



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

SUURJÄNNIKOESTUSTEN KEHITTÄMINEN

TEKIJÄ:

Samuel Hirvonen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä Samuel Hirvonen	
Työn nimi Suurjännitekoestusten kehittäminen	
Päiväys	23.11.2022
Sivumäärä/Liitteet	40/1
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia-amk	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Savonian suurjännitelaboratorion oppimisympäristö uudistui vuonna 2020, kun kampus siirtyi Microtecnialle. Tässä yhteydessä suurjännitelaboratorio siirtyi metalliseen konttiin. Tässä työssä tutkittiin, kuinka parantaa koestusolosuhteita kontissa ja kuinka kosteus vaikuttaa koestustuloksiin. Työstä tuli laaja kokonaisuus käytännön asioita, jotka vaikuttavat koestuksen järjestämiseen. Tutkittiin myös koestusten olosuhteita määrittävän standardin soveltamista suurjännitteisiin koestuksiin. Työn valvojan kyselyiden perusteella vastaavaa koestustyötä ja tuloksia ei oltu vielä muualla Suomessa tehty.</p> <p>Työn voi jakaa karkeasti neljään osa-alueeseen. Ensiksi paneuduttiin uuden muuntajan hankintaan. Tällä hetkellä käytössä oleva muuntaja on yli 100 kV. Sillä tehtävien säätöjen askeleet ovat suuriporiaisia. Laboratoriossa olisi kuitenkin mielekästä pystyä tutkimaan ilmiötä paljon pienemmillä jännitteillä ja siksi työssä tutkittiin mahdollisuutta hankkia muuntaja, jonka jännite olisi 11 kV. Tehtiin sähköpostikyselyjä kotimaisille ja ulkomaisille toimittajille. Toiseksi tutkittiin otsonin määrää koestuksissa. Turvallisuuteen vaikuttava otsonikaasu syntyy karkaavien elektronien seurauksena. Tässä työssä selitetään otsonin synty ja suoritetaan mittauksia sen määrästä. Lopuksi otetaan kantaa sen määrän vaarallisuuteen ihmiselle. Kolmanneksi paneuduttiin kontin EMC-häiriöiden tutkiminen ja ratkaiseminen. Kontissa tehtävät koestukset aiheuttavat hyvin nopeita sähkömagneettisia impulsseja, jotka osuessaan elektronisiin laitteisiin vuorostaan toimintahäiriötä niiden toiminnassa. Työssä jäljitettiin mistä ja miten häiriöt kulkeutuvat ja kuinka niitä voitaisiin hallita. Pahimmillaan virheet johtivat tietokonenäyttöjen hetkelliseen vilkuntaan tai jopa pimenemiseen. Tähän ongelmaan työssä tehtiin useita korjauksia ja niiden vaikutuksia testattiin. Neljäntenä asiana opinnäytetyössä käsitellään kosteuden vaikutusta suurjännitekoestuksiin. Tämä on työn haastavin kokonaisuus. Standardi (IEC International, 2010) käsittelee suurjännitekoestuksien olosuhteiden huomioimista koestustuloksissa. Standardi määrittelee normaaliolosuhteet sekä sen, kuinka korjata mittaustuloksia, jos ne on tehty muissa kuin standardin edellyttämässä olosuhteissa. Myös kosteuden vaikutukseen annetaan mallinnus, mutta ei kaavaa, koska se ei ole matemaattisesti esitettävissä. Standardin määrittelemien korjauskertoimien soveltaminen on haastavaa ja tämä työ antaa esimerkin, kuinka niitä voi käyttää. Tässä työssä tosinnetaan kosteuden vaikutus koestustuloksiin.</p> <p>EMC- häiriöt ovat hyvin mielenkiintoisia ilmiöitä, jotka vaikuttavat myös teollisuudessa. Kipinävälin kaltaisia ilmiöitä syntyy katkaisijoiden ja erottimien kaltaisissa kytkimissä kokoajan. Koulun laboratorion häiriöt saatiin puolitettua ja valvomo on turvallisempi elektronisille laitteille. Kosteuden lisääminen lisäsi jännitekestoisuutta. Työ mallintaa sen graafisesti. Opinnäytetyön tuloksena, koulun laboratorio on nyt uuden näköinen. Tilat ovat jouhevät ja niissä on enemmän toiminnallisuutta ja tilaa seurata koestuksia. Tilojen turvallisuuteen vaikuttaa esimerkiksi koestusten aikana syntyvä otsoni. Tässä opinnäytetyössä tutkittiin tasajännitetestauksen jälkeen esiintyviä otsonin määrää.</p>	
Avainsanat kosteus, suurjännitekoestus, EMC-häiriöt	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Electrical and Automation Engineering	
Author(s) Samuel Hirvonen	
Title of Thesis Improving of High-Voltage Test Techniques	
Date 23 November 2022	Pages/Appendices 40/1
Client Organisation /Partners Savonia University Of Applied Sciences	
<p>Abstract</p> <p>The thesis is a broad view of how to improve the space used for testing so that the equipment will function in those conditions.</p> <p>Thesis is a deep look inside of how to apply a standard for high-voltage testing conditions. This was done by taking a sharp look into moisture during testing and its effects in the test results.</p> <p>This thesis has a closer look on how to decrease the effects of EMP pulses and how to protect testing equipment from it. At the time of starting the thesis, testing created such a high impulse that even monitors were having errors in signal or a complete loss of signal for a while. Rearranging grounding and making Faradise case helped to solve problem.</p> <p>In this thesis is explained how to use given formulas to maintain same level in test results as in those conditions that standard requires. This thesis helps to understand this event with results of real tests done with a varying amount of moisture inside the laboratory. First voltage discharge level stays the same and around 80% of moisture raises to be unstable around 100% of moisture in the air.</p> <p>The last part of this thesis is concerning of the need for new transformer and it was searched how to purchase it. Finally, recommendation to buy one was made.</p>	
<p>Keywords high-voltage testing, moisture, EMC</p>	

LYHYNTEET

AC	VAIHTOJÄNNITE
DC	TASAJÄNNITE
EMC	SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS
EMI	RADIOTAAJUUSHÄIRIÖT
EMS	SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS
IEC	KANSAINVÄLINEN SÄHKÖALAN STANDARDOINTIORGANISAATIO

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	UUDEN MUUNTAJAN HANKINTA	8
2.1	Tarjouskyselyt	8
3	EMC-HÄIRIÖIDEN SELVITTELY	10
3.1	EMC-käsite	10
3.1.1	EMC-emissio	11
3.2	Käytännön kokeet	12
3.2.1	Manuaalinen todentaminen	13
3.2.2	Näytön peittäminen foliolla	15
3.2.3	Valvomon ikkunoiden peittäminen foliolla	15
3.2.4	Näytön siirtäminen ulos kontista ja näytön virran tuominen eri sähkökeskuksesta.	15
3.2.5	Tietokoneen ympäröiminen foliolla	16
3.2.6	Mitta-antureiden irrotus ja maadoituksen lisääminen	17
3.3	Tulokset	18
3.3.1	Ehdotuksia vian selvittämisen ja korjaamisen tueksi	19
4	OTSONIN MÄÄRÄ KOESTUKSESSA	20
5	KOSTEUDEN VAIKUTUS SUURJÄNNITEKOESTUKSEEN	22
5.1	Tausta.....	22
5.2	Koestusjärjestely.....	23
5.2.1	Up & Down-menetelmä	24
5.3	Kosteuden ja muiden arvojen huomioiminen tuloksissa	25
5.3.1	Ilmakehän korjausarvo läpilyöntivälille.....	26
5.3.2	Kosteuden korjaus, K_2 -arvo.....	27
5.3.3	k -arvon potenssit	28
5.3.4	Kosteus	30
5.4	Kertaus	31
5.5	Numeerinen esimerkki.....	32
6	KÄYTÄNNÖN TESTIT	34
6.1	Järjestelyt.....	34
6.2	Tulokset	34
6.3	Tulosten analysointi	35

7	SUURJÄNNITEKONTIN TILAJÄRJESTELYT	37
7.1	Lähtötilanne	37
8	YHTEENVETO.....	39
	LÄHTEET	41
	LIITTEET	42

KUVALUETTELO

KUVA 1.	Tarjouksen hinta (Kanth, 2021)	
KUVA 2.	Sähkömagneettinen taajuusalue (Researchgate, 2018).....	10
KUVA 3.	Academy of EMC, EMC raja-arvot (EMC).....	12
KUVA 4.	Lähtötilanne	
KUVA 5.	Saavutettu taso.....	13
KUVA 6.	EMC säteilyn mittaus kuparikäämillä, taustalla valokaari	14
KUVA 7.	Oskilloskooppikuva EMC impulssista	14
KUVA 8.	Folioilla peitetty näyttö ja ikkunat.....	15
KUVA 9.	Näytön siirto ulos kontista	16
KUVA 10.	Verkkohäkki keskusyksikölle.....	17
KUVA 11.	Maadoitusten lisääminen pöytään.....	17
KUVA 12.	Maadoitusten lisääminen sähkökeskukseen	
KUVA 13.	EMC-analysaattori. IO SIGNAL OY (OY)	19
KUVA 14.	Otsonin määrä kokeen jälkeen ja viitearvot.....	21
KUVA 15.	Valokaaren alkaminen	22
KUVA 16.	Valokaari eli plasmasilta.....	23
KUVA 17.	Laboratorion läpilyöntijohdin ja posliinieriste	24
KUVA 18.	k -arvo	28
KUVA 19.	m -arvo	29
KUVA 20.	w kerroin	30
KUVA 21.	Absoluuttinen kosteus, lämpötila ja suhteellinen kosteus (IEC International, 2010).....	31
KUVA 22.	Testi kosteuden vaikutuksesta läpilyöntilujuuteen.....	35
KUVA 23.	Kuva ennen muutoksia	37
KUVA 24.	Kuva muutosten jälkeen	37
KUVA 25.	Valvomo muutosten jälkeen	38

1 JOHDANTO

Keväällä 2020 Savonian AMK siirtyi Opistotien kampukselta Microkadun kampustiloihin. Tässä yhteydessä sähkötekniikan laboratoriot pienenevät merkittävästi. Suurjännitelaboratorio päätettiin sijoittaa konttiin, koska sen käyttöaste on muuhun laboratoriokäyttöön nähden pienempi. Tarkoitukseen tilattiin kahdesta 9 m kontista koottu rakennus, jonka sisään saatiin nyt myös yritysten tarpeita palveleva suurjännitetestauslaboratorio.

Tämä opinnäytetyö liittyy siihen, kuinka tilat ja koestukset saataisiin järjestettyä kaikkia palvelevaksi kokonaisuudeksi. Esimerkiksi akkuteknologian kasvu on suurta, koska autojen ja muuhun liikkumiseen tarkoitettujen laitteiden huikea siirtyminen polttomoottorikäyttöisistä akkukäyttöisiin on ollut nopeasti kasvavaa. Lisäksi on tarpeen selvittää vaihtoehtoja hankkia uusi 10 kV muuntaja, jolla saataisiin tarkemmin koestettua pienemmän jännitteen koestuksia. Työhön kuului sopivan muuntajan etsiminen, jota voisin suositella koululle hankittavaksi.

Yksi luku työstä käsittelee kosteuden vaikutusta tasajännitteen läpilyöntiin eristimen yli. Tämä osoittautui hyvin mielenkiintoiseksi kokeineen ja tulosten käsittely osoittautui hyvin haastavaksi, koska muunnoskaavat sisältävät paljon muuttujia. Epäonnistunut toinen testi osoittautui hyväksi siinä mielessä, että se pakotti tarkastamaan ja kertaamaan moneen kertaan kaavat ja niiden syöttämisen koneelle. Opinnäytetyössä mainittu testi onnistui todella hyvin kuvaamaan standardissa mainittua ilmiötä, kun kosteuden määrä läheni 80 % suhteellista kosteutta.

Työn tilasi Savonian sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusyksikkö ja heidän tavoitteensa on parantaa suurjännitelaboratorion käytettävyyttä ja mahdollistaa testausmahdollisuuksien vuokraaminen yrityksille. Jotta tämä voitaisiin saavuttaa, tarvitaan järjestelyjä tilan suhteen ja laitteiden toimivuutta halutaan parantaa. Noista asioista koostuu tämä opinnäytetyö.

Suuret kiitokset kaikille työtä tukeneille. Erityiskiitos työn ohjaajille kärsivällisestä opastuksesta ja käytännön tuesta. Kiitos myös EMC-laboratoriolle laitteiden ja ohjeistuksen jakamisesta.

2 UUDEN MUUNTAJAN HANKINTA

Suurjännitelaboratorion koestusjännite muodostetaan 220/100000 V yksinvaihemuuntajan avulla. Säädettyä 0–100 kV jännitettä käytetään vaihtojännitekoestuksissa ja samaa säädettyä vaihtojännitettä käytetään myös ukkosta simuloivan syöksyjännitepulssin muodostamiseen.

Muuntaja on hyväksi todettu suurille jännitteille. Kuitenkin sen haittana on hyvin suuri jänniteaskellus. Pienimmilläänkin se on 1 kV, mutta nykyisellä ohjauspaneelilla voidaan todeta vain 2 kV jänniteaskelmat luotettavasti. Myöskään monet suurjännitekoestukset eivät tarvitse kymmenien kilovolttien suuruisia jännitteitä ja siksi olisi tarpeellista olla myös pienemmän jännitteen omaava, pienemmän jänniteaskelluksen omaava muuntaja. Tätä varten yhtenä opinnäytetyön osana oli selvittää noin 10 kV, yksivaiheisen ja noin 5 kVA muuntajan hankinta ja kustannukset. Suomessa käytössä on keskijännitejakeluportaassa pääsääntöisesti 20 kV kolmivaiheisia muuntajia. Suurin osa 10 kV järjestelmistä muutetaan 20 kV jännitetasolle. Kaikki nämä verkot ovat kolmivaiheisia. Siksi 10 kV ja yksivaiheisen muuntajan löytyminen suoraan Suomesta on hankalaa.

2.1 Tarjouskyselyt

Savon Voimalta ja muilta Kuopion alueen sähköjakeluyhtiöiltä kysyttiin sähköpostitse kyseisen muuntajan löytymistä käytettynä. He kaikki vastasivat, että heillä ei vastaavaa ole. Isoista yrityksistä muuntajaa kyseltiin ABB:ltä ja Hitachilta. Kiinalaisesta verkkokaupasta Alibabasta kysyttiin myös tarjousta, mutta hintaa toimitettuna suomeen ei saatu. Lopulta Intiasta saimme sitovan ja oikean tarjouksen muuntajasta. Tarjouksen saamisessa auttoi Savoniassa työskentelevä opettaja, joka on kotoisin Intiasta. Sen lopulliseksi hinnaksi tulisi 2800 USD toimitettuna. Tämä on jo vakavasti otettava tarjous ja ammattikorkeakoulu harkitsee sen ostamista. Ohessa taulukko muuntajan teknisistä ominaisuuksista.

TAULUKKO 1. Yksivaihemuuntajan ominaisuudet (Kanth, Muuntajan hankinta Intiasta, 2021)

SL. NO	PARTICULARS	DESCRIPTION
1.	Manufacturer	ASTRON ELECTRIK BANGALORE
2.	Winding Material	Copper Wound (EC GRADE)
3.	Max. continuous Rating	5000VA Oil Cooled Transformer
4.	Voltages HV / LV	11000V/240V
5.	Vector Group	NA
6.	Type of connection: HV / LV	NA
7.	Reference standard	IS 11171 / IEC 60076
8.	Rated frequency	50 Hz +/- 3% turned ON
9.	Tapings	NONE
10.	Efficiency	>98%
11.	Noise Level	< 70db measured from 1 meter distance
12.	Insulation Class	F
13.	Type of Tap changer	NA
14.	Type of cooling	ONAN
15.	Temperature condition	Winding/ ambient= 115 ⁰ C / 30 ⁰ C
16.	Terminal arrangement: HV / LV	NO CABLE BOX / CABLE BOX
17.	No Load Losses	<120Watts +/- 10% tolerance
18.	Full Load Losses	<175Watts +/- 10% tolerance
19.	Impedance	4.5% (IS Tolerance)
20.	Approx .Dimensions: L x B x H	In the event of Order

Muuntajan hinta tarjouskyselyn mukaan on 2800 \$. Tähän tulee vielä päälle rahat ja tullit sekä verot, jolloin lopullinen hinta koululle toimitettuna on 5000 €.

PRICE SCHEDULE

SL. NO	TRANSFORMER RATING	QUANTITY	UNIT PRICE
1	5000VA 11000/ 240V COPPER WOUND OIL COOLED TRANSFORMERS	1	\$ 2800 (USD TWO THOUSAND EIGHT HUNDRED <u>DOLLERS</u>)

KUVA 1. Tarjouksen hinta (Kanth, 2021)

Tämän kaltainen muuntaja olisi koulun hyvä hankkia. Se on kokonsa ja ominaisuuksiensa puolesta sopiva vaihtoehto tuottamaan alle 11 kV jännitteitä. Laboratoriokäytössä muuntajan virrankesto ei ole määräävä tekijä, koska virrat pyritään turvallisuussyistä pitämään mahdollisimman matalana. Opinnäytetyön lopussa tuli koululle myös tarjous suomesta ostettavasta muuntajasta vastaavilla ominaisuuksilla. Täten hankinta ulkomailta ei ole pakollinen eikä kannattava, koska hinta suomesta ostettuna on todennäköisesti jopa edullisempi kuin tilaamalla. Yksivaiheisia muuntajia ei käytetä suomessa jakeluverkossa ja siksi myyjät eivät olleet tietoisia, että heidän yrityksensä edes pystyy tarjoamaan näitä suomeen.

3 EMC-HÄIRIÖIDEN SELVITTELY

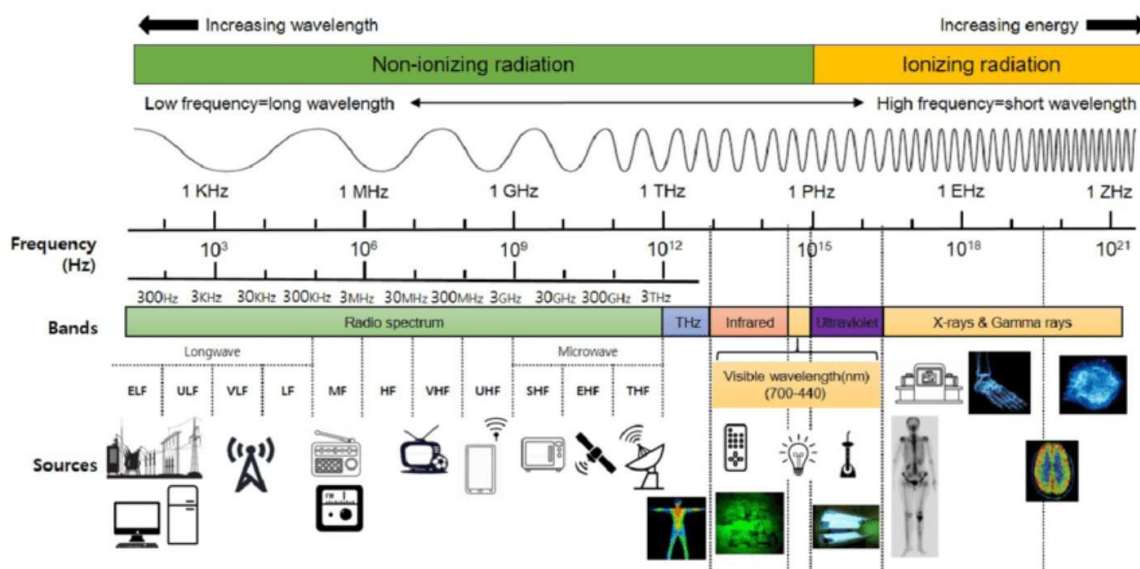
Laboratorion siirryttyä konttiin on tietokoneen näytössä ilmennyt signaalihäiriötä. Ilmiö esiintyy nopean syöksyjännitepulssein yhteydessä. Kyse on jännitepulsseista, joka nousee huippuarvoonsa noin 1 mikrosekunnissa. Häiriö on kahdenlainen. Joskus se häiritsee kuvaa, mutta useimmiten se katkaisee signaalin kokonaan. Tämän ongelman selvittely on tärkeää, jotta konttia voisi käyttää luontevasti tulosten tarkasteluun. Häiriötä ei varsinaisesti ole havaittu oskilloskoopin mittaustuloksissa, joten mittaustulokset pystytään kyllä kirjaamaan samalla luotettavuustasolla kuin ennen kuin laboratorion siirtämistä konttiin, mutta näytön pätkiminen ei ole suotavaa.

Käydään nyt läpi lyhyesti mitä EMC-häiriö tarkoittaa ja sen jälkeen luomme silmäyksen kohteena olevaan ongelmaan.

3.1 EMC-käsite

EMC-häiriöt käsitteenä on hyvin laaja. Tässä työssä rajataan aiheen käsittelyä vain tätä työtä tukevaan tietoon ja aiheen käsittelyyn, koska muuten opinnäytetyö laajenisi liian laajaksi.

EMC:stä puhuttaessa käytetään usein ilmausta EMC-yhteensopivuus. Tämä käsite on yksi avain sen ymmärtämiseen, miksi aihe on niin tärkeä ottaa huomioon jo laitteistojen suunnitteluvaiheessa, eikä vasta sitten, kun ongelma havaitaan käytön puolella. EMC-yhteensopivuus pitää sisällään sen, mihin kohtaan sähkömagneettista taajuusalueita laite sijoittuu. On tärkeää tietää säteilyn aallonpituus ja voimakkuus. Eri laitteille on sitten määritelty niiden häiriönkestävyyden raja-arvot. Laboratoriossa muodostuva häiriö on laajakaistaista tai se rikkoutuu niin että sitä esiintyy useammalla taajuuden alueella.



KUVA 2. Sähkömagneettinen taajuusalue (Researchgate, 2018)

Yllä olevasta kuvasta nähdään, että sähkömagneettinen impulssi voi olla hyvinkin laajalla taajuusalueella. Laboratoriossa tehdyissä kokeissa suurimmat säteilyarvot löydettiin, kun mittari oli säädetty 500 MHz taajuudelle. Viimeisenä kuvaajassa on EHF-aallot, jotka kuuluvat kännyköiden verkkotaajuuksiin. Kännyköiden aiheuttaman EMI-säteilyn voi havaita, jos sijoittaa kännykän lähelle kaiutinta,

jossa ei ole suojausta sähkömagneettista häiriötä vastaan. Jos kaiuttimessa on vielä sisäinen vahvistin, on "rallattava" häiriö selvästi kuultavissa.

Toiseksi pääkohdaksi muodostuu häiriön voimakkuus. EMC: llä on kaksi määrettä, joilla sitä kuvataan.

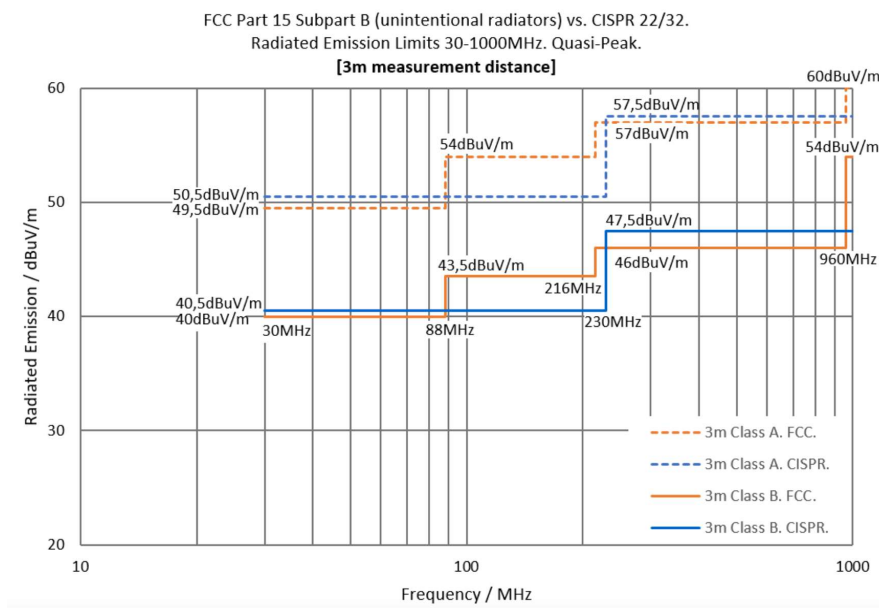
1. Emissio eli säteilyn määrä. Tätä kuvataan lyhenteellä EMI = Electromagnetic interface
2. Vastustuskyky säteilyä vastaan. Yleisesti käytetään nimeä säteilyimmunitaetti.

3.1.1 EMC-emissio

Savonian suurjännitelaboratoriossa verkkojännitteellä syötetään erillistä muuntajaa, joka nostaa jännitteen 0–220 V:sta testattavaan jännitteeseen, joka yleensä on noin 0-100 kV. Suurjännitemuuntaja lataa kondensaattoreita diodisillan läpi. Lataus tapahtuu siniaallon toisella puoliskolla. Tällöin latausta tapahtuu 50 kertaa sekunnissa taajuuden ollessa 50 Hz. Kondensaattori latautuu, kunnes kipinävälin ilman läpilyöntilujuus ylittyy. Läpilyönnin tapahtuessa ja kipinävälin pysyessä samana alkaa ensiöpiiri latautua uudelleen ja sen seurauksena syntyy uusi läpilyönti. Laboratoriolaitteistossa ongelmat alkavat juuri sillä hetkellä, kun kipinäväli syttyy. Tällöin ongelman voi muodostaa kaksi erillistä ilmiötä: johtuva emissio ja säteilevä emissio. Laboratorion laitteistossa ilmenee molempia. Tässä insinööriyössä on keskitytty säteilyn kautta tulevien ongelmien ratkaisemiseen. Kokeiltiin kyllä muutamia johdon päälle asetettavia säteilyn kerääjiä, joilla voisi torjua johtuvia emissioita, mutta niillä ei ollut silmin todistettavaa vaikutusta laitteistoon.

Ammattikorkeakoulun laboratoriossa ilmenevät sähkömagneettiset säteilyt eivät millään tavalla aiheuta terveysvaaraa, sillä raja-arvo terveydelle haitallisella säteilyllä on 5 kV/m. (STUK, 2018) Tämä raja-arvo voisi hetkittäin ylittyä, jos seisot 400 kV siirtoverkon alla, johtojen ollessa matalla.

EMC emissioille on valtava määrä eri standardeja. Koska tämä työ ei ole varsinaisesti EMC:tä käsittelevä, esitetään seuraavassa yksi monista standardien tarjoamista raja-arvo taulukoista säteilylle. Erot eri maanosien ja eri standardilaitosten välillä eivät ole kovin suuria. Tämä kaavio on Academy of EMC :n julkaisema (Academy of EMC, 2018-2022).



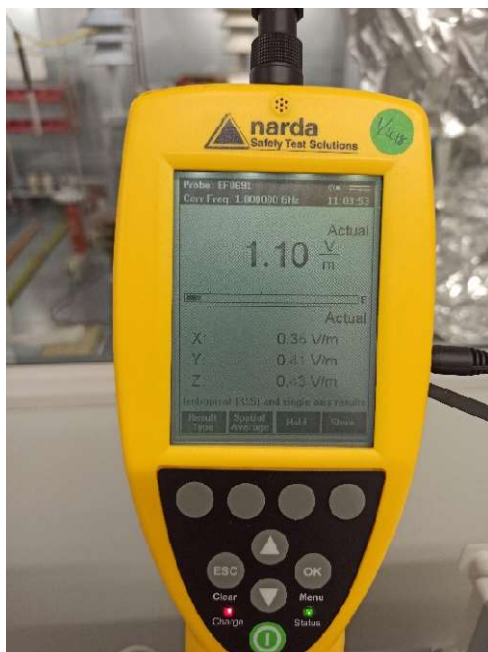
KUVA 3. Academy of EMC, EMC raja-arvot (EMC)

Tästä kaaviosta voidaan nähdä kuinka EMC säteilyn ei tulisi missään olosuhteessa ylittää 60 dB μ V/m. Todellisuudessa sen pitäisi olla paljon alhaisempi, jotta herkät laitteet eivät saisi häiriöitä.

3.2 Käytännön kokeet

Uudessa laboratoriokontissa tehtiin monia käytännön kokeita, jotta saatiin rajattua häiriön aiheuttajaa. Koska tilassa oli ollut opiskelijoiden kannettava tietokone ja se oli myös reagoinut näytön sammumisella, oli luontevaa päätellä, että syy olisi sähkömagneettinen impulssi, joka leviää ilmateitse säteilemällä.

Siksi tehtiin koesarja, jossa vian aiheuttajaa etsittiin folion avulla. Folio toimii ohuudestaan ja heikkoudestaan huolimatta hyvin ilmateitse leviävän pallomaisen signaalin pysäyttäjänä. Siksi vuorattiin tietokoneen näyttö folion sisään ja asennettiin puhelin kuvaamaan näyttöä, jotta voitaisiin todentaa poistuisiko virhe. Toivottua tulosta ei tullut, mutta säteilyn määrä kyllä pieneni. Lopulta päädyttiin teettämään valvomon ja laboratorion väliin metalliverkosta rakennettu suojaseinä. Tämä pienensi huomattavasti EMC säteilyn määrää. Seuraavissa kuvissa esitellään muutos Nardan NBM 550 EMC-mittarilla. Ensimmäisessä kuvassa on tilanne mistä lähdettiin. Säteilyn määrä oli 1,1 V/m. Toisessa kuvassa näkyy tulos, kun kaikki EMC torjuntakeinot oli tehty. Tulos lähes puolittui ollen 0,57 V/m. Tämäkin tulos ei tosin poistanut tietokonenäytön vilkuntaa ja syykin on selvä. Säteilyä on edelleen liikaa. Tämä voidaan nähdä myös vertaamalla aiemmin mainittuun standardiin, jossa maksimiarvoksi oli annettu alle 60 dB μ V/m. Jos muutetaan mitattu 0,57 V/m yksikköön dB μ V/m, tulee arvoksi 115,12 dB μ V/m. Tämä arvo on jotakuinkin kaksi kertaa niin suuri kuin se standardin mukaan saisi olla. Jotta päästäisiin alle tuon 60 dB μ V/m, tulisi mittarin näyttää arvoa luokkaa 10 mV/m. Niin suuri ero on. Asteikko desibeleille on logaritminen ja siksi arvot ovat niin erilaisia.



KUVA 4. Lähtötilanne



KUVA 5. Saavutettu taso

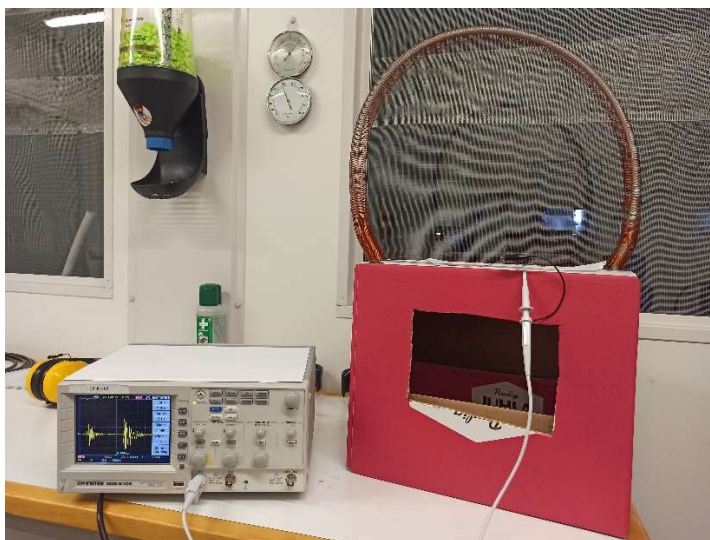
3.2.1 Manuaalinen todentaminen

Olisi hienoa, jos opetuskäytössä voisi oppilaille mallintaa niin sanotusta rautalankaversiosta, kuinka paljon tilassa oikeasti on EMC säteilyä. Sen vuoksi mallinnettiin kokeeksi kupari käämitys, joka induktoi säteilyä. Muoviputken ympärille sijoitetusta kuparikierrosta mitataan oskilloskoopilla säteilyn kautta leviävää energiaa eli sähkömagneettista säteilyä. Oskilloskooppi pystyy todentamaan jännitteen vastuksen yli. Ensimmäinen kokeiltu analoginen jännitemittari ei kyennyt tähän, koska impulssi on niin nopea. Kuvasta 7 selviää impulssin kestoajasta, joka on noin 2 μ s. Tämä tieto on uutta tässä työssä, jos verrataan Nardan mittarilla saatuihin tietoihin. Nardasta tämä tieto pitäisi laskea taajuudesta. Jännite noin 2,2 V. Arvot eivät ole oikein millään tavalla tieteellisesti käytettävissä, koska silmukan arvoja ei tunneta. Koska käytössä on laite, joka jo mittaa säteilyn tarkasti, ei ole syytä tämän työn aikana tehdä tästä laitteesta niin syvää tutkimustyötä. Laite kuitenkin antaa opetuskäytössä oppilaille kuvan energiasta joka kipinävälin purkauksesta lähtee. Samoin se näyttää kuinka antennina toimii monissa laitteissa käytettyä kuparisilmukkaa eri muodoissaan. Tämä taas auttaa ymmärtämään syyn suojata laitteet niin, että ne eivät joko häiriinny säteilystä tai tuota sitä. Yksi iso tieteellinen huomio voidaan kyllä todeta tästä mittauksesta. Valvomon ikkunat on suojattu teräsverkolla. Se ei ole suojauksena hyvä siinä mielessä, että se on heikosti johtava materiaali verrattuna kupariin, alumiiniin tai hopeaan. Ja että se on magneettinen aine. Tämän takia se ei suojaa niin hyvin, kuin jos käytössä olisi muovikalvo, jossa on hyvin ohut kupariverkko sisällä. Kuitenkin hintansa puolesta metalliverkko on hyvä ja siksi tähän tilanteeseen sitä käytettiin suojauksessa.

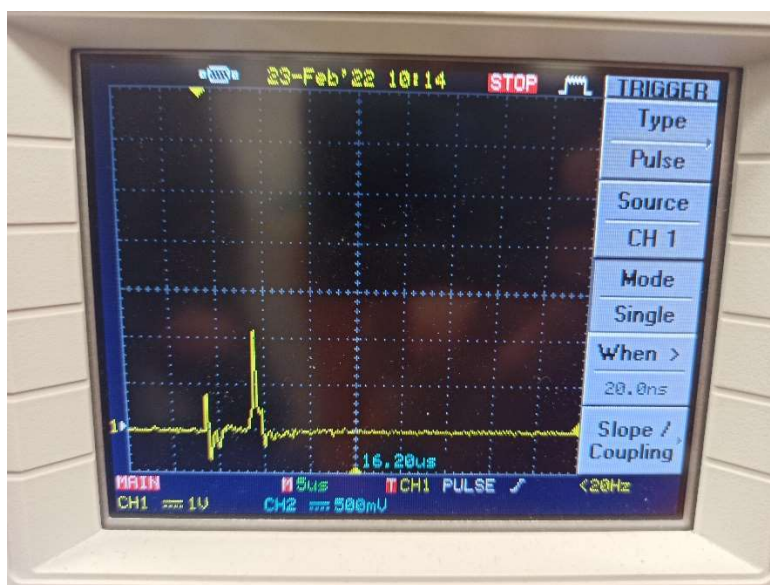
Yleinen nyrkkisääntö rakennettaessa Faradayn häkkiä on: Faradayn häkin aukkojen tulee olla alle 1/10 osa aallonpituudesta. Jos on esimerkiksi 10 GHz aallonpituus, tulisi aukkojen olla alle 3 mm halkaisijaltaan. (instruments, 2022). Käytännössä tällaisen suojauksen näkee esimerkiksi mikroaaltouunin ovesa. Laboratorioon asennettujen verkkojen silmäkoko on 2 mm. Säteilyn taajuus on 500 MHz luokkaa, eli sen aallonpituus on noin 0,6 m. Taajuus perustuu Nardan mittarilta saatuihin lukemiin,

laskennallisesti taajuus voi olla kilohertseissä, mutta sillä on oltava kerrannaisia, jotka näkyvät mitauksissa voimakkaimpina, kuin varsinainen lähtötaajuus. Jos näin ei olisi, toimisi nyt asennettu 2 mm verkko huomattavasti paremmin. Kiloherziluokkaa olevan aallon pituus on kilometreissä ja se suodattuisi helposti laboratorion ikkunoiden suojauksella.

Myös kontin seinien materiaalina käytetty metallilevy heijastaa aaltoja tehokkaasti. Jotta Nardan mittarin ilmoittamaa luokan 500 MHz taajuutta voisi torjua metalliverkolla, tulisi verkon silmäkoko olla 1/10 osa 0,6 m:stä, eli 6 cm. Käyttämämme 2 mm silmäkoon verkon pitäisi torjua tämä säteily. Jäljelle jää siis paljon tutkimattomia kohtia, miksi säteily edelleen kulkee valvomoon. Kontissa pitäisi tehdä EMC-mittaukset siihen oikeasti suunnitelluilla laitteilla. Niillä näkisi signaalin taajuuden. Tämä auttaisi tarkemmin kohdistamaan suojausta tilassa. Asennettu suojaus silti auttaa, kuten mittaukset Nardan mittarilla osoittivat ja se mahdollistaa oppilaiden tulevat mittaukset sen suojaavuudesta ja mahdollisesti aallonpituuksien tarkemmasta selvittämisestä.



KUVA 6. EMC säteilyn mittaus kuparikäämillä, taustalla valokaari



KUVA 7. Oskilloskooppikuva EMC impulssista

3.2.2 Näytön peittäminen foliolla

Kuten kuvasta 8 näkyy, rakennettiin näytön ympärille pahvilaatikosta ja foliosta täydellisesti peittävän suoja ts. Faradayn häkki. Tämän jälkeen tehtiin vaihtojännitekoestuksen avulla jännite läpilyöntejä. Näytöllä ilmeni yhtä lailla virheitä kuin ilman näyttöä peittävää foliota. Tämä viittaisi siihen, että häiriö johtuu kaapelia pitkin tai pikemminkin näytönohjaimen signaali häiriintyy. Siksi näytön vilkuntaa tuskin voitaisiin korjata vaihtamalla näyttöä EMC-resistiiviseksi.

3.2.3 Valvomon ikkunoiden peittäminen foliolla

Näytön foliolla peittämisen lisäksi peitettiin myös valvomon ja itse laboratorion välisen seinän pleksilasit foliolla. Oltiin huolellisia, jotta ei jäisi reikiä, joista häiriösignaali voisi kulkea läpi. Tälläkään liksäyksellä ei ollut merkittävästi vaikutusta näytön häiriöherkkyyteen. Koestusten tekeminen myös vaatii näköyhteyden kipinäväliin:

- jotta sitä voidaan säätää tarvittaessa
- sen todentamiseksi missä läpilyönti tapahtui. Harjaantunut henkilö voi myös kuulla eron eristimen läpilyönnistä ja kipinävälin läpilyönnistä.
- muiden häiriöiden tai ongelmien havaitsemiseen



KUVA 8. Foliolla peitetty näyttö ja ikkunat

3.2.4 Näytön siirtäminen ulos kontista ja näytön virran tuominen eri sähkökeskuksesta.

Näyttö kannettiin ulos kontista edelleen folioon peiteltynä. Edes näytön siirtäminen kontin ulkopuolelle ei poistanut häiriöitä. Näytölle tuotiin virta autonlämmityspistorasiasta, joka on kaukana siitä virransyötöstä, joka konttiin tulee. Ajatus oli, että virransyöttö saisi häiriöitä läpilyönti-impulssista ja aiheuttaisi näytön sammumisen. Näytön vilkunta jatkui edelleen eikä siinä ollut havaittavissa selvää muutosta puoleen eikä toiseen.

Tehtiin vielä toinenkin koe, jossa myös keskusyksikölle tuotiin virta eri kautta, mutta mitään vaikutusta häiriöön tällä ei ollut.



KUVA 9. Näytön siirto ulos kontista

3.2.5 Tietokoneen ympäröiminen foliolla

Seuraavaksi tietokoneen keskusyksikkö ympäröitiin foliolla. Tämä koe ei ollut etukäteen suunniteltu, joten folio aseteltiin niin hyvin kuin se saatiin. Keskusyksiköstä lähtee johtoja molemmilta puolilta ja siksi näiden johtojen kohdille jäi aukkoja folioon, jotka puristeltiin kiinni. Tämä oli ensimmäinen koe, jolla saatiin tuloksia. Aluksi näytti, että näyttö ei vilkkuisi, mutta alkoikin sitten kuitenkin vilkkumaan, mutta selvästi harvemmin kuin muilla kokeilemillamme tavoilla.

Kun tämä koe oli suoritettu, tuli selväksi, että keskusyksikkö on enemmän vian kohde kuin näyttö. Häiriö mitä todennäköisemmin tulee keskusyksikön näytönohjaimen kautta näyttöön. Sijaitsehan näytönohjain nimenomaan keskusyksikössä. Keskusyksikön suojaaminen metallihäkällä, voisi myös olla yksi varteenotettava ajatus edetä ongelman selvittelyssä. Lopulta päätettiin tehdä verkolla päällystetty häkki keskusyksikölle. Tämän heikkoutena on silti häkin sisään menevät mitta-antureiden johdot.

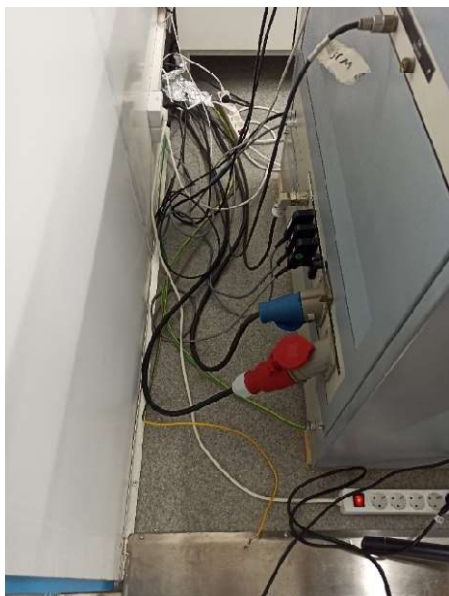
Ehdotettiin hankittavaksi verkkosuodattimia keskusyksikön virransyötölle. Ne olisivat edullinen ratkaisu, jos vika muodostuu syötettävän virran kautta. Jos taas vika on sähkömagneettisesti kotelon läpi muodostuvaa laatua, ei verkkosuodattimilla ole korjaavaa vaikutusta. Kuitenkin ne ovat helpoin tapa tällä hetkellä jatkaa ongelman selvittelyä, sillä luotettavan häkin rakentaminen on työläämpi ja kustannuksiltaan suurempi.



KUVA 10. Verkkohäkki keskusyksiköille

3.2.6 Mitta-antureiden irrotus ja maadoituksen lisääminen

Mitta-anturit irrotettiin laboratorion puolelta ja tutkittiin, johtuisiko virhe mitta-antureiden johtoja pitkin. Tällä ei ollut vaikutusta virheeseen. Tämäkin kokeilu viittaa siihen, että EMC häiriöt ovat sekä johtuvia kaapeleita pitkin, mutta myös aaltolina leviäviä sähköisiä impulsseja, jotka läpäisevät ainakin ikkunat, jotka ovat laboratoriolaitteiden ja ohjauspaneelien välissä.



KUVA 11. Maadoitusten lisääminen pöytään



KUVA 12. Maadoitusten lisääminen sähkökeskukseen

3.3 Tulokset

Monien yritysten ja teknisten muutosten myötä on myönnettävä, että kokonaisuudessa häiriö ei poistunut. Kokeita aloitettaessa ajateltiin, että säteilevä häiriö olisi selvästi suurempi kuin johtuva. Tämä tuli todistetusti selvitettyä vääräksi päätelmäksi. Todellisuudessa ei voida sanoa kumpi on suurempi, koska johtuvia aaltoja ei mitattu. Toteen voidaan näyttää vain mitatut säteilemällä tulleet häiriöt. Ikkunoiden peittäminen foliolla kyllä pienensi jonkin verran säteilymittarin lukemaa, mutta se ei poistanut vilkuntaa näytöstä. Ja koska edes näytön siirtäminen ulos ja sen virransyötön muuttaminen toiseen paikkaan ei poistanut vilkuntaa, pääteltiin, että näyttö itsessään ei ole ongelman juuri. Antureiden irrotus laboratoriopuolen laitteista ei poistanut vikaa. Tässä on huomioitava, että johtoja ei fyysisesti poistettu paikoiltaan, vaan ne irrotettiin laitteistosta. Niitä pitkin voisi johtumalla edelleen tulla häiriöitä valvomon puolelle. Keskusyksikön ympärille rakennettu Faradayn häkkikään ei poistanut vilkuntaa. Siitä pääteltiin, että suurin osa elektromagneettisesta häiriöstä tulee johtumalla laboratorion puolella olevista laitteistoista. Tässäkin on vielä huomioitava säteilemällä valvomon puolelle tuleva häiriö, joka sitten voisi absorboitua johtoihin. Laboratoriosta menee useita johtoja valvomon puolelle. Myös virransyöttö muuntajalle kulkee valvomon säätölaitteiston läpi päätyen itse laboratorion puolen muuntajalle. Se toimii luonnollisesti myös reittinä takaisinpäin valvomon puolelle. Tehtiin testi asettamalla Nardan mittari valvomon kaapin sisään, mutta tällä ei saatu tulosta, josta voisi tehdä päätelmiä. Lisättiin myös keskusyksikön virransyöttökaapeliin asennettava häiriönpoistaja. Sekään ei poistanut vilkuntaa näytöstä. Saatiin kuitenkin merkittävästi parannettua laitteistoa kokonaisuutena. Seuraavaksi lisättiin useita sähkömagneettisia säteilyn poistavia elementtejä. Vaikka häiriö ei poistunut kokonaan, toimii tila tarkoituksen mukaisesti ja tarjoaa myös hyvän paikan ymmärtää kuinka sähköinsinöörin tulisi osata ottaa huomioon sähkömagneettinen soveltuvuus laitteistoja korjattaessa, käyttäessä tai suunniteltaessa.

3.3.1 Ehdotuksia vian selvittämisen ja korjaamisen tueksi

Kontin laboratorion ja valvomon välisiä rakoja voitaisiin tilkitä. Näin niistä tuleva säteily voitaisiin ehkäistä. Tähän tarkoitukseen voi käyttää esimerkiksi teräsvillaa. Seuraava helpohko tapa yrittää korjata tilannetta voisi olla seinien akustointi. Tämä olisi hyvä vaihtoehto siinä mielessä, että tila on oikeasti säteilyn kannalta todella pieni. Lisäksi se on kuin peilitalo metallisine seinineen. Akustolevyt eivät hinnaltaankaan ole mahdottoman kalliita. Ne absorboisivat suuren osan säteilystä ja ehkäisisivät kimpoilevia aaltoja.

Koestustestauksia voisi jatkaa siten, että kaikki muut johdot paitsi sähkönsyöttökaapeli poistettaisiin ja suoritettaisiin mittausta. Tällä voisi todentaa paljonko häiriöstä tulee mittausanturajohtimien kautta. Suositellaan EMC-häiriöihin erikoistunutta oskilloskooppia mittausten analysointiin. Esimerkki laitteesta on esitetty kuvassa 13. Sillä voi tutkia johtimien kautta tulevaa häiriötä ja saada selville sen aallonpituudet. Aallonpituuksien avulla voi tarkemmin vaimentaa häiriötä käyttämällä siihen soveltuvia sovitimia.



KUVA 13. EMC-analysaattori. IO SIGNAL OY (OY)

4 OTSONIN MÄÄRÄ KOESTUKSESSA

Läpilyönnin tapahtuessa muodostuu koronapurkaus. Koronapurkauksessa taas muodostuu otsonia. Otsoni muodostuu seuraavasti: (Ozonetech, 2022)

Purkausenergian elektronit erottavat happimolekyylin atomit:

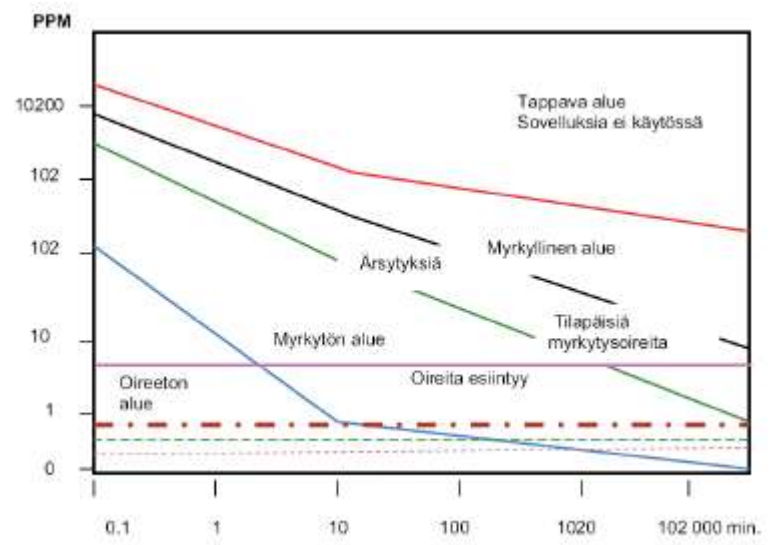


Nämä vapaat atomit reagoivat suoraan keskenään tai happimolekyylien kanssa ja muodostavat otsonia:



Näin muodostunut otsoni hajoaa puoliintumisajassa takaisin hapeksi.

Yhtenä selvitettävänä asiana oli otsonin määrä koestuksessa. Kuvassa 14 näkyvä otsonin arvo on noin 1 ppm. Mittari reagoi otsoniin, kun sitä hitaasti liikuttaa. Siksi tässä kuvassa näkyvä arvo ei edusta suurinta mitattua lukemaa laboratoriotilasta otettuna, heti testijakson päätyttyä. Otsonin määrä ei koskaan ylittänyt 3 ppm, mutta vaihteli kyllä paikasta ja korkeudesta riippuen paljonkin, ollen 1–3 ppm. Otsonin puoliintumisaika on noin 20–30 minuuttia. Pitkähkön ajan vuoksi tilan tuuletus on paras tapa poistaa otsoni koestuksen jälkeen. Kuten alla olevasta kaaviosta huomataan, on koulun suurjännitelaboratoriossa mahdollista saada otsonista oireita. Joskin ne ovat hyvin pieniä ja suurin osa ei niitä koe ollenkaan. Tämä johtuu ajasta, jonka henkilöt altistuvat otsonille kokeiden jälkeen. Tilassa ei oleskella pitkään, vaan siellä korkeintaan tehdään joitakin säätöjä tai koestuspiiri maadoitetaan turvallisuuden takaamiseksi. Ja tuon ajan kuluessa on puoliintumisaika jo pienentänyt otsonin määrän turvalliseksi. Lisäksi tilassa on hyvin tehokas poistopuhallin. Puhaltimella tila saadaan tuuletettua 1–3 minuutissa, perustuen arvioon poistopuhaltimen tehosta ja kokemukseen ilmastointilaitteiden asentajana.



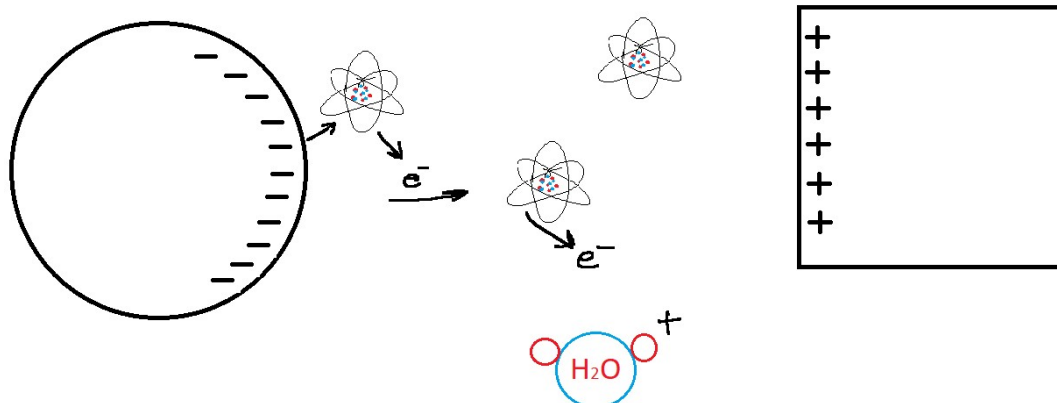
KUVA 14. Otsonin määrä kokeen jälkeen ja viitearvot

5 KOSTEUDEN VAIKUTUS SUURJÄNNITEKOESTUKSEEN

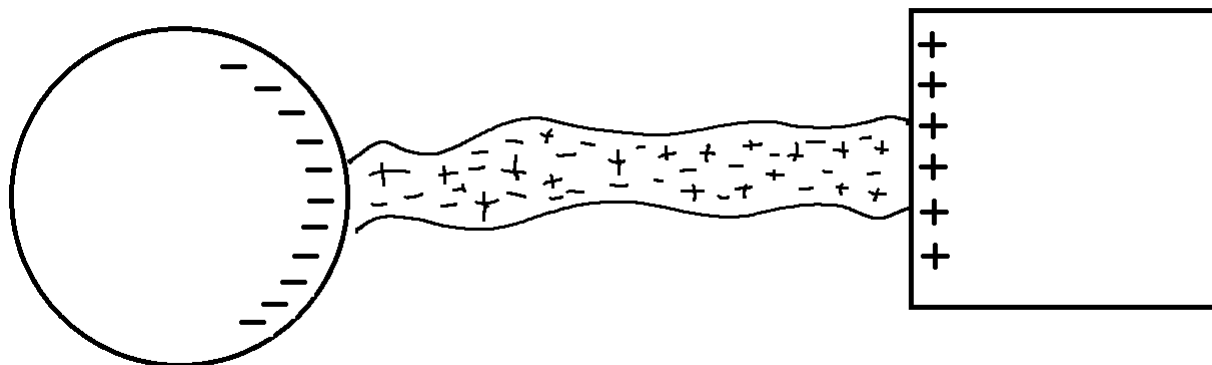
5.1 Tausta

Kosteuden vaikutusta suurjännitekoestukseen on tutkittu kohtuullisen vähän tai tehdyistä kokeista ei ole julkaistua tietoa saatavilla. Standardi siitä, kuinka suurjännitekoestuksia pitäisi tehdä ja minkälaiset olosuhteet tulisi olla tai miten tulokset muunnetaan vastaamaan standardia, on olemassa. Tätä aihetta käsittelee IEC 60060:2010 standardi. On hyvin mielenkiintoista perehtyä kosteuden vaikutukseen purkauksen muodostamisessa käytännössä. Standardissa on tiedossa, että kosteus vaikuttaa läpilyöntiin suurilla jännitteillä. Asiaan perehtymättä voisi ajatella, että kosteuden lisääminen läpilyöntiväliin alentaisi läpilyöntikestävyyttä, vesihän johtaa sähköä. Käytännössä asia ei kuitenkaan ole näin.

Työssä tutkittiin, miten kosteuden vaikutusta koestustuloksiin voidaan havainnollistaa Savonian suurjännitelaboratoriossa. Kokeissa huomattiin niin ennalta odotettuja tuloksia, kuin myös arvaamattomia. Arvaamattomat tulokset eivät tosin selity standardilla, vaan kyseessä on jokin virhe koestuksessa tai olosuhteiden määrittämisessä. Läpilyöntiherkkyyteen vaikuttaa moni asia. "Vesimolekyylit ovat jonkin verran elektropositiivisia ja pyrkivät siksi sitomaan vapaita elektroneja. Sen vuoksi pelkän ilmavälin jännitelujuus suurenee kosteuden suurentuessa aina kastepisteeseen saakka" (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen, & Palva, 2015). Testeissä mentiin yli kastepisteen ja saavutettiin ilman maksimikosteus tai ainakaan koulun laitteilla ei saatu kosteutta lisättyä. Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu, miten koronapurkaus alkaa. Ensinnäkin synnytetään suuri varaus, joka näkyy kuvassa miinusmerkkisinä tihentyminä johtimen pinnalla. Yksi elektroni karkaa johtimesta ja sysäisee kaasumolekyylissä olevan elektronin irti. Tämä irronnut elektroni jatkaa kulkuaan ja sysäisee taas seuraavasta molekyylisestä elektronin irti. Syntyy ketjureaktio, joka johtaa plasmavirran syntymiseen plusmerkkisen ja miinusmerkkisen varauksen väliin. Tämä on läpilyönti. Kuvassa näkyvä vesimolekyylit on hieman positiivisesti varautunut ja sitoo siksi karanneen elektronin. Tämä selittää sitä, miksi läpilyöntijännitteen tulee olla niin suuri, että se johtaa koronasillan muodostumiseen purkauskohteen välille. Kuvassa 16 on havainnollistettu valokaari eli plasmasilta, joka on täynnä plus- ja miinusmerkkisiä varauksia. Tämä ketjureaktio jatkuu, kunnes vapaita elektroneja ei enää ole.



KUVA 15. Valokaaren alkaminen



KUVA 16. Valokaari eli plasmasilta

Jännitelujuus on satunnaissuure. Sen määrittämiseksi on tehtävä koestus, jossa läpilyöntejä toistetaan niin monta kertaa, että saadaan keskimääräinen läpilyöntilujuus. Tässä työssä ei oteta huomioon ylivärähtelyitä ja niiden vaikutuksia tuloksiin. Lisäksi koska testitulokseen vaikuttaa niin moni asia, ei ole mahdollista tehdä tuloksista matemaattista tarkastelua, vaan keskitytään ilmiön tutkimiseen ja sen graafiseen mallintamiseen. Tämän ajatuksen myöntää alan kirjallisuuskin.

5.2 Koestusjärjestely

Kokeessa käytettiin eristimen syöksyjännitekoestuslaitteistoa. Siinä vaihtojännite muunnetaan tasajännitteeksi diodilla ja saatu tasajännite varataan kondensaattoreihin. Suurista varaavista kondensaattoreista jännite siirretään pulssimuotoisena pienemmille kondensaattoreille, joilta jännite ohjautuu ilmaeristeiseen kaapelikannattimeen. Kun jännite ylittää eristimelle (tai elektrodien välimatkalle) määritellyn jännitekestävyyden tapahtuu läpilyönti, joka purkautuu kantavan rakenteen kautta maihin. Tässä kohtaa ilmenevää läpilyöntiherkkyyttä yritetään muuttaa kosteuden määrän säätämällä, tässä opinnäytetyössä. Mallinnuksena käytetään up&down menetelmää, jolla saadaan todennäköisyyteen perustuva läpilyöntikeskiarvo. Sähköisen läpilyönnin muodostumiseen vaikuttaa hyvin moni asia. Läpilyöntiin vaikuttavia asioita on esimerkiksi: (Partanen, 2021)

1. Elektroneina toimivien materiaalien huokoisuus
2. Niiden koko ja muoto
3. Käytetyn jännitteen muoto (näissä kokeissa tasajännite)
4. Jännitteen nousunopeus
5. Ilmassa olevien vapaiden elektronien määrä
6. Ilmanpaine, kosteus, lämpötila, hiukkaset ja muut ympäristön olosuhteet
7. Sattuma, kyseessä on tilastollinen ilmiö, jolla on selvä hajonta johtuen suuresta määrästä muutujia

Kuvassa 17 esitetään laboratoriossa käytössä oleva läpilyöntijohdin ja posliinieriste. Ylhäällä olevasta alumiinisesta johtimesta muodostuu läpilyönti posliinieristeen yli alla olevaan maadoitettuun runkoon. Myöhemmin laskuissa käytettävä etäisyys näkyy kuvassa olevassa mitassa, ollen noin 0,2 m.



KUVA 17. Laboratorion läpilyöntijohdin ja posliinieriste

5.2.1 Up & Down -menetelmä

Katsotaan seuraavaksi, miten Up & Down menetelmällä saadaan U_{50} -arvo. Siinä seurataan jännitteen läpilyöntiä siten, että jos läpilyöntiä ei tapahdu, nostetaan jännite seuraavaan raja-arvoon. Kun läpilyönti tapahtuu, lasketaan jännitettä seuraavaan askeleen osoittamaan arvoon ja suoritetaan laitteistolla jänniteimpulssi, läpilyönnin saamiseksi. Jos olisi reaktio, joka tapahtuisi systemaattisesti ja ennustettavasti, ei tarvitsisi laskea kuin tapahtuneet jänniteläpilyönnit. Silloin saataisiin niiden keskiarvo ja hajonta olisi hyvin pientä. Kun otetaan huomioon myös tapaus, kun läpilyöntiä ei tapahdu, lasketaan siis ikään kuin pinta-alan pohjalta keskiarvo, joka huomioi myös suuren vaihtelun läpilyöntien tapahtumisessa ja antaa laajemman kuvan tapahtuman sattumallisuudesta. Lisäksi silmällä hahmottelemalla voi kuvitella, että jos vain x :llä kuvatut läpilyönnit laskettaisiin, olisi keskiarvo tapahtuneiden läpilyöntien alimman arvon ja maksimiarvon summasta otettu sattuma-arvo, eikä se ottaisi huomioon välillä tapahtuvia jännitepykäliä, joissa läpilyöntiä ei tapahdu. Jos laskettaisiin ottaen huomioon vain X :t eli tapahtuneet läpilyönnit, alla olevasta esimerkistä tulisi vastaukseksi 96,33 kV, mutta otettaessa huomioon myös O :t, joissa läpilyöntiä ei tapahtunut on vastaus tuo alla mainittu 95,38 kV. Tämä vastaus ottaa huomioon myös sen, että läpilyönti olisi voinut tapahtua hiukan alle sen edellisen läpilyöntiarvon, mutta sitä ei mitattu. Tällä tavalla lasketusta arvosta saadaan tuloksen U_{d50} arvo. Se tarkoittaa sitä, että tällä jännitteen arvolla on 50 % todennäköisyys läpilyöntiin. Nyt voi ymmärtää syyn miksi myös O -arvot otettiin mukaan aritmeettista keskiarvoa laskiessa.

TAULUKKO 2. Up & Down -menetelmä

UP&DOWN menetelmä

Jännitetaso
kV

																					kpl(x+o)		
100	x																			x	2		
98		x		x				x													o	o	5
96				o		x		o	x										x		o		6
94						o			x	x				x		o		o					6
92									o		x		o		o								4
90												o											1
	yht																				24		

X tarkoittaa, että läpilyönti on tapahtunut

O tarkoittaa, että läpilyönti ei ole tapahtunut

kaava, jolla painotettu keskiarvo voidaan laskea on:

$$U_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \quad (\text{IEC-standardi 60060-1})$$

$$U_{d50} = \frac{2 * 100 + 5 * 98 + 6 * 96 + 6 * 94 + 4 * 92 + 1 * 90}{24} = 95,333 \text{ kV}$$

5.3 Kosteuden ja muiden arvojen huomioiminen tuloksissa

Jotta erilaiset testiolosuhteet saataisiin edustamaan samaa lähtötilannetta, minkä standardi testeille määrittelee, joudutaan käyttämään erilaisia korjauskertoimia ja niiden kaavoja. Seuraavaksi esitellään millaisia korjauskertoimia ja kaavoja käytetään suurjännitelaboratoriossa. Esitellään myös erityisesti tehdyn kosteuden vaikutustestin tulokset ja vertaan niitä IEC 60060 (IEC International, 2010) suurjännitelaboratoriokoestuksista kirjoitettuun standardiin ja vertaan niitä siinä mainittuihin havaintoihin sekä ennustuksiin tapahtumista. Ensiksi käydään läpi teoriaa kaavojen muodossa, joilla voidaan päästä lähemmäs standardiarvoja tai normaaliolosuhteita. Kun tarkastellaan kaavoja, on hyvä tietää joitakin vakioarvoja kaavoista, jotka määrittelevät ns. normaaliolosuhteet:

Lämpötila $t_0 = 20 \text{ °C}$

Absoluuttinen ilmanpaine $p_0 = 1013 \text{ hPa (1013 mbar)}$

Absoluuttinen kosteus $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$

Nämä edellä mainitut arvot ovat siis standardin määrittelemät arvot testaukselle. Näihin arvoihin tulee vallitseva koestusolosuhteet muuttaa standardin (IEC International, 2010) avulla. Seuraavaksi

käydään läpi, kuinka standardin avulla voidaan muuttaa vallitseva olosuhde vastaamaan edellä mainittuja standardin olosuhteita.

5.3.1 Ilmakehän korjausarvo läpilyöntivälille

Ilmakehän korjausarvo on K_t -arvo. Sitä tarvitaan, jotta olosuhdekorjaus voidaan tehdä vastaamaan standardia. Kerroin koostuu kolmen muuttujan vaikutuksesta. Ne ovat samat mitkä on mainittu standardiolosuhdetta käsiteltäessä, t_0 -lämpötila, p_0 -absoluuttinen ilmanpaine ja h_0 -absoluuttinen kosteus. Korjaus voidaan tehdä kahteen suuntaan. Ensimmäinen tapa on korjata vallitsevat olosuhteet vastaamaan edellä mainittuja standardin olosuhteita. Tällöin käytettävä koestusjännite korjataan suhteessa K_t -arvoon ja se antaa korjatun jännitteen, jolla testi tulee suorittaa. Ilmavälin jännitelujuus on suoraan verrannollinen kertoimeen K_t ja suurenee siis ilman tiheyden ja kosteuden mukana (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen, & Palva, 2015). Seuraavaksi esitetään joukko kaavoja, jotka ovat standardista IEC 60060-1, 2010.

$$U_0 = \frac{U}{K_t} \quad (3)$$

Jos on jo testattu tietyllä jännitearvolla, tietyissä olosuhteissa, jotka eivät vastaa standardin olosuhteita, voidaan kaavalla laskea paljonko jännitekestoisuus olisi ollut standardiolosuhteissa. Kertomalla testausjännite olosuhdekertoimella, saadaan sama jännitearvo, kuin jos testi olisi tehty standardiolosuhteissa. Kaava on silloin seuraavanlainen:

$$U = U_0 K_t \quad (4)$$

Vaikka olosuhde arvoja oli kolme, muodostuu K_t -arvo kahdesta osasta. Lämpötila on ilman tiheyden korjauskertoimen laskennassa mukana. Toisin sanoen lämpötila yksistään ei ole muuttuja, vaan se muuttaa muuttuessaan myös kahta muuta arvoa. Siksi K_t jakautuu kahteen osaan seuraavasti:

$$K_t = k_1 \cdot k_2 \quad (5)$$

k_1 Ilman suhteellisen tiheyden korjauskerroin

k_2 Kosteuden korjauskerroin

K_1 -arvo korjaa ilman suhteellista tiheyttä. se voidaan yleisesti esittää muodossa:

$$k_1 = \delta^m \quad (6)$$

m on eksponentti, joka selviää taulukosta 3, joka on esitetty myöhemmin. Kreikkalainen symboli δ (delta) kuvaa suhteellista ilmantiheyttä. Kun ilman lämpötila on annettu celsiusasteina ja ilmakehänpaine p ja p_0 samassa yksikössä, voidaan suhteellinen ilmantiheys laskea seuraavalla kaavalla:

$$\delta = \frac{p \cdot 273 + t_0}{\rho_0 \cdot 273 + t} \quad (7)$$

p = standardi ilmanpaine (101,325 Pa)

ρ_0 = vallitseva ilmanpaine

t = standardi lämpötila (20 °C)

t_0 = vallitseva lämpötila (°C)

Tämä ilman suhteellisen ilmantiheden kaava on luotettava, jos sen arvo on $0,8 < k_l < 1,05$

5.3.2 Kosteuden korjaus, k_z -arvo

k_z -arvolla korjataan kosteuden määrän eroa standardi olosuhteisiin. Alla on esitetty kaava k_z -arvolle ja sen potenssin arvo saadaan taulukosta 3.

$$k_z = k^w \quad (8)$$

k -arvo riippuu kosteuden määrästä ja muokkaa jännitearvoa vastaamaan standardioloja. K -arvon määrittelee ilman kosteus h ja ilman tiheys δ . Näille muuttujille on tehty kaavat. Kaavat muuttavat k -arvoa, joka sitten vielä muutetaan myöhemmin selitettävillä kertoimilla. Syystä voidaan sanoa, että jos kaikki standardissa mainitut korjaukset tehdään jännitearvolle, ei se ole helppo tai yksinkertainen asia. Tosin, jos mietitään kuinka ilmassa olevat mikroskooppiset vesipisarot vaikuttavat ilman läpilyöntilujuuteen, ei sekään ole yksinkertainen ilmiö. Kosteuden määrä vaihtelee ilman tiheyden suhteessa. Lämpötila taas muuttaa ilman tiheyttä, mahdollistaen sen, että ilmassa voi olla vaihteleva määrä kosteutta, ennen kuin se tiivistyy. Seuraavaksi yhtälöt, joilla ratkaistaan yllä olevasta yhtälöstä jälkimmäinen k -arvo, joka sitten vielä alistuu w -potenssille. Sen lisäksi se pitää vielä laskea potenssiin kertoimella w , jolloin saadaan k_z -arvo. Kaikki seuraavat kaavat tuloksen normaaliolosuhteisiin saattamiseksi ovat standardista (60060-1 © IEC:2010).

$$\text{DC} \rightarrow k = 1 + 0,014 \left(\frac{h}{\delta - 11} \right) - 0,00022 \left(\frac{h}{\delta - 11} \right)^2 \quad (9)$$

$$\text{AC} \rightarrow k = 1 + 0,012 \left(\frac{h}{\delta - 11} \right) \quad (10)$$

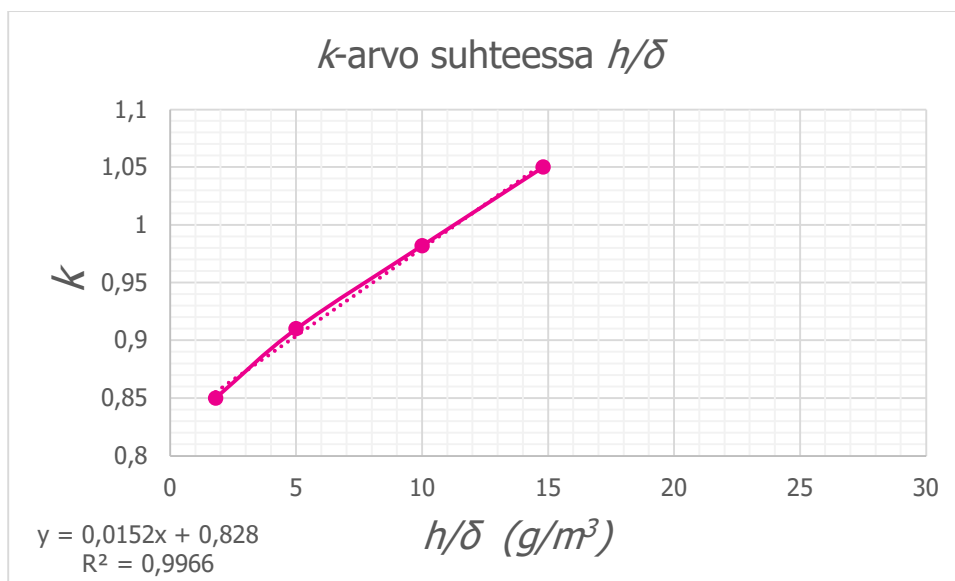
Nämä kaavat toimivat, kun kosteus on $1 \frac{g}{m^3} < \frac{h}{\delta} < 15 \frac{g}{m^3}$

Lisäksi vielä kaava impulssimaiselle jännitteelle:

$$\text{Impulssi} \rightarrow k = 1 + 0,010 \left(\frac{h}{\delta - 11} \right) \quad (11)$$

tällöin kosteuden tulee olla $1 \frac{g}{m^3} < \frac{h}{\delta} < 20 \frac{g}{m^3}$

Seuraavassa kuvaajassa on esitetty k -arvo tasajännitteellä. Tätä koestustapaa käytettiin myöhemmin esitettävissä kokeissa. Koska vaihtojännitteestä ja impulssista poiketen, tasajännitteessä on pieni neliöllinen vähennys, seuraa siitä hyvin loiva kaarevuus kertoimen käyrälle. Vaihtojännitteellä ja impulssilla tätä ei ole ja ne ovat siten lineaarisia. Myöhemmin tehdyissä koestuskokeissa ilmassa oleva kosteuden määrä ylitti tässä mainitun raja-arvon 15 g/m^3 :lle. Tuon kokeen tulosten perusteella voi sanoa, että jo tuossa maksimikosteuden määrässä alkaa kosteuden tiivistyminen pinnoille vedeksi. Tällöin puhutaan siis hyvin kosteista olosuhteista. Jos kuvailisimme tuota tilaa, niin henkilöllä alkaa olla tunne, että kosteus tunkeutuu ”luihin ja ytimiin” kylmässä ilmassa ja lämpimässä ilmassa iholle alkaa muodostua vesipisaroita, niin kostea on tuo 15 g/m^3 :n raja-arvo.



KUVA 18. k -arvo

5.3.3 k -arvon potenssit

Nyt olemme määritelleet k_2 -arvon k -osuuden kaavalla ja ilman kosteuden määrällä. Seuraavaksi määrittelemme k -n potenssin. k_2 arvo tulee kertoa n -potenssilla. Saadaksemme tämän täytyy tehdä muutama askel. Ensimmäiseksi on määriteltävä parametri (g). G -parametri ottaa huomioon läpilyöntietäisyyden ja kosteuden vaikutuksen U_{50} jännitteeseen verraten. Standardi käyttää kirjainyhdistelmää U_{50} , voidaan myös puhua U_{d50} arvosta, ne ovat sama asia. G -arvo lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$g = \frac{U_{50}}{500L\delta k} \quad (12)$$

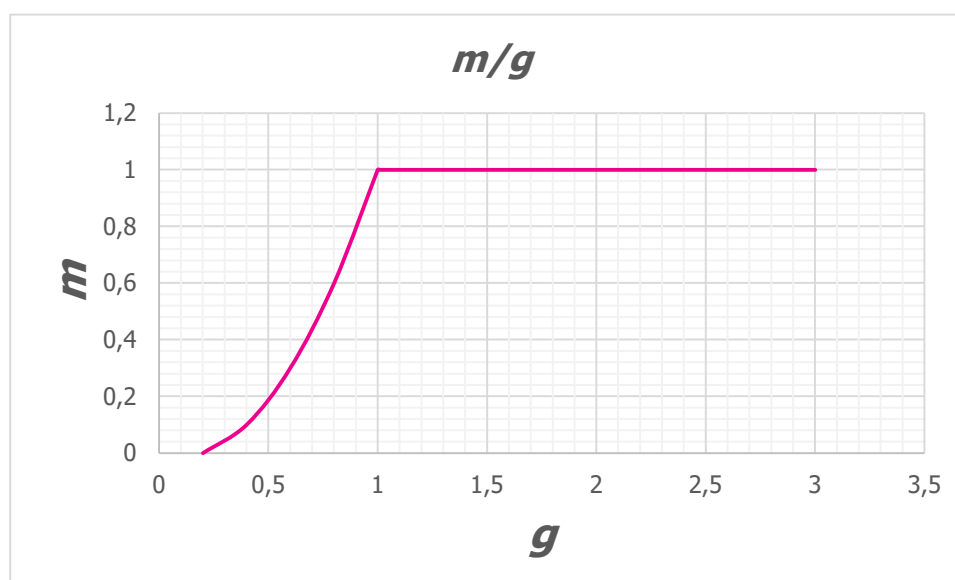
U_{50} = Up & Down menetelmällä laskettu 50 % mahdollisuus läpilyöntiin kyseisellä jännitteellä

L = Läpilyöntietäisyys

δ = Suhteellinen ilmankosteus

k = k -arvo suhteessa ilmanpaineeseen ja suhteelliseen kosteuteen

Kun g -arvo on laskettu, sijoitetaan se oheiseen taulukkoon saadaksemme eksponentti m -arvon. M -eksponentti on ilman tiheyden korjauskertoimen. Seuraavassa (Kuvassa 19.) on sille graafinen kuvaaja.



KUVA 19. m -arvo

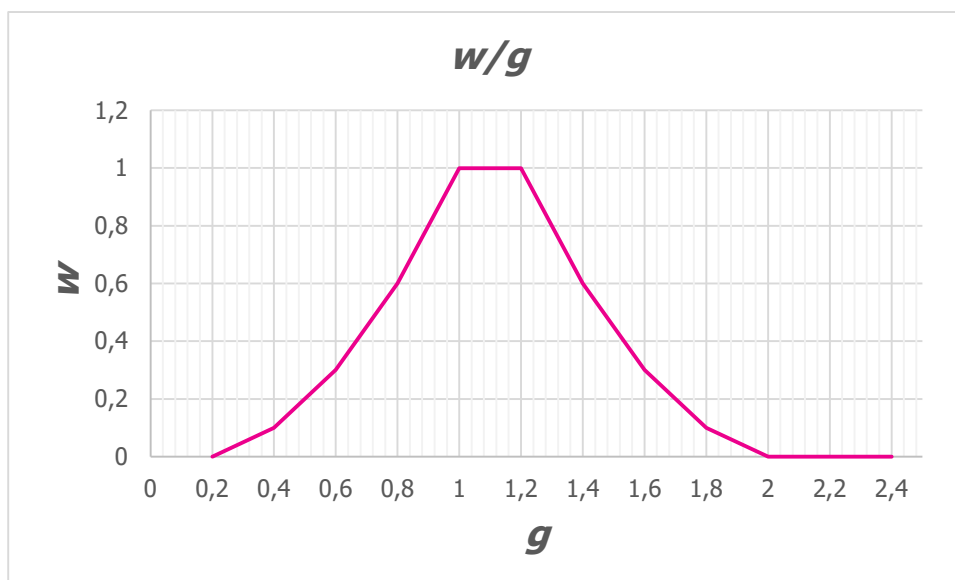
Oheisesta taulukosta 3 voi nähdä suhteet g :n ja m :n ja w :n välillä. Samalla se esittää oheisen graafisen kuvaajan (kuvasta 19) taulukkomuodossa.

TAULUKKO 3. g , m ja w kertoimet

g	m	w
<0,2	0	0
0,2 - 1,0	$g (g-0,2) / 0,8$	$g (g-0,2) / 0,8$
1,0 - 1,2	1,0	1,0
1,2 - 2,0	1,0	$(2,2-g) (2,0-g) / 0,8$
>2,0	1,0	0

Kuten graafisesta ja taulukkomuotoisesta esitystavasta voi nähdä, korjauskertoimet toimivat vain tietyllä olosuhteiden vaihteluvälillä.

Jäljellä on vielä yksi kerroin w . w -kerroin korjaa kosteuden aiheuttamaa poikkeamaa standardiolosuhteisiin verraten. Laskennallisesti saatu g -arvo on pohja, joka määrää w -arvon.



KUVA 20. w -kerroin

5.3.4 Kosteus

Standardin mukaan kosteus tulee mitata luotettavalla laitteella enintään 1 g/m^3 tarkkuudella. Standardi myös antaa mahdollisuuden laskea kosteuden ilman suhteellisesta kosteusarvosta, joka on esitetty prosentteina. Tätä kaavaa käytettäessä on edellytyksenä sama tarkkuus kuin edellä mainittu 1 g/m^3 .

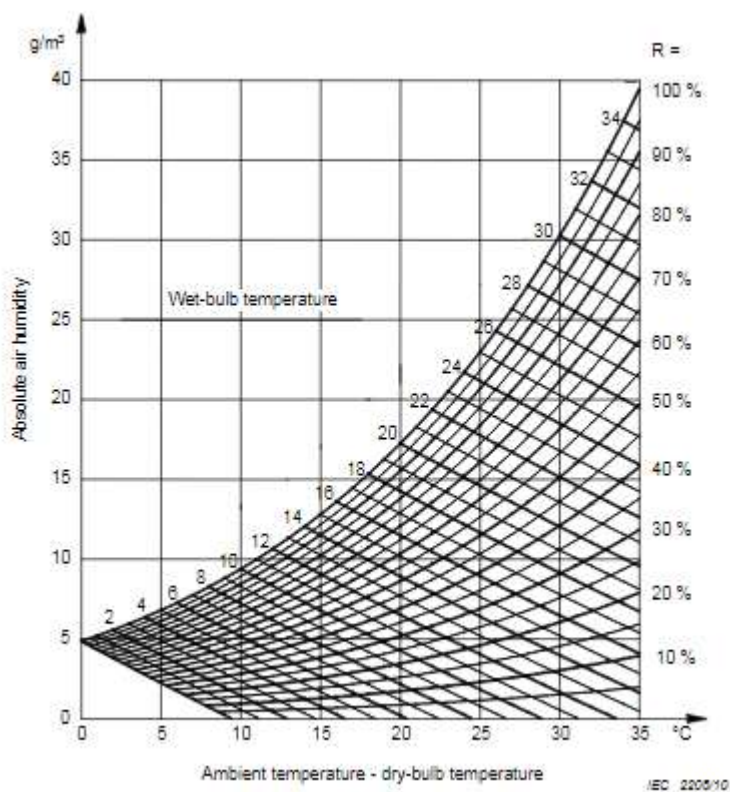
$$h = \frac{6,11 \cdot R \cdot e^{\left(\frac{17,5 \cdot t}{243 - t}\right)}}{0,4615 \cdot (273 + t)} \quad (13)$$

h = absoluuttinen kosteus g/m^3

R = suhteellinen kosteus %:na

t = vallitseva lämpötila $^{\circ}\text{C}$

Viimeisenä esitellään standardissa oleva kaavio, joka on ensinäkemältä hankala luettava, mutta joka aukeaa, kun on pyöritellyt näitä muuttujia jonkin aikaa. Kaaviossa suhteellisen kosteuden ja lämpötilan avulla saa helposti absoluuttisen kosteuden määrän. Toki taulukko toimii toisinkin, kunhan kaksi muuttujaa on tiedossa.



KUVA 21. Absoluuttinen kosteus, lämpötila ja suhteellinen kosteus (IEC International, 2010)

5.4 Kertaus

Jotta koestuksen tuloksiin voidaan suorittaa standardin (60060-1 IEC 2010) mukainen olosuhdekorjaus, tulee kerätä muutama välttämätön tieto koestustilanteessa. Seuraavaksi jäsennellään hiukan mitä kaikkea pitää ottaa huomioon.

1. Kerätään nämä tiedot talteen:

- Lämpötila. Huomioidaan se, että lämpötila muuttuu, kun kosteuden määrä vaihtuu
- Suhteellinen kosteus. Tämä tieto tarvitaan, jotta voidaan laskea tai katsoa käyrästä absoluuttinen kosteus
- Ilmanpaine. Vaikuttaa absoluuttisen kosteuden määrään ilmassa
- Koestusjännite. Mitattu arvo jännitteelle. Selitetty Up & Down menetelmässä

2. Selvitetään k -kerroin

K -kerroin jakaantuu kahteen osaan, ilmantiheyden muutokertoimeen k_1 ja kosteuden muutokertoimeen k_2 . On huomioitavaa, että laskettaessa k_1 ja k_2 :n arvoja on niissä vielä oma k -kerroin joka ei ole sama kuin k_1 ja k_2 .

$$k_t = k_1 \cdot k_2 \quad (14)$$

K_1 kerroin on ilmantiheyden kerroin, joka saadaan sijoittamalla arvot kaavaan 6. Tämä arvo sijoitetaan seuraaviin lausekkeisiin. Kun on laskettu δ -arvo, tulee se laskea potenssiin arvolla m

3. K_2 -arvoa määriteltessä pitää ensin laskea (kaavalla 7) absoluuttinen kosteus. Se sijoitetaan annettuun kaavaan, joka on eri koestustavasta riippuen (Tasajännite, Vaihtojännite, Impulssi). Tällöin on saatu k_2 -arvon k -osuus, joka pitää vielä laskea potenssiin w : llä.

W :tä määriteltessä seuraa seuraavaa listaa:

- Lasketaan arvo g
 - Katsotaan kuvan 19 käyrältä arvo m
 - Katsotaan kaaviosta 2 w tai laske se annetulla kaavalla g :n arvon avulla.
 - Vaihtoehtoisesti kuva 20 voi antaa w -arvon kun g on laskettu
4. Laske k_t ja kerro sillä jännitearvo, saadaksesi todellisen standardin mukaan korjatun jännitearvon, joka vastaa standardin mainitsema olosuhteita koestukselle.

Liitteessä 1 on malliesimerkki, miten nämä tiedot voisi kerätä laskentataulukko ohjelmaan. Perustietoja lukuun ottamatta muut tiedot ovat kaavan avulla saatuja tuloksia. Syötettäessä arvoja eri kerroksille, on hyvä ottaa huomioon, että ne ovat niin paljon ristiviitattuja, että tulokset ilmenevät kaikkiin kohtiin vasta kun viimeinenkin kertoimen kaava on syötetty taulukkoon. Tämä juuri tekee standardinmukaisen mallinnuksen haastavaksi.

5.5 Numeerinen esimerkki

Arvot ovat 18.5 tehdystä testistä, ensimmäisestä sarjasta (LIITE 1).

Lämpötila 22 °C

Suhteellinen kosteus 62 %

Ilmanpaine 994 hPa

Koestusjännite, Up & Down menetelmällä

$$U_{d50} = \frac{3 * 72 + 9 * 70 + 7 * 68 + 1 * 66}{20} = 69,4 \text{ kV}$$

Lasketaan suhteellinen ilmantiheys kaavalla 7.

$$\delta = \frac{101,325 \text{ Pa}}{94,4 \text{ Pa}} \cdot \frac{273 + 22^\circ \text{C}}{273 + 20^\circ \text{C}} = 1,08$$

Äsken saatu delta tulee laskea potenssiin kertoimella m .

Lasketaan potenssiin δ kertoimella m . Jotta saadaan m (taulukosta 3), tulee selvittää ensin g . Jotta voitaisiin laskea g , ensin tulee laskea h .

$$h = \frac{6,11 \cdot 62\% \cdot e^{\left(\frac{17,6 \cdot 22^\circ \text{C}}{243 + 22^\circ \text{C}}\right)}}{0,4615 \cdot (273 + 22^\circ \text{C})} = 12 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

Nyt voidaan laskea g , kunhan (Kuvasta 18) määritellään k -arvo kaavaan (12). 12g/m^3 lukemalla k :ksi tulee (kuvasta 18).

$$k = 0,0152 \cdot 12 + 0,828 = 1,0104$$

Nyt lasketaan δ^m , joka on k_1 -arvo.

$$k_1 = 1,08^{1,0104} = 1,08$$

On huomioitavaa, että ilmantiheyden korjauskertoimen arvon tuli olla välillä $0,8 < k_1 < 1,05$, ollakseen luotettava. Standardi ei ota kantaa mitä sitten pitäisi tehdä, jos arvo ei ole raja-arvojen sisällä. Se ei vain ole täysin luotettava. Tämä saatu vastaus on nyt luotettavan rajan ulkopuolella. Hiukan silti omituista, että näinkin lähellä normaaleja olosuhteita jo mennään epävarmalle alueelle. Jos jaetaan kaava (7) osiin ja mietitään, kumpi on herkempi tekemään virhettä, niin ilmanpaine, koska siinä suhde-ero on helpommin suuri. Sisätilojen lämpötila harvoin on hyvin kaukana 20 °C. Tästä voidaan päätellä, että paikassa, jossa tehdään hyvin tarkkoja mittauksia, myös ilmanpaine tulee olla kontrolloitu.

Sitten selvitetään k_2 . Kaavan $k_2 = k''$ jälkimmäisen k :n arvo lasketaan (kaava 9) seuraavasti:

$$k = 1 + 0,014 \left(\frac{12}{1,08 - 11} \right) - 0,00022 \left(\frac{12}{1,08 - 11} \right)^2 = 0,98$$

Potenssi w saadaan joko (KUVA 20) tai (Taulukko 3) ja se on molemmista katsottuna 1. Täten k_2 on 0,98.

Seuraavaksi lasketaan k_t -arvo kaavasta (5).

$$k_t = k_1 \cdot k_2 = 1,08 \cdot 0,98 = 1,0584$$

Nyt saadaan normaaliolosuhteisiin korjattu jännitearvo jakamalla U_{d50} -arvo k_t :llä.

$$U_0 = \frac{U_{d50}}{k_t} = \frac{69,4kV}{1,0584} = 65,6kV$$

Muutos on verrattain iso. Ero mittaustuloksen ja normaaliolosuhteisiin saatetun tuloksen välillä on 7,4%.

$$\frac{65,6kV}{69,4kV} \cdot 100\% = 94,5\%$$

6 KÄYTÄNNÖN TESTIT

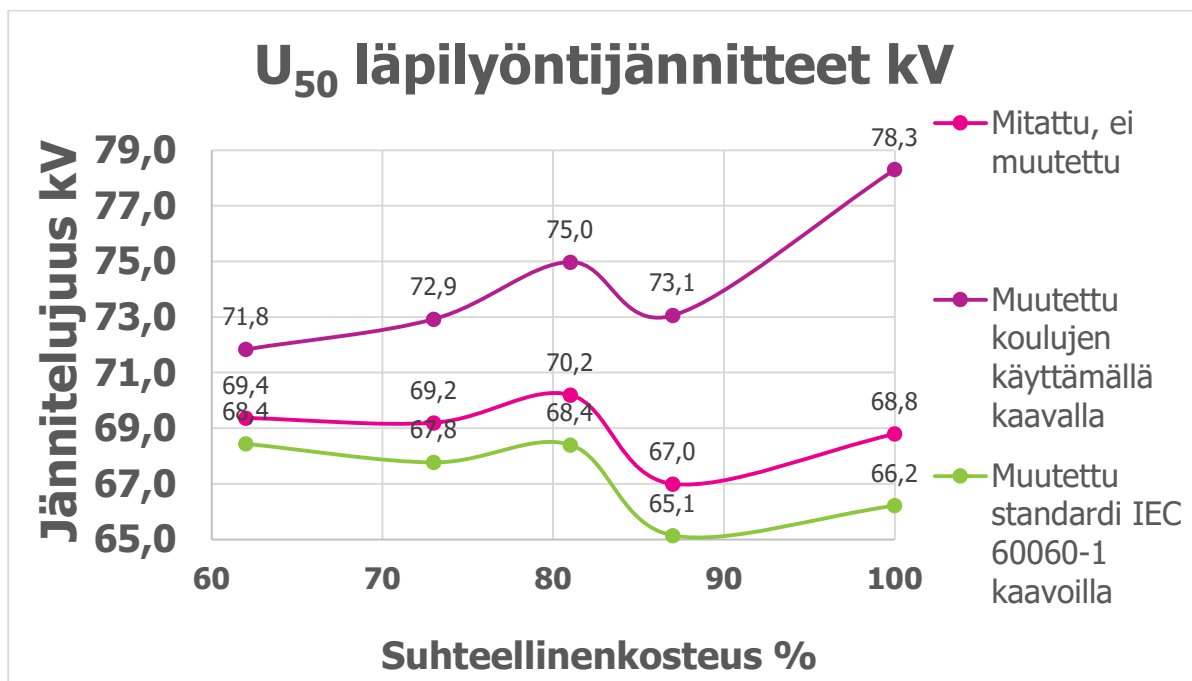
Opinnäytetyön isoin osa käsittää Savonian suurjännitekontissa tehdyt testit, joilla tutkittiin kosteuden vaikutusta suurjänniteläpilyöntiin eristeen yli. Näillä testeillä haluttiin mallintaa standardin (IEC International, 2010) lyhyesti mainitsemaa tapahtumaa, suhteellisen kosteuden noustessa lähelle 80 %. Testejä tehtiin kaksi kertaa. Koska kyseessä oli ensimmäinen kerta, kun kosteuden lisäämisen vaikutuksia läpilyöntiin testattiin Savoniassa, on luonnollista, että testien toteutus kehittyi sitä mukaan, kun saatiin kokemusta järjestelyjen ja laitteiston suhteen. Ensimmäisellä kerralla haettiin kosteuden määrää ilmassa, jossa läpilyönti muuttuisi merkittävästi. Työn alussa mainittu maallikon tunteen sähkönjohtavuuden parantumisesta ja läpilyönnin helpottumisesta kosteuden lisääntyessä voi todeta vääräksi, kun suhteellinen kosteus lähenee 80 %. Standardi (IEC International, 2010) mainitsee, että kosteuden noustua riittävästi, läpilyöntilujuus kasvaa, kunnes lähestyttäessä 100 % suhteellista kosteutta, läpilyöntilujuus tulee arvaamattomaksi. Tätä ilmiötä haluttiin tutkia testeillä ja samalla tutkia muunnoskaavoja, joilla standardiolosuhteista poikkeavat olosuhteet voitaisiin huomioida ja neutralisoida.

6.1 Järjestelyt

Työtä lähdettiin toteuttamaan järjestämällä kolme ilman kostutinta. Laboratorion oma ilmanvaihto kytkettiin pois päältä ja ulkoa tulevat häiriötekijät pyrittiin minimoimaan. Ensimmäisessä yrityksessä otettiin 20 läpilyönnin sarja jännitepulsseja niin, että jännite oli vakio ja kipinävälin avulla se johdettiin keraamisen eristimen päälle niin, että läpilyöntiraja on hyvin lähellä syötettävää jännitettä. Päätettiin, että kipinävälistä annetaan vain yksi pulssi eristimelle, jotta vältettäisiin se, että jälkimmäinen piiri laitteistossa varaisi edes jollain tasolla jännitettä ja siten häiritsisi läpilyönnin luotettavuutta. Kun kipinävälistä oli syötetty läpi jännite, odotettiin 30 sekuntia ennen seuraavaa jänniteportaan kipinäimpulssia, jotta mahdollinen varaus piirissä olisi kerennyt purkautua. Näistä läpilyönneistä ja niistä kerroista, kun läpilyöntiä ei tapahtunut muodostettiin taulukko, jonka avulla laskettiin U_{50} -arvo. Seuraavaksi esitän yhden sarjan, joka on tehty tietylle kosteusarvolle. Laboratoriotilasta mitattiin ilman suhteellinen kosteus, joka sitten kaavan avulla muutettiin absoluuttiseksi kosteudeksi. Luvussa 5 esitettyjen kaavojen avulla suoritettiin sitten muunnos, jolla saatiin jännite vastaamaan normaaliolosuhteiden arvoja.

6.2 Tulokset

Kokeita tehtiin kahtena päivänä. 18.5.2021 ja 25.5.2021. 18.5 tehdyt kokeet onnistuivat hyvin. 25.5.2021 tehdyssä kokeessa tapahtui jonkinlainen virhe ja siksi niitä tuloksia ei nyt käsitellä. Kokeessa tehdyt laskelmat osoittavat hyvin, kuinka kosteuden lisääminen yllättäen lisääkin läpilyöntilujuutta kosteuden ollessa noin 80 % suhteellista kosteutta tai noin 15 g/m^3 absoluuttista kosteutta. Sen jälkeen läpilyöntilujuus laski ja teorian mukaan sen pitäisi olla arvaamaton, kun lähestytään 100 % suhteellista kosteutta. Nämä kaikki ilmiöt ovat havaittavissa tehdyssä koesarjassa.



KUVA 22. Testi kosteuden vaikutuksesta läpilyöntilujuuteen

6.3 Tulosten analysointi

Kirja "Suurjännitetekniikka" (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen, & Palva, 2015) kertoo, että normaaliolosuhteissa läpilyöntilujuus on 3,1 kV/mm jokaista 10 mm etäisyyttä kohden. Laitteiston läpilyöntipituus on noin 0,2 m eli sen läpilyöntilujuus ilman kautta tulisi olla 62 kV, yhtälön mukaan. Testeissä se on ollut 68–69 kV luokkaa, riippuen käytettävästä korjauskertoimesta. Tämä arvo on hyvin lähellä kirjassa mainittua arvoa. Etäisyys on vaikea arvioida hyvin tarkkaan, joten sekin voi hyvin selittää pienen heiton läpilyöntijännitteessä. Ilmiö itsessään tunnetaan niin hyvin, että matemaattinen yhtälö jännitekestoisuudesta mm:ä kohden toimii, kun ollaan normaaliolosuhteiden alaisissa olosuhdearvoissa.

Testin käyrästä näyttää hyvin paljon siltä mitä standardi kuvaa tapahtuvaksi kosteuden lisääntyessä. Suhteellisen kosteuden lähestyessä 80 %:a läpilyöntijännite kasvaa (IEC International, 2010). Tämä johtuu hiukan positiivisten vesimolekyylien ominaisuudesta sitoa vapaita elektroneja ja siten estää ketjureaktio, joka johtaisi valokaaren muodostumiseen. Kun kosteus menee yli 80 %, alkaa ennalta arvaamaton alue jännitekestoisuuden osalta. Testi kuitenkin osoitti, että läpilyöntilujuus saisi hieman nousevan mallin lähestyessä 100 % suhteellista kosteutta. Tämä on myös standardin ajatus, joskaan ei matemaattinen totuus. Savoniassa ei ole käytössä suoraan standardin mukaisia korjauskerrointen käyttämiä, vaan hiukan yksinkertaistettu malli, joka ottaa huomioon kosteuden ja höyrynpaineen kautta laskettavan kertoimen jännitteelle. Testissä on hyvin nähtävissä, kuinka lähellä toisiinsa ovat koulujen yleisesti käyttämä mallinnus ja standardin (IEC International, 2010) mallinnus. Ero näiden kahden mallinnuksen välillä kasvaa suurella määrällä kosteutta, kun tarkastellaan testin

arvoja. Näin tulisi luonnollisesti ollakin, koska mallinnukset eivät ole suunniteltu yli 80 % suhteellisten kosteuksien mallintamiseen luotettavasti.

7 SUURJÄNNITEKONTIN TILAJÄRJESTELYT

7.1 Lähtötilanne

Suurjännitekontti oli juuri saatu asennettua paikalleen ja ensimmäisen lukukauden testit oli suoritettu siellä. Savonian muuttaessa uuteen kampukseen oli ykkösprioriteetti saada laitteet nopeasti käyttövalmiiksi ja siksi tilankäytön suunnitteluun ei ollut mahdollista uhrata liikaa resursseja. Keskitimme miettimään miten kontin tilan saisi paremmin hyödynnettyä ja järjestettyä uutta tilaa tuleville koestuslaitteistoille. Seuraavaksi kuva lähtötilanteesta:

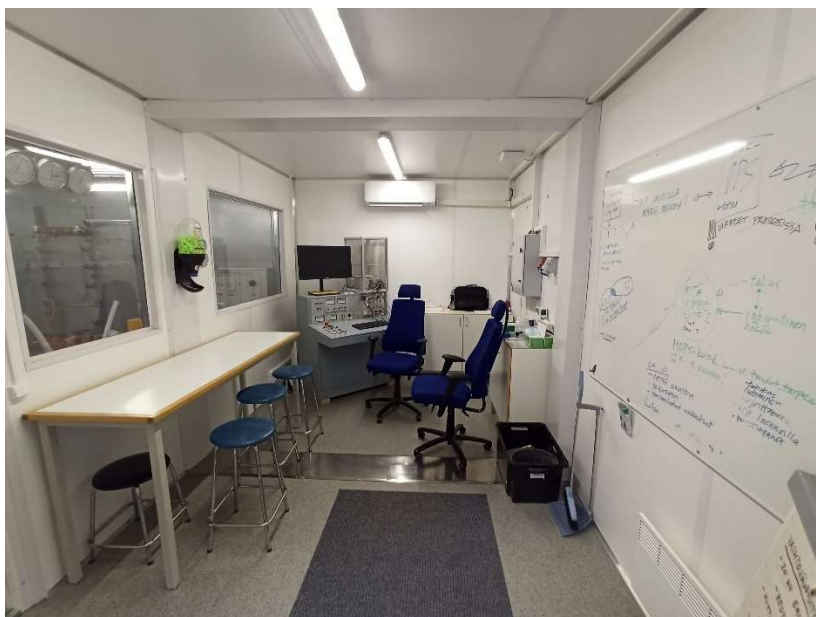


KUVA 23. Kuva ennen muutoksia

ja seuraavaksi kuvat uudelleenjärjestelyiden jälkeen:



KUVA 24. Kuva muutosten jälkeen



KUVA 25. Valvomo muutosten jälkeen

Tilaan rakennettiin kaksi uutta testauspöytä. Yhden salaman syöksyjännitetestaukseen ja toisen suojamaadoitetun sähkönsyöttöpöydän kaikenlaista koestusta varten. Keskelle jäi reilusti tilaa uusille laitteille, sekä oppilasryhmää varten. Toimistossa siirrettiin ohjausmoduuli nurkkaan. Nyt isompikin ryhmä voi seurata asetusten säätämistä ja mittareiden reagointia. Lisättiin oppilaille pöytä muistiinpanojen tekemistä varten sekä tussitaulu opettajalle. Molempiin huoneisiin tuli reilusti tilantuntua ja vapaata tilaa.

8 YHTEENVETO

Kokonaisuutena tämä opinnäytetyö on ollut hyvin laaja. Kaikkia uudistuksia ja parannuksia ei ole tähän työhön kirjattu, koska jo nyt asioita oli monta. Tavoite oli parantaa testausympäristöä ja saada sinne lisää toimintoja. Toinen tavoite oli ymmärtää suurjännitestauksen standardin mukaista normaaliolosuhteisiin palauttavaa mallinnusta ja sitä mitä tapahtuu kosteuden noustessa 80 % ja sen yli.

Kontin tilat muuttuivat paljon käytännöllisemmiksi. Tilojen soveltuvuus opetuskäyttöön myös parani huomattavasti. Oppilasryhmille tuli enemmän tilaa ja tussitaulu auttaa visualisoinnissa. Ukkossuojia voi nyt testata omassa penkissä, jossa laitteet pysyvät järjestyksessä. Koestuslaitteiden osat voi nostella seinälle ja rullakko ei vie enää tilaa lattialta.

EMC häiriöiden estämiseksi tehtiin paljon parannuksia ja häiriöitä lievennettiin. Mittaustulokset osoittavat, että ne keskimäärin puolittuivat. Harmillista on, että häiriö on niin suuri edelleen, että valvomon tietokoneen näyttö menettää signaalin ajoittain. Jos häiriöitä haluttaisiin vielä vähentää, tulisi mittausantureiden kaapelit muuttaa optisiksi ja virransyöttö olla erikseen koestuslaitteelle ja valvomon päätteelle. Myös väliseinä on riittämätön suojaukseen. Siinä on kohtia, jotka eivät ole tiiviitä ja ne vaatisivat huolellisia tilkitsemistä. Säteily tulee läpi pienimmistäkin rei'istä ja niitä metallisen seinän liitoksissa riittää. Lisäksi tilan koko on hankaloittava tekijä. Suuressa tilassa säteily leviäisi isomalle alueelle kulkiessaan kohti valvomoa. Kontin metalliseinät kimmottavat säteitä niin kauan, että ne vaimenevat ja menettävät energiansa.

Opinnäytetyön suurin osa-alue käsitteli kosteuden vaikutusta jännitekestoisuuteen. Tässä saatiin aikaiseksi yksi hyvä testisarja, joka mallintaa hyvin sen, mikä on kirjoitettu suurjännitekoestusten standardiin IEC 60060-1, 2010. Jännitekestoisuus nousee, kun lähestytään 80 % suhteellista ilman kosteutta. Tuolloin ilmassa on vettä noin 15-18 g/m³. Vesimolekyylejä on niin paljon, että niiden heikko positiivinen varaus vetää puoleensa elektrodista vapautuvia elektroneja. Tällöin ketjureaktiota, jossa elektroni törmää seuraavaan kaasuatomiin ja sinkauttaa siitä yhden elektronin vapaaksi ei tapahdu. Purkauksen on todettu olevan pallomainen etsiessään positiivisesti varautunutta kohdetta. Kun se saavuttaa sen, syntyy valokaari, jonka sisällä on plasmatila, jossa elektronit liikkuvat kohti positiivista päätä ja kaasuatomit kohti negatiivisesti varautunutta elektrodia. Ilmiö jatkuu, kunnes tasapaino varauksissa on syntynyt. Tätä kutsutaan valokaareksi.

Kaasuatomeja on useita ja yksi niistä on happi. Se myös reagoi vapauttaen yhden elektronin ja hajo-ten kahdeksi osaksi. Sen jälkeen happi ja toinen hajo- osasta muodostaa otsonimolekyylin. Otsooni hajoaa takaisin oman puoliintumisajan kuluttua. Tässä opinnäytetyössä otettiin kantaa tasajännitekokeen jälkeiseen otsonin määrään ja todettiin sen olevan niin pieni, että se ei aiheuta vaaraa, mutta lieviä oireita jollekin voisi tulla, jos hän menee koestustilaan heti koesarjan jälkeen. Tilanne olisi pahempi, jos koestus tehtäisiin vaihtojännitettä käyttäen.

Jos verrataan Savoniassa yleisesti käytettyä mallinnusta normaaliolosuhteisiin palauttamiseksi ja IEC 60060-1 standardia, voitaisiin sanoa, että merkittävää eroa mallinnusten tuloksissa ei ole. Yleisesti käytetty malli tarkastelee ilmassa olevaa kosteutta suhteessa höyrynosapaineeseen ja lämpötilaan.

Ilmanpaineen avulla lasketaan absoluuttisen kosteus. Sen jälkeen k -arvo katsotaan kaaviosta ja tällä lasketaan normaaliolosuhteita kuvaava jännite. Menetelmä on huomattavasti yksinkertaisempi kuin standardin menetelmä, joka on kuvailtu luvussa 5. Standardin mallinnus sisältää monia kertoimia ja ensikertaa katsottaessa näyttää, että ne eivät olisi edes järjestyksessä käsiteltävissä. Molemmissa mallinuksissa pitää katsoa taulukoita. Standardin kanssa ne ovat monimutkaisia ja vaativat suurta tarkkuutta. Yleisesti voi sanoa, että ei ole mitään syytä käyttää opetuksessa standardin vaikeampaa tulkintaa normaaliolosuhteisiin palauttamiseksi, vaan riittää hyvin yleinen mallinnus.

Tämän opinnäytetyön aikana ilmeni mielenkiintoisia uusia tutkimuskohteita seuraaville opiskelijoille. Kokeen voisi toistaa käyttäen vaihtojännitteeseen perustuvaa purkausmallia. Sen jälkeistä otsonia voisi myös tarkastella vaarallisuuden kannalta. EMC-häiriöiden tutkintaa voisi jatkaa. Erityisesti olisi hyvä suorittaa mittauksia oskilloskoopilla johtimien kautta tulevista häiriöistä. Mittauksia voisi myös tehdä nyt verraten tuloksia laboratorion puolella ja valvomossa. Tässä työssä kehiteltiin siihen soveltuvaa mekaanista antennia. Sen voisi korvata tarkemmalla ja paremmalla mallilla. Oskilloskoopilla olisi hyvä selvittää tarkemmin, millä taajuudella häiriöt ilmenevät. Ja jos päädytään hankkimaan uusi muuntaja, voisi kehitellä sille uusia koestusjärjestelyjä ja harjoituksia.

LÄHTEET

- Academy of EMC. (2018-2022). *EMC Standards*. Haettu 1. 2. 2022 osoitteesta Academy of EMC:
<https://www.academyofemc.com/emc-standards>
- Aro, M.;Elovaara, J.;Karttunen, M.;Nousiainen, K.;& Palva, V. (2015). *Suurjännitekniikka*. Helsinki: Otatieto.
- IEC International. (2010). *60060-1 2010*. Geneve: IEC.
- instruments, G. (23. 2. 2022). *Gamry Instruments*. Noudettu osoitteesta Faraday Cage: What Is It? How Does It Work?: <https://www.gamry.com/application-notes/instrumentation/faraday-cage/>
- Kanth, R. (6. 5. 2021). Muuntajan hankinta Intiasta. *Sähköpostikeskustelu*. (S. Hirvonen, Haastattelija)
- Kanth, R. (2021). *Tarjous muuntajasta*. Kuopio: email conversation 6.5.2001.
- OY, I. S. (23. 2. 2022). *IO Signal Oy*. Noudettu osoitteesta Rigol RSA3030E-TG Reaaliaikainen Spektrianalysaattori 3,0GHz: https://iosignal.fi/shop/spectrum_analyzers/rigol_spectrum_analyzers/rigol-rsa3000e/rigol-rsa3030e-tg-reaaliaikainen-spektrianalysaattori-3ghz/?gclid=EAIaIQobChMIbnfGgoyR9gIV1ZrVCh2kewDLEAYYAIBEGKarvD_BwE
- Ozonetech. (19. 2. 2022). *ozonetech*. Noudettu osoitteesta Tietoa otsonista: <https://www.ozonetech.com/fi/tietoa-otsonista/>
- Partanen, J. (2021). *Suurjännitetekniikka*. Lappeenranta: J. Partanen.
- Researchgate. (1. nov 2018). *researchgate*. Noudettu osoitteesta Schematic-illustration-of-spectrum-of-electromagnetic-field-in-our-environment_fig1_329220048:
https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustration-of-spectrum-of-electromagnetic-field-in-our-environment_fig1_329220048
- STUK. (22. 1. 2018). *STUK*. Noudettu osoitteesta documents:
https://www.stuk.fi/documents/12547/103352/STMa-ionisoimattoman_sateilyn_vaestolle_aiheuttaman_altistuksen_rajoittamisesta_luonnos-22_1_2018.pdf/f3e173a4-e697-aab7-413e-5e92a95767d1

LIITTEET

1. 18.5.2022 tehty koestuslaskentataulukko

LIITE 1. 18.5.2021 Tehty Koestuslaskentataulukko

testi gym. ilmankalpa säätiloissa ilmoitettu standardi ilmankalpa
(18.5.2021) 994,0 hPa 1004 hPa 1012 hPa

testi	1	2	3	4	5
KV x/a	76 76 74 72 70 68 66	76 76 74 72 70 68 66	76 76 74 72 70 68 66	76 76 74 72 70 68 66	76 76 74 72 70 68 66
YHT	lämpötila 22,0 °C kosteus 62 % 1 vesihöyrynp. 1,623800181 kPa 2 ilmankalpa 994 hPa 3 abs kosteus 11,90992973 g/m ³ 4 k-arvo 0,993007993 5 p-arvo 0,972792001 10 todellinen mitattu 71,84116216 kV	lämpötila 21,5 °C kosteus 72 % 1 vesihöyrynp. 1,850078776 kPa 2 ilmankalpa 994 hPa 3 abs kosteus 12,90999316 g/m ³ 4 k-arvo 0,972749929 5 p-arvo 0,975136933 10 todellinen mitattu 71,92996493 kV	lämpötila 21,2 °C kosteus 82 % 1 vesihöyrynp. 2,012186775 kPa 2 ilmankalpa 994 hPa 3 abs kosteus 14,91738276 g/m ³ 4 k-arvo 0,998891949 5 p-arvo 0,978430999 10 todellinen mitattu 71,97730661 kV	lämpötila 21,7 °C kosteus 87 % 1 vesihöyrynp. 2,182197114 kPa 2 ilmankalpa 994 hPa 3 abs kosteus 16,1089937 g/m ³ 4 k-arvo 0,960713023 5 p-arvo 0,971171667 10 todellinen mitattu 72,08910789 kV	lämpötila 21,4 °C kosteus 100 % 1 vesihöyrynp. 2,682817712 kPa 2 ilmankalpa 994 hPa 3 abs kosteus 19,99176115 g/m ³ 4 k-arvo 0,992999733 5 p-arvo 0,973191655 10 todellinen mitattu 72,11368023 kV
δ	1,029071	1,021993	1,023399	1,023028	1,027462
h	11,99501	12,73109	14,99109	16,51967	15,79491
k	1,009999	1,021992	1,017911	1,009112	1,007701
g	0,999999	0,991399	0,991703	0,91209	0,998919
m	0,999971	0,971768	0,973119	0,919979	0,910923
w	0,999971	0,971768	0,973119	0,919979	0,910923
U ₅₀	69,161	67,779	69,101	69,103	69,101
k ₁	1,0103	1,009	1,0096	1,0079	1,0084
k ₂	1,0028	1,0119	1,0179	1,0029	1,0201
k ₃	1,014	1,021	1,0163	1,0185	1,0289
U ₀	69,161	67,779	69,101	69,103	69,101

