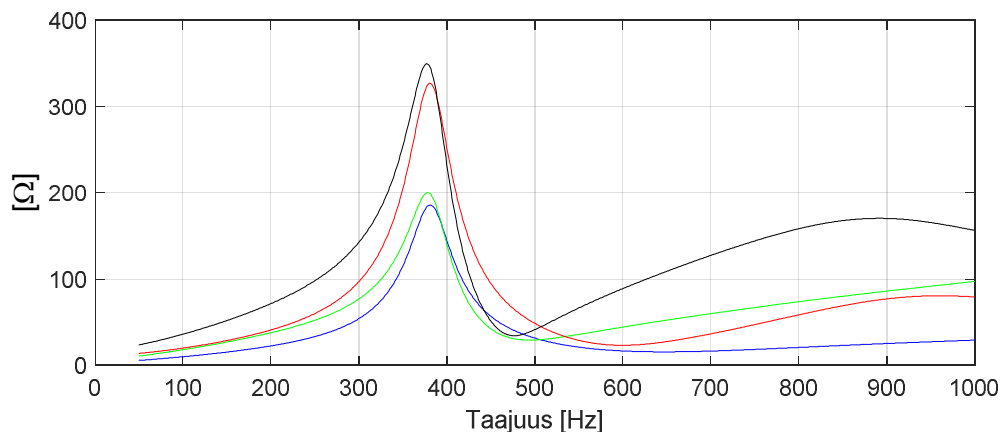
Kuva 2.6 Simuloinneissa käytetyn sekaverkon konfiguraatio.

2.5.1 Harmonisen virran kohtaama impedanssi ja jännitesärön muodostuminen sekaverkossa

Seuraavassa on tarkasteltu harmonisen virran kohtaamia impedansseja sekaverkossa. Verkon heterogeenisemmän rakenteen vuoksi myös harmonisen virran kohtaamat impedanssit vaihtelevat enemmän kuin vastaavassa kaapeliverkossa. Kuvassa 2.7 on esitetty solmupisteistä 1 – 4 näkyvät impedanssit ja kuvassa 2.8 solmupisteistä 5 – 8 näkyvät impedanssit taajuuden funktiona. Tarkastelu tehtiin kuormittamattomalle verkolle.



Kuva 2.7 Virran kohtaama impedanssi taajuuden funktiona solmupisteissä 1 (sin.), 2 (vihr.), 3 (pun.) ja 4 (musta).



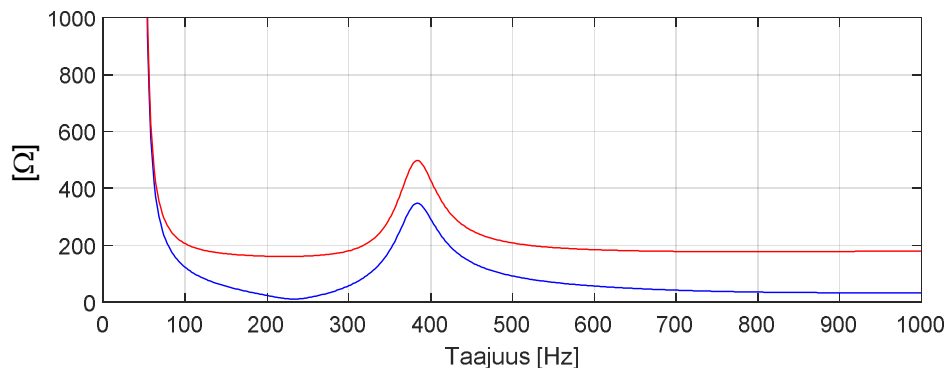
Kuva 2.8 Virran kohtaama impedanssi taajuuden funktiona solmupisteissä 5 (sin.), 6 (vihr.), 7 (pun.) ja 8 (musta).

Edellä olevista kuvista nähdään, että sähköaseman ja tarkastelupisteen väliset ilmajohto-osat kasvattavat merkittävästi harmonisen virran kohtaamaa impedanssia. Tarkastelussa käytettiin varsin suuripoikkipintaista ilmajohtoa (Pigeon), jonka poikkipinta on samaa suuruusluokkaa kaapelin kanssa (AHXAMK-WP 3x95). Käytännössä ilmajohtojen poikkipinnat ovat usein selvästi pienempiä kuin maakaapeleiden, jolloin niiden vaikutus harmonisten virtojen kohtaamaan impedanssiin on suurempi. Resonanssikohta osuu esimerkkiverkossa noin 375 Hz kohdalle. Resonanssikohtaan vaikuttavat kaapeli- ja ilmajohtopituuksien suhde eli kaapelointiaste, käytetyt poikkipinnat ja verkon konfiguraatio. Kuvan 2.1 kaapeliverkossa vastaava resonanssikohta osui noin 450 Hz kohdalle, mikä vastaa suunnilleen järjestysluvun 9. harmonista taajuutta. Varsinkin välillä 150 Hz – 350 Hz harmonisten virtojen kohtaamat impedanssit näyttäisivät olevan esimerkkiverkon mukaisessa sekaverkossa suurempia puhtaaseen kaapeliverkkoon verrattuna. Tämä tarkoittaa sitä, että jännitteiden säröytyminen on kaapeliverkkoon verrattuna suurempaa samansuuruisilla harmonisilla virroilla. Verkon resistiivinen kuormitus madaltaa impedanssikäyrien resonanssipeikkiä.

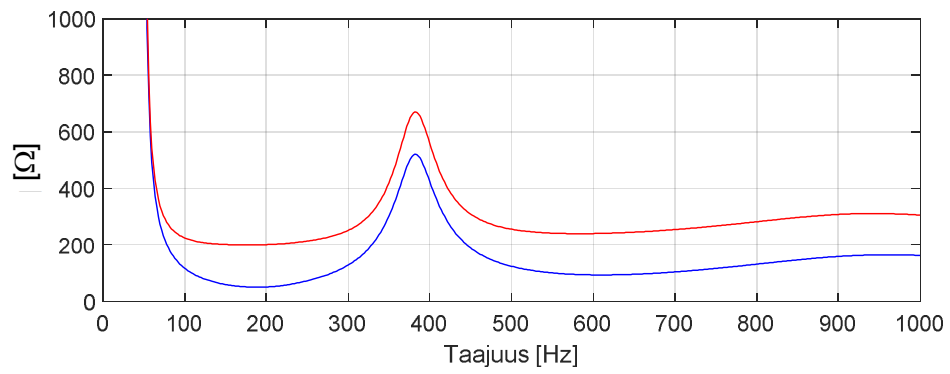
2.5.2 Maasulkuvirran kohtaama harmoninen kokonaisimpedanssi

Maasulkuvirran kohtaama kokonaisimpedanssia ja harmonisia vikavirtoja tarkasteltiin kuvan 2.6 mukaisessa verkossa. Kuvassa 2.9 on esitetty vikavirtapiirin impedanssit myötä-, vasta- ja nollaverkon sarjakytkennälle, kun impedanssien summaan on lisätty vikaresistanssin R_F arvo kolmella kerrottuna solmupisteissä 1 - 8. Vikaresistanssin arvot olivat 0 Ω ja 50 Ω .

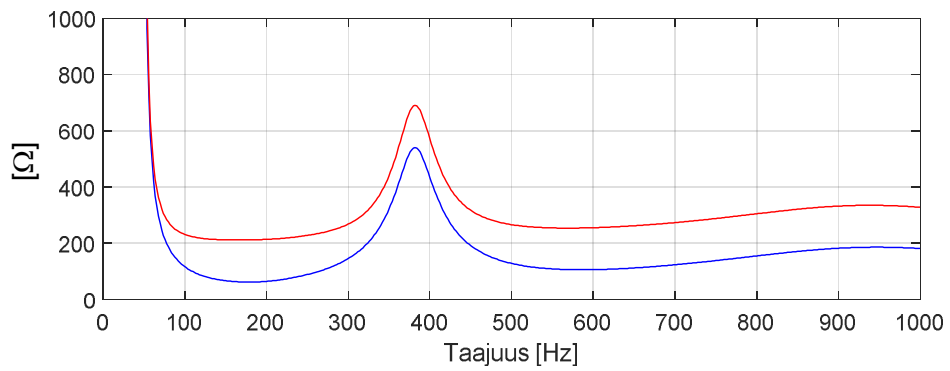
Solmupiste 1:



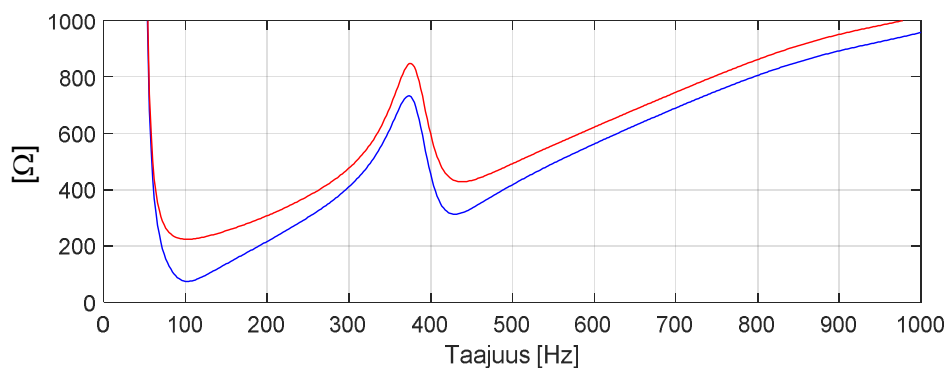
Solmupiste 2:



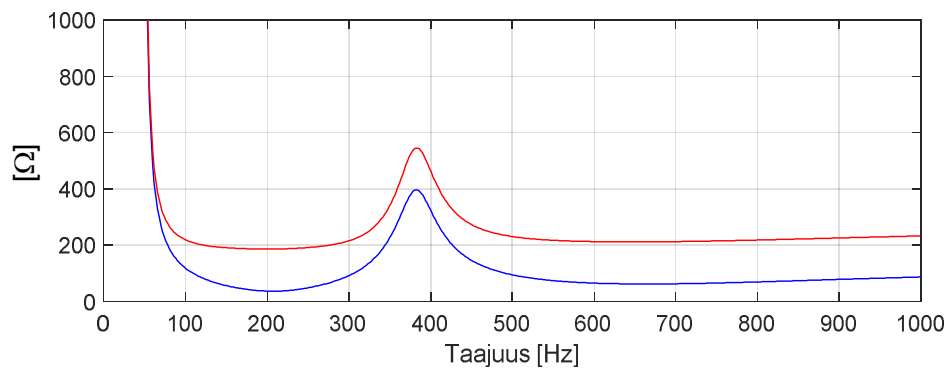
Solmupiste 3:



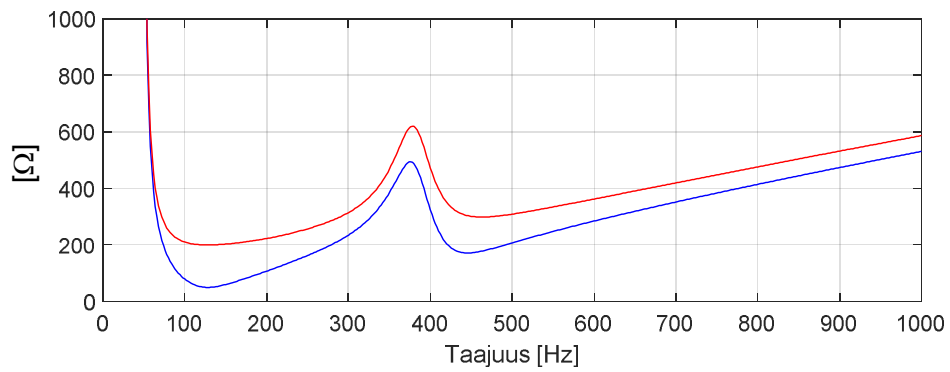
Solmupiste 4:



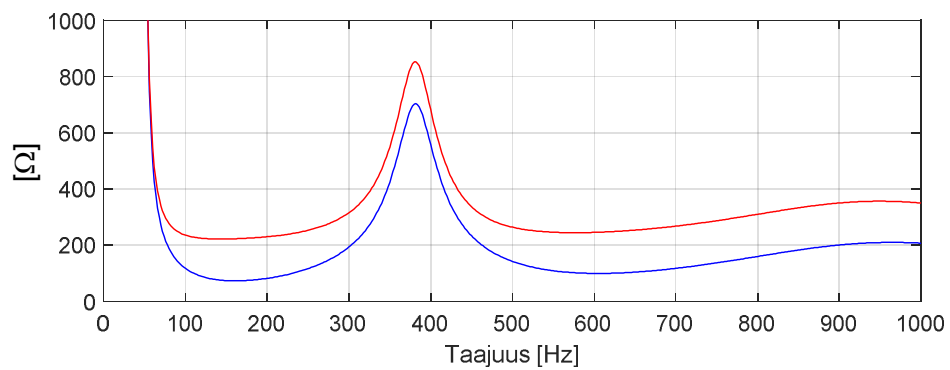
Solmupiste 5:



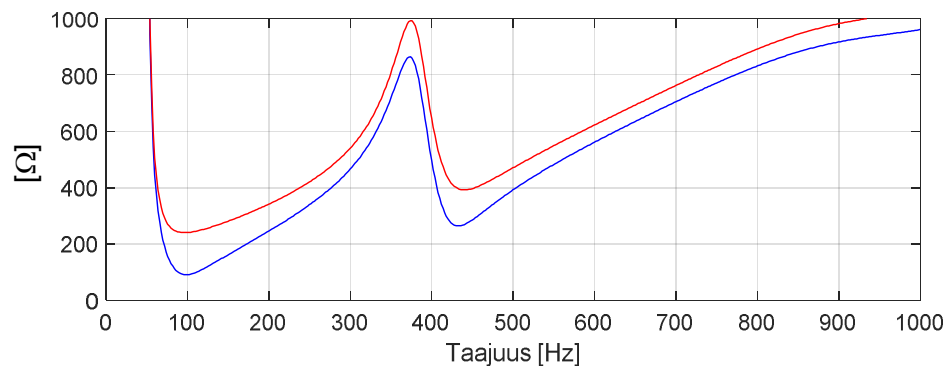
Solmupiste 6:



Solmupiste 7:



Solmupiste 8:



Kuva 2.9 Vikavirtapiirin impedanssit myötä-, vasta- ja nollaverkon sarjakytkennälle, kun impedanssien summaan on lisätty vikaresistanssi $R_F = 0 \Omega$ (sin.) ja $R_F = 50 \Omega$ kolmella kerrottuna (pun.) solmupisteissä 1 – 8.

Harmonisia impedansseja voidaan tarkastella myös laskennallisesti eri taajuuksilla. Taulukossa 2.5 on esitetty esimerkkiverkon (kuva 2.6) solmupisteiden myötä- ja nollaimpedanssit 250 Hz taajuudella sekä simuloituna että laskettuna. Jos verkkoon tehdään symmetrinen kolmivaiheinen 5 A, 250 Hz virtainjektio solmupisteeseen 1, saadaan taulukon 2.6 mukaiset 250 Hz jännitesäröt. Taulukossa 2.7 on esitetty vastaavat jännitesäröt, kun kolmivaiheinen 5 A, 250 Hz virtainjektio tehdään solmupisteeseen 8. Taulukossa 2.8 on esitetty jännitesäröt, kun kolmivaiheinen 1 A, 250 Hz virtainjektio tehdään kaikkiin kahdeksaan solmupisteeseen. Tarkastelu tehtiin kuormittamattomalle verkolle.

Taulukko 2.5 Esimerkkiverkon solmupisteiden myötä- ja nollaimpedanssit.

Solmupisteistä näkyvät impedanssit 250 Hz				
Solmupiste	Simuloitu		Laskettu	
	\underline{Z}_1 / Ω	\underline{Z}_0 / Ω	\underline{Z}_1 / Ω	\underline{Z}_0 / Ω
1	1,72 + j25,97	9,09 - j41,94	1,22 + j26,53	7,60 - j42,68
2	12,61 + j41,95	33,37 - j40,45	12,34 + j42,81	31,57 - j41,92
3	14,66 + j45,20	43,35 - j38,04	14,39 + j46,06	41,02 - j39,66
4	19,92 + j79,62	56,07 + j126,03	19,67 + j80,57	54,39 + j125,19
5	5,87 + j32,69	26,94 - j37,52	5,39 + j33,28	25,01 - j38,49
6	9,42 + j51,33	37,95 + j45,53	8,94 + j51,94	36,03 + j44,63
7	23,83 + j55,01	44,74 - j39,44	24,83 + j57,13	44,17 - j40,47i
8	31,30 + j92,81	67,72 + j127,01	32,34 + j95,03	67,29 + j126,64

Taulukko 2.6 Solmupisteiden jännitesäröt (250 Hz), kun solmupisteeseen 1 tehdään symmetrinen kolmivaiheinen 5 A, 250 Hz virtainjektio.

Solmupisteiden jännitesäröt 250 Hz (vaihe A)		
Solmupiste	U_{250} / V (simuloitu)	U_{250} / V (laskettu)
1	130,26	132,79
2	138,93	141,85
3	139,28	142,21
4	139,76	142,70
5	131,70	134,28
6	131,90	134,48
7	147,74	152,17
8	148,62	153,07

Taulukko 2.7 Solmupisteiden jännitesäröt (250 Hz), kun solmupisteeseen 8 tehdään symmetrinen kolmivaiheinen 5 A, 250 Hz virtainjektio.

Solmupisteiden jännitesäröt 250 Hz (vaihe A)		
Solmupiste	U_{250} / V (simuloitu)	U_{250} / V (laskettu)
1	148,61	153,07
2	158,51	163,52
3	158,91	163,94
4	159,46	164,49
5	150,27	154,79
6	150,49	155,02
7	300,49	313,32
8	488,69	501,90

Taulukko 2.8 Solmupisteiden jännitesäröt (250 Hz), kun kaikkiin solmupisteisiin solmupisteeseen tehdään symmetrinen kolmivaiheinen 1 A 250 Hz virtainjektio.

Solmupisteiden jännitesäröt 250 Hz (vaihe A)		
Solmupiste	U_{250} / V (simuloitu)	U_{250} / V (laskettu)
1	221,50	226,58
2	277,80	284,09
3	281,88	288,20
4	317,31	323,72
5	237,03	242,22
6	256,22	261,43
7	301,99	312,41
8	341,55	352,12

Taulukosta 2.7 nähdään selvästi virtainjektion sijainnin vaikutus. Pitkän ilmajohto-osan takana kolmivaiheinen 5 A, 250 Hz virtainjektio johtaa merkittävästi suurempaan jännitesäröön kyseisellä lähdöllä. Vaikutus ei ole kovin suuri rinnakkaisilla lähdöillä tai sähköasemalla. Mikäli virtainjektio tehdään tasaisesti kaikkiin solmupisteisiin, myös jännitesäröt jakautuvat tasaisemmin verkkoon, mutta tällöinkin suurimmat säröt ovat pisimpien ilmajohto-osien takana.

2.5.3 Maasulkuvirran ja nollajännitteen särö

Kuvan 2.6 esimerkkiverkossa 250 Hz harmoninen jännitesärö muodostettiin tekemällä symmetrinen kolmivaiheinen 1 A, 250 Hz virtainjektio kaikkiin kahdeksaan solmupisteeseen. Tämän seurauksena harmoninen särö vaihteli verkon solmupisteissä suunnilleen välillä 2 - 3 % taulukon 2.8 mukaisesti. Taulukossa 2.9 on esitetty solmupisteiden 50 Hz ja 250 Hz maasulkuvirrat. Taulukosta nähdään, että 5. harmoninen maasulkuvirta riippuu vian sijainnista selvästi enemmän kuin perustajuinen vikavirta, joka pysyy lähes samana eri solmupisteissä. 50 Hz ja 250 Hz nollajännitteet, kun maasulku on solmupisteessä 3, on esitetty taulukossa 2.10.

Taulukko 2.9 Esimerkkiverkon maasulkuvirrat.

Maasulkuvirrat 50 Hz / 250 Hz				
Solmupiste	Simuloitu		Laskettu	
	I_{E50} / A	I_{E250} / A	I_{E50} / A	I_{E250} / A
1	14,77	36,28	14,21	40,75
2	14,23	11,08	13,70	11,57
3	14,20	9,20	13,68	9,63
4	14,34	3,17	13,83	3,21
5	14,65	14,22	14,11	15,18
6	14,70	4,84	14,18	4,93
7	13,77	7,65	13,23	7,69
8	13,88	3,01	13,36	3,07

Taulukko 2.10 Esimerkkiverkon nollajännitteet, kun maasulku on solmupisteessä 3.

Nollajännitteet 50 Hz / 250 Hz				
Solmupiste	Simuloitu		Laskettu	
	$U_{0,50} / V$	$U_{0,250} / V$	$U_{0,50} / V$	$U_{0,250} / V$
1	11676	138,8	11674	145,5
2	11910	161,6	11892	168,9
3	11925	177,3	11904	183,2
4	11916	163,5	11899	170,9
5	11711	140,2	11708	146,9
6	11712	140,6	11710	147,4
7	12086	149,7	12081	160,3
8	12092	151,5	12087	162,2

Nollajännitteen 250 Hz säröt jäävät pienemmiksi, kuin vikaa edeltäneen tilan jännitteessä. Tämä johtuu siitä, että esimerkkiverkon kaltaisessa sekaverkossa komponentti-impedanssien summa on suurempi kuin nollaimpedanssi. Tämä suhde vaihtelee verkon eri solmuissa. Pitkien ilmajohto-osien takana nollareaktanssi on positiivinen, mikä kasvattaa komponentti-impedanssien summaa ja näkyy pieninä 250 Hz maasulkuvirran arvoina solmuissa 4, 6 ja 8.

2.5.4 Johtopäätöksiä sekaverkon tarkastelusta

Tietyn suuruinen 250 Hz virtainjektio sähköaseman kiskoon tehtynä aiheuttaa pienemmän jännitesärön kuin sähköisesti kauemmaksi verkkoon tehty vastaava virtainjektio. Myös silloin, kun harmoniset virtainjektiot tehdään tasaisesti koko verkkoon, sähköaseman särö jää esimerkkiverkossa hieman pienemmäksi. Pelkästään sähköasemalla mitattua harmonista jännitesäröä ei voida siten pitää pahimman tilanteen mukaisena. Käytännössä harmonisten virtainjektioiden suuruudet, sijainnit ja ajallinen vaihtelu vaikuttavat vastaaviin jännitesäröihin ja niiden vaihteluun verkossa. Vaikka harmoninen virtainjektio tehdään ainoastaan yhteen verkon kohtaan, sen vaikutus näkyy melko tasaisesti koko verkossa. Tämä johtuu suurelta osin päämuuntajassa tapahtuvasta harmonisesta jännitehäviöstä.

Harmoniset 250 Hz maasulkuvirrat ovat silti yleensä suurempia lähempänä sähköasemaa, koska vikavirran näkemä kokonaisimpedanssi on pienempi. Siksi 250 Hz harmoninen maadoitusjännite on usein suurimmillaan sähköaseman läheisyydessä. Toisin kuin 50 Hz:llä, 250 Hz maasulkuvirta voi vaihdella merkittävästi vikakohdan sijainnista riippuen. Sekaverkoissa ilmajohto-osat ja niiden pistemäiset maadoitukset sijaitsevat usein lähtöjen loppupäissä olevilla johto-osilla. Siksi maadoitusjännitteen kannalta haasteellisimpia kohtia saattavat olla lähtöjen loppupäissä sijaitsevien ilmajohto-osien alkupään maadoitukset, joissa reduktiokerroin on 1.

Nollajännitteen 250 Hz särön suuruus suhteessa vikaa edeltäneen tilan jännitteeseen riippuu verkon kaapelointiasteesta sekä luonnollisesti myös johtovakioista. Kokonaiskaapelointiaste vaikuttaa siihen, kuinka hyvin nollareaktanssi kompensoi vastakkaismerkkisiä myötä- ja vastareaktansseja. Kaapeliverkossa nollajännitteen 250 Hz särö voi olla suurempi kuin vikaa edeltäneen tilan jännitteessä. Esimerkkiverkon kaltaisessa sekaverkossa vikavirran näkemä nollaimpedanssi on pienempi kuin komponentti-impedanssien summa. Siksi myös nollajännitteen särö jää pienemmäksi vikaa edeltäneen tilan jännitteeseen nähden.

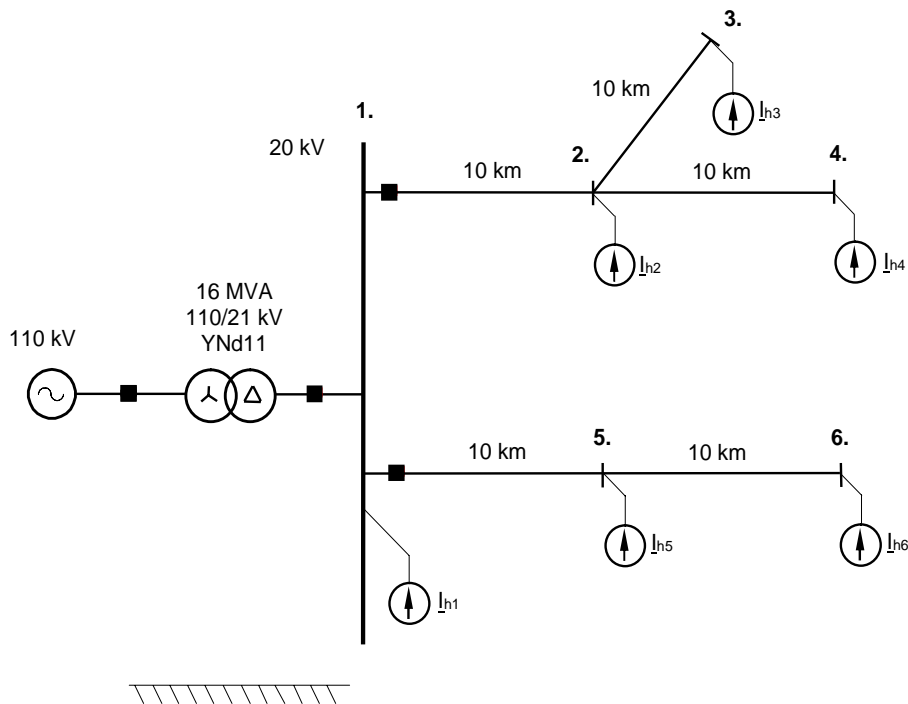
2.6 Ilmajohtoverkon tarkastelu

Haja-asutusalueiden verkkojen laajamittaisen kaapeloinnin seurauksena puhtaita ilmajohtoverkkoja on enää suhteellisen vähän. Vertailun vuoksi seuraavassa on tarkasteltu

kuitenkin myös puhdasta ilmajohtoverkkoa. Harmonisia taajuuksia ajatellen ilmajohtoverkon impedanssisuhteet ovat hyvin erilaiset kaapeliverkkoon verrattuna. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että maakaapelin kapasitanssi on noin 30 - 50 kertainen ilmajohtoon verrattuna. Tämä vaikuttaa merkittävästi verkon eri kohdista näkyviin komponentti-impedansseihin.

Maasta erotetun ilmajohtoverkon jännitesäröjen ja maasulkusuureiden harmonisten taajuuksien syntyminen vaikuttavia tekijöitä ja syntymekanismeja tarkasteltiin 6 solmupisteen verkon avulla. Konfiguraatio on sama kuin kaapeliverkkoa kuvaavassa esimerkiverkossa. Ilmajohtoverkon 6 solmupisteen mallin (kuva 2.10) rakenne oli seuraava.

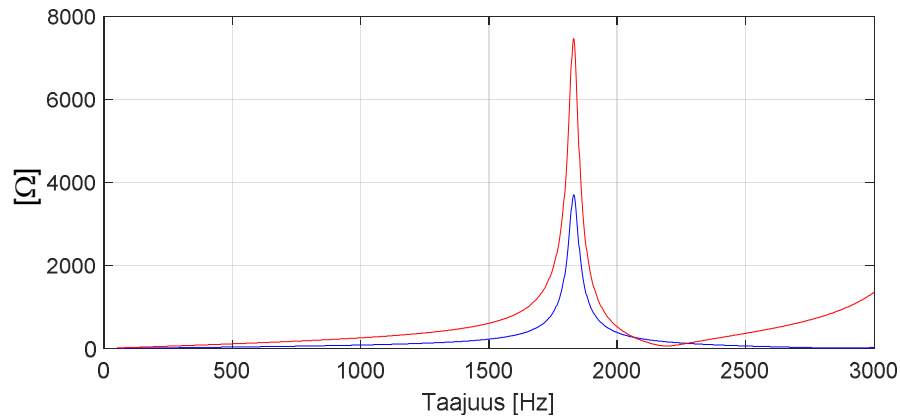
- Kaksi keskijännitelähtöä, yhteensä 50 km ilmajohtoa, johdinlaji Pigeon
- Maasta erotettu verkko
- Vakiosuuruinen harmoninen virtainjektio yksittäiseen tai useampaan solmupisteeseen
- Yksivaiheinen maasulku haluttuun verkon solmupisteeseen



Kuva 2.10 Simuloinneissa käytetyn ilmajohtoverkon konfiguraatio.

2.6.1 Harmonisen virran kohtaama impedanssi ja jännitesärön muodostuminen ilmajohtoverkossa

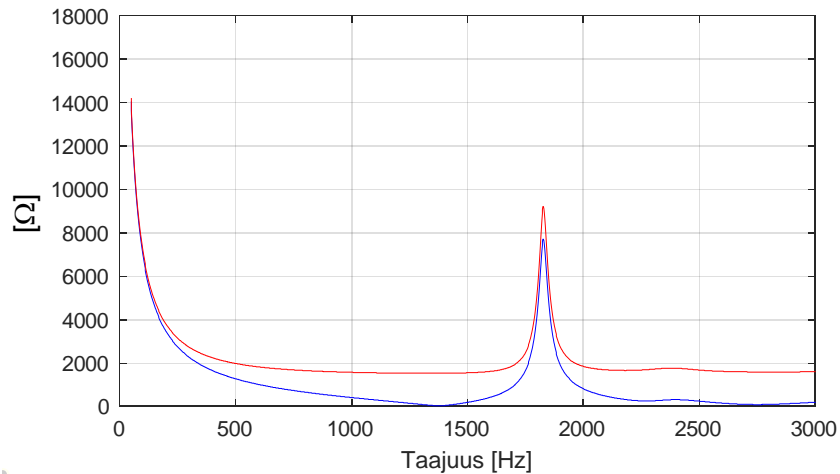
Kuvassa 2.11 on esitetty harmonisen virran kohtaama impedanssi taajuuden funktiona verkon solmupisteissä 1 ja 6 eli sähköasemalla ja ilmajohtolähdön loppupäässä, kun verkko on kuormittamaton. Ilmajohtoverkossa impedanssikäyrän resonanssipiste osuu tyypillisesti hyvin korkealle taajuudelle ollen esimerkiverkossa 1800 Hz paikkeilla. Näin korkea taajuus ei ole enää relevantti harmonisten virtojen kannalta. Esimerkiksi 450 Hz taajuudella impedanssi jää selvästi pienemmäksi kuin kaapeliverkossa. Alhaisemilla harmonisilla taajuuksilla impedanssit ovat kuitenkin samoissa suuruusluokissa kaapeliverkon kanssa.



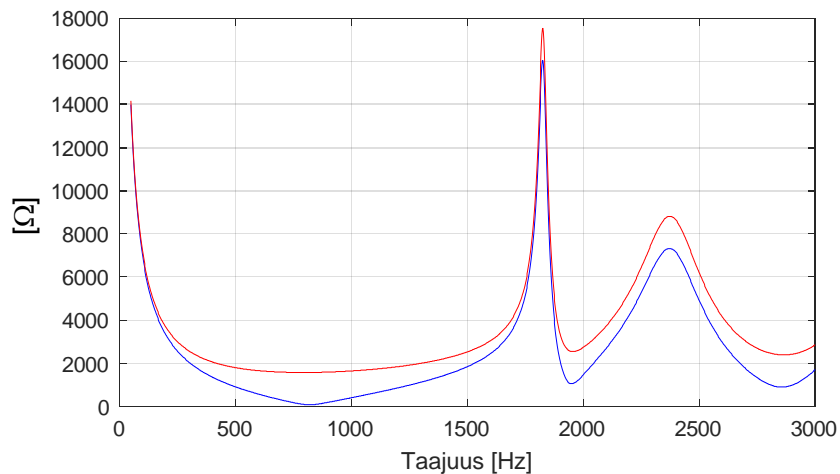
Kuva 2.11 Harmonisen virran kohtaama impedanssi solmupisteissä 1 (sin.) ja 6 (pun.).

2.6.2 Maasulkuvirran kohtaama harmoninen kokonaisimpedanssi

Seuraavassa on tarkasteltu harmonisen vikavirran kohtaamia kokonaisimpedansseja ilmajohtoverkossa (kuva 2.10). Kuvassa 2.12 on esitetty solmupisteestä 1 näkyvät impedanssit ja kuvassa 2.13 solmupisteestä 6 näkyvät kokonaisimpedanssit taajuuden funktiona.

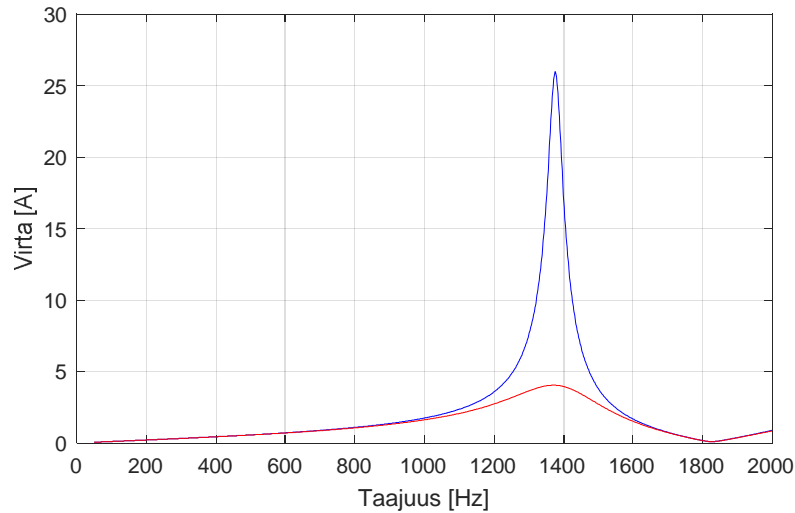


Kuva 2.12 Maasulkuvirran kohtaama impedanssi esimerkkiverkon solmupisteessä 1, kun vikaresistanssi on 0Ω (sin.) ja 500Ω (pun.).

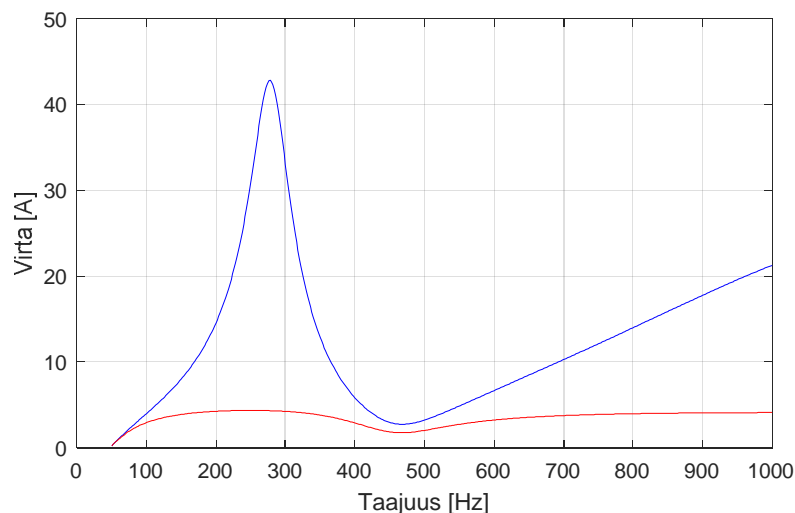


Kuva 2.13 Maasulkuvirran kohtaama impedanssi esimerkkiverkon solmupisteessä 6 kun vikaresistanssi on 0Ω (sin.) ja 500Ω (pun.).

Kuvissa 2.14 ja 2.15 on havainnollistettu harmonisen maasulkuvirran muodostumista maasta erotetussa ilmajohtoverkossa ja kompensoidussa kaapeliverkossa käyttäen edellä esiteltyjä esimerkkiverkkoja. Jännitesäröksi on oletettu 2 % läpi koko taajuusalueen. Ilmajohtoverkossa harmonisen maasulkuvirran muodostuminen taajuusalueella 50 – 450 Hz on suhteellisen vähäistä. Harmonisen vikavirran suuruus hyvin korkeilla yli 1000 Hz taajuuksilla ei ole relevantti, koska jännitteessä ei yleensä ole merkittävästi näin korkeita taajuuksia. Kaapeliverkossa taajuusalueella 150 – 350 Hz harmonista maasulkuvirtaa syntyy enemmän. Vikaresistanssin kasvattaminen pienentää harmonista maasulkuvirtaa merkittävästi.



Kuva 2.14 Harmoninen maasulkuvirta ilmajohtoverkon solmupisteessä 1, kun jännitesäröksi on oletettu 2 % läpi koko taajuusalueen. Vikaresistanssi on 0 Ω (sin.) ja 50 Ω (pun.).



Kuva 2.15 Harmoninen maasulkuvirta kaapeliverkon solmupisteessä 1, kun jännitesäröksi on oletettu 2 % läpi koko taajuusalueen. Vikaresistanssi on 0 Ω (sin.) ja 50 Ω (pun.).

Taulukossa 2.11 on esitetty esimerkkiverkon (kuva 2.10) solmupisteiden myötä- ja nollaimpedanssit 250 Hz taajuudella simuloituna ja laskettuna. Taulukoissa 2.12 – 2.14 on tarkasteltu esimerkkinä tilannetta, jossa tehdään symmetrinen kolmivaiheinen 2 A, 250 Hz virtainjektio esimerkkiverkon kaikkiin solmupisteisiin. Taulukossa 2.12 on esitetty verkon normaalitilan jännitesäröt ja taulukossa 2.13 50 Hz ja 250 Hz maasulkuvirrat eri solmupisteissä. Taulukossa 2.14 on esitetty 50 Hz ja 250 Hz nollajännitteet verkon eri solmupisteissä, kun maasulku on solmupisteessä 3.

Taulukko 2.11 Verkon solmupisteiden myötä- ja nollaimpedanssit.

Solmupisteistä näkyvät impedanssit 250 Hz				
Solmupiste	Simuloitu		Laskettu	
	\underline{Z}_1 / Ω	\underline{Z}_0 / Ω	\underline{Z}_1 / Ω	\underline{Z}_0 / Ω
1	0,18 + j16,06	33,94 - j2779,71	0,22 + j16,14	29,83 - j2781,21
2	3,78 + j34,96	34,81 - j2779,59	3,82 + j35,04	30,71 - j2781,09
3	7,32 + j53,60	43,74 - j2709,66	7,37 + j53,70	39,66 - j2711,09
4	7,32 + j53,60	43,74 - j2709,66	7,37 + j53,70	39,66 - j2711,09
5	3,74 + j34,81	38,92 - j2744,36	3,78 + j34,89	34,82 - j2745,82
6	7,27 + j53,45	47,90 - j2674,22	7,32 + j53,54	43,83 - j2675,62

Taulukko 2.12 Solmupisteiden jännitesäröt (250 Hz) ilmajohtoverkossa.

Solmupisteiden jännitesäröt 250 Hz (vaihe A)		
Solmupiste	U_{250} / V (simuloitu)	U_{250} / V (laskettu)
1	193,9	194,8
2	308,2	309,3
3	346,1	347,3
4	346,1	347,3
5	269,6	270,7
6	307,5	308,6

2.6.3 Maasulkuvirran ja nollajännitteen särö

Taulukossa 2.13 on esitetty esimerkkiverkon solmupisteiden 50 Hz ja 250 Hz maasulkuvirrat ($R_F = 1 \Omega$), kun jokaiseen solmupisteeseen tehdään symmetrinen kolmivaiheinen 2 A, 250 Hz virtainjektio. Solmupisteiden nollajännitteet, kun maasulku on solmupisteessä 3, on esitetty taulukossa 2.14. Jos vikaresistanssi on 1Ω , nollajännitteen 250 Hz särö vikakohdassa on hieman suurempi kuin vikapaikan jännitesärö ennen vikaa. Tämä johtuu siitä, että myötä- ja vastareaktanssit kompensoivat hieman nollareaktanssia maasulkuvirran kohtaamassa kokonaisimpedanssissa. 250 Hz maasulkuvirrat ovat erittäin pieniä, mikä johtuu suurista nollaimpedanssin arvoista. Muiden komponentti-impedanssien vaikutus on suhteellisen vähäinen. Laajassa ilmajohtoverkossa nollaimpedanssit pienenevät selvästi esimerkkiverkkoon verrattuna kapasitanssien kasvaessa.

Taulukko 2.13 Esimerkkiverkon maasulkuvirrat.

Maasulkuvirrat 50 Hz / 250 Hz				
Solmupiste	Simuloitu		Laskettu	
	I_{E50} / A	I_{E250} / A	I_{E50} / A	I_{E250} / A
1	2,55	0,21	2,55	0,21
2	2,55	0,34	2,55	0,34
3	2,56	0,39	2,56	0,40
4	2,56	0,39	2,56	0,40
5	2,55	0,30	2,55	0,30
6	2,56	0,35	2,56	0,36

Taulukko 2.14 Esimerkkiverkon nollajännitteet, kun maasulku on solmupisteessä 3.

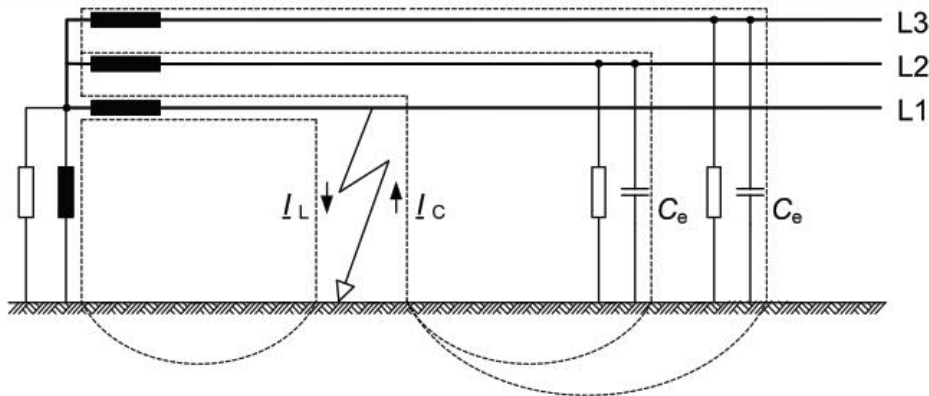
Nollajännitteet 50 Hz / 250 Hz				
Solmupiste	Simuloitu		Laskettu	
	$U_{0,50} / V$	$U_{0,250} / V$	$U_{0,50} / V$	$U_{0,250} / V$
1	11974	376,1	11975	377,9
2	11967	370,3	11967	372,1
3	11952	360,1	11953	361,6
4	11968	371,5	11969	373,2
5	11979	379,5	11980	381,5
6	11981	380,7	11982	382,6

Ilmajohtoverkolle on tyypillistä, että 250 Hz taajuudella verkon eri kohdista näkyvät nollaimpedanssit ovat hyvin suuria muihin komponentti-impedansseihin verrattuna. Tämä vielä korostuu esimerkkiverkossa, jonka sähköinen laajuus on varsin pieni. Koska myötä- ja vastareaktanssien etumerkit ovat vastakkaisia nollaimpedanssin etumerkkiin verrattuna, ne kompensoivat hieman tosiaan maasulkuvirran kohtaamassa kokonaisimpedanssissa. Siksi nollajännitteen särö vikakohdassa on hieman suurempi kuin vikaa edeltäneen tilan jännitteessä, jos vikaimpedanssi on pieni. Suuresta nollaimpedanssista johtuen harmoninen 250 Hz maasulkuvirta jää hyvin pieneksi. Vikavirtaa pienentää myös se, että esimerkkiverkon sähköinen laajuus oli pieni todellisiin ilmajohtoverkkoihin verrattuna.

3 HARMONISEN MAASULKUVIRRRAN ARVIOINTI TODELLISESSA VERKOSSA

Standardissa SFS 6001 on esitetty suurjännitejärjestelmien maasulkuvirtojen keskeiset komponentit (kaava 3.1). Sammutetun järjestelmän maasulun osalta voidaan soveltaa kuvaa 3.1 [1]. Sammutetun järjestelmän jäännösmaasulkuvirta sisältää kompensoinnin vinovirityksestä aiheutuvan reaktiiviseen komponentin lisäksi vikavirran resistiivisen virtakomponentin sekä harmonisen vikavirtakomponentin I_H , joka sisältää harmonisia taajuuksia. Vikavirran resistiivinen komponentti on määritelty sisältyvän virtaosoittimiin I_C ja I_L , jotka ovat verkon maasulussa tuottama kapasitiivinen virta ja kompensointikuristimen tai -kuristimien tuottama induktiivinen virta, vastaavasti. Mikäli maasulun jäännösvirran tarkkaa arvoa ei ole käytettävissä, sen arvoksi voidaan standardin mukaan olettaa 10 % arvosta I_C [1]. Seuraavassa tarkastellaan maasulkuvirran harmonisia yliaaltokomponentteja.

Maasulkuvirran kompensointi on yleensä viritetty 50 Hz taajuudella lähelle resonanssia haluttuun kompensointiasteeseen. Siksi kompensoinnilla ei ole merkittävää vaikutusta perustaajuutta merkittävästi korkeammilla taajuuksilla harmonisen vikavirran suuruuteen. 50 Hz:n taajuudella kompensointikelan induktiivinen reaktanssi X_L säädetään vastaamaan suunnilleen maakapasitanssien edustamaa kapasitiivista reaktanssia X_C . Jos kompensointi on resonanssissa 50 Hz:n taajuudella, kompensointiaste olisi 150 Hz taajuudella yhdeksäsosa eli noin 11 % ja 250 Hz taajuudella 4 %. Korkeammilla harmonisilla taajuuksilla kompensoinnin vaikutus vikakohdan harmoniseen vikavirtaan muuttuu siis hyvin pieneksi. Siksi kompensoitu verkko vastaa likimain maasta erotettua verkkoa korkeammilla harmonisilla taajuuksilla.



Kuva 3.1 Maasulkuvirta sammutetussa järjestelmässä [1].

Jäännösmaasulkuvirta I_F voidaan laskea seuraavalla kaavalla.

$$|I_F| = |I_{RES}| = \sqrt{|I_C + I_L|^2 + |I_H|^2} \quad (3.1)$$

Kompensoitujen järjestelmien, joissa on kompensointikelat, maadoitusjännitteeseen ja kosketusjännitteisiin liittyvä virta maasulussa on seuraava [1].

$$I_E = r * \sqrt{I_L^2 + I_{RES}^2} \quad (3.2)$$

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

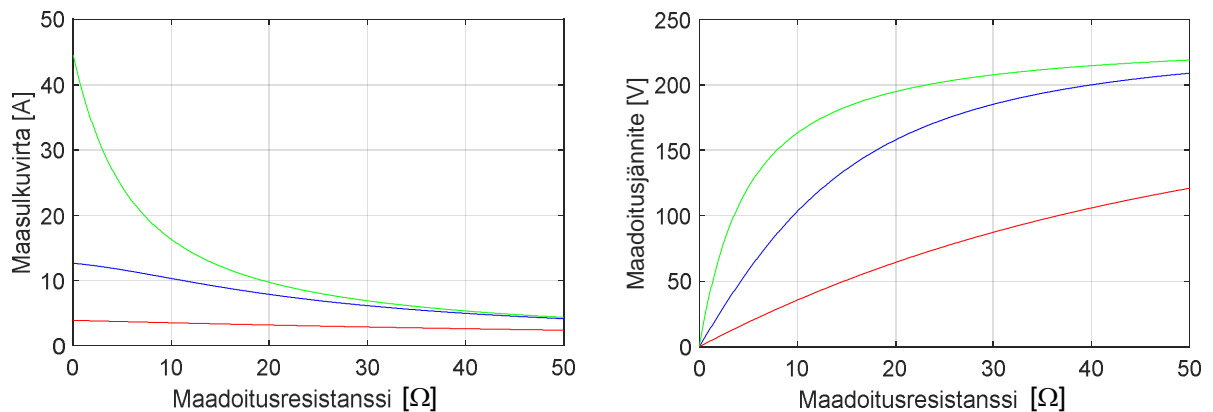
$$I_E = r * I_{RES} \quad (3.3)$$

Kaapeloidussa verkossa, jossa maadoitukset ketjuuntuvat, reduktiokerroin pienentää maahan menevää vikavirtaa ja siten maadoitusjännitettä. Virtareduktiokerroin vaikuttaa maahan menevään virtaan myös korkeammilla taajuuksilla ja on erilainen riippuen taajuudesta. Maakaapelin virtareduktiokerrointa on tarkasteltu luvussa 4.

Harmonista taajuutta h vastaava vikavirtakomponentti I_{Fh} voidaan laskea alla olevasta kaavasta 3.4, kun jännite \underline{U}_h on järjestysluvultaan h , vikakohdassa ennen vikaa vallinnut harmoninen yliaaltojännite. Impedanssit \underline{Z}_{h1} , \underline{Z}_{h2} ja \underline{Z}_{h0} ovat vikakohdasta nähdyt harmoniset myötä-, vasta- ja nollaimpedanssit vastaten järjestyslukua h . Vikaimpedanssi \underline{Z}_F oletetaan olevan taajuudesta riippumaton maadoitusresistanssi. Seuraavassa tarkastelussa ei oteta huomioon virtareduktiota vaan tarkastellaan kokonaismaasulkuvirtaa I_{Fh} . Harmonisia vikavirtakomponentteja voidaan arvioida, jos vikakohdan harmoninen jännitesärö tunnetaan mittaustietona ja vikakohdasta näkyvä kokonaisimpedanssi voidaan määrittää. Mittaus voi olla jatkuva tai harmoninen jännitesärö voi perustua pitkäkestoiseen seurantamittaukseen, jonka perusteella saadaan joko keskimääräinen tai suurin mahdollinen jännitesärö.

$$I_{Fh} = \frac{3\underline{U}_h}{\underline{Z}_{h1} + \underline{Z}_{h2} + \underline{Z}_{h0} + 3\underline{Z}_F} \quad (3.4)$$

Sähköturvallisuuden kannalta harmoninen maadoitusjännite on keskeinen. Harmonisen maasulkuvirran synnyttämä maadoitusjännite ei ole suurimmillaan harmonisen virran ollessa suurimmillaan (Kuva 3.2). Harmonisen maadoitusjännitteen suurin arvo saavutetaan vasta suuremmilla maadoitusresistanssin arvoilla, vaikka maasulkuvirta onkin suurimmillaan pienillä maadoitusresistanssin arvoilla. Kuvassa 3.2 on esitetty maasulkuvirran harmoniset virtakomponentit ja harmoninen maadoitusjännite kuvan 2.6 sekaverkossa sähköaseman läheisyydessä 150 Hz, 250 Hz ja 350 Hz taajuuksilla. Harmoninen jännitesärö kaikilla taajuuksilla oletettiin olevan 2 % ja 50 Hz laskentajännite oli 20,6 kV. Reduktiokerroin oli 1.



Kuva 3.2 Harmoninen maasulkuvirta ja maadoitusjännite esimerkkiverkossa 150 Hz (sin.), 250 Hz (vihr.) ja 350 Hz (pun.) taajuuksilla, kun jännitesärö on 2 % ja vika sähköasemalla.

3.1 Haasteet ja reunaehdot

Mikäli myös maasulkuvirran harmoniset virtakomponentit halutaan ottaa huomioon kokonaisvikavirran ja maadoitusjännitteen arvioinnissa perustuen esimerkiksi kaavaan 3.4, haasteena ovat mm. seuraavat seikat:

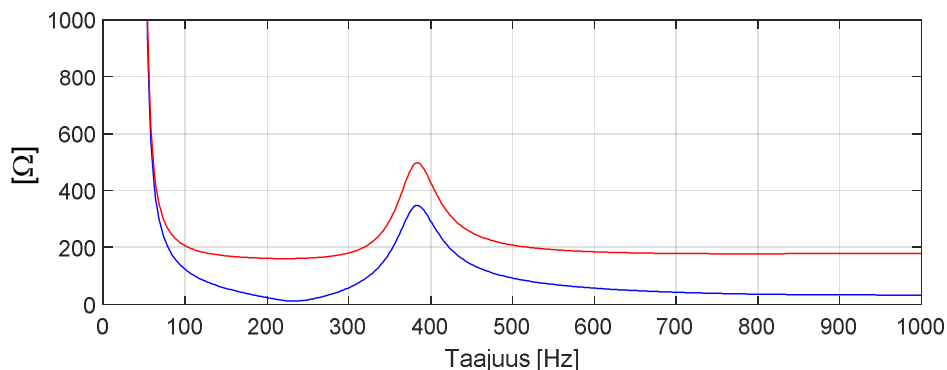
- Harmonisten virtainjektioiden suuruuksia tai sijainteja ei tunneta verkon normaalitilassa.
- Harmoniset virrat vaihtelevat verkossa ajallisesti kuormitusten mukana.
- Harmonisia jännitesäröjä verkon eri osissa ei tunneta, koska verkoissa ei ole riittävän kattavasti pysyviä jännitteenlaatumittauksia.
- Käytössä oleva verkostolaskenta ei mahdollista laskentaa harmonisilla taajuuksilla.

Vikavirran harmonisten taajuuksien huomiointi maadoitusjännitteen arvioinnissa edellyttää yksinkertaistuksia ja oletuksia. Tehtyjen mittausten ja kenttäkokeiden perusteella kaapeli- ja sekaverkoissa 150 Hz, 250 Hz ja 350 Hz näyttäisivät olevan keskeisimmät harmoniset taajuudet. Siksi niitä voidaan pitää myös maadoitusjännitteiden keskeisimpinä taajuuksina.

Perustaajuuden maadoitusjännitteen osalta kosketusjännitevaatimusten lähtökohtana on pahimman tilanteen määrittely, joka perustuu suurimman mahdollisen maasulkuvirran laskemiseen [1]. Suurin vikavirta saadaan vikaimpedanssin arvolla nolla. Maadoitusjännitteen määrittämisessä käytetään kuitenkin todellista maadoitusresistanssin arvoa.

3.2 Suurimman harmonisen maadoitusjännitteen arviointi

Kuvassa 3.3 on esitetty esimerkki maasulkuvirran kohtaamasta kokonaisimpedanssista sekaverkossa taajuuden funktiona. Kuvasta nähdään, että taajuus vaikuttaa merkittävästi kyseisiin impedansseihin. Kokonaisimpedanssit ovat pienimmillään välillä 100 – 300 Hz sekä suurimmilla yli 500 Hz taajuuksilla. Verkoissa esiintyvät yli 500 Hz taajuiset harmoniset jännitteet ovat tyypillisesti pieniä ja siten yli 500 Hz taajuisien maadoitusjännitteiden merkitys on pieni. Verkolle ominaiset resonanssitaajuudet vaikuttavat olennaisesti kyseisiin kokonaisimpedansseihin. Vaikka maasulkuvirran kohtaama kokonaisimpedanssi ja resonanssitaajuus riippuvat verkkotyypistä (kaapeli-, seka- ja ilmajohtoverkko), järjestyslukujen 3., 5. ja 7. harmoniset taajuudet näyttäisivät olevan keskeisimmät. Soveltaen kaavaa 3.4 ja kuvan 3.3 impedanssikäyrää, 250 Hz maadoitusjännite kyseisessä verkon kohdassa voidaan määrittää halutulla 250 Hz jännitesärön arvolla ja 50Ω maadoitusresistanssilla. Esimerkiksi 240 V jännitesäröllä 250 Hz maadoitusjännitteeksi saadaan $(3 \times 240 \text{ V} / 163 \Omega) \times 50 \Omega = 221 \text{ V}$. Jos reduktiokerroin on alle 1, maadoitusjännite pienenee vastaavasti. Näin suurella maadoitusresistanssilla maadoitusjännite on vain 19 V pienempi kuin verkon vaihejännitteessä esiintynyt 240 V yliaaltojännite.



Kuva 3.3 Vikavirtapiirin impedanssit myötä-, vasta- ja nollaverkon sarjakytkennälle, kun impedanssien summaan on lisätty vikaresistanssi $R_F = 0 \Omega$ (sin.) ja $R_F = 50 \Omega$ kolmella kerrottuna (pun.).

Standardin SFS 6001 mukaan sammutetun verkon maadoitustarkasteluissa sovellettavia periaatteita ovat [1]:

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

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

$$|U_E| = |I_{RES}| \times |Z_E| = \sqrt{|I_C + I_L|^2 + |I_H|^2} \times |Z_E| \quad (3.5)$$

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

$$|U_E| = \sqrt{|U_{E1}|^2 + |U_{EH}|^2} \quad (3.6)$$

$$|U_{E1}| = |I_{RES1}| \times |Z_E| = \sqrt{|I_C + I_L|^2} \times |Z_E| \quad (3.7)$$

$$|U_{EH}| = |I_H| \times |Z_E| = \sqrt{\sum_{h \neq 1} I_{Eh}^2} \times |Z_E| = \sqrt{\sum_{h \neq 1} U_{Eh}^2} \quad (3.8)$$

Kaikkien haluttujen yliaaltojen summavaikutus maadoitusjännitteeseen voidaan periaatteessa laskea taajuus kerrallaan ja summaamalla edellä esitetyllä tavalla kaavojen 3.4 ja 3.6 – 3.8 mukaisesti. Oletetaan, että vikaimpedanssi Z_F on taajuudesta riippumaton maadoitusresistanssi R_F . Kosketusjännitevaatimusten kannalta vikakohdan harmoninen virta ja vikakohdassa sen johdosta esiintyvä maadoitusjännite ovat keskeisiä. Maadoitusjännite U_{Eh} voidaan laskea kullekin kertaluvun h yliaallolle erikseen seuraavan kaavan avulla.

$$U_{Eh} = \frac{3U_h \cdot R_F}{Z_{h1} + Z_{h2} + Z_{h0} + 3R_F} \quad (3.9)$$

Kaavan 3.9 nimittäjän impedanssien summan itseisarvo on aina suurempi kuin osoittajan termi $3R_F$. Siten vastaavan taajuinen maadoitusjännite U_{Eh} on aina pienempi kuin vikakohdan vikaa edeltänyt yliaaltojännite U_h . Summautuvassa maadoitusjännitteessä harmoniset yliaaltojännitteet ovat siis pienempiä kuin syöttävän verkon jännitteessä. Harmoniselle kokonaisjännitesärölle $THDu$ saadaan [3]:

$$THDu = \sqrt{\sum_{h \neq 1} U_h^2} > \sqrt{\sum_{h \neq 1} U_{Eh}^2} \quad (3.10)$$

Standardissa SFS-EN 50160 kokonaisjännitesärön laskennassa otetaan huomioon kaikki harmoniset jännitteet kertaluvusta 2 kertalukuun 40 asti [3]. Maadoitusjännitetarkastelussa voitaisiin huomioida ainoastaan vikavirran harmonisen sisällön kannalta keskeiset taajuudet, esimerkiksi kertaluvut 3., 5. ja 7. Syöttävän verkon kokonaisjännitesäröä $THDu$ voitaisiin mahdollisesti käyttää turvallisella puolella olevana ylärajaestimaattina, mikäli harmonisia yliaaltojännitteitä otetaan huomioon maadoitusjännitteiden laskennassa. Tällöin maadoitusjännitteelle U_E saadaan:

$$U_E = |U_E| < \sqrt{|U_{E1}|^2 + |THDu|^2}, \quad (3.11)$$

missä U_{E1} on perustaajuisen maasulkuvirran synnyttämä maadoitusjännite. Tällöin maadoitusjännitetarkastelu voisi mennä seuraavasti [2]:

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

$$2. \quad U_E = \sqrt{|U_{E1}|^2 + |U_{EH}|^2} \quad (3.12)$$

$$3. \quad U_{E_{max}} \approx \sqrt{|U_{E1_{max}}|^2 + THDu^2} \quad (3.13)$$

$$4. \quad U_{E1_{max}} \approx \sqrt{U_{E_{max}}^2 - THDu^2} \quad (3.14)$$

Tällöin sallittu perustaajuinen maadoitusjännite U_{E1max} saisi olla enintään sallittu kokonaismaadoitusjännite U_{Emax} vähennettynä jännitesäröllä $THDu$. Tällöin harmoninen särö $THDu$ pienentäisi suurinta sallittua 50 Hz maadoitusjännitettä. Menetelmään sisältyy oletus, että sallituille harmonisille kosketusjännitteille voidaan soveltaa samaa käyrää kuin perustaajuudella, jolloin eri taajuiset maadoitusjännitteet ovat verrannollisia toisiinsa [1]. Mikäli reduktiokerroin halutaan ottaa huomioon, maadoitusjännitekomponentit U_{Emax} ja $THDu$ pitää kertoa arvioituilla reduktiokertoimen arvolla. Virtareduktio riippuu myös taajuudesta, joten yksittäisten harmonisten vikavirtakomponenttien reduktiokertoimet ovat erilaiset.

Vaihtoehtoisesti sallittu kokonaismaadoitusjännite U_{Emax} voitaisiin määrittellä suurimman jännösvirran I_{RES_max} ja maadoitusimpedanssin Z_E avulla kaavan 3.15 mukaisesti. Tällöin $THDu$:ta voitaisiin käyttää suoraan maadoituskohtien harmonisten maasulkuvirtojen arviointiin.

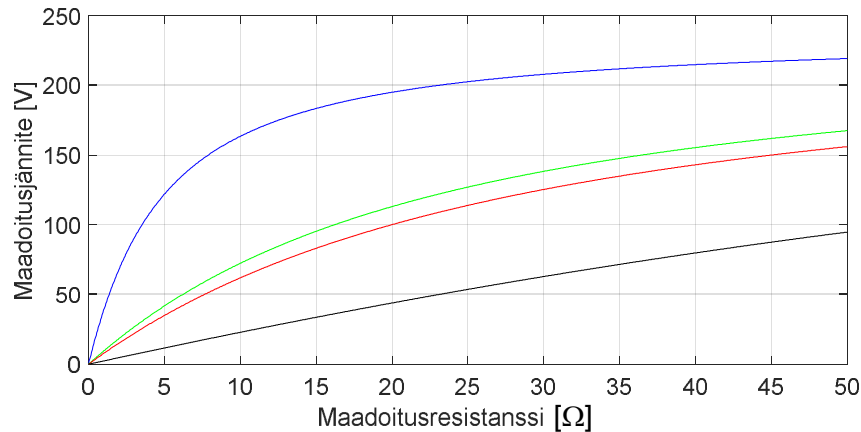
$$U_{Emax} \approx |I_{RES_max}| \times Z_E \approx \sqrt{|L_C + L_L|^2 + \left(\frac{THDu}{Z_E}\right)^2} \times Z_E \quad (3.15)$$

Edellä esitettyjen menetelmien ja niihin sisältyvien oletusten käyttökelpoisuuden arviointi edellyttäisi kattavampia tarkasteluja oikeissa verkoissa. Keski-jänniteverkoissa ei ole yleensä pysyvästi asennettuja, riittävän kattavia sähkölaatumittauksia. Siksi verkon eri osissa normaalikäytön aikana esiintyviä harmonisia jännitesäröjä ei voida käyttää harmonisen maadoitusjännitteen arvioinnissa. Verkon jännitteet mitataan tyypillisesti syöttävällä sähköasemalla. Mikäli sähköasemalla ei ole harmonisten jännitteiden mittausta, se olisi helpointa järjestää sinne. Tällöin sähköaseman normaalitilan aikaisia harmonisia jännitteitä voitaisiin käyttää maasulunaikaisen suurimman maadoitusjännitteen arviointiin. Sähköaseman jännitesärö ei välttämättä edusta verkon suurinta yliaaltojännitettä. Kaapeliverkon ja sekaverkon tarkasteluiden perusteella ainakin 250 Hz harmoninen maasulkuvirta näyttäisi olevan tyypillisesti suurimmillaan sähköasemalla, koska komponentti-impedanssien summa on tyypillisesti pienimmillään. Siten sähköaseman jännitesäröä voitaisiin käyttää harmonisen maadoitusjännitteen ylärajaestimaattina.

Toinen vaihtoehto verkon harmonisten jännitesäröjen tai kokonaissärön määrittämiseen olisivat laajemmat seurantamittaukset verkoissa. Laskennassa käytettävä harmoninen jännitesärö voisi perustua joko jatkuvaan tai pitkäkestoiseen seurantamittaukseen, jonka perusteella voitaisiin määrittää arvio joko suurimmalle mahdolliselle tai keskimääräiselle harmoniselle jännitesärölle. Jompaakumpaa arvoa voisi käyttää harmonisen maadoitusjännitteen määrittämiseen soveltaen kaavaa 3.9 tai likimääräistä kaavaa 3.15.

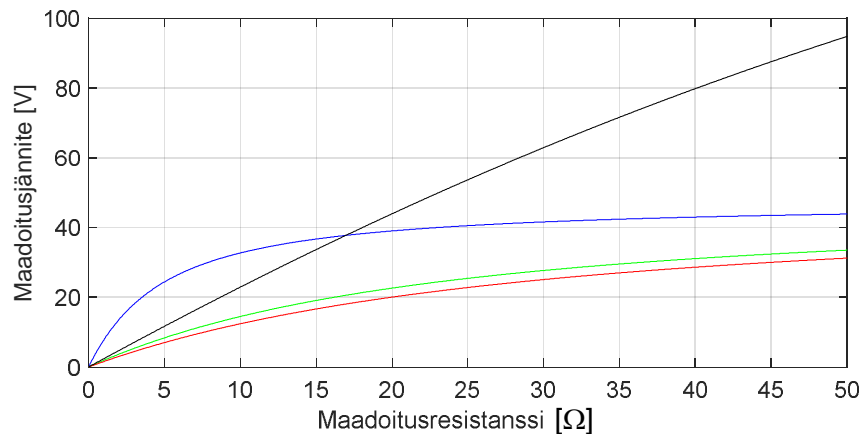
Tehtyjen tarkastelujen perusteella suurimmat harmoniset vikavirrat mitataan usein lähempänä sähköasemaa, koska vikavirran näkemä kokonaisimpedanssi on pienempi, vaikka jännitesärö olisikin pienempi kuin kauempana verkossa. Jos samansuuruinen harmoninen virtainjektio tehdään sähköasemalle tai kauemmaksi keski-jännitelähdölle, sen aikaansaama jännitesärö on suurempi sähköisesti kauempana verkossa. Jos kyseiseen kohtaan syntyy maasulku, myös vikavirran näkemä kokonaisimpedanssi on suurempi. Tämä kompensoi suuremman jännitesärön vaikutusta. Sähköasemalla mitattua jännitesäröä voisi olla perusteltua käyttää pahimman tilanteen harmonisen maadoitusjännitteen ylärajaestimaattina, vaikka se ei edustaisikaan suurinta harmonista säröä koko verkossa.

Jos voidaan olettaa, että harmoniset maasulkuvirrat ovat suurimmillaan sähköasemalla tai sen läheisyydessä, sähköasemalla mitattua harmonista kokonaissäröä $THDu$ voitaisiin pitää maadoitusjännitteen ylärajaestimaattina. Tällaisen menetelmän tarkkuus olisi ehkä paras kaapeliverkossa, koska komponentti-impedanssien summa on pienimmillään. Haasteena on varsinkin sekaverkossa se, että harmoniset maasulkuvirrat ovat pienimmillään pitkiä ilmajohto-osuuksia sisältävien lähtöjen lopussa. Vaikka harmoninen jännitesärökin voi olla lähdön lopussa isompi, pienestä vikavirrasta johtuen sähköaseman vikaa edeltäneen tilan jännitesärö voi johtaa turhan suureen maadoitusjännitteen arviointiin lähdön lopussa. Menetelmä voisi johtaa turhan suureen varmuusmarginaaliin. Tätä on havainnollistettu kuvassa 3.4, jossa on esitetty kuvan 2.6 esimerkiverkon 250 Hz maadoitusjännitteet reduktiokertoimella 1 solmupisteissä 1 – 4, kun vikakohdan jännitesärö on 2 % ja laskentajännite 20,6 kV.



Kuva 3.4 250 Hz maadoitusjännite kuvan 2.6 mukaisen sekaverkon solmupisteissä 1 (sin.), 2 (vihr.), 3 (pun.) ja 4 (musta), kun jännitesärö on 2 % kaikissa solmupisteissä.

Lähtöjen alkuosat ovat usein kaapelia, jolloin virtareduktio pienentää maadoitusjännitettä ja lähtöjen loppuosat ovat usein ilmajohtoa, jossa reduktiokerroin on 1. Kuvan 3.4 laskentajännitteellä kahden prosentin jännitesärö 250 Hz taajuudella tarkoittaa noin 238 V jännitettä. Jos sitä käytettäisiin suoraan 250 Hz maadoitusjännitteen ylärajana, oltaisiin kaikkien solmupisteiden osalta turvallisella puolella. Sähköisesti kaukana sähköasemalta olevissa ilmajohtoverkon solmupisteissä varmuusmarginaali muodostuisi kuitenkin suhteellisen suureksi. Pitkien ilmajohto-osien takana kokonaisimpedanssit ovat 250 Hz taajuudella selvästi suuremmat kuin lähtöjen alkupään kaapeliosuuksilla. Jos kaapeliosuuksilla sovellettaisiin reduktiokertoimia, tilanne tasoittuisi huomattavasti. Tällöin maadoitusjännitteen kaavan 3.9 laskentajännite \underline{U}_h kerrotaisiin reduktiokertoimella kaapeliosuuksilla. Tällöin myös referenssinä käytettävä sähköaseman jännitesärö pitäisi kertoa samalla reduktiokertoimella, kun tarkastellaan kaapeliosuuksien maadoituksia. Taajuuden vaikutusta reduktiokertoimeen on tarkasteltu kohdassa 4.2.4. Esimerkiksi 2 % jännitesärö sähköasemalla edustaisi reduktiokertoimella 0,2 noin 48 V maadoitusjännitettä kaapeliosuuksilla. Ilmajohto-osilla reduktiokerroin olisi luonnollisesti 1. Kuvassa 3.5 on esitetty vastaavat maadoitusjännitteet, mutta kaapeliosuuksien solmuissa 1, 2 ja 3 on sovellettu reduktiokerrointa 0,2. Kuvista voidaan päätellä, että suurin maadoitusjännite onkin lähdön lopussa olevan pitkän ilmajohto-osan alussa ensimmäisellä maadoituksella, jossa reduktiokerroin on 1 ja maadoitusjännitekäyrä lähes sama kuin kuvan 3.4 solmupisteen 2 käyrä. Tällöin pitäisi varautua yli 150 V maadoitusjännitteeseen suurilla maadoitusresistansseilla.



Kuva 3.5 250 Hz maadoitusjännite kuvan 2.6 mukaisen sekaverkon solmupisteissä 1 (sin.), 2 (vihr.), 3 (pun.) ja 4 (musta), kun jännitesärö on 2 % kaikissa solmupisteissä ja solmupisteissä 1, 2 ja 3 reduktiokerroin on 0,2.

4 MAAKAPELIN VIRTAREDUKTIOKERROIN

Ilmajohtoverkon maadoitukset ovat yleensä erillismaadoituksia, jolloin kaikki maasulkuvirta kulkee maadoituksen kautta maahan. Kaapeloidussa keskijänniteverkossa maadoitukset kytkeytyvät kaapeleiden maadoitettujen osien, kuten kosketussuojien ja maadoitusköysien kautta toisiinsa. Säteiläisen kaapeloidun keskijännitelähdön maadoitukset ovat ketjuuntuneet, mikä pienentää olennaisesti yksittäisen maadoituksen resuloivaa maadoitusimpedanssia [5]. Suurempien kaupunkien kaapeloidut keskijänniteverkot ovat rakenteeltaan usein silmukoidumpia sisältäen myös enemmän maadoitusyhteyksiä eri solmupisteiden välillä. Vaikka verkon käyttötapa onkin säteiläinen, maadoitusverkko on silmukoitu. Mikäli laajalle maadoitusverkolle asetetut ehdot täyttyvät, kosketusjännitteitä ei tarvitse tarkastella samalla tavoin kuin esimerkiksi ketjuuntuneiden maadoitusten tapauksessa.

Suurimman kosketusjännitteen määrittäminen perustuu vikakohtassa esiintyvään suurimpaan maadoitusjännitteeseen [1]. Maakaapeleiden metallivaipat ja mahdollinen keskusköysi osallistuvat vikavirtojen johtamiseen, eli osa virtapiirin maasulkuvirrasta kulkee niiden kautta. Maadoitusjännitteen kannalta on olennaista, kuinka suuri osa yksivaiheisen maasulun vikavirrasta kulkee maadoituksen kautta maahan ja kuinka suuri osa palaa kaapelin maadoitettujen rakenteiden kautta. Kolmivaihejohtoon reduktiokerroin r on maavirran suhde päävirtapiirin vaihejohtimien nollavirtojen summaan ($r = I_E / 3I_0$) pisteessä, joka sijaitsee kaukana maasulkukohdasta ja asennuksen maadoitusjärjestelmästä. Maavirta I_E on se osa maasulkuvirrasta, joka aiheuttaa maadoitusjännitteen [1].

Maakaapelin virtareduktiokerroin määritellään maadoitukseen menevän virran ja kokonaismaasulkuvirran suhteena, kun johtavat kosketussuojat ja mahdollinen keskusköysi on maadoitettu kaapelin molemmissa päissä merkityksettömän pienen maadoitusresistanssin kautta [7]. Maadoitusresistanssilla 0Ω saadaan suurin reduktiokertoimen arvo, joka on turvallisella puolella kosketusjännitetarkasteluissa. Ilman maadoitusresistanssia, kaapelin reduktiokerroin on kaapelin pituudesta riippumaton. Käytännössä maadoitusresistanssin arvo on aina nolaa suurempi. Reduktiokertoimen arvoon sisältyy myös vaihejohtimien ja maadoitettujen vaippojen välisen induktiivisen kytkeytymisen vaikutus. Vaihejohtimien ja kosketussuojien välinen keskinäisimpedanssi pienentää maan tai maadoitusjärjestelmän kautta kulkevaa maasulkuvirtaa.

Yksivaiheisen maasulun aikana maahan menevä virta synnyttää maadoitusjännitteen, josta osa esiintyy kosketusjännitteenä. Tämä maadoitusjännite on suoraan verrannollinen maadoituksen kautta maahan menevään virtaan. Kaapeleiden reduktiokertoimet tulisi tuntea, jotta sähköturvallisuuden kannalta keskeisiä kosketusjännitteitä voitaisiin arvioida tarkemmin. Jos verkon ja maadoitusten suunnittelu perustuu todellista olennaisesti suurempiin reduktiokertoimiin, maadoitusjärjestelmästä tulee parempi kuin kosketusjännitevaatimukset edellyttävät ja sen rakentamisesta aiheutuu ylimääräisiä kustannuksia. Jos käytetään todellista pienempiä reduktiokertoimia, kosketusjännitevaatimukset eivät välttämättä toteudu.

Laaja maadoitusjärjestelmä on yhtenäinen maadoitusjärjestelmä, joka on toteutettu kytkemällä yhteen paikalliset maadoitusjärjestelmät. Yhteenkytkettyjen maadoitusjärjestelmien läheisyys varmistaa sen, ettei vaarallisia kosketusjännitteitä esiinny. Kaupunkialueilla turvallisuusmääräykset tulevat usein täytetyksi, jos maadoitusverkko voidaan määritellä laajaksi maadoitusverkoksi. Kaapeliverkon jakelumuuntamoiden paikalliset maadoitukset yhdistyvät kosketussuojien ja maadoitusköysien kautta. Verkon silmukkamaisen rakenteen takia myös maadoitusjärjestelmästä tulee silmukoitu. Laajasta maadoitusverkosta huolimatta kaupunkialueillakin pitää varmistaa, että maadoitusjännite pysyy alle 160 V ja siksi reduktiokertoimillakin on vaikutusta. Haja-asutusalueilla sijaitsevilla verkoissa tilanne on erilainen. Sekaverkoissa on ilmajohto-osuuksia, jotka sisältävät erillismaadoituksia. Erillismaadoituksen tapauksessa reduktiokerroin r saa arvon yksi. Kaapeliosuuksien ketjuuntuvia maadoituksia ei voida käsitellä laajana maadoitusverkkona, jolloin kosketusjännitevaatimusten toteutuminen maasulkutilanteissa pitää voida osoittaa.

4.1 Virtareduktiokertoimeen vaikuttavat tekijät

Seuraavassa tarkastelussa maavirran ja kokonaismaasulkuvirran suhteesta käytetään yksinkertaisuuden vuoksi nimitystä reduktiokerroin kaapelin päiden maadoitusresistanssien suuruudesta riippumatta. Suomalaiset sähköverkkoyhtiöt käyttävät runsaasti AHXAMK-WP ja AHXAMK-W tyyppin maakaapeleita, joissa kosketussuojat ja mahdollinen keskusköysi muodostavat galvaanisen paluureitin vikavirralle. Kaapelityypistä riippuen kosketussuojia voi olla kolme tai yksi, joko jokaisen vaiheen ympärillä erikseen tai yksi kaikkien kolmen vaiheen ympärillä.

Voimakaapelin reduktiokertoimella tarkoitetaan yleensä kuvan 4.1 d) mukaista tilannetta, jossa maasulku sijaitsee tarkasteltavan kaapeliosuuden takana. Tällöin maasulkuvirrasta I_1 siirtyy osa I_3 kulkemaan kaapelin vaippaa pitkin [6]. Tällöin virtareduktiokerroin ilmaisee maan kautta kulkevan virran suhteen kokonaismaasulkuvirtaan. Jos maakaapelissa syntyy maasulku, vikavirran jakautuminen maadoitettujen rakenteiden ja maan kesken riippuu mm.

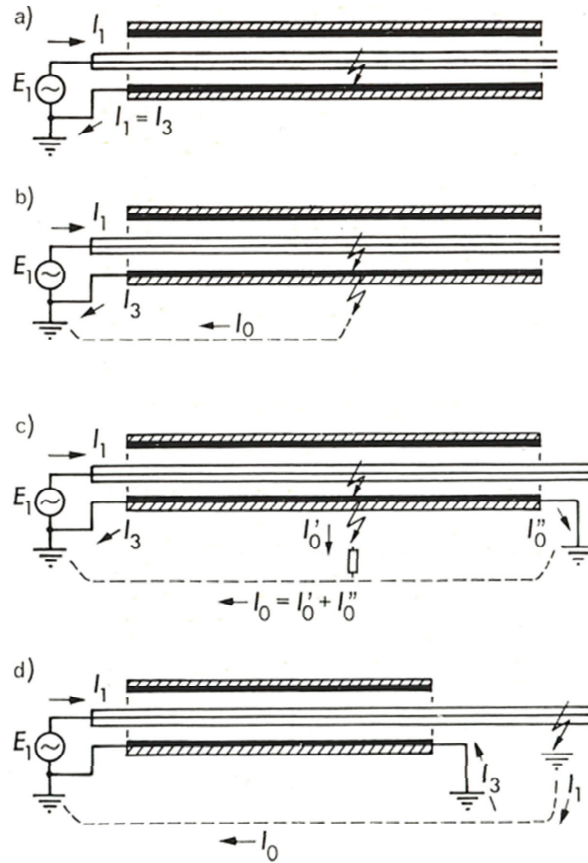
- kaapelin maadoituksista sekä muista maadoituksista, joihin kaapelin maadoitukset kytkeytyvät,
- vikapaikan sijainnista,
- kaapelin metallivaipan impedanssista,
- mahdollisesta keskusköydestä tai erillisestä maadoitusköydestä sekä niiden impedansseista,
- tarkasteltavan kaapelin pituudesta, mikäli maadoitusresistanssit ovat nolosta poikkeavia,
- maasulkuvirran taajuudesta (50 Hz ja harmoniset taajuudet) ja
- mahdollisen korroosiosuojan säilymisestä eheänä.

Yksittäisen maakaapelin reduktiokertoimeen vaikuttavat seuraavat tekijät:

- kaapelin tyyppi, esimerkiksi AHXAMK-WP, AHXAMK-W, AXAL-TT PRO
- kosketussuojan itseisimpedanssi maan vaikutus huomioiden,
- mahdollisen keskusköyden itseisimpedanssi maan vaikutus huomioiden,
- maaperän resistiivisyys,
- maadoitusresistanssit kaapeliyhteyden päissä,
- tarkasteltavan kaapelin pituus, jos maadoitusresistanssi on suurempi kuin 0Ω sekä
- keskinäisimpedanssit maan vaikutus huomioiden
 - kosketussuojan ja vaihejohtimen välillä,
 - kahden kosketussuojan välillä,
 - kosketussuojan ja toisen kaapelin vaihejohtimen välillä,
 - kosketussuojan ja keskusköyden välillä ja
 - vaihejohtimen ja keskusköyden välillä.

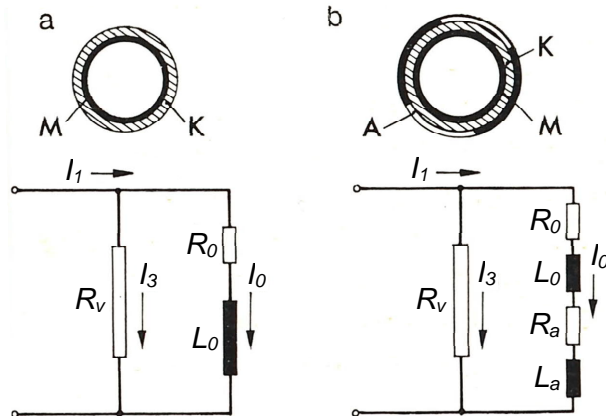
Kuvan 4.1 tapauksessa c) maasulku vaihejohtimesta kosketussuojaan ja edelleen maahan tapahtuu kaapeliosuuden syöttävän ja vastaanottavan pään välillä. Mikäli vikaresistanssi kosketussuojan ja maan välillä ja kaapelin päiden maadoitusresistanssit oletetaan nolaksi, tämä tilanne ei poikkea virtareduktion osalta juurikaan tapauksesta d). Nollaa suurempi vikaresistanssin arvo pienentää reduktiokerrointa, joka riippuu myös vikakohdan sijainnista alku- ja loppupään välillä. Erisuuruiset maadoitusresistanssit kaapelin eri päissä vaikuttavat myös jakosuhteeseen.

Kun maakaapelin maadoitukset kytkeytyvät kosketussuojien ja mahdollisen maadoitusköyden kautta verkon muihin maadoituksiin, myös reduktio muuttuu, koska resuloivat maadoitusresistanssit muuttuvat.



Kuva 4.1 Maakaapelin maasulkuvirran kulkureitit [6].

Viitteessä [6] on esitetty menetelmä kaapelin virtareduktiokertoimen määrittämiseksi. Menetelmä perustuu suoraan virranjakosuhteeseen kaapelin maadoitettujen osien ja maapiirin kesken, eikä ota huomioon edellä mainittuja keskinäisimpedansseja vaihejohtimen, metallivaipan ja keskusköyden välillä. Sijaiskytkennät on esitetty kuvassa 4.2.



Kuva 4.2 Kaapelin maasulkupiirin sijaiskytkentä, missä M on metallivaippa, K korroosiosuojakerros ja A armeerausvyöhyke [6].

R_v on kaapelin rinnankytkettyjen metallivaippojen ja armeerausten kytkentäresistanssi (50 Hz taajuudella suunnilleen sama kuin tasavirtaresistanssi), R_0 on maapiirin resistanssi, L_0 on maapiirin induktanssi, R_a on armeerauksen häviöitä edustava resistanssi ja L_a on armeerauksen induktanssi. Jos ajatellaan AHXAMK-W/WP tyyppin kaapeleita, olennaista on rinnankytkettyjen kosketussuojien ja mahdollisen keskusköyden impedanssi suhteessa maapiirin impedanssiin. Kuvan 4.2 mukaisessa tilanteessa reduktiokerroin voidaan laskea seuraavalla kaavalla [6].

$$r = \frac{I_0}{I_1} = \frac{R_v}{R_v + R_0 + R_a + j\omega(L_0 + L_a)} \quad (4.1)$$

Kun kosketussuojat ja mahdollinen keskusköysi on kytketty yhteen ja maadoitettu yhteyden molemmissa päissä, maadoituselektrodien ja maan väliset maadoitusresistanssit kytkeytyvät sarjaan maaperän resistanssin kanssa. Suurimmat arvot virtareduktiokertoimelle saadaan maadoitusresistanssin arvolla 0Ω . Koska ideaalisesti maadoitettu kaapeli ($R_E = 0 \Omega$) on teoreettinen, eikä sitä voida käytännössä saavuttaa, oletus liioittelee maassa palaavan virran osuutta. Kosketusjännitevaatimuksissa lähtökohtana on kuitenkin ns. pahimman tilanteen määrittely. Tällöin maadoituksen maadoitusjännite lasketaan suurimmalla maasulkuvirralla vastaten vikaresistanssin arvoa 0Ω . Myös kaapelin reduktiokertoimen suurin arvo on kosketusjännitteen kannalta turvallisella puolella oleva mitoitus. Joissain tapauksissa tämä voi johtaa kuitenkin melko suuriin varmuusmarginaaleihin.

Maaperän kosteuden suuri vaihtelu maadoituselektrodin ympärillä (hellekesä vs. sateinen loppusyksy tai loppukevät lumen/roudan sulamisen jälkeen) aiheuttaa sen, että myös maaperän resistiivisyys ρ_m voi vaihdella. Siksi myös maadoituselektrodin resistanssi esimerkiksi pylväs- ja puistomuuntamalla voi vaihdella jonkin verran maaperän kosteuden mukaan. Muutos näkyy myös virtareduktiokertoimessa, koska kaapelin maadoitettujen osien impedanssiin kosteus ei vaikuta.

Kaapeleiden reduktiokertoimia voidaan laskea useilla eri kombinaatioilla, joissa kertoimeen vaikuttavat tekijät vaihtelevat. Alla on lueteltu esimerkkejä.

- AHXAMK-W, AHXAMK-WP, eri poikkipinnat
- Kaapelipituus, esim. 0,5 km, 1,0 km, 1,5 km, 2 km, 3 km, ..., 10 km
- Maaperän resistiivisyys: $50 \Omega\text{m} \dots 2300 \Omega\text{m} \dots 15000 \Omega\text{m}$
- Kaapeliojaan mahdollisesti asennettavan erillisen saattomaadoitusjohtimen (esim. Cu 35 mm^2) vaikutus
- Myös kaapelin kuormitustilanne ja ympäristön lämpötila (kesä/talvi) vaikuttavat jonkin verran kosketussuojan ja keskusköyden resistanssiin: vaihejohdin esim. 20°C , 40°C ja $65^\circ\text{C} \rightarrow$ kosketussuojan resistanssi
- Laajan maadoitusverkon vaikutus / ketjuuntuneiden maadoitusten vaikutus

SFS 6001 standardissa on määritelty reduktiokertoimia ja niiden vaihteluvälejä erilaisille maakaapeleille. Yksivaiheisille PEX kaapeleille (10 kV ja 20 kV, Cu $95 \text{ mm}^2 / 16 \text{ mm}^2$ kuparivaippa) reduktiokertoimen r arvoksi on määritelty 0,5 - 0,6 [1]. Standardissa ei ole määritelty maadoitusresistansseja, mutta oletettavasti reduktiokertoimet vastaavat maadoitusresistanssin arvoa $R_E = 0 \Omega$, jolloin kerroin r ei riipu kaapelin pituudesta.

4.2 Kaapeleiden reduktiokertoimien määrittäminen

Hankkeessa arvioitiin laskennallisesti 20 kV AHXAMK-WP ja AHXAMK-W tyyppin kaapeleiden reduktiokertoimia viidelle tyypilliselle poikkipinnalle. Kaapeleiden tarkkoja rakenne- ja materiaalitietoja ei ollut käytettävissä, mistä saattaa aiheutua epätarkkuutta laskettuihin reduktiokertoimiin. Reduktiokertoimia tarkasteltiin myös simuloimalla lähinnä laskentatulosten verifioimiseksi, mutta mahdolliset lähtötietojen epätarkkuudet vaikuttavat myös kaapelin mallintamiseen PSCAD:ssä. Laskennassa käytettiin julkisesti saatavilla olleita tietoja kaapeleiden ominaisuuksista.

Viitteessä [8] on esitetty laskentamenetelmä kolmivaihekaapelin vaipan nolлайmpedanssin (Z_{SS0}) määrittämiseen maan vaikutus huomioiden. Kaava 4.2 on muokattu vastaamaan AHXAMK-WP tyyppin kaapelia, jossa jokaisella vaiheella on oma kosketussuoja. Vaihejohtimien ja kosketussuojien keskinäisnolлайmpedansseja Z_{msc0} voidaan arvioida kaavan 4.3 avulla [8].

$$\underline{Z}_{ss0} = 3 \left(\frac{R_{sh}}{3} + 988,2 * 10^{-6} f + j2,893 * 10^{-3} f \log_{10} \left(\frac{658368 \sqrt{\frac{\rho_m}{f}}}{GMR_{sh}} \right) \right) \Omega/\text{vaihe}/\text{km} \quad (4.2)$$

$$\underline{Z}_{msc0} = 3 \left(988,2 * 10^{-6} f + j2,893 * 10^{-3} f \log_{10} \left(\frac{658368 \sqrt{\frac{\rho_m}{f}}}{d_{sc}} \right) \right) \Omega/\text{vaihe}/\text{km} \quad (4.3)$$

Alumiinivaipan resistanssi R_{sh} voidaan laskea kaavasta

$$R_{sh} = \frac{\rho_{sh} * 10^9}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} \quad \Omega/\text{km} \quad (4.4)$$

f on taajuus [Hz],

ρ_m on maaperän resistiivisyys [Ωm],

ρ_{sh} on vaipan materiaalin resistiivisyys [Ωm],

r_o on vaipan ulkosäde [mm] ja

r_i on vaipan sisäsäde [mm].

Kaapelin vaipan geometrinen keskisäde GMR_{sh} voidaan laskea AHXAMK tyyppiselle kaapelille seuraavasti, kun GMD on geometrinen keskietäisyys johtimien keskipisteiden välillä. Geometrinen keskietäisyys johtimien ja kosketussuojien välillä (d_{sc}) on sama kuin GMR_{sh} [9].

$$GMR_{sh} = \sqrt[3]{\frac{r_o + r_i}{2} GMD^2} \quad (4.5)$$

Tällöin kaapelin reduktiokertoimelle voidaan johtaa seuraava lauseke. Kaavassa 4.6 maadoitusresistanssit R_E kaapelin päissä on merkitty samoiksi.

$$r = \frac{R_{sh0}}{R_{sh0} + \underline{Z}_{msc0} + 3R_E + 3R_E} \quad (4.6)$$

Kosketussuojaa edustavan alumiinilaminaatin nimellispaksuus oli 0,2 mm ja sen resistiivisyydelle käytettiin alumiinin ominaisresistanssia $2,84 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$. Kosketussuojien resistanssit (R_{sh}) laskettiin kaavan 4.4 avulla. Kosketussuojien 50 Hz itseisimpedanssit maan vaikutus huomioiden laskettiin kaavan 4.2 avulla. AHXAMK tyyppin kaapeleiden poikkipinnoille $50 - 240 \text{ mm}^2$ lasketut kosketussuojien 50 Hz itseisreaktanssit maan vaikutus huomioiden vaihtelivat välillä $0,75 - 0,77 \Omega/\text{km}$, kun maan resistiivisyys oli $2300 \Omega\text{m}$. Viitteessä [5] on arvioitu, että tyyppillisten AHXAMK kaapeleiden kosketussuojien itseisreaktanssi on 50 Hz taajuudella maan vaikutus huomioiden likimain $0,8 \Omega/\text{km}$, riippuen jonkin verran kaapelityypistä ja maan resistiivisyydestä. Maan resistiivisyydellä $2300 \Omega\text{m}$ em. laskentatulokset vastaavat hyvin viitteessä [5] esitettyjä kosketussuojien itseisreaktansseja.

AHXAMK-W tyyppin maakaapelilla on kosketussuojien lisäksi keskusköysi, joka kytkeytyy rinnakkain kolmen maadoitetun vaihevaipan kanssa. Keskusköysi on tyyppillisesti 35 mm^2 säikeinen kuparijohdin. Suurilla kaapelipoikkipinnoilla, esimerkiksi 240 mm^2 ja 300 mm^2 keskusköysi voi olla myös 70 mm^2 . Kaapelin AHXAMK-W $3 \times 95\text{Al} + 35\text{Cu}$ 20 kV kolmen rinnankytketyn kosketussuojan laskennallinen resistanssi paluumaapiiri huomioiden on noin $0,6 \Omega/\text{km}$.

Tarkastellaan 1 km pituista AHXAMK-WP kolmivaihekaapelia, joka on maadoitettu molemmista päistä ideaalisesti eli maadoitusresistanssi $R_E = 0 \Omega$. Maaperän resistiivisyyden ρ_m arvoina käytettiin $50 \Omega\text{m}$ ja $2300 \Omega\text{m}$. $2300 \Omega\text{m}$ vastaa keskimääräistä maaperän resistiivisyyttä Suomessa ja arvo $50 \Omega\text{m}$ erittäin hyvin johtavaa maaperää. Taulukossa 4.1 on esitetty lasketut ja simuloimalla (PSCAD) määritetyt reduktiokertoimet r viidelle eri poikkipintaiselle kaapelille. Mikäli reduktiokertoimet määritetään kaavan 4.1 avulla ilman keskinäisnollaimpedanssien vaikutusta, arvot kasvavat hieman taulukkoon 4.1 verrattuna.

Taulukko 4.1 Kaapeleiden reduktiokertoimia, kun maadoitusresistanssi R_E on 0Ω .

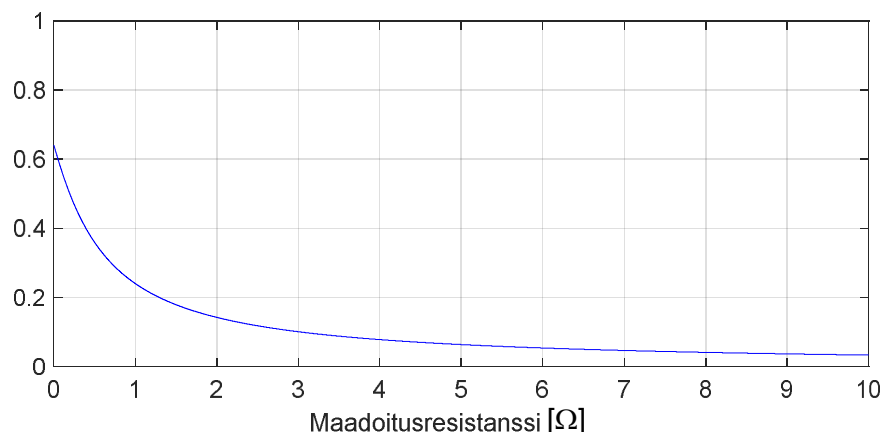
Reduktiokertoimet: 50 Hz, $R_E = 0 \Omega$				
Kaapeli AHXAMK-WP 20 kV	r (laskettu)		r (simuloitu)	
	$\rho_m = 50 \Omega\text{m}$	$\rho_m = 2300 \Omega\text{m}$	$\rho_m = 50 \Omega\text{m}$	$\rho_m = 2300 \Omega\text{m}$
3x50	0,70	0,64	0,70	0,64
3x95	0,66	0,59	0,64	0,59
3x150	0,62	0,56	0,62	0,56
3x185	0,58	0,52	0,60	0,54
3x240	0,48	0,42	0,48	0,42

4.2.1 Maadoitusresistanssin ja maan resistiivisyyden vaikutus

Kun maadoitusresistanssi kaapelin molemmissa päissä kasvaa, maan kautta kulkevan vikavirran osuus kokonaismaasulkuvirrasta pienenee, mikä pienentää myös reduktiokertoimia. Taulukossa 4.2 on määritetty vastaavat reduktiokertoimien arvot kuin taulukossa 4.1, mutta maadoitusresistanssi kaapelin molemmissa päissä on 1Ω . Resultoivat maadoitusresistanssit voivat olla huonoissa maadoitusolosuhteissa suurempiakin riippuen myös ketjussa olevien maadoitusten lukumäärästä [5]. Suuremmilla maadoitusresistanssin arvoilla maaperän resistiivisyyden vaikutus reduktiokertoimeen on pieni. Esimerkki maadoitusresistanssin vaikutuksesta reduktiokertoimeen on esitetty kuvassa 4.3. Mitä pidempää kaapeliosuutta tarkastellaan, sitä hitaammin reduktiokerroin pienenee maadoitusresistanssin funktiona. Tämä johtuu siitä, että maadoitusresistanssin suhteellinen osuus maapiirin impedanssista on pienempi pitkän kaapelin tapauksessa.

Taulukko 4.2 Kaapeleiden reduktiokertoimia, kun maadoitusresistanssi R_E on 1Ω .

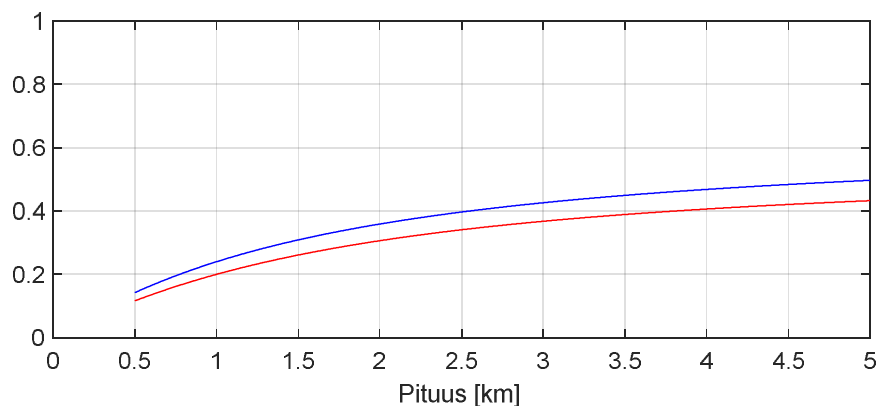
Reduktiokertoimet: 50 Hz, $R_E = 1 \Omega$				
Kaapeli AHXAMK-WP 20 kV	r (laskettu)		r (simuloitu)	
	$\rho_m = 50 \Omega\text{m}$	$\rho_m = 2300 \Omega\text{m}$	$\rho_m = 50 \Omega\text{m}$	$\rho_m = 2300 \Omega\text{m}$
3x50	0,24	0,24	0,24	0,24
3x95	0,22	0,22	0,21	0,21
3x150	0,20	0,20	0,20	0,20
3x185	0,18	0,18	0,19	0,19
3x240	0,14	0,14	0,14	0,14

Kuva 4.3 Kaapelin AHXAMK-WP 3x50 20 kV virtareduktiokerroin maadoitusresistanssin funktiona, kun kaapelin pituus on 1 km ja $\rho_m = 2300 \Omega\text{m}$.

Maaperän resistiivisyyden suora vaikutus kaapelin reduktiokertoimeen on suhteellisen pieni, kuten taulukoista 4.1 ja 4.2 voidaan havaita. Maadoitusresistanssin kasvaessa vaikutus pienenee entisestään. Maaperän resistiivisyys vaikuttaa lähinnä siihen, kuinka hyviä maadoituksia verkkoon voidaan rakentaa kohtuullisilla kustannuksilla. Sitä kautta maaperän resistiivisyys vaikuttaa myös reduktiokertoimiin.

4.2.2 Kaapelin pituuden vaikutus

Maadoitusresistanssin arvolla 0Ω , maan kautta kulkevan vikavirtakomponentin suuruus ei riipu tarkasteltavan kaapelin pituudesta, koska kosketussuojien, mahdollisen keskusköyden ja maan impedanssit sekä keskinäisimpedanssit kasvavat lineaarisesti pituuteen nähden. Tällöin virranjakosuhte ei muutu kaapelin pituuden mukana. Kun kaapelin päät on maadoitettu tietyn suuruisen maadoitusresistanssin kautta, reduktiokerroin pienenee eniten lyhyillä johtopituuksilla ja kasvaa johtopituuden kasvaessa, kun maadoitusresistanssien suhteellinen vaikutus pienenee. Kuvassa 4.4 on esitetty esimerkki kaapelin pituuden vaikutuksesta.



Kuva 4.4 Kolmivaihekaapelin AHXAMK-WP poikkipintojen 50 mm^2 (sin.) ja 150 mm^2 (pun.) virtareduktiokerroin johtopituuden funktiona, kun $R_E = 1 \Omega$ ja $\rho_m = 2300 \Omega\text{m}$.

4.2.3 Kaapelityypin vaikutus

AHXAMK-W tyypin kaapeleissa maasulkuvirran paluupiiri muodostuu kolmesta kosketussuojasta, keskusköydestä ja maapiiristä. 35 mm^2 tai 70 mm^2 kupariköysi pienentää galvaanisen paluupiirin impedanssia ja pienentää siten kaapelin virtareduktiokerrointa. Keskusköydellä ei katsota olevan maadoitusvaikutusta, jolloin se ainoastaan yhdistää maadoitukset toisiinsa. AHXAMK-W tyypin kaapeleiden reduktiokertoimet määritettiin viitteessä [7] esitetyn teorian pohjalta. Malli ottaa huomioon kosketussuojien ja keskusköyden itseisimpedanssien lisäksi kaikki vaihejohtimien, kosketussuojien ja keskusköyden väliset keskinäisimpedanssit. Seuraavassa taulukossa 4.3 on esitetty AHXAMK-W tyypin kaapelin eri poikkipinnoille laskettuja reduktiokerrointen arvoja. Tuloksiin pätevät samat lähtötietojen epävarmuudet kuin AHXAMK-WP kaapeleidenkin tapauksessa. Reduktiokertoimet voidaan määrittää myös kaavan 4.1 mukaisesti, jolloin saadaan hieman suurempia arvoja taulukkoon 4.3 verrattuna.

Keskusköydestä johtuva ero reduktiokertoimissa AHXAMK-WP tyypin kaapeliin verrattuna on merkittävin silloin, kun maadoitusresistanssi on 0Ω . Ideaalinen maadoitus on kuitenkin teoreettinen tilanne ja maadoitusresistanssin suhteellisen osuuden kasvaessa paluupiirissä, keskusköyden vaikutus reduktiokertoimeen pienenee absoluuttiarvona merkittävästi. Suuremmilla maadoitusresistanssin arvoilla reduktiokertoimet ovat pieniä molemmilla kaapelityypeillä. Keskusköysi yhdistää ketjuuntuneet maadoitukset myös vahvemmin toisiinsa.

Taulukko 4.3 Kaapeleiden reduktiokertoimia, kun kaapelin pituus on 1 km ja maadoitusresistanssi R_E on 0 Ω ja 1 Ω . Maaperän resistiivisyydet ovat 50 Ωm ja 2300 Ωm .

Reduktiokertoimet: 50 Hz				
Kaapeli AHXAMK-W 20 kV	$r(R_E = 0 \Omega)$		$r(R_E = 1 \Omega)$	
	$\rho_m = 50 \Omega\text{m}$	$\rho_m = 2300 \Omega\text{m}$	$\rho_m = 50 \Omega\text{m}$	$\rho_m = 2300 \Omega\text{m}$
3x50Al+35Cu	0,41	0,36	0,14	0,14
3x95Al+35Cu	0,39	0,34	0,13	0,13
3x150Al+35Cu	0,38	0,33	0,12	0,12
3x185Al+35Cu	0,37	0,32	0,12	0,12
3x240Al+35Cu	0,32	0,28	0,10	0,10

4.2.4 Maasulkuvirran taajuuden vaikutus virtareduktioon

Taajuuden kasvaessa maaperän resistanssi kasvaa lineaarisesti, mikä pienentää maan kautta kulkevaa virtaa. Jos oletetaan, että maadoitusimpedanssit ovat taajuudesta riippumattomia resistansseja, niiden suhteellinen vaikutus maahan verrattuna pienenee taajuuden kasvaessa. Maan nolliimpedanssin minimiä vastaa maan resistiivisyyden ja taajuuden määräämä virran jakautuma, joka resistiivisyyden kasvaessa laajenee ja taajuuden kasvaessa supistuu. Nollapiirin impedanssi pystytään laskemaan maan heterogeenisyyden takia vain likimäärin. Maapiirin resistanssia matkalla l voidaan arvioida seuraavan kaavan avulla.

$$R_m \approx \frac{\omega \mu_0}{8} * l, \quad (4.7)$$

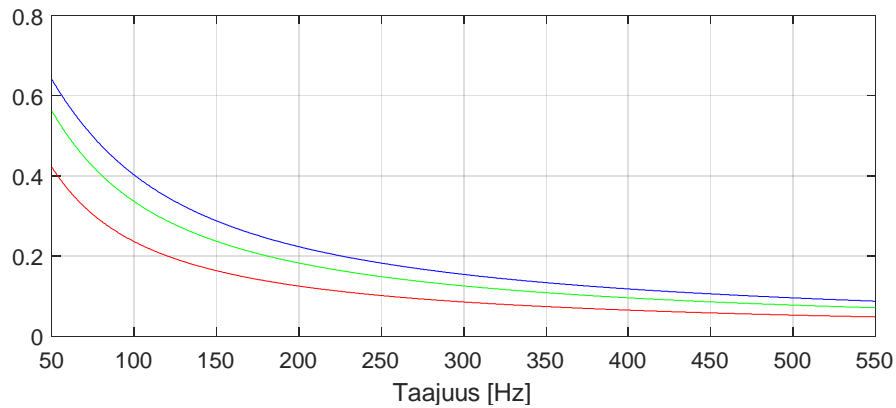
missä μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti ja ω on kulmataajuus.

Myös maapiirin reaktanssi riippuu taajuudesta, koska taajuus vaikuttaa maavirran ekvivalenttisyvyyteen. Taulukossa 4.4 on esitetty laskettuja reduktiokertoimia AHXAMK-WP tyyppin kaapeleille maadoitusresistanssin arvoilla 0 Ω ja 1 Ω , kun taajuus on 250 Hz. Taajuuden kasvun aiheuttamaa virranahdon vaikutusta kosketussuojien resistanssiin ei ole huomioitu. Sen voidaan arvioida olevan pieni.

Taulukko 4.4 Kaapeleiden 250 Hz reduktiokertoimia, kun kaapelin pituus on 1 km ja maadoitusresistanssi R_E on 0 Ω ja 1 Ω . Maaperän resistiivisyydet ovat 50 Ωm ja 2300 Ωm .

Reduktiokertoimet: 250 Hz				
Kaapeli AHXAMK-WP 20 kV	$r(R_E = 0 \Omega)$		$r(R_E = 1 \Omega)$	
	$\rho_m = 50 \Omega\text{m}$	$\rho_m = 2300 \Omega\text{m}$	$\rho_m = 50 \Omega\text{m}$	$\rho_m = 2300 \Omega\text{m}$
3x50	0,22	0,18	0,16	0,15
3x95	0,20	0,16	0,15	0,13
3x150	0,18	0,15	0,13	0,12
3x185	0,16	0,13	0,12	0,11
3x240	0,12	0,10	0,09	0,08

Kuvassa 4.5 on esitetty esimerkki 1 km pituisen AHXAMK-WP kaapelin reduktiokertoimesta taajuuden funktiona kolmelle eri poikkipinnalle laskettuna. Maadoitusresistanssi on 0 Ω ja maaperän resistiivisyys 2300 Ωm .



Kuva 4.5 Kaapelin AHXAMK-WP poikkipintojen 50 mm² (sin.) ja 150 mm² (vihr.) ja 240 mm² (pun.) virtareduktiokerroin taajuuden funktiona, kun $R_E = 0 \Omega$ ja $\rho_m = 2300 \Omega\text{m}$.

4.3 Johtopäätöksiä kaapeleiden virtareduktiosta

Maakaapeleiden virtareduktion huomioiminen parantaa kosketusjännitteiden arvioinnin tarkkuutta. Hankkeessa selvitettiin reduktiokerroimen laskentaan liittyvä teoria ja laskettiin reduktiokerroimia kahdelle yleisesti käytetylle kaapelityypille ja viidelle eri poikkipinnalle. Maakaapelin ominaisuuksien lisäksi reduktiokerroimeen vaikuttavat monet muut tekijät. Tutkimuksessa selvitettiin myös maadoitusresistanssin, maan resistiivisyyden, kaapelin pituuden, kaapelityypin ja maasulkuvirran taajuuden vaikutukset reduktiokerroimiin. Samaa teoriaa voidaan soveltaa myös muun tyyppisille kaapeleille.

Maakaapelin virtareduktiokerroin määritellään yleensä maadoitusresistanssin R_E teoreettisella arvolla 0Ω , jolloin saadaan suurin reduktiokerroimen arvo, joka ei riipu tarkasteltavan kaapelin pituudesta. Tämä virtareduktiokerroimen kannalta pahin tilanne liioittelee maassa palaavan virran osuutta ja on siksi kosketusjännitteen kannalta turvallisella puolella oleva mitoitus. Kun maadoitusjännitteen laskennassa käytetään todellisia maadoitusresistansseja ja suurinta maan kautta kiertävää vikavirtaa, saadaan turvallisella puolella oleva maadoitusjännitteen arvo suurimman kosketusjännitteen määrittämistä varten.

Reduktiokerroimet pienevät suhteellisen nopeasti maadoitusresistanssin kasvaessa varsinkin lyhyillä kaapelipituuksilla. Jos maadoitusresistanssin arvo on suurempi kuin 0Ω , reduktiokerroin kasvaa kaapelin pituuden kasvaessa. Kun kosketussuojien impedanssi kasvaa pituuden kasvun myötä, vakiosuuruisten maadoitusresistanssien suhteellinen vaikutus reduktiokerroimeen pienenee. Siksi maakaapelin pituuden kasvaessa myös reduktiokerroin kasvaa maadoitusresistanssien pysyessä vakiona. Maaperän resistiivisyyden vaikutus reduktiokerroimeen on suhteellisen pieni varsinkin nolaa suuremmilla maadoitusresistanssin arvoilla kaapelipituuden ollessa vakio.

Reduktiokerroimet pienenevät kaapelipoikkipinnan kasvaessa, koska myös kosketussuojien poikkipinnat kasvavat. Keskusköysi pienentää selvästi kaapelin reduktiokerrointa maadoitusresistanssin teoreettisella arvolla 0Ω . Maadoitusresistanssin kasvaessa reduktiokerroimet pienevät joka tapauksessa niin paljon, että ero -WP ja -W tyyppin kaapeleiden välillä on suhteellisen pieni, jos ajatellaan kompensoidun verkon jäännösvirran suuruutta.

Maavirran taajuus vaikuttaa merkittävästi virtareduktiokerroimeen. Maaperän resistanssi kasvaa lineaarisesti taajuuden funktiona. Tämä on merkittävin tekijä, joka pienentää reduktiokerrointa taajuuden kasvaessa. Siksi tyypillisimmät maasulkuvirran harmoniset taajuudet eivät synnytä kaapeliverkossa yhtä suuria maadoitusjänniteitä kuin vastaavan suuruiset perustajuiset virrat. Tulee kuitenkin muistaa, että erillismaadoitukseen tapahtuvassa maasulussa reduktiokerroin on 1 myös vikavirran harmonisten komponenttien osalta. Tällöin vikavirran synnyttämä maadoitusjännite on verrannollinen kokonismaasulkuvirtaan sisältäen myös harmoniset komponentit.

5 VERKOSSA ESIINTYVIEN HARMONISTEN JÄNNITESÄRÖJEN SELVITTÄMINEN MITTAUKSIN

Keskijänniteverkoissa esiintyvien harmonisten yliaaltojen suuruuksia selvitettiin hankkeessa yhtäältä sähköasemille asennettujen sähkönlaatumittalaitteiden keräämistä mittaustiedoista kuukausien tai vuosien ajalta ja toisaalta verkoissa tehtyjen maasulkukokeiden yhteydessä ennen vikaa verkon normaalitilassa ja maasulkuvian aikana. Maasulkukokeiden yhteydessä tehtyjen mittausten tapauksessa mittaustietoa oli käytettävissä sähköaseman lisäksi maaseutuverkon 1 kokeissa myös vikapaikasta ja maaseutuverkon 2 kokeissa kahdelta muuntamoilla sijaitsevalta hajautetun kompensoinnin yksiköltä.

Pitkäaikaisia sähköasemamittauksia oli käytettävissä kolmelta kaupunkiverkon sähköasemalta noin 3 kuukauden ajalta, 15 maaseutuverkon sähköasemalta noin 2,5 kuukauden ajalta, yhdeltä maaseutuverkon sähköasemalta 6,5 kk ajalta ja 2 maaseutuverkon sähköasemalta vajaan 3 vuoden ajalta. Kaupunkiverkon sähköasemien mittaukset on tehty standardin IEC 61000-4-30 luokan A mukaisilla mittalaitteilla ja maaseutuverkon sähköasemien mittaukset MX Electrix Oy:n Laatuvahti-mittareilla. Molemmissa tapauksissa yliaaltojen mittaus on aukotonta. Mittausintervalli oli kaupunkiverkon mittauksissa 10 minuuttia ja laitteet mittasivat pääjännitteitä (standardin SFS-EN 50160 mukaisesti) ja maaseutuverkon mittauksissa 1 minuutti (kahden vajaan kolmen vuoden ajalta mitatun sähköaseman osalta 10 minuuttia) ja laitteet mittasivat vaihejännitteitä mittalaitteen keinotekoisista nollapistettä vasten.

5.1 Yliaaltojännitteiden tilastollinen tarkastelu sähköasemilla

Tarkasteluun on koottu kolmelta kaupunkiverkon ja 15 maaseutuverkon sähköasemalta merkittävimpien harmonisten yliaaltojännitteiden (5., 7., 11. ja 13. yliaalto) aikasarjat (prosentteina perusaallosta) ja niistä muodostetut kertymäfunktiot. Koska jakelumuuntajien keskijännitepuolen käämitykset ovat yleensä kolmiokytkettyjä, parittomien kolmella jaollisten kertalukujen harmoniset yliaallot eivät merkittävässä määrin siirry keskijänniteverkkoon ja niiden tasot olivat tutkituilla sähköasemilla niin pieniä, että niitä ei katsottu aiheelliseksi tarkastella tarkemmin.

Kaupunkiverkon sähköasemien aikasarjat olivat 10 minuutin keskiarvoja 3 kuukauden ajalta (1.1....31.3.2021) ja maaseutuverkkojen osalta 1 minuutin keskiarvoja noin 2,5 kuukauden ajalta (12.3....26.5.2021). Kertymäfunktioihin on poimittu kultakin 1 tai 10 minuutin jaksolta suurin kolmesta vaiheesta (kuvaamaan pahinta tilannetta, että maasulku tulisi vaiheeseen, jossa yliaaltotaso on kulloinkin suurin). 1 tai 10 minuutin keskiarvojen käyttö tarkasteluissa maksimiarvojen sijasta vähentää esimerkiksi lyhytaikaisten kytkentäilmiöiden vaikutusta tuloksiin. Kytkentäilmiöt ovat kestoaltaan niin lyhyitä, että niillä ei ole merkitystä esimerkiksi maasulkujen aikaisten maadoitusjännitteiden kannalta, mutta ne voivat kuitenkin näkyä säröjen maksimiarvomittauksissa piikkeinä. Aikasarjat on selvytyden vuoksi muodostettu kunkin sähköaseman vaiheen L1 mittaustiedoista.

Kaupunkiverkon kolme sähköasemaa (K1...K3) olivat kuormiltaan erityyppisiä:

K1: teollisuuspainotteista kuormaa

K2: julkista ja yksityistä palvelukuormaa

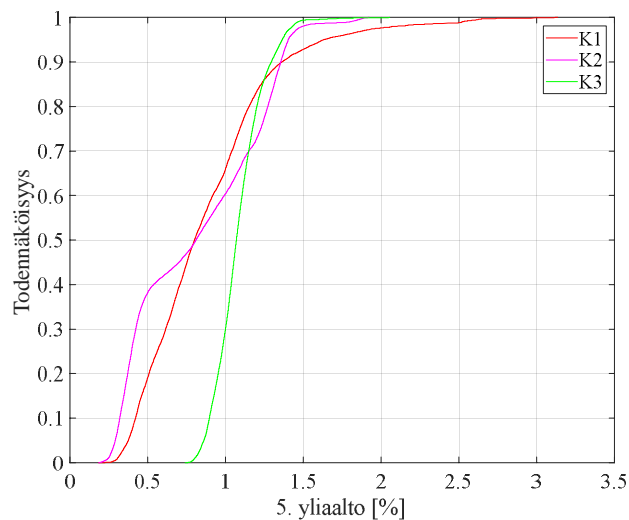
K3: asumispainotteista kuormaa

Teollisuuspainotteisen kuorman osalta yliaaltotasojen vaihtelu oli suurin ja asumispainotteisen kuorman osalta pienin.

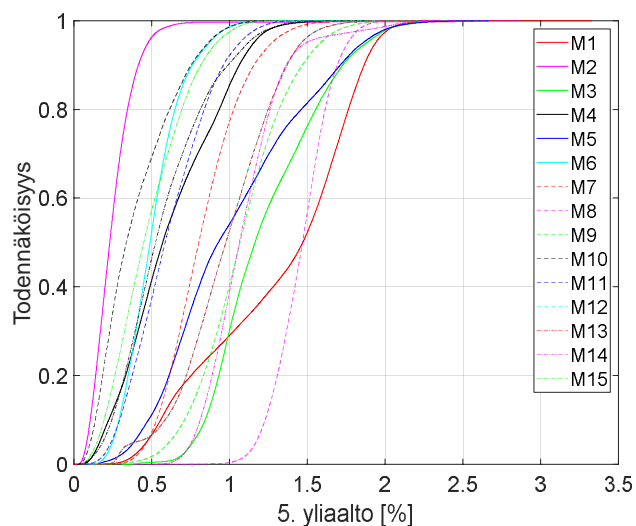
Liitteissä A ja B esitetyissä aikasarjakuvaajissa on nähtävissä yleensä melko selvästi erottuvien vuorokausi- ja viikkorytmien lisäksi joissain tapauksissa sähköaseman ja verkon kytkentätilanteista johtuvia askelmaisia, yleensä melko lyhytaikaisia muutoksia, jotka näkyvät myös kertymäfunktiossa porrasmaisina muutoksina.

Kertymäfunktiot on esitetty kuvissa 5.1...5.8. Kaupunki- ja maaseutuverkon sähköasemien tuloksia vertailtaessa on pidettävä mielessä, että kaupunkiverkon osalta mittausintervalli (tehollisarvojen laskenta-aikaväli) on standardin SFS-EN 50160 mukainen 10 minuuttia ja maaseutuverkon asemilla se on 1 minuutti, jolloin jälkimmäisissä yliaaltotasojen vaihtelut tulevat jonkin verran selvemmin esille ja esimerkiksi suurimmat arvot voivat lyhyemmästä keskiarvotusjaksosta johtuen olla suurempia kuin 10 minuutin mittausintervallilla mitattaessa. Eri mittausintervallien vaikutusta pätö- ja loistehojen kertymäfunktioihin erityyppisten kuormien osalta on tarkasteltu mm. Antti Hildénin diplomityössä [13].

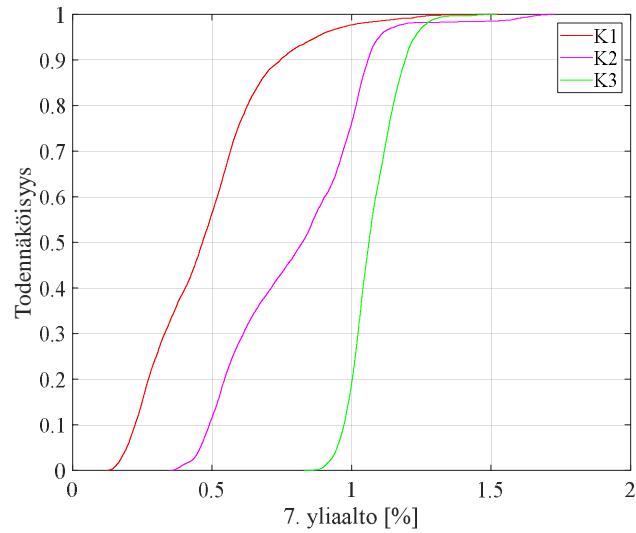
Kertymäfunktioiden tilastollisissa tarkasteluissa yleisesti käytettyjä kvanttiileja on koottu taulukoihin 5.1...5.4. Tarkasteltaessa yliaaltojen vaikutusta maadoitusjännitteisiin tulisi pyrkiä huomioimaan pahimmat tilanteet ja näin ollen kertymäfunktioiden osalta kiinnostavimpia ovat suurimpien todennäköisyyksien kvantiilit 0.95...1.0. Taulukoihin on valittu harmaalla korostetuksi 99,5 % kvantiili. Hallitsevin yliaalto oli useimmilla asemilla 5. yliaalto, joissain tapauksissa 7. yliaalto. Joissain tapauksissa hallitsevin yliaalto vaihteli myös ajan funktiona. Jos tarkastellaan kertymäfunktioiden 99,5 % pisteitä, 5. yliaallon taso jäi kaikilla sähköasemilla alle 2,62 %:iin ja 7. yliaallon taso alle 1,81 %:iin perusaallosta. Suurimmatkin mitatut kaupunkiverkon sähköasemien yksittäisten yliaaltojen 10 minuutin keskiarvot jäivät alle 3,2 %:iin ja maaseutuverkon sähköasemien 1 minuutin keskiarvot alle 4 %:iin perusaallosta.



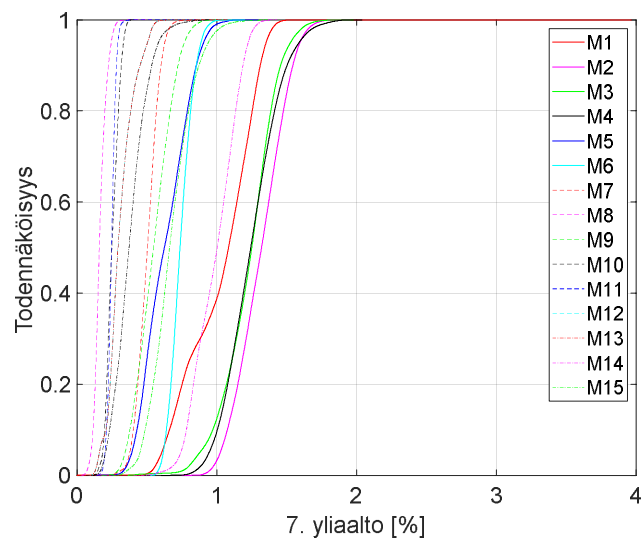
Kuva 5.1 Kaupunkiverkon sähköasemien 5. yliaallon kertymäfunktiot.



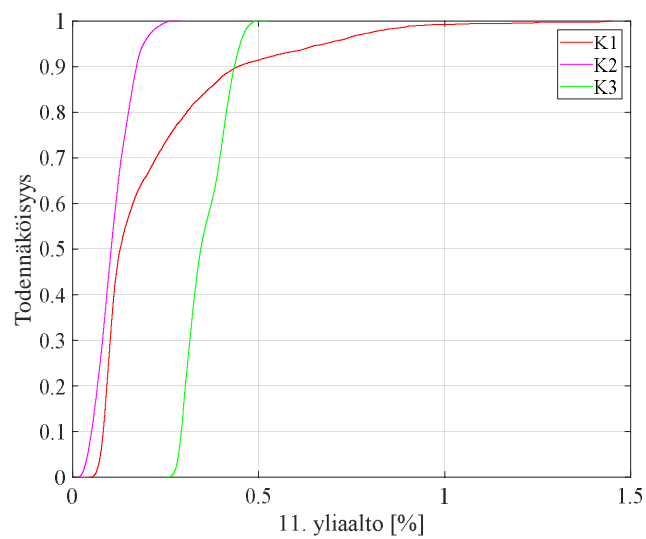
Kuva 5.2 Maaseutuverkon sähköasemien 5. yliaallon kertymäfunktiot.



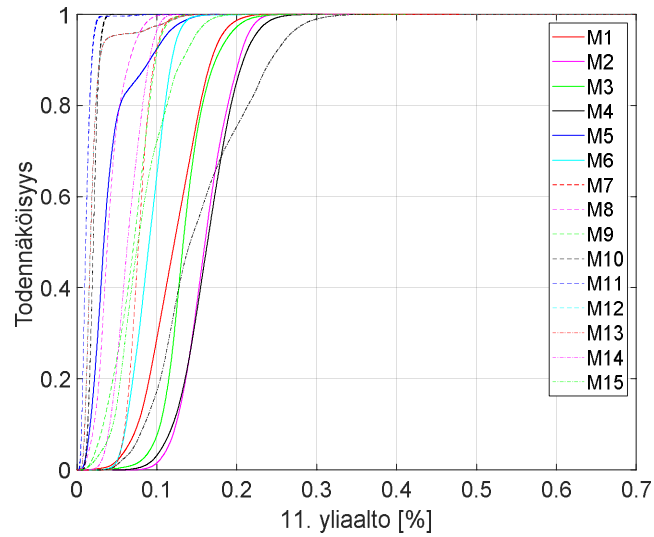
Kuva 5.3 Kaupunkiverkon sähköasemien 7. yliaallon kertymäfunktiot.



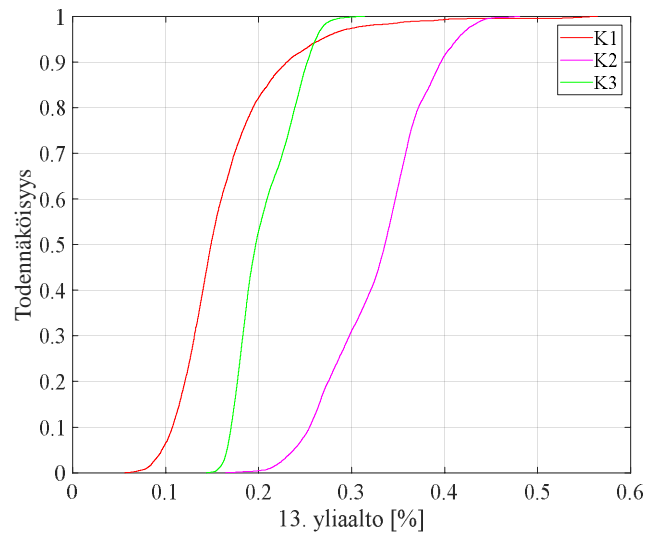
Kuva 5.4 Maaseutuverkon sähköasemien 7. yliaallon kertymäfunktiot.



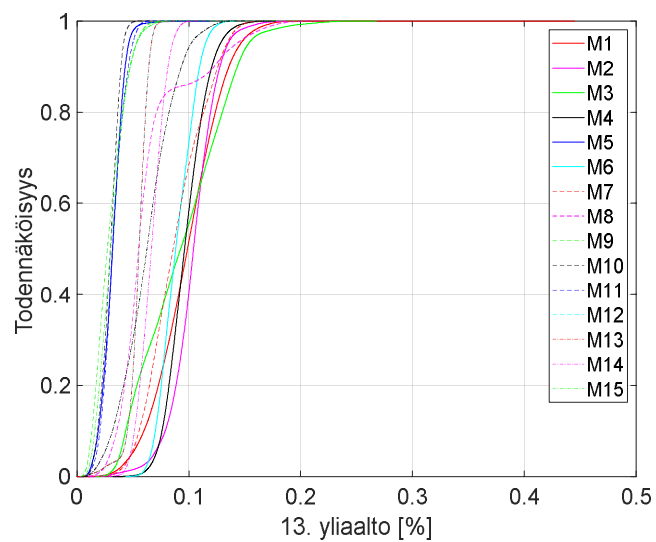
Kuva 5.5 Kaupunkiverkon sähköasemien 11. yliaallon kertymäfunktiot.



Kuva 5.6 Maaseutuverkon sähköasemien 11. yliaallon kertymäfunktiot.



Kuva 5.7 Kaupunkiverkon sähköasemien 13. yliaallon kertymäfunktiot.



Kuva 5.8 Maaseutuverkon sähköasemien 13. yliaallon kertymäfunktiot.

Taulukko 5.1 Kaupunkiverkon sähköasemien 5. ja 7. yliaaltojen kertymäfunktioiden keskeisimpiä kvanttileja.

5. yliaalto [%]				7. yliaalto [%]			
Kvanttiili	K1	K2	K3	Kvanttiili	K1	K2	K3
1.000	3.13	1.92	2.06	1.000	1.53	1.73	1.52
0.995	2.62	1.85	1.56	0.995	1.24	1.64	1.33
0.990	2.52	1.80	1.46	0.990	1.17	1.59	1.30
0.975	1.96	1.47	1.42	0.975	0.99	1.17	1.26
0.950	1.63	1.40	1.36	0.950	0.87	1.10	1.23
0.800	1.15	1.27	1.20	0.800	0.63	1.02	1.15

Taulukko 5.2 Maaseutuverkon sähköasemien 5. ja 7. yliaaltojen kertymäfunktioiden keskeisimpiä kvanttileja.

5. yliaalto [%]															
Kvanttiili	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
1	3.33	2.53	2.67	1.75	2.67	1.95	2.27	2.87	2.22	1.32	1.55	2.04	2.47	1.86	1.90
0.995	2.15	0.72	2.19	1.43	2.20	1.07	1.55	1.92	1.87	1.08	1.28	1.75	2.12	1.13	1.39
0.99	2.08	0.64	2.11	1.34	2.10	1.02	1.48	1.88	1.79	1.03	1.23	1.67	2.04	1.08	1.33
0.975	2.00	0.54	1.98	1.23	1.97	0.94	1.37	1.81	1.68	0.94	1.15	1.55	1.80	1.00	1.21
0.95	1.94	0.48	1.88	1.16	1.86	0.87	1.27	1.76	1.58	0.86	1.07	1.46	1.49	0.92	1.12
0.8	1.76	0.34	1.55	0.93	1.46	0.65	1.03	1.61	1.32	0.61	0.84	1.25	1.26	0.69	0.81

7. yliaalto [%]															
Kvanttiili	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
1.000	3.96	1.96	1.98	2.04	1.30	1.20	1.09	0.53	1.05	0.42	0.85	1.08	1.43	1.38	0.96
0.995	1.44	1.73	1.70	1.81	1.04	0.97	0.70	0.29	0.88	0.36	0.33	0.57	1.31	1.13	0.78
0.990	1.42	1.69	1.65	1.75	1.00	0.95	0.68	0.28	0.85	0.36	0.32	0.55	1.29	1.07	0.71
0.975	1.39	1.64	1.59	1.66	0.95	0.91	0.65	0.26	0.81	0.34	0.30	0.53	1.25	1.00	0.63
0.950	1.35	1.59	1.53	1.59	0.91	0.89	0.63	0.24	0.77	0.33	0.29	0.50	1.22	0.94	0.58
0.800	1.25	1.48	1.39	1.41	0.79	0.81	0.57	0.20	0.67	0.30	0.27	0.38	1.14	0.80	0.47

Taulukko 5.3 Kaupunkiverkon sähköasemien 11. ja 13. yliaaltojen kertymäfunktioiden keskeisimpiä kvanttileja.

11. yliaalto [%]				13. yliaalto [%]			
Kvanttiili	K1	K2	K3	Kvanttiili	K1	K2	K3
1.000	1.45	0.29	0.52	1.000	0.56	0.48	0.31
0.995	1.19	0.25	0.48	0.995	0.42	0.45	0.28
0.990	0.93	0.23	0.47	0.990	0.37	0.44	0.28
0.975	0.80	0.21	0.46	0.975	0.30	0.43	0.27
0.950	0.68	0.19	0.45	0.950	0.27	0.41	0.26
0.800	0.31	0.15	0.41	0.800	0.19	0.37	0.24

Taulukko 5.4 Maaseutuverkon sähköasemien 11. ja 13. yliaaltojen kertymäfunktioiden keskeisimpiä kvanttileja.

11. yliaalto [%]															
Kvanttiili	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
1.000	0.48	0.35	0.27	0.31	0.18	0.23	0.24	0.14	0.16	0.06	0.19	0.70	0.13	0.41	0.38
0.995	0.21	0.23	0.23	0.25	0.15	0.15	0.13	0.10	0.13	0.04	0.03	0.13	0.11	0.18	0.31
0.990	0.20	0.23	0.22	0.25	0.14	0.14	0.12	0.09	0.12	0.04	0.03	0.12	0.11	0.17	0.30
0.975	0.19	0.22	0.20	0.23	0.12	0.13	0.11	0.08	0.11	0.03	0.02	0.10	0.10	0.16	0.28
0.950	0.18	0.21	0.19	0.22	0.11	0.13	0.10	0.08	0.10	0.03	0.02	0.04	0.10	0.15	0.26
0.800	0.15	0.19	0.16	0.19	0.05	0.11	0.09	0.05	0.09	0.03	0.02	0.02	0.08	0.11	0.21

13. yliaalto [%]															
Kvanttiili	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
1.000	0.44	0.19	0.27	0.18	0.12	0.14	0.17	0.22	0.08	0.07	0.17	0.16	0.11	0.20	0.15
0.995	0.17	0.16	0.21	0.15	0.06	0.13	0.15	0.18	0.07	0.05	0.06	0.07	0.09	0.07	0.13
0.990	0.17	0.16	0.19	0.14	0.05	0.12	0.15	0.17	0.06	0.05	0.06	0.07	0.09	0.07	0.12
0.975	0.16	0.14	0.17	0.13	0.05	0.12	0.14	0.16	0.06	0.04	0.05	0.07	0.09	0.06	0.11
0.950	0.15	0.13	0.15	0.13	0.05	0.11	0.13	0.14	0.05	0.04	0.05	0.07	0.09	0.05	0.10
0.800	0.12	0.12	0.13	0.11	0.04	0.10	0.11	0.07	0.04	0.04	0.04	0.06	0.08	0.04	0.08

Kuten taulukoista 5.3 ja 5.4 ilmenee, 11. ja 13. yliaaltojen taso on kaikilla maaseutuverkon sähköasemilla varsin pieni, alle 0,31 % perusaallosta. Kaupunkiverkon asemista yhdellä, teollisuuspainotteista kuormaa sisältävällä K1:llä, 11. yliaallon taso on selvästi suurempi kuin muilla asemilla, noin 1,2 %, jos tarkastellaan 99,5 % kvantiilia. Myös 13. yliaallon tasot ovat kaupunkiverkon asemilla suurempia kuin tarkastelluilla maaseutuverkon asemilla.

Standardin SFS-EN 50160 [3] mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa, kunkin viikon pituisen mittaustuloksen aikana, 95 % jakelujännitteen kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräisistä tehollisarvoista tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin standardin taulukossa annettu arvo, joka 5. yliaallolle on 6,0 %, 7. yliaallolle 5,0 %, 11. yliaallolle 3,5 % ja 13. yliaallolle 3,0 %. Taulukossa 5.5 on verrattu kaupunki- ja maaseutuverkkojen sähköasemien mittaustulosten 95 % kvantiileja standardin raja-arvoihin. Kunkin yliaallon osalta on tarkasteltu yksittäistä suurinta kaupunki- ja maaseutuverkon sähköasemakohtaista 95 % kvantiilia ja kaikkien kaupunkiverkon sähköasemien ja vastaavasti maaseutuverkon sähköasemien yhdistettyjen datojen 95 % kvantiileja. Kuten taulukosta nähdään, yksittäisten sähköasemien 5. ja 7. yliaaltojen osaltakin 95 % kvantiilit jäävät alle kolmannekseen raja-arvosta, vaikka maaseutuverkon asemien mittaustulokset ovat 1 minuutin keskiarvoja. 11. ja 13. yliaallot jäävät vielä tätäkin pienemmiksi. 5. ja 7. yliaaltojen osalta maaseutuverkkojen 95 % kvantiilit ovat hieman suurempia kuin kaupunkiverkkojen vastaavat, mikä selittyyneen pääosin lyhyemmällä 1 minuutin keskiarvotusjaksolla. 11. ja 13. yliaaltojen osalta maaseutuverkkojen 95 % kvantiilit ovat sen sijaan selvästi pienempiä kuin kaupunkiverkkojen vastaavat.

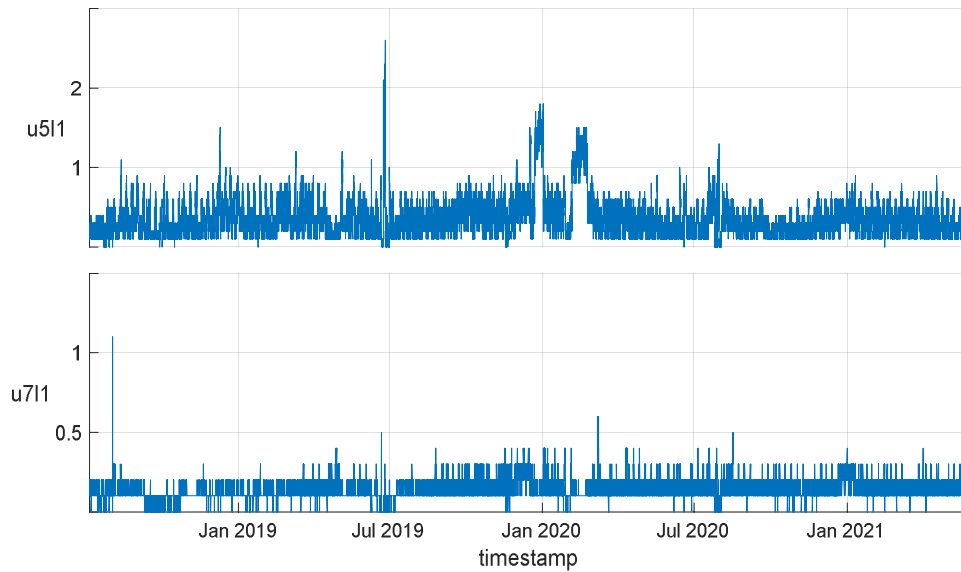
Taulukko 5.5 Kaupunki- ja maaseutuverkon sähköasemien mittaustulosten 95 % kvantiilit suhteessa SFS-EN 50160 raja-arvoihin.

	5. yliaalto		7. yliaalto		11. yliaalto		13. yliaalto	
	Kaupunki	Maaseutu	Kaupunki	Maaseutu	Kaupunki	Maaseutu	Kaupunki	Maaseutu
SFS-EN 50160 raja-arvo, u_n [%]	6.00		5.00		3.50		3.00	
Mittaustulosten 95 % kvantiili, suurin yksittäisen sähköaseman arvo	1.63	1.94	1.23	1.59	0.68	0.26	0.41	0.15
Mittaustulos/raja-arvo-suhde [%] *), suurin yksittäisen sähköaseman arvo	27.2	32.3	24.6	31.8	19.4	7.4	13.7	5.0
Mittaustulosten 95 % kvantiili, kaikkien sähköasemien yhdistetty data	1.48	1.66	1.18	1.40	0.45	0.19	0.39	0.13
Mittaustulos/raja-arvo-suhde [%] *), kaikkien sähköasemien yhdistetty data	24.7	27.7	23.6	28.0	12.9	5.4	13.0	4.3
*) maaseutuverkon sähköasemien tapauksessa mittaustulokset on ollut 1 minuutti, raja-arvot on annettu 10 minuutin intervallille								

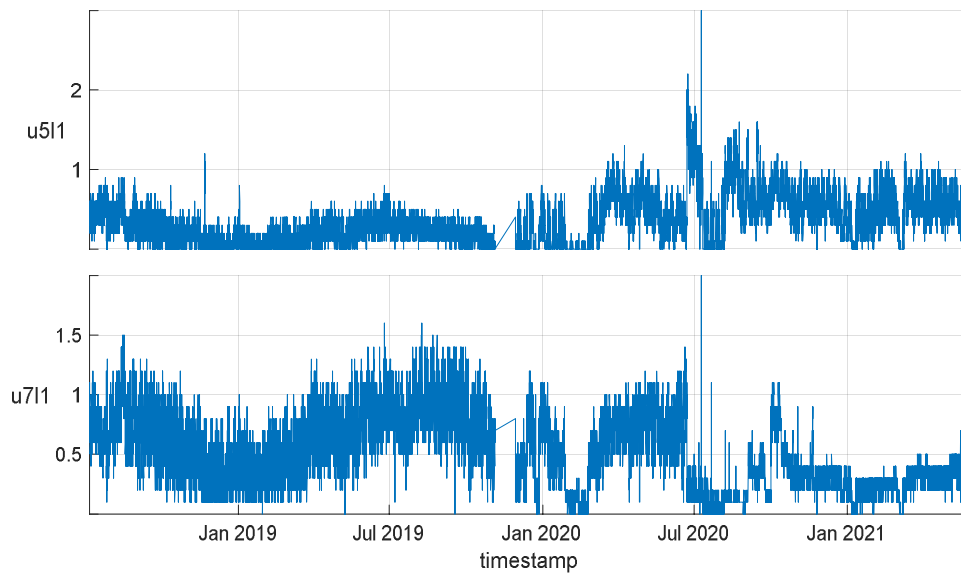
5.2 Yliaaltojännitteiden kehitys pidemmällä aikavälillä

Pidemmältä, useamman vuoden ajalta mittaustuloksia oli käytettävissä vain kahdelta sähköasemalta, joten niiden perusteella ei ole mahdollista tehdä kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä yliaaltotasojen kehityksestä pidemmällä aikavälillä. Kuvissa 5.9...5.11 on esitetty kolmelta maaseutuverkkoyhtiön sähköasemalta mitatut 5. ja 7. yliaaltojännitteet prosentteina perusaallosta, kahden aseman osalta vajaan kolmen vuoden ajalta ja yhden aseman osalta 6,5 kk ajalta. Sähköasemilla M16 ja M17 mittaustulokset on 10 minuuttia ja sähköasemalla M18 1 minuutti. Sähköaseman M16 osalta 5. yliaallon taso näyttäisi olevan hieman laskeneen viimeisen vajaan kolmen vuoden kuluessa ja 7. yliaallon taso ehkä hieman nousseen, mutta muutokset ovat varsin pieniä. Sähköasemalla M17 kehitys näyttäisi päinvastaiselta ja hieman selvemältä, 5. yliaallon taso on noussut ja 7. yliaallon taso laskenut, mutta molemmat ovat tarkastelujaksosella lopulla varsin matalalla tasolla. Sähköaseman M18 tapauksessa 5. ja 7. yliaaltojen tasot ovat selvästi suuremmat kuin kahdella muulla asemalla. Joulun ja vuodenvaihteen aikaan särötasoissa näkyy melko selvä lasku, mutta selvää kehitystrendiä kuvassa ei ole havaittavissa. Tämän aseman osalta tarkastelujaksokin on tosin selvästi lyhyempi, vain noin 6,5 kuukautta.

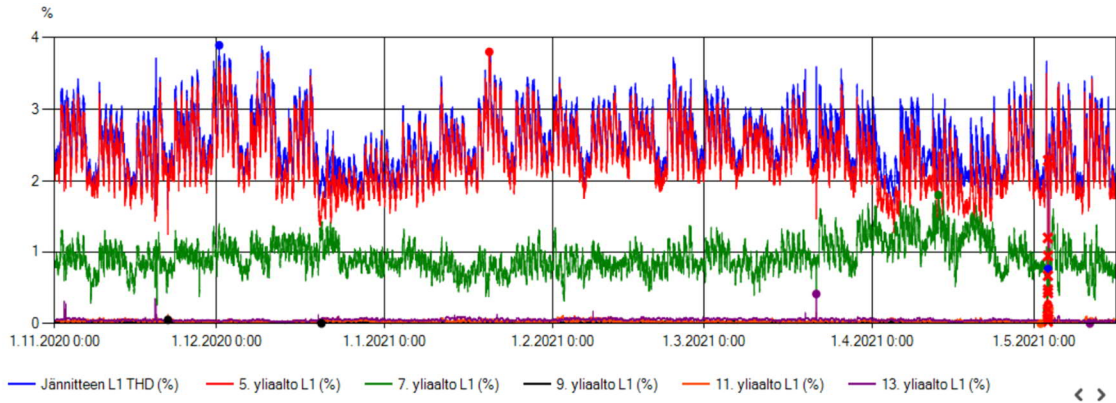
Tarkastellut mittaukset kaupunki- ja maaseutuverkkojen sähköasemilta antavat melko hyvän kuvan yliaaltotasoista erilaisilla sähköasemilla. Myös tässä raportissa esitetyissä simuloinneissa käytettyjen yliaaltotasojen voidaan katsoa edustavan hyvin näitä sähköasemilta mitattuja yliaaltotasoja.



Kuva 5.9 Sähköaseman M16 5. ja 7. yliaaltojännitteet prosentteina perusaallosta vajaan 3 vuoden ajalta.

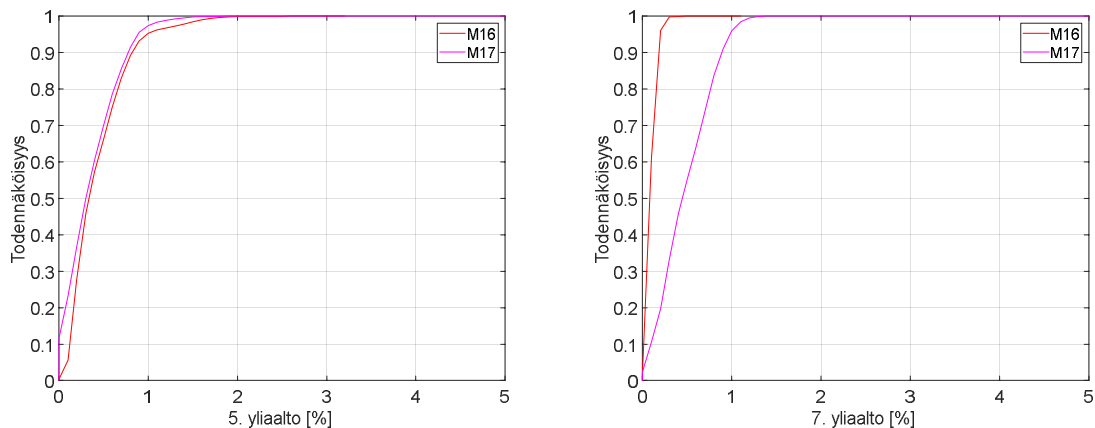


Kuva 5.10 Sähköaseman M17 5. ja 7. yliaaltojännitteet prosentteina perusaallosta vajaan 3 vuoden ajalta.



Kuva 5.11 Maaseutuverkon sähköaseman M18 harmoninen kokonaissärö sekä 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet prosentteina perusaallosta noin 6,5 kk ajalta.

Kuvassa 5.12 on esitetty kertymäfunktiot sähköasemien M16 ja M17 5. ja 7. yliaaltojännitteistä. 5. yliaallon osalta kertymäfunktiot ovat samankaltaiset, mutta 7. yliaaltojännite on sähköasemalla M17 selvästi suurempi.



Kuva 5.12 Sähköasemien M16 ja M17 5. ja 7. yliaaltojännitteiden kertymäfunktiot (prosentteina perusaallosta).

5.3 Yliaaltojännitteet ja -virrat maasulkukokeissa – maaseutuverkko 1

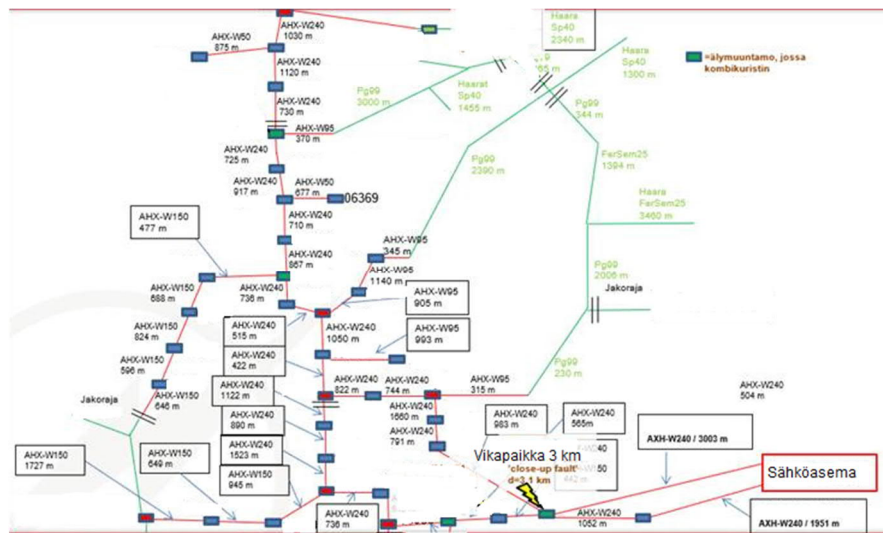
Ensimmäiset tässä hankkeessa tarkastellut maasulkukoesarjat tehtiin maaseutuverkossa 1 vuosina 2014 ja 2018. Vikapaikkojen sijainnit, etäisyydet sähköasemalta sekä vikapaikan ja sähköaseman välisen johto-osuuden impedanssi Z1 on esitetty taulukossa 5.6 ja verkkokuvat kuvissa 5.13 ja 5.14.

Taulukko 5.6 Vikapaikkojen sijainnit, etäisyydet sähköasemalta sekä vikapaikan ja sähköaseman välisen johto-osuuden impedanssi Z1.

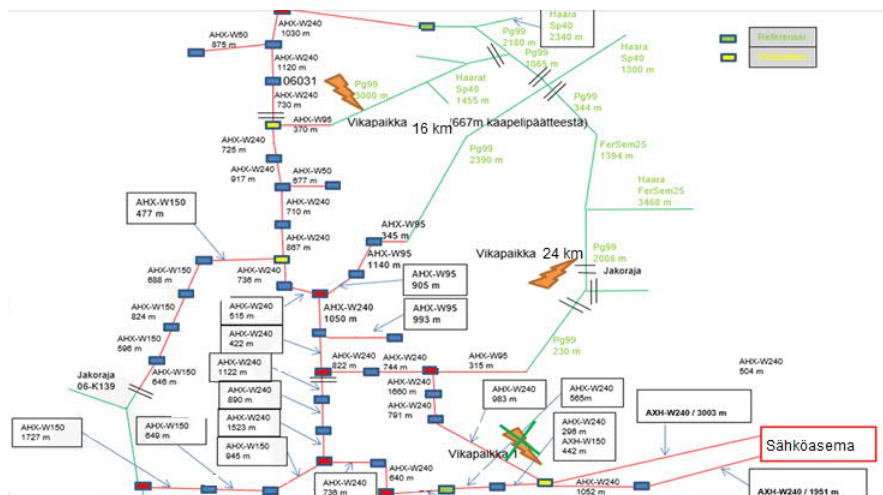
Vikapaikka	Etäisyys sähköasemalta	Impedanssi Z1 *)	Kokeiden ajankohta
1	3 km	$\sim 0.4 + j \cdot 0.34 \text{ ohm}$	2014
2	16 km	$\sim 2.2 + j \cdot 1.88 \text{ ohm}$	2018
3	24 km	$\sim 6.6 + j \cdot 4.75 \text{ ohm}$	2018

*) Vikapaikan ja sähköaseman välisen johto-osuuden impedanssi Z1

Aseman kompensointikelan kompensointiaste oli kokeissa -2A ja vikälähdön kompensointiyksiköt olivat koko ajan kiinni verkossa. Tässä tarkastelluissa kokeissa aseman kuristimessa vastuslogiikka (0A – 8A – 0A) oli käytössä.



Kuva 5.13 Vikapaikka 1 (3 km) vuoden 2014 maasulkukokeissa.



Kuva 5.14 Vikapaikat 2 (16 km) ja 3 (24 km) vuoden 2018 maasulkukokeissa.

Yliaaltotarkastelut on tehty Dranview-ohjelmistolla (versio 7.7.08) käyttämällä yliaalto-laskennoissa standardin IEC 61000-4-7 mukaista 200 ms laskentaikkunaa. Yliaaltoja tarkasteltiin kolmelta ajan hetkeltä:

- t 1: Normaalitylessä ennen vikaa, noin 600 ms alkuperäisen tallenteen alusta (kuviissa alkuperäisestä datasta ensimmäiset 100 ms jätetty pois)
- t 2: Vian aikana noin 800 ms vian alkuhetken jälkeen vian stabiililta osalta

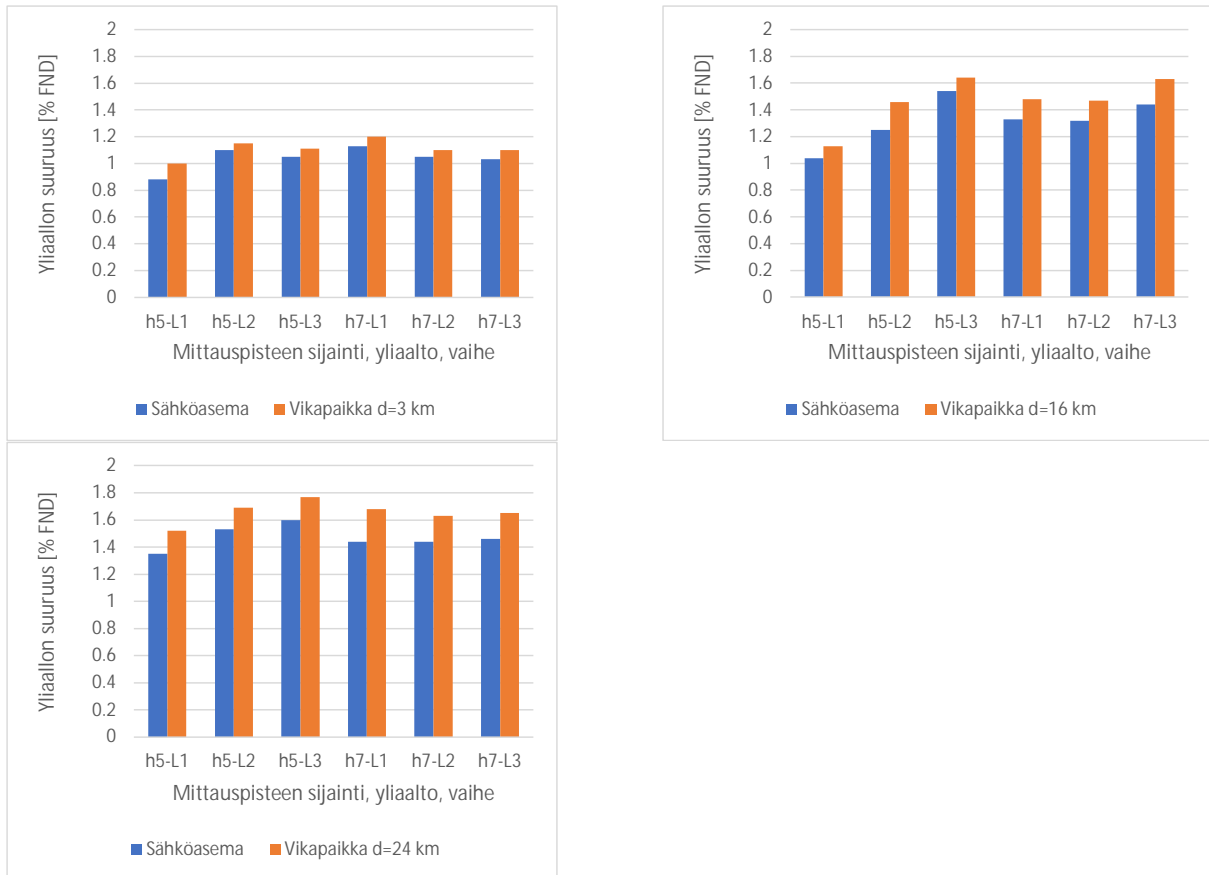
Sähköasemalla mitattiin

- Vaihejännitteet ja -virrat
- Nollajännite ja vikälähdön summavirta

Vikapaikassa mitattiin

- Vaihejännitteet
- Maasulkuvirta (ja Rogowski-sensoreilla vaihevirit, joita ei kuitenkaan ole käsitelty tässä raportissa)

Vaihejännitteiden 5. ja 7. harmoniset yliaallot sähköasemalla ja vikapaikoissa normaalitilassa ennen vikaa on esitetty kuvan 5.15 pylväsdiagrammeissa prosentteina perusaallosta. Kuten kuvista näkyy, yliaaltotasot ovat johtolähtöjen varrella jonkin verran suuremmat kuin sähköasemalla ja etäisyyden kasvaessa ero näyttäisi olevan yleisesti ottaen suurempi. Etäisyyden kasvaminen näyttäisi vaikuttavan enemmän 7. yliaallon kuin 5. yliaallon suuruuteen. Ero riippuu kuitenkin yliaallon kohtaaman impedanssin lisäksi kuormitusvirtojen yliaaltosisällöistä ja yliaaltolähteiden sijainnista verkossa.



Kuva 5.15 Normaalitilan yliaallot ennen vikaa sähköasemalla ja eri vikapaikoissa.

5.3.1 Vikapaikka 3 km sähköasemalta

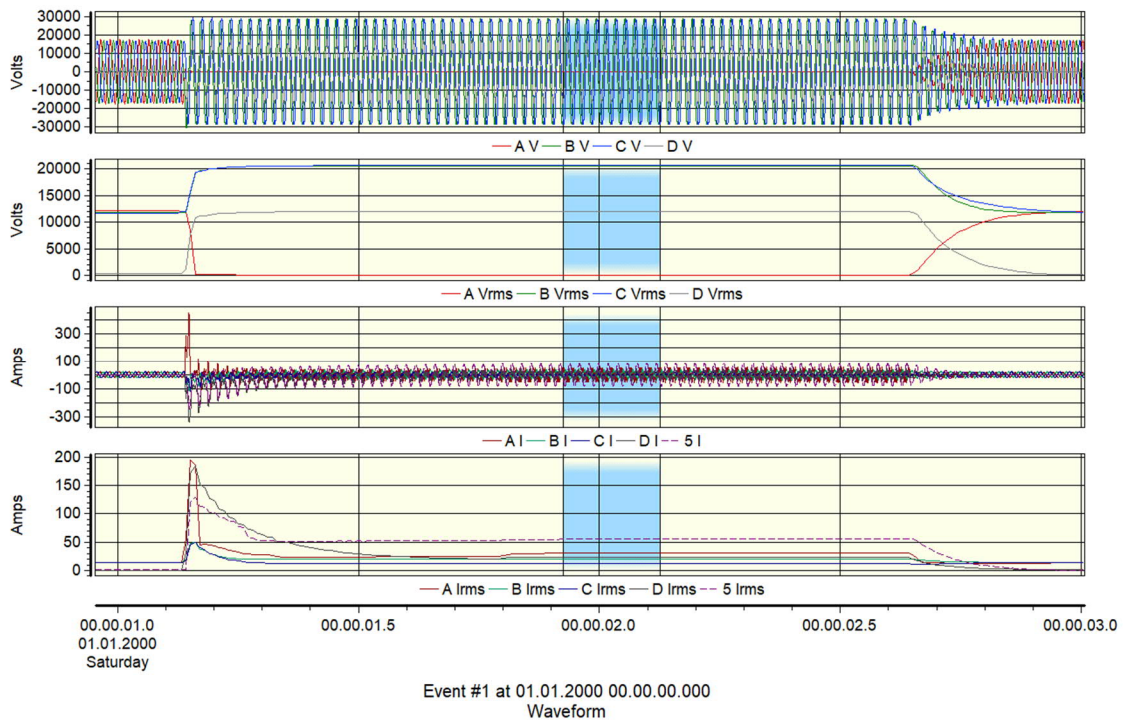
Taulukossa 5.7 on esitetty yhteenveto maadoitusjännitteiden kannalta keskeisimmistä suureista vian 32 osalta (vikaresistanssi $R_f = 0 \Omega$). Vikapaikan etäisyys sähköasemalta oli noin 3 km, joka oli kokonaan kaapelia (AHXAMK-W 3x240+35). Kuten taulukosta nähdään, vikalähdön summavirran ja vikavaiheen virran yliaaltosisältö ovat muuten samankaltaisia kuin vaihejännitteen yliaaltojakauma vikaa edeltävässä tilanteessa, mutta 7. yliaalto on selvästi vaimentunut. Keskitetyn maasulkuvirran kompensointikuristimen virran yliaaltosisältö on muuten samankaltainen, mutta siinä on lisäksi runsaasti 3. yliaaltoa. Yliaaltojakaumat on laskettu jakaumaa edeltävissä aaltomuotokuvissa sinisellä pohjalla merkityltä ajanjaksolta (sama pätee muihinkin luvun 5 ja liitteiden kuviin, ellei toisin ole mainittu).

Taulukko 5.7 Yhteenveto maadoitusjännitteiden kannalta keskeisimmistä suureista ja niiden yliaaltosisällöistä vian 32 osalta.

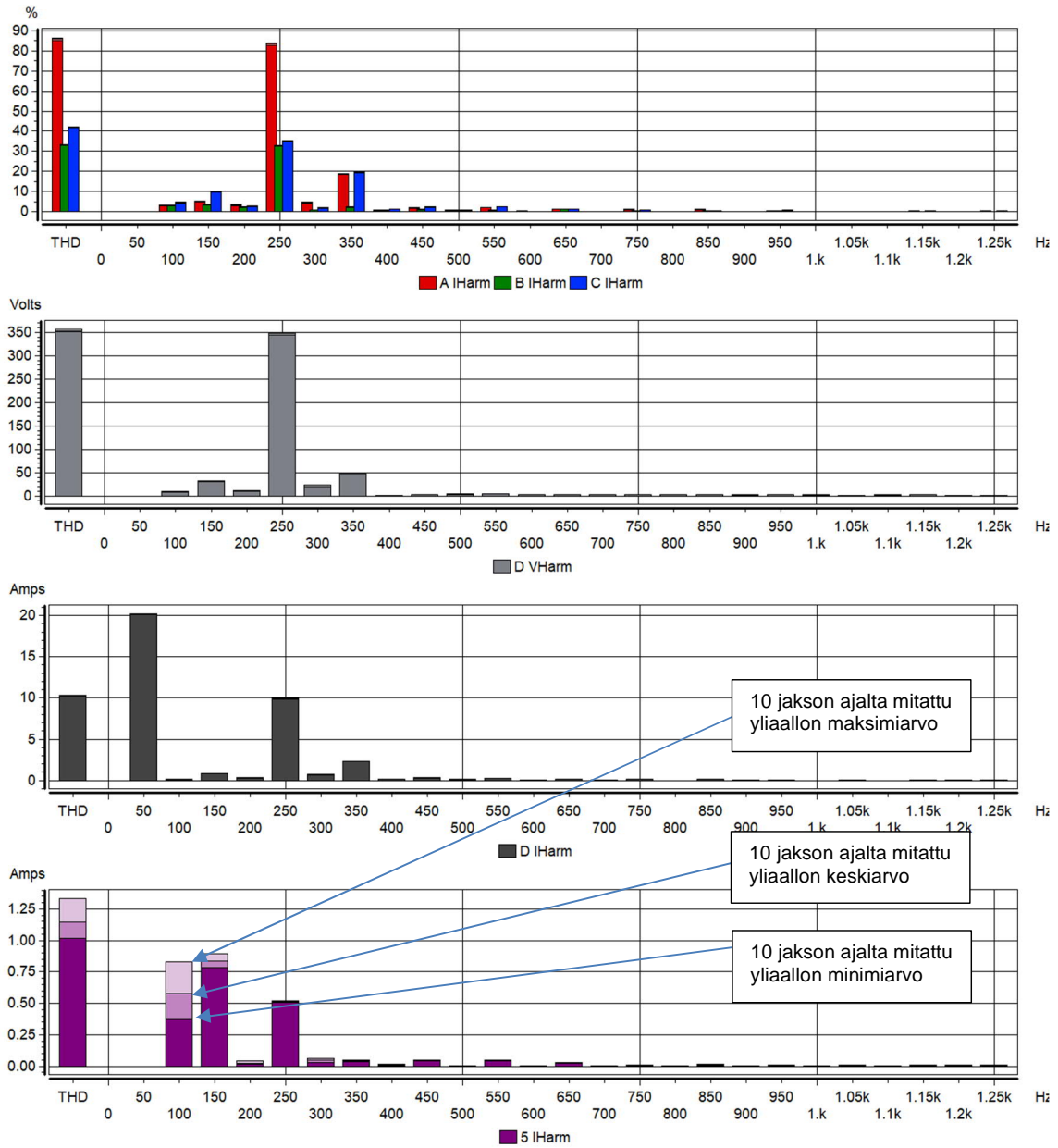
Vika	Mittauspiste	Suure ¹⁾	Mittaus	Yliaallon järjestysluku						
				50 Hz	3	5	7	11	13	
32	Sähköasema	Yliaaltojännite vikavaiheessa ennen vikaa [% FND]	U_{L1-ss}	12 144 V	0.17	0.88	1.08	0.015	0.059	
		Nollajännite vian aikana [V]	U_{0-ss}	11 942	30.7	348	48.6	4.83	2.4	
		Vikalähdön summavirta vian aikana [A]	I_{0-ss}	20.2	0.84	9.95	2.31	0.29	0.19	
		Vikavaiheen virta vian aikana [A]	I_{L1-ss}	23.2	1.17	19.3	4.34	0.47	0.33	
		Sammutuskuristimen virta [A]	I_{ES-ss}	55.3	0.83	0.51	0.042	0.045	0.025	
Vikapaikka	Yliaaltojännite vikavaiheessa ennen vikaa [% FND]	Yliaaltojännite vikavaiheessa ennen vikaa [% FND]	U_{L1-fl}	12 085 V	0.15	0.97	1.21	0.05	0.085	
			Vikavirta [A]	I_{E-fl}	7.5	0.77	13.1	2.92	0.36	0.23
			Vikavirran yliaaltojen suhde perusaaltoon [% FND]			10.3	174.7	38.9	4.8	3.1

¹⁾ kaikkien suureiden arvot 200 ms tehollisarvoja (avg) vian stabiililta osuudelta tai n. 400 ms ennen vikaa

Jännitteiden ja virtojen aaltomuodot, tehollisarvot ja yliaaltojakaumat on esitetty kuvissa 5.16...5.18.

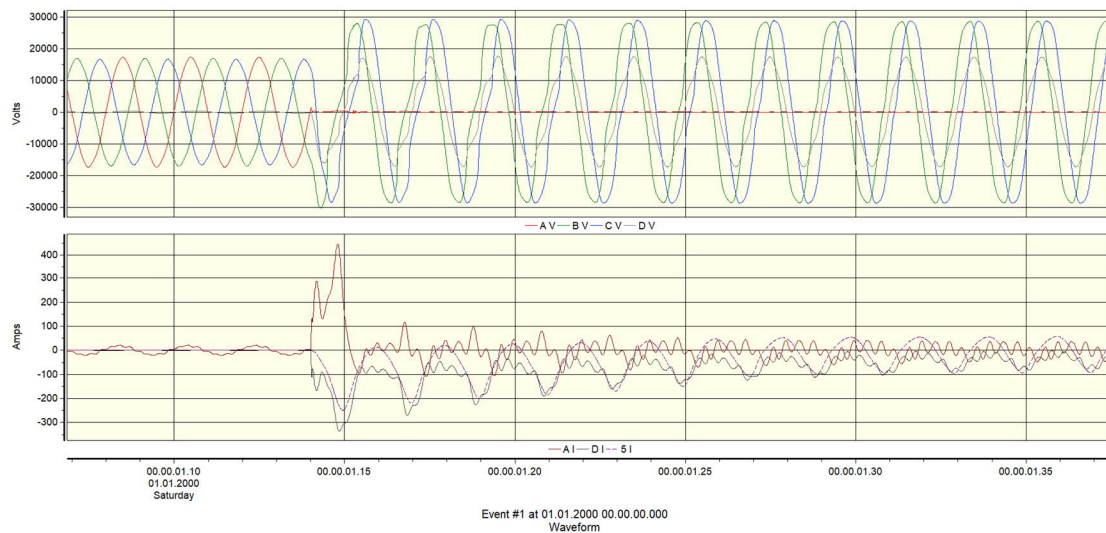


Kuva 5.16 Vaihejännitteiden (AV...CV) ja -virtojen (AI...CI) sekä nollajännitteen (DV) ja vikalähdön summavirran (DI) ja keskitetyn kompensoinnin kuristimen virran (5I) aaltomuodot ja tehollisarvot sähköasemalla kiskojaännitemuuntajien ja vikalähdön virtamuuntajien toisioista mitattuna.

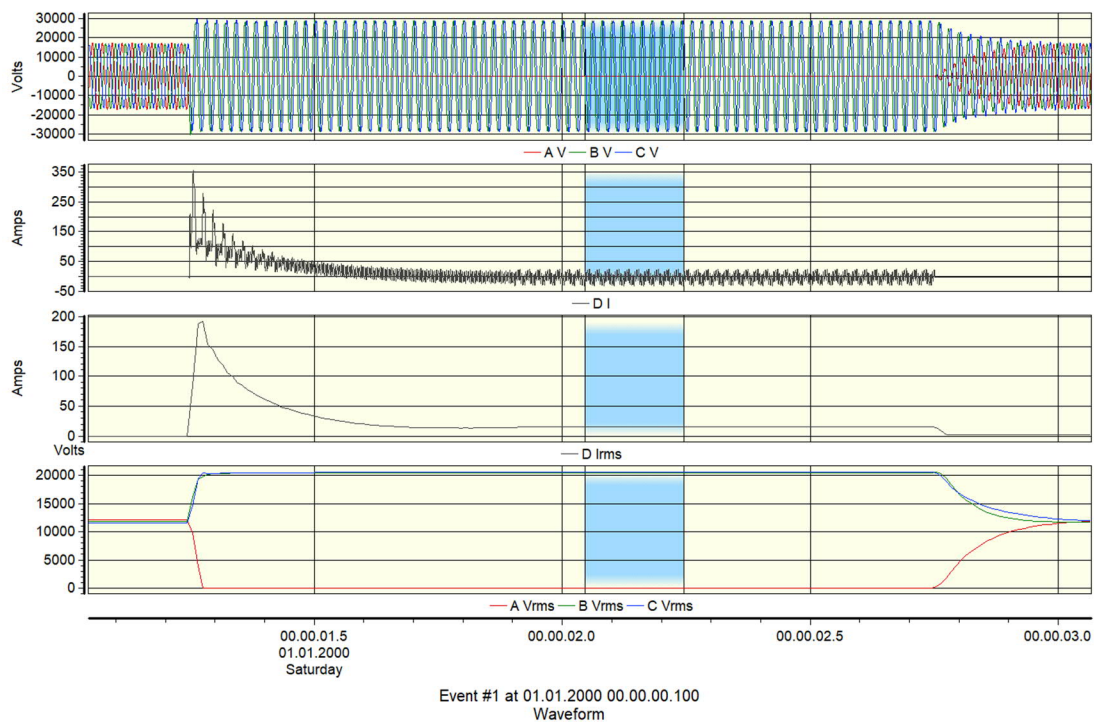


Kuva 5.17 Vikalähdön vaihevirtojen (AI...CI), nollajännitteen (DV), vikalähdön summavirran (DI) ja keskitetyn kompensoinnin kuristimen virran (5I) yliaaltojakaumat. Ensin mainittu prosentteina perusaallosta, muut absoluuttisarvoina.

a)



b)



Kuva 5.18 a) Vaihejännitteiden ja nollajännitteen sekä vikavaiheen virran, vikälähdön summavirran ja keskitetyn kompensoinnin kuristimen virran aaltomuodot vian alussa sähköasemalla kiskojännitemuuntajien ja vikälähdön virtamuuntajien toisista mitattuna. b) Vaihejännitteiden (AV...CV) ja vikavirran (DI) aaltomuodot ja tehollisarvot vikapaikassa vikakärryn jännitemuuntajien ja kaapelivirtamuuntajan toisista mitattuna.

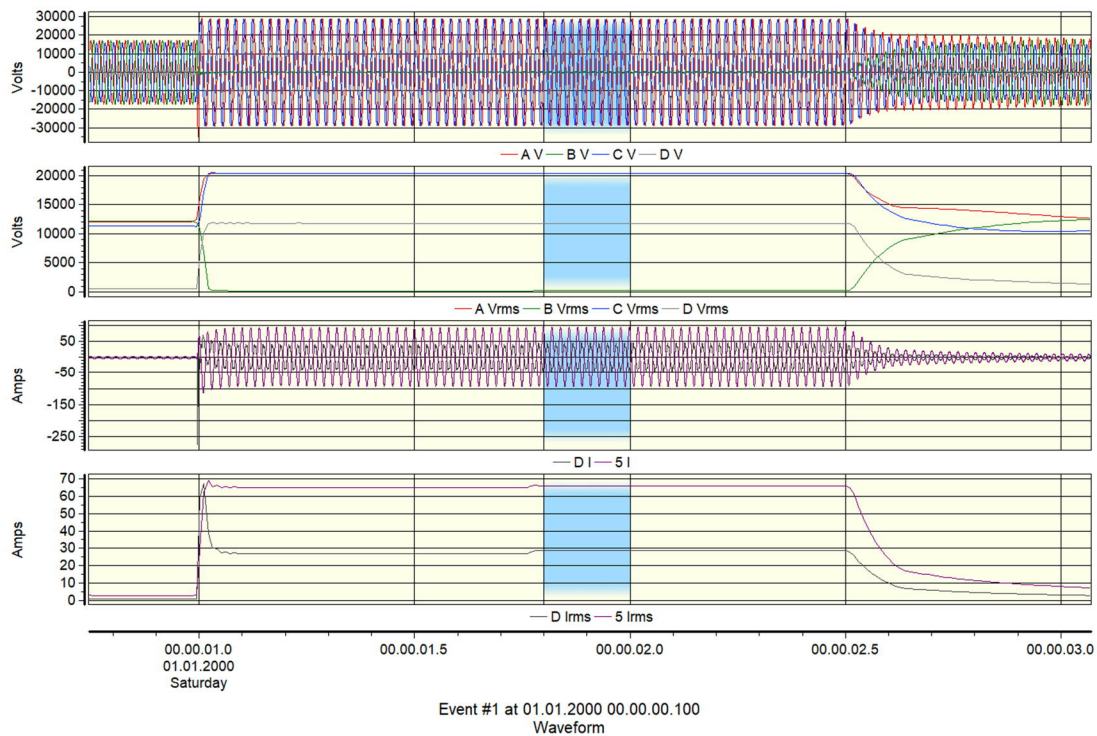
5.3.2 Vikapaikka 16 km sähköasemalta

Taulukossa 5.8 on esitetty yhteenveto maadoitusjännitteiden kannalta keskeisimmistä suureista vian 59 (vikaresistanssi $R_F = 0 \Omega$) ja 69 (vikaresistanssi $R_F = 50 \Omega$) osalta. Vikapaikan etäisyys sähköasemalta oli noin 16 km, josta noin 15,4 km oli kaapelia ja noin 0,667 km avojohtoa (Pg99). Kuten taulukosta ja kuvasta 20 nähdään, 5. ja 7. yliaaltojen suhteellinen osuus vikalähdön summavirrassa on pienentynyt selvästi 3 km etäisyydellä tehtyyn vikaan verrattuna. Ero on suurempi 5. yliaallon tapauksessa. Myös nolajännitteessä on havaittavissa sama ilmiö.

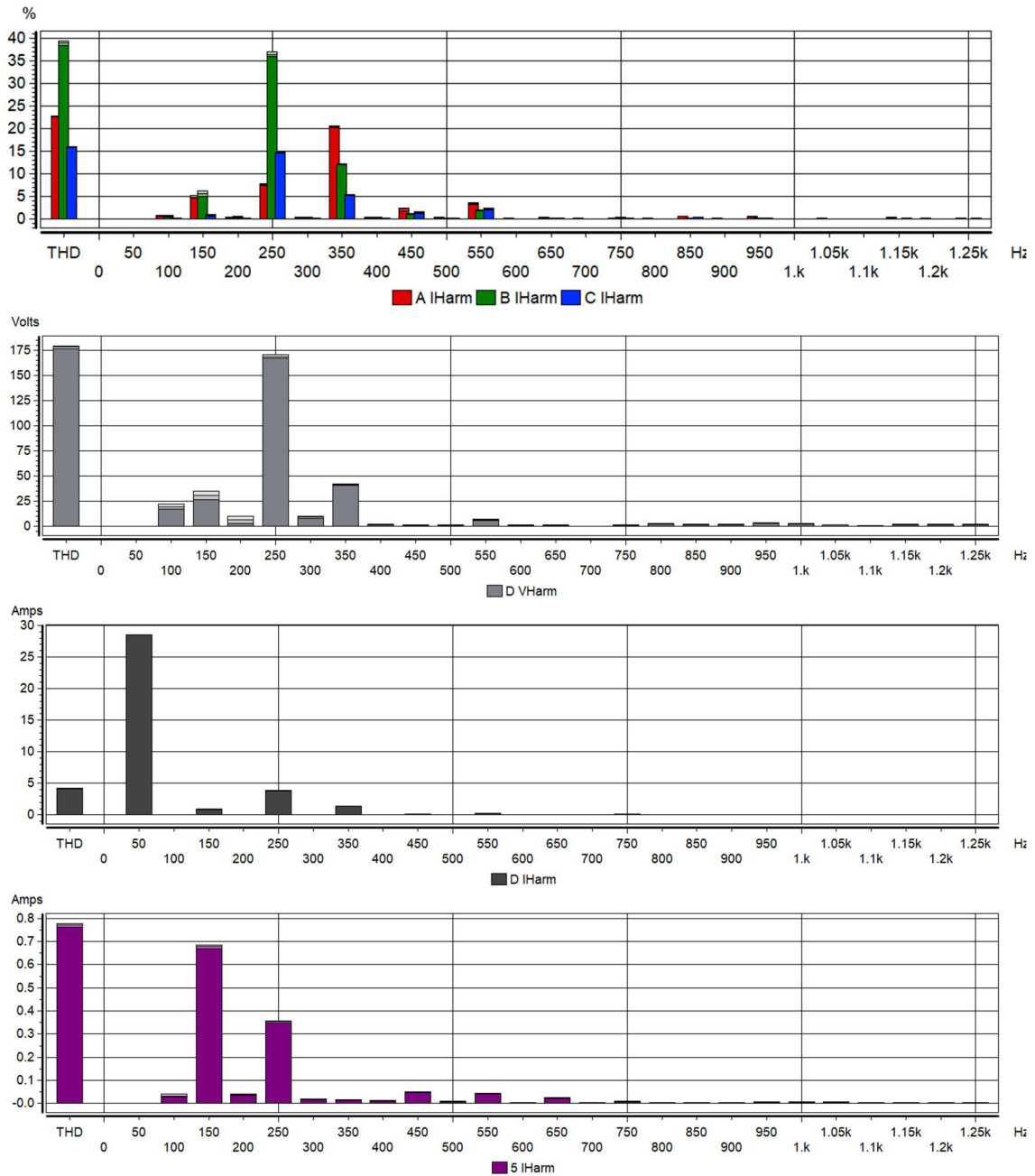
Taulukko 5.8 Yhteenveto maadoitusjännitteiden kannalta keskeisimmistä suureista ja niiden yliaaltosisällöistä vian 59 osalta.

Vika	Mittauspiste	Suure ¹⁾	Mittaus	Yliaallon järjestysluku					
				50 Hz	3	5	7	11	13
59	Sähköasema	Yliaaltojännite vikavaiheessa ennen vikaa [% FND]	U_{L2-ss}	12 187 V	0.073	1.3	1.32	0.16	0.018
		Nolajännite vian aikana [V]	U_{0-ss}	11 754	30.8	169	41.8	6.7	1.56
		Vikalähdön summavirta vian aikana [A]	I_{0-ss}	28.6	0.88	3.83	1.4	0.28	0.061
		Vikavaiheen virta vian aikana [A]	I_{L2-ss}	22.3	1.24	8.1	2.7	0.42	0.027
		Sammutuskuristimen virta [A]	I_{ES-ss}	65.7	0.68	0.35	0.014	0.043	0.026
	Vikapaikka	Yliaaltojännite vikavaiheessa ennen vikaa [% FND]	U_{L2-fl}	12 122	0.08	1.45	1.46	0.23	0.025
		Vikavirta [A]	I_{E-fl}	11	1.35	9.43	3.15	0.65	0.17
		Vikavirran yliaaltojen suhde perusaaltoon [% FND]			12.3	85.7	28.6	5.9	1.5

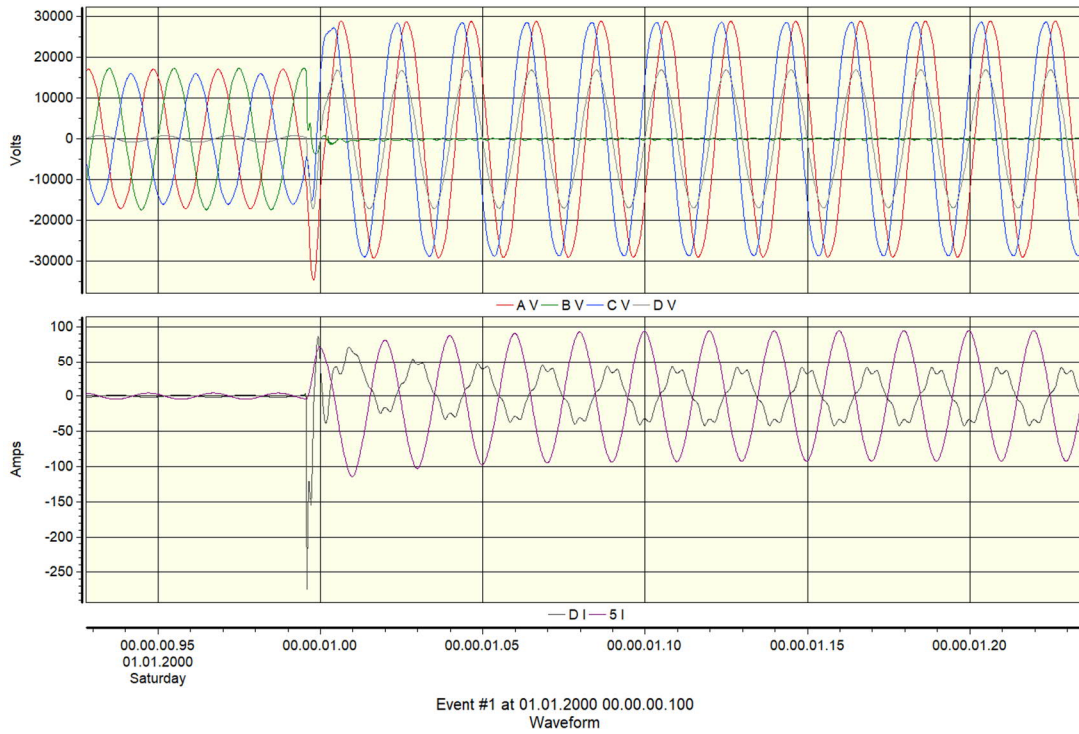
¹⁾ kaikkien suureiden arvot 200 ms tehollisarvoja (avg) vian stabiililta osuudelta tai n. 400 ms ennen vikaa



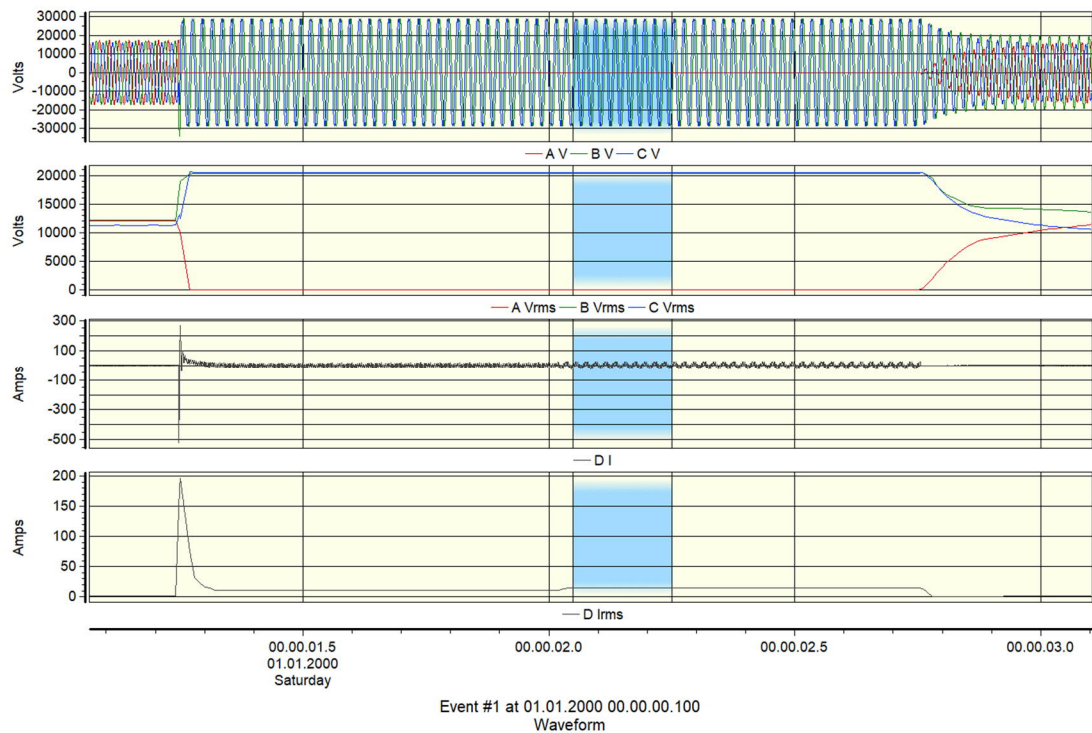
Kuva 5.19 Vaihejännitteiden (AV...CV) ja nolajännitteen (DV) sekä vikalähdön summavirran (DI) ja keskitetyn kompensoinnin kuristimen virran (5I) aaltomuodot ja tehollisarvot sähköasemalla kiskojännitemuuntajien ja vikalähdön virtamuuntajien toisioista mitattuna.



Kuva 5.20 Vikalähdön vaihevirtojen (AI...CI), nollajännitteen (DV), vikalähdön summavirran (DI) ja keskitetyn kompensoinnin kuristimen virran (5I) yliaaltojakaumat. Ensin mainittu prosentteina perusaallosta, muut absoluuttisarvoina.



Kuva 5.21 Vaihejännitteiden ja nolajännitteen sekä vikälähdon summavirran ja keskitetyn kompensoinnin kuristimen virran aaltomuodot vian alussa sähköasemalla kiskojännitemuuntajien ja vikälähdon virtamuuntajien toisiosta mitattuna.

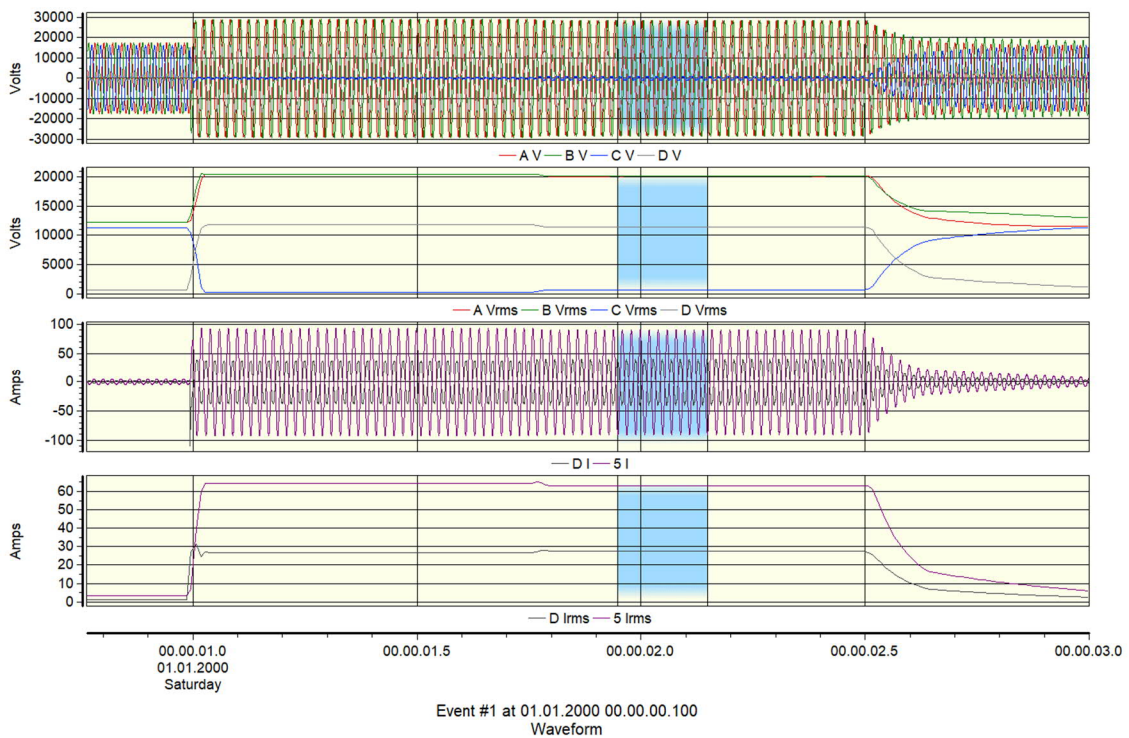


Kuva 5.22 Vaihejännitteiden (AV...CV) ja vikavirran (DI) aaltomuodot ja tehollisarvot vikapaikassa vikäkärryn jännitemuuntajien ja kaapelivirtamuuntajan toisiosta mitattuna.

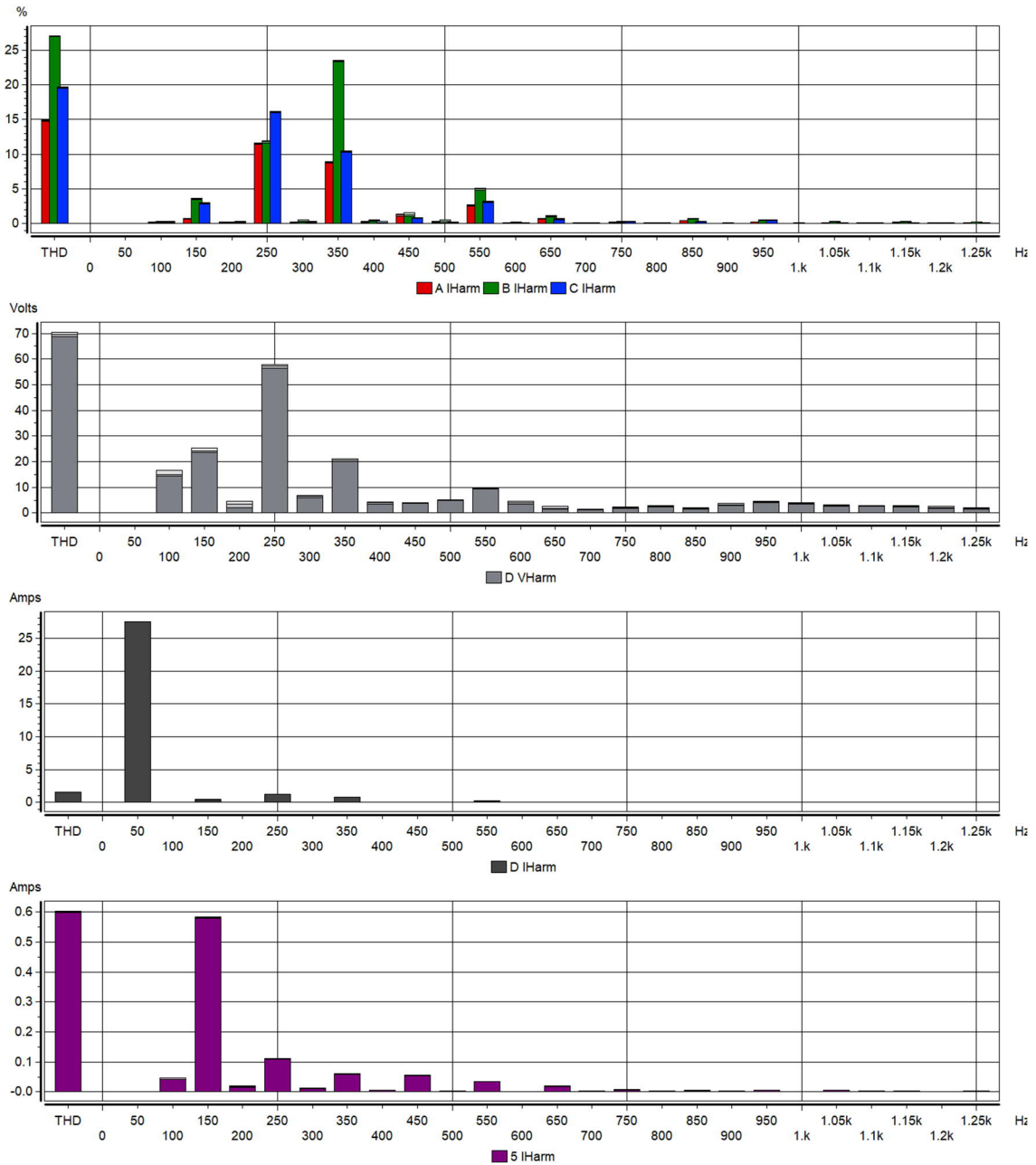
Taulukko 5.9 Yhteenveto maadoitusjännitteiden kannalta keskeisimmistä suureista ja niiden yliaaltosisällöistä vian 69 osalta.

Vika	Mittauspiste	Suure ¹⁾	Mittaus	Yliaallon järjestysluku					
				50 Hz	3	5	7	11	13
59	Sähköasema	Yliaaltojännite vikavaiheessa ennen vikaa [% FND]	U_{L2-ss}	12 187 V	0.073	1.3	1.32	0.16	0.018
		Nollajännite vian aikana [V]	U_{0-ss}	11 754	30.8	169	41.8	6.7	1.56
		Vikalähdon summavirta vian aikana [A]	I_{0-ss}	28.6	0.88	3.83	1.4	0.28	0.061
		Vikavaiheen virta vian aikana [A]	I_{L2-ss}	22.3	1.24	8.1	2.7	0.42	0.027
		Sammutuskuristimen virta [A]	I_{ES-ss}	65.7	0.68	0.35	0.014	0.043	0.026
	Vikapaikka	Yliaaltojännite vikavaiheessa ennen vikaa [% FND]	U_{L2-fl}	12 122	0.08	1.45	1.46	0.23	0.025
		Vikavirta [A]	I_{E-fl}	11	1.35	9.43	3.15	0.65	0.17
Vikavirran yliaaltojen suhde perusaaltoon [% FND]				12.3	85.7	28.6	5.9	1.5	

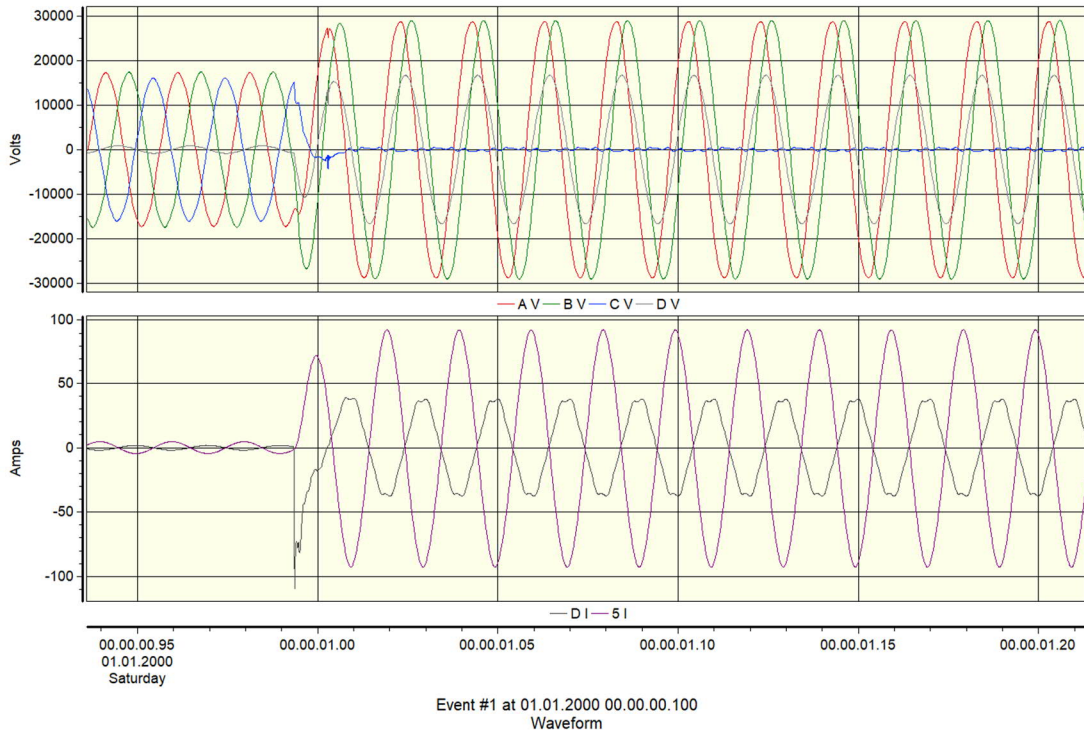
¹⁾ kaikkien suureiden arvot 200 ms tehollisarvoja (avg) vian stabiililta osuudelta tai n. 400 ms ennen vikaa



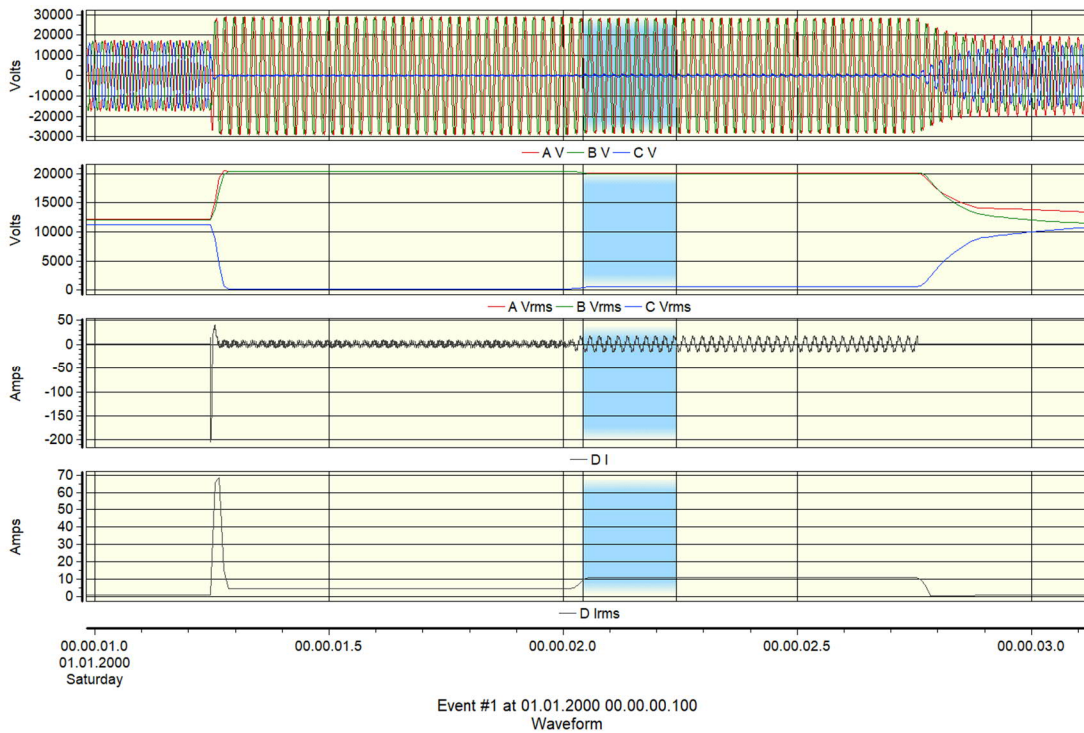
Kuva 5.23 Vaihejännitteiden (AV...CV) sekä nollajännitteen (DV) ja vikalähdon summavirran (DI) ja keskitetyn kompensoinnin kuristimen virran (5I) aaltomuodot ja tehollisarvot sähköasemalla kiskojaännitemuuntajien ja vikalähdon virtamuuntajien toisioista mitattuna.



Kuva 5.24 Vikalähdön vaihevirtojen (A1...C1), nolajännitteen (DV), vikalähdön summavirran (DI) ja keskitetyn kompensoinnin kuristimen virran (5I) yliaaltojakaumat. Ensinnä mainittu prosentteina perusaallosta, muut absoluuttisarvoina.



Kuva 5.25 Vaihejännitteiden ja nollajännitteen sekä vikälähdön summavirran ja keskitetyn kompensoinnin kuristimen virran aaltomuodot vian alussa sähköasemalla kiskojännitemuuntajien ja vikälähdön virtamuuntajien toisista mitattuna.



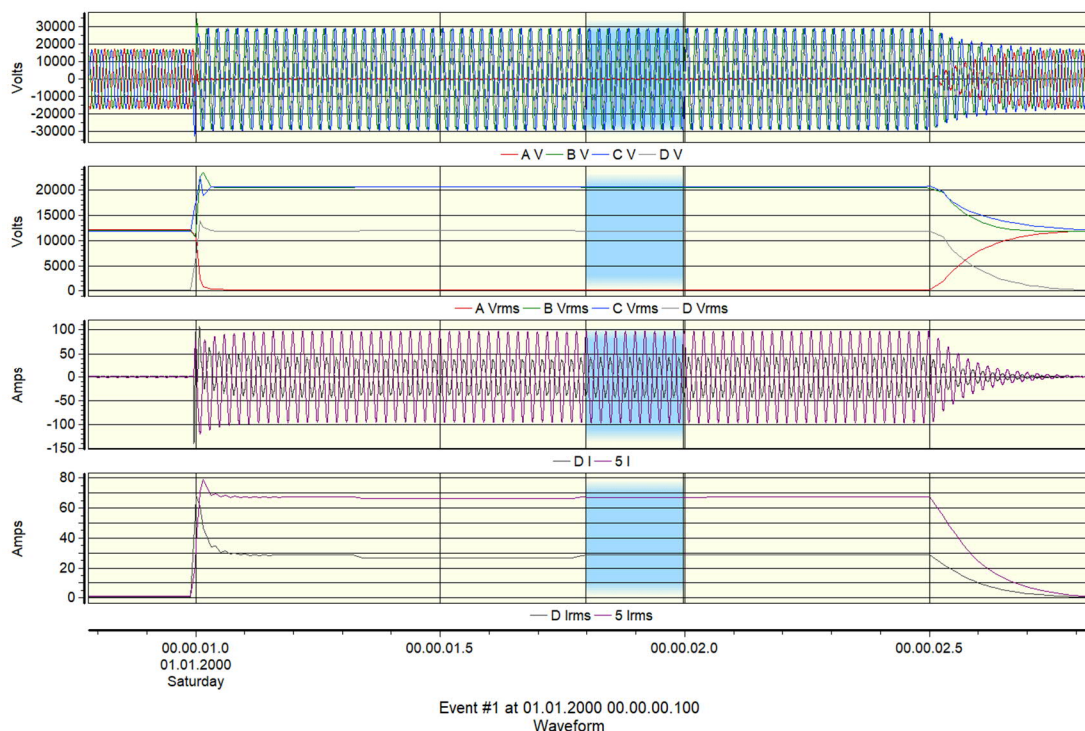
Kuva 5.26 Vaihejännitteiden (AV...CV) ja vikavirran (DI) aaltomuodot ja tehollisarvot vikapaikassa vikäkärryn jännitemuuntajien ja kaapelivirtamuuntajan toisista mitattuna.

5.3.3 Vikapaikka 24 km sähköasemalta

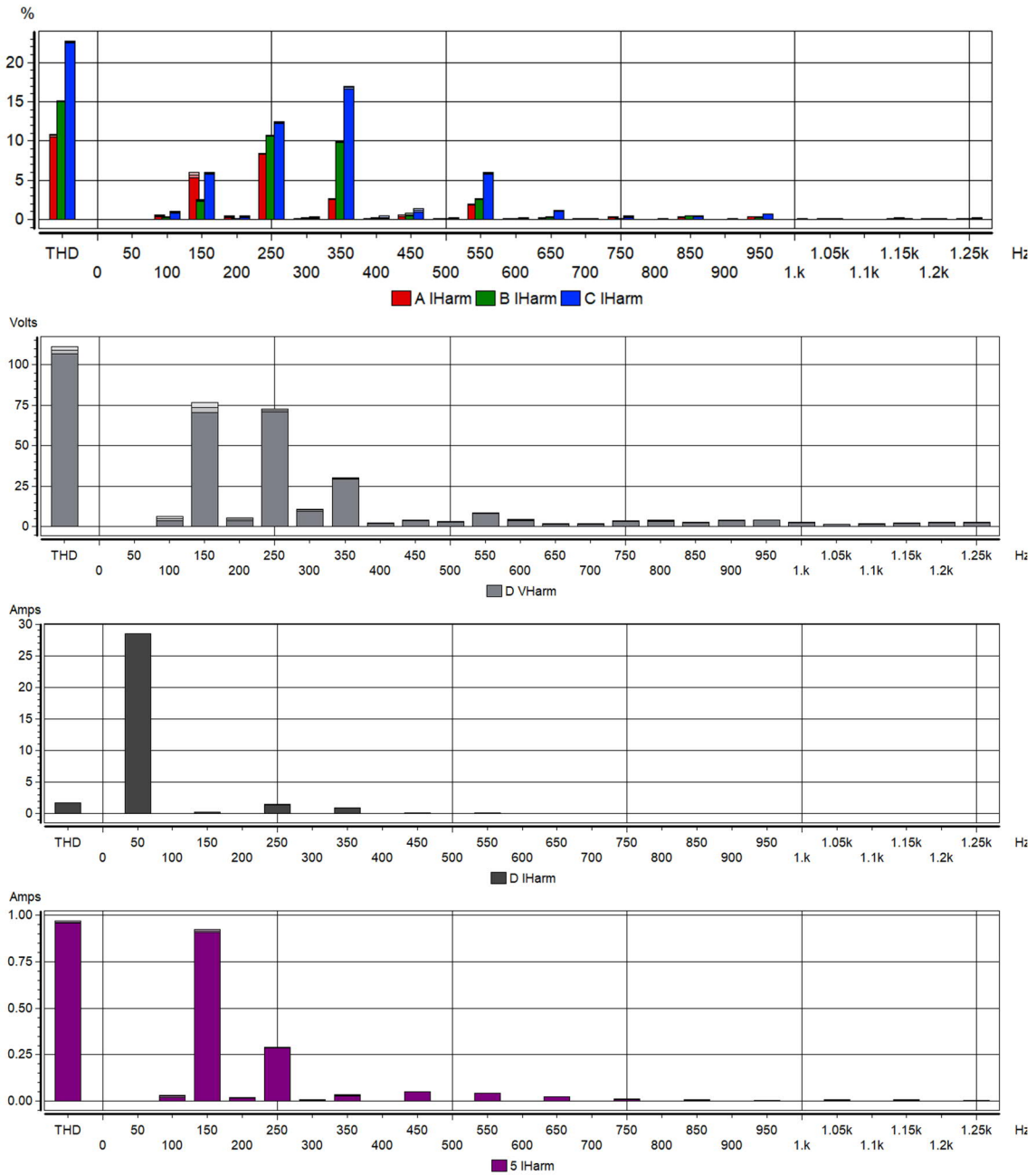
Taulukossa 5.10 on esitetty yhteenveto maadoitusjännitteiden kannalta keskeisimmistä suureista vian 28 osalta (vikaresistanssi $R_F = 0 \Omega$). Vikapaikan etäisyys sähköasemalta oli noin 24 km, josta noin 15,4 km oli kaapelia ja noin 8,6 km avojohtoa (pääosin Pg99 + 1394 m FerSem25). Kuten taulukosta 5.10 ja kuvasta 5.28 nähdään, 3 km ja 16 km etäisyyksillä tehtiin vikoihin verrattuna 7. yliaallon suhteellinen osuus vikavirran säröstä on kasvanut mutta kaikki yliaaltovirrat 3. yliaalto lukuun ottamatta kuitenkin ovat pienentyneet suhteessa vikavirran perusaaltoon, 5. yliaalto kaikkein selvimmin. Myös nolajännitteessä on havaittavissa sama ilmiö. Myös vikälähdön summavirran yliaaltojakauma muistuttaa nyt enemmän terveen tilan vaihejännitteen yliaaltojakaumaa kuin 3 km ja 16 km etäisyyksillä tehtyjen vikojen tapauksessa.

Taulukko 5.10 Yhteenveto maadoitusjännitteiden kannalta keskeisimmistä suureista ja niiden yliaaltosisällöistä vian 28 osalta.

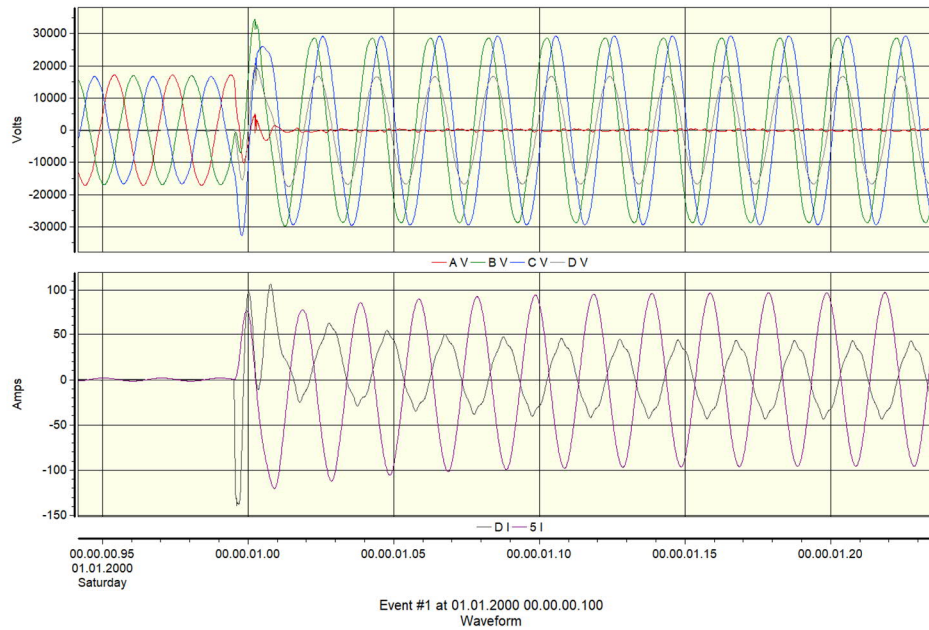
Vika	Mittauspiste	Suure ¹⁾	Mittaus	Yliaallon järjestysluku					
				50 Hz	3	5	7	11	13
28	Sähköasema	Yliaaltojännite vikavaiheessa ennen vikaa [% FND]	U_{L1-ss}	12 129 V	0.23	1.36	1.45	0.13	0.013
		Nolajännite vian aikana [V]	U_{0-ss}	11 854	73.8	71.8	29.8	8.32	1.74
		Vikalähdön summavirta vian aikana [A]	I_{0-ss}	28.5	0.25	1.46	0.95	0.15	0.046
		Viollisen vaiheen virta vian aikana [A]	I_{L1-ss}	21.7	1.24	1.82	0.57	0.4	0.049
		Sammutuskuristimen kuristimen virta [A]	I_{ES-ss}	67.2	0.91	0.29	0.033	0.043	0.024
	Vikapaikka	Yliaaltojännite vikavaiheessa ennen vikaa [% FND]	U_{L1-fl}	12 066 V	0.18	1.5	1.68	0.22	0.035
	Vikavirta [A]	I_{E-fl}	11.3	1.49	3.73	2.09	0.34	0.068	
	Vikavirran yliaaltojen suhde perusaaltoon [% FND]			13.2	33.0	18.5	3.0	0.6	
		¹⁾ kaikkien suureiden arvot 200 ms tehollisarvoja (avg) vian stabiililta osuudelta tai n. 400 ms ennen vikaa							



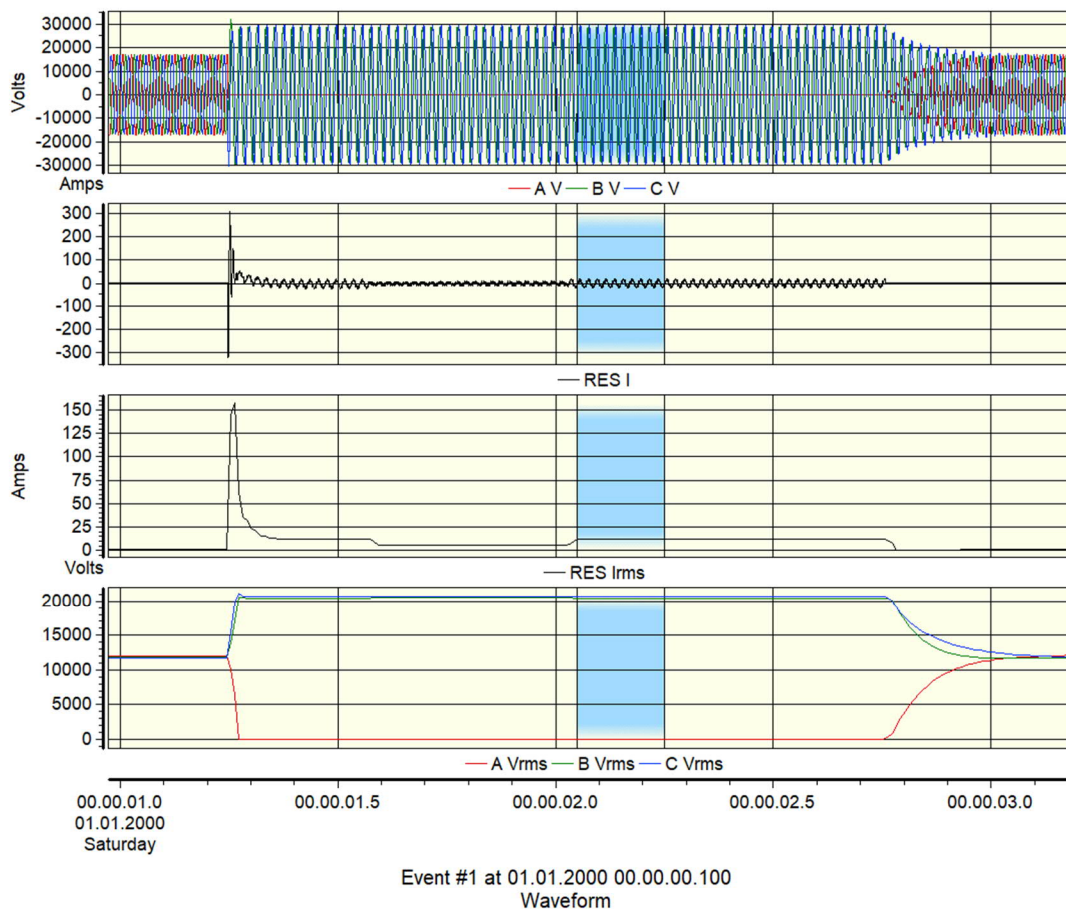
Kuva 5.27 Vaihejännitteiden (AV...CV) ja nolajännitteen (DV) sekä vikälähdön summavirran (DI) ja keskitetyn kompensoinnin kuristimen virran (5I) aaltomuodot ja tehollisarvot sähköasemalla kiskoajännitemuuntajien ja vikälähdön virtamuuntajien toisioista mitattuna.



Kuva 5.28 Vikalähdön vaihevirtojen (AI...CI), nollajännitteen (DV), vikalähdön summavirran (DI) ja keskitetyn kompensoinnin kuristimen virran (I) yliaaltojakaumat. Ensinnä mainittu prosentteina perusaallosta, muut absoluuttisarvoina.



Kuva 5.29 Vaihejännitteiden (AV...CV) ja nollajännitteen (DV) sekä vikälähdon summavirran (DI) ja keskitetyn kompensoinnin kuristimen virran (5I) aaltomuodot ja tehollisarvot sähköasemalla kiskojännitemuuntajien ja vikälähdon virtamuuntajien toisista mitattuna.



Kuva 5.30 Vaihejännitteiden (AV...CV) ja vikavirran (RES I) aaltomuodot ja tehollisarvot vikapaikassa vikakärryn jännitemuuntajien ja kaapelivirtamuuntajan toisista mitattuna.

5.4 Yliaaltojännitteet ja -virrat maasulkukokeissa – maaseutuverkko 2

Toinen hankkeessa tarkasteltu maasulkukoesarja tehtiin hankkeen aikana maaseutuverkon sähköasemalla tehtyjen maasulkuvirran kompensointilaitteiston käyttöönottokokeiden yhteydessä. Sähköasemalla oli ennestään maasulkuvirran kompensointilaitteisto, mutta kaapeliverkon laajentumisen myötä nyt otettiin käyttöön lisäkompensointikela. Kaikki kokeet tehtiin tässä tapauksessa vikaresistanssilla $R_F = 0 \Omega$ ja vikapaikka sijaitti sähköasemaitauksen sisäpuolella sähköasemalta lähtevän avojohdon päätepylväällä. Viat tehtiin maadoittamalla lähdön yhden vaiheen kaapelipääte (kuva 5.31) pylvään maadoitukseen. Tehtyjen vikojen perustiedot ja lisävastuksen asettelu eri vioissa on esitetty taulukossa 5.11. Lisävastuksen arvot on esitetty taulukossa toisioarvoina.

Yksinkertaistettu kaaviokuva mittauspisteiden sijainneista vikälähdöllä ja kahdella muulla hajautettua kompensointia sisältävällä lähdöllä on esitetty kuvassa 5.32. Sähköasemalla mitattiin vikälähdön vaihejännitteitä, vaihevirtoja ja nolajännitettä ja toisen (säädettävän) sammutuskuristimen virtaa sekä muuntamoilla, joissa sammutuskuristin oli integroitu jakelumuuntajaan, jakelumuuntajan maadoituksen virtaa. Lisäksi toisella muuntamolla mitattiin myös muuntajalta kojeistolle lähtevien kaapeleiden kosketussuojien virtaa. Sammutuskuristimen virta jakautuu maadoituksen ja kosketussuojien kesken vastaavalla tavalla kuin vikavirta vikakohdassa. Mittauksia tehtiin kahdella eri lisävastuksen arvolla ja ilman lisävastusta. Kuvaa on yksinkertaistettu mm. seuraavilta osin:

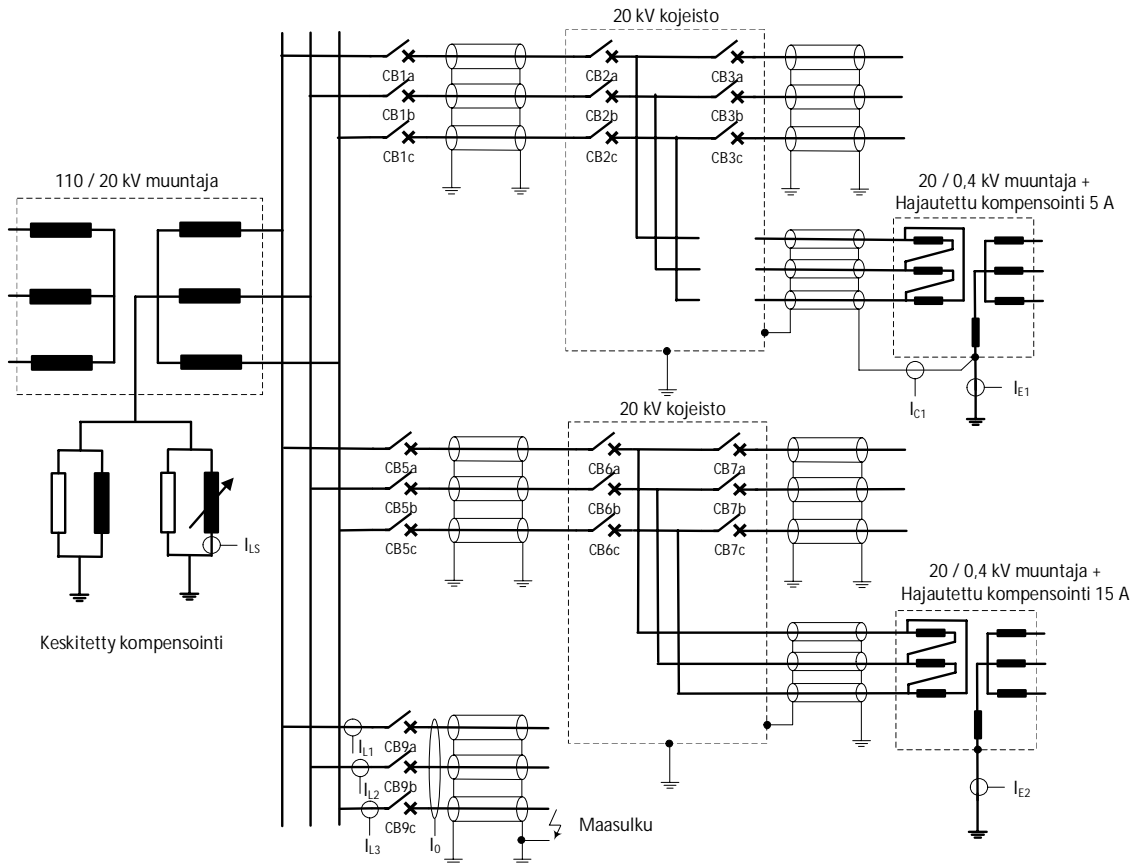
- Keskitetty maasulkuvirran kompensointi on piirretty päämuuntajan toisioon tähtipisteeseen, todellisuudessa keskitetty kompensointi on kytketty verkkoon tavanomaiseen tapaan maadoitusmuuntajan kautta ja päämuuntajan toisio on kolmiokytkentäinen.
- Hajautetun kompensoinnin lähdöillä mitatut muuntamot eivät olleet sähköasemalta katsottuna ensimmäisiä, vaan välissä oli 5 A kompensoinnin tapauksessa 2 kpl ja 15 A kompensoinnin tapauksessa useampia muita muuntamoita, verkko oli kuitenkin kaapeliverkkoa sähköasemalta mitatulle muuntamolle saakka ja vielä siitä eteenpäinkin vähintään yhden muuntamovälin verran.
- Sähköaseman muita lähtöjä vikälähdön ja mitattujen lähtöjen lisäksi ei ole piirretty kuvaan.



Kuva 5.31 Vikapaikka päätepylvään kaapelipääteellä.

Taulukko 5.11 Maasulkukokeissa tehdyt viat.

Vika n:o	Klo	Vikavaihe	Vikaresistanssi	Lisävastus
1	10:29:04	L3	0 Ω	8 A
2	11:28:57	L3	0 Ω	4 A
3	12:15:46	L2	0 Ω	0 A (ei lisävastusta)
4	12:19:55	L2	0 Ω	8 A



Kuva 5.32 Yksinkertaistettu kaaviokuva maaseutuverkon 2 sähköasemasta ja lähdistä, joilla maasulkukokeet ja mittaukset tehtiin.

Kuten kuvasta 5.32 nähdään, 5 A ja 15 A kompensoinnin muuntamoilla mm. muuntaja-kojeisto-kaapeleiden maadoitukset oli kytketty eri tavoin, joten esimerkiksi virran jakautumisen mittaus (muuntajan maadoitus - kaapeleiden kosketussuojat) oli mahdollista ainoastaan 5 A kompensoinnin muuntamolla.

5.4.1 Mittaukset sähköasemalla

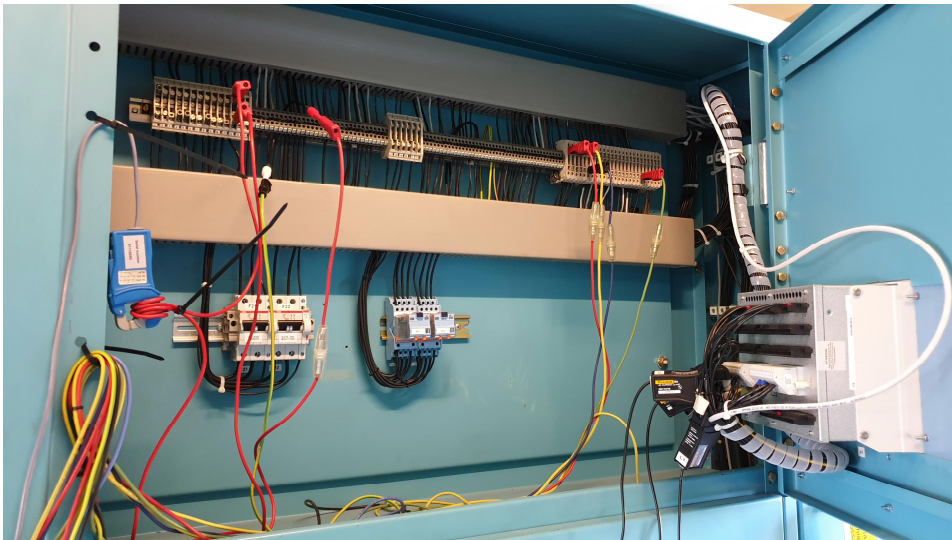
Sähköasemalla mittaukset tehtiin vikälähdöstä Dranetz PowerXplorer PX5-sähkönlaatuanalysointilaitteella ja Dranetz TR 2510A-virtapihdeillä kiskojännitemuuntajien ja vikälähdön virtamuuntajien toisista. Mittalaitte rekisteröi vikälähdön vaihejännitteet ja virrat, nollajännitteen U_0 ja summavirran I_0 . Lisäksi toisella Dranetz PowerXplorer PX5-sähkönlaatuanalysointilaitteella ja Fluke i1000s-virtapihdeillä rekisteröitiin toisen (säädettävän) sammutuskuristimen virta. Mittauskytkennät on esitetty taulukoissa 5.12 ja 5.13 sekä kuvissa 5.34 ja 5.35.

Taulukko 5.12 Mittauskytkennät sähköaseman vikälähdöllä.

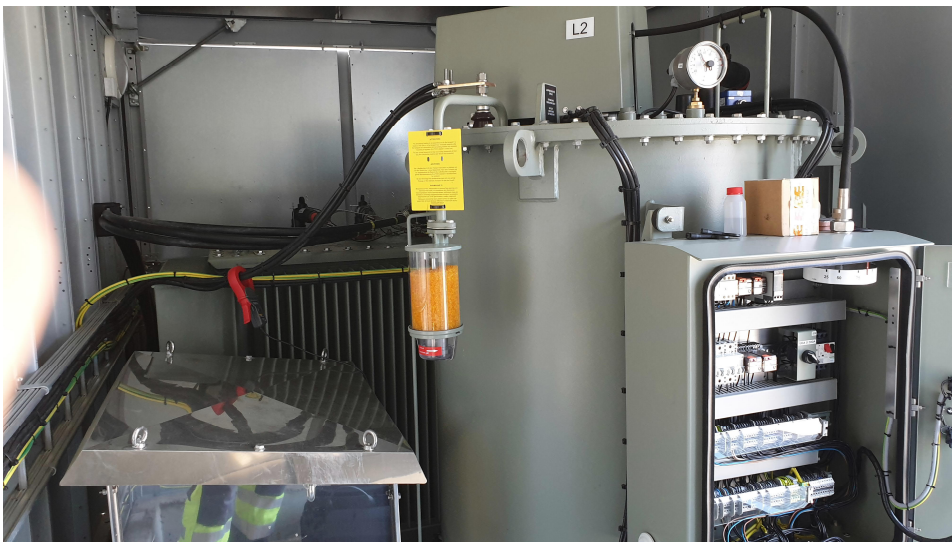
Kanava	Probe	Mitattava suure
AV	1:1 mittajohto	Vaihejännite L1 kiskojännitemuuntajan toisista
BV	1:1 mittajohto	Vaihejännite L2 kiskojännitemuuntajan toisista
CV	1:1 mittajohto	Vaihejännite L3 kiskojännitemuuntajan toisista
DV	1:1 mittajohto	U_0 vikälähdön kennon riviliittimeltä
AI	Dranetz TR 2510A	Vaihevirta L1 vikälähdön virtamuuntajan toisista
BI	Dranetz TR 2510A	Vaihevirta L2 vikälähdön virtamuuntajan toisista
CI	Dranetz TR 2510A	Vaihevirta L3 vikälähdön virtamuuntajan toisista
DI	Dranetz TR 2510A	I_0 vikälähdön summavirtamuuntajalta

Taulukko 5.13 Mittauskytkennät sähköaseman säädettävällä sammutuskuristimella.

Kanava	Probe	Mitattava suure
AV	1:1 mittajohto	Vaihejännite kompensointikopin pistorasialta
AI	Fluke i1000s (100 A)	Sammutuskuristimen virta I_{LS}



Kuva 5.33 Sähköaseman vaihejännitteiden ja nollijännitteen sekä vikälähdön vaihevirtojen ja summavirran mittaukset.



Kuva 5.34 Sähköaseman säädettävän sammutuskuristimen virtamittaus.

Kuvissa 5.35...5.38 on esitetty mittaustulokset sähköasemalla tehdyistä mittauksista vian 1 osalta. Mittaustulokset vikojen 2...4 osalta on esitetty liitteissä C...N. Kuten kuvasta 5.35 nähdään yliaaltojännitteet sähköasemalla ovat normaalitilassa ennen vikaa varsin kohtuulliset, jännitteen harmoninen kokonaissärö on vaiheesta riippuen 0,9...1,1 % ja hallitsevana on 5. yliaalto, jonka suuruus on noin 0,7...0,9 % perusaallosta. Vikalähdön vaihejännitteiden ja -virtojen sekä nollajännitteen ja summavirran aaltomuodot ja tehollisarvot sähköasemalla vian 1 ajalta on esitetty kuvassa 5.36 ja sammutuskuristimen virran aaltomuoto ja tehollisarvo kuvassa 5.37.

On syytä huomata, että erityisesti vian 1 osalta vikalähdön summavirtamittauksen alkutransientti on leikkautunut melko voimakkaasti useamman verkkojakson ajalta, ja tästä johtuen tehollisarvokuvaajakin on vastaavalta ajanjaksolta virheellinen.

Jännitteiden ja virtojen yliaaltoja on tässä tarkasteltu ainoastaan vian loppupuolella, jossa vian alun muutosilmiöt ovat jo tasaantuneet ja dc-offset poistunut. Kuten kuvasta 5.38 nähdään, vikalähdön summavirrassa on parillisten harmonisten lisäksi 3. harmonista lähes yhtä paljon kuin perusaaltoa ja lisäksi 5. ja 7. harmonisia (noin 50 % ja 25 % perusaallosta). Tämän raportin liitteissä on esitetty yliaaltojakaumat myös vikojen alkupuolelta.

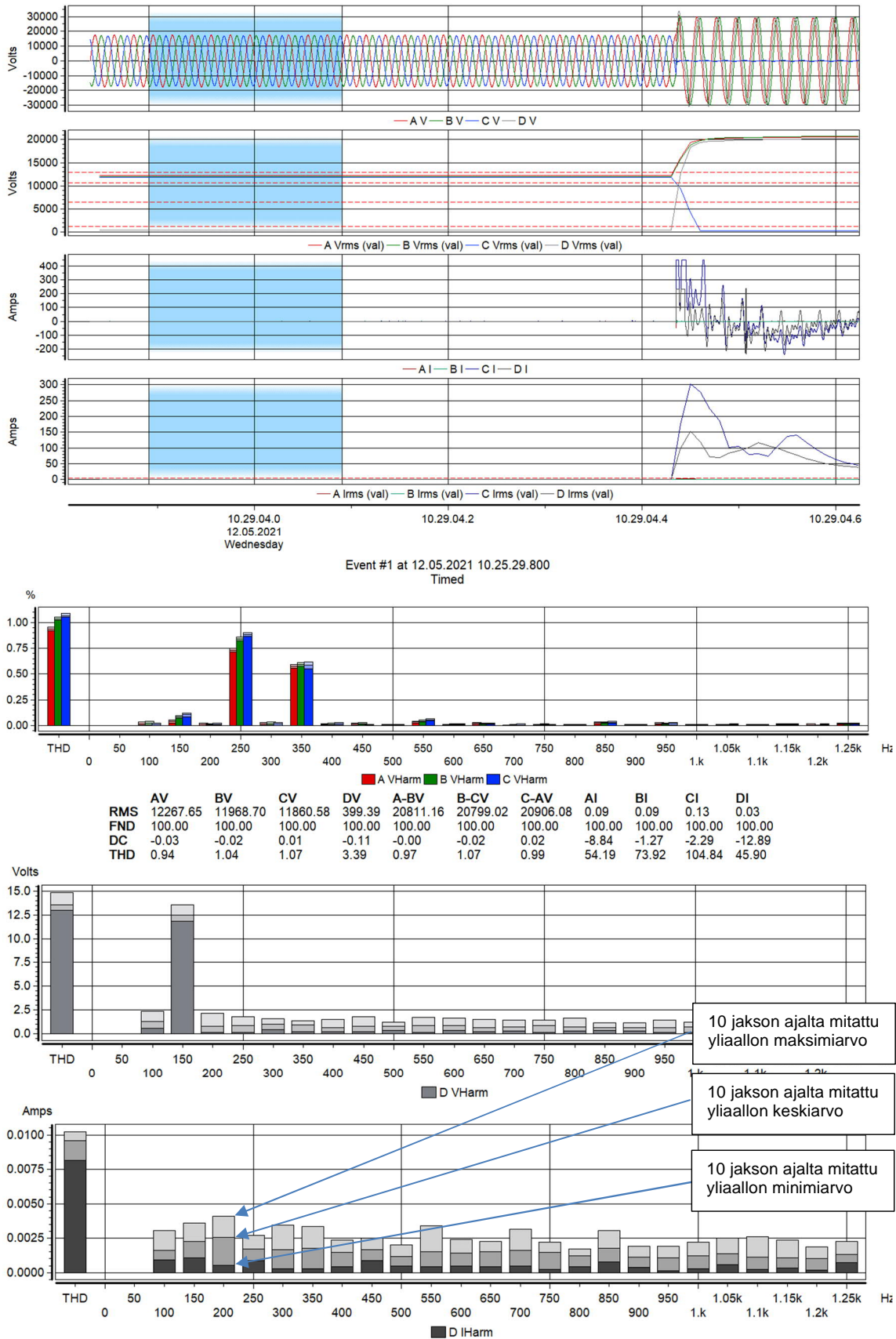
Taulukossa 5.14 on esitetty yhteenveto maadoitusjännitteiden kannalta keskeisimmistä suureista vian 1 osalta. Kuten taulukosta nähdään vikalähdön summavirran ja vikavaiheen virran yliaaltosisältö näyttäisi olevan muutoin samankaltainen kuin vaihejännitteen yliaaltosisältö ennen vikaa, mutta luvussa 5.3 esitetyistä maaseutuverkko 1:n mittauksista poiketen em. virroissa on lisäksi runsaasti 3. yliaaltoa, jota ei merkittävässä määrin ole vikaa edeltävän tilan vaihejännitteissä. Keskitetyn kuristimen ja hajautettujen kompensointikuristimien virtojen yliaaltosisällöt eroavat jonkin verran toisistaan ja ovat em. virtojen yliaaltosisällöistä poikkeavia, mutta merkittävimmät yliaallot ovat niissäkin 3., 5. ja 7. yliaalto.

Myös nollajännitteessä on runsaasti 3. yliaaltoa sekä normaalitilanteessa että vian aikana. Nollajännitteen kuvaajat ja mittaustulokset ovat lukuarvojen osalta virheellisiä johtuen siitä, että nollajännitteen skaalauskerroin on ollut mittauksissa virheellinen (pitäisi olla 200 sijasta ilmeisesti 120 eli tulokset pitää kertoa 0,6:lla).

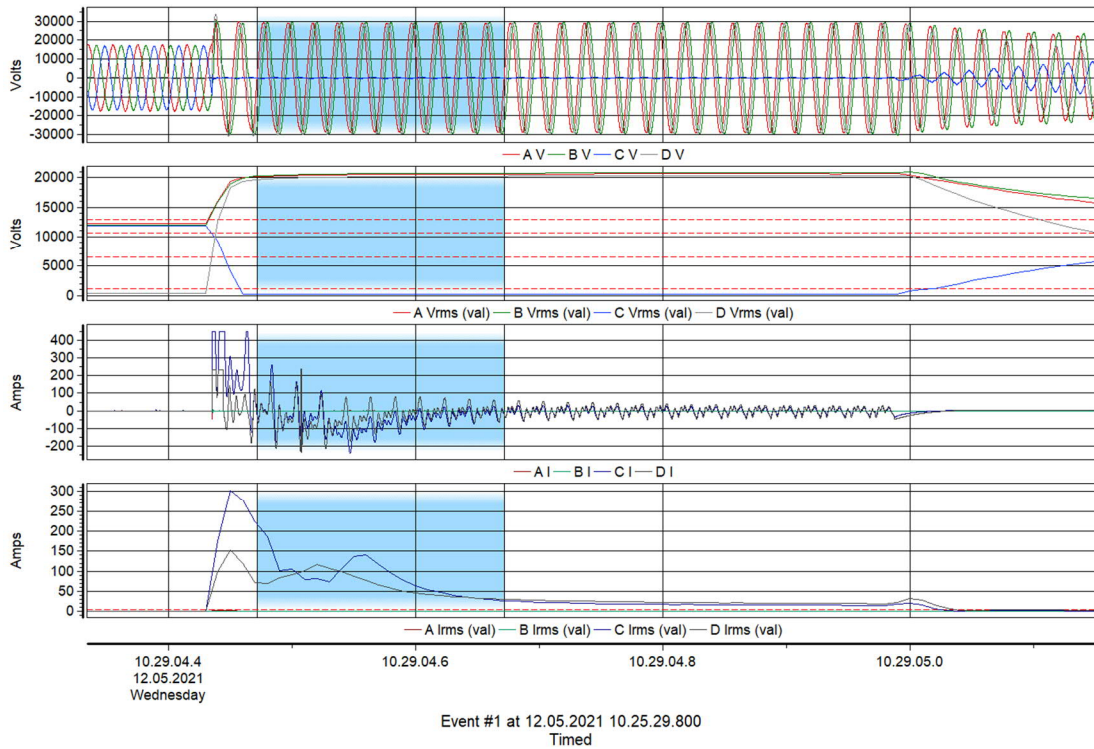
Syy 3. harmonisen esiintymiseen vikalähdön summavirrassa vian aikana (vikavirrassa) ja nollajännitteessä on epäselvä, mutta yhtenä mahdollisena aiheuttajana saattavat olla hajautetun kompensoinnin yksiköt (5 - 15 A), joita tutkitussa verkossa oli yli 30 kpl.

Taulukko 5.14 Yhteenveto maadoitusjännitteiden kannalta keskeisimmistä suureista ja niiden yliaaltosisällöistä vian 1 osalta.

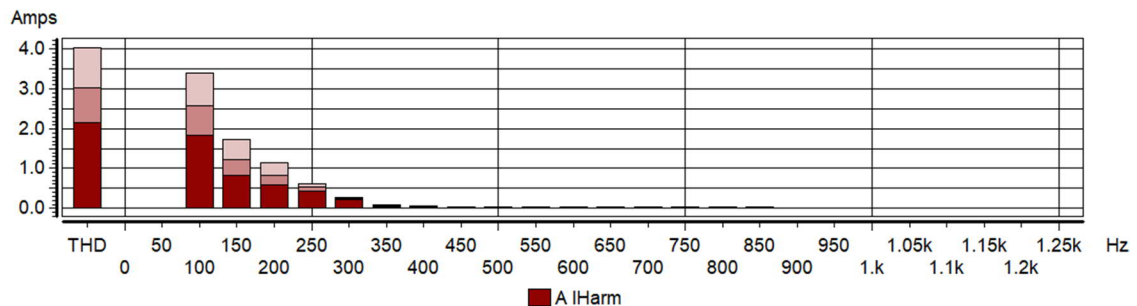
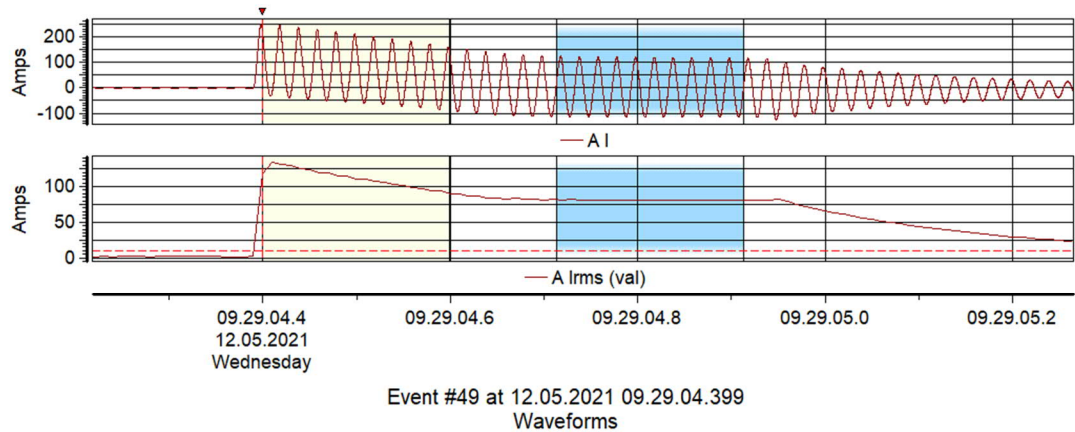
Vika	Mittauspiste	Suure ¹⁾	Mittaus	Yliaallon järjestysluku					
				50 Hz	3	5	7	11	13
1	Sähköasema	Yliaaltojännite vikavaiheessa ennen vikaa [% FND]	U_{L3}	11860 V	0.04	0.88	0.59	0.05	0.01
		Nollajännite vian aikana [V]	U_0	20236	163	92.6	24.8	3.4	1.0
		Vikalähdön summavirta vian aikana [A]	I_0	13	13.1	6	4.1	1.3	1.3
		Viallisen vaiheen virta vian aikana [A]	I_{L3}	9.1	10.7	4.9	3.4	1.1	1.1
	Säädettävän kuristimen virta [A]	I_{ES}	81	1.2	0.5	0.5	0.018	0.016	
	Muuntamo 1	Kuristimen virta [A] ²⁾	I_{E1}	3.1	0.13	0.18	0.1	0.03	0.009
	Muuntamo 2	Kuristimen virta [A]	I_{E2}	16.2	0.81	0.26	0.016	0.01	0.012
		¹⁾ kaikkien suureiden arvot 200 ms tehollisarvoja (avg) vian stabiiliilta osuudelta							
		²⁾ kuristimen maadoitusjohtimesta mitattu virta, todellinen virta on lähes kaksinkertainen							



Kuva 5.35 Sähköaseman vikälähdön mittaaminen, ennen vikaa. Yliaaltojakaumat on laskettu aaltomuotokuvassa sinisellä pohjalla merkityiltä aikaväliltä.

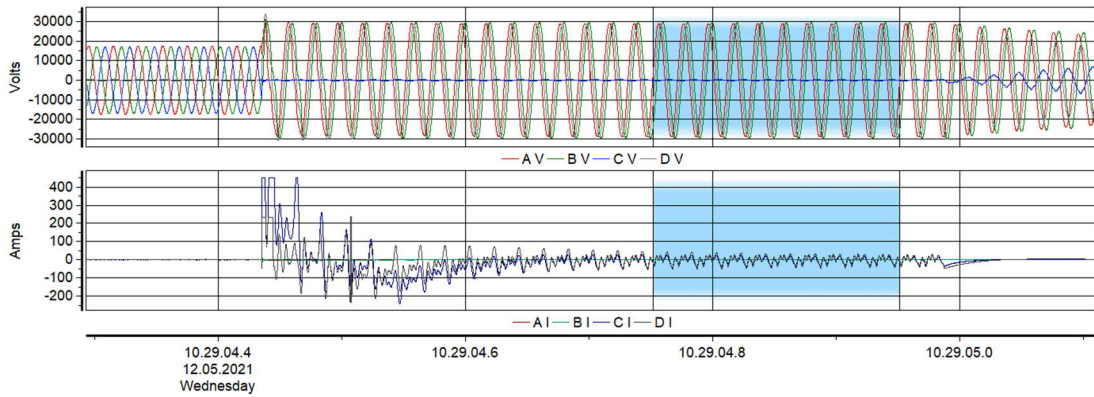


Kuva 5.36 Vikalähdön vaihejännitteiden ja -virtojen sekä nolajännitteen ja summavirran aaltomuodot ja tehollisarvot sähköasemalla vian 1 ajalta.

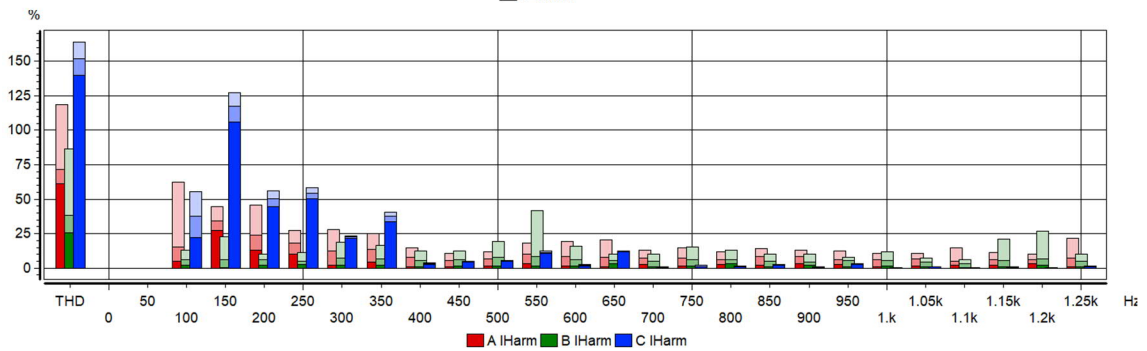
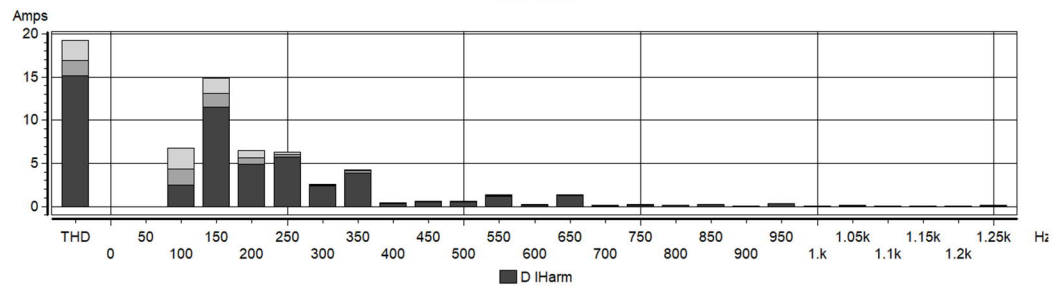
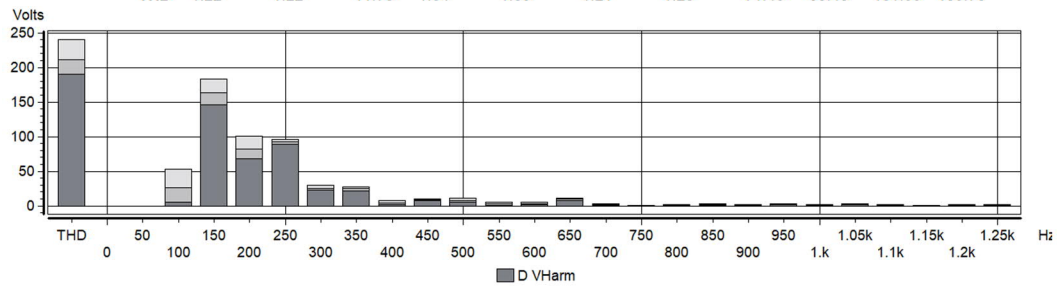
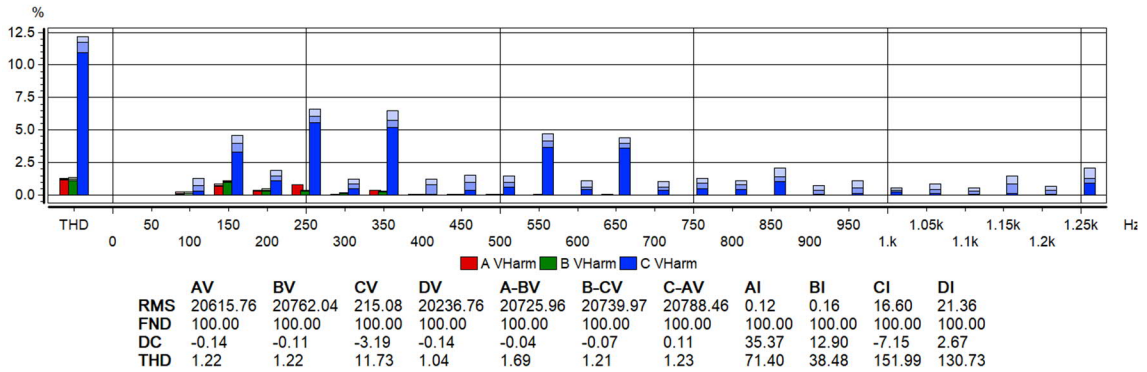


	AV	BV	CV	DV	A-BV	B-CV	C-AV	AI	BI	CI	DI
RMS	213.91	0.09	0.09	0.08	213.89	0.15	213.91	73.76	0.04	0.03	0.03
FND	235.29	0.03	0.00	0.00	235.27	0.03	235.29	81.04	0.00	0.00	0.00
DC	0.07	0.01	-0.02	0.01	0.06	0.03	-0.09	-2.34	0.02	-0.00	0.02
THD	2.18	0.06	0.06	0.06	2.18	0.04	2.18	3.03	0.03	0.03	0.03

Kuva 5.37 Säädettävän sammutuskuristimen virta ja sen yliaallot sähköasemalla vian 1 lopussa, aaltomuotokuvasta sinisellä pohjalla merkityltä ajalta laskettuna.



Event #1 at 12.05.2021 10.25.29.800
Timed



Kuva 5.38 Sähköaseman vikälähdön mittaus, vian lopussa. Yliaaltojakaumat on laskettu aaltomuotokuvassa sinisellä pohjalla merkityltä aikaväliltä.

5.4.2 Mittaukset muuntamolla 1 (5 A kompensointi)

Muuntamolla 1 hajautettu kompensointi oli aseteltu arvoon 15 A. Mittaukset tehtiin Dranetz PowerXplorer PX5-sähkölaatuanalysointilaitteella ja käytetyt virtapihdit ja mittauskytkennät on esitetty alla taulukossa 5.15:

Taulukko 5.15 Mittauskytkennät muuntamolla 1.

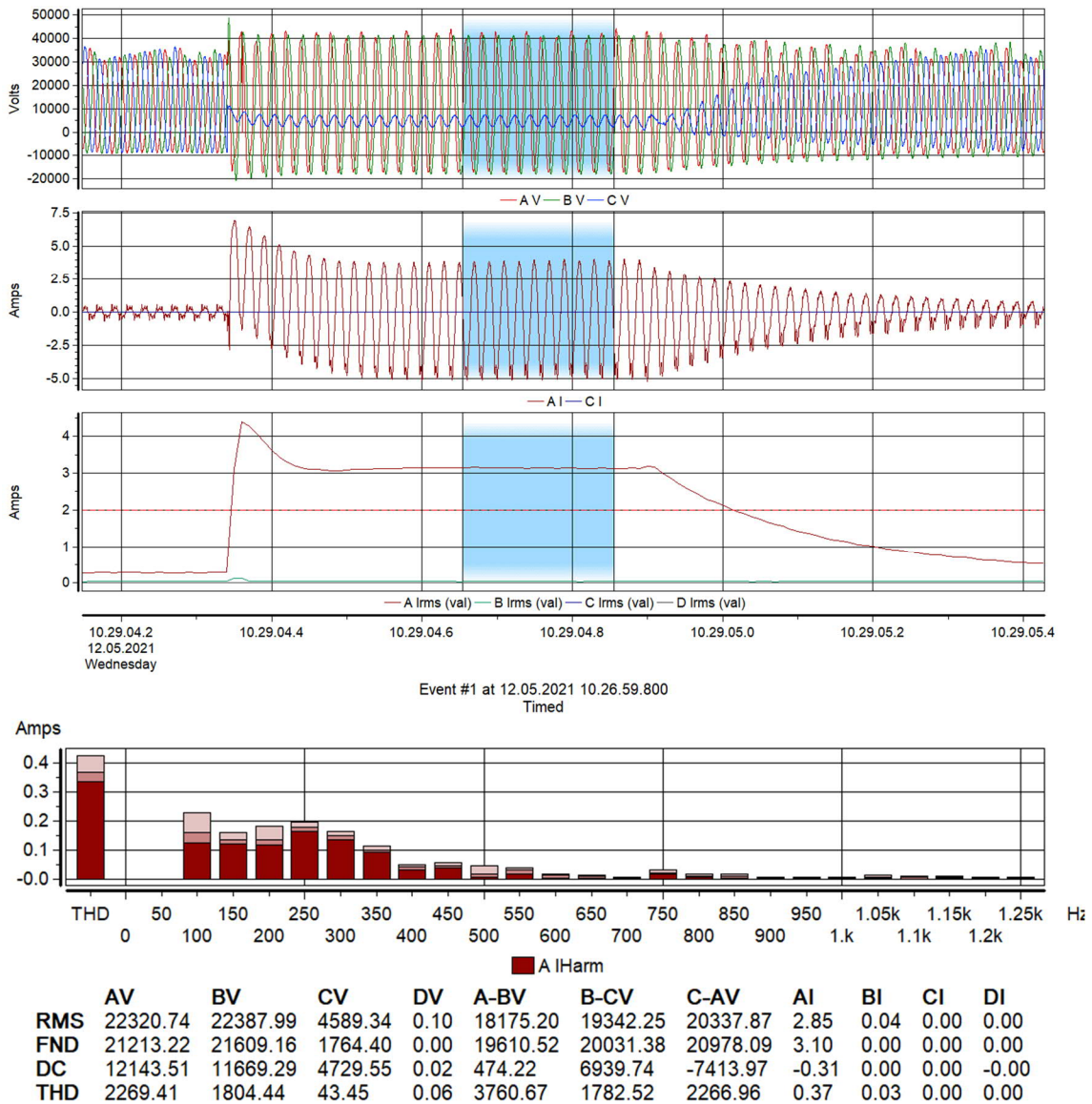
Kanava	Probe	Mitattava suure
AV	1:1 mittajohto	L1-PEN-jännite muuntajakennon jänniteilmajäljeltä
BV	1:1 mittajohto	L2-PEN-jännite muuntajakennon jänniteilmajäljeltä
CV	1:1 mittajohto	L3-PEN-jännite muuntajakennon jänniteilmajäljeltä
AI	Dranetz TR 2510A	Hajautetun kompensointikuristimen maadoitusjohtimen virta I_{E1}
CI	Fluke i1000s (10 A alue)	Muuntaja-kojeisto-kaapeleiden kosketussuojien virtojen summa I_{C1}



Kuva 5.39 Muuntaja-kojeisto-kaapeleiden kosketussuojien maadoitukset ja niiden virtojen summan mittaus kaapeleiden kojeiston puoleisesta päästä.

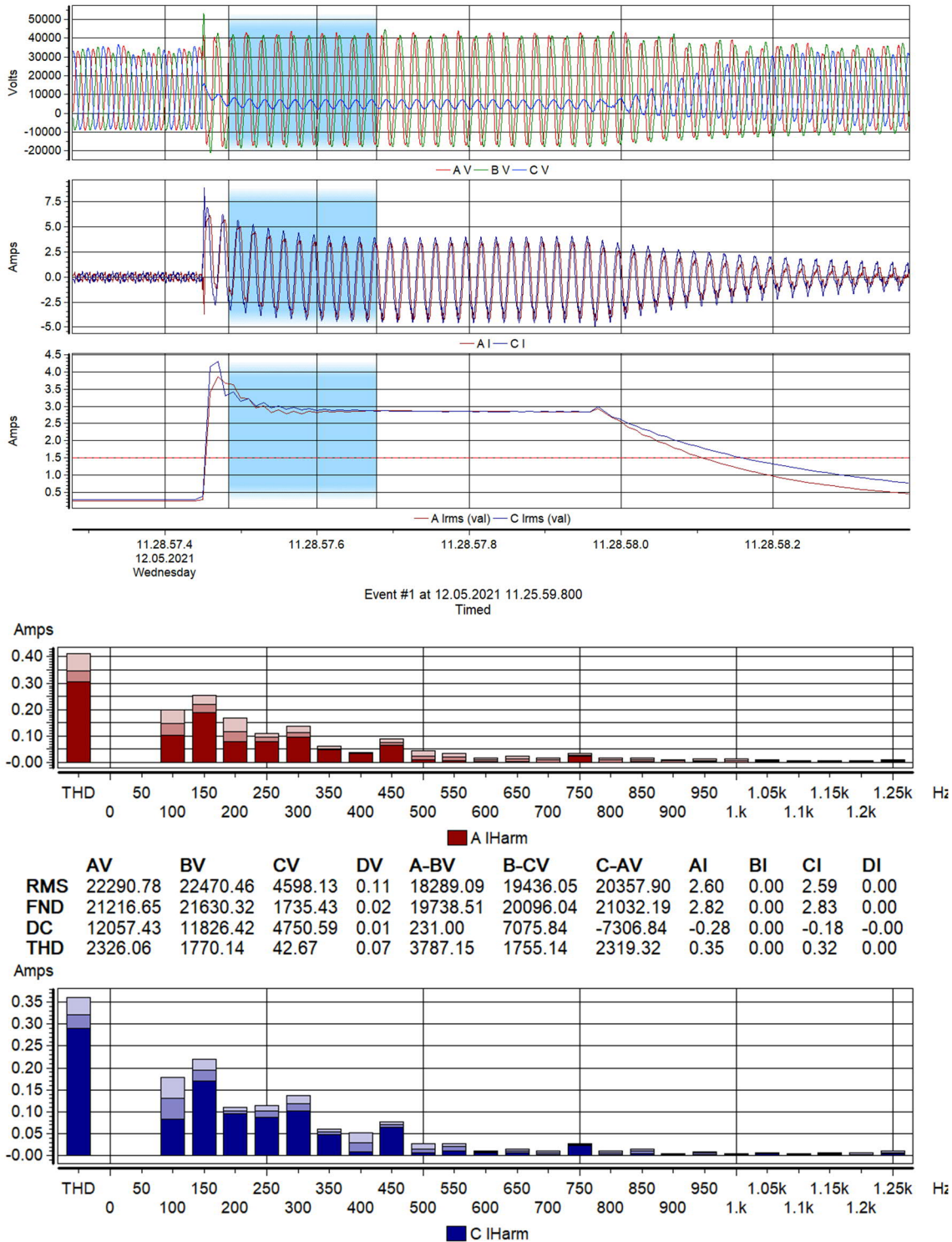


Kuva 5.40 Muuntamon 1 hajautetun kompensoinnin maadoitusjohtimen virtamittaus.



Kuva 5.41 Muuntamolla 1 vian 1 aikana mitattu maasulkuvirran hajautetun kompensoinnin kuristimen (5 A) maadoitusjohtimen (kanava A I) virta ja sen yliaaltojakauma.

Muuntamolla 1 muuntaja - kuristin yhdistelmä oli maadoitettu sekä muuntajan PE-johtimella että muuntajan ja kojeiston välisten kaapeleiden kosketussuojien kautta. Tästä johtuen muuntajan PE-johtimesta mitattu virta oli vain noin puolet kuristimen virrasta, toinen puoli kulki muuntaja-kojeisto-kaapeleiden kosketussuojien kautta. Maadoituskuristimen maasulussa tuottama virta kulki sähköasemalle vikakohtaan maan ja kaapelin kosketussuojien kautta. Vaikka kyse ei ollut vikakohtasta, kompensointivirta jakautuu vastaavalla tavalla kuin vikakohtaan maasulkuvirtakin. Tällöin noin puolet kompensointikelan virrasta kulkee maan kautta (maavirta) ja puolet kaapeleiden kosketussuojissa. Maadoitusresistansseista ei ollut tietoa, mutta oletettavasti ainakin sähköaseman päässä on hyvät maadoitukset.



Kuva 5.42 Muuntamolla 1 vian 2 aikana mitattu integroidun muuntajan ja maasulkuvirran hajautetun kompensoinnin kuristimen maadoitusjohtimen (kanava A I) ja muuntajan tankin maadoituspisteeseen kytkettyjen kaapeleiden kosketussuojien virta (kanava C I) sekä niiden yliaaltojakaumat.

5.4.3 Mittaukset muuntamolla 2 (15 A kompensointi)

Muuntamolla 2 hajautettu kompensointi oli aseteltu arvoon 15 A. Mittaukset tehtiin Dranetz PowerXplorer PX5-sähkölaatuanalysointilaitteella ja käytetyt virtapihdit ja mittauskytkennät on esitetty alla taulukoissa 5.16 ja 5.17. Kompensointikuristimen virran yliaaltoanalyysit Dranview-ohjelmistossa näyttivät syystä tai toisesta toimivan vain ensimmäisessä mittauksessa, joten raportin liitteissä ne on jätetty muiden mittausten osalta esittämättä.

Taulukko 5.16 Mittauskytkennät vian 1 mittauksessa.

Kanava	Probe	Mitattava suure
AV	1:1 mittajohto	L1-PEN-jännite muuntajakennon jänniteilmaisijalta
BV	1:1 mittajohto	L2-PEN-jännite muuntajakennon jänniteilmaisijalta
CV	1:1 mittajohto	L3-PEN-jännite muuntajakennon jänniteilmaisijalta
AI	Dranetz TR 2510A	Muuntajan pohjan kevin virta
BI	Fluke i1000s (100 A alue)	Muuntajan kannen ja pohjan kevin summavirta

Taulukko 5.17 Mittauskytkennät vikojen 2...4 mittauksissa.

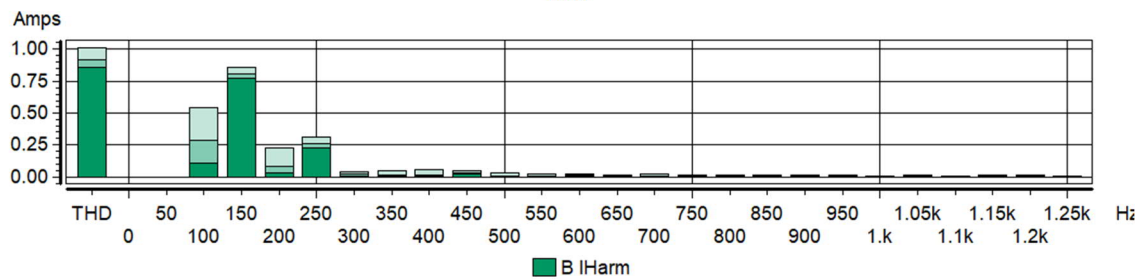
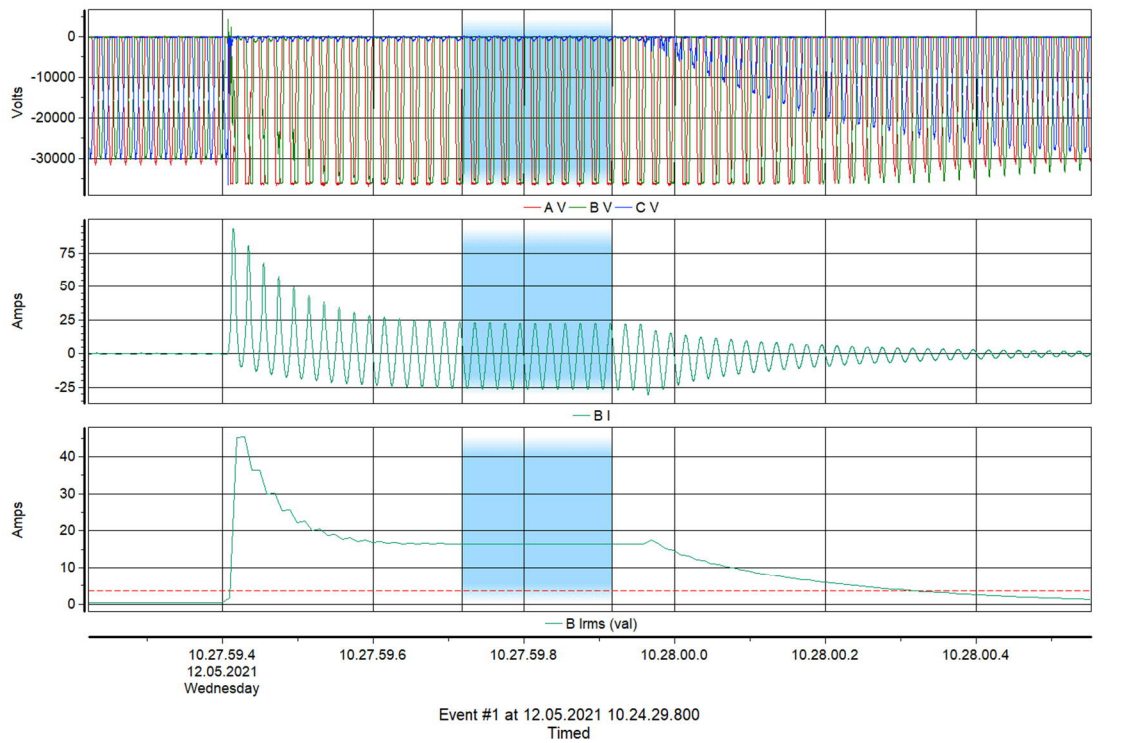
Kanava	Probe	Mitattava suure
AV	1:1 mittajohto	L1-PEN-jännite muuntajakennon jänniteilmaisijalta
BV	1:1 mittajohto	L2-PEN-jännite muuntajakennon jänniteilmaisijalta
CV	1:1 mittajohto	L3-PEN-jännite muuntajakennon jänniteilmaisijalta
AI	Dranetz TR 2510A	Muuntajan kannen kevin virta
BI	Fluke i1000s (100 A alue)	Muuntajan kannen ja pohjan kevin summavirta
CI	Fluke i1000s (100 A alue)	Muuntajan pohjan kevin virta



Kuva 5.43 Mittausjärjestely muuntamolla 2.



Kuva 5.44 Muuntamon 2 hajautetun kompensoinnin maadoitusjohtimen virtamittaus (keskimmäinen virtapihti). Lisäksi mitattiin myös erillistä muuntajan kannen maadoitusjohtimen virtaa ja näiden kahden virran summaa. Mittausten perusteella muuntajan kannen maadoitusjohtimen liitos muuntajan kannella ei ilmeisesti ollut johtava, koska kaikki virta kulki muuntajan pohjan maadoitusjohtimen kautta.



	AV	BV	CV	DV	A-BV	B-CV	C-AV	AI	BI	CI	DI
RMS	21186.77	21171.74	442.21	0.06	18097.81	20918.45	20773.24	15.50	16.43	0.00	0.00
FND	14842.08	14740.48	302.61	0.00	14547.58	14622.25	14542.18	15.48	16.24	0.00	0.00
DC	-13777.71	-13883.96	-283.71	-0.04	106.25	-13600.25	13493.99	-0.17	-2.30	-0.00	0.00
THD	6225.55	6179.45	150.22	0.03	10763.17	6228.33	6160.68	0.87	0.91	0.00	0.00

Kuva 5.45 Muuntamolla 2 vian 1 aikana mitattu maasulkuvirran hajautetun kompensoinnin kuristimen (15 A) maadoitusjohtimen (kanava B I) virta ja sen yliaaltojakauma.

6 YHTEENVETO

Hankkeessa selvitettiin, miten harmoniset yliaallot muodostuvat maasulun aikana mitattaviin suureisiin kuten maasulkuvirtaan ja nollajännitteeseen ja mitkä tekijät vaikuttavat harmonisten jännitesäröjen suuruuteen. Teoreettisissa tarkasteluissa päähuomio oli 250 Hz taajuudessa, joka on osoittautunut kenttämittauksissa monesti merkittävimäksi komponentiksi sekä jännitesäröissä että maasulkuvirrassa. Raportissa esitetty teoria maasulkuvirran ja nollajännitteen harmonisten komponenttien määrittämiseen soveltuu myös muiden taajuuksien tarkasteluun. Maasulkuvirran 250 Hz komponenttia käytetään myös maasulun indikointiin ja maasulkusuojauksen toteuttamiseen kompensoidussa verkossa.

Maasulkusuureiden harmoniset komponentit aiheutuvat pääasiassa verkon jännitteiden harmonisista säröistä vikaa edeltäneessä tilassa. Verkon tyyppi (kaapeliverkko / sekaverkko / ilmajohtoverkko) vaikuttaa epälineaaristen kuormien verkkoon syöttämien harmonisten virtojen kohtaamiin impedansseihin sekä maasulkuvirran harmonisten komponenttien kohtaamiin kokonaisimpedansseihin. Tämä johtuu siitä, että maakaapelin ja ilmajohtoverkon edustamat impedanssit ovat hyvin erilaiset varsinkin kapasitanssien osalta. Riippuen kaapelityypeistä ja poikkipinnoista sekä verkon konfiguraatiosta puhtaassa kaapeliverkossa maasulkuvirran kohtaama impedanssi on tyypillisesti pienimmillään 150 – 350 Hz alueella, johon osuvat tyypillisesti myös merkittävimmät harmoniset jännitesäröt. Siksi verkon kaapelointi lisää tyypillisesti maasulkuvirran harmonisia taajuuksia. Kaapeliverkon vioissa vikaresistanssit ovat yleensä pienempiä kuin ilmajohtoverkon vioissa. Vikaresistanssi kasvattaa nopeasti harmonista kokonaisimpedanssia ja rajoittaa siten vikavirran harmonisia komponentteja. Sekaverkossa harmoninen kokonaisimpedanssi vaihtelee enemmän ollen suurimmillaan lähtöjen lopussa pitkien ilmajohto-osien takana. Tällöin myös maasulkuvirran harmoniset komponentit jäävät pienemmiksi. Harmonisille maasulkuvirroille onkin tyypillistä suurempi riippuvuus vikakohdan sijainnista. Perustaajuinen maasulkuvirta on tyypillisesti suunnilleen sama verkon eri osissa varsinkin, jos verkossa on hajautettu kompensointi.

Maasulun aikana mitattavan nollajännitteen harmonisten komponenttien suuruus riippuu myös verkkotyypistä. Kaapeliverkossa nollareaktanssit kompensoivat 250 Hz taajuudella merkittävässä määrin myötä- ja vastareaktansseja kokonaisimpedanssissa. Komponentti-impedanssien summa voi olla jopa pienempi kuin nollaimpedanssi, jolloin nollajännitteessä voi olla enemmän 250 Hz säröä kuin vikaa edeltäneen tilan jännitteessä. Sekaverkossa tilanne riippuu mm. kaapelointiasteesta. Sekaverkolle on tyypillistä, että maasulkuvirran kohtaama kokonaisimpedanssi relevantilla taajuusalueella riippuu merkittävästi tarkasteltavasta verkon kohdasta. Pitkien ilmajohto-osien takana komponentti-impedanssien summa kasvaa.

Tietyn suuruinen 250 Hz virtainjektio aiheuttaa tyypillisesti sähköasemalla hieman pienemmän jännitesärön kuin sähköisesti kauempana verkossa. Pienempi jännitesärö pienentää harmonista maasulkuvirtaa. Tästä huolimatta 250 Hz harmoniset maasulkuvirrat ovat yleensä suurempia lähellä sähköasemaa, koska vikavirran kohtaama kokonaisimpedanssi on pienempi. Tämä näkyi myös kenttämittausten analyysissä.

Puhtaalle ilmajohtoverkolle on tyypillistä, että 250 Hz taajuudella verkon eri kohdista näkyvät nollaimpedanssit ovat suuria muihin komponentti-impedansseihin verrattuna. Siksi nollajännitteen särö vikakohdassa on samaa suuruusluokkaa tai vähän suurempi kuin vikaa edeltäneen tilan jännitteessä. Suuresta nollaimpedanssista johtuen harmoninen 250 Hz maasulkuvirta jää pieneksi.

Maasulkuvirran harmonisten komponenttien huomiointi maadoitusjännitteen laskemisessa on haasteellista. Tämä johtuu siitä, että harmonisia jännitesäröjä verkon eri osissa ei tunneta ja lisäksi ne vaihtelevat kuormitusten mukana. Verkon eri kohdista näkyviä harmonisia kokonaisimpedansseja ei voida määrittää käytettävissä olevalla verkostolaskennalla. Jos myös harmoniset vikavirrat halutaan ottaa huomioon kosketusjännitetarkasteluissa, tarvitaan huomattavia yksinkertaistuksia. Vikakohdan jännitesäröä voidaan pitää harmonisen

maadoitusjännitteen yläraja-arvona. Kaapeliverkossa komponentti-impedanssien summa voi olla suhteellisen pieni, jolloin varsinkin suuremmilla vikaresistanssin arvoilla harmoninen maadoitusjännite voi olla suhteellisen lähellä harmonista jännitesäröä. Pienillä vikaresistanssin arvoilla ero kasvaa. Sähköasemalla mitatun jännitesärön käyttäminen maadoitusjännitteen arvioinnissa voisi olla perusteltua, koska harmoninen maasulkuvirta on usein suurimmillaan sähköasemalla. Lisäksi mittauksen toteuttaminen olisi helpointa sähköasemalla. Jos harmoniset taajuudet otettaisiin huomioon maadoitusjännitteiden määrittämisessä, vikavirran harmoninen sisältö pienentäisi suurinta sallittua 50 Hz maadoitusjännitettä. Haasteena em. menetelmän soveltamiselle sekaverkoissa on myös se, että komponentti-impedanssien summa voi vaihdella suurestikin verkon eri osissa ollen tyypillisesti suurimmillaan pitkien ilmajohto-osien takana. Mitä suurempi komponentti-impedanssien summa on, sitä pienempi maadoitusjännite on suhteessa vikaa edeltäneen tilan jännitesäröön tietyllä vikaresistanssilla. Tämä voisi johtaa turhan suuriin varmuusmarginaaleihin.

Hankkeessa arvioitiin maakaapeleiden virtareduktioon vaikuttavia tekijöitä. Suurimmat arvot kaapeleiden reduktiokertoimille saadaan, kun maadoitusresistanssi kaapelin päissä on 0Ω . Isommilla maadoitusresistansseilla myös tarkasteltavan kaapelin pituus vaikuttaa virtareduktioon. Keskinäisimpedanssit vaihejohtimien, kosketussuojien ja mahdollisen keskusköyden välillä pienentävät reduktiokertoimia jonkin verran, mutta merkittävin tekijä on kaapelin maadoitusresistanssi. Reduktiokerroin pienenee suhteellisen nopeasti maadoitusresistanssin kasvaessa. Toinen merkittävä virtareduktiokertoimeen vaikuttava tekijä on maasulkuvirran taajuus. Taajuuden kasvaessa maapiirin resistanssi kasvaa lineaarisesti taajuuden funktiona. Vaikka maasulkuvirta saattaa sisältää merkittävästikin harmonisia taajuuksia, pienempi reduktiokerroin korkeammilla taajuuksilla rajoittaa selvästi harmonisia maadoitusjännitteitä.

Kenttämittauksista saatujen tulosten ja maasulkukokeiden avulla saatiin hyvä kuva harmonisten jännitesäröjen suuruusluokista ja niiden vaihtelusta verkon normaalin käyttötilanteen aikana. Simuloinneissa ja laskelmissa käytetyt jännitesäröt pyrittiin mittaamaan samaan suuruusluokkaan mittausten kanssa. Mittausten perusteella parittomat kertalukujen 5. ja 7. harmoniset taajuudet näyttäsivät olevan merkittävimmät. Hallitsevin yliaalto oli useimmilla sähköasemilla 5. yliaalto, joissain tapauksissa 7. yliaalto. Joissain tapauksissa hallitsevin yliaalto vaihteli myös ajan funktiona. Jos tarkastellaan kertymäfunktioiden 99,5 % pisteitä, 5. yliaallon taso jäi kaikilla sähköasemilla alle 2,62 %:iin ja 7. yliaallon taso alle 1,81 %:iin perusaallosta. Suurimmatkin mitatut kaupunkiverkon sähköasemien yksittäisten yliaaltojen 10 minuutin keskiarvot jäivät alle 3,2 %:iin ja maaseutuverkon sähköasemien 1 minuutin keskiarvot alle 4 %:iin perusaallosta. Jos standardin SFS-EN 50160 mukaisia kertymäfunktioiden 95 % pisteitä verrataan em. standardin raja-arvoihin, yliaaltojännitteet olivat hallitsevimpien 5. ja 7. yliaaltojen osaltakin alle kolmannes standardin raja-arvoista.

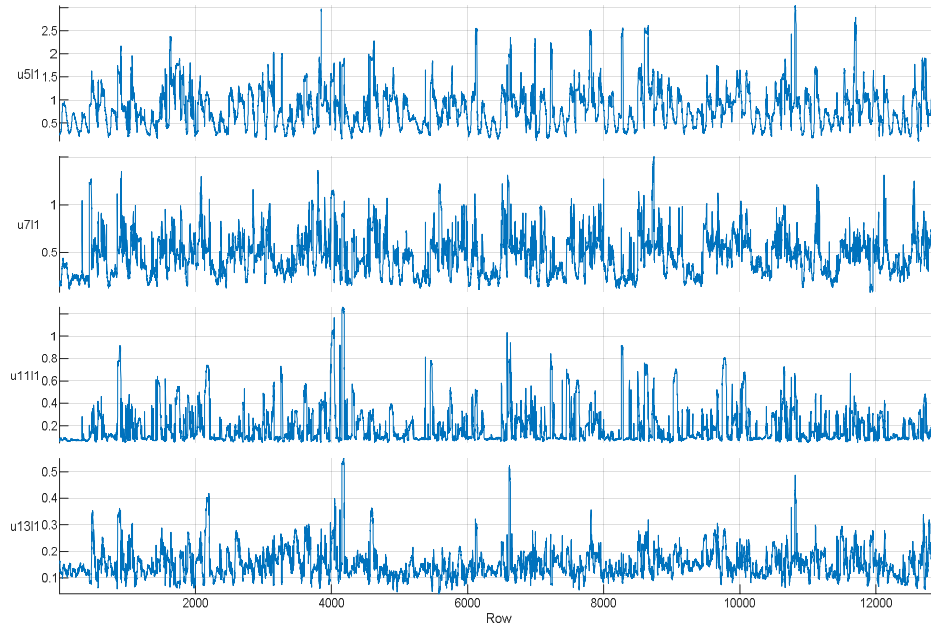
Maasulkukokeiden perusteella varsinkin 5. harmoninen maasulkuvirta voi olla merkittävä perustaajuiseen vikavirtaan verrattuna ja vian sijaitessa lähellä sähköasemaa jopa suurempi. Verkon 1 maasulkukokeissa vikavirran yliaaltosisältö vastasi suunnilleen vikaa edeltävän tilan vaihejännitteen yliaaltojakaumaa, mutta 7. yliaalto oli muihin verrattuna selvästi vaimentunut. Tämä johtuu siitä, että taajuus vaikuttaa merkittävästi maasulkuvirran kohtaaman kokonaisimpedanssin muodostumiseen. Vikapaikan ja sähköaseman välisen etäisyyden kasvaessa 7. yliaallon suhteellinen osuus vikavirran kokonaissäröstä kasvoi, mutta kaikki yliaaltovirrat 3. yliaaltoa lukuun ottamatta kuitenkin pienenevät suhteessa vikavirran perusaaltoon, 5. yliaalto kaikkein selvimmin. Verkon 2 kokeissa vika sijaitsi sähköasema-alueella ja niissä vikälähdön summavirran yliaaltosisältö vastasi muuten vikaa edeltävän tilan vaihejännitteen yliaaltojakaumaa, mutta 3. yliaaltoa oli sekä nollajännitteessä että vikälähdön summavirrassa vian aikana ja vikaa edeltävässä tilassa huomattavan paljon, summavirrassa jopa yli kaksinkertaisesti 5. yliaaltoon verrattuna. Vikaa edeltävän tilan vaihejännitteessä 3. yliaalto oli merkityksettömän pieni. Yhtenä mahdollisena 3. yliaallon aiheuttajana saattoivat olla hajautetun kompensoinnin yksiköt (5 - 15 A), joita tutkitussa verkossa oli yli 30 kpl.

Maasulkuvirran harmoniset komponentit kasvavat verkkoihin liitettävien epälineaaristen kuormien määrän kasvaessa sekä verkkojen kaapeloinnin myötä. Kaapeloitujen johto-osien maasuluissa merkittävä osa maasulkuvirrasta palaa kaapeleiden kosketussuojien ja mahdollisen keskusköyden kautta virtareduktion periaatteiden mukaisesti. Reduktiokertoimien pieneneminen taajuuden kasvaessa vähentää huomattavasti harmonisten virtakomponenttien vaikutusta maadoitusjännitteisiin ja esiintyviin kosketusjännitteisiin. Kosketusjännitteiden kannalta haasteellisimpia ovat sekaverkkojen ilmajohto-osien pistemäiset maadoitukset, joissa maasulkuvirta kulkee kokonaisuudessaan maahan. Sekaverkoissa ilmajohto-osat sijoittuvat usein lähtöjen loppupäihin. Vikavirran harmoniset komponentit pienenevät pitkän ilmajohto-osan takana, jossa vikavirran näkemä kokonaisimpedanssi kasvaa. Vikavirran harmonisiin komponentteihin tulisi kuitenkin kiinnittää huomiota erityisesti ilmajohto-osan alkupäässä olevilla maadoituksilla.

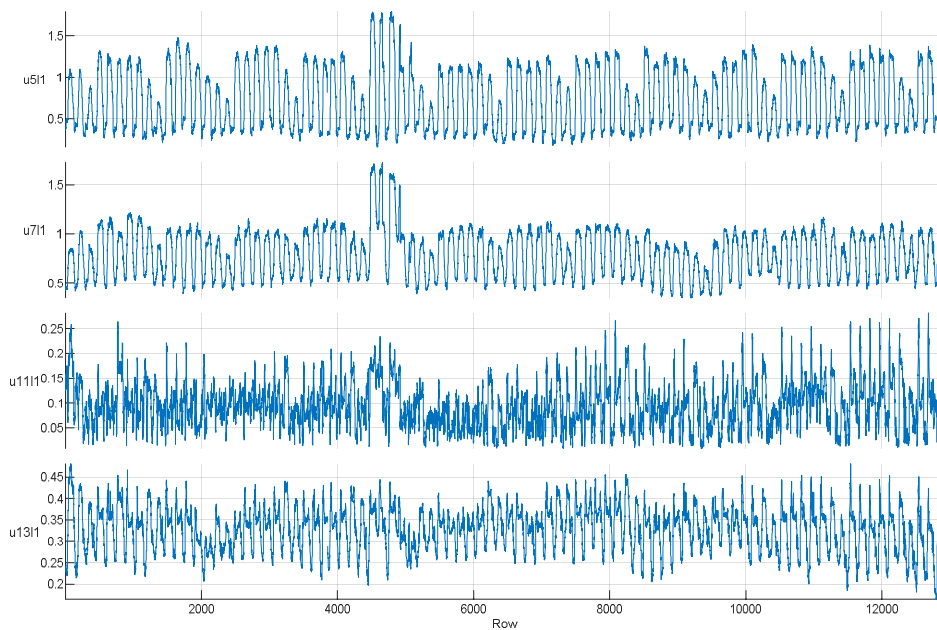
7 LÄHDELUETTELO

- [1] Suurjännitesähköasennukset (High-voltage electrical installations), SFS 6001:2018, Suomen Standardoimisliitto SFS ry, SESKO ry, vahvistettu 15.6.2018, 5. painos, 155 s.
- [2] Nikander, A., Mäkinen A. Laajan kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkuilmiöiden vaikutukset - suojausasteet, yliaallot, vaarajännitteet, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2017, 40 s. + liites. 1 s.
- [3] Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet (Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks), SFS-EN 50160:2010 + A1:2015 + A2:2019 + A3:2019, Suomen Standardoimisliitto, SESKO ry, vahvistettu 10.4.2019, 83s.
- [4] Antoine, Q., Hennuy, B., Finotto, W., Valmacco, D. Return paths of earth fault current in medium voltage grids with underground shielded cables. Proceedings of the 25th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Madrid, 3-6 June 2019, Paper n° 1081, 5 p.
- [5] Mäkinen A. Selvitys keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmästä, Raportti/Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan laitos, 2016, 38 s.
- [6] Alatalo P. Voimakaapelit ja asennusjohdot, Oy Nokia Ab, Kaapelitehdas, Espoo, 1975, 167 s.
- [7] Tasić, D., Stojanović, M. Reduction Factor for Aerial Bundled Cables, Article in FACTA UNIVERSITATIS Series Electronics and Energetics, vol. 19, no. 1, April 2006, pp. 63 - 70.
- [8] Parsotam, A. Fundamentals of Calculation of Earth Potential Rise in the Underground Power Distribution Cable Network, Paper of Power & Telecommunications Systems Coordination Conference, Melbourne, Australia, March 1997. 33 p. + app.
- [9] Blackburn J. L. Symmetrical Components for Power Systems Engineering. Marcel Dekker, Inc., 1993, New York, 427p.
- [10] Schmidt U., Frowein K. and Druml G. New Method for Calculation of the Harmonics in the Residual Earth Fault Current in Isolated and Compensated Networks. Proceedings of 10th Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ2016) Conference, IEEE, 29 - 31 August 2016, Tallinn, Estonia, 5p.
- [11] Frowein K., Schmidt U., Druml G. and Schegner P. New model for the calculation of harmonics in the residual earth fault current of medium voltage systems. Proceedings of the 24th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2017), Glasgow, Scotland, 12 - 15 June 2017, 5 p.
- [12] Jorgensen H. J. Risks incident to harmonics in compensated MV networks. Proceedings of the 17th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2003), Barcelona, Spain, 12 - 15 May 2003, 4 p.
- [13] Hilden A. Power quality and power monitoring in a modern office building utilizing diverse metering, Master of Science Thesis, Tampere University of Technology, 2018. 88 p.

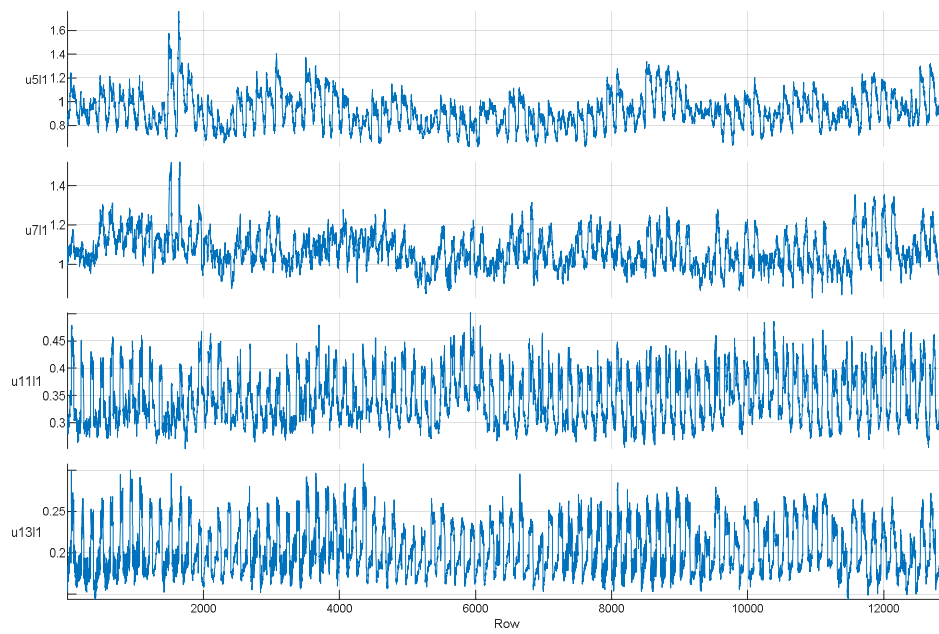
LIITE A: KAUPUNKIVERKON SÄHKÖASEMIEN YLIAALTOJÄNNITTEET



Kuva 1. Kaupunkiverkon sähköaseman K1 (teollisuuspainotteista kuormaa) 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet ajan funktiona prosentteina perusaallosta.

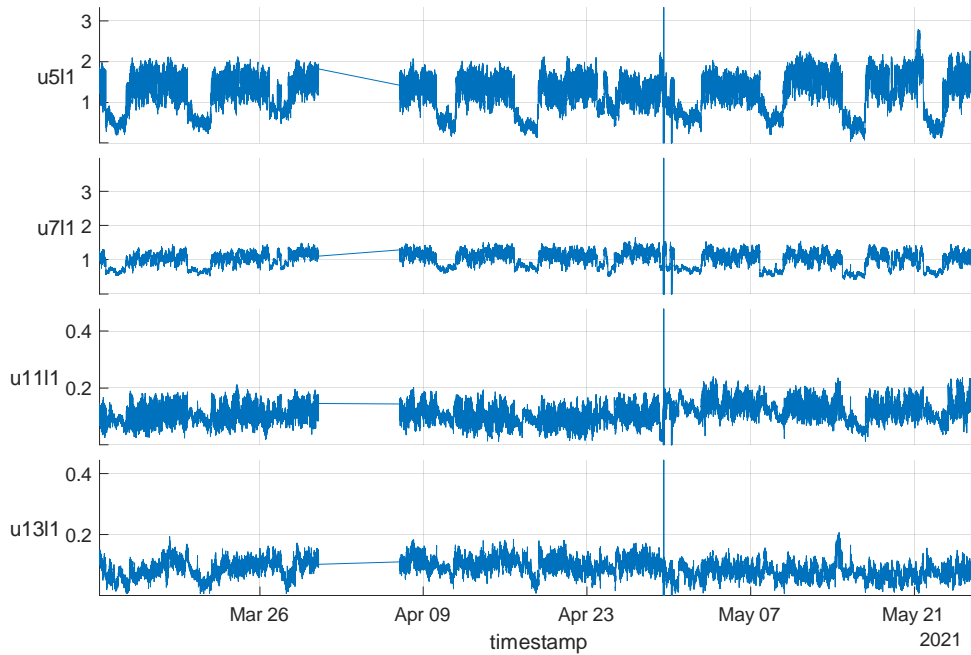


Kuva 2. Kaupunkiverkon sähköaseman K2 (julkista ja yksityistä palvelukuormaa) 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet ajan funktiona prosentteina perusaallosta.

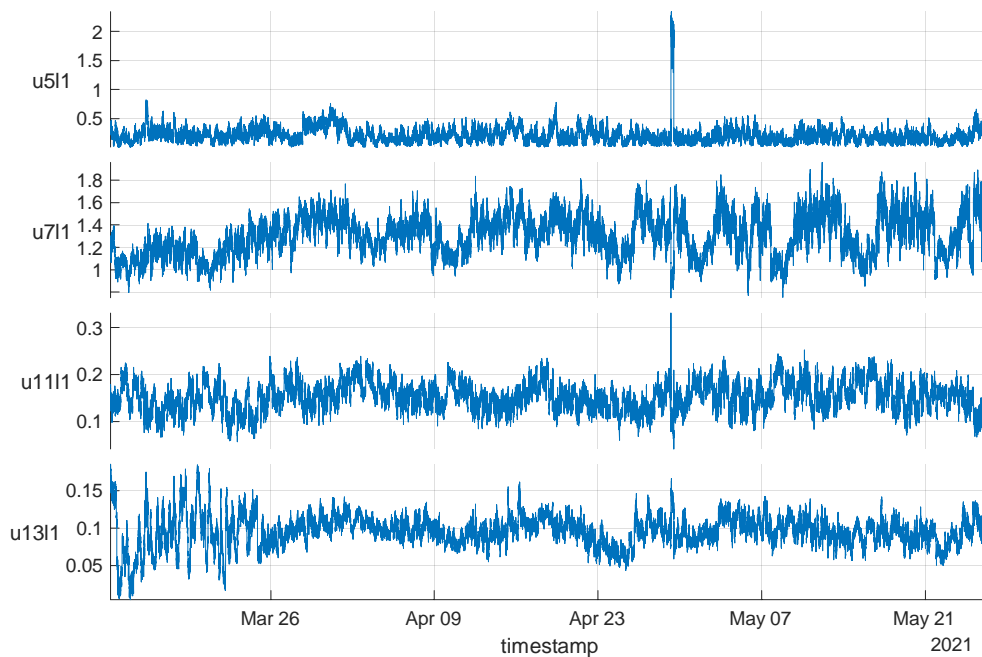


Kuva 3. Kaupunkiverkon sähköaseman K3 (asumispainotteista kuormaa) 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet ajan funktiona prosentteina perusaallosta.

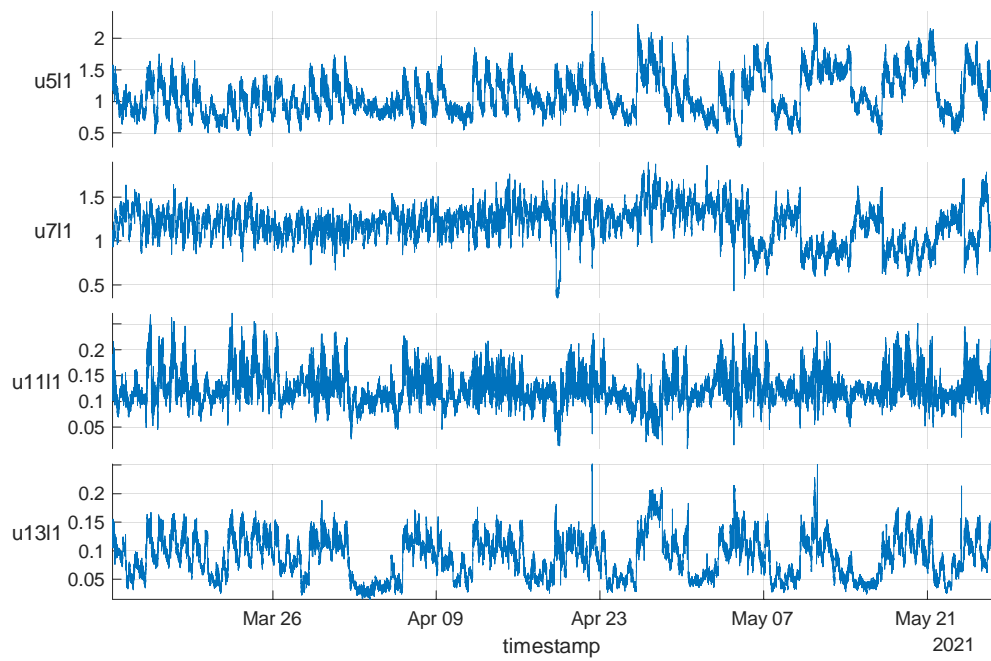
LIITE B: MAASEUTUVERKON SÄHKÖASEMIEN YLIAALTOJÄNNITTEET



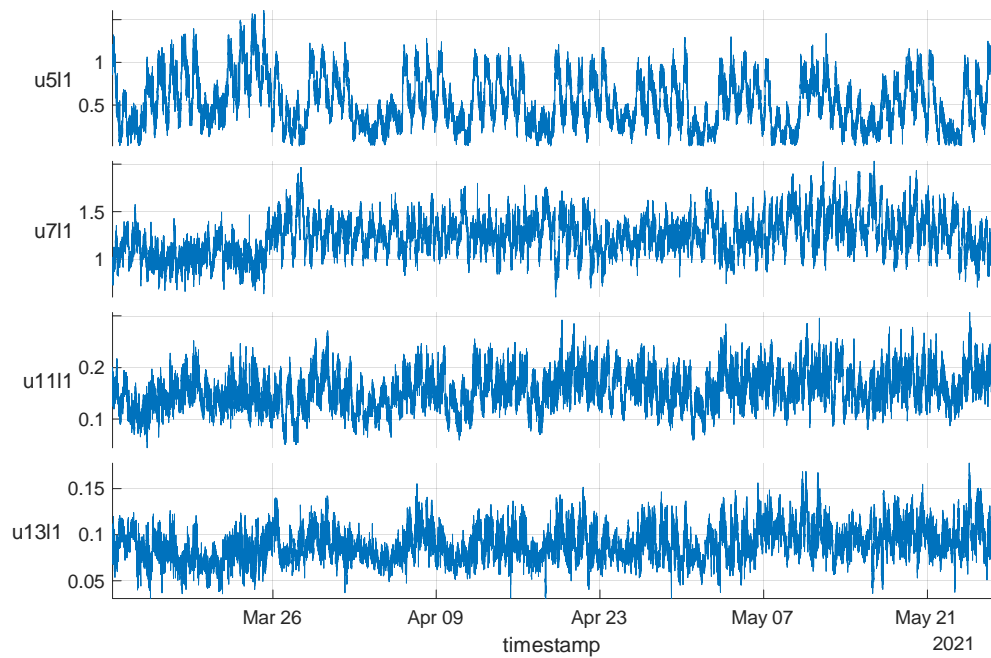
Kuva 4. Sähköaseman M1 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet ajan funktiona prosentteina perusaallosta.



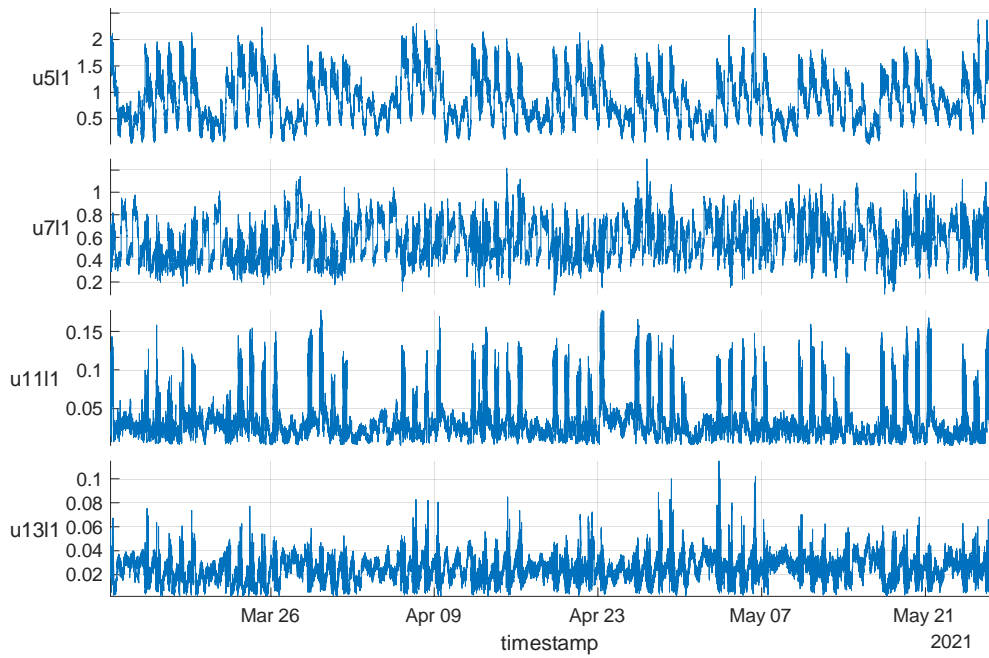
Kuva 5. Sähköaseman M2 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet ajan funktiona prosentteina perusaallosta.



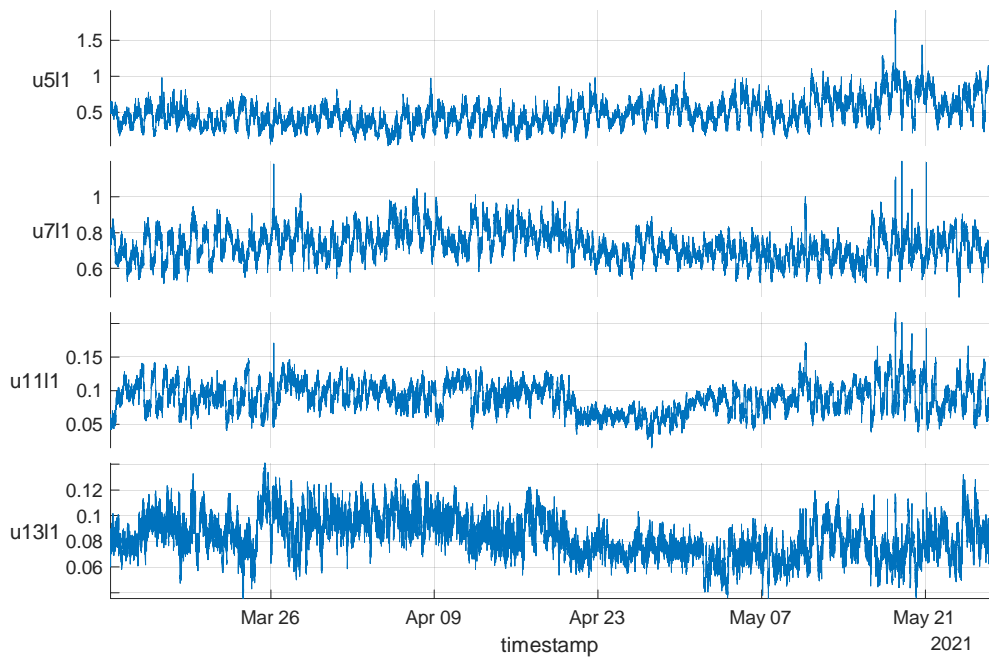
Kuva 6. Sähköaseman M3 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet ajan funktiona prosentteina perusaallosta.



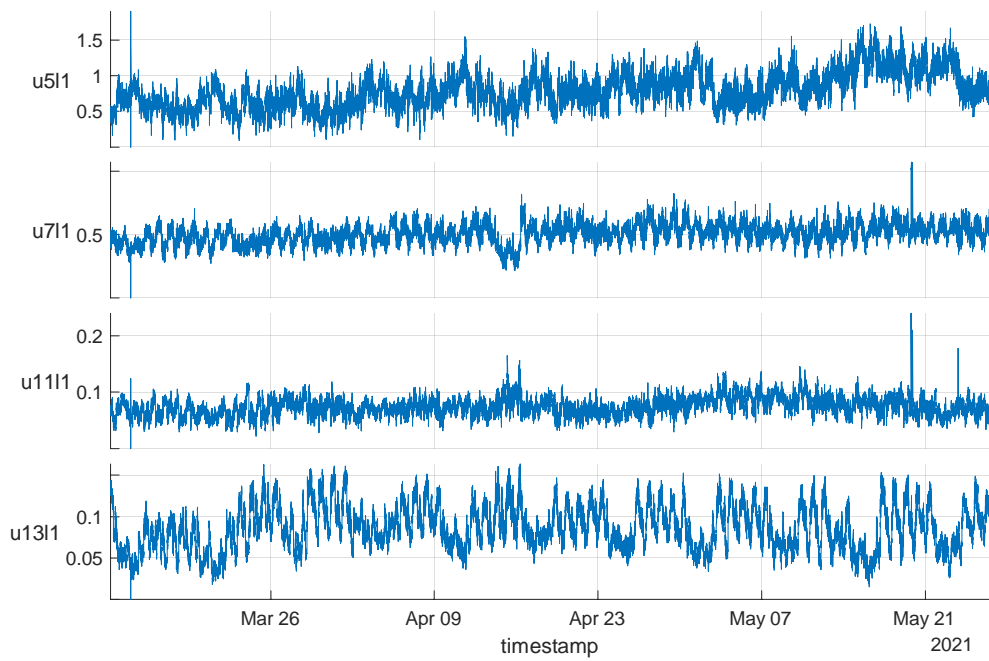
Kuva 7. Sähköaseman M4 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet ajan funktiona prosentteina perusaallosta.



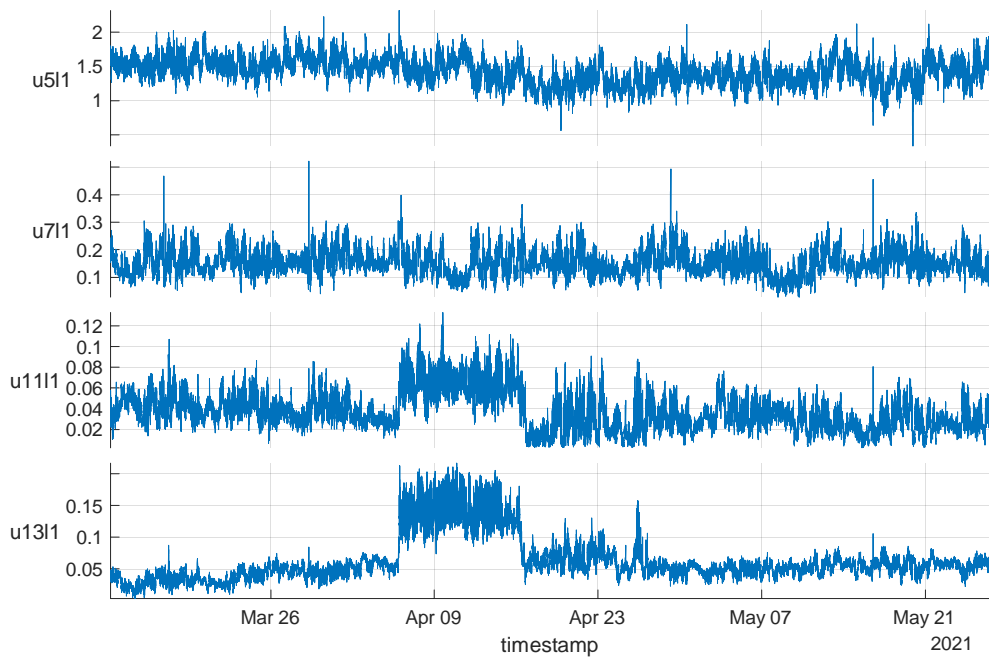
Kuva 8. Sähköaseman M5 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet ajan funktiona prosentteina perusaallosta.



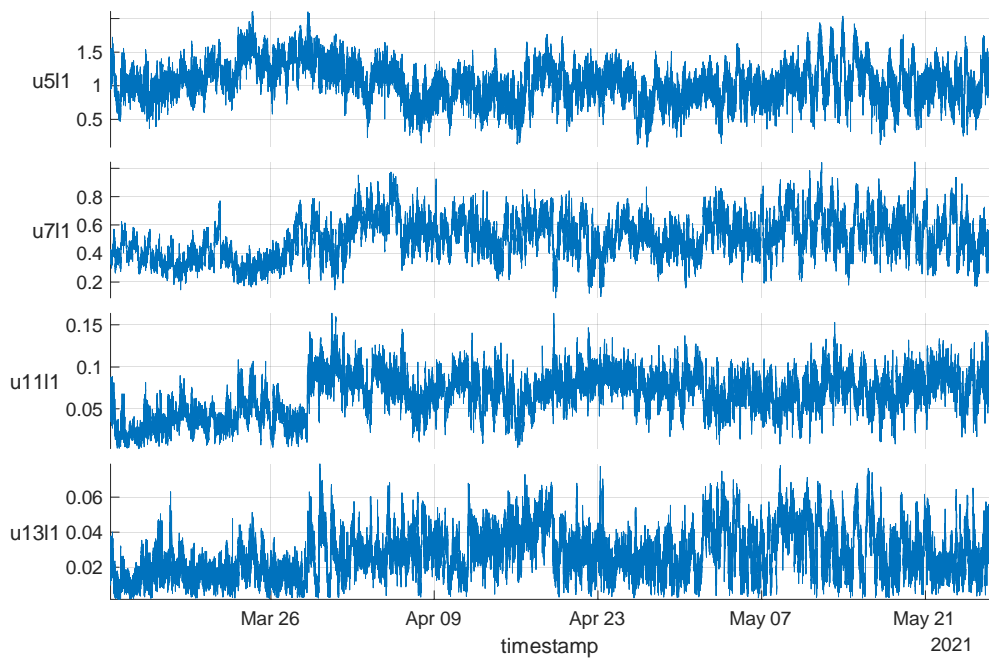
Kuva 9. Sähköaseman M6 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet ajan funktiona prosentteina perusaallosta.



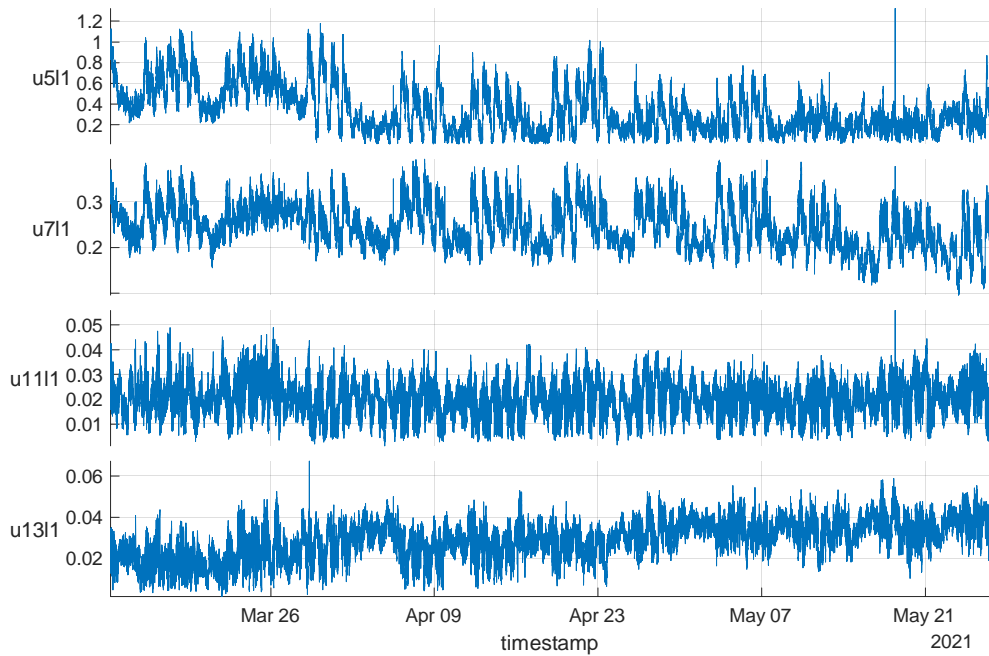
Kuva 10. Sähkösäseman M7 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet ajan funktiona prosentteina perusaallosta.



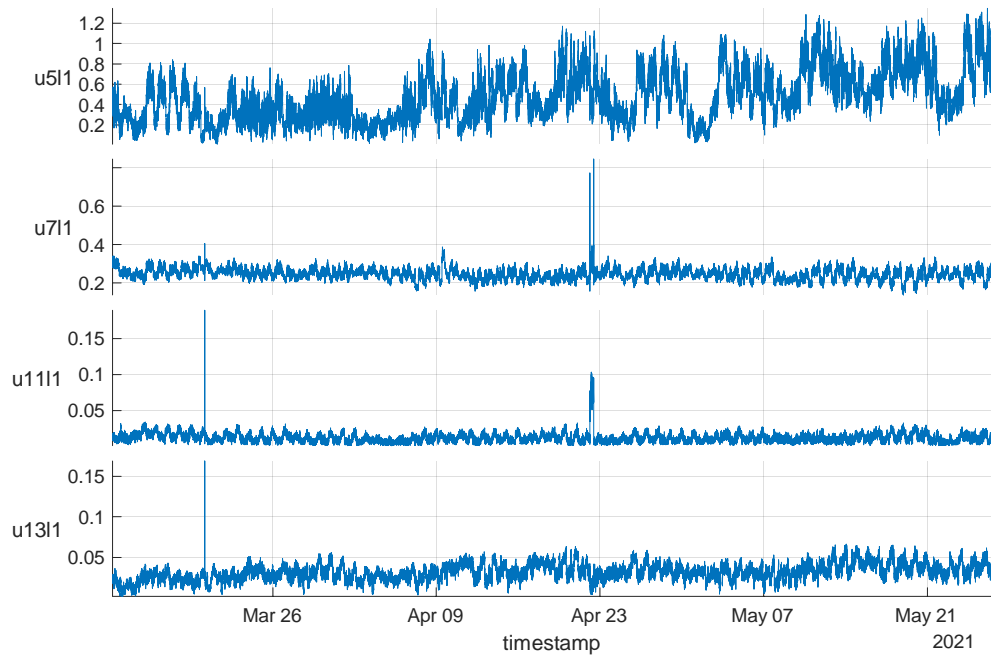
Kuva 11. Sähkösäseman M8 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet ajan funktiona prosentteina perusaallosta.



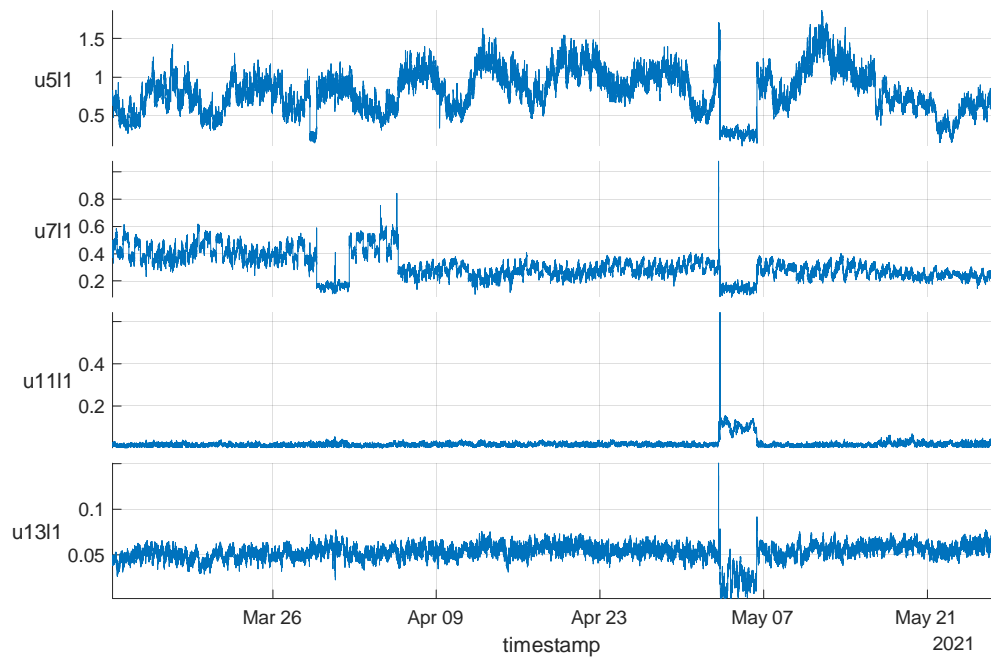
Kuva 12. Sähköaseman M9 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet ajan funktiona prosentteina perusaallosta.



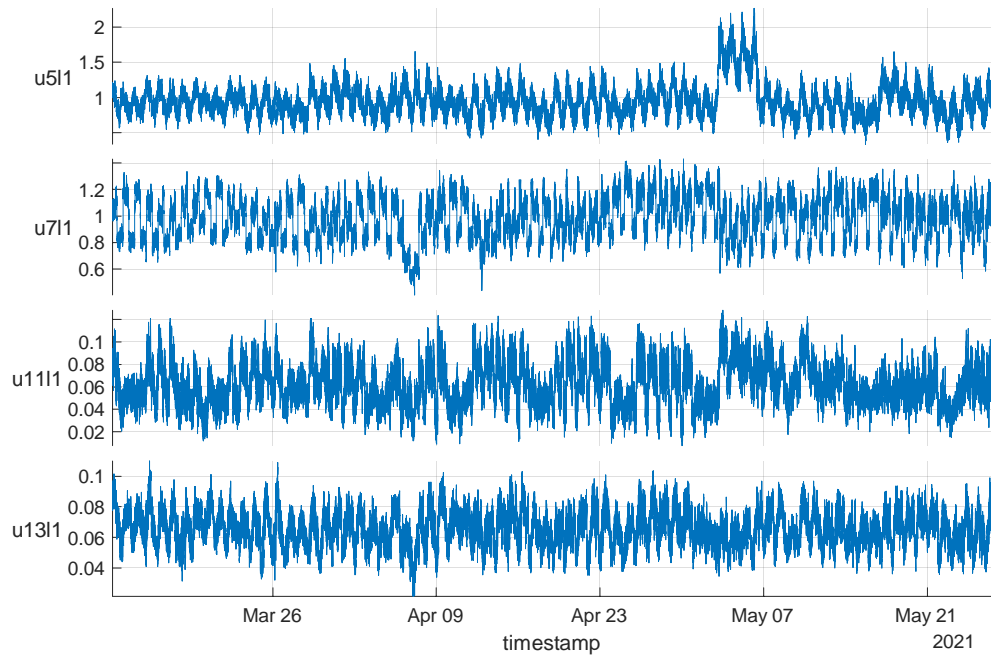
Kuva 13. Sähköaseman M10 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet ajan funktiona prosentteina perusaallosta.



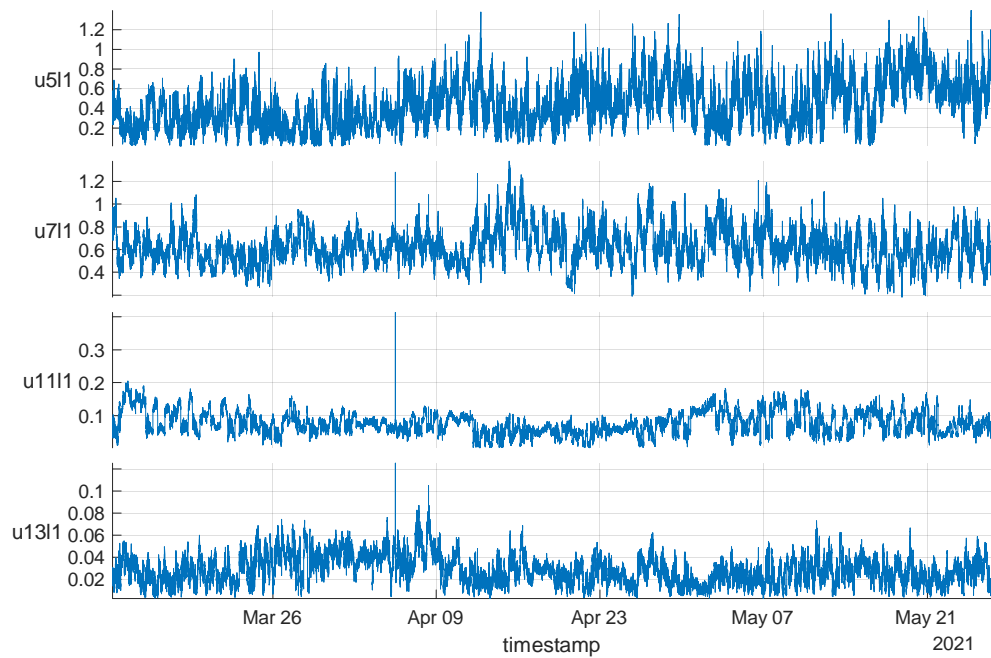
Kuva 14. Sähköaseman M11 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet ajan funktiona prosentteina perusaallosta.



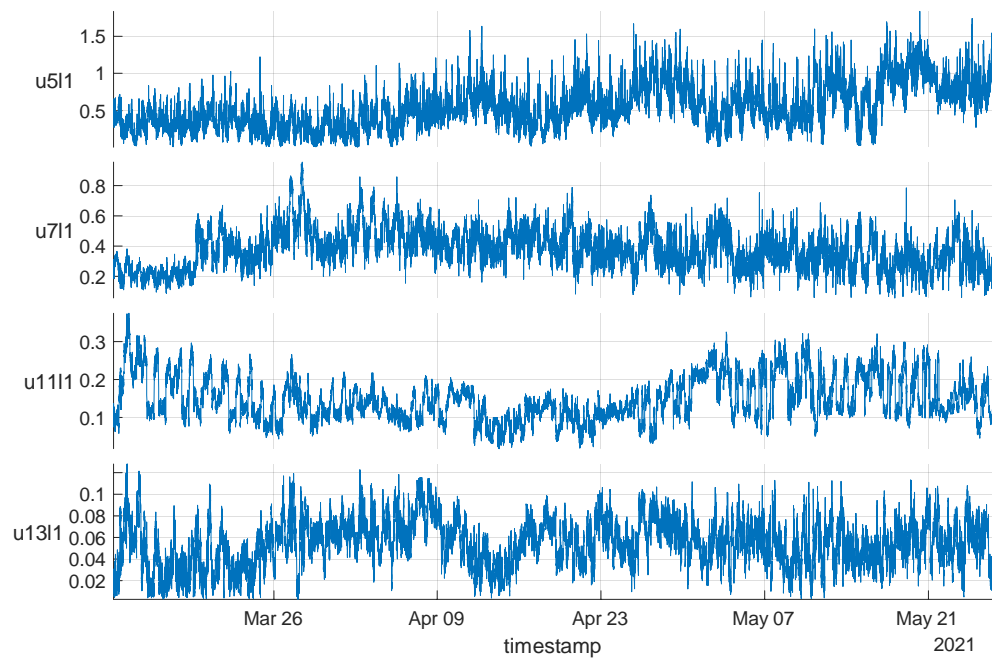
Kuva 15. Sähköaseman M12 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet ajan funktiona prosentteina perusaallosta.



Kuva 16. Sähköaseman M13 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet ajan funktiona prosentteina perusaallosta.



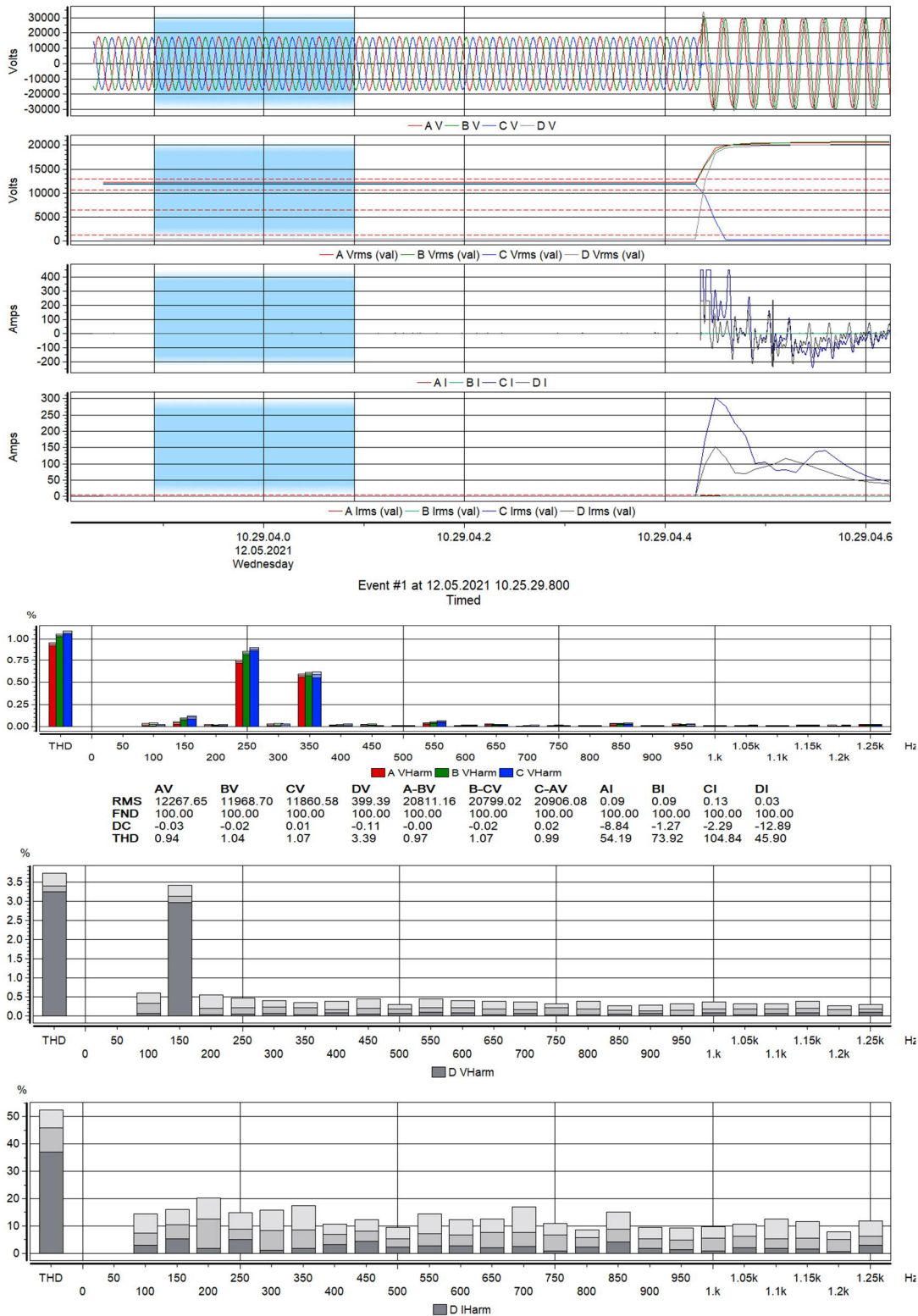
Kuva 17. Sähköaseman M14 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet ajan funktiona prosentteina perusaallosta.



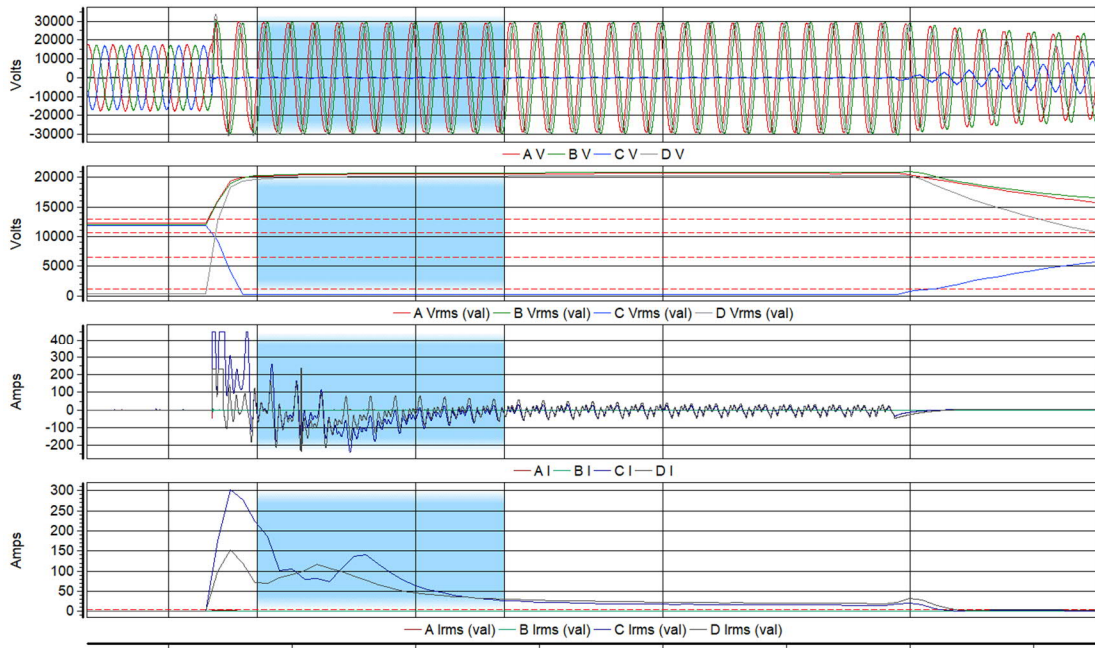
Kuva 18. Sähköaseman M15 5., 7., 11. ja 13. yliaaltojännitteet ajan funktiona prosentteina perusaallosta.

LIITE C: MAASULKUKEET – VERKKO 2, VIKA 1, SÄHKÖASEMA

Vian 1 osalta vikalähdön summavirtamittauksen alkutransientti on leikkautunut useamman verkkojakson ajalta ja tästä johtuen tehollisarvokuvaajakin on vastaavalta ajanjaksolta virheellinen.

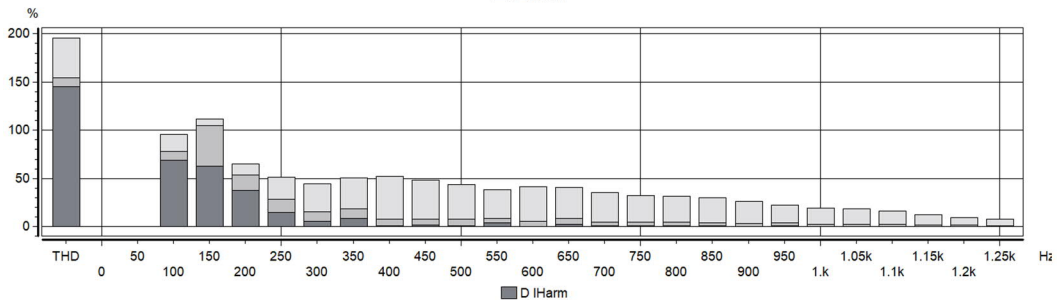
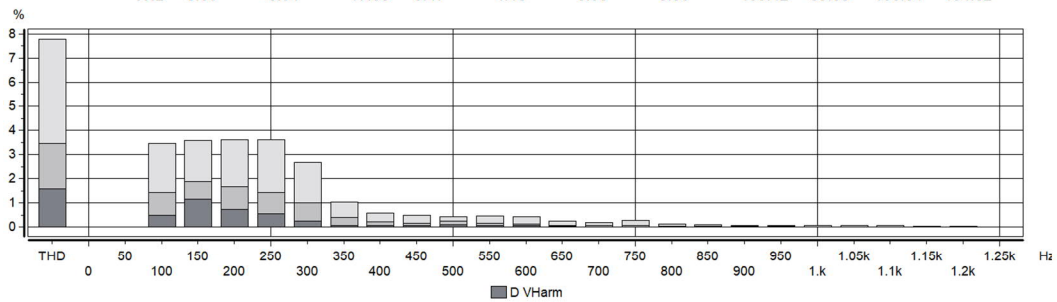
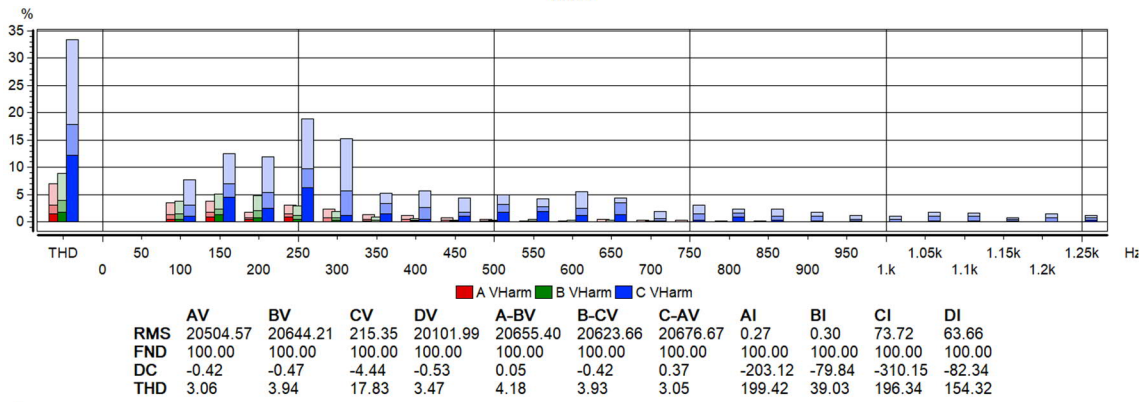


Kuva 19. Vika 1 vaiheessa L3, vikalähdön mittaus sähköasemalla, yliaallot ennen vika.

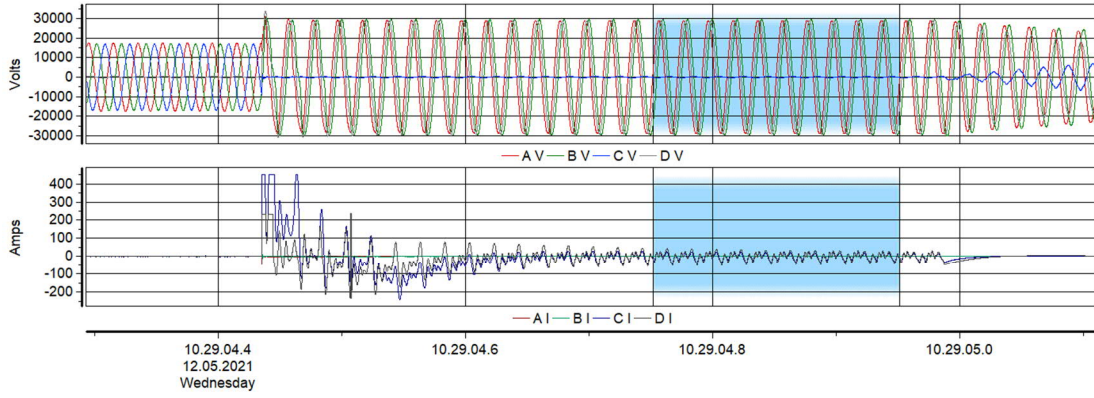


10.29.04.4
12.05.2021
Wednesday

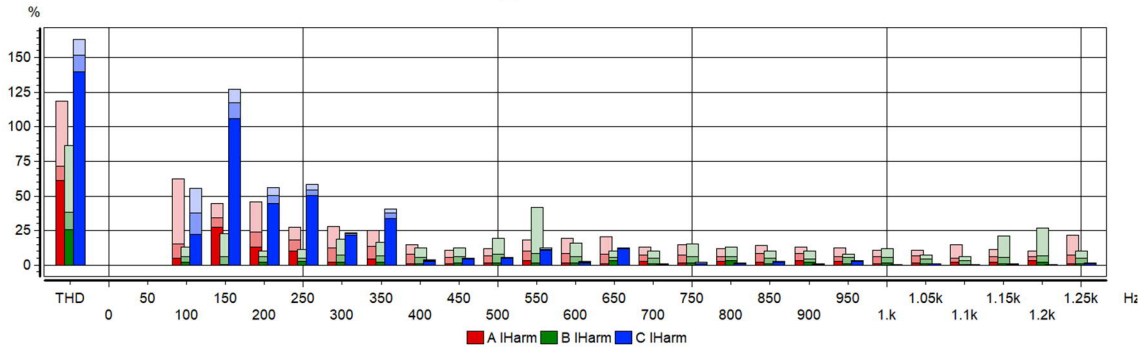
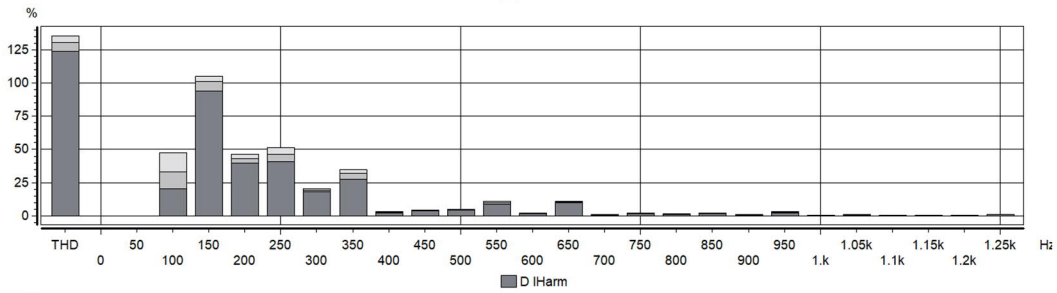
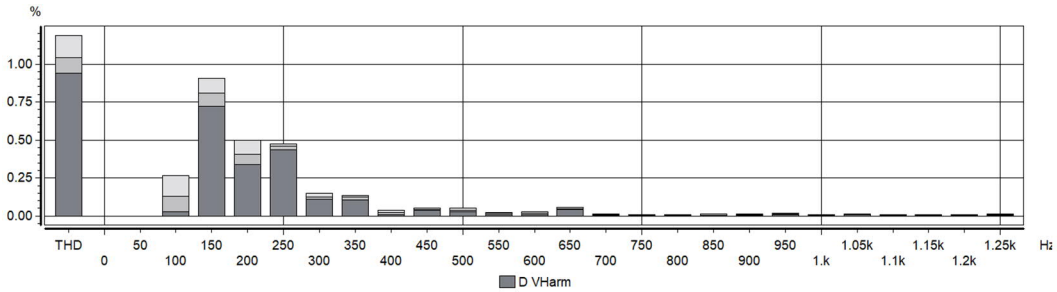
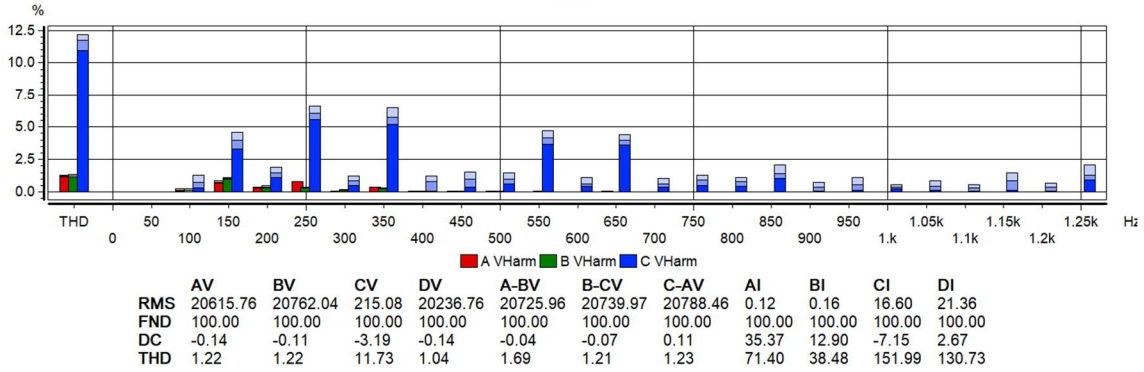
Event #1 at 12.05.2021 10.25.29.800
Timed



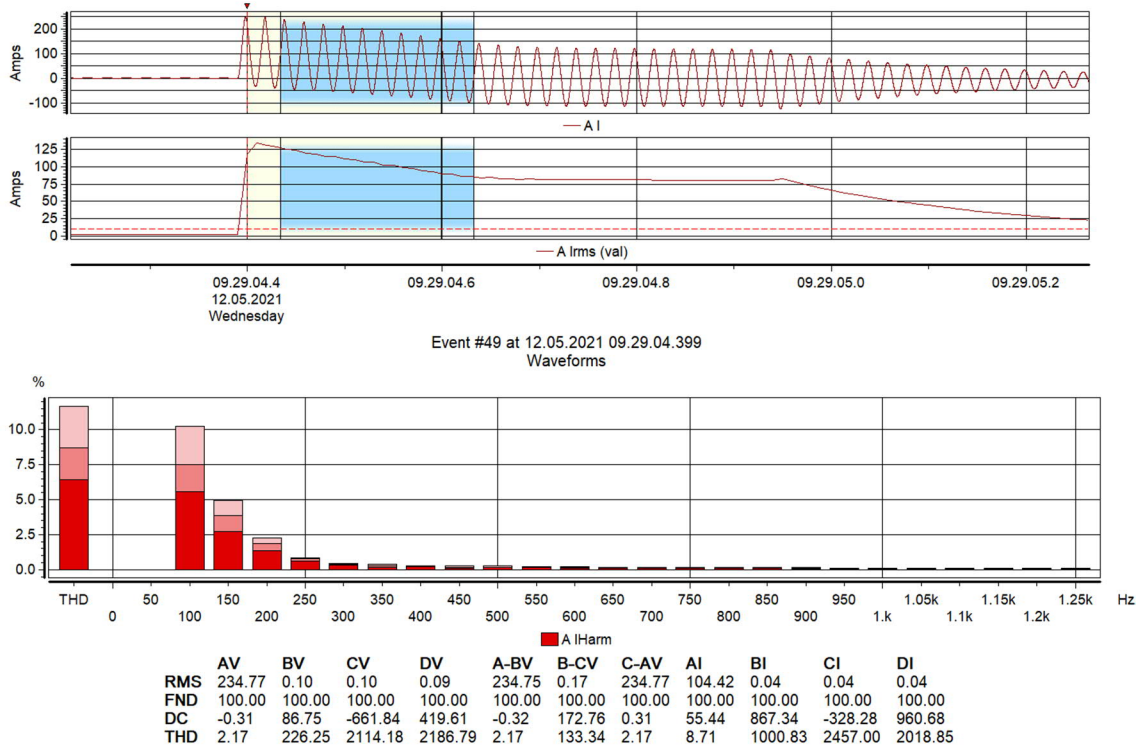
Kuva 20. Vika 1 vaiheessa L3, vikalähdön mittaus sähköasemalla, yliaallot vian alkupuolella.



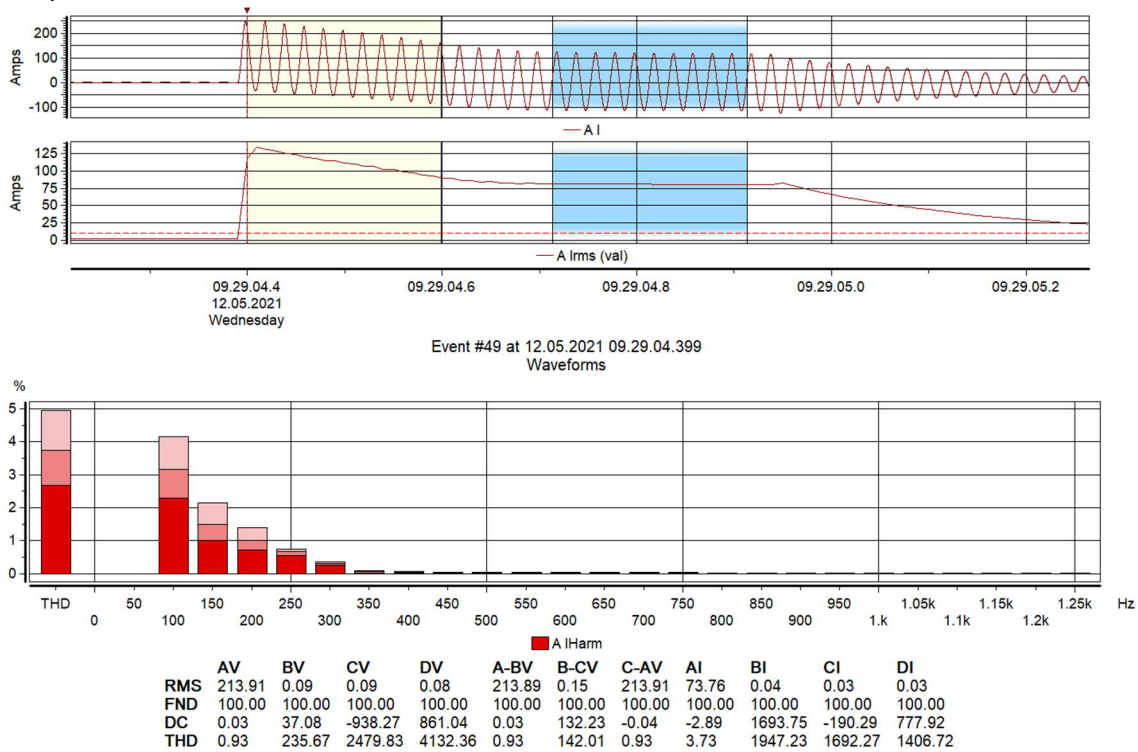
Event #1 at 12.05.2021 10.25.29.800
Timed



Kuva 21. Vika 1 vaiheessa L3, vikalähdön mittaus sähköasemalla, yliaallot vian loppupuolella.

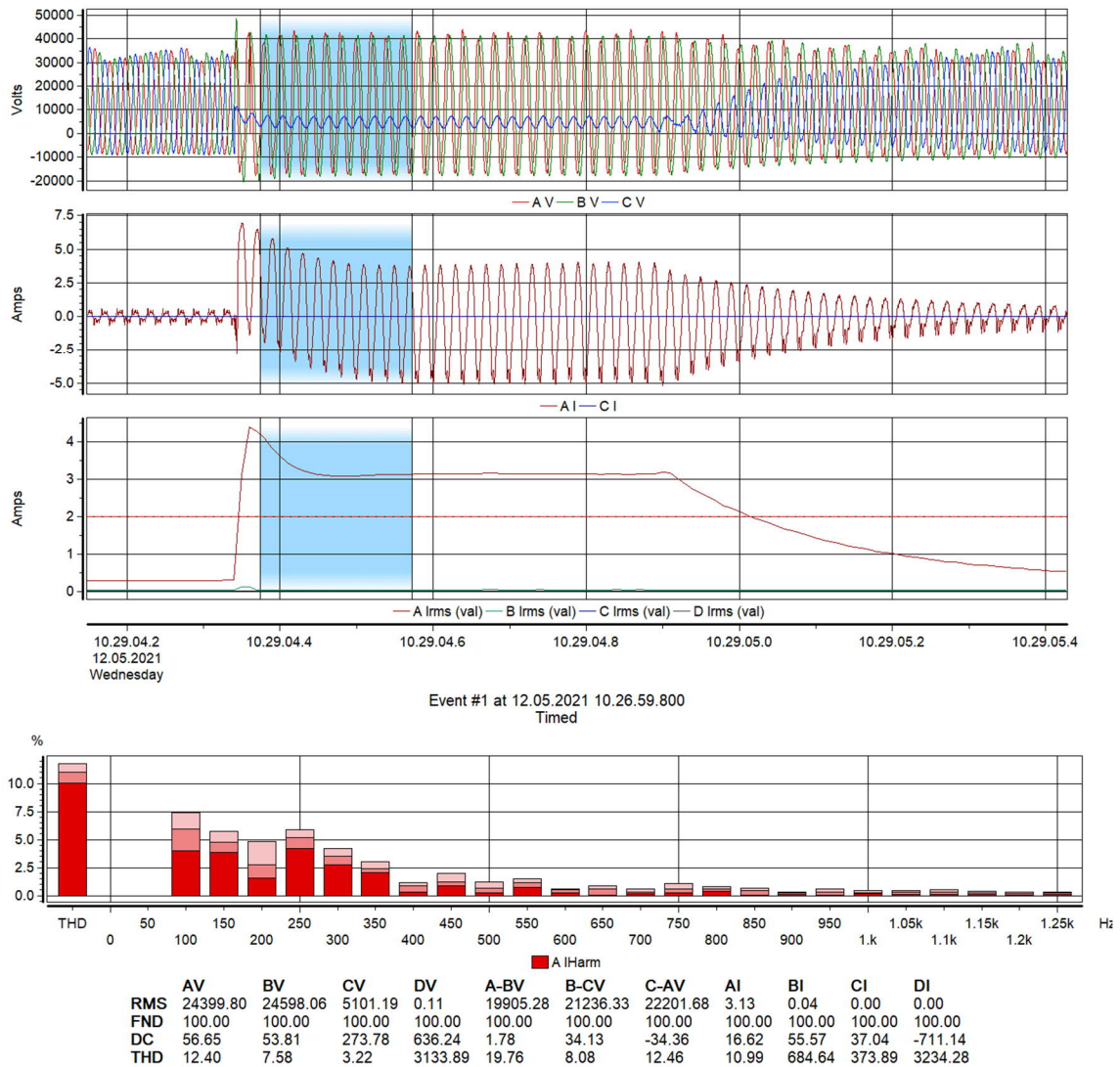


Kuva 22. Vika 1 vaiheessa L3, säädettävän kuristimen mittaus sähköasemalla, yliaallot vian alkupuolella.

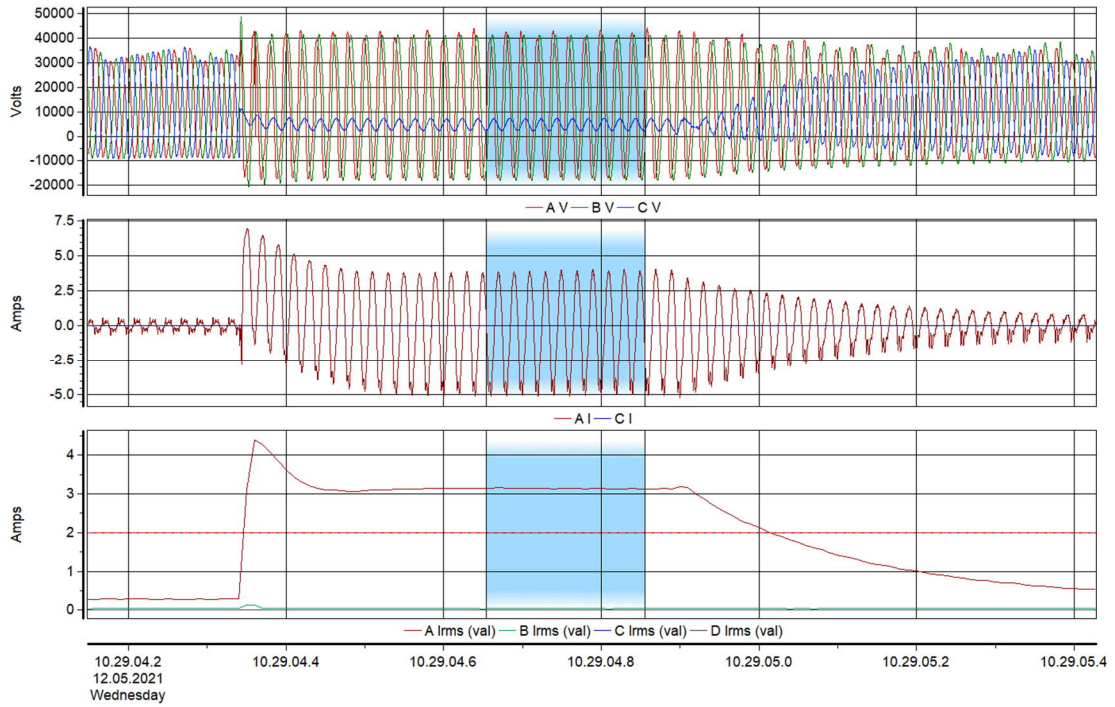


Kuva 23. Vika 1 vaiheessa L3, säädettävän kuristimen mittaus sähköasemalla, yliaallot vian loppupuolella.

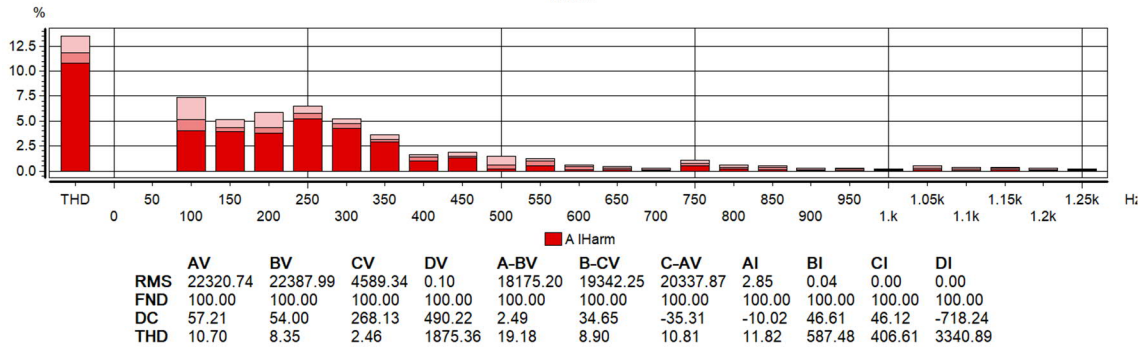
LIITE D: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 1, MUUNTAMO 1



Kuva 24. Muuntamon kojeiston jänniteilmajisijalta mitatut vaihejännitteiden aaltomuodot, maasulkuvirran hajautetun kompensointikuristimen (5A) virran aaltomuoto ja tehollisarvo sekä yliaaltojakauma vian alkupuolella (muuntajan PE-johtimesta mitattuna).

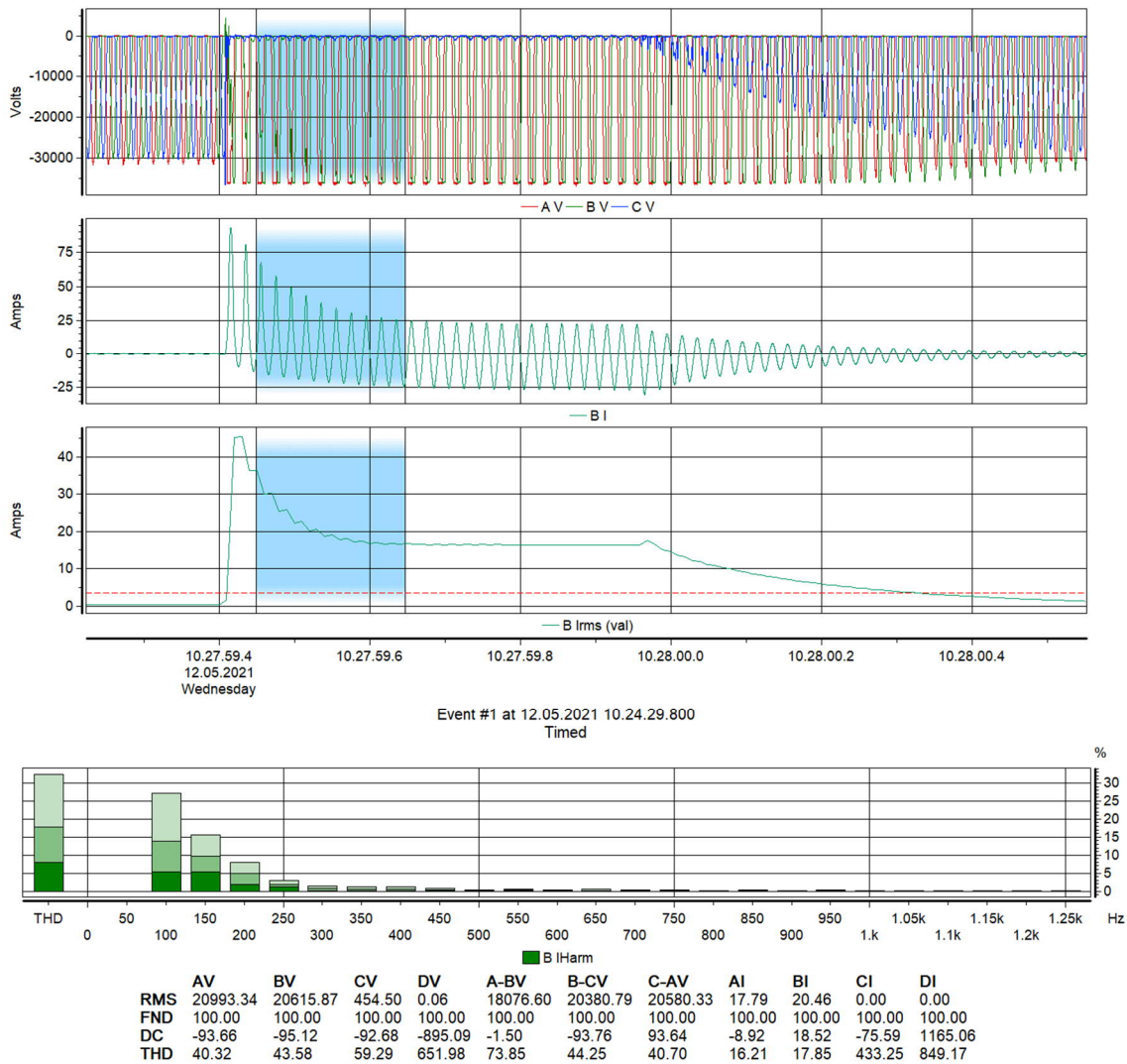


Event #1 at 12.05.2021 10.26.59.800
Timed

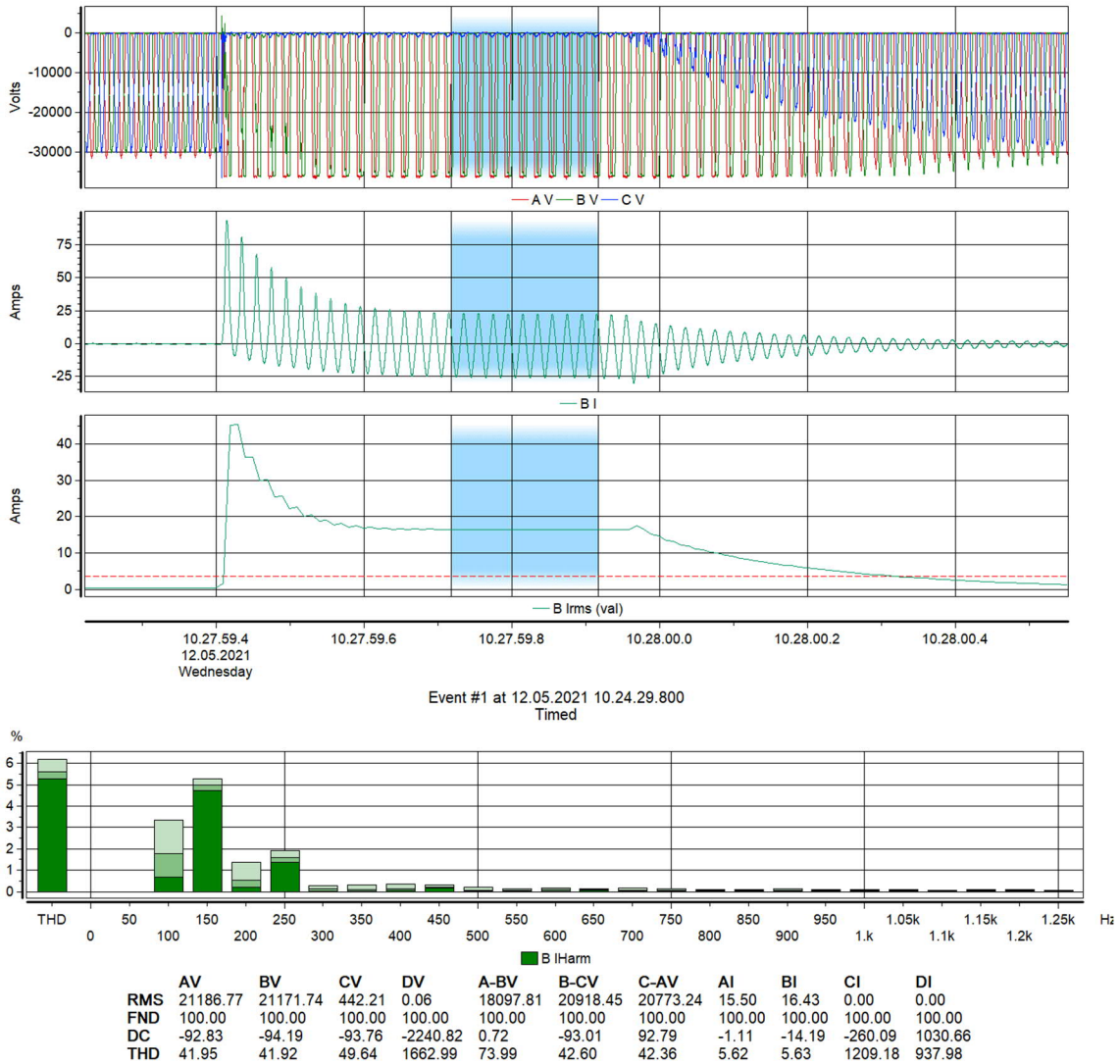


Kuva 25. Muuntamon kojeiston jänniteilmiasijalta mitatut vaihejännitteiden aaltomuodot, maasulkuvirran hajautetun kompensointikuristimen (5A) virran aaltomuoto ja tehollisarvo sekä yliaaltojakauma vian loppupuolella (muuntajan PE-johtimesta mitattuna).

LIITE E: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 1, MUUNTAMO 2

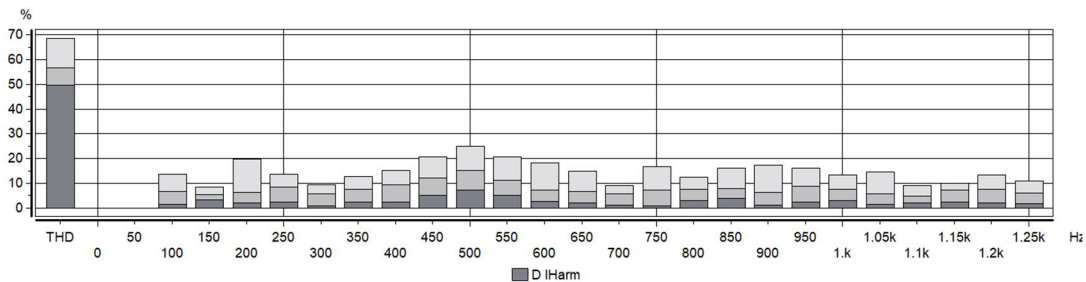
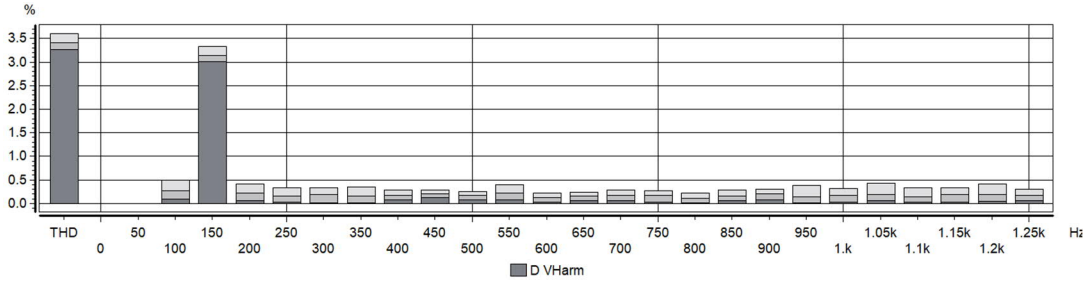
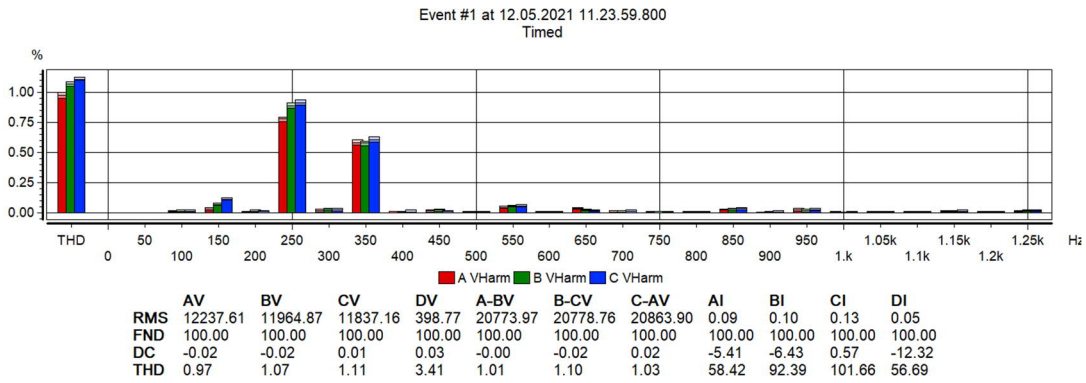
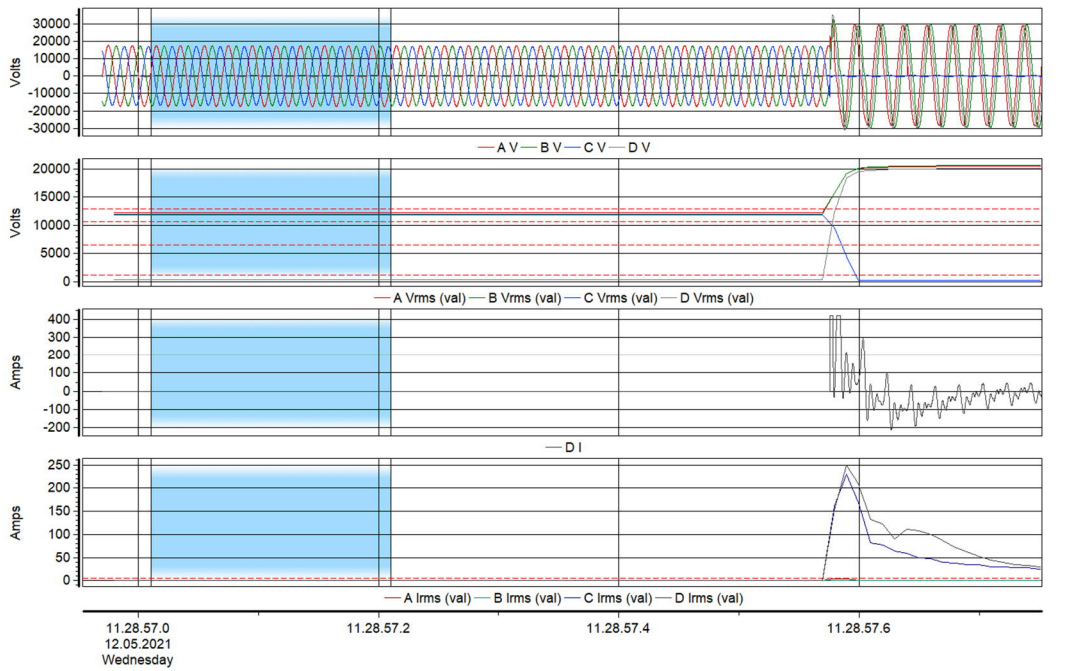


Kuva 26. Muuntamon kojeiston jänniteilmajalta mitatut vaihejännitteiden aaltomuodot, maasulkuvirran hajautetun kompensointikuristimen (15A) virran aaltomuoto ja tehollisarvo sekä yliaaltojakauma vian alkupuolella (muuntajan PE-johtimesta mitattuna).

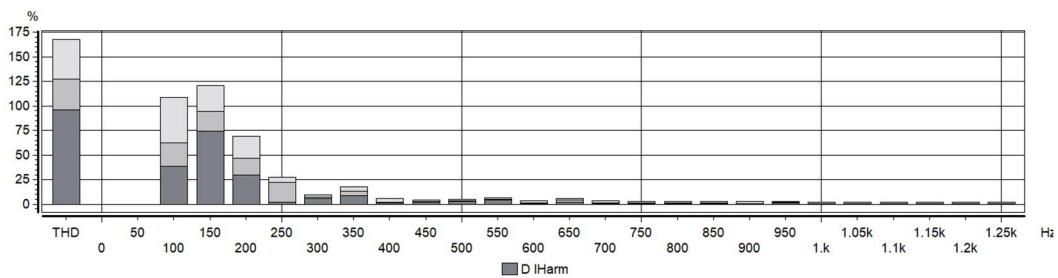
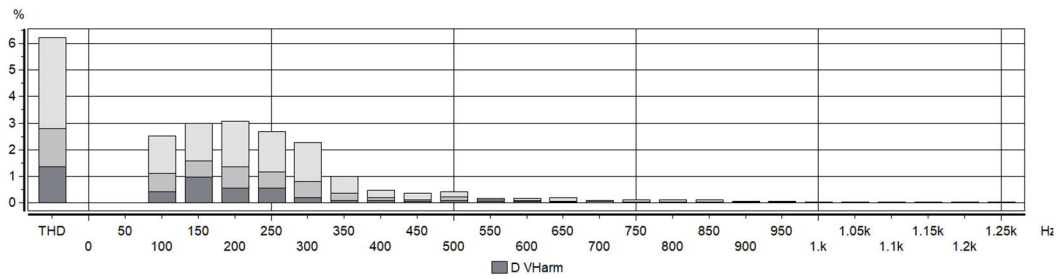
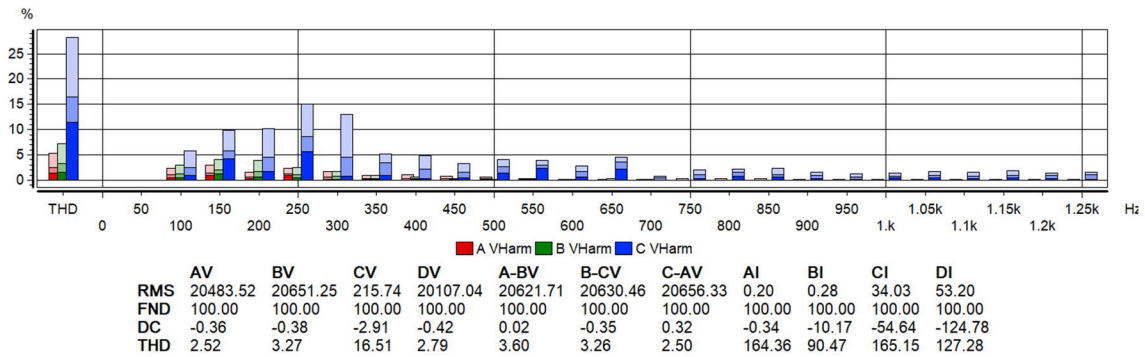
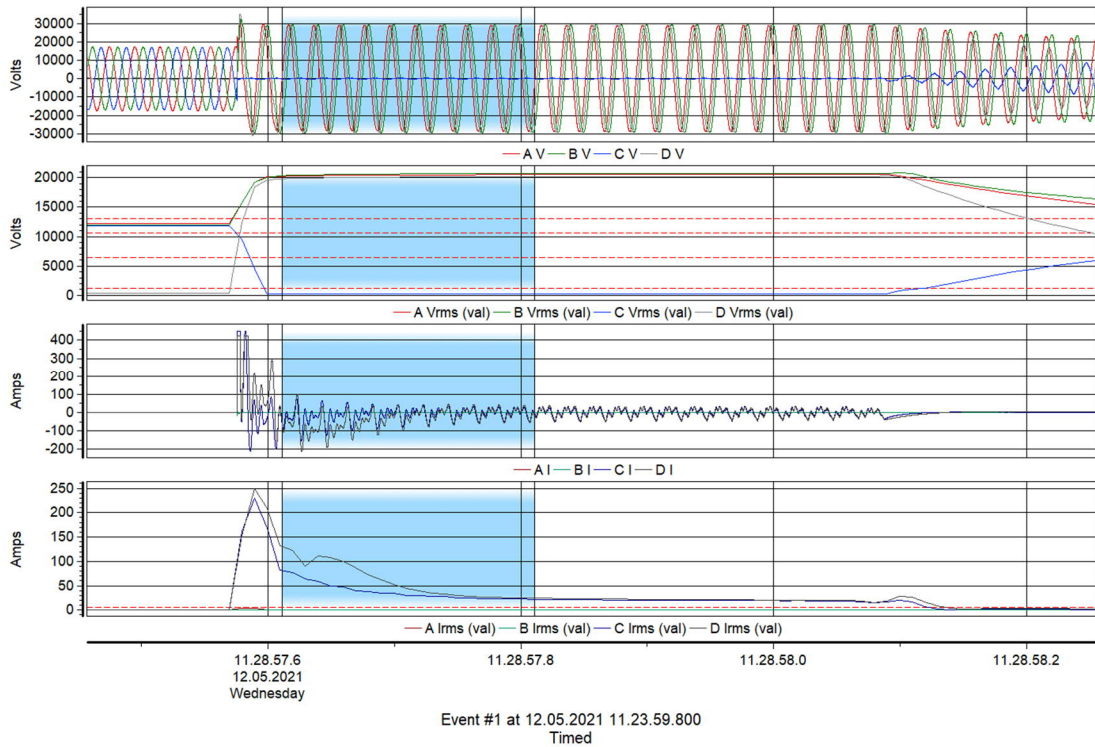


Kuva 27. Muuntamon kojeiston jänniteilmiasijalta mitatut vaihejännitteiden aaltomuodot, maasulkuvirran hajautetun kompensointikuristimen (15A) virran aaltomuoto ja tehollisarvo sekä yliaaltojakauma vian loppupuolella (muuntajan PE-johtimesta mitattuna).

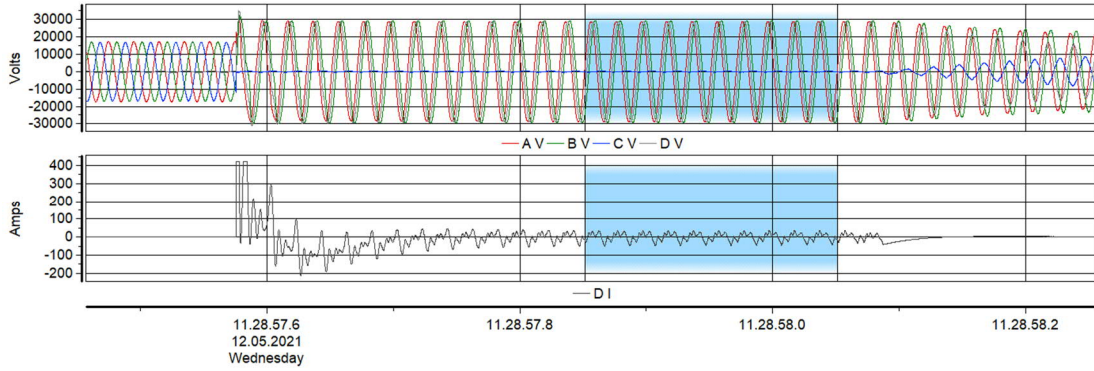
LIITE F: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 2, SÄHKÖASEMA



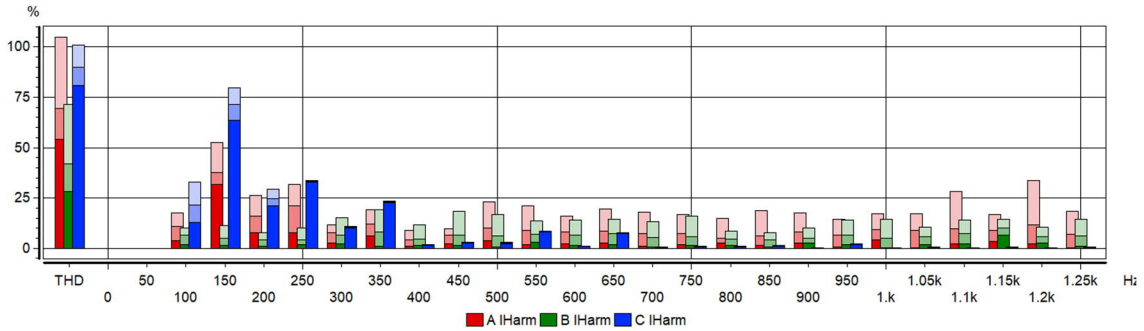
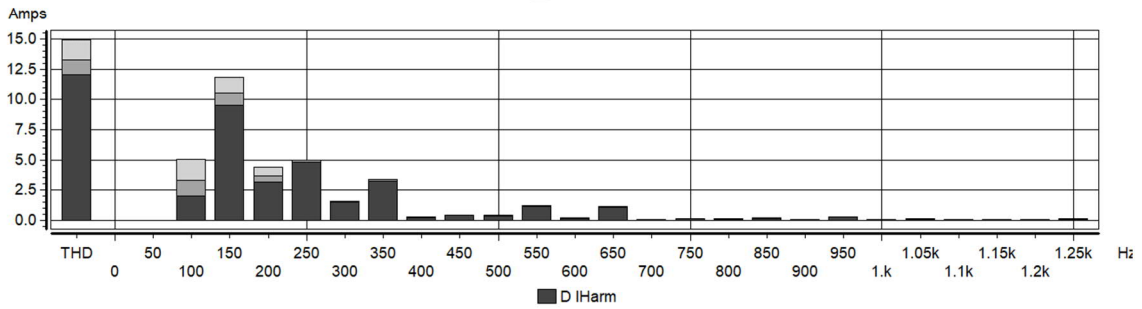
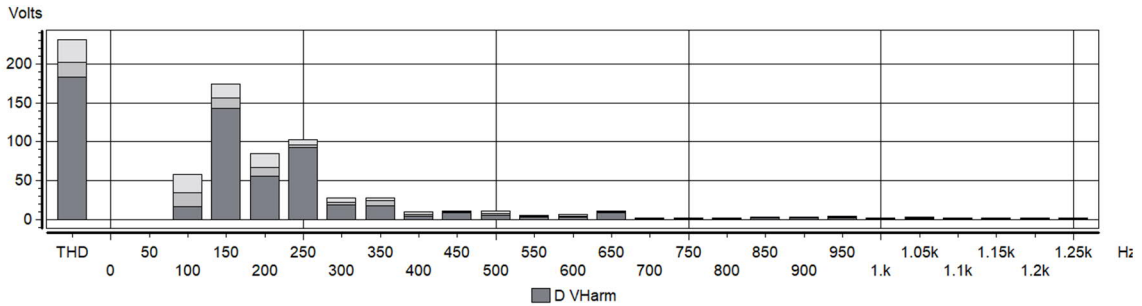
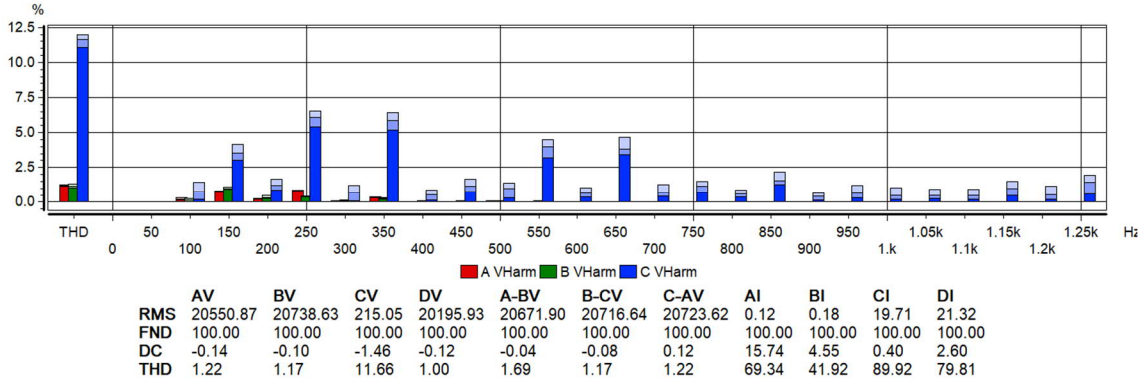
Kuva 28. Vika 2 vaiheessa L3, vikalähdön mittaus sähköasemalla, yliaallot ennen vikaa.



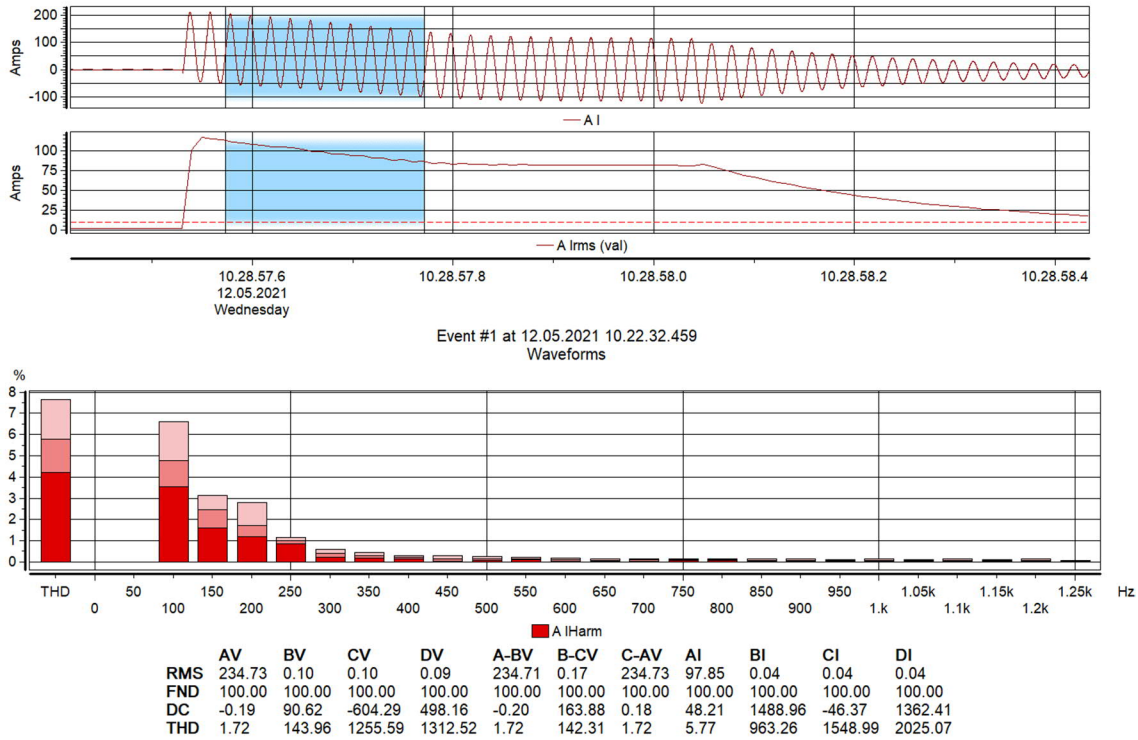
Kuva 29. Vika 2 vaiheessa L3, vikalähdön mittaus sähköasemalla, yliaallot vian alkupuolella.



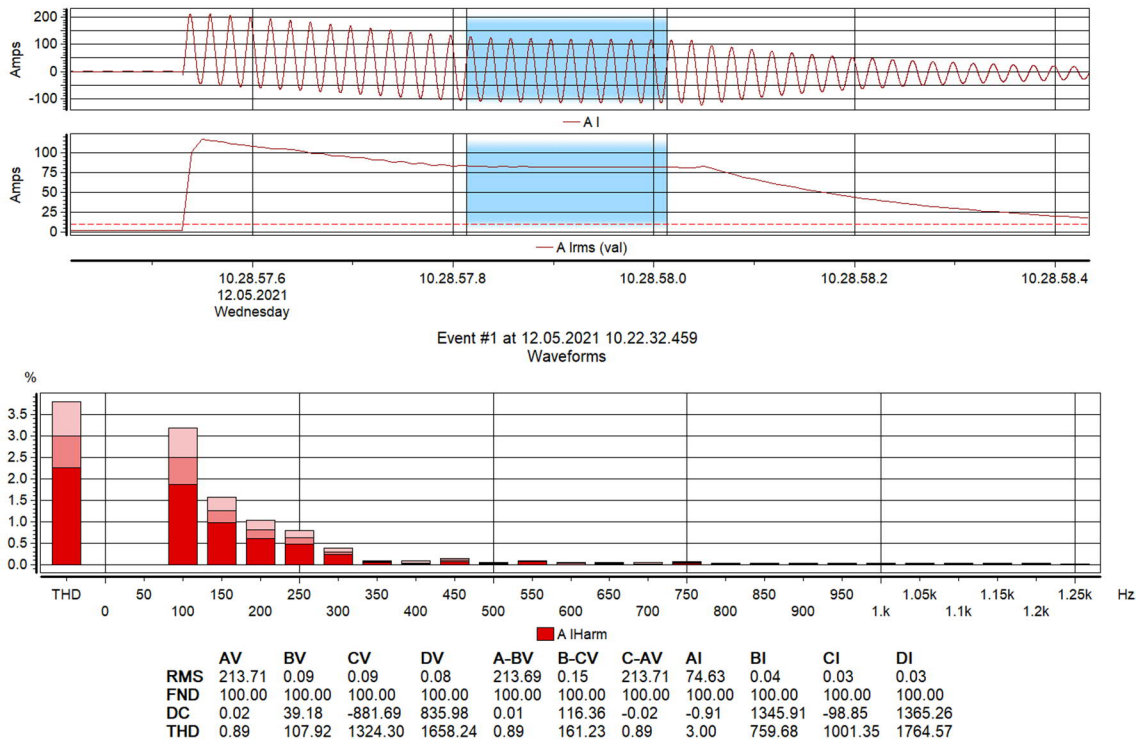
Event #1 at 12.05.2021 11.23.59.800
Timed



Kuva 30. Vika 2 vaiheessa L3, vikalähdön mittaus sähköasemalla, yliaallot vian loppupuolella.

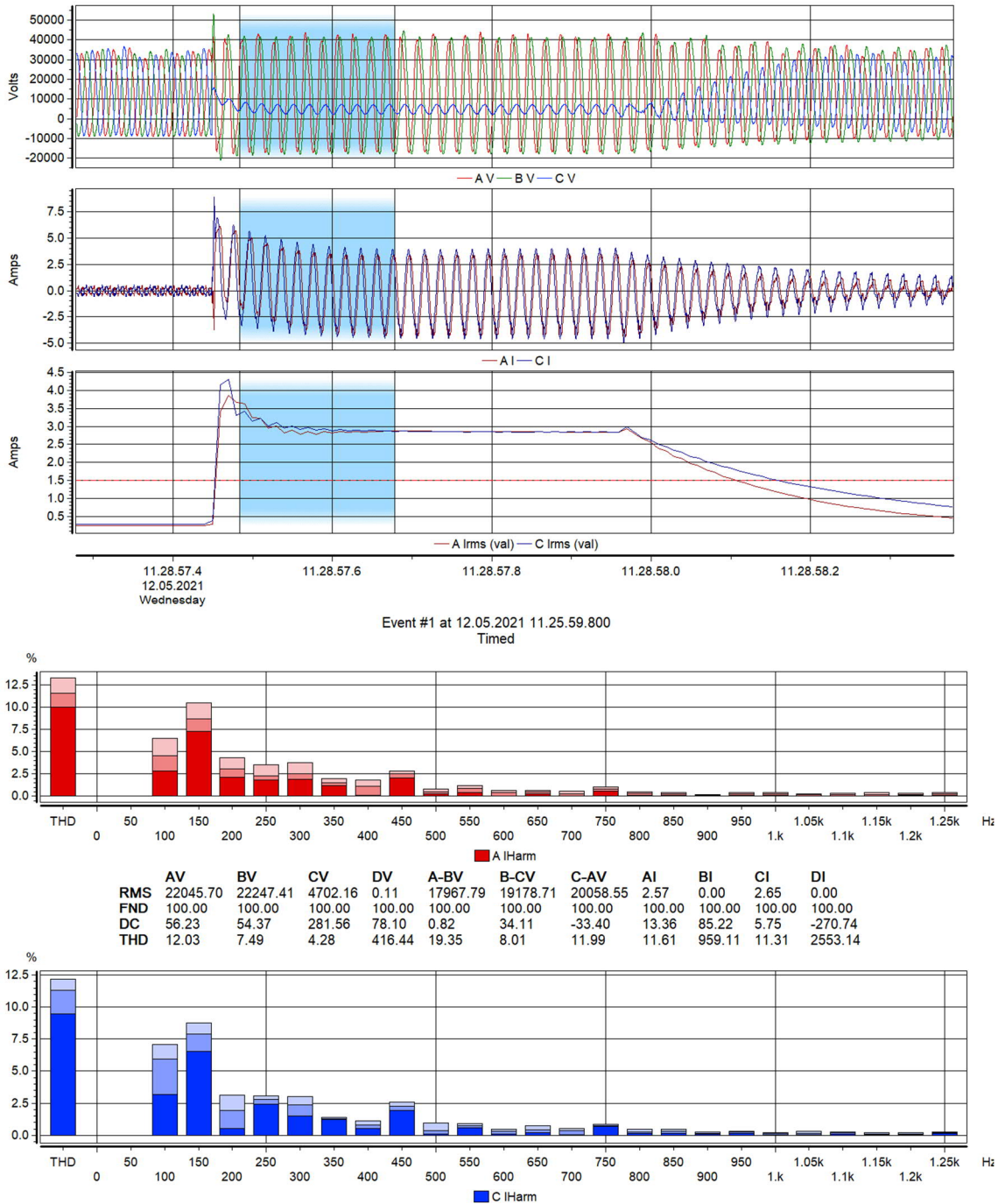


Kuva 31. Vika 2 vaiheessa L3, säädettävän kuristimen mittaus sähköasemalla, yliaallot vian alkupuolella.

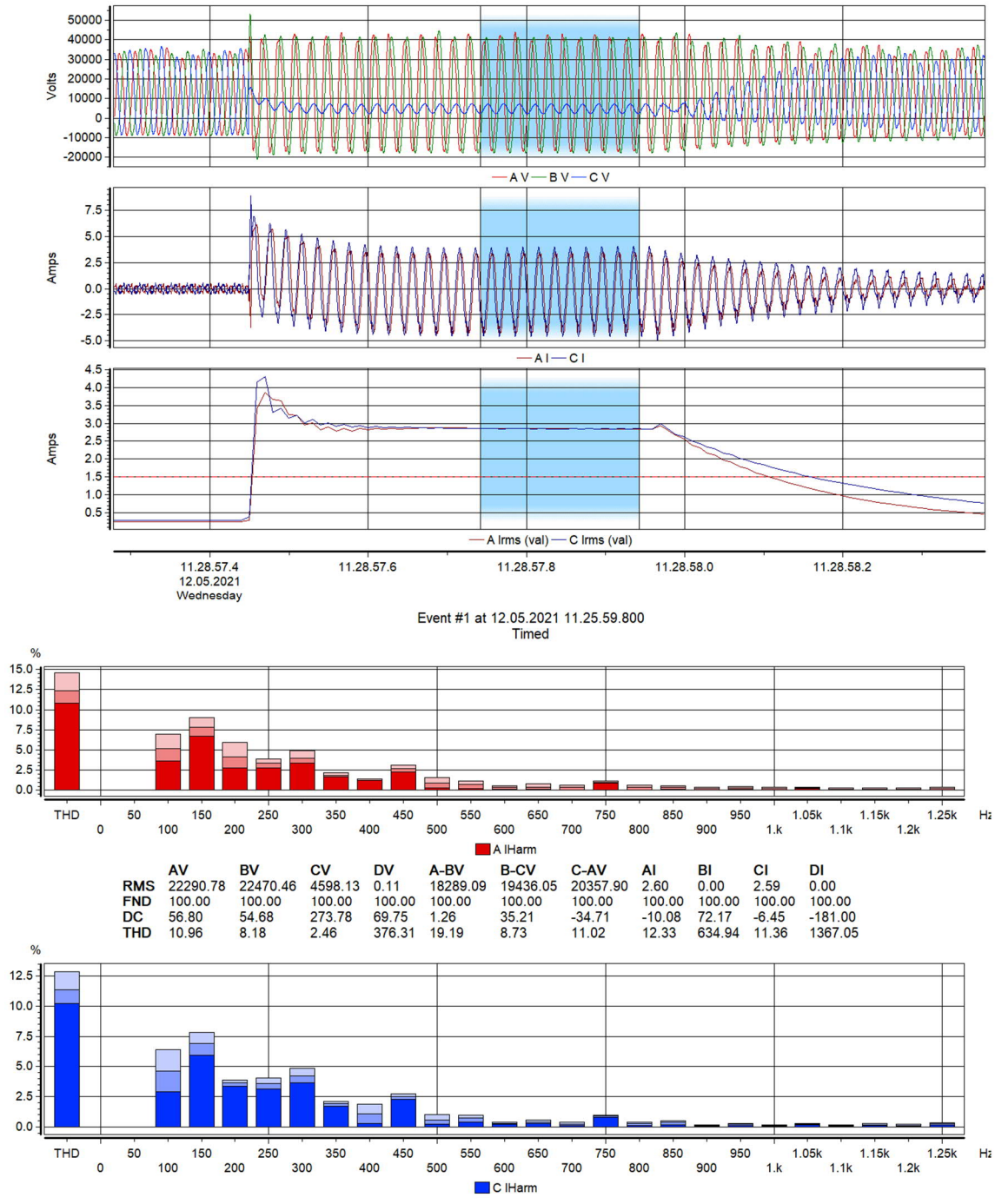


Kuva 32. Vika 2 vaiheessa L3, säädettävän kuristimen mittaus sähköasemalla, yliaallot vian loppupuolella.

LIITE G: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 2, MUUNTAMO 1

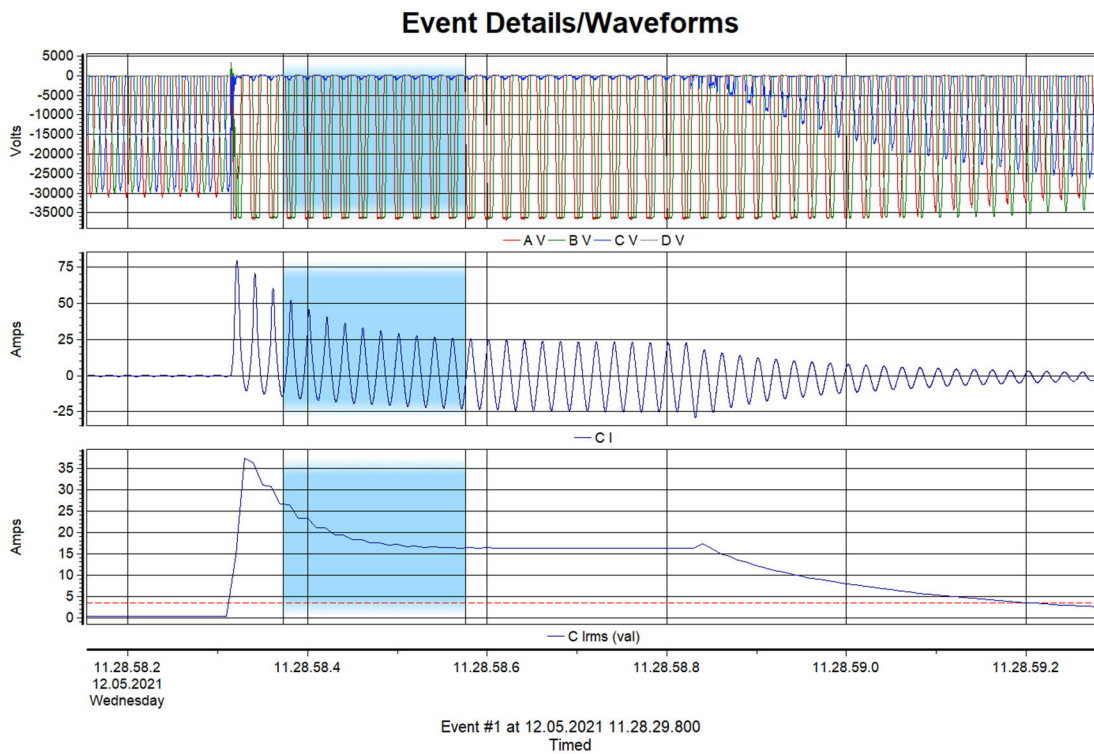


Kuva 33. Muuntamon kojeiston jänniteilmajalta mitatut vaihejännitteiden aaltomuodot, maasulkuvirran hajautetun kompensointikuristimen (5A) (+ muuntajan) PE-johtimen virran (AI) sekä muuntajan ja kojeiston välisten kaapeleiden kosketussuojien summavirran (CI) aaltomuoto, tehollisarvo sekä yliaaltojakauma ja vian alkupuolella.



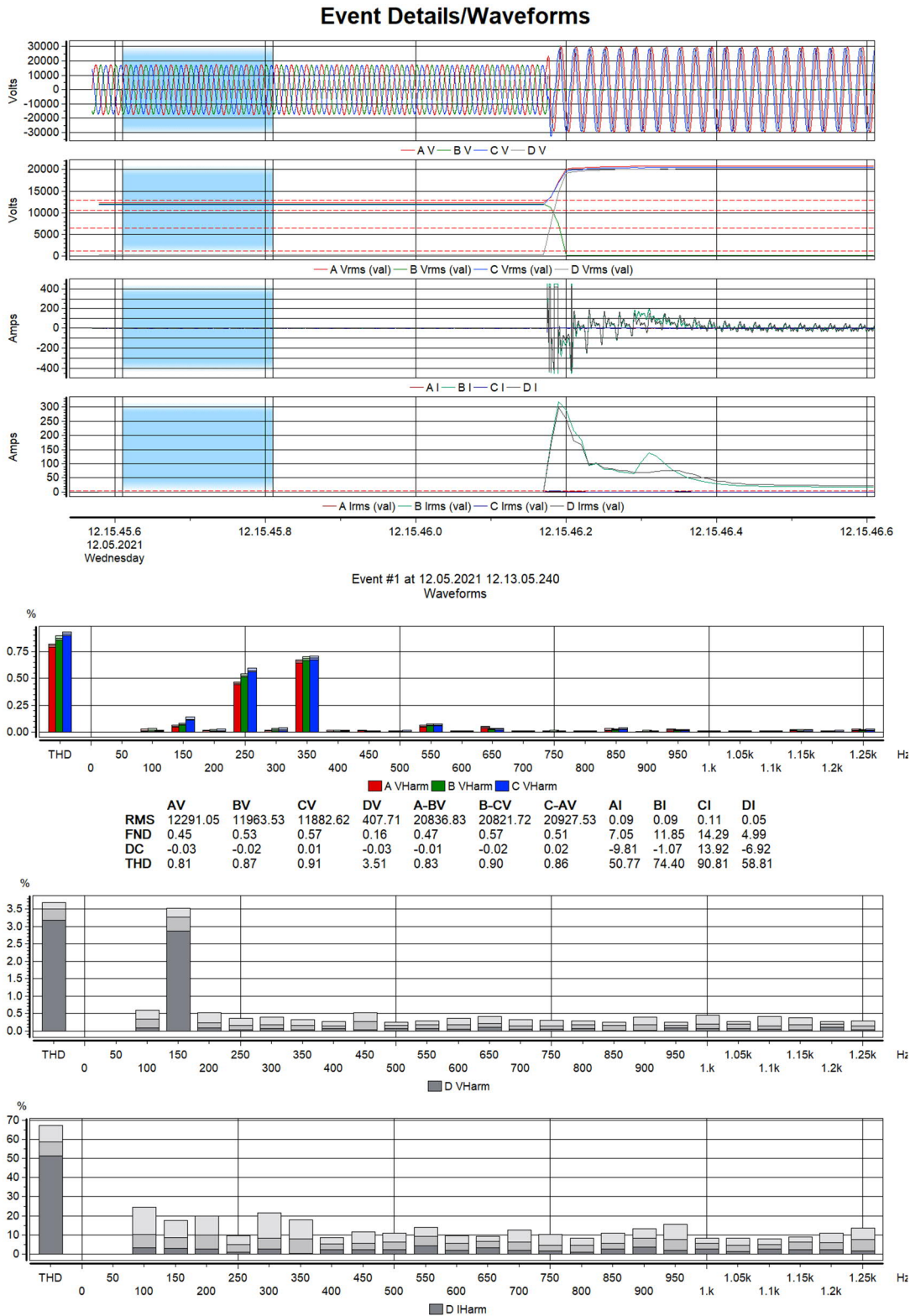
Kuva 34. Muuntamon kojeiston jänniteilmajalta mitatut vaihejännitteiden aaltomuodot, maasulkuvirran hajautetun kompensointikuristimen (5A) (+ muuntajan) PE-johtimen virran (AI) sekä muuntajan ja kojeiston välisten kaapeleiden kosketussuojien summavirran (CI) aaltomuoto, tehollisarvo sekä yliaaltojakauma ja vian loppupuolella.

LIITE H: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 2, MUUNTAMO 2

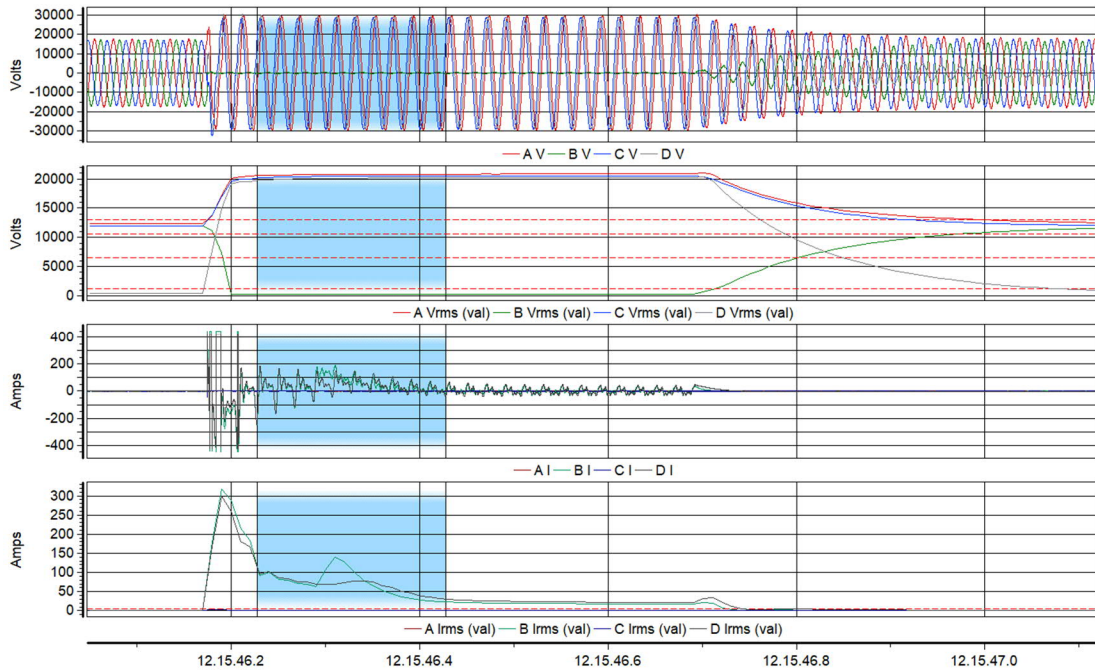


Kuva 35. Muuntamon kojeiston jänniteilmiasijalta mitatut vaihejännitteiden aaltomuodot, maasulkuvirran hajautetun kompensointikuristimen (15A) virran aaltomuoto ja tehollisarvo vian aikana (muuntajan PE-johtimesta mitattuna).

LIITE I: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKKA 3, SÄHKÖASEMA

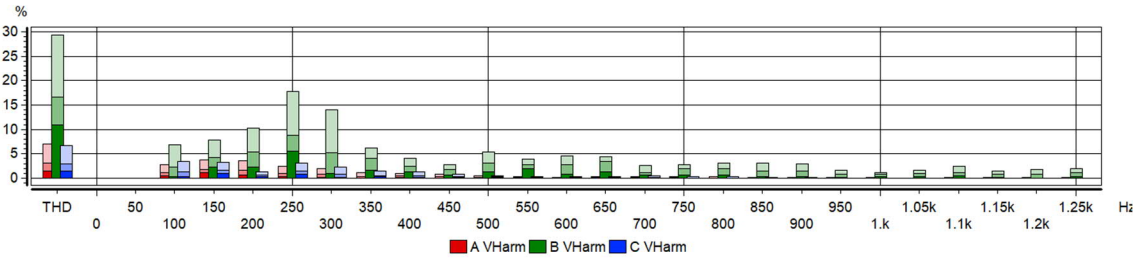


Kuva 36. Vika 3 vaiheessa L2, vikalähdön mittaus sähköasemalla, yliaallot ennen vika.

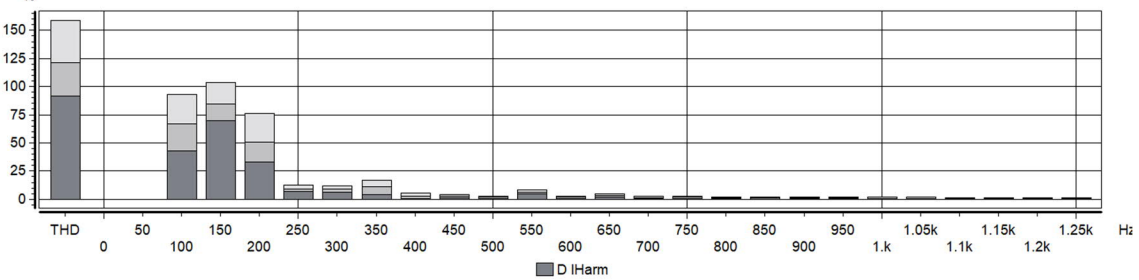
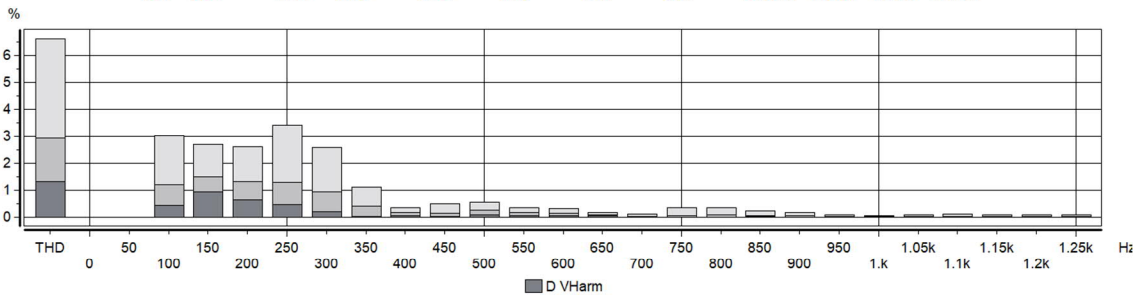


12.15.46.2
12.05.2021
Wednesday

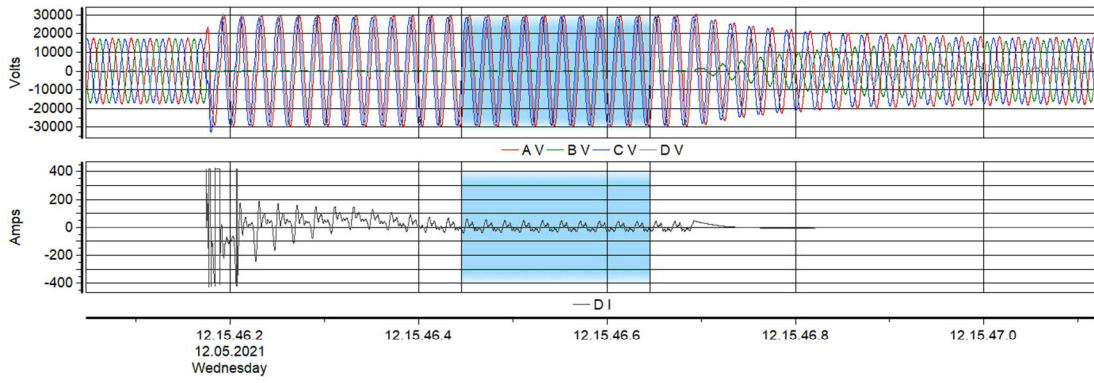
Event #1 at 12.05.2021 12.13.05.240
Waveforms



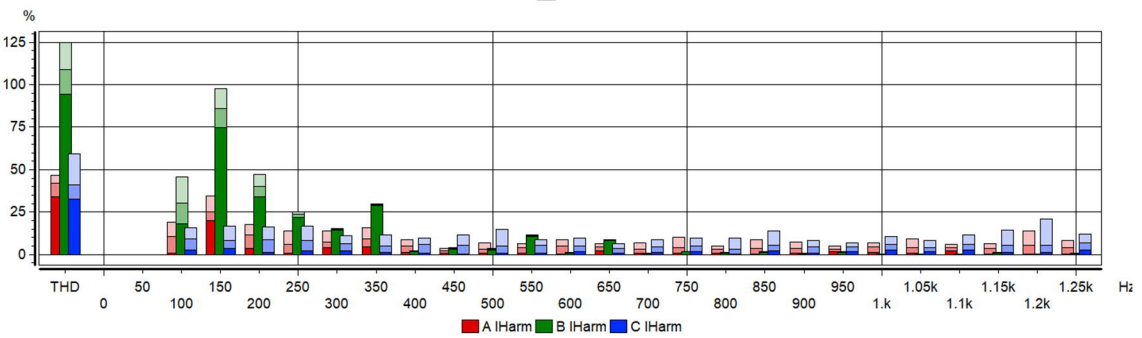
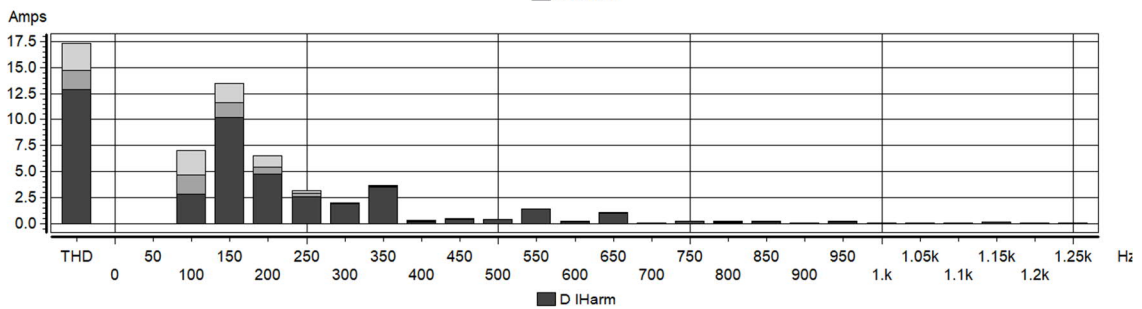
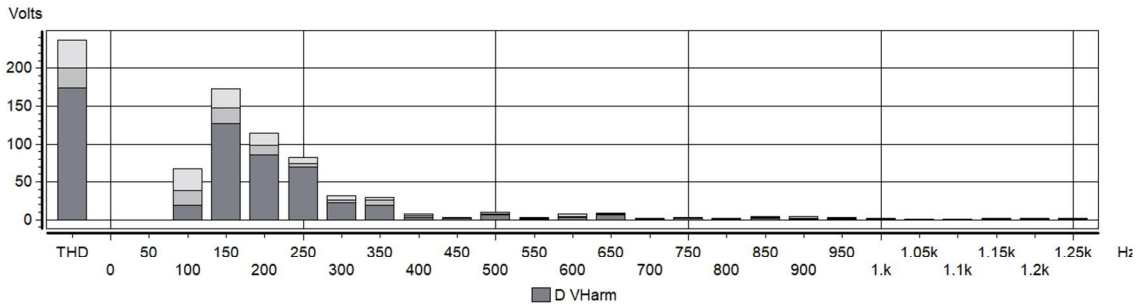
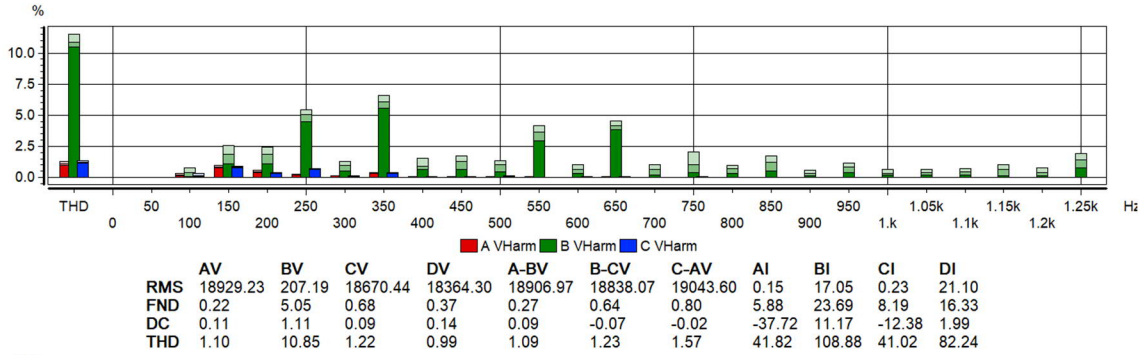
	AV	BV	CV	DV	A-BV	B-CV	C-AV	AI	BI	CI	DI
RMS	20755.90	228.95	20447.27	20103.74	20732.38	20631.28	20913.22	0.37	66.62	0.40	63.70
FND	0.92	8.84	1.42	1.28	0.97	1.36	1.20	34.51	18.77	13.86	9.28
DC	0.25	2.91	0.26	0.32	0.22	-0.22	-0.00	130.93	216.48	12.79	146.46
THD	3.11	16.71	2.89	2.93	3.10	2.88	3.55	204.59	143.37	92.08	121.46



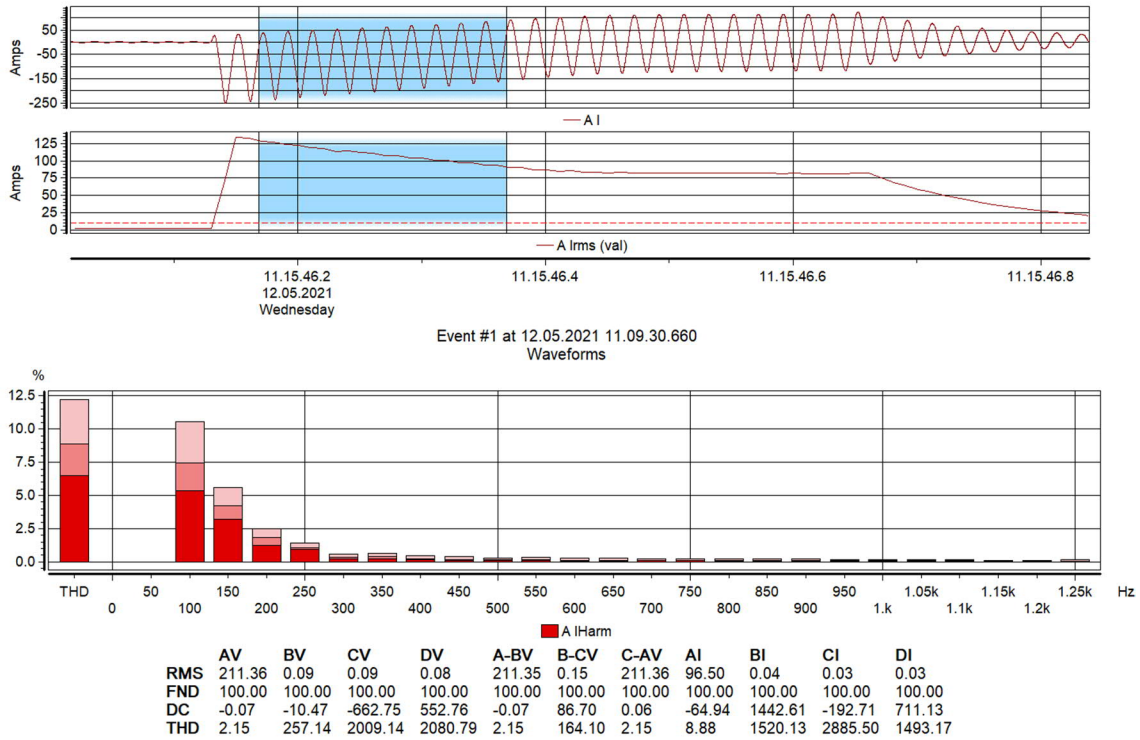
Kuva 37. Vika 3 vaiheessa L2, vikalähdön mittaus sähköasemalla, yliaallot vian alkupuolella.



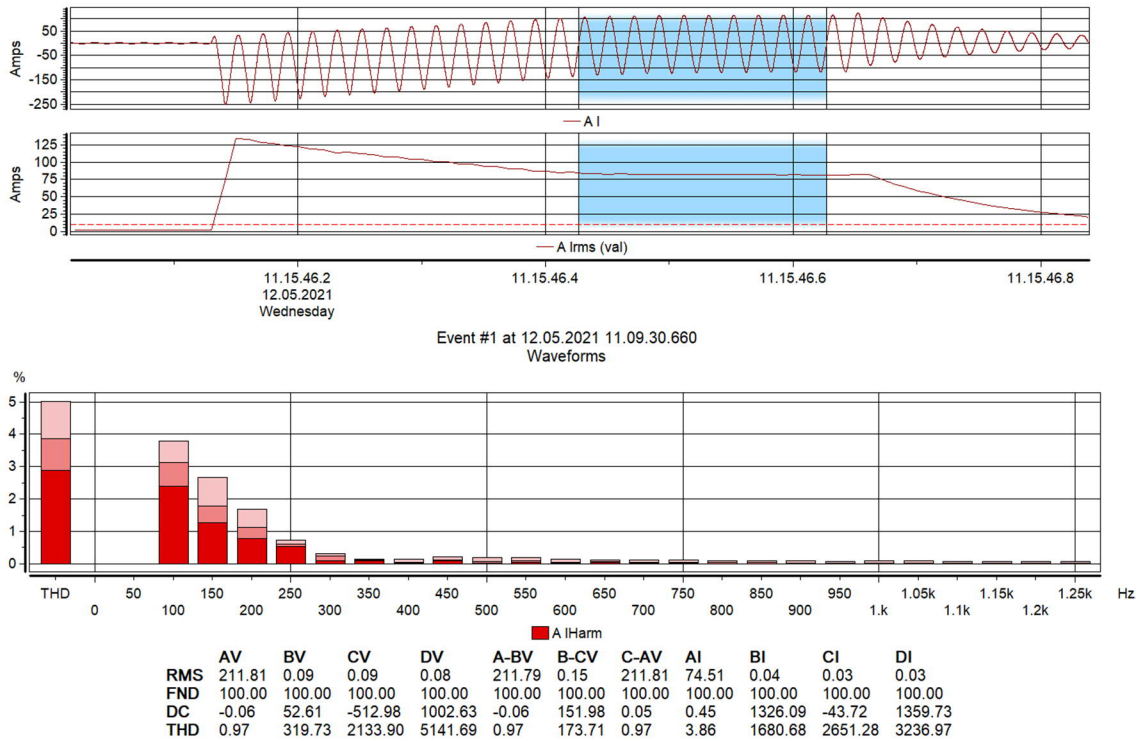
Event #1 at 12.05.2021 12.13.05.240
Waveforms



Kuva 38. Vika 3 vaiheessa L2, vikalähdön mittaus sähköasemalla, yliaallot vian loppupuolella.

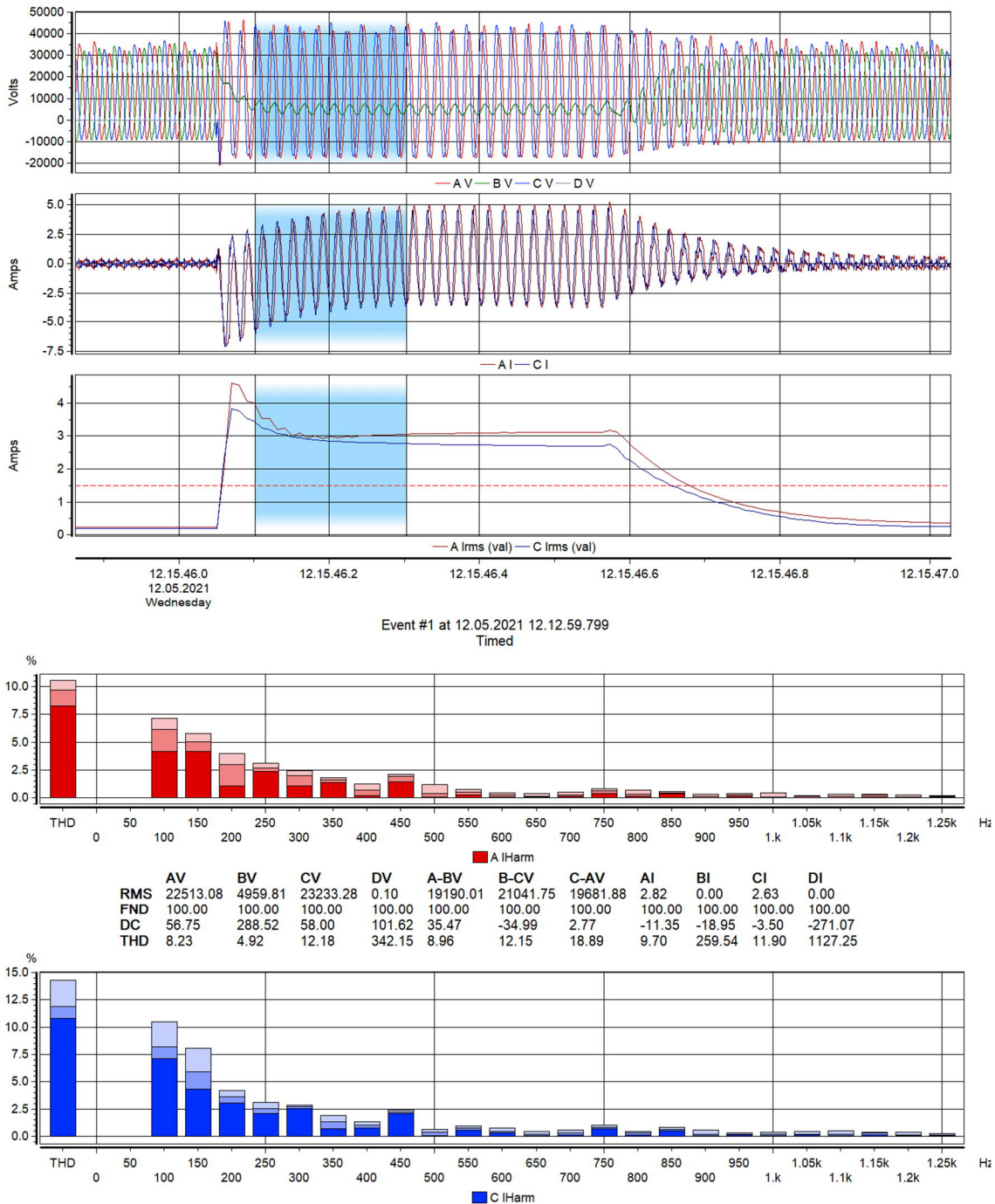


Kuva 39. Vika 3 vaiheessa L2, säädettävän kuristimen mittaus sähköasemalla, yliaallot vian alkupuolella.

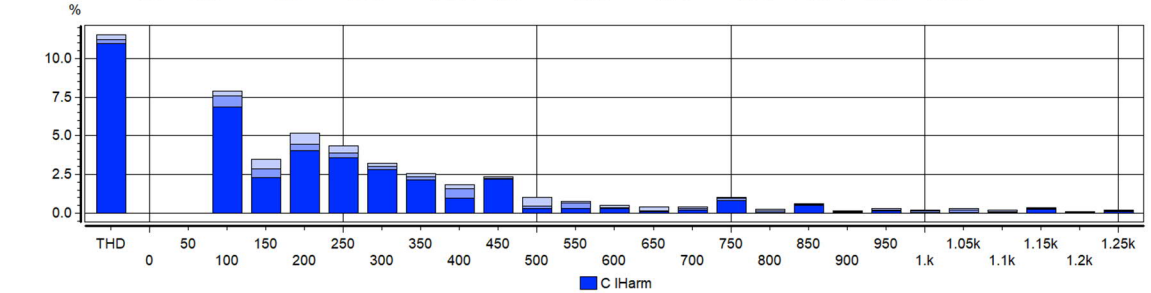
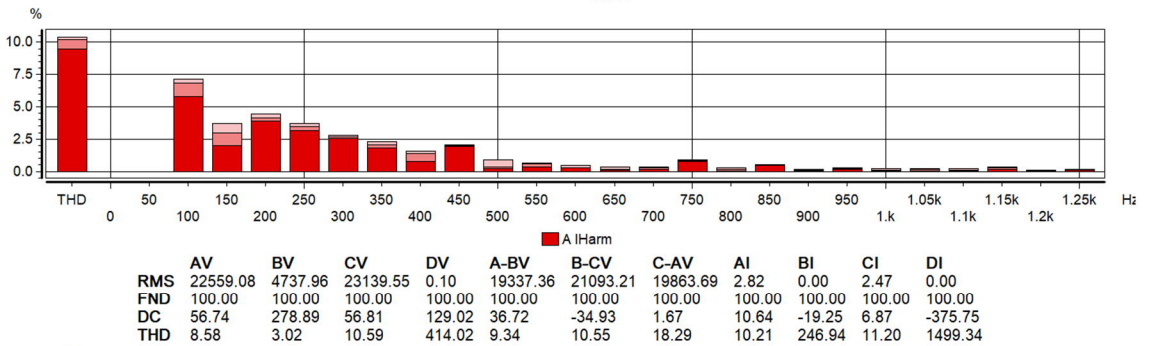
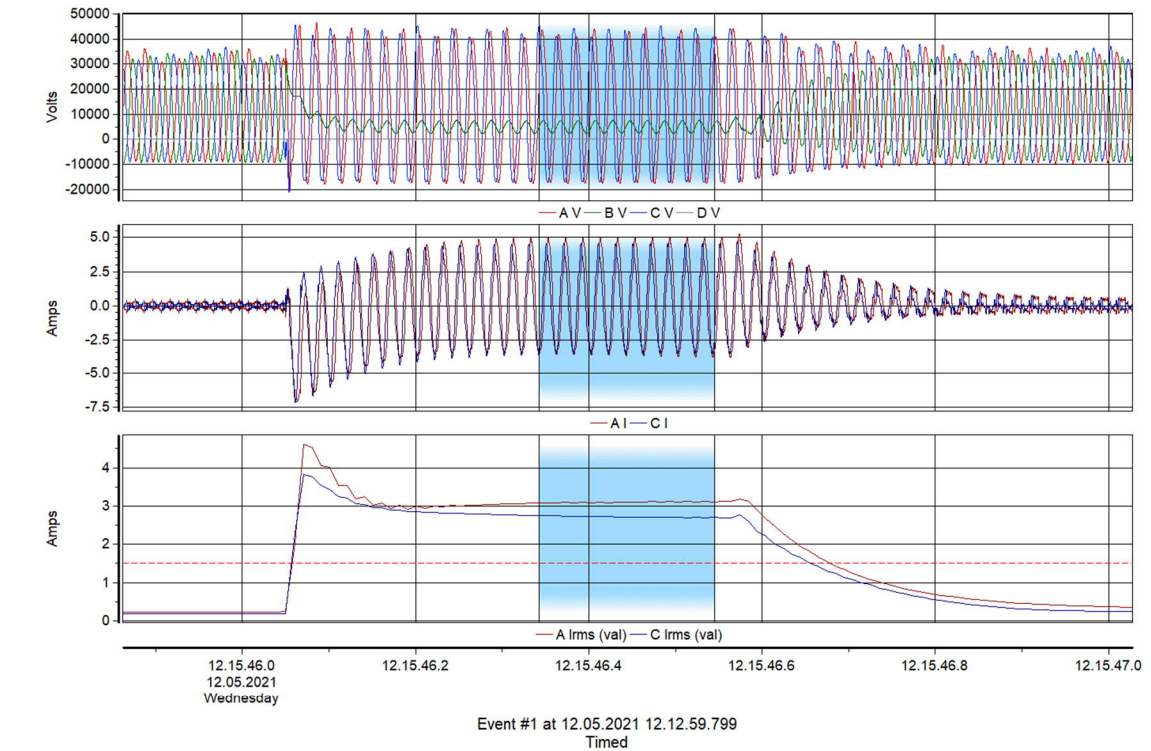


Kuva 40. Vika 3 vaiheessa L2, säädettävän kuristimen mittaus sähköasemalla, yliaallot vian loppupuolella.

LIITE J: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKKA 3, MUUNTAMO 1

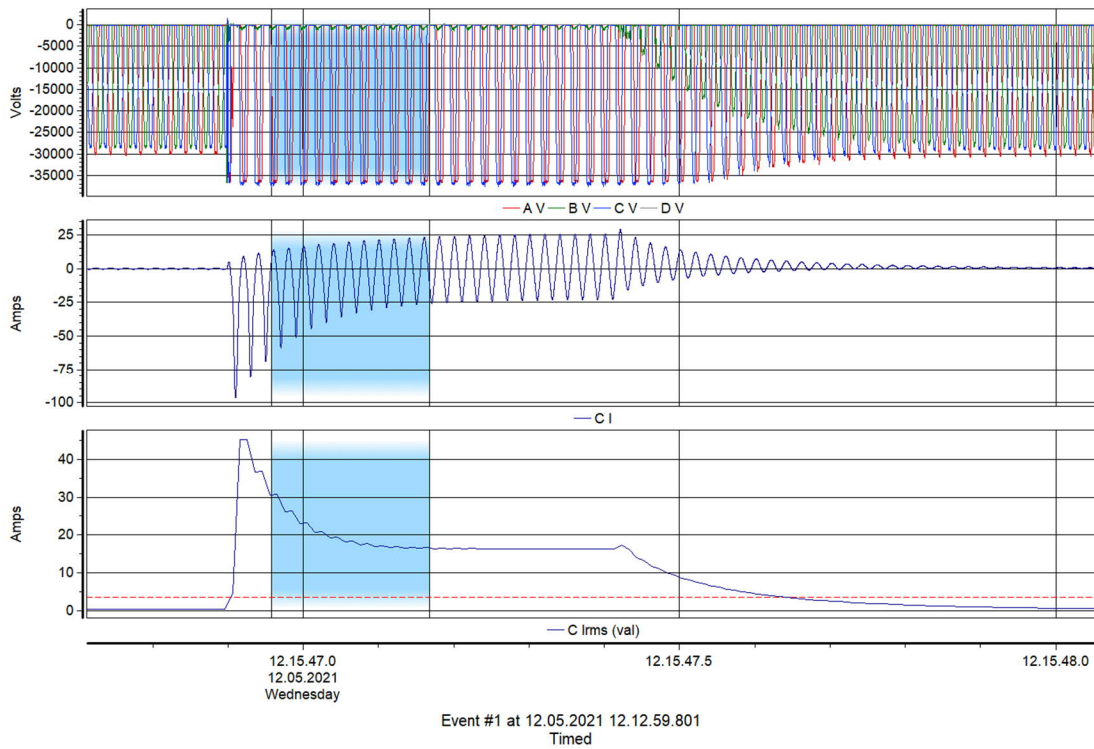


Kuva 41. Muuntamon kojeiston jänniteilmajalta mitatut vaihejännitteiden aaltomuodot, maasulkuvirran hajautetun kompensointikuristimen (5A) (+ muuntajan) PE-johtimen virran (AI) sekä muuntajan ja kojeiston välisten kaapeleiden kosketussuojien summavirran (CI) aaltomuoto, tehollisarvo sekä yliaaltojakauma ja vian alkupuolella.



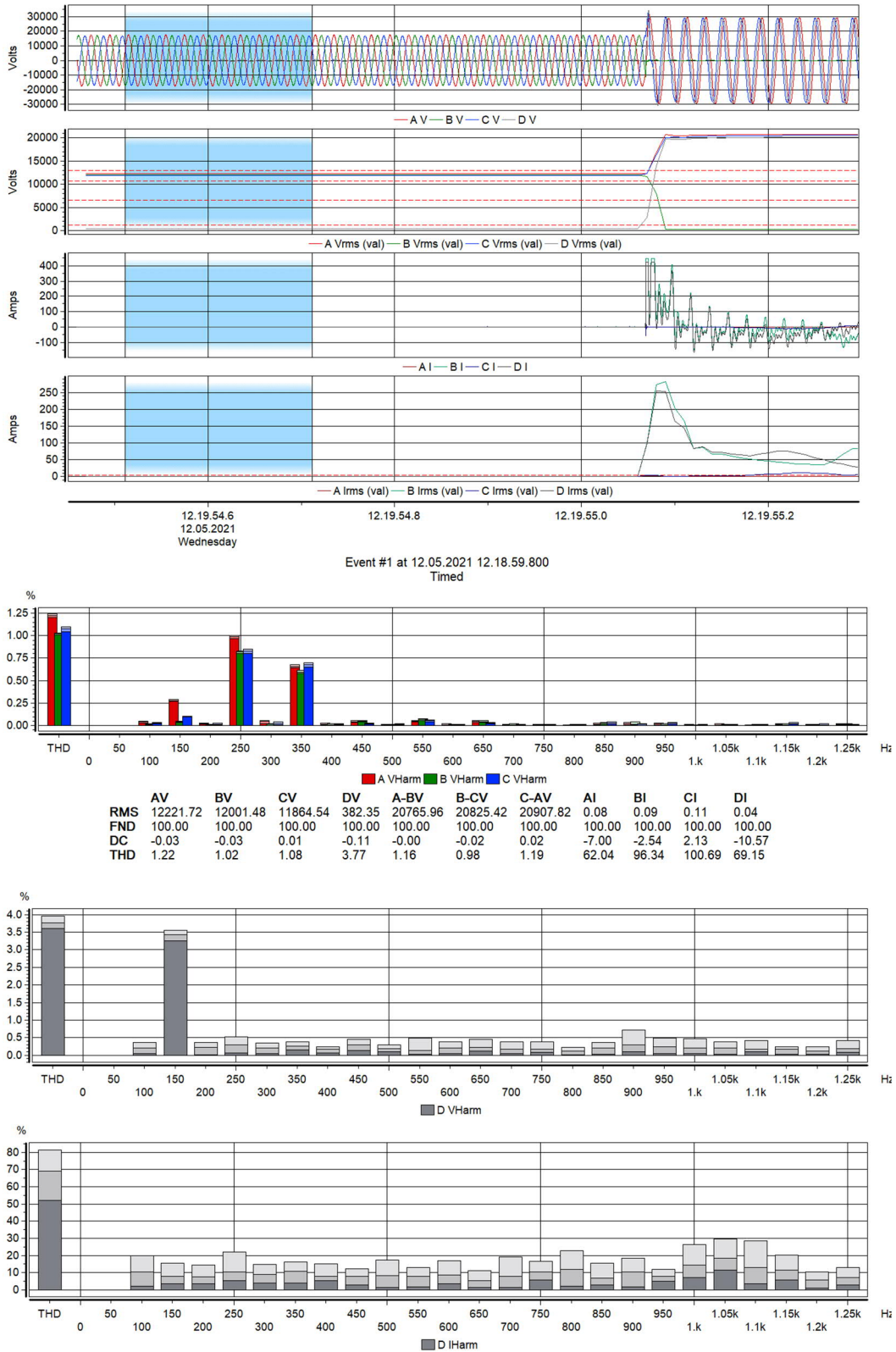
Kuva 42. Muuntamon kojeiston jänniteilmajisjalta mitatut vaihejännitteiden aaltomuodot, maasulkuvirran hajautetun kompensointikuristimen (5A) (+ muuntajan) PE-johtimen virran (AI) sekä muuntajan ja kojeiston välisten kaapeleiden kosketussuojien summavirran (CI) aaltomuoto, tehollisarvo sekä yliaaltojakauma ja vian alkupuolella.

LIITE K: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 3, MUUNTAMO 2

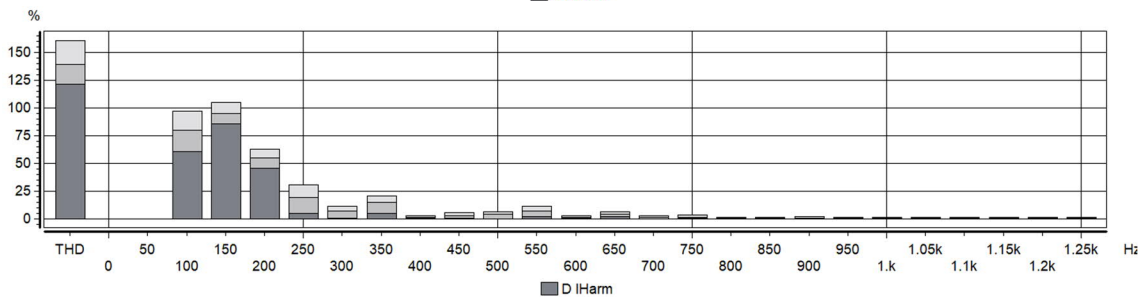
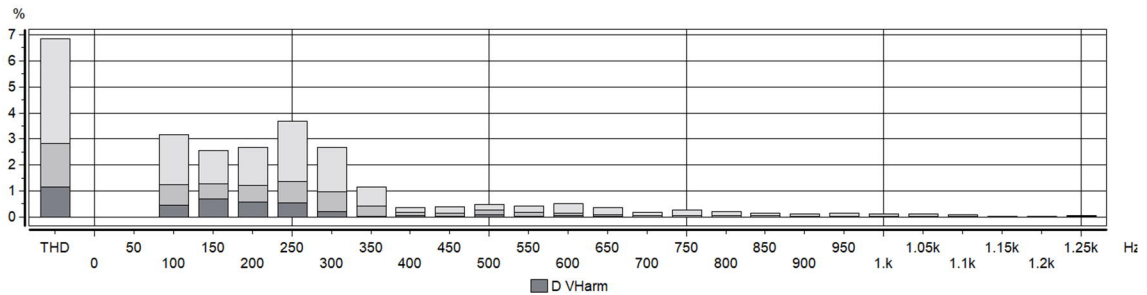
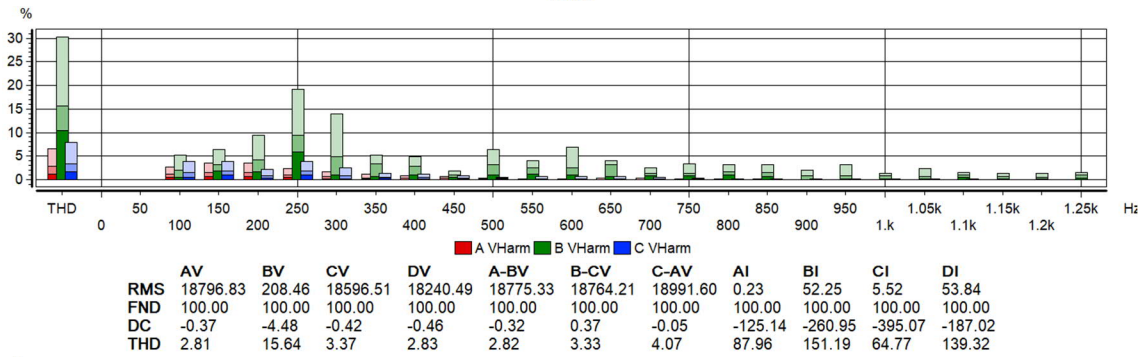
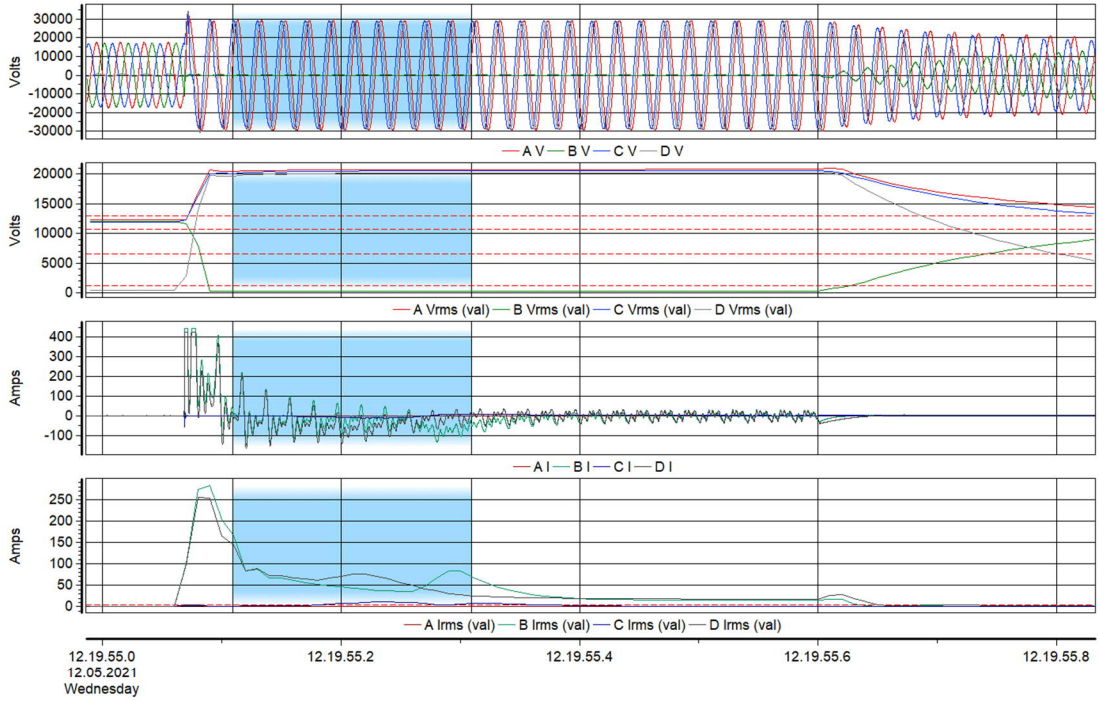


Kuva 43. Muuntamon kojeiston jänniteilmiasijalta mitatut vaihejännitteiden aaltomuodot, maasulkuvirran hajautetun kompensointikuristimen (15A) virran aaltomuoto ja tehollisarvo vian aikana (muuntajan PE-johtimesta mitattuna).

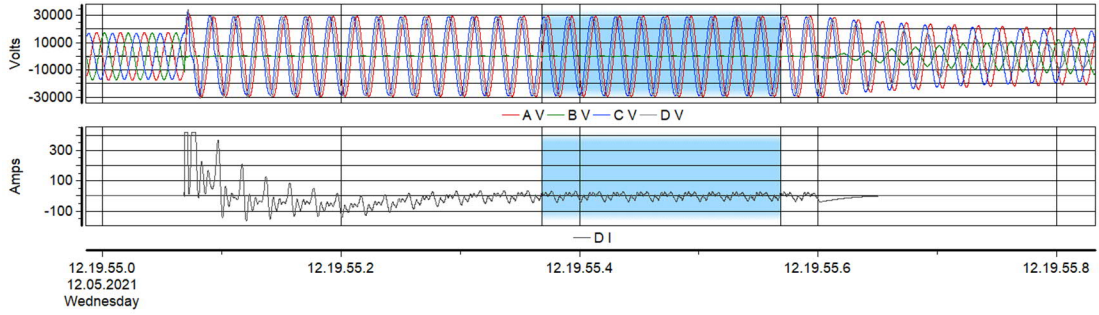
LIITE L: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 4, SÄHKÖASEMA



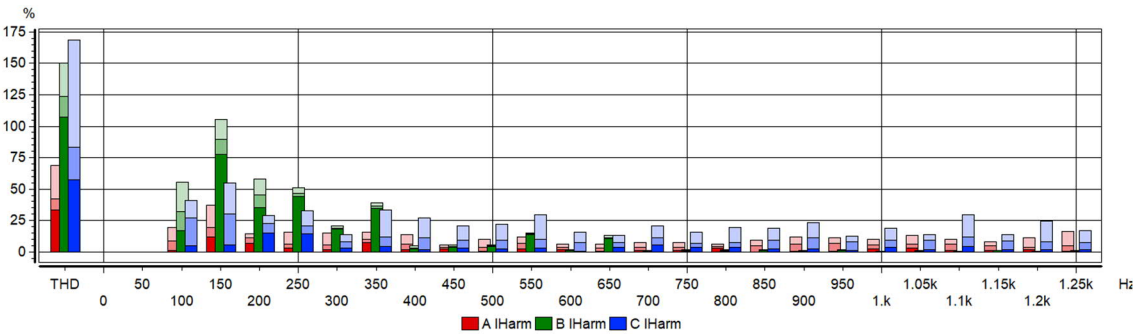
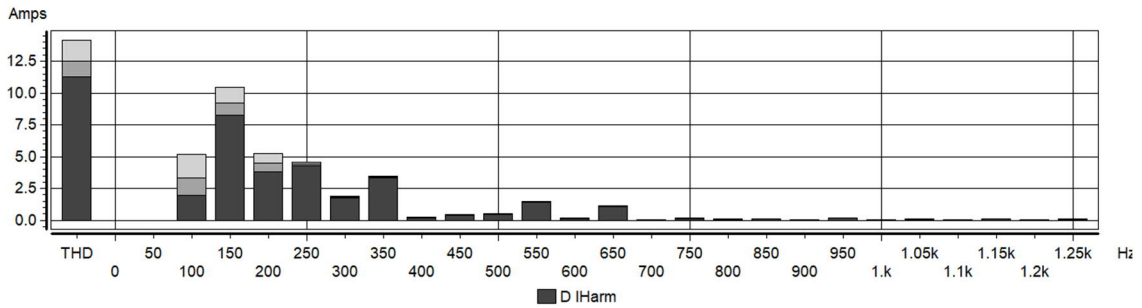
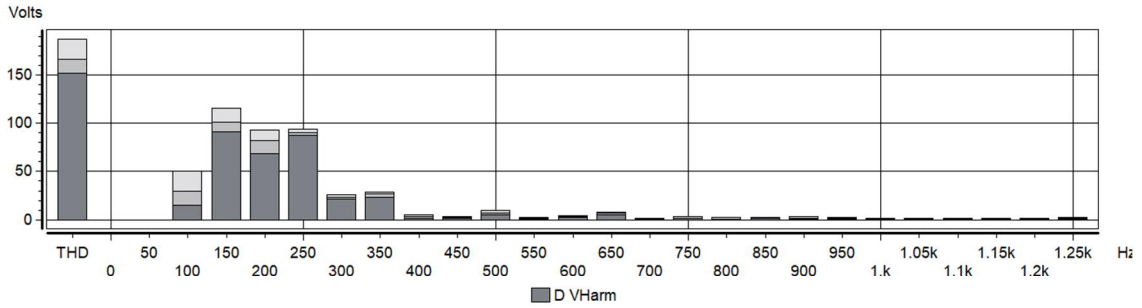
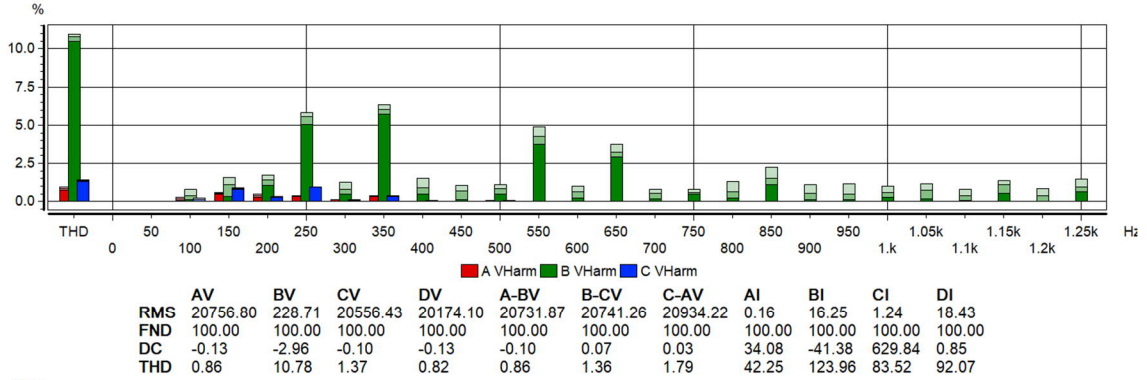
Kuva 44. Vika 4 vaiheessa L2, vikalähdön mittaus sähköasemalla, yliaallot ennen vika.



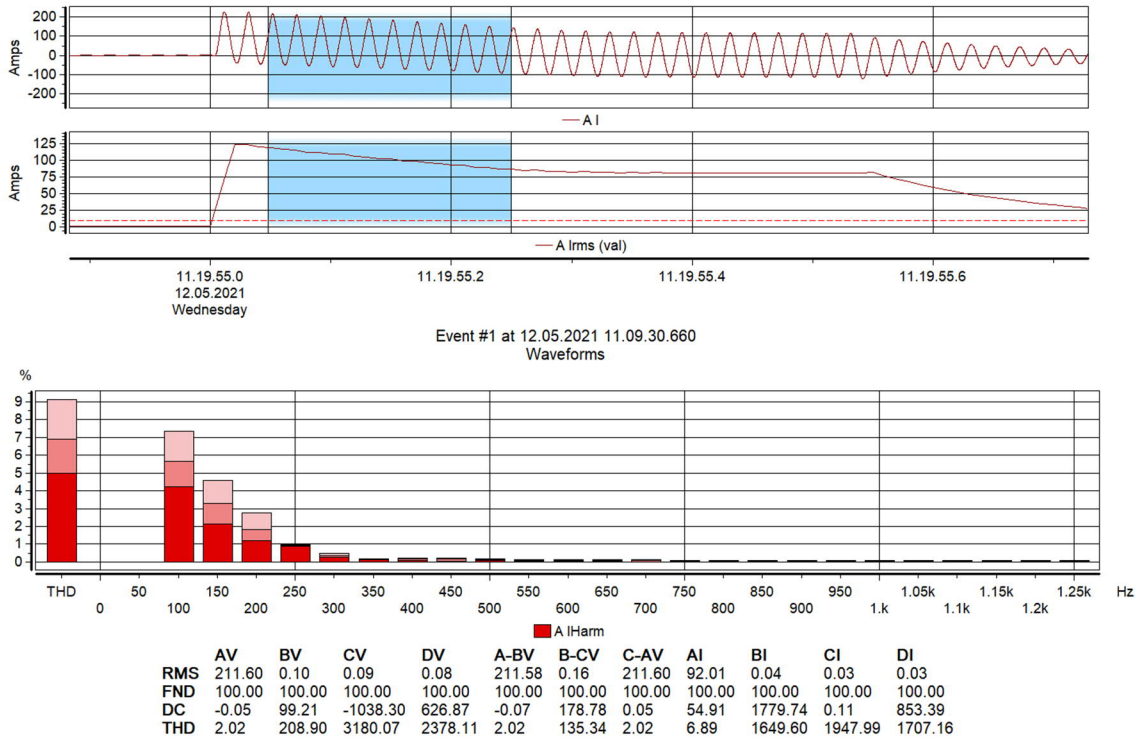
Kuva 45. Vika 4 vaiheessa L2, vikalähdön mittaussähköasemalla, yliaallot vian alkupuolella.



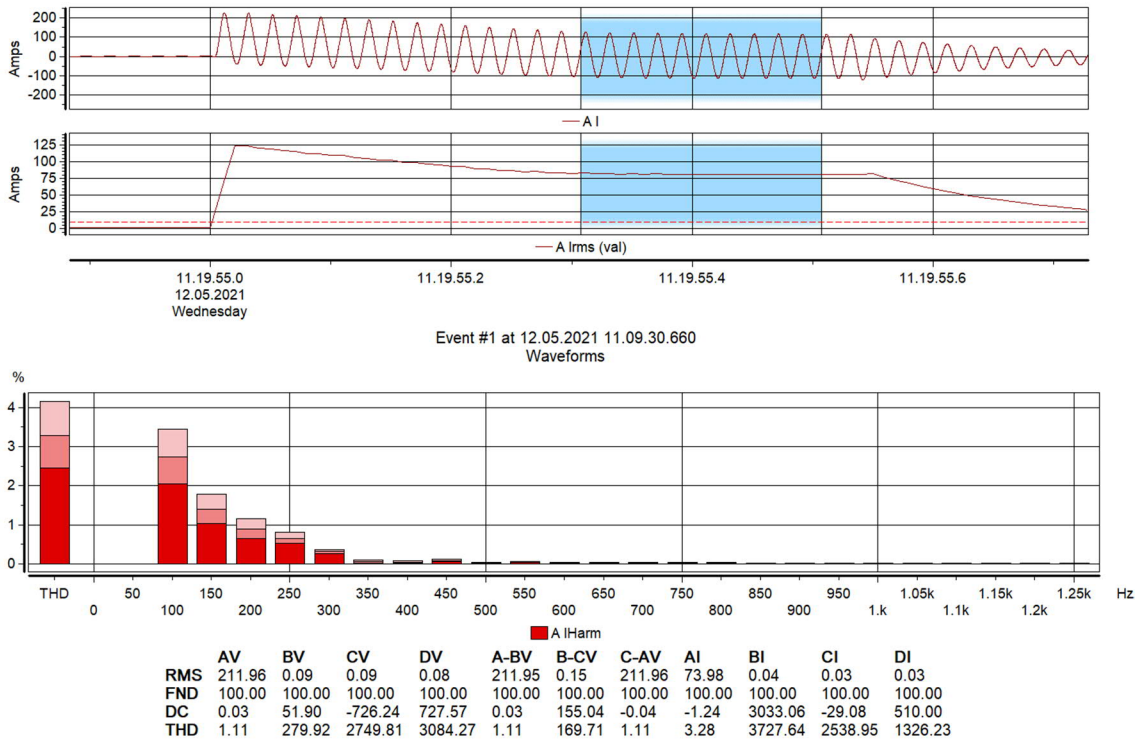
Event #1 at 12.05.2021 12.18.59.800
Timed



Kuva 46. Vika 4 vaiheessa L2, vikälähdön mittaus sähköasemalla, yliaallot vian loppupuolella.

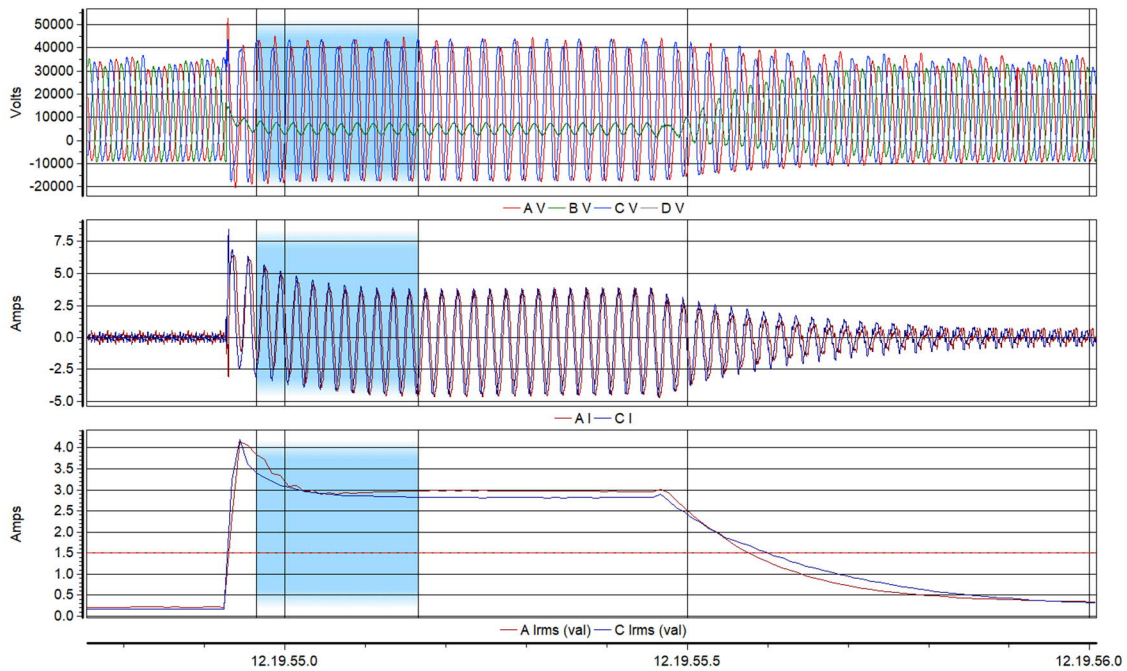


Kuva 47. Vika 4 vaiheessa L2, säädettävän kuristimen mittaus sähköasemalla, yliaallot vian alkupuolella.

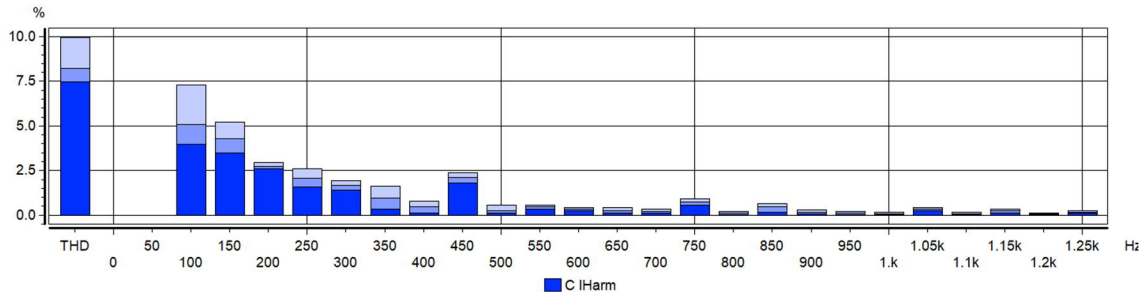
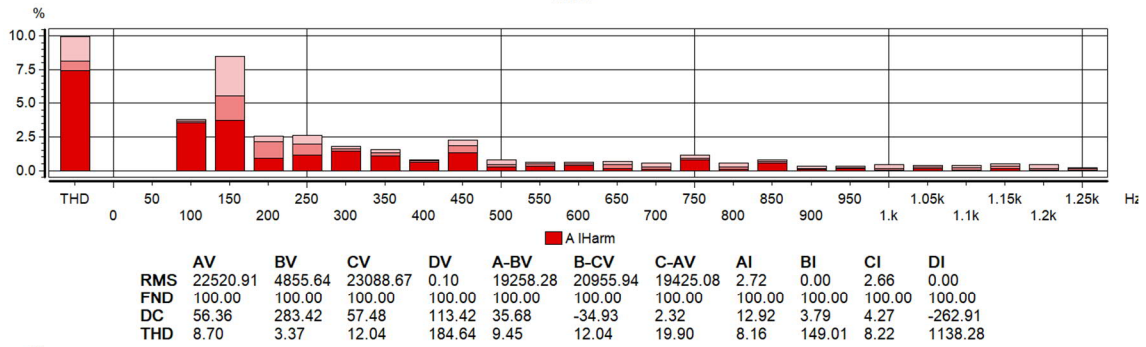


Kuva 48. Vika 4 vaiheessa L2, säädettävän kuristimen mittaus sähköasemalla, yliaallot vian loppupuolella.

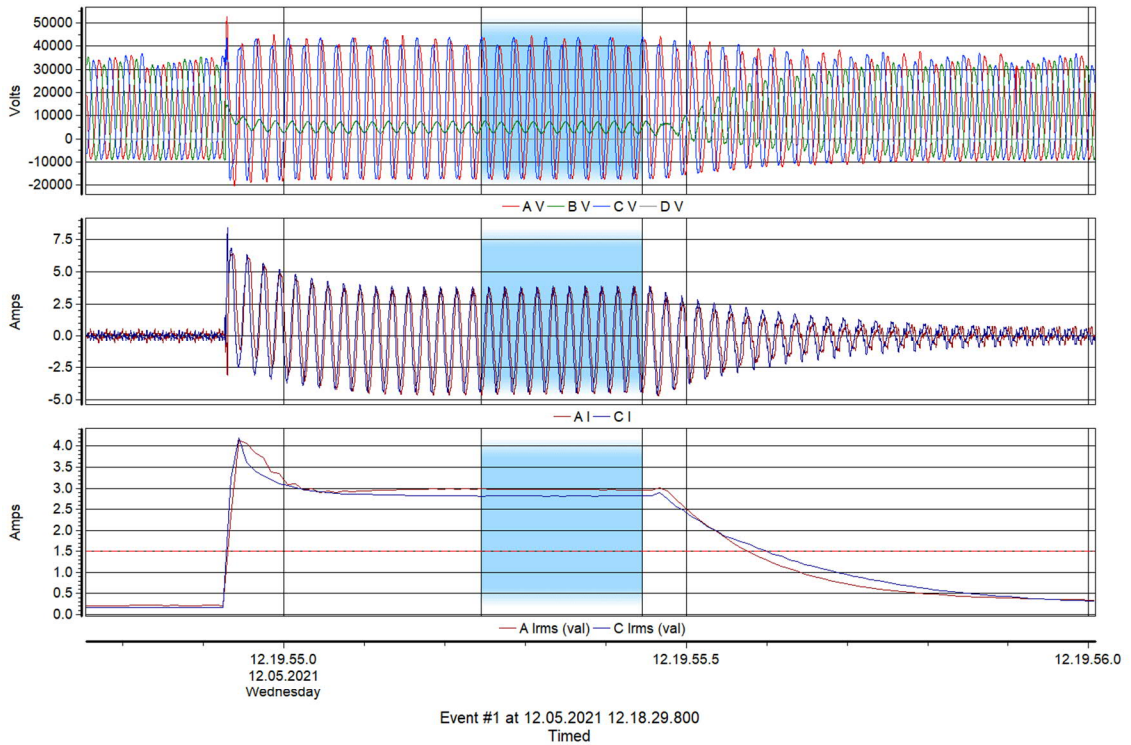
LIITE M: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 4, MUUNTAMO 1



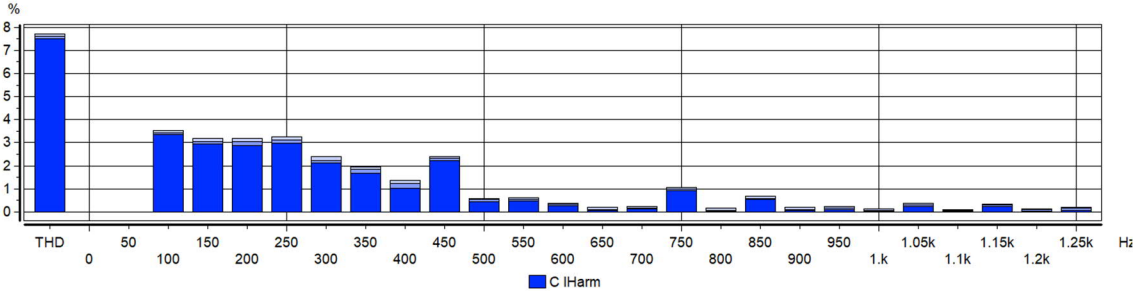
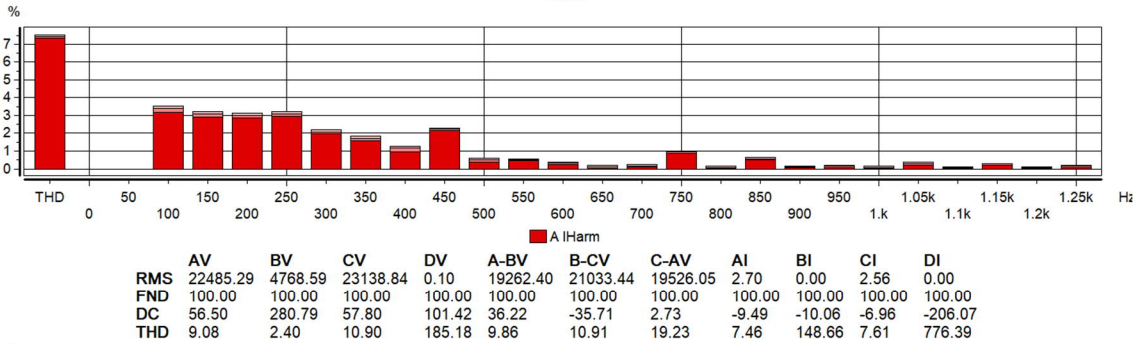
Event #1 at 12.05.2021 12.18.29.800
Timed



Kuva 49. Muuntamon kojeiston jänniteilmajisijalta mitatut vaihejännitteiden aaltomuodot, maasulkuvirran hajautetun kompensointikuristimen (5A) (+ muuntajan) PE-johtimen virran (AI) sekä muuntajan ja kojeiston välisten kaapeleiden kosketussuojien summavirran (CI) aaltomuoto, tehollisarvo sekä yliaaltojakauma ja vian alkupuolella.

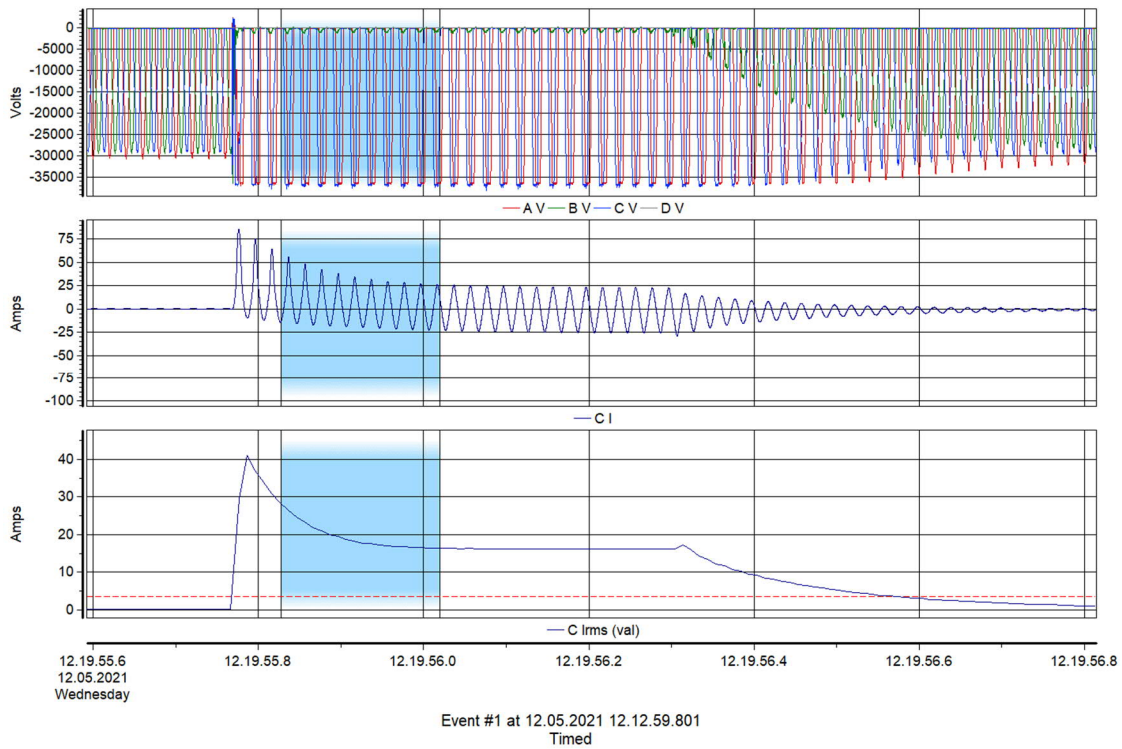


Event #1 at 12.05.2021 12.18.29.800
Timed



Kuva 50. Muuntamon kojeiston jänniteilmajisjalta mitatut vaihejännitteiden aaltomuodot, maasulkuvirran hajautetun kompensointikuristimen (5A) (+ muuntajan) PE-johtimen virran (AI) sekä muuntajan ja kojeiston välisten kaapeleiden kosketussuojien summavirran (CI) aaltomuoto, tehollisarvo sekä yliaaltojakauma ja vian alkupuolella.

LIITE N: MAASULKUKOKEET – VERKKO 2, VIKA 4, MUUNTAMO 2



Kuva 51. Muuntamon kojeiston jänniteilmiasijalta mitatut vaihejännitteiden aaltomuodot, maasulkuvirran hajautetun kompensointikuristimen (15A) virran aaltomuoto ja tehollisarvo vian aikana (muuntajan PE-johtimesta mitattuna).

