



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

KISKOERISTE

TEKIJÄ: Taneli Pasanen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Taneli Pasanen			
Työn nimi Kiskoeriste			
Päiväys	27.4.2015	Sivumäärä/Liitteet	41
Ohjaaja(t) yliopettaja Juhani Rouvali, lehtori Mika Mäkinen			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) ABB Oy, Helsinki, diplomi-insinööri Jaani Kärppä			
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön aiheena oli suunnitella sähköinen eristys ABB Oy:n kehittämään uuden sukupolven taajuusmuuttajaan. Aihe on ajankohtainen, koska taajuusmuuttajia valmistetaan ja otetaan käyttöön yhä enemmän niiden tuomien kustannus- ja tehohyötyjen vuoksi.</p> <p>Työ aloitettiin tutkimalla erilaisia eristemateriaaleja sekä suunnittelemalla testejä, joilla mitattiin materiaalien ominaisuuksia erilaisissa olosuhteissa. Työssä käytettiin neljää erilaista testiä, jotka testasivat kappaleiden läpilyöntilujuutta olosuhteiden aiheuttaman rasituksen yhteydessä. Työn tarkoituksena oli myös havainnollistaa läpilyöntilujuuden muutosta uusien ja rasitettujen eristekappaleiden välillä testien yhteydessä. Haastetta opinnäytetyöhön toi tarkasti määritellyt sekä korkeat kriteerit, jotka eristeelle oli ennalta määritetty.</p> <p>Työn tuloksena saatiin testitulokset, jotka osoittavat parhaiten sopivat materiaalit kyseisen taajuusmuuttajan virtakiskojen eristeiksi. Työn tuloksia voidaan hyödyntää yleisesti taajuusmuuttajan virtakiskon eristeen suunnittelussa ja valinnassa.</p>			
Avainsanat eriste, läpilyönti, läpilyöntilujuus, taajuusmuuttaja, kisko			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author(s) Taneli Pasanen			
Title of Thesis Busbar insulation			
Date	27 April, 2015	Pages/Appendices	41
Supervisor(s) Mr. Juhani Rouvali, Principal Lecturer. Mr. Mika Mäkinen, Senior Lecturer			
Client Organisation /Partners ABB Oy, Helsinki, Mr. Jaani Kärppä, Master of Science in Technology			
<p>Abstract</p> <p>The topic of the final year project was to design electrical insulation for a new generation frequency converter developed by ABB. The topic is timely, because frequency converters are manufactured and introduced more and more all the time because they provide cost and power benefits.</p> <p>The work was started by studying a variety of insulating materials and designing test methods for measuring the properties of materials under different conditions. There were four different types of tests that tested breakdown strength of the objects under different conditions. The purpose of the work was also to illustrate the changes of the dielectric strength between the new and already stressed insulation objects. The challenge in the project was brought by well-defined and high criterions that were pre-defined for the insulation.</p> <p>The outcomes of the project were the test results, which show the most suitable materials for the insulation of the frequency converter's busbars. The results can generally be utilized in the designing and specifying the insulation for the busbars of frequency converters.</p>			
<p>Keywords insulation, electric breakdown, dielectric strength, frequency converter, busbar</p>			

ESIPUHE

Opinnäytetyö oli haastava mutta mielenkintoinen ja opettava kokemus. Työn kautta perehdyin perusteellisesti erilaisiin sähköristemateriaaleihin ja – testausmenetelmiin. Työssä pääsin myös tutustumaan ABB Helsingin työympäristöön ja työskentelytapoihin.

Haluan kiittää ABB Helsinki Oy:n diplomi-insinööri Jaani Kärppää kannustuksesta ja ohjauksesta. Lisäksi kiitän Savonia-ammattikorkeakoulun vastuuopettajia yliopettaja Juhani Rouvalia ja lehtori Mika Mäkistä. Haluan myös kiittää avopuolisoani Tuulia sekä perhettäni, jotka ovat tukeneet minua läpi opiskeluajan.

Kuopiossa 27.4.2015

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
1.1	Toimeksiantajan esittely.....	7
1.2	Työn tavoitteet	7
2	KÄSITTEET	9
2.1	Taajuusmuuttaja.....	9
2.2	Sähköeriste	10
2.3	Sähköjohdin	11
2.4	Läpilyönti	11
3	ERISTEMATERIAALIT	13
3.1	Muovit	13
3.2	Muut kiinteät eristeet.....	13
3.3	Nestemäiset eristeet.....	13
3.4	Kaasut	14
4	TESTATTAVAT MATERIAALIT	16
4.1	Polypropeeni (PP).....	16
4.2	Polykarbonaatti (PC).....	16
4.3	Polyeteeni (PE)	17
4.4	Polybuteenitereftalaatti (PBT)	17
4.5	Nomex.....	17
4.6	Kapton-eristeteippi	17
5	TESTISUUNNITELMAT	19
5.1	Läpilyöntitesti	19
5.2	85/85-testi	21
5.3	Lämpötilanvaihtelutesti	22
5.4	Läpilyöntilujuuden selvittäminen	23
5.5	Testikappale	25
6	TESTITULOKSET	27
6.1	Läpilyöntitesti	27
6.2	85/85 -testi	27
6.3	Lämpötilanvaihtelutesti	28
6.4	Läpilyöntilujuuden selvittäminen	31

7	JOHTOPÄÄTÖKSET	33
7.1	Testaustulokset.....	33
7.2	Kehittämisideat	34
7.3	Jatkoideat	35
8	ERISTEET TULEVAISUUDESSA.....	36
8.1	Nykyiset käytössä olevat eristeaineet.....	36
8.2	Nanoteknologia.....	36
9	YHTEENVETO.....	38
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT.....	39

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö käsittelee taajuusmuuttajan virtakiskon eristeen suunnittelua. Tarkoituksena on suunnitella ahtaaseen tilaan sopiva sähköinen eristys. Lisäksi täytyy varmistaa rakenteen jäähdytys sekä mekaanisesti kestävä liitos. Työn toimeksiantajana on ABB Oy, Helsinki.

1.1 Toimeksiantajan esittely

ABB Oy on johtava sähkövoima- ja automaatioteknologiayhtymä, jonka pääkonttori sijaitsee Sveitsin Zürichissä. ABB Oy työllistää maailmanlaajuisesti noin 140 000 henkilöä noin sadassa maassa. Suomessa ABB työllistää noin 5 200 työntekijää, joista suurin osa työskentelee Vaasan ja Helsingin tehdaskeskittymissä. Yritys tarjoaa tuotteita, palveluita ja ratkaisuja, jotka parantavat teollisuus- ja energiayhtiöasiakkaiden kilpailukykyä ottaen samalla huomioon ympäristöasiat. (ABB Oy 2015.)

ABB on perustettu vuonna 1988, mutta sen historia Suomessa ulottuu yli 125 vuotta taaksepäin. Aiemmin yritys toimi nimellä Strömberg, jonka perusti Axel Gottfrid Strömberg vuonna 1889. Yrityksen suunnittelemat sähkökoneet olivat aikansa huippua ja tulivat palkituksi kansainvälisissä näyttelyissä. Axel Gottfrid Strömberg toimi itse yhtiön toimitusjohtajana vuoteen 1919 ja hallituksen puheenjohtajana sekä jäsenenä kuolemaansa asti eli vuoteen 1938. Yrityksen liiketoiminta kostuu viidestä eri divisioonasta, jotka jakautuvat vielä asiakassegmenttien ja teollisuudenalojen mukaan. (ABB Oy 2015.)

ABB:n merkittävimpiä innovaatioita nyky-yhteiskunnan kannalta ovat olleet mm. korkeajännitteisen tasavirran siirto pitkillä välimatkoilla sekä laivojen sähköistysratkaisut, jotka ovat mullistaneet alaa. Lisäksi nykyään ABB on maailman johtava teollisuuden taajuusmuuttajien, moottoreiden, turbiinigeneraattoreiden sekä sähköverkkojen toimittaja. (ABB Oy 2015.)

1.2 Työn tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella taajuusmuuttajan sisäisille virtakiskoille kriteerit täyttävä pinnoite tai päällystävää materiaali, joka toimisi eristeenä. Eristeen tulisi kestää mahdollisimman hyvin erilaisia rasituksia, kuten mekaanista rasitusta, kosteutta, kiskon jännitettä, kemikaaleja sekä suuria lämpötilaeroja. Tavoitteena on tutkia, vertailla ja testata kattava otanta erilaisia mahdollisia eristemateriaaleja ja valita niistä testien perusteella paras mahdollinen virtakiskojen eristeeksi.

Valitun eristeen tulisi kestää lämpötilaa, joka vaihtelee – 40 °C ja +150 °C:n välillä. Lisäksi eristeen pitäisi kestää 0 - 100 % RH-kosteutta ja sen läpilyöntilujuus tulisi olla vähintään 4 kV. Mekaanisia rasituksia voi ilmetä esimerkiksi hankauksena, värinä, puristuksena, iskuna tai taivutuksena ja näitä kaikkia suunniteltavan eristeen tulisi kestää mahdollisimman hyvin.

Virtakiskoston muotoon liittyvät asiat tuli ottaa tarkasti huomioon. Kiskosto vie paljon tilaa taajuusmuuttajan muutenkin ahtaissa sisätiloissa, joten eristeen tulisi olla todella ohutta ja helposti muokattavaa.

Lisäksi eristeen tulisi soveltua tuotantoon, joten eristeen täytyisi olla edullinen toteuttaa. Ympäristöön liittyvät asiat on huomioitava eristettä suunniteltaessa, sillä taajuusmuuttajan komponentit tulee pystyä kierrättämään. Tämän vuoksi eristeeksi ei käy mikä tahansa eristävä aine tai materiaali.

Haasteita aiheutti myös testimenetelmien suunnitteleminen, sillä aiemmin Savonia-ammattikorkeakoulussa ei ollut testattu eristekappaleita tällä tavalla. Tämän vuoksi työhön tuli alusta asti suunnitella läpilyöntitestien testimenetelmä ja käytettävä testipenkki.

Taajuusmuuttajia käytetään nykyään yhä enemmän teollisuudessa, koska niiden tuomat kustannus- ja tehohyödyt ovat pitkällä aikavälillä huomattavia. ABB on ollut vuosia yksi maailman johtavimmista taajuusmuuttajien valmistajista ja yrityksen uusi taajuusmuuttajamalli on tällä hetkellä tekeillä.

2 KÄSITTEET

Tässä luvussa esitellään keskeisimmät työssä esiintyvät käsitteet.

2.1 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajien historia ulottuu 1960-luvun loppuun, jolloin niitä alettiin valmistaa Tanskassa. Tuolloin tehoalue rajoittui 10 – 30 kW:iin ja ne olivat todella suurikokoisia verrattuna nykyisiin taajuusmuuttajiin. Suomessa taajuusmuuttajia on valmistettu 1970-luvulta lähtien. (Mäkinen ja Kallio 2004, 136.)

Taajuusmuuttaja on vaihtovirtaverkossa käytettävä sähkölaite, jonka tarkoituksena on säätää kolmivaiheisen oikosulkumoottorin pyörimisnopeutta, jolloin prosessit ovat paremmin hallittavia sekä energiatehokkaampia (Mäkinen ja Kallio 2004, 136 – 137). Taajuusmuuttaja säätelee portaattomasti moottorin pyörimisnopeutta sekä sen vääntömomenttia. Suurinpana etuna taajuusmuuttajien käytössä on energiansäästö, koska periaatteessa taajuusmuuttajan avulla moottori saadaan aina pyörimään prosessin tarpeen mukaisella teholla. Taajuusmuuttajista on suuri hyöty, sillä esimerkiksi kaksinopeusmoottorien käyttäminen tai moottorin hallinta sammuttamalla se väliajoin ovat riittämättömiä energiatehokkuuden kannalta. (ABB Oy 2015.) Taajuusmuuttaja myös ohjaa moottorin toimintaa sekä suojaa esimerkiksi ylikuormitukselta, jumitilanteelta tai muilta vikatilanteilta (Hietalahti 2012, 101).

ABB:n arvion mukaan nykyisin yleisesti käytössä olevat sähköjärjestelmät säästävät noin 115 TWh sähköä joka vuosi eli saman verran kuin 14 ydinreaktoria vuodessa. Hiilidioksidipäästöjä tulee vuosittain 97 miljoonaa tonnia vähemmän. Tämä määrä on Suomen vuosittaisia kokonaispäästöjä suurempi. Saavutetut energiasäästöt voivat olla jopa niin suuria, että investoinnit, jotka käytetään järjestelmien asennuksiin, voidaan saada takaisin jo muutamana kuukauden kuluessa säästöinä. Monet pumppu- ja tuuletinsovelluksien kustannukset maksavat itsensä takaisin alle vuodessa. (ABB Oy 2015.)

Kuitenkin vain alle 10 % maailman käytössä olevista moottoreista on varustettu taajuusmuuttajilla. Sähkökäyttöjä on saatavilla useita eri kokoja, ja lisäksi ne on koteloitu pienimmillään vain maitopurkin ja suurimmillaan vaatekaapin kokoihin koteloihin säädettävän moottorin koon mukaan. (ABB Oy 2015.)

Tämän työn eristettä suunnitellaan käytettävän taajuusmuuttajassa, joka on ABB:n suunnittelema uuden sukupolven taajuusmuuttaja. Tyyppinimeltään tämän työn taajuusmuuttaja on HES880-104. (kuva 1.)



KUVA 1. ABB:n HES880-104 taajuusmuuttaja (ABB.)

2.2 Sähköeriste

Sähköeristeeksi kutsutaan ainetta, jolla on vähän varauksenkuljettajia ja täten huono johtavuus (Juhala, Lehtinen, Suominen ja Tammi. 2005, 6 – 7). Tällöin sanotaan, että eristeellä on suuri resistiivisyys sekä vastaavasti pieni sähkönjohtavuus. Sähköeristeellä voidaan tarkoittaa myös sähkötekniistä rakennetta tai komponenttia, jolla virtapiirejä voidaan erottaa galvaanisesti toisistaan tai ympäristöstä. Sähkötekniikassa parhaiten tunnettuja ja eniten käytettyjä eristemateriaaleja ovat mm. erilaiset muovit, posliinit, lasit, lakat, öljyt sekä kaasut. Suurin osa epämetalleista voi toimia eristeinä, poikkeuksena kuitenkin esimerkiksi grafiitti.

Sähköeristeen tarkoituksena on ylläpitää johtimen tai kiskon sähköisiä ominaisuuksia ja vähentää signaali- tai jännitehäviöitä johtimessa (Cable Manufacturing & Assembly Company, Inc.). Eristeiden tärkeimpiä ominaisuuksille ovat vuotovirran suuruus ja jännitteen kestävyys. Läpilyöntijännitteellä tarkoitetaan jännitearvoa, jota eristemateriaali ei enää kestä vaadittua aikaa. (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen ja Palvi 1996, 119 – 120.) Nesteille ja kiinteille eristeaineille lämpötila on tärkein tekijä, joka vaikuttaa eristeen vanhenemiseen.

Montsingerin lain mukaan esimerkiksi öljyeristyksellä jokaista 6 °C lämpötilan kasvamista kohden vanheneminen kiihtyy kaksinkertaiseksi. (Aro ym. 1996, 173 – 174.) Normaalisti eristeissä elektronivyön (ts. valenssivyö) ja johtavuusvyön väli on suuri, joten siellä ei ole monia vapaita elektroneja, eikä eristeessä ei pysty kulkemaan suurta määrää virtaa. Eristeen kuumetessa liikaa saattaa sulanut eriste muuttua jopa hyväksi johteeksi. Tämä johtuu eristeessä olevien valenssielektronien siirtymisestä lähemmäksi johtavuusvyötä. (Juhala ym. 2005, 45.)

Kiinteät eristeaineet voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri pääryhmään, joita ovat orgaaniset, epäorgaaniset ja synteettiset eristeet. Näistä erityisen suuri ryhmä on synteettiset polymeerit, joihin kuuluu erilaisia muoveja, jotka on valmistettu teollisesti. Synteettisillä eristeaineilla on todella hyvät sähköiset ominaisuudet ja sen lisäksi ne ovat yleisesti helppoja työstettäviä haluttuihin muotoihin. Epäorgaaniset eristeet, joista tavallisimpia ovat lasit, kiilteet ja keraamit, eroavat orgaanisista eristeistä ominaisuuksiltaan, koska ne kestävät hyvin korkeaa lämpötilaa ja lisäksi niillä on hyvät sähköiset sekä mekaaniset ominaisuudet. Epäorgaanisten eristeiden heikkous on työstettävyys. Orgaanisista eristeistä tavallisimpia ovat esimerkiksi paperi, kumi sekä puu. Näitä on helppo käsitellä sekä työstää ja hyvin usein niillä on hyvät sähköiset ominaisuudet. Heikkouksina ovat korkeat lämpötilat sekä nopea vanheneminen käytössä. (Aro ym. 1996, 119 – 120.)

2.3 Sähköjohdin

Opinnäytetyö keskittyy sähköjohtimen, tässä tapauksessa kiskon, ympärille tulevaan eristemateriaaliin. Sähköjohdin on itsessään materiaali, usein jonkinlainen sähköä hyvin johtava metalli, kuten kupari tai alumiini. Sähköjohtimen kautta sähkö pääsee kulkemaan laitteissa. Johtimen avulla voidaan kuljettaa sähköistä virtaa, jännitettä ja signaalia johtimen käyttötarkoituksen mukaan (Cable Manufacturing & Assembly Company, Inc.).

2.4 Läpilyönti

Jos sähköinen eristys ei ole riittävä ja jännite kasvaa liian suureksi eristeen jännitelujuuteen nähden, pääsee sähkö lyömään eristeen läpi tai ohi. Kun sähkökentän voimakkuus on niin suuri, että läpilyönti tapahtuu eristeen läpi, puhutaan täydellisestä purkauksesta. Sen aikana eristeen läpi kulkee vuotovirtaa. Vuotovirran merkittävä kasvu merkitsee sitä, että eriste on vaurioitumassa. Ylilyöntiä ja läpilyöntiä ei tule sekoittaa keskenään, koska ylilyönti eroaa läpilyönnistä siinä, että ylilyönnissä purkaus tapahtuu kahden eristeen rajapinnassa. (Aro ym. 1996, 57.)

Läpilyöntilujuus ei ole ominainen vakio materiaaleille, vaan riippuu monista erilaisista ulkoisista tekijöistä. Läpilyöntilujuuteen vaikuttavat vaihtovirran taajuus, virran vaikutusaika, lämpötila sekä materiaalin paksuus (Hurri 2005, 11).

3 ERISTEMATERIAALIT

Opinnäytetyö aloitettiin tutkimalla erilaisia tapoja taajuusmuuttajan kiskoeristeen toteuttamiseksi. Kyseinen taajuusmuuttajan virtakiskojen ympärillä ei ole paljoo tilaa. Silti suunniteltavan eristeen tuli olla ominaisuuksiltaan kriteerit täyttävä.

3.1 Muovit

Aluksi tutkittiin ja vertailtiin muovien termisiä sekä sähköisiä ominaisuuksia. Muoveja on olemassa todella monta eri laatua. Muoveilla on tunnetusti erinomaiset sähköiset ominaisuudet. Yleisesti muovien ongelmana pidetään sitä, että ne eivät palaudu. Lisäksi muoveille sekä hyvin korkeat että myös matalat lämpötilat voivat olla kriittisiä. Korkeissa lämpötiloissa muovit alkavat sulaa ja matalissa haurastua. Lisäksi erilaiset kemialliset reaktiot vaikuttavat siihen, kuinka hyvin eriste pysyy käyttökelpoisena. Myös UV-säteily voi haurastuttaa polymeerejä katkomalla polymeeriketjuja. (Aro ym. 1996, 119 – 120.)

3.2 Muut kiinteät eristeet

Kiinteitä eristeitä on olemassa monia satoja, joten aivan kaikkia niistä ei ollut aikaa ja mahdollisuutta tutkia. Työssä tutkittiin mm. lasin ja posliinin käyttöä sähköeristystarkoituksessa. Näitä kahta käytetäänkin yleisesti sähköeristeinä. Sekä muovien että lasin ja posliinin ongelmana eristeenä on palautumattomuus.

Lasia ja posliinia käytetään usein eristimissä, joissa niiden tarkoituksena on tukea kaasumaisten eristeiden yhteydessä jännitteisiä osia siten, että niiden etäisyydet maadoitettuihin kappaleisiin ja muihin jännitteisiin osiin ovat tarpeeksi suuret. Lasisten eristimien materiaalina käytetään nykyisin lähinnä karkaistua lasia. Karkaistun lasin mekaaninen lujuus kasvaa ja samalla eristin pystytään rakentamaan ohuemmaksi verrattuna posliiniseen eristimeen. Posliiniset eristimet ovat ominaisuuksiltaan lähellä lasia, mutta näiden aineiden välillä on muutamia ratkaisevia eroja. Esimerkiksi karkaistun lasin mekaaninen lujuus ja läpilyöntilujuus ovat suurempia kuin posliinin. Posliiniset eristimet ovat kuitenkin helpompia rakentaa ja ne eivät pirstoudu, kuten lasiset eristimet. (Aro ym. 1996, 127 – 129; Cotton 1958)

3.3 Nestemäiset eristeet

Kiinteiden materiaalien lisäksi tutkittiin myös mahdollisuutta käyttää eristeenä nestemäistä eristettä, jota käytetään yleensä mm. muuntajissa, kondensaattoreissa sekä katkaisijoissa. Nestemäisten eristeiden etu verrattuna kiinteisiin eristeisiin on se, että ne palautuvat lähes ennalleen läpilyönnin sattuessa. Nestemäisillä eristeillä on alhainen permittiviteetti ja alhai-

set dielektriset häviöt sekä usein hyvä lämmönsiirtokyky, minkä vuoksi niitä käytetään jäähdystystehtävissä. (Aro ym. 1996, 111 – 112.)

Öljyeriste on yleisesti havaittu toimivaksi nestemäiseksi eristeeksi mm. suurissa muuntajissa, mutta tässä tapauksessa se on hyvin vaikeaksi toteuttaa. Kyseinen taajuusmuuttaja tulisi suunnitella melkein kokonaan uusiksi, jos eristeenä käytettäisiin öljyä, koska vähintään taajuusmuuttajan osa, johon öljy tulisi, täytyisi tiivistää entistä paremmin ja jäähdystystä tulisi tehostaa. Öljyeristys on myös hyvin hauras epäpuhtauksille, jotka vaikuttavat jännitelujuuteen. Muuntajissa eristeöljy vanhenee hapen vaikutuksesta. Myös jäähdytys olisi vaikeampi toteuttaa taajuusmuuttajan ollessa täysin tiivis, joten päätettiin yhdessä ABB:n vastuhenkilön kanssa jättää öljyeristys pois suunnitelmista. (Aro ym. 116 – 117.)

3.4 Kaasut

Myös erilaisia kaasuja on käytetty paljon eristeinä, lähinnä suurten kojeistojen yhteydessä. Toisin kuin kiinteät eristeaineet, kaasut ovat palautuvia eristeitä. Yksi yleisimmistä kaasumaisista eristeaineista lienee SF_6 , eli rikkiheksafluoridi, jota on käytetty esimerkiksi keskijännitekojeistojen katkaisijakojeistojen eristeenä sekä kuormaerotinkojeistoissa valokaaren sammutusaineina (Siemens 2012, 3). Paljon käytetään myös koteloituja kaasueristyskäyttöä (GIS), joissa yleensä on käytetty normaalia suurempaa painetta, jotta kaasun jännitelujuus olisi mahdollisimman suuri. Painetta ei kuitenkaan ole syytä nostaa liian korkeaksi, koska paineen kasvaessa myös kotelon mekaaninen kestävyys sekä tiiviysvaatimukset kasvavat. (Aro ym. 1996, 119 – 120.) Eristeenä käytettävien kaasujen ongelma on myös se, että niiden jännitelujuus ei ole vakio, vaan se saadaan yhtälöstä

$$p * d \tag{1}$$

jossa p on paine ja d on elektrodiväli. Jännitelujuus u saadaan myös selvittämällä se Paschenin laista yhtälöllä

$$u = E(p * d) \tag{2}$$

Kaavassa 2 E on sähkökentän voimakkuus. Paschenin lain avulla voidaan selvittää jännitelujuudet erilaisille kaasumaisille eristeaineille. (Aro ym. 1996, 65 – 68.)

Kaasun käyttäminen tällaisessa taajuusmuuttajan eristämässä on todella hankalaa, koska kuten öljyeriste, kaasukin vaatisi aivan erilaisen tiiviiden taajuusmuuttajan kotelolta. Lisäk-

si kaasumaisten eristeiden kunnollinen testaaminen Savonia-ammattikorkeakoulun tiloissa on liki mahdotonta.

Ilmaeristeillä on alhaisempi läpilyöntilujuus kuin muilla eristeaineilla. Ne ovat selvästi yleisimmin käytettyjä eristeitä suurjännitetekniikassa. Ilmaeristeiden heikkous on se, että toimiakseen eristeenä ilma tarvitsee suhteessa suuren eristysvälin. (Aro ym. 1996, 91.) Ilmaa päätettiin käyttää eristeenä niissä kohdin, missä tilaa taajuusmuuttajan virtakiskon ympärillä on yli 10,3 mm, koska tällöin ilmaväli on tarpeeksi suuri toimiakseen riittävänä eristeenä (Kärppä 2014-12-12).

4 TESTATTAVAT MATERIAALIT

Testeihin valittiin kattavasti erilaisia materiaaleja, koska esimerkiksi erilaisia muovityyppejä on todella monia, ja vielä enemmän hieman toisistaan poikkeavia versioita tietyn tyyppisistä muoveista. Siksi tuli tutkia ja ottaa selvää jo nykyisin käytössä olevista eristeistä. Näiden pohjalta pystyttiin valitsemaan testattavat materiaalit. Heti alkuun osoittautui, että erilaiset muovilaadut ovat paljon käytettyjä eristemateriaaleina. Tästä syystä tämän työn testeissä keskityttiin lähinnä erilaisiin muoveihin.

Tutkituista muovityypeistä parhaiten nämä kriteerit täyttivät polypropeeni, polykarbonaatti, polyeteeni sekä polybuteeni. Näistä muovilaaduista päätettiin valita ainakin yksi mukaan tutkiviin testeihin.

Muovien lisäksi testeihin päätettiin ottaa mukaan mm. Nomexia ja Kapton-eristysteippi. Kapton-eristesteippi valikoitui mukaan, koska sen avulla haluttiin selvittää teipin sopivuutta tällaisessa eristystarkoituksessa sekä kahta erilaista Nomex:ia, joista toinen oli 0,2 mm ja toinen 0,5 mm paksuista.

4.1 Polypropeeni (PP)

Polypropeeni on termoplastinen polymeeri, jota tehdään propeenista. Se on myös osakiteinen valtamuovi. Propeenia käytetään useissa tarkoituksissa, kuten kalvoissa, kuiduissa, köysissä ja levyissä. Polypropeeni on erittäin vastustuskykyinen liuottimille, emäksille ja happoille. Se on rakenteeltaan kiteinen muovi. Tähän testiin polypropeeni materiaaliksi valittiin Formex GK-17. (Koleva, Polypropeeni; Hurri 2005, 43.)

4.2 Polykarbonaatti (PC)

Polykarbonaatit ovat yksi termoplastisten polymeerien ryhmä. Niiden merkittävimpiä ominaisuuksia ovat iskunkestävyys sekä sen helppo työstettävyys. Polykarbonaatista valmistetaan mm. CD-levyjä, kypäriä, iskunkestäviä läpinäkyviä muovia, kännyköiden näyttöjä sekä suojalasien linssejä. Helpposta työstettävyydestä kertoo se, että polykarbonaattilevyjä voidaan särmätä yli 90 asteen kulmiin sekä taittaa ilman lämmitystä. Polykarbonaattilevyt eivät myöskään vaurioidu, kun niitä sahataan tai kun niiden reunoihin porataan reikiä.

Heikkona ominaisuutena polykarbonaateilla on huono liuottimien kestävyys, jotka liuottaessaan muovin pintaa, voivat samalla pilata muovin iskunkestävyyden. Myös lämmönkestävyys on esimerkiksi lasiin nähden alhainen, mutta kuitenkin parempi kuin muissa muoveissa.

Polykarbonaatteja on useita erilaisia seoksia, joista testiin valittiinkin kaksi: läpinäkyvä Lexan FR60 ja Lexan FR700. (Nykänen, Polykarbonaatti; Hurri 2005, 42).

4.3 Polyeteeni (PE)

Polyeteeni on yksi käytetyimmistä polymeereistä, mutta sen ominaisuudet vaihtelevat suuresti valmistusmenetelmän mukaan. Niihin vaikuttavat mm. polymeerin moolimassa, tiheys, rakenne ja kiteisyys. Sen käytettävyys johtuu osittain ainakin sen yksinkertaisesta rakenteesta sekä edullisuudesta. Polyeteenimateriaaliksi testeihin valittiin PE-1000. (Koleva, Polyeteeni.)

4.4 Polybuteenitereftalaatti (PBT)

Polybuteenitereftalaatti on hyvin jäykkä ja iskunkestävä kiteinen polyesterimuovi ja kestää hyvin pitkäaikaista lämpöä. Polybuteenitereftalaatti on etenkin ruiskuvalettuna paljon käytetty materiaali, mutta soveltuu hyvin myös putkiekstruution ja levyjen suulakepursotukseen. Tämän muovityypin muoveista testeihin valikoitui väriltään valkoinen Valox FR1 (Hurri 2005, 43).

4.5 Nomex

Nomex on palonkestävä synteettinen kuitu, jota käytetään paljon esimerkiksi palomiehien varusteissa. Sitä käytetään myös laajalti sähköeristeenä muun muassa moottoreissa, muuntajissa, generaattoreissa sekä monissa muissa sähkölaitteissa sähköisen eristyksen parantamiseksi. Näissä testeissä käytetyt kaksi Nomex materiaalia oli lujitettu lasikuidulla. Nomexin heikkoutena on se, että jos sitä taittaa jyrkkään kulmaan, se katkeaa. Tämän vuoksi se ei välttämättä sovellu kovinkaan hyvin ahtaisiin tiloihin, joissa on jyrkkiä kulmia. (DuPont, Electrical Insulation 2015; DuPont, Flame Resistant Nomex 2015)

4.6 Kapton-eristeteippi

Kapton eristeteippi on hyvin leimahdusta estävä materiaali. Kapton-polyamidi teipissä on silikonipohjainen liima. Kapton eristeteippi otettiin mukaan testeihin, koska haluttiin valita yksi muista poikkeava materiaali. Muiden materiaalien ollessa valmiita eristeliuksia, Kapton-eristeteippi toimitettiin testeihin vain teippirullana. (Kaptontape 2015; DuPont, Kapton Polyimide Film 2015.)

Alla on esitetty taulukko valittujen muovieristeiden ominaisuuksista.

TAULUKKO 1 Muovieristeiden ominaisuuksia (Hurri 2005, 47; Matweb 2015; Cadillac Plastic 2005; ITW Formex 2015.)

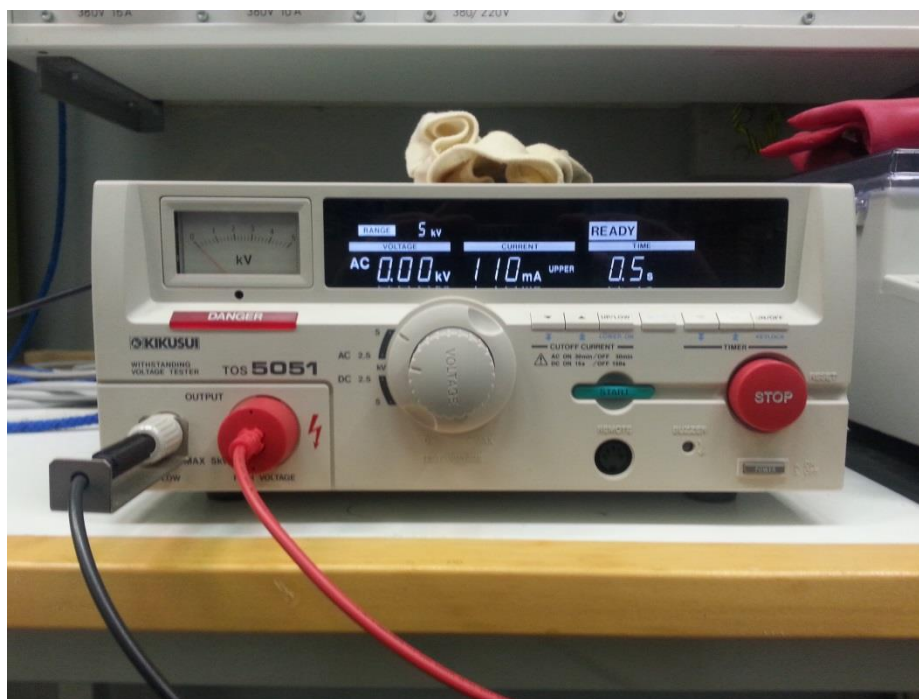
Ominaisuus:	Yksikkö	Lexan FR60	Lexan FR700	Valox FR1	Formex GK-17
Paksuus	mm	0,5	0,5	0,5	0,43
Tiheys	kg/m ³	1320	1320	1340	1035
Läpilyöntikestävyys	kV/mm	59	59	42,9	24,8
Charpyn iskukoe	kJ/m ²	ei murru	ei murru	ei murru	ei murru
Veden imeytyminen	% (24h)	0,08	0,08	0,08	0,06
Myötölujuus	MPa	60	60	45	44
Väri		läpinäkyvä	musta	valkoinen	musta

5 TESTISUUNNITELMAT

Testimateriaalien valitsemisen jälkeen suunniteltiin erilaisia testejä, joilla testattiin materiaalien ominaisuuksia. Savonia-ammattikorkeakoulun tiloissa ei aiemmin ollut tehty tällaisia testejä, joten työn yhtenä osa-alueena tuli tehdä etukäteen tarkat testisuunnitelmat sekä suunnitella testimenetelmät. Suunnitelmat ja menetelmät hyväksyttiin vastuupettaja Juhani Rouvalilla sekä ABB:n vastuuhenkilöllä diplomi-insinööri Jaani Kärpällä. Lisäksi ABB:ltä tuli kyseisen taajuusmuuttajaprojektin kanssa työskennelleitä henkilöitä katsomaan Savonia-ammattikorkeakoululle meneillään olleita testejä ja samalla tarkemmin analysoimaan testisuunnitelmia ja -menetelmiä.

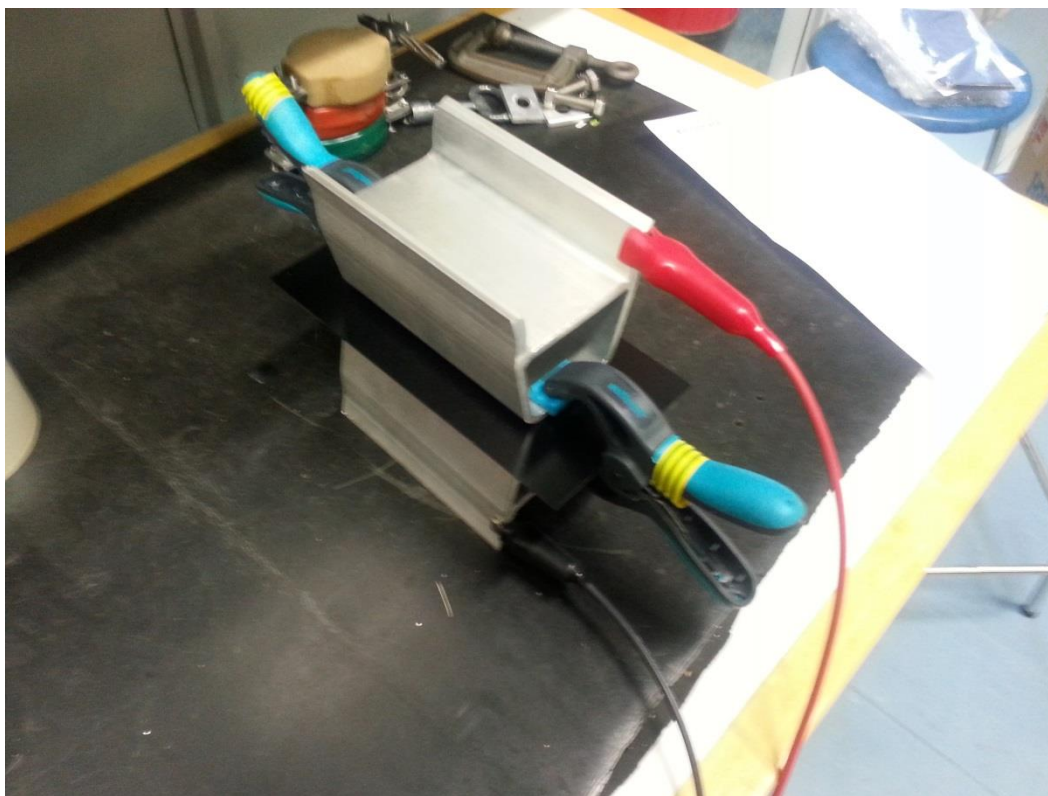
5.1 Lämpilyöntitesti

Lämpilyöntitestissä tarkoituksena oli selvittää, että materiaalit kestäisivät niiltä vaaditun jännitteen. Testi suoritettiin Savonia-ammattikorkeakoulun suurjännitelaboratoriossa. Testilaitteena käytettiin Kikusui TOS 5051-jännitteenkestotesteriä (kuva 2), jolla pystyttiin syöttämään maksimissaan 5 kV suuruista tasa- tai vaihtojännitettä. Eristeelle oli ABB:n puolelta määritetty, että sen tulisi kestää 4 kV vaihtojännitettä (AC). Testilaitteisto lopetti itsestään jännitteensyötön ja hälytti, kun lämpilyöntivirran suuruus kasvoi yli 110 mA:n.



KUVA 2. Testilaitteisto Kikusui TOS 5051 (Pasanen 2015-01-23.)

Testejä varten tuli suunnitella myös menetelmä, jolla testi pystyttiin suorittamaan luotettavasti. Päädettiin yksinkertaiseen menetelmään, jossa käytettiin puristimia sekä kahta alumiinista kiskoa, joiden väliin testattava kappale tulisi. Alumiinikiskon pinnan mitat olivat 130 x 45 mm, joten eristemateriaalien tuli olla tätä suurempia, jotta läpilyönti ei tapahdu eristeen ympäriltä. Alumiiniset kiskot hiottiin ja jysyttiin Savonia ammattikorkeakoulun kone-tekniikan laboratoriossa, jotta testipenkin kiskojen pinnat olisivat suorat ja tasaiset. Tasoitettu alumiininen kisko asetettiin eristävän kumimaton päälle pöydälle ja kiskon päälle aseteltiin eristekappale vaakatasoon lepäämään. Eristeen päälle asetettiin toinen samanlainen alumiinikisko, jolloin eriste jäi kiskojen väliin. Tämän jälkeen kiskoja puristettiin vielä puristimilla kiinni, jolloin testausmenetelmästä tuli vakaampi ja turvallisempi. Tällä menetelmällä pystyttiin havaitsemaan läpilyönnit. Kuvassa 3 on nähtävissä testeissä käytetty testimenetelmä.



KUVA 3. Testimenetelmä (Pasanen 2015-02-13.)

Läpilyöntitestin pituudeksi määriteltiin yksi minuutti, kun jännite oli 5 kV AC. Yhden minuutin aikaa on yleisesti käytetty tällaisissa jännitteensietotesteissä. (Lucas 2001; 9.5 Tests On Insulators.) Jännitteen nousunopeudeksi määriteltiin 1 kV kolmessa sekunnissa. Tästä syystä ensimmäiset 15 sekuntia kului jännitteen nostamiseen vaaditulle 5 kV tasolle ja vasta tästä laskettiin alkaneeksi yksi minuutti läpilyöntitestissä, koska kappaleiden tuli tässä testissä kestää jännitteen määriteltyä maksimiarvoa minuutin ajan.

Ensimmäiseksi läpilyöntitestissä kokeiltiin menetelmän toimivuutta tavallisella läpinäkyvällä teipillä, jota laitettiin muutama kerros alumiinikiskon ympärille. Ensimmäisellä yrityksellä kaapeleiden hauenleuat ilmeisesti lävistivät teipin, minkä vuoksi jännite löi teippieristeen läpi. Toisella yrityksellä pieneksi yllätykseksi osoittautui se, että tämä kyseinen teippi kesti testissä käytetyn 5 kV vaihtojännitettä. Laitteiden ja menetelmän toimivuuden testauksen jälkeen pystyttiin aloittamaan testaukset varsinaisilla testimateriaaleilla. (DeDad 2000; Lucas 2001, 11-12)

5.2 85/85-testi

Toisena testinä eristemateriaaleille tehtiin ns. 85/85-testi, toiselta nimeltään HAST-testi (highly accelerated stress test), jossa eristemateriaalit laitettiin olosuhdekaappiin. Sisäiseksi lämpötilaksi asetettiin 85 °C ja ilmankosteudeksi 85 %. 85/85-testissä standardina käytetään JESD22-A101B-standardia. Testiä on käytetty paljon luotettavuuden mittaamisessa. Se muodostaa hyvän ja luotettavan pohjan materiaalien luotettavuutta osoittavassa ja vaativassa testissä. (Virkki & Tuukkanen 2010; Standardi JESD22-A101B)

Testit suoritettiin laittamalla testikappaleet Vötsch VC4060-olosuhdekaappiin (ts. sääkaappi), jolla on mahdollista simuloida erilaisia olosuhteita säätämällä lämpötilaa, kosteutta, UV-säteilyä ja sadetusta. Olosuhdekaapin lämpötila-alue on – 40 °C - + 180 °C ja kosteusalue 10 % - 100 %. Kaapin sisämitat ovat 800 mm x 800 mm x 950 mm (*s*k). (Vötsch: VT³/VC³, 2015.)

85/85-testiosuuden pituudeksi määritettiin kaksi viikkoa, jonka aikana kappaleet olivat olosuhdekaapissa. Lisäksi osalle materiaaleista tehtiin läpilyöntitestejä. Läpilyöntitestauksien ajankohdiksi määriteltiin kaksi päivää, poikkeuksena viikonloput, mistä syystä perjantain ja maanantain testien väliksi muodostui kolme päivää. Testauspäivinä olosuhdekaapista otettiin jokaista eristemateriaalia kolme kappaletta, joille suoritettiin läpilyöntitesti. Poikkeuksina molemmat Nomex-laadut sekä Kapton-eristeteippi, joita oli vain yksi kappale testattavaksi kerrallaan. Kaikki eristekappaleet palautettiin läpilyöntitestien jälkeen olosuhdekaappiin, jotta selviäisi kuinka kaksi viikkoa jatkuvaa 85/85-testiä vaikuttaa eristemateriaaleihin.

Jokainen testikappale merkittiin selkeästi ja aina läpilyönnin sattuessa kappale poistettiin testistä, koska läpilyönti rikkoo eristeen ja täten tekee eristeestä hyödyttömän. Olosuhdekaapin olosuhteiden vuoksi merkkausta ei jätetty vain pelkän kynällä tehtävän merkinnän varaan. Paperille tehtiin myös kaavio, jonka ansiosta oli tiedossa, mikä kappale oli seuraavaksi testausvuorossa ja mitkä kappaleista olivat vertailukappaleita. (HASTEST 2010.)

5.3 Lämpötilanvaihtelutesti

85/85-testin jälkeen vuorossa olisi ollut vain testi, jossa testattaisiin kappaleiden todellinen läpilyöntikestävyys. Kesken 85/85-testin päätettiin ABB Oy:n edustajien kanssa kehittää yksi testi ennen lopullista läpilyöntitestiä, koska haluttiin vielä testata testikappaleita erilaisissa lämpötiloissa. Tätä varten suunniteltiin yhteistyössä ABB:n kanssa olosuhdekaapin avulla testi, jossa kaapin sisäinen lämpötila vaihtelisi -40 °C :n ja $+100\text{ °C}$:n välillä. -40 °C lämpötila on alin lämpötila, minkä eristemateriaalien tulisi taajuusmuuttajassa kestää. Se oli myös alin lämpötila, johon käytetty olosuhdekaappi pääsi. 100 °C lämpötila määritettiin, koska haluttiin rasittaa materiaaleja suuremmalla lämpötilalla kuin standardissa oli määritetty. Yleensä tällaisissa lämpötilanvaihtelutesteissä on standardina käytetty JESD22-A104D, joka on määrittänyt muutamia erilaisia maksimiarvoja testissä käytettäville lämpötiloille. Tehdyt testit vastaavat eniten standardin testiolosuhdetta N, jossa maksimilämpötila-arvot ovat -40 °C ($+0\text{ °C} - 10\text{ °C}$) ja $+85\text{ °C}$ ($+10\text{ °C} - 0\text{ °C}$) (Standardi JESD22-A104D. 2009, 5)

Lämpötilanvaihtelua varten suunniteltiin olosuhdekaapille ohjelma, joka syklaisi tätä lämpötilan vaihdossykliä jatkuvasti. Lisäksi päätettiin, että lämpötilan tulisi myös pysyä hieman pidempään maksimiarvoissaan niin kylmässä kuin kuumassa. Tätä varten sykliä muokattiin niin, että -40 °C :ssa lämpötila pysyisi 30 minuuttia, jotta kappaleiden lämpötila putoaisi mahdollisimman lähelle asetettua arvoa. Samantapainen syklin muokkaus suoritettiin myös $+100\text{ °C}$:seen, jossa päätettiin pitää lämpötilaa 10 minuuttia. Yhden syklin kokonaispituudeksi muodostui näin yhteensä neljä tuntia. Tästä oli helppo testin loputtua laskea kahden viikon aikana yhteensä tapahtuneet syklit.

85/85-testistä selvinneet kappaleet altistettiin myös tämän testin olosuhteille ja lisäksi ABB:n kanssa tilattiin lisää uusia testikappaleita samoista materiaaleista. Osa uusista testikappaleista asetettiin olosuhdekaappiin suoraksi, kuten aiemmatkin eristeet. Lisäksi kuusi kappaletta eristettä kohden, paitsi Nomexit ja Kapton-teippi, laitettiin putkiklemmariden avulla pienelle mutkalle, jotta näihin kohdistuisi mekaanista rasitusta taivutuksen muodossa. Taivutusta aiheuttavien kahden putkiklemmarin halkaisijaksi määrittelin 80 mm. Kaksi eristemateriaalikappaletta asetettiin kahden putkiklemmarin sisään, jotta säästettiin olosuhdekaapissa tilaa. Kuvat taivutetuista kappaleista ovat nähtävissä kuvassa 4.



KUVA 4. Materiaalien taivutusmenetelmä (Pasanen 2015-02-27.)

Lämpötilanvaihtelutesti määriteltiin kahden viikon pituiseksi, kuten myös 85/85-testi. Eroksi testimenetelmiin näiden kahden testin välillä muodostui se, että tässä testissä viikon 10 aiheuttama Savonia-ammattikorkeakoulun talvilomaviikon aikana ei päästy tarkastelemaan tai suorittamaan läpilyöntitestejä kappaleille. Viikolla 11 testattiin jälleen kappaleita joka toisena päivänä eli maanantaina, keskiviikkona ja perjantaina. Suunniteltu kokonaissyklimäärä oli kahdessa viikossa 84 sykliä.

5.4 Läpilyöntilujuuden selvittäminen

Viimeisenä testinä suoritettiin suurjännitelaboratoriossa testi, jossa haettiin jokaisen testikappaleen läpilyönnin todellisia rajoja. Tässä testissä tarkoitus oli nostaa jännitettä niin kauan, että se viimein löi jokaisen käytössä olleen eristekappaleen läpi.

Testikytkentä muodostui suurjännitelaboratoriossa olevasta jännitteensäätöpulpetista sekä häkkiin sijoitetusta kytkennästä. Kytkentään kuului muuntaja, jonka ensiöpuolen jännite oli 220 V ja toisiopuolen jännite 100 kV. Lisäksi tarvittiin 100 pF:n suuruinen kondensaattori sekä 10 M Ω suuruinen vastus. Tässäkin testissä käytössä oli sama testipenkki kuin aiemmassa 5 kV:n läpilyöntilujuustestissä. Suurjännitelaboratorion lämpötila olivat testin aikana 23 °C, ilmankosteus 38 % RH sekä ilmanpaine 986,7 hPa.

Suurjännitelaboratorion ohjauspulpetin näyttö osoitti ensiöjännitteen, joten varsinainen koestusjännite eli toisiopuolen jännite saatiin selville kertomalla ensiöjännite muuntajan muuntosuhteella. Muuntajan muuntosuhde saatiin kaavalla:

$$\mu = \frac{100000 \text{ V}}{220 \text{ V}} = 454,5.$$

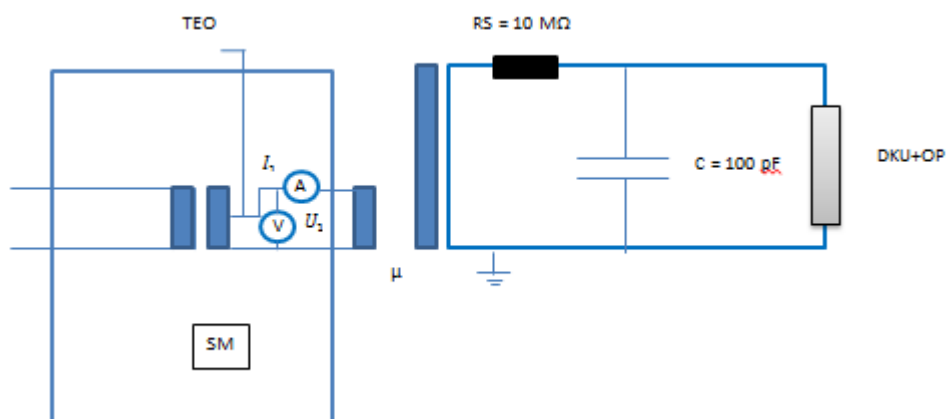
Jännitteen nousunopeudeksi määritettiin ensiöpuolen jännitteellä 50 V puolessa minuutissa ja arvoksi saatiin 1,67 V/s kaavalla:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{50 \text{ V}}{30 \text{ s}} = 1,67 \text{ V/s} \quad (4)$$

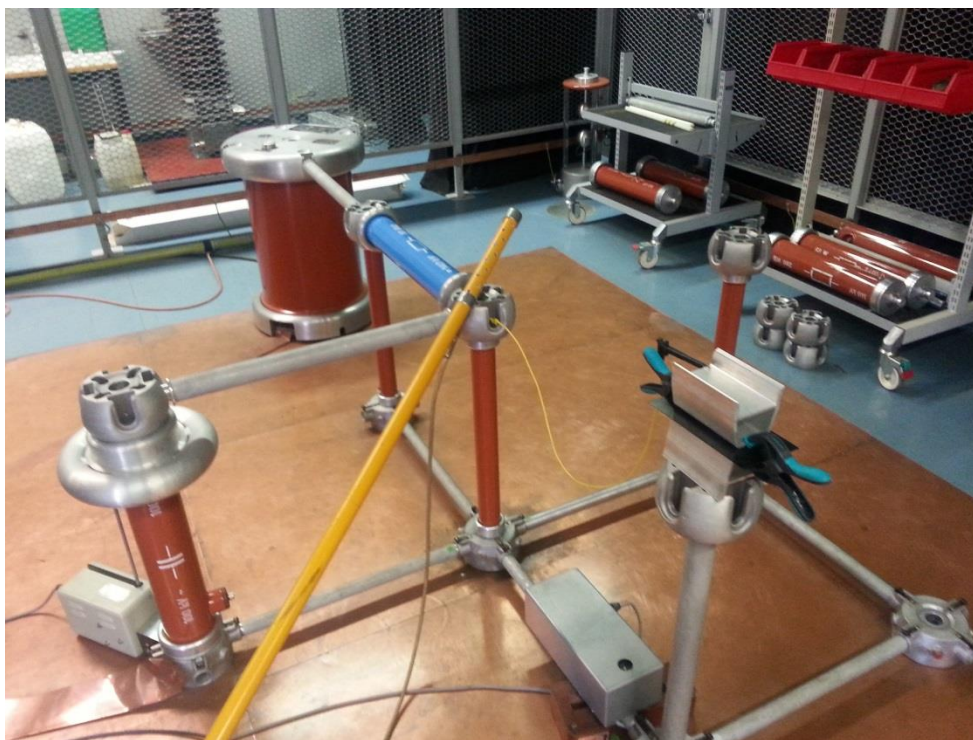
Kun tämän jälkeen nousunopeuden arvo kerrottiin muuntosuhteella μ , saatiin todellinen toisiopuolen jännitteen nousunopeus kaavalla:

$$1,67 \frac{\text{V}}{\text{s}} * 454,5 = 760 \frac{\text{V}}{\text{s}} \quad (5)$$

Testikytkentä on esitetty kuvissa 5 ja 6.



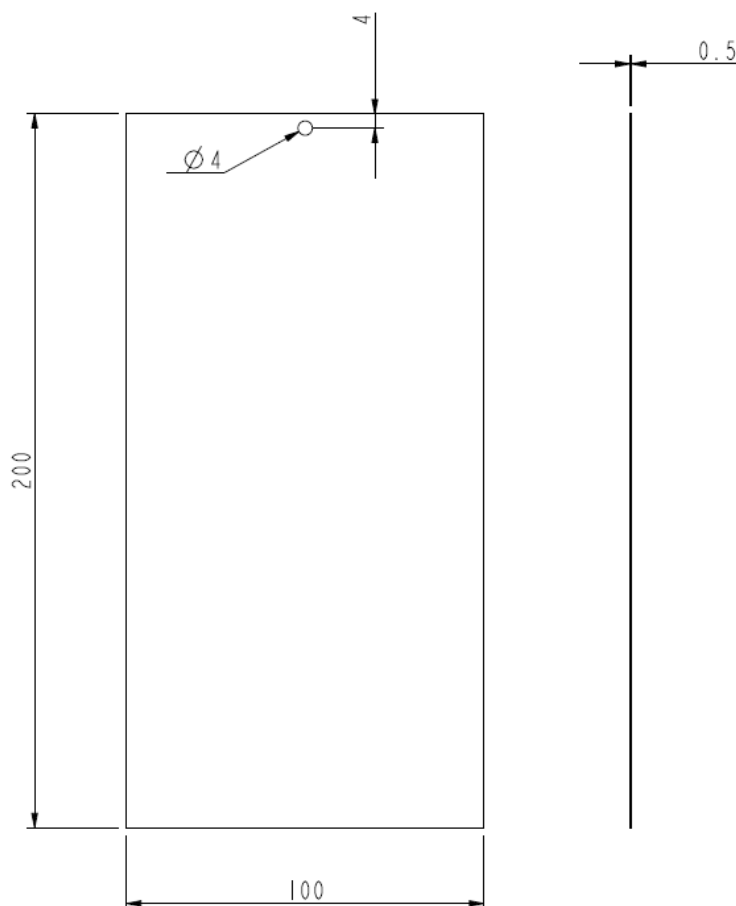
KUVA 5. Lämpötilajuuden selvittämisen kytkentä



KUVA 6. Testikytkentä suurjännitelaboratoriossa (Pasanen 2015-03-20)

5.5 Testikappale

Testimenetelmien lisäksi tuli määritellä testattavien kappaleiden muoto. Koska kappaleiden läpilyöntilujuuteen vaikuttaa kappaleen paksuus, tuli valita kaikista materiaaleja samanpaksuisia kappaleita testeihin. Testikappaleiden paksuudeksi määritettiin kaikille mahdollisimman lähelle 0,5 mm, paitsi Formexille, jota oli saatavissa vain 0,43 mm paksuisena ja aiemmin mainittu toinen Nomex laaduista, jonka paksuus oli vain 0,2 mm. Myös eristeteipin paksuus poikkesi tuosta 0,5 mm paksuudesta. Testikappaleiden tuli myös olla suurempia pinta-alaltaan kuin testipenkkienä toimivien kahden alumiinikiskojen pinta-ala. Lisäksi tuli huomioida, että sähkövirta ei saa lyödä läpi testikappaleen ympäriltä. Tämän takia testimateriaalien kappalekooksi määritettiin 200 mm x 100 mm. Muovisiin testikappaleisiin lisättiin toisen lyhyemmän sivun reunaan keskelle myös pieni 4 mm suuruinen reikä, jotta kappaleet voitiin ripustaa kuparilangalla olosuhdekaapin ritilään roikkumaan. Tämä tarkoitti sitä, että testikappaleet veivät olosuhdekaapissa vähemmän tilaa. Reikä ei kuitenkaan saanut vaikuttaa läpilyöntilujuustestin tuloksiin millään tavalla, joten tästä syystä reikä tehtiin vain kappaleen yhteen reunaan ja sen halkaisijaksi määritettiin 4 mm. Suunnittelun aikainen hahmottelukuva testikappaleesta on kuvassa 7.



Kuva 7. Testikappaleen hahmotelma

Testattavista kappaleista poikkeuksena oli Kapton eristeteippi, joka toimitettiin vain rullana. Tästä syystä teippiä rullattiin 200 mm x 100 mm kokoisen metallilevyn ympärille, jolloin kappaleen pinta-ala vastasi muiden testattavien kappaleiden pinta-alaa. Eristeteippien testattaville kappaleille ei myöskään tehty reikää ripustamista varten, vaan kappaleet olivat olosuhdekaapissa ritilän päällä vaaka-asennossa. Se, että oliko kappale suorana ripustettuna reiästä vai vaaka-asennossa ritilän päällä, ei vaikuttanut testituloksiin millään tavalla.

6 TESTITULOKSET

Tässä luvussa esitellään opinnäytetyössä tehtyjen testien tulokset.

6.1 Lämpilyöntitesti

Ennen olosuhdekaapissa suoritettavia kokeita testattiin kaikki testikappaleet lämpilyöntitestissä. Tällä vain varmistettiin, ettei yksikään testikappale ollut saapuessaan valmiiksi viallinen testien alkaessa. Kaikki testatut kappaleet läpäisivät tämän testin vaatiman 5 kV lämpilyöntilujuuden yhden minuutin ajan ja näin pystyttiin jatkamaan seuraavaan testiin.

6.2 85/85 -testi

Lämpilyöntitestin ja manuaalisen olosuhdekaapin arvojen asettelun jälkeen siirrettiin kaikki testikappaleet olosuhdekaappiin. Testin aikana käytiin tasaisin väliajoin, tässä tapauksessa joka toinen päivä, ottamassa olosuhdekaapista testikappaleita lämpilyöntitesteihin. Olosuhdekaapin sisäiset olosuhteet on esitetty kuvassa 8.



KUVA 8. Testiolosuhteet olosuhdekaapissa (Pasanen 2015-02-25)

85/85-testin aikana ilmeni Kapton-teipin sopimattomuus olosuhteissa, joissa on korkea lämpötila sekä korkea ilmankosteus. Kahden viikon aikana viidestä Kapton-testikappaleesta kolme löi läpi.

Ilmankosteuden vuoksi teipin liimapinta ei pitänyt kunnolla ja lämpilyöntitesteissä syntyneistä väleistä jännite pääsi lyömään eristeen läpi. Kuvassa 9 on nähtävissä erään läpilyöneen Kapton-eristeteipin jäljet.



KUVA 9. Kapton-eristeen läpilyönnin jäljet (Pasanen 2015-02-27.)

Kapton-eristeteipin lisäksi vain Nomexin ohuempi 0,2 mm:n paksuinen kappale löi läpi kahden testiviikon aikana. Erikoista tässä oli se, että läpilyönti tämän materiaalin kohdalla tapahtui vain kerran ja vain yhden testattavan Nomex-kappaleen läpi. Läpilyönti tapahtui jo ensimmäisellä testiviikolla.

85/85-testin aikaisten läpilyöntitestien tulokset on esitetty taulukossa 2. Taulukkoon on merkitty testin läpäisseet kappaleet suhteessa testattuihin kappaleisiin. Lisäksi punaisella värillä on merkitty, jos testin aikana yksikin testattavan materiaalin kappale rikkoutui läpilyönnin johdosta.

TAULUKKO 2. 85/85-testin tulokset

Materiaali:	18.helmi	20.helmi	23.helmi	25.helmi	27.helmi
Lexan FR60	3/3	6/6	9/9	12/12	15/15
Lexan FR700	3/3	6/6	9/9	12/12	15/15
Valox FR1	3/3	6/6	9/9	12/12	15/15
Formex GK-17	3/3	6/6	9/9	12/12	15/15
Nomex 0.5mm	1/1	2/2	3/3	4/4	5/5
Nomex 0.2mm	1/1	1/2	2/2	3/3	4/4
Kapton	0/1	1/1	2/2	2/3	3/3

6.3 Lämpötilanvaihtelutesti

85/85-testin jälkeen olosuhdekaappiin laitettiin uusi ohjelma, jossa olosuhdekaappin lämpötilan vaihteli -40 °C:n ja + 100 °C:n välillä. Testin alussa ilmeni kuitenkin ongelma. Olosuhdekaappi oli kolmantena testauspäivänä, sunnuntaina 1.3. klo 22.30 sammunut ja talviloman vuoksi ongelma huomattiin 3.3 klo 13.00, kun olosuhdekaappiin vietiin osaa tilatuista testikappaleista. Olosuhdekaappi saatiin käyntiin myöhemmin saman päivän illalla eikä sa-

manlaisia ongelmia ilmennyt enää testauksien aikana. Ohjelman keskeytyksen vuoksi kokonaissyklien määrä putosi suunnitellusta 84:stä noin 72 sykliin.

Ensimmäiset mittaukset tämän testin eristeille suoritettiin maanantaina 9.3. Heti oli nähtävissä alun perin suorien Formex GK-17 ja Nomex 0,5 mm kappaleiden osalta se, että ne alkoivat kipristellä mutkalle (kuva 10).

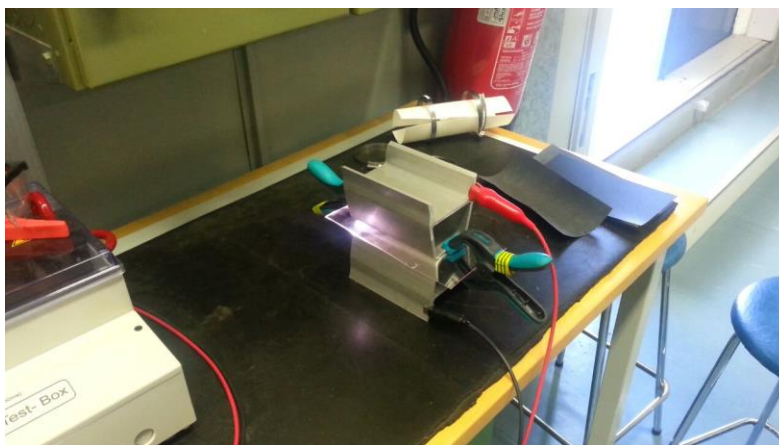


KUVA 10. Formex GK-17 (vasemmalla) ja Nomex 0,5mm (oikealla) kipristelyä (Pasanen 2015-03-03.)

Lisäksi oli selvästi nähtävissä halkeamia ja säröjä mutkalle taivutetuissa Lexan FR60-eristeissä. Läpilyöntitestissä molemmat testatuista taivutuksen alaisena olleista Lexan FR60-eritekappaleista löivätkin läpi. Kaikki muut eristeet, niin suorat kuin taivutetut, selvisivät ilman läpilyönnejä. Kuvat Lexanin säröistä, läpilyönnistä ja läpilyönнин aiheuttamasta jäljestä on esitetty alla kuvissa 11, 12 ja 13.



KUVA 11. Taivutetun Lexan FR60:n säröilyä (Pasanen 2015-03-09.)



KUVA 42. Taivutetun Lexan FR60:n läpilyönti (Pasanen 2015-03-09.)



KUVA 53. Taivutetun Lexan FR60 läpilyönnin jälki (Pasanen 2015-03-09.)

Halkeilun vuoksi päätettiin alkuperäisten suunnitelmien lisäksi vielä testata, johtuiko halkeileminen vain taivutuksen aiheuttamasta rasituksesta vai oliko vaihtuvalla lämpötilalla tekemistä halkeilemisen ja säröilyn kanssa. Tämä testattiin niin, että molempia Lexan-laatuja taivutettiin myös huoneenlämmössä viikon ajan, jotta saataisiin selville lämpötilan vaihtelun vaikutus. Huoneenlämmössä taivutus ei saanut kappaleita halkeilemaan, mistä voitiin päätellä taivutuksesta johtuvan rasituksen halkaisevan Lexaneita yhdessä lämpötilan suuren vaihtelun kanssa.

Lämpötilan vaihtelutestin tulokset ovat nähtävissä taulukossa 3, josta selviää kappaleiden kestävyudet lämpötilan vaihdellessa. Taulukossa on huomioitu vanhat ja uudet suorat kappaleet omissa sarakkeissaan ja taivutukselle altistetut kappaleet omissaan. Taulukossa 3 on merkitty myös testin läpäisseet kappaleet ilmaistuna suhteessa testattuihin kappaleisiin ja punaisella värillä on merkitty, jos testin aikana yksikin testattavan materiaalin kappale rikkoutui läpilyönnin johdosta. Lisäksi huomioitiin se, että tätä testiä varten kaikkia kappaleita,

kuten kumpaakaan Nomex-laatua tai Kaptonia, ei altistettu taivutukselle eikä ohuempaa Nomex-laatua (0,2 mm) tai Kapton-eristeteippiä tilattu uusia suoria kappaleita. Tämän vuoksi taulukossa kyseisten kappaleiden kohdalla on viiva.

TAULUKKO 3. Lämpötilanvaihtelutestin tulokset

Materiaali:	9.maaliskuuta			11.maaliskuuta			13.maaliskuuta		
	Suora (vanha)	Suora (uusi)	Käyrä	Suora (vanha)	Suora (uusi)	Käyrä	Suora (vanha)	Suora (uusi)	Käyrä
Lexan FR60	5/5	2/2	0/2	10/10	4/4	1/2	15/15	5/5	2/3
Lexan FR700	5/5	2/2	2/2	10/10	4/4	3/4	15/15	5/5	4/5
Valox FR1	5/5	2/2	2/2	10/10	4/4	4/4	15/15	5/5	6/6
Formex GK-17	5/5	2/2	2/2	10/10	4/4	4/4	15/15	5/5	6/6
Nomex 0.5mm	2/2	1/1	-	4/4	2/2	-	5/5	3/3	-
Nomex 0.2mm	2/2	-	-	4/4	-	-	4/4	-	-
Kapton	2/2	-	-	3/3	-	-	3/3	-	-

6.4 Lämpötilanvaihtelutestin selvittäminen

Lämpötilanvaihtelutestin selvittämiseksi laitettiin jokaisen jo edellisissä testeissä rasitettu kappale sekä lisäksi täysin uusia tilattuja kappaleita suurjännitelaboratorion suurjännitehakkisiin. Suurjännitehakkisissa kappaleet vuorotellen altistettiin nousevalle jännitteelle niin kauan kuin ne kestivät. Tavoitteena oli lopuksi saada läpilyönti jokaiselle materiaalille ja sitä kautta tieto materiaalien todellisesta läpilyöntikestävydestä. Lisäksi oli tarkoitus tehdä havaintoja siitä, olivatko 85/85-testi sekä lämmönvaihtelutesti vaikuttaneet testattuihin kappaleisiin verrattuna täysin uusiin tätä varten tilattuihin saman materiaalin kappaleisiin. Viimein tämän testivaiheen alkuun mennessä myös PE-1000 kappaleet saapuivat testeihin, joten päätettiin testata myös nämä kappaleet.

Heti testin alussa ilmeni ongelma, joka muutti testin luonnetta joidenkin materiaalien testauksissa. Kävi ilmi, että jännitteen noustessa tarpeeksi suureksi ei tapahtunutkaan odotettua läpilyöntiä kappaleen läpi, vaan molempien Lexan-laatuja, Valox FR1:sen, Nomex 0,5 mm:n sekä Formex GK-17:n kohdalla tapahtui ylilyönti joko ilman kautta tai eristeen pintaa pitkin ryömien. Tämä ilmiö tapahtui jännitteen ollessa noin 30 – 40 kV suuruudessa. 0,2 mm paksuisen Nomex-laadun, Kapton-teipin sekä PE-1000:n yhteydessä läpilyönnit saatiin aikaan läpilyönti.

Eristeen suunnittelussa oli määritetty eristeelle neljän kilovoltin jännitteen kesto, joten testin perusteella voidaan sanoa jokaisen materiaalin täyttävän tämän kriteerin. Kaikkien kappaleiden todellista läpilyöntilujuutta ei tällä testausjärjestelyllä saatu selville, mutta riittävä tulos kriteerin täyttämiseksi saavutettiin. Taulukossa 4 on esitetty läpilyöntilujuuden selvittä-

tämisen tulokset. Punaisella värillä merkitty tulos tarkoittaa läpilyöntiä kappaleen läpi ja mustalla merkitty tulos tarkoittaa läpilyöntiä muulla tavalla.

Taulukko 4. Läpilyöntilujuuden selvittämisen tulokset

Materiaali	suora/taivutettu			
Lexan FR60		kV		
uusi	suora	38	36	37
uusi	taivutettu	36	36	-
rasitettu	suora	37	38	37
rasitettu	taivutettu	11	22	-
Lexan FR700		kV		
uusi	suora	37	36	38
uusi	taivutettu	36	36	-
rasitettu	suora	32	36	37
rasitettu	taivutettu	34	16	11
Valox FR1		kV		
uusi	suora	38	38	37
rasitettu	suora	38	36	39
rasitettu	taivutettu	36	38	38
Formex GK-17		kV		
uusi	suora	36	34	36
rasitettu	suora	34	32	34
rasitettu	taivutettu	31	34	36
Nomex 0.5mm		kV		
uusi	suora	45	31	34
rasitettu	suora	34	34	34
Nomex 0.2mm		kV		
uusi	suora	45	47	46
rasitettu	suora	50	52	50
Kapton		kV		
uusi	suora	-	-	-
rasitettu	suora	54	59	54
PE-1000		kV		
uusi	suora	27	38	31

Tulokset havainnollistavat hyvin eri materiaalien toimivuutta sähköeristeenä vaativissa olo-
suhteissa. Suoritetuissa testeissä ei valitettavasti pystytty simuloimaan suolan ja muiden
kemikaalien vaikutusta testikappaleisiin. Kappaleita ei voitu altistaa minkäänlaiselle tärinäl-
le.

Valitettavasti tilatut PE-1000 eristemateriaalit eivät saapuneet testeihimme ennen viimeistä
testivaihetta tilausongelmien vuoksi. Tämän takia päätimme yhdessä ABB:n kanssa sulkea
tämän testimateriaalin kokonaan pois muista testeistä paitsi ensimmäisestä 5 kV:n ja vii-
meisestä läpilyöntilujuustestistä.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Testejä suoritettiin yhteensä neljä erilaista, joissa testattiin eristekappaleiden kestävyyttä erilaisissa olosuhteissa. Testeistä kävi ilmi erilaisten eristemateriaalien läpilyöntikestävyys erilaisten testien ja rasituksen jälkeen. Valitettavaa testeissä oli se, että PE-1000 materiaalia ei yrityksestä huolimatta saatu testeihin ajoissa toimitusongelmien vuoksi. Olisi ollut mielenkiintoista saada testattua laajempi otanta erilaisia testimateriaaleja ja nähdä niiden käyttäytyminen lämpötilan ja kosteuden aiheuttaman rasituksen alaisena.

7.1 Testaustulokset

Jo aikaisessa vaiheessa osoittautui Kapton-teipin sopimattomuus tällaisen kiskon eristeeksi, joka altistuu monenlaisille erilaisille lämpötiloille ja korkealle kosteudelle. Lisäksi teipin paikalleen asentaminen vaatisi käsintehtävää teipin rullaamista kiskon tai muun eristettävän osan päälle, mikä ei ole ideaalista tuotantotarkoituksessa. Kahden viikon 85/85-testin aikana suuri osa Kapton-eristeistä löikin läpi.

Erikoista oli Nomex 0,2 mm käyttäytyminen 85/85-testissä. Jo varhaisessa vaiheessa yksi testattavista kappaleista löi läpi rasituksen jälkeen. Kuitenkin muut saman materiaalin kappaleet säilyivät ehjinä testeistä. Tämän testin osalta ei siis täysin voi tyrmätä 0,2 mm Nomexin sopivuutta eristeeksi tällaisissa olosuhteissa, mutta läpilyönti kertoo siitä, että 100 % luottamusta ei tälle materiaalille näissä olosuhteissa voi antaa. Kuva läpilyöneestä Nomexista on esitetty kuvassa 14.



Kuva 64. Nomex 0.2mm läpilyönnin jälki (Pasanen 2015-02-20)

Lexanin molemmat testatut laadut selvisivät 85/85- ja lämpötilan vaihtelutestissä, kun testattava kappale oli suora. Mutta kun kappaleita rasitettiin käyristämällä niitä, alkoivat molemmat sekä Lexan FR60- että Lexan FR700-kappaleet halkeilla ja säröillä. Halkeamien ja säröjen kohdalta jännite pääsi helposti lyömään kappaleiden läpi. Loppujen lopuksi kaikki

muut taivutetut Lexan kappaleet, paitsi yksi Lexan FR700, löivätkin läpi. Suorat Lexan FR60 ja FR700 kappaleet kestivät vähintään 36 kV jännitteen viimeisessä läpilyöntilujuuden selvittävässä testissä, joka on melkein kymmenkertainen arvo vaadituun verrattuna. Tällöinkin täydellistä läpilyöntiä ei tapahtunut, vaan purkaus tapahtui ryömien kappaleen pintaa pitkin kiskosta toiseen.

Nomexin paksumpi testikappale (0,5 mm) kesti kaikissa läpilyöntitesteissä ilman läpilyöntiä kappaleen läpi. Kuitenkin on otettava huomioon sen heikko työstettävyys, sillä se ei kestä taivuttelua jyrkkiin kulmiin. Suorana kappale kuitenkin kesti ainakin 31 kV jännitettä ja silloin myös läpilyönti tapahtui kappaleen ympäriltä.

Sekä Valox FR1 että Formex GK-17 läpäisivät kaikki testatut testit ilman läpilyönnejä kappaleiden läpi. Formex GK-17 ainut huomattava asia oli sen suorien kappaleiden pienimuotoinen käyristyminen olosuhdekaapissa sekä 85/85- että lämpötilan vaihtelutestissä. Tämä ei kuitenkaan aiheuttaisi suurta ongelmaa taajuusmuuttajan kiskoeristeenä, koska eristeellä olisi vain vähän tilaa ja se olisi kiinnitetty hyvin. Tällöin käyristelyä ei juuri pääsisi tapahtumaan. Tulee myös ottaa huomioon se, että testattu Formex GK-17 oli hieman ohuempaa kuin Valox FR1 ja silti tehdyissä testeissä pärjasi yhtä hyvin. Tästä voitaisiin päätellä, että Formexia käytettäessä voisi säästää tilaa taajuusmuuttajan sisällä ja että Formex olisi helpompi asentaa paikalleen. Asentamista Formexin osalta helpottaa se, että se ei ole niin pleksimäinen materiaali kuin Valox FR1, joten sitä on helpompi taittaa erilaisiin kulmiin viiltojen avulla. Tällä tavoin Formex GK-17 eristettä voidaan toimittaa suurina levyinä ja taittaa muotoonsa nopeasti kokoonpanovaiheessa.

7.2 Kehittämisasiideat

Opinnäytetyössä yritettiin tehdä mahdollisimman kattavia testauksia eristekappaleiden luotettavuudesta ja kestävyydestä erilaisille rasituksille altistettuina. Eristekappaleita oli monipuolinen otanta, mutta lähinnä muovien osalta. Lisäksi yksi muovilaatu, polyeteeni PE-1000, jäi tilausongelmien vuoksi saamatta ajoissa testeihin.

Jos työ tehtäisiin uudestaan, olisi hyvä ottaa paremmin selvää myös jo aiemmin testatuista eristetyypeistä ja niiden testauksista. Järkevää olisi tutustua tarkemmin jo ennen testejä olemassa oleviin menetelmiin ja standardeihin, joiden mukaan testit voisi suorittaa.

Testijärjestelyissä osattaisiin nyt ottaa paremmin huomioon erityisesti kappaleen kokoon liittyviä asioita. Koon vaikutukset näkyivät lähinnä viimeisessä testissä, jossa tarkoituksena oli saada luotua niin korkea jännite, että se löisi jokaisen testattavan kappaleen läpi. Näin

ei kuitenkaan käynyt, koska läpilyönti tapahtui osalla kappaleista joko ilman kautta tai eristeen pintaa pitkin ryömien. Suurempi kappale ei kuitenkaan olisi ollut välttämättä ratkaisu, koska testattiin myös normaalia suurempia (220 mm x 240 mm) Nomex 0,5 mm kappaleita, joiden kanssa kävi samanlainen ilmiö. Suuremmat testikappaleet eivät olisi olleet helpompia käsitellä silloin, kun kappaleet olivat olosuhdekaapissa, koska ne olisivat vieneet paljon enemmän tilaa.

7.3 Jatkoideat

Tällaista eristekappaleiden testausta ei tiettävästi ainakaan Savonia-ammattikorkeakoulussa ole aiemmin tehty. Tämän opinnäytetyön aikana pystyttiin testaamaan kattavasti erilaisten lämpötilojen vaikutusta erilaisten eristeiden läpilyöntilujuuteen. Myös kappaleiden todellisen läpilyöntikestävyyden selvittäminen kaikkien testattujen kappaleiden oli positiivinen lisätyöhön.

Jatkossa olisi kiinnostavaa testata öljyjä ja kaasuja. Niiden testaaminen on paljon vaikeampaa kuin esimerkiksi muovien sillä se vaatisi erilaisia testilaitteita.

Tulevaisuudessa eristekappaleiden testauksissa olisi hyvä huomioida myös värinän kappaleille aiheuttama rasitus. Tämä voi kuitenkin olla hyvin vaikeaa toteuttaa käytännössä, varsinkin jos tavoitteena on samaan aikaan altistaa kappale jollekin tietylle tai syklaavalle lämpötilalle myös läpilyöntitestin aikana. Lisäksi öljyn tai kaasun käyttäminen eristemateriaalina vaatisi taajuusmuuttajan kuparikiskon eristyksestä myös sitä, että koko taajuusmuuttaja tulisi suunnitella tiiviimmäksi ja jäähdytys tulisi toteuttaa eri tavalla. Myös taivutusrasitusta voisi jatkaa niin, että kappaleita taivuteltaisiin esimerkiksi 90 asteen kulmiin.

Olisi ollut kiinnostavaa selvittää myös erilaisten kemikaalien vaikutus kappaleisiin. Suolan vaikutus materiaaleihin olisi varmaan helpoin tapa selvittää jonkilaisessa suolakaapissa. Lisäksi harmittavaa oli CTI-arvojen testauksen puute, jota ei ollut mahdollista suorittaa Savonia ammattikorkeakoulun tiloissa. Suolan vaikutus materiaaleihin ja CTI-arvojen testaus olisi tuonut paljon lisäarvoa opinnäytetyölle. Onneksi monesta lähteestä on saatavilla suuntaa antavia CTI-arvoja suurelle osalle käytetyistä materiaaleista.

8 ERISTEET TULEVAISUUDESSA

Tässä osiossa pohditaan työn ohessa oppimaa ja mietitään tulevaisuudessa käytettäviä sähköeristeitä ja niiden toteuttamista.

8.1 Nykyiset käytössä olevat eristeaineet

Uskon lähitulevaisuudessa pysyttävän nykyisissä jo käytössä olleissa eristeaineissa, koska ne ovat jo hyvin pitkälle tutkittuja, testattuja ja hyväksi havaittuja. Varmasti erilaisia parannuksia ja sähköistä lujuuutta vahvistavia ominaisuuksia tuovat jatkossa esimerkiksi erilaiset uudet yhdisteet tai kemikaalit.

Suuria öljyeristeisiä muuntajia on jo olemassa. Olisikin mielenkiintoista, jos samantyyppistä tekniikka voisi hyödyntää taajuusmuuttajakäytössä. Öljyeristeisen taajuusmuuttajan voisi toteuttaa, jos taajuusmuuttajasta rakennettaisiin tiivis ja sen jäähdytystä tehostettaisiin. Öljy saattaisi eristeenä myös absorboida värinän aiheuttamaa räsitusta. Ei kuitenkaan ole täyttä varmuutta, mitä öljy tekisi kaikille erilaisille elektronisille komponenteille, jos sitä pääsisi niihin.

Eristeitä voidaan myös ruiskumaalata kiskostojen pintaan. On olemassa tapa, jolla epoksi-jauhetta ruiskumaalataan kiskon päälle, jolloin siitä syntyy eristävä pinnoite kiskolle. Tämä mahdollistaa komponenttien tiiviimmän sijoitustavan järjestelmissä. Pinnoite toimii eristeenä, kun sitä on 6 - 120 mm:n kerros. (Storm Copper 2012.) Tämänäyttöinen eristäminen voisi hyvinkin yleistyä tulevaisuudessa sen nopean asentamisen ja tilan säästämisen vuoksi, jos vain ruiskumaalattu eristys on kestävä ja luotettava.

8.2 Nanoteknologia

Nanoteknologia on tieteenala, joka hyödyntää todella pieniä, nanokokoisia rakenteita, - materiaaleja ja – toimintoja (Evira 2015). Nano-partikkeliksi lasketaan partikkeli, jonka yhden sivun pituus on alle 100 nm (Jalkanen 2007, 5). Nanoteknologia on kehittynyt suurin harppauksin vuosikymmeninä. Nanoteknologiaa hyödynnetään nykyisin jo melkein jokaisella tärkeimmällä teollisuuden ja teknologian alalla, kuten lääke-, elektroniikka-, energia- ja biotekniikan alalla. (Evira 2015.)

Nykyään esimerkiksi Kristall-yritys hyödyntää nanoteknologiaa jo mm. älypuhelimien ja tablettitietokoneiden näytönsuojina sekä autojen tuulilasin suojina. Täysin näkymätön nanopinnoiteneste valutetaan suojattavan tason päälle, jolloin pinnoite antaa suojaa naarmuilta ja kestää vuoden puhelimen näytöllä. (Kristall 2015.) Tämä antoi ajatuksen vastaavan

tyyppisestä nanoteknologian hyödyntämisestä myös sähkötekniikassa ja varsinkin eristävissä tarkoituksessa. Sähkötekniikassa nanoteknologiaa on aiemmin käytetty lähinnä sähköä johtavaan tarkoitukseen.

9 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli suunnitella taajuusmuuttajan virtakiskolle vaadittujen kriteerien mukainen sähköinen eristys. Tutkimuksessa tehtiin kattavalle määrälle erilaisia eristemateriaaleja sähkölujuutta mittaavia testejä erilaisissa olosuhteissa. Testien avulla tuli selvittää eristemateriaalien sähköisiä ja mekaanisia ominaisuuksia. Testien pääpainoksi muodostui kappaleiden läpilyöntilujuuden testaaminen erilaisten rasitusten alaisina. Tämän työn aikana rasitusta muodostivat korkeat jännitteet, suuri kosteusprosentti yhdistettynä korkeaan lämpötilaan, kappaleisiin kohdistettu taivutus sekä vaihteleva lämpötila.

Testausmenetelmien suunnittelu onnistui hyvin minkä vuoksi vuoksi testit ja tulokset olivat päteviä. Testien osalta tavoitteisiin päästiin, koska kappaleita oli useita erilaisia ja niistä suurin osa ei läpäissyt kaikkia testejä. Testeissä saatiin mielenkiintoisia ja hyödyllisiä tuloksia erilaisten materiaalien läpilyöntilujuuden käyttäytymisestä vaihtelevissa olosuhteissa. Testit ja niiden tulokset ovat myös toistettavissa.

Testien perusteella voidaan valita eristeeksi materiaali, joka kesti kaikki läpilyöntitestit olosuhdekaapin rasituksista ja taivutusrasituksesta huolimatta sekä kesti hyvin läpilyöntilujuustestissä. Näiden testien tuloksena suositeltavaa olisi käyttää eristeenä joko Valox FR1:stä tai Formex GK-17:ää. Kaikki ominaisuudet huomioon ottaen parhaiten eristeeksi sopisi Formex GK-17 sen paremman muokattavuuden vuoksi. Muokattavuudessa Formexin suurin etu on se, että Formexiin voi tehdä viiltoja taitekohtiin, jolloin eristettä voidaan taivuttaa jyrkkiin kulmiin. Viiltojen avulla Formex säilyy taitoksista huolimatta kestäväenä eristeenä ja se voidaan helposti toimittaa suurina levyinä, mikä nopeuttaa sen asentamista. Formex GK-17 sopiikin tuotannollisesta näkökulmasta parhaiten virtakiskojen eristeeksi.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

ABB OY 2015. ABB-yhtymä. [Viitattu 2015-01-11.] Saatavissa:

<http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/yhtyma>

ARO, ELOVAARA, KARTTUNEN, NOUSIAINEN ja PALVA 1996. Suurjännitetekniikka. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

CABLE MANUFACTURING & ASSEMBLY COMPANY, INC. 2014. Cable Conductors.[Viitattu 2015-02-23.] Saatavissa:

<http://www.cmacable.com/electrical-cable/c-terms/conductive-terms-definitions/>

CADILLAC PLASTIC 2005. Valox FR1. [Viitattu 2015-04-13.] Saatavissa:

http://www.cadillacplastic.co.uk/wp-content/uploads/2013/10/VALOX_FR1.pdf

COTTON, H. 1958. The Transmission And Distribution of Electrical Energy. Lontoo, Iso Britannia: The English Universities Press, Ltd. [Viitattu 2015-02-25.] Saatavissa:

<http://www.myinsulators.com/acw/bookref/insulator/>

DeDAD, John 2000. The Basics of Insulation Resistance Testing. [Viitattu 2015-02-10.]

Saatavissa: <http://ecmweb.com/ops-amp-maintenance/basics-insulation-resistance-testing>

DuPONT 2015a. Flame Resistant Nomex. [Viitattu 2015-02-12.] Saatavissa:

<http://www.dupont.com/products-and-services/personal-protective-equipment/nomex.html>

DuPONT 2015b. Nomex Electrical Insulation. [Viitattu 2015-02-12.] Saatavissa:

<http://www.dupont.com/products-and-services/electronic-electrical-materials/electrical-insulation/brands/nomex-electrical-insulation.html>

EVIRA 2015. Nanoteknologia Elintarviketeollisuudessa. [Viitattu 2015-03-19.] Saatavissa:

<http://www.evira.fi/portal/fi/elintarvikkeet/valmistus+ja+myynti/tuotantotapoja/nanoteknologia/>

HATEST 2010. Hastets Solutions. [Viitattu 2015-02-12.] Saatavissa:

<http://www.hastest.com/articles.php?page=1&articleid=5>

HIETALAHTI, Lauri. 2012. Säädetty Sähkömoottorikäyttö. 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy, Tammertekniikka.

HURRI, Jussi. 2005. Eristemuovit ja niiden muokkaustekniikat. Diplomityö. Helsingin teknillinen korkeakoulu. Konetekniikan osasto.

ITW FORMEX s.a. Formex GK. [Viitattu 2015-03-03.] Saatavissa:

<http://itwformex.com/FormexGK.html>

JALKANEN, Timo-Olavi. 2007. Nanoteknologia tulee – oletko valmis? [Viitattu 2015-03-03.]

Saatavissa: <http://www.databooks.com/timojalkanen/journalist/nanoteknologia-jalkanen.pdf>

JESD22-A104D. 2009. Temperature Cycling. JEDEC Solid State Technology Association STANDARD. [Viitattu 2015-01-15.] Saatavissa:

<http://www.jedec.org/sites/default/files/docs/22a104d.pdf>

JUHALA, Matti, LEHTINEN, Arto, SUOMINEN, Matti ja TAMMI, Kari 2005. Moottorialan Sähköoppi. 8. uudistettu painos. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

KAPTONTAPE 2015. 1 Mil Kapton® Tapes [Viitattu 2015-02-10.] Saatavissa:

http://www.kaptontape.com/1_Mil_Kapton_Tapes.php

KOLEVA, Milena. Polyeteeni. Valuatlas. [Viitattu 2015-01-15]. Saatavissa:

http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PE_FI.pdf

KOLEVA, Milena. Polypropeeni. Valuatlas. [Viitattu 2015-01-15]. Saatavissa:

http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PP_FI.pdf

KRISTALL 2015. ELECTRONIC DEVICES SCREEN PROTECTOR.. [Viitattu 2015-03-10.] Saatavissa: <http://kristallglobal.com/electronic-devices-screen-protector/>

KÄRPPÄ, Jaani 2014-12-12. Diplomi-insinööri. ABB. [Suullinen tiedonanto.] Helsinki: ABB Oy.

LEHTONEN, Olli 2012. SF6-kaasu sähkökojeistoissa. Seminaari keskijänniteverkon suunnittelijoille. [Viitattu 2015-02-10.] Saatavissa:

http://www.siemens.fi/pool/cc/events/keskijannitesuunnittelijat2012/03_sf6-kaasu_sahkokojeistoissa.pdf

LUCAS, J.R. 2001. High Voltage Testing. [Viitattu 2015-01-11.] Saatavissa:
http://www.elect.mrt.ac.lk/HV_Chap9.pdf

MÄKINEN, Markku J.J. ja KALLIO, Raimo 2004. Teollisuuden sähköasennukset. Keuruu:
Otavan Kirjapaino Oy.

NYKÄNEN, Sanna. Polykarbonaatti. Valuatlas. [Viitattu 2015-01-15]. Saatavissa:
http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PC_FI.pdf

POLYKARBONAATTI s.a. Valuatlas. [Viitattu 2015-01-15]. Saatavissa:
<http://www.tuotteet.vink.fi/tuotteet/pc-polykarbonaatti.html>

STORM COPPER COMPONENTS, CO. 2012. Epoxy Powder-Coated Bus Bar Insulation. [Viitattu 2015-04-13.] Saatavissa: <http://stormcopper.com/powder-coated-busbar.html>

VIRKKI, Johanna ja TUUKKANEN, S. 2010. Modifications of the Standard Reliability Tests. [Viitattu 2015-02-01]. Saatavissa:
http://next.utu.fi/2010/presentations/Johanna_Virkki-HTSL_and_LTSL_Tests_at_Component_Level.pdf