

Jälleenkytkentöjen päivitystarpeet

Pertti Pakonen, Ari Nikander, Pekka Verho

Loppuraportti

ALKUSANAT

Tämä raportti esittelee Tampereen yliopiston (TAU) Sähkötekniikan yksikössä tehdyn tutkimushankkeen ”Jälleenkytkentöjen päivitystarpeet” keskeisiä tuloksia. Tutkimus on tehty Sähkötutkimuspoolin rahoituksella.

Esitämme kiitokset hankkeen johtoryhmälle hyvästä yhteistyöstä ja tietojen toimittamisesta liittyen mm. jälleenkytkennöistä häiriintyneisiin laitteisiin. Lisäksi osoitamme erityiskiitokset Elenia Oy:lle kenttämittauksiin liittyvistä järjestelyistä, Vaasan Sähköverkko Oy:lle jälleenkytkentöihin liittyvien tilastotietojen toimittamisesta sekä kaikille hankkeessa toteutettuun kyselytutkimukseen vastanneille yhtiöille.

Hankkeen ohjausryhmään kuuluivat:

Sami Viiliäinen, Savon Voima Verkko Oy / R4, puheenjohtaja

Tuukka Heikkilä, Energiateollisuus ry, Sähkötutkimuspooli

Petteri Kangasluoma, Elenia Verkko Oyj

Tomi Öster, Järvi Suomen Energia Oy / R4

Timo Kiiski, Savon Voima Verkko Oy / R4

Matti Pesonen, PKS Sähkönsiirto Oy / R4

Asmo Karvinen, Kymenlaakson Sähköverkko Oy / R4

Ontrei Raipala, ABB Oy (2.2.2022 alkaen)

Tutkimuksen toteutus (Tampereen yliopisto):

Pekka Verho, hankkeen vastuullinen johtaja

Pertti Pakonen, hankkeen projektipäällikkö, tutkija

Ari Nikander, asiantuntija, tutkija

Tampereella 2022

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO JA TUTKIMUSONGELMAN KUVAUS	4
2. JÄLLEENKYTKENTÖIHIN JA JÄNNITEKUOPPIIN LIITTYVÄ STANDARDINTI. 5	
2.1 Jälleenkytkentöjen toteutus	5
2.2 Laitteiden testausvaatimukset	6
2.2.1 Yleiset testausvaatimukset	6
2.2.2 Taajuusmuuttajille asetetut vaatimukset	7
2.3 Jakeluverkkojen jännitteen laatu	9
3. JÄLLEENKYTKENTÖJEN JA JÄNNITEKUOPPIEN VAIKUTUKSET LAITTEISIIN	10
3.1 Jälleenkytkentöjen ja jännitekuoppien ominaisuudet	10
3.2 Vaikutukset ohjaamattomien tasasuuntaajien toimintaan	11
3.3 Vaikutukset taajuusmuuttajien toimintaan	12
3.4 Vaikutukset taajuusmuuttajien elinikään	17
4. KYSELYTUTKIMUS	19
4.1 Kyselytutkimuksen toteutus	19
4.2 Verkkorakenteet ja suojarelekanta	19
4.3 Jälleenkytkentäkäytännöt, niiden kehittäminen ja tilastointi	20
4.4 Jännitekuoppien rekisteröinti	22
4.5 Jälleenkytkennöistä saatu asiakaspalaute ja sen dokumentointi	23
4.6 Pikajälleenkytkentöjen selvittämät viat	25
5. VIKATILASTOJEN JA HÄIRIÖTALLENTEIDEN ANALYSOINTI	27
5.1 Jälleenkytkentöjen ja jännitekuoppien tilastollinen tarkastelu	27
5.2 Häiriötallenteiden analysointi	30
6. SEURANTAMITTAUKSET ASIAKASKOHOEISSA	32
6.1 Mittauskohteet	32
6.1.1 Teollisuuskohteet	32
6.1.2 Teollisuuskohteet	32
6.1.3 Maatalouskohteet	32
6.2 Jännitteettömän väliajan vaikutus kuormien irtoamiseen verkosta	33
6.2.1 Kaksivaiheinen oikosulku ja pikajälleenkytkentä	33
6.2.2 Maasulku ja pikajälleenkytkentä	38
6.2.3 Jännitekuoppa	40
6.3 Jännitteettömän väliajan vaikutus kuormien kytkentävirtoihin	43
6.4 Kuormien käyttäytyminen teollisuuskohteessa 1	47
6.5 Kuormien käyttäytyminen maatalouskohteessa	50
6.6 Asiakasmittareiden mahdollisuudet jälleenkytkentöjen seurannassa ..	52

6.7	Suojareleiden mahdollisuudet jälleenkytkentöjen seurannassa	54
7.	LABORATORIOKOKKEET	55
7.1	Koejärjestelyt	55
7.2	Taajuusmuuttajakäyttö	58
7.2.1	Toiminnalliset testit	59
7.2.2	Kytkevävirtasysäysten mittaukset	62
7.2.3	Yhteenveto taajuusmuuttajatesteistä	68
7.3	Ilmanvaihtokone maaviileäjäähdytyksellä	68
7.4	Jääkaappi-pakastin mekaanisilla termostaateilla	72
7.5	Kaappipakastin elektronisella termostaatilla	76
8.	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINNAT	78
9.	YHTEENVETO	80
	LÄHDELUETTELO	83
	LIITE A: KYSELYTUTKIMUSLOMAKE	85
	LIITE B: TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖN TOIMINNALLISET TESTIT	88
	LIITE C: TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖN KYTKENTÄVIRTASYSÄYKSET	91
	LIITE D: TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖN AALTOUOTOKUVIA	93
	LIITE E: HÄIRIÖTALLENTEITA TD=300 MS	100
	LIITE F: HÄIRIÖTALLENTEITA TD=1,0 S	107

1. JOHDANTO JA TUTKIMUSONGELMAN KUVAUS

Jälleenkytkennät [1] ja niihin liittyvät lyhyet keskeytykset ovat osa sähköverkon ohimeneviin oikosulku- ja maasulkuvikoihin liittyviä toimintoja, joilla pyritään vähentämään verkon pysyviä vikoja ja lyhentämään asiakkaan kokemaa keskeytysaikaa. Verkon ohimeneviin oikosulkuvikoihin liittyvät osana myös jännitekuopat [2], joissa vikälähdöllä kulkeva oikosulkuvirta aiheuttaa sähköaseman kiskojännitteen alenemisen ja sitä kautta jännitteen alenemisen myös sähköaseman muilla lähdöillä, kunnes vikälähdön relesuojaus laukaisee viallisen lähdön irti verkosta. Sekä lyhyet keskeytykset että jännitekuopat ovat jännitteen laatuun liittyviä häiriötapahtumia, jotka aiheuttavat sähköä käyttäjille erilaisia ongelmia ja haittoja. Lyhyiden keskeytysten ja jännitekuoppien haitat voivat olla samankaltaisia riippuen niiden kestosta ja jännitekuoppien syvyydestä ja asiakasnäkökulmasta niitä onkin usein vaikea erottaa toisistaan.

Jälleenkytkentöjen jännitteettömällä väliajalla on vaikutusta mm. valokaaren sammumistoden näköisyyteen ja sitä kautta vian poistumistoden näköisyyteen jälleenkytkennän seurauksena. Sillä on vaikutusta myös keskeytyksen asiakkaille aiheuttamiin haittoihin, jotka voivat olla erilaisia riippuen asiakkaasta ja asiakasryhmästä. Haitat voivat olla esimerkiksi (työ)turvallisuuden liittyviä (valaistuksen sammuminen) tai laitteiden tai prosessien toimintahäiriöihin ja keskeytymiseen tai laitteiden rikkoutumiseen liittyviä. Perinteisesti on ajateltu, että mitä lyhyempi keskeytys on, sitä pienempi on haitta. Tätä ajattelutapaa on kuitenkin haastettu ja jopa käytännössä osoitettu, että jännitteettömän ajan pidentämisellä voi olla haittoja vähentäväkin vaikutus.

Nykyiset jälleenkytkentöjen käytännöt perustuvat suurelta osin vuosikymmenien takaiseen teknologiaan ja ajattelutapaan, vaikka sähköjakelujärjestelmä, suojausteknologia ja kuluttajalaitteiden tekniikka ovat muuttuneet merkittävästi. Verkkojen osalta oleellisia muutoksia ovat mm. verkkojen laajamittainen kaapelointi, maasulkuvirran kompensointi ja suojakipinäväleistä luopuminen. Nykyaikainen suojausteknologia puolestaan mahdollistaa aiempaa monipuolisempia jälleenkytkentäsekvenssejä ja jopa sen, että jälleenkytkentöjen toteutus riippuu havaitun vian ominaisuuksista. Asiakkaiden ja asiakaslaitteiden näkökulmasta tehoelektronikka sisältävien laitteiden lisääntyminen verkossa ja asiakkaan kulutuskohteissa sekä hajautetun tuotannon ja energiavarastojen lisääntyminen on tuonut omat erityispiirteensä, jotka on huomioitava myös verkon suojauksessa. Toisaalta sähkövarastojen ja sähköautojen yleistymisen on omiaan vähentämään keskijänniteverkon merkitystä lyhyiden keskeytysten ja jännitekuoppien näkökulmasta, jos ne on toteutettu niin, että niitä voidaan käyttää kuormien sähkönsyöttöön keskeytysten aikana.

Pikajälleenkytkennän jännitteettömällä väliajalla ja releiden laukaisuajoilla on vaikutusta mm. asiakkaiden laitteiden toimintahäiriöihin ja keskeytysten ja jännitekuoppien asiakkaille aiheuttamiin haittoihin ja mahdollisesti myös laitevaurioihin.

Hankkeen tavoitteena on tutkia jälleenkytkentäkäytäntöjen kehittämistarpeita ja -mahdollisuuksia erityisesti jälleenkytkentöjen jännitteettömän väliajan pituuden ja relesuojausten laukaisu-aikojen ("polttoaikojen") näkökulmasta. Perimmäisenä tavoitteena on luoda suosituksia, joiden pohjalta verkkoyhtiöissä olisi mahdollista määritellä mm. pikajälleenkytkennän jännitteetön väliaika, jolla päästään kansantaloudellisesti pienimpiin haittoihin. Hankkeessa keskitytään tutkimaan asiaa erityisesti laitteiden toimintahäiriöiden ja vikaantumisriskien näkökulmasta, joilla on taloudellisessa mielessä suuri merkitys ja joihin valtaosa jälleenkytkentöihin liittyvistä rekламаatioistakin kokemusten mukaan liittyy. Jälleenkytkennät voivat aiheuttaa myös esimerkiksi työturvallisuus- ja mukavuushaittoja ja asiakkaasta tai asiakasryhmästä riippuen jälleenkytkentöjen erilaisten haittojen painoarvo voi vaihdella. Sama jännitteetön väliaika ei välttämättä ole optimaalinen kaikissa tapauksissa.

2. JÄLLEENKYTKENTÖIHIN JA JÄNNITEKUOPPIIN LIITTYVÄ STANDARDOINTI

Jälleenkytkentöihin tavalla tai toisella liittyviä standardeja on paljon. Tässä luvussa on tarkasteltu asiaa lähinnä siitä näkökulmasta, millaisia määrittelyjä standardeissa on, joilla voi olla vaikutusta jälleenkytkennän jännitteettömän väliajan minimiarvoon ja toisaalta maksimiarvoon.

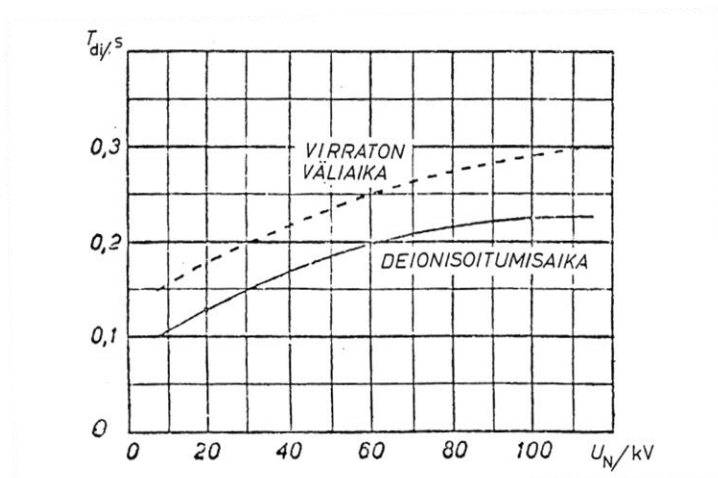
2.1 Jälleenkytkentöjen toteutus

Standardissa IEEE Std C37.104 -2012, IEEE Guide for Automatic Reclosing of Circuit Breakers for AC Distribution and Transmission Lines [1], on todettu, että vikavirtavalokaaren ioni-soima purkauskanava alkaa johtaa uudelleen pikajälleenkytkennän jälkeen, jos ionisaation haajaantumiselle ei anneta riittävästi aikaa. De-ionisaatioaika riippuu jännitteestä, johdinvälien suuruudesta, vikavirran suuruudesta ja sääolosuhteista. Standardissa annetaan jälleenkytkennän minimiviiveeksi t_d

$$t_d = 10,5 + U_{L-L}/34,5$$

missä t on aika verkkojaksoina ja U_{L-L} on nimellinen pääjännite. 21,0 kV pääjännitteellä jälleenkytkentäviiveeksi saataisiin siis noin 222 ms.

Vertailun vuoksi voidaan todeta, että lähdeviitteessä [2] on esitetty kuvan 2.1 mukaiset kuvaajat deionisoitumisajalle ja jälleenkytkennän virrattomalle väliajalle. Virraton väliaika on varsinkin oikosulkuvioissa hieman lyhyempi kuin katkaisijan aukioloaika ja jännitteettömäksi katsottava väliaika taas voi olla vikaa edeltävästä jännitekuopasta johtuen (kuopan syvyydestä riippuen) pidempi kuin katkaisijan aukioloaika. Maasulussa suurta eroa ei ole, jos ei oteta huomioon katkaisijan katkaisuominaisuuksia. Katkaisu tapahtuu hieman hitaammin kuin katkaisijan mekaaninen avautuminen ja kytkentä vastaavasti hieman nopeammin kuin katkaisijan mekaaninen sulkeutuminen, mutta tässä raportissa termillä jännitteetön väliaika tarkoitetaan aikaa, jona kaikki kolmivaihelaitteen vaihejännitteet tai yksivaihelaitteen vaihejännite laitteen liitännästerminaaleissa on pienempi kuin 5 % U_n , jossa U_n on pienjänniteverkon nimellinen vaihejännite ($U_n = 230$ V).



Kuva 2.1. Valokaaren deionisoitumisaika käyttöjännitteen funktiona sekä pienin virraton väliaika [2].

2.2 Laitteiden testausvaatimukset

Sähkölaitteiden EMC-testauksia koskevilla standardeilla on määritelty testejä ja testausvaatimuksia myös laitteiden jännitekuoppien ja lyhyiden keskeytysten siedolle. Tehtävien testien sisältö ja laitteille asetetut toimintavaatimukset niissä riippuvat siitä, millaisessa käyttöympäristössä laite on suunniteltu käytettäväksi. Käyttöympäristöt on määritelty standardissa IEC 61000-4-11 [3] seuraavasti:

Luokka 1 (ensimmäinen käyttöympäristö)

- Tämä luokka koskee suojattuja sähkönsyöttöjä ja sen yhteensopivuustasot ovat alemmat kuin yleisissä jakeluverkoissa. Siihen kuuluvat sähkönsyötön häiriöille erityisen alttiit laitteet, esimerkiksi jotkut laboratorioden mittalaitteet ja jotkut automaatio- ja suoja-laitteet.

Luokka 2 (toinen käyttöympäristö)

- Tämä luokka koskee kuluttajalaitteiden liittämispisteisiin (PCC, points of common coupling) ja yleisiin teollisuusympäristöjen liittämispisteisiin (IPC, in-plant points of common coupling) liitettäväksi tarkoitetut laitteet. Yhteensopivuustasot tässä luokassa vastaavat yleisten jakeluverkkojen yhteensopivuustasoja ja tämän luokan teollisuusverkon liittämispisteissä voidaan käyttää yleiseen jakeluverkkoon suunniteltuja laitteita.

Luokka 3 (kolmas käyttöympäristö)

- Tämä luokka koskee ainoastaan teollisuusverkkojen liittämispisteitä (IPC). Tämän luokan yhteensopivuustasot ovat joidenkin häiriöiden osalta korkeammat kuin luokassa 2. Tämän luokan vaatimuksia tulisi harkita sovellettavaksi, jos joku seuraavista vaatimuksista täyttyy:
 - suurin osa kuormista on syötetty konverttereilla
 - ympäristössä on hitsauslaitteita
 - käynnistetään usein suuria moottoreita
 - kuormat vaihtelevat nopeasti
- Hyvin häiritsevien kuormien kuten valokaariuunien tapauksessa yhteensopivuustasoista tulisi sopia erikseen

Näistä toinen käyttöympäristö on yleisten jakeluverkkojen ja siihen liitettyjen laitteiden kannalta oleellisin.

2.2.1 Yleiset testausvaatimukset

IEC 61000-4-11 [3] määrittelee jännitekuoppien, lyhyiden keskeytysten ja jännitevaihteluiden immuniteettitestausmenetelmät ja testitasot 50 ja 60 Hz pienjännitesähköverkkoihin kytkettäville sähkö- ja elektroniikkalaitteille, joiden nimellisäänmenovirta ei ylitä 16 A:ia. Tuotestandardeissa voidaan antaa erikseen tarkennuksia näihin testausvaatimuksiin ja näin on tehty esimerkiksi taajuusmuuttajia koskevassa standardissa SFS-EN 61800-3:2018 [4], jota on käsitelty tarkemmin luvussa 2.2.2.

Kuten taulukosta 2-1 ilmenee lyhyiden keskeytysten sietotestaus suositellaan tehtäväksi luokkien 2 ja 3 laitteille 5 sekunnin keskeytyksellä, jossa jäännösjännite on 0 %.

Taulukko 2-1. Suositeltavat testitasot ja kestoajat lyhyille keskeytyksille [3].

Class ^a	Test levels and durations for short interruptions (t_s) (50 Hz/60 Hz)
Class 1	Case-by-case according to the equipment requirements
Class 2	0 % during 250/300 ^c cycles
Class 3	0 % during 250/300 ^c cycles
Class X ^b	X
^a Classes as per IEC 61000-2-4; see Annex B	
^b To be defined by product committee. For equipment connected directly or indirectly to the public network, the levels shall not be less severe than class 2.	
^c "250/300 cycles" means "250 cycles for 50 Hz test" and "300 cycles for 60 Hz test".	

Jännitekuoppatestaukset suositellaan tehtäväksi luokan 2 laitteille kolmella erilaisella symmetrisellä kolmivaiheisella kuopalla:

- puolen jakson (10 ms) pituinen kuoppa 0 % jäännösjännitteellä
- yhden jakson (20 ms) pituinen kuoppa 0 % jäännösjännitteellä
- 0,5 sekunnin pituinen kuoppa 70 % jäännösjännitteellä

Taulukko 2-2. Suositeltavat testitasot ja kestoajat jännitekuopille [3].

Class ^a	Test levels and durations for voltage dips (t_s) (50 Hz/60 Hz)				
Class 1	Case-by-case according to the equipment requirements				
Class 2	0 % during ½ cycle	0 % during 1 cycle	70 % during 25/30 ^c cycle		
	0 % during ½ cycle	0 % during 1 cycle	40 % during 10/12 ^c cycles	70 % during 25/30 ^c cycles	80 % during 250/300 ^c cycles
Class X ^b	X	X	X	X	X
^a Classes as per IEC 61000-2-4; see Annex B					
^b To be defined by product committee. For equipment connected directly or indirectly to the public network, the levels shall not be less severe than class 2.					
^c "250/300 cycles" means "250 cycles for 50 Hz test" and "300 cycles for 60 Hz test".					

2.2.2 Taajuusmuuttajille asetetut vaatimukset

Taajuusmuuttajille on asetettu tarkemmat testausvaatimukset ja toiminnalliset vaatimukset (hyväksyntäkriteerit) standardissa SFS-EN 61800-3:2018 [4].

Kuten taulukosta 2-3 ilmenee, toiminnalliset vaatimukset koskevat lähinnä sitä, että käyttäjän laitteeseen ohjelmoimien asetusten tulee säilyä muistissa kuoppien ja keskeytysten jälkeenkin eikä laite saa käynnistyä itseksensä jännitehäiriön jälkeen, jos se on ollut ennen jännitehäiriötä STOP-tilassa. Laitteen suojaukset saavat toimia, mutta niiden on oltava käyttäjän palautettavissa (manuaalinen resetointi).

Kuten taulukossa 2-4 esitetyistä testausvaatimuksista ilmenee, ne ovat varsinkin luokan 2 osalta melko suppeat. Laitteen toimintaa testataan ainoastaan

- 5 sekunnin keskeytyksellä, jossa jäännösjännite on 0 % ja
- yhden verkkojakson (20 ms) jännitekuopalla, jossa jäännösjännite on 0 % (eli hyvin lyhyt keskeytys) ja
- 0,5 sekunnin symmetrisellä kuopalla, jossa jäännösjännite on 70 %.

Taulukko 2-3. Taajuusmuuttajien hyväksyntäkriteerit sähkömagneettisten häiriöiden immunitetitesteissä [4].

Item	Acceptance (performance) criterion ^a		
	A	B	C
General system performance	No noticeable changes of the operating characteristic Operating as intended, within specified tolerance	Noticeable changes (visible or audible) of the operating characteristic Self-recoverable	Shutdown, changes in operating characteristics Triggering of protective devices ^b Not self-recoverable
Special system performance. Torque generating behaviour	Torque deviation within specified tolerances	Temporary torque deviation outside specified tolerances Self-recoverable	Loss of torque Not self-recoverable
Sub-component performance Operation of power electronics and driving circuits	No malfunction of a power semiconductor	Temporary malfunction which cannot cause unintended shut-down of the PDS	Shutdown, triggering of protective devices ^b No loss of stored program No loss of user program No loss of settings Not self-recoverable
Sub-component performance Information processing and sensing functions	Undisturbed communication and data exchange to external devices	Temporarily disturbed communication, but no error reports of the internal or external devices which could cause shut-down	Errors in communication, loss of data and information No loss of stored program, no loss of user program No loss of settings Not self-recoverable
Sub-component performance Operation of displays and control panels	No changes of visible display information, only slight intensity fluctuation of LEDs, or slight movement of characters	Visible temporary changes of information, undesired LED illumination	Shut down, permanent loss of information, or unpermitted operating mode, obviously wrong display information No loss of stored program, no loss of user program No loss of settings
^a Acceptance criteria A, B, C - False starts are not acceptable. A false start is an unintended change from the logical state "STOPPED" which can make the motor run.			
^b Acceptance criterion C - The function can be restored by operator intervention (manual reset). Opening of fuses is allowed for line-commutated converters operating in inverting mode.			

Taulukko 2-4. Jännitevaihteluiden, jännitekuoppien ja lyhyiden keskeytysten minimisietovaatimukset pienjännite-
taajuusmuuttajien sähkönsyöttöliitännöille [4].

Phenomenon	First environment			Second environment			Performance (acceptance) criterion
	Reference document	Level		Reference document	Level		
Voltage deviations (> 60 s)	IEC 61000-2-2	$\pm 10\%$ ^a		IEC 61000-2-4 Class 2	$\pm 10\%$ ^a		A ^b
Voltage dips ^e	IEC 61000-4-11 Class 2 or IEC 61000-4-34 Class 2 ^f	Volts remaining 0 % 70 %	Cycles . 1 25/30 ^c	IEC 61000-4-11 Class 3 or IEC 61000-4-34 Class 3 ^f	Volts remaining 0 % 40 % 70 % 80 %	Cycles . 1 10/12 ^c 25/30 ^c 250/300 ^c	C ^d
Short interruptions	IEC 61000-4-11 Class 2 or IEC 61000-4-34 Class 2 ^f	Volts remaining 0 %	Cycles . 250/300 ^c	IEC 61000-4-11 Class 3 or IEC 61000-4-34 Class 3 ^f	Volts remaining 0 %	Cycles 250/300 ^c	C ^d

^a "Voltage deviation" is a supply voltage variation from the nominal supply voltage. Testing of voltage deviations for three phase PDS requires increasing or reducing the voltage of all three phases simultaneously.

^b When the voltage is below nominal, the maximum output power ratings - speed and/or torque - may be reduced, because they are voltage dependent.

^c "x/y cycles" means "x cycles for 50 Hz test" and "y cycles for 60 Hz test".

^d Opening of fuses is allowed for line-commutated converters operating in inverting mode.

^e Power ports with current rating ≥ 75 A: the method of the voltage drop test according to 7.5 of IEC 61400-21:2008 may be used.

^f IEC 61000-4-11 applies to equipment rated less than or equal to 16 A and IEC 61000-4-34 to equipment rated above 16 A.

2.3 Jakeluverkkojen jännitteen laatu

Sähkönjakeluverkkojen jännitteen laatu yleisissä jakeluverkoissa verkon käyttäjän liittymispisteessä on määritelty Suomessa standardissa SFS-EN 50160 [5]. Standardissa jännitekuoppien luokittelulle pienjänniteverkoissa annettu taulukko on esitetty taulukossa 2-5.

Taulukko 2-5. Jännitekuoppien luokittelu jäännösjännitteen ja kestoajan perusteella standardin SFS-EN 50160 mukaan [5].

Jäännösjännite u %	Kesto aika t ms				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1000$	$1000 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60\,000$
$90 > u \geq 80$	ALKIO A1	ALKIO A2	ALKIO A3	ALKIO A4	ALKIO A5
$80 > u \geq 70$	ALKIO B1	ALKIO B2	ALKIO B3	ALKIO B4	ALKIO B5
$70 > u \geq 40$	ALKIO C1	ALKIO C2	ALKIO C3	ALKIO C4	ALKIO C5
$40 > u \geq 5$	ALKIO D1	ALKIO D2	ALKIO D3	ALKIO D4	ALKIO D5
$5 > u$	ALKIO X1	ALKIO X2	ALKIO X3	ALKIO X4	ALKIO X5

Standardissa todetaan, että vaikka taulukon ruuduissa mitatut arvot eivät ole täysin yhteneviä testitasotaulukon arvojen kanssa, voidaan odottaa, että laitetta koskevan tuotestandardin mukaisesti testatun laitteen tulisi vastata kestoisuudeltaan seuraavissa ruuduissa määriteltyjä jännitekuoppia:

- A1, B1, A2, B2 luokassa 2
- A1, B1, C1, A2, B2, A3, A4 luokassa 3.

3. JÄLLEENKYTKENTÖJEN JA JÄNNITEKUOPPIEN VAIKUTUKSET LAITTEISIIN

Pikajälleenkytkentöihin liittyvillä jännitekuopilla ja lyhyillä keskeytyksillä voi olla vaikutusta erilaisten sähkölaitteiden toimintaan ja pitkällä aikavälillä myös niiden ikääntymiseen ja elinikään. Tässä luvussa on tarkasteltu em. tekijöiden vaikutusta erityisesti taajuusmuuttajien toimintaan ja niiden elinikään aiempien tutkimusten valossa. Taajuusmuuttajia käytetään nykyisin yleisesti teollisuudessa erilaisten tuotantolaitteiden moottorikäytöissä, mutta myös esimerkiksi asuin- ja liikerakennusten ja julkisten tilojen ilmanvaihtoon ja lämmitykseen liittyvissä laitteissa.

3.1 Jälleenkytkentöjen ja jännitekuoppien ominaisuudet

Jälleenkytkennät voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

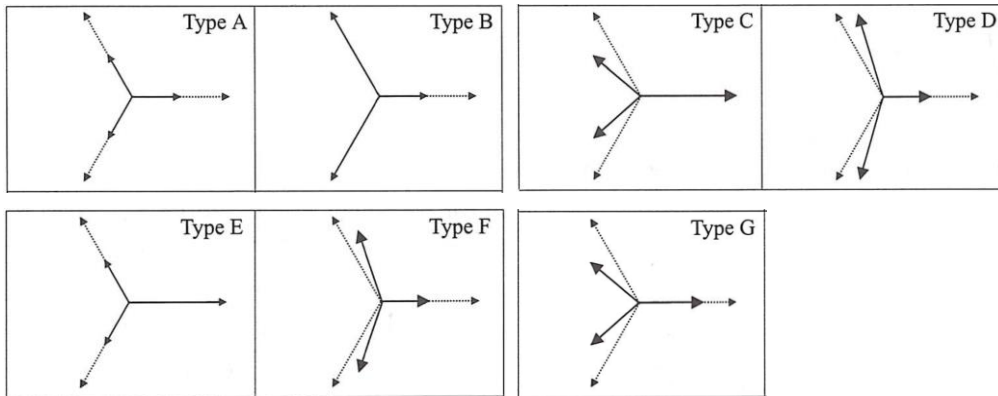
- pikajälleenkytkennät, joissa jännitteetön väliaika on ollut perinteisesti noin 0,3...0,5 sekuntia
- aikajälleenkytkennät, joissa jännitteetön väliaika on ollut perinteisesti noin 30 sekuntia...2 minuuttia
- kokeilukytkennät, jotka voidaan tehdä
 - manuaalisesti (jännitteetön väliaika voi vaihdella melko laajoissakin rajoissa)
 - automaattisesti FLIR(automated fault location, isolation and supply restoration)-toiminnallisuuden ohjaamana, jolloin jännitteetön väliaika voi olla esimerkiksi 30-40 sekuntia. Jännitteetön väliajan pituus vaihtelee ja riippuu siitä, kuinka nopeasti automaatiojärjestelmä tekee kytkentöjä.

Perinteiset jälleenkytkentäsekvenssit on usein toteutettu niin, että vian jälkeen tehdään yksi pikajälleenkytkentä ja jos vika ei poistu, tehdään aikajälleenkytkentä ja jos vika ei edelleenkään poistu, johtolähtö jätetään jännitteettömäksi odottamaan vian paikallistamista ja erottamista esimerkiksi manuaalisilla kokeilukytkennöillä. Oikosulkuvika, joka ei heti poistu jälleenkytkennöillä, aiheuttaa tällaisessa tapauksessa siis lyhyen ajan sisällä vähintään 2-3 jännitekuoppaa sähköaseman kaikille lähdoille. Eri verkkoyhtiöissä käytännöt vaihtelevat ja poikkeuksia voidaan tehdä myös johtolähtökohtaisesti, esim. pika- ja aikajälleenkytkennöistä voi olla käytössä vain toinen tai ne on voitu korvata kokonaan tai osittain manuaalisilla tai automaattisilla (FLIR) kokeilukytkennöillä.

Jännitekuopat ovat edellä mainitusta syystä jakeluverkoissa lyhyitä keskeytyksiäkin yleisempi ilmiö. Niitä kuvataan yleisesti kahdella parametrilla [6]:

- kesto-aika, joka lasketaan alkavaksi siitä, kun jännitteen tehollisarvo U_{rms} yhdessä tai useammassa vaiheessa laskee alle jännitekuopan raja-arvon (yleensä 90 % U_n) ja päättyy siihen, kun jännitteen tehollisarvo U_{rms} on suurempi tai yhtäsuuri kuin jännitekuopan raja-arvo
- jäännösjännite, joka on pienin kolmessa vaiheessa mitattu jännitteen tehollisarvo kuopan aikana

Kolmivaiheisten laitteiden kannalta tämä kuvaus on kuitenkin melko puutteellinen, koska jännitekuoppien vaikutukset kolmivaihelaitteisiin riippuvat myös siitä, mitkä ovat yksittäiset vaihejännitteiden suuruudet (ja kulmat) kuopan aikana ja millaisiksi pääjännitteet muodostuvat. Jännitekuopat voidaan luokitella kuopan aikaisten jänniteosoittimien perusteella seitsemään eri tyyppiin (A-G) kuvan 3.1 mukaisesti.

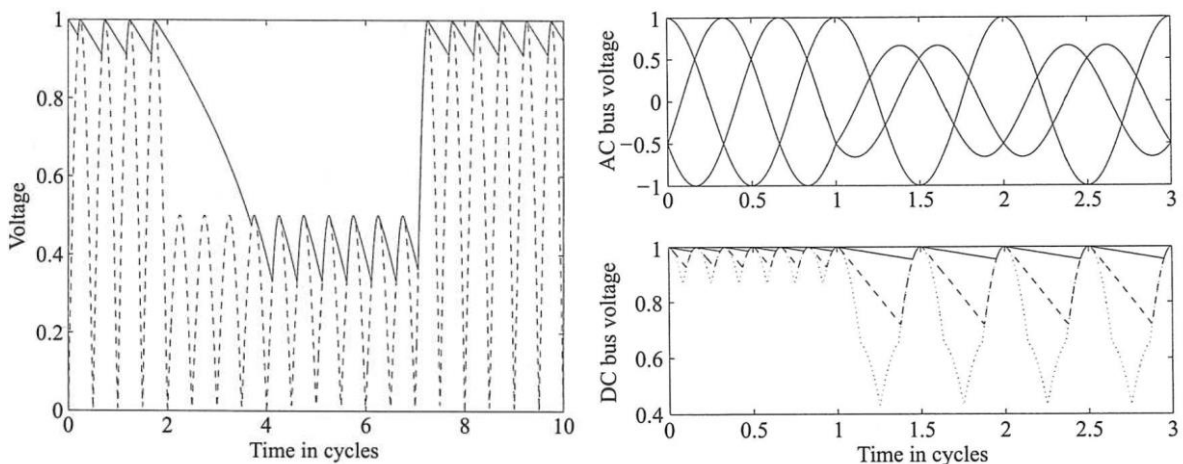


Kuva 3.1. Seitsemän erityyppistä jännitekuoppaa vaihejänniteosoittimilla kuvattuna [7].

3.2 Vaikutukset ohjaamattomien tasasuuntaajien toimintaan

Ohjaamaton tasasuuntaaja on varsinkin kuluttajalaitteissa yleisin tasasuuntaajasiltatyyppejä. Sitä käytetään yksivaiheisena mm. kuluttajaelektronikan hakkuriteholähteissä (viihde-elektronikan laitteet, LED-valaistus jne.) ja kolmivaiheisena mm. taajuusmuuttajissa ja isommissa hitsausinverttereissä sekä hakkuriteholähteissä. Kolmivaiheiset tasasuuntaajat voivat olla diodeilla toteutettuja 6- tai 12-pulssisiltoja. Ohjaamattomien tasasuuntaajien ja niiden syöttämien kuormien käyttäytyminen pikajälleenkytkennöissä ja jännitekuopissa riippuu jännitehäiriön ominaisuuksien (kesto-aika, jäännösjännite ja kolmivaiheisissa tapauksissa symmetria) lisäksi mm. tasasuuntaajan pulssiluvusta, tasasuuntaajan jälkeisen suodatuskondensaattorin mitoituksista ja kuorman suuruudesta.

Kuvassa 3.2 on havainnollistettu yksivaiheisen kokoaalto-tasasuuntaajan ulostulojännitteen käyttäytymistä jännitekuopassa ja kolmivaiheisen 6-pulssitasasuuntaajan käyttäytymistä epäsymmetrisessä tyypin C jännitekuopassa.

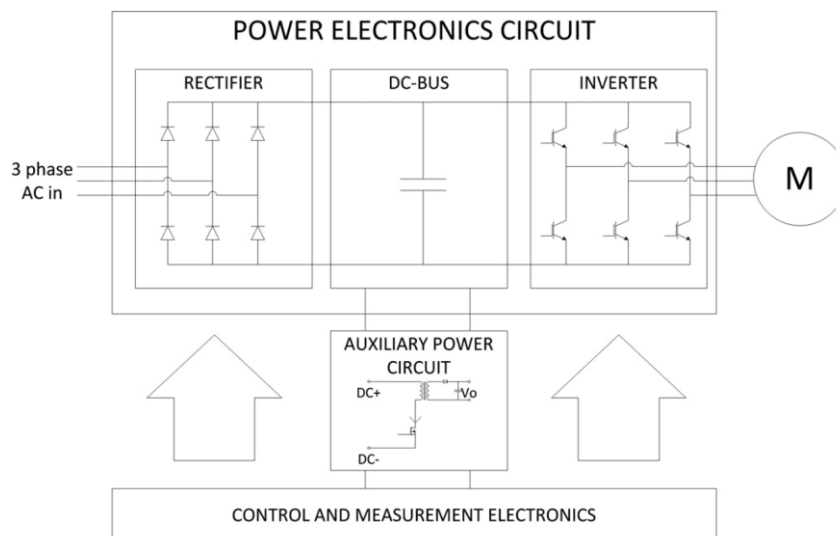


Kuva 3.2. a) Jännitekuopan vaikutus 1-vaiheisen tasasuuntaajan dc-kondensaattorin jännitteeseen: vaihtojännitteen itseisarvo (katkoviiva) and dc-kondensaattorin jännite (yhtenäinen viiva), b) Jännitteet C-tyypin epäsymmetrisessä jännitekuopassa: vaihtojännitteet (ylin kuva) dc-kondensaattorin jännitteet (alakuva) kun kondensaattori on suuri (yhtenäinen viiva), pieni (katkoviiva) tai sitä ei ole ollenkaan (dotted line) [6].

3.3 Vaikutukset taajuusmuuttajien toimintaan

Taajuusmuuttajien käyttäytymistä jälleenkytkentöjen ja jännitekuoppien yhteydessä tutkittiin hankkeessa tehtyjen seurantamittausten yhteydessä ja tässä luvussa on tarkasteltu mm. siihen liittyvää teoriataustaa ja kokemuksia aiempien julkisten tutkimusten valossa. Erityisesti sitä, kuinka pitkäkestoisia ja syviä jännitekuoppia tai keskeytyksiä taajuusmuuttajat kestävät häiriintymättä ja mitkä tekijät vaikuttavat niiden häiriintymiseen ja kuinka paljon esimerkiksi laitteiden parametreilla pystytään vaikuttamaan niiden em. jännitehäiriöiden sietoon.

Kuvassa 3.3 on esitetty tyypillinen taajuusmuuttajaan perustuvan moottorikäytön rakenne. Varsinkin pienemmissä muutamien kilowattien...kymmenien kilowattien taajuusmuuttajissa verkko-liityntä on toteutettu diodisillalla, jolla yksi- tai kolmivaiheinen verkkojännite kokoaaltotasa-suunnataan ja syötetään taajuusmuuttajan DC-kiskoon, jossa se suodatetaan elektrolyytti-kondensaattoreilla. Taajuusmuuttajan ohjaus- ja säätöelektronikan tarvitsema apujännite muodostetaan yleensä tästä ns. välipiirin DC-kiskojännitteestä DC-DC-muuntimella. DC-kiskon tasajännite vaihtosuunnataan takaisin halutun taajuiseksi vaihtojännitteeksi vaihtosuuntaajalla joka voidaan toteuttaa esimerkiksi IGBT(insulated gate bipolar transistor)- tai MOS-FET(metal oxide semiconductor field effect transistor)-transistoreilla.



Kuva 3.3. Taajuusmuuttajan pääkomponentit [8].

Kuvasta puuttuvat mm. verkkosuodattimet ja vastuksilla ja releellä tai kontaktorilla toteutettu hidastuskytkentä, jolla välipiirin kondensaattorin latautumista hidastetaan ja siitä aiheutuvaa kytkentävirtasysäystä pienennetään, kun taajuusmuuttaja kytketään jännitteiseksi.

Lähdeviitteessä [9] on tarkasteltu 5 erilaista taajuusmuuttajakäytön (ASD, adjustable speed drive) herkkyyttä erityyppisille jännitekuopille ja lyhyille keskeytyksille. Testatut taajuusmuuttajat on esitetty taulukossa 3-1.

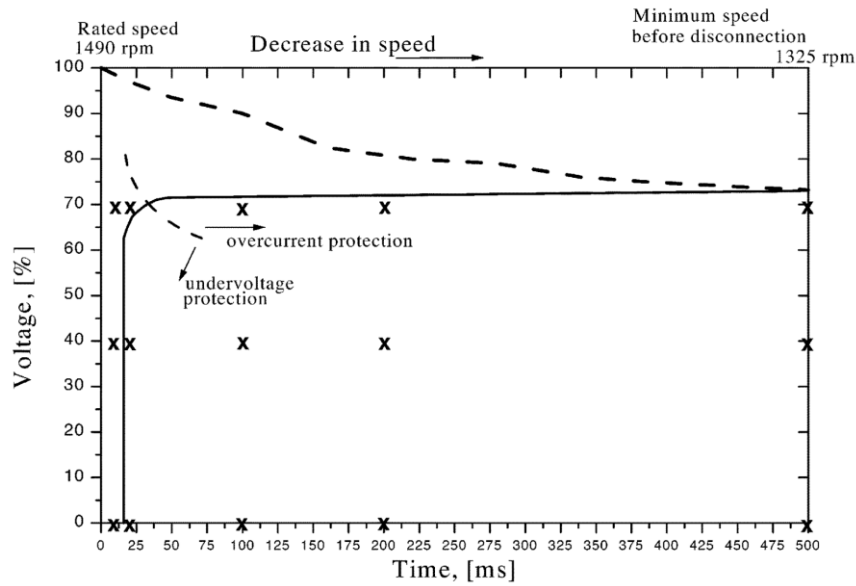
Taulukko 3-1. Testattujen taajuusmuuttajien perustiedot [9].

ASD1	Input: 3~, 48-62Hz, 380/480V, 9.5A, 4kW Output: 3~, 0÷1000Hz, 0÷480V, 9.5A C=85μF/kW, $U_{dcmin}=320V$ dc (57% of $U_{dcnom}=560V$)
ASD2	Input: 3~, 50/60Hz, 380/460V, 10.2A, 4kW Output: 3~, 0÷600Hz, 0÷480V, 10.2A C=165μF/kW, $U_{dcmin}=426V$ dc (76% of $U_{dcnom}=560V$)
ASD3	Input: 3~, 50/60Hz, 380/460V, 8.8A, 3.7kW Output: 3~, 0÷400Hz, 0÷460V, 8.8A C=151μF/kW, $U_{dcmin}=400V$ dc (71.4% of $U_{dcnom}=560V$)
ASD4	Input: 3~, 50-60Hz, 380/480V, 10A, 4kW Output: 3~, 0÷132Hz, 0÷500V, 10A C=85 μF/kW $U_{dcmin}=483V$ dc (86.3% of $U_{dcnom}=560V$)
ASD5	Input: 3~, 48-63Hz, 380/480V, 11A, 4kW Output: 3~, 0÷300Hz, 0÷500V, 11A C=78 μF/kW $U_{dcmin}=334V$ dc (60% of $U_{dcnom}=560V$)
Induction motor	Input: Δ/Y 230/400V, 13.9/8A, 50Hz, 4kW, $\cos\phi=0.86$ Output: 25.5Nm, 1440min ⁻¹

Kuvissa 3.4 ja 3.5 on esitetty taajuusmuuttajan 1 herkkyydet symmetriselle kolmivaiheiselle jännitekuopalle ja epäsymmetriselle yksivaiheiselle jännitekuopalle, kun moottoria käytetään nimellinopeudella, vakiovääntömomenttikuormalla ja nimellisellä vääntömomentilla. Kuvajien vaakasuoran osan alapuolella ja pystysuoran osan oikealla puolella taajuusmuuttajan toiminta pysähtyy. Kuten kuvasta 3.4 nähdään, taajuusmuuttajan irtikytkeytyminen voi tapahtua kahden eri suojamekanismin, alijännitesuojauksen ja ylivirtasuojauksen, perusteella. Taajuusmuuttajan alijännitesuojaus aktivoituu, kun taajuusmuuttajan dc-välipiirin laskee alle asetellun minimirajan (U_{dcmin}). Tämä alijännitelaukaisuraja on yleensä mahdollista asetella jopa 50 %:iin dc-välipiirin nimellisjännitteestä, mutta yleensä se asetellaan 65...90 % välille. Kuten kuvasta 3.5 nähdään alijännitelaukaisun asettelu määrää jännitekuoppien siedon aika-akselin suunnassa (eli tämä suojaus aktivoituu syvissä kuopissa ja lyhyissä keskeytyksissä).

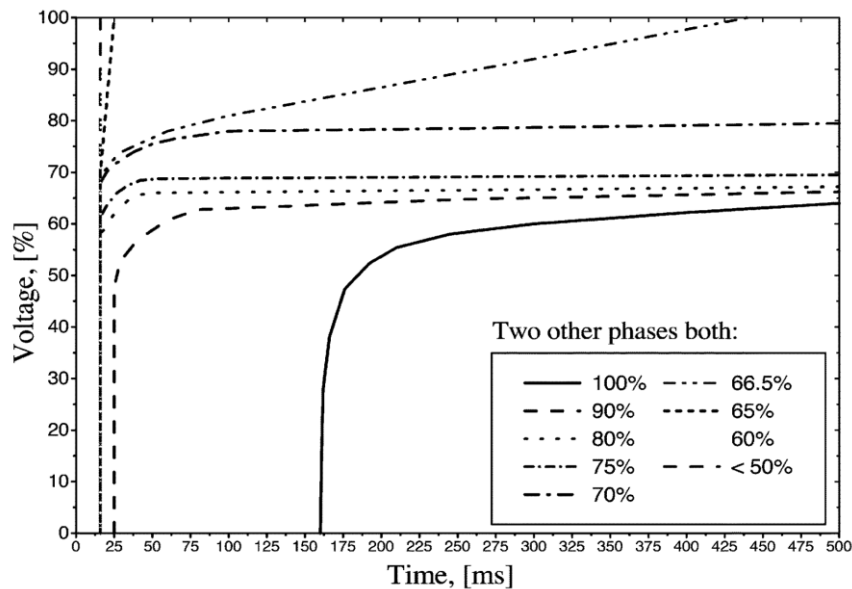
Taajuusmuuttajan ylivirtasuojaus voi aktivoitua joko jännitekuopan aikaisen kasvaneen virran seurauksena tai kuopan päättymishetkellä syntyvän suuren kytkentävirtasysäyksen vuoksi (purkautunut dc-välipiirin kondensaattori latautuu nopeasti jännitteen palautuessa normaaliiksi). Tämä suojaus määrää taajuusmuuttajan irtikytkeytymiskynnyksen kuopan jäännösjännitteeksi suunnassa. Lähdeviitteen [3] suosittamat kestoajat ja jäännösjännitteet symmetristen kolmivaiheisten suorakaiteenmuotoisten jännitekuoppien sietotestauksiin on merkitty kuvan "x":llä. Paksulla katkoviivalla on kuvattu muutoksia moottorin pyörimisnopeudessa pitkissä jännitekuopissa, jotka eivät ole riittävän syviä aiheuttaakseen taajuusmuuttajan irtikytkeytymisen.

Kuten kuvasta 3.5 nähdään epäsymmetristen yksivaiheisten kuoppien tapauksessa taajuusmuuttajan herkkyys kuopille kasvaa voimakkaasti, kun kahden normaalijännitteessä tai lähellä sitä olevan vaiheen jännitettä aletaan laskea. Tämä johtuu siitä, että kun kaksi vaihejännitettä ovat normaalijännitteessä tai lähellä sitä, yksi pääjännitteistä on normaali tai lähellä sitä, jolloin pääjännitteistä muodostettava DC-välipiirin jännitekin pysyy vielä normaalina tai lähellä sitä, mutta alkaa laskea, jos em. vaihejännitteet laskevat.

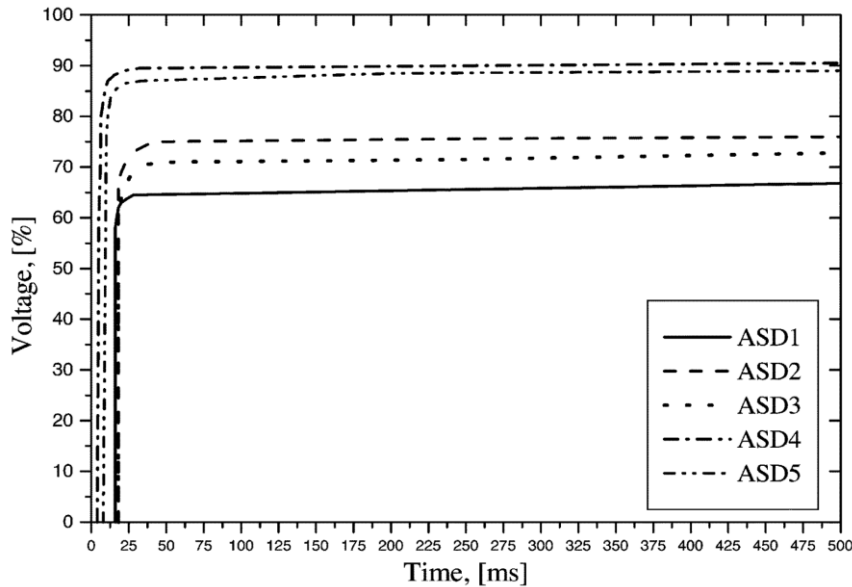


Kuva 3.4. ASD1:n herkkyys kolmivaiheisille jännitekuopille [9].

Kuvassa 3.6 on esitetty kaikkien testattujen taajuusmuuttajien herkkyys kaksivaiheisille jännitekuopille, kun kolmannen vaiheen jännite oli nimellisjännitteen suuruinen. Kuten kuvasta nähdään, taajuusmuuttajien välillä on huomattavia eroja jännitekuoppien siedossa. Ottaen huomioon, että jännitteen tehollisarvoa ei voi laskea jaksolliselle suureelle alle puolijakson pituiselle ajalle, taajuusmuuttajien ASD4 ja ASD5 tulisi todeta olevan herkkiä jännitekuoppien tai lyhyiden keskeytysten sijasta alijännitetransienteille.



Kuva 3.5. ASD1:n herkkyys yksivaiheisille jännitekuopille [9].



Kuva 3.6. Kaikkien testattujen taajuusmuuttajien herkkyys kaksivaiheisille jännitekuopille, kun kolmannen vaiheen jännite oli nimellijännitteen suuruinen [9].

Tutkimuksessa todetaan, että nykyinen jännitekuoppien kaksiuotteinen karakterisointi jännösjännitteen ja kestoajan avulla on riittämätön erityisesti kolmivaihelaitteiden käyttäytymisen arvioinnissa ja vähimmäisvaatimuksena jännösjännite ja kestoaika tulisi ilmoittaa kaikkien kolmen vaiheen osalta. Myöskin standardeissa määritellyt jännitekuoppien testausmenetelmät todettiin riittämättömiksi, koska niissä ei testata lainkaan yleisimpiä, epäsymmetrisiä jännitekuoppia.

Johtopäätöksissä todetaan, että taajuusmuuttajien välillä on selviä eroja käyttäytymisessä, mutta jännitehäiriöiden sietokuvaajien muoto on kuitenkin kaikissa lähes suorakulmainen: lähes pystysuora tai lievästi kallistettu pystyosa, lievästi nouseva vaakaosa ja ”polvi” näiden välissä. Testien perusteella näytti siltä, että

- joillakin nimellisestä poikkeavilla pyörimisnopeuksilla taajuusmuuttajien herkkyys jännitekuopille kasvoi, mutta yleisesti, jos nopeus oli nimellistä pienempi, jännitekuoppien sieto parani
- Jännitekuopan alkamisvaihekuomalla tai vaihesiirrolla kuopan aikana ei ollut vaikutusta jännitekuoppien sietoon
- Jännitteen suuruudella ja yliaaltosisällöllä on vaikutusta sekä jännitehäiriöiden sietokuvaajien vaaka- että pystyosiin. Jos jännite ennen kuoppaa on 110 % nimellisestä, herkkyys kuopille pienenee ja jos se on 90 % nimellisestä, herkkyys kasvaa.
- Suurin herkkyuden kasvu havaittiin 5. yliaallon vaihekuomalla 0 ° ja pieneminen vaihekuomalla 180 °.
- Suljetun silmukan käyttömoodissa herkkyys on hieman suurempi kuin avoimen silmukan käyttömoodissa.
- Suorakaiteen muotoisilla ja siitä poikkeavilla kuopilla tehtyjen testien perusteella taajuusmuuttajan reagointi kuoppaan riippuu pääasiassa kuopan tyypistä, ei sen muodosta

Lähteessä [13] todetaan että keskeytyksen ja jännitekuopan aikana, kun syöttävän verkon jännite on pienempi kuin taajuusmuuttajan dc-välipiiriin jännite, dc-välipiiriin kondensaattori syöttää kuorman tarvitseman energian, mikä johtaa kondensaattorin jännitteen laskuun. Jännitteen laskun suuruus riippuu jännitehäiriön luonteesta (suuruus, kestoaika, epäsymmetria ja vaihekuomahypyt), kondensaattorin kapasitanssista ja kuorman tehosta. Jos jännitteenlaskua ei rajoiteta, se voi johtaa seuraaviin ongelmiin:

- Vaihtosuuntaajan puolijohdekytkimet voivat vaurioitua, jos kuormaan syötetty teho pysyy vakiona, koska jännitteen lasku johtaa virran kasvuun
- Jotta moottorin vääntömomentti pystyttäisiin maksimoimaan koko pyörimisnopeusalueella ja moottorin saturoituminen estämään, jännitteen ja taajuuden suhde pitää pysyä vakiona. Jos välipiirin jännite laskee, ulostulotaajuuden ja moottorin pyörimisnopeuden tulee myös laskea samassa suhteessa. Joissain prosesseissa pyörimisnopeuden lasku ei ole hyväksyttävää.
- Monissa tapauksissa ohjauselektronikka ja IGBT-ohjaimet voivat sammua, koska niiden tehonsyöttö tapahtuu dc-välipiiristä DC-DC-konvertereilla
- Tasasuuntaajaan puolijohdekytkimet voivat vaurioitua tai sulakkeet palaa dc-välipiirin kondensaattorin latausvirtasysäyksen vuoksi jännitteen palautuessa normaaliksi kuopan jälkeen

Lähteessä [10] on tutkittu kahden teollisuuslaitoksessa käytettävän taajuusmuuttajan jännitekuoppien ja lyhyiden katkosten siedon parantamismahdollisuuksia. Taajuusmuuttajissa oli käytettävissä seuraavia keinoja siedon parantamiseen:

- "Flying start". Jännitekuopan aikana taajuusmuuttajan ohjauselektronikka kytkee moottorin irti taajuusmuuttajasta, ja odottaa jännitteen palautumista. Kuopan aikana moottorin pyörimisnopeus laskee. Kuopan päätyttyä taajuusmuuttaja mittaa moottorin pyörimisnopeuden ja alkaa säätää moottorin pyörimisnopeutta takaisin asetusarvoonsa. Näin vältetään moottorin kytkentävirtasysäys, joka voisi aiheuttaa taajuusmuuttajan ylivirtalaukaisun.
- Taajuusmuuttajan dc-välipiiriin varastoidun energian kasvattaminen konfiguraatiomuutoksilla (parametroinnilla).
- Kuorman hitausmomentin hyödyntäminen. Kuormaa hyödynnetään vauhtipyöränä ja kuopan aikana moottoria jarrutetaan ja jarrutusenergia käytetään dc-välipiirin jännitteen ylläpitämiseen.

Taajuusmuuttajien asetuksiin tehtiin seuraavat muutokset:

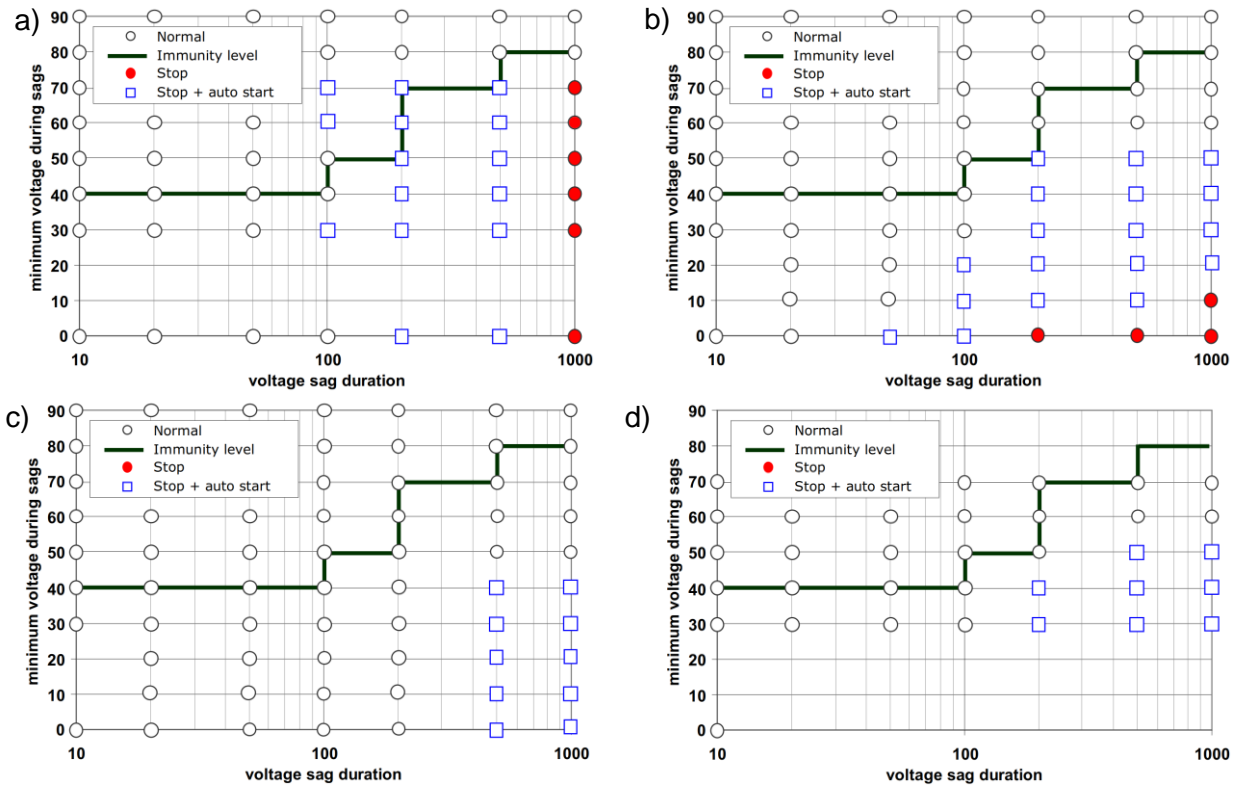
- Poistettiin käytöstä dc-jännitehälytykset
- Säädettiin minimi- ja maksimijännitetasoja
- Otettiin käyttöön kuorman hitausmomentin hyödyntäminen taajuusmuuttajassa A
- Otettiin käyttöön "flying start" taajuusmuuttajassa B

Näillä muutoksilla saadut parannukset on esitetty taajuusmuuttajien A ja B osalta kuvassa 3.7. Taajuusmuuttajien käyttäytyminen jännitekuopissa luokiteltiin (kuvissa) seuraavasti:

- Normaali. Taajuusmuuttaja pysyy toiminnassa jännitekuopan ajan ja vaikutus kuormaan on olematon.
- Stop + autostart. Taajuusmuuttaja lopettaa toimintansa kuopan aikana, mutta jatkaa toimintaansa kuopan jälkeen.
- Stop. Taajuusmuuttaja lopettaa toimintansa kuopan aikana ja vaatii ulkoisen komennon tai toimenpiteitä jatkaakseen toimintaansa.

Yhtenäinen viiva kuvissa kuvaa tavoitteeksi asetettua immuniteettitasoa, joka määritettiin kohteessa vuoden aikana tehtyjen jännitekuoppamittausten perusteella niin, että jännitekuoppien aiheuttama haitta saataisiin kohtuulliselle tasolle.

Kuvien perusteella tässä tapauksessa kuorman hitausmomenttia hyödyntämällä saatiin huomattava parannus taajuusmuuttajakäytön jännitekuoppien siedossa (taajuusmuuttaja A) ja flying start toiminnollakin sieto parani hieman (taajuusmuuttaja B).



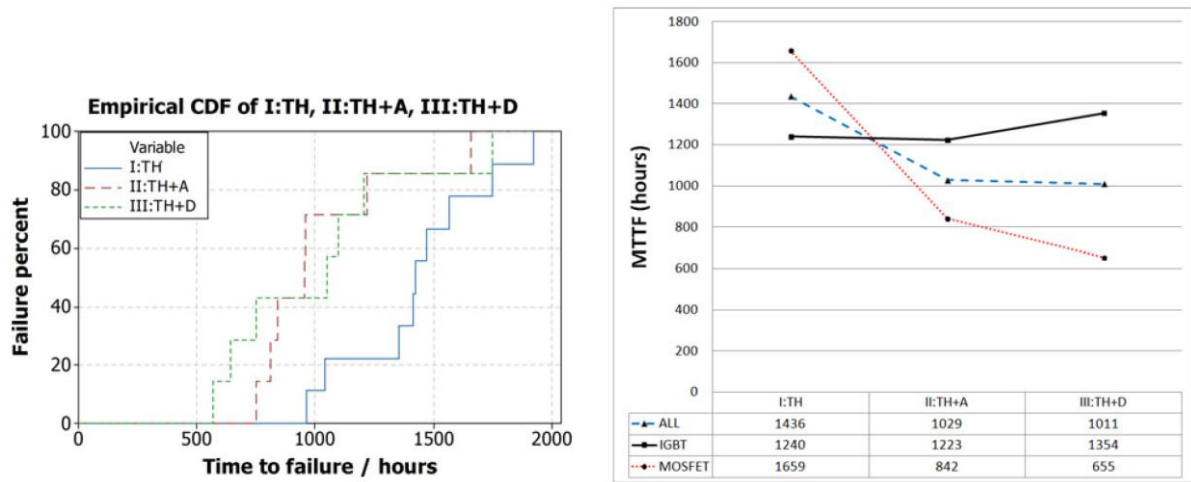
Kuva 3.7. a) Taajuusmuuttaja A oletusasetuksilla, b) taajuusmuuttaja B oletusasetuksilla, c) taajuusmuuttaja A asetusmuutosten jälkeen, d) taajuusmuuttaja B asetusmuutosten jälkeen [10].

Kuten edellä esitetyistä tarkasteluista ilmenee, taajuusmuuttajien jännitekuoppien ja keskeytysten siedossa on oletusasetuksillakin melko suuria eroja ja laitteen parametroinnilla voidaan vaikuttaa sietoon merkittävästi. Parametroinnin optimoinnilla saavutettavat hyödyt riippuvat tapauksesta ja esimerkiksi taajuusmuuttajan kuorman ominaisuuksista, mutta ongelmatapauksissa mahdollisuudet kannattaa selvittää yhtenä vaihtoehtona ja/tai lisäkeinona esimerkiksi jännitteen laatua parantavien laitteiden hankinnalle.

3.4 Vaikutukset taajuusmuuttajien elinikään

Lyhyiden katkosten vaikutusta taajuusmuuttajien ikääntymiseen ja vikaantumiseen on tarkasteltu mm. lähteissä [8, 12] raportoiduissa tutkimuksissa. Tutkimuksessa testattiin yhteensä 29 taajuusmuuttajaa, joiden nimellinen syöttöjännite oli 400 Vrms ja nimellinen ulostulovirta 2,4 Arms ja maksimiulostulovirta 4,2 Arms. Osassa taajuusmuuttajista vaihtosuuntaaja oli toteutettu MOSFET-transistoreilla ja osassa IGBT-transistoreilla. Taajuusmuuttajien kuormana käytettiin 0,8 kW moottoreita, jotka oli varustettu vauhtipyörällä. Taajuusmuuttajia testattiin 4:ssä eri ryhmässä, joista ryhmässä I ja IV taajuusmuuttajilla ajettiin pelkästään toistuvaa tehosyklausta (10 s ajoa, 10 sekuntia pysäyksissä 3 sekunnin kiihdytys- ja jarrutusrampeilla). Testiryhmässä II lisättiin lyhyt sähkönsyötön keskeytys kiihdytysjaksoon ja testiryhmässä III jarrutusjaksoon. Sähkönsyötön keskeytyksen pituutta tai vaihekulmia tutkimuksessa ei ilmoitettu. Kaikissa testeissä taajuusmuuttajat olivat 85 °C lämpötilassa ja ryhmässä I-III lisäksi 85 % suhteellisessa kosteudessa. Testejä ajettiin 500 h jaksoissa.

Kuten kuvasta 3.8 a) ilmenee testiryhmissä II ja III, joissa ajojen kiihdytys- tai jarrutusrampeihin oli lisätty lyhyt sähkönsyötön keskeytys keskimääräiset eliniät MTTF(mean time to failure):llä mitattuna olivat selvästi lyhyempiä kuin testiryhmässä I, jossa keskeytyksiä ei ollut.



Kuva 3.8. a) Testiryhmien I, II ja III testitulosten kertymäfunktiot ja b) testitulosten vertailu vikaantumistavan perusteella [8].

Kuten kuvasta 3.8 b) ilmenee sähkönsyötön keskeytyksillä oli selvä vaikutus nimenomaan MOSFET-transistoreilla toteutettujen taajuusmuuttajien keskimääräiseen elinikään. Tarkemmassa tutkimuksessa havaittiin, että MOSFET-transistoreiden vuotovirrat olivat kasvaneet niiden testiryhmien laitteissa, jotka oli altistettu lyhyille keskeytyksille moottorin kiihdytys- tai jarrutusjaksoissa. IGBT-transistoreilla toteutetuissa laitteissa vastaavaa eliniän lyhenemistä ei ollut havaittavissa.

Myös kosteudella todettiin olevan selvä vaikutus taajuusmuuttajien elinikään, kuivassa testatuissa laitteissa (testiryhmä IV) ei tapahtunut yhtään laiterikkoa [8].

4. KYSELYTUTKIMUS

Hankkeen puitteissa toteutettiin kyselytutkimus, jonka tarkoituksena oli kartoittaa mm. sähköverkkoyhtiöissä käytössä olevia keskijännitejohtolähtöjen suojausten ja jälleenkytkentöjen toteutustapoja, niistä saatuja kokemuksia ja asiakaspalautteita sekä jännitekuoppien ja jälleenkytkentöjen rekisteröintikäytäntöjä.

4.1 Kyselytutkimuksen toteutus

Kysely toteutettiin rtf-muotoisilla lomakkeilla, jotka verkkoyhtiöt täyttivät ja palauttivat sähköpostitse Tampereen yliopiston tutkijalle. Kyselylomake on esitetty tämän raportin liitteessä A. Kysely jaettiin sähköverkkoyhtiöiden verkkojohtajille Energiategollisuus ry:n kautta ja kyselyyn vastasi yhteensä 16 verkkoyhtiötä, joista 8 oli maaseutumaisia ja 8 kaupunkiverkkoyhtiötä. Vastausten maantieteellinen kattavuus oli hyvä.

4.2 Verkkorakenteet ja suojarahakanta

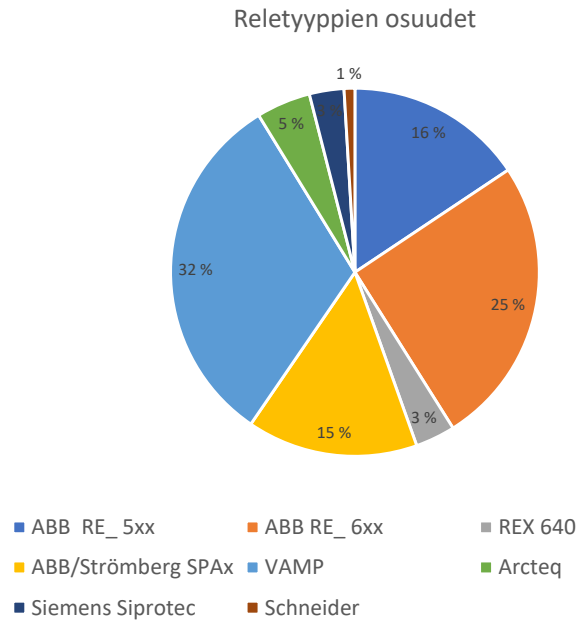
Kyselyyn vastanneilla yhtiöillä oli keskijännitejohtoa yhteensä hieman yli 73 000 km, josta ilmajohtoa vajaa 45 000 km ja kaapelia reilu 28 000 km. Yhtiöiden yhteenlasketuista johtopituuksista laskettu keskimääräinen kaapelointiaste oli maaseutumaisilla yhtiöillä noin 36 % ja kaupunkipainotteisilla yhtiöillä noin 67 % (yhtiöiden ilmoittamien kaapelointiasteiden aritmeettiset keskiarvot vastaavasti noin 29,5 % ja 74 %).

Pääosalla yhtiöistä oli käytössä keskitetty sammutus, vain pari yhtiötä ilmoitti käyttävänsä verkkoa maasta erotettuna. Suurimmalla osalla maaseutumaisista verkkoyhtiöistä oli käytössä myös hajautettua kompensointia. Vain pari yhtiötä ilmoitti käyttävänsä pelkästään keskitettyä kompensointia.

Kipinävälisuojaia oli käytössä vielä melko runsaasti, niiden yhtiöiden osalta, jotka ilmoittivat lukumääriä tai lukumääräarvioita, kokonaissumma oli 5622 kpl. Keskimäärin ilmajohtoa oli yhtä ilmoitettua kipinävälisuojaa kohden yhtiöstä riippuen 2,7...24,6 km, maaseutumaisilla verkkoyhtiöillä keskimäärin 5 km.

Suojarelekannan osalta tulokset ovat suuntaa antavia, kaikki yhtiöt eivät ilmoittaneet lukumääriä tai ilmoittivat vaihteluvälin, jolloin laskennassa käytettiin vaihteluvälin keskiarvoa. Useampia reletyyppisiä oli niputettu yhdeksi ryhmäksi hieman vaihtelevasti, esim. VAMPin releistä ei ollut tästä johtuen mahdollista erottaa eri relesukupolvia. Kuvassa 4.1 on esitetty suojarahaletyyppien jakauma valmistajittain ja ABB:n osalta myös relesukupolvittain. Otokseen koottiin suojarahaleet, joita oli käytössä useammalla kuin yhdellä yhtiöllä ja joista oli tiedossa tarkka lukumäärä tai lukumääräarvio. Otokseen saatiin näin yhteensä 3694 suojarahalettä.

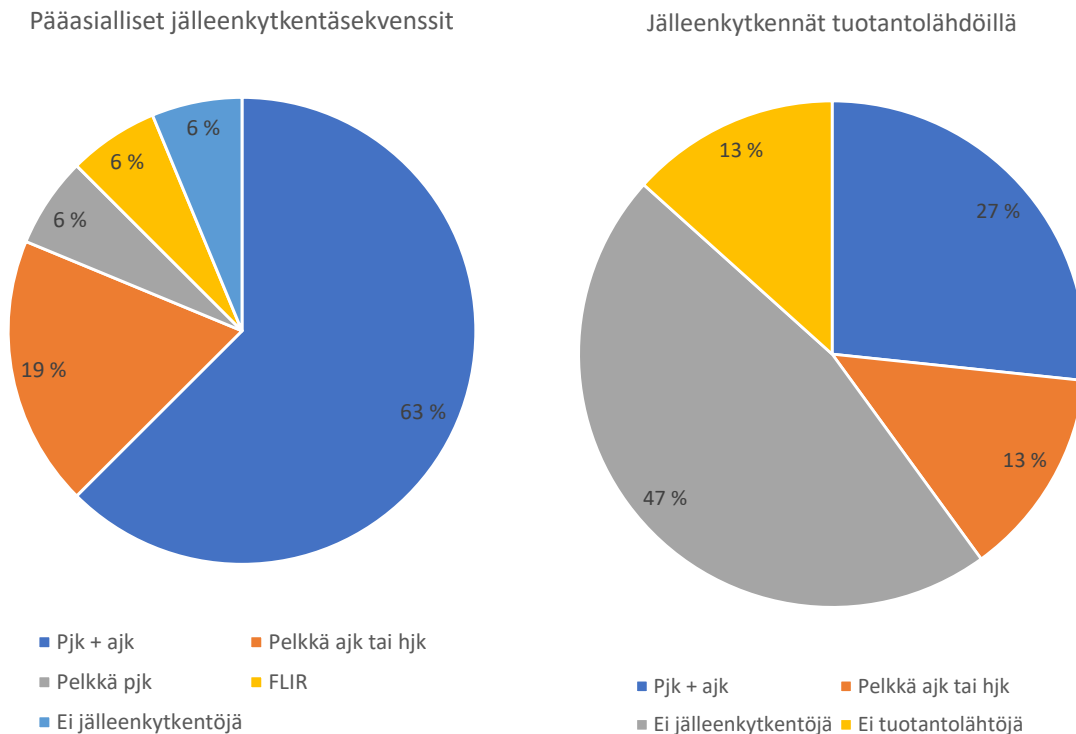
Kuten jakaumasta nähdään, varsin uusiakin numeerisia releitä on yhtiöillä käytössä jo paljon. Uudehkot numeeriset releet mahdollistavat jo monenlaisia älykkäitä toimintoja kuten vikapaikan etäisyyden arvioinnin ja mahdollistaisivat myös nykyistä älykkäämpiä jälleenkytkentäsekkenssejä, joissa hyödynnettäisiin releen mittaustietoja ja laskentatuloksia.



Kuva 4.1. Kyselyyn vastanneiden yhtiöiden suojarelätyyppien jakauma valmistajittain ja relesukupolvittain.

4.3 Jälleenkytkentäkäytännöt, niiden kehittäminen ja tilastointi

Kyselyllä kartoitettiin myös yhtiöissä käytössä olevia jälleenkytkentäkäytäntöjä ja niihin tehtyjä ja meneillään tai suunnitteilla olevia muutoksia. Kuvaan 4.2 on koottu kyselyyn vastanneiden yhtiöiden nykyisin käytössä olevat pääasialliset jälleenkytkentäsekvenssit ja jälleenkytkennät tuotantolähdöillä. Jos yhtiöllä oli käytössä eri sekvenssit maasulku- ja oikosulkuvioille, on kuvaan otettu pelkästään oikosulkuvikojen sekvenssi. Kuten kuvasta ilmenee, valtaosalla yhtiöistä on käytössä sekä pika- että aikajälleenkytkennät.



Kuva 4.2. Kyselyyn vastanneiden yhtiöiden pääasialliset jälleenkytkentäsekvenssit.

Viimeisen noin kahden vuoden kuluessa jälleenkytkentöihin oli tehnyt muutoksia koko verkossaan kolme yhtiötä. Tehdyt muutokset:

- 1 s pjk + ajk -> FLIR (ilman pjk:ta ja ajk:ta)
- 0,4 s pjk -> 1 s pjk
- 0,3-0,5 s pjk -> 0,7 s pjk

Jo aiemmin oli tehty seuraavat muutokset kahdessa yhtiössä:

- 180 s ajk -> 60 s ajk
- pjk poistettu ja 120 s ajk -> 30 s ajk

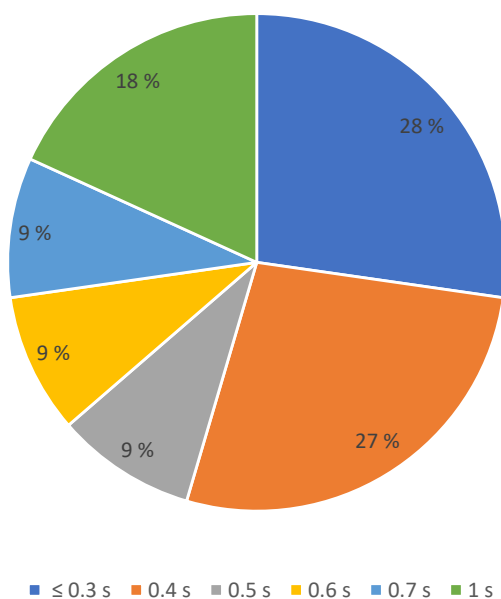
Viime vuosina aloitettuina ja edelleen käynnissä olevina pidempiaikaisina prosesseina kahdessa yhtiössä olivat seuraavat muutokset:

- vähitellen 0,3 s pjk + 60 s ajk -> 30 s hidastettu jälleenkytkentä (hjk)
- vähitellen 0,3 s pjk -> 1 s pjk
- 120 s ajk -> 60 s ajk

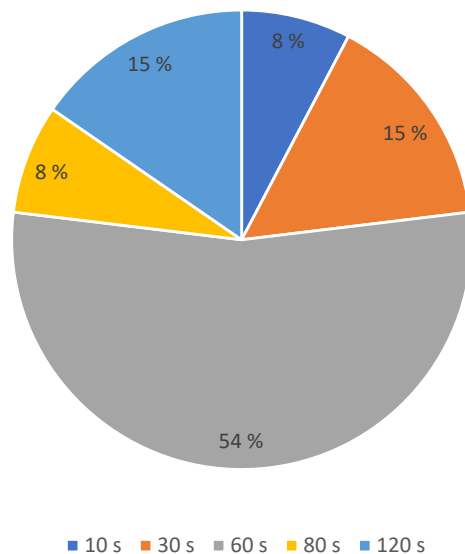
Vikojen selvittämiseksi mahdollisimman lyhyellä keskeytysajalla kaksiportaista pjk+ajk-sykliä voitaneen pitää hyvänä, koska suuri osa viosta selviää jo lyhyellä pikajälleenkytkennällä. Pika-jälleenkytkennän asiakkaille aiheuttamat laitteiden toimintahäiriöt ja mahdolliset laiterikot ovat saattaneet kuitenkin osaltaan puoltaa sen poisjättämistä, samoin johtolähdöllä oleva sähköntuotanto. Pjk + ajk-sykliä on mahdollista täydentää myös FLIR:llä, tilanteesta riippuen FLIR voi olla nopeampi tai hitaampi kuin manuaaliset kokeilukytkennät.

Yhtiöillä nykyisin käytössä olevat pääasialliset pikajälleenkytkentöjen ja aikajälleenkytkentöjen (tai hidastettujen jälleenkytkentöjen) jännitteettömät väliajat on esitetty kuvassa 4.3. Kuten kuvasta ilmenee yli puolella pikajälleenkytkentää käyttävistä yhtiöistä jännitteetön väliaika on pienempi tai yhtäsuuri kuin 0,4 s ja 82 %:lla se on pienempi tai yhtäsuuri kuin 0,7 s. 1 sekunnin jännitteetön väliaika on käytössä tai siihen ollaan vähitellen siirtymässä kahdessa yhtiössä. Yhdessä yhtiössä on siirrytty 1 sekunnin jännitteettömästä väliajasta FLIRiin (pjk:sta ja ajk:sta on samalla luovuttu kokonaan).

Pikajälleenkytkennän jännitteettömät väliajat



Aikajälleenkytkennän (tai hidastetun jälleenkytkennän) jännitteettömät väliajat



Kuva 4.3. Kyselyyn vastanneiden yhtiöiden käyttämät pika- ja aikajälleenkytkentöjen jännitteettömät väliajat.

Aikajälleenkytkennöissä selvästi yleisin (yli puolet otoksesta) jännitteetön väliaika on 60 s, mutta myös 30 s ja 120 s jännitteettömiä väliaikoja on käytössä jonkin verran (kumpaakin 15 % otoksesta). Aikajälleenkytkennän osalta jännitteettömän väliajan määrittelyssä on huomiotava keskeytyksestä aiheutuvan haitan lisäksi oikosulkuvioissa myös johtimien jäähtymiseen tarvittava aika, joka riippuu mm. vikavirrasta, releen laukaisuhideastuksesta (polttoajasta), johdinlajista ja -poikkipinnasta sekä ympäristöolosuhteista. Polttoaikojen tutkiminen päätettiin rajata tämän hankkeen ulkopuolelle, mutta muutamia yleisen tason näkökohtia niihin liittyen on käsitelty luvun 8 pohdintaosuudessa.

Sekälähdöillä kaapelointiasteen raja, jonka jälkeen jälleenkytkennät otetaan pois käytöstä vaihteli jonkin verran. Kaksi yhtiötä ilmoitti kaapelointiastevaatimukseksi 100 %, mutta useimmilla yhtiöillä jälleenkytkentöjen poistamista harkittiin tapauskohtaisesti jo aiemminkin. Vaikutavina tekijöinä mainittiin mm. mahdolliset maastokatkaisijat, haarajohtojen määrä, runkojohdon kaapelointiaste, PAS-johto-osuudet, vierimetsät ja viat, jotka pikajälleenkytkentä olisi mahdollisesti selvittänyt. Jos esimerkiksi ilmajohto-osuudet olivat maastokatkaisijoiden takana, jälleenkytkennät otettiin pois. Yksi yhtiö ilmoitti, että jälleenkytkennät poistetaan, kun kaapelointiaste on 60 %.

Jälleenkytkentöjen tilastointikäytännöt olivat pääosin varsin yhteneväiset:

- erikseen tilastoidaan onnistuneet pj:t, ajk:t ja pysyvät viat
- epäonnistuneet jälleenkytkennät sisältyvät pysyviin vikoihin, niitä ei erikseen tilastoida
- oikosulku/maasulkutiedon tallentumista koskevaan kysymykseen vastasi 12 yhtiötä ja niistä 11:llä tieto tallentui johonkin järjestelmään

4.4 Jännitekuoppien rekisteröinti

Jännitekuoppien rekisteröinnin nykytilanne oli kyselyn perustella melko kirjava (kuva 4.4.a). Useimmilla kyselyyn vastanneista yhtiöistä oli vähintään osalla sähköasemista jonkinlainen jännitekuoppien rekisteröinti. Yhdellä kyselyyn vastanneista yhtiöistä oli kaikilla sähköasemilla sähkönlaatuanalysointorit, jotka rekisteröivät jännitekuopat. MX Electrix Oy:n Laatuvahtimittareita oli kaikilla sähköasemilla kahdella yhtiöllä ja osalla sähköasemista neljällä yhtiöllä. 8 yhtiötä ilmoitti, että sähköasemien suojareleet rekisteröivät jännitekuopat, mutta niitä ei aktiivisesti seurata. Yksi yhtiö ilmoitti, että jännitekuoppia ei rekisteröidä. Tämänkin tapauksen voi tässä luokittelussa katsoa kuuluvaksi edelliseen 8 yhtiön ryhmään, koska melko suuri osa yhtiön releistä oli uudehkoja ja niiden häiriötallentimet ainakin osalla asemista todennäköisesti pystyvät rekisteröimään suuren osan jännitekuopista. Toisaalta em. 8 yhtiön osaltakaan vastauksista ei varmuudella ilmene, tulevatko kaikki (myös kantaverkon aiheuttamat) jännitekuopat rekisteröityä.

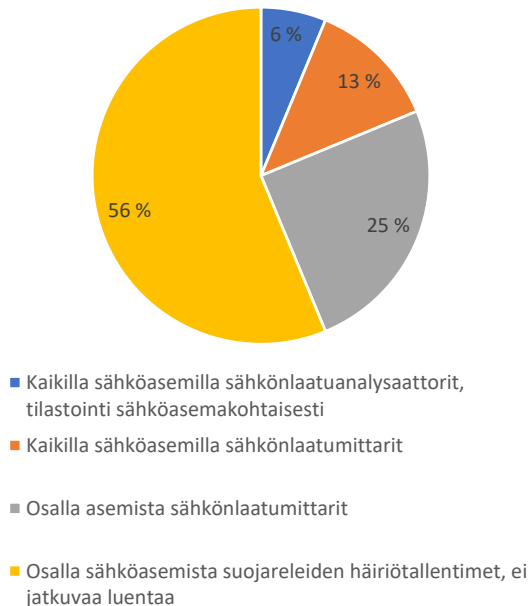
Ainakin yhdellä yhtiöllä oli lisäksi yksittäisiä sähkönlaatumittareita asennettuna jakelumuuntamoille. Yksi yhtiö ilmoitti, että maastokatkaisijat mahdollistaisivat jännitekuoppien seurannan myös muualla kuin sähköasemilla, mutta tällaista ei ole kuitenkaan tällä hetkellä käytössä. Muilla yhtiöillä ei ollut jännitekuoppien rekisteröintiä muualla kuin sähköasemilla.

Kyselyssä kysyttiin myös, pitävätkö yhtiöt kuoppien rekisteröintiä hyödyllisenä ja kannattaisiko se ottaa osaksi valtakunnallista keskeytystilastointia. Vastauksen jakauma on esitetty kuvassa 4.4.b). Vastauksissa todettiin mm. että jännitekuopat on tunnistettu ilmiöksi, johon on tarve kiinnittää huomiota ja valtaosa näki seurannan hyödyllisenä esim. asiakaspalautteiden käsittelyn näkökulmasta. Neljä yhtiötä kannatti selkeästi jännitekuoppien ottamista osaksi valtakunnallista häiriö- ja keskeytystilastointia. Enimmäkseen oltiin kuitenkin sitä mieltä, että jos se tulisi osaksi valtakunnallista tilastointia, sen tulisi olla vapaaehtoinen, koska seurannan ulottaminen kattavasti kaikille asemille aiheuttaisi merkittäviä lisäkustannuksia, varsinkin nopealla aikataululla toteutettuna. Jokaisella asemalla pitäisi silloin olla sähkön laadun seurantalaitteisto tai jännitekuoppien tallennukseen soveltuva suojareleistys (+ tietojärjestelmät). Kielteisissä vastauksissa perusteina oli mm. kuoppien vähäinen määrä ja se, että hyödyt nähtiin melko pieniksi suhteessa työmäärään.

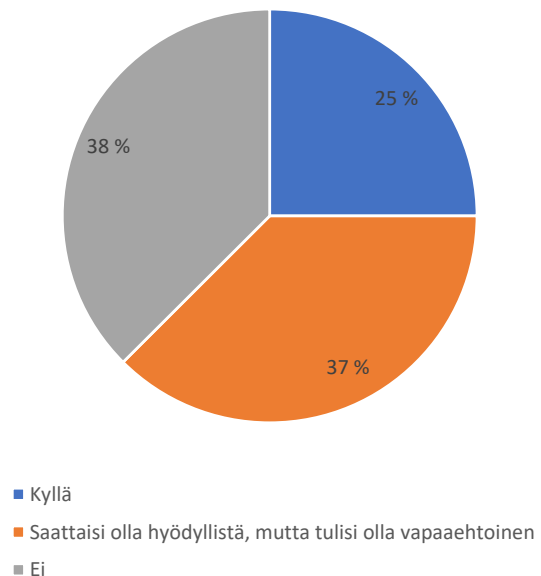
Muita vastauksissa esille tulleita näkökohtia:

- Valtakunnalliseen tilastointiin mukaan ottaminen vaatisi myös yhtenevät määrittelyt jännitekuopille. Lähtökohtana voisi käyttää tämän raportin luvussa 2 esitettyä, standardissa SFS-EN 50160 [5] on annettua suositusta jännitekuoppien luokitteluun.
- Jännitekuopista ei mielellään saisi tulla SCADAn tapahtumalistalle ilmoituksia, vaan tulisi olla erillinen järjestelmä, josta niitä pystyisi tutkimaan selkeästi.
- Jännitekuoppien seuranta on hyvä nyt, kun verkossa tapahtuu isoja muutoksia (kaapelointi). Valtakunnallisen tilastoinnin kannalta olisi hyvä pohtia, mitä tilastoinnilla halutaan kuvata. Jännitekuoppien osalta haitta ja vaikutukset on hyvin erityyppiset eri käyttäjille. Osalla asiakkaista jännitekuopat eivät aiheuta ongelmia eivätkä ne näy juurikaan toiminnassa ja osalla ne aiheuttavat enemmän ongelmia (teollisuus). Vaarana voi olla, että jännitekuoppien osalta syntyy kuva, että kuoppiakaan ei saa verkossa olla. Myös sähkön käyttäjät voivat huomioida ja vähentää kuoppien vaikutusta toiminnassaan.

a) Jännitekuoppien rekisteröinti sähköasemilla



b) Pitäisikö jännitekuopat ottaa osaksi valtakunnallista häiriö- ja keskeytystilastointia?



Kuva 4.4. a) Jännitekuoppien rekisteröinnin nykytilanne yhtiöissä ja b) halukkuus jännitekuoppien rekisteröinnin ottamiseen osaksi valtakunnallista häiriö- ja keskeytystilastointia.

4.5 Jälleenkytkennöistä saatu asiakaspalaute ja sen dokumentointi

Jälleenkytkennöistä saatua asiakaspalautetta kysyttiin erikseen sekä laitehäiriöiden että mahdollisten laiterikkojen osalta. Varsinkin maaseutumaiset verkkoyhtiöt raportoivat saaneensa palautetta jälleenkytkentöjen aiheuttamista häiriöistä. Muutama yhtiö raportoi ongelmien liittyneen pelkästään pikajälleenkytkentöihin, pidemmissä katkoissa ongelmia ei ole esiintynyt. Joissain yhtiöissä todettiin, että asiakaspalautteen perusteella on usein vaikea sanoa varmasti, ovatko ongelmat johtuneet ns. normaaleista vikakatkoista vai jälleenkytkennöistä.

Laitehäiriöistä verkkoyhtiöt raportoivat saaneensa palautetta seuraavien laitteiden osalta:

1. maalämpöpumput

- ainakin yhdentyypisen uuden invertterimaalämpöpumpun osalta on raportoitu tapauksia, joissa laite on mennyt pikajälleenkytkentöjen jälkeen virhetilaan, joka edellyttää käyttäjän toimia laitteen palauttamiseksi normaalitilaan (esimerkkejä virheilmoituksista on esitetty kuvassa 4.5)

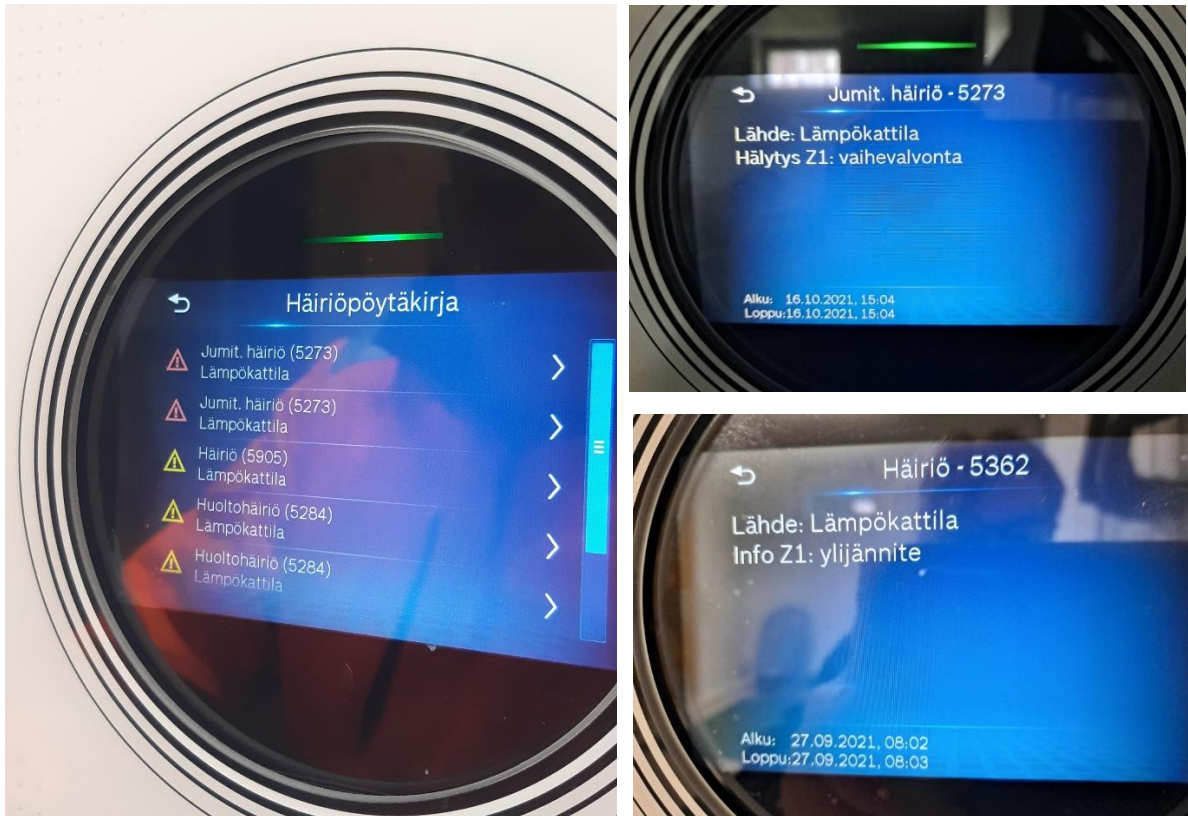
- b. ilmeisesti myös muissa maalämpöpumpuissa on esiintynyt häiriöitä, yhdessä tapauksessa pikajälleenkytkentä aiheutti virheilmoituksen ”alijännitevirransyötössä”, mutta pidemmissä katkoissa ongelmaa ei esiintynyt
2. ilmalämpöpumput
 3. pellettilämmitykset
 4. maatalouden lypsyrobotit ja muu automaatio
 5. valmistavan teollisuuden tuotantolinjat, taajuusmuuttajakäytöt sekä logiikka/automaatiokomponentit
 6. tietokoneet, taajuusmuuttajat, logiikkapiirit, automaattiset työstökoneet
 7. pienelektroniikan laitteet (mikrot, kelloradiot yms.)
 8. jääkaappipakastimien kompressorit jäävät ”jurraamaan” katkojen jälkeen

Laiterikoista yhtiöt raportoivat saaneensa palautetta jonkin verran (yleensä yksittäisiä tapauksia vuodessa) seuraavien laitteiden osalta:

1. virtalähteet
2. ohjainkortit
3. automaatiolaitteet
4. elektroniikkaa sisältävät kodinkoneet
5. vanhat elektroniikkalaitteet
6. yksityisasiakkailta korvaushakemuksia tulee kaikesta mahdollisesta verkkosähköön kytketystä: tietokone, televisio, ilmalämpöpumppu, pakastin, jääkaappi, kiuas jne.

Näistä todennettuja tapauksia oli ainoastaan yhdellä yhtiöllä laiteryhmistä 1-3.

Vastausten perusteella usein jää epäselväksi, mistä laitteen rikkoutuminen tosiasiassa on aiheutunut, ts. ei voida osoittaa laiterikon aiheutuneen jälleenkytkennästä tai sähkökatkosta. Yksi yhtiö ilmoitti yleisen ohjeistuksen olevan, että ensisijaisesti korvausta tulee hakea kotivaikutuksesta ja siten hakemusmäärä verkonhaltijan suuntaan on rajallinen.



Kuva 4.5. Esimerkkejä jälleenkytkentöjen aiheuttamista maalämpöpumppujen häiriöistä.

Vastausten perusteella asiakaspalautteiden dokumentointikäytännöt vaihtelevat verkkoyhtiöiden välillä. Kyselyyn vastanneissa yhtiöissä oli käytössä seuraavanlaisia käytäntöjä:

- kirjataan kontaktiksi asiakastietojärjestelmään (yleisin tapa, käytössä 8 yhtiössä)
 - joillain yhtiöillä oli näissä lisäksi käytössä jaottelu vahingonkorvaus- tai sähköntaakontakteihin, jälleenkytkennöille ei kuitenkaan ollut erillistä kontaktiryhmää eikä erottelu laitehäiriöiden ja -rikköjen tai aiheuttajan perusteella ollut mahdollista
 - palaute on voitu saada erillisellä lomakkeella, puhelimitse tai sähköisesti
 - kirjaus järjestelmään asiantuntijan toimesta, jollain yhtiöllä oli lisäksi käytössä ohjelmistorobotti
- kirjataan laatu- ja turvallisuusjärjestelmään
- kirjataan M-files dokumentoinnin hallintajärjestelmään
- kirjataan taulukkoon
- ei kirjata mihinkään järjestelmään, sähköpostit jäävät sähköposteihin talteen (4 yhtiössä)
- muutamalla yhtiöllä oli lisäksi oma taulukko tai vastaava, johon vahingonkorvaushakemukset kirjataan kootusti.
- korvausvaatimukseen liittyen yhdellä yhtiöllä oli tarkennus, että korvausvaatimuksista dokumentoidaan sellaiset, jotka etenevät korvauskäsittelyprosessiin, eli sellaisten rekламаatioiden/korvausvaatimusten tietoja ei kirjata tarkemmin ylös, missä on selvä ettei sähkötoimituksen virhettä ole tapahtunut (verkkoyhtiö ei korvausvelvollinen). Nämä hoituvat pääosin keskustelulla asiakkaan kanssa. Korvauskäsittelyprosessiin etenevistä tapauksista tallennetaan korvausvaatimuslomake, jossa asiakas on täyttänyt korvausvaatimuksen laitteet yms. eriteltynä.

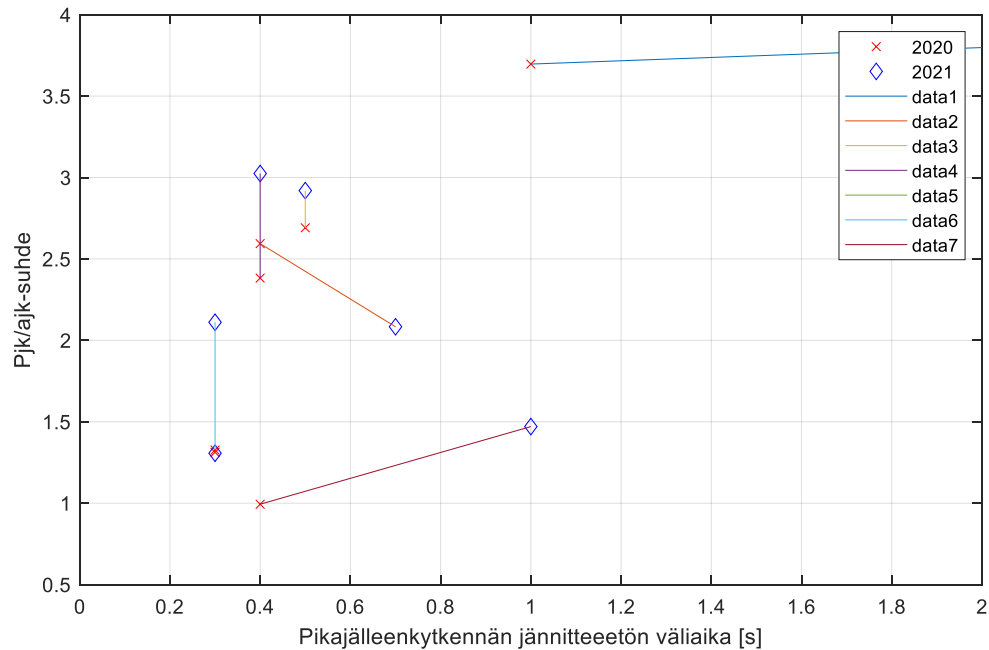
Ainakin yksi yhtiö raportoi, että merkittävää teollisuutta sisältävillä lähdoilla jälleenkytkentöjä ei käytetä ja toinen yhtiö kertoi ilmajohtoverkossa tarkastelevansa teollisuutta sisältävillä lähdoilla jälleenkytkentäasetteluita tarpeen mukaan.

4.6 Pikajälleenkytkentöjen selvittämät viat

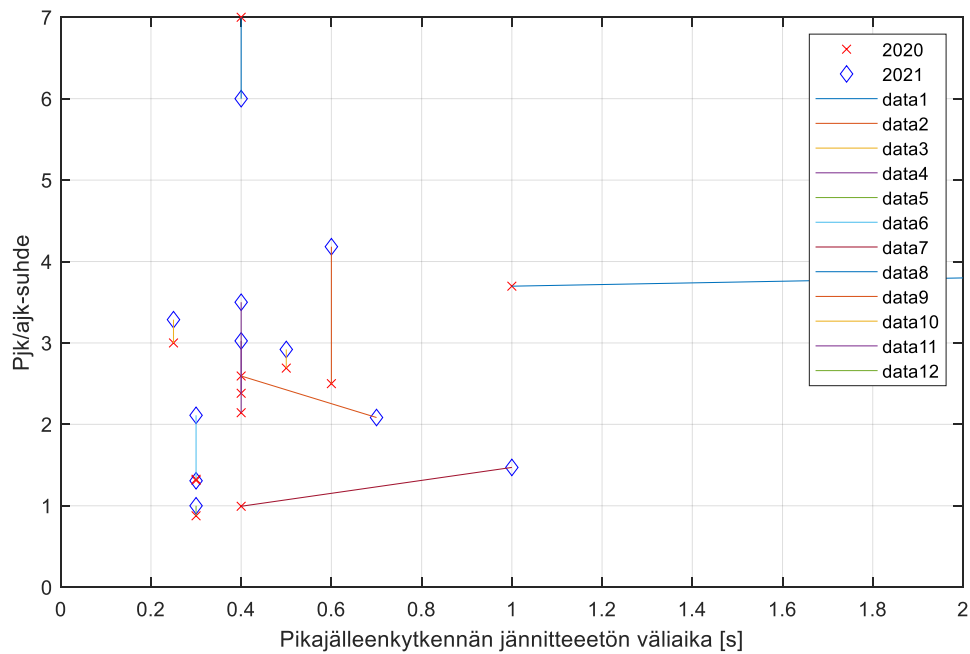
Kyselyssä pyydettiin verkkoyhtiöiltä myös kahden viimeksi kuluneen vuoden (2020 ja 2021) tiedot pika- ja aikajälleenkytkennöistä ja pysyvistä vioista. Vastausten perusteella tutkittiin pikajälleenkytkennällä ja aikajälleenkytkennällä poistuneiden vikojen suhdetta pikajälleenkytkennän jännitteettömän väliajan funktiona. Pikajälleenkytkennässä 1 sekunnin jännitteetön väliaika on tutkitulla 2 vuoden tarkastelujaksolla ollut käytössä lähes koko verkossa kahdella yhtiöllä, joista toinen siirtyi siihen tarkastelujakson aikana 0,4 sekunnin jännitteettömästä väliajasta ja toinen siirtyi siitä tarkastelujakson aikana FLIRin käyttöön. Kuvassa 4.6 on esitetty pjk/ajk-suhteen kehitys tarkastelujaksolla jälleenkytkennän jännitteetön väliajan funktiona maaseutuverkkoyhtiöissä, joilla oli ilmajohtoverkkoa vähintään 500 km. Kuvassa 4.7 on vastaavat kuvaajat kaikkien yhtiöiden osalta, joilla pikajälleenkytkentä oli käytössä merkittävässä osassa verkkoa. Jos yhtiöllä on ollut käytössään useampia pjk:n jännitteettömiä väliaikoja, kuvaajaan on otettu niiden aritmeettinen keskiarvo. Kuten kuvista nähdään, useimmilla yhtiöillä pjk:n onnistumistodennäköisyys on vuonna 2021 ollut ainakin jonkin verran vuotta 2020 parempi, vaikka muutoksia jälleenkytkennän jännitteettömään väliaikaan ei olisi tehtykään.

Kuvat kuitenkin viittaisivat jossain määrin siihen, että pidempi jälleenkytkennän jännitteetön väliaika parantaisi jonkin verran jälleenkytkennän onnistumistodennäköisyyttä. Pidempää jännitteetöntä väliaikaa käyttäneillä yhtiöillä pjk:n onnistumistodennäköisyys on ollut keskimäärin jonkin verran parempi. Jännitteettömään väliaikaan on tehnyt tarkastelujaksolla muutoksia koko verkkoon tai merkittävään osaan verkkoa varmuudella kaksi yhtiötä, kuvassa data 1 (1 s pjk -> FLIR 35-45 s) ja data 7 (0,4 s pjk -> 1 s pjk) ja näillä molemmilla pjk:n onnistumistodennäköisyys on parantunut. Kolmannella muutoksia tehneellä yhtiöllä (data 2) muutos (0,3-0,5 s

pjk -> 0,7 s pjk) on vastauksen perusteella ilmeisesti ajoittunut useammalle vuodelle ja vastauksesta ei ilmennyt kuinka suurta verkon osaa muutos on koskenut tällä tarkastelujaksolla. Tämän yhtiön tapauksessa pjk:n onnistumistodennäköisyys on pienentynyt.



Kuva 4.6. Pikajälleenkytkennällä ja aikajälleenkytkennällä poistuneiden vikojen suhde pikajälleenkytkennän jännitteetön väliajan funktiona vuosina 2020 ja 2021 maaseutuverkko-yhtiöissä, joiden ilmajohtopituus ≥ 500 km.



Kuva 4.7. Pikajälleenkytkennällä ja aikajälleenkytkennällä poistuneiden vikojen suhde pikajälleenkytkennän jännitteetön väliajan funktiona kaikissa kyselyyn vastanneissa yhtiöissä, joilla pikajälleenkytkentä oli käytössä.

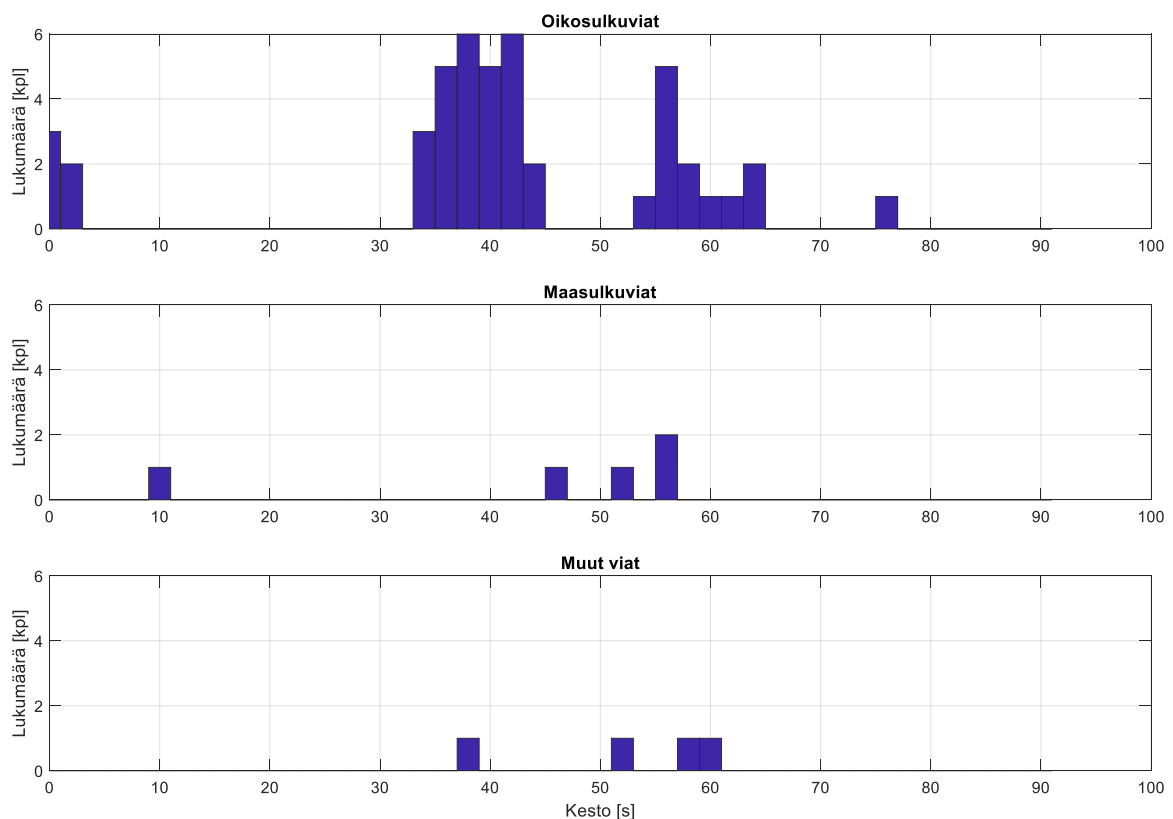
Pikajälleenkytkennän onnistumistodennäköisyyteen vaikuttavat monet tekijät ja nyt kun esim. verkkorakenteet muuttuvat nopeassa tahdissa ja sääoloissa vuosittaiset vaihtelut ovat olleet suuria, kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä näistä on kuitenkin vaikea tehdä.

5. VIKATILASTOJEN JA HÄIRIÖTALLENTEIDEN ANALYSOINTI

Jälleenkytkentöihin ja jännitekuoppiin liittyviä vikatilastoja kerättiin Vaasan Sähköverkko Oy:n yhdeltä sähköasemalta noin vuoden ajalta ja häiriötallenteita Elenia Oy:n kahdelta sähköasemalta (niiltä sähköasemilta, jotka syöttivät luvussa 6 käsiteltyjä asiakasmittauskohteita)

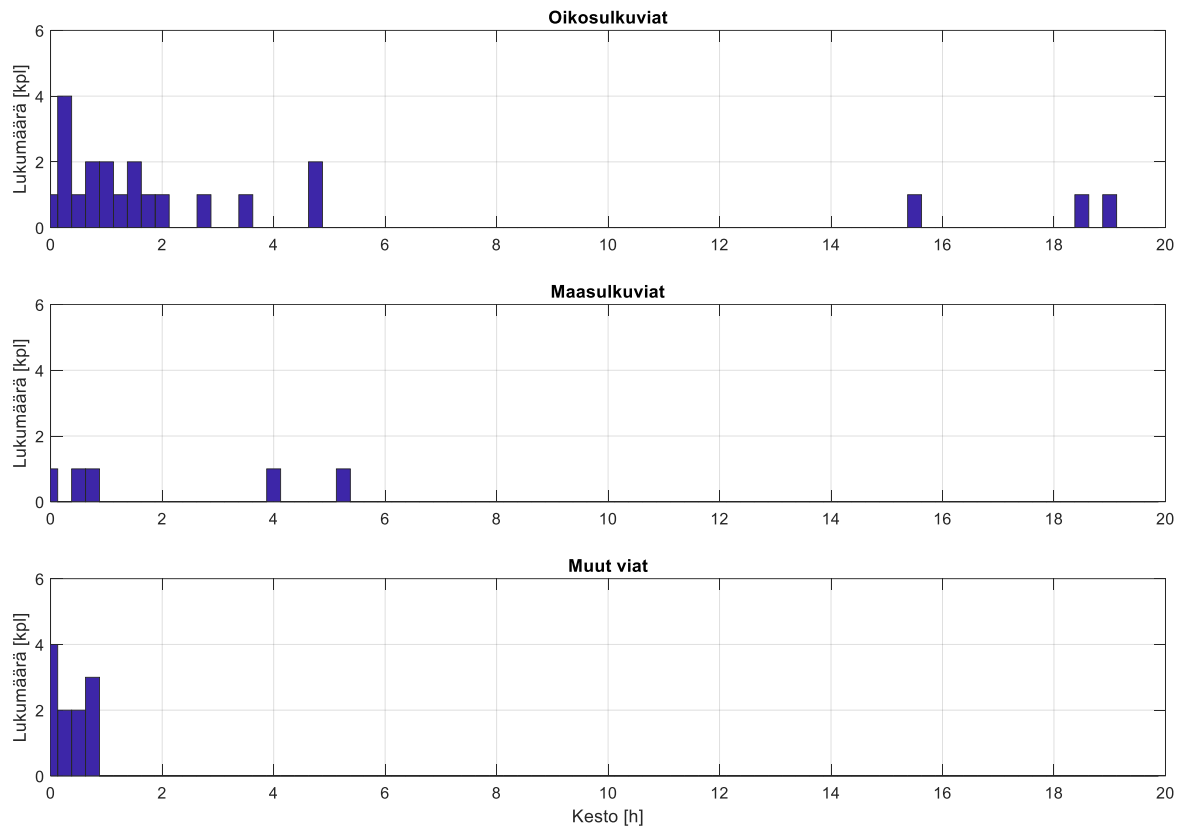
5.1 Jälleenkytkentöjen ja jännitekuoppien tilastollinen tarkastelu

Jälleenkytkentöihin ja jännitekuoppiin liittyviä vikatilastoja kerättiin noin vuoden ajalta 3.11.2020...10.11.2021 Vaasan Sähköverkko Oy:n yhdeltä sähköasemalta. Aseman koko 20 kV verkon pituus on noin 208 km, josta avojohtoa on noin 167 km, PAS-johtoa 5,5 km ja loput maa-, vesi- tai ilmakaapelia. Verkko on sammutettu. Vuonna 2020 asemalla oli vielä käytössä pikajälleenkytkentä, mutta tammikuun alkupuolella on siirrytty käyttämään FLIR:iä. Viimeinen pikajälleenkytkentä on ollut 8.1.2021 ja ensimmäinen FLIR:n tekemä kytkentä 12.1.2021. Myös FLIR:n tekemät jälleenkytkennät (yhteensä 48 kpl) rekisteröityvät pikajälleenkytkentöinä, mutta kestoajan perusteella ne ovat erotettavissa perinteisistä jälleenkytkennöistä (jännitteetön väliaika tässä tapauksessa 1 s). Pikajälleenkytkentöjä tarkastelujakson alkuun (3.11.2020...8.1.2021), jolloin FLIR ei vielä ollut käytössä, osui 6 kpl ja aikajälleenkytkentöjä 1 kpl eli jälleenkytkentöjen selvittämiä vikoja oli tarkastelujaksolla yhteensä 55 kpl. Kuvassa 5.1 on esitetty pj:ksi rekisteröityneiden kytkentöjen jännitteettömien väliaikojen jakaumat.



Kuva 5.1. Tarkastellun sähköaseman pikajälleenkytkentöjen (mukaan lukien FLIR:n tekemät kytkennät) jännitteettömien väliaikojen kestot eri vikatyypeissä yhden vuoden ajalta. Normaalit jälleenkytkennät tarkastelujakson alussa näkyvät ylimmän osakuvan vasemmassa laidassa, muut jälleenkytkennät ovat FLIR:n tekemiä onnistuneita kokeilukytkentöjä.

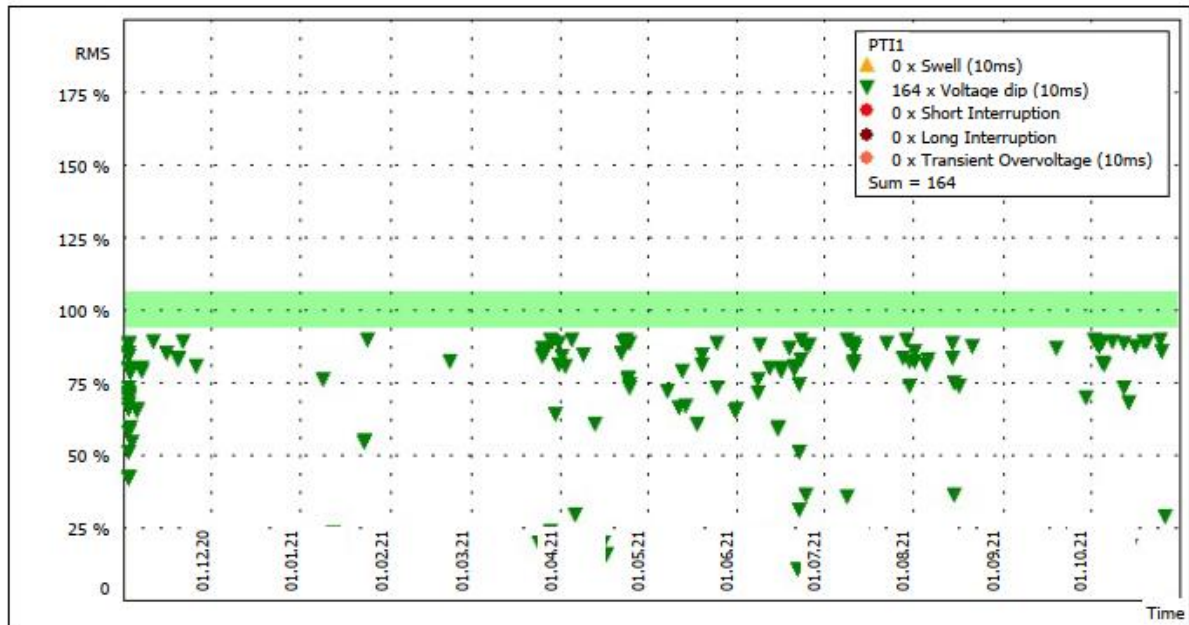
Kuvassa 5.2 on esitetty tarkastelujakson pysyvien vikojen (yhteensä 41 kpl) kestoajat vikatyypeittäin. Tarkastelujaksolle osui yksi pahempi myrsky marraskuun alussa 2020, jolloin erityisesti saaristo-kohteiden vikojen korjaus oli tavallista haasteellisempaa. Pisimmät keskeytysajat ovat tähän myrskyyn liittyviä.



Kuva 5.2. Tarkastellun sähköaseman pysyvien vikojen kestoajat vikatyypeittäin.

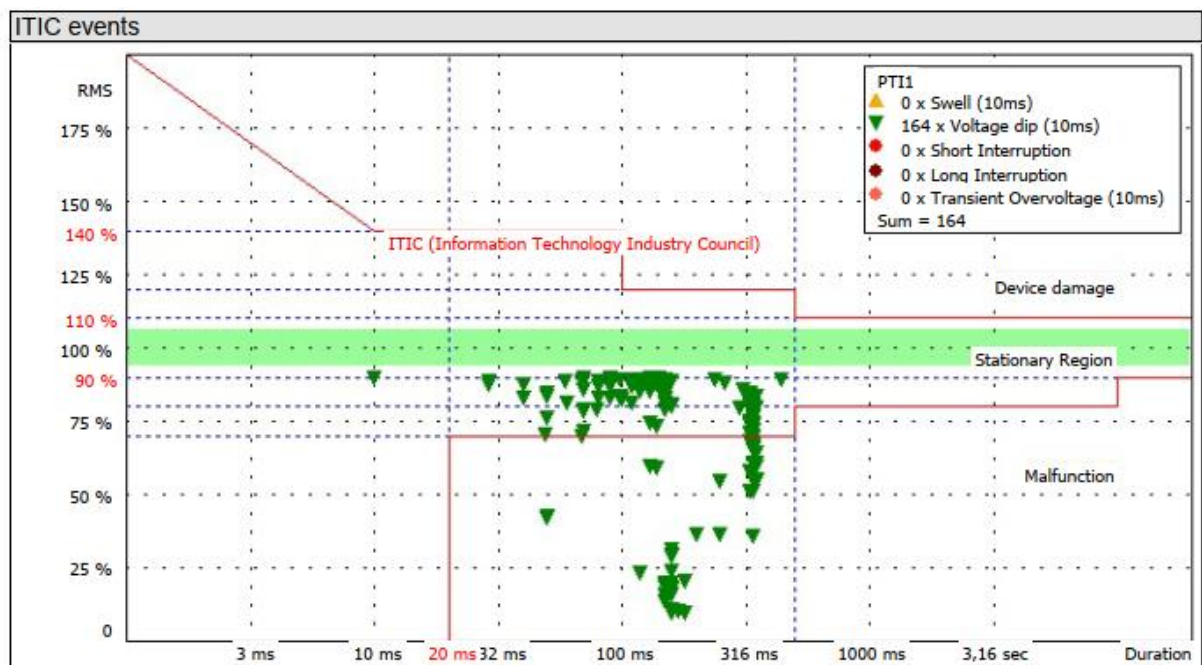
Jännitekuoppatietoja kerättiin yhdeltä sähköasemalta, jonka 20 kV syöttökennossa on Multirelin kiinteästi asennettu sähkönlaatuanalysointilaite keräämässä tietoa SFS-EN 50160:ssa määritellyistä sähkönlaatusuureista. Koska laite on kytketty sähköaseman syöttökennoon, keskeytyksiä ei ole rekisteröitynyt (asemaa syöttävässä 110 kV verkossa ei ole ollut keskeytyksiä). Kerättyjen jännitekuoppien ajallinen jakauma on esitetty kuvassa 5.3 ja kesto-aika-jännönsjännitejakauma kuvassa 5.4. Kuten kuvista nähdään, jännitekuoppia (yhteensä 164 kpl) on lähes kaksinkertainen määrä keskeytyksiin (yhteensä 96 kpl) verrattuna. Pikajälleenkytkentöjen (mukaan lukien FLIR:n tekemät kytkennät) ja aikajälleenkytkentöjen selvittämiä vikoja on tarkastelujaksolla yhteensä 55 kpl. Nämä viat ovat oletettavasti aiheuttaneet vain yhden jännitekuopan, joten pysyviin vikoihin (yhteensä 41 kpl) liittyviä jännitekuoppia olisi tarkastelujaksolla yhteensä 109 kpl eli noin 2,7 jännitekuoppaa/vika.

Kuten kuvasta 5.3 nähdään, jännitekuoppia on runsaasti huhti-toukokuussa ja lokakuussa, jolloin on lintujen kevät ja syysmuutto sekä kesällä, jolloin ukkoset aiheuttavat ilmastollisia ylijännitteitä. Kuvassa näkyy myös marraskuun alun 2020 myrskyn aiheuttamat jännitekuopat.



Kuva 5.3. Vaasan Sähköverkko Oy:n yhden sähköaseman jännitekuoppien ajallinen jakauma vuoden ajalta.

Kuvassa 5.4 jännitekuopat on esitetty kestoaja- jännösjännitejakaumana, johon on piirretty myös ITIC-raja-arvot. Kuten kuvasta nähdään, huomattava osa kuopista on sellaisia, jotka todennäköisesti aiheuttaisivat toimintahäiriöitä laitteille. Jännitekuopista arviolta noin neljännes...viidennes näyttäisi olevan kestoaltaan ja syvyydeltään sellaisia, jotka ITIC-määrittelyn mukaan voivat aiheuttaa laitteiden toimintahäiriöitä.



Kuva 5.4. Vaasan Sähköverkko Oy:n yhden sähköaseman jännitekuoppien kestoaja-jännösjännitejakauma.

5.2 Häiriötallenteiden analysointi

Häiriötallenteita kerättiin Elenia Oy:n kahdelta sähköasemalta, jotka syöttivät luvussa 6 käsitellyjä asiakasmittauskohteita. Tässä on käsitelty esimerkkinä häiriötallenteita kahdesta eri kohteesta, joista toisessa jälleenkytkennän jännitteetön väliaika on 300 ms (luvussa 6 käsitellyn teollisuuskohde 1:n lähtö) ja toisessa 1 s (luvussa 6 käsitellyn teollisuuskohde 2:n lähtö). Muita esimerkkejä häiriötallenteista em. sähköasemien eri lähdöiltä on koottu liitteeseen E. Tähän lukuun ja liitteeseen on koottu pääasiassa oikosulkuvikoja, jotka ovat pääosin 2-vaiheisia, mutta mukana on myös muutamia maasulkuja, oikosulkuja maakosketuksella ja jännitekuoppia.

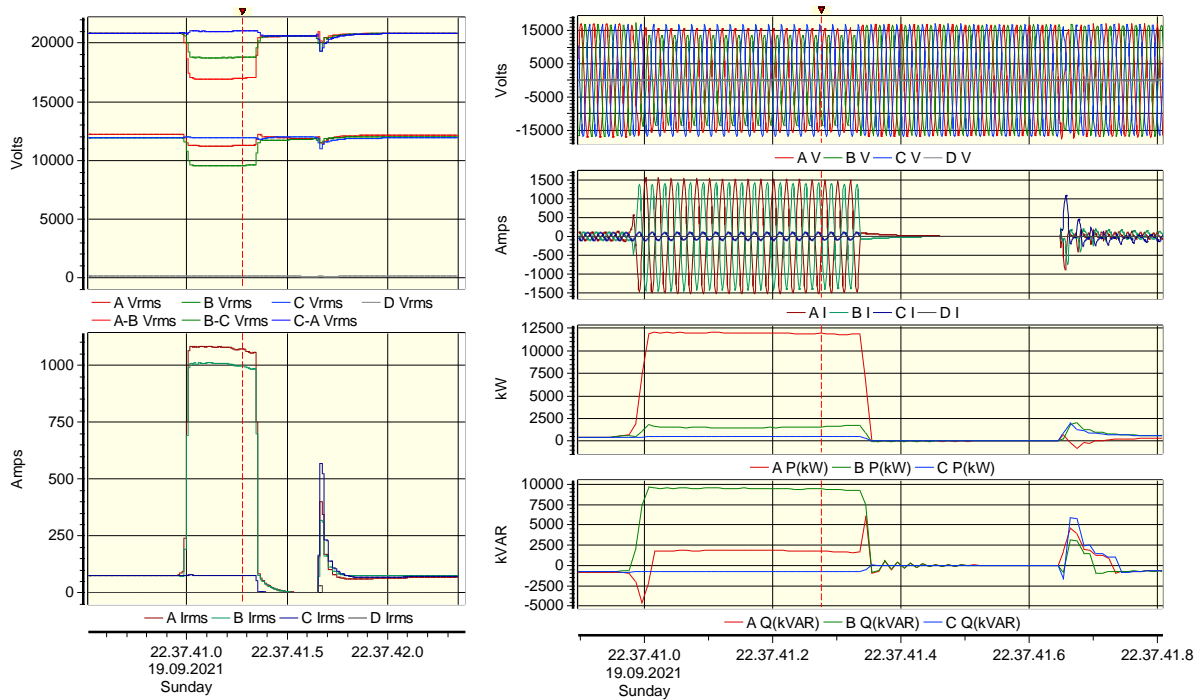
Tallenteista tarkasteltiin vaihekohtaisesti lähinnä pätötehojen muutoksia jälleenkytkentöjen yhteydessä ja jälleenkytkentöjä edeltävien jännitekuoppien syvyyttä ja luonnetta. Tässä pienessä otoksessakin näytti olevan melko suuria vaihteluita kuormien pudotuksissa muutamasta prosentista lähes 40 %:iin ilmeisesti lähdön kulloistenkin kuormien luonteesta riippuen. Yksittäisen lähdön tapauksessakin pätötehon pudotus saattoi vaihdella huomattavasti mm. vuorokauden ajasta riippuen. Teollisuuskohde 1:n lähdön tapauksessa kuormat jopa hieman kasvoivat vaiheissa L2 ja L3. Osa pudonneista kuormista voi palautua automaattisesti kymmenien sekuntien tai vasta useiden minuuttien kuluttua, kuten luvun 7 laboratoriokeista ilmenee.

Muutenkaan häiriötallenteisiin perustuvat tehotarkastelut ennen ja jälkeen pjk:n jännitteettömän väliajan pidentämisen (0,3 s -> 1 s) eivät olisi olleet tutkittujen kohteiden lähtöjen osalta mahdollisia, koska teollisuuskohde 1:tä ja maatalouskohdetta syöttävällä sähköasemalla häiriötallenteiden pituus jäi muutoksen jälkeen sen verran lyhyeksi, että tehotarkastelut jännitteen paluun jälkeen eivät olleet mahdollisia ja teollisuuskohde 2:ta syöttävältä sähköasemalta häiriötallenteita oli saatavissa vasta uudelta releistyksestä, jolla 0,3 s jännitteetöntä väliaikaa ei enää käytetty.

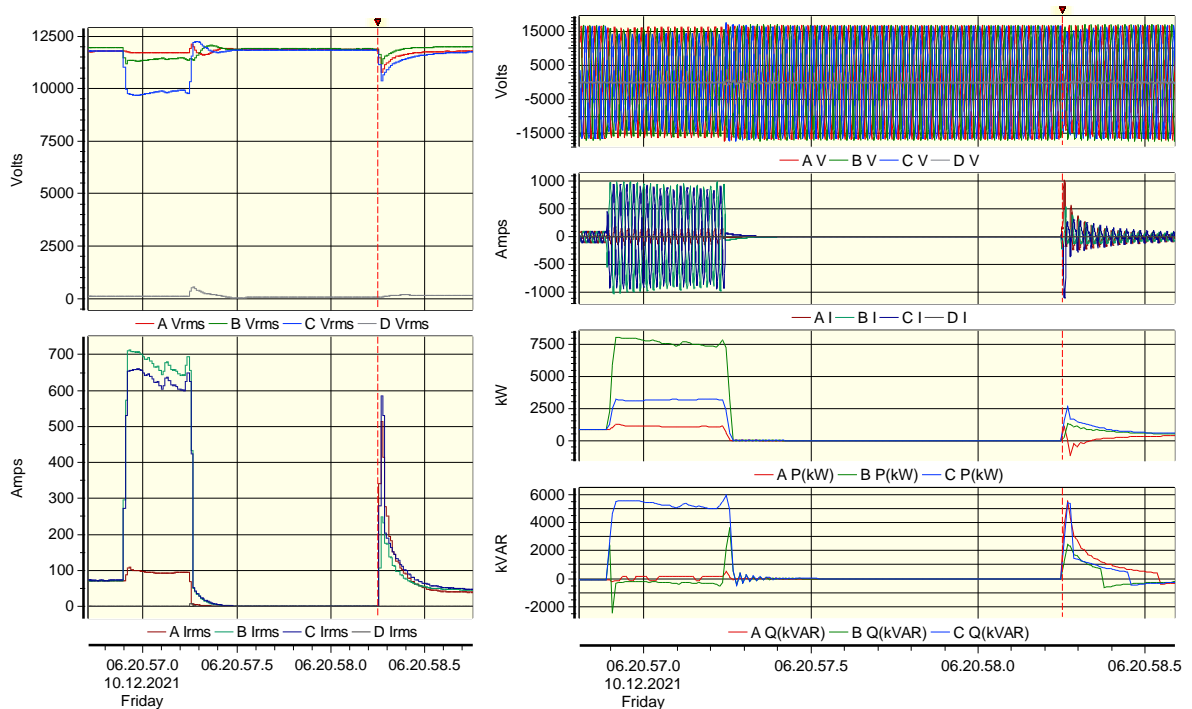
Jälleenkytkentää edeltävän jännitekuopan kesto aika riippuu suojareiden laukaisuhidastusten pituudesta ("polttoajoista"). Jännitekuopan syvyyteen vaikuttaa oikosulkuvioissa vikaimpedanssin lisäksi mm. sähköaseman ja vikapaikan välisen johto-osuuden impedanssi ja se, mikä on asemaa syöttävän verkon impedanssi. 2-vaiheisissa oikosuluissa yksi 20 kV verkon pääjännitteistä säilyy lähes normaalina tai jopa hieman kasvaa ja kaksi muuta alenevat vikapaikan etäisyydestä riippuen enemmän tai vähemmän. Pienjänniteverkon vaihejännitteet määräytyvät 20 kV verkon pääjännitteiden perusteella ja näin ollen esimerkiksi kuvan 5.5 kaltaisessa kJ-verkon 2-vaiheisessa oikosulkuvioissa kolmasosa pj-verkkoon kytketyistä 1-vaihelaitteista ei koe jännitekuoppaa, jos yksivaihelaitteet olisivat tasaisesti jakautuneena kolmelle vaiheelle.

Jännitteiden palautuminen pjk:n jännitteettömän väliajan jälkeen aiheuttaa suurehkon virtasysäyksen, jonka suuruuteen vaikuttavat mm. lähdön jakelumuntajat, suoraan verkkoon kytketyt epätahtimoottorit ja erilaiset tehoelektronikalla verkkoon liitetyt kuormat. Kytkevävirtasysäys aiheuttaa myös pienen ja lyhytkestoisen jänniteheilahduksen, jossa jäännösjännite voi olla jännitekuopan kriteerit täyttävä (kuten esimerkiksi kuvassa 5.5). Onnistuneestakin pjk:sta voi siis seurata 2 peräkkäistä jännitekuoppaa. Kytkevävirtasysäyksen aiheuttama kuoppa on kuitenkin niin lyhyt ja yleensä lievä syvyydeltäänkin, että sillä ei todennäköisesti ole suurta merkitystä useimpien kuormien toimintaan.

Jos pikajälleenkytkennän jännitteetöntä väliaikaa pidennetään, on tarkistettava myös suojareiden häiriötallentimien asetukset, jos halutaan, että häiriötallenne kattaa myös jännitteen palaamishetken ja jonkin aikaa sen jälkeisiä tapahtumia. Jos esimerkiksi 0,3 s jännitteetöntä väliaikaa käytettäessä jännitteen palaamisen jälkeen on tallennettu vain 0,7 s, johtaa jännitteettömän väliajan pidentäminen esimerkiksi 1 sekuntiin jo siihen, että jännitteen palaamishetki ja sen jälkeiset tapahtumat eivät enää tallennu. Pidemmällä jännitteettömällä väliajoilla kannattaa harkita erillisen tallenteen tekemistä viasta laukaisutapahtumiseen ja jännitteen palaamisesta.



Kuva 5.5. 2-vaiheinen oikosulku, onnistunut pjk, luvussa 6 käsitellyn teollisuuskohte 1:n lähtö. Pätötehon muutokset L1: 414.8 -> 354.1 kW (-60.7 kW eli -14.6 %), L2: 416.3 -> 430 kW (+13.7 kW eli + 3.3 %) L3: 414.0 -> 460.3 kW (+46.3 kW eli + 11.2 %) eli keskimäärin noin 35 %.



Kuva 5.6. 2-vaiheinen oikosulku, onnistunut pjk, luvussa 6 käsitellyn teollisuuskohte 2:n lähtö. Pätötehon pudotukset L1: 837.1 -> 548.6 kW (289 kW), L2: 860.5 -> 565.9 kW (295 kW) L3: 860.4 -> 579.9 kW (281 kW) eli keskimäärin noin 35 %.

6. SEURANTAMITTAUKSET ASIAKASKOHITEISSA

Hankkeessa tehtyjen seurantamittausten tarkoituksena oli kerätä tietoa jälleenkytkentöjen erityyppisille asiakkaille aiheuttamista haitoista ja lisäksi mittausten avulla kerätä tietoa erityyppisten kuormien käyttäytymisestä jännitekuoppien yhteydessä sekä pika- ja aikajälleenkytkentöjen yhteydessä. Jälleenkytkentöjen aiheuttamien haittojen selvittämiseksi ja sopivan mittauspisteen valitsemiseksi asiakkaan edustajia haastateltiin ennen mittalaitteiden asentamista.

6.1 Mittauskohteet

Mittauksia tehtiin kolmessa kohteessa, jotka kaikki sijaitsivat Elenia Oy:n verkossa. Kaksi kohteista oli teollisuuskohteita ja yksi oli maatalouskohde (sikala). Toisessa teollisuuskohteesta syöttävällä sähköasemalla tehtiin mittausten kuluessa releuudistus, jonka yhteydessä pikajälleenkytkennän jännitteetön väliaika muutettiin 0,3 sekunnista 1 sekuntiin. Releuudistuksen jälkeen asemalta saatiin myös häiriötallenteita. Vastaava muutos oli tehty myös kahta muuta kohdetta (jäljempänä mainittu teollisuuskohde 1 ja maatalouskohde) syöttävällä sähköasemalla mittausten loppupuolella. Tällä asemallakin pikajälleenkytkennän jännitteetön väliaika oli ensin 0,3 sekuntia ja mittausten loppuvaiheessa 1,0 sekuntia ja aikajälleenkytkennän jännitteetön väliaika oli 1 minuutti. Häiriötallenteita kerättiin asemalta sekä mittausten alku- että loppupuolella, jolloin jälleenkytkentöjä esiintyi eniten.

6.1.1 Teollisuuskohde 1

Teollisuuskohde 1 on metallipaja, jossa asiakkaan edustajien haastattelujen perusteella katsottiin kiinnostavimmaksi mitata hakelämpökeskusta syöttävän nousukeskuksen syöttöä, jossa kuormana on pääasiassa taajuusmuuttajakäyttöjä ja suoria moottorikäyttöjä ja muutama pieni hakkuriteholähde. Suurimpana jälleenkytkentöjen aiheuttamana häirtana lämpökeskuskella oli se, että savukaasuimurin taajuusmuuttaja ei palaudu automaattisesti toimintaan vaan se täytyy käydä kuittaamassa manuaalisesti paikan päällä. Ongelma näytti liittyvän nimenomaan pikajälleenkytkentöihin. Kohteessa on lisäksi rikkoutunut vuosien varrella joitain taajuusmuuttajia ja yksi UPS-laite. Taajuusmuuttajien toimittaja epäili laiterikkojen syyksi jälleenkytkentöjä. Tehtaan puolella merkittävimpänä jälleenkytkentöjen aiheuttamana häirtana on se, että vanhemmat hitsausrobotit täytyy katkon jälkeen kalibroida uudelleen ja manuaalisesti hakea ohjelmasta kohta, josta prosessia jatketaan.

6.1.2 Teollisuuskohde 2

Teollisuuskohteessa 2 kuormana on mm. hitsausrobotteja, manuaalisia hitsauslaitteita ja metallintyöstökoneita. Tässä kohteessa mitattavaksi otettiin koko teollisuushallin syöttö, mittalaitte kytkettiin hallia syöttäville 20/0,4 kV muuntamolle hallin lähtöön. Suurimpana jälleenkytkentöjen aiheuttamana häirtana oli se, että hitsausrobotin ohjelma keskeytyy ja robotti täytyy kalibroida uudelleen ennen kuin ohjelmaa voi alkaa uudelleen ajaa.

6.1.3 Maatalouskohde

Mitattavaksi maatalouskohteeksi valikoitui sikala, jossa sikalan ruokinta-automaatti menee katkojen seurauksena häiriötilaan, joka täytyy kuitata manuaalisesti. Häiriöistä tulee hälytys isännän kännykkään. Myös sikalan ilmanvaihto pysähtyy katkon ajaksi, mutta käynnistyy automaattisesti katkon jälkeen. Näistäkin häiriöistä tulee hälytys isännän kännykkään. Pidempien katkojen varalta kohteessa on traktorikäyttöinen varavoimakone. Pitkiä katkoja on ollut tässä

kohteessa niin vähän, että investointia automaattisesti käynnistyvään kiinteään varavoimaan ei ole katsottu kannattavaksi.

Mittaus kytkettiin jälleenkytkennöistä häiriintyvän ruokinta-automaatin syöttöön. Ruokinta-automaatissa on ohjauslogiikka, suoria moottorikäyttöjä ja paineilmakompressori. Ruokintaa ohjaava tietokone on eri syötössä ja UPS-varmennettu, joten sitä ei mitattu. Ruokinta-automaatin kompressori oli rikkoutunut kerran (ei enää käynnistynyt jälleenkytkennän jälkeen).

6.2 Jännitteettömän väliajan vaikutus kuormien irtoamiseen verkosta

Jännitteettömän väliajan vaikutusta kuormien irtoamiseen verkosta on tarkasteltu tässä teollisuuskohte 2:n osalta, jossa ilmiötä oli mahdollista tarkastella kahdella eri tavalla:

Erityyppisissä vioissa:

- 2-vaiheisen oikosulkuvian tapauksessa, jossa pikajälleenkytkennän jännitteetöntä väliainaa edelsi jännitekuoppa, joka pidensi jännitehäiriön vaikutusaikaa ja teki sen luonteeltaan kaksiosaiseksi,
- maasulun yhteydessä, jossa pikajälleenkytkennän jännitteetöntä väliainaa ei edeltänyt jännitekuoppa ja
- jännitekuopassa, jossa alin vaihejännite oli noin 129 V

6.2.1 Kaksivaiheinen oikosulku ja pikajälleenkytkentä

Kuvissa 6.1 ja 6.2 on esitetty vaihejännitteiden ja virtojen aaltomuodot ja 10 ms välein lasketut 20 ms tehollisarvot sekä pätö- ja loistehot sekä jännite- ja virtaosoittimet jännitekuopan aikana yhdessä kaksivaiheisen oikosulun aiheuttamassa pikajälleenkytkennässä, jossa vika on poistunut jälleenkytkennän seurauksena. Kuten kuvasta nähdään, pikajälleenkytkennän jännitteetön väliaika kestää noin 300 ms, jos kriteerinä pidetään esimerkiksi monille hakkuriteholähteille ilmoitettua 100-240 V käyttöjännitealueen alarajaa. Jännitteetöntä väliainaa edeltävä epäsymmetrinen kuoppa, jonka kesto aika on vajaa 400 ms ja kaksi vaihejännitettä (L1, L3) putoaa 175-201 voltin välille ja kolmas (L2) 15-50 V välille.

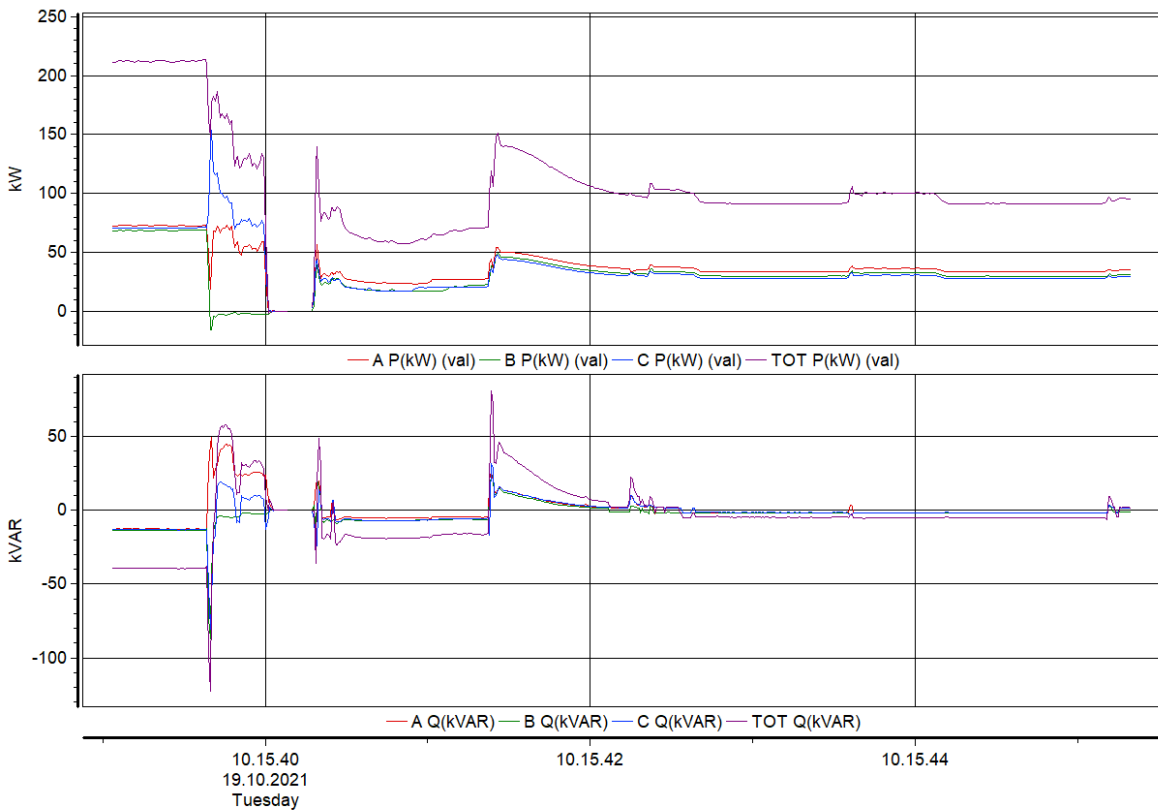
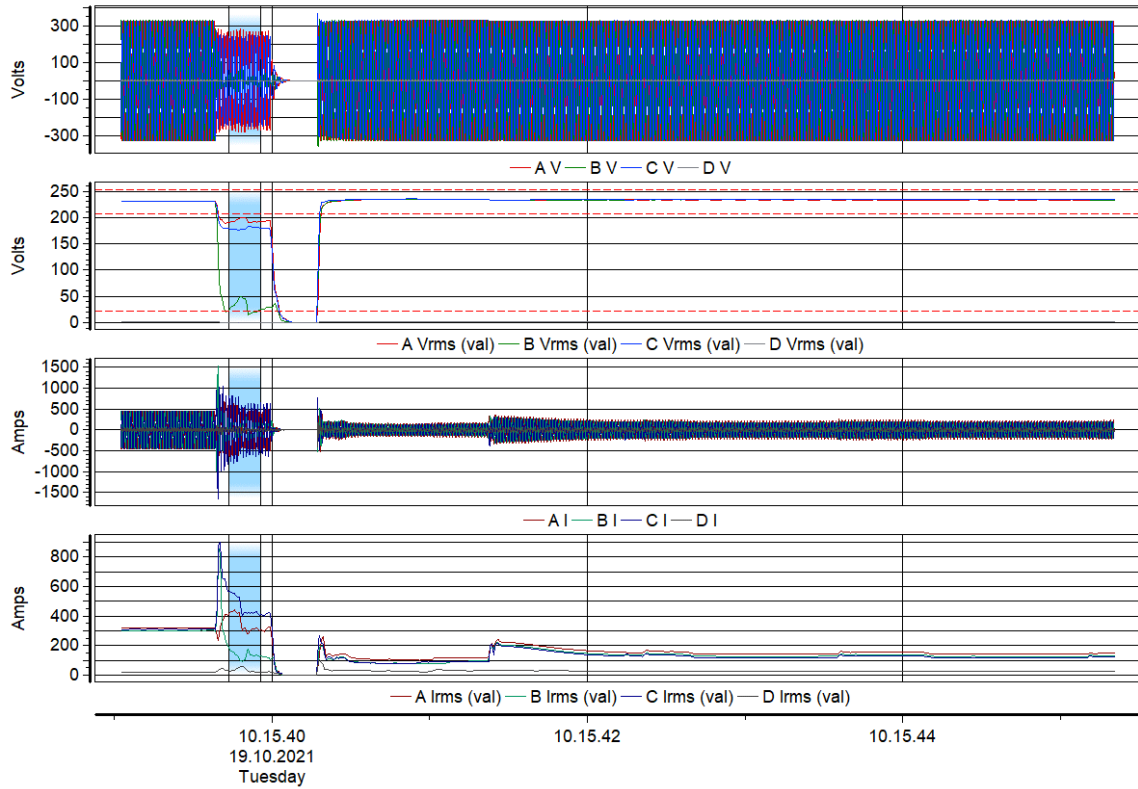
Kuten kuvasta nähdään, kuormien ottama virta kasvaa kuopan alussa vaiheessa L3 voimakkaasti noin 300 A:sta lyhytaikaisesti noin 900 A:iin ja laskee kuopan puoliväliin mennessä portaittain hieman yli 400 A:iin. Vaiheessa L1 virta kasvaa ensin pienen notkahduksen jälkeen noin 400 A:iin, mutta palaa sitten alkuperäiselle tasolle noin 300 A:iin. Vaiheen L2 (jossa jännite oli pienin) virta käy hetkellisesti noin 850 A:ssa, mutta laskee sitten 100-200 A välille.

Vaiheessa L2 pätöteho putoaa heti kuopan alussa käytännössä noltaan eli yksivaiheiset kuormat ilmeisesti irtoavat verkosta ja kolmivaiheiset laitteet eivät enää ota juuri tehoa vaiheesta L2, jossa jännite on hyvin alhainen. Vaiheessa L3 pätöteho kasvaa kuopan alussa yli kaksinkertaiseksi, mutta palaa kuopan puoliväliin mennessä suunnilleen kuoppaa edeltävälle tasolle. Vaiheessa L1 pätöteho laskee kuopan puoliväliin paikkeilla 20-25 % kuoppaa edeltävää tasoa alemmas. Kolmivaiheisesta pätötehosta häviää kuopan puoliväliin mennessä näin ollen hieman yli kolmannes eli kolmivaihelaitteistakaan (joita kohteen kuormista todennäköisesti valtaosa on) suurin osa ei toimi vakiotehokuormina.

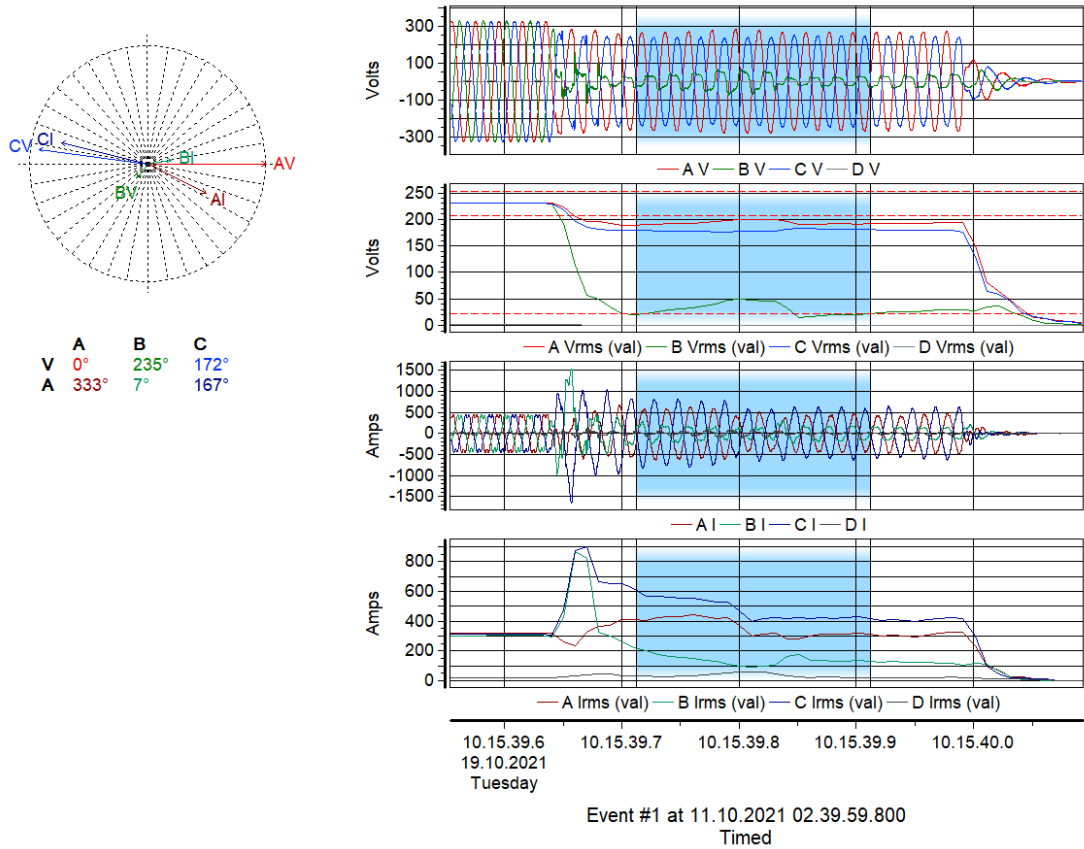
Pikajälleenkytkennän jännitteettömän väliajan alussa jännitteet laskevat kaikissa vaiheissa alle 100 ms:ssa noltaan ja jännitteen palautuessa kaikissa vaiheissa esiintyy virtapiikki ja kuormavirratt jäävät noin 100 A tasolle. Kuorman kolmivaiheinen kokonaispätöteho laskee häiriötä edeltävästä noin 212 kW:sta noin 60 kW:iin (noin 152 kW pudotus) ja kolmivaiheinen kokonaisloisteho noin -40 kvarista noin -19 kilovariin. Noin sekunnin kuluttua pätöteho nousee enimmillään noin 150 kW:iin ja asettuu sitten noin sekunnissa noin 100 kW tasolle. Samalla loisteho nousee hetkeksi muutamia kymmeniä kvar induktiiviselle puolelle, mutta asettuu sitten lähelle noltaa. Kuormien pätötehosta vajaa puolet näyttäisi siis palautuvan nopeasti jo parissa

sekunnissa. Osalla kuormista uudelleenkäynnistyminen voi kestää automaation ohjaamanakin huomattavasti pidempään, ja jos käynnistyminen edellyttää manuaalisia toimenpiteitä tai esimerkiksi hitsausrobottien tapauksessa uudelleenkaliibrointeja, uudelleenkäynnistys voi kestää pitkäänkin.

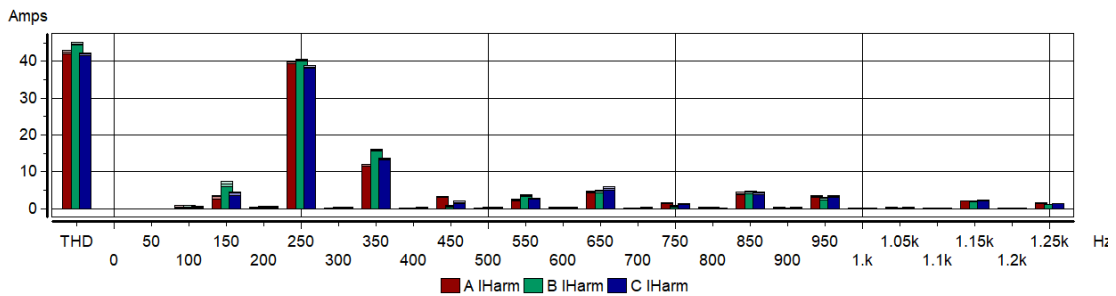
Kuvissa 6.3...6.4 on esitetty yliaaltojakaumat laskettuna standardin IEC 61000-4-7 mukaisesta 200 ms laskentaikkunasta normaalitilanteessa ennen vikaa, oikosulkuvian aiheuttaman jännitekuopan ajalta ja kolmelta ajan hetkeltä pikajälleenkytkennän jälkeen. Kuten kuvista nähdään hallitsevin 5. yliaaltovirta jää jälleenkytkennän jälkeen tapahtuvan kuormien palautumisen loppupuolellakin vielä noin kahdeksanteen osaan ja 7. yliaaltovirtakin noin viidenteen osaan jännitehäiriötä edeltäneeseen normaalitilaan verrattuna. Tämä viittaisi siihen, että suuri osa tehoelektroniikalla verkkoon liitetystä kuormista irtoaa verkosta.



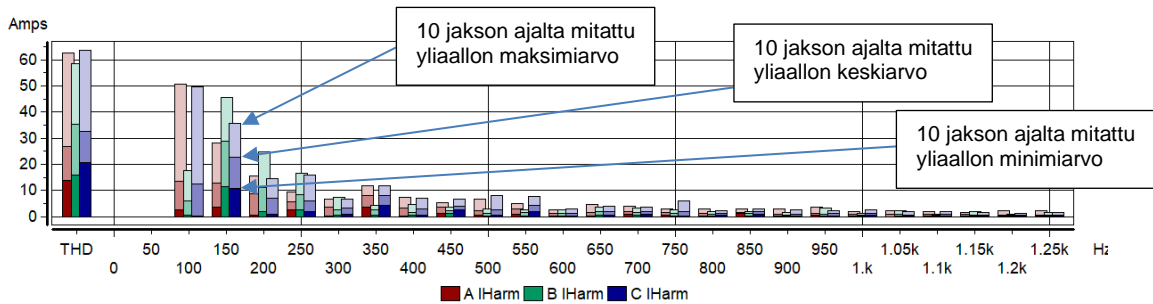
Kuva 6.1. Vaihejännitteiden ja -virtojen aaltomuodot ja 10 ms välein lasketut 20 ms tehollisarvot sekä vaihekohtaiset ja kolmivaiheiset kokonaispätö- ja kokonaisloistehot.



Kuva 6.2. Vaihejännitteiden ja -virtojen osoittimet oikeanpuoleisessa kuvassa vaaleansinisellä pohjalla merkityltä kohdalta määritettynä.

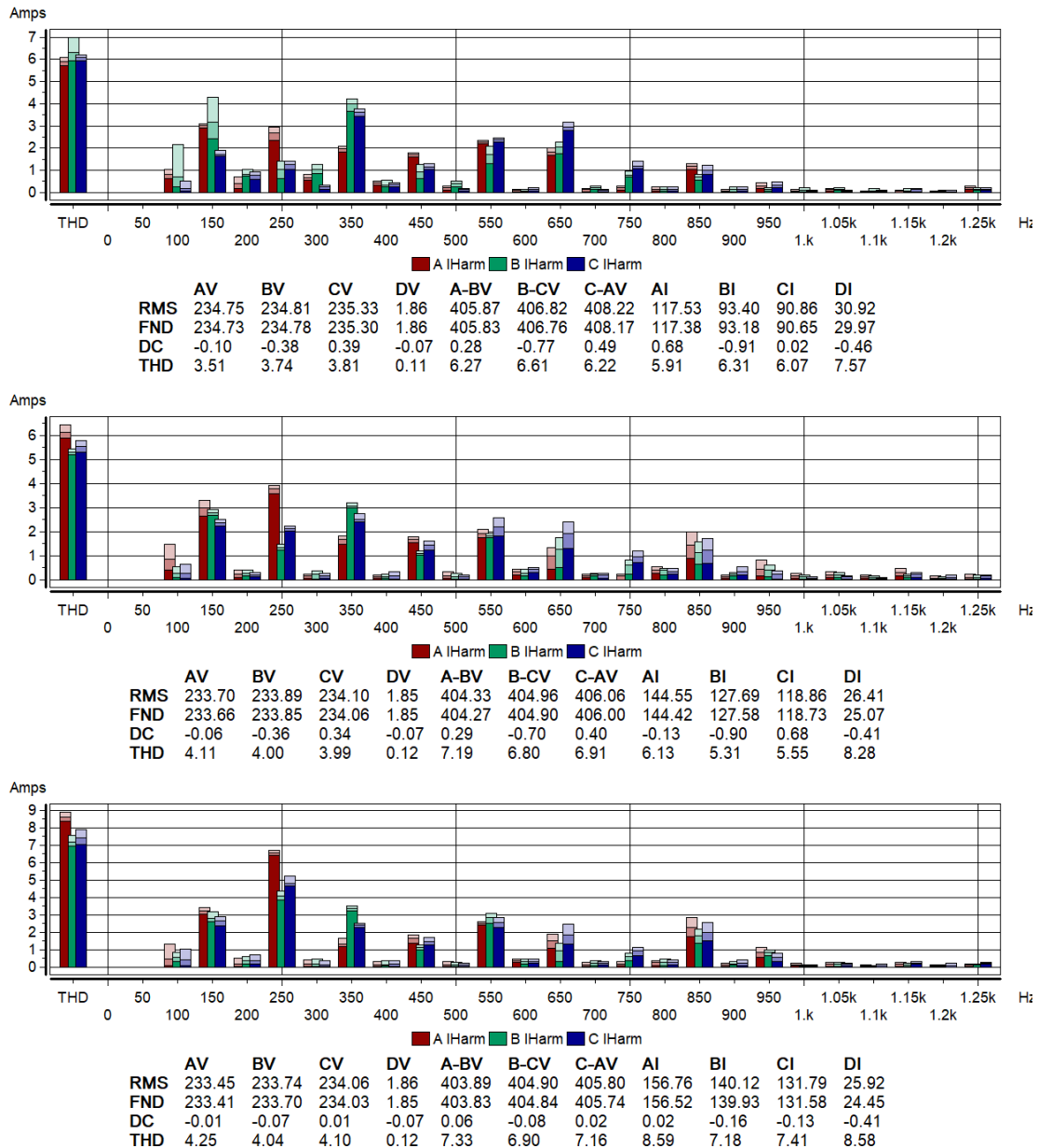


	AV	BV	CV	DV	A-BV	B-CV	C-AV	AI	BI	CI	DI
RMS	230.76	231.09	230.90	1.82	399.55	399.94	400.39	319.91	302.43	311.03	20.90
FND	230.72	231.05	230.87	1.81	399.48	399.87	400.33	317.07	299.11	308.20	14.90
DC	-0.01	-0.03	-0.03	-0.07	0.02	-0.00	-0.02	-0.23	-0.08	-0.08	-0.56
THD	3.94	4.38	4.22	0.17	7.31	7.35	6.91	42.50	44.71	41.92	14.63



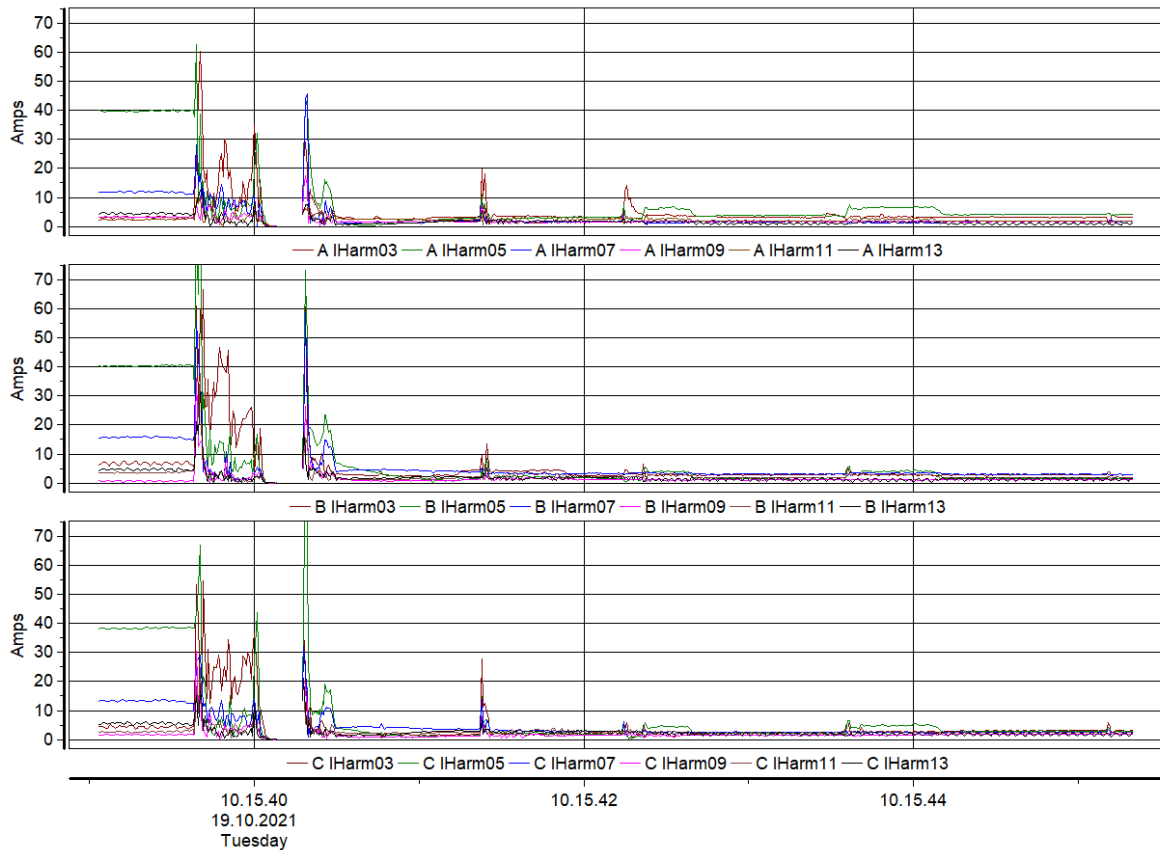
	AV	BV	CV	DV	A-BV	B-CV	C-AV	AI	BI	CI	DI
RMS	194.36	31.57	179.38	0.66	213.42	169.53	372.61	350.74	134.34	463.55	34.85
FND	194.25	29.71	179.15	0.62	212.81	168.45	372.45	348.98	127.42	461.89	33.07
DC	-0.08	0.02	-0.03	-0.07	-0.09	0.05	0.05	-4.64	-2.66	6.13	0.43
THD	6.32	9.84	8.63	0.19	14.38	17.37	11.05	26.90	35.41	32.55	10.41

Kuva 6.3. Vaihevirtojen yliaaltojakaumat ennen jännitekuoppaa ja sen aikana.



Kuva 6.4. Vaihevirtojen yliaaltojakaumat pikajälleenkytkennän jälkeen ajan hetkiltä noin 10:15:41.1, 10:15:43.0 ja 10:15:43.8

Kuvassa 6.5 on esitetty vaihevirtojen parittomat harmoniset ajan funktiona pikajälleenkytkentätapahtumaa ennen, sen aikana ja sen jälkeen. Eri vaiheiden yliaalloissa on jonkin verran eroja myös normaalijännitteiden aikana ennen vikaa ja pikajälleenkytkennän jälkeen. Kuvan oikeassa puoliskossa on nähtävissä vaiheen A osalta suurempia virtoja erityisesti 3. ja 5. yliaallon osalta, mikä voisi viitata esimerkiksi yksivaiheisiin tasasuuntaajiin ja sellaisia sisältävien kuormien käynnistymiseen.



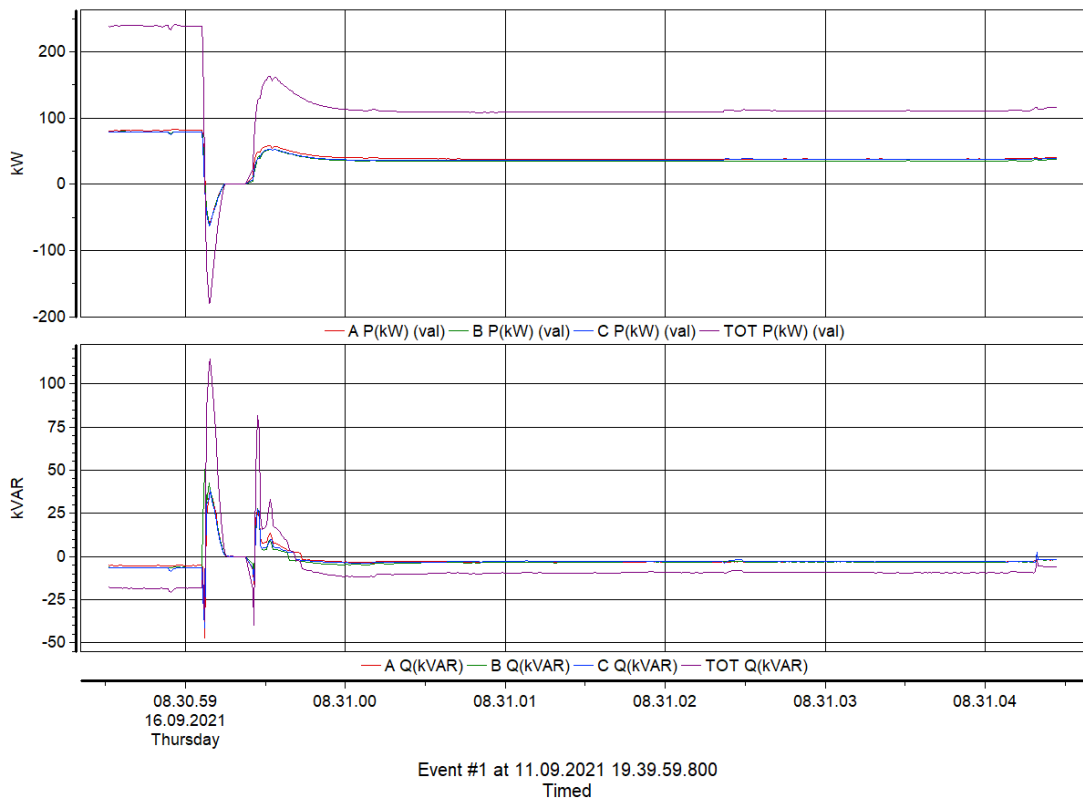
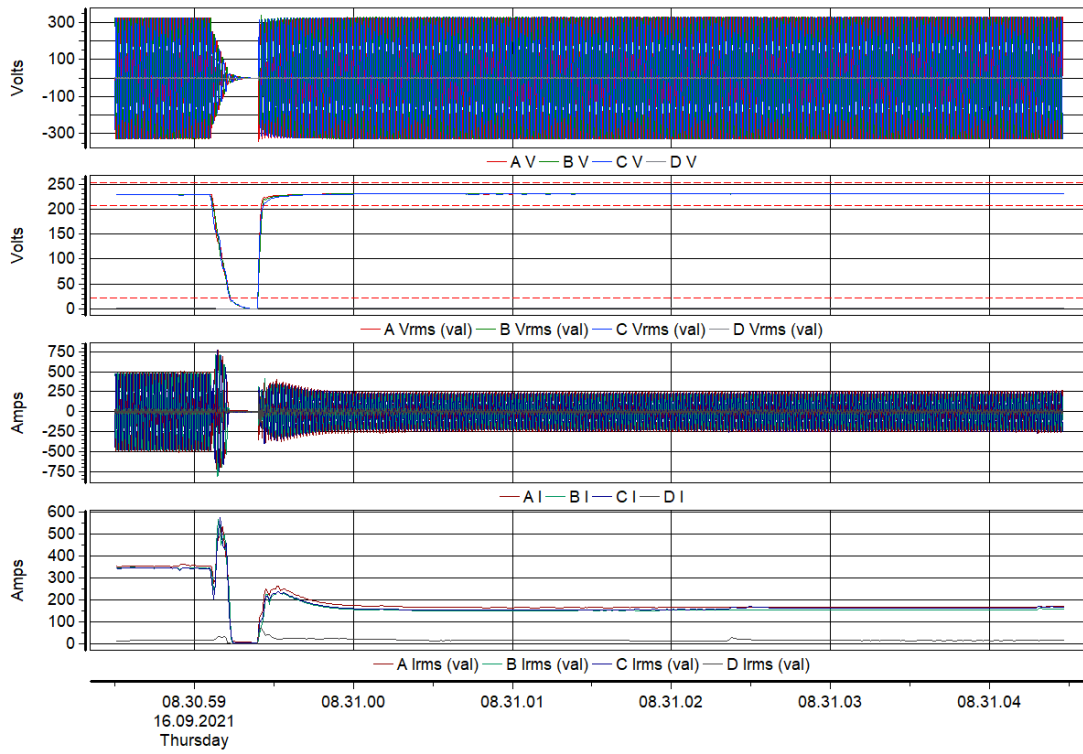
Kuva 6.5. Vaihevirtojen parittomat harmoniset ajan funktiona.

6.2.2 Maasulku ja pikajälleenkytkentä

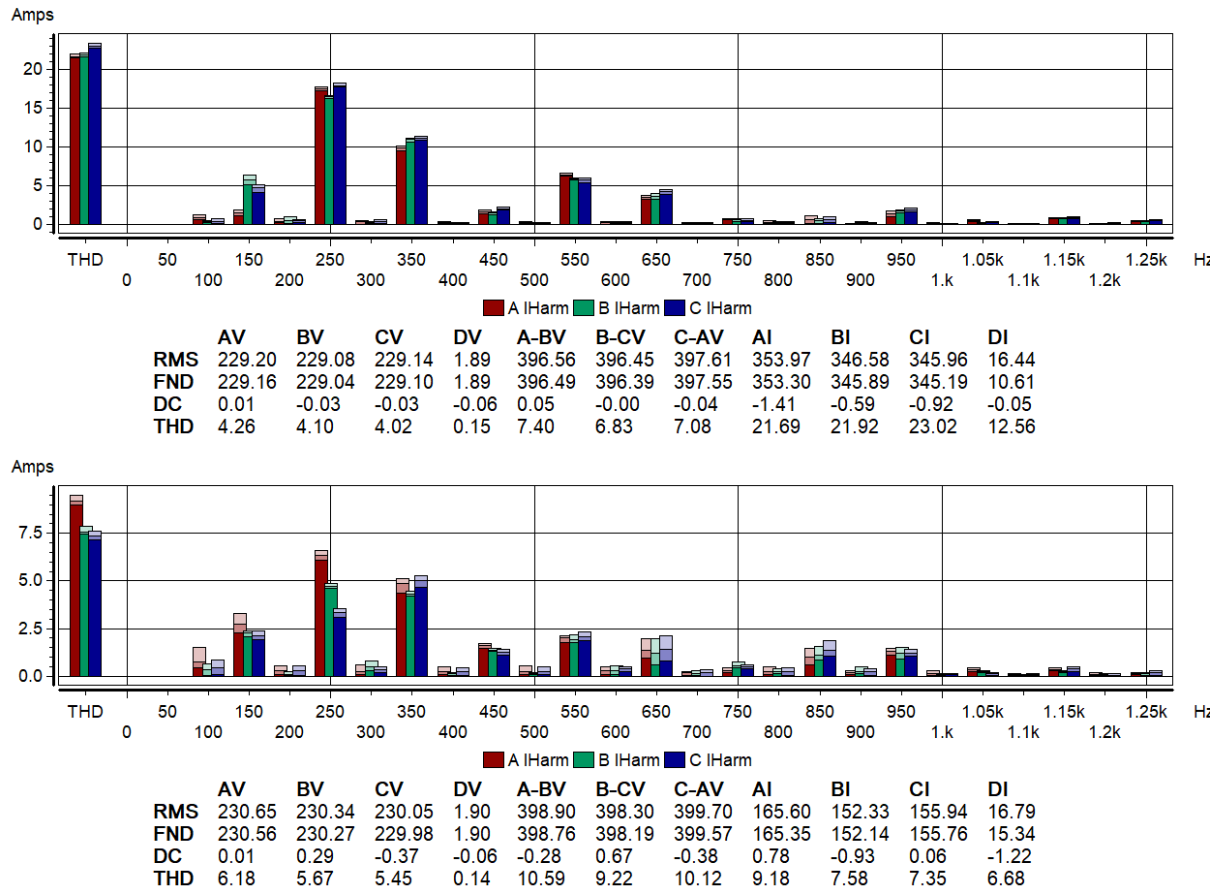
Kuvassa 6.6 on esitetty pikajälleenkytkentä, jonka on ilmeisesti aiheuttanut maasulku mitatulla johtolähdöllä. Tässä pikajälleenkytkentää ei edellä jännitekuoppa vaan pienjänniteverkon vaihejännitteet pysyvät muuttumattomina pikajälleenkytkennän alkuun saakka. Myös pikajälleenkytkennän jännitteettömän väliajan alussa tapahtuva jännitteen lasku on loivempi ja lineaarisempi kuin edellä esitettyssä kaksivaiheisessa oikosulussa.

Kuten kuvasta 6.6 nähdään, tässä tapauksessa kuormien kolmivaiheinen kokonaispäteho laskee vähemmän kuin kaksivaiheisen oikosulkuvian tapauksessa, noin 240 kW:sta noin 110 kW:iin (noin 46 %:iin alkuperäisestä) eli pudotusta on noin 130 kW. Kuormia irtoaa siis verkosta jonkin verran vähemmän kuin edellä esitetyn jännitekuopan ja pikajälleenkytkennän yhteydessä. Kolmivaiheinen kokonaisloisteho pienenee noin -18 kvarista noin -10 kvariin. Loistehossa on huomattava piikki positiiviseen suuntaan (huippu noin 115 kvar) ja pätehossa negatiiviseen suuntaan (huippu noin -179 kW) pikajälleenkytkennän jännitteettömän väliajan alussa.

Kuvassa 6.7 esitettyjen yliaaltojakaumien perusteella verkosta irtoaa melko paljon tehoelektronikalla verkkoon liitettyä kuormaa, koska esimerkiksi 5. yliaaltovirta pienenee noin kolmanneksen osan ja 7. yliaaltovirtakin noin puoleen.



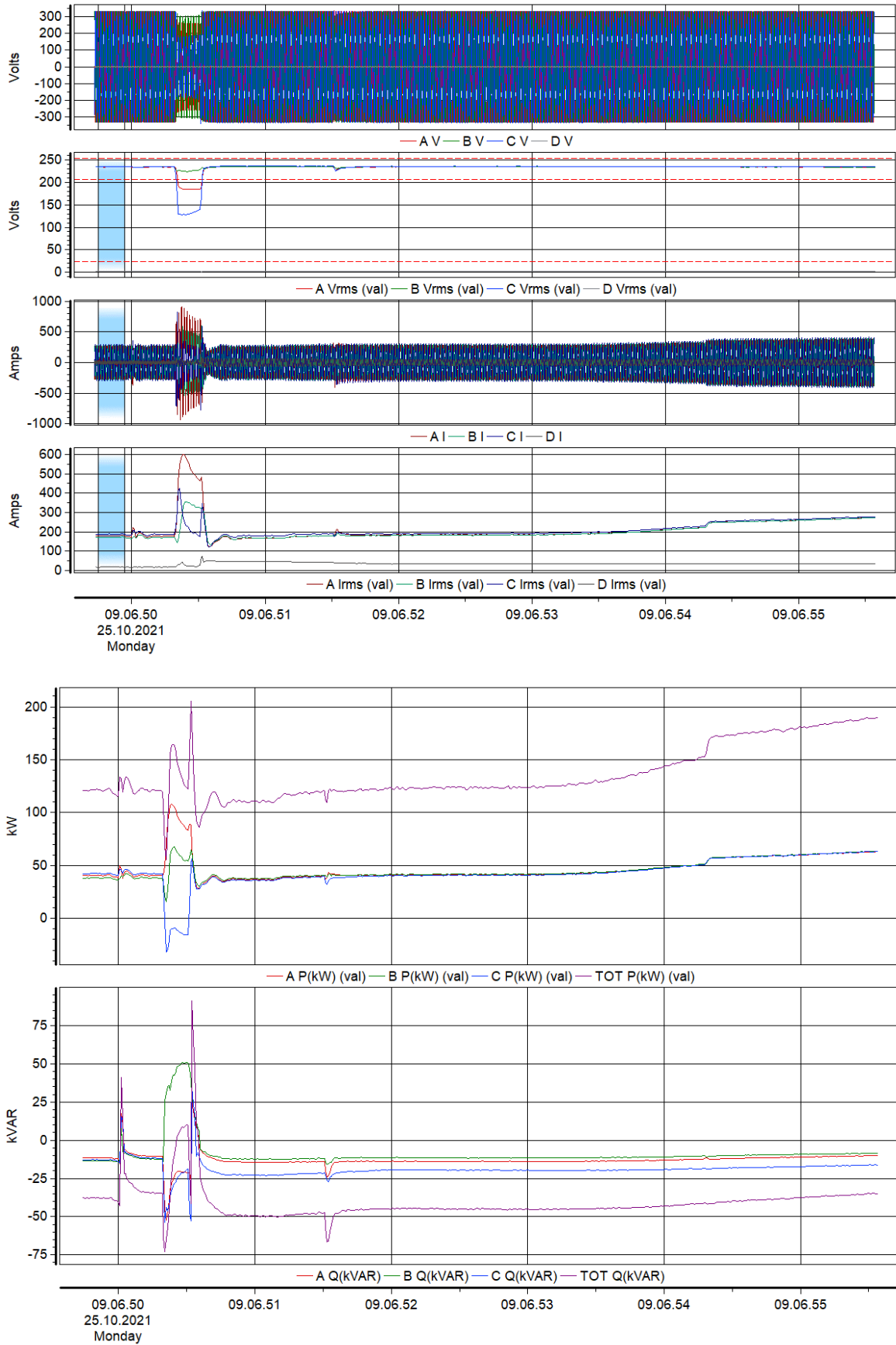
Kuva 6.6. Vaihejännitteiden ja -virtojen aaltomuodot ja 10 ms välein lasketut 20 ms tehollisarvot sekä vaihekohtaiset ja kolmivaiheiset kokonaispätö- ja kokonaisloistehot.



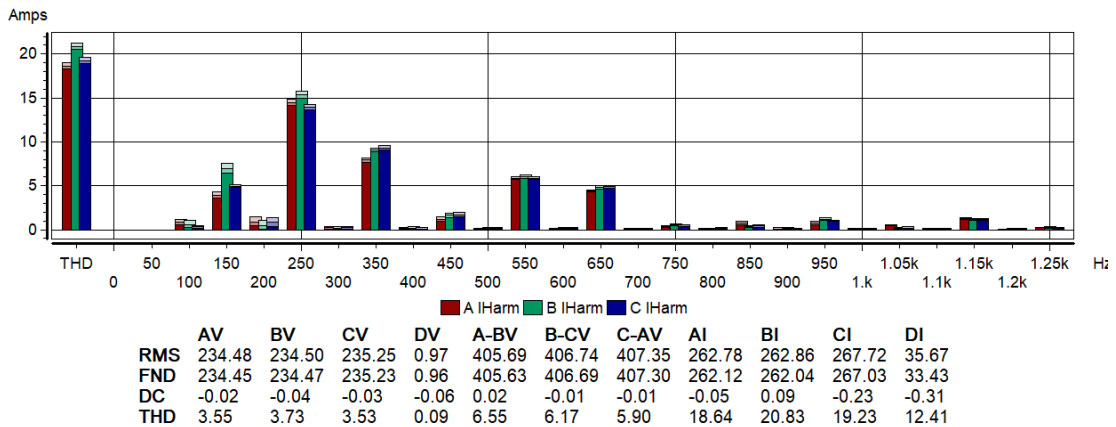
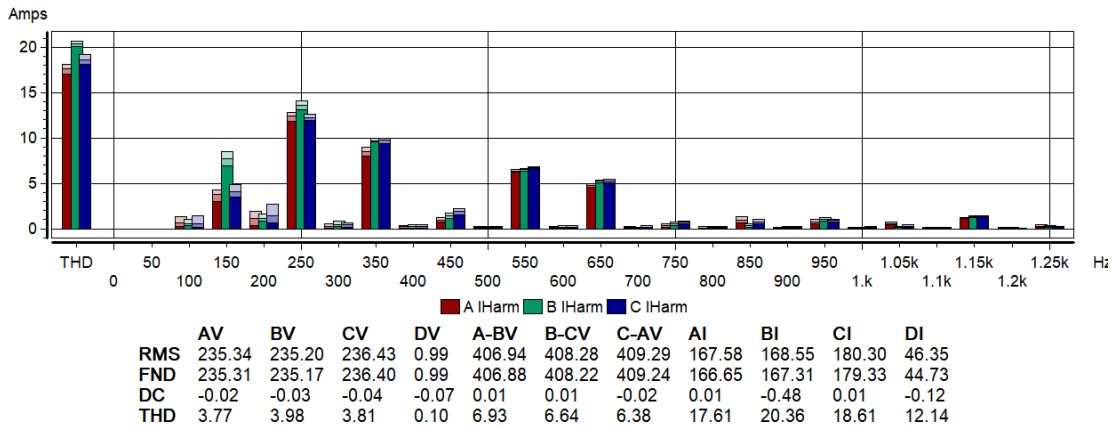
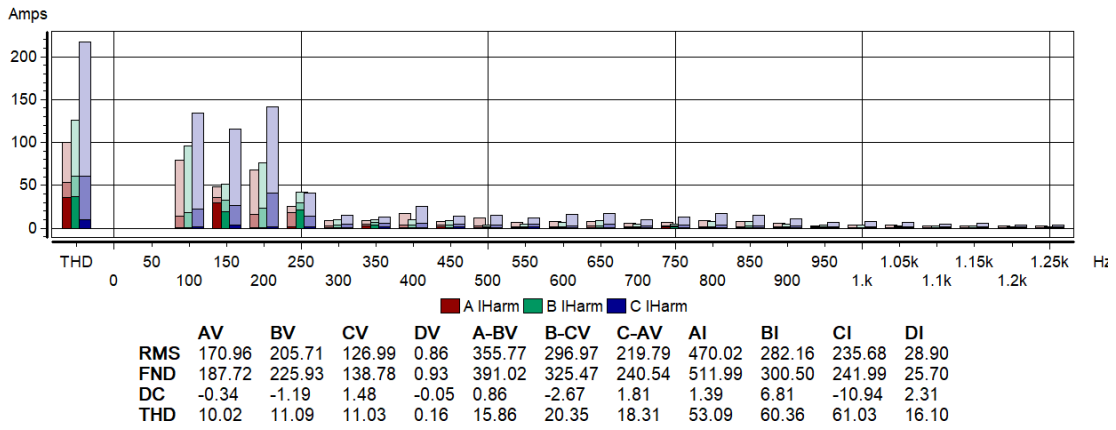
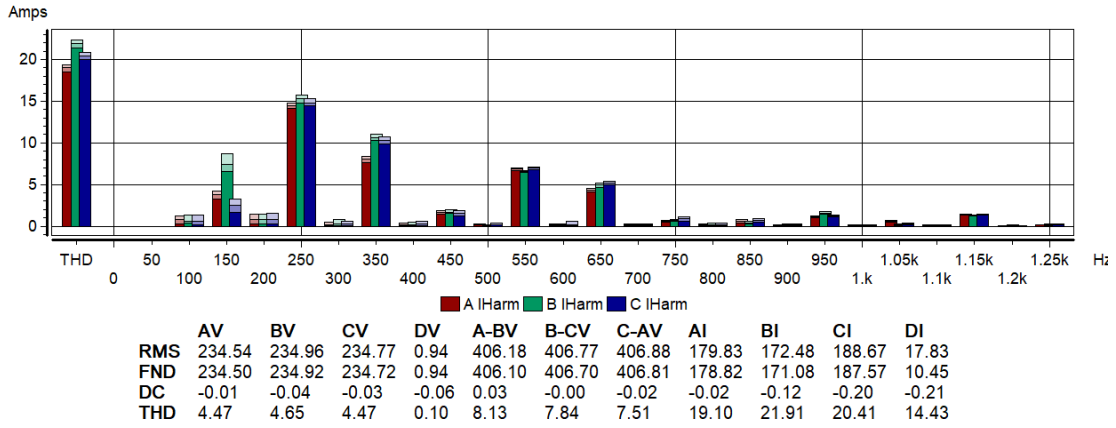
Kuva 6.7. Vaihevirtojen yliaaltojakaumat ennen pikajälleenkytkentää ja sen jälkeen ajan hetkeltä 08:31:01.0.

6.2.3 Jännitekuoppa

Kuvassa 6.8 on esitetty noin 200 ms kestävä jännitekuoppa teollisuuskohteessa 2, jossa alimman vaiheen L3 jännite on alimmillaan noin 129 V ja myös vaiheen L1 jännite noin 185 V alittaa selvästi kuopan raja-arvon vaiheen L2 pysyessä lähes kuoppaa edeltävällä tasolla. Jännitekuoppa aiheuttaa voimakkaan virran nousun erityisesti vaiheessa L2, mutta kuoppaa edeltävien ja sen jälkeisten tehojen ja yliaaltojakaumien (kuva 6.9) perusteella mitattavan kohteen kuormia ei kuopan seurauksena irtoa verkosta.



Kuva 6.8. Vaihejännitteiden ja -virtojen aaltomuodot ja 10 ms välein lasketut 20 ms tehollisarvot sekä vaihekohtaiset ja kolmivaiheiset kokonaispäte- ja kokonaisloistehot.



Kuva 6.9. Vaihevirtojen yliaaltojakaumat ennen jännitekuoppaa, sen ajalta ja sen jälkeen ajan hetkiltä noin 09:06:50.9 ja 09:06:55.0.

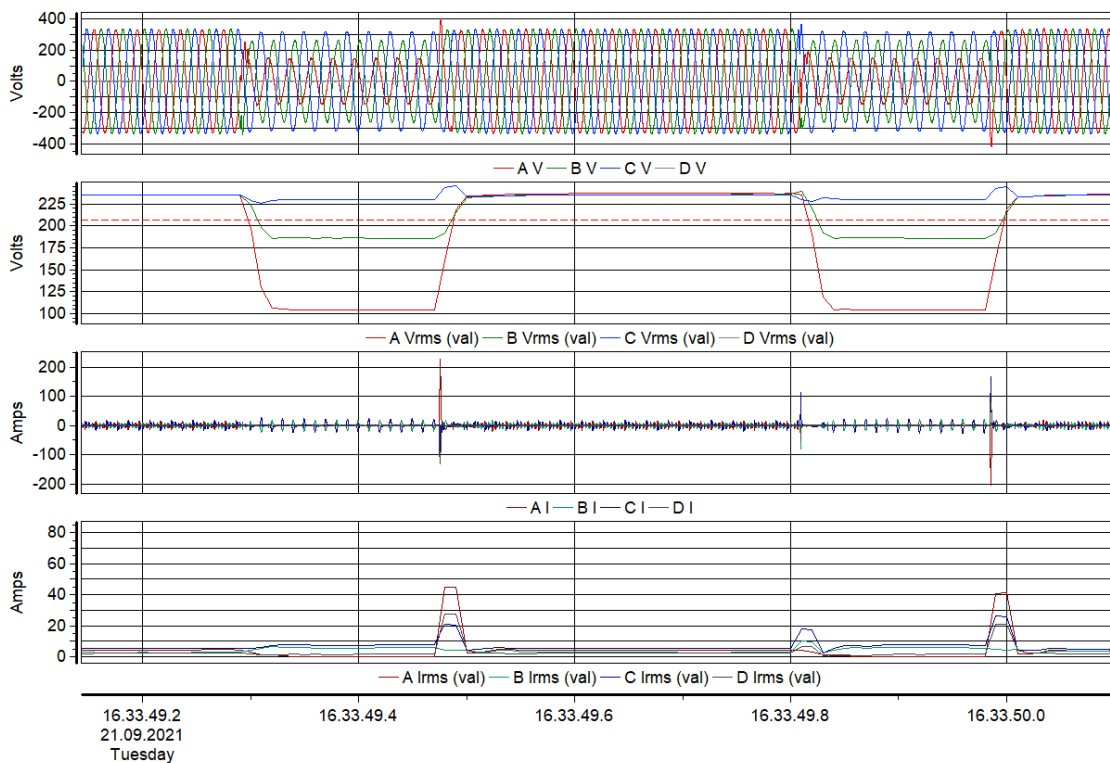
6.3 Jännitteettömän väliajan vaikutus kuormien kytkentävirtoihin

Jännitteettömän väliajan vaikutusta erityisesti taajuusmuuttajia sisältävän kuorman kytkentävirtoihin tutkittiin teollisuuskohde 1:ssä, jossa esiintyi mittausten kuluessa melko kattavasti erityyppisiä jännitekuoppia ja jälleenkytkentöjä:

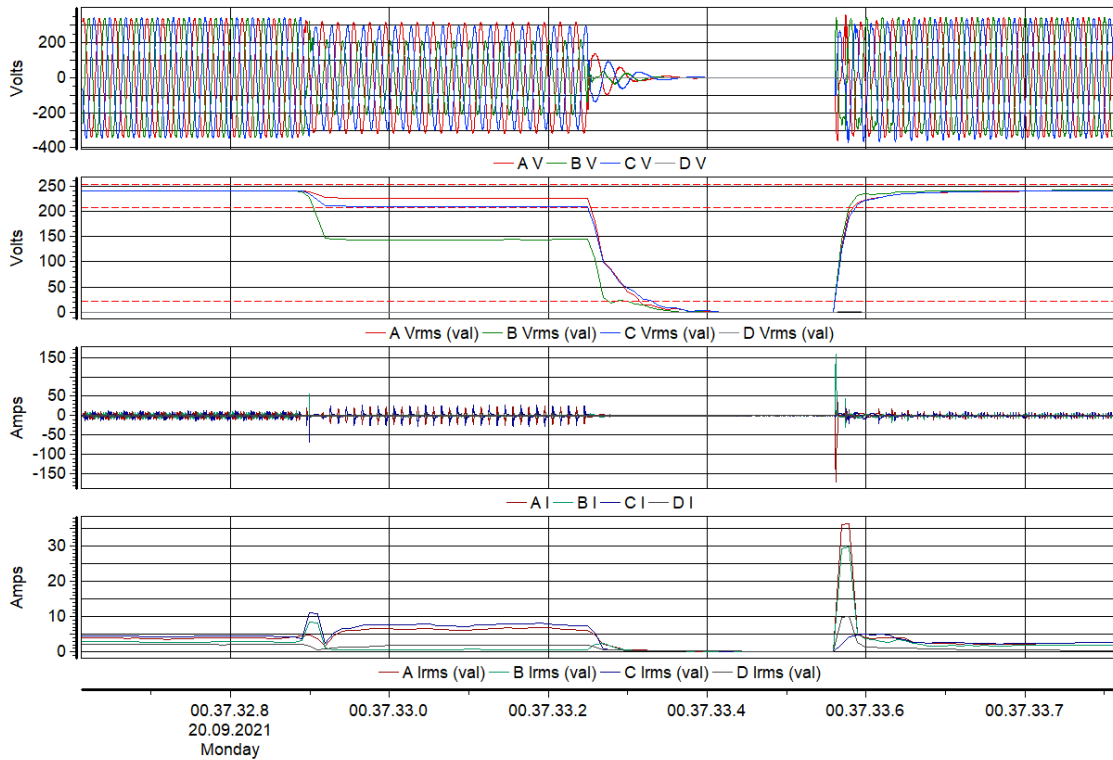
- muilla lähdöillä (tai 110 kV verkossa) esiintyneiden vikojen aiheuttamia jännitekuoppia,
- tutkittavalla lähdöllä esiintyneiden oikosulkuvikojen aiheuttamia jännitekuoppia + pikajälleenkytkentöjä 0,3 sekunnin ja 1,0 sekunnin jännitteettömällä väliajalla ja lisäksi
- aikajälleenkytkentöjä ja manuaalisia vianrajauskytkeä

Kuvissa 6.10...6.12 on esitetty mitatut vaihejännitteet ja kytkentävirtasysäykset jännitekuopan, pikajälleenkytkennän (0,3 s jännitteetön väliaika) ja aikajälleenkytkennän yhteydessä. Kuten kuvista ja taulukosta 6-1 ilmenee, suurimmat kytkentävirtasysäykset (203...228 A) esiintyvät jännitekuopissa, jännitteen palatessa normaaliksi. Pikajälleenkytkennässä virtasysäys on jonkin verran pienempi, noin 171 A ja epäonnistuneen ajk:n yhteydessä vain noin 55 A.

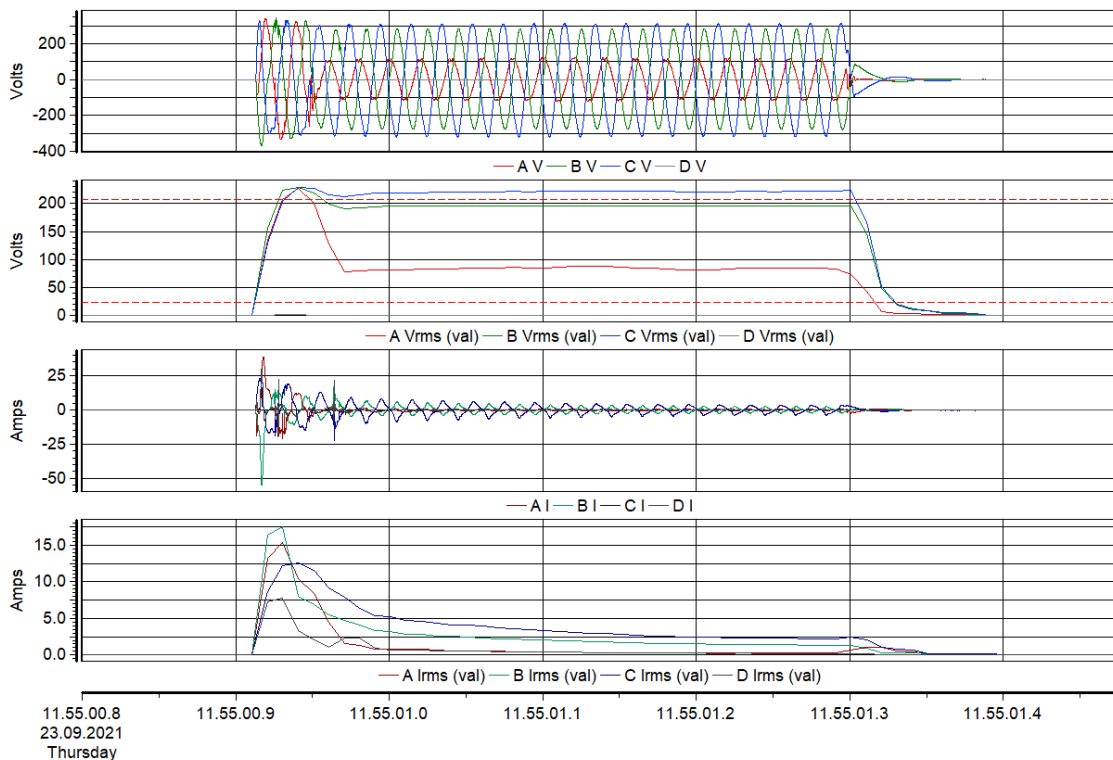
Kuvissa 6.10...6.11 taajuusmuuttajat jäävät jo kuopan alussa kahden vaiheen varaan, mutta näyttäisivät palaavan ainakin pääosin normaaliin toimintaan kuopan jälkeen.



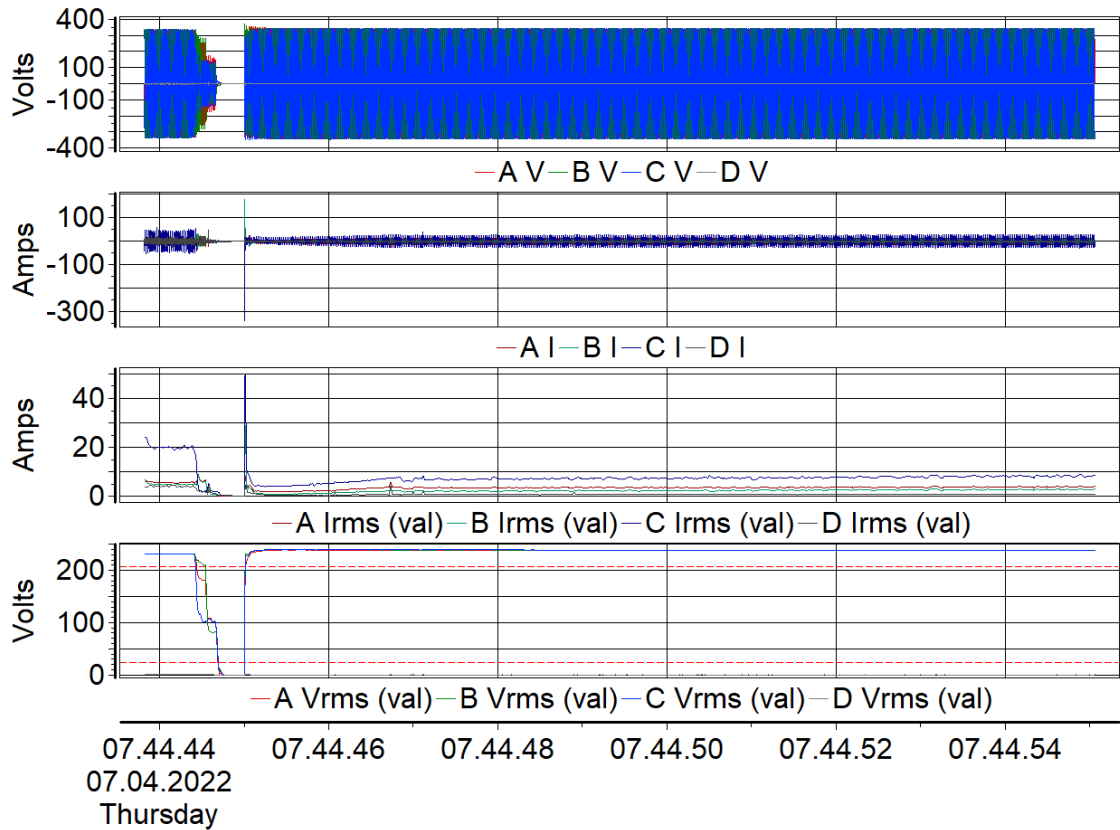
Kuva 6.10. Pääosin taajuusmuuttajakäyttöä sisältävän kuorman vaihejännitteiden ja -virtojen aaltomuodot ja tehollisarvot kahden peräkkäisen jännitekuopan yhteydessä.



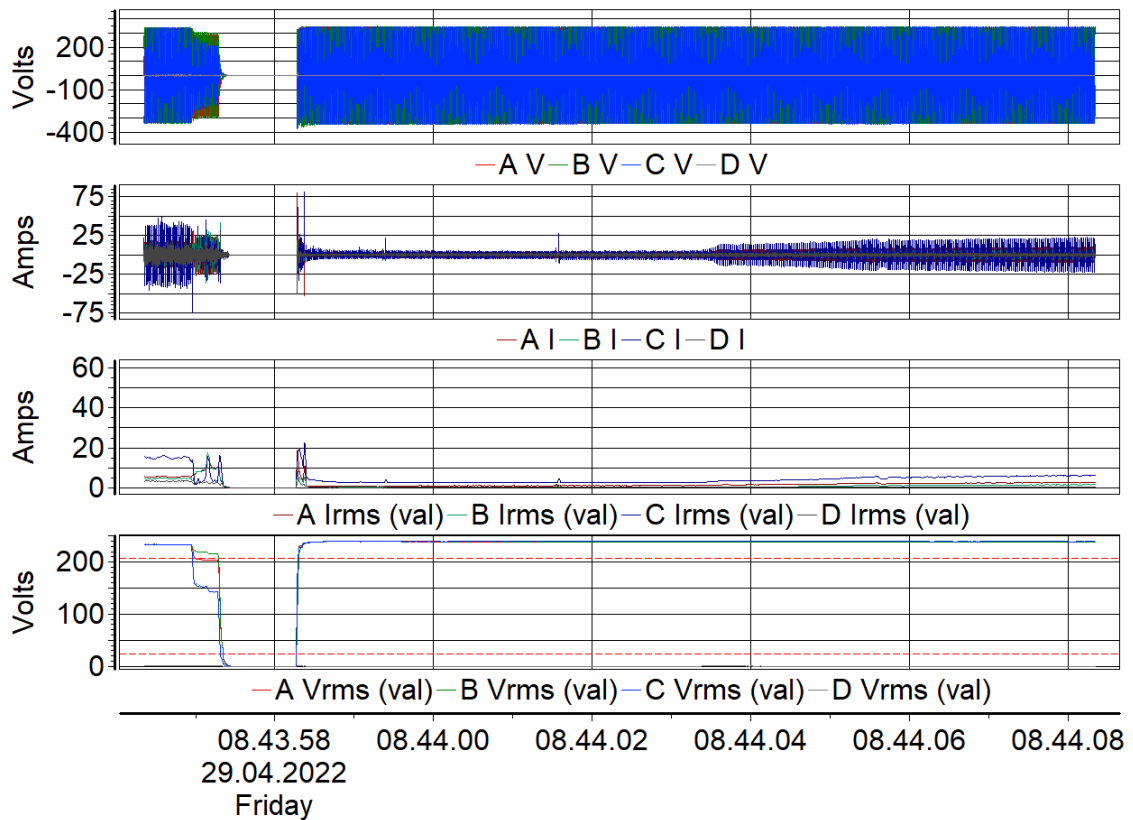
Kuva 6.11. Pääosin taajuusmuuttajakäyttöä sisältävän kuorman vaihejännitteiden ja -virtojen aaltomuodot ja tehollisarvot kaksivaiheisen oikosulun aiheuttaman jännitekuopan ja pikajälleenkytkennän yhteydessä.



Kuva 6.12. Pääosin taajuusmuuttajakäyttöä sisältävän kuorman vaihejännitteiden ja -virtojen aaltomuodot ja tehollisarvot epäonnistuneen (vika ei poistu) aikajälleenkytkennän yhteydessä.



Kuva 6.13. Pääosin taajuusmuuttajakäyttöä sisältävän kuorman vaihejännitteiden ja -virtojen aaltomuodot ja tehollisarvot pikajälleenkytkennässä 0,3 sekunnin jännitteettömällä väliajalla.

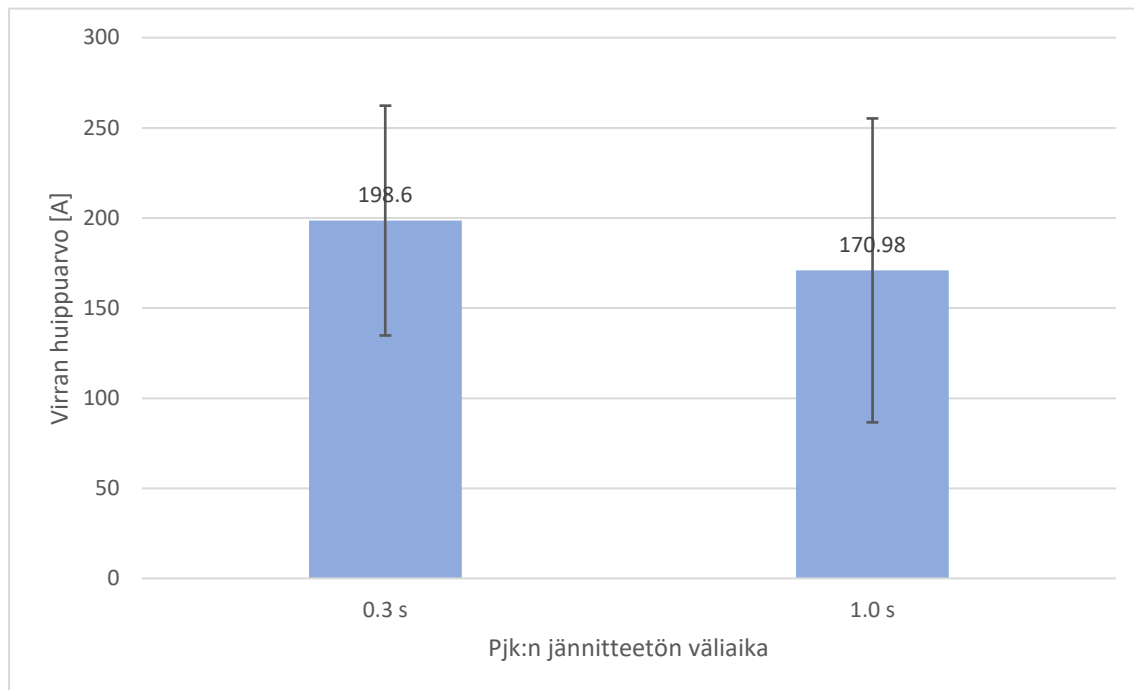


Kuva 6.14. Pääosin taajuusmuuttajakäyttöä sisältävän kuorman vaihejännitteiden ja -virtojen aaltomuodot ja tehollisarvot pikajälleenkytkennässä 1,0 sekunnin jännitteettömällä väliajalla.

Taulukko 6-1. Kytkevävirtasysäykset erilaisissa jännitehäiriöissä teollisuuskohteessa 1.

	Vaihevirran huippuarvo [A]			Vaihevirran suurin tehollisarvo [A]		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Jännitekuoppa 1, alku	*)	*)	*)	*)	*)	*)
Jännitekuoppa 1, loppu	228	-18.8	-106	44.9	6	20.7
Jännitekuoppa 2, alku	-14.2	-80.2	112.3	4.4	10	17.9
Jännitekuoppa 2, loppu	-203	21.2	167	41	5.7	26.2
Pikajälleenkytkentä 0,3 s	-171	159	-21.5	36.4	29.7	5.2
Aikajälleenkytkentä 1 min	38.8	-55.2	22.9	15.3	17.5	12.6
*) ei virtasysäystä						

Jännitehäiriöiden yhteydessä virtasysäysten huippuarvojen hajonta näytti olevan melko suurta, joten taulukkoa 6-1 on pidettävä lähinnä suuntaa antavana. Virtasysäysten huippuarvoihin voi vaikuttaa esimerkiksi taajuusmuuttajien ja muiden kuormien käyttötilanne ja kuormitus pikajälleenkytkennän tapahtumishetkellä (jännitteiden katketessa) ja jännitteiden vaihekulmat ja aaltomuoto jännitteiden palatessa. Koko mittausjakson aikana pikajälleenkytkentöjä esiintyi sen verran, että niistä saatiin tehtyä keskiarvo- ja luottamusvälitarkastelu ennen ja jälkeen jännitteettömän väliajan pidentämisen. Jännitteen paluuhetken virtasysäyksistä (kolmen vaiheen suurin arvo) laskettiin keskiarvot ja 95 % luottamusvälit viidestä pikajälleenkytkentätapauksesta 0,3 sekunnin jännitteettömällä väliajalla ja viidestä pikajälleenkytkentätapauksesta 1,0 sekunnin jännitteettömällä väliajalla. Tulokset on esitetty kuvassa 6.15. Kuten kuvasta nähdään kytkentävirtasysäys näyttäisi pienenevän pj:n jännitteettömää väliaikaa lyhentämällä.



Kuva 6.15. Teollisuuskohteessa 1:ssä mitatut kuormien kytkentävirtasysäysten keskiarvot ja 95 % luottamusvälit pikajälleenkytkentöissä 0,3 s ja 1,0 s jännitteettömällä väliajalla.

Hakelämpökeskuksen huollosta ja vikapäivystyksestä vastaavan henkilön haastattelun perusteella myös savukaasumurin taajuusmuuttajan manuaalisten resetointien tarve näyttäisi poistuneen, kun ko. kohdetta syöttävällä lähdöllä on siirrytty 1,0 sekunnin jännitteettömään väliaikaan pikajälleenkytkentöissä. Tämä yhdessä mittaus tulosten kanssa viittaisi siihen, että ongelmana on ollut samanlainen taajuusmuuttajan ohjauselektronikan jumittuminen, joka ha-

vaittiin luvussa 7 käsitellyissä taajuusmuuttajan laboratoriokokeissa. Laboratoriokokeissa käytetty taajuusmuuttaja oli eri valmistajan tuote kuin teollisuuskohde 1:ssä savukaasuimurissa käytetty taajuusmuuttaja.

Edellä kuvatut ilmiöt liittyvät todennäköisesti siihen, että muutamien kilowattien...kymmenien kilowattien taajuusmuuttajia syötetään tyypillisesti diodisillalla, jonka dc-piirin muodostaa kondensaattori. Lisäksi diodisillan ac- tai dc-puolella saattaa olla suodatinkuristin rajoittamassa virtaa jonkin verran. Kun taajuusmuuttaja kytketään verkkoon ns. normaalitilanteessa, dc-piirin kondensaattori ladataan erillisen latauspiirin (esim. latausvastus sarjassa kondensaattorin kanssa) kautta. Kun dc-jännite nousee, latauspiiri ohitetaan, ja taajuusmuuttajaa voi alkaa kuormittaa [14].

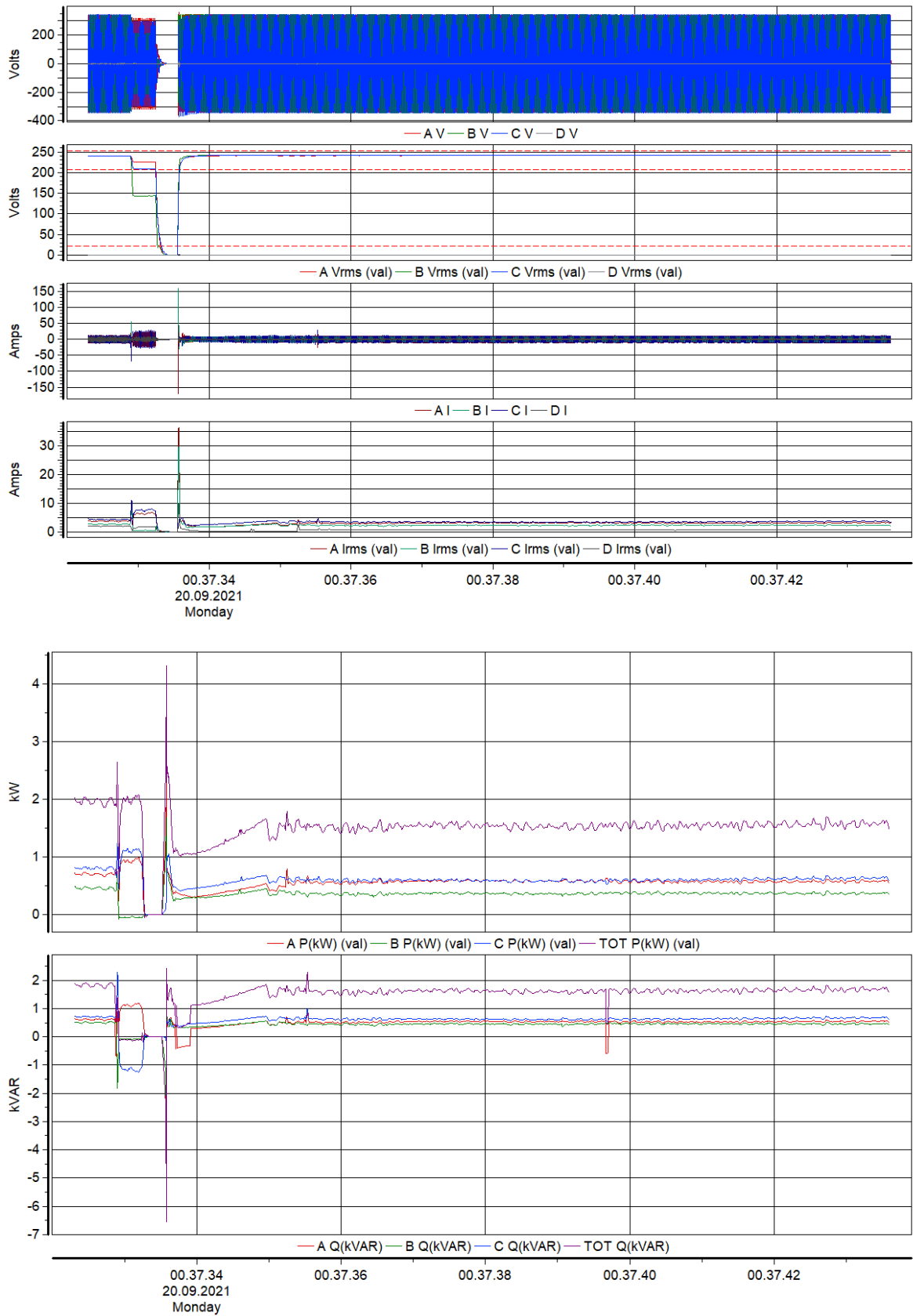
Muutaman sadan millisekunnin mittaisessa katkoksesta dc-piirin jännite ei välttämättä ehdi laskea niin alas, että latauspiiri kytkeytyisi päälle, joten jännitteiden palatessa dc-kondensaattorin latausvirtaa rajoittanee ainoastaan taajuusmuuttajan mahdolliset verkkosuodattimet sekä verkkoimpedanssi. Pidemmässä katkoksesta dc-jännite todennäköisesti putoaa niin alas, että latauspiiri kytkeytyy päälle ja jännitteiden palatessa virta ei nouse ns. tavanomaista latausvirtaa korkeammaksi [14].

Näyttäisi siltä, että jälleenkytkennän jännitteettömän väliajan pidentäminen todennäköisesti pienentäisi taajuusmuuttajan rasituksia. Virtapiikki jännitteen palatessa pienentyisi, kun latauspiiri ehtisi uudelleen aktivoitua. DC-välipiirin jännitteen lasku riippuu luonnollisesti taajuusmuuttajan kuormituksesta, välipiirin kondensaattorin mitoituksesta ja jännitteestä alkutilanteesta.

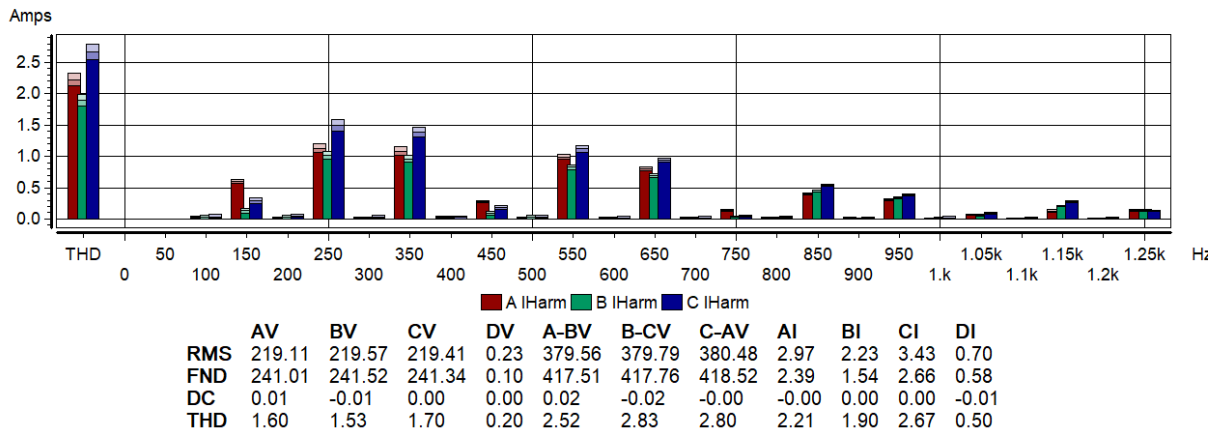
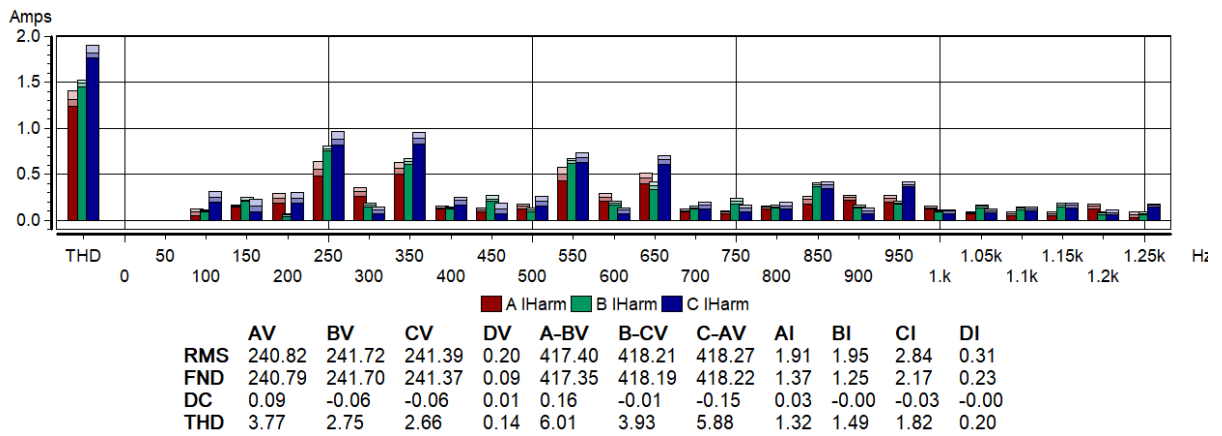
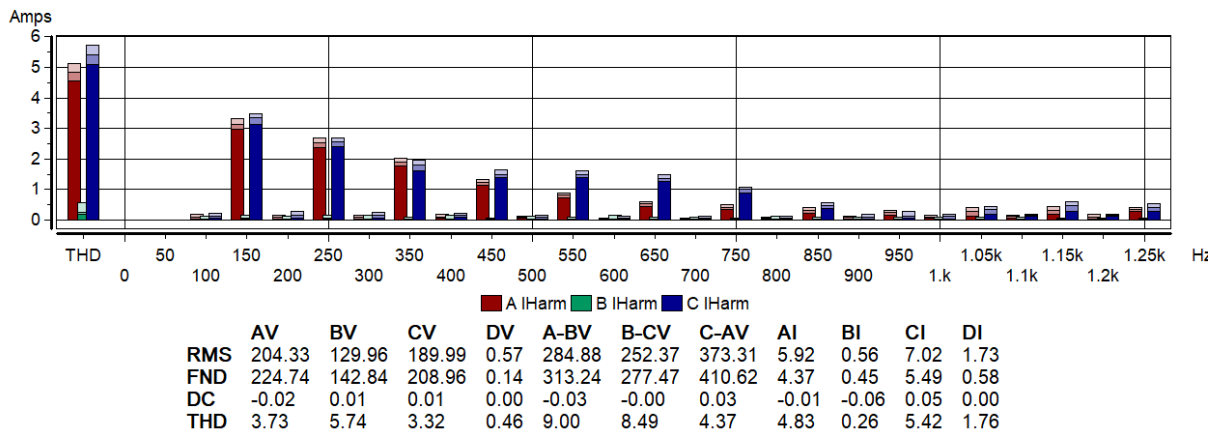
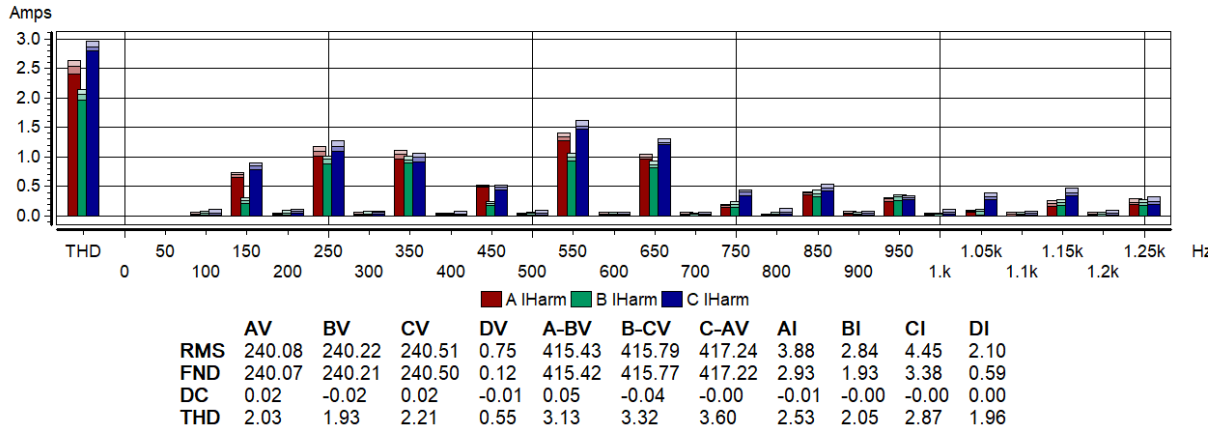
Taajuusmuuttajien kannalta lyhyissä jännitekatkokseissa on haasteena se, että taajuusmuuttaja ei mittaa verkon jännitettä. Tyypillisesti mitattava suure on dc-jännite, joten laite ei tunnista verkon katoamista ennen kuin dc-jännite putoaa riittävän alas. Tämä pätee todennäköisesti myös hakkureihin. Toinen haaste saattaa olla se, että mikäli latauspiiri aktivoituu, yleensä myös invertterisillan toiminta ja moottori pysäytetään tai pysähtyy. Tilanne tulkitaan viaksi ja invertterin uudelleen käynnistäminen saattaa vaatia vian kuittaamista, mutta tämä on yleensä haluttaessa mahdollista hoitaa laitteen parametroinnilla [14].

6.4 Kuormien käyttäytyminen teollisuuskohteessa 1

Kuvassa 6.16 on esitetty teollisuuskohteen 1 lämpökeskuksen kuormien käyttäytyminen jännitekuopassa ja sitä seuraavassa pikajälleenkytkennässä. Jännitekuopassa vaiheen L2 jännite käy alimmillaan noin 143 V ja kaksi muuta vaihetta pysyvät vielä $U_n-10\%$ yläpuolella. Kuten päto- ja loistehokuvaajista ja kuvan 6.17 yliaaltojakauksesta nähdään, kuormat palautuvat pikajälleenkytkennän jälkeen lähes normaaliksi jo noin sekunnin kuluttua jännitteiden palaamisesta.



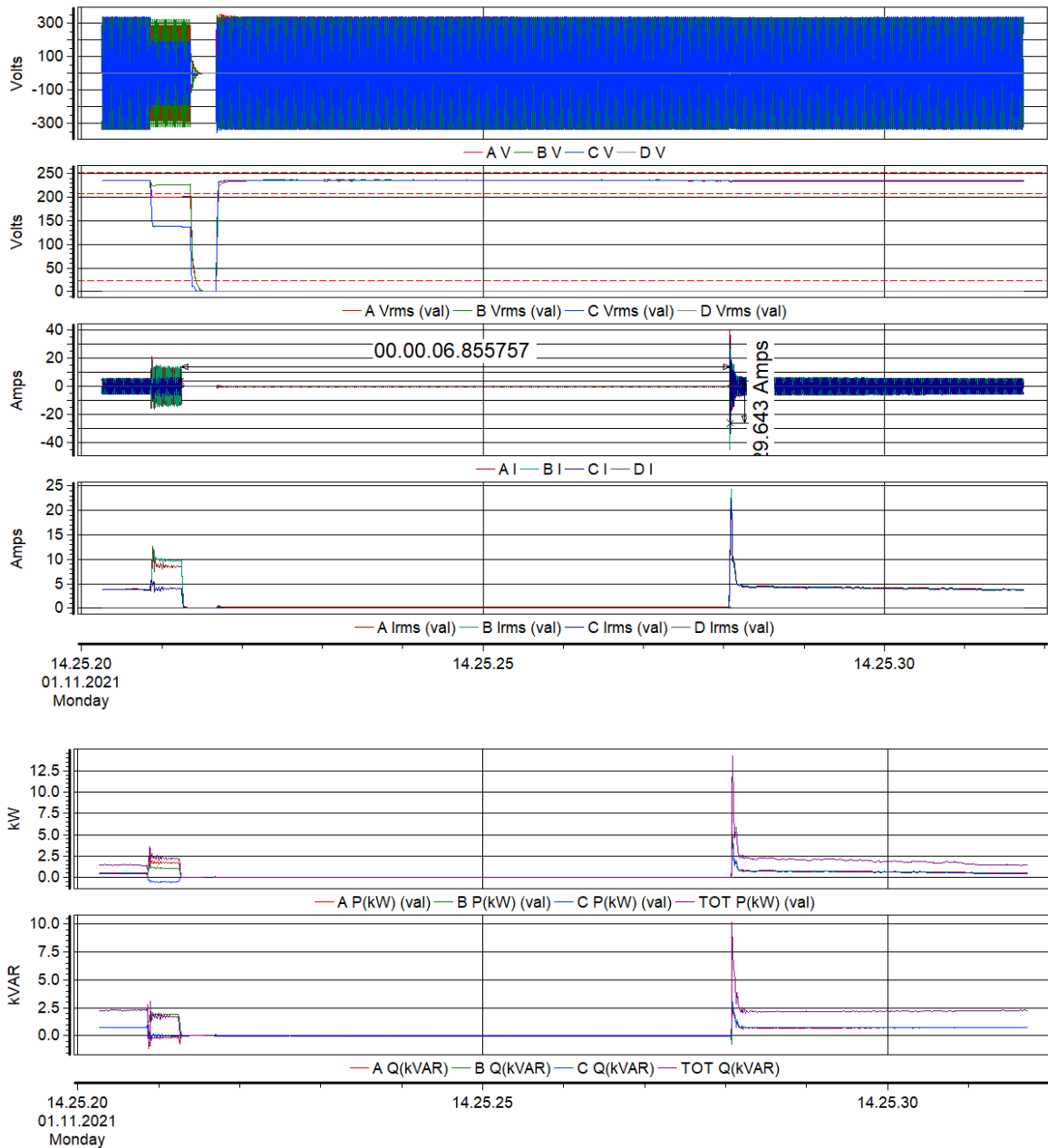
Kuva 6.16. Vaihejännitteiden ja -virtojen aaltomuodot ja 10 ms välein lasketut 20 ms tehollisarvot sekä vaihekohtaiset ja kolmivaiheiset kokonaispäte- ja kokonaisloistehot.



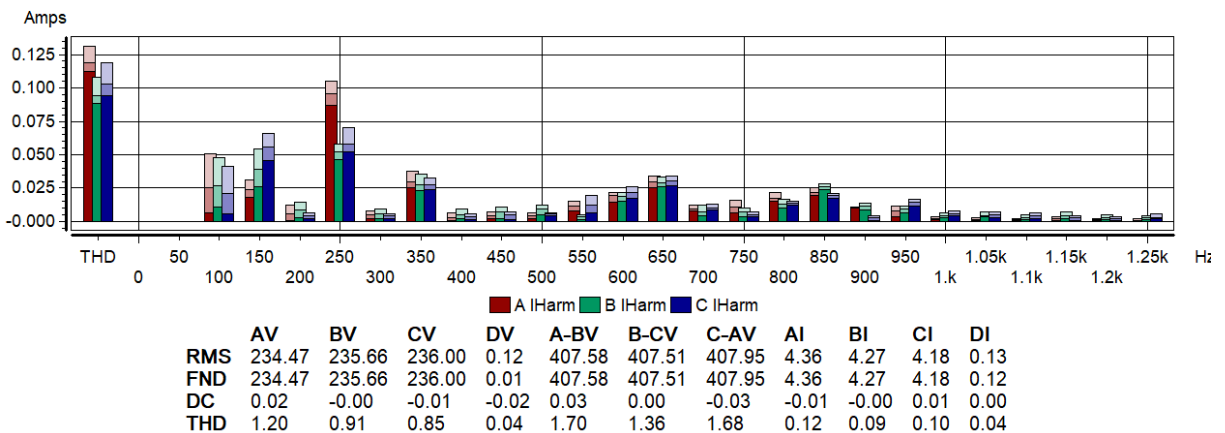
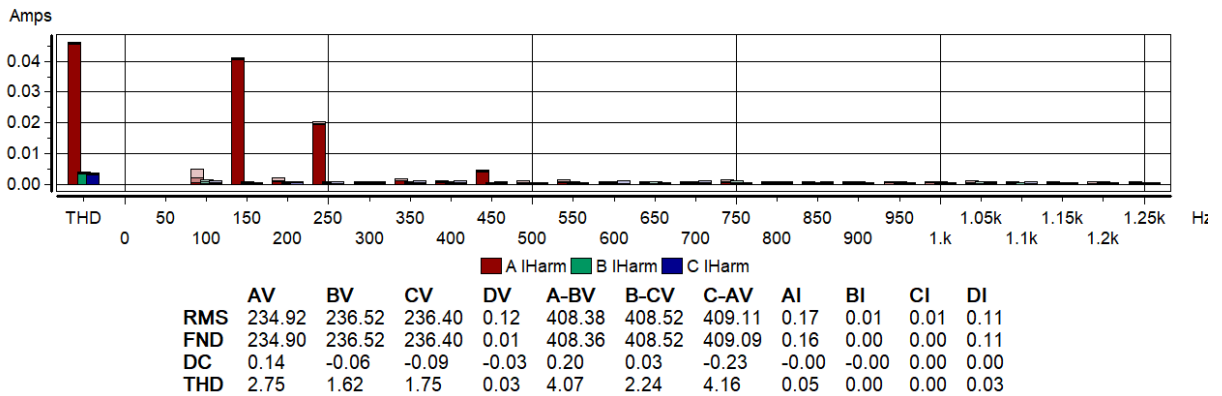
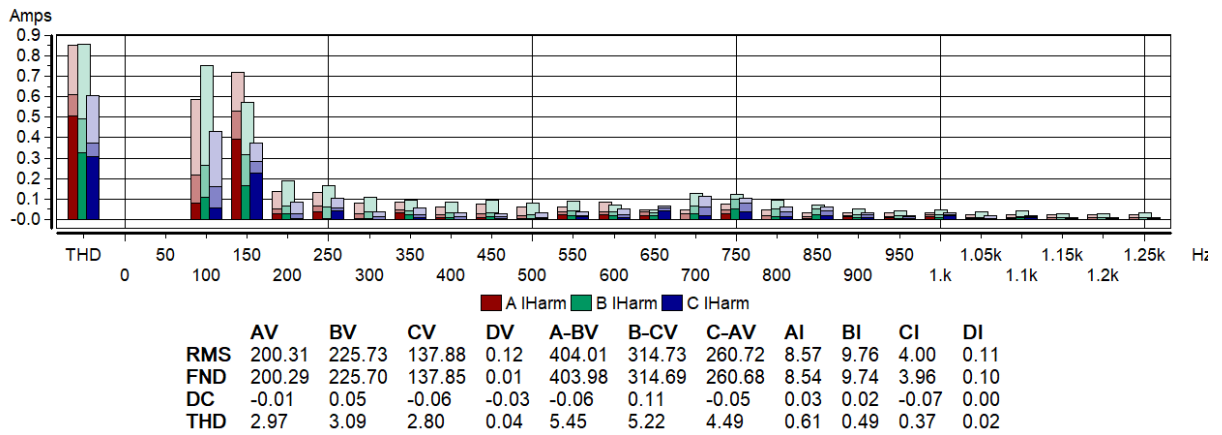
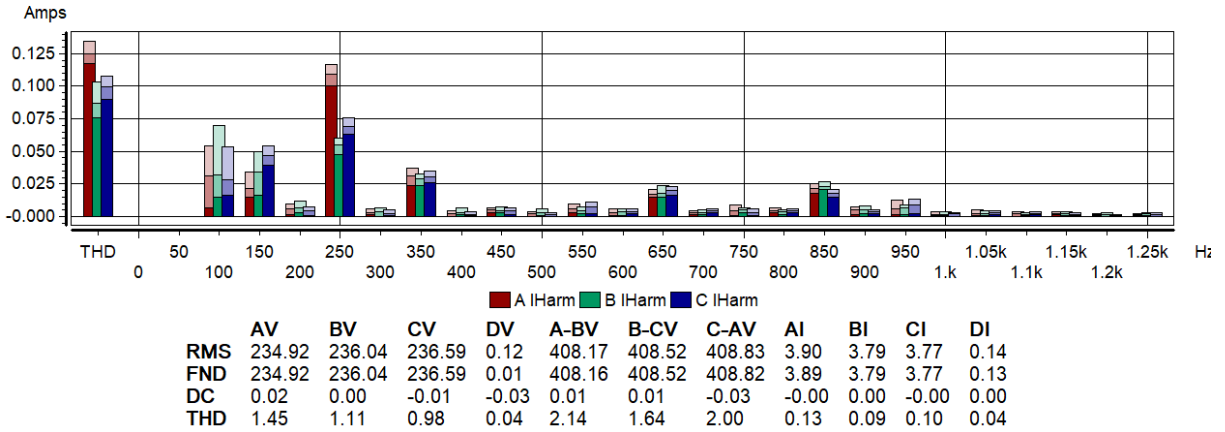
Kuva 6.17. Vaihevirtojen yliaaltojakaumat ennen jännitekuoppaa, sen ajalta ja pikajälleenkytkennän jälkeen ajan hetkiltä noin 00:37:34.0 ja 00:37:42.0.

6.5 Kuormien käyttäytyminen maatalouskohteessa

Kuvassa 6.18 on esitetty sikalan ruokintakoneen syötön vaihejännitteet ja virrat sekä pätö- ja loistehot jännitekuopan ja sitä seuraavan pikajälleenkytkennän aikana. Jännitekuopassa vaiheen L3 alin jännite on noin 138 V ja vaiheen L1 jännite noin 201 V, vaihe L2 pysyy lähes kuoppaa edeltävällä tasolla. Kuten tehokuvaajista ja kuvan 6.19 yliaaltojakaumista nähdään, kuorma palautuu jännitehäiriötä edeltävälle tasolle 6,5 sekunnin kuluttua jännitteiden palaamisesta. Ennen sitä virta on hyvin pientä ja yliaaltojakaumastakin päätellen toiminnassa on vain ilmeisesti vaiheelle L1 kytketty ruokinta-automaatin ohjauselektronikka.



Kuva 6.18. Vaihejännitteiden ja -virtojen aaltomuodot ja 10 ms välein lasketut 20 ms tehollisarvot sekä vaihekohtaiset ja kolmivaiheiset kokonaispätö- ja kokonaisloistehot.

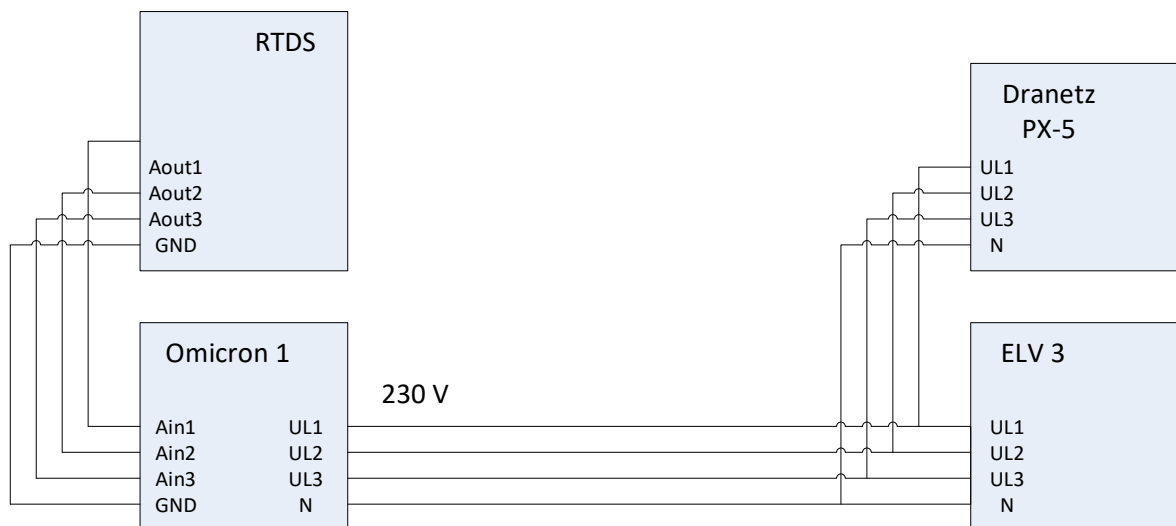


Kuva 6.19. Vaihevirtojen yliaaltojakaumat ennen jännitekuoppaa, sen ajalta ja pikajälleenkytkennän jälkeen ajan hetkiltä noin 14:25:22.0 ja 14:25:29.0.

6.6 Asiakasmittareiden mahdollisuudet jälleenkytkentöjen seurannassa

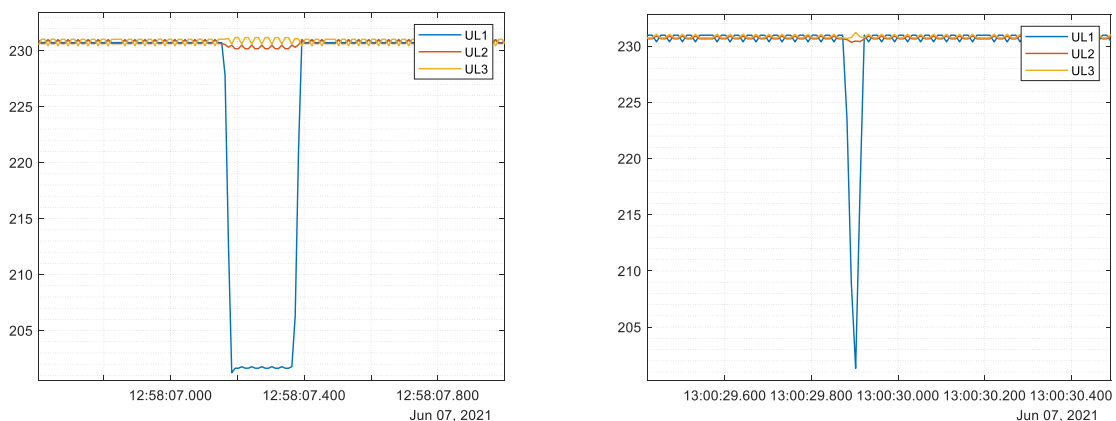
Uusimmissa etäluettavissa asiakasmittareissa on jo melko monipuolisia mahdollisuuksia sähkön laadun seurantaan ja joissain mittareissa on jo olemassa tai ainakin tulossa mahdollisuus jopa häiriötallennetyyppisiin tietyillä triggausehdoilla toteutettaviin tapahtumatalennuksiin. Tässä hankkeessa tutkittiin RTDS(Real time digital simulator)-ympäristössä yhtä tällaista mittaria, Mx Electric Oy:n Laatuvahti 3:a. Mittalaitteen tapahtumatalennin asetettiin näissä testeissä triggamaan jännitteen tehollisarvon alituksesta (207 V) ja tallentamaan jännitteiden tehollisarvoja 5 sekuntia ennen ja 5 sekuntia jälkeen triggauhetken.

Laatuvahti 3:n tapahtumatalennuksia testattiin mm. useammilla eripituisilla yksivaiheisilla jännitekuopilla (10 ms-2 s), 100 ms kestävällä nollavialla ja sekvenssillä, jossa mitattavassa jännitteessä esiintyi ensin jännitekuoppa (jännösjännite 50 %), sitten taajuusmuutos 50 Hz:stä hieman yli 52 Hz:iin ja lopuksi -90 asteen vaihekulmahyppäys. Mittauksissa käytetty koejärjestely on esitetty kuvassa 6.20.

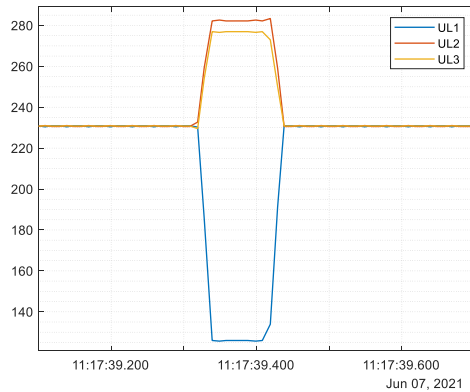


Kuva 6.20. Laatuvahti 3 (ELV3) testauskytkentä RTDS-ympäristössä.

Esimerkit jännitekuoppien ja lyhytaikaisen nollavian tallennuksista (vaihejännitteiden tehollisarvot) on esitetty kuvissa 6.21 ja 6.22 ja em. sekvenssin tallennus vaihejännitteiden tehollisarvojen ja taajuuden osalta kuvassa 6.23.

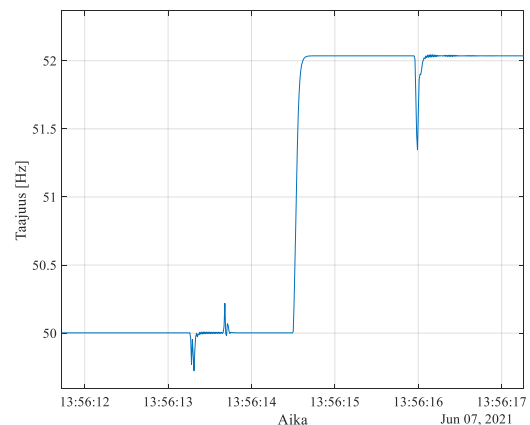
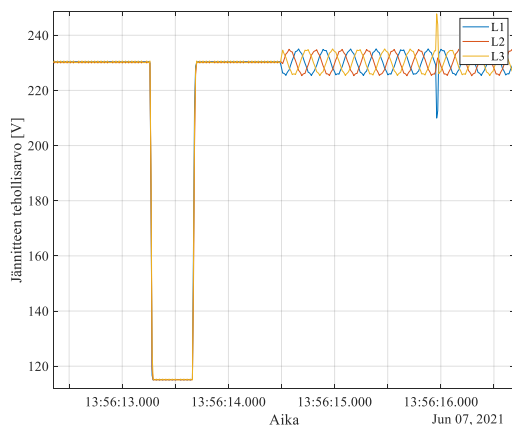


Kuva 6.21. Kestoajaltaan 200 ms ja 20 ms yksivaiheiset jännitekuopat tallennettuna Laatuvahti 3:lla.



Kuva 6.22. Kestoajaltaan 100 ms tilapäinen nollavika tallennettuna Laatuvahti 3:lla.

Kuvissa 6.21 lievästi ja kuvassa 6.23 selvemmin näkyvä jännitteiden tehollisarvojen värähtely ei ole todellista vaan johtuu mittarin tehollisarvomittauksen toteutustavasta. Värähtelyn amplitudin todettiin riippuvan lineaarisesti siitä, kuinka suuri on mitattavan jännitteen taajuuden poikkeama 50 Hz:stä. Käytännössä kuvassa 6.23 esitetyn suuruisia 2 Hz taajuuspoikkeamia ei verkossa pitäisi normaalisti esiintyä, mutta siirryttäessä yleisestä jakeluverkosta saarekekäyttöön esimerkiksi vikatilanteen seurauksena ne voivat hetkellisesti olla mahdollisia.



Kuva 6.23. a) Vaihejännitteiden tehollisarvot, ja b) taajuus, kun RTDS:llä ajettiin seuraava sekvenssi: jännitekuoppa (jännösjännite 115 V), taajuusmuutos 50.00 -> 52.036 Hz, vaihekulmahyppy -90 astetta.

Taajuuden ja jännitteiden mittaus ja tallennus 10 ms aikaresoluutiolla on hyödyllinen ominaisuus erityisesti saarekekäyttötilanteissa, joissa hajautetun tuotannon yksikkö voi jäädä hetkellisesti tai mikroverkkojen tapauksessa suunnitellusti ja pidempiaikaisestikin syöttämään saarekkeen kuormia. Esimerkiksi useimmissa sähkönlaatuanalysointoreissa taajuusmittauksen aikaresoluutio on huomattavasti heikompi. Standardin SFS-EN 50160 mukaisissa sähkönlaatumittauksissa noudatetaan standardia SFS-EN 61000-4-30, jossa taajuuden mittausjakso on 10 s.

Asiakasmittareiden häiriötallenneominaisuuksien kehittyminen mahdollistaa myös jälleenkytkentöjen vaikutusten entistä monipuolisemman analysoinnin myös asiakaslaitteiden näkökulmasta. Vaikutusten tarkastelemismahdollisuuksiin vaikuttavat mm. seuraavat häiriötallentimen asetukset:

- triggerauehdot: häiriötallennin käynnistyy esim., kun joku vaihejännite alittaa asetellun rajan, esim. 80 % U_n . Triggerauehdoilla voidaan rajoittaa kertyvien tallenteiden määrää, jos tiedetään, että tietyn syvyiset kuopat eivät vielä aiheuta asiakkaalle ongelmia.

- tallennusaika ennen jännitteen katkeamista. Tässä riittää melko lyhytkin aika, jos tallennin tallentaa jännitteen ja virran tehollisarvojen lisäksi myös aaltomuodot olisi tämän ajan hyvä olla suurempi kuin 200 ms, jotta esimerkiksi yliaaltojakaumat pystyttäisiin laskemaan aaltomuodoista standardin IEC 61000-4-7 mukaisesti.
- tallennusaika jännitteen katkeamisen (tai palautumisen) jälkeen. Tämä riippuu voimakkaasti asiakaslaitteiden luonteesta, kuten luvun 7 laboratoriomittauksistakin ilmenee. Joillain elektronisesti ohjatuilla laitteilla käynnistyminen voi kestää jopa useita minuutteja (pakastinkaapin tapauksessa 6 minuuttia), mutta esimerkiksi taajuusmuuttajat ja luvussa 7 tutkittu ilmanvaihtokone käynnistyivät selvästi alle minuutissa. Jos tallennusaika on esimerkiksi 1-2 minuuttia, aikajälleenkytkennän viiveestä riippuen myös se voi tallentua, vaikka häiriötallentimen trigger tapahtuisi pelkästään jännitteen triggerausajan alituksesta
- tallennettavat suureet:
 - jännitteiden ja virtojen tehollisarvot ja jos mahdollista, myös hetkellisarvot (aaltomuodot). Hetkellisarvoista on hyötyä esimerkiksi kytkentätransienttien energian ja mahdollisen aiheuttajan arvioinnissa.
 - päto- ja loistehot (mielellään vaihekohtaiset). Näistä on hyötyä kytkeytyvien kuormien tyyppin arvioinnissa (NIALM-tyyppinen tarkastelu).
 - jännitteiden ja virtojen yliaallot. Esim. 3., 5. ja 7. yliaaltojen perusteella pystyy jo tekemään erottelua esimerkiksi erityyppisten perinteisten ja tehoelektronikkakuormien välillä.

Jos mittari tallentaa myös jännitteiden ja virtojen aaltomuodot, tehojen ja yliaaltojen tallentaminen ei ole välttämätöntä, vaan ne on mahdollista laskea jälkikäteenkin, jos käytävissä sopiva ohjelmisto. Tässä tutkimuksessa teho- ja yliaaltolaskentoihin ja häiriötallenteiden analysointiin käytettiin Dranetzin Dranview-ohjelmistoa.

Kertyvien tallenteiden määrää voidaan tarvittaessa rajoittaa triggerausehtojen avulla, esimerkiksi asettamalla jännitteen triggerusraja niin alas, etteivät asiakkaan laitteiden kannalta merkityksellisen pienet jännitekuopat tallennu. Kuten luvun 3 kirjallisuuskatsauksesta ilmenee, esimerkiksi taajuusmuuttajat voivat varsinkin oletusasetuksillaan häiriintyä jo melko pienistäkin 70 % U_n jännitekuopista.

6.7 Suojareiden mahdollisuudet jälleenkytkentöjen seurannassa

Suojareiden häiriötallentimien parametointi perustuu lähtökohtaisesti enemmän vikojen ja suojausten toiminnan analysoinnin mahdollistamiseen, mutta myös niitä voidaan käyttää jälleenkytkentöjen asiakkaille aiheuttamien haittojen arviointiin. Jotta tämä olisi mahdollista myös muiden kuin vikälähdön osalta, tulisi releiden häiriötallentimet asetella tallentamaan esimerkiksi silloin, kun vähintään yksi pääjännitteistä alittaa halutun rajan.

Periaatteessa parametointiin pätevät samat kriteerit kuin edellä asiakasmittareiden tapauksessa, mutta käytännössä tallenteiden pituutta joudutaan suhteellisen suuren näytteenottotajuuden ja aaltomuototallennuksen vuoksi varsinkin vanhemmissa releissä rajoittamaan niin, että jännitteen palautumisen jälkeen tallennetaan vain joitain satoja millisekunteja.

Myös tallenteiden pidempiaikaisen säilyttämisen kriteereitä voi olla tarpeen harkita esimerkiksi kuoppien syvyyden osalta.

7. LABORATORIOKOKKEET

Laboratoriokokeiden tavoitteena oli tutkia tiettyjen asiakaslaitteiden käyttäytymistä eripituisten ja eri vaihekulmilla tapahtuvien jälleenkytkentöjen yhteydessä. Osa mittauksista tehtiin laitteiden käyttökohteissa, mutta niissäkin tapauksissa koeolosuhteet mitattiin ja kirjattiin kokeisiin mahdollisesti vaikuttavilta osin laboratoriomittauksia vastaavalla tavalla.

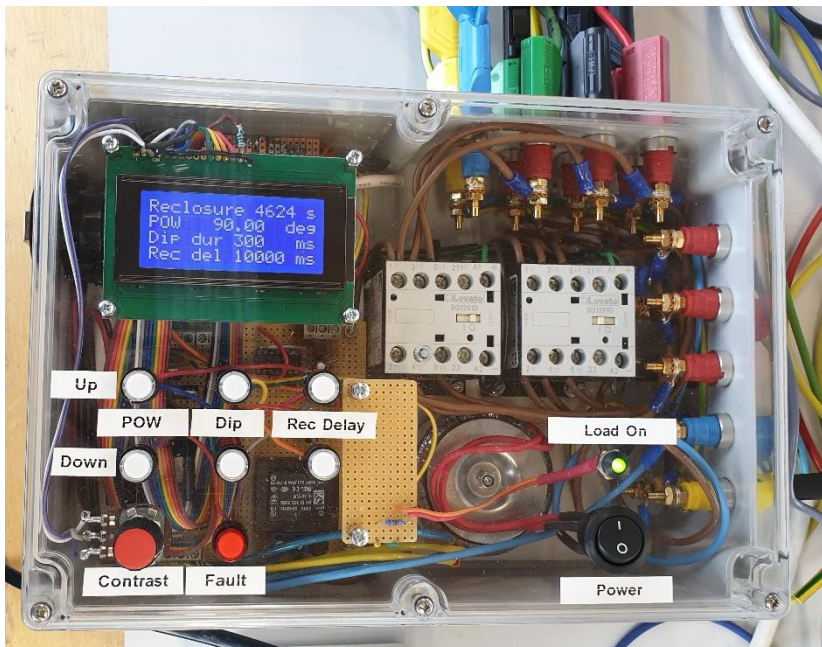
Jälleenkytkentäkokeita tehtiin seuraaville laitteille:

- Oikosulkumoottorikäyttö: taajuusmuuttaja (nimellisteho 5.5 kW) + oikosulkumoottori (nimellisteho 2,2 kW)
- Ilmanvaihtokone maaviilejäähdytyksellä
- Vanha jääkaappi-pakastin mekaanisilla termostaateilla
- Uudehko kaappipakastin elektronisella termostaatilla

7.1 Koejärjestelyt

Jälleenkytkentöjen tekemiseen käytettiin sekä laboratoriossa että laitteiden käyttökohteissa tehdyissä kokeissa niitä varten rakennettua Arduino-mikrokontrolleriin pohjautuvaa, kuvassa 7.1 esitettyä laitetta. Sillä on mahdollista säätää

- jälleenkytkentää edeltävän jännitekuopan kestoaikaa t_s (Dip dur)
- jälleenkytkennän jännitteetöntä väliaikaa t_d (Rec del)
- vaihekulmaa (POW, point-of-wave, vaiheesta L1 mitattuna), jolla jännite katkeaa jälleenkytkennän alussa ja palautuu jännitteettömän väliajan jälkeen



Kuva 7.1. Arduino-mikrokontrolleriin pohjautuva jälleenkytkentöjen tekemiseen käytetty laite.

Point-of-wave-säätö perustui yksinkertaiseen optoerottimella toteutettuun nollapisteilmajaan, jonka tarkkuus riitti tämän tutkimuksen mittauskohteissa, joissa jännitteiden yliaaltosisältö oli varsin kohtuullinen eikä kytkentävaihekulman absoluuttiselle tarkkuudelle ollut kovin suuria

vaatimuksia. Laitteessa on kuvassa näkyvät kaksi kontaktoria, joista oikeanpuoleista käytetään jälleenkytkennän tekemiseen ja vasemmanpuoleisella voidaan tehdä jännitekuoppa ennen jälleenkytkentää, jos laitteen jännitekuoppaliittimiin kytketään riittävän suuri vastuskuorma ja syötön oikosulkuvirta on riittävän pieni.

Laitteiden verkkoliittynnän osalta testit tehtiin kaikkien laitteiden osalta samalla tavalla eli tutkitavan laitteen rinnalle (tai kolmivaihelaitteiden tapauksessa kunkin vaiheen ja nollajohtimen välille) oli kytkettynä noin 610 W vastus simuloimaan tilannetta, että todellisessa verkossa tapahtuvassa jälleenkytkennässä yksittäisen laitteen rinnalla on muutakin kuormaa, joka (voi) nopeuttaa jännitteen laskua kj-johtolähdön laukaisun jälkeen. Todellisessa verkossakin jännitteiden käyttäytyminen voi vaihdella riippuen siitä, minkä tyyppistä kuormaa (esim. suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja toisaalta suoraan verkkoon kytkettyjä kulutuskojeita ja esim. resistiivistä lämmityskuormaa) laukaistavalla lähdöllä on. Laitteiden virtamittaukset tehtiin kuitenkin mittaamalla pelkästään laitteen ottamaa virtaa.

Jännitekuopat tehtiin taajuusmuuttajatesteissä heikentämällä syöttävän verkon yksivaiheista oikosulkuvirtaa tasolle $I_{k1} \approx 64 \text{ A}$ ja kytkemällä jälleenkytkentälaitteen jännitekuoppaliittimiin 1 kW ja 2 kW lämmitysvastukset, joilla saatiin tehtyä lievä jännitekuoppa (L1: ei kuoppaa, L2: kuopan jäännösjännite noin 85 % U_n , L3: kuopan jäännösjännite noin 80 % U_n) ennen jälleenkytkentää. Tehtävien jännitekuoppien syvyyttä rajoitti tässä tapauksessa lähinnä jälleenkytkentälaitteen kontaktorien nimellisvirta, joka oli $I_n = 12 \text{ A}$.

Oikosulkuvirtamittaukset tutkittujen laitteiden verkkoliittännöissä tehtiin Fluke 1654B asennustesterillä.

Koejärjestelyt taajuusmuuttajan testeissä on esitetty kuvassa 7.2. Muiden laitteiden testeissä käytettiin muuten samanlaista järjestelyä, mutta toista sähkönlaatuanalysointia ja epäsymmetrisen jännitekuopan tekemiseen tarvittavia vastuksia ja verkon heikentämiseen tarvittavia vastuksia ei käytetty. 1-vaihelaitteiden tapauksessa riitti luonnollisesti myös yksivaiheinen mitaus ja yksi kuormavastus.



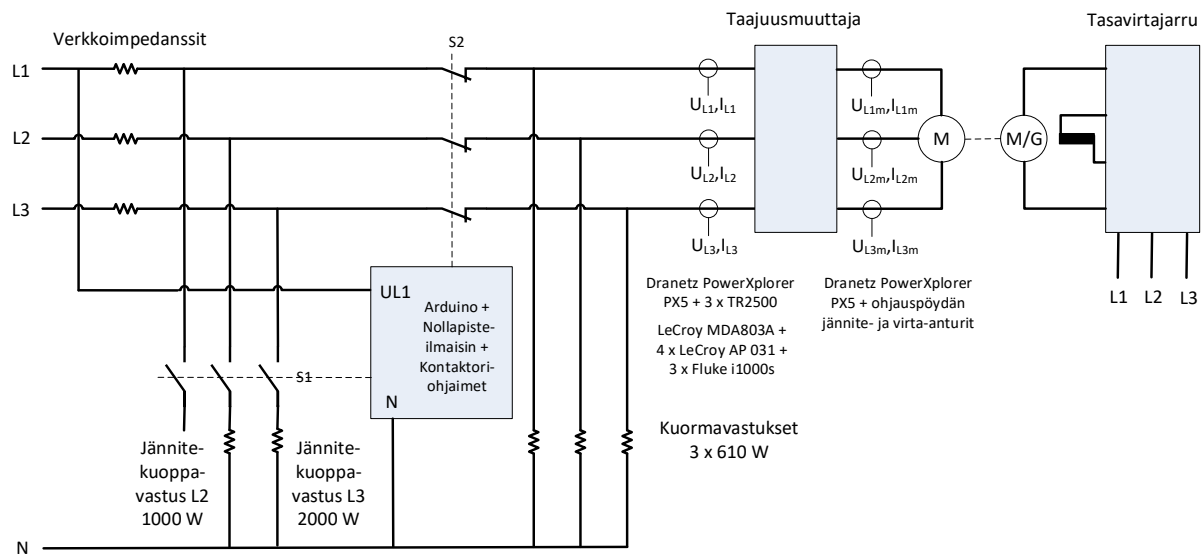
Kuva 7.2. Koejärjestely taajuusmuuttajan jälleenkytkentäkokeissa. Etualalla taajuusmuuttajan syöttämä oikosulkumootori, keskellä takana tutkittava taajuusmuuttaja, vasemmalla mittauksiin käytetty oskilloskooppi ja sen vieressä jälleenkytkentälaitte ja virtapihdit. Oikealla pöydällä taajuusmuuttajan verkkoliittynnän (+ kierrosnopeuden) ja moottorilähdön (+ momentin) mittauksiin käytetyt sähkönlaatuanalysointilaitteet. Oskilloskoopin pöydän takana taajuusmuuttajan verkkoliittynnän rinnalle kytketyt kuormavastukset (3 kpl lämpöpattereita á 610 W) ja epäsymmetrisen jännitekuopan tekemiseen käytetyt kuormavastukset (2 kpl lämpöpattereita, 1 kW ja 2 kW) sekä heikon verkon luomiseen käytetyt kolmivaiheiset tehovastusvaunut.

Tutkittujen laitteiden verkkoliityntöjen jännite- ja virtamittaukset tehtiin samanaikaisesti kahdella eri laitteistolla, joista oskilloskooppilaitteistoa käytettiin lähinnä referenssinä verifioidaan sähkölaatuanalysointilaitteen mittaustuloksia. Mittauksissa käytetyt laitteet olivat:

- Dranetz PowerXplorer PX5 sähkölaatu- ja häiriöanalysointilaitteet ja mitatusta laitteesta riippuen 2-3 kpl Dranetz TR2500 virtapihtejä (500 A), joiden taajuuskaistaksi valmistaja ilmoittaa 48...3000 Hz ja tarkkuudeksi:
 - 48 to 400 Hz: $\pm 1.5\%$ reading $\pm 0.6A$
 - 400 to 3000 Hz: $\pm 3\%$ reading $\pm 0.8A$
 - kulmavirhe (45 to 1000 Hz): vähemmän kuin 4°
- 8-kanavainen oskilloskooppi/moottorikäyttöanalysointilaitteet LeCroy MDA803A + ja mitatusta laitteesta riippuen 2-4 kpl LeCroy ADP 031 differentiaalimittapäitä jännitemittauksiin ja 2-3 kpl Fluke i1000s virtapihtejä (1000 A alueella), joiden taajuuskaistaksi valmistaja ilmoittaa 5 Hz...100 kHz ja tarkkuudeksi:
 - 1% of reading ± 1 mV
 - kulmavirhe: 50...200 A vähemmän kuin 3° , 200...1000 A vähemmän kuin 2°

Taajuusmuuttajan tapauksessa käytettiin lisäksi toista Dranetz PowerXplorer PX5 sähkölaatu- ja häiriöanalysointilaitteita mittaamaan moottorin syöttöjännitettä ja moottorin momenttia mutta näitä mittauksia ei ole tarkasteltu tässä raportissa. Momentin ja kierrosnopeuden mittaukseen oli moottorikäytön ohjauspöydässä lisäksi digitaaliläytöt.

Yksinkertaistettu kytkentäkaavio mittausjärjestelystä taajuusmuuttajan tapauksessa on esitetty kuvassa 7.3. Yksivaihelaitteiden tapauksessa järjestely oli muuten samanlainen, mutta toista Dranetzia ei käytetty ja mitattiin ainoastaan yksivaiheinen jännite ja vaihe- ja nollajohtimen virta.



Kuva 7.3. Yksinkertaistettu kytkentäkaavio mittausjärjestelystä taajuusmuuttajan tapauksessa.

7.2 Taajuusmuuttajakäyttö

Tutkittu taajuusmuuttajan nimellisvirta oli $I_{\text{cont,max}} = 13.9 \text{ A}$ ja nimellisteho $P_{\text{cont,max}} = 5.5 \text{ kW}$. Taajuusmuuttajan syöttämän oikosulkumoottorin nimellisteho oli 2,2 kW ja nimellismomentti $T_N = 22 \text{ Nm}$. Moottorin kuormana oli Simoreg D400/30:llä syötetty DC-moottori/generaattori GNAU3210B, jonka aiheuttamaa kuormamomenttia pystyttiin säätämään portaattomasti 1,5 Nm...22 Nm. Tarvittaessa suurempiakin kuormia olisi ollut mahdollista käyttää, mutta näissä kokeissa suurin momentti rajoitettiin 22 Nm:iin, joka oli moottorin nimellismomentti. Mitatut oikosulkuvirrat taajuusmuuttajan verkkoliityntäpisteessä on esitetty taulukossa 7-1.

Taulukko 7-1. Yksivaiheiset oikosulkuvirrat taajuusmuuttajan verkkoliityntäpisteessä.

Taajuusmuuttajakokeet				
Vaihe	Normaaliverkko		Heikko verkko *)	
	$I_{k1} [\text{A}]$	$R_{\text{loop}} [\text{ohm}]$	$I_{k1} [\text{A}]$	$R_{\text{loop}} [\text{ohm}]$
L1	718	0.33	63	3.57
L2	761	0.31	64	3.54
L3	765	0.31	64	3.54
keskiarvo	748	0.32	63.7	3.55
*) Jännitekuoppien tekemisen mahdollistava, lisäresistansseilla heikennetty verkko.				

Testeissä varioitiin:

- kuormamomenttia, pääsääntöisesti käytettiin momenteja 1,5 Nm, 5,5 Nm, 11 Nm, 16,5 Nm ja 22 Nm, jotka vastasivat 7 %, 25 %, 50 % 75 % ja 100 % kuormaa suhteessa nimelliskuormaan.
- jännitteen vaihekulmaa (POW, point-of-wave), jolla kuorma kytkettiin takaisin verkkoon jälleenkytkemisen jälkeisen välitilan jälkeen, pääasiassa käytettiin POW-arvoja 30°, 60°, 75°, 90°. 0 asteen kytkentäkulmalla jännitteen kytkentymisen aaltomuoto ja sen toistettavuus ei ollut tyydyttävä, joten sillä vaihekulmalla testejä ei tehty.
- jännitteettömän välitilan pituutta: 300 ms, 500 ms, 700 ms, 1.0 s, 2.0 s, 5.0 s ja 10.0 s
- syöttöjännitettä ennen jälleenkytkentää - ei jännitekuoppaa tai lievä epäsymmetrinen jännitekuoppa (alla olevat jännitteet suurimmalla kuormitusmomentilla mitattuna)
 - Vaihejännitteet: L1: ei kuoppaa, L2: kuopan jäännösjännite noin 85 % U_n , L3: kuopan jäännösjännite noin 80 % U_n
 - Pääjännitteet: L1-L2: kuopan jäännösjännite noin 85 % U_n , L2-L3: kuopan jäännösjännite noin 83 % U_n , L3-L1: kuopan jäännösjännite noin 85 % U_n

Testejä tehtiin lisäksi käyttämällä taajuusmuuttajaa kahdessa eri säätömoodissa:

- Skalaarisäätömoodissa, jossa moottorikäyttöä säädetään taajuusohjeella. Säätösuurina käytetään moottorin staattoriin syötettävän jännitteen taajuutta ja suuruutta. Roottorin tilaa ei huomioida, eli nopeus- tai asentotietojen takaisinkytkentää ei ole eikä myöskään momenttia voida säätää tarkasti. Tämä säätömoodi soveltuu lähinnä pumppu-, puhallinkäyttöihin, joissa ei tarvita tarkkaa säätöä. Taajuusmuuttajan käyttöohjeessa suositellaan tätä moodia käytettäväksi mm. monimoottorikäytöissä (jos esim. kuorma ei jakaudu tasan moottoreiden kesken tai moottorit ovat erikokoisia tai niitä tullaan vaihtamaan moottorin identifioinnin jälkeen) tai jos moottorin nimellisvirta on alle 1/6 taajuusmuuttajan nimellisvirrasta. Testeissä ei käytetty IR-kompensointia (IR compensation-arvo oli 0 %). IR-kompensoinnilla voidaan parantaa moottorin käyntiinlähtöä (käynnistysmomenttia) pysähdyksistä.

- DTC(Direct torque control)-moodissa hyödynnetään vektorisäätöä, mutta se on toteutettu ilman takaisinkytkentää. Säättösuureina ovat moottorin magneettivuo ja moottorin momentti. DTC-tekniikkaa käytettäessä ei tarvita modulaattoria eikä takometriä tai asentoanturia moottorin akselin nopeuden tai asennon takaisinkytkentään. Sillä saavutetaan erittäin nopea momenttivaste.

Taajuusmuuttajien testaaminen on siinä mielessä haastavaa, että niissä on kymmenistä satoihin käyttäjän aseteltavissa olevia parametreja, joista monilla voidaan vaikuttaa myös taajuusmuuttajan toimintaan jännitekuopissa ja lyhyissä tai pidemmissä keskeytyksissä. Tässä kuvattut testit on tehty käytettyjen säätömoodien edellyttämiä perusparametreja (syöttävän verkon jännite, syötettävän moottorin tiedot) lukuun ottamatta taajuusmuuttajan oletusasetuksilla.

Esimerkiksi ABB:n taajuusmuuttajissa alijännitesäädin on oletusarvoisesti käytössä. Taajuusmuuttajan syöttämä moottori toimii tällöin alijännitetilanteessa generaattorina ja ohjauskortit saavat sitä kautta sähkönsä. Kun katkos päättyy ja taajuusmuuttajan syöttöjännite palautuu, normaali toiminta jatkuu edellyttäen, että välipiirin jännite ei ole katkon aikana laskenut liian alas. Jos näin on käynyt ja taajuusmuuttajan toiminta on keskeytynyt esimerkiksi alijänniteviikaan ja taajuusmuuttaja on automaatiojärjestelmän ohjauksessa (ohjauskaapeliratkaisu tai kenttäväylä), taajuusmuuttaja on mahdollista asetella käynnistymään automaattisesti syöttöjännitteiden palattua. Taajuusmuuttajan parametroinnilla on mahdollista mm. määritellä kuinka monta kertaa taajuusmuuttaja yrittää uudelleenkäynnistystä esimerkiksi alijännitevian jälkeen ja millä aikavälillä.

Tässä hankkeessa tutkittu taajuusmuuttaja ei ollut liitettyä osaksi mitään automaatiojärjestelmää eikä käyttöohjeessa mainittuja automaattisia resetoiteja ja käynnistystä sen vuoksi voitu käyttää (niiden parametroinnilla ei ollut vaikutusta taajuusmuuttajan toimintaan).

7.2.1 Toiminnalliset testit

Taajuusmuuttajalle tehtiin sekä toiminnalliset testit että mittaukset, joilla pyrittiin kartoittamaan mm. taajuusmuuttajan kytkentävirtasysäyksiä ja eri tekijöiden vaikutusta niihin. Toiminnallisten testien päätulokset on esitetty taulukoissa 7-2...7-3. Kuten taulukoista nähdään taajuusmuuttaja on huomattavasti herkempi pikajälleenkytkentöjen aiheuttamille jännitekatkoille skalaarisäätömoodissa kuin DTC-säädöllä. Kuten luvussa 7.2.2 käsitellyistä kytkentävirtamittauksista ilmenee, erityisesti skalaarisäädöllä taulukkoon punaisella taustavärillä merkityt testitapaukset olivat sikäli ongelmallisia, että taajuusmuuttajan virheilmoitusta ei saatu kuitattua normaalitapaan pelkällä ohjauspaneelin reset-näppäimellä vaan se edellytti taajuusmuuttajan uudelleenkäynnistämistä (sähkönsyötön katkaisemista hetkeksi) tai peräkkäisiä reset- ja stop-näppäinten painalluksia.

Kytkenäkulmalla ei näytä olevan olennaista vaikutusta tuloksiin, kuten taulukosta 7-4 ilmenee. Kytkentäkulmatestejä tehtiin vain 0,3...0,7 sekunnin jännitteettömällä väliajoilla, koska tätä suuremmilla väliajoilla laitteen toiminnassa ei enää tapahtunut muutoksia. Tulosten perusteella valtaosa testeistä päätettiin tehdä noin 90 asteen kytkentäkulmalla (POW, point of wave) eli jälleenkytkennän jälkeinen jännitteen palautuminen tapahtui vaiheen L1 jännitteen vaihekulmalla noin 90 astetta.

Taajuusmuuttajan kaikkien toiminnallisten testien tulokset on esitetty liitteessä B. Kuten liitteen taulukoista ilmenee, tulokset olivat hyvin toistettavia: skalaarisäädöllä ainoastaan 0.5 sekunnin jännitteettömällä väliajalla pienimmällä momentilla ensimmäinen testi johti vikailmoitukseen, mutta muissa testeissä toiminta jatkui keskeytyksettä. Tämä saattoi johtua esimerkiksi moottorin lämpenemisestä (koesarja 1 oli päivän ensimmäinen). DTC-säädöllä communication faultin jälkeinen numero vaihteli joissain tapauksissa, mutta muuten toiminnassa ei ollut eroa koesarjan 1 ja 2 välillä.

Myöskään verkon heikentämisellä ja lievien epäsymmetristen jännitekuoppien lisäämisellä ennen jälleenkytkentää ei ollut vaikutusta tuloksiin (taulukot 7-5 ja 7-6). Tulosten yhteneväisyys selittyy seuraavilla tekijöillä:

- Heikossa verkossa tehdyissä testeissäkin jännite pysyi vielä standardin SFS-EN 50160 [5] rajoissa eli taajuusmuuttajan normaalilla käyttöjännitealueella.
- Testatussa lievässä epäsymmetrisissä jännitekuopassa taajuusmuuttaja ilmeisesti pystyy pitämään välipiirin jännitteen riittävän suurena, kun DC-välipiirin jännitteen kannalta olennainen suurin pääjännite (tässä tapauksessa kaksi niistä) oli noin 85 % nimellisestä 400 V:sta. Yksi vaihejännitteistä oli lisäksi standardin SFS-EN 50160 rajoissa (ei jännitekuoppa), mutta tällä ei ole taajuusmuuttajan kolmivaiheisen tasasuuntaajan kannalta merkitystä. Mahdolliset erot taajuusmuuttajan toiminnassa testatulla kuopalla ja ilman sitä eivät ainakaan tulleet esiin tässä testissä käytetyllä jännitteettömien väliaikojen ja moottorikuormitusten porrastuksella.

Kuten liitteen B taulukoista 7 ja 8 ilmenee, taajuusmuuttajan ollessa kuormittamattomana eli moottorin ollessa pysäyksissä, mutta taajuusmuuttaja jännitteisenä, toiminta oli DTC-säädöllä samanlainen kuin moottorin pyöriessä pienimmällä 1,5 Nm kuormitusmomentilla, mutta skalaarisäädöllä toiminta parani oleellisesti eli taajuusmuuttaja pysyi päällä vielä sekunnin jännitteettömällä väliajallakin samaan tapaan kuin DTC-säädölläkin.

Taulukko 7-2. Taajuusmuuttajan toiminta normaaliverkon jälleenkytkennöissä skalaarisäädöllä 90 asteen kytkentäkulmalla.

Skalaarisäätö, normaaliverkko, koesarja 1								
POW	T _m	Jälleenkytkennän jännitteetön väliaika [s], laitteen toiminta						
		0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
90°	1.5	C	f-NC 3 x	f-NC 3 x	S+B	S+B	S+B	S+B
	5.5	f-NC 3 x	f-NC 3	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B
	11	f-NC 3 x	f-NC 3	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B
	16.5	f-NC 3 x	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B
	22	f-NC 3 x	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B
C = jatkoi toimintaansa								
f-NC 3 = virheilmoitus, communication fault (3), kuitattavissa reset-näppäimellä								
f-NC 3 x = virheilmoitus, communication fault (3), ei yleensä poistunut pelkästään reset-näppäintä painamalla, vaan edellytti uudelleenkäynnistystä tai peräkkäiset reset- ja stop-näppäimien painallukset								
S+B = laite sammui ja käynnistyi uudelleen								

Taulukko 7-3. Taajuusmuuttajan toiminta normaaliverkon jälleenkytkennöissä DTC-säädöllä 90 asteen kytkentäkulmalla.

DTC-säätö, normaaliverkko, koesarja 1								
POW	T _m	Jälleenkytkennän jännitteetön väliaika [s], laitteen toiminta						
		0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
90°	1.5	C	C	C	C	f-NC 3	S+B	S+B
	5.5	C	C	C	f-UV	S+B	S+B	S+B
	11	C	C	f-UV	f-NC 8	S+B	S+B	S+B
	16.5	C	f-UV	f-NC 2	f-NC 3	S+B	S+B	S+B
	22	C	f-UV	f-NC 3	S+B	S+B	S+B	S+B
C = jatkoi toimintaansa								
f-UV = virheilmoitus, undervoltage (3220)								
f-NC 2 = virheilmoitus, communication fault (2), kuitattavissa reset-näppäimellä								
f-NC 3 = virheilmoitus, communication fault (3), kuitattavissa reset-näppäimellä								
f-NC 8 = virheilmoitus, communication fault (8), kuitattavissa reset-näppäimellä								
S+B = laite sammui ja käynnistyi uudelleen								

Taulukko 7-4. Taajuusmuuttajan toiminta normaaliverkon jälleenkytkennöissä skalaarisäädöllä eri kytkentäkulmilla.

Skalaarisäätö, normaaliverkko, koesarja 2												
Jälleenkytkennän jännitteetön väliaika [s], laitteen toiminta												
POW	30°			60°			75°			90°		
T _m	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7
1.5	C	C	f-NC 3 x	C	C	f-NC 3 x	C	C	f-NC 3 x	C	C	f-NC 3
5.5	f-NC 3 x	f-NC 3 x	S+B	f-NC 3 x	f-NC 3 x	S+B	f-NC 3 x	f-NC 3 x	S+B	f-NC 3 x	f-NC 2 x	S+B
11	f-NC 3 x	f-NC 3		f-NC 3 x	f-NC 3		f-NC 3 x	f-NC 3		f-NC 3 x	f-NC 3	
16.5	f-NC 3 x	f-NC 3		f-NC 3 x	f-NC 3		f-NC 3 x	f-NC 3		f-NC 3 x	f-NC 3	
22	f-NC 3 x	S+B		f-NC 3 x	S+B		f-NC 3 x	S+B		f-NC 3 x	S+B	
C = jatkoi toimintaansa												
f-NC 2 = virheilmoitus, communication fault (3), kuitattavissa reset-näppäimellä												
f-NC 3 x = virheilmoitus, communication fault (3), ei yleensä poistunut pelkästään reset-näppäintä painamalla, vaan edellytti uudelleenkäynnistystä tai peräkkäiset reset- ja stop-näppäimien painallukset												
f-NC 3 = virheilmoitus, communication fault (3), kuitattavissa reset-näppäimellä												
S+B = laite sammui ja käynnistyi uudelleen												

Taulukko 7-5. Taajuusmuuttajan toiminta heikon verkon jälleenkytkennöissä ilman jälleenkytkentää edeltävää jännitekuoppaa DTC-säädöllä 90 asteen kytkentäkulmalla.

DTC-säätö, heikko verkko, pelkkä pj-k ilman jännitekuoppaa								
Jälleenkytkennän jännitteetön väliaika [s], laitteen toiminta								
POW	T _m	0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
90°	1.5	C	C	C	C	f-NC 3	S+B	S+B
	5.5	C	C	C	f-UV	S+B	S+B	S+B
	11	C	C	f-UV	f-NC 3	S+B	S+B	S+B
	16.5	C	f-UV	f-NC 8	f-NC 3	S+B	S+B	S+B
	22	f-UV	f-UV	f-NC 3	S+B	S+B	S+B	S+B
C = jatkoi toimintaansa								
f-UV = virheilmoitus, undervoltage (3220)								
f-NC 3 = virheilmoitus, communication fault (3), kuitattavissa reset-näppäimellä								
f-NC 8 = virheilmoitus, communication fault (8), kuitattavissa reset-näppäimellä								
S+B = laite sammui ja käynnistyi uudelleen								

Taulukko 7-6. Taajuusmuuttajan toiminta heikon verkon jälleenkytkennöissä DTC-säädöllä 90 asteen kytkentäkulmalla, kun jälleenkytkentää edelsi epäsymmetrinen jännitekuoppa.

DTC-säätö, heikko verkko, epäsymmetrinen jännitekuoppa ennen pj:ta								
Jälleenkytkennän jännitteetön väliaika [s], laitteen toiminta								
POW	T _m	0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
90°	1.5	C	C	C	C	f-NC 8	S+B	S+B
	5.5	C	C	C	f-UV	S+B	S+B	S+B
	11	C	C	f-UV	f-NC 2	S+B	S+B	S+B
	16.5	C	f-UV	f-NC 3	f-NC 3	S+B	S+B	S+B
	22	f-UV	f-UV	f-NC 3	S+B	S+B	S+B	S+B
C = jatkoi toimintaansa								
f-UV = virheilmoitus, undervoltage (3220)								
f-NC 2 = virheilmoitus, communication fault (2), kuitattavissa reset-näppäimellä								
f-NC 3 = virheilmoitus, communication fault (3), kuitattavissa reset-näppäimellä								
f-NC 8 = virheilmoitus, communication fault (8), kuitattavissa reset-näppäimellä								
S+B = laite sammui ja käynnistyi uudelleen								

7.2.2 Kytkentävirtasysäysten mittaukset

Kenttämittauksissa saatiin alustavia viitteitä siitä, että jälleenkytkennän jännitteettömän väliajan pituus todennäköisesti vaikuttaa taajuusmuuttajan kytkentävirtasysäyksen suuruuteen jännitteen palatessa. Tätä tutkittiin tarkemmin laboratoriomittauksilla varioimalla

- moottorin kuormitusmomenttia,
- jälleenkytkennän jännitteetöntä väliaikaa,
- jännitteiden palautumisen vaihekulmaa (kytkentäkulmaa) ja
- syöttöjännitettä ennen jälleenkytkentää (ei jännitekuoppaa tai epäsymmetrinen jännitekuoppa)

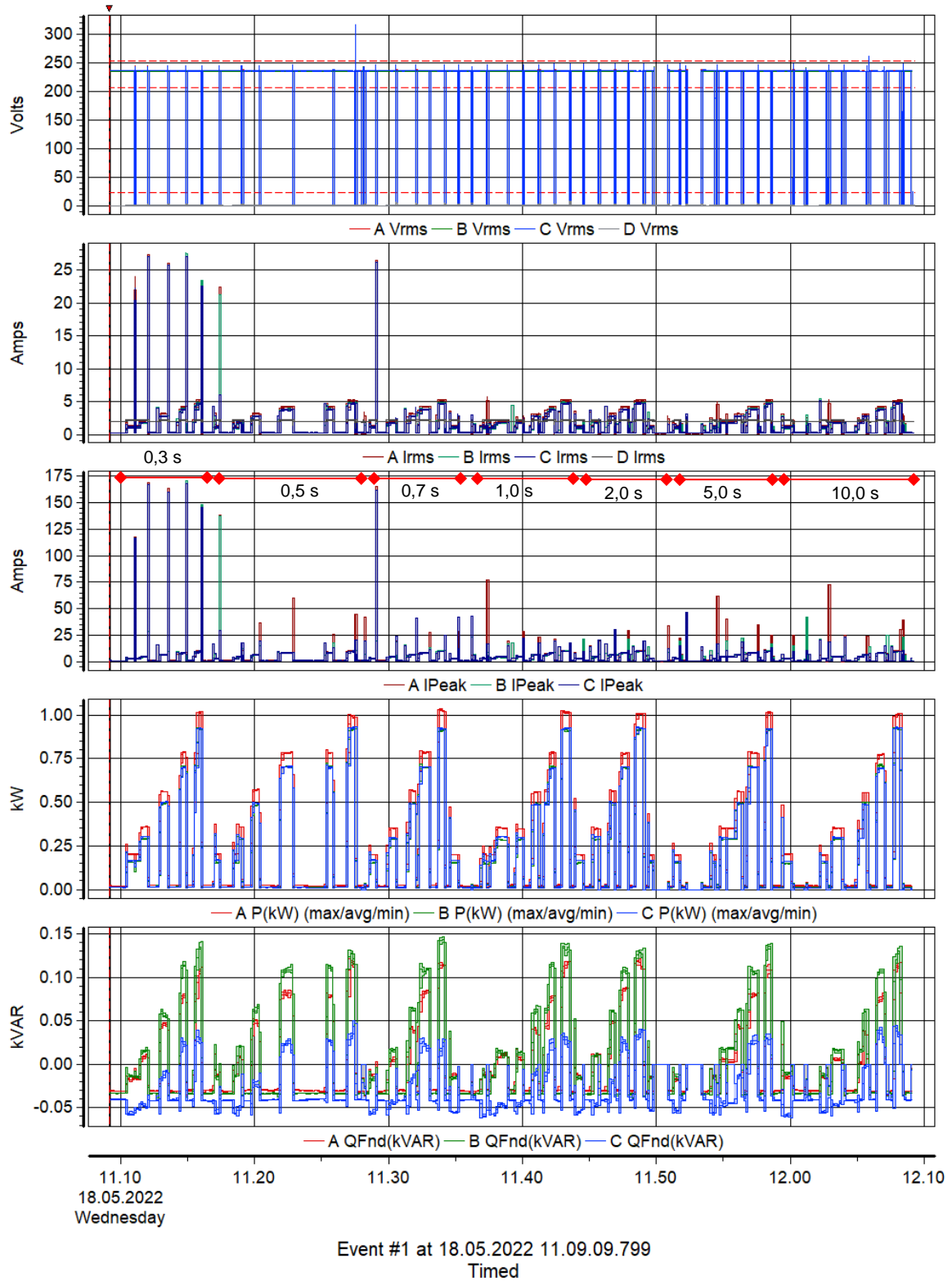
Mittausten tulokset on esitetty kuvissa 7.2...7.4 ja liitteen C taulukoissa. Kuvat ovat Dranetz-mittauksista ja liitteen taulukot on koottu oskilloskooppimittauksen datoista, mutta tulokset ovat oleellisilta osin varsin yhteneväiset. Eroja esiintyi lähinnä hyvin nopeiden kytkentätransienttien suuruuksissa, joiden huippuarvo rekisteröityi oskilloskooppimittauksilla tarkemmin, mutta transientit olivat niin lyhytkestoisia (eikä niiden alkuperä ollut täysin selvillä), että niillä ei arvioitu olevan merkitystä laitteen toiminnan tai kestävyuden kannalta.

Kuten kuvista ilmenee, skalaarisäädöllä kytkentävirtasysäykset olivat 0,3 sekunnin jännitteettömällä väliajalla kaikilla kuormituksilla varsin suuret, mutta erityisesti tapauksissa, joissa moottori pysähtyi taajuusmuuttajan virheilmoitukseen communication fault (3). Näissä tapauksissa käynnistysvirtasysäykset olivat huippuarvoltaan 148...171 A ja ne johtivat taajuusmuuttajan jumiutumiseen niin, että virheilmoitusta ei saatu kuitattua pelkällä reset-näppäimellä vaan se edellytti joko taajuusmuuttajan uudelleenkäynnistämistä tai peräkkäistä ohjauspaneelin reset- ja stop-näppäinten painamista.

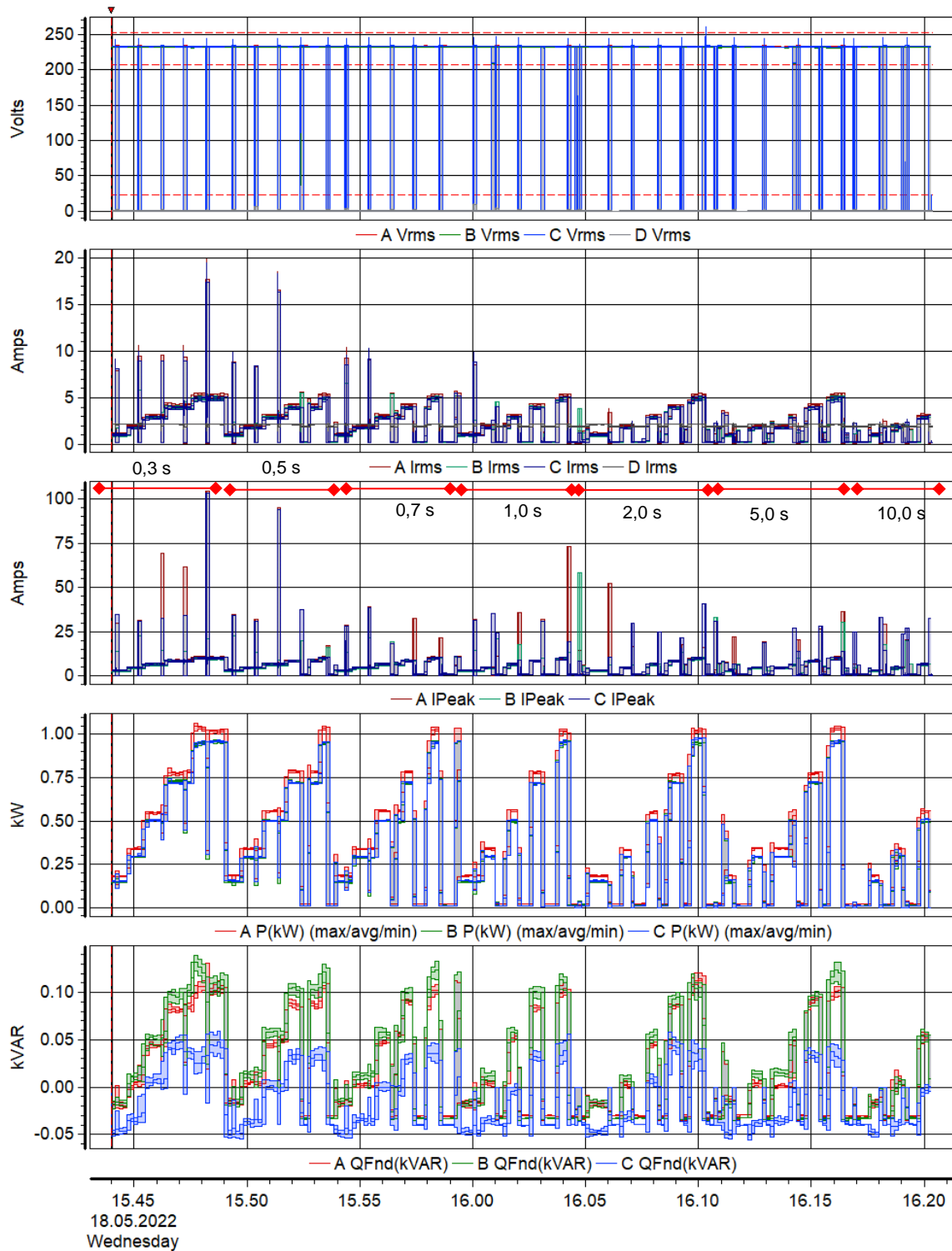
DTC-säädöllä kuormitus vaikutti kytkentävirtasysäyksen suuruuteen muuten melko vähän, mutta 0,3 sekunnin jännitteettömällä väliajalla suurimmalla (=moottorin nimellisellä) momentilla kuormitettaessa ja 0,5 s väliajalla suurimmalla toiminnan jatkumisen sallineella momentilla kuormitettaessa kytkentävirtasysäyksen suurin huippuarvo oli 96...104 A, kun se muuten oli moottorin toiminnan jatkuessa 29...35 A. Jos moottori ja taajuusmuuttaja pysähtyivät, käynnistysvirtasysäys jännitteen palatessa tyypistyi hyvin lyhyeksi transientiksi, jonka huippuarvo oli 5 kHz ylärajataajuudella suodatetuissa oskilloskooppimittauksissa säännöllisesti noin 23...26 A suuruusluokkaa ja tehollisarvo alle 1,5 A. Huomionarvoista on myös, että DTC-säädöllä suuret kytkentävirtasysäykset eivät vaikuttaneet taajuusmuuttajan toimintaan eivätkä aiheuttaneet virheilmoitusta ja toisaalta samantyyppisiin virheilmoituksiin, joihin skalaarisäädöllä liittyi hyvin suuri kytkentävirtasysäys ja taajuusmuuttajan ohjauspaneelin jumiutuminen, ei DTC-säädöllä liittynyt kumpaakaan.

Kuvassa 7.6 on esitetty taajuusmuuttajan kytkentävirtasysäykset DTC-säätömodissa eri kytkentäkulmilla (POW). Kuten kuvasta nähdään kytkentäkulmalla ei näytä olevan johdonmukaista vaikutusta kytkentävirtasysäysten suuruuteen, vaan vaihtelu näyttäisi olevan satunnaista.

Kuvissa 7.7 ja 7.8 on esitetty kytkentävirtasysäykset heikennetyssä verkossa ilman jälleenkytkentää edeltävää jännitekuoppa ja jännitekuopan kanssa. Kuten kuvista nähdään, suuria ja johdonmukaisia eroja ei ole havaittavissa. Tämä selittyy luvussa 7.2.1 toiminnallisten testien yhteydessä mainituilla tekijöillä.

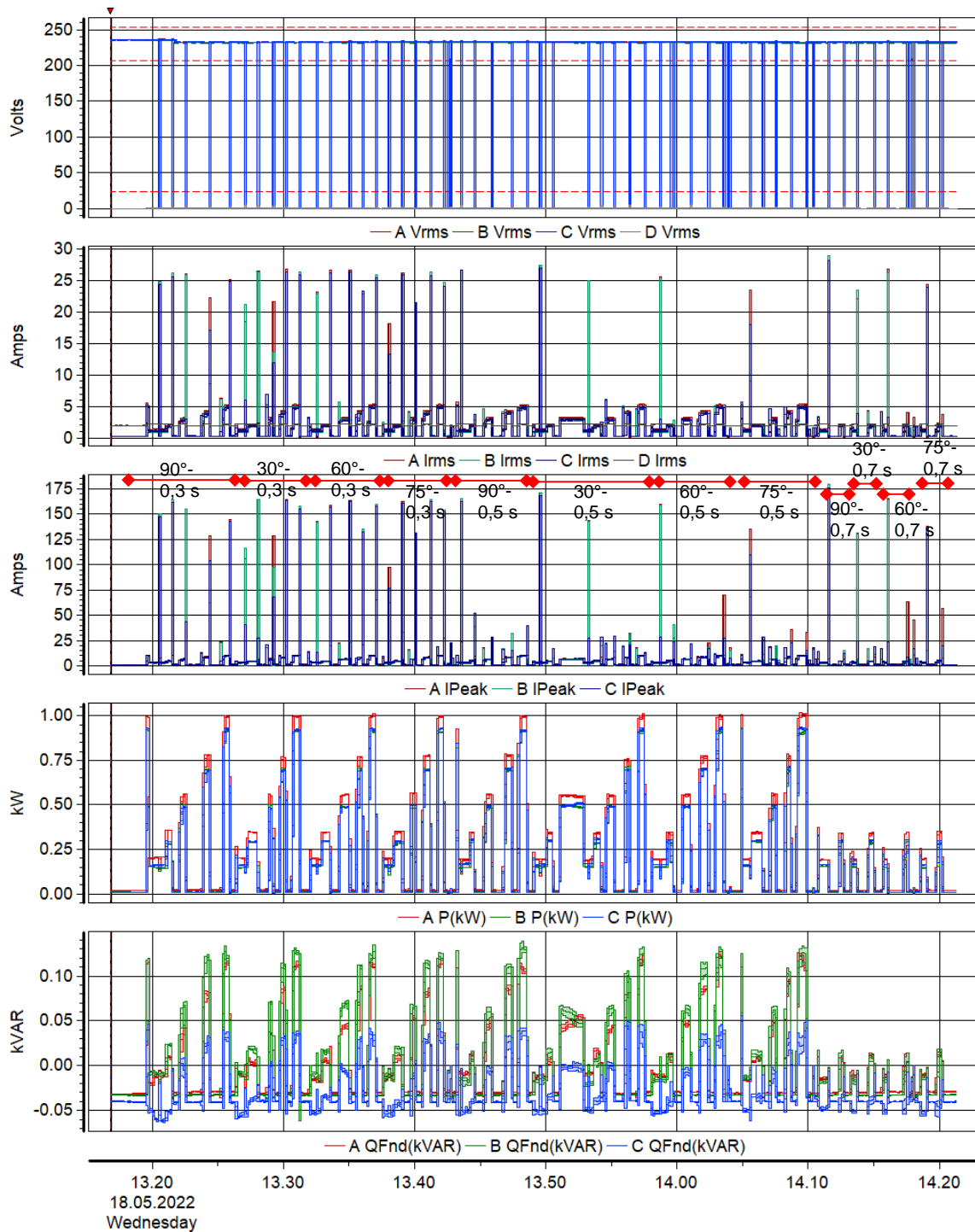


Kuva 7.4. Taajuusmuuttajan verkkoliittynän vaihejännitteiden ja -virtojen 20 ms tehollisarvot, vaihevirtojen hetkelliset huippuarvot ja vaihekohtaiset pätötehot ja perusaallon loistehot skaalarisäädöllä tehdyissä kokeissa erilaisilla jälleenkytkennän jännitteettömillä väliajoilla (eroteltu punaisilla janoilla), normaaliverkon koesarja 1.



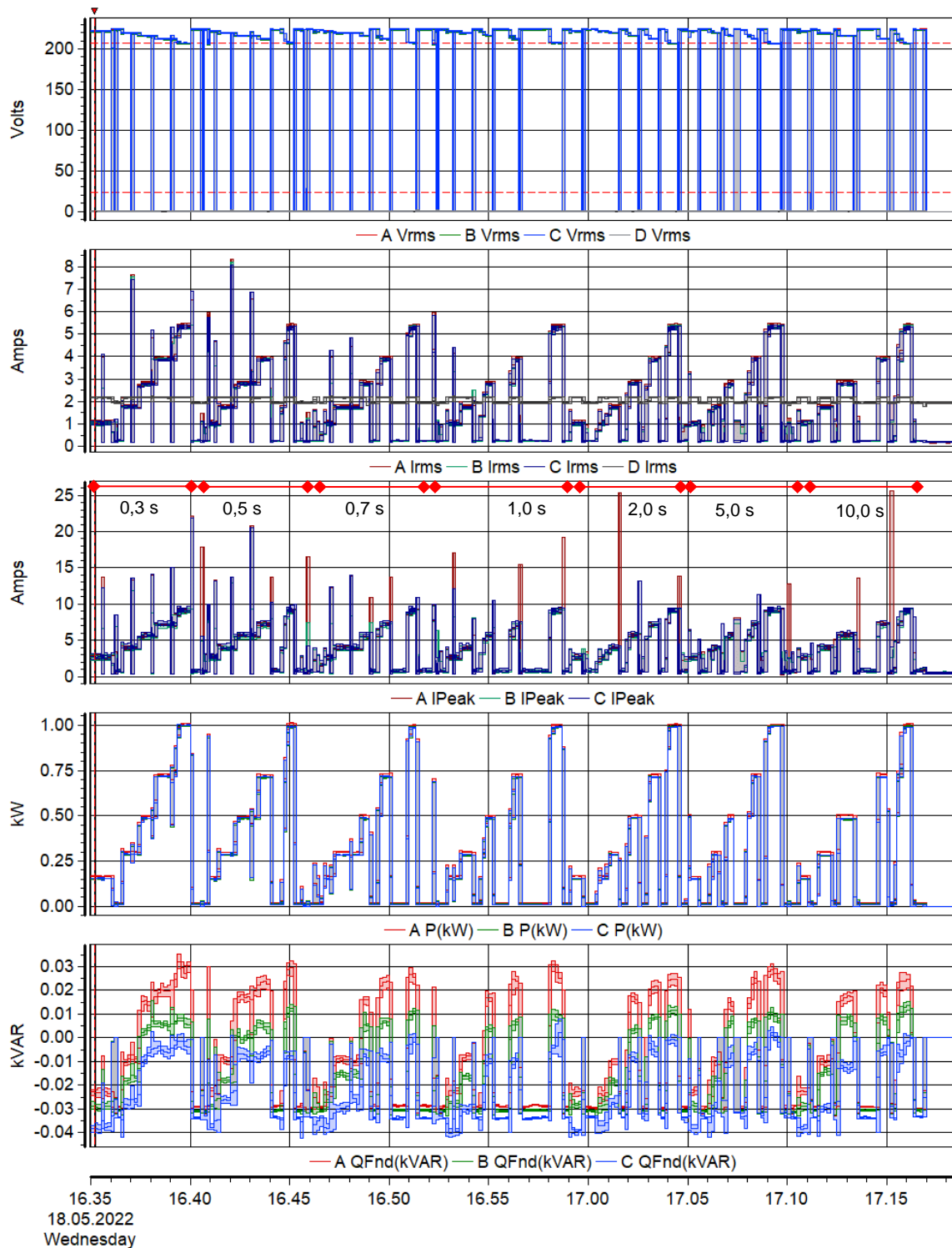
Event #1 at 18.05.2022 15.43.59.800
Timed

Kuva 7.5. Taajuusmuuttajan verkkoliittymän vaihejännitteiden ja -virtojen 20 ms tehollisarvot, vaihevirtojen hetkelliset huippuarvot ja vaihekohtaiset pätötehot ja perusaallon loistehot DTC-säädöllä tehdyissä kokeissa erilaisilla jälleenkytkennän jännitteettömillä väliajoilla (eroteltu punaisilla janoilla), normaaliverkon koesarja 2.



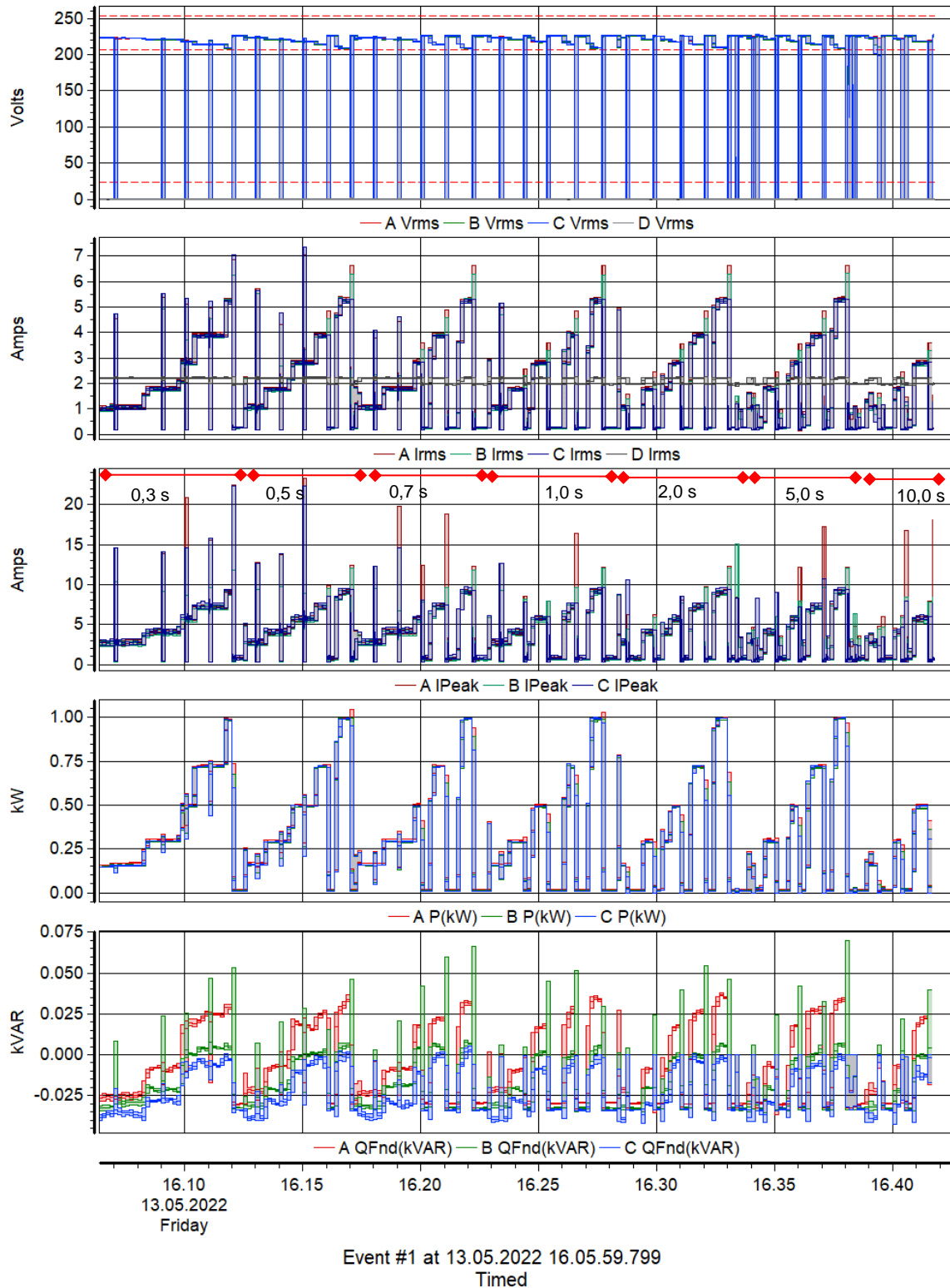
Event #1 at 18.05.2022 13.16.49.799
Timed

Kuva 7.6. Taajuusmuuttajan verkkoliittynän vaihejännitteiden ja -virtojen 20 ms tehollisarvot, vaihevirtojen hetkelliset huippuarvot ja vaihekohtaiset pätötehot ja perusaallon loistehot skaalarisäädöllä eri kytkentäkulmilla (POW) ja jännitteettömillä väliajoilla tehdyissä kokeissa, normaaliverkko.



Event #1 at 18.05.2022 16.35.09.799
Timed

Kuva 7.7. Taajuusmuuttajan verkkoliittynän vaihejännitteiden ja -virtojen 20 ms tehollisarvot, vaihevirtojen hetkelliset huippuarvot ja vaihekohtaiset pätötehot ja perusaallon loistehot DTC-säädöllä tehdyissä kokeissa erilaisilla jälleenkytkennän jännitteettömillä väliajoilla (eroteltu punaisilla janoilla), heikko verkko ($I_{k1} \approx 64$ A), ei jännitekuoppaa ennen.



Kuva 7.8. Taajuusmuuttajan verkkoliittymän vaihejännitteiden ja -virtojen 20 ms tehollisarvot, vaihevirtojen hetkelliset huippuarvot ja vaihekohtaiset päätöhetot ja perusaallon loistehot DTC-säädöllä tehdyissä kokeissa erilaisilla jälleenkytkennän jännitteettömällä väliajoilla (eroteltu punaisilla janoilla), heikko verkko ($I_{k1} \approx 64$ A), epäsymmetrinen jännitekuoppa ennen jälleenkytkentää.

7.2.3 Yhteenvedo taajuusmuuttajatesteistä

Käynnistysvirtamittausten ja toiminnallisten testien perusteella näyttäisi siltä, että kokonaisuutena parhaiten toimivia olisivat ainakin tämäntyyppisen taajuusmuuttajan tapauksessa 1,0 sekunnin tai sitä pidemmät jälleenkytkennän jännitteettömät väliajat. Täysin ilman virheilmoituksia taajuusmuuttaja toimi testatuista jännitteettömistä väliajoista vasta 5,0 sekunnin väliajalla (DTC-säädöllä esiintyi hyvin pienellä kuormalla vielä 2,0 sekunnin jännitteettömällä väliajalla reset-näppäimellä kuitattavissa olevia virheilmoituksia). Erityisesti laajemmissa järjestelmissä, joissa on useita automaatiojärjestelmän ohjaamia taajuusmuuttajia, joista osaa saatetaan käyttää syystä tai toisesta skalaarisäätömodissa, lyhyemmät jälleenkytkennän jännitteettömät väliajat todennäköisesti saavat aikaan sen, että osa taajuusmuuttajista ei jälleenkytkennän jälkeen palaudu toimintaan ilman käyttäjän manuaalisesti tekemiä toimenpiteitä.

7.3 Ilmanvaihtokone maaviileäjäähdytyksellä

Ilmanvaihtokoneen (kuva 7.9) käyttäytymistä tutkittiin omakotitalokohteessa. Laitteessa on pyörivä lämmönsiirrin ja siinä on lisäksi tuloilman jäähdytys maaviileällä eli laitteeseen on integroitu lämmönvaihdin, jossa kiertää maalämpöpumpun maalämpökaivon neste. Jäähdytyksen ohjaukseen tarvittavan kolmitieventtiilin ja kiertovesipumpun ohjaus ja sähkönsyöttö tulevat ilmanvaihtokoneen ohjauskortin kautta. Laitteessa on neljä ohjelmoitavaa toimintatilaa: koton, poissa, tehostus ja ylipaine, ja kussakin esimerkiksi puhallinnopeudet ovat portaattomasti ohjelmoitavissa. Talon huonetiloihin sijoitettua laitteen langatonta ohjauspaneelia pidettiin jälleenkytkentäkokeiden ajan lataustelineessä, jossa se normaalisti on. Myös latausteline saa DC-sähkönsyöttönsä ilmanvaihtokoneen ohjauskortilta. Laitteessa on lisäksi langallinen ethernet-liitäntä, joka mahdollistaa laitteen etäohjauksen ja mittaustietojen ja -historian tarkastelun internet-käyttöliittymän kautta. Laitetta testattiin sekä talon ethernet-verkkoon liitettynä että ethernet-verkosta irrotettuna, mutta sillä ei havaittu olevan vaikutusta laitteen toimintaan. Muut koetilanteen asetukset olivat:

- tuloilmapuhaltimen ($P_{\text{tulo}} = 230 \text{ W}$) nopeus: 55 %,
- poistoilmapuhaltimen ($P_{\text{poisto}} = 230 \text{ W}$) nopeus: 60 %,
- maaviileäjäähdytys: päällä, kiertovesipumpun tehoasetus 20 W

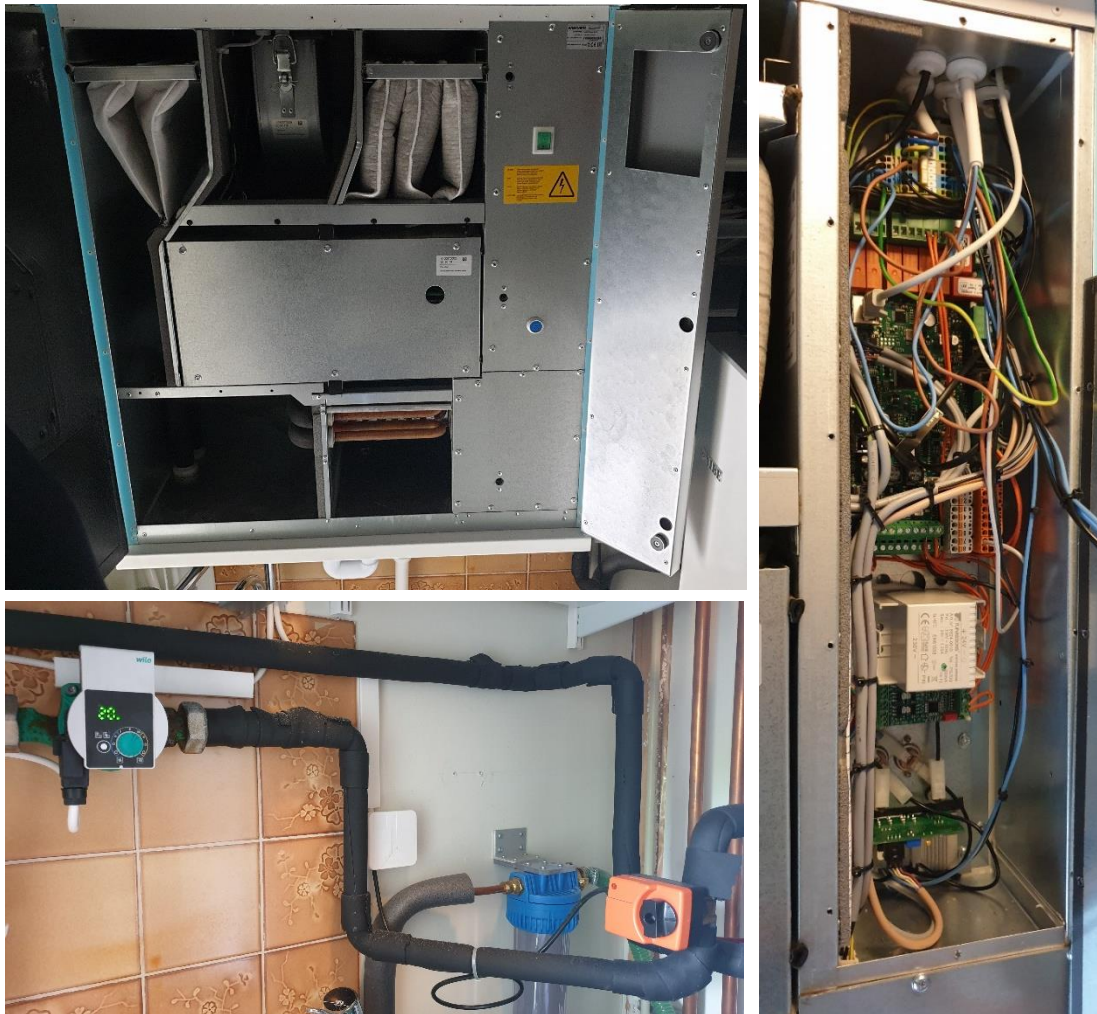
Jälleenkytkentöjen jälkeen maaviileäjäähdytyksen käynnistymisviive oli ilmeisesti niin pitkä, että kiertovesipumppu ei ehtinyt palautua toimintaan tehdyissä testeissä lukuunottamatta aivan viimeisiä testejä, kuten kuvasta 7.10 ilmenee. Mitattu yksivaiheinen oikosulkuvirta ilmanvaihtokoneen verkkoliitännässä oli kokeiden aikana $I_{k1} = 638 \text{ A}$ ja verkkojännite kokeiden aikana keskimäärin noin 229 V. Laitteen rinnalle oli tässäkin tapauksessa kytkettyä luvussa 7.1 mainittu lämmitysvastus.

Kuten taulukosta 7-7 ilmenee, jälleenkytkennän jännitteettömästä väliajasta riippumatta laite jatkoi toimintaansa jälleenkytkennän jälkeen ilman käyttäjän toimia. Täysin katkotta laite toimi kuitenkin vain lyhyimmällä 300 ms jännitteettömällä väliajalla ja silläkin vain osassa testeistä.

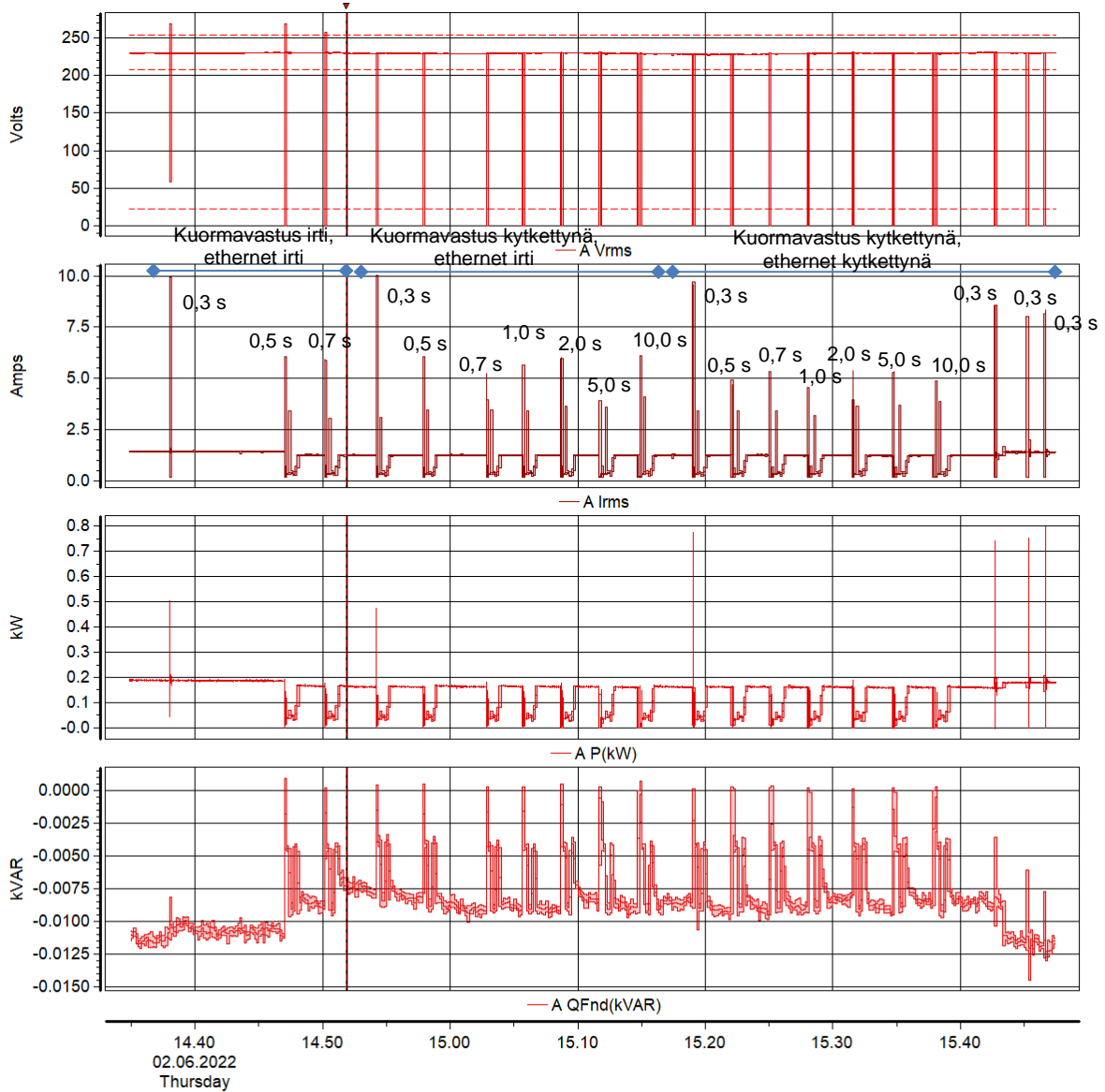
Taulukko 7-7. Ilmanvaihtokoneen toiminta jälleenkytkennöissä noin puolella teholla 90 asteen kytkentäkulmalla.

Ilmanvaihtokone maaviileäjäähdytyksellä, puhallinnopeudet: tuloilma 55 %, poistoilma 60 %				Jälleenkytkennän jännitteetön väliaika [s], laitteen toiminta						
POW	Kuormavastus	Ethernet	Muuta	0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
90°	irti	irti	1 pjk	C	S+B	S+B				
	kytkettynä	irti	1 pjk	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B
	kytkettynä	kytkettynä	1 pjk	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B
	kytkettynä	kytkettynä	2 peräkkäistä pjk:ta alle sekunnin väliajalla	C						
	kytkettynä	kytkettynä	1 pjk, uusintakoe	C						
	kytkettynä	kytkettynä	1 pjk, uusintakoe	C						
C = laite jatkoi toimintaansa										
S+B = laite sammui ja käynnistyi uudelleen sammumista edeltäneeseen tilaan										

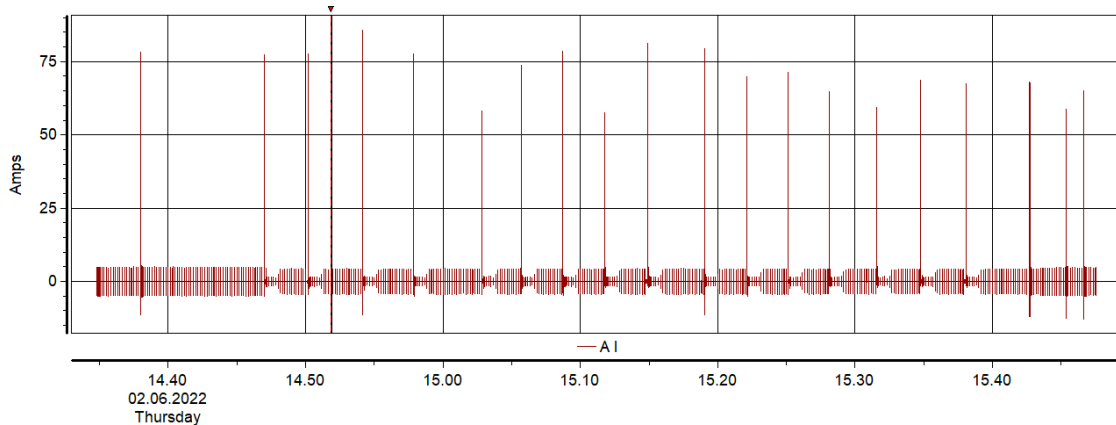
Kuvassa 7.10 on esitetty 20 ms jaksoilta 10 ms välein laskettujen jännitteiden ja virtojen tehollisarvojen sekä pätötehojen ja loistehojen 10 sekunnin minimi- maksimi ja keskiarvot (tehollisarvot) sekä alimmassa osakuvassa virtojen suurimmat hetkellisarvot jännitteen palautumishetkiltä jälleenkytkennän jännitteettömien väliaikojen jälkeen. Kuten kuvasta nähdään, virran huippuarvot näyttävät vaihtelevan melko satunnaisesti 58...86 A välillä, mutta tehollisarvot ovat johdonmukaisesti ja selvästi suurimmat lyhyimmällä 300 ms jännitteettömällä väliajalla.



Kuva 7.9. Ilmanvaihtokone, sen ohjauselektronikka ja ilmanvaihtokoneen kautta sähkönsyöttönsä saavat maaviileäjäähdytyksen kiertovesipumppu ja kolmitieventtiili.



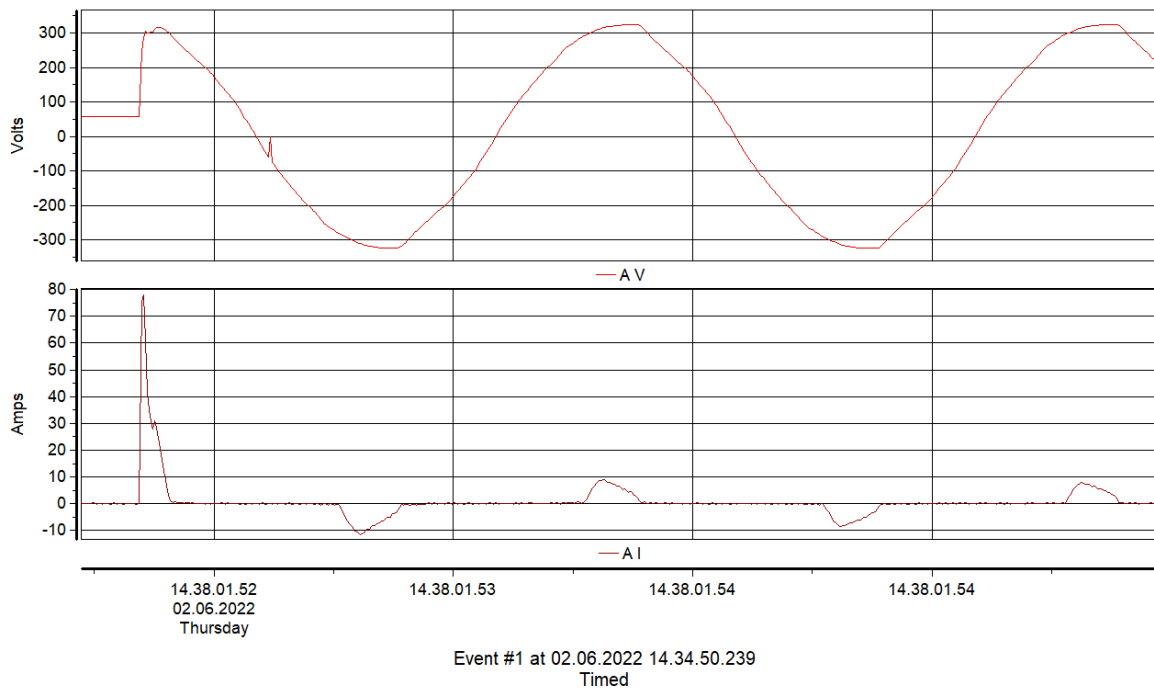
Event #402 at 02.06.2022 14.51.49.799
Timed



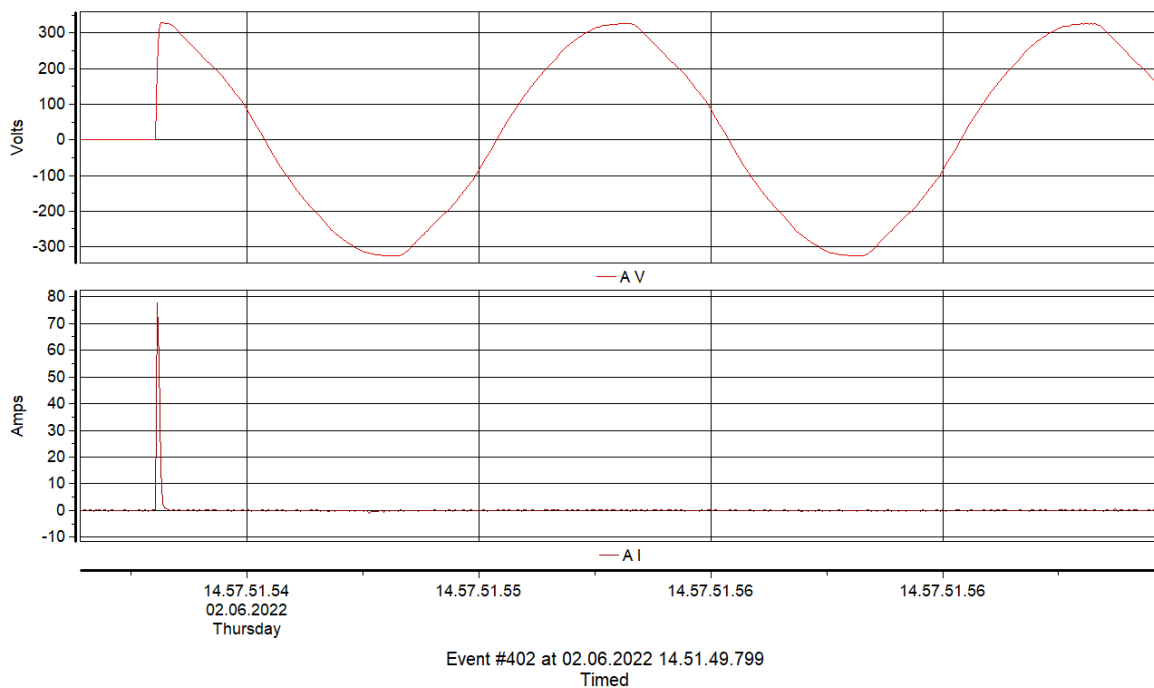
Event #402 at 02.06.2022 14.51.49.799
Timed

Kuva 7.10. 20 ms jaksoilta 10 ms välein laskettujen jännitteiden ja virtojen tehollisarvojen sekä pätehojen ja lois-
tehojen 10 sekunnin minimi- maksimi ja keskiarvot (tehollisarvot) sekä alimmassa osakuvassa virtojen suurimmat
hetkellisarvot jännitteen palautumishetkiltä jälleenkytkennän jännitteettömien väliaikojen jälkeen.

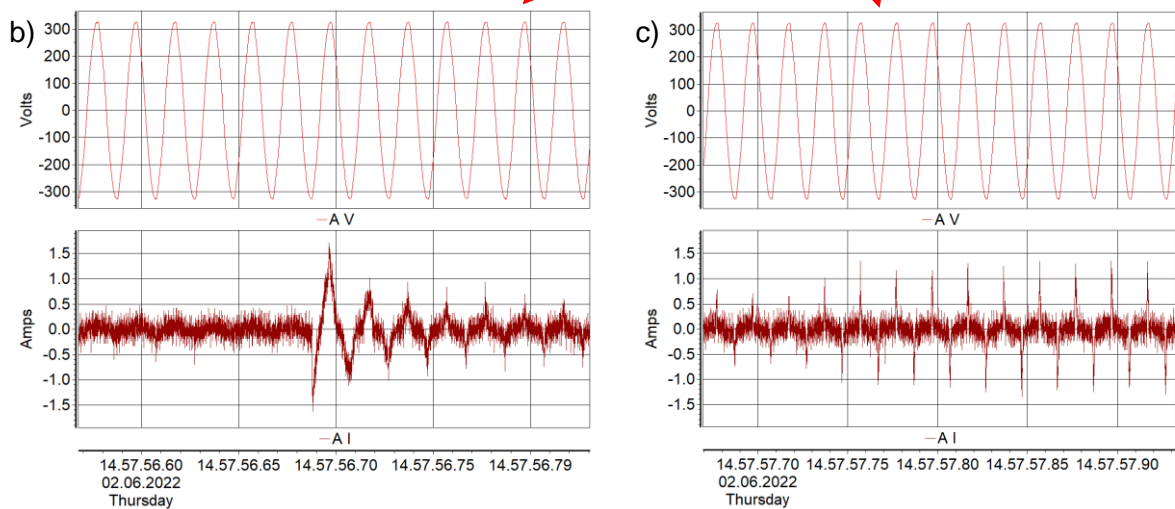
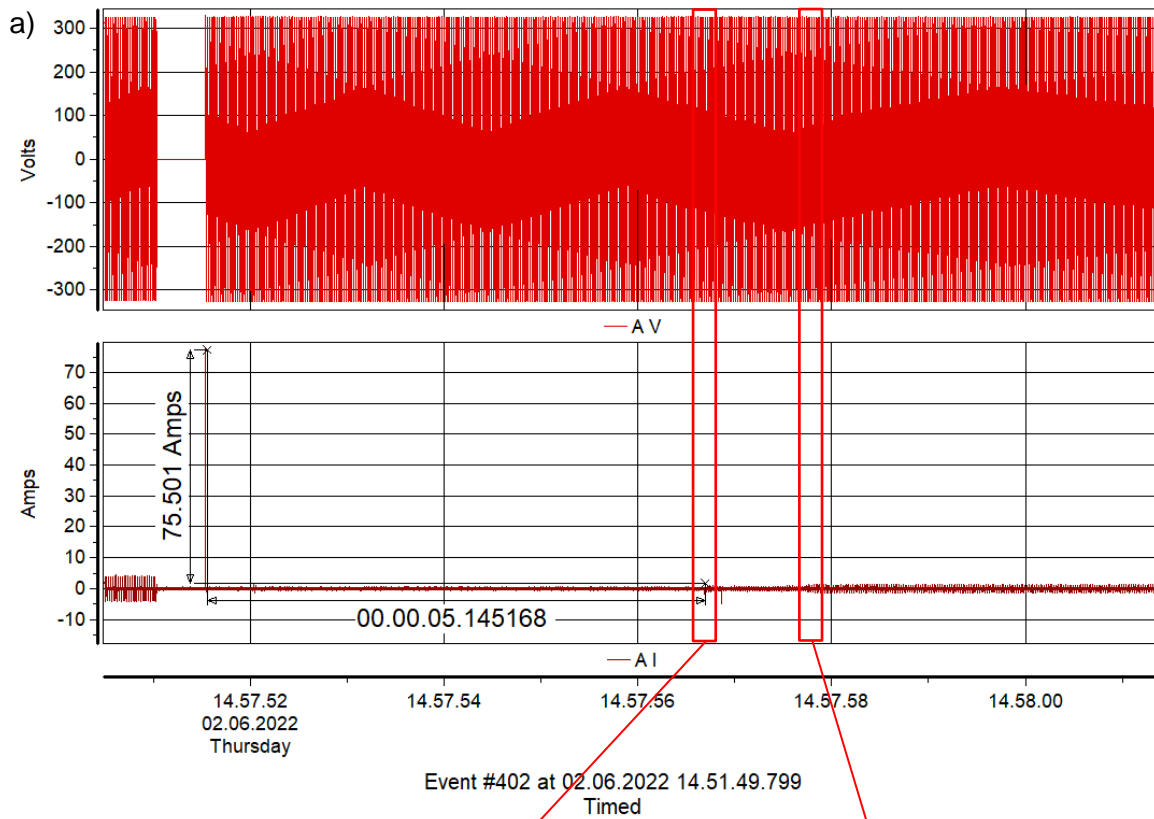
Kuten kuvissa 7.11 ja 7.12 esitetystä aaltomuotokuvista ilmenee, 300 ms jännitteettömällä väliajalla kytkentävirtasysäys jännitteen palatessa on selvästi pidempikestoinen ja virtasysäyksen energia suurempi kuin 500 ms jännitteettömällä väliajalla. 500 ms ja sitä suuremmilla jännitteettömällä väliajoilla kokoaaltotasasuuntaajalle ominaista virtaa jännitteen molemmilla puolijaksoilla ei ollut havaittavissa heti kytkentävirtasysäyksen jälkeen, vaan se alkoi vasta noin 5 sekunnin kuluttua jännitteen palaamisesta, kuten kuvassa 7.13 esitetystä esimerkistä ilmenee. Noin 7 sekunnin kuluttua jännitteen palaamisesta virta kasvoi hieman (tehollisarvoltaan noin 0,2 A:sta 0,3 A:iin), mutta laitteen puhaltimet käynnistyivät ja alkoivat nostaa pyörimisnopeuttaan aseteltuun arvoon vasta noin minuutin kuluttua jännitteen palaamisesta.



Kuva 7.11. Ilmanvaihtokoneen verkkoliitännän vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot jännitteen palatessa jällekytkennän jälkeen 300 ms jännitteettömällä väliajalla.



Kuva 7.12. Ilmanvaihtokoneen verkkoliitännän vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot jännitteen palatessa jälleenkynnän jälkeen 500 ms jännitteettömällä väliajalla.



Kuva 7.13. a) Ilmanvaihtokoneen verkkoliitännän vaihejännitteen ja -virran aaltomuodot jännitteen palatessa jälleenkynnän jälkeen 500 ms jännitteettömällä väliajalla, b) ja c) osasuurenokset kuvaan a) punaisilla suorakaitteilla merkityistä kohdista.

7.4 Jääkaappi-pakastin mekaanisilla termostaateilla

Ensimmäinen tutkituista kylmälaitteista oli 1990-luvun alussa valmistettu vanha jääkaappi-pakastin. Laitteessa on jääkaapille ja pakastimelle omat erilliset kompressorinsa ja molempien

osien lämpötilasäädöt on toteutettu mekaanisilla termostaateilla. Laitteen nimellisteho on 160 W ja kylmäaineena on R12. Kokeiden ajan laitetta käytettiin pikapakastustila päällekytkettynä, jolla varmistettiin, että pakastinosan kompressori pyrki käymään jatkuvasti. Mitattu yksivaiheinen oikosulkuvirta laitteen verkkoliitännässä oli $I_{k1} = 307$ A ja verkkojännite kokeiden aikana keskimäärin noin 230 V.

Kuten taulukosta 7-8 ilmenee, varsinkin kytkentäkulmalla 0 astetta ja jälleenkytkennän jännitteettömillä väliajoilla 300...700 ms toinen kompressoreista jäi jälleenkytkennän jälkeen korvin-kuultavasti värähtelemään mekaanisesti. Kuten kuvista 7.14...7.15 ilmenee, värähtely kesti noin 10 sekuntia, jonka jälkeen kaapin suojaus (ilmeisesti lämpörele) kytki kompressorin irti verkosta noin 20...25 sekunnin ajaksi. Sen jälkeen kompressori kytketty uudelleen verkkoon ja jos värähtely ei poistunut, em. suojausten toimintasykli toistui kunnes kompressori käynnistyi normaalisti. Mekaaninen värähtely näkyi jossain määrin myös sähköisesti virtamittauksessa, mutta hyvin lievänä. Kuvan 7.15 tapauksessa mekaaninen värähtely lakkasi jo vajaan 5 sekunnin kuluttua, mutta kompressorin virta jäi silti epänormaalin korkeaksi lähes 3.5 A:iin vielä 5-6 sekunnin ajaksi, kun se normaalisti on vain noin 0,6...0,7 A.

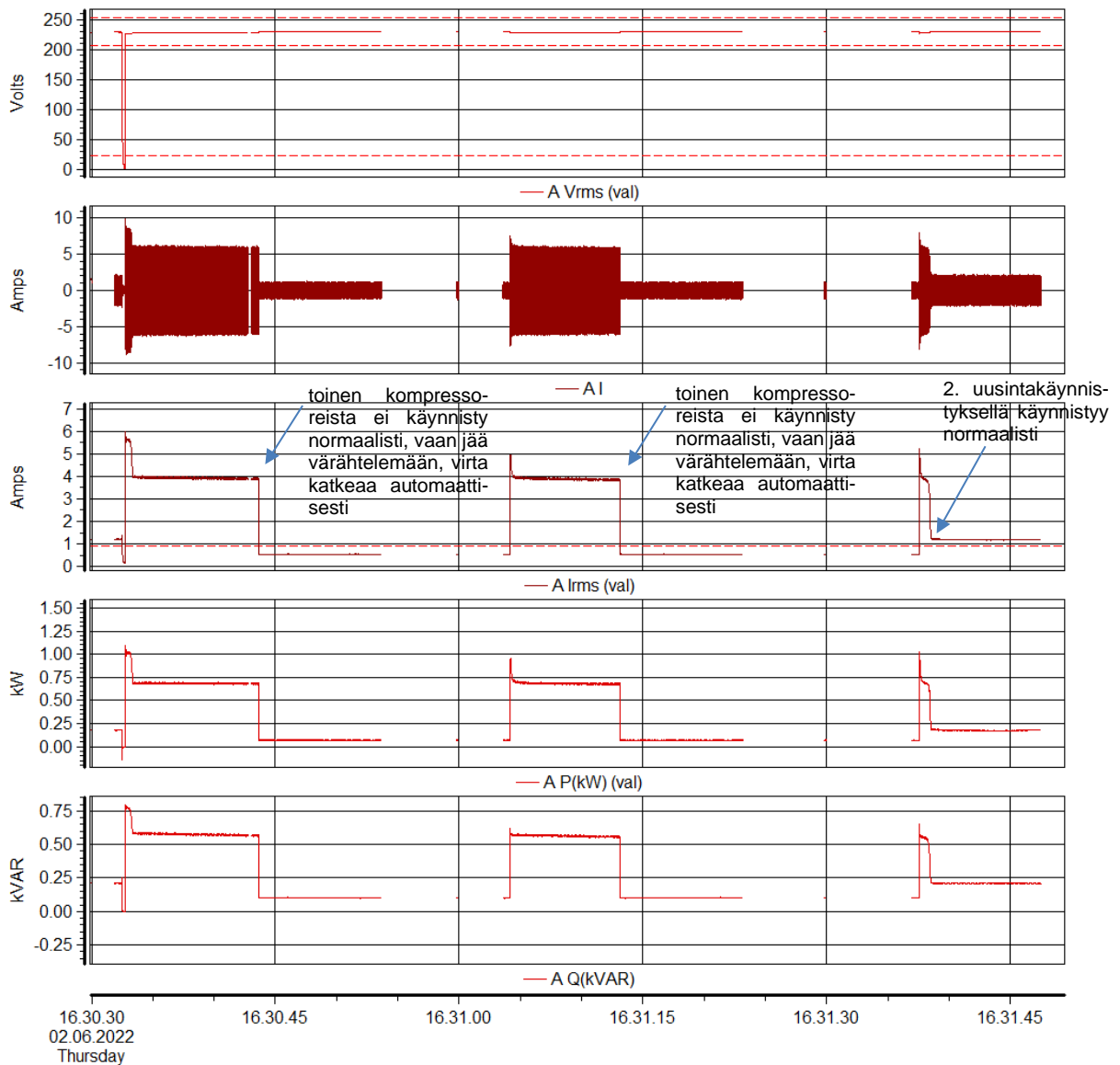
90 asteen kytkentäkulmalla värähtelyongelmaa ei esiintynyt ja useiden pääasiassa 0 asteen kytkentäkulmalla tehtyjen toistojen jälkeen se poistui myös 0 ja 30 asteen kytkentäkulmilta ja kompressori jatkoi 300 ms jännitteettömällä väliajalla toimintaansa. Kokonaisuutena tämän laitteen toiminnassa tuntui olevan enemmän epäjohtonmukaisuutta kuin muissa tutkituissa laitteissa, ilmeisesti termostaattien ja suojausten toteutustavasta johtuen.

Taulukko 7-8. Mekaanisilla termostaateilla varustetun vanhan jääkaappipakastimen toiminta jälleenkytkennöissä eri kytkentäkulmilla ja jälleenkytkennän jännitteettömillä väliajoilla.

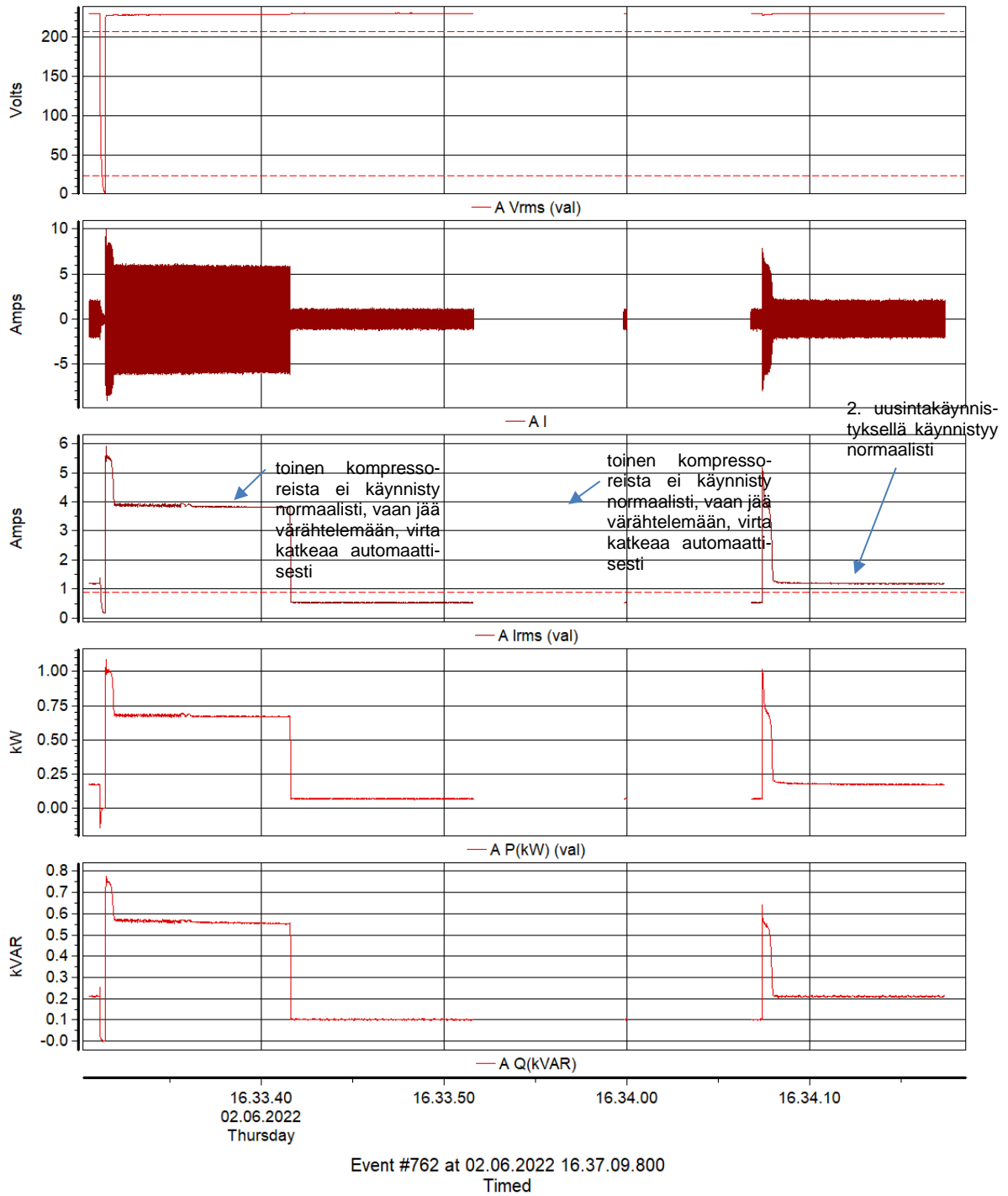
Jääkaappi-pakastin, 2 kompressoria, mekaaniset termostaatit								
POW		Jälleenkytkennän jännitteetön väliaika [s], laitteen toiminta						
		0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
0°		OSC 3	OSC 1	OSC 1	C			
		OSC 2	H	H	H	H	H	H
		C	H		H	H	H	
		C						
30°		OSC 1						
		C						
60°		C						
		C						
90°		C						
C = kompressorit jatkoivat toimintaansa								
OSC x = jääkaapin kompressori jäi värähtelemään, käynnistyi normaalisti x. uudelleenkäynnistysyrityksellä								
H = kompressori ei jää värähtelemään, mutta sen virta jää huomattavasti koholle joksikin aikaa								

Taulukko 7-9. Taulukon 7-8 kokeiden kellonajat, joista ilmenee kokeiden toteutusjärjestys.

Jääkaappi-pakastin, 2 kompressoria, mekaaniset termostaatit								
POW		Jälleenkytkennän jännitteetön väliaika [s], laitteen toiminta						
		0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
0°		16:24	16:39	16:42	16:36			
		16:29	18:51	18:55	16:44	16:47	16:49	16:52
		18:50	19:06		17:03	17:29	17:34	
		18:57						
		19:05						
30°		16:33						
		16:56						
60°		16:54						
		16:55						
90°		16:29						



Kuva 7.14. Mekaanisilla termostaateilla varustetun jääkaappipakastimen verkkoliitännän jännitteen ja virran tehollisarvot, virran aaltomuoto ja pätö- ja loistehot jälleenkytkennän jälkeisen käynnistymisen onnistuessa 0 asteen kytkentäkulmalla vasta 2. uusintayrityksellä (300 ms jännitteetön väliaika).



Kuva 7.15. Mekaanisilla termostaateilla varustetun jääkaappipakastimen verkkoliitännän jännitteen ja virran tehollisarvot, virran aaltomuoto ja päto- ja loistehot jälleenkytkennän jälkeisen käynnistymisen onnistuessa 30 asteen kytkentäkulmalla 1. uusintayrityksellä (300 ms jännitteetön väliaika).

7.5 Kaappipakastin elektronisella termostaatilla

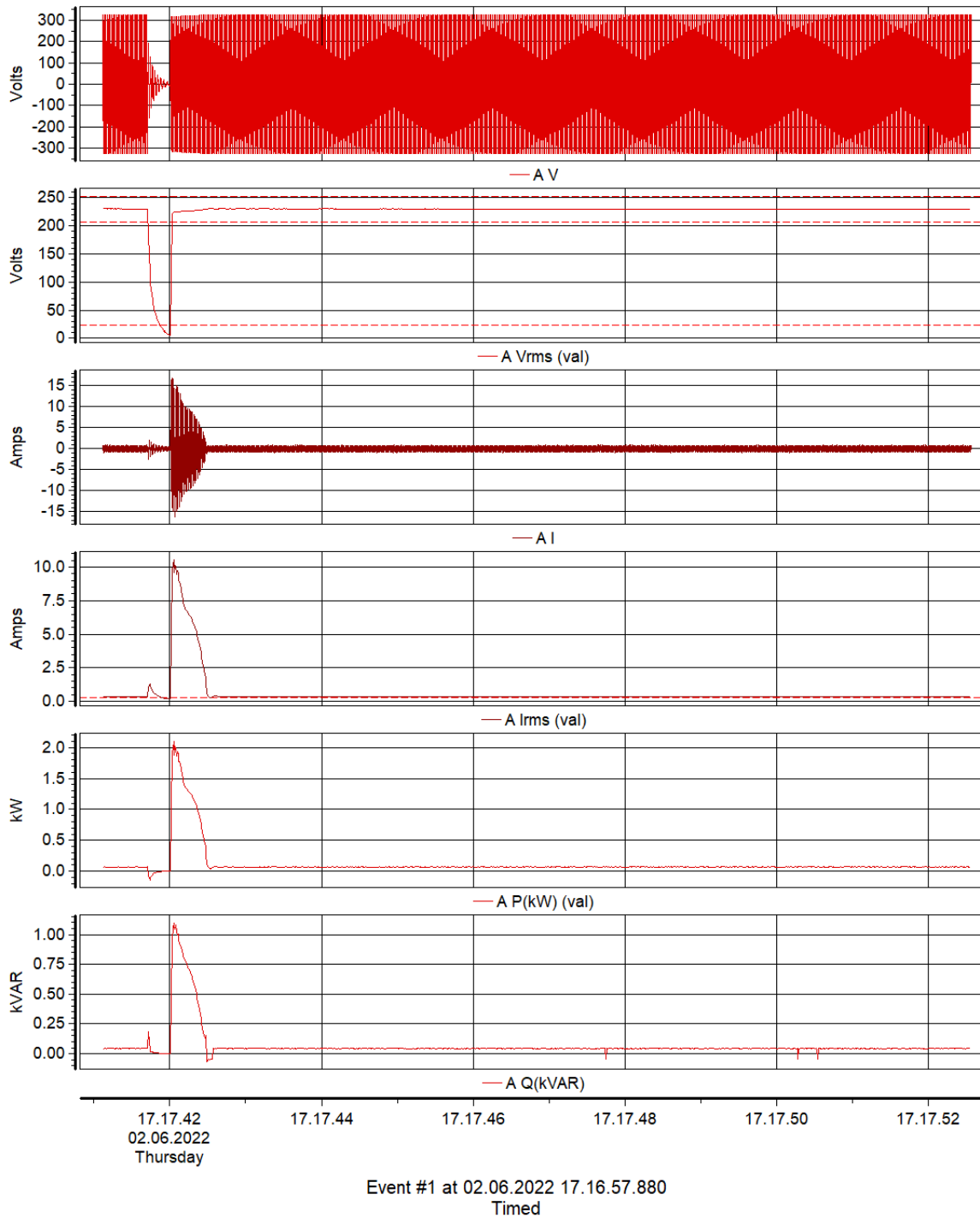
Toinen tutkituista kylmlaitteista oli vajaa 10 vuotta vanha kaappipakastin. Laitteen lämpötilansäätö on toteutettu elektronisella termostaatilla. Laitteen nimellisteho on 90 W, kylmäaine R600a ja käyttötilavuus 237 litraa. Kokeiden ajan laitetta käytettiin pikapakastustila (super) päällekytkettynä, jolla varmistettiin, että kompressorin pyöräily jatkuu jatkuvasti. Mitattu yksivaiheinen oikosulkuvirta laitteen verkkoliitännässä oli $I_{k1} = 307$ A ja verkkojännite kokeiden aikana keskimäärin noin 230 V.

Kuten taulukosta 7-10 ilmenee, kompressorin jatkoi toimintaansa jälleenytkennässä 300 ms jännitteettömällä väliajalla, mutta tätä pidemmillä väliajoilla se kytketi jännitteen katketessa pois päältä ja käynnistyi uudelleen vasta noin 6 minuutin kuluttua jännitteen palaamisesta.

Kuten kuvasta 7.16 nähdään 300 ms jännitteettömällä väliajalla kaapin ottama virta kasvaa jännitteen palatessa tehollisarvoltaan hetkeksi noin 10 A:iin ja laskee noin puolen sekunnin kuluessa normaaliksi. Suuruudeltaan ja kestoaltaan jokseenkin samanlainen virtasysäys esiintyi muutenkin kompressorin käynnistyessä normaalisti. Myös jännitteen katketessa ennen jälleenytkentää esiintyy pieni virran hetkellinen kasvu reiluun 1A:iin ennen kompressorin pysähtymistä. Kuten kuvasta näkyy, kaappipakastimen rinnalle kytketystä 610 W kuormitusvastuksesta huolimatta jännite ei tässä tapauksessa laske porrasmaisesti nolaa, kuten taajuusmuuttajan tapauksessa, vaan loivasti (kompressorin pyöräily pitää jännitettä yllä hetken aikaa).

Taulukko 7-10. Elektronisilla termostaateilla varustetun kaappipakastimen toiminta jälleenytkennöissä 0 asteen kytkentäkulmalla ja erilaisilla jälleenytkennän jännitteettömällä väliajoilla.

Kaappipakastin, elektroninen termostaatti								
		Jälleenytkennän jännitteetön väliaika [s], laitteen toiminta						
POW		0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
0°		C	S+B	S+B	S+B			
C =		kompressorit jatkoivat toimintaansa						
S + B =		kompressorin sammui ja käynnistyi uudelleen noin 6 minuutin kuluttua						



Kuva 7.16. Elektronisilla termostaateilla varustetun kaappiakastimen verkkoliitännän jännitteen ja virran tehollisarvot ja aaltomuodot sekä päto- ja loistehot jälleenkytkennässä 0 asteen kytkentäkulmalla (300 ms jännitteetön väliaika).

8. JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINNAT

Hankkeessa tehtyjen laboratorio- ja kenttämittausten sekä kirjallisuus- ja kyselytutkimuksen perusteella pikajälleenkytkennän jännitteettömän väliajan pidentäminen nykyisin yleisesti käytetystä 300...700 millisekunnista 2...5 sekuntiin olisi perusteltua. Laboratoriomittauksissa taajuusmuuttajien virtasysäykset jännitteen palatessa pienenevät skalaarisäättöä käytettäessä oleellisesti jännitteettömän väliajan pidentyessä ja ohjauselektronikan jumiutumiset poistuivat 1 sekunnin ja sitä pidemmillä jännitteettömillä väliajoilla, jolloin taajuusmuuttaja on mahdollista parametroida kuitaamaan mahdolliset virheilmoitukset ja käynnistymään pikajälleenkytkennän jälkeen automaattisesti uudelleen. Myös kenttäkokeissa saatiin vastaavanlaisia tuloksia teollisuuskohde 1:ssä, jossa hakelämpökeskuksen taajuusmuuttajien kytkentävirtasysäykset pienenevät jälleenkytkennän jännitteettömän väliajan (tai jännitekuopan) pidentyessä. Kun pikajälleenkytkennän jännitteetön väliaika muutettiin ko. kohteessa 0,3 sekunnista 1,0 sekuntiin, myös ongelmia aiheuttanut taajuusmuuttajan manuaalisen resetoinnin tarve pikajälleenkytkentöjen jälkeen näyttää poistuneen ja savukaasumurin taajuusmuuttaja käynnistyy 1 sekunnin pikajälleenkytkentöjen jälkeen automaattisesti uudelleen. Teollisuuskohde 1:ssä oli käytössä eri valmistajan taajuusmuuttaja kuin laboratoriokokeissa.

Tehtyjen laboratoriokokeiden ja laitteiden EMC-testausvaatimusten perusteella turvallisin jälleenkytkennän jännitteetön väliaika laitteiden toiminnan kannalta näyttäisi olevan 5 sekuntia. Laitteiden EMC-testauksissa käytetään 5 sekunnin jännitteetöntä väliaikaa, joten sen valitseminen myös pikajälleenkytkennän jännitteettömäksi väliajaksi olisi perusteltua, ellei erityisiä asiakkaiden tarpeisiin perustuvia syitä käyttäjä lyhyempää jännitteetöntä väliaikaa ole. Nykyisin hyvin yleisten taajuusmuuttajakuormien näkökulmasta 5 sekunnin jännitteetön väliaika antaisi marginaalia osassa laboratoriokokeista virheilmoituksiin johtaneisiin 1-2 sekunnin ja ohjauselektronikan jumiutumisia aiheuttaneisiin 0,3...0,7 sekunnin jännitteettömiin väliaikoihin. Esimerkiksi taajuusmuuttajien osalta eri valmistajien laitteet ja suunnittelijoiden/käyttäjien valitsemat taajuusmuuttaja-moottoryhdistelmät saattavat käyttäytyä hieman eri tavalla kuin tässä tutkimuksessa laboratoriossa ja kentällä tutkitut taajuusmuuttajat.

Suojareleiden laukaisuhidastuksen ("polttoajan") vaikutusten yksityiskohtaisempi tutkiminen päätettiin rajata tämän hankkeen ulkopuolelle. Sen vaikutuksen tutkiminen esimerkiksi pikajälleenkytkennän onnistumistodennäköisyyteen edellyttäisi tietojen keräämistä pika- ja aikajälleenkytkennöistä laukaisufunktiokohtaisesti, koska sekä oikosulku-, että maasulkuvikojen osalta yhtiöillä on käytössä useita eri laukaisufunktioita ja/tai -portaita, joissa polttoajat voivat vaihdella melko laajoissa rajoissa ja polttoajan ja jännitteettömän väliajan lisäksi onnistumistodennäköisyyteen vaikuttaa moni muukin tekijä, jotka myös voivat vaihdella yhtiökohtaisesti. Luotettavien tulosten saamiseksi tutkimukseen olisi syytä sisällyttää myös kenttäkokeita.

Yleisellä tasolla voidaan kuitenkin todeta muutamia asiaan liittyviä näkökohtia. Laukaisuhidastus vaikuttaa kolmivaiheisissa oikosuluissa jännitteettömäksi katsottavaan kokonaisväliaikaan ja haittojen näkökulmasta se summautuu pj:n jännitteettömään väliaikaan. Terveiden lähtöjen näkökulmasta laukaisuhidastuksen lyhentäminen luvussa 2 käsiteltyjä laitteiden immunitetestauksissa käytettäviä 500 ms tai 200 ms aikarajoja lyhyemmäksi todennäköisesti vähentäisi jännitekuoppien asiakaslaitteiden toiminnalle aiheuttamia haittoja. Vian poistumisen kannalta mekanismi on laukaisuhidastuksen aikana eri kuin pj:n jännitteettömänä aikana, mutta siinäkin laukaisuhidastuksen lyhentäminen voi heikentää pikajälleenkytkennän onnistumistodennäköisyyttä. Polttoajalla on oikosulkuvioissa vaikutusta myös johdinlämpenemiin. Jos polttoaika on pitkä, tarvitaan myös pitkä jännitteetön väliaika johtimien jäähtymiseen. Tältä osin tilanne paranee jonkin verran, jos pj:n jännitteetöntä väliaikaa pidennetään. Kaksivaiheisissa oikosuluissa tilanne on mutkikkaampi jännite-epäsymmetrian takia. Osa yksivaihekuormista ei välttämättä edes näe isoa jännitekuoppaa. Muiden kuin viallisen lähdön asiakkaat saman sähkö-

aseman alueella kokevat oikosulkuvioissa jännitekuopan, jonka pituus riippuu laukaisuhidastuksesta. Tässä mielessä laukaisuhidastuksen asetelulla on suuri merkitys jännitekuoppien aiheuttamien haittojen kannalta. Toisaalta myös asiakas voi vaikuttaa laitteiden valinnalla ja parametroinnilla esimerkiksi taajuusmuuttajakäyttöjen tapauksessa niiden jännitekuoppien sietoon.

Maasuluissa jännitekuoppaa ei esiinny ja jännitteetön väliaika alkaa vasta, kun lähdön katkaisija aukeaa. Tällöin polttoaika vaikuttaa lähinnä vian itsestäänpoistumistodennäköisyyteen. Sitten polttoaika ei ole oleellinen jännitekatkon haittojen kannalta maasuluissa vaan vaikuttaa lähinnä siihen, tarvitaanko jälleenkytkentää ollenkaan. Sitä kautta polttoajalla on kytkentä pikajälleenkytkentöjen lukumääriin. Maasulussa polttoajan tutkiminen liittyy lähinnä vian poistumismekanismeihin (valokaari) ja kosketusjännitevaatimusten toteutumiseen. Myös jäännösvikavirran suuruus vaikuttaa vian polttovaikutukseen (esim. oksan palaminen).

Pikajälleenkytkennän jännitteettömän väliajan pidentäminen pienentää polttoajan vaikutusta laitteiden häiriintymiseen ja mahdolliseen vikaantumiseen vikalähdöllä. Myös erot maasulku- ja oikosulkuvikojen välillä kaventuvat tässä suhteessa. Muilla kuin vikalähdöllä polttoajalla tulee edelleen olemaan jännitekuopan syvyyden ohella suuri merkitys laitteiden toimintaan.

Jotta regulaatio ei rajoittaisi pikajälleenkytkennän aiheuttamien asiakashaittojen vähentämistä, tulisi pika- ja aikajälleenkytkentöjen ajallinen määrittely ja niiden arvostukset ottaa uudelleen tarkasteluun niin, että pikajälleenkytkennän jännitteettömän väliajan pidentäminen esimerkiksi 5 sekuntiin saakka olisi mahdollista. Jälleenkytkennän 5 sekunnin jännitteetön aika tulisi siis tulkita ajk:n sijasta pikajälleenkytkennäksi. Tämä määrittelymuutos tulisi tehdä ET:n keskeytystilastointiohjeeseen ja Energiaviraston valvontamallissa tulee tukeutua keskeytystunnuslukujen osalta alan määrittelyihin. Määrittelyiden tulisi olla yksiselitteiset myös FLIR:n (automated fault location, isolation and supply restoration) erilaisten käyttötapojen osalta. FLIR-toiminnallisuutta voidaan käyttää pika- ja/tai aikajälleenkytkentöjen yhteydessä manuaalisten kokeilukytkentöjen korvaajana tai yksinään korvaamaan kokeilukytkentöjen lisäksi myös pika- ja/tai aikajälleenkytkennät. FLIR:n tapauksessa jännitteetön väliaika voi vaihdella vikatapauskohtaisesti.

9. YHTEENVETO

Jälleenkytkennät ja niihin liittyvät lyhyet keskeytykset ovat osa sähköverkon ohimeneviin oikosulku- ja maasulkuvikoihin liittyviä toimintoja, joilla pyritään vähentämään verkon pysyviä vikoja ja lyhentämään asiakkaan kokemaa keskeytysaikaa. Jälleenkytkentöjen jännitteettömällä väliajalla on vaikutusta mm. valokaaren sammumistodennäköisyyteen ja sitä kautta vian poistumistodennäköisyyteen jälleenkytkennän seurauksena. Sillä on vaikutusta myös keskeytyksen asiakkaille aiheuttamiin haittoihin, jotka voivat olla erilaisia riippuen asiakkaasta ja asiakasryhmästä. Tässä hankkeessa keskityttiin tutkimaan asiaa erityisesti laitteiden toimintahäiriöiden ja vikaantumisriskien näkökulmasta, joilla on taloudellisessa mielessä suuri merkitys ja joihin valtaosa jälleenkytkentöihin liittyvistä reklamaatioistakin kokemusten mukaan liittyy. Jälleenkytkennät voivat aiheuttaa myös esimerkiksi työturvallisuus- ja mukavuushaittoja ja asiakkaasta ja asiakasryhmästä riippuen erilaisten haittojen painoarvo voi vaihdella. Sama jännitteetön väliaika ei välttämättä ole optimaalinen kaikissa tapauksissa. Esimerkiksi akkuvarastojen yleistyminen tarjoaa uusia vaihtoehtoja jälleenkytkentöjen aiheuttamien työturvallisuus- ja mukavuushaittojen vähentämiseen asiakaskohtaisestikin.

Nykyiset jälleenkytkentöjen käytännöt perustuvat suurelta osin vuosikymmenien takaiseen teknologiaan ja ajattelutapaan, vaikka sähköjakelujärjestelmä, suojausteknologia ja kuluttajalaitteiden tekniikka ovat muuttuneet merkittävästi. Asiakkaiden ja asiakaslaitteiden näkökulmasta tehoelektroniikka sisältävien laitteiden lisääntyminen verkossa ja asiakkaan kulutuskohteissa sekä hajautetun tuotannon ja energiavarastojen lisääntyminen on tuonut omat erityispiirteensä, jotka on huomioitava myös verkon suojauksessa. Pikajälleenkytkennän jännitteettömällä väliajalla ja releiden laukaisuajoilla on vaikutusta mm. asiakkaiden laitteiden toimintahäiriöihin ja keskeytysten ja jännitekuoppien asiakkaille aiheuttamiin haittoihin ja mahdollisesti myös laitevaurioihin.

Hankkeen tavoitteena oli tutkia jälleenkytkentäkäytäntöjen kehittämistarpeita ja -mahdollisuuksia erityisesti jälleenkytkentöjen jännitteettömän väliajan pituuden näkökulmasta. Perimmäisenä tavoitteena oli luoda suosituksia, joiden pohjalta verkkoyhtiöissä olisi mahdollista määrittellä mm. pikajälleenkytkennän jännitteetön väliaika, jolla päästään kansantaloudellisesti pie-nimpiin haittoihin.

Alaraja jälleenkytkennän jännitteettömälle väliajalle määräytyy vikaan liittyvän valokaaren sammumisajan perusteella ja se riippuu mm. johdon jännitetasosta. Minimiajalle on annettu laskentakaava mm. standardissa IEEE Std C37.104 ja 20 kV johdoille laskentakaavasta saatava minimiaika 21,0 kV pääjännitteellä on noin 222 ms.

Sähköverkkoon liitettävien laitteiden EMC-testauksissa laitteiden jännitekuoppien ja lyhyiden keskeytysten sietoa testataan nykyisin varsin suppeasti. Sähkö- ja elektroniikkalaitteet, joiden nimellissäänmenovirta ei ylitä 16 A, testataan keskeytysten osalta ainoastaan 5 sekunnin keskeytyksellä, jossa jäännösjännite on 0 %. Jännitekuoppatestejä tehdään luokan 2 laitteille, joita yleisiin jakeluverkkoihin liitettävät laitteet pääsääntöisesti ovat, ainoastaan kolmella symmetrisellä kolmivaiheisella kuopalla:

- puolen jakson (10 ms) pituinen kuoppa 0 % jäännösjännitteellä
- yhden jakson (20 ms) pituinen kuoppa 0 % jäännösjännitteellä
- 0,5 sekunnin pituinen kuoppa 70 % jäännösjännitteellä

Tältä pohjalta on ymmärrettävää, että laitteet tai useista eri laitteista koostuvat järjestelmät eivät välttämättä toimi oikein ja hallitusti kaikilla nykyisin käytössä olevilla pikajälleenkytkennän jännitteettömällä väliajoilla.

Hankkeessa toteutetun kyselytutkimuksen perusteella yli puolella niistä yhtiöstä, joilla pikajälleenkytkentä oli käytössä (11 kpl), pj:n jännitteetön väliaika oli edelleen pääsääntöisesti pienempi tai yhtäsuuri kuin 0,4 s. Kolme yhtiötä oli siirtynyt tai siirtymässä 1 sekunnin jännitteetömmään väliaikaan ja näistä yksi oli siirtynyt edelleen FLIR:n käyttöön ja luopunut perinteisestä pj+ajk-käytännöstä. Yksi yhtiö oli siirtynyt 0,3...0,5 s pj:sta 0,7 s pj:hon. Kokemuksia pidennetyistä jännitteettömistä väliajoista ei vielä juuri ollut ehtinyt kertyä yhtä yhtiötä lukuunottamatta ja sillä kokemukset olivat olleet hyvin myönteisiä.

Yleisimmiksi jälleenkytkennöistä häiriintyviksi laitteiksi raportoitiin maa- ja ilmalämpöpumput, pellettilämmitykset sekä maatalouden ja valmistavan teollisuuden automaatio ja taajuusmuuttajakäytöt. Todennettuja laiterikkoja raportoi vain yksi yhtiö (virtalähteet, ohjainkortit ja automaatiolaitteet), mutta korvausvaatimuksia useimmat yhtiöt saavat yksittäisiä vuodessa mm. kotitalouksien laitteista, mutta niiden vaurioitumisen syytä on usein vaikea todentaa. Kyselyyn vastanneiden yhtiöiden pj/ajk-suhteet ja niiden kehitys viittasi jossain määrin siihen, että pidempi pj:n jännitteetön väliaika selvittäisi vikoja paremmin kuin lyhyt. Kyselyn perusteella suurin osa verkkoyhtiöiden relekannasta on melko uutta 2000-luvulla käyttöön otettua ja nämä releet antaisivat mahdollisuuksia myös nykyistä monipuolisempien ja älykkäämpien jälleenkytkentäsekvenssien käyttöön.

Jännitekuoppien seuranta oli kyselyyn vastanneista 16 yhtiöstä vain kolmella kaikilla sähköasemilla. Yleisesti jännitekuoppien seuranta pidettiin hyödyllisenä erityisesti nyt, kun verkoissa tapahtuu paljon muutoksia. Useimmat eivät kuitenkaan kannattaneet sen ottamista pakollisena osaksi valtakunnallista häiriö- ja keskeytystilastointia.

Tehtyjen kenttämittausten perusteella jännitekuopat ja pikajälleenkytkennän lyhyet jännitteetömät väliajat (tutkituissa tapauksissa 300 ms) voivat aiheuttaa erityisesti taajuusmuuttajien tapauksessa suuria kytkentävirtasysäyksiä ja mahdollisesti tarvetta taajuusmuuttajan manuaaliseen uudelleenkäynnistykseen jälleenkytkennän jälkeen. Kenttämittausten yhteydessä tutkitussa tapauksessa manuaalinen uudelleenkäynnistystarve näyttäisi poistuneen, kun jännitteetön väliaika pidennettiin 300 ms:sta 1 sekuntiin.

Tehtyjen laboratoriokokeiden perusteella näyttäisi siltä, että kokonaisuutena parhaiten toimivia olisivat tutkitun tyyppisen taajuusmuuttajakäytön tapauksessa 1-2 sekuntia pidemmät jälleenkytkennän jännitteetömät väliajat. Laitteiden jännitekuoppa- ja keskeytystestauksia koskevat EMC-standardit ja mahdolliset laitekohtaiset vaihtelut huomioiden turvallisimpana jälleenkytkennän jännitteettömänä väliaikana voitaisiin pitää 5 sekuntia, ellei erityisiä asiakkaiden tarpeisiin perustuvia syitä käyttää lyhyempää jännitteetöntä väliaikaa ole. Tällöin välttyttäisiin skaalarisäätöä käyttävien taajuusmuuttajien suurilta kytkentävirtasysäyksiltä ja jumitumisilta, jotka edellyttävät käyttäjän toimia taajuusmuuttajan uudelleenkäynnistämiseksi. DTC-säädön paremmat ride-through-ominaisuudet tosin jäävät silloin pikajälleenkytkentöjen osalta hyödynnettäväksi, mutta erilaiset taajuusmuuttajakuormat toimisivat tällöin yhdenmukaisemmin. Ainakin osassa jännitekuopista DTC-säädöstä olisi todennäköisesti edelleen hyötyä. Erityisesti laajemmissa järjestelmissä, joissa on useita automaatiojärjestelmän ohjaamia taajuusmuuttajia, joista osaa saatetaan käyttää syystä tai toisesta skaalarisäätömoodissa ja taajuusmuuttajien kuormitusasteet joka tapauksessa vaihtelevat, lyhyimmät 0,3...0,7 sekunnin jälleenkytkennän

jännitteettömät väliajat todennäköisesti saavat aikaan sen, että osa taajuusmuuttajista ei jälleenkytkennän jälkeen välttämättä palaudu toimintaan ilman käyttäjän manuaalisesti tekemiä toimenpiteitä.

Oikosulkuvikoihin ja jälleenkytkentöihin liittyvien jännitekuoppien vaikutuksia teollisuuslaitoksissa ja monissa muissakin kohteissa on mahdollista vähentää myös taajuusmuuttajien parametreilla. Laboratoriokokeiden yhteydessä luvussa 7 mainitun säätömoodin lisäksi monilla muillakin parametreilla voidaan vaikuttaa siihen, kuinka taajuusmuuttaja selviää jännitekuopista, kuten luvussa 3 todettiin.

Tutkittu kotitalouskäyttöön suunniteltu ilmanvaihtokone ja uudempi elektronisella termostaatilla varustettu kaappipakastin näyttivät toimivan kaikilla jälleenkytkennän jännitteettömillä väliajoilla hallitusti, ongelmitta ja toistettavasti. Vanhan lähes kolmekymmentä vuotta vanhan jääkaappipakastimen kompressori sen sijaan jäi lyhyemmällä 0,3...0,7 sekunnin jännitteettömillä väliajoilla värähtelemään, mutta siinäkin kompressorin suojaus kytki kompressorin jännitteettömäksi noin 10 sekunnin kuluessa käynnistyksestä, jos värähtelyä esiintyi. Jääkaapin ääni ja värinä todennäköisesti kuitenkin herättää tällaisessa tapauksessa asiakkaissa huolta.

Kun jälleenkytkennän jännitteetöntä väliaikaa pidennetään, on tarkistettava myös suojaroiden häiriötallentimien asetukset, jos halutaan, että häiriötallenne kattaa myös jännitteen palaamishetken ja sen jälkeisiä tapahtumia. Esimerkiksi 5 s jännitteettömällä väliajalla kannattaa jo tehdä erilliset tallenteet viasta laukaisutapahtumiseen ja jännitteen palaamisesta.

LÄHDELUETTELO

- [1] IEEE Std C37.104 -2012, IEEE Guide for Automatic Reclosing of Circuit Breakers for AC Distribution and Transmission Lines, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2012. 61 p.
- [2] Feillokalisering i hoyspenningsfordelningsnett, julkaisu IVR 279-1980, Norske elektrisitetsverkers forening, Oslo, 1980.
- [3] EN IEC 61000-4-11:2020, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-11: Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests for equipment with input current up to 16 A per phase, CENELEC, 2020. 30 p.
- [4] SFS-EN IEC 61800-3:2018, Adjustable speed electrical power drive systems. Part 3: EMC requirements and specific test methods (IEC 61800-3:2017), Suomen standardisoimisliitto SFS, 2019. 120 s.
- [5] SFS-EN 50160:2010 + A1:2015 + A2:2019 + A3:2019, Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet (Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks), Suomen standardisoimisliitto SFS, 2019. 83 s.
- [6] IEC 61000-4-30:2015, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods, CENELEC, 2015. 146 p.
- [7] Math H.J. Bollen, Understanding Power Quality Problems, Voltage Sags and Interruptions, IEEE Press, NJ, 2000. 543 p.
- [8] J. Pippola, I. Vaalasaranta, T. Marttila, J. Kiilunen, L. Frisk, Product Level Accelerated Reliability Testing of Motor Drives With Input Power Interruptions, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, No. 5, May 2015. pp. 2614-2622.
- [9] S.Z. Djokic, J. V. Milanovic, J. J. M. Desmet, R. Belmans, Sensitivity of AC Adjustable Speed Drives to Voltage Sags and Short Interruptions, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, January 2005. pp-494-505.
- [10] C. Carrillo, F. Vidal-Vilariño, M. Suárez-Álvarez, M. Saez-Tort, E. Díaz-Dorado, Impact of ASD settings in its LVRT behaviour, SPEEDAM 2010 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion.
- [11] Anurag Khergade, R. J. Satputaley, Sanjay Bodkhe, Impact of Different Types of Voltage Sag on Adjustable Speed Drive, Helix (2020) 10 (1): 245-249, <https://doi.org/10.29042/2020-10-1-245-249>.
- [12] J. Kiilunen, Development and Evaluation of Accelerated Environmental Test Methods for Products with High Reliability Requirements, Väitöskirja, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere 2014. 70 s.
- [13] S. Galceran, M. Teixidó, A. Sumper, J. Casas, J. Sánchez, Adjustable Speed Drives and Power Quality, RE&PQJ, Vol. 1, No.1, April 2003. <https://doi.org/10.24084/repqj01.364>.

- [14] Sähköpostihaastattelu, TkT Mikko Routimo, Control Architect, ABB System Drives / Professor of Practice, Aalto University, 29.10.2021.

LIITE A: KYSELYTUTKIMUSLOMAKE

Kysely jälleenkytkennöistä

Kyselyn täyttö:

- Voit täyttää kyselyn sähköisesti suoraan tähän rtf-lomakkeeseen tai
 - Tulostaa kyselyn ja täyttää käsin ja skannata sähköpostin liitteeksi
- Palautus sähköpostilla osoitteeseen: pertti.pakonen@tuni.fi.

Vastaajan tiedot:

- A. Yhtiön nimi:
- B. Yhteyshenkilön nimi:
- C. Yhteyshenkilön asema yhtiössä:
- D. Yhteyshenkilön sähköpostiosoite:
- E. Yhteyshenkilön puhelinnumero:

Kysymykset yhtiötänne koskien:

1. Keskijänniteverkon johtopituus yhteensä?
2. Keskijänniteverkon kaapelointiaste?
3. Keskijänniteverkon maadoitustapa/-tavat?
4. Maasulkuvirran kompensoinnin toteutustapa (esim. keskitetty tai keskitetty + hajautettu)?
5. Onko keskijänniteverkossanne käytössä suojakipinäväleillä toteutettua ylijännitesuojasta? Minkä verran?

6. Keskijänniteverkossanne käytössä olevat suojaretyypit:

ID n:o	Valmistaja	Malli	Asennusvuosi/-vuodet	Lukumäärä(t)
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				

7. Millaisia suojarleiden suojausfunktioita ja laukaisuhidastuksia ("polttoaikoja") teillä on käytössä

- a) maasulkusuojauksessa?
- b) oikosulkusuojauksessa?

8. Millaisia jälleenkytkentäsekvenssejä ja jälleenkytkentöjen jännitteettömiä väliaikoja teillä on tällä hetkellä käytössä maasulku- ja oikosulkusuojauksessa avojohtolähdöillä?

9. Miten lähdön kaapelointiaste vaikuttaa asetuksiin sekalähdöillä? Missä vaiheessa jälleenkytkennät otetaan pois käytöstä (pitääkö kaapelointiasteen olla 100 %)? Jos harvinta on tapauskohtaista, mitkä tekijät vaikuttavat päätökseen jälleenkytkentöjen poistamisesta?

10. Onko jälleenkytkentöjä käytössä sähkön tuotantoa sisältävillä johtolähdöillä? Jos on, niin millaiset ovat asetukset?

11. Miten jälleenkytkennät tilastoidaan (erotellaanko esim. onnistuneet ja epäonnistuneet, tallentuuko oikosulku/maasulku-tieto)?

12. Rekisteröidäänkö jännitekuopat? Miten ja kuinka kattavasti (onko rekisteröinti esimerkiksi kaikilla sähköasemilla, mahdolliset rekisteröinnit muualla verkossa)?

13. Pidätkö jännitekuoppien seuranta hyödyllisenä ja kannattaisiko se ottaa osaksi esimerkiksi valtakunnallista keskeytystilastointia?
14. Jälleenkytkentöjen selvittämät viat ja pitkät vikakeskeytykset keskijänniteverkossanne kahdelta viimeksi kuluneelta vuodelta:

Tapahtuma	Tapahtumien lukumäärä (kpl)	
	2020	2021
Pikajälleenkytkentöjen selvittämät viat		
Aikajälleenkytkentöjen selvittämät viat		
Pitkät vikakeskeytykset		

15. Oletteko saaneet verkon käyttäjiltä palautetta jälleenkytkentöjen aiheuttamista laiteiden toimintahäiriöistä nykyisin käytössä olevien jälleenkytkentäkäytäntöjen aikana? Mitkä laitteet ovat häiriintyneet ja miten (asiakasryhmä, laite ja mahdollisuuksien mukaan myös valmistaja, malli ja valmistusvuosi, kuvaus häiriöstä ja palautuuko toimintaan automaattisesti vai edellyttääkö käyttäjän toimenpiteitä)?
16. Oletteko saaneet verkon käyttäjiltä palautetta jälleenkytkentöjen aiheuttamista laiterikoista nykyisin käytössä olevien jälleenkytkentäkäytäntöjen aikana? Mitä laitteita on rikkoutunut (asiakasryhmä, laite ja mahdollisuuksien mukaan myös valmistaja, malli ja valmistusvuosi)?
17. Miten asiakaspalautteet dokumentoidaan?
18. Oletteko tehneet jälleenkytkentäsekvensseihin tai jälleenkytkentöjen jännitteetömiin väliaikoihin jossain vaiheessa muutoksia? Millaisia ja milloin? Millainen vaikutus niillä on ollut tai oli asiakaspalautteeseen?
19. Oletteko harkinneet jälleenkytkentäsekvenssin tai jälleenkytkentöjen jännitteetömiä väliaikojen muuttamista? Miten ja millä aikataululla?
20. Onko teillä käytössä automaattista FLIR/FLISR(fault location, isolation and service restoration)-toiminnallisuutta (automaattista vianpaikannusta, erotusta ja sähkönjake-lun palautusta)? Millaisia kokemuksia siitä on saatu?

LIITE B: TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖN TOIMINNALLISET TESTIT

Taulukko B-1. Taajuusmuuttajan toiminta normaaliverkon jälleenkytkennöissä skalaarisäädöllä 90 asteen kytkentäkulmalla, koesarja 1.

Skalaarisäätö, normaaliverkko, koesarja 1								
POW	T _m	Jälleenkytkennän jännitteetön väliaika [s], laitteen toiminta						
		0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
90°	1.5	C	f-NC 3 x	f-NC 3 x	S+B	S+B	S+B	S+B
	5.5	f-NC 3 x	f-NC 3	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B
	11	f-NC 3 x	f-NC 3	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B
	16.5	f-NC 3 x	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B
	22	f-NC 3 x	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B
C = jatkoi toimintaansa								
f-NC 3 = virheilmoitus, communication fault (3), kuitattavissa reset-näppäimellä								
f-NC 3 x = virheilmoitus, communication fault (3), ei yleensä poistunut pelkästään reset-näppäintä painamalla, vaan edellytti uudelleenikäynnistystä tai peräkkäiset reset- ja stop-näppäimien painallukset								
S+B = laite sammui ja käynnistyi uudelleen								

Taulukko B-2. Taajuusmuuttajan toiminta normaaliverkon jälleenkytkennöissä DTC-säädöllä 90 asteen kytkentäkulmalla, koesarja 1.

DTC-säätö, normaaliverkko, koesarja 1								
POW	T _m	Jälleenkytkennän jännitteetön väliaika [s], laitteen toiminta						
		0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
90°	1.5	C	C	C	C	f-NC 3	S+B	S+B
	5.5	C	C	C	f-UV	S+B	S+B	S+B
	11	C	C	f-UV	f-NC 8	S+B	S+B	S+B
	16.5	C	f-UV	f-NC 2	f-NC 3	S+B	S+B	S+B
	22	C	f-UV	f-NC 3	S+B	S+B	S+B	S+B
C = jatkoi toimintaansa								
f-UV = virheilmoitus, undervoltage (3220)								
f-NC 2 = virheilmoitus, communication fault (2), kuitattavissa reset-näppäimellä								
f-NC 3 = virheilmoitus, communication fault (3), kuitattavissa reset-näppäimellä								
f-NC 8 = virheilmoitus, communication fault (8), kuitattavissa reset-näppäimellä								
S+B = laite sammui ja käynnistyi uudelleen								

Taulukko B-3. Taajuusmuuttajan toiminta normaaliverkon jälleenkytkennöissä DTC-säädöllä 90 asteen kytkentäkulmalla, koesarja 2.

DTC-säätö, normaaliverkko, koesarja 2								
POW	T _m	Jälleenkytkennän jännitteetön väliaika [s], laitteen toiminta						
		0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
90°	1.5	C	C	C	C	f-NC 3	S+B	S+B
	5.5	C	C	C	f-UV	S+B	S+B	S+B
	11	C	C	f-UV	f-NC 3	S+B	S+B	S+B
	16.5	C	f-UV	f-NC 3	f-NC 3	S+B	S+B	S+B
	22	C	f-UV	f-NC 3	S+B	S+B	S+B	S+B
C = jatkoi toimintaansa								
f-UV = virheilmoitus, undervoltage (3220)								
f-NC 3 = virheilmoitus, communication fault (3), kuitattavissa reset-näppäimellä								
S+B = laite sammui ja käynnistyi uudelleen								

Taulukko B-4. Taajuusmuuttajan toiminta normaaliverkon jälleenkytkennöissä skalaarisäädöllä eri kytkentäkulmilla.

Skalaarisäätö, normaaliverkko, koesarja 2												
Jälleenkytkennän jännitteetön väliaika [s], laitteen toiminta												
POW	30°			60°			75°			90°		
T _m	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7
1.5	C	C	f-NC 3 x	C	C	f-NC 3 x	C	C	f-NC 3 x	C	C	f-NC 3
5.5	f-NC 3 x	f-NC 3 x	S+B	f-NC 3 x	f-NC 3 x	S+B	f-NC 3 x	f-NC 3 x	S+B	f-NC 3 x	f-NC 2 x	S+B
11	f-NC 3 x	f-NC 3		f-NC 3 x	f-NC 3		f-NC 3 x	f-NC 3		f-NC 3 x	f-NC 3	
16.5	f-NC 3 x	f-NC 3		f-NC 3 x	f-NC 3		f-NC 3 x	f-NC 3		f-NC 3 x	f-NC 3	
22	f-NC 3 x	S+B		f-NC 3 x	S+B		f-NC 3 x	S+B		f-NC 3 x	S+B	
C = jatkoi toimintaansa												
f-NC 2 = virheilmoitus, communication fault (3), kuitattavissa reset-näppäimellä												
f-NC 3 x = virheilmoitus, communication fault (3), ei yleensä poistunut pelkästään reset-näppäintä painamalla, vaan edellytti uudelleenkäynnistystä tai peräkkäiset reset- ja stop-näppäimien painallukset												
f-NC 3 = virheilmoitus, communication fault (3), kuitattavissa reset-näppäimellä												
S+B = laite sammui ja käynnistyi uudelleen												

Taulukko B-5. Taajuusmuuttajan toiminta heikon verkon jälleenkytkennöissä ilman jälleenkytkentää edeltävää jännitekuoppaa DTC-säädöllä 90 asteen kytkentäkulmalla.

DTC-säätö, heikko verkko, pelkkä pj-k ilman jännitekuoppaa								
Jälleenkytkennän jännitteetön väliaika [s], laitteen toiminta								
POW	T _m	0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
90°	1.5	C	C	C	C	f-NC 3	S+B	S+B
	5.5	C	C	C	f-UV	S+B	S+B	S+B
	11	C	C	f-UV	f-NC 3	S+B	S+B	S+B
	16.5	C	f-UV	f-NC 8	f-NC 3	S+B	S+B	S+B
	22	f-UV	f-UV	f-NC 3	S+B	S+B	S+B	S+B
C = jatkoi toimintaansa								
f-UV = virheilmoitus, undervoltage (3220)								
f-NC 3 = virheilmoitus, communication fault (3), kuitattavissa reset-näppäimellä								
f-NC 8 = virheilmoitus, communication fault (8), kuitattavissa reset-näppäimellä								
S+B = laite sammui ja käynnistyi uudelleen								

Taulukko B-6. Taajuusmuuttajan toiminta heikon verkon jälleenkytkennöissä DTC-säädöllä 90 asteen kytkentäkulmalla, kun jälleenkytkentää edelsi epäsymmetrinen jännitekuoppa.

DTC-säätö, heikko verkko, epäsymmetrinen jännitekuoppa ennen pj:ta								
Jälleenkytkennän jännitteetön väliaika [s], laitteen toiminta								
POW	T _m	0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
90°	1.5	C	C	C	C	f-NC 8	S+B	S+B
	5.5	C	C	C	f-UV	S+B	S+B	S+B
	11	C	C	f-UV	f-NC 2	S+B	S+B	S+B
	16.5	C	f-UV	f-NC 3	f-NC 3	S+B	S+B	S+B
	22	f-UV	f-UV	f-NC 3	S+B	S+B	S+B	S+B
C = jatkoi toimintaansa								
f-UV = virheilmoitus, undervoltage (3220)								
f-NC 2 = virheilmoitus, communication fault (2), kuitattavissa reset-näppäimellä								
f-NC 3 = virheilmoitus, communication fault (3), kuitattavissa reset-näppäimellä								
f-NC 8 = virheilmoitus, communication fault (8), kuitattavissa reset-näppäimellä								
S+B = laite sammui ja käynnistyi uudelleen								

Taulukko B-7. Taajuusmuuttajan toiminta normaaliverkon jälleenkytkennöissä skalaarisäädöllä 90 asteen kytkentäkulmalla moottorin ollessa pysäyksissä, mutta taajuusmuuttaja päällä.

Skalaarisäätö, normaaliverkko, moottori pysäyksissä (rpm = 0), mutta taajuusmuuttaja päällä								
		Jälleenkytkennän jännitteetön väliaika [s], laitteen toiminta						
POW	puhallin	0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
90°	off	C	C	C	C	f-NC 3	B	B
	on	C	C	C	C	B	B	B
C = taajuusmuuttaja pysyi päällä								
f-NC 3 = virheilmoitus, communication fault (3), kuitattavissa reset-näppäimellä								
B = laite sammui ja käynnistyi uudelleen								

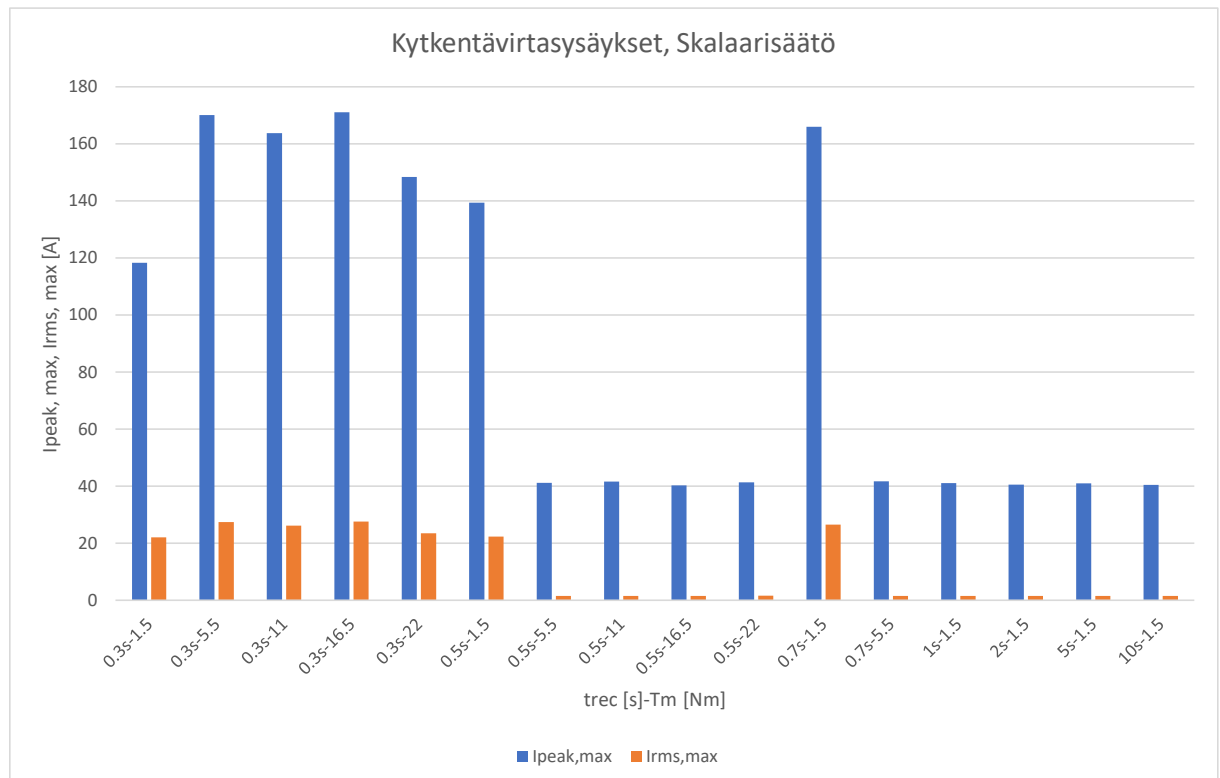
Taulukko B-8. Taajuusmuuttajan toiminta normaaliverkon jälleenkytkennöissä DTC-säädöllä 90 asteen kytkentäkulmalla moottorin ollessa pysäyksissä, mutta taajuusmuuttaja päällä.

DTC-säätö, normaaliverkko, moottori pysäyksissä (rpm = 0), mutta taajuusmuuttaja päällä								
		Jälleenkytkennän jännitteetön väliaika [s], laitteen toiminta						
POW	puhallin	0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
90°	off	C	C	C	C	f-NC 3	B	B
	on	C	C	C	C	B	B	B
C = taajuusmuuttaja pysyi päällä								
f-NC 3 = virheilmoitus, communication fault (3), kuitattavissa reset-näppäimellä								
B = laite sammui ja käynnistyi uudelleen								

LIITE C: TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖN KYTKENTÄVIRTASYSÄYKSET

Taulukko C-1. Taajuusmuuttajan kytkentävirtasysäykset eri jälleenkytkennän jännitteettömillä väliajoilla ja moottorin kuormitusmomenteilla skalaarisäätöä käytettäessä.

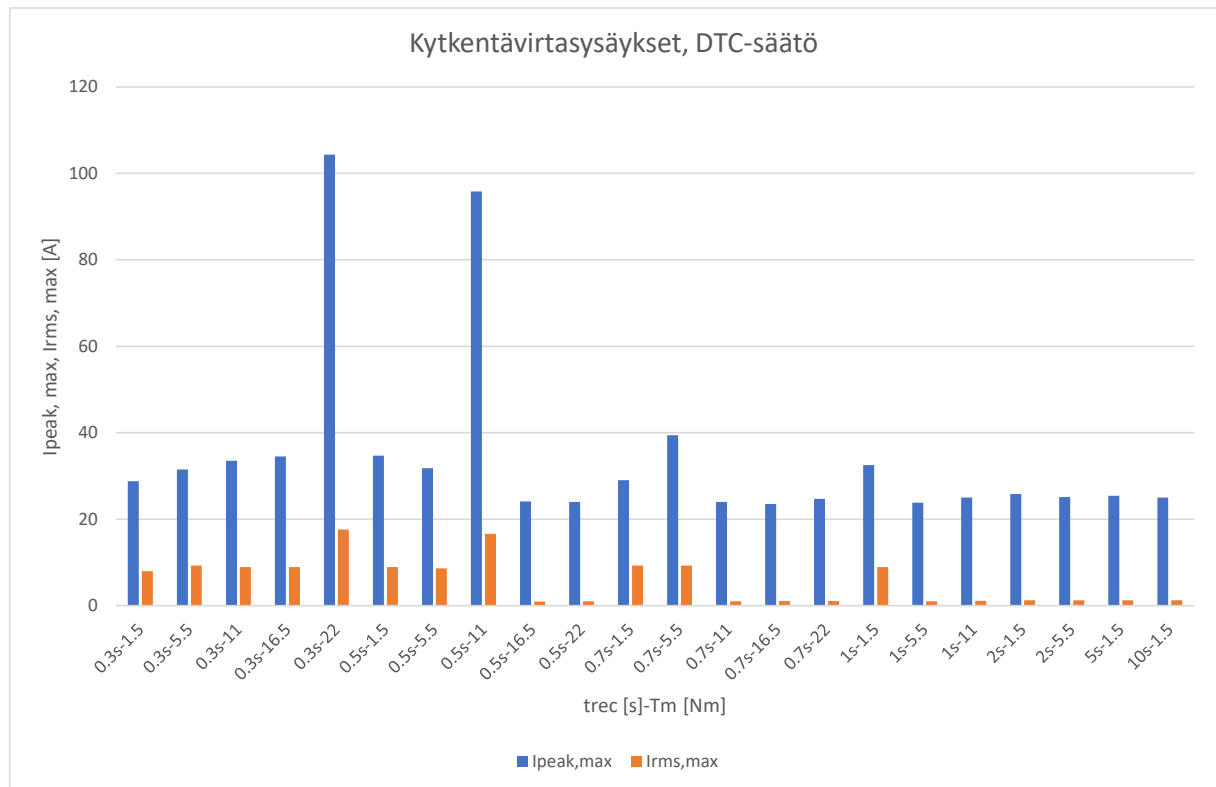
Skalaarisäätö, normaaliverkko, koesarja 1										
t_{rec} [s]	T_m [Nm]	Vaihevirran huippuarvo I_{peak}				Vaihevirran huippuarvo I_{rms}				Toiminta
		L1 [A]	L2 [A]	L3 [A]	$I_{peak,max}$	L1 [A]	L2 [A]	L3 [A]	$I_{rms,max}$	
0.3	0.3s-1.5	117.9	-24.5	-118.3	118.3	22.1	3.7	20.7	22.1	C
	0.3s-5.5	-169.2	-1.29	170.1	170.1	27.3	0.44	27.4	27.4	f-NC 3
	0.3s-11	-162.8	-8.93	163.8	163.8	26	0.82	26.2	26.2	f-NC 3
	0.3s-16.5	1.31	-171	171.1	171.1	0.52	27.6	27.5	27.6	f-NC 3
	0.3s-22	26.9	-148.4	148.2	148.4	4.44	23.5	23	23.5	f-NC 3
0.5	0.5s-1.5	-139.4	138.7	32	139.4	22.3	21.2	6.1	22.3	f-NC 3
	0.5s-5.5	41.2	-17.8	-16	41.2	1.54	1.09	1.39	1.54	f-NC 3
	0.5s-11	41.6	-17.4	-14.5	41.6	1.56	1.09	1.33	1.56	f-NC 3
	0.5s-16.5	40.3	-17.8	-17.2	40.3	1.54	1.11	1.37	1.54	S+B
	0.5s-22	41.4	-18.5	-17	41.4	1.6	1.12	1.4	1.6	S+B
0.7	0.7s-1.5	-165	-7.6	166	166	26.4	0.68	26.5	26.5	f-NC 3
	0.7s-5.5	41.7	-18.1	-15.6	41.7	1.58	1.11	1.35	1.58	S+B
1	1s-1.5	41.1	-17	-18	41.1	1.57	1.07	1.4	1.57	S+B
2	2s-1.5	40.6	-16	-17.8	40.6	1.54	1.08	1.36	1.54	S+B
5	5s-1.5	41	-16	-17.7	41	1.56	1.07	1.4	1.56	S+B
10	10s-1.5	40.5	-16.6	-18.3	40.5	1.52	1.09	1.38	1.52	S+B



Kuva C.1. Taajuusmuuttajan kytkentävirtasysäykset eri jälleenkytkennän jännitteettömillä väliajoilla ja moottorin kuormitusmomenteilla skalaarisäätöä käytettäessä.

Taulukko C-2. Taajuusmuuttajan kytkentävirtasysäykset eri jälleenkytkennän jännitteettömillä väliajoilla ja moottorin kuormitusmomenteilla DTC-säätöä käytettäessä.

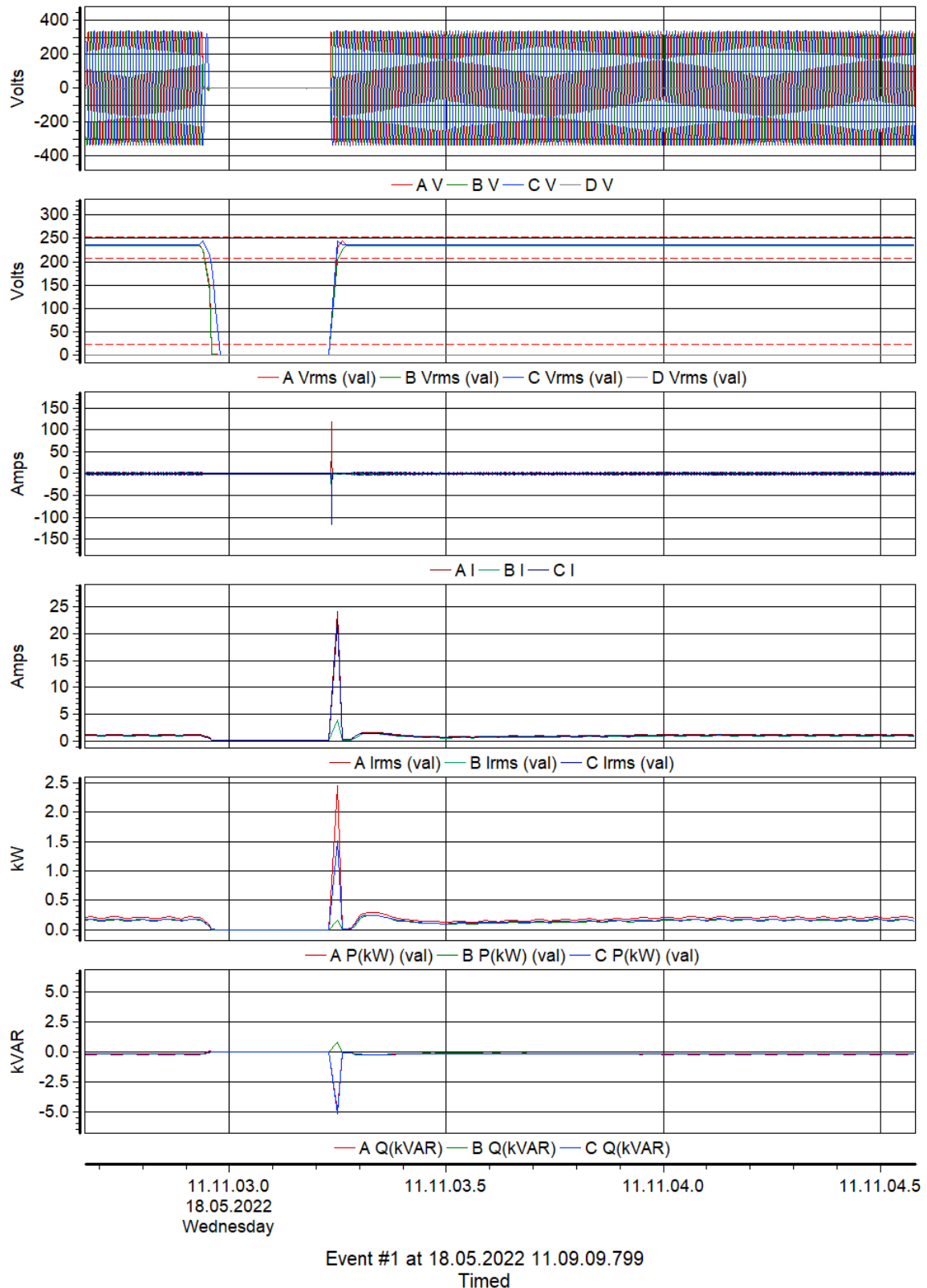
DTC-säätö, normaaliverkko, koesarja 2										
t_{rec} [s]	T_m [Nm]	Vaihevirran huippuarvo I_{peak}				Vaihevirran huippuarvo I_{rms}				Toiminta
		L1 [A]	L2 [A]	L3 [A]	$I_{peak,max}$	L1 [A]	L2 [A]	L3 [A]	$I_{rms,max}$	
0.3	0.3s-1.5	28.8	12.1	-28.7	28.8	7.8	1.59	8	8	C
	0.3s-5.5	31.4	13.7	-31.5	31.5	9.3	3.8	9	9.3	C
	0.3s-11	33.4	13.4	-33.5	33.5	8.7	1.9	8.9	8.9	C
	0.3s-16.5	34.5	14	-34.5	34.5	8.7	2	8.9	8.9	C
	0.3s-22	103.9	-8.9	-104.3	104.3	17.5	0.53	17.6	17.6	C
0.5	0.5s-1.5	34.7	13.8	-34.7	34.7	8.76	1.93	8.95	8.95	C
	0.5s-5.5	31.8	13	-31.7	31.8	8.4	1.79	8.6	8.6	C
	0.5s-11	95.6	-9.1	-95.8	95.8	16.5	0.73	16.6	16.6	C
	0.5s-16.5	24.1	-9.5	-8.9	24.1	0.97	0.66	0.88	0.97	f-UV
	0.5s-22	24	-9.5	-10.9	24	1	0.7	0.95	1	f-UV
0.7	0.7s-1.5	29	13.4	-28.9	29	9.25	4.1	8.7	9.25	C
	0.7s-5.5	39.3	11.7	-39.4	39.4	9.2	1.48	9.3	9.3	C
	0.7s-11	24	-9.6	-10.7	24	0.98	0.68	0.92	0.98	f-UV
	0.7s-16.5	23.5	-10.1	-10.8	23.5	1.06	0.76	1.03	1.06	f-NC 3
	0.7s-22	24.7	-9.8	-9.7	24.7	1.07	0.76	1.04	1.07	f-NC 3
1	1s-1.5	32.4	14	-32.5	32.5	8.6	2.06	8.9	8.9	C
	1s-5.5	23.8	-7.3	-9.3	23.8	1.02	0.68	0.92	1.02	f-UV
	1s-11	25	-8.4	-9.5	25	1.1	0.85	1.1	1.1	f-NC 3
2	2s-1.5	25.8	-9.4	-15	25.8	1.24	0.97	1.24	1.24	f-NC 3
	2s-5.5	25.1	-9.1	-11.6	25.1	1.22	0.97	1.23	1.23	S+B
5	5s-1.5	25.4	-9.8	-12.7	25.4	1.23	0.97	1.26	1.26	S+B
10	10s-1.5	25	-9.2	-10.7	25	1.26	0.97	1.26	1.26	S+B



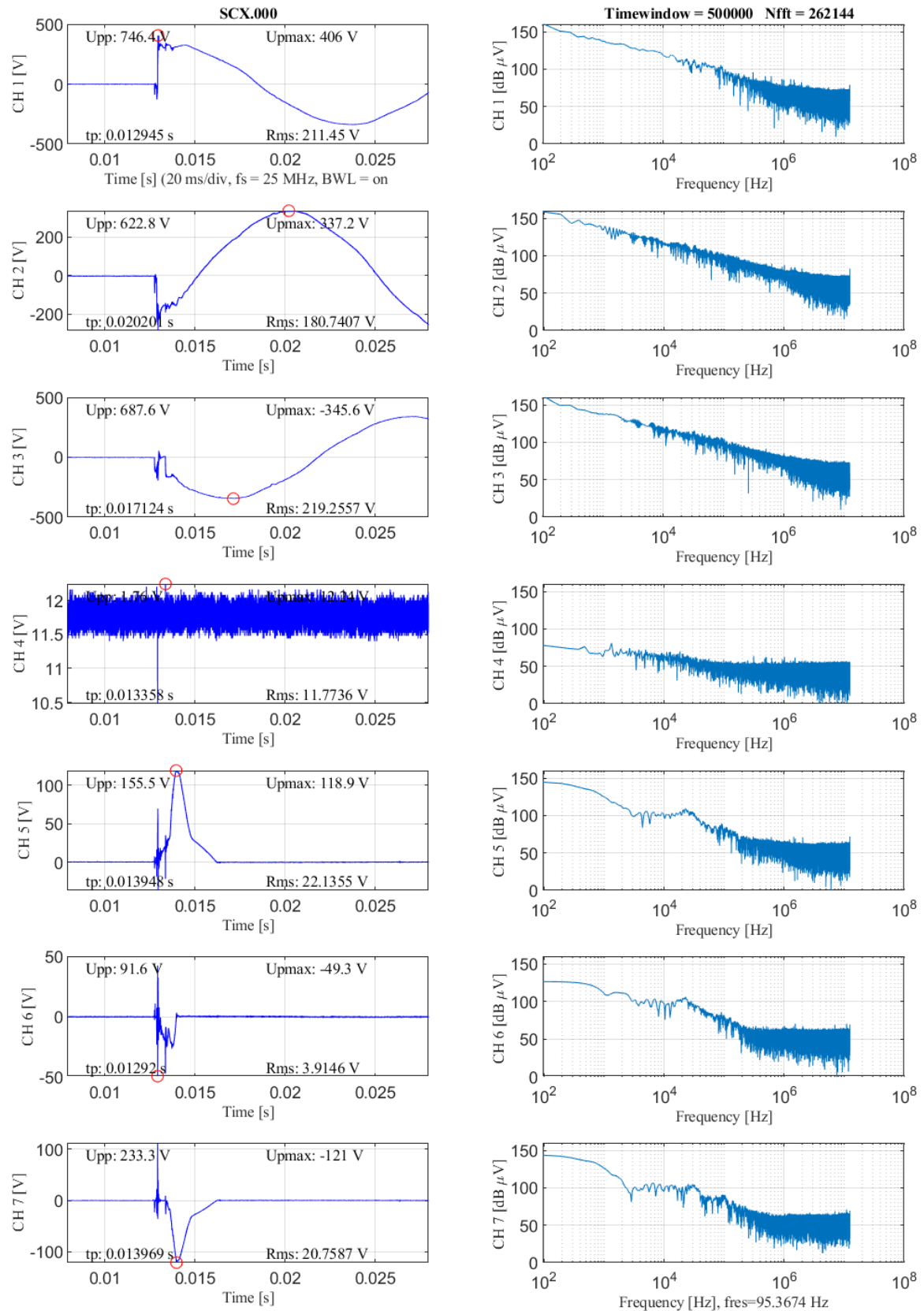
Kuva C.2. Taajuusmuuttajan kytkentävirtasysäykset eri jälleenkytkennän jännitteettömillä väliajoilla ja moottorin kuormitusmomenteilla DTC-säätöä käytettäessä.

LIITE D: TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖN AALTOMUOTOKUVIA

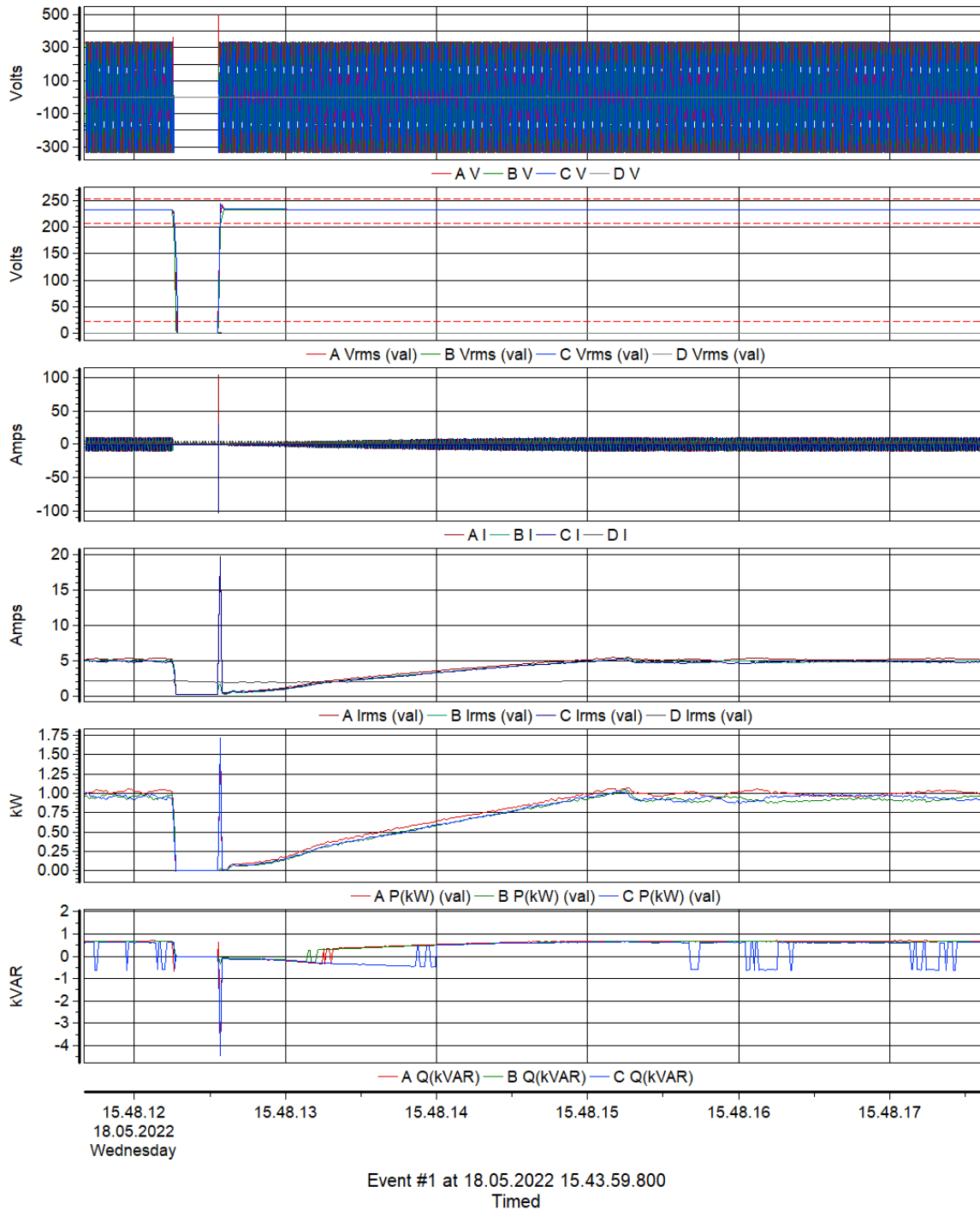
Tässä liitteessä on esitetty laboratoriossa Dranetz PowerXplorer PX5 sähkönlaatu- ja häiriö-analysaattorilla ja LeCroy MDA803-oskilloskoopilla mitattuja vaihejännitteiden ja -virtojen aaltomuotoja. Tarkempi kuvaus mittausjärjestelyistä on esitetty tämän raportin luvussa 7.



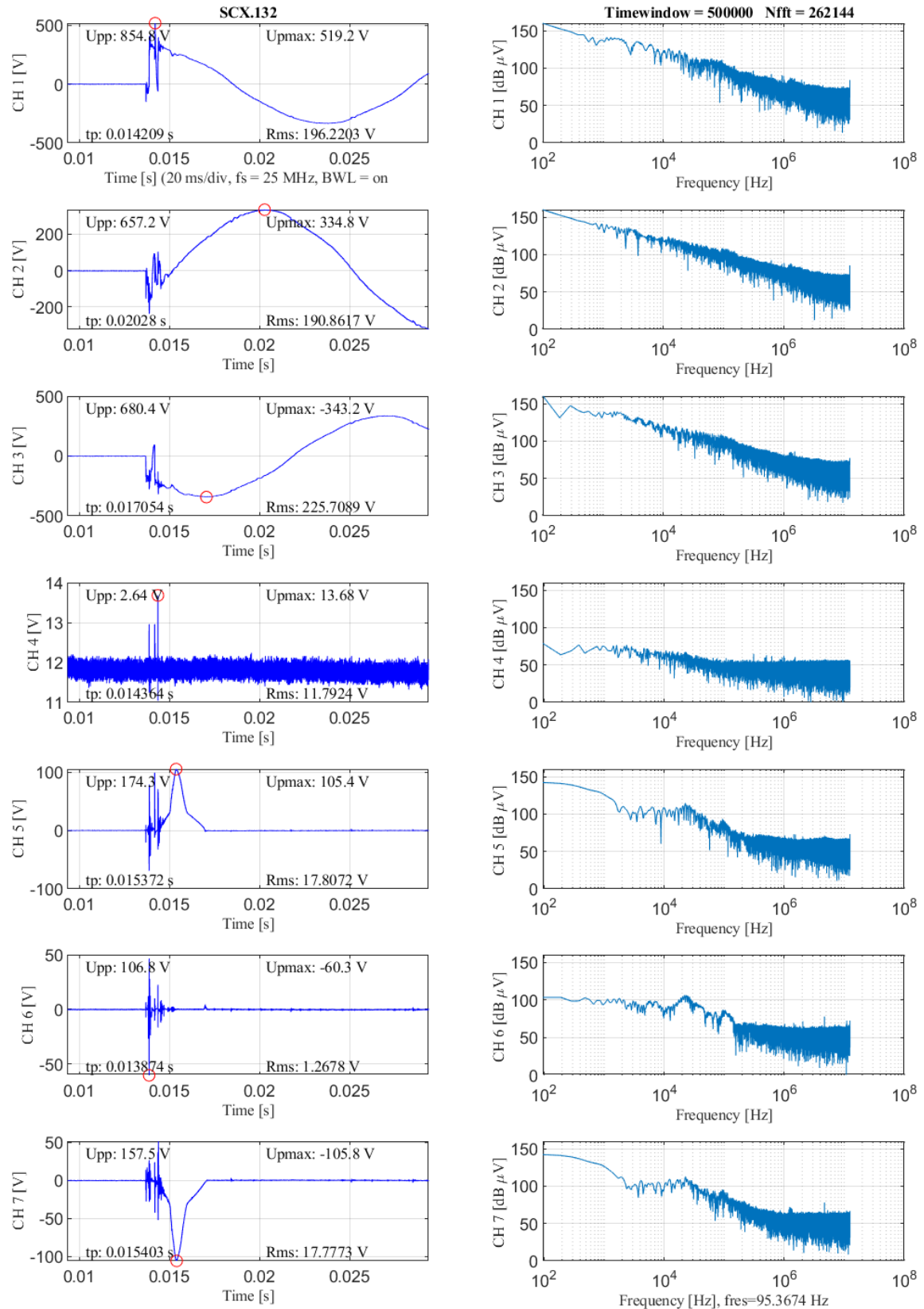
Kuva D.1. Taajuusmuuttajan verkkoliitynnän vaihejännitteiden ja -virtojen aaltomuodot ja 10 ms välein lasketut 20 ms tehollisarvot ja vaihekohtaiset pätötehot ja kokonaisloistehot skalaarisäädöllä tehdyssä kokeessa, jälleenkytkennän jännitteetön väliaika 300 ms, normaaliverkko ($I_{k1} \approx 750$ A), $T_m = 1,5$ Nm, taajuusmuuttajan toiminta ei keskeytynyt jälleenkytkennässä. Dranetz-mittaus.



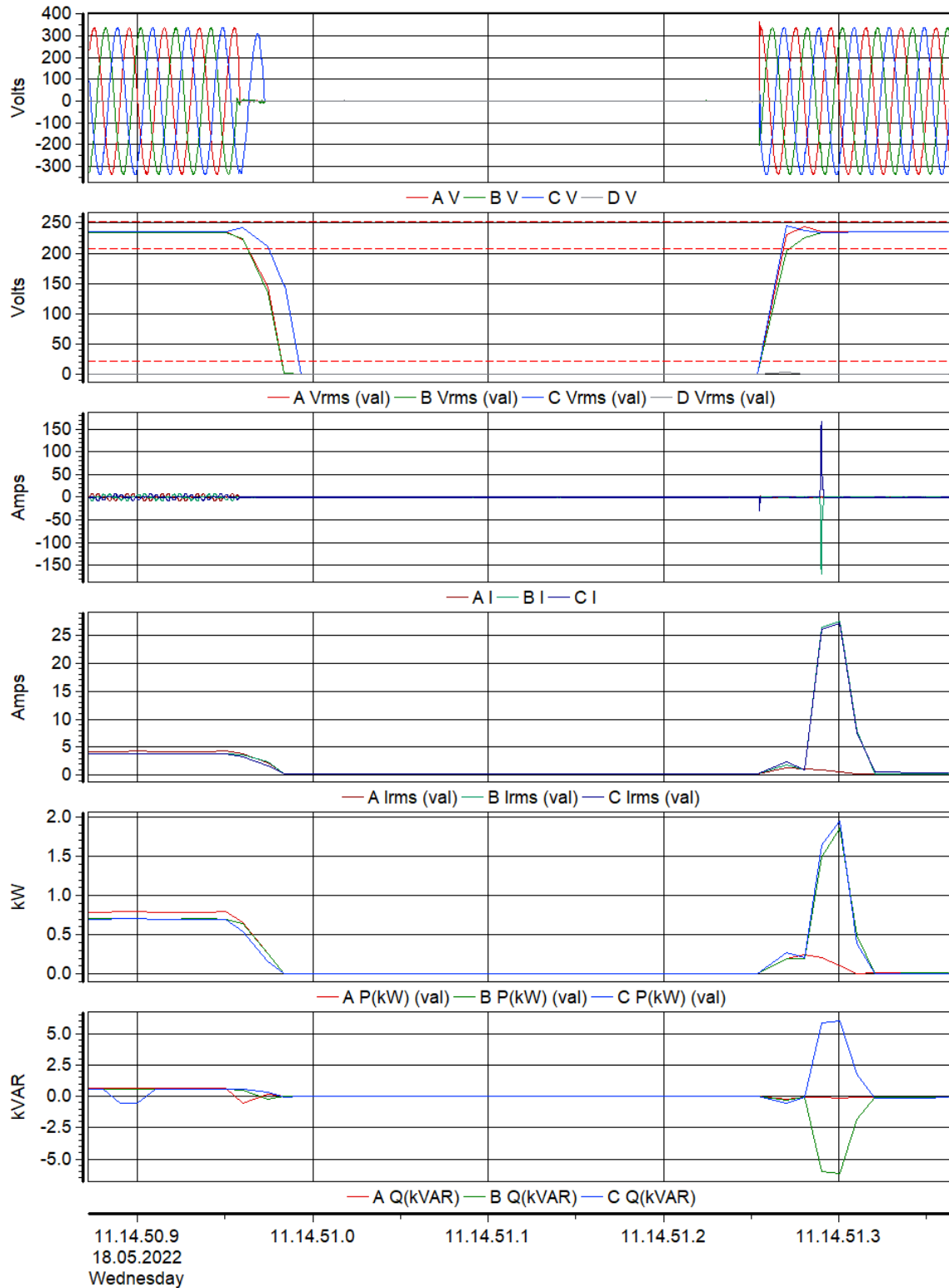
Kuva D.2. Taajuusmuuttajan verkkoliitynnän vaihejännitteiden ja -virtojen aaltomuodot skalaaarisäädöllä tehdyssä kokeessa, jälleenkytkennän jännitteetön väliaika 300 ms, normaaliverkko ($I_{k1} \approx 750$ A), $T_m = 1,5$ Nm, taajuusmuuttajan toiminta ei keskeytynyt jälleenkytkennässä. Oskilloskooppimittaus LeCroy ADP 031-differentialimittapäillä ja Fluke i1000s virtapihdeillä samalta ajan hetkeltä kuin edellinen Dranetz-mittaus.



Kuva D.3. Taajuusmuuttajan verkkoliitynnän vaihejännitteiden ja -virtojen aaltomuodot ja 10 ms välein lasketut 20 ms tehollisarvot ja vaihekohtaiset pätötehot ja kokonaisloistehot DTC-säädöllä tehdyssä kokeessa, jälleenkytkennän jännitteetön väliaika 300 ms, normaaliverkko ($I_{k1} \approx 750$ A), $T_m = 22$ Nm, taajuusmuuttajan toiminta ei keskeytynyt jälleenkytkennässä. Dranetz-mittaus.

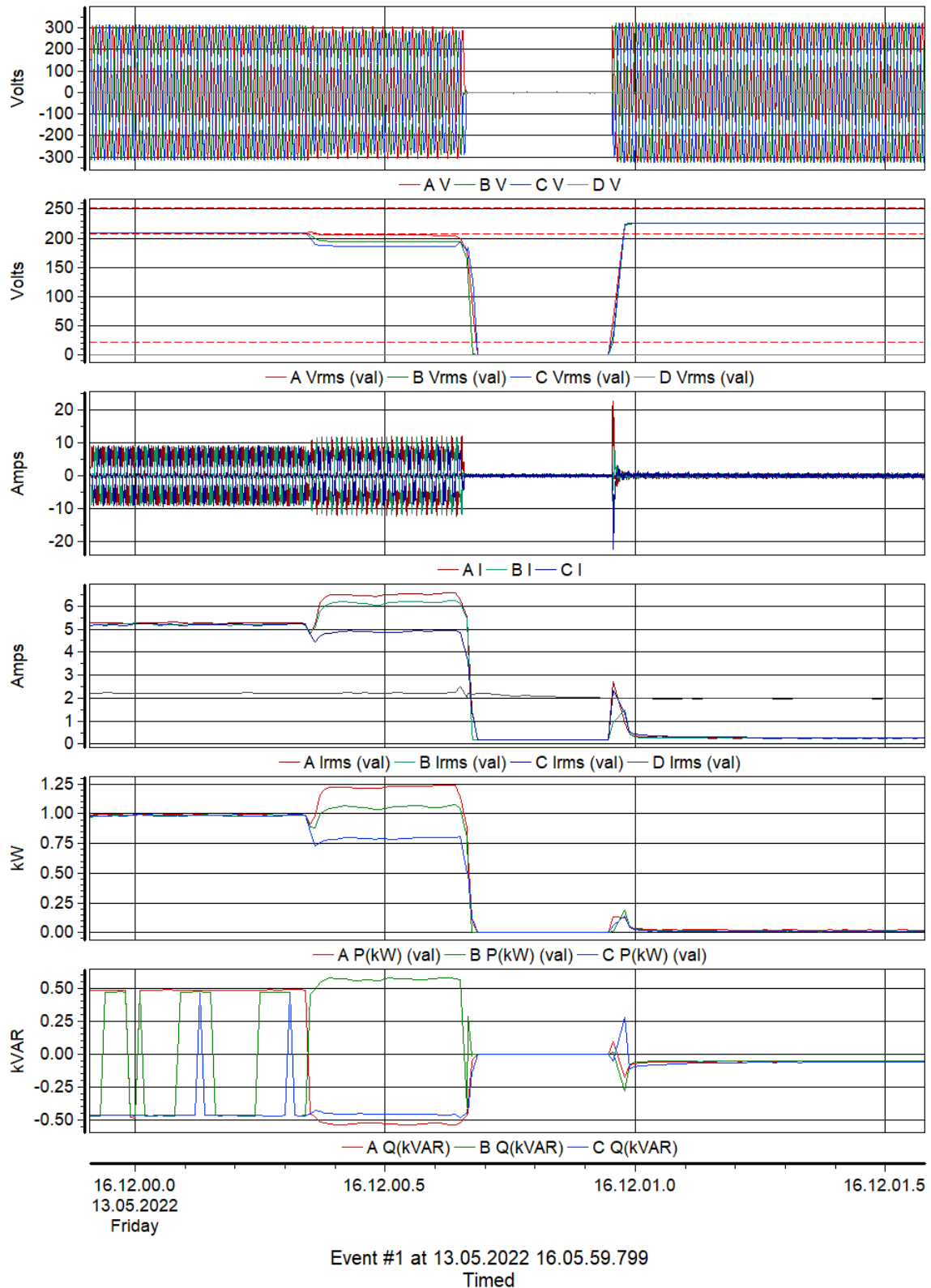


Kuva D.4. Taajuusmuuttajan verkkoliittynän vaihejännitteiden ja -virtojen aaltomuodot ja 10 ms välein lasketut 20 ms tehollisarvot ja vaihekohtaiset pätötehot ja kokonaisloistehot DTC-säädöllä tehdyssä kokeessa, jälleenkytkennän jännitteetön väliaika 300 ms, normaaliverkko ($I_{k1} \approx 750$ A), $T_m = 22$ Nm, taajuusmuuttajan toiminta ei keskeytynyt jälleenkytkennässä. Oskilloskooppimittaus LeCroy ADP 031-differentialimittapäillä ja Fluke i1000s virtapihdeillä samalta ajan hetkeltä kuin edellinen Dranetz-mittaus.



Event #1 at 18.05.2022 11.09.09.799
Timed

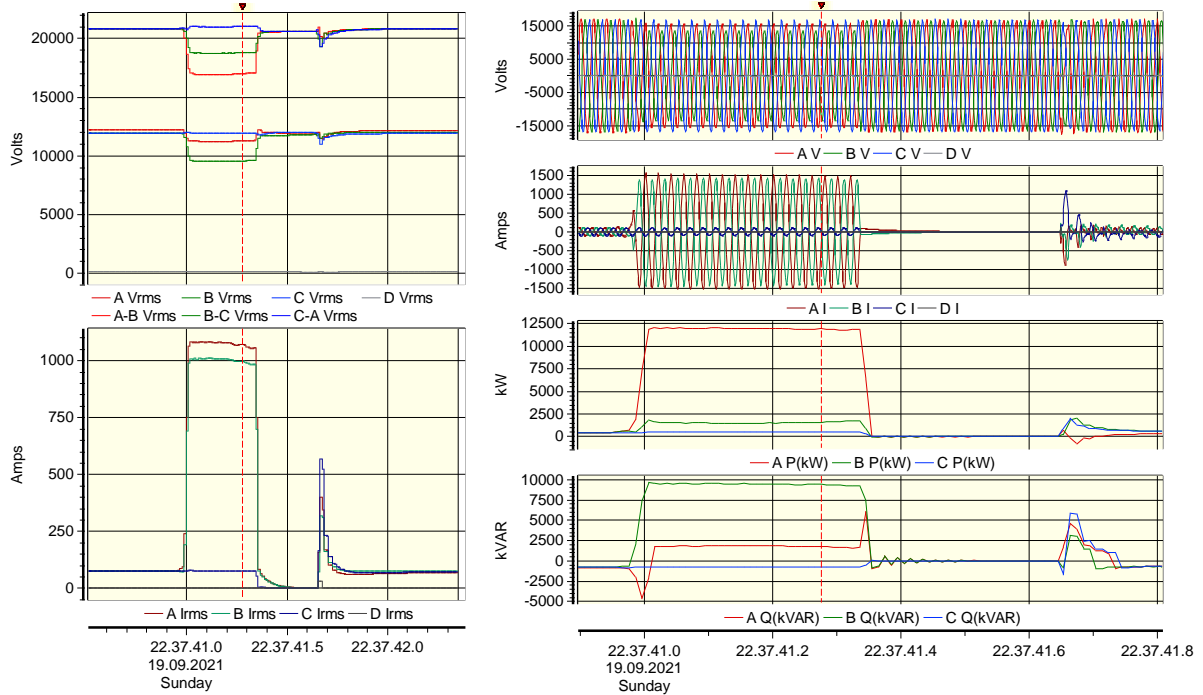
Kuva D.5. Taajuusmuuttajan verkkoliittynän vaihejännitteiden ja -virtojen aaltomuodot ja 10 ms välein lasketut 20 ms tehollisarvot ja vaihekohtaiset pätötehot ja kokonaisloistehot skalaarisäädöllä tehdyissä kokeissa, jälleenkytkennän jännitteiden väliaika 300 ms, normaaliverkko ($I_{k1} \approx 750$ A), $T_m = 16,5$ Nm, taajuusmuuttajan toiminta pysähtyi jälleenkytkennässä. Dranetz-mittaus.



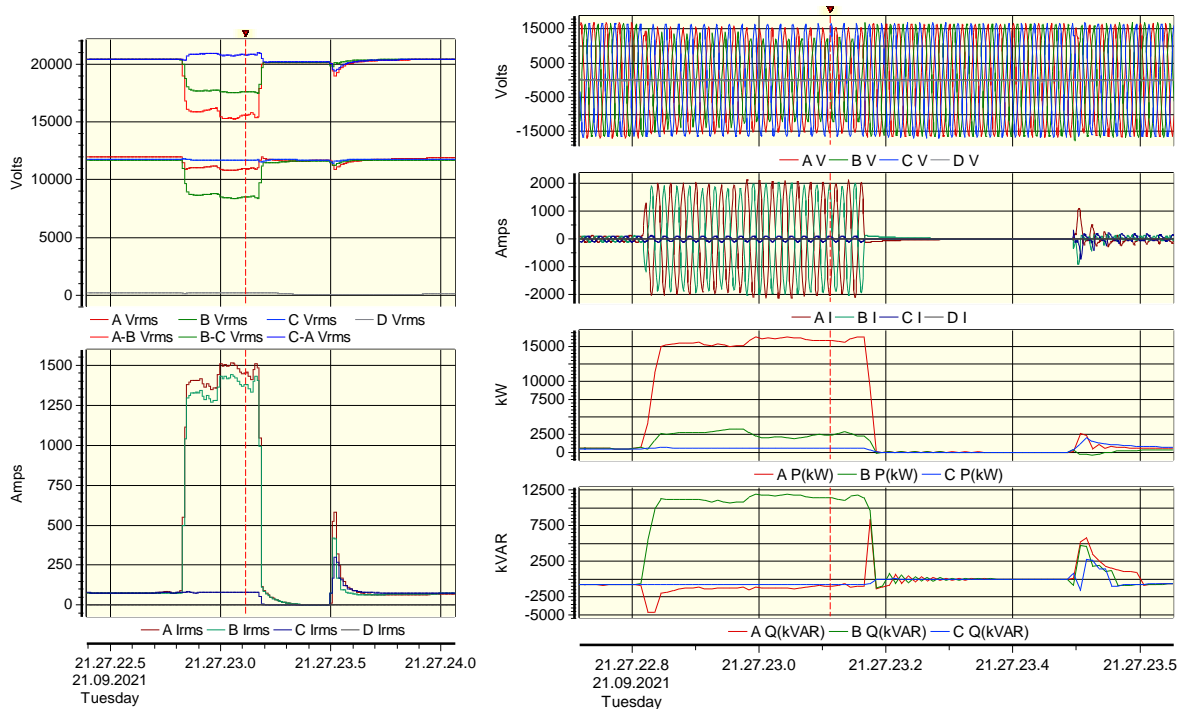
Kuva D.6. Taajuusmuuttajan verkkoliitynnän vaihejännitteiden ja -virtojen aaltomuodot ja 10 ms välein lasketut 20 ms tehollisarvot ja vaihekohtaiset pätötehot ja kokonaisloistehot skalaarisäädöllä tehdyissä kokeissa, jälleenkytkennän jännitteetön väliaika 300 ms, heikko verkko ($I_{k1} \approx 64$ A), epäsymmetrinen jännitekuoppa ennen jälleenkytkentää, $T_m = 22$ Nm, taajuusmuuttajan toiminta pysähtyi jälleenkytkennässä. Dranetz-mittaus.

LIITE E: HÄIRIÖTALLENTEITA TD=300 MS

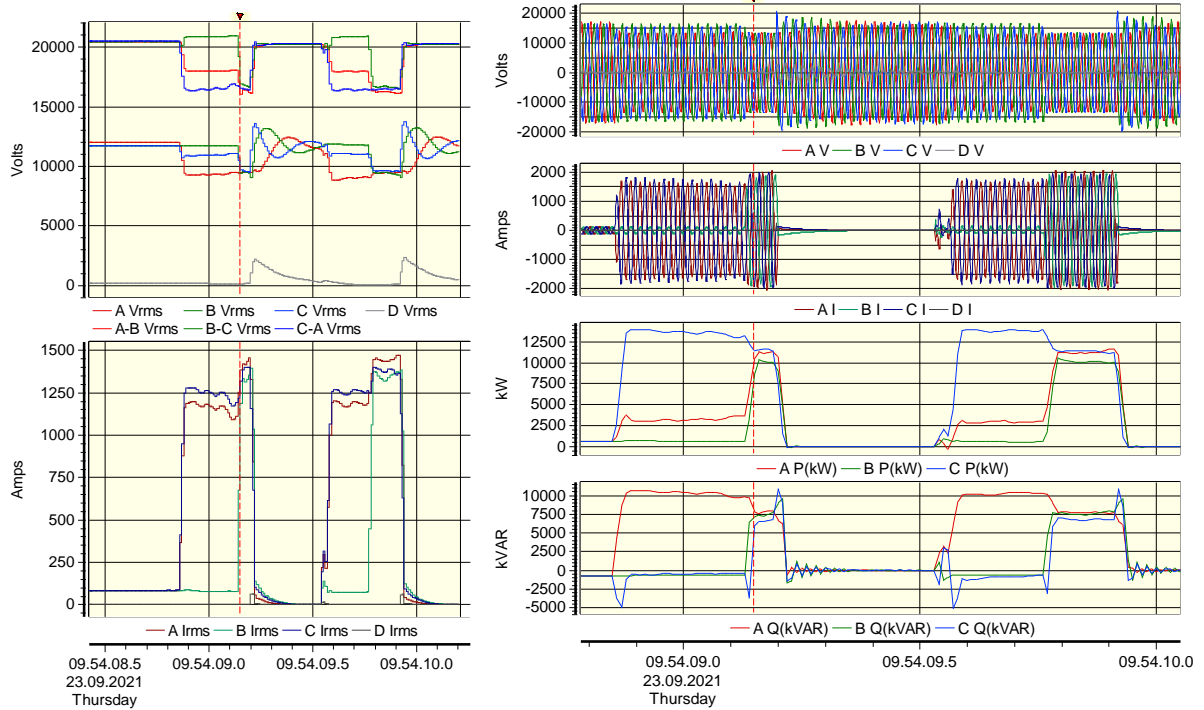
Häiriötallenteiden aikaleimat ovat UTC-ajassa, mikä on huomioitava, jos näitä verrataan asiakakohteissa tehtyihin mittauksiin. Asiakaskohteissa mittalaitteet olivat Suomen ajassa (UTC + 2 h).



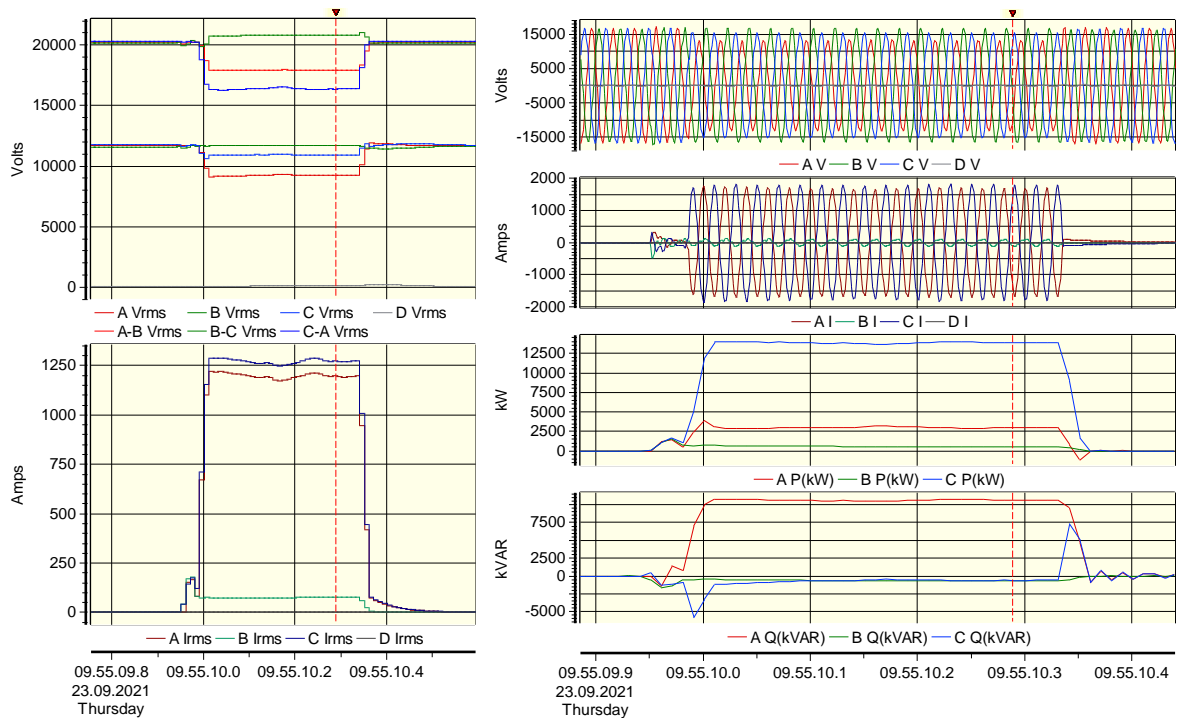
Kuva E.1. Lähtö 1 (teollisuuskohte 1:n lähtö), 2-vaiheinen oikosulku, onnistunut pj.ä.



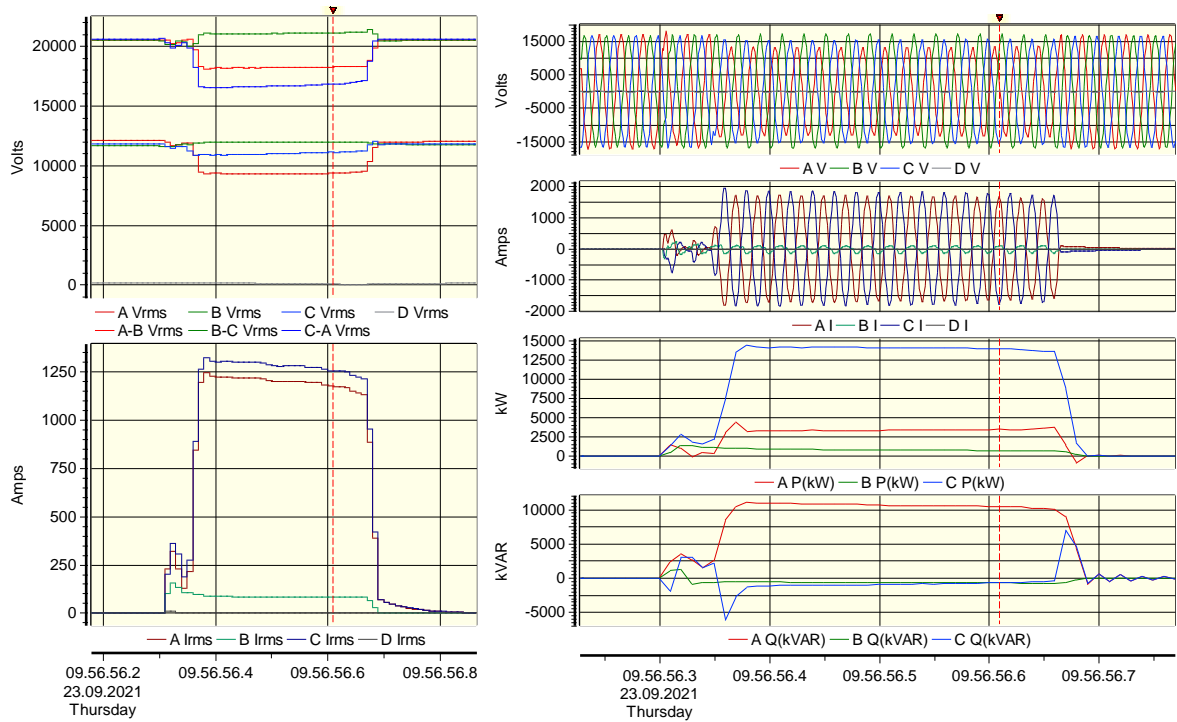
Kuva E.2. Lähtö 1 (teollisuuskohte 1:n lähtö), 2-vaiheinen oikosulku, onnistunut pj.ä.



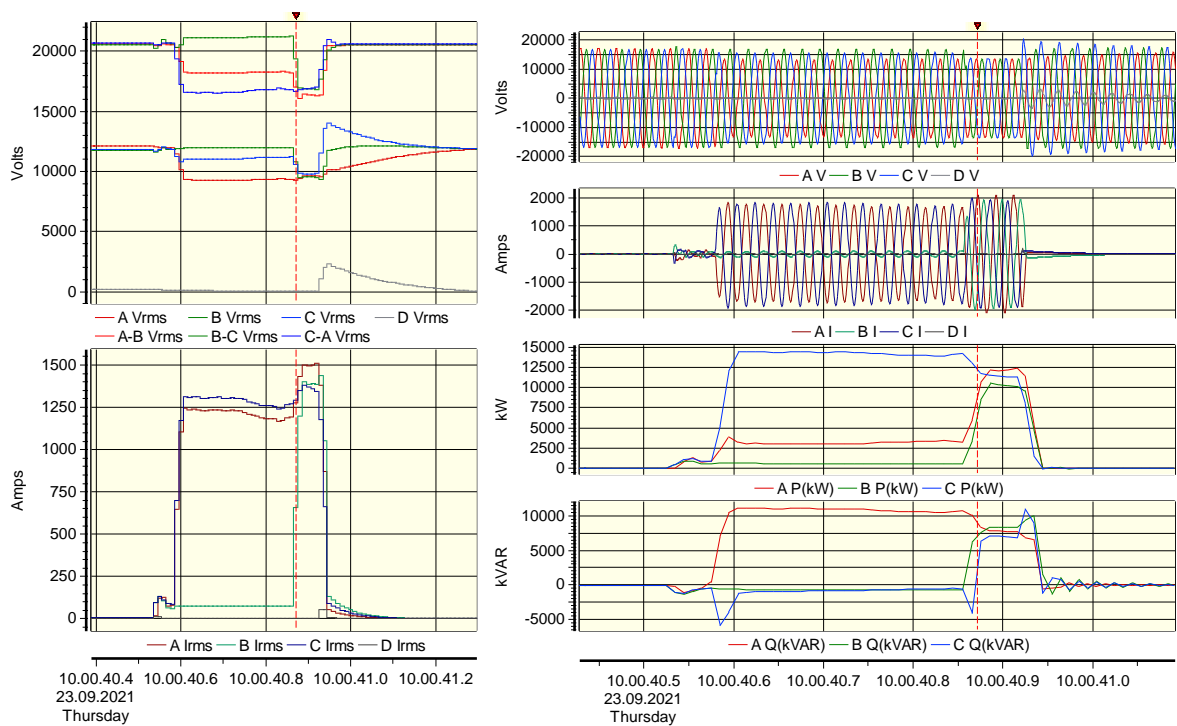
Kuva E.3. Lähtö 1 (teollisuuskohte 1:n lähtö), 2-vaiheinen oikosulku, epäonnistunut pjk, 2-vaiheinen oikosulku, kehittyy kolmivaiheiseksi ennen laukaisua.



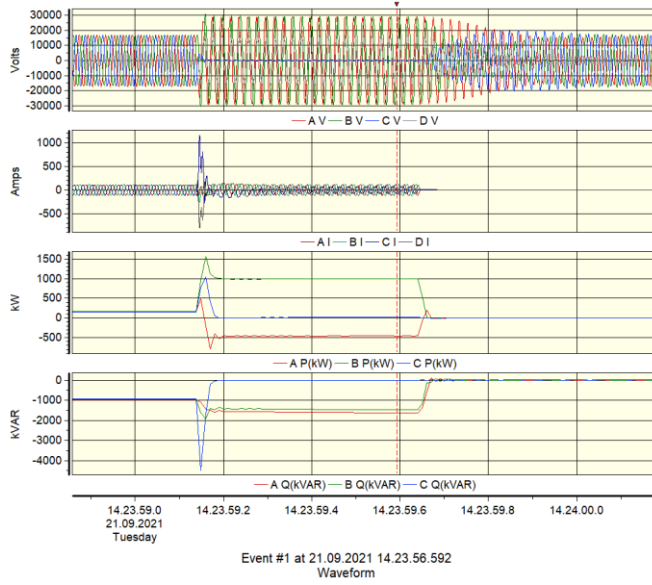
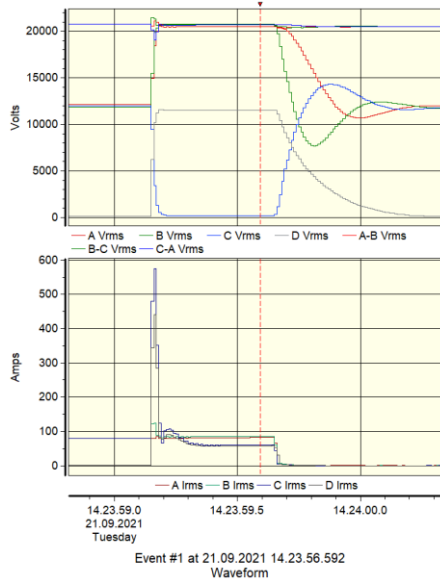
Kuva E.4. Lähtö 1 (teollisuuskohte 1:n lähtö), epäonnistunut ajk.



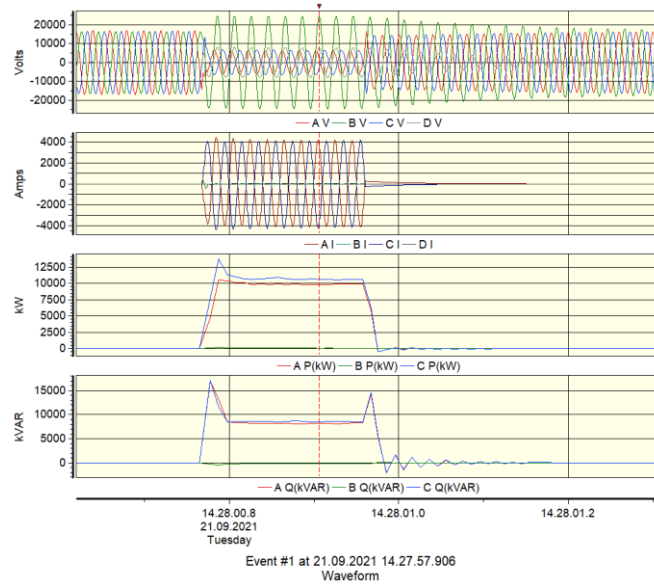
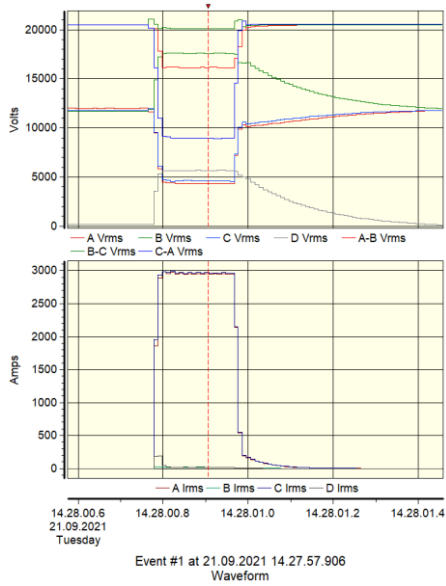
Kuva E.5. Lähde 1 (teollisuuskohte 1:n lähde), epäonnistunut kokeilukytkentä.



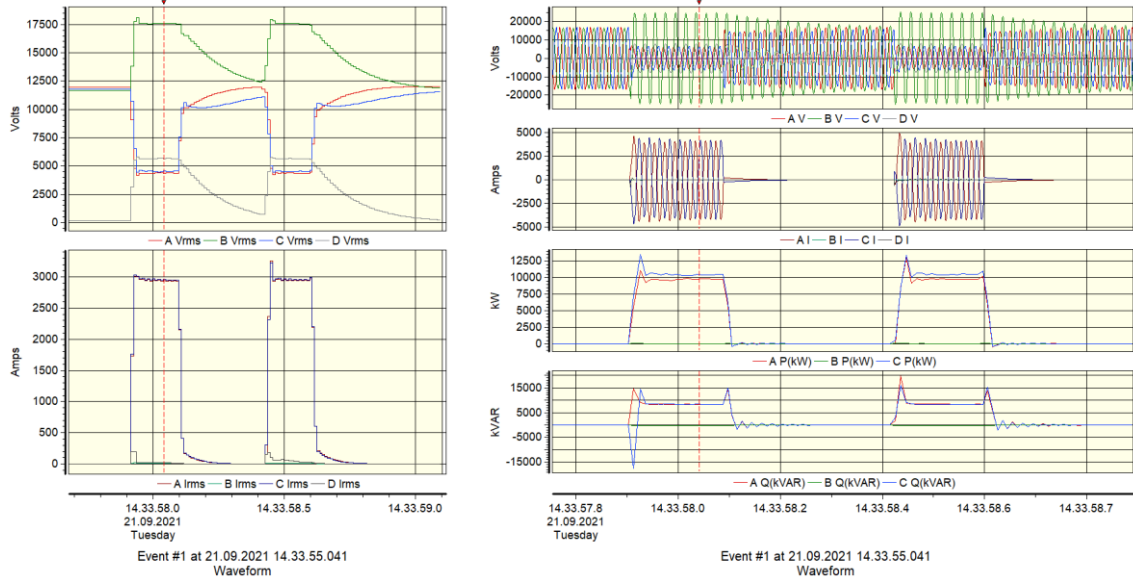
Kuva E.6. Lähde 1 (teollisuuskohte 1:n lähde), epäonnistunut kokeilukytkentä.



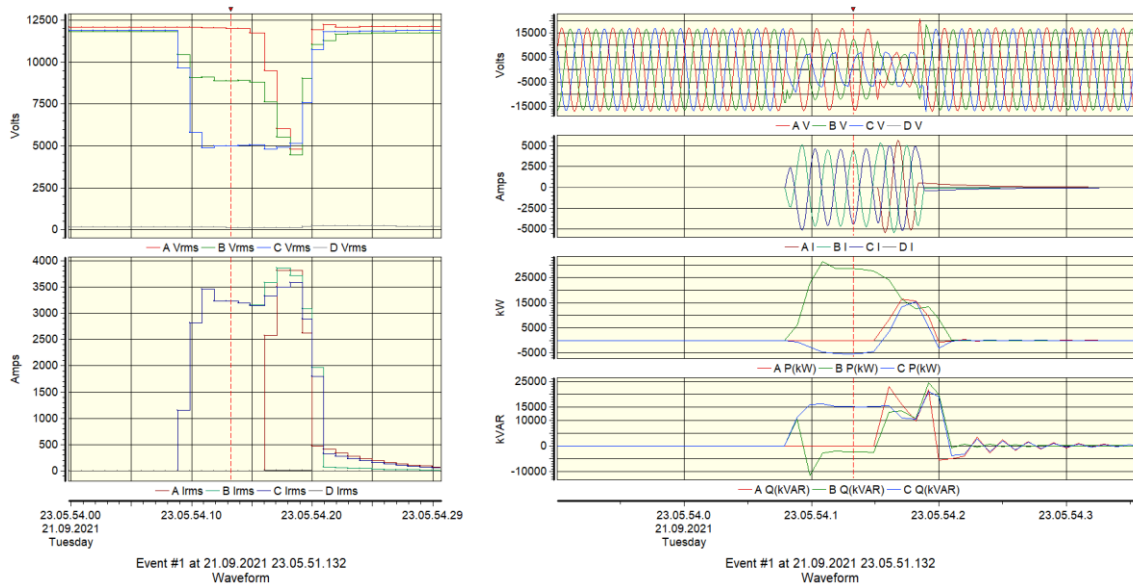
Kuva E.7. Lähtö 2, maasulku.



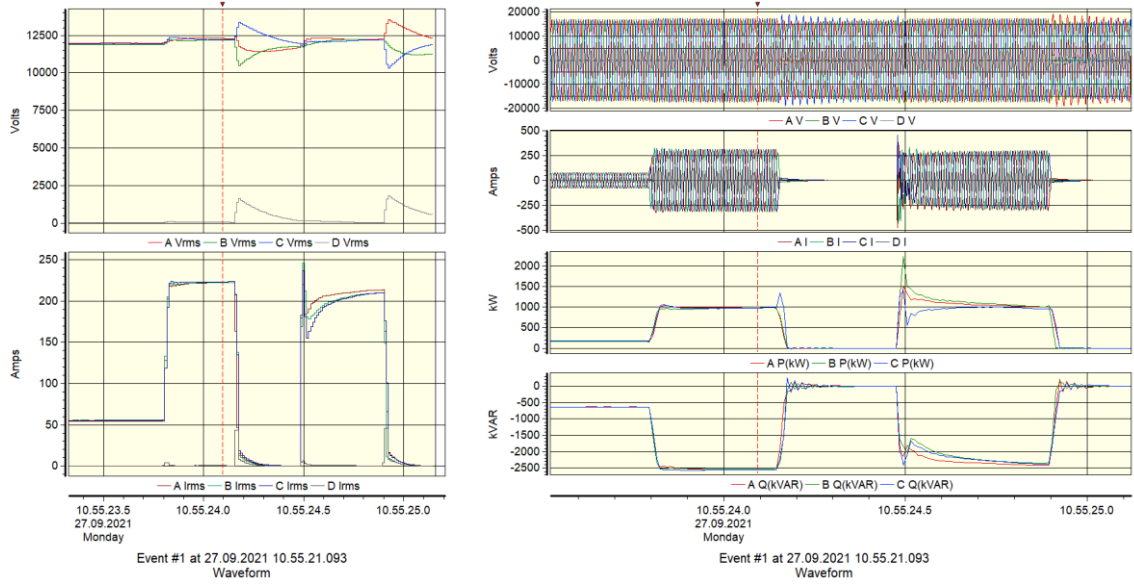
Kuva E.8. Lähtö 2, 2-vaiheinen oikosulku maakosketuksella, ei merkittävää kuormaa ennen vikaa.



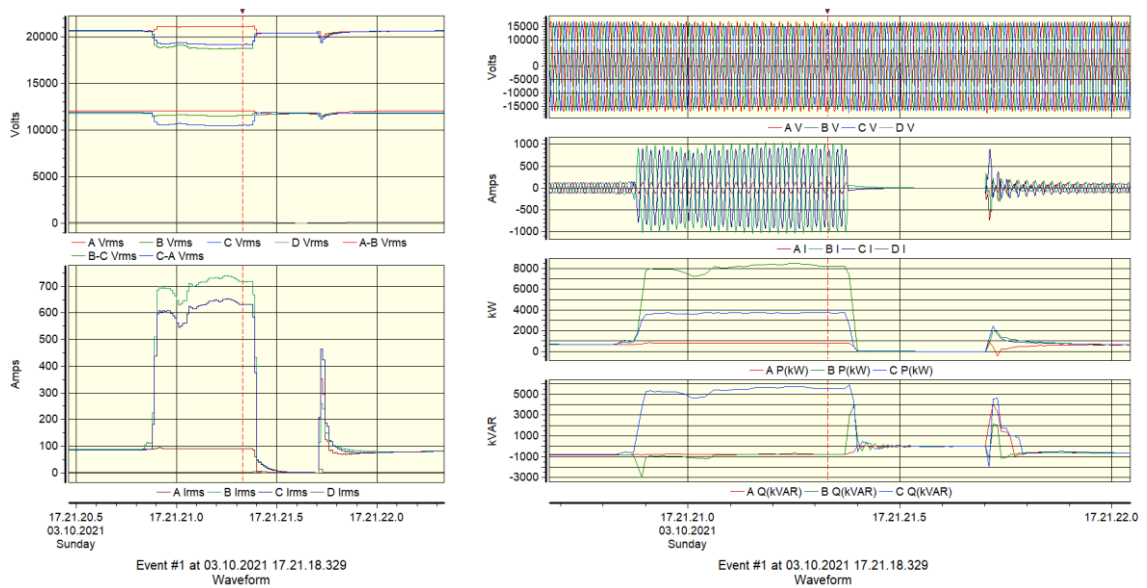
Kuva E.9. Lähtö 2, 2-vaiheinen oikosulku maakesetuksella, epäonnistunut pj.



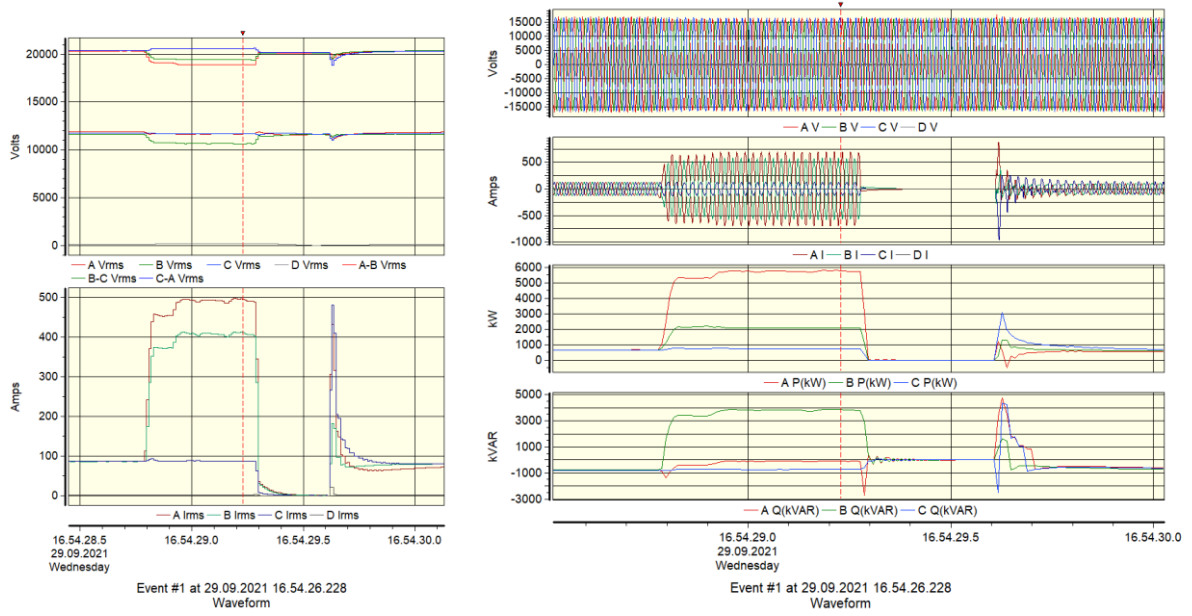
Kuva E.10. Lähtö 2, 2-vaiheinen oikosulku joka kehittyi 3-vaiheiseksi.



Kuva E.11. Lähtö 2, 3-vaiheinen oikosulku, epäonnistunut pjk.



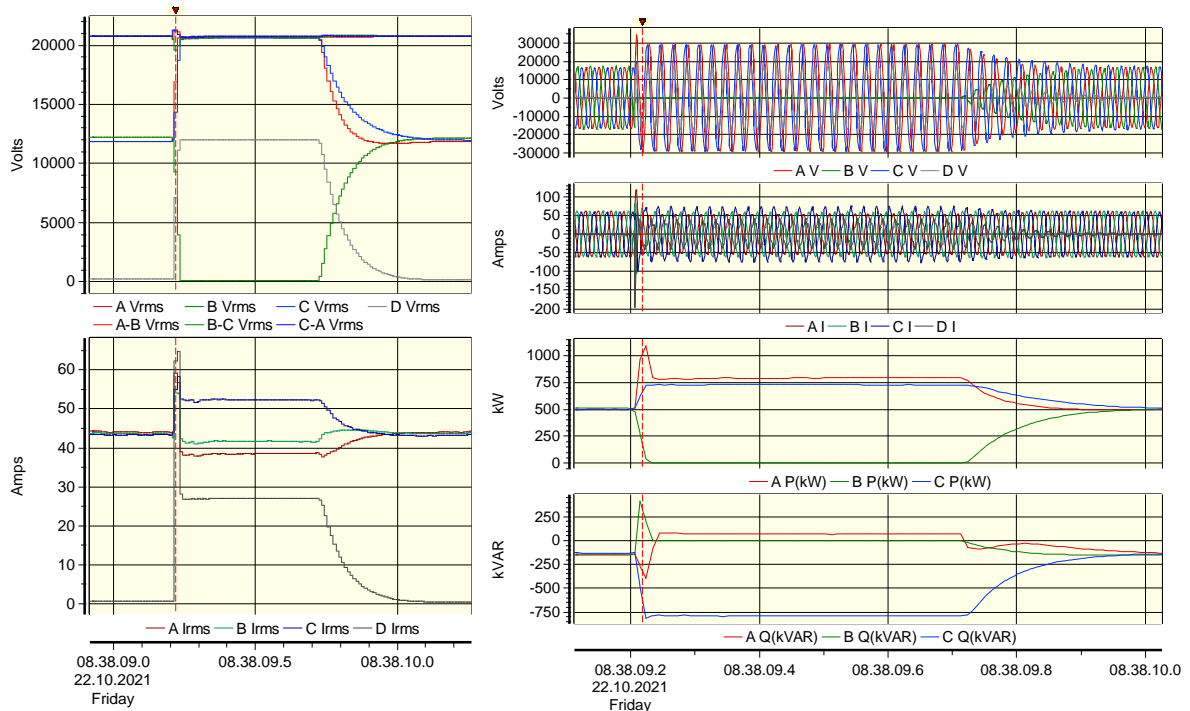
Kuva E.12. Lähtö 3, 2-vaiheinen oikosulku, onnistunut pjk.



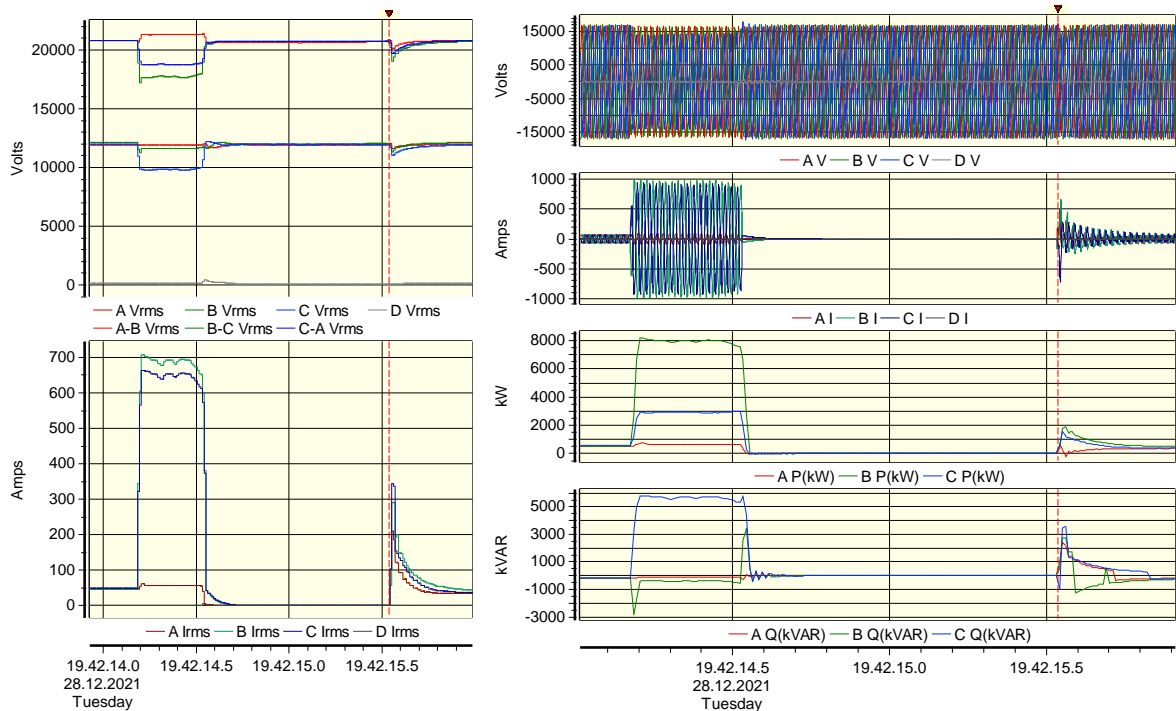
Kuva E.13. Lähtö 3, 2-vaiheinen oikosulku, onnistunut pjk.

LIITE F: HÄIRIÖTALLENTEITA TD=1,0 S

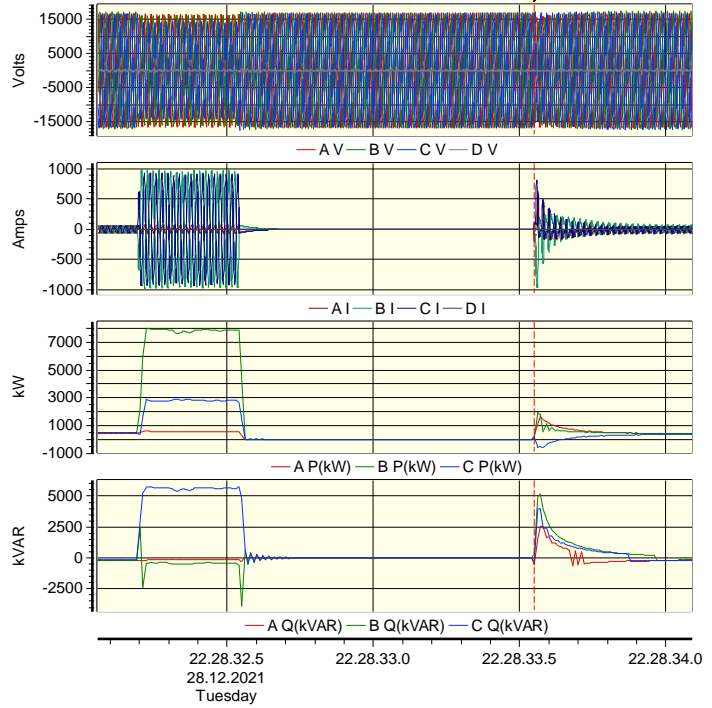
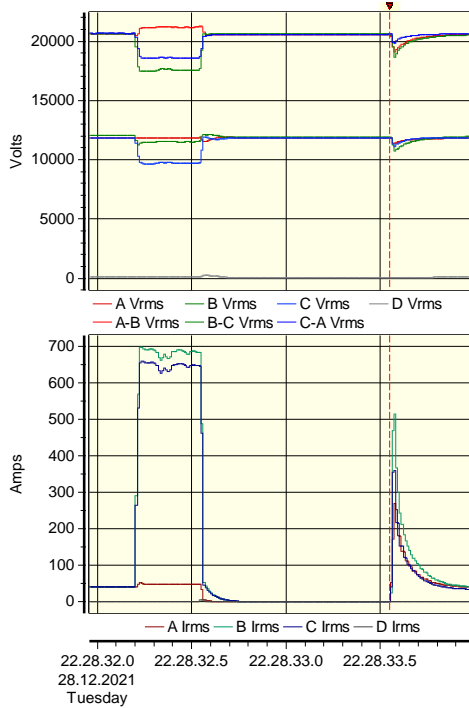
Häiriötallenteiden aikaleimat ovat UTC-ajassa, mikä on huomioitava, jos näitä verrataan asiakakohteissa tehtyihin mittauksiin. Asiakaskohteissa mittalaitteet olivat Suomen ajassa (UTC + 2 h).



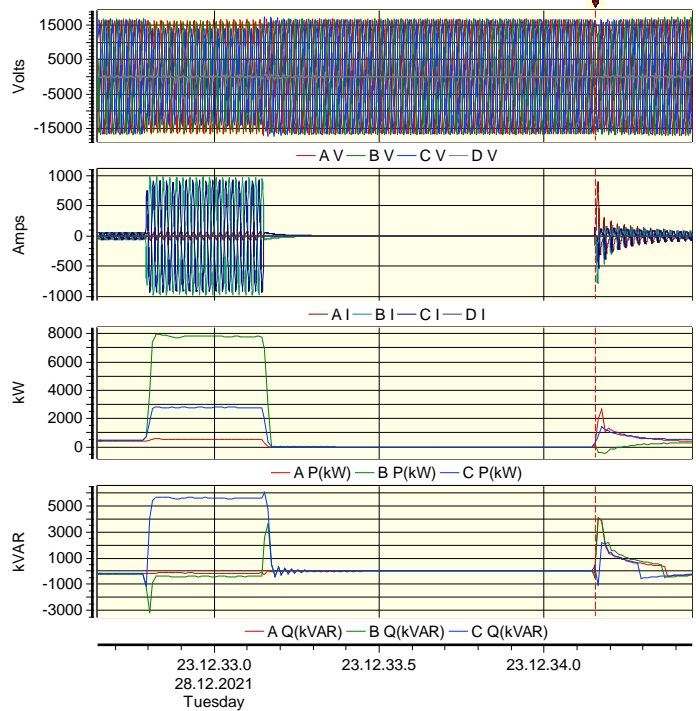
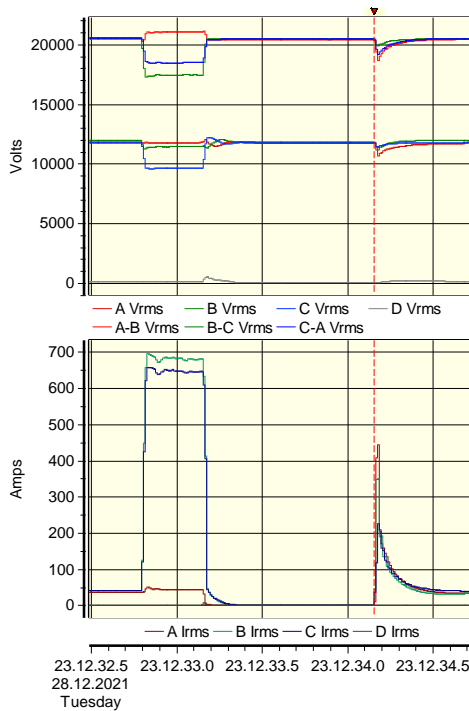
Kuva F.1. Lähtö 1, Maasulku, ei vaikutusta kuormiin.



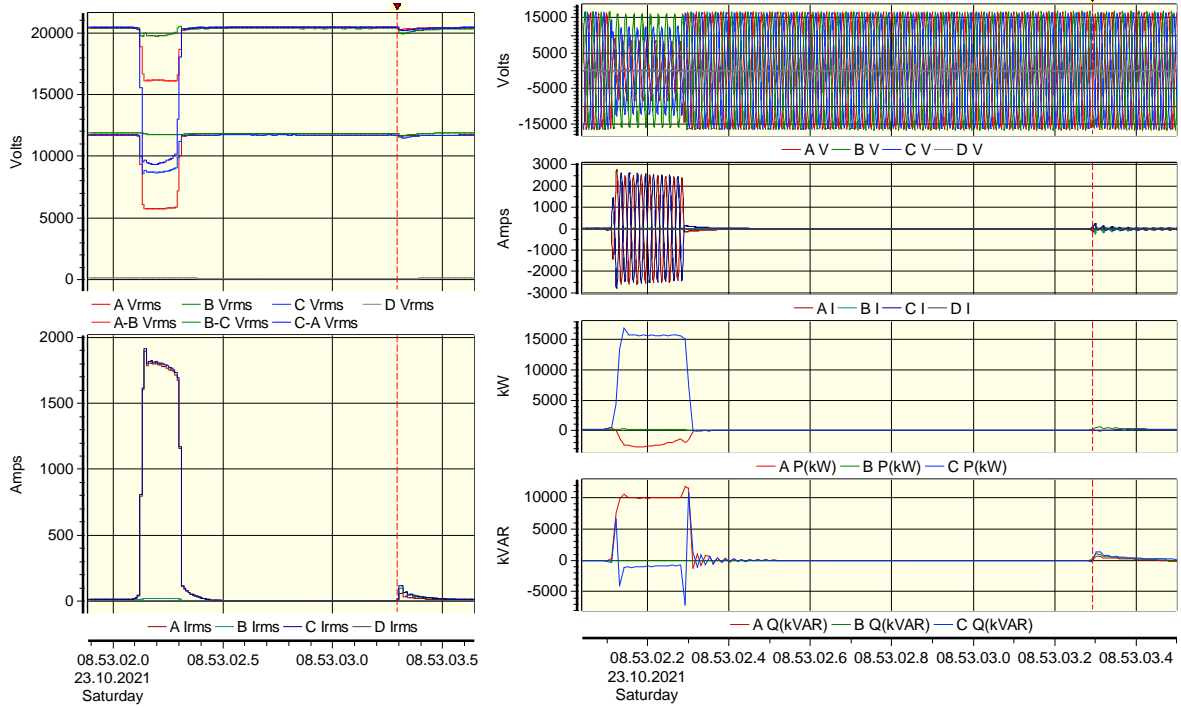
Kuva F.2. Lähtö 1, 2-vaiheinen oikosulku, onnistunut pjk. Pätötehon pudotus L1: 543.5 -> 444.2 kW (99.3 kW, n. 18 %), L2: 547.7 -> 467.6 kW (80.1 kW, n. 15 %) L3: 563.2 -> 471.6 kW (91.6 kW, n. 16 %).



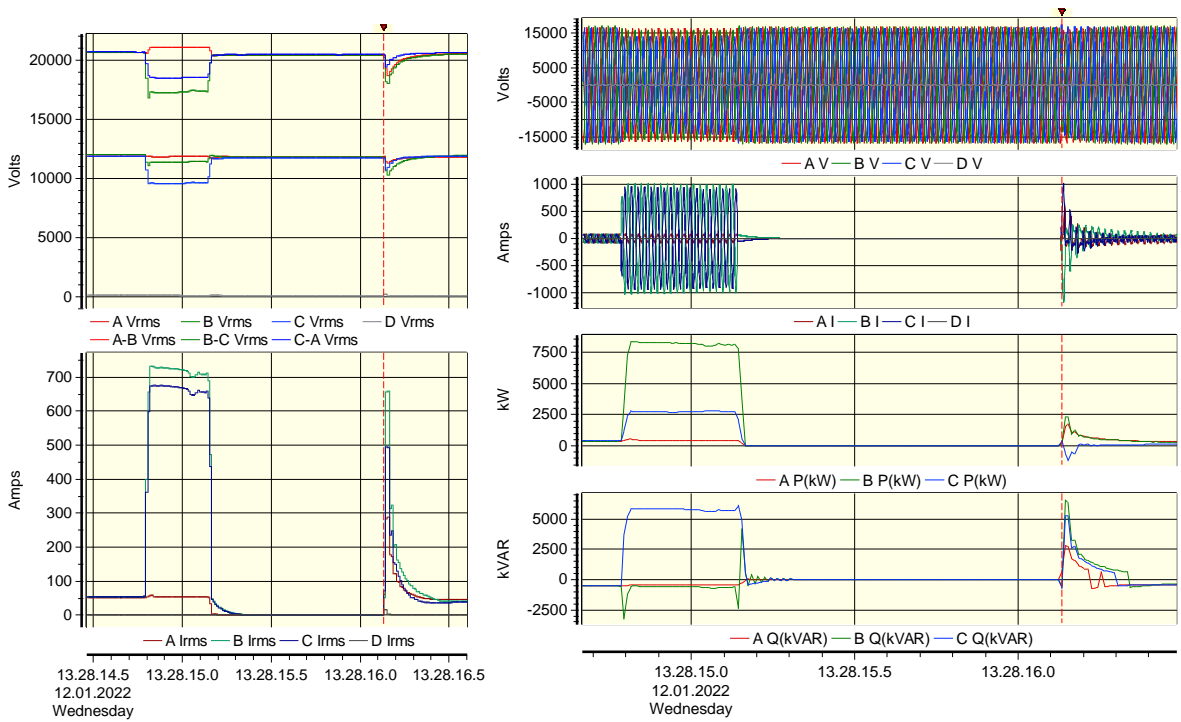
Kuva F.3. Lähtö 1, 2-vaiheinen oikosulku, onnistunut pjk. Pätötehon pudotus L1: 548.6 -> 413.0 kW (135.6 kW, n. 25 %), L2: 565.9 -> 419.2 kW (146.7 kW, n. 26 %) L3: 579.9 -> 424.7 kW (155.2 kW, n. 27 %).



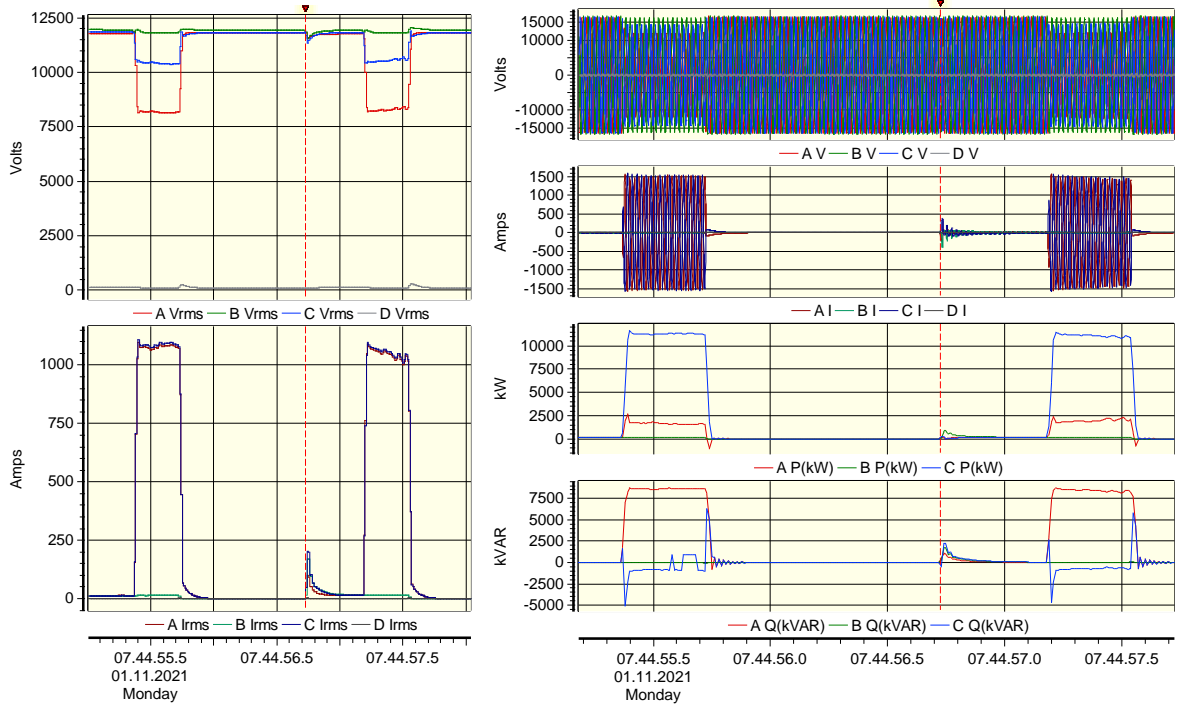
Kuva F.4. Lähtö 1, 2-vaiheinen oikosulku, onnistunut pjk. Pätötehon pudotus L1: 413.1 -> 389.6 kW (23.5 kW, n. 5.7 %), L2: 442.0 -> 406.1 kW (35.9 kW, n. 8.1 %) L3: 458.3 -> 432.4 kW (25.9 kW, n. 5.7 %).



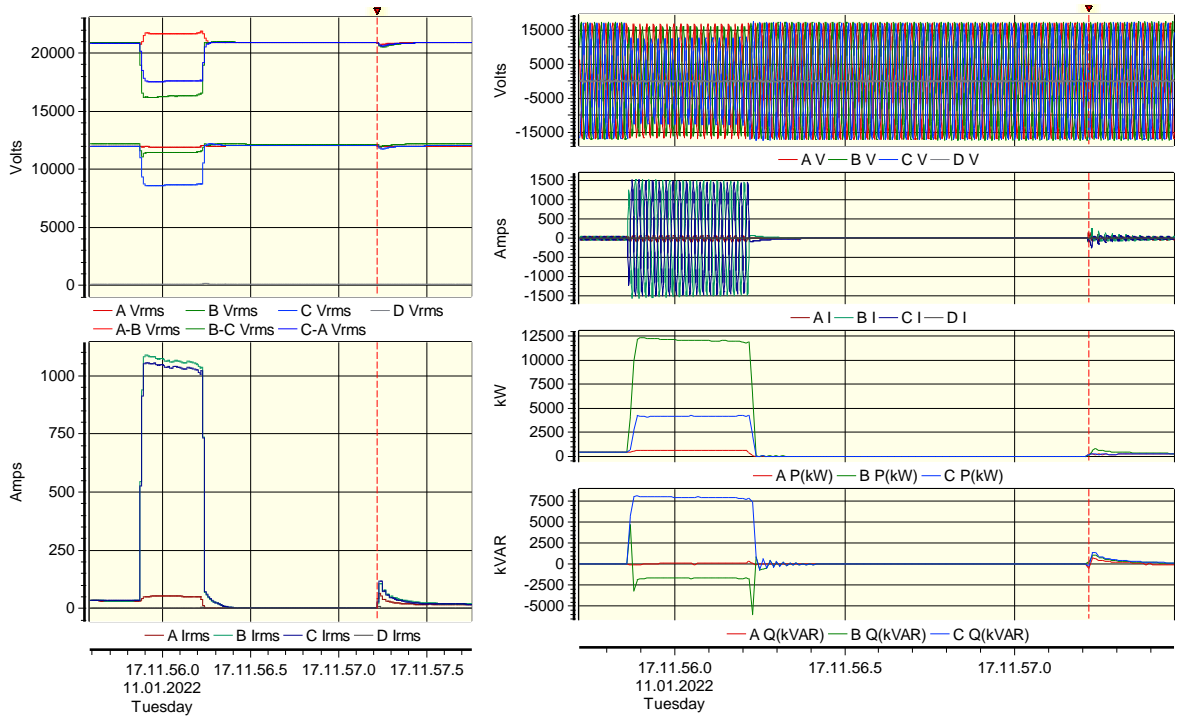
Kuva F.5. Lähde 2, 2-vaiheinen oikosulku, onnistunut pj.k.



Kuva F.6. Lähde 3, 2-vaiheinen oikosulku, onnistunut pj.k.



Kuva F.7. Lähtö 4, 2-vaiheinen oikosulku, epäonnistunut pjk.



Kuva F.8. Lähtö 5, 2-vaiheinen oikosulku, onnistunut pjk. Pätötehon pudotus L1: 401.7 -> 247.5 kW (154.2 kW, n. 38 %), L2: 401.1 -> 256.3 kW (144.8 kW, n. 36 %) L3: 409.3 -> 255.8 kW (153.5 kW, n. 38 %).