

3 x 32 A suojaerotusmuuntajien suunnittelu, toteutus ja koestus

Ville Kankkunen

Opinnäytetyö

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Elektroniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Ville Kankkunen			
Työn nimi 3 x 32 A suojaerotusmuuntajien suunnittelu, toteutus ja koestus			
Päiväys	29.2.2012	Sivumäärä/Liitteet	53 / 77
Ohjaaja(t) lehtori Heikki Laininen			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia-ammattikorkeakoulun EMC-laboratorio			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella, toteuttaa ja koestaa kaksi kappaletta suojaerotusmuuntajakokonaisuuksia. Työ tehtiin Savonia-ammattikorkeakoulun EMC-laboratoriolle, joka tarjoaa sähkö- ja elektroniikkateollisuuden tuotekehityksille testauspalveluita. Muuntajia tullaan käyttämään syöksyaallon sietotestauksessa, joka kuuluu osana EMC-direktiivin mukaista testausta. Tuotteen avulla voidaan luoda standardin mukainen testiasetelma testattaessa suojattuja linjoja.</p> <p>Suojaerotusmuuntajien nimellisteho on 22 kVA, jolloin kuormana voidaan käyttää jopa 32 A:n kolmivaihelaitetta. Tärkeänä vaatimuksena työssä oli toteuttaa muuntajan ensiö- ja toisiopuolen väliseksi eristysvaatimukseksi 8,0 kV:n jännitekesto. Toisena vaatimuksena oli toteuttaa muuntajan ensiöpuolelle vaimenninpiiri, joka vähentää muuntajan käynnistyksessä ilmenevää magnetoitumisvirtapiikkiä.</p> <p>Työ jakautui kolmeen osa-alueeseen: laitteen suunnitteluun, toteutukseen ja koestukseen. Muuntajat toteutettiin valmiiksi hankittujen käämipakettien ympärille. Kaikki toteutukset tehtiin LVD- ja EMC-määräykset huomioiden. Direktiivien vaatimustenmukaisuus osoitettiin osittain testaamalla laite standardien mukaisesti ja osittain teknisten johtopäätöksien ja määrittelyjen perusteella.</p> <p>Lopputuloksena on saatu vaatimusten mukainen suojaerotusmuuntajakokonaisuus kotelointi- ja rajapintavaatimuksineen. Muuntajille tehtiin kaikki CE-merkintään liittyvät viranomaisten vaatimat testaukset ja dokumentoinnit.</p>			
Avainsanat suojaerotusmuuntaja, tuotetestaus, sähkömagneettinen yhteensopivuus, pienjännitedirektiivi			
julkinen			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electronic Engineering			
Author(s) Ville Kankkunen			
Title of Thesis Design, Implementation and Testing of 3 x 32 A Isolation Transformers			
Date	29 February 2012	Pages/Appendices	53 / 77
Supervisor(s) Mr. Heikki Laininen, Lecturer			
Client Organization/Partners Savonia University of Applied Sciences, EMC laboratory			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to design, build and test two isolation transformers. The thesis was done for the EMC laboratory of Savonia University of Applied Sciences which offers testing services for research and development companies in the field of electricity and electronics. The isolation transformers will be used in surge immunity testing which is a part of testing according to the EMC directive. The test setup for testing shielded lines can be created with these transformers.</p> <p>The rated power of the transformers is 22 kVA which enables the use of 32 A three phase devices. An important requirement in this thesis was to implement an 8 kV withstand voltage between the primary and secondary windings. Another requirement was to build an attenuator circuit that would reduce the inrush current when the transformer is powered on.</p> <p>The work was divided into three main sections: design, implementation and testing of the device. The transformers were built around windings that were purchased ready-made. The implementation was done taking into consideration LVD and EMC regulations. Compliance with the directives was based on testing results and technical specifications.</p> <p>The result of this thesis was a well-executed isolation transformer with the preferred enclosure and interface demands. All the tests and documentation relating to the CE mark required by the authorities were included in this thesis.</p>			
Keywords isolation transformer, product testing, electromagnetic compatibility, low voltage directive			
public			

ALKUSANAT

Tein opinnäytetyöni Savonia-ammattikorkeakoulun EMC-laboratoriolle vuoden 2011 aikana. Työ toi paljon uutta tietoa tuotteen suunnittelusta, rakentamisesta ja testauksesta. Varsinkin sähkölaitteiden EMC- ja LVD-asioista opin hyvin paljon uutta ja niistä on paljon hyötyä jatkossa urallani.

Haluan kiittää opinnäytetyöni ohjaajaa lehtori Heikki Lainista ja EMC-laboratorion teknistä vastaavaa Matti Tiustasta ja testausinsinöörejä Tero Siparia sekä Marko Sor-saa. Iso kiitos kuuluu myös avopuolisolleni Mirkalle ja perheelleni opiskeluaikana saamastani tuesta ja avusta.

Kuopiossa 29.2.2012

Ville Kankkunen

SISÄLTÖ

KÄSITTEET JA LYHENTEET

1	JOHDANTO.....	11
2	MUUNTAJA.....	12
2.1	Muuntajan toimintaperiaate.....	12
2.2	Kolmivaihemuuntajat	13
2.2.1	Kytkenät.....	14
2.2.2	Kytkeväävirtasysäys.....	16
2.3	Suojaerotusmuuntajan toimintaperiaate.....	17
3	SYÖKSYAALLON SIETOTESTAUS	19
3.1	Syöksyaallon aaltomuoto	19
3.2	Suojaerotusmuuntaja testauksessa	20
4	DIREKTIIVIT JA STANDARDIT.....	21
4.1	Pienjännitedirektiivi.....	21
4.2	EMC-direktiivi	22
4.3	Vaatimustenmukaisuusvakuutus ja CE-merkintä	22
4.4	Tekninen tiedosto	23
5	SUUNNITTELU	24
5.1	Kotelointi	25
5.2	8 kV:n eristysvaatimuksen toteuttaminen.....	25
5.3	Magnetoitumisvirran rajoittaminen	26
5.4	Muuntajien hankinta	27
6	TOTEUTUS.....	29
6.1	Ensiöpuoli	30
6.2	Toisiopuoli	31
7	KOESTUS	36
7.1	EMC-testaus.....	36
7.1.1	Säteilevä emissio.....	36
7.1.2	Johtuva emissio	39
7.1.3	Nopeat transientit ja purskeet	40
7.1.4	Syöksyaallon sieto	40
7.1.5	Verkkotaajuuden magneettikentän sieto	41
7.1.6	Jännitteenalenemat ja lyhyet katkokset.....	42
7.1.7	Staattisen sähkön purkaus	43
7.2	LVD-testaus	43
7.2.1	Lämpötilamittaus.....	43

7.2.2	Maadoituksen jatkuvuus.....	46
7.2.3	Eristysresistanssi	46
7.2.4	Eristelujuus	47
8	DOKUMENTOINTI.....	48
8.1	Testausraportti	49
8.2	Tekninen tiedosto	49
8.3	Vaatimustenmukaisuusvakuutus	50
9	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	51
	LÄHTEET	52

LIITTEET

Liite 1 3KP23-22k-400_400 MT13803 tekniset tiedot

Liite 2 Kytkenäkaavio

Liite 3 Tekninen tiedosto

Liite 4 Compliance test report

Liite 5 Käyttö- ja huolto-ohjeet

Liite 6 Declaration of Conformity

Liite 7 Valmis suojaerotusmuuntaja 3P32-22kVA

KÄSITTEET JA LYHENTEET

EMC	Electromagnetic Compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
EUT	Equipment Under Test, testattava laite
LVD	Low Voltage Directive, pienjännitedirektiivi
PE	Protective earth, suojamaadoitus

1 JOHDANTO

Työn tarkoituksena on toteuttaa kaksi identtistä suojaerotusmuuntajaa. Muuntajia tullaan käyttämään standardin IEC/EN 61000-4-5 määrittelemässä syöksyaallon sietotestauksessa osana standardin mukaista testausasettelua. Muuntajien toteutuksessa tulee soveltaa pienjännitedirektiivin mukaista standardia IEC 61558-2-4:2009, jossa on määritelty suojaerotusmuuntajalle erityiset vaatimukset ja testit. Muuntajien EMC- ja pienjännitedirektiivien vaatimustenmukaisuus todennetaan testauksilla ja luomalla laitteesta tekninen tiedosto.

Työn tilaajana on Savonia-ammattikorkeakoulun EMC-laboratorio. EMC-laboratoriolla on valmiina laitteisto syöksyaallon sietotestauksen toteuttamiseen, mutta suojattujen kaapelien testausasetelmaan tarvittavat 3 x 32 A:n suojaerotusmuuntajat puuttuvat. Suojaerotusmuuntajat toteutetaan opinnäytetyönä, koska tällöin muuntajat pystytään valmistamaan vaadituilla rajapintavaatimuksilla.

Suojaerotusmuuntajien toteutuksessa tulee ottaa huomioon sähkölaitteen suunnitteluun ja rakentamiseen liittyviä seikkoja. Perehtyminen sähköturvallisuusvaatimuksiin ja EMC-ilmiöihin kuuluu olennaisesti tähän työhön.

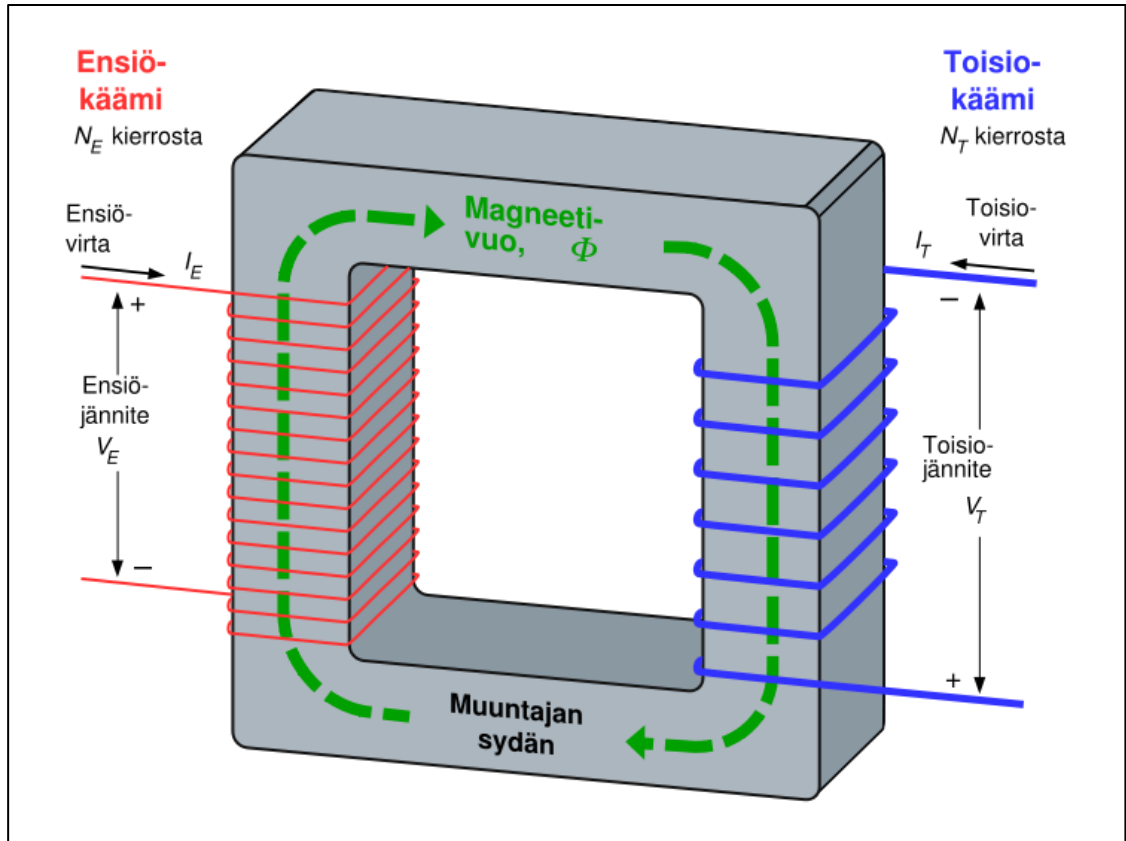
2 MUUNTAJA

Muuntaja on vain vaihtosähköllä toimiva sähkökone, joka on aikoinaan lähes kokonaan syrjäyttänyt tasasähkön ja yleistänyt vaihtosähkön käytön. Muuntaja on rakenteeltaan hyvin yksinkertainen laite, joka koostuu normaalisti ensiö- ja toisiokäämeistä, jotka on asennettu samalle rautasydämelle. Siinä ei ole ollenkaan liikkuvia osia. (Aura & Tonteri 1996, 7.)

Muuntajat voidaan jakaa tehtäviensä puolesta kolmeen eri ryhmään: voima-, mitta- ja suojamuuntajiin. Voimamuuntajia käytetään sähköenergian siirron vaatimien tarpeiden mukaisesti muuntamaan jännite U_1 jännitteeksi U_2 . Mittamuuntajien, jotka jaetaan jännite- ja virtamuuntajiin, tehtävänä on muuntaa jännite tai virta mittalaitteille tai releille sopivaksi. Suojamuuntajan tehtävänä on eristää sähkölaite yleisestä sähköverkosta. (Aura & Tonteri 1996, 7.)

2.1 Muuntajan toimintaperiaate

Muuntajalla pystytään muodostamaan voimakas induktiivinen kytkentä kahden virtapiirin välille. Kuvassa 1 nähdään yksivaiheisen muuntajan rakenne. Se koostuu ensiö- (N_E) ja toisiokäämistä (N_T), jotka on asennettu samalle rautasydämelle. Teho siirtyy käämistä toiseen keskinäisinduktanssin ansiosta lähes häviöttömästi. Kun ensiökäämille tuodaan virta I_E , synnyttää se rautasydämeen muuttuvan magneettivuon Φ . Tämän seurauksesta toisiokäämiin indusoituu jännite V_T , joka synnyttää toisiopiiriin vaihtovirran I_T . Toisiokäämiin siirtynyt teho E_T on yhtä suuri kuin ensiökäämiin syötetty teho E_E , jos oletetaan, että muuntajan tehohäviöt ovat mitättömän pienet. (Aura & Tonteri 2002, 269.)



KUVA 1. Yksivaihemuuntajan rakennekuva (Wikipedia 2006)

Muuntajan avulla voidaan syötetyn vaihtojännitteen huippuarvoa säätää pienemmäksi tai suuremmaksi. Muutetun jännitteen taajuus pysyy samana. Muuntajan muuntosuhde μ ilmaisee ensiö- ja toisiokäämien jännitteiden suhdetta, ja se on yhtä suuri kuin johdinkierrosten lukumäärien suhde (Laajalehto & Suvanto 2006, 339.):

$$\mu = \frac{V_E}{V_T} = \frac{E_E}{E_T} = \frac{I_T}{I_E} = \frac{N_E}{N_T} \quad (1)$$

2.2 Kolmivaihemuuntajat

Kolmivaihemuuntaja saadaan kytkemällä yhteen kolme yksivaihemuuntajaa. Muuntajien ensiö- ja toisiokäämit on liitetty yhteen vain sähköisesti. Ne eivät ole magneettisesti kytketty, koska jokaisen muuntajan magneettivuo kulkee omassa rautasydämessään. Jokainen yksivaihemuuntaja muodostaa kolmivaihemuuntajan yhden vaiheen. Kaikki yksivaihemuuntajaan liittyvä toiminta pätee näin myös kolmivaihemuuntajan yhteen vaiheeseen. Tästä syystä voidaan kolmivaihemuuntajan toimintaa tarkastella yhtä vaihetta tarkastelemalla. Tässä työssä käytetty muuntaja on kolmivai-

heinen tehomuuntaja, jossa on lisäeristys ensiö- ja toisiokäämien välillä. (Aura & Tonteri 1996, 38.)

2.2.1 Kytkennät

Kolmivaihemuuntajan kytkentöihin on olemassa standardoidut kytkentämerkinnät. Vaihekäämit on mahdollista kytkeä joko kolmioon, tähteen tai hakatähteen. Yhteensä erilaisia kytkentöjä on 12. Ne jakautuvat neljään eri kytkentäryhmään, joiden tunnusluvut ovat 0, 5, 6 ja 11. Näissä jokaisessa on kolme erilaista kytkentää, jotka voidaan nähdä taulukossa 1. (Aura & Tonteri 1996, 40.)

TAULUKKO 1. Muuntajien kytkentäryhmät. Yleisimmät Suomessa käytetyt kytkennät ovat Yy0, Dy11, Yd11 ja Yz11. (Tiainen & Vitikka 2004, 34)

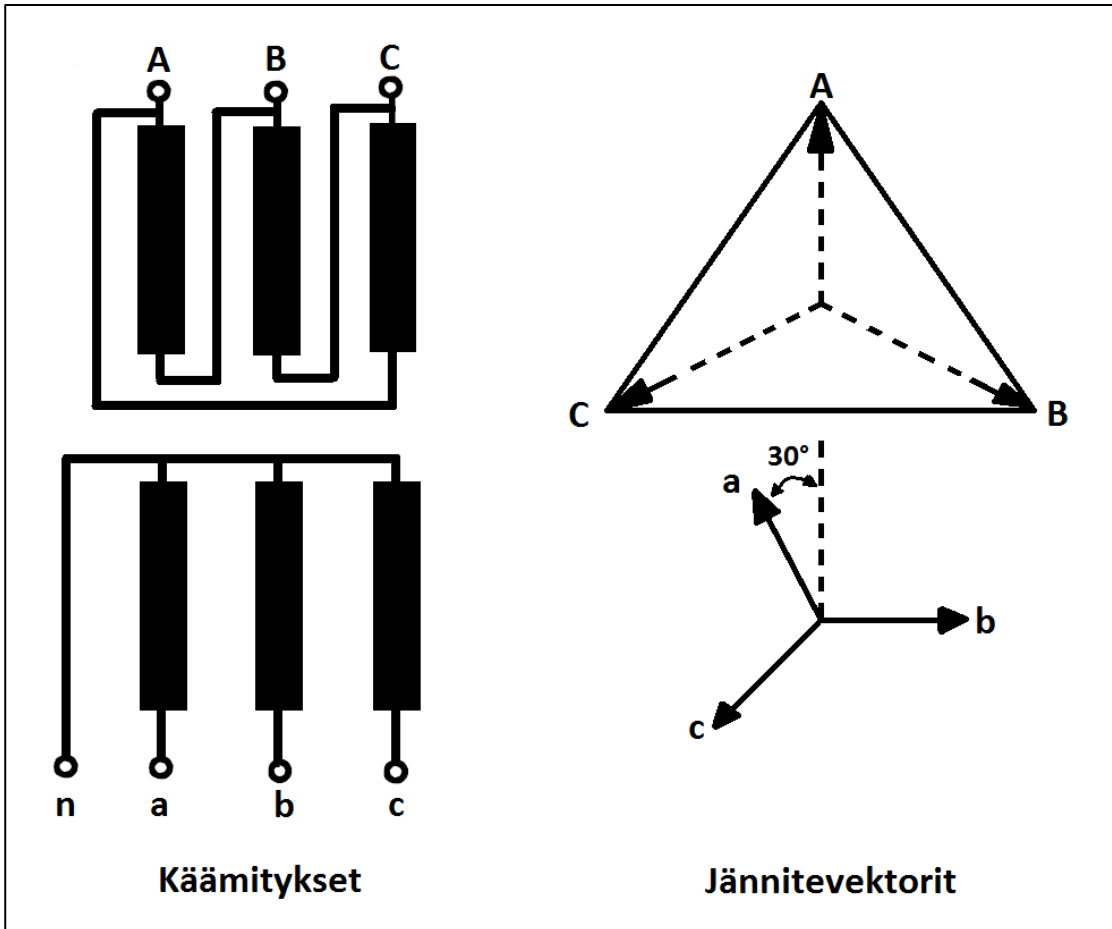
Tunnus-luku	Kytkentä	Vektorikaavio
0	Dd 0	
	Yy 0	
	Dz 0	
5	Dy 5	
	Yd 5	
	Yz 5	
6	Dd 6	
	Yy 6	
	Dz 6	
11	Dy 11	
	Yd 11	
	Yz 11	

Kytkenöt kuvataan seuraavilla kirjainsymboleilla:

- D = ensiökäämi kolmiokytkennässä
- Y = ensiökäämi tähtikytkennässä
- d = toisiökäämi kolmiokytkennässä
- y = toisiökäämi tähtikytkennässä
- z = toisiökäämi hakatähtikytkennässä.

Jos käytössä on käämityksen nolapiste, merkitään se ensiöpuolella kirjaimella N ja toisiopuolella kirjaimella n, esimerkiksi YNyn0. Kolmio- ja tähtikytkentää käytetään yleisesti kaikissa kolmivaiheisissa muuntajasovelluksissa. Hakatähtikytkentä on hie-man harvinaisempi ja sitä käytetään ainoastaan jakelumuuntajissa. Se vastaa sähkö-johdon kannalta täysin tähtikytkentää, mutta sallii epäsymmetrisen kuormituksen. Konkreettisenä erona on, että käämi on jaettu kahteen osaan. Haittana on, että haka-tähtikytkentään tarvitaan 15,5 % enemmän johdinkierroksia. (Aura & Tonteri 2002, 282.)

Tunnusluvut kuvaavat kytkennän vaihekulmaeroa toisiinsa nähden, niiden ilmaisemi- seen käytetään kellotaulun tuntilukuja. Tunnusluku ilmoittaa kohdan kellotaulusta, johon toisiojänniteosoitin asettuu, kun vastaava ensiöjänniteosoitin asetetaan osoit- tamaan kello 12:ta. Koska kellossa on 12 tuntia ja ympyrä koostuu 360°:sta, edustaa jokainen tunti 30°:ta. Tunnusluku 1 tarkoittaa silloin, että toisiojännite on 30° en- siöjännitettä edellä. 0 ilmoittaa, että jännitevektorit ovat samansuuntaiset. Tunnusluku ilmoitetaan toisiökäämin kirjainsymbolin jälkeen. Se on pariton, jos toinen käämeistä on kytketty tähteen ja toinen joko kolmioon tai hakatähteen. Muulloin se on parillinen. (Tiainen & Vitikka 2004, 33.)



KUVA 2. Kytkenässä Dyn11 on ensiöpuoli kolmiokytkennässä ja toisiopuoli tähtikytkennässä, josta on luotu nollapiste. Toisiojännite on 30° :ta edellä ensiojännitettä. (muokattu Tiainen & Vitikka 2004, 34)

2.2.2 KytKentävirtasysäys

KytKentävirtasysäys on sähkölaitteille, varsinkin muuntajille ja muille hyvin induktiivisille laitteille ominainen piirre. Sillä viitataan maksimaaliseen ja hetkelliseen syöttövir-tapiikkiin, jonka laite imee sähköverkosta päällekytkentähetkellä. KytKentävirtasysä-yksen muodostuminen perustuu muuntajassa olevan rautasydämen kyllästymiseen. Ilmiö tulee ottaa huomioon suojalaitteiden suunnittelussa, jotta niiden virheellinen laukeaminen voidaan estää. Sitä kutsutaan myös nimellä magnetoitumisvirta. (Tiainen & Vitikka 2004, 32.)

Jännitteetön muuntaja, jonka sydämen magneettivuo on virran kytKentähetkellä lähes nolla, siirtyy jatkuvuustilaan aina tasoitusilmiön kautta. Tämä johtuu rautasydämen magneettisesta hitaudesta. Virtasysäyksen arvo riippuu kytKentäjännitteen hetkelli-

sestä arvosta. Jos jännitteellä on huippuarvo kytkentähetkellä, ei magneettivuossa eikä virrassa synny suuria tasoitusilmiöitä. Tasoitusilmiö on suurimmillaan, kun jännitteen hetkellisarvo on kytkemishetkellä nolla. Tämän johtuu siitä, että magneettivuo nousee tällöin sinimuotoisena epäsymmetrisesti nolasta ensimmäiseen huippuarvoonsa. Näin muuntajan sydän kyllästyy ja magnetoimisvirta nousee voimakkaasti. On huomattu, että ensimmäisen virtapiikin huippuarvo voi olla pahimmassa tapauksessa jopa noin 8–12-kertainen muuntajan nimellisvirran huippuarvoon nähden. Virta vaimenee kuitenkin nopeasti piirissä olevan resistanssin ansiosta puoleen arvoonsa, noin 0,05–0,15 sekunnissa, ja saavuttaa jatkuvuustilan noin sekunnin kuluttua. (Tiainen & Vitikka 2004, 32.)

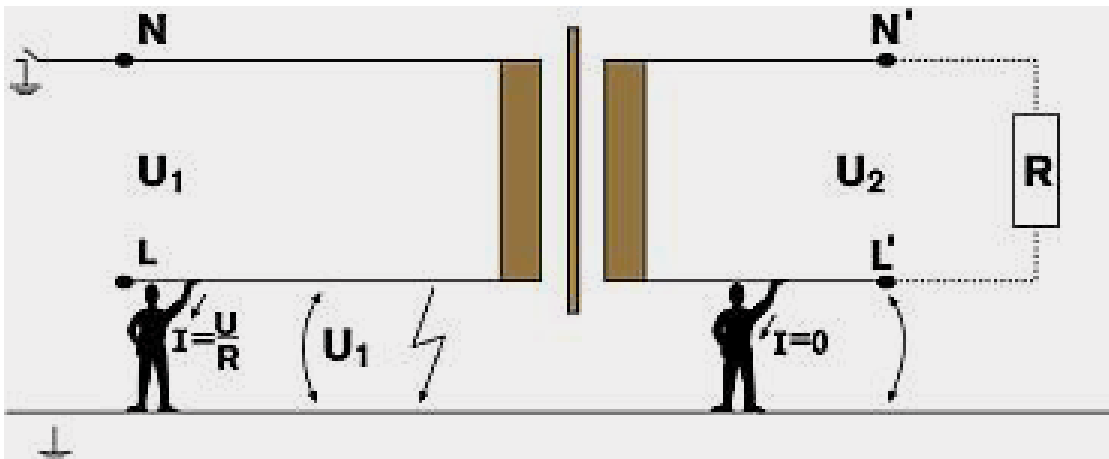
2.3 Suojaerotusmuuntajan toimintaperiaate

Suojaerotusmuuntaja on täysin samanlainen kuin mikä tahansa tehomuuntaja, mutta se toimii yleensä 1:1 muuntosuhteella. Sen ensiö- ja toisiokäämit on erotettu galvaanisesti toisistaan. Käämien välillä on peruseristyksen lisäksi lisäsuoja, jolla luodaan haluttu eristystaso. Eristyksen tulee olla luotettava ja hyväksytty, koska suojaerotusmuuntajaa käytetään yleisesti suojalaitteina.

Suojaerotusmuuntajan päällimmäisenä tarkoituksena on erottaa kaksi piiriä toisistaan. Niissä on yleensä symmetriset käämitykset ensiö- ja toisiopuolella, jotka mahdollistavat vaihtojännitteisen tehon syötön toisesta laitteesta toiseen ilman sähköistä kytkentää. Tämä galvaaninen erotus perustuu siihen, että estetään varauksellisten partikkelien liikkuminen toiselta käämiltä toiselle, toisin sanoen suoraa virran virtausta ei tapahdu käämien välillä. Teho voidaan kuitenkin siirtää muuntajan tapauksessa keskinäisinduktanssin avulla ja kytkentä tapahtuu muuttuvan magneettivuon kautta. (Wikipedia 2012.)

Standardi IEC 61558-2-4 käsittelee suojaerotusmuuntajiin liittyviä erityisvaatimuksia. Siinä vaaditaan, että ensiö- ja toisiopiirien välille ei saa syntyä sähköistä kytkentää muuten kuin tahallisen toiminnan kautta. Ensiö- ja toisiokäämien välisen eristyksen tulee olla määritelty kestävä vähintään nimellisen käyttöjännitteen. Tässä työssä kuitenkin lisävaatimuksena on 8 kV eristysvaatimus. (IEC 61558-2-4 2009, 9.)

Kuvassa 3 on esitetty suojaerotusmuuntajan toimintaperiaate. Voidaan kuvitella, että kuvan vasemmalla puolella on syöttävä sähköverkko. Henkilön tullessa kosketuksiin jännitteiseen osaan (L), esimerkiksi vioittuneeseen sähkölaitteeseen, jonka jännite on päässyt kytkeytymään laitteen koteloon, ja henkilön ollessa samalla yhteydessä vahvaan maapisteeseen, kulkee hengenvaarallinen virta ruumiin läpi. Jos taas laite on erotettu sähköverkosta suojaerotusmuuntajalla, ei muuntajan toisiopuolella ole enää johtavaa yhteyttä maapisteeseen. Tällöin ei ole enää mahdollista saada sähköiskua jännitteisestä osasta (L') maata tai sähköverkon vaihetta (N) vastaan, koska virralla ei ole paluureittiä. Täytyy kuitenkin muistaa, että jos koskettaa toisiopuolella olevia molempia johtimia (L' ja N'), saa yhä yhtä vaarallisen sähköiskun, koska niiden välillä vallitsee sama potentiaaliero kuin sähköverkossakin. (Intertrafo 2010.)



KUVA 3. Suojaerotusmuuntajan toimintaperiaate. (Intertrafo 2010)

Suojaerotusmuuntajaa käytetään suojausmenetelmänä verraten harvoin. Lähinnä se tulee kysymykseen sähkölaittekorjaamoissa ja sähkölaboratorioissa, joissa on tarpeellista erottaa tutkittava virtapiiri galvaanisesti yleisestä sähköverkosta. Suojaerotusmuuntajalla saadaan aikaiseksi erittäin hyvä suojaustaso, mutta sen käyttö on kuitenkin suhteellisen harvinaista sen suuren hankintahinnan takia.

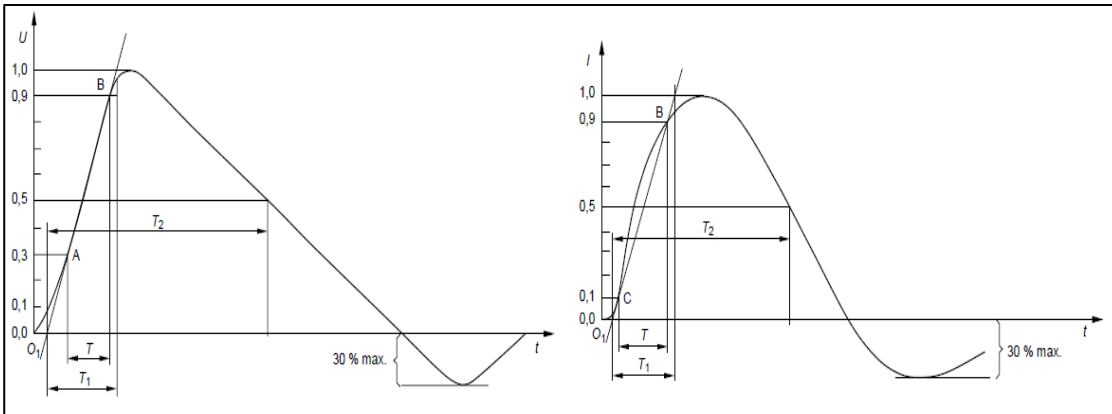
3 SYÖKSYAALLON SIETOTESTAUS

Syöksyaallon sietotestaus kuuluu osana EMC-direktiivin mukaista immuniteettitestausta. Testissä simuloidaan voimalinjoihin ja pitkiin signaalilinjoihin korkeajännitteisiä, mutta suhteellisen hitaita transientti ylijännitteitä. Näitä pulssimaisia jännitteitä aiheuttaa yleensä salaman iskiessä linjojen lähistölle tai kuormien kytkeytymisestä sähköjakaiverkossa ja ne aiheuttavat usein pysyviä vaurioita laitteelle tai komponenteille. Sietotestauksessa jännitteitä mitataan kilovoltteina (kV). Testauksen tarkoituksena on taata laitteen toiminta ja häiriintymättömyys asetetulla transienttipulssilla. Syöksyaallon siedon testaustasot ja -tekniikat on määritelty standardissa IEC 61000-4-5:2005. (Williams 2001, 143, 145.)

Syöksyaallon sietotestauslaitteisto sisältää generaattorin ja kytkentäverkon (CDN, coupling/decoupling network). Generaattori tuottaa testissä käytettävän 1,2/50 μ s jännitepiikin tai 8/20 μ s virtapiikin. KytKentäverkko kytkee generaattorin testattavaan laitteeseen, esimerkiksi AC-virtalinjaan, ja estää haitallisten jännitteiden pääsyn takaisin sähkösyöttöverkkoon. (Williams 2001, 143.)

3.1 Syöksyaallon aaltomuoto

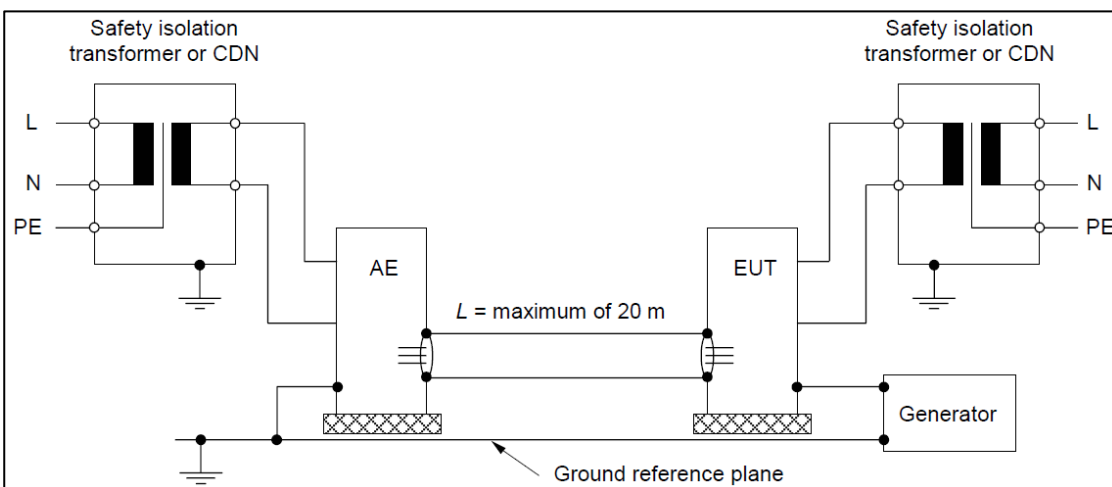
Laitteen testauksessa syöksyaallot kytketään virta-, teleliikenne-, syöttö- ja lähtölinjoihin. Testauksessa käytettävässä testigeneraattorissa on määritelty jännite- ja virtapulssin aallonmuodot (kuva 4) mahdollisimman tarkasti, jotta häiriöitä pystytään simuloimaan todenmukaisesti. Generaattorin kytkentäelementit on määritelty siten, että se tuottaa 1,2/50 μ s jännitepiikin korkearesistanssiseen kuormaan (yli 100 Ω) ja 8/20 μ s virtapiikin oikosulkupiiriin. (Williams 2001, 143.)



KUVA4. Syöksyaaltojen aaltomuodot. Vasemmalla olevan jännitepiikin nousuaika on $1,2 \mu\text{s}$ ja puoliintumisaika $50 \mu\text{s}$. Oikealla olevan virtapiikin nousuaika on $8 \mu\text{s}$ ja puoliintumisaika $20 \mu\text{s}$. (IEC 61000-4-5 2005, 29)

3.2 Suojaerotusmuuntaja testauksessa

Suojaerotusmuuntajia on tarkoitus käyttää syöksyaallon sietotestauksessa, jotta saadaan toteutettua standardin mukainen testausjärjestely, jossa testataan laitetta, jossa on suojattuja linjoja. Tällöin testattava laite (EUT, Equipment Under Test) tulee olla eristetty maatasosta ja syöksyaalto johdetaan suoraan laitteen metalliseen kotelointiin. Kaikki testattavaan laitteeseen tulevat liitännät, pois lukien ne joita testataan, tulee eristään maatasosta suojaerotusmuuntajalla tai soveltuvalla kytkentäverkolla kuvion 1 mukaisesti. (IEC 61000-4-5 2005, 67.)



KUVIO 1. Standardin mukainen testijärjestely testattaessa suojattuja linjoja. (IEC 61000-4-5 2005, 67)

4 DIREKTIIVIT JA STANDARDIT

Sähkölaitteen suunnitteluun liittyvät yleiset vaatimukset on määritelty sähkölaitesäädöksissä ja standardeissa. Direktiivien mukaisten vaatimuksien toteutuminen voidaan osoittaa testaamalla tuote direktiivien alaisten harmonisoitujen, eli yhdenmukaistettujen standardien, mukaisesti. Tällöin valmistaja itse, tai erillisen testauslaitoksen kautta, varmistaa laitteen standardien vaatimustenmukaisuuden. Vaatimustenmukaisuus todistetaan vaatimustenmukaisuusvakuutuksella ja CE-merkinnällä. (Williams 2001, 36–37.)

Tässä työssä tuli ottaa huomioon laitesuunnittelussa sekä pienjännitedirektiivin (LVD, Low Voltage Directive) 2006/95/EY että EMC-direktiivin (ElectroMagnetic Compatibility) 2004/108/EY mukaiset vaatimukset. Direktiivien vaatimustenmukaisuus todistettiin tässä työssä teknisen tiedoston avulla.

4.1 Pienjännitedirektiivi

Pienjännitedirektiivin tarkoituksena on taata sähkölaitteen turvallisuus ja suojata käyttäjää sähkö-, palo- ja säteilyvaaroilta sekä mekaanisilta vaaroilta. Sen sovellusalueeseen kuuluvat laitteet, joiden syöttö- tai lähtöjännite on vaihtovirralla alueella 50 V–1000 V ja tasavirralla 75 V–1500 V. (Tukes 2011a.)

Työssä käytetyt pienjännitedirektiivin alaiset standardit käsittelevät pienitehoisten muuntajien, teholähteiden ja vastaavien turvallisuutta. Standardi IEC 61558-1:2005 sisältää yleiset vaatimukset ja testit. Standardi IEC 61558-2-4:2009 sisältää yleiseen käyttöön tarkoitettujen suojaerotusmuuntajien erityisvaatimuksia. Standardeissa on asetettu vaatimukset muun muassa seuraaville asioille: suojaus sähköiskua vastaan, lämmönsieto, mekaaninen kestävyys, rakenne, komponentit, pinta- ja ilmavälit, eristysresistanssi, eristelujuus, suojaus oikosululta ja ylikuormitukselta. (IEC 61558-2-4 2009.)

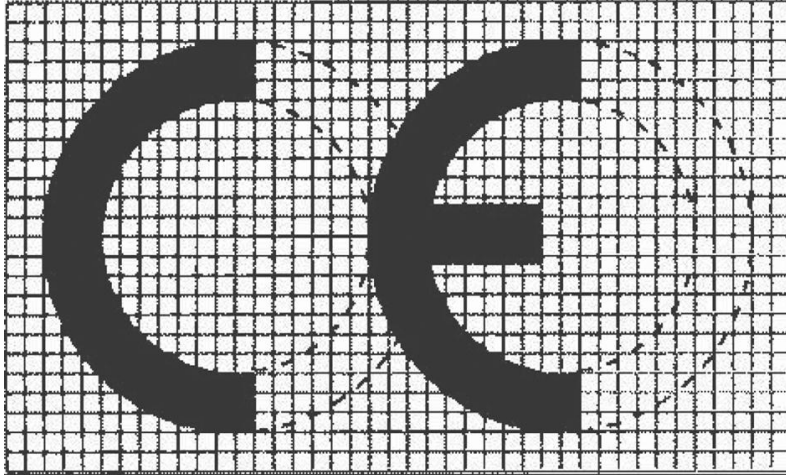
4.2 EMC-direktiivi

EMC-direktiivin eli sähkömagneettisen yhteensopivuuden tarkoituksena on taata sähkölaitteiden häiriötön toiminta samassa käyttöympäristössä. Direktiivin mukaiselta laitteelta vaaditaan, että sen päästämä sähkömagneettinen häiriö ei aiheuta sovittua tasoa suurempia häiriöitä ja laitteen itse tulee myös sietää sovittun tasoiset häiriöt. Häiriöt voivat levitä ympäristöön joko johtimia pitkin tai säteilemällä. Kotitalous- ja teollisuusympäristöön on määritelty erikseen omat häiriötasot. (Tukes 2011c.)

Tässä työssä käytettiin häiriönsieto ja -päästö tasoina vaatimuksiltaan vaativampia geneerisiä standardeja. Standardi EN 61000-6-2:2005 sisältää häiriönsietotasot teollisuusympäristössä taajuusalueella 0 Hz–400 GHz. Standardi määrittelee seuraavat sietotestaukset: radiotaajuisen sähkömagneettisen kentän sieto, johtuvan radiotaajuisen häiriön sieto, staattisen sähköön purkaus, nopeat transientit ja purskeet, syöksyaallon sieto, verkkotaajuisen magneettikentän sieto, jännitteen vaihtelut ja vajoamat sekä lyhyet katkokset. Häiriönpäästötasot määritellään standardissa EN 61000-6-3:2007, joka kattaa häiriönpäästöt kotitalous-, toimisto- ja kevyen teollisuuden ympäristöissä taajuusalueella 0 Hz–400 GHz. Standardi määrittelee seuraavat päästötestaukset: säteilevä ja johtuva emissio, harmonisten yliaaltojen emissio ja jännitehuojunta ja välkyntä.

4.3 Vaatimustenmukaisuusvakuutus ja CE-merkintä

Tuotteen valmistajan tai hänen valtuuttaman edustajan tulee julkaista tuotteelle vaatimustenmukaisuusvakuutus. Dokumentilla osoitetaan, että direktiivin mukaiset turvallisuusvaatimukset on täytetty. Vaatimustenmukaisuusvakuutus tulee pystyä esittämään viranomaisten pyynnöstä kymmenen vuotta sen jälkeen kun tuotteen valmistus on lopetettu. Vaatimustenmukaisuuden osoittamiseksi tulee tuotteeseen kiinnittää kuvan 5 mukainen CE-merkki itse laitteeseen tai jos tämä ei ole mahdollista niin sen pakkaukseen, ohjeisiin tai takuutodistukseen. (Williams 2001, 28–29.)



KUVA 5. CE-merkin tulee olla vähintään 5 mm korkea ja se tulee kiinnittää näkyvästi ja helppolukuisesti. (LVD 2006/95/EY 2006, 7)

4.4 Tekninen tiedosto

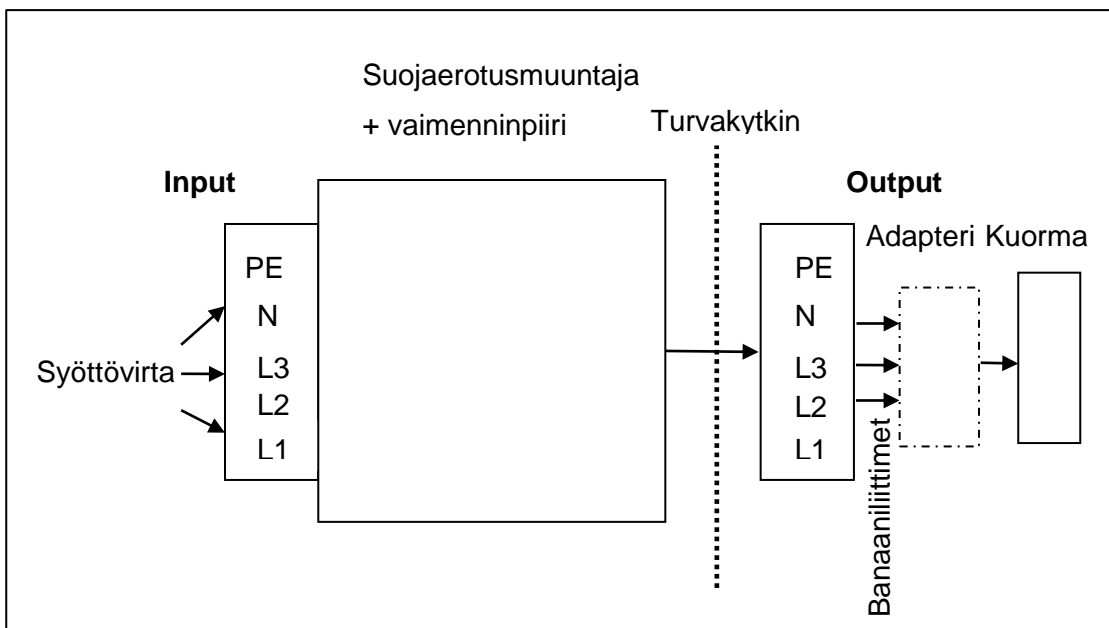
Tässä työssä nähtiin järkeväksi laitteen teknisten ominaisuuksien ja valittujen komponenttien takia osoittaa vaatimustenmukaisuus testaamalla suojaerotusmuuntaja vain osittain LVD- ja EMC-direktiivien alaisten standardien mukaisesti. LVD-direktiivi vaatii, että tuotteesta on aina laadittu tekninen tiedosto. Siinä selitetään tavat, joilla direktiivinmukaisuus on varmennettu. Jos EMC-direktiivinmukaisuus on varmennettu jollain muulla tavalla kuin testaamalla se yhdenmukaistettujen standardien mukaisesti, tulee siitä näiltä osin laatia EMC:tä koskeva oma tekninen rakennetiedosto tai liittää sen osuus LVD:n tekniseen tiedostoon. Rakennetiedoston EMC-osuudelle on suositeltavaa hankkia ilmoitetun laitoksen antama hyväksytty lausunto. Rakennetiedosto on pyydettyessä pystyttävä osoittamaan viranomaiselle 10 vuoden ajan siitä kun viimeinen tuote on toimitettu asiakkaalle. (Tukes 2011b.)

Tekninen tiedosto koostuu muun muassa seuraavista asiakohdista:

- tuotteen tunnistetiedot ja tuote-esittely
- tekninen kuvaus
- luettelo standardeista, joita on sovellettu
- tuotetta koskevien direktiivienmukaisuuden osoittaminen
 - direktiivinmukaisuuden suunnittelunäkökohdat
 - testaustulokset ja päätelmät
- tarvittaessa ilmoitetun laitoksen antama raportti tai sertifikaatti
- ohjekirja.

5 SUUNNITTELU

Työ lähti liikkeelle suunnitteluvaiheesta. Ensimmäisenä laadittiin vaatimusmäärittely, jossa listattiin muuntajien toteutukseen liittyvät yleiset vaatimukset. Muuntajien rajapintojen ja liitäntöjen toteutuksesta laadittiin kuvion 2 mukainen alustava esitys. Syötösähkö muuntajien ensiöpuolelle tuli toteuttaa käyttäen kolmivaihevirtaa. Tämä tarkoittaa, että muuntajien ensiöpuolen sisääntuloon (input) tuodaan jännite kolmea vaihejohtinta (L1, L2 ja L3) pitkin. Vaiheiden välinen pääjännite (U_N) on Suomen pienjänniteverkossa 400 V. Ensiöpuolelle tulee myös verkon nollajohtin (N) ja suojamaadoitus (PE). Nollajohtimen ja vaihejohtimen välillä vaikuttaa vaihejännite (U_P), joka on suuruudeltaan 230 V.



KUVIO 2. Alustavan suunnitelman mukainen kaaviokuva muuntajakokonaisuuden toteuttamisesta

Suunnittelussa todettiin, että muuntajien ulostulopuolella (output) olisi hyvä olla turvakytkin, jolla voitaisiin katkaista virta pelkästään kuormalta. Näin muuntajan käämissä pysyy jännite ja magnetoitumisvirtapiikkiä ei synny uudestaan. Kuorma voidaan liittää muuntajaan suoraan banaaniliittimillä tai käyttää adapteria, jolloin kuorma voidaan suoraan kiinnittää tavalliseen verkkovirta- tai 3-vaihevirtapistorasiaan.

5.1 Kotelointi

Koteloinnissa pyritään sovittamaan sekä vaimenninpiiri että käämipaketti samaan koteloon, jolloin laite on helpommin liikuteltavissa paikasta toiseen. Laitteen liikuteltavuus ei ole tärkein ominaisuus, koska laite pysyy paikoillaan testauksen ajan. Laitteen fyysiset mitat riippuvat suuresti käytettävästä käämipaketin koosta. Laitteen suojausluokaksi tulee Suojaluokka I. Tämä tarkoittaa, että laitteessa on sen peruseristyksen lisäksi suojamaadoitus. Tällöin laitteen kosketeltavat metalliosat on liitetty sähköverkon suojajohtimeen. Näin alttiit osat eivät voi tulla jännitteisiksi peruseristyksen pettäessä. (Korpinen 2007, 14.)

Laitteen kotelointiluokituksessa (IP-luokka) päädyttiin IP-20-luokitukseen. Luokituksen määrittelee standardi IEC 60529, jossa ilmaistaan laitteen suojaus ulkoisia uhkia vastaan. Ensimmäinen numero ilmaisee, kuinka hyvin kiinteiden osien sisään tunkeutuminen ja suora kosketus jännitteisiin osiin on estetty. Toinen numero kertoo puolestaan, kuinka laite on suojattu sisään tunkeutuvilta vedeltä. (Noratel 2004.)

IP 2 0 ——— Ei suojausta vettä vastaan.

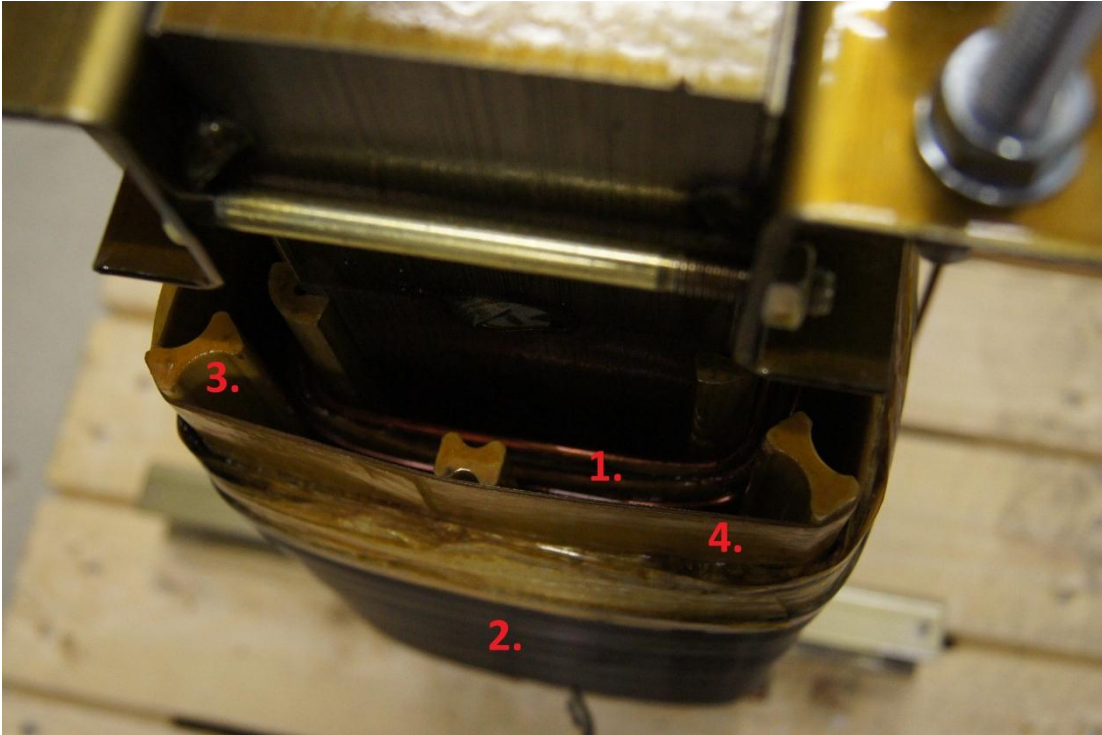
Laite on suojattu suoralta kosketukselta sormilla. Halkaisijaltaan yli 12,5 mm kiinteiden kappaleiden sisään tunkeutuminen on estetty.

5.2 8 kV:n eristysvaatimuksen toteuttaminen

Koska suojaerotusmuuntajaa tarvitaan syöksyaallon sietotestausmenetelmää varten, on erityisen tärkeää, että se toteuttaa eristysvaatimuksena minimissään 8 kV läpilyöntilujuuden ensiö- ja toisiopuolen välillä. Tämä tarkoittaa sitä, että jos muuntajan toisiopuolelle pääsee kytkeytymään 8 kV:n syöksyaalto, muuntajan käämien välisten eristeiden tulee olla mitoitettu kestäämään tämä ylijännite.

Eristys tulee rakentaa muuntajaan jo käämityksien rakennusvaiheessa. Näin ollen sen toteutus jää käämipakettien valmistajalle. Lähtökohtana käämipakettien valmistajan valinnassa olikin se, kuka pystyy tämän vaatimuksen toteuttamaan. Eristys toteutetaan luomalla ensiökäämin (kuva 6, numero 1) ja toisiokäämin (2) välille tarpeeksi suuret pinta- ja ilmavälit. Ilmaväliä on saatu aikaiseksi lisäämällä käämien väliin koiranluita (3) ja lisänä on käytetty kerroksittain muovisia eristyskalvoja (4).

Eristyksen lisäksi muuntaja lakataan ja estetään näin sen ruostuminen, levyjen liikkeestä aiheutuvan äänen muodostuminen ja käämilankojen liikkuminen.



KUVA 6. Ensiö- ja toisiokäämin välinen eristys

Käämipakettien eristyksen toteutumisen lisäksi tulee 8 kV:n jännitekesto ottaa huomioon toisiopuolelle sijoitettavissa komponenteissa. Tämä oli sinällään haastavaa, koska suurin osa markkinoilla olevista komponenteista on mitoitettu kestämään vain 4–6 kV tason. Toteutusvaiheessa käytettiin tästä syystä komponentteja, jotka oli tarkoitettu raskaan teollisuuden sovelluksiin.

5.3 Magnetoitumisvirran rajoittaminen

Muuntajan magnetoitumisvirta on niin suuri, että se kuormittaa kiinteän verkon johdonsuojakatkaisijoita (3 x 32 A) liikaa. Tästä syystä tehoelektronikkaosion kannalta työssä tuli suunnitella ja toteuttaa tarvittava suojausjärjestelmä kyseessä olevalle ongelmalle. Suojaus toteutettiin suunnitteleamalla vaimenninpiiri muuntajan ensiöpuolelle. Yleinen suojaustapa magnetoitumisvirran rajoittamiseen on käyttää NTC-termistoria, jonka resistanssi on hyvin suuri kylmänä. Näin voidaan estää suuri virtapiikki käynnistystilanteessa. Termistorin resistanssi nousee sen lämmitessä, jolloin

normaali käyttövirta pääsee kulkemaan sen läpi. NTC-termistorien huono puoli on pieni jatkuva tehonhäviö vastusten resistanssille sekä se, että termistorit vaativat jäähtymisajan muuntajan virran katkaisun ja uudelleenkytkennän välillä. (Amwei 2010.)

NTC-termistorit eivät soveltuneet tämän työn muuntajan mitoitusvirtoihin ja oli tärkeää pystyä suorittamaan virtojen uudelleenkytkentä ilman aikaviivettä. Tästä syystä toteutettiin vaimenninpiiri käyttämällä tehovastuksia, jotka sijoitetaan sarjaan jokaisen vaiheelinjan kanssa. Käynnistyksessä ilmenevä magnetoitumisvirta vaimenee sallittavalle tasolle kulkiessaan vastusten läpi, jotka kestävät hyvin lyhytaikaisen virtapiikin. Vastukset eivät kuitenkaan kestä kokoaikaista kuormitusta, minkä takia ne ohitetaan kontaktorilla. Kontaktori on sähkömekaaninen kytkin, joka vastaa toiminnaltaan releitä. Tässä tapauksessa sen tulee kestää 32 A:n nimellisvirta ja 400 V:n käyttöjännite. Kun kontaktorin kelalle tuodaan jännite, aukeaa sen koskettimet pienen viiveen jälkeen. Tämän kytkeytymisviiveen aikana magnetoitumisvirtapiikki ehtii vaimentua sopivalle tasolle. Koskettimien ollessa auki virta valitsee vähemmän resistiivisen reitin kontaktorin läpi. Näin säästytään vastusten aiheuttamilta pidempiaikaisilta tehohäviöiltä.

5.4 Muuntajien hankinta

Käämpaketit oli tarkoitus hankkia valmiina, joten niille tuli mitoittaa tehoarvot vaatimusten mukaisesti. Muuntajien teho ilmoitetaan aina nimellistehona, jonka yksikkö on VA (volttiampeeria). Muuntajille vaadittiin jokaiselle vaiheelle 32 A:n virransyöttökykyä. Muuntajien teho vaatimus voidaan laskea kolmivaihekytkennässä seuraavasti:

$$P = \sqrt{3} * U_p * I = \sqrt{3} * 400 \text{ V} * 32 \text{ A} = 22170 \text{ VA} \quad (2)$$

Muuntajien toteutusta tiedusteltiin usealta muuntajiin erikoistuneelta yritykseltä. Paras tarjous saatiin Muuntosähkö Oy/Trafoxilta. Se pystyi toteuttamaan mitoituksen mukaiset muuntajapaketit vaaditulla ensiön ja toision välisellä 8 kV:n eristysvaatimuksella. Lisäksi yritys tarjosi valmista vaimenninpiiriratkaisua ensiöpuolelle, joka oli toteutettu samalla tekniikalla kuin oli itse suunniteltu.

Muuntajien tilaus tapahtui paikallisen yrityksen ElektroSkandian kautta, joka kuuluu Savonia-ammattikorkeakoulun viralliseen hankintapiiriin. Muuntajat jouduttiin valmistamaan mittatilaustyönä, malli 3KP23-22k (kuva 7). Tästä syystä arvioitu toimitusaika oli yli kuusi viikkoa tilauksesta.

Muuntajien tärkeimmät tekniset tiedot ovat:

- nimellisteho 22 kVA
- ensiö- ja toisiojännitteet 400 V (50/60 Hz)
- ensiö- ja toisiovirta 32 A
- kytkentäryhmä Dyn11
- suurin käyttöympäristön lämpötila 45 °C
- kämmimateriaali kupari (Cu)
- käynnistysvirtapiikkiarvio n. $12 \times I_n = 380 \text{ A}$.

Muuntajien tarkemmat tekniset tiedot ja mitat löytyvät liitteestä 1.

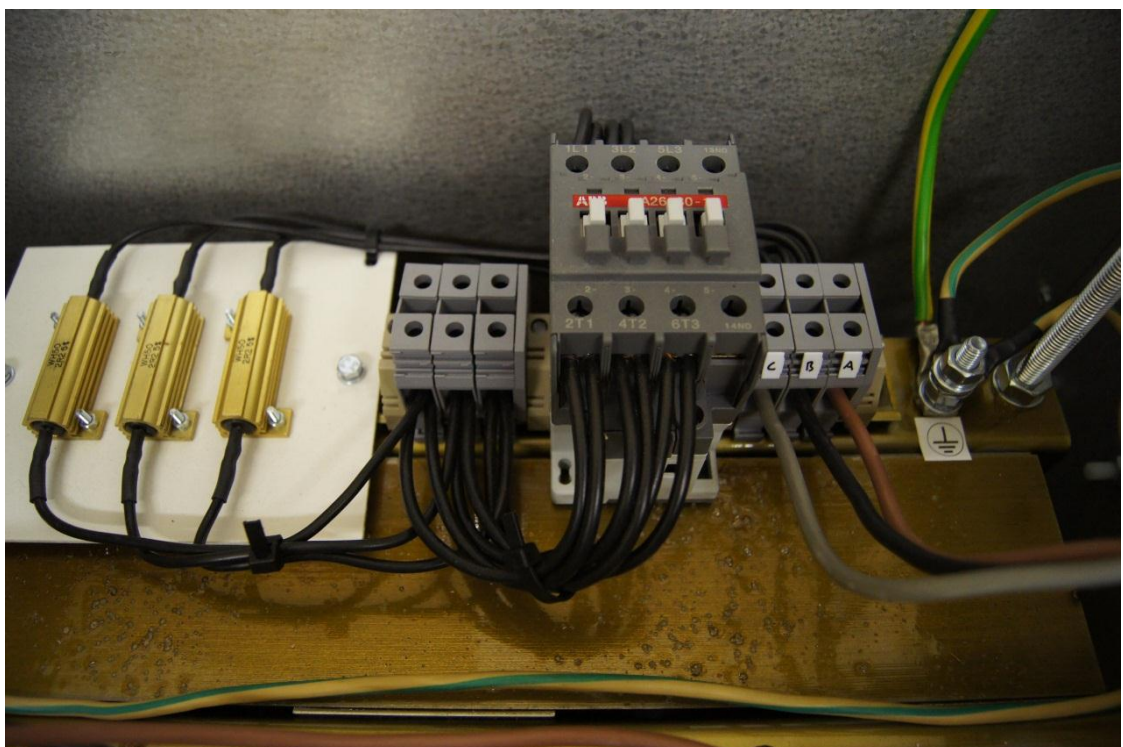


KUVA 7. Muuntajat toimitushetkellä

6 TOTEUTUS

EMC-laboratorion käyttöön valmistettiin kaksi identtistä suojaerotusmuuntajaa, sarjanumerot 0003 ja 0004. Valmiita muuntajapaketteja tuli muokata laboratoriokäyttöön sopiviksi ja niihin tuli toteuttaa ensiö- ja toisiopuolen rajapinnat ja liitännät. Toteutuksessa käytettyjen komponenttien mallit ja tekniset tiedot löytyvät liitteen 2 sivuilta 6–7.

Vaimenninpiirit (kuva 8) päädyttiin tilaamaan suoraan valmistajan asentamana. Tähän ratkaisuun päädyttiin, koska tällöin vaimenninpiiri pystyttiin integroimaan osaksi muuntajan rakennetta. Ratkaisu oli toiminnallisesti varmempi ja koteloinnista tuli kompaktimpi ja selkeämpi. Komponenttien lisäyksellä muuntajan koteloinnin sisälle, voi olla ratkaiseva vaikutus valmistajan mitoittamiin pinta- ja ilmaväleihin. Myös jäähdytyksen toimivuus voi heikentyä. Lisäksi erikseen hankittavien komponenttien kustannusarvio oli lähes sama kuin valmistajan tarjoama hinta valmiille vaimenninpiirille.



KUVA 8. Vaimenninpiiri, kuvassa näkyy tehovastukset, kontaktori, syöttöliitännät (A, B ja C) ja maadoituspiste.

Suunnitteluvaiheessa oli tarkoitus hankkia toiseen muuntajaan valmis vaimenninpiiri ja toteuttaa toiseen se itse hankituilla komponenteilla, ja testata mahdollisia eroja

toimivuudessa. Tästä jouduttiin kuitenkin luopumaan, koska tällöin muuntajat eroaisivat rakenteellisesti toisistaan ja niiden koestaminen huomattavasti hankaloituisi. Yhden muuntajan testitulokset eivät olisi enää päteet toiseen ja vaatimustenmukaisuus olisi täytynyt osoittaa kummallekin muuntajalle erikseen.

Muuntajaan asennettiin pyörät, jotta sen liikuttelu helpottuisi. Pyöriksi valittiin Mannerin valmistamat kalustepyörät, joiden kantokyky on 50 kg. Muuntajan alkuperäiset suorakulmion muotoiset metalliset tukiputket eivät kestäneet muuntajan painoa pyörien kanssa vaan ne vääntyivät, koska niiden yksi sivu oli avonainen. Tukiputkien tilalle hankittiin umpinaista 60 mm x 40 mm teräksistä huonekaluputkea, jota muokattiin sopimaan alkuperäisten putkien tilalle. Putkien valmistamisessa otettiin huomioon aikaisemmin huomattu alttius kaatumiselle, joka poistettiin kasvattamalla pyörien etäisyyttä rungosta noin 10 cm:llä. Putket viimeisteltiin maalamalla ne kotelon väriksi ja lisäämällä päihin muoviset päätypalikat. Lopputulos oli viimeistellyn näköinen ja hyvin toimiva. Kuvia valmiista suojaerotusmuuntajasta löytyy liitteestä 7.

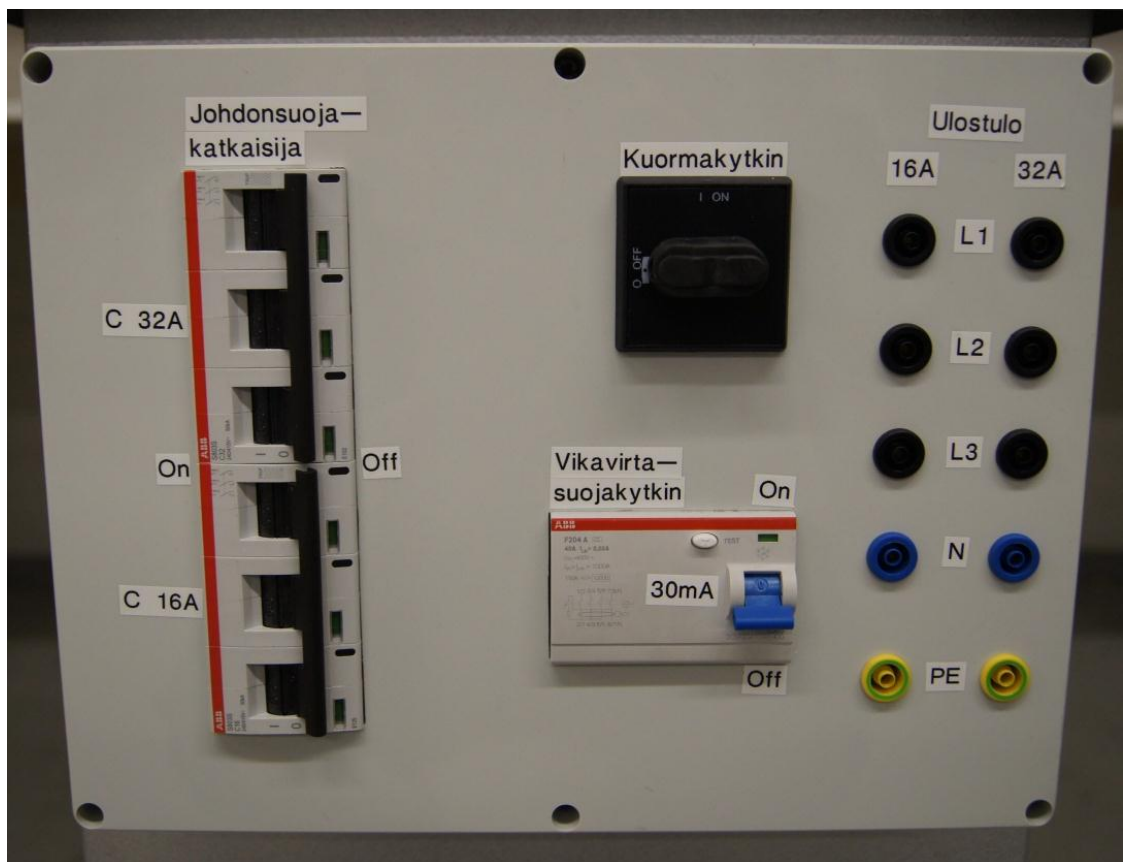
6.1 Ensiöpuoli

Ensiöpuoli koostuu vain muutamasta komponentista. Tarvittiin vain virta- ja jännitekestoltaan sopivaa sähkökaapelia, jossa oli viisi johdinta (L1, L2, L3, N ja PE). Sähkökaapelin toiseen päähän liitettiin 32A:n 3-vaihepistotulppa ja toinen pää kytkettiin ABB:n valmistamaan koteloituun kuormakyttimeen OTP45BM3. Kuormakytin toimii pääkytkimenä, jolla voidaan kytkeä ja katkaista muuntajalta virta. Näin suhteellisen raskaan 3-vaihepistotulpan jatkuvalta irrottamiselta seinästä vältytään. Kytkin on kiinnitetty muuntajan metalliseen koteloon nailonisilla M8-pulteilla. Kytkimeltä vedettiin vaihejohtimet muuntajan tuloliitäntöihin. L1-vaihe kytkettiin kolmiokytkennän A-pisteeseen, L2-vaihe B-pisteeseen ja L3-vaihe C-pisteeseen. Nollajohtimen pää eristettiin teipillä ja jätettiin kellumaan, koska sitä ei Dyn11-kytkennässä käytetä. PE-johdin kytkettiin muuntajan suojamaadoituspisteeseen (kuva 8). Muuntajan ensiö- ja toisiopuolella on käytetty kaikissa johdotuksissa samaa värikoodausta: L1 on ruskea, L2 on musta, L3 on harmaa, N on vaalean sininen ja PE on keltavihreä.

6.2 Toisiopuoli

Toisiopuolen rajapintoja toteutettaessa tuli mitoituksessa ottaa huomioon komponenttien 8 kV:n impulssijännitekesto. Tämän lisäksi tärkeäksi turvallisuuden kannalta muodostui johdon mitoitus ja suojaus. Kaikkien komponenttien tuli myös olla virta- ja jännitekestoltaan sopivia.

Toisiopuolella kytkennät lähtevät muuntajan käämiltä seuraavasti: a on L1, b on L2, c on L3 ja n on nollavaihe. Liittimiltä johdotus kulkee muuntajan metallisen kotelon ulkopintaan asennettuun muovikoteloon, johon myös kaikki toisiopuolen komponentit on sijoitettu (kuva 9). Ensimmäisenä on kuormakytin, jolla pystytään katkaisemaan virta koko toisiopuolen kuormalta. Kytkimen ominaisuuksiin kuuluu vaihe- ja nollajohdinten samanaikainen katkaisukyky 40A:iin asti. Tästä kaikki johtimet jatkavat vikavirtasuojakytkimelle, josta taas nollajohdin suoraan ja vaihejohtimet johdonsuojakatkaisijoiden kautta ulostuloliittimille.



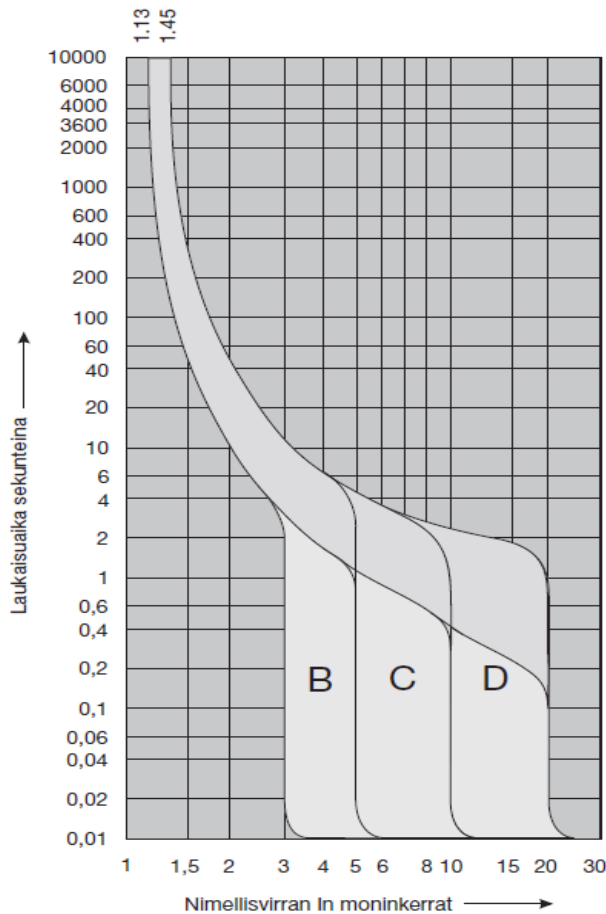
KUVA 9. Toisiopuolen komponentit ja ulostuloliitännät.

Turvallisen käytön kannalta todettiin tarpeelliseksi suojata toisiopuolta turvallisuuskomponenteilla. Johdonsuojauksessa käytettiin johdonsuojakatkaisijoita, joissa on kaksi erilaista laukaisumekanismia: magneettinen laukaisu oikosulkusuojana ja hidastettu terminen laukaisu ylikuormitussuojana. Ylikuormitussuojauksen tarkoituksena on estää virtapiirissä esiintyvää mitoitusvirtaa suurempaa virtaa eli ylivirtaa. Suojauksen tarkoituksena on katkaista ylivirta ennen kuin lämpötila kohoaa niin korkeaksi, että se vahingoittaa eristystä, johtimia, ympäristöä ynnä muuta sellaista. (Tiainen 2010, 27.)

Virtapiirissä voi ilmetä myös oikosulkuja, esimerkiksi rikkoutuneen johtimen eristeen takia. Oikosulku tapahtuu, kun kaksi eri potentiaalissa olevaa jännitteistä osaa kytkeytyy yhteen pieni-impedanssisen kuorman kautta. Tällöin virta voi nousta hyvinkin suureksi ja suojalaitteen tulee toimia huomattavasti nopeammin kuin ylikuormitustilanteessa. (Tiainen 2010, 65.)

Johdonsuojakatkaisijoiden valinnassa on hyödynnetty standardia SFS-EN 60898, joka määrittelee enintään 125 A:n johdonsuojakatkaisijoiden B, C ja D suojalaitetyypit. Näiden laukaisuominaisuuksia kuvataan kuvassa 10. Oikean laukaisukäyrän valintaan vaikuttaa sen käyttökohde:

- B (nopea): Resistiiviset kuormat, johdonsuojaus asuinrakennuksissa, lämmitys ja valaistus.
- C (hidas): Kuten B, mutta lisäksi induktiiviset ja kapasitiiviset kuormat.
- D (erittäin hidas): Voimakkaasti induktiiviset ja kapasitiiviset kuormat, jotka aiheuttavat voimakkaan käynnistysvirtasysäyksen. Muuntajat, moottorit, virtalähteet ym. (Tiainen 2010, 32.)

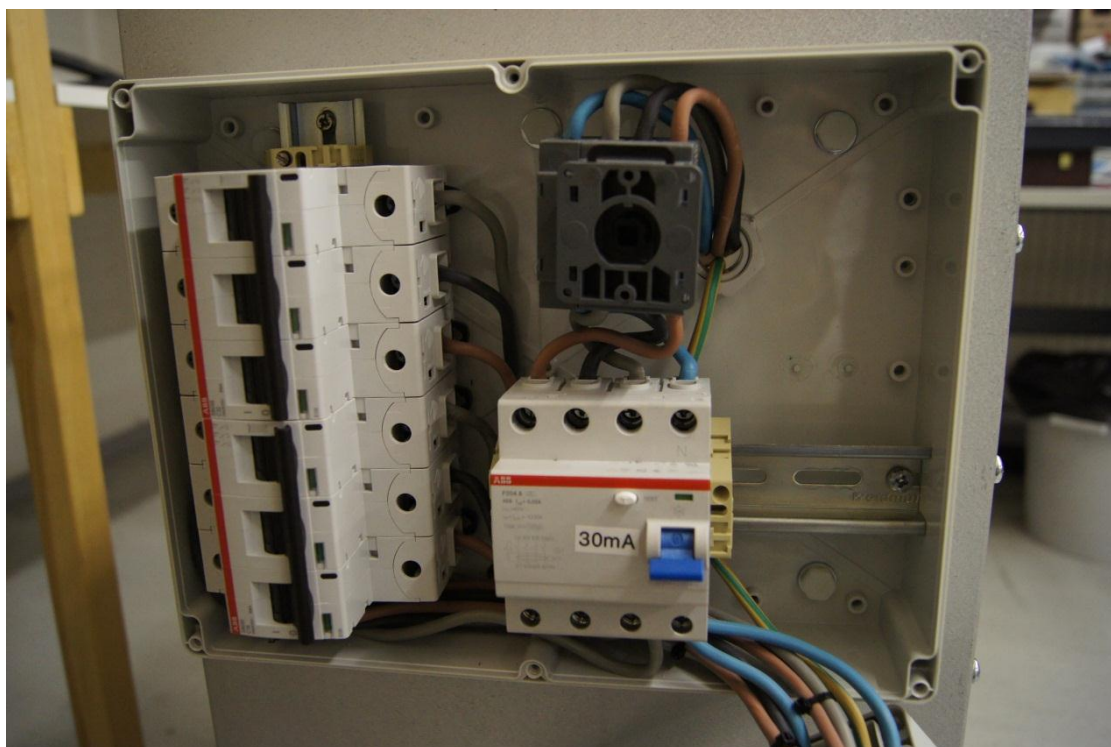


KUVA 10. Johdonsuojakatkaisijoiden laukaisukäyrät (Hager 2011)

Johdonsuojakatkaisijan valinta ylikuormitussuojaksi on helppoa, koska sen terminen toimintarajavirta on 1,45-kertaa suojalaitteen nimellisvirta. Tällöin ylikuormitussuojaus voidaan suoraan valita johtimen kuormitettavuuden mukaan. Muuntajan tapauksessa 16 A:n ulostulo suojataan 16 A:n ja 32 A:n ulostulo 32 A:n johdonsuojakatkaisijalla. Laukaisukäyräksi valittiin C, koska se sopii parhaiten toisiopuolelle kytkettäviin kuormiin. Valittujen johdonsuojakatkaisijoiden katkaisukyky oikosulkutilanteessa on 50 kA ja nimellisjännite 400 V. (Tiainen 2010, 29–30.)

Henkilönsuojausta tehostettiin toisiopuolelle vikavirtasuojakytkimellä. Se vertaa menevän ja tulevan virran erotusta vaihe- ja nollajohtimista. Vikatapauksessa virta voi vuotaa esimerkiksi laitteen runkoon, jolloin palaavan virran määrä on pienempi kuin saapuvan. Jos virtojen ero kasvaa yli sallitun arvon, katkaisee vikavirtasuojakytkin välittömästi virran. Työssä käytettiin 30 mA vikavirtasuojakytkintä, joka on tarkoitettu henkilösuojaukseen. Tästä suuremmat virrat aiheuttavat tajunnan menetyksen sekä muita vakavia vaurioita. Käytetty vikavirtasuojakytkin on tyypiltään A, joka tarkoittaa että se toimii sekä vaihtovirralla että pulssimaisella tasavirralla. (Korpinen 2007, 10.)

Vikavirtasuojakytkin oli ainoa toisiopuolella käytetty komponentti, joka ei suoraan valmistajan mukaan täyttänyt vaatimusta 8 kV:n jänniteimpulssinkestosta. Sen ilmoitettu impulssikesto oli 6 kV. Jos olisi haluttu täyttää tämä vaatimus, olisi suojalaitteet täytynyt vaihtaa kompaktikatkaisijoihin, joiden koko ja hinta kasvoivat liian suuriksi. Valitulle vikavirtasuojakytkimelle tehtiin omasta toimesta 8 kV:n syöksyaallon sieto-testaus, jonka se läpäisi. Lisäksi otettiin huomioon se, että muuntajaa joudutaan hyvin harvoin käyttämään 8 kV:n testissä ja on epätodennäköistä, että pulssi tällöin edes kytkeytyy vikavirtasuojakytkimelle asti. Tästä johtuen päätettiin, että komponenttia voidaan käyttää muuntajassa. Jos jatkossa ilmenee ongelmia vikavirtasuojakytkimessä 8 kV:n testin aikana, voidaan se ohittaa testin ajaksi.



KUVA 11. Toisiopuolen johdotus ja komponentit kotelon sisällä

Johdon kuormitettavuudessa tuli ottaa huomioon johtimien poikkipinnan suuruus kuormitusvirran mukaisesti. Standardi EN 61558-1 määrittelee johtimen poikkipinta-alaksi 6 mm² virran ollessa 32 A–40 A. Oikean kokoisien johtimien valinnalla, voidaan ennaltaehkäistä liian korkeita lämpötiloja laitteessa.

Ulostulo toteutettiin banaaniliittimillä erikseen 16 A:n ja 32 A:n kuormille. Jokainen vaihe saadaan tällöin ulos muuntajasta erikseen tai voidaan käyttää laboratorioissa valmiina olevia adaptoreja, joissa on liittämä 32 A:n 3-vaihepistotulpalle tai tavalliselle

1-vaihepistotulpalle. Banaaniliittimillä on CAT III 1000 V luokitus, joka tarkoittaa, että ne on suunniteltu kestävänsä 8 kV:n impulssijännite. Toisiopuolen suojamaadoitus (PE) on liitetty samaan maadoituspisteeseen ensiöpuolen ja muuntajan kotelon kanssa. Tällöin kaikki laitteet ovat häiriötilanteen sattuessa samassa potentiaalissa.

Toisiopuolella käytetyt komponentit:

- Kuormakytin: ABB OT40FT4N2
- Vikavirtasuojakytin: ABB F204A-40/0,03
- Johdonsuoja-automaatit: ABB S803S-C16 ja S803S-C32
- Banaaniliittimet: Hirschmann SKS SEB 2600 G M4
- Kotelo: Fibox PC233009 230x300x87mm

Suojaerotusmuuntajan rakennusvaiheessa huomioitiin hieman outo seikka koskien toisiopuolen vaiheliittimen ja suojamaadoitetun metallikotelon välistä potentiaaliero. Mitattaessa jännitettä yleismittarilla saatiin arvoksi noin 150 V. Selvityksen jälkeen ratkaisu löytyi yleismittarin sisäisestä resistanssista, joka on luokkaa 10 MΩ. Muuntajan käämien ja suojamaan välillä esiintyy muun muassa kapasitanssia, jonka vaikutuksesta jännitemittari näyttää suurehkojakin jännitearvoja. Nämä ovat kuitenkin kuormitettaessa virtateholtaan erittäin pieniä. Toisiopiirin kytkennöistä ja käämeistä ei saa suojaerotusmuuntajan tapauksessa olla galvaanista yhteyttä ensiökäämeihin eikä suojamaadoitukseen. Tämä todennettiin myöhemmin pienjännitetesteissä.

Muuntajan johdotuksesta tehtiin kytkentäkaavio (liite 2), josta ilmenee kaikki muuntaajaan liittyvät kytkennät. Se tehtiin CADS Planner Electric -ohjelmistolla. Ohjelmisto on tarkoitettu sähkö- ja automaatioalan eri suunnittelu- ja dokumentointitarpeisiin. Kytkentäkaavion luonti oli suhteellisen helppoa, kunhan ohjelmaan oli ensin perehtynyt hieman. Kaaviota tehdessä käytettiin hyväksi ohjelmiston tarjoamia valmiita komponenttikirjastoja.

7 KOESTUS

Direktiivien vaatimustenmukaisuuden osoittamiseksi tuli laitekokonaisuudelle suorittaa EMC- ja pienjännitetestausta. Osa tuotteeseen liittyvistä standardin mukaisista testeistä jätettiin pois, koska vaatimustenmukaisuuden osoittamisessa on nähty, että luotettavan komponenttivalmistajan antamat osoitukset ja lausunnot ovat riittäviä osoittamaan direktiivien vaatimustenmukaisuus. Lisäksi, koska kyseessä on ominaisuuksiltaan direktiivien vaatimusten kannalta yksinkertainen laite, on testaamatta jätettyjen standardin kohtien vaatimustenmukaisuus todettu teknisillä päätelmillä. Kaikki laitteelle suoritettut testit ja niiden testitulokset ja -kuvat löytyvät liitteestä 4.

7.1 EMC-testaus

EMC-direktiivin vaatimustenmukaisuuden osoittamisessa käytetään niin sanottua yhdistettyä menettelyä, jossa tuote testataan osittain harmonisoitujen standardien mukaan ja niiltä osin kun tuotetta ei testata, käytetään ilmoitetun laitoksen lausunto-menettelyä. Tuote katsotaan myös osittain EMC-direktiivin mukaan laitteeksi, jolla on vähäinen vaikutus.

Suojaerotusmuuntajalle suoritettut EMC-testaukset koostuivat päästö- ja sietotestauksista. Päästötestauksissa mitattiin laitteen lähettämiä häiriöitä ja sietotestauksessa sitä, kuinka hyvin laite kestää häiriöitä. Päästötestauksista tehtiin säteilevä ja johtuva emissio. Sietotestauksista tehtiin nopeat transientit/purskeet, syöksyaallon sieto, verkkotaajuuden magneettikentän sieto, jännitteen alenemat ja lyhyet katkokset ja staattisen sähköön purkaus.

7.1.1 Säteilevä emissio

Testillä mitattiin laitteesta säteilevän häiriön määrää taajuusalueella 30 MHz–1 GHz. Säteilevän häiriön raja-arvo oli 30 dB μ V/m taajuusalueella 30 MHz–230 MHz ja 37 dB μ V/m taajuusalueella 230 MHz–1000 MHz. Mittaus suoritettiin standardin CISPR 16-2-3 mukaisella testausmenetelmällä suojatussa puolivaimennetussa huoneessa kuvan 12 mukaisella testiasetelmalla. Testattava laite asetettiin lattiatasolle pyörityspöydän keskelle. Mittausantenni CBL 6141 oli kiinnitetty antennimastoon ja sijoitettu

standardin mukaisesti 3 m:n päähän EUT:stä. Testin aikana antennia skannattiin pystysuunnassa 1 m ja 4 m välillä ja pyörityspöytää liikutettiin 0° ja 360° välillä. Testissä mitattiin mittausantennin pysty- ja vaakapolarisaatiot. Mittauksen aikana suojaerotusmuuntajaa kuormitettiin 8 kW:n keinokuormalla.

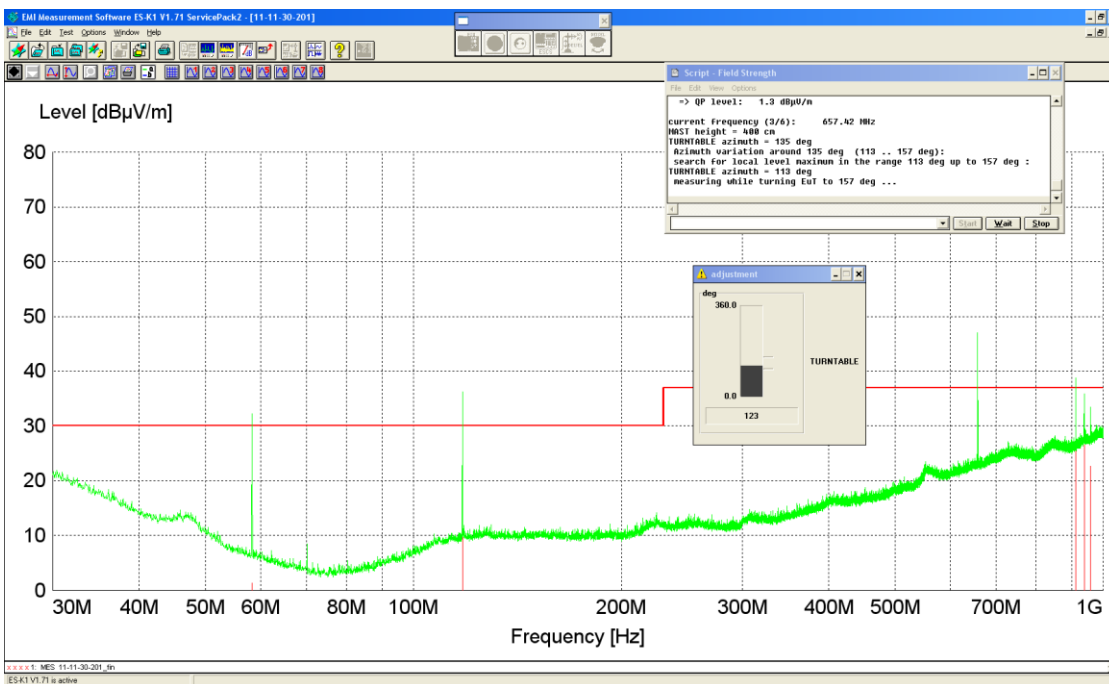


KUVA 12. Säteilevän emission testiasetus

Mittaus suoritettiin ES-K1 -ohjelmistolla (kuva 13), joka on Rohde&Schwarzin valmistama testausohjelmisto johtuvien ja säteilevien emission mittauksiin. Ohjelmalla suoritettiin preview- ja final-mittaukset. Mittaukset tapahtuivat automaattisesti, eli ohjelma sääti antennin korkeutta ja polarisaatiota, pyörityspöydän asentoa ja mittavastaa.

Preview-testissä EUT skannattiin 45°:een välein pyörityspöydän eri asennoissa. Jokaisessa asennossa skannattiin pysty- ja vaakapolarisaatiot 1 m ja 3 m korkeudelta. Preview-testin tarkoituksena oli löytää EUT:n asento, jossa säteily oli suurinta.

Final-testissä asetelma oli muuten sama, paitsi ohjelmisto mittasi vain preview-testissä ilmenneitä häiriöpiikkejä. Ohjelmisto skannasi tarkemmin niitä taajuusalueita, joilla piikkejä ilmeni. Pyörityspöydän asentoa ja maston korkeutta säädettiin portaattomasti, ja näin ohjelmisto haki pahimman mahdollisen kulman ja korkeuden, jolla pahin häiriöpiikki ilmeni, ja mittasi tästä asennosta quasi-peak-ilmmaisimella lopullisen tuloksen.



KUVA 13. Final-mittaus käynnissä. Ohjelmisto säättää pyörityspöytää portaattomasti.

Preview-testauksessa ilmenneet piikit aiheutuivat keinokuorman termostaatin kytkeytymisestä. Tämä testattiin manuaalisesti mittaamalla kapeampaa kaistaa (50 MHz–150 MHz) spektrianalysaattorilla ja samalla kytkettiin keinokuorman termostaattia auki ja kiinni. Tällöin taajuusalueella huomattiin kytkentähetkellä korkea piikki. Termostaatin kytkeytymisestä johtuva piikki on niin laajakaistainen, että se näkyy koko mittausalueella. Näitä piikkejä ei enää final-mittauksessa ilmennyt, eli muuntaja läpäisi testin.

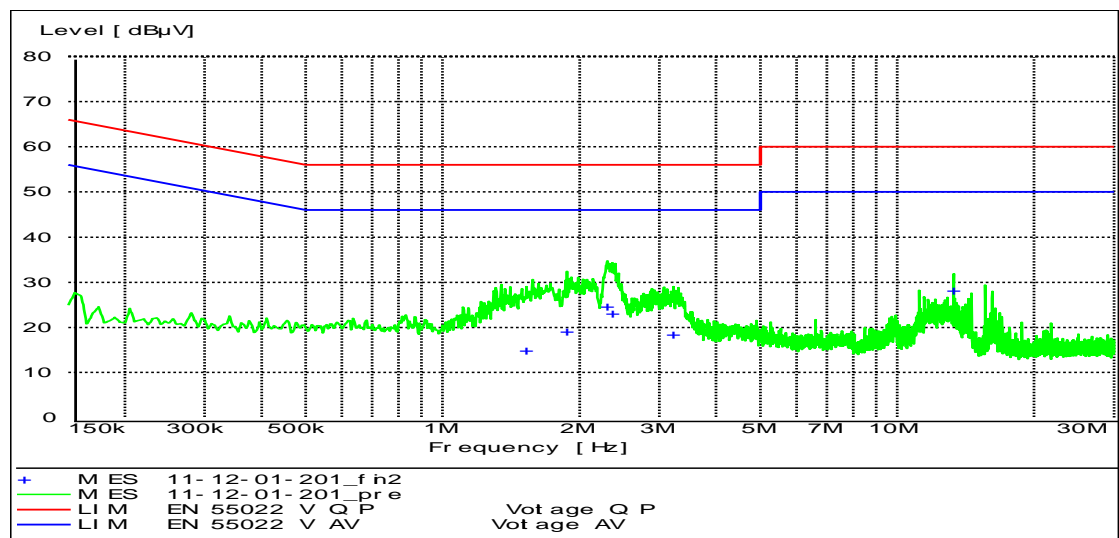
7.1.2 Johtuva emissio

Testillä mitattiin laitteesta kaapeleita pitkin johtuvan häiriön määrää taajuusalueella 150 kHz–30 MHz, 5 kHz:n askelilla ja 9 kHz:n kaistanleveysresoluutiolla. Alustavat mittaukset tehtiin keskiarvoilmaisimella vaiheille (L1, L2 ja L3) ja nollalinjalle (N). Lopulliset mittaukset tehtiin standardin mukaisella testimenetelmällä käyttäen quasi-peak-ilmaisinta. ES-K1-ohjelmisto suoritti taas mittaukset automaattisesti. Johtuvan häiriöpäästön raja-arvot voidaan nähdä taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Standardin mukaiset raja-arvot taajuusalueittain

Ilmaisintyyppi	Taajuus / MHz	Raja-arvo / dB μ V
Quasi-peak	0,15–0,50	66–56
	0,50–5	56
	5–30	60
Keskiarvo	0,15–0,50	56–46
	0,50–5	46
	5–30	50

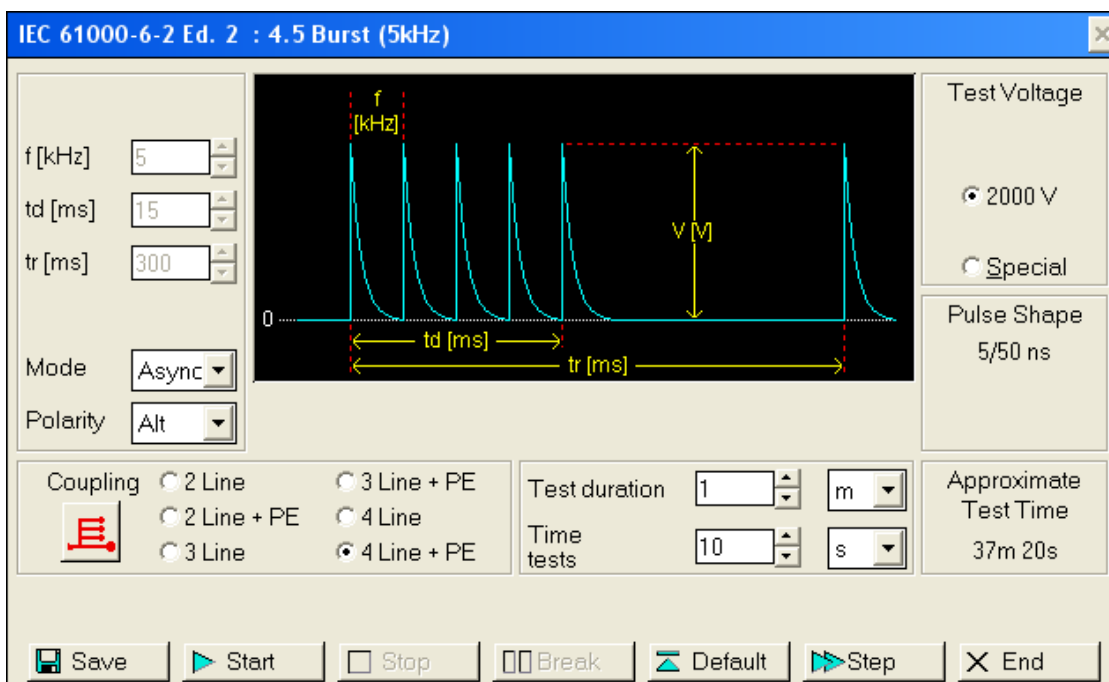
Mittauksissa näkyi pientä häiriötä, jonka todettiin johtuvan keinokuormasta. Keinokuormalle tehtiin erikseen oma preview-mittaus, josta häiriö todettiin. Muuntaja läpäisi testin.



KUVA 14. Johtuvan emission mittaustulokset

7.1.3 Nopeat transientit ja purskeet

Sietotestauksissa, joita ohjattiin ohjelmistolla, käytettiin EM Testin ISMIEC-testausohjelmistoa. EFT-testi (Electrical Fast Transient) on standardin IEC 61000-4-4 määrittelemä sietotestaus, jolla pyritään simuloimaan sähköverkossa esiintyviä häiriöitä. EFT-testissä muuntajan ensiöpuolen AC-tehonsyöttöporttiin syötettiin purskeina nopeita pulseja 5 kHz:n taajuudella ja 2 kV:n testijännitteellä. Testi suoritettiin erikseen jokaiseen linjaan (L1, L2, L3, N ja PE) sekä kahden linjan välisiin yhdistelmiin, esimerkiksi L1+L2 ja L2+PE. Testin aikana muuntajan häiriöitymistä seurattiin toisiopuolelta kytketystä lampusta sekä kuunneltiin vaimenninpiirin kontaktorin toimintaa. Lampulta ei missään vaiheessa hävinnyt virta (se ei sammunut tai välkkynyt) eikä kontaktorin toiminta häiriintynyt. Tämän perusteella todettiin, että muuntaja ei häiriöidy nopeista transienteista.



KUVA 15. Sietotestien testausohjelmisto. Kuvassa on EFT-testin asetus-ikkuna.

7.1.4 Syöksyaallon sieto

Syöksyaallon sietotesti on standardin IEC 61000-4-5 määrittelemä. Se on sama testaus, jonka yhden testausmenetelmän toteuttamiseksi tämän työn suojaerotusmuuntajat valmistetaan. Testissä syötettiin testijännitepulseja AC-tehonsyöttöporttiin. Tes-

tissä käytiin läpi testijännitteet 500 V–1000 V vaihelinjojen ja 500 V–2000 V vaihe- ja nollalinjan välillä. Jälleen valvottiin lampun ja kontaktorin toimintaa. Niissä ei ilmennyt testin aikana häiriöitä, joten muuntaja läpäisi testin.

7.1.5 Verkkotaajuisen magneettikentän sieto

Kyseessä on standardin IEC 61000-4-8 mukainen sietotestaus. Testissä mitattiin laitteen sietokykyä 30 A/m magneettikentässä. Mittaukset tehtiin kolmesta eri polarisaatiosta, X (kuva 16), Y ja Z. Näin magneettikentän vaikutus voitiin testata jokaisesta suunnasta. Muuntajan ympärille asetettiin antenni, jonka kautta magneettikenttä luotiin. Testimenetelmä verifioitiin mittaamalla virta antennin A2-johtimesta. Virraksi mitattiin noin 33 A, joka oli yli vaaditun minimitason. Testien aikana laitetta monitoroitiin; mitään häiriökäyttäytymistä ei esiintynyt.



KUVA 16. Verkkotaajuisen magneettikentän siedon mittausasetelma, X-polarisaatio

7.1.6 Jännitteenalenemat ja lyhyet katkokset

Testaus toteutetaan standardin EN 61000-4-11 mukaisesti. Testissä syöttöjännitettä alennetaan tietyn prosenttimäärän verran tai katkaistaan kokonaan tietyksi ajanjaksoksi. Tässä tapauksessa ei pystytty simuloimaan alenemia ja katkoksia jokaiseen vaihejohtimeen, joten testit tehtiin vain L1-johtimelle. L1-johdin valittiin testaukseen, koska kontaktorin kelan jännite on kytketty siihen. Mittausten ajaksi kytkettiin monitorointilamppu muuntajan toisiopuolelle. Muuntajalle tehtiin jännitteenalenemia seuraavasti:

- 70 % = Jännitettä alennettiin 30 % 70 %:iin = 161 V. Testiaika oli 25 sykliä eli $25 * 1/50 \text{ Hz} = 500 \text{ ms}$. Vaihekulma 0° .
- 40 % = Jännitettä alennettiin 60 % 40 %:iin = 92 V. Testiaika oli 10 sykliä eli 200 ms. Vaihekulmat 0° ja 180° .
- 0 % = Jännitettä alennettiin 0 %:iin = 0 V. Testiaika oli 1 sykli eli 20 ms. Vaihekulmat 0° ja 180° .

Kaikissa testeissä tehtiin vaihekulmaa kohden kolme alenemaa. 70 % ja 40 % alenemien aikana havaittiin samanlaiset vaikutukset. Alenemien aikana kuului hiljainen naksahdus, jonka oletettiin lähtevän vaimenninpiirin kontaktorista. Kontaktorin kelalta ei hävinnyt jännite kokonaan, koska kelan mekanismi (jousi) ei palautunut. Myös monitorointilamppu välähti aleneman aikana. 0 % aleneman aikana kontaktorista lähti selkeä naksahdus, joten kelan mekanismin oletetaan kokonaan palautuneen. Silmämääräisesti ei kuitenkaan nähty, että jousi palautuisi. Monitorointilamppu sammui kokonaan aleneman ajaksi.

Jännitteen katkokset olivat kestoltaan 5 000 ms, ja niitä syötettiin vaihelinjaan kolme kappaletta 10 s välein. Katkoksen aikana kuului hiljainen naksahdus, mutta jännite ei hävinnyt kokonaan kontaktorin kelalta, koska kelan mekanismi ei palautunut. Myös muuntajalle ominainen humina loppui katkoksen ajaksi. Monitorointilamppu sammui katkoksen aikana, mutta palautui normaaliin toimintaansa katkoksen jälkeen. Testin aikana voidaan odottaa tämäntapaisia ilmiöitä, koska jännitettä pienennetään tai hävitetään. Kuitenkin tärkeintä on, että EUT palautuu normaaliin toimintaansa häiriöiden jälkeen. Muuntaja läpäisi siis kyseessä olevan testin.

7.1.7 Staattisen sähkön purkaus

Kyseessä on standardin EN 61000-4-2 mukainen testi, jolla pyritään simuloimaan staattisen sähkön purkauksia, joita voi ilmetä, kun esimerkiksi ihmiseen muodostunut varaus purkautuu. Testi suoritettiin ampumalla ESD-pistoolilla ilma- ja suorakosketuspurkauksia EUT:hen. Epäsuorat purkaukset jätettiin pois EUT:n metallisen kotelon takia. Testitasot suorakosketuspurkauksille oli ± 2 kV ja ± 4 kV, ja ilmapurkauksille ± 2 kV, ± 4 kV ja ± 8 kV. Suorakosketuspurkauksia ammuttiin valittuihin paikkoihin aina kymmenen purkausta paikkaansa. Ilmapurkaukset testattiin kaikkiin EUT:n ei-johtaviin osiin. Testauksen aikana ei ilmennyt muutoksia EUT:n toiminnassa.

7.2 LVD-testaus

Pienjännitedirektiivin vaatimustenmukaisuuden osoittamisessa on otettava huomioon tuotteen rajoitettu käyttö, koska tuote on tarkoitettu vain asiantuntevan laboratoriohenkilökunnan käyttöön rajoitetussa käyttöympäristössä. Tästä syystä todettiin standardien vaatimustenmukaisuus vain niiltä osin, kuin tuotteen turvallisen käytön kannalta on oleellista.

Muuntajan testaus ja arviointi toteutettiin Nemko Oy:n koulutustapahtuman yhteydessä. Muuntajaa ei ollut tarkoitus testata täysin standardin IEC 61558-2-4 mukaisesti, koska itse muuntajalle Trafox Oy on jo myöntänyt CE-merkinnän. Näin ollen suurin osa standardin ilmoittamista testeistä jätettiin suorittamatta ja luotettiin hyväksi todettuihin valmistajiin ja komponentteihin.

Tavallisesti muuntajaa testattaessa se aukaistaan kokonaan ja tarkastetaan ilmoitetut eristemateriaalit sekä ilma- ja pintavälit. Tässä tapauksessa ei ollut viisasta särkeä muuntajia niiden hinnan ja määrän vuoksi, joten luotettiin Trafoxin ilmoittamiin arvoihin. Muuntajalle suoritettiin kuitenkin ulkopuolinen tarkastus, jossa todettiin mittamalla ilmoitettujen arvojen olevan todenmukaisia.

7.2.1 Lämpötilamittaus

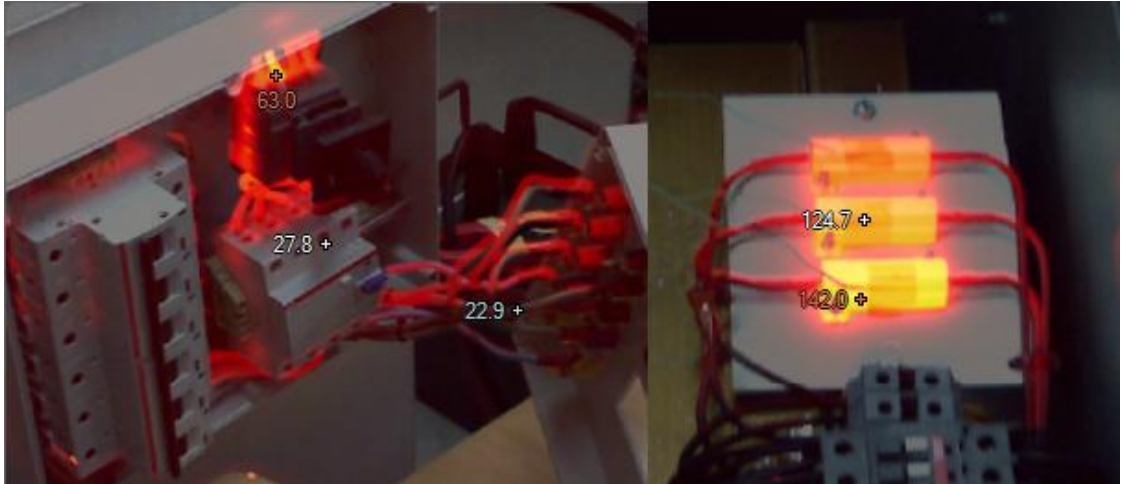
Lämpötilanmittauksessa muuntajaa kuormitettiin virtamuuntajan avulla, jolloin pystyttiin simuloimaan 3 x 32 A:n virranteho. Vaihejohtimet (L1, L2 ja L3) sekä nollajohdin

(N) kytkettiin sarjaan, jolloin niitä kaikkia saatiin kuormitettua tasaisesti. Lämpötilamittaukset tehtiin termoelementeillä, jotka sijoitettiin taulukossa 3 ilmoitettuihin paikkoihin. Paikkojen valinnassa käytettiin apuna lämpökameraa (kuva 17), jolla pystyttiin paikallistamaan pahimmat lämpenemiskohdat.

TAULUKKO 3. Lämpötilamittauksen tulokset. Testaus aloitettiin kello 08:09 ja huoneen ympäristön lämpötila oli 21,8 °C.

Kellonaika:	10.09 (2h)	10.45 (2h 36min)	11.09 (3h)
Termoelementtien sijainnit	T (°C)	T (°C)	T (°C)
Toisiopuolen niputetut johtimet (L1, L2, L3 ja N) muuntajakotelon sisällä	43,9	44,7	44,8
Kuormakytkimelle (OT40FT4N2) saapuva L3-johdin (harmaa)	61,5	62,8	63,1
32A johdonsuoja-automaatin (S803S-C32) kotelon yläpinta	56,3	58,4	59,3
Vikavirtasuojan (F204 A-40/0,03) yläpinta	56,2	57,7	58,0
32A johdonsuoja-automaatin (S803S-C32) sivupinnassa. Kotelon sisätilan ympäristön lämpötila	50,6	52,1	52,7
Kotelon yläpinta, sisäpuolella	42,7	43,6	43,9
Kotelon yläpinta, ulkopuolella	42,5	42,9	43,2
Banaaniliittimen (SEB 2600 G M4) ja adapterin liitoskohta, L2 (toinen ylhäältä) ← → adapterin jalka	46,9	47,4	48,1
Adapterikotelon yläpinta	33,6	34,2	34,3
Testaustilan ympäristön lämpötila	21,8	21,7	21,8

Termoelementtien mittaamisessa käytettiin Agilentin valmistamaa Data Loggeria, jolta lämpötilat luettiin tiettyinä kellonaikoina. Muuntajaa kuormitettiin kolmen tunnin ajan, minkä jälkeen katsottiin sen saavuttaneen jatkuvuustilan. Taulukon 3 mittaustulokset pysyivät standardissa ilmoitettujen raja-arvojen alapuolella.



KUVA 17. Lämpötilamittausten aikana otettuja lämpökuvia. Vasemmalla näkyy johdotuksen lämpeneminen kotelon sisällä ja oikealla vaimenninpiirin lämmenneet vastukset.

Lämpötilamittauksen yhteydessä haluttiin myös simuloida vikatapausta vaimenninpiirin kontaktorissa. Testin tarkoituksena oli varmistaa, että EUT pysyy turvallisena vian sattuessa. Tämä toteutettiin simuloimalla kontaktorin vikatapausta. Vikatilanne toteutettiin irrottamalla L1-johdin kontaktorin kelalta. Tällöin kontaktorin kela ei vedä ja virta kulkee jatkuvasti vastusten läpi ilman kuormaa. Johtimissa kulki pieni virta, koska muuntajan tyhjäkäyntihäviöt ovat luokkaa 300 W. Vikatilanteen aikana vaimenninpiirin vastusten lämpötilankestoa testattiin. Mittauspaikat ja -tulokset 30 minuutin kuormituksen jälkeen näkyvät taulukossa 4. Vastukset kestivät hyvin tyhjäkäyntiteholla, koska niiden lämpötilankesto on luokkaa 200 °C.

TAULUKKO 4. Vastustenlämpötilat simuloidun vikatilanteen aikana

Termoelementtien sijainnit	Virta johtimessa (A)	T (°C)
C-vastus (L3)	2,1	117,6
B-vastus (L2)	2,14	132,3
A-vastus (L1)	2,3	137,6
Niputettujen johtojen pinta	-	46,4
Huoneen ympäristön lämpötila	-	22,2

7.2.2 Maadoituksen jatkuvuus

Testillä varmistetaan, että laitteen maadoituspisteet ovat hyvin kiinnitetty toisiinsa sekä verkon maapisteeseen. Testissä mitattiin resistanssiarvoa, jonka piti olla alhaisempi kuin laitestandardissa ilmoitettu $0,1 \Omega$. Testissä syötettiin 25 A:n virtaa AC-teholähteestä ensiöpuolen 32 A:n 3-vaihepistotulpan PE-liittimen ja kotelon pellin välille 15 sekunnin ajan. Testilaitte Alltest HT 4050 mittasi jännitteen aleneman liitosten väliltä ja laski resistanssin. Mittaustulokseksi saatiin $0,043 \Omega$, joka täyttää standardin vaatimukset.

7.2.3 Eristysresistanssi

Testissä mitattiin EUT:n eristyksen resistanssia. Testissä käytettiin hyvin stabiilia 500 VDC testijännitettä. Mittaukset tehtiin taulukon 5 mukaisten kytkentöjen väliltä.

TAULUKKO 5. Mittauspaikat ja -tulokset

Testikytkennät	Testijännite (VDC)	Eristysresistanssi	Tulos
Syöttöpuolen 3-vaihepistotulppa (L1, L2, L3 ja N) \leftrightarrow PE	516	∞	PASS
Syöttölinjat (L1, L2, L3 ja N) \leftrightarrow Toisiopuolen linjat (a, b, c ja n) sarjaan kytkettynä	512	∞	PASS
Toisiopuolen linjat (a, b, c ja n) sarjaan kytkettynä \leftrightarrow Muuntajan kotelo	511	∞	PASS

Mitatut eristysresistanssit ylittivät mittalaitteen mittausalueen ($99,99 \text{ M}\Omega$) ja voidaan näin ollen olettaa niiden olevan äärettömiä. Standardin vaatimat eristysresistanssi arvot ovat kytkennästä riippuen $2\text{--}7 \text{ M}\Omega$. Muuntaja siis täyttää standardin mukaiset vaatimukset.

7.2.4 Eristelujuus

Testin tarkoituksena oli varmistaa, että eristemateriaaleille tai järjestelmille ei aiheudu kipinäpurkausta tai hajoamista testin aikana. Testissä syötettiin AC-jännitettä testipisteiden välille (taulukko 6). Toinen testipiste kytkettiin testilaitteen maadoituspisteeseen ja toiseen pisteeseen ammuttiin korkeajännitepistoolilla testijännitettä 3 s ajan. Samalla tarkkailtiin, että mitään häiriötä ei synny materiaaleihin.

TAULUKKO 6. Testauspaikat ja -jännitteet

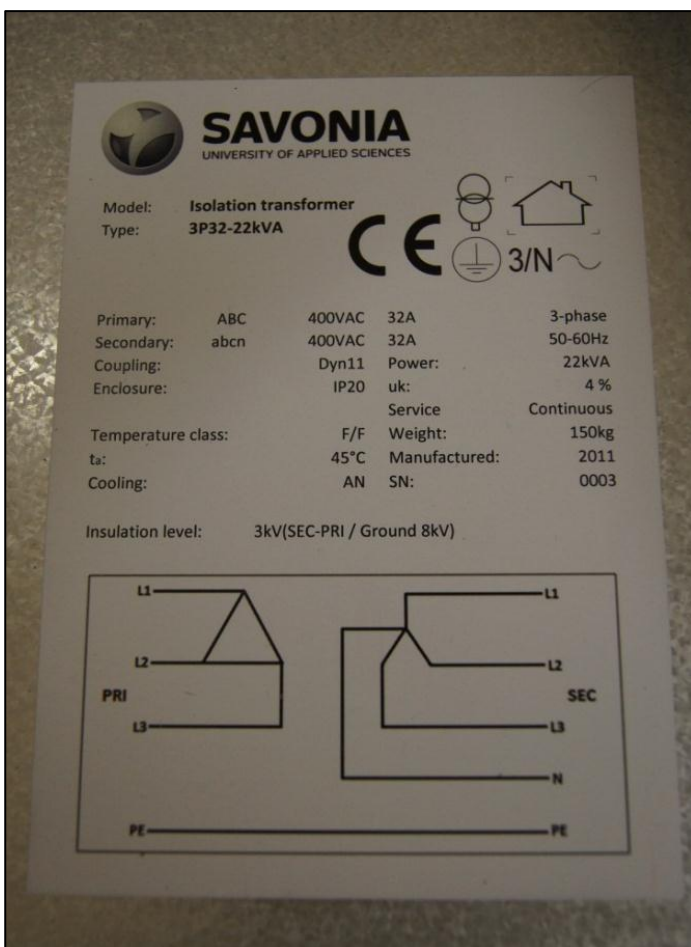
Testikytkennät	Testijännite (VAC)	Tulos
Syöttöpuolen 3-vaihe pistotulpan PE-liitin ↔ B-tuloliitin	1875	PASS
Syöttöpuolen 3-vaihe pistotulpan PE-liitin ↔ Toisio	1875	PASS
Ensiö ↔ Toisio	4367	PASS

Testissä ei ilmennyt minkäänlaista eristemateriaalin hajoamista tai kipinäpurkauksia, joten muuntaja läpäisi testin.

8 DOKUMENTOINTI

Suojaerotusmuuntajiin liittyvä dokumentointi oli suhteellisen laajaa tässä työssä. Muuntajalle laadittiin käyttö- ja huolto-ohje (liite 5), jossa on kerrottu muuntajan yleisistä käyttöohjeista, kuten käyttöympäristöstä, liitännöistä ja päällekytkennästä. Ohjeessa on myös kerrottu muuntajaan liittyvistä huolto-ohjeista ja korjauksesta.

Pienjännitestandardi vaatii, että muuntajassa on esillä asianmukainen arvokilpi (kuva 18). Siinä on ilmoitettu muuntajan teknisiä ominaisuuksia, malli- ja tyyppimerkinnät, kytkentäkuva ja tärkeät merkinnät: CE-merkki, suojaerotus, suojamaadoitus-merkki ja vain sisäkäyttöön-merkintä.



KUVA 18. Muuntajan kanteen kiinnitetty arvokilpi

8.1 Testausraportti

Muuntajaan liittyvistä testeistä laadittiin virallinen testausraportti (liite 4). Tämä sisältää tarkat mittaustulokset ja -menetelmät suoritetuista testeistä. Testausraportti (Compliance test report_Suojaerotusmuuntaja 3P32-22kVA) kattaa sekä EMC- että LVD-testit. 51-sivuinen raportti on kirjoitettu englanniksi. Raportin avulla voidaan todentaa suoritettut testit ja tarpeen vaatiessa toistaa ne.

8.2 Tekninen tiedosto

Muuntajasta tuli luoda tekninen tiedosto (liite 3), koska LVD-direktiivi sitä vaatii ja kaikkia EMC-direktiivin mukaisia testauksia ei suoritettu. Tähän tiedostoon on koottu tuotteen tunnistetiedot, tekninen kuvaus muuntajasta ja selitykset siitä, kuinka direktiivienmukaisuus on osoitettu. Tekninen tiedosto on hyvin laaja, ja sen laatiminen oli haastavaa ilman aikaisempaa kokemusta aiheesta. Teknisen tiedoston laatimisen opettelusta on kuitenkin suuri hyöty tulevaisuudessa.

Tekninen tiedosto toimii kaiken muuntajaan liittyvän dokumentaatioon pohjana. Dokumentaatio on koottu yhteen kansioon, johon tekninen tiedosto toimii linkkinä. Teknisestä tiedostosta on suorat hyperlinkit esim. testausraporttiin, käyttö- ja huolto-ohjeisiin, komponenttien dokumentaatioon ja valokuviiin. Tämä kansiorakenne säilytetään EMC-laboratorion verkkolevyllä.

Teknisen tiedoston kansiorakenne lähetettiin kokonaisuudessaan NEMKO Oy:lle tarkistettavaksi. Katselmoinnin tarkoituksena oli saada asiantuntijan arvio teknisestä tiedostosta, koska tämä oli ensimmäinen kerta, kun sellainen luotiin tällä osastolla; aikaisempaa kokemusta asiasta ei siis ollut. Katselmoinnissa löytyi vain muutama huomautettava asia. Tekniseen tiedostoon ja käyttö- ja huolto-ohjeeseen oli vain muutama kirjallinen korjausehdotus. Lisäksi lohkokaaevioon tuli vikavirtasuojakytkimen kohdalle lisätä N-johtimen liitännä. Tämä oli huomaamatta jäänyt merkitsemättä luontivaiheessa. Suurimpana korjausvaatimuksena oli muokata pääkytkimen OTP45B3M sisääntulopuolen PE (keltavihreää suojamaadoitus) johtimen pituutta. Asennusta muokattiin siten, että PE-johdin on pidempi kuin vaihejohtimet. Korjaus tehtiin siksi, että mikäli johtimen vedonpoistolaite pettäisi, tulee suojamaadoitusjohtimen pituus olla mitoitettu siten, että se irtoaa viimeisenä. Kaiken kaikkiaan dokumenttia kehuttiin hyvin laadukkaaksi ja siitä luotiin versio 1.1, johon kaikki nämä korjaukset on tehty.

8.3 Vaatimustenmukaisuusvakuutus

Suojaerotusmuuntajille laadittiin virallinen vaatimustenmukaisuusvakuutus (liite 6).

Sen ulkoasu on vapaa, mutta siinä tuli olla seuraavat vähimmäisvaatimukset:

- viittaus sovellettuihin direktiiveihin
- vakuutetun laitteen tunnistetiedot
- valmistajan nimi ja osoite
- viittaus harmonisoituihin standardeihin
- vakuutuksen antamispäivä
- valtuutetun henkilön tunnistetiedot ja allekirjoitus.

Vaatimustenmukaisuusvakuutuksella osoitetaan, että muuntaja täyttää kaikki vaaditut viranomaisvaatimukset. (EMC-direktiivin 2004/108/EY soveltamisopas, 38–39.)

9 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli toteuttaa valmis suojaerotusmuuntajakokonaisuus kotelointi- ja rajapintavaatimuksineen. Toteutuksessa tuli ottaa huomioon 8,0 kV:n eristysvaatimus ja magnetoitumisvirran rajoittaminen sellaiselle tasolle, että se ei ylikuormita liikaa kiinteän verkon johdonsuojakatkaisijoita. Myös tarvittavat testaukset ja dokumentointi tuli sisällyttää työhön.

Lopputuloksena saatiin kaksi kappaletta toimivia ja laadukkaita suojaerotusmuuntajia vaadittuine ominaisuuksineen. Tuotteissa on käytetty laadukkaita komponentteja ja ne on hyvin viimeistely. Muuntajaa voidaan käyttää syöksyaallon sieron testauksessa. Jatkossa suojaerotusmuuntajia on mahdollista myös yhdistää laboratoriossa aloitettaviin pienjännitedirektiivin alaisiin testauksiin. Muuntajia voidaan näiden testien lisäksi käyttää yleisinä suojalaitteina. Teknisestä tiedostosta saatiin niin laadukas, että EMC-laboratorio voi käyttää sitä jatkossa pohjana tuottaessa maksullisia palveluja yrityksille.

Opinnäytetyössä jouduttiin laajasti perehtymään tuotesuunnitteluun ja siihen, kuinka tuote saatetaan markkinoille direktiivien mukaisesti. Suunnittelun lisäksi työssä oppi laitteen rakentamiseen liittyviä mekaanisia seikkoja. Iso osa opinnäytetyötä oli tuotetestaus, josta saatiin laaja osaaminen EMC- ja pienjännitedirektiivin mukaiseen testaukseen. Virallisten dokumenttien laatiminen opetti insinööriyölle ominaista dokumentointitaitoa.

Jatkossa teknisen tiedoston EMC-osuudelle hankitaan ilmoitetun laitoksen lausunto. Tuotteita koskeva dokumentaatio säilytetään EMC-laboratorion tiloissa ja tekninen tiedosto on pyydettyessä pystyttävä osoittamaan viranomaiselle 10 vuoden ajan. Tuotteelle laadittu virallinen vaatimustenmukaisuusvakuutus allekirjoitetaan, kun saadaan hyväksytty lausunto ilmoitetulta laitokselta.

LÄHTEET

Amwei Thermistor CO. 2010. *Inrush Current Limiting Power NTC Thermistors* [verkkajulkaisu] [viitattu 26.1.2012] Saatavissa:

http://www.amwei.com/views.asp?hw_id=64

Aura, L. & Tonteri A. J. 1996. *Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet*. Porvoo: WSOY.

Aura, L. & Tonteri A. J. 2002. *Teoreettinen sähkötekniikka*. Vantaa: Dark Oy.

EMC-direktiivin 2004/108/EY soveltamisopas. 2007. [PDF-dokumentti]. [viitattu 21.2.2012]. Saatavissa:

http://tukes.fi/Tiedostot/sahko_ja_hissit/ohjeet/EMC_dir10804_sovopas.pdf

Hager. 2011. *Johdonsuojakatkaisijat* [PDF-dokumentti]. [viitattu 12.12.2011] Saatavissa:

http://www.utupowel.fi/liitetiedosto.aspx?att=PDF/hager/tekniset_tiedot/6_johdonsuojat_t.pdf&s=2

IEC 61000-4-5 2005. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test*. Second edition. International electrotechnical commission.

IEC 61558-2-4 2009. *Safety of transformers, reactors, power supply units and similar products for supply voltages up to 1100 V – Part 2-4: Particular requirements and tests for isolating transformers and power supply units incorporating isolation transformers*. Edition 2.0. International electrotechnical commission.

Intertrafo. 2010. 3.2. *Muuntaja: perustietoa* [verkkajulkaisu]. [viitattu 25.1.2012] Saatavissa:

<http://www.intertrafo.fi/muuntaja.html>

Korpinen, L. 2007. *7 Sähköturvallisuus* [PDF-dokumentti]. [viitattu 12.12.2011] Saatavissa:

http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/7sahkoturvallisuus.pdf

Laajalehto, K. & Suvanto, K. 2006. *Tekniikan Fysiikka 2*. Helsinki: Edita Prima Oy.

LVD 2006/95/EY. 2006. *Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/95/EY* [PDF-dokumentti] [viitattu 27.1.2012] Saatavilla:

[http://eur-](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:374:0010:0019:fi:PDF)

[lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:374:0010:0019:fi:PDF](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:374:0010:0019:fi:PDF)

Noratel. 2004. *IP-luokka* [PDF-dokumentti] [viitattu 11.11.2011] Saatavissa:

<http://www.noratel.fi/content/view/full/195> 16.10fi.dpf

Tiainen, E. 2010. *Johdon mitoitus ja suojaus*. Helsinki: Painokurki Oy.

Tiainen, E. & Vitikka V-P. 2004. *Sähköasennustekniikka 3*. Espoo: Tammer-Paino Oy.

Tukes. 2011a. *Pienjännitedirektiivi* [verkkajulkaisu] [viitattu 4.11.2011] Saatavissa:

<http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Sahko-ja-hissit/Pienjannitedirektiivi--/>

Tukes. 2011b. *Sahkotuoteopas Liite 1* [verkkajulkaisu] [viitattu 21.12.2011] Saatavissa:

<http://www.tukes.fi/sahkotuoteopas/liite1.html>

Tukes. 2011c. *Sähkömagneettinen yhteensopivuus (EMC)* [verkkajulkaisu] [viitattu 4.11.2011] Saatavissa:

<http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Sahko-ja-hissit/EMC/>

Wikipedia. 2006. *Muuntaja* [verkkajulkaisu] [viitattu 8.11.2011] Saatavissa:

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ec/Muuntaja3d.svg>

Wikipedia. 2012. *Galvanic isolation* [verkkajulkaisu] [viitattu 15.2.2012] Saatavissa:

http://en.wikipedia.org/wiki/Galvanic_isolation

Williams, T. 2001. *EMC for Product Designers*. Third edition. Oxford: Newnes.



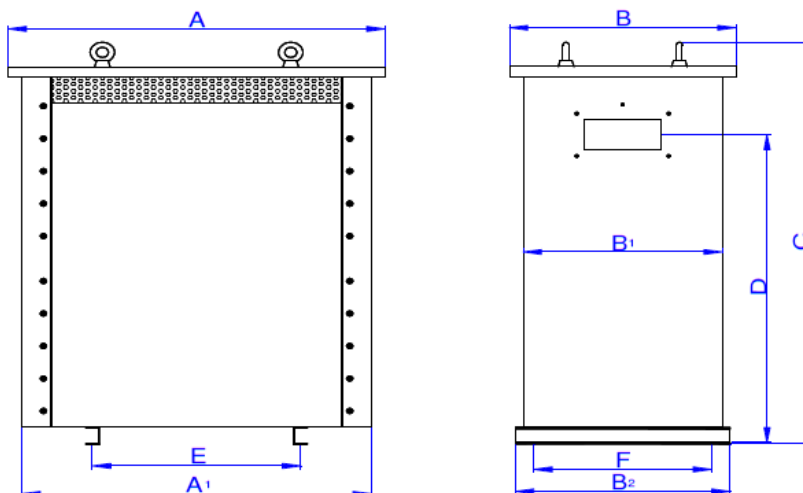
Muuntajan 3KP23-22k
Technical information for transformer

tekniset tiedot
3KP23-22k

Muuntajan nimellisteho / <i>Rated power</i>	22	kVA
Ensiöjännite / <i>Primary voltage</i>	400	V
Toisiojännite / <i>Secondary voltage</i>	400	V
Taajuus / <i>Frequency</i>	50	Hz
Ensiövirta / <i>Primary current</i>	31.8	A
Toisiovirta / <i>Secondary current</i>	31.8	A
KytKentäryhmä / <i>Vector group</i>	Dyn 11	
Tyhjäkäyntihäviöt / <i>No-load losses</i>	~300	W
Kuormitushäviöt / <i>Load losses (t_{Cu} = 120 °C)</i>	~810	W
Oikosulkuimpedanssi / <i>Short circuit impedance</i>	4	%
Suurin ympäristön lämpötila / <i>Maximum ambient temperature</i>	45	°C
Lämmönousu sydämessä / <i>Core temperature rise</i>	80	°C
Lämmönousu käämissä / <i>Winding temperature rise</i>	100	°C
Jäähdytys / <i>Cooling</i>	AN	
Kotelointiluokka / <i>Protection class</i>	IP-23	
Käämimateriaali / <i>Winding material</i>	Cu	
Materiaalien lämpöluokka / <i>Insulation class of materials</i>	F	
Staattinen suoja/Static shield	Ei/No	
Lämpötilanvalvonta / <i>Temperature control</i>	Ei/No	
Sovellettu standardi / <i>Applied standard</i>	IEC 60076-11	

Toision jännitelujuus on 8kV AC

Käynnistysvirtapiikkiarvio n. 12xI_n= 380A



Mitat millimetreinä / Dimensions in millimeters

Tyyppi / <i>Type</i>	A	A1	B	B1	B2	C	D	E	F	G		kg
3KP23-22k	600	595	400	370	400	800	630	356	370	10x19		145

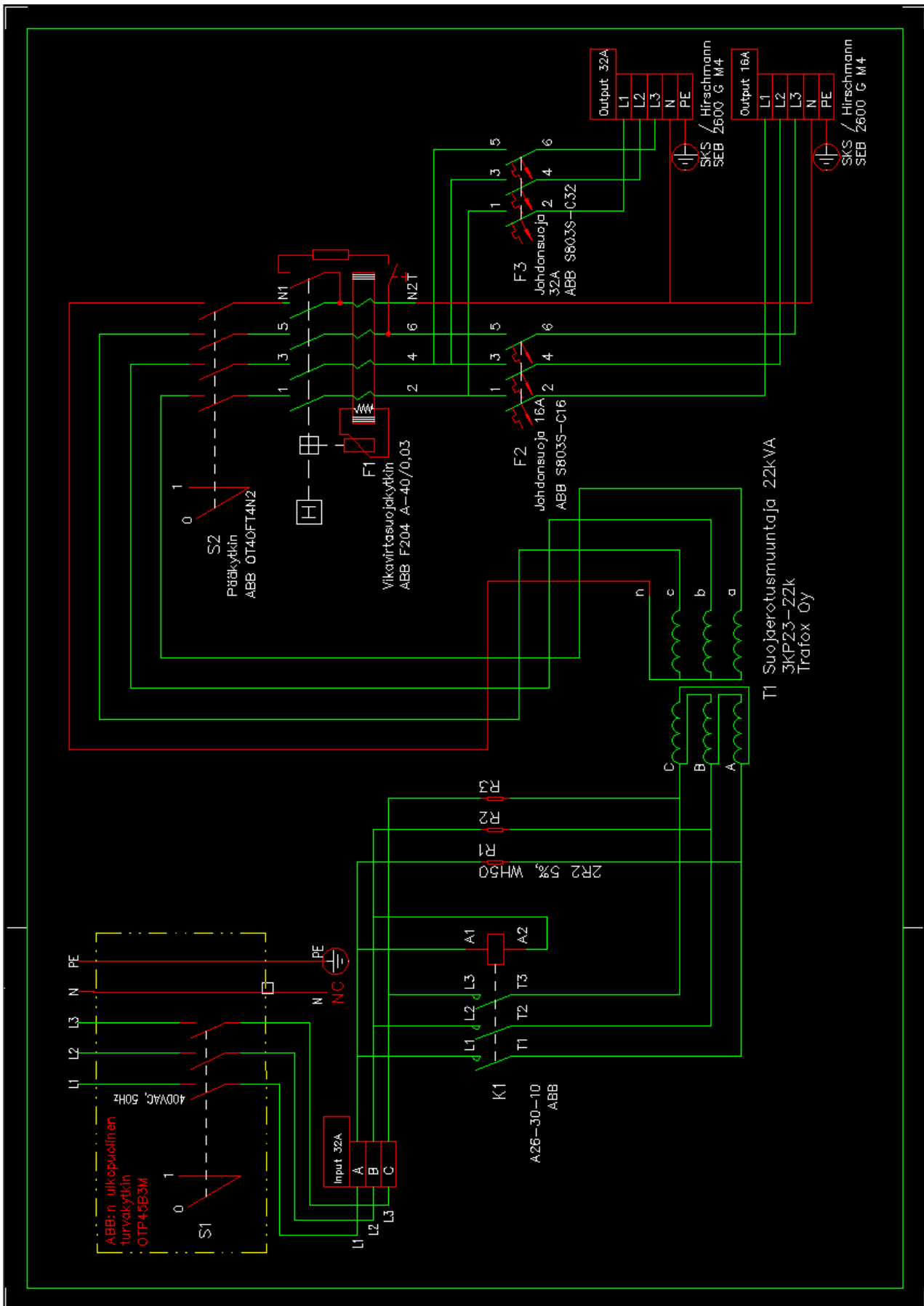
23.5.2005

ISO 2768-v

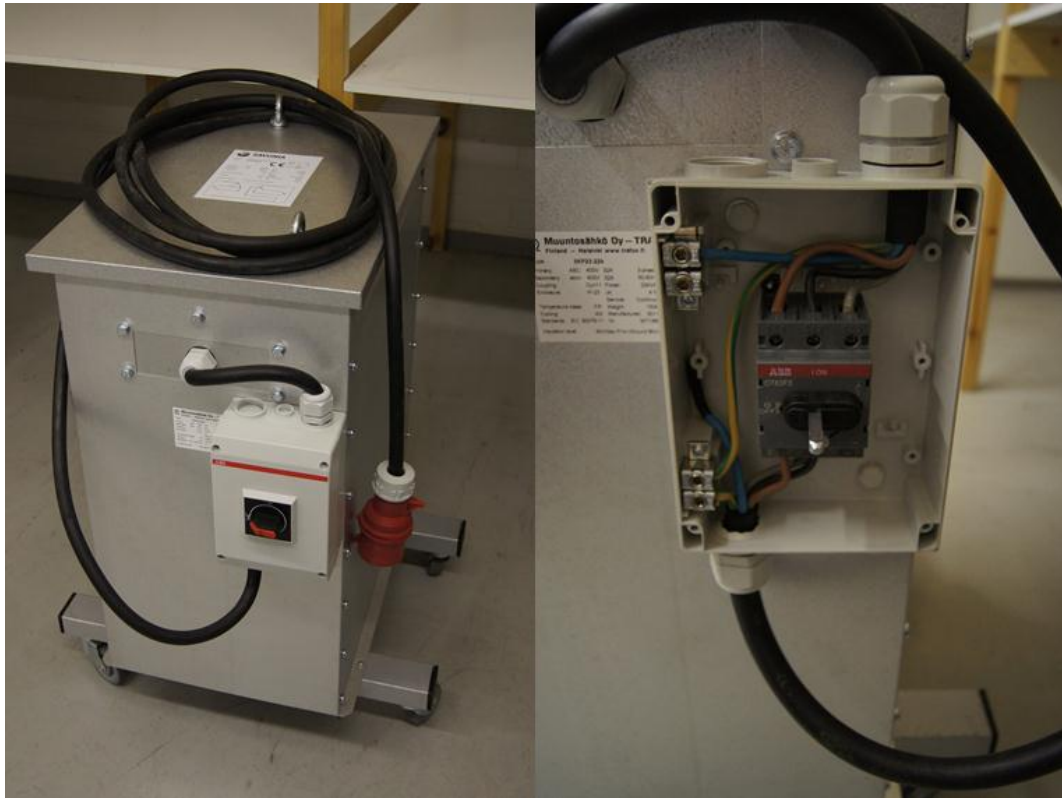
Muuntosähkö Oy - Trafox
Niittylänpolku 4
FIN-00620 HELSINKI
www.trafox.fi

Faksi +358-207933746
Puhelin +358-207933700
sposti sales@trafox.fi

Kytentäkaavio



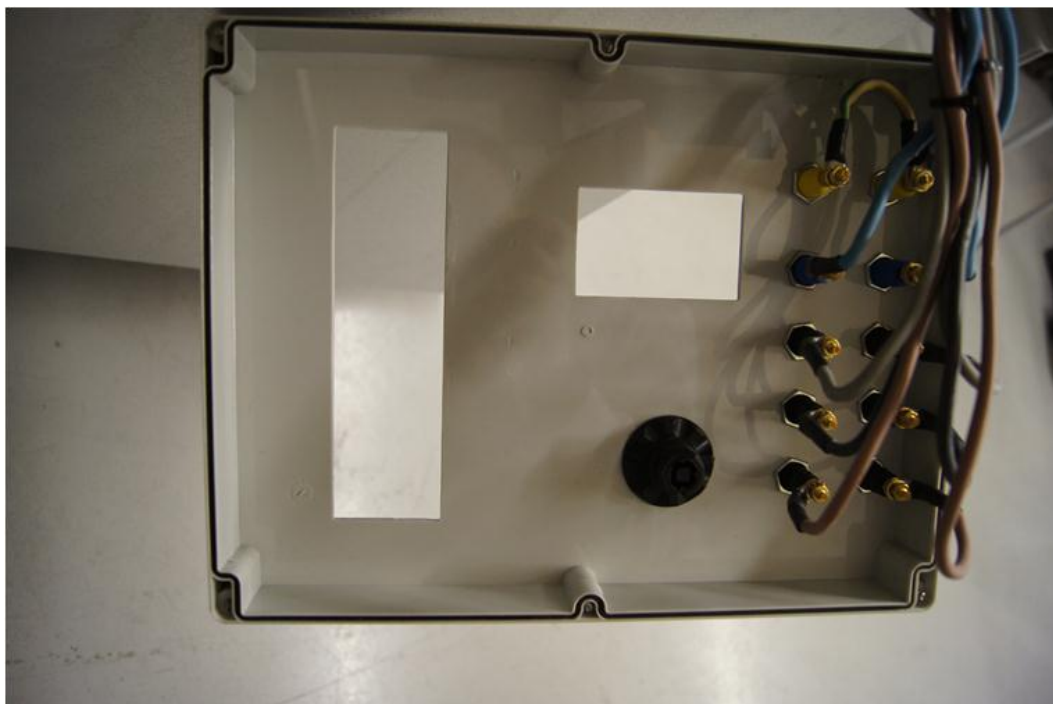
Valmis suojaerotusmuuntaja 3P32-22kVA



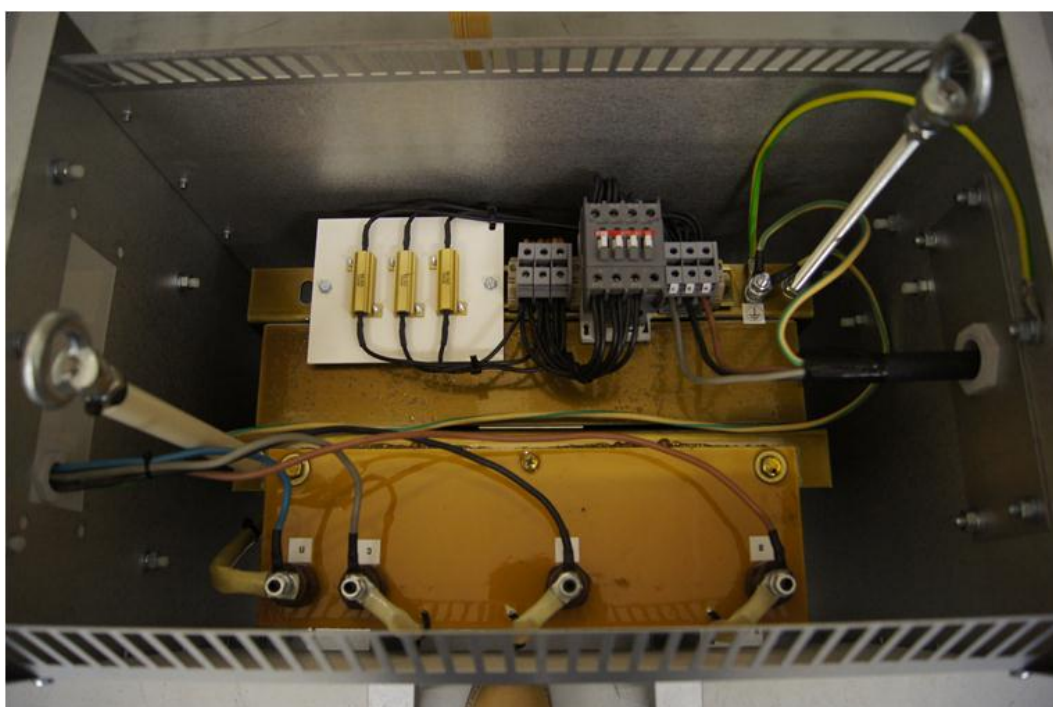
Kuva 1. Suojaerotusmuuntaja kuvattuna ensiöpuolelta ja pääkytkimen kotelointi auki.



Kuva 2. Suojaerotusmuuntaja kuvattuna sivusta ja toisiopuolelta.



Kuva 3. Toisiopuolen ulostuloliitännät koteloinnin sisäpuolelta.



Kuva 4. Muuntajan liitännät koteloinnin sisäpuolella.

