



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

AUTOMAATTISEN MAASULKUVIRRRAN KOMPENSOINTILAITTEISTON HYÖDYN TEHOSTAMINEN

TEKIJÄ: Joonas Tolvanen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Joonas Tolvanen	
Työn nimi Automaattisen maasulkuvirran kompensointilaitteiston hyödyn tehostaminen	
Päiväys 9.5.2014	Sivumäärä/Liitteet 35/16
Ohjaaja(t) yliopettaja Juhani Rouvali, koulutus- ja kehittämisspäällikkö Esko Pöllänen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) PKS Sähkönsiirto Oy, Joensuu, käytönsuunnittelija Jari Laeslehto	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Työn tarkoituksena oli tutkia ja selvittää maasulkuvirran kompensointilaitteiston REG-DPA-automaattisäätäjän lisävastuksen ohjausta ja testata lisävastuksen erilaisia ohjaustapoja käytännössä maasulkukokeilla. Lisäksi tavoitteena oli tehdä laskentatyökalu, jolla saadaan selville maasulkutilanteissa esiintyvien maasulkuvirtojen ja vaarajännitteiden arvoja maasta erotetussa ja sammutetussa keskijänniteverkossa.</p> <p>Työ tehtiin tutkimalla maasulun teoriaan liittyvää lähdekirjallisuutta, luentomateriaaleja, internetainestoa, asiaan liittyviä standardeja ja haastatteleamalla laitteen edustajaa Suomessa ja työn toimeksiantajan henkilökuntaa. Säätäjän toimintaa ja vastuksen ohjausta tutkittiin laitevalmistajan laitemanuaaleista ja sähköseman piirikaavioista. Säätäjän oikea toiminta testattiin käytännössä maasulkukokeilla. Kokeiden tuloksia tutkimalla varmistuttiin siitä, että vastuksen ohjaus toimii halutulla tavalla.</p> <p>Työ helpottaa ymmärtämään säätäjän toimintaa ja lisävastuksen eri ohjaustapoja. Tätä varten laadittiin toimeksiantajalle ohje säätäjän käytöstä lisävastuksen ohjausta varten. Lisäksi tehtiin Microsoft Excel -pohjainen laskentatyökalu keskijänniteverkon maasulkulaskentoja varten.</p>	
Avainsanat maasulku, maasulkuvirta, sammutus, kompensointi, lisävastus	
Julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author(s) Joonas Tolvanen			
Title of Thesis Improving the Use of Automatic Earth Fault Compensation Controller			
Date	9 May 2014	Pages/Appendices	35/16
Supervisor(s) Mr. Juhani Rouvali, Principal Lecturer, Mr. Esko Pöllänen, Head of Engineering and Technology			
Client Organisation /Partners PKS Sähkösiirto Oy, Joensuu, Mr. Jari Laeslehto, Planner			
<p>Abstract</p> <p>This thesis researched the operation of the shunt resistor control of the REG-DPA earth fault compensation controller. The purpose was to find out different ways to control the resistor and test them in practice. The second purpose was to produce a calculation tool which could be used to calculate earth fault currents and voltages in ungrounded and resonantly grounded medium voltage networks.</p> <p>The thesis was done by researching theory about earth fault in written publications, Internet material, standards and by interviews. The operation of the controller and the resistor control was studied from electrical drawings and manufacturers manuals. The correct operation of the resistor control was tested with field tests in practice. By studying the results of these field tests, it was confirmed that the resistor control works as desired.</p> <p>The result of this thesis helps to understand the operation of the controller and different resistor control methods. For this purpose a guide was produced about the resistor control. An earth fault calculation tool was produced by using Microsoft Excel.</p>			
Keywords earth fault, earth fault current, arc suppression, compensation, shunt resistor			
Public			

ESIPUHE

Haluan kiittää PKS Sähkösiirto Oy:tä erittäin mielenkiintoisesta ja haastavasta aiheesta. Lisäksi haluan kiittää käytönsuunnittelija Jari Laeslehtoa ja käytönsuunnittelija Matti Pesosta avusta työn tekemiseen, Sales Manager Anders Artea Multirel Oy:stä hyvistä neuvoista ja yliopettaja Juhani Rouvalia työn ohjaamisesta.

Työssä sain ainutlaatuisen tilaisuuden perehtyä mielenkiintoiseen ja haastavaan teoriaan sekä sähkösema ympäristöön käytännössä. Toivon, että työstä on tulevaisuudessa hyötyä PKS Sähkösiirron henkilökunnalle.

Varkaudessa 9.5.2014

Joonas Tolvanen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
1.1	Työn tarkoitus.....	7
1.2	PKS Sähkönsiirto Oy	7
2	MAASULKU	8
2.1	Maasulun määritelmä.....	8
2.2	SFS 6001 -standardin vaatimukset maasululle.....	9
2.3	Maasta erotettu verkko	11
2.4	Sammutettu verkko	13
3	MAASULKUSUOJAUS	15
4	MAASULKUVIRRAN KOMPENSOINTI	17
4.1	Kompensoinnin tarkoitus ja sähkön laatu	17
4.2	Kompensointilaitteisto.....	17
4.2.1	Automaattisäätäjä.....	17
4.2.2	Maadoitusmuuntaja.....	18
4.2.3	Kompensointikela.....	18
4.2.4	Lisävastus.....	19
4.2.5	Kompensointilaitteiston suojaus.....	21
4.3	Kompensoinnin hyödyt ja haitat	21
5	MAASULKUVIRTOJEN LASKENTA	22
5.1	Maasta erotettu verkko	22
5.2	Sammutettu verkko	23
5.2.1	Kompensointikelan induktanssin laskenta.....	23
5.2.2	Lisävastuksen vaikutus maasulkuvirtaan	24
5.3	Maasulkuvirtojen laskentamalli.....	25
6	KOMPENSOINNIN HYÖDYN TEHOSTAMINEN	27
6.1	Pohjois-Karjalan Sähkö Oy:n sammutettu verkko	27
6.2	REG-DPA.....	27
6.3	Lisävastuksen ohjaus.....	28
6.4	Maasulkukokeet	30
7	YHTEENVETO.....	34
	LÄHTEET	35

LIITE 1: HONKAVAARAN SÄHKÖASEMAN 20 KILOVOLTIN PÄÄKAAVIO.....	36
LIITE 2: HONKAVAARAN SÄHKÖASEMAN KOMPENSOINTIKELOJEN KILPIARVOT	37
LIITE 3: LISÄVASTUKSEN OHJAUSPIIRIKAAVIO	38
LIITE 4: VAMP255 -SUOJARELEEN I_0 JA U_0 HÄIRIÖTALLENTEET MAASULKUKOKEISTA	39
LIITE 5: REG-DPA -SÄÄTÄJÄN LOKI MAASULKUKOKEISTA	49

1 JOHDANTO

1.1 Työn tarkoitus

Maasulut aiheuttavat eniten keskeytyksiä sähkönjakeluverkoissa. Maasulkuvirran kompensoinnilla ja -keluverkot halutaan varmemmaksi ja pika- ja jälleenkytkentöjen määrä pienemmäksi. Työn tarkoituksena on selvittää ja tehostaa PKS Sähkönsiirto Oy:n sähkönjakeluverkon maasulkuvirran kompensointilaitteiston toimintaa ja etenkin selvittää kompensointilaitteiston lisävastuksen erilaisia ohjaustapoja. Lisäksi tavoitteena on tehdä maasulkuvirtojen laskentaa varten Excel -pohjainen laskentamalli, jolla pystytään kokeilemaan eri arvojen vaikutus maasulussa esiintyviin virtoihin ja jännitteisiin.

1.2 PKS Sähkönsiirto Oy

PKS Sähkönsiirto Oy on Pohjois-Karjalan Sähkö Oy:n tytäryhtiö. PKS Sähkönsiirto Oy vastaa sähköverkon rakentamisesta, kunnossapidosta ja sähkönjakelusta ja -siirrosta Pohjois-Karjalassa ja itäisessä Savossa (kuva 1). PKS Sähkönsiirto Oy:n henkilöstöön kuuluu noin 40 henkilöä. (PKS 2014.)

Pohjois-Karjalan Sähkön verkkoon kuuluu 30 sähköasemaa ja 35 päämuuntajaa. Verkkoon kuuluu 110 kV:n alueverkkoa 255 km ja keskijännite- ja pienjännitejohtoja on yhteensä noin 21 000 km. Verkosta 90 % ja asiakkaita 50 % sijaitsee harvaan tai erittäin harvaan asutuilla alueilla. Asiakkaita on yhteensä noin 88 000. Vuonna 2012 siirretty sähkömäärä oli n. 1 200 milj. kWh. (PKSS 2013.)

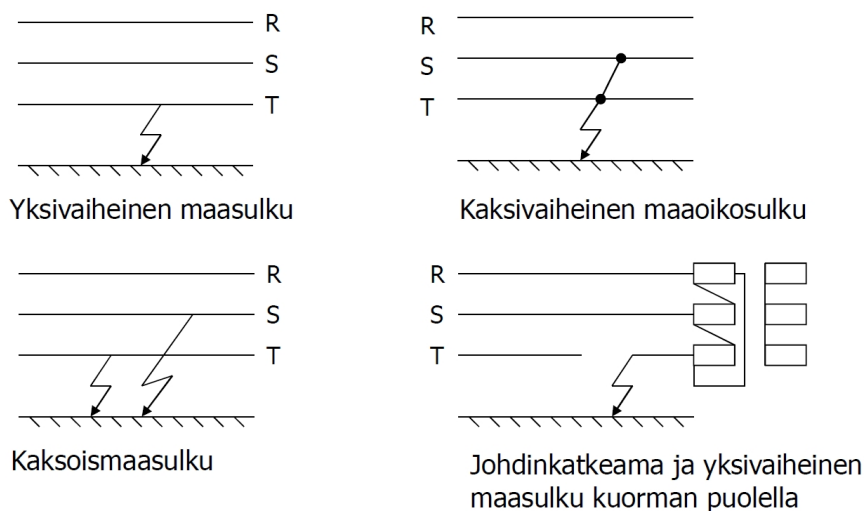


KUVA 1. Pohjois-Karjalan Sähkö Oy verkkoalue (PKS 2014.)

2 MAASULKU

2.1 Maasulun määritelmä

Maasulku määritellään vian aiheuttamaksi johtavaksi yhteydeksi vaihejohtimen ja maan tai maahan yhteydessä olevan osan välille. Tämä yhteys voi syntyä myös valokaaren kautta. (Suurjännitesähköasennukset 2009, 17.)



KUVIO 1. Erilaisia maasulkutilanteita (Partanen 2011.)

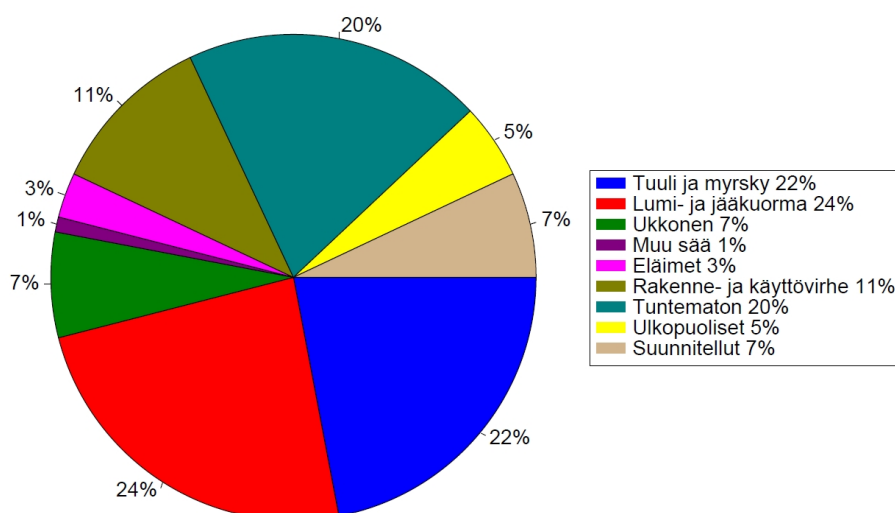
Maasulku voi olla yksi- tai monivaiheinen (kuvio 1). Yleisin maasulkutilanne on yksivaiheinen maasulku. Yksivaiheinen maasulku muodostuu yhden vaihejohtimen ja maapotentiaalilin välille. Kaksois- tai monivaiheisessa maasulkutilanteessa kahdella tai useammalla eri vaihejohtimella on maahan nähden eristysvika verkon eri kohdissa. Mikäli monivaiheisen maasulun eristysvikat sattuvat osumaan verkon samaan kohtaan siten, että vikapaikassa virtajohtimien välille syntyy johtava yhteys ja osa vikavirrasta kulkee maan kautta, kutsutaan tilannetta maaokosulukuksi. Tällöin kyseessä on kaksivaiheisen oikosulun kaltainen tilanne ja vikavirrat ovat oikosulkuvirtojen tasolla. Tyypillinen maasulku on jakelumuuntajan kipinäväilylijännitesuojan toiminta salamaniskun aiheuttamasta ylijännitteestä. (Partanen 2011; Lakervi ja Partanen 2008, 182 - 198.)

Terveessä tilassa verkon vaihejännitteet ovat maahan nähden symmetrisiä eli niiden summa on nolla. Johtojen maakapasitanssien kautta kulkeva osa verkon varausvirroista muodostaa myös symmetrisen järjestelmän. Maasulkutilanteessa verkon kaikkien vaiheiden jännitteet ja tähtipisteen ja maan välinen jännite muuttuvat ja verkon eri osissa esiintyy johtojen maakapasitanssien kautta kulkevia kapasitiivisia vikavirtoja. Maasulussa muodostuvat vikavirrat riippuvat verkon maakapasitanssista ja verkon maadoitustavasta. Suomessa keskijänniteverkot ovat huonojen maadoitusolosuhteiden vuoksi joko maasta erotettuja tai ns. kompensointikelan kautta maadoitettuja sammutettuja verkkoja. (ABB 2000; Lakervi ja Partanen 2008, 182 - 198.)

Suuresta jännite-epäsymmetriasta huolimatta verkon käyttöä voidaan maasulun aikana periaatteessa jatkaa. Jakelumuuntajan ensiökämin ollessa kytkettynä kolmioon ovat toisiopuolella 400 V:n

verkon jännitteet normaalit. Vikavirrat ovat pieniä, eivätkä ne aiheuta laitevaurioita. Käytännössä käyttöä kuitenkin rajoittaa maasulun aikana esiintyvät kosketusjännitteet. (Lakervi ja Partanen 2008, 182 - 198.)

Suunnitellut keskeytykset aiheuttavat vain pienen osan jakelun keskeytyksistä. Viidesosa keskeytyksen aiheuttajasta jää tuntemattomaksi (Energiateollisuus 2013). Kuvion 2 perusteella voi todeta, että keskeytyksistä suuri osa voi aiheutua maasulusta.



KUVIO 2. Keskeytykseen johtaneet syyt määrittäin (Energiateollisuus 2013.)

2.2 SFS 6001 -standardin vaatimukset maasululle

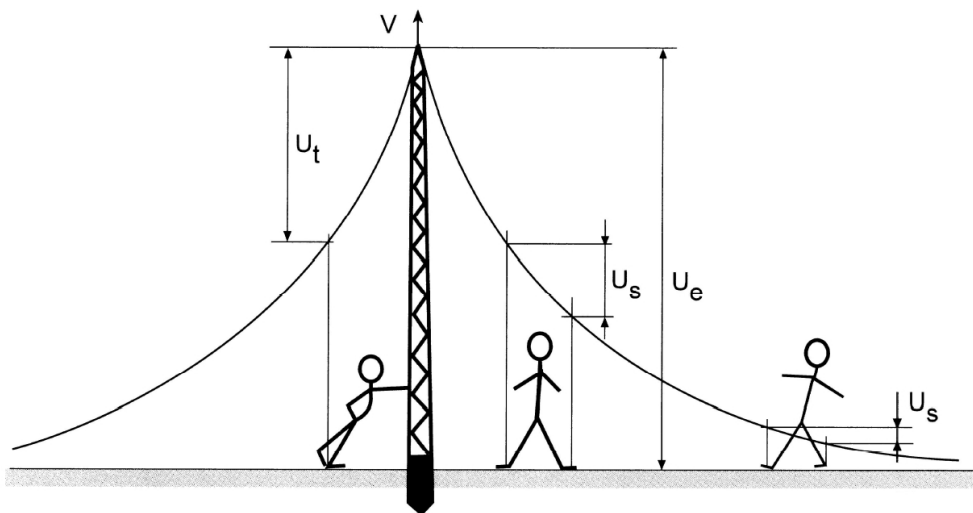
Sähköturvallisuuslaissa määrätään seuraavaa: "Sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on huollettava ja käytettävä niin, että niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa" (Sähköturvallisuuslaki 1996, § 5).

Ihmisen saaman sähköiskun vaikutukset riippuvat pääasiassa ihmisen kautta kulkevan virran suuruudesta ja kestoajasta. SFS 6001 -standardi antaa maadoitusjärjestelmälle vaatimukset joiden mukaan järjestelmän on oltava turvallinen kaikissa olosuhteissa ja että ihmisten turvallisuus on taattu kaikissa paikoissa, joissa henkilöillä on oikeus kulkea. Maadoitusjärjestelmien rakenteen on täytettävä neljä standardissa annettua vaatimusta:

- riittävä mekaanisen lujuus ja korroosionkestävyys
- suurimman vikavirran kestävyys termisesti
- omaisuuden ja laitteiden vaurioitumisen estäminen
- henkilöiden turvallisuuden varmistaminen suurimman maasulkuvirran aikana maadoitusjärjestelmissä esiintyvien jännitteiden suhteen. (Suurjännitesähköasennukset 2009, 70 - 79.)

Maasulkuvikavirrat ovat yleensä pieniä, mutta ne aiheuttavat vikakohtaa ympäröivän maanpinnan potentiaalin (V) kohoamisen (kuviot 3). Vikavirran kulkiessa maahan se kohtaa aina jonkin suuruisen maadoitusresistanssin, johon syntyy tällöin maadoitusjännite (U_E) vikapaikan potentiaalin ja ääret-

tömän kaukana olevan todellisen maapotentiaalin välille. Maadoitusjännite aiheuttaa kosketeltavissa olevan ns. kosketusjännitteen (U_T), jonka suuruus on vain osa maadoitusjännitteestä. SFS 6001 määrittelee sallitut kosketusjännitteiden (U_{TP}) arvot erilaisille asennuksille. (Partanen 2011.)



KUVIO 3. Maasulussa esiintyviä potentiaalieroja (Partanen 2011.)

SFS 6001 -standardissa määritellään, että yleensä asennukset on suojattava automaattisesti toimivilla laitteilla, jotka kytkevät pois vaarallisen maasulun. Maasulusta aiheutuvaa hälytystä ja käsin tapahtuvaa poiskytkentää voidaan käyttää silloin, jos verkon käytön luonteen takia maasulun aiheuttama keskeytys on tarvetta siirtää sopivampaan ajankohtaan. Tällöin verkon on oltava rakenteeltaan sellainen, että valokaarimaasulun todennäköisyys on pieni. Maasulusta on myös tultava hälytys verkkoa valvovan henkilön tietoon ja vian selvittämiseen on ryhdyttävä välittömästi. Jos maasulusta ei aiheudu välitöntä vaaraa hengelle tai omaisuudelle tai kohtuutonta häiriötä toiselle laitteelle, voidaan käyttöä jatkaa kahden tunnin ajan. Jos vian sijainti tiedetään ja varmistetaan, ettei siitä aiheudu vaaraa, voidaan käyttöä maasulun aikana jatkaa pitempäänkin. Jatkuvassa maasulussa maadoitusjännite saa olla korkeintaan 150 V. (Suurjännitesähköasennukset 2009, 70 - 79.)

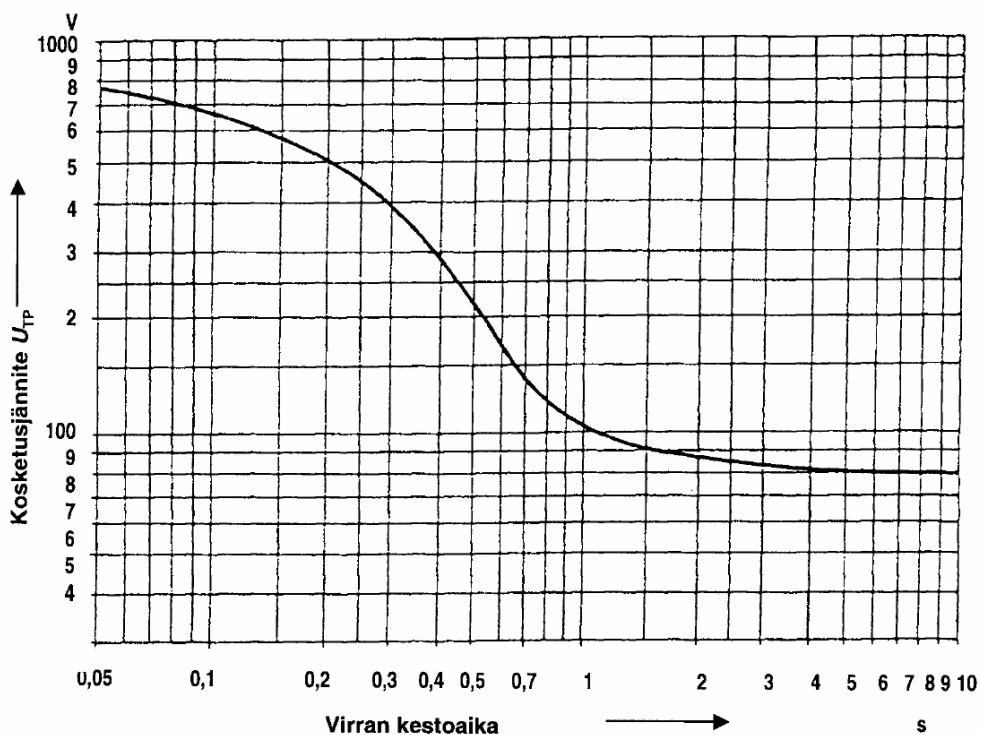
Sallittu kosketusjännite U_{TP} annetaan vikavirran kestoajan funktiona kuvion 4 mukaisesti. Käyrä esittää jännitteen arvoa, joka voi esiintyä ihmiskehon yli paljaasta kädestä paljaisiin jalkoihin. Mikäli virran kesto-aika on paljon pitempi kuin 10 s, voidaan kosketusjännitteelle käyttää arvoa 75 V. (Suurjännitesähköasennukset 2009, 70 - 79.) Maadoitusjännite ei kuitenkaan saa ylittää yhtälön 1 mukaisia arvoja (Lakervi ja Partanen 2008, 182 - 198).

$$U_e \leq k \times U_{TP} \quad (1)$$

Tavoitetasolla kerroin k saa arvon 2. Tällöin muuntamon maadoituksen lisäksi on tehtävä pienjänniteverkon maadoitukset standardin mukaan. Aina jos mahdollista myös keski- ja pienjänniteverkkojen maadoitukset yhdistetään muuntamalla. Jos erityistapauksissa teknisistä tai taloudellisista syistä kaksinkertaista arvoa ei voida saavuttaa, saa maadoitusjännite U_E olla nelinkertainen U_{TP} arvoon verrattuna. Ehtoina nelinkertaisen arvon käytölle ovat huonot maadoitusolosuhteet, jakelumuuntamalla

tehtävä potentiaalinhojaus tai jokaisessa pienjännitejohtohaarassa tehdään ainakin yksi maadoitus. Erityistapauksissa, esim. syötettäessä jakelumuuntamolla yksittäistä kuluttajaa vaikeissa maadoitusolosuhteissa, voidaan käyttää maadoitusjännitteen U_E arvona viisinkertaista U_{TP} arvoa. Viisinkertaista arvoa voidaan käyttää kun jakelumuuntamolle tehdään potentiaalinhojaus ja jokainen liittymä maadoitetaan. Jos kahta edellä mainittua toimenpidettä ei voi varmistaa, täytyy liittymän rakennuksen ympärille tehdä potentiaalinhojaus. (Lakervi ja Partanen 2008, 182 - 198; Suurjännitesähköasennukset 2009, 70 - 79.)

Askeljännitteille (U_S) ei ole välttämätöntä määrittellä arvoja. Askeljännitteiden sallitut arvot ovat hieman suurempia kuin sallitut kosketusjännitteet. Jos maadoitusjärjestelmä täyttää kosketusjännitevaatimukset, voidaan olettaa, että vaarallisia askeljännitteitä ei esiinny. (Suurjännitesähköasennukset 2009, 70 - 79.)



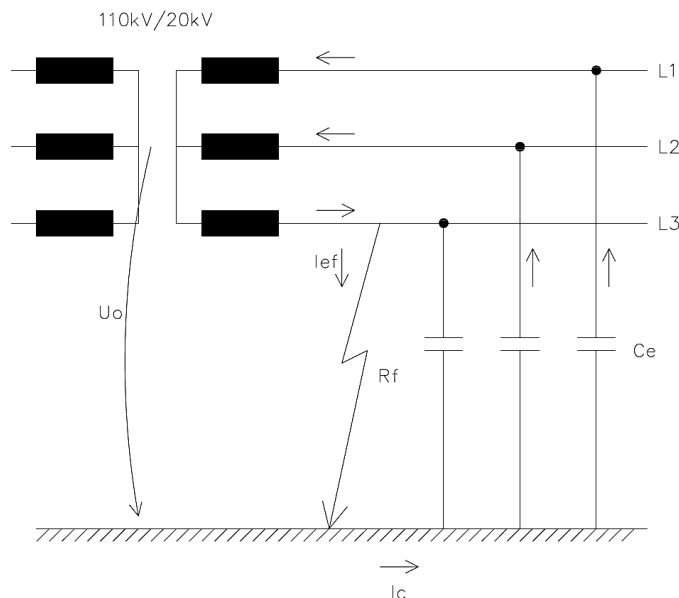
KUVIO 4. Sallitut kosketusjännitteet U_{TP} virran kestoajan funktiona kun maasulku tapahtuu suurjännite järjestelmässä (Suurjännitesähköasennukset 2009, 78.)

Standardin vaatimukset voidaan täyttää paitsi maadoituksia parantamalla eli pyrkimällä pieneen maadoitusresistanssiin, mutta myös laukaisuaikoja lyhentämällä tai pienentämällä maasulkuvirran suuruutta. Maasulkuvirtaa voidaan pienentää jakamalla verkkoa galvaanisesti pienempiin osiin useammalle päämuuntajalle tai käyttämällä maasulkuvirran kompensointia. (Suurjännitesähköasennukset 2009, 70 - 79; Lakervi ja Partanen 2008, 182 - 198.)

2.3 Maasta erotettu verkko

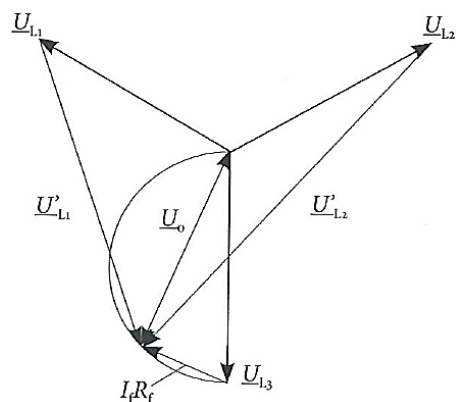
Maasta erotetulla verkolla tarkoitetaan järjestelmää, jonka tähtipistettä ei ole maadoitettu. Maasta erotetun verkon maasulussa vikavirroilla on kulkureitti ainoastaan johtojen luonnollisten maaka-

pasitanssien kautta (kuvio 5). Kun vaihejohtimen ja maan välille muodostuu johtava yhteys, alkaa maasulkuvirta kulkea vikapaikasta maahan, usein vikaresistanssin kautta, maasta terveiden vaiheiden johtojen maakapasitanssien ja impedanssien kautta päämuuntajan käämityksiin ja sieltä viallisen vaiheen impedanssin kautta vikapaikkaan. (Lakervi ja Partanen 2008, 182 - 198.)



KUVIO 5. Maasulku maasta erotetussa verkossa.

Maasta erotetuissa verkoissa maasulkuvirrat ovat pieniä oikosulkuvirtoihin verrattuna ja usein jopa kuormitusvirtoja pienempiä. Maasulkuvirran suuruus riippuu galvaanisesti yhteen kytketyn verkon laajuudesta ja johtimien ja kaapelien maakapasitansseista. Maasulkuvirta on yleensä noin 5-200 A suuruusluokkaa. Avojohtoilla maasulkuvirtaa syntyy n. 0,06 A/km. Kaapeleiden tuottama maasulkuvirta vaihtelee suuresti eri kaapelityyppien välillä, mutta on kuitenkin moninkertainen avojohtoihin verrattuna. Maasulkuvirtaa määritettäessä onkin käytettävä kaapelivalmistajien antamia arvoja. (Lakervi ja Partanen 2008, 182 - 198.)



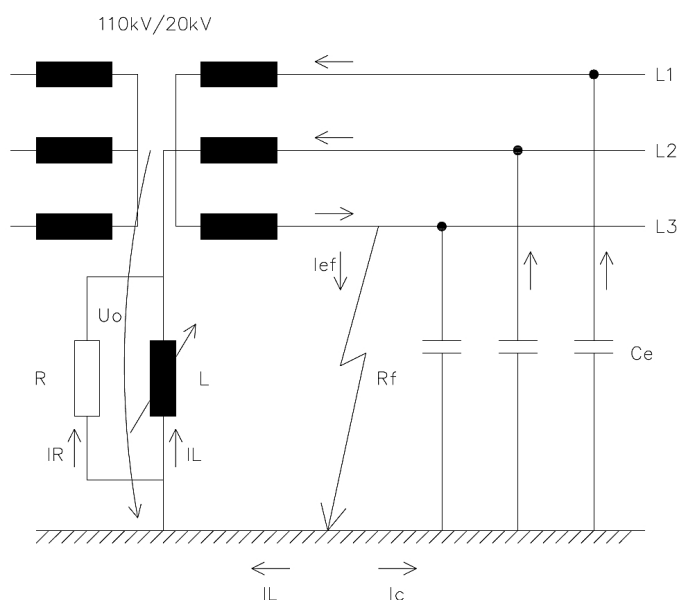
KUVIO 6. Jännitteet maasulun aikana (Lakervi ja Partanen 2008, 187.)

Kuviossa 6 on esitetty, kuinka jännitteiden osoittimet muodostuvat maasulussa. Maasuluissa, joissa vikaresistanssi on nolla, terveiden vaiheiden jännitteet maahan nähden nousevat pääjännitteen suuruiseksi ja viallisen vaiheen jännite putoaa nollaan. Tämän jännite-epäsymmetrian takia myös ver-

kon tähtipisteen potentiaali poikkeaa maan potentiaalista, josta syntyy nollajännite tähtipisteen ja maan välille. Vikaresistanssittomassa eli suorassa maasulussa nollajännite on vaihejännitteen suuruinen. Vikaresistanssin ja verkon laajuuden kasvaessa nollajännite pienenee. Vikaresistanssin kasvaessa myös maasulkuvirta pienenee. (Lakervi ja Partanen 2008, 182 - 198.)

2.4 Sammutettu verkko

Sammutetussa verkossa verkon tähtipiste maadoitetaan Petersen-kelan, eli ns. kompensointikelan kautta (kuvio 7). Kelan ideana on, että kapasitiivista maasulkuvirtaa kompensoidaan kelalla tuotettavalla vastakkaisuuntaisella induktiivisella virralla. Kompensoinnilla pienennetään maasulkuvirtoja, jolloin maasulun seurauksena syttynyt valokaari sammuu usein itsestään. Tästä tuleekin nimitys sammutus tai sammutettu verkko. (Lakervi ja Partanen 2008, 182 - 198.)



KUVIO 7. Maasulku sammutetussa verkossa.

Maasulkuvirta voidaan kompensoida joko kokonaan tai osittain. Yleensä verkkoa ei ole viritetty täysin kompensoiduksi. Tämä johtuu siitä, että täysin kompensoitu verkko saattaa joutua resonanssitiilaan. Resonanssissa verkon kapasitiivinen reaktanssi ja induktiivinen reaktanssi ovat yhtä suuria jollain taajuudella. Resonanssi vahvistaa yliaaltoja, joka aiheuttaa vääristymiä jännitteisiin ja saattaa vaurioittaa laitteita. Resonanssi saattaa myös aiheuttaa ylijännitteitä. Alikompensoidussa verkossa johtolähdön irtoaminen verkosta saattaa johtaa resonanssitilanteeseen. Resonanssin riskin takia verkko kannattaisikin pitää hieman ylikompensoituna jolloin verkko ei joutuisi resonanssiin missään tilanteessa. Maasulussa vikavirta sisältäisi tällöin pienen induktiivisen osuuden. Tästä huolimatta Suomessa verkkoja pidetään kuitenkin hieman alikompensoituina. (Wahlroos ja Altonen 2011.) Kompensoinnin epäviritys voi olla joko absoluuttinen tai suhteellinen. Absoluuttisen epäviriteen etuna on se, että vikapaikan läpi menevä virta on aina samansuuruinen. Suhteellisella epävirityksellä virta saattaa kasvaa laajoissa verkoissa liian suureksi, jotta valokaari sammuisi itse. (A. Eberle 2007.)

Kelalla pystytään kompensoimaan ainoastaan perustaa-juinen kapasitiivinen maasulkuvikavirta, mutta ei yliaaltoja eikä resistiivistä virtaa. Tällöin täysin kompensoidussa verkossa jäljelle jää vikavirran resistiivinen jäännösvirta jonka suuruus riippuu kompensointikelan, verkon johtojen resistansseista, resistiivisistä vuotovirroista sekä mahdollisesta kelan rinnalle kytkettävän toisiovastuksen, eli lisävas-
tuksen resistanssista. (Wahlroos ja Altonen 2011.) Resisttiivisen virran osuus keskijänniteverkoissa on yleensä n. 5 - 8 % kapasitiivisesta virrasta. Täysin kaapeloiduissa verkoissa osuus on n. 2 - 3 % ja puhtaissa ilmajohtoverkoissa jopa 15 %. (Hänninen 2001.)

Kompensointi voidaan toteuttaa keskitetysti, hajautetusti tai näiden yhdistelmällä. Keskitetyssä kompensoidussa maasulkuvirran kompensointi toteutetaan sijoittamalla säädettävä kompensointilaitteisto sähköasemalle verkon tähtipisteeseen, jolloin laitteisto kompensoi koko sähköaseman verkon. Hajautetussa kompensoinnissa kiinteitä, ei säädettäviä, kompensointikeloja sijoitetaan verkon johtojen varsille. Hajautetussa kompensoinnissa vain osa kompensoitavan johdon maasulkuvirrasta kompensoidaan niin, että yksittäiset johdot eivät missään tilanteessa tule ylikompensoiduiksi. Tilanteessa jossa johtolähtö irtoaa verkosta, irtoaa myös kela. Hajautettua kompensointia käytetäänkin yleensä pitkien johtolähtöjen varsilla. (ABB 2000; Wahlroos ja Altonen 2011.)

3 MAASULKUSUOJAUS

Koska maasulkuvirrat ovat hyvin pieniä verrattuna oikosulkuvirtoihin, ei suojausta voida perustaa ylivirtaan. Maasulun tunnistamiseen on olemassa monia erilaisia havainnointimenetelmiä. Maasulussa esiintyviä muutoksia ovat mm. perustaajuisen tähtipistejännitteen ja vaihejännitteiden muutokset, sekä perustaajuisen summavirran kasvaminen. Maasulussa esiintyy myös yliaaltoja ja maakaapitanssien purkautumisesta ja varautumisesta aiheutuvia muutosvirtoja. Käytännössä käytetään kuitenkin maasulun suuntareleitä. Tällöin maasulkuvian tunnistaminen perustuu perustaajuisen summa- eli nollavirran ja tähtipiste- eli nollajännitteen suuruuteen ja niiden välisen kulman mittaamiseen. Nollavirran mittausta perustuu vaihevirtojen epäsymmetriaan. Epäsymmetriaa kuvaava nollavirta saadaan vaihevirtojen osoitinsummasta. Nollavirta mitataan virtamuuntajien summakytkenästä tai kaapelivirtamuuntajalla. Käytännössä nykyään käytetään kaapelivirtamuuntajia, sillä johtolähtöjen alkupää on lähes aina kaapelia. Kaapelivirtamuuntajien toisio on yleensä 1 A. Nollajännite mitataan yleensä vaihejännitteeseen kytketyn jännitemuuntajan avokolmiokäämistä. Jännitemuuntajien muuntosuhde on skaalattu niin, että kun verkossa on suora maasulku eli ensiossa on vaihejännitteen suuruinen jännite, on jännite toisiossa 100 V. (Lakervi ja Partanen 2008, 182 - 198; ABB 2000.)

Suojausasetteluja varten on tehtävä useita erilaisia maasulkulaskelmia. Suojauksen kannalta kiinnostavimpia ovat pienimmät esiintyvät maasulkuvirrat ja nollajännitteet. Lisäksi suojauksen suunnittelussa on otettava huomioon mahdolliset poikkeukselliset kytkennät, joissa esim. asemaa syötetään varasyötöllä toiselta asemalta, jolloin verkko on normaalia huomattavasti laajempi ja maasulkuvirrat kasvavat. Lisäksi on tutkittava tilanteita, joissa verkko on suppeimmillaan. (Lakervi ja Partanen 2008, 182 - 198.)

Tapahtuupa maasulku missä verkon osassa tahansa, se näkyy nollajännitteen nousuna. Sammutetussa verkossa terveen tilan nollajännite on suurempi kuin maasta erotetussa verkossa ja on suurimmillaan resonanssitilanteessa. Suojauksen selektiivisyyden toteutumiseksi on käytännössä otettava huomioon nollajännitteen ja nollavirran välinen kulma. Ehtona vikaantuneen lähdön havaitsemiseksi on, että nollavirta kulkee virtamuuntajan läpi verkkoon eli vikapaikkaan päin. Nollavirta on pienempi kuin itse vikapaikkaan menevä maasulkuvirta. (Lakervi ja Partanen 2008, 182 - 198; Partanen 2011; ABB 2000.)

Kulma riippuu siitä, onko käytössä maasta erotettu vai sammutettu verkko. Näin ollen releasetteluja täytyy muuttaa, jos sammutetussa verkossa kompensointi otetaan pois ja verkkoa käytetään maasta erotetun verkon tavoin. Releen toimintaehdoiksi saadaan siis:

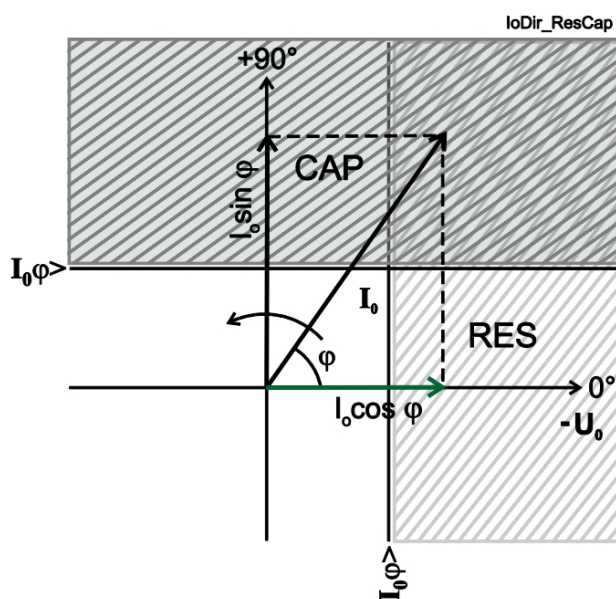
- nollavirta > asetteluarvo
- nollajännite > asetteluarvo
- virran ja jännitteen välinen kulma
 - o $90^\circ \pm 75^\circ$ maasta erotetussa verkossa
 - o $0^\circ \pm 75^\circ$ sammutetussa verkossa. (Partanen 2011)

Vian poiskytkentäaika määräytyy suurimman sallitun kosketusjännitteen mukaan. Vika tulee siis poistaa vaaditussa ajassa, joka sisältää sekä releen että katkaisijan toiminta-ajat. Releeseen asetettava aika on siis käytännössä hieman lyhyempi kuin pisin sallittu poiskytkentäaika. Releen ja katkaisijan toiminta-ajat tulee selvittää koestuksilla. (Suurjänniteasennukset 2009, 70 - 79.)

Suojauksen toimivuuden kannalta ongelmallisia ovat suuriohmiset viat, jolloin nollavirrat ja nollajännite jäävät pieneksi. Suuriohminen maasulku syntyy mm. tilanteissa, joissa kuiva puu jää nojaamaan avo- tai PAS-johtoon tai kun PAS-johto putoaa maahan. Tällöin vikaresistanssi voi olla jopa 10 - 100 k Ω ja tällöin lähellä verkon normaalia vuotoresistanssia. Tämän takia PAS-johdot tulisivin aina tarkistaa myrskyjen jälkeen. (Lakervi ja Partanen 2008, 182 - 198.)

Toinen ongelmallinen vika on katkeileva maasulku. Katkeilevassa maasulussa esim. vaurioituneeseen eristeeseen pääsee kosteutta ja heikentyneen eristyskyvyn takia tapahtuu läpilyönti. Kosteus kuivuu läpilyönnin seurauksena ja vika häviää. Kosteus kerääntyy taas uudestaan ja tapahtuu uusi läpilyönti. Kaikki tämä tapahtuu hyvin nopeasti, jolloin suojaus ehtii havahtua, mutta ei aiheuta laukaisua. (VAMP 2012.)

Relevalmistajilla on olemassa releissä erilaisia toimintoja maasulkusuojauksen toteuttamiseen. VAMP255 -suojareleessä valittu toiminto riippuu suojattavan verkon rakenteesta ja maadoitustavasta. Maasta erotetuilla ja sammutetuilla verkoilla suunnattu maasulkusuojaus toteutetaan ResCap -toiminnolla (kuvio 8). Toiminto sisältää kaksi alatoimintoa: Res ja Cap. Releelle on tuotava tieto siitä, kumpi verkko on kyseessä, jotta rele osaa vaihtaa suojausasettelut suojattavan verkon mukaan. Res-toimintoa käytetään sammutetuilla verkoilla ja sen toiminta perustuu nollavirran resistiivisen komponenttiin. Cap -toimintoa käytetään, kun suojattava verkko on maasta erotettu. Sen toiminta perustuu nollavirran kapasitiiviseen komponenttiin. (VAMP 2012.)



KUVIO 8. ResCap -toiminnon kulmakarakteristiikka (VAMP 2012.)

4 MAASULKUVIRRAN KOMPENSOINTI

4.1 Kompensoinnin tarkoitus ja sähkön laatu

Sähkönjakelun varmuutta mietittäessä on aina muistettava, että täysin varmaa verkkoa ei ole mahdollista eikä taloudellisesti järkevää rakentaa. Tästä syystä keskeytyksiä tulee aina tietyin määrin hyväksyä. Syksyllä 2013 voimaan astunut uusi sähkömarkkinalaki asettaa uusia tiukentuneita vaatimuksia sähkön laadulle. Laki velvoittaa mm. verkkoyhtiöitä suunnittelemaan ja rakentamaan verkonsa niin, että sähköverkot toimivat myös silloin, kun niihin kohdistuu normaaleja odotettavissa olevia ilmastollisia, mekaanisia ja muita ulkoisia häiriöitä. (Sähkömarkkinalaki 2013, § 19.)

Keskijänniteverkoissa 88 % vikakeskeytyksistä aiheutuu jakeluverkon avojohto-osuuksilla. Yleisin vika on maasulku, joista noin 90 % on ohimeneviä valokaarivikoja. Maasta erotetussa verkossa maasulkuvalokaaren sammuttamiseen käytetään yleisesti pikajälleenkytkentää (PJK). Tästä aiheutuu lyhyt keskeytys sähkötoimitukseen. PJK selvittää 56 % vioista ja aikajälleenkytkentä (AJK) 17 % vioista. (Energiateollisuus 2013.)

Jännitteetön aika on Suomen keskijänniteverkoissa yleensä 0,3 s. Vaikka aika on hyvin lyhyt ja PJK:lla voidaan ehkäistä pidempiaikainen keskeytys, voivat nykyaikaiset herkäät sähkölaitteet vaurioitua äkillisen sähköjen häviämisen takia tai jälleenkytkennästä aiheutuvasta ylijännitepiikistä. Sammutetussa verkossa pienempi maasulkuvirta antaa valokaarivioissa valokaarelle mahdollisuuden sammua itsestään ja vähentää näin turhia jälleenkytkentöjä ja näin parantaa sähkön laatua. Verkon kompensointilaitteella on suuri vaikutus siihen, miten hyvin maasulkuvalokaari sammuu. Tämän takia on tärkeää, että kompensointilaitteisto on viritetty optimaalisesti. Keskeytyksiä voidaan vähentää myös parantamalla johtokatuja raivaamista ja lisäämällä kaapelointia. (Maviko 2014.)

4.2 Kompensointilaitteisto

4.2.1 Automaattisäätäjä

Maasulkuvirran kompensoinnin on toimittava oikein jokaisessa verkon tilassa. Tämän vuoksi maasulkuvirran kompensointilaitteistoa on säädettävä verkossa tapahtuvien muutosten mukaan. Laitteistoa ohjaa ns. resonanssisäätäjä tai automaattisäätäjä. Säätäjän tehtävänä on tunnistaa muutokset verkon tilassa ja säätää kela vastaamaan uutta resonanssipistettä tai ennalta määriteltyä yli- tai alikompensointiarvoa. Kompensointikelojen muut ohjaus-, mittaus- ja tallennustoiminnot kuuluvat myös laitteen ominaisuuksiin. (A. Eberle 2007.) Automaattisäätäjien valmistajia ovat muun muassa Swedish Neutral, Trench ja A. Eberle.

Säätäjän toiminta perustuu terveeseen verkon nollajännitteen seuraamiseen. Myös terveessä sammute- tussa verkossa on jonkin suuruinen nollajännite, joka saavuttaa suurimman arvonsa, kun kelan induktiivinen reaktanssi ja verkon maakapasitanssien reaktanssi ovat yhtä suuret. Verkko on tällöin resonanssipisteessä. Jos verkossa tapahtuu muutos, esim. johtolähtö irtoaa verkosta, muuttuu verkon maakapasitanssi. Tällöin myös nollajännite muuttuu. Säätäjä voi mitata vain kelan ajankohtaista

asentoa ja nolajännitettä. Muutoksen ollessa suurempi kuin säätäjään aseteltu arvo alkaa säätäjä etsiä uutta resonanssipistettä ja määrittämään resonanssikäyrää. Resonanssipisteen etsintä voidaan suorittaa säätämällä kelan asentoa tai syöttämällä keinotekoisesti virtaa verkon tähtipisteeseen erillisellä virransyöttöyksiköllä. Tällöin myös säätäjän mittaama nolajännite muuttuu. Näiden muutosten perusteella säätäjä pystyy algoritmeillaan laskemaan uuden resonanssikäyrän ja resonanssipisteen. (A. Eberle 2007.)

4.2.2 Maadoitusmuuntaja

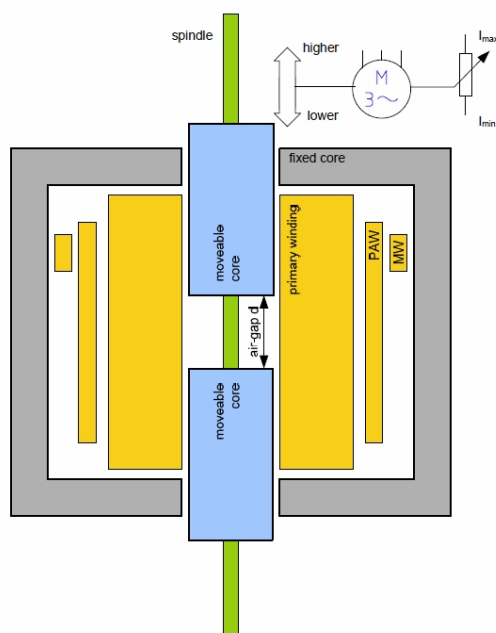
Sammutetussa verkossa verkon kapasitiivista maasulkuvirtaa kompensoidaan verkon tähtipisteeseen kytketyllä kompensointikelalla. Keskijänniteverkoissa päämuuntajan tähtipiste on vain harvoin käytettävissä. Kelan kytkemistä päämuuntajan tähtipisteeseen rajoittavat mm. tähtipisteen kuormittavuus ja eri tilanteet, joissa päämuuntaja on irti verkosta. Tällaisia tilanteita ovat esim. päämuuntajan huolto tai vikaantunut päämuuntaja. Tällöin myös kompensointi on pois käytöstä ja standardin vaatimia kosketusjännitevaatimuksia ei välttämättä pystytä täyttämään. Päämuuntaja voi olla myös kolmiokytkentäinen, jolloin verkossa ei ole tähtipistettä.

Jos olemassa olevaa tähtipistettä ei pystytä käyttämään tai tähtipiste puuttuu kokonaan, joudutaan verkkoon muodostamaan keinotekoinen tähtipiste. Käytännössä tämä toteutetaan ZN-kytkentäisen maadoitusmuuntajan avulla, jonka ensiön tähtipisteeseen kompensointikelat liitetään. Rakenteeltaan maadoitusmuuntaja on normaalin jakelumuuntajan kaltainen. Muuntaja mitoitetaan kelan virran ja käyttöajan, jatkuva tai 2 tuntia, mukaan (Maviko 2014). Maadoitusmuuntaja voi sisältää myös omakäyttökäämin, josta sähköasema saa omakäyttöjännitteensä ja tällöin asemalla ei tarvita erillistä omakäyttömuuntajaa. Esimerkiksi PKS:n Honkavaaran sähköasemalla maadoitusmuuntajat ovat ZNyn11-kytkentäryhmän muuntajia joiden toisiossa on 400 V 100 kVA omakäyttökäämi (liite 1).

4.2.3 Kompensointikelat

Verkon kytkentätilanteiden muuttuessa myös keloja pitää pystyä säätämään. Siksi nykyään lähes kaikki kompensointikelat (kuva 2) ovat jatkuvasääteisiä, koska ne toimivat kaikkein parhaiten verkon kytkentätilanteiden muuttuessa. Jatkuvasäätäinen kompensointikelat on kaksoisrautasydämellä varustettu öljytäytteinen kela, jonka induktanssia, eli käytännössä sen tuottamaa induktiivista virtaa, muutetaan sydämien liikkuvien osien ilmaväliä säätämällä. Säätö tapahtuu kotelon yläosassa sijaitsevan moottorin avulla kierretangon välityksellä (kuvio 9). Kela säätelee automaattisäätäjä verkon muuttuvien olosuhteiden mukaan. Kelan asentotieto saadaan esim. potentiometrin avulla ja lähetetään säätäjälle. Kela voidaan säätää myös käsin mekaanisella kammella. Jatkuvasäätäisen kelan virransäätöalue on 10 - 100 % nimellisvirrasta. (Trench 2011.)

Kelan ensiö eli pääkäämi on käämittyä rautasydämen ympärille ja käämin toinen pää kytketään verkon tähtipisteeseen ja toinen maahan. Kelassa voi lisäksi olla mittauksia varten mittauskäämit virran ja jännitteen mittausta varten ja tehoapukäämi esim. lisävastuksen tai ns. virransyöttöyksikön kytkentää varten. (A. Eberle 2007.)



KUVIO 9. Kompensointikelan periaatelinen rakenne (A. Eberle 2007.)

4.2.4 Lisävastus

Jotta pysyvät maasulkuviat voidaan kytkeä nopeasti ja selektiivisesti pois, tulee vikaantunut johtolähtö tunnistaa. Täysin kompensoidussa verkossa kapasitiivinen maasulkuvirta kompensoidaan ja jäljelle jää ainoastaan verkon resistansseista syntyvä resistiivinen jäännösvirta. Maasulkuvian tunnistus sammutetussa verkossa perustuu jäännösvirran mittaukseen. Jos sammutettu verkko on suppea, voi jäännösvirta jäädä monesti liian pieneksi, jotta maasulkusuojaus toimisi luotettavasti ja selektiivisesti. Jäännösvirtaa voidaan kasvattaa keinotekoisesti kytkemällä kelan rinnalle ns. lisävastus, joka kasvattaa tätä resistiivistä jäännösvirtaa. (ABB 2000.)

Kompensoinnin käyttö asettaa verkon kapasitanssiepäsymmetrialle vaatimuksia, sillä käytännössä myös terveessä verkossa on jonkin suuruinen nollajännite, joka syntyy johtojen välisestä kapasitanssiepäsymmetriasta. Tätä syntyy esim. avojohtojen eri vaiheiden fyysisestä sijoittelusta toisiinsa nähden ja vaiheiden välisestä erilaisesta kuormasta. Tämän takia avojohtoverkossa tulisivin tehdä vaihejohtimien vaihevuorottelua epäsymmetrian tasaamiseksi. Terveessä tilassa suuri nollajännite voi aiheuttaa sähköaseman varasuojauksien virheellisen toiminnan. Nollajännitettä voidaan verkon terveessä tilassa vaimentaa lisävastuksen avulla. Tällöin vastuksen on oltava koko ajan päälle kytkettynä. Vastus kytketään kelan rinnalle pienijännitteiseen tehoapukäämiin. Vastuksen nimellisjännite voi olla esim. 500 V (liite 2). (A. Eberle 2007.)



KUVA 2. Kompensointikela ja lisävastus (EGE 2014.)

Lisävastuksella on suuri vaikutus maasulkusuojauksen toimintaan sammutetussa verkossa. Lisävastuksen ohjaukseen ei ole yleisesti käytettyä menetelmää. Jakeluverkon rakenne vaikuttaa suuresti valittuun vastuksen ohjaustapaan, joten verkkoyhtiöiden on ohjattava vastusta parhaaksi havainnoimallaan tavalla. Jokainen löytää siis itse omaan verkkoon parhaiten sopivan ohjaustavan. Vastuksen ohjaukselle on olemassa kolme erilaista tapaa:

1. Vastus on kytkettynä verkkoon koko ajan. Verkon nolajännite pysyy ilmajohtoverkoissa paremmin hallinnassa ja samalla estetään varasuojauksien virheellinen toiminta. Toisaalta tämä ohjaustapa sotii kompensoinnin perusajatusta vastaan. Kun vastusta pidetään jatkuvasti päällä, saajännösvirta suuremman arvon ja maasulkuvalokaaren itsestään sammuminen vaikeutuu. Toisaalta kaapeliverkoissa kaapeleiden symmetrisyyden takia nolajännite saattaa jäädä niin pieneksi, että kelan ohjaus vaikeutuu tai on jopa mahdotonta.
2. Vastus on poiskytkettynä verkon terveessä tilassa ja kytketään maasulkuvian tullessa päälle. Näin annetaan maasulkuvalokaarelle mahdollisuus sammua itsestään. Vian ollessa pysyvä vastus kytkeytyy päälle, jolloin resistiivinen jäännösvirta kasvaa ja suojauksen selektiivinen toiminta on todennäköisempää. Vastuksen ollessa terveessä tilassa poiskytkettynä, saattaa nolajännite nousta liian korkealla kompensointiasteesta ja verkon kapasitanssiepäsymmetriasta riippuen ja aiheuttaa varasuojauksen toiminnan.
3. Vastus on kytkettynä päälle verkon terveessä tilassa koko ajan ja kytketään pois maasulkuvian tullessa. Tällä ohjaustavalla lisävastuksesta otetaan kaikki hyöty irti. Terveen verkon nolajännite pysyy matalampana ja maasulkuvalokaarelle annetaan mahdollisuus sammua itsestään ja näin vältetään turhia pikajälleenkytkentöjä.

Näiden lisäksi vastusta on tarpeen mukaan mahdollista ohjata useammilla päälle ja pois kytkennöillä ja asettamalla kytkentöihin erilaisia viiveitä.

4.2.5 Kompensointilaitteiston suojaus

Maadoitusmuuntaja on täysin tavallisen jakelumuuntajan kaltainen muuntaja ja on tämän vuoksi myös suojattava normaaliin tapaan. Muuntaja varustetaan öljyn pinnan ja lämpötilan osoittimilla. Myös kela varustetaan öljyn pinnan ja lämpötilan tarkkailulla ja ohjainmoottori suojakytkimellä.

Vastuksen päällä pitämistä vian aikana rajoittaa vastuksen terminen kuormitettavuus (A. Eberle 2007). Termisen ylikuormituksen estämiseksi vastus varustetaan ylikuormitussuojalla. Koko kompensointilaitteisto suojataan ylivirtasuojauksella kojeistossa.

4.3 Kompensoinnin hyödyt ja haitat

Kompensoinnin myötä vikapaikkaan menevä maasulkuvirta pienenee murto-osaan maasta erotettuun verkkoon verrattuna. Pienempi vikavirta taas pienentää maadoitusresistansseissa syntyviä maadoitusjännitteitä parantaen henkilöturvallisuutta. Pienemmillä maasulkuvirroilla pystytään myös mahdollisesti säästämään maadoituskustannuksissa. Lisäksi kompensointi pienentää maasulkujen riskiä laajentua oikosuluiksi ja vähentää jännite-epäsymmetriasta johtuvia laitteille aiheutuvia raskautuksia. Kompensointi pienentää myös maasulkuvirran suuruutta pysyvissä maasuluissa. Tämä taas mahdollistaa verkon tilapäisen käytön maasulun aikana standardin SFS 6001 vaatimuksien puitteissa. Sammutetussa verkossa voidaan pienempien maasulkuvirtojen vuoksi käyttää pidempiä laukaisuaikoja kuin maasta erotetussa verkossa, jolloin ohimenevillä valokaariviolla on parempi mahdollisuus sammua itsestään ennen kuin se on poistettava jälleenkytkennällä. Tämän ansiosta jälleenkytkentöjen määrä vähenee, jotka lasketaan suoraan rahallisena menetyksenä verkkoyhtiölle. Sähkön toimituksen keskeytykset pienentävät sähköyhtiöiden suurinta sallittua tuottoa, jota Energiamarkkinavirasto säätelee. (Lakervi ja Partanen 2008, 182 - 198.)

Sammutettu verkko on investointikustannuksiltaan kalliimpi kuin vastaava maasta erotettu verkko. Sammutuksen myötä vaatimus verkon maakapasitanssisymmetrialle kasvaa, koska terveen tilan nolajännite voi kasvaa muuten liian suureksi (A. Eberle 2007). Relesuojauksen toteuttaminen on jonkin verran vaikeampaa kuin maasta erotetussa verkossa. Sammutetussa verkossa vikavirrat ovat huomattavasti pienempiä, jolloin suuriohmisten vikojen havainnointi vaikeutuu. (Lakervi ja Partanen 2008, 182 - 198.)

5 MAASULKUVIRTOJEN LASKENTA

5.1 Maasta erotettu verkko

Maasulkuvirtaa laskettaessa johtimien ja muuntajakäämien impedanssit voidaan jättää huomioimatta, sillä niiden suuruus on pieni verrattuna maakapasitansseihin (Lakervi ja Partanen 2008, 182 - 198). Laskentakaavoina on käytetty ABB TTT -käsikirjasta saatuja kaavoja (ABB 2000). Maasulkuvirta maasta erotetun verkon suorassa vikaresistanssittomassa maasulussa saadaan laskettua kaavalla 2:

$$I_e = \sqrt{3}\omega C_0 U \quad (2)$$

jossa C_0 = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi

U = verkon pääjännite

$\omega = 2\pi f$.

Vikaresistanssin vaikutuksesta maasulkuvirta pienenee ja pienentynyt arvo saadaan laskettua kaavalla 3:

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{3}\omega C_0}{\sqrt{1 + (3\omega C_0 R_f)^2}} U \quad (3)$$

jossa R_f = vikaresistanssi.

Tunnettaessa maasulkuvirta suorassa maasulussa voidaan kaava 3 johtaa muotoon 4:

$$I_{ef} = \frac{I_e}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3}I_e R_f}{U}\right)^2}} \quad (4)$$

Nollajännite saadaan laskettua kaavalla 5:

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + (3\omega C_0 R_f)^2}} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

Edellä esitetyillä kaavoilla lasketut virrat ovat vikapaikassa, viallisesta vaiheesta maahan kulkeva virta. Johdon aseman syöttöpään vaihevirtojen summavirta ei sisällä johdon omien maakapasitanssien kautta kulkevaa osaa maasulkuvirrasta. Vaihevirtojen summavirta eli taustaverkon syöttämä maasulkuvirta saadaan laskettua kaavalla 6:

$$I_v = \frac{C_0 - C_{0j}}{C_0} I_{ef} \quad (6)$$

jossa C_0 = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi
 C_{0j} = suojattavan johdon yhden vaiheen maakapasitanssi
 I_{ef} = johdon vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta.

5.2 Sammutettu verkko

Täysin kompensoidussa verkossa vikapaikkaan kulkee vain resistiivinen jäännösvirta. Jäännösvirta muodostuu kelan ja verkon häviöistä sekä mahdollisen kelan lisävastuksen aiheuttamasta pätövirrasta sekä yliaalloista. Laskentakaavoina on käytetty ABB TTT -käsikirjasta saatuja kaavoja (ABB 2000). Maasulkuvirta sammutetussa verkossa saadaan laskettua kaavalla 7:

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{1 + R_0^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}{\sqrt{(R_f + R_0)^2 + R_f^2 + R_0^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

jossa R_0 = kompensointikelan ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin sekä mahdollisen kelan toisioresistanssin tähtipisteeseen redusoitu resistanssi
 ωL = kompensointikelan reaktanssi.

Nollajännite muodostuu maasulkuvirran, verkon maakapasitanssien, kelan induktanssin ja häviöresistanssien rinnankytkennän impedanssien tulosta. Nollajännite saadaan laskettua kaavalla 8:

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_0}\right)^2 + \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} I_{ef} \quad (8)$$

Täysin kompensoidussa verkossa kaavat sievenevät muotoon 9 ja 10:

$$I_{ef} = \frac{1}{R_f + R_0} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

$$U_0 = \frac{R_0}{R_f + R_0} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

5.2.1 Kompensointikelan induktanssin laskenta

Kompensointikelan induktanssin laskemista varten on ensin laskettava verkon kapasitiivinen reaktanssi. Verkon maakapasitanssi saadaan laskettua, kun tunnetaan verkon laajuus ja johtimien ja kaapeleiden tyypit. Kapasitiivinen reaktanssi saadaan laskettua kaavalla 11:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (11)$$

jossa C = verkon maakapasitanssi.

Koska kapasitiivista virtaa kompensoidaan induktiivisella virralla, on reaktanssien oltava tällöin yhtä suuret: $X_C = X_L$. Induktiivinen reaktanssi saadaan laskettua kaavalla 12:

$$X_L = 2\pi f L \quad (12)$$

Kaava saadaan johdettua muotoon 13:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (13)$$

5.2.2 Lisävastuksen vaikutus maasulkuvirtaan

Koska kompensointikelan mahdollinen lisävastus kytketään kelan pääkäämin (ensiö) rinnalle apukäämin (toisio) avulla, on sen resistanssi redusoitava oikeaan jännitetasoon. Tässä tapauksessa on laskettu Honkavaaran aseman kompensointikelan kilpiarvoista (liite 2). Vastus on kytkettynä kelan toisioon pisteiden M2 ja N2 väliin, jossa nimellijännite on 500 V. Ensiössä eli verkon tähtipisteen ja maan välillä kelan nimellijännite on 11,84 kV eli 20,5 kV:n jakeluverkon vaihejännitteen suuruinen jännite. Tämän suuruinen jännite muodostuu kelan yli suorassa maasulussa. Tällöin resistanssiksi saadaan redusoidulla kaavalla 14:

$$R'_2 = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 R_2 = \left(\frac{11,84kV}{500V}\right)^2 \cdot 5\Omega = 2804\Omega \quad (14)$$

Vastuksen virta on tällöin ohmin lain mukaisesti:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{11,84kV}{2804\Omega} = 4,2A \quad (15)$$

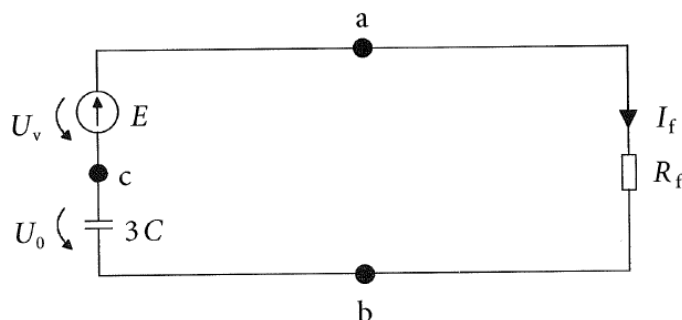
jossa U on verkon nollajännite U_0 eli kelan yli vaikuttava jännite.

Edellä laskettu arvo on suorassa maasulussa. Vikaresistanssin kasvaessa nollajännite pienenee, jolloin myös vastuksen virta pienenee. Tästä syystä vastuksesta on apua suojauksen selektiivisyyden kannalta vain tiettyyn pisteeseen asti.

5.3 Maasulkuvirtojen laskentamalli

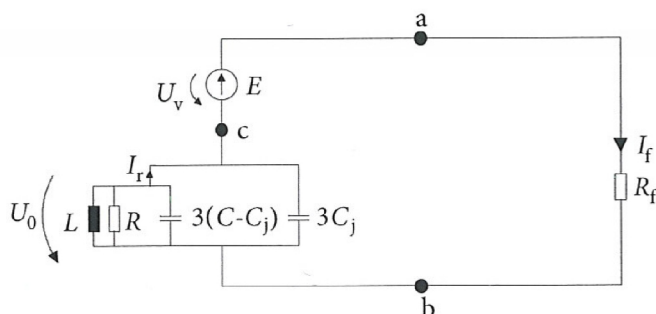
Työtä varten tehtiin Excel -pohjainen laskentataulukko (kuva 3) toimeksiantajan käyttöön, jolla voidaan laskea jakeluverkoissa esiintyviä maasulkuvirtoja, nollajännitteitä ja maadoitusjännitteitä. Laskentataulukolla saadaan laskettuja arvoja, joita voidaan verrata verkkoyhtiön käyttämien laskentaohjelmien laskemiin arvoihin ja käyttää hyödyksi suunnittelussa. Laskennan avulla voidaan mm. ennustaa maasulkuvirtojen kasvua ja selvittää millekälä johtolähdöille kannattaisi asentaa hajautettua kompensointia.

Laskenta on jaettu kahdelle eri välilehdelle, joissa ensimmäisessä lasketaan maasta erotetun verkon arvot ja toisessa sammutetun verkon arvot. Yhteisinä tietoina syötetään maakapasitanssien laskentaa varten verkkoyhtiön tietojärjestelmästä saadut eri johdinlajien pituudet kilometreinä. Johtojen ja kaapeleiden maakapasitanssiarvoina käytettiin SA 5:94 -verkkostosuositukselta saatavia arvoja (Verkkostosuositus SA 5:94 1994).

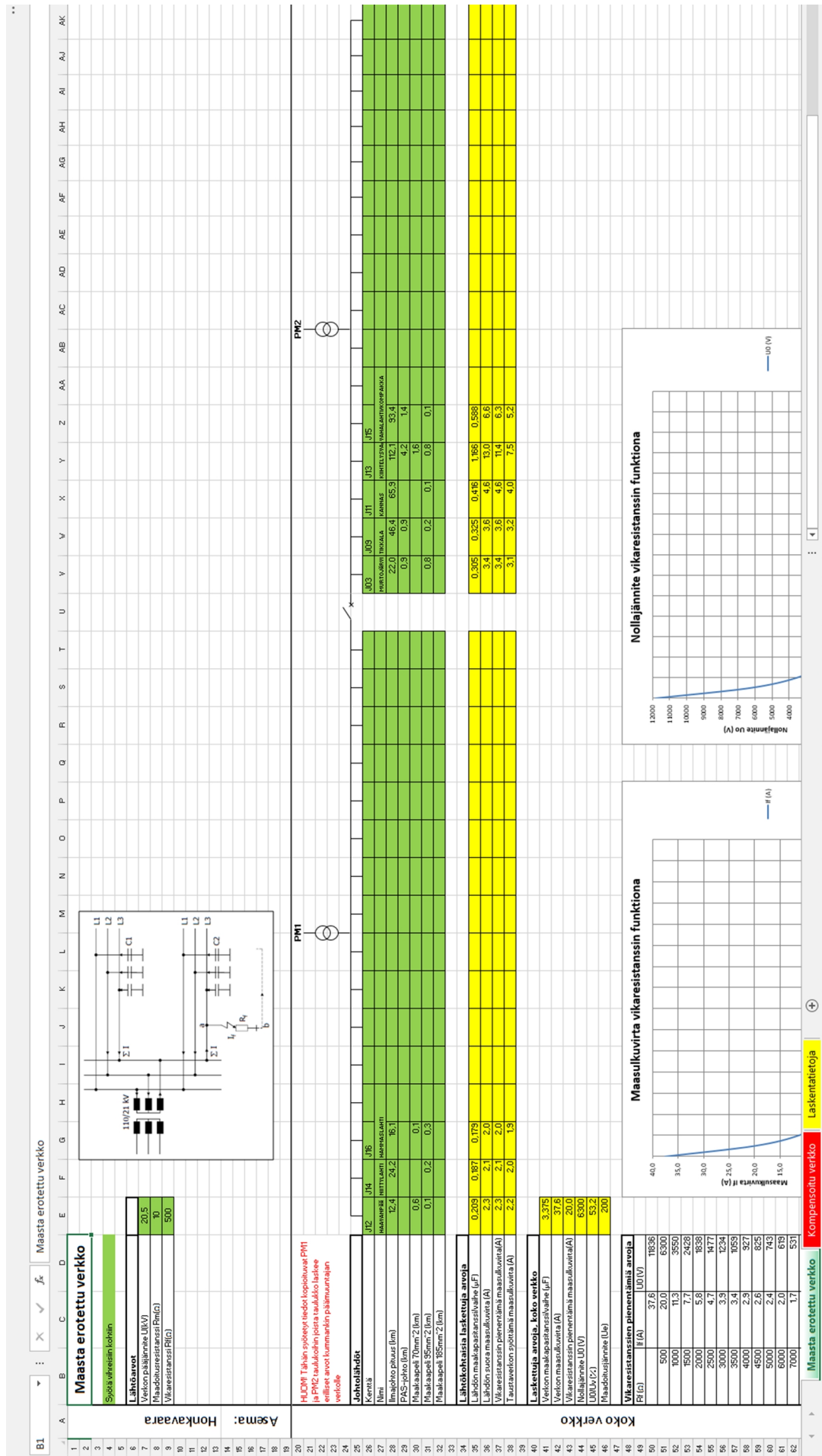


KUVIO 10. Maasulkupiirin sijaiskytkentä maasta erotetussa verkossa (Lakervi ja Partanen 2008, 184.)

Maasta erotetun verkon (kuvio 10) laskennoissa syötetään lähtötiedoiksi verkon pääjännite, vikaresistanssi ja maadoitusresistanssi. Sammutetun verkon (kuvio 11) laskentaa varten syötetään lisäksi kelan ja lisävastuksen tiedot ja verkon kompensointiaste. Tuloksina saadaan lähtöjen ja koko verkon maasulkuvirrat, taustaverkon syöttämät maasulkuvirrat ja eri jännite-arvoja. Taulukko tekee laskelman erilaisilla vikaresistanssin arvoilla maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa. Tuloksista piirretään lisäksi kuvaajat.



KUVIO 11. Maasulkupiirin sijaiskytkentä sammutetussa verkossa (Lakervi ja Partanen 2008, 185.)



KUVA 3. Näkymä maasta erotetun verkon laskentataulukosta.

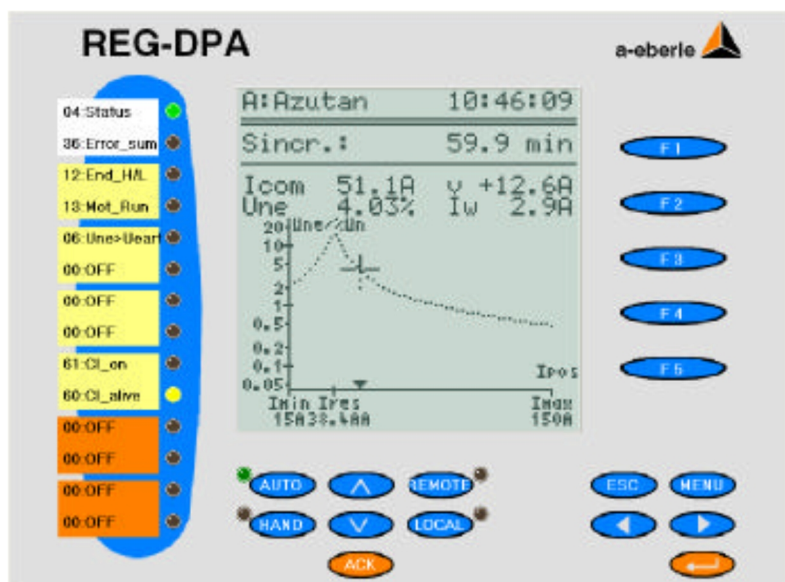
6 KOMPENSOINNIN HYÖDYN TEHOSTAMINEN

6.1 Pohjois-Karjalan Sähkö Oy:n sammutettu verkko

PKS:n jakeluverkko on lähes 100 % sammutettua verkkoa. Verkon kompensointiasteena on yleisesti käytetty -5 A:n alikompensointia. Jos aseman verkko on suppea, käytetään -30 %:n alikompensointia. Tällä hetkellä on käytössä ainoastaan keskitettyä kompensointia. Hajautettua kompensointia on tulossa käyttöön vuoden 2014 aikana. (Laeslehto 2014.)

6.2 REG-DPA

REG-DPA on saksalaisen A. Eberlen valmistama mikroprosessoriohjattu automaattinen kompensointilaitteiston säätäjä. Säätäjän toimintoihin kuuluu mm. kompensointikelan, lisävastuksen ja mahdollisen virransyöttöyksikön ohjaustoiminnot ja niihin liittyvät mittaus- ja suojaustoiminnot. (A. Eberle 2007.) PKS:illä on käytössään REG-DPA -säätäjä 15 asemalla (Laeslehto 2014).



KUVA 4. REG-DPA -säätäjän näyttöpaneeli (A. Eberle 2007.)

Säätäjän näytöstä (kuva 4) nähdään arvioitu resonanssikäyrä ja seuraavat tiedot:

- I_{com} = kompensointikelan arvo säätöpisteessä
- v = epävire A tai %
- U_{ne} = nollajännitteen arvo säätöpisteessä
- I_w = vikapaikan läpimenevän virran resistiivinen osuus jäykässä maasulussa
- I_{res} = resonanssipiste
- I_{min} = säädettävän kelan minimiarvo
- I_{max} = säädettävän kelan maksimiarvo. (A. Eberle 2007.)

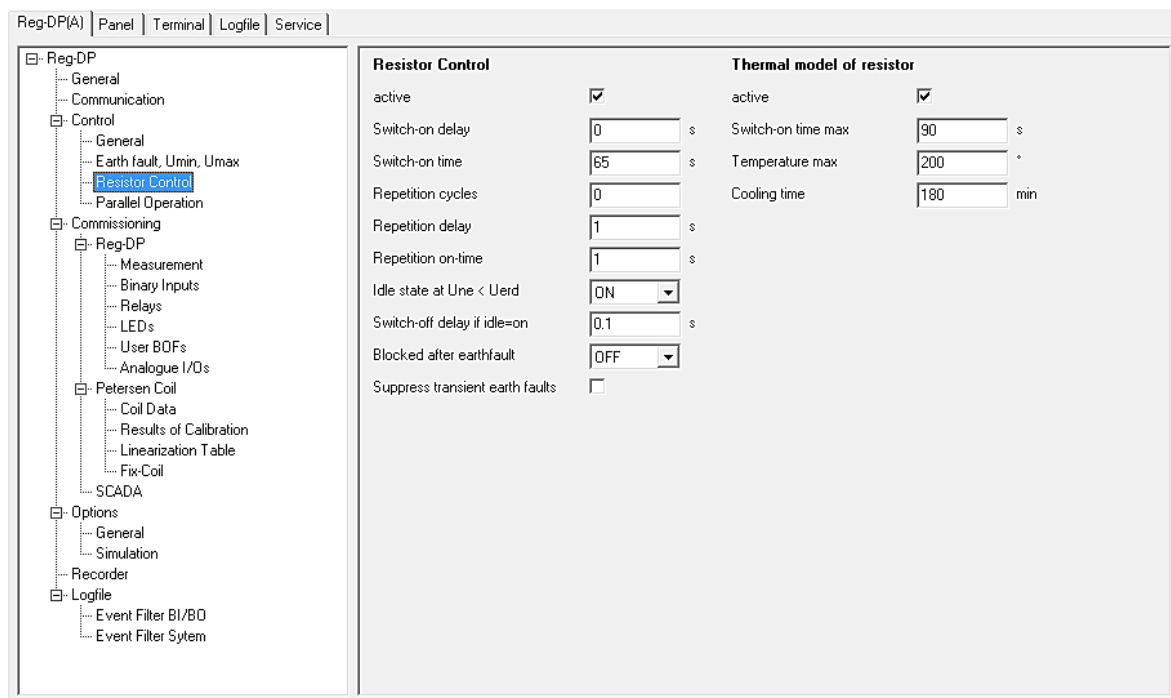
Näillä määritellyillä arvoilla voidaan odotettavissa oleva virta maasulkupaikassa määritellä ennakoon verkon ollessa terveessä tilassa (A. Eberle 2007).

6.3 Lisävastuksen ohjaus

REG-DPA sisältää lisävastuksen automaattisen ohjauksen, jota ei kuitenkaan ollut saatu toimimaan oikein laitteiston käyttöönotossa 2012. Samaa säätäjän toimintoa ei ole saatu toimimaan monella muullakaan asemalla. Normaalisti säätäjän, kojetunnus OT4:A24, rele R3 kytkee 110 VDC ohjausjännitteen kelan ohjainkotelossa sijaitsevalle apureleen K9 kelalle. Apurele K9 taas ohjaa kontaktoria K7, joka ohjaa vastusta. (liite 3.) Koska ohjausta ei ollut saatu toimimaan, oli vastus päätetty asentaa pakko-ohjattuna päälle. Tämä oli tehty asentamalla hyppylanka riviliittimien 68 ja 62 väliin, jolloin kontaktori oli jatkuvasti kiinni (Laeslehto 2014).

Lisävastuksen ohjausta selvitettiin ensin laitteen käyttöohjeesta, mitkä parametrit vaikuttavat ohjaukseen ja mistä voisi olla kyse, ettei ohjaus toimi niin kuin pitäisi. Lisäksi pyydettiin neuvoja sähköpostitse laitteen edustajalta Multirel Oy:ltä. Tämän lisäksi vertailtiin PKS:n eri sähköasemien saman säätäjän asetus-tiedostoja ja etsittiin eroavaisuuksia. Näistä selvisikin muutama asia, joista saatiin hyviä johtolankoja. Säätäjään toimintaan tutustuttiin ensin Palokin sähköasemalla Heinävedellä.

Säätäjän asetusten säätöön on olemassa kaksi ohjelmaa, WinREG ja WinEDC. Näistä käytettiin WinEDC:tä (kuva 5). Asetusten muuttaminen voidaan tehdä myös säätäjän näyttöpaneelista (kuva 4).



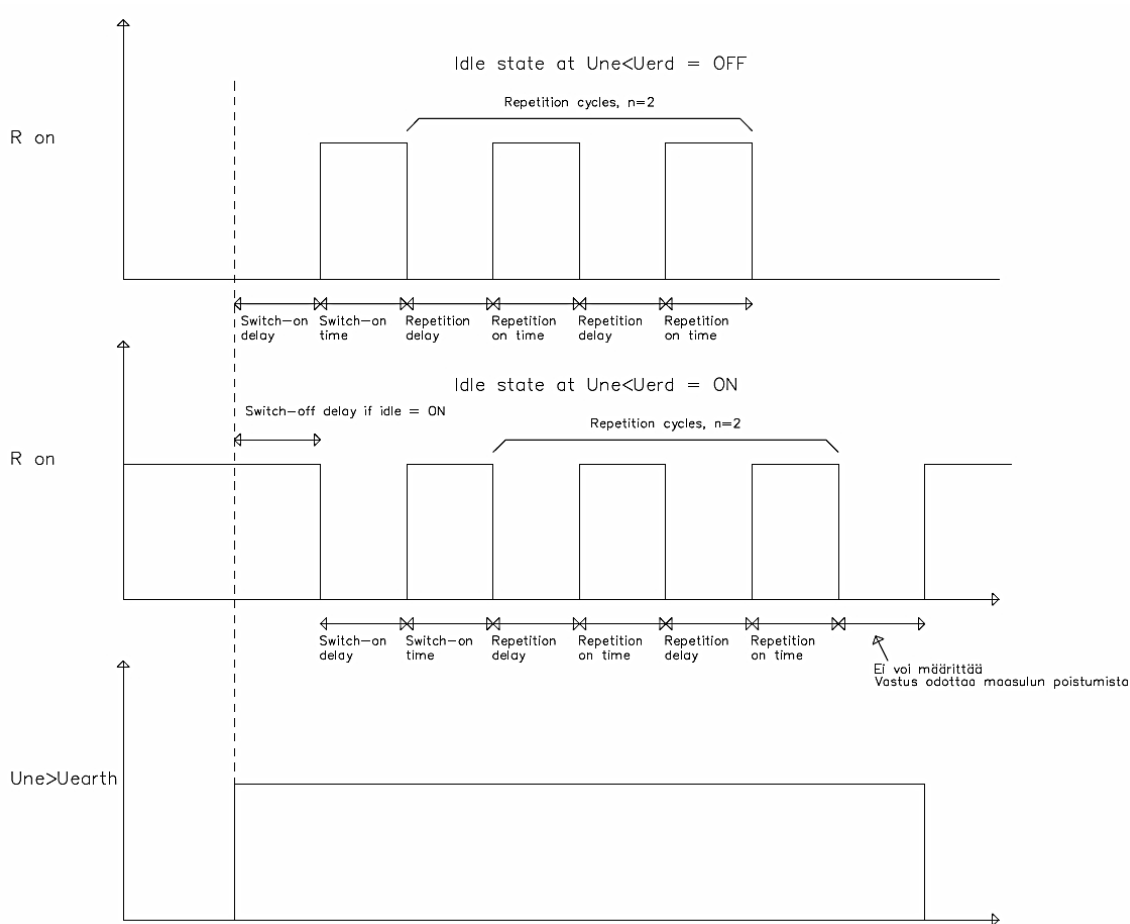
KUVA 5. WinEDC parametrusiohjelmalla. Lisävastuksen ohjaukseen vaikuttavat asetukset.

Vastusohjaus on kelan säätötoiminnoista riippumaton toiminta. Vastuksen ohjaus käynnistyy normaalisti, kun maasulku on lopullisesti tunnistettu transienttien vikojen viivästyksen jälkeen. Viivästyksen voidaan ohittaa parametrilla "Suppress transient earth faults". Jos viivästyksistä ei ole määritetty, käynnistyy vastus ohjaus heti, kun mitattu U_{ne} (nollajännite kelan jännitemuuntajalta) arvo ylittää säätäjään asetellun U_{earth} arvon. Arvon ylittyessä on tämä merkki säätäjälle verkossa olevasta maasulusta. (A. Eberle 2007.)

Parametrien käyttötarkoitukset selvitettiin laitteen manuaalista ja "Blocked after earthfault" paramet-
rin toiminta varmistettiin laitteen Suomen edustajalta sähköpostitse (REG-DPA 2013-11-22 – 2014-
01-30). Alla on kerrottu vastuksen ohjaukseen vaikuttavat asetukset ja niiden tarkoitus:

- Uerd = Uearth threshold, maasulun kynnysjännite
- Une = kelan mittauskäämistä mitattu nolajännite
- Active = aktivoi vastuksen ohjauksen
- Switch-on delay = vastuksen päälle kytkentä viive
- Switch-on time = vastuksen päällä olo aika
- Idle state at $U_{ne} < U_{erd}$ = määrittelee vastuksen lepotilan, OFF = Normaalissa käyttötilanteessa vastus on pois päältä, ON = normaalissa käyttötilanteessa vastus on päällä
- Switch-off delay if idle=on = vastuksen poiskytkentä viive. Valittavissa vain jos ylempi asetus = ON
- Repetition cycles = toistojaksojen määrä, määriteltävissä n kertaa
- Repetition delay = toiston kytkentä viive
- Repetition on-time = toiston päällä olon viive
- Blocked after earthfault = vastusautomaatiikan lukitus maasulun jälkeen. OFF, ON tai AUTO
 - o OFF-asennossa vastusautomaatiikka on lukittuna maasulun jälkeen
 - o ON-asennossa vastusohjaus on päällä, mutta ei käynnisty automaattisesti seuraavassa maasulussa vaan on käynnistettävä kaukokäytöltä tai laitteen valikosta
 - o AUTO-asennossa yksi jakso käynnistyy automaattisesti maasulkutilanteessa
- Suppress transient earth faults = asetuksella voidaan ohittaa transienttien vikojen viivästys.
(A. Eberle 2007.)

Parametreilla Switch-on delay, Switch-on time ja Switch-off delay if idle=on, määritellään vastuksen ohjauksen ensimmäinen jakso. Repetition parametreilla voidaan lisätä tarvittaessa jaksojen määrää. Kuviossa 12 on esitetty tarkemmin, kuinka parametrit vaikuttavat vastuksen ohjaukseen. (A. Eberle 2007.)



KUVIO 12. Parametrien vaikutus vastuksen ohjaukseen.

6.4 Maasulkukokeet

Erilaisten parametrien vaikutus vastukseen ohjaukseen ja vastuksen vaikutus maasulkusuojauksen toimintaan testattiin järjestämällä maasulkukokeet. Maasulkukokeet järjestettiin PKS:n Honkavaaran sähköasemalla Joensuun Hammaslahdessa. Honkavaaran asema on kahden 110/45/20kV päämuuntajan asema. 20kV kojeisto on sijoitettu kahteen riviin, joita normaalitilanteessa syöttää oma päämuuntaja. Kiskot voidaan myös yhdistää. Kummallakin kiskolla on oma kompensointikela, mutta toistaiseksi käytössä vain PT2:n verkossa. Maasulkukokeita varten kiskot otettiin yhteen ja koko verkko PT2:n perään. (liite 1.)

Testejä varten johtolähdöstä J12 Haavanpää maadoitettiin yksi vaihe asemaa lähellä olevalla pylvällä. Johtolähtö J12 valittiin, koska verkko saatiin kytkennöillä järjestettyä niin, että yksikään asiakas ei jäänyt ilman sähköä (Laeslehto 2014). Maasulkukokeet tulisi tehdä myös maadoittamalla johto erilaisilla vastusarvoilla kuvaamaan erilaisia vikaresistansseja ja säädettävällä kipinävälillä kuvaamaan katkeilevaa maasulkua. Valitettavasti tällaisia laitteita ei ollut saatavilla, joten maadoitus tehtiin suoraan maahan, jolloin tilanne vastasi suoraa maasulkua.

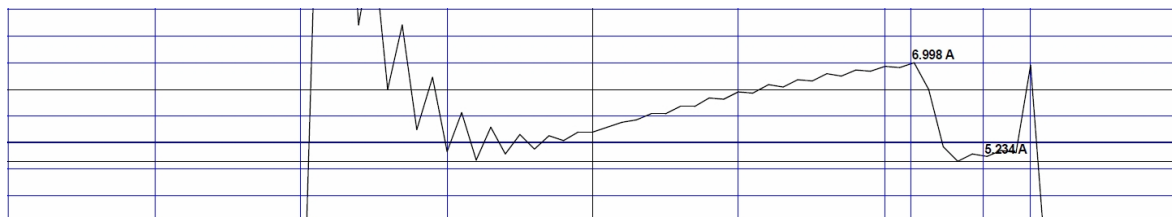
Honkavaaran aseman verkko on pääosin ilmajohtoverkkoa, jossa kompensointilaitteiston lisävastusta pidetään terveessä verkossa jatkuvasti päällä vaimentamaan terveen verkon nollajännitettä (Laeslehto 2014). Tämän takia maasulkukokeissa pystyttiin kokeilemaan kappaleessa 4.2.4 mainittuja oh-

jaustapoja 1 ja 3. Kokeista otettiin talteen VAMP255 -suojareleen häiriötallenteet (liite 4) ja säätäjän lokin (liite 5).

Vian poiskytkentäajaksi oli aseteltu 0,4 s. Jälleenkytkennät otettiin väliaikaisesti pois käytöstä johtolähdön VAMP255 -suojareleesta testien ajaksi ja varasuojauksien toiminta-aikaa pidennettiin siltä varalta, ettei pääsuojaus toimisikaan ja katkaisija ehdittäisiin ohjata takaisin auki manuaalisesti (Laeslehto 2014). Testien aluksi säätäjä sääteli kelan asennon vastaamaan verkon uutta kytkentätilannetta, jonka tiedot olivat seuraavat:

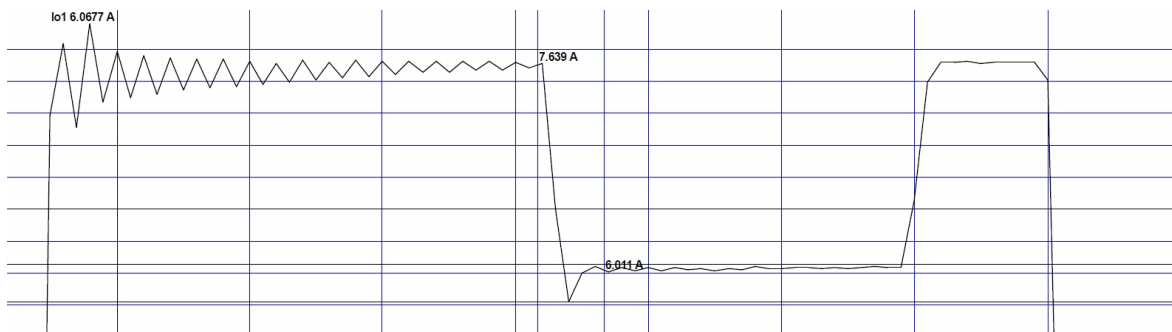
- Ires: 27,2 A
- v: -5,1 A
- Une: 6,28 V
- Iw: 4,7 A
- Icom: 22,1 A

Ensimmäinen testi tehtiin klo 09.54 asettamalla vastus kytkettyyn pois heti maasulun tultua ja pysymään pois 0,2 s, minkä jälkeen vastus kytketty takaisin päälle. Katkaisija ohjattiin kiinni, jolloin rele havaitsi maasulun ja viasta saatiin kuvion 13 mukainen häiriötallenne I_o virrasta.



KUVIO 13. Testi 1, klo 09.54. Suojareleen I_o häiriötallenne.

Toinen testi tehtiin klo 10.07 asettamalla vastus kytkettyyn pois heti maasulun tultua ja pysymään pois 0,3 s, minkä jälkeen vastus kytketty takaisin päälle. Vian poiskytkentäajaksi muutettiin suojareleeseen 0,7 s. Katkaisija ohjattiin kiinni, jolloin rele havaitsi maasulun ja viasta saatiin kuvion 14 mukainen häiriötallenne I_o virrasta. Vastuksen pois-päälle kytkentä nähdään selkeänä vaikutuksena nollavirtaan häiriötallenteesta. Taulukosta 1 (aikakoodi virheellisesti -1 h) nähdään säätäjän lokiin tallentamat tapahtumat testistä.



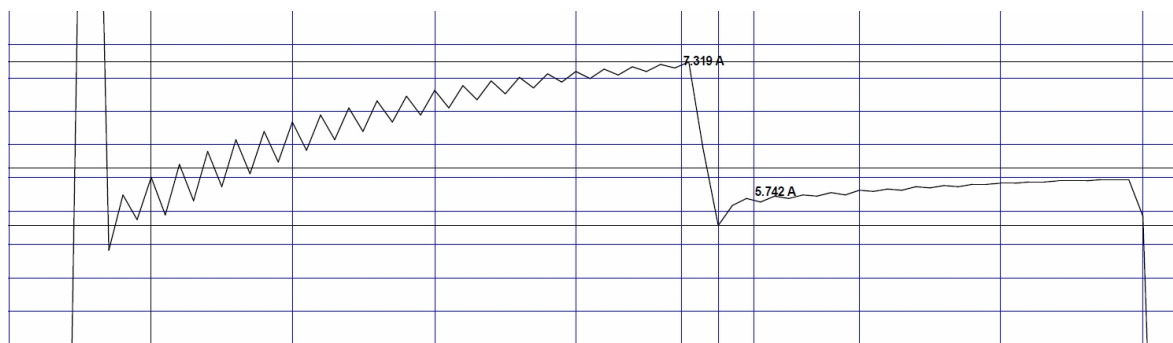
KUVIO 14. Testi 2, klo 10.07. Suojareleen I_o häiriötallenne.

TAULUKKO 1. Testi 2, klo 10.07. Säätäjän loki.

1)	2014-01-08 09:07:37,132 BOF 6: Uen>Ugnd	come	Une= 6,27V -74,0°
2)	2014-01-08 09:07:37,132 BOF 25: R_on	go	
	2014-01-08 09:07:37,208 BO 3	go	
	2014-01-08 09:07:37,379 BI 3	go	Une= 58,89V 56,7°
	2014-01-08 09:07:37,410 BOF 8: Uen>Umax	come	Une= 56,7°
3)	2014-01-08 09:07:37,410 BOF 25: R_on	come	Ipos= 22,1A
	2014-01-08 09:07:37,410 BOF 54: Umax_end	come	
	2014-01-08 09:07:37,410 BOF 84: Tuned_Umax_endgo		
	2014-01-08 09:07:37,410 BO 3	come	
	2014-01-08 09:07:37,563 BI 3	come	
4)	2014-01-08 09:07:38,188 BOF 6: Uen>Ugnd	go	Une= 89,43V
	2014-01-08 09:07:38,427 BOF 8: Uen>Umax	go	Une= 7,66V -71,8°
	2014-01-08 09:07:38,427 BOF 54: Umax_end	go	Ipos= 22,1A
	2014-01-08 09:07:38,427 BOF 84: Tuned_Umax_endcome		

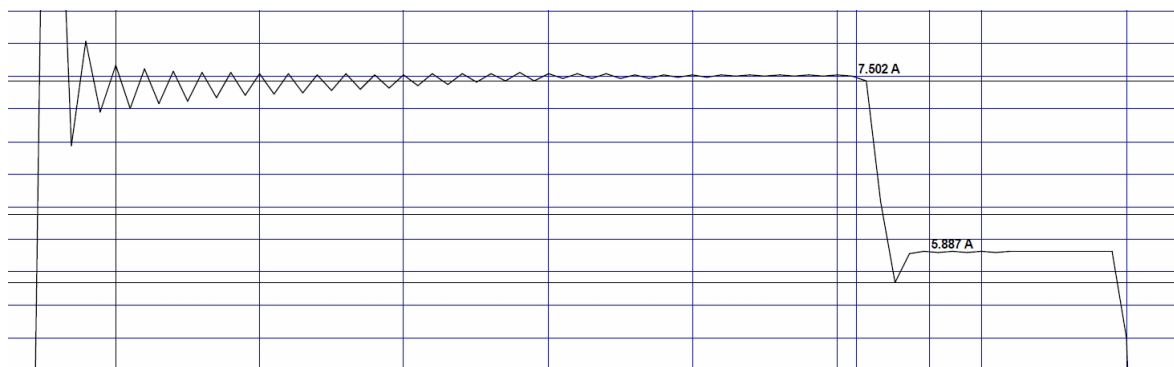
- 1) nollajännite ylittää maasulkurajajännitteen = verkossa maasulku
- 2) lisävastus kytkeytyy pois
- 3) lisävastus kytkeytyy päälle
- 4) nollajännite laskee alle maasulkurajajännitteen = maasulku poistunut.

Kolmas testi tehtiin klo 10.23 asettamalla vastus kytkeytymään pois 0,1 s viiveellä ja pysymään pois 0,4 s, minkä jälkeen vastus kytkeytyy takaisin päälle. Katkaisija ohjattiin kiinni, jolloin rele havaitsi maasulun ja viasta saatiin kuvion 15 mukainen häiriötallenne I_o virrasta.



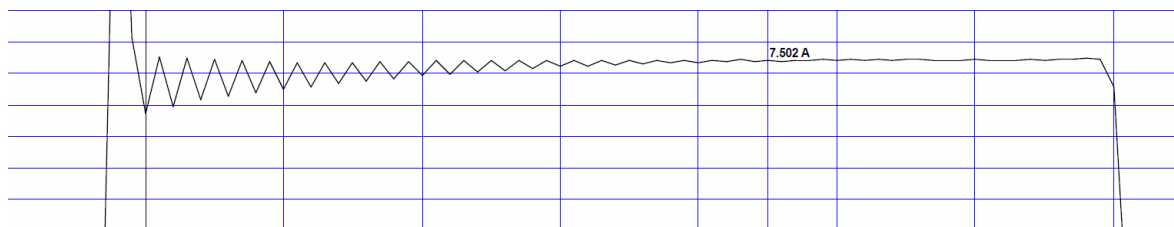
KUVIO 15. Testi 3, klo 10.23. Suojareleen I_o häiriötallenne.

Neljäs testi tehtiin klo 10.48 asettamalla vastus kytkeytymään pois 0,1 s viiveellä ja pysymään pois 0,2 s, minkä jälkeen vastus kytkeytyi takaisin päälle. Katkaisija ohjattiin kiinni, jolloin rele havaitsi maasulun ja viasta saatiin kuvion 16 mukainen häiriötallenne I_o virrasta.



KUVIO 16. Testi 4, klo 10.48. Suojareleen I_0 häiriötallenne.

Viides testi tehtiin klo 10.51 asettamalla vastus pysymään päällä myös vian aikana. Tämä tehtiin asettamalla parametrien Switch-on delay ja Switch-off delay if idle=on arvoksi 0 s. Katkaisija ohjattiin kiinni, jolloin rele havaitsi maasulun ja viasta saatiin kuvion 17 mukainen häiriötallenne I_0 virrasta. Kuviosta 17 näkee, kuinka nollavirta ei muutu, koska vastus pysyy jatkuvasti päällä.



KUVIO 17. Testi 5, klo 10.51. Suojareleen I_0 häiriötallenne.

Häiriötallenteista nähdään, että lisävastuksella on n. 1,6 - 1,7 A:n vaikutus nollavirtaan. Honkavaaran suojareleiden ensimmäisen portaan I_0 asettelu on 1,4 A ja nollajännitteen 20 V. Testien perusteella voi todeta, että suojaus toimii selektiivisesti pelkän lisävastuksen ansiosta ainakin suorassa maasulussa. Suurilla vikaresistanssin arvoilla maasulkuvirta saattaa jäädä niin pieneksi, ettei se välttämättä riitä laukaisemaan vikaantunutta lähtöä pois. Nollajännitettä on kuitenkin yleensä riittävästi, jolloin aseman varasuojaus toimii ja ohjaa aseman syöttökennon katkaisijan auki.

Vastuksen ohjauksen oikea toiminta on suojausten selektiivisen toiminnan kannalta tärkeä, koska releen toiminta vaatii vian havaitsemiseen riittävän suuren nollajännitteen ja nollavirran. Erilaisten vikaresistanssien vaikutus nollavirtaan olisikin ollut mielenkiintoista ja tärkeää todentaa. Testien tuloksien perusteella voi kuitenkin todeta, että erilaisten parametrien vaikutus vastuksen ohjaukseen toimivat oikein. Jatkotoimenpiteinä tulisi vastuksen toimintaa tarkkailla tarkastelemalla säätäjän lokia ja suojareleiden häiriötallenteita verkossa tapahtuvien maasulkujen jälkeen. Näistä voidaan nähdä toimiiko ohjaus aina halutulla tavalla ja tarvittaessa muuttaa parametreja ja näin löytää optimaalisin tapa ohjata vastusta.

7 YHTEENVETO

Lisääntyvän sähköverkon kaapeloinnin ja tiukentuvien sähkön laatuvaatimusten takia tarve maasulkuvirran kompensoinnille kasvaa. Kompensointilaitteiston oikea toiminta on tärkeää jokaisessa verkon tilassa sekä sähkön laadun että sähköturvallisuuden kannalta. Maasulkuvirran kompensoinnilla voidaan suurimmassa osassa vikatapauksissa poistaa vika aiheuttamatta häiriötä sähkönjakeluun tai vaaraa ihmiselle. Tilanteissa, joissa maasulkuvika jää pysyväksi, kompensointilaitteiston lisävastuksen toiminta on tärkeää, jotta vikaantunut verkon osa voidaan erottaa muusta verkosta luotettavasti ja selektiivisesti. Jotta maasulkuvirran kompensointi ja maasulkusuojaus voidaan toteuttaa oikein ja tehokkaasti, on tiedettävä verkossa syntyvät maasulkuvirrat ja selvitettävä ne laskennallisin keinoin.

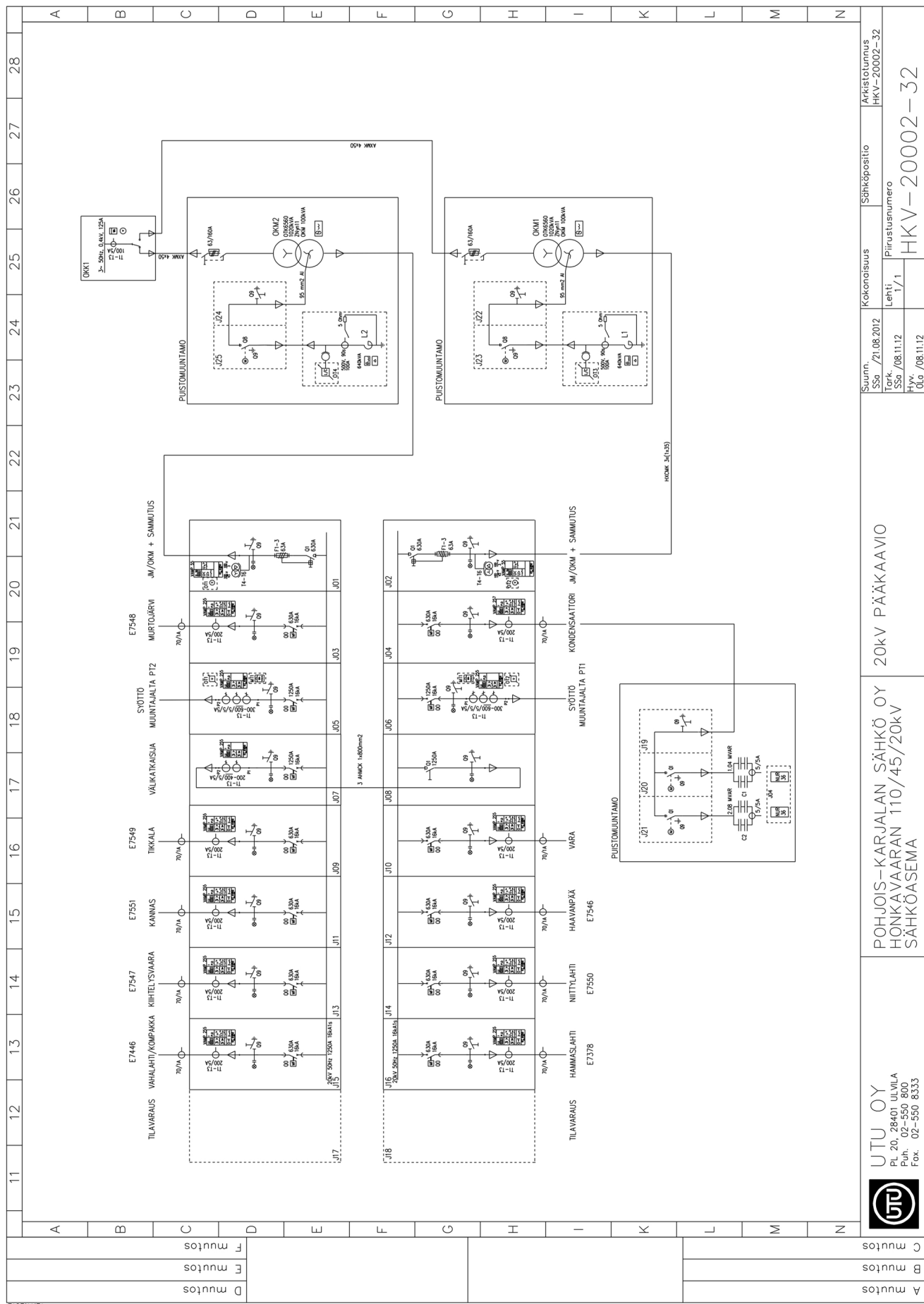
Työssä tutkittiin erilaisia vastuksen ohjaustapoja ja esitettiin perusteita niiden käytölle. Laitteen toimintaa tutkittiin varsin laajasti ja selvitettiin eri parametrien vaikutus vastuksen ohjaukseen. Vastuksen vaikutusta maasulkuvirran suuruuteen tutkittiin laskelmilla, jotka osoittivat, että lisävastuksen kytkeytyminen lisää pätövirran osuutta maasulkupaikassa. Kompensointilaitteiston lisävastuksen toimintaa ja vaikutusta maasulkuvirtaan selvitettiin myös käytännön kokeilla ja varmistuttiin siitä, että parametrit toimivat niin kuin on tarkoitettu. Ilmajohtoverkoissa kapasitanssiepäsymmetrian aiheuttamaa terveen tilan nolajännitettä voidaan vaimentaa pitämällä lisävastusta terveessä tilassa kytkettynä. Vikatilanteessa on kuitenkin hyödyllistä kytkeä vastus pois väliaikaisesti, jotta mahdollinen maasulkuvalokaari sammuu helpommin. Käytännössä on kuitenkin muistettava, että lisävastuksesta ei ole hyötyä suojauksen oikean toimivuuden kannalta kuin tiettyyn pisteeseen asti.

Tätä opinnäytetyötä on tulevaisuudessa tarkoitus käyttää mietittäessä, minkälaisia vastuksen ohjaustapoja tullaan käyttämään. Ohjaustavan valintaan vaikuttaa suuresti verkon rakenne. Joko vastusta pidetään terveessä tilassa päällä ja kytketään väliaikaisesti pois vian tullessa, tai vastus pidetään pois terveessä verkossa ja kytketään viiveellä päälle, jos vika ei häviä. Toivon, että laskentatyökalusta olisi tulevaisuudessa tukea maasulkuvirtojen laskentaan ja sähköasemasuunnitteluun.

LÄHTEET

- ABB Oy 2000. TTT Teknisiä taulukoita ja tietoja. Luku 8. Maasulkusuojaus. Helsinki: ABB Oy.
- A. EBERLE GmbH & Co. KG. REG-DPA Operating manual v2. 2007. [Viitattu 2013-09-10.] Saatavissa: <http://www.a-eberle.de/en/download-center/finish/57-bediensanleitungen/599-ba-reg-dpa-d-pdf.html>
- EGE, spol. s r.o. [digikuva]. [Viitattu 2014-01-10.] Saatavissa: http://www.ege.cz/storage/1_938_ASR%20bez%20konz%20SR%20velka.jpg
- ENERGIATEOLLISUUS ry 2013. Sähkön keskeytystilasto 2012 [verkkójulkaisu]. [Viitattu 2013-24-10.] Saatavissa: <http://energia.fi/julkaisut/sahkon-keskeytystilasto-2012>
- HÄNNINEN, Seppo 2001. Single Phase Earth Faults in High Impedance Grounded Networks. Characteristics, indication and location [verkkójulkaisu]. VTT Publications. Espoo 2001. [Viitattu 2014-03-13.] Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2001/P453.pdf>
- LAESLEHTO, Jari 2014-01-08. Käytönsuunnittelija. [Haastattelu.] Joensuu: PKSS Oy.
- LAKERVI, Erkki ja PARTANEN, Jarmo 2008. Sähkönjakelutekniikka. 3 painos. Helsinki: Otatieto.
- MAVIKO Oy 2014 [verkkoinaisto]. [Viitattu 2014-01-10.] Saatavissa: <http://www.maviko.fi/>
- PARTANEN, Jarmo 2011. Sähkönjakelutekniikka luentomateriaali [verkkoinaisto]. LUT Energy. Saatavissa: <https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0500/luennot/maasulkusuojaus.pdf>
- PKS Oy 2014. Yritysesittely [verkkoinaisto]. [Viitattu 2014-01-13.] Saatavissa: <http://www.pks.fi/yritysesittely>
- PKSS Oy 2013. Yritysesittely [intranet]. Sijainti: Joensuu: PKS Oy
- REG-DPA 2013-11-22 – 2014-01-30. [Tolvanen, Joonas - Arte, Anders, Multirel Oy. Sähköpostikeskustelu.]
- SUURJÄNNITEASENNUKSET 2009. SFS 6001. Vahvistettu 2009-05-25. 3. painos. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS Ry.
- SÄHKÖTURVALLISUUSLAKI. L 1996/410. Finlex. Lainsäädäntö. [Viitattu 2014-02-08.] Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1996/19960410>
- SÄHKÖMARKKINALAKI. L 2013/588. Finlex. Lainsäädäntö. [Viitattu 2014-02-08.] Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>
- TRENCH AUSTRIA GmbH 2011. Arc Suppression Coils [verkkójulkaisu]. [Viitattu 2014-01-20.] Saatavissa: <http://www.trenchgroup.com/content/download/1470/13364/file/Arc%20Suppression%20Coils.pdf>
- VAMP Ltd. 2012. VAMP 255/245/230 Operation and configuration instructions, Technical description. [Viitattu 2014-03-25.] Saatavissa: <http://www-fi.vamp.fi/Manuals/English/VM255.EN024.pdf>
- VERKOSTOSUOSITUS SA 5:94 1994. Keskijänniteverkon sähköinen mitoittaminen. Helsinki: Sähköenergialiitto ry.
- WAHLROOS, Ari ja ALTONEN Janne 2011. Compensated Networks and Admittance Based Earth-fault Protection [verkkójulkaisu]. ABB Oy Distribution Automation. Vaasa 2011. [Viitattu 2014-03-30.] Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/509d776e7bdcc425c1257847004468f4/\\$file/Compensated%20networks%20and%20admittance%20based%20earth%20fault%20protection_techpub_757370_ENa.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/509d776e7bdcc425c1257847004468f4/$file/Compensated%20networks%20and%20admittance%20based%20earth%20fault%20protection_techpub_757370_ENa.pdf)

LIITE 1: HONKAVAARAN SÄHKÖASEMAN 20 KILOVOLTIN PÄÄKAAVIO



12.11.2012

A	mutos
B	mutos
C	mutos



UTU OY
 PL 20, 28401 ULVILA
 Puh. 02-550 8000
 Fax. 02-550 8333

POHOIS-KARJALAN SÄHKÖ OY
 HONKAVAARAN 110/45/20KV
 SÄHKÖASEMA

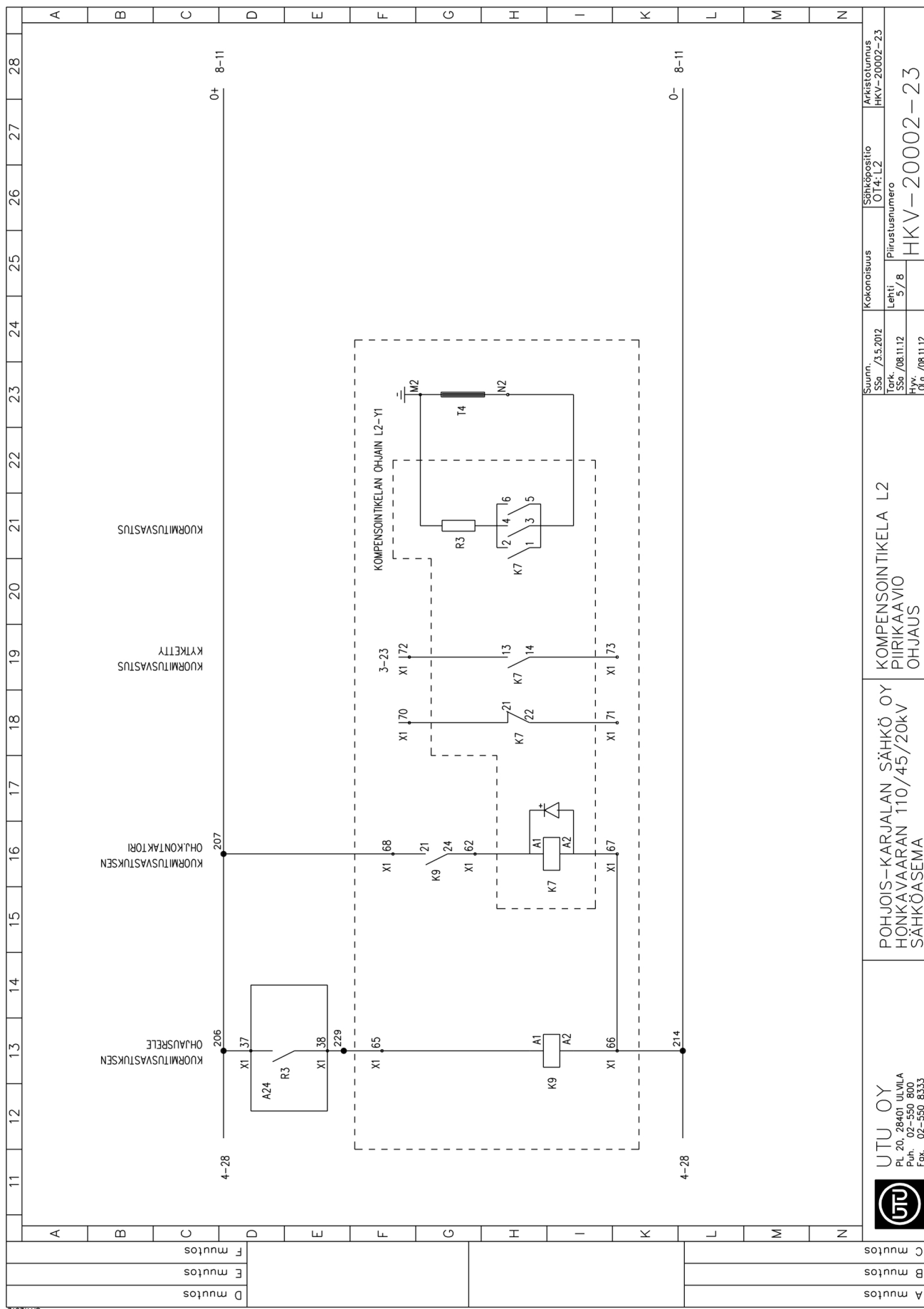
20KV PÄÄKAAVIO

Arkiotunnus	HKV-20002-32
Sähköposito	
Kokonaissuus	
Lehti	1/1
Piirustusnumero	HKV-20002-32
Suunn.	SSo /21.08.2012
Tark.	SSo /08.11.12
Hyv.	OLg /08.11.12

LIITE 2: HONKAVAARAN SÄHKÖASEMAN KOMPENSOINTIKELOJEN KILPIARVOT

1	2	3	4	5	6	7	8																																																																																																																
A	B	C	D	E	F																																																																																																																		
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>8301 8302</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>EGE, spol. s r.o. Novohradská 34 České Budějovice CZECH REPUBLIC</p> </div> </div>																																																																																																																							
<p>EGE</p> <p>PORTAATTOMASTI SÄÄDETTÄVÄ KOMPENSOINTIKELA</p>																																																																																																																							
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">LAJI</td> <td style="width: 15%;">ASR0.63P</td> <td style="width: 15%;">VALM. NRO</td> <td style="width: 15%;">IEC 60076-6</td> <td style="width: 15%;">ULIUS ASENETTÄVÄ</td> <td style="width: 15%;">2012</td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">KOKONAISPAINO t</td> <td colspan="2">1.9</td> <td colspan="2">RAKENNE</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>NIMELLISJÄNNITE kv</td> <td>11.84</td> <td>ÖLJYN PAINO t</td> <td>0.51</td> <td>VALM. VUOSI</td> <td>2012</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>TAAJUUS Hz</td> <td>50</td> <td>SIRRETTÄVIEN OSIEN PAINO t</td> <td>1.04</td> <td>JÄÄHDYTYKSEN DINAN</td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>NIMELLISTEHO kvAr</td> <td>---</td> <td>NIMELLISVIRTA A</td> <td>---</td> <td>KÄYTTÖ JÄTKUVA</td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>NIMELLISTEHO kvAr</td> <td>6.40</td> <td>NIMELLISVIRTA A</td> <td>5.4-5.4</td> <td>KÄYTTÖ</td> <td>2h</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>IMPEDANSSI jatk. Ω</td> <td></td> <td>IMPEDANSSI Ω</td> <td>2192-219.2</td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>ERISTYSTASO</td> <td colspan="2">LI125 AC50 - AC3/AC3</td> <td colspan="5"></td> </tr> <tr> <td>KÄYTTÖMOOTTORI kw</td> <td>0.55</td> <td colspan="2">3x400 V AC</td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td colspan="8" style="text-align: center;">TOISIOIKÄÄMI</td> </tr> <tr> <td colspan="2">LITTIMET</td> <td colspan="2">JÄNNITE</td> <td colspan="2">TEHO</td> <td colspan="2">KÄYTTÖ</td> </tr> <tr> <td>M2 - N2 V</td> <td>500 ±10%</td> <td>A</td> <td>160</td> <td>kVA</td> <td>80</td> <td></td> <td>90s</td> </tr> <tr> <td>M1 - N1 V</td> <td>100 ±10%</td> <td>A</td> <td>3</td> <td>VA</td> <td>300</td> <td></td> <td>DB</td> </tr> <tr> <td>k - l</td> <td>A</td> <td>75/1</td> <td>VA</td> <td>30</td> <td>TARKK. LUOKKA</td> <td></td> <td>1FS5</td> </tr> </table>								LAJI	ASR0.63P	VALM. NRO	IEC 60076-6	ULIUS ASENETTÄVÄ	2012			KOKONAISPAINO t		1.9		RAKENNE				NIMELLISJÄNNITE kv	11.84	ÖLJYN PAINO t	0.51	VALM. VUOSI	2012			TAAJUUS Hz	50	SIRRETTÄVIEN OSIEN PAINO t	1.04	JÄÄHDYTYKSEN DINAN				NIMELLISTEHO kvAr	---	NIMELLISVIRTA A	---	KÄYTTÖ JÄTKUVA				NIMELLISTEHO kvAr	6.40	NIMELLISVIRTA A	5.4-5.4	KÄYTTÖ	2h			IMPEDANSSI jatk. Ω		IMPEDANSSI Ω	2192-219.2					ERISTYSTASO	LI125 AC50 - AC3/AC3							KÄYTTÖMOOTTORI kw	0.55	3x400 V AC						TOISIOIKÄÄMI								LITTIMET		JÄNNITE		TEHO		KÄYTTÖ		M2 - N2 V	500 ±10%	A	160	kVA	80		90s	M1 - N1 V	100 ±10%	A	3	VA	300		DB	k - l	A	75/1	VA	30	TARKK. LUOKKA		1FS5
LAJI	ASR0.63P	VALM. NRO	IEC 60076-6	ULIUS ASENETTÄVÄ	2012																																																																																																																		
KOKONAISPAINO t		1.9		RAKENNE																																																																																																																			
NIMELLISJÄNNITE kv	11.84	ÖLJYN PAINO t	0.51	VALM. VUOSI	2012																																																																																																																		
TAAJUUS Hz	50	SIRRETTÄVIEN OSIEN PAINO t	1.04	JÄÄHDYTYKSEN DINAN																																																																																																																			
NIMELLISTEHO kvAr	---	NIMELLISVIRTA A	---	KÄYTTÖ JÄTKUVA																																																																																																																			
NIMELLISTEHO kvAr	6.40	NIMELLISVIRTA A	5.4-5.4	KÄYTTÖ	2h																																																																																																																		
IMPEDANSSI jatk. Ω		IMPEDANSSI Ω	2192-219.2																																																																																																																				
ERISTYSTASO	LI125 AC50 - AC3/AC3																																																																																																																						
KÄYTTÖMOOTTORI kw	0.55	3x400 V AC																																																																																																																					
TOISIOIKÄÄMI																																																																																																																							
LITTIMET		JÄNNITE		TEHO		KÄYTTÖ																																																																																																																	
M2 - N2 V	500 ±10%	A	160	kVA	80		90s																																																																																																																
M1 - N1 V	100 ±10%	A	3	VA	300		DB																																																																																																																
k - l	A	75/1	VA	30	TARKK. LUOKKA		1FS5																																																																																																																
<p>KYTKENTÄKAAVIO</p> <p>D1-D2 PÄÄKÄÄMI M1-N1 KOMPENSOINTIKÄÄMI M2-N2 KOMPENSOINTIKÄÄMI k-l VIRTAM. TOISIOIKÄÄMI</p>																																																																																																																							
<p>EGE</p>																																																																																																																							
<p>MULTIREL Oy Finland</p>																																																																																																																							
<p>RATING PLATE</p>																																																																																																																							
<p>E1200033</p>																																																																																																																							
<p>Weight ±2% Dimension ±2%</p>																																																																																																																							
<p>SHEET 4</p>																																																																																																																							
<p>8</p>																																																																																																																							
<p>7</p>																																																																																																																							
<p>6</p>																																																																																																																							
<p>5</p>																																																																																																																							
<p>4</p>																																																																																																																							
<p>3</p>																																																																																																																							
<p>2</p>																																																																																																																							
<p>1</p>																																																																																																																							
<p>ORIGINAL</p>																																																																																																																							
<p>REPLACEMENT</p>																																																																																																																							
<p>DATE 7.3.2012</p>																																																																																																																							
<p>DRAWN Sitl</p>																																																																																																																							
<p>VERIFIED Procházka</p>																																																																																																																							
<p>NAME</p>																																																																																																																							
<p>DATE</p>																																																																																																																							
<p>2</p>																																																																																																																							
<p>1</p>																																																																																																																							

LIITE 3: LISÄVASTUKSEN OHJAUSPIIRIKAAVIO



A	D mutos	
B	E mutos	
C	F mutos	



UTU OY
 PL 20, 28401 ULVILA
 Puh. 02-550 800
 Fax. 02-550 8333

POHJOIS-KARJALAN SÄHKÖ OY
 HONKAVAARAN 110/45/20kV
 SÄHKÖASEMA

KOMPENSANTIKELA L2
 PIIRIKAAVIO
 OHJAUS

Swunn	Suunn.	Kokonaissuus	Sähköpositio	Arkiolosasto
SSp /15.2012	SSp /15.2012	OT4:L2	HKV-20002-23	
Torkk /08.11.12	Torkk /08.11.12	Lehti	Piirustusnumero	
Fvk /08.11.12	Fvk /08.11.12	5/8	HKV-20002-23	

LIITE 4: VAMP255 -SUOJARELEEN I_0 JA U_0 HÄIRIÖTALLENTEET MAASULKUKOKEISTA

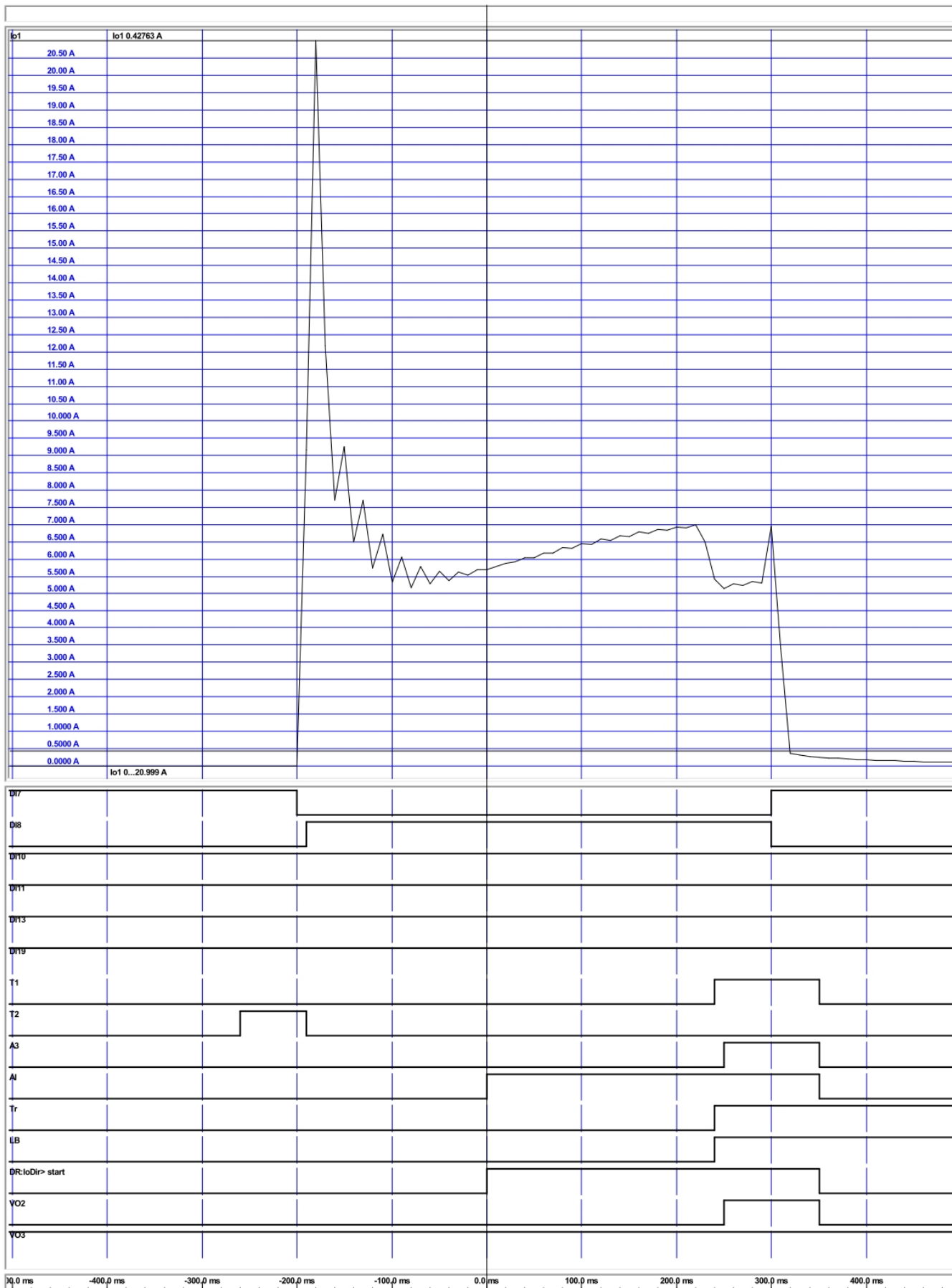
DISTURBANCE RECORD from Pääsuoja

Page 2/7

A1

START TIME: 08/01/2014,09:54:48.917000

TRIG TIME: 08/01/2014,09:54:52.917000

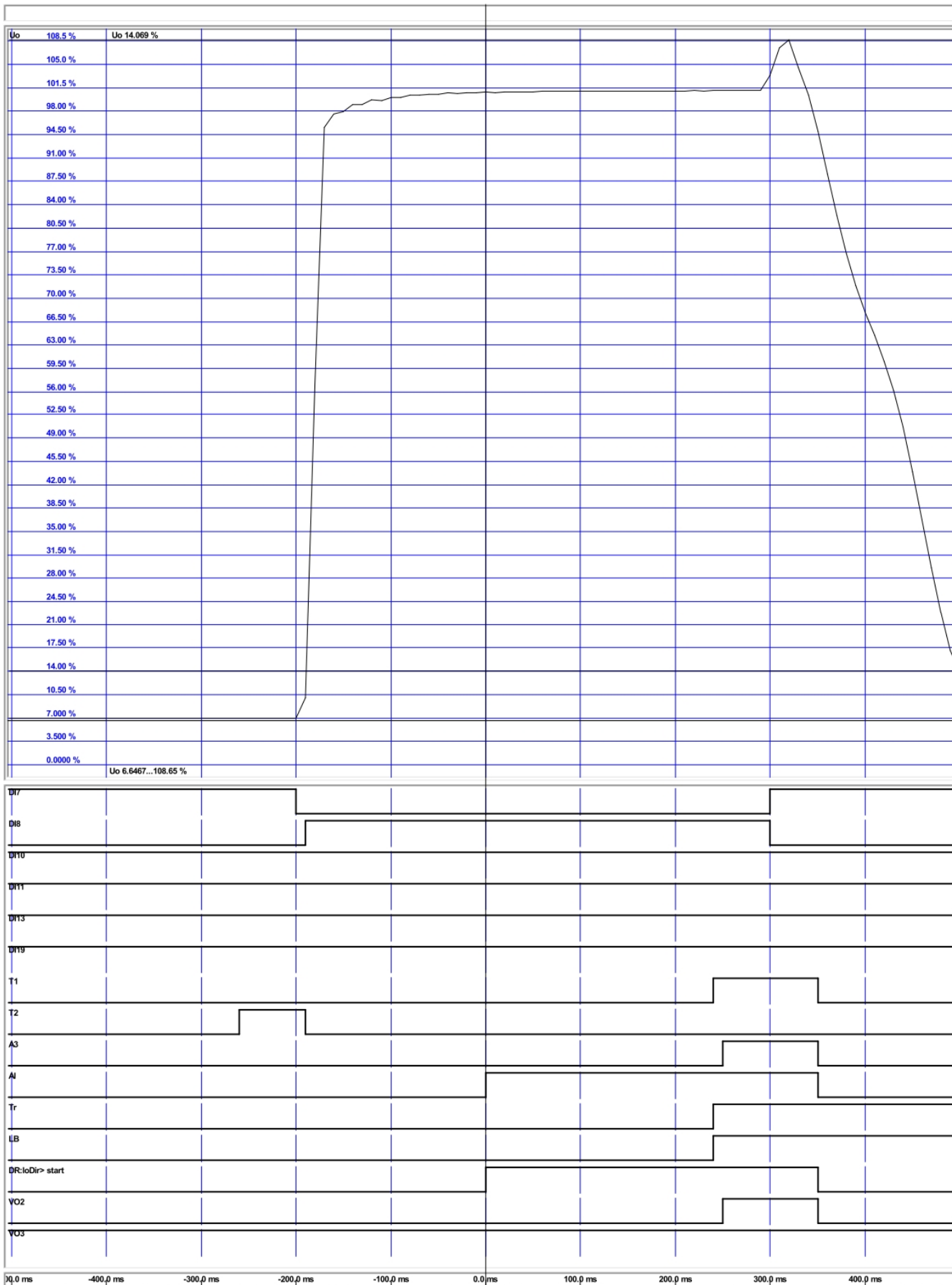


DISTURBANCE RECORD from Pääsuoja

A1

START TIME: 08/01/2014,09:54:48.917000

TRIG TIME: 08/01/2014,09:54:52.917000

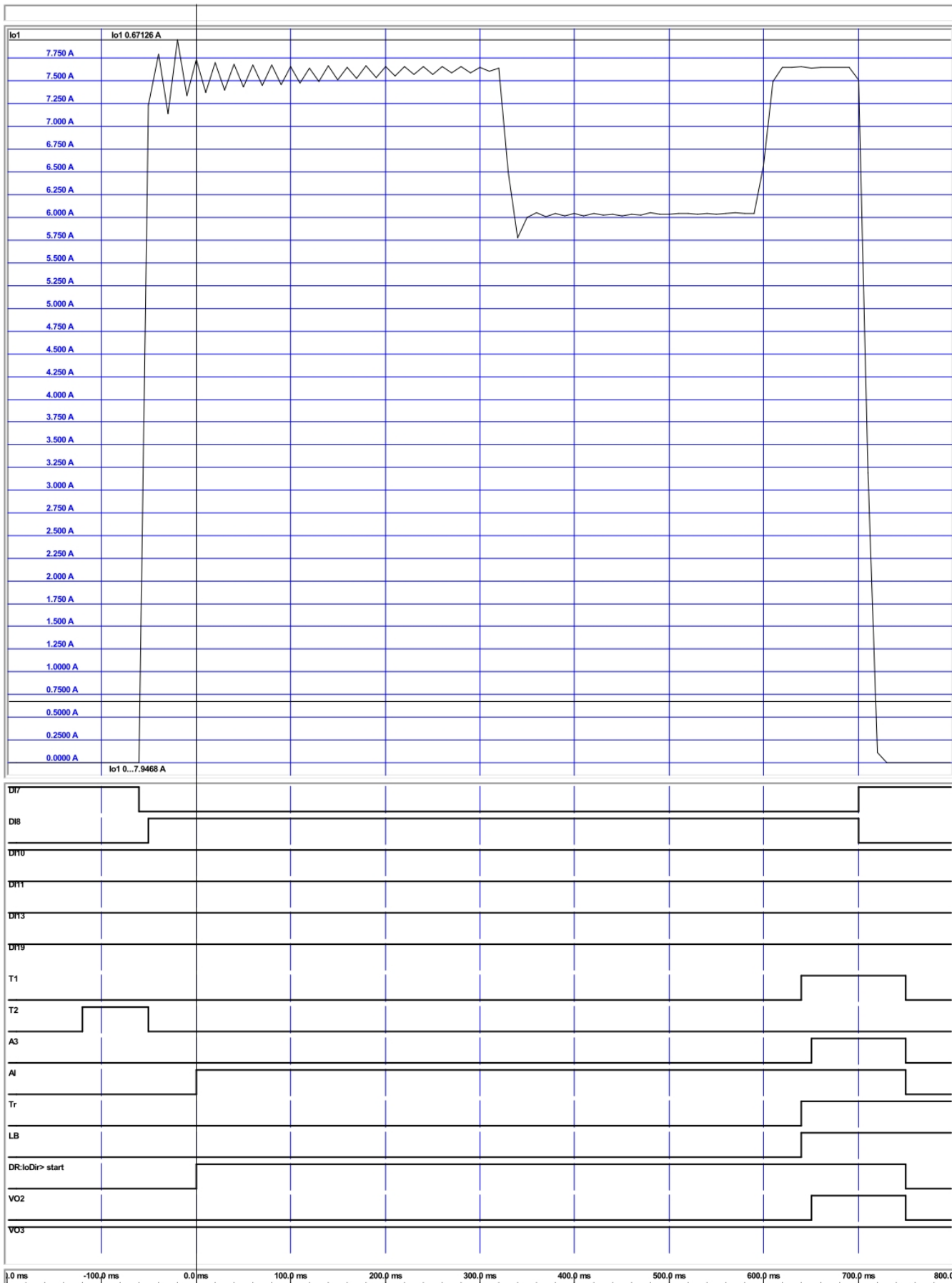


DISTURBANCE RECORD from Pääsuoja

A1

START TIME: 08/01/2014,10:07:31.603000

TRIG TIME: 08/01/2014,10:07:35.603000



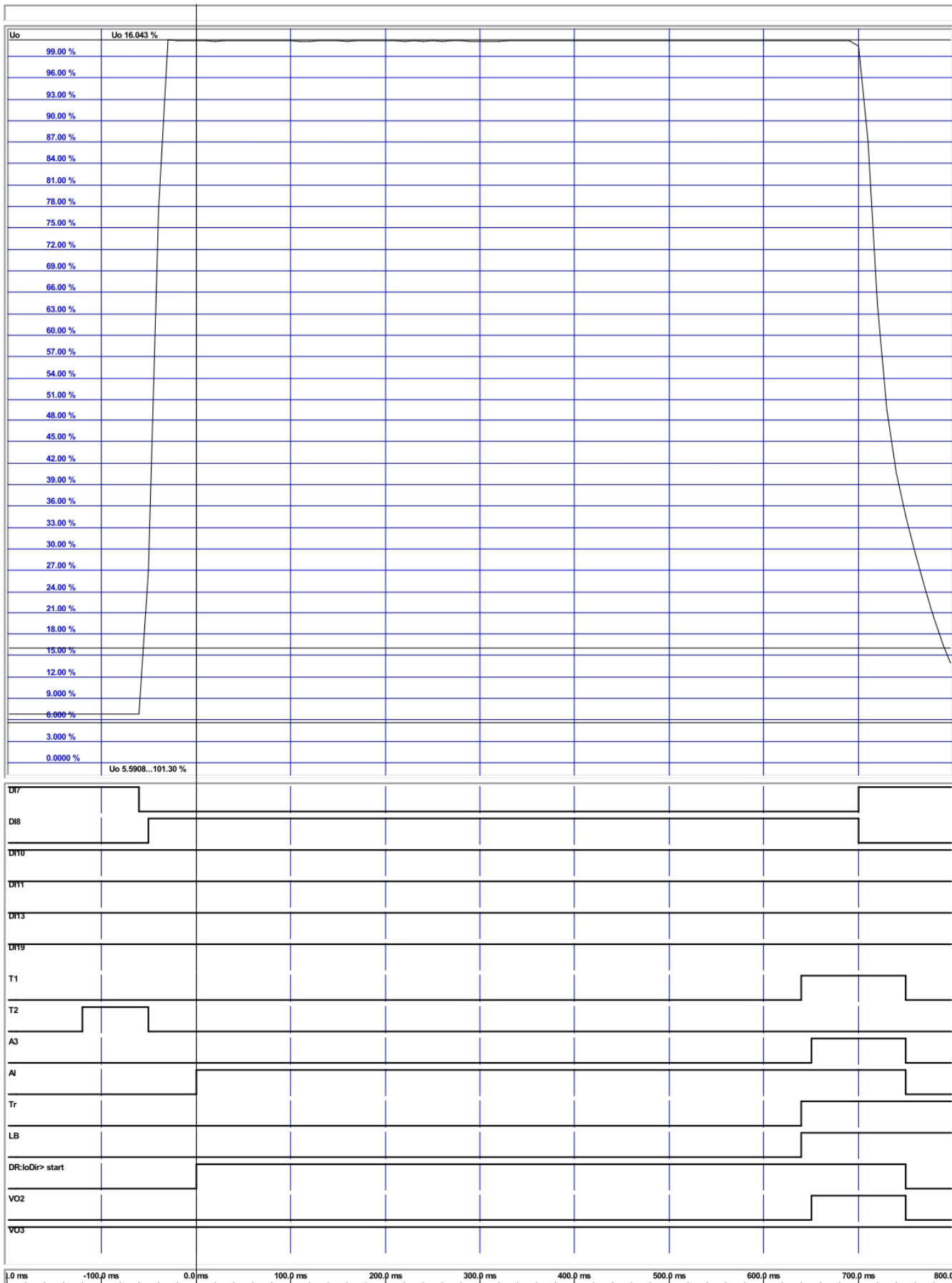
DISTURBANCE RECORD from Pääsuoja

Page 6/7

A1

START TIME: 08/01/2014,10:07:31.603000

TRIG TIME: 08/01/2014,10:07:35.603000

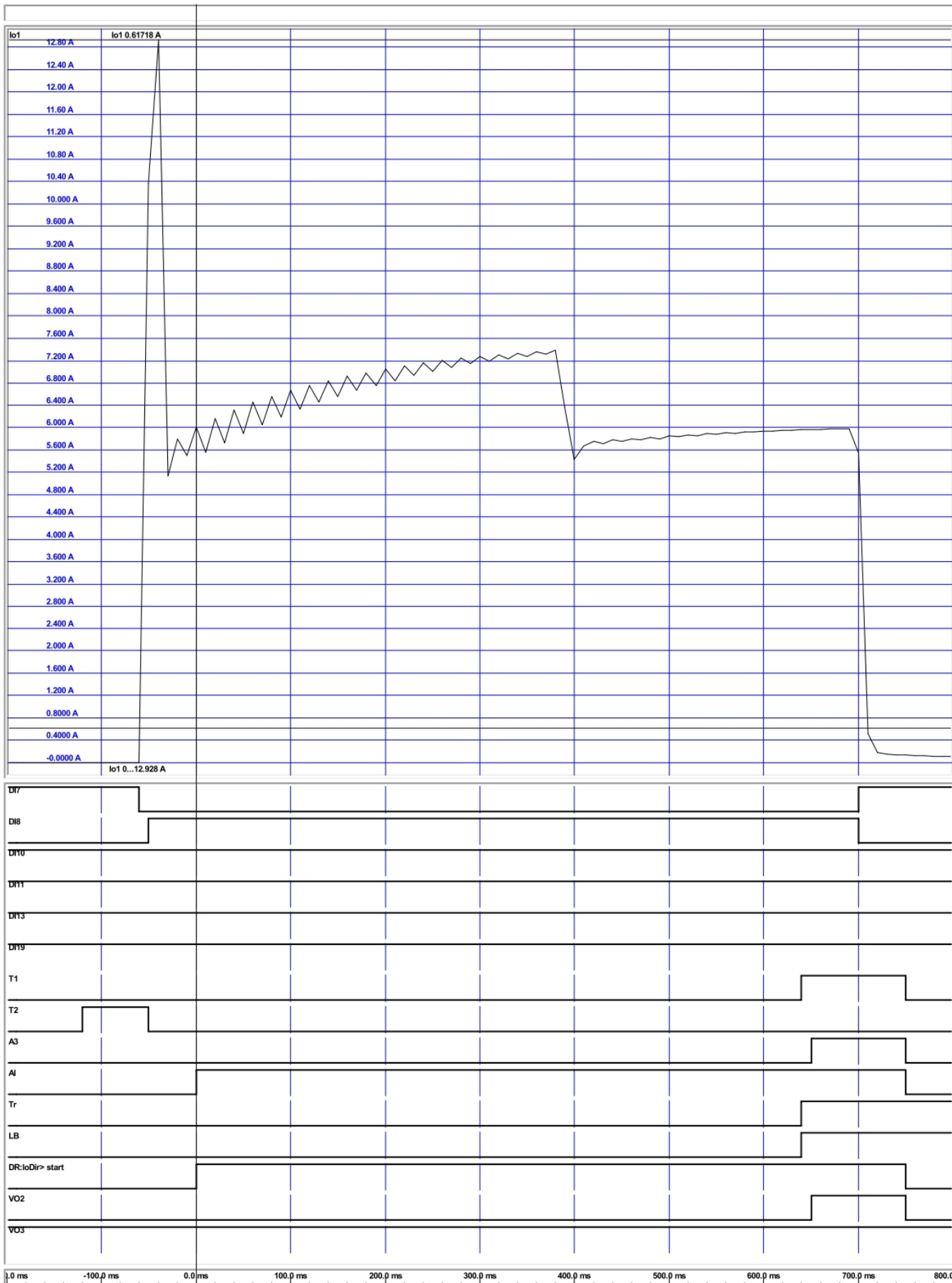


DISTURBANCE RECORD from Pääsuoja

A1

START TIME: 08/01/2014,10:23:54.404000

TRIG TIME: 08/01/2014,10:23:58.404000



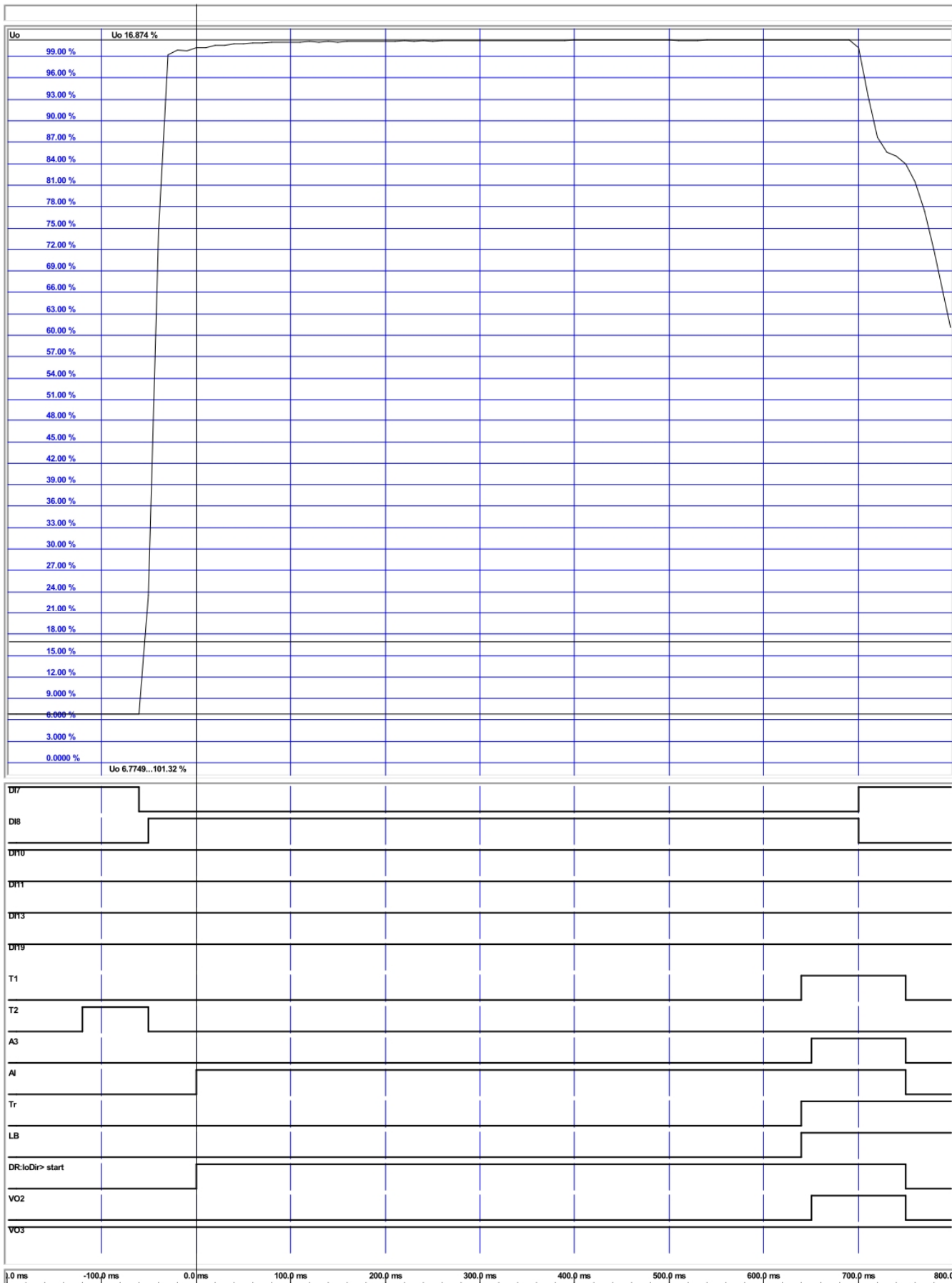
DISTURBANCE RECORD from Pääsuoja

Page 6/7

A1

START TIME: 08/01/2014,10:23:54.404000

TRIG TIME: 08/01/2014,10:23:58.404000

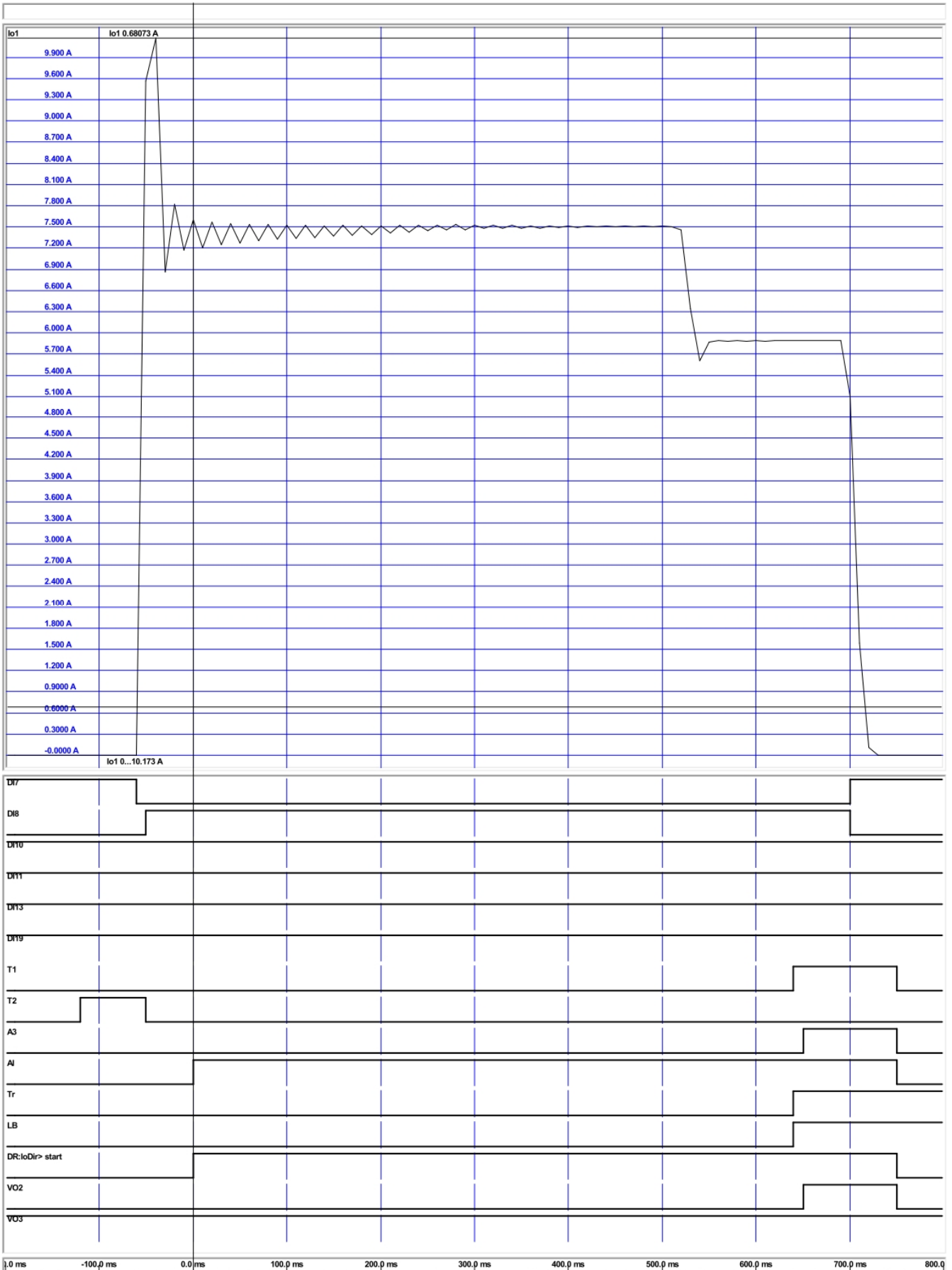


DISTURBANCE RECORD from Pääsuoja

A1

START TIME: 08/01/2014,10:48:04.664000

TRIG TIME: 08/01/2014,10:48:08.664000



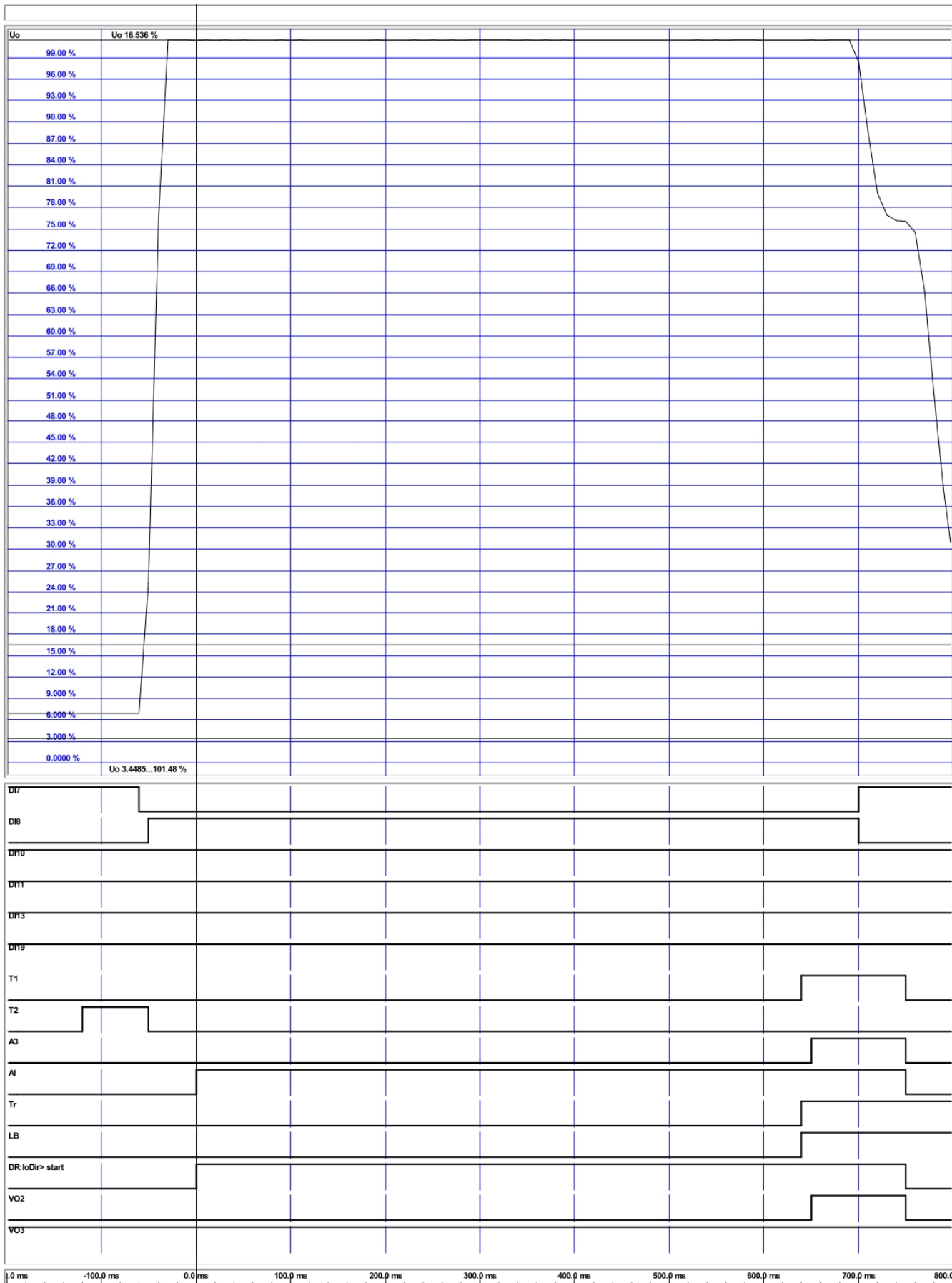
DISTURBANCE RECORD from Pääsuoja

Page 6/7

A1

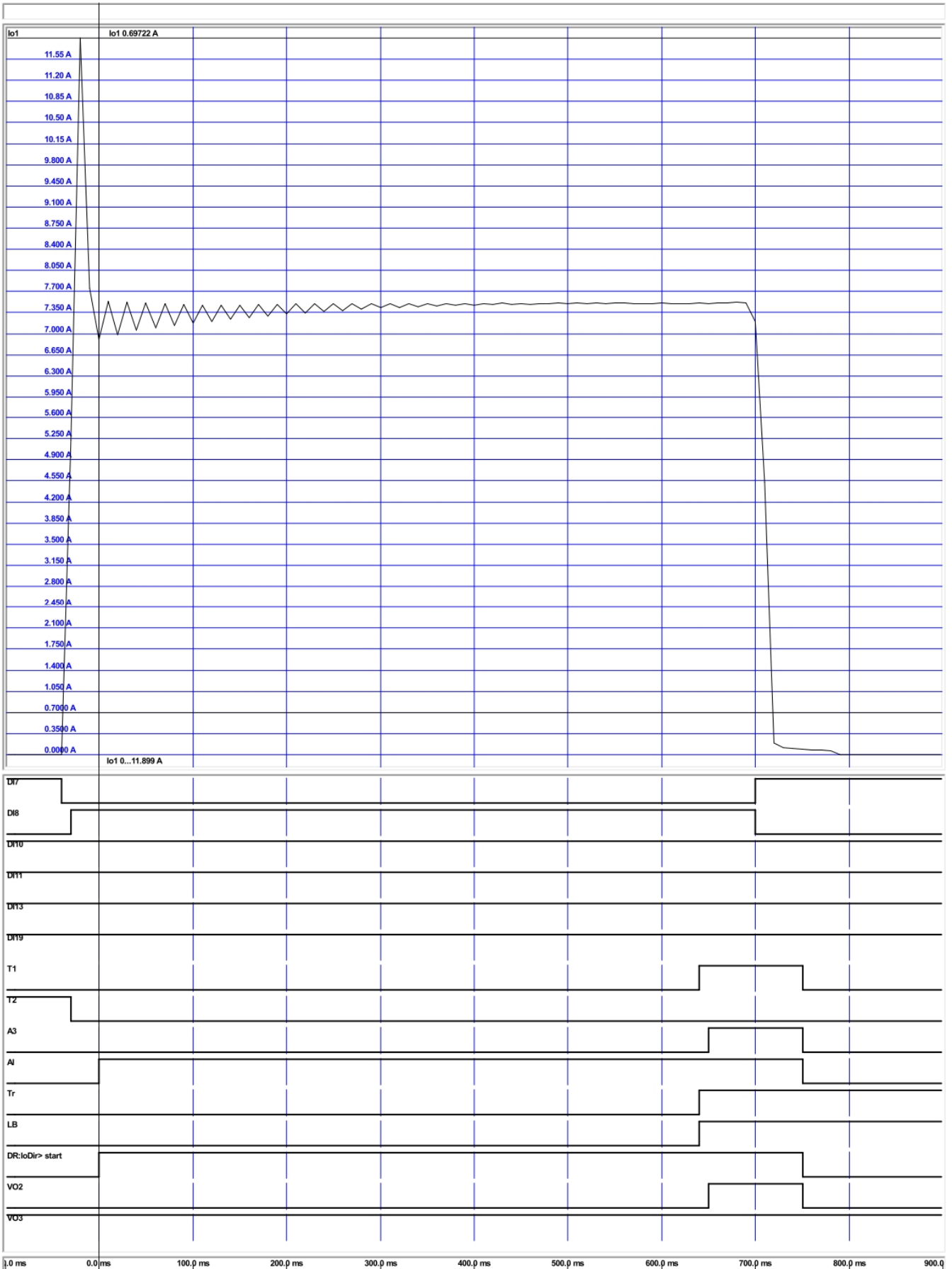
START TIME: 08/01/2014,10:48:04.664000

TRIG TIME: 08/01/2014,10:48:08.664000



DISTURBANCE RECORD from Pääsuoja
A1
START TIME: 08/01/2014,10:51:23.026000
TRIG TIME: 08/01/2014,10:51:27.026000

Page 2/7



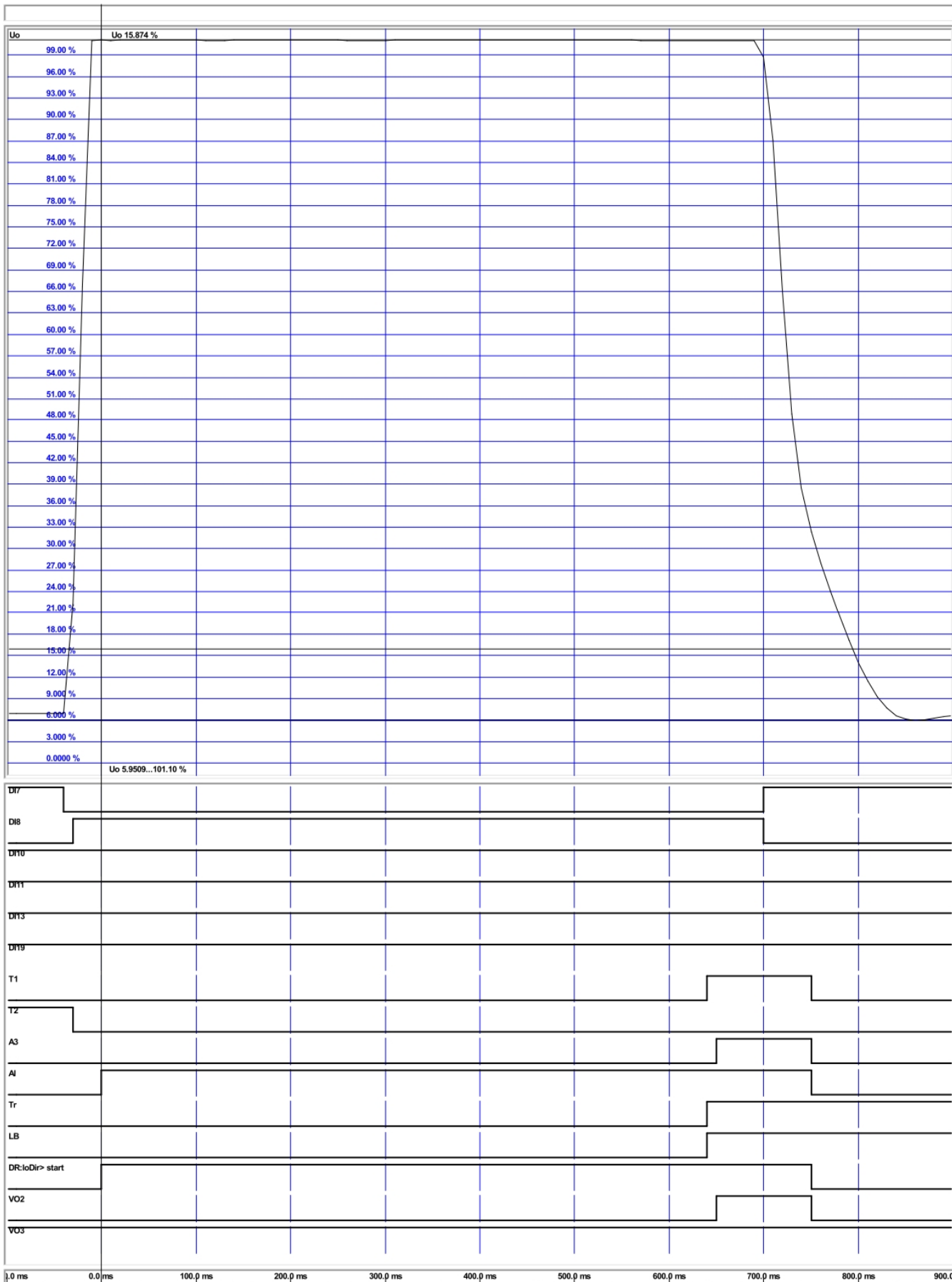
DISTURBANCE RECORD from Pääsuoja

Page 6/7

A1

START TIME: 08/01/2014,10:51:23.026000

TRIG TIME: 08/01/2014,10:51:27.026000



LIITE 5: REG-DPA -SÄÄTÄJÄN LOKI MAASULKUKOKEISTA

2014-01-08 08:54:53,342 BOF 6: Uen>Ugnd come Une= 34,87V 53,0°
2014-01-08 08:54:53,342 BOF 25: R_on go
2014-01-08 08:54:53,342 BO 3 go
2014-01-08 08:54:53,511 BOF 8: Uen>Umax come
2014-01-08 08:54:53,511 BOF 54: Umax_end come Une= 34,87V
2014-01-08 08:54:53,511 BOF 84: Tuned_Umax_endgo Une= 53,0°
2014-01-08 08:54:53,576 BI 3 go lpos= 22,1A
2014-01-08 08:54:53,603 BOF 25: R_on come
2014-01-08 08:54:53,603 BO 3 come
2014-01-08 08:54:53,743 BI 3 come
2014-01-08 08:54:54,146 BOF 6: Uen>Ugnd go Une= 64,34V
2014-01-08 08:54:54,385 BOF 8: Uen>Umax go Une= 4,26V -67,5°
2014-01-08 08:54:54,385 BOF 54: Umax_end go Une= -67,5°
2014-01-08 08:54:54,385 BOF 84: Tuned_Umax_endcome lpos= 22,1A
2014-01-08 09:03:05,874 Time Old Time: 2014-01-08 09:03:04,773
2014-01-08 09:07:37,132 BOF 6: Uen>Ugnd come Une= 6,27V -74,0°
2014-01-08 09:07:37,132 BOF 25: R_on go
2014-01-08 09:07:37,208 BO 3 go
2014-01-08 09:07:37,379 BI 3 go Une= 58,89V 56,7°
2014-01-08 09:07:37,410 BOF 8: Uen>Umax come Une= 56,7°
2014-01-08 09:07:37,410 BOF 25: R_on come lpos= 22,1A
2014-01-08 09:07:37,410 BOF 54: Umax_end come
2014-01-08 09:07:37,410 BOF 84: Tuned_Umax_endgo
2014-01-08 09:07:37,410 BO 3 come
2014-01-08 09:07:37,563 BI 3 come
2014-01-08 09:07:38,188 BOF 6: Uen>Ugnd go Une= 89,43V
2014-01-08 09:07:38,427 BOF 8: Uen>Umax go Une= 7,66V -71,8°
2014-01-08 09:07:38,427 BOF 54: Umax_end go lpos= 22,1A
2014-01-08 09:07:38,427 BOF 84: Tuned_Umax_endcome
2014-01-08 09:08:05,398 Time Old Time: 2014-01-08 09:08:06,289
2014-01-08 09:23:58,946 BOF 6: Uen>Ugnd come Une= 30,23V 51,4°
2014-01-08 09:23:59,023 BOF 8: Uen>Umax come
2014-01-08 09:23:59,023 BOF 25: R_on go Une= 30,23V
2014-01-08 09:23:59,023 BOF 54: Umax_end come Une= 51,4°
2014-01-08 09:23:59,023 BOF 84: Tuned_Umax_endgo lpos= 22,1A
2014-01-08 09:23:59,023 BO 3 go
2014-01-08 09:23:59,296 BI 3 go
2014-01-08 09:23:59,445 BOF 25: R_on come Une= 93,67V 58,9°
2014-01-08 09:23:59,445 BO 3 come
2014-01-08 09:23:59,582 BI 3 come Une= 93,67V
2014-01-08 09:23:59,980 BOF 6: Uen>Ugnd go Une= 28,25V 38,9°
2014-01-08 09:24:00,439 BOF 8: Uen>Umax go Une= 6,35V -73,5° lpos= 22,1A
2014-01-08 09:24:00,439 BOF 54: Umax_end go
2014-01-08 09:24:00,439 BOF 84: Tuned_Umax_endcome
2014-01-08 09:34:54,769 BOF 23: R_auto_on go
2014-01-08 09:34:54,769 BOF 25: R_on go

2014-01-08 09:34:54,769 BO 3	go	Une= 6,30V
2014-01-08 09:34:54,868 BOF 47: R_armed	go	Une= -74,0°
2014-01-08 09:34:55,016 BI 3	go	Ipos= 22,1A
2014-01-08 09:35:02,535 BOF 5: AUTO	go	Une= 8,31V -100,9°
2014-01-08 09:35:02,535 BOF 14: Tuned	go	
2014-01-08 09:35:02,535 BO 8	go	
2014-01-08 09:35:02,535 BO 12	go	
2014-01-08 09:35:02,636 BOF 84: Tuned_Umax_endgo		Une= 8,31V
2014-01-08 09:35:37,734 BOF 23: R_auto_on	come	Une= -102,2°
2014-01-08 09:35:37,734 BOF 25: R_on	come	Ipos= 22,1A
2014-01-08 09:35:37,734 BOF 47: R_armed	come	
2014-01-08 09:35:37,734 BO 3	come	
2014-01-08 09:35:37,890 BI 3	come	
2014-01-08 09:35:51,765 BOF 5: AUTO	come	Une= 6,30V -74,1°
2014-01-08 09:35:51,765 BO 12	come	Une= 6,30V
2014-01-08 09:36:02,116 BOF 53: Search	come	Une= -74,1°
2014-01-08 09:36:02,329 BOF 2: Motor_H	come	Ipos= 22,1A
2014-01-08 09:36:02,329 BO 1	come	
2014-01-08 09:36:20,309 BOF 2: Motor_H	go	Une= 8,40V -11,1° Ipos= 28,9A
2014-01-08 09:36:20,309 BO 1	go	
2014-01-08 09:36:22,586 BOF 3: Motor_L	come	Une= 8,21V
2014-01-08 09:36:22,586 BO 2	come	Une= 8,21V
2014-01-08 09:36:40,240 BOF 3: Motor_L	go	Une= 6,70V -70,7° Ipos= 22,5A
2014-01-08 09:36:40,240 BO 2	go	Ipos= 22,5A
2014-01-08 09:36:44,668 Resonance curve		Ice= 27,2A Iw= 4,6A Ures= 8,86V UresPhi= -29,2° Ifix= 0,0A Iext= 0,0A (Ipos + Ifix + I_Slave)
2014-01-08 09:36:44,751 BOF 14: Tuned	come	Une= 6,53V
2014-01-08 09:36:44,751 BOF 53: Search	go	
2014-01-08 09:36:44,751 BOF 84: Tuned_Umax_endcome		
2014-01-08 09:36:44,751 BO 8	come	Une= 6,53V
2014-01-08 09:38:06,916 Time		Old Time: 2014-01-08 09:38:05,819
2014-01-08 09:40:16,018 BOF 6: Uen>Ugnd	come	Une= -71,9° Ipos= 22,3A
2014-01-08 09:40:16,018 BOF 25: R_on	go	
2014-01-08 09:40:16,018 BO 3	go	
2014-01-08 09:40:16,210 BOF 8: Uen>Umax	come	Une= 87,00V 58,3°
2014-01-08 09:40:16,210 BOF 25: R_on	come	
2014-01-08 09:40:16,210 BOF 54: Umax_end	come	Une= 87,00V
2014-01-08 09:40:16,210 BOF 84: Tuned_Umax_endgo		Une= 58,3°
2014-01-08 09:40:16,210 BO 3	come	Ipos= 22,3A
2014-01-08 09:40:16,300 BI 3	go	
2014-01-08 09:40:16,379 BI 3	come	
2014-01-08 09:40:16,866 BOF 47: R_armed	go	Une= 93,06V
2014-01-08 09:40:16,994 BOF 6: Uen>Ugnd	go	
2014-01-08 09:40:17,202 BOF 8: Uen>Umax	go	Une= 8,99V -53,7°
2014-01-08 09:40:17,202 BOF 54: Umax_end	go	Une= -53,7°
2014-01-08 09:40:17,202 BOF 84: Tuned_Umax_endcome		Ipos= 22,3A
2014-01-08 09:43:06,468 Time		Old Time: 2014-01-08 09:43:07,372
2014-01-08 09:47:15,233 BOF 47: R_armed	come	Une= 6,37V -73,3°
2014-01-08 09:48:09,322 BOF 6: Uen>Ugnd	come	Une= 47,98V 54,8°

2014-01-08 09:48:09,470 BOF 8: Uen>Umax	come
2014-01-08 09:48:09,470 BOF 25: R_on	go Une= 47,98V
2014-01-08 09:48:09,470 BOF 54: Umax_end	come Une= 54,8°
2014-01-08 09:48:09,470 BOF 84: Tuned_Umax_endgo	lpos= 22,3A
2014-01-08 09:48:09,470 BO 3	go
2014-01-08 09:48:09,635 BOF 25: R_on	come
2014-01-08 09:48:09,635 BO 3	come
2014-01-08 09:48:09,695 BI 3	go
2014-01-08 09:48:09,759 BI 3	come Une= 93,56V
2014-01-08 09:48:10,389 BOF 6: Uen>Ugnd	go Une= 15,24V -4,2°
2014-01-08 09:48:10,389 BOF 54: Umax_end	go lpos= 22,3A
2014-01-08 09:48:10,464 BOF 84: Tuned_Umax_end	come
2014-01-08 09:48:10,850 BOF 8: Uen>Umax	go Une= 6,41V -72,8°
2014-01-08 09:51:27,832 BOF 6: Uen>Ugnd	come Une= 10,84V 19,4°
2014-01-08 09:51:28,031 BOF 8: Uen>Umax	come Une= 93,23V 58,2°
2014-01-08 09:51:28,031 BOF 54: Umax_end	come Une= 93,23V
2014-01-08 09:51:28,031 BOF 84: Tuned_Umax_endgo	Une= 58,2°
2014-01-08 09:51:28,507 BOF 6: Uen>Ugnd	go Une= 47,49V 50,0° lpos= 22,3A
2014-01-08 09:51:29,107 BOF 8: Uen>Umax	go Une= 6,41V -73,7°
2014-01-08 09:51:29,107 BOF 54: Umax_end	go
2014-01-08 09:51:29,107 BOF 84: Tuned_Umax_end	come
2014-01-08 09:56:32,578 BOF 6: Uen>Ugnd	come
2014-01-08 09:56:32,916 BOF 8: Uen>Umax	come Une= 81,57V 57,8°
2014-01-08 09:56:32,916 BOF 54: Umax_end	come Une= 57,8°
2014-01-08 09:56:32,916 BOF 84: Tuned_Umax_endgo	lpos= 22,3A
2014-01-08 09:56:33,576 BOF 6: Uen>Ugnd	go Une= 65,99V
2014-01-08 09:56:33,754 BOF 8: Uen>Umax	go Une= 6,39V -73,4°
2014-01-08 09:56:33,754 BOF 54: Umax_end	go
2014-01-08 09:56:33,754 BOF 84: Tuned_Umax_end	come