



Säävarma ja älykäs jakeluverkko

Atte Saarni

OPINNÄYTETYÖ

Tammikuu 2024

ÄLYKKÄÄN UUSIUTUVAN

SÄHKÖENERGIATUOTANNON YLEMPI TUTKINTO-OHJELMA

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Älykkään uusiutuvan sähköenergiantuotannon ylempi AMK

SAARNI ATTE
Säävarma ja älykäs jakeluverkko

Tutkielma 75 sivua, joista liitteitä 5 sivua
Tammikuu 2024

Tutkielmassa kuvataan Suomessa meneillään olevaa sähköenergian siirto- ja jakeluverkon modernisointia, sekä sähköverkkojen roolia osana yhteiskunnan kriittistä infrastruktuuria. Tutkimushankkeessa kehitettiin ratkaisuja ja menetelmiä sähköverkkojen suojaamiseksi ilmastonmuutoksen ja konfliktien kestäväksi. Tutkielmassa esitellään myrskyvarman ja älykkään maanalaisen jakeluverkon rakennustapa. Tutkielmassa esitellään ”Säävarma ja älykäs jakeluverkko” tutkimushankkeen olosuhdemittausten tuloksia. Hanke toteutettiin Tampereen aikuiskoulutuskeskuksen Sähkökenttä -oppimisympäristössä. Lisäksi esitellään Tampereen yliopiston suurjännitelaboratoriossa suoritettuja sähköteknisiä mittauksia.

Tutkielmassa esitetään havaintoja ja mittaustietoa maanalaisesta älyverkkoinfrastruktuurista rakentamisen ja koekäytön aikana. Konseptin ratkaisuja testattiin kentällä sähköasemaympäristössä vuoden ajan. Sähköisiä mittauksia suoritettiin suurjännitelaboratoriossa laitteiden turvallisen käytön rajojen varmistamiseksi ja takaamiseksi. Lisäksi kerättiin mittaustietoa jatkokehityksen tueksi.

Kenttä- ja laboratoriomittausten tulokset on esitetty ja analysoitu tutkielmassa, sekä niitä on verrattu soveltuvin osin suomalaisen jakeluverkkoyhtiön toteuttamiin mittauksiin verkossaan. Mittausten perusteella maanalainen jakeluverkkoinfra tarjoaa suotuisat olosuhteet kriittiselle infralle. Tulosten perusteella maanalainen älyverkkoinfra voi olla pitkäikäisempää, energiatehokkaampaa sekä vähemmän vikaantuvaa verrattuna nykyisiin maanpäällisiin ratkaisuihin.

Tutkielmassa esitetään nykyisen maanpäällisen jakeluverkkoinfran rakennustapa, sekä maanalaisen rakennustavan menetelmiä. Lisäksi esitetään arvioita maanalaisen sähköverkon rakentamisen kustannuksista verrattuna nykyiseen rakennustapaan. Alustavat arviot osoittavat, että maanalainen rakennustapa voi olla jakeluverkonhaltijalle huomattavasti kustannustehokkaampi tapa rakentaa ja kunnossapitää jakeluverkkoa verrattuna nykyiseen maanpäälliseen rakennustapaan.

Tutkielman johtopäätös on, että maanalainen rakentaminen voi turvata yhteiskunnan kriittistä infraa nykyisiä ratkaisuja paremmin, sekä tarjota suuria hyötyjä jakeluverkon haltijalle ja asiakkaille. Tutkielmassa käsitellään aiheita maanalaisen rakennustavan tutkimisen jatkamiseksi, sekä tuotekehityksen mahdollisia tulevia painopisteitä.

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences

SAARNI ATTE

Weatherproof and smart distribution grid

Master's thesis 75 pages, appendices 5 pages

January 2024

The thesis describes the ongoing modernization of the electricity transmission and distribution network in Finland, as well as the role of electrical energy grids as part of societies critical infrastructure. The research developed solutions and methods to make electricity grids more resilient to climate change and conflicts, and it presents the construction method of a storm-proof and intelligent underground distribution grid. It presents the results of environmental condition measurements conducted in the "Weatherproof and Intelligent Distribution grid" research project carried out in the Tampere Adult Education Centre's Electrical Field learning environment. Additionally, it introduces electrical measurements performed at Tampere University's high-voltage laboratory.

The thesis provides observations and measurement data on underground smart grid infrastructure during construction and field testing. Concept solutions were field tested in a substation environment for a year. Furthermore, underground infrastructure performance was tested in the high-voltage laboratory to ensure safe operating limits, and measurement data was collected to support further development.

The results of field and laboratory measurements are presented and analysed in the thesis, and they are also compared, where applicable, with measurements conducted by a Finnish distribution system operator on their network. Based on the measurements, underground distribution grid infrastructure offers favourable conditions for critical infrastructure. The results suggest that underground smart grid infrastructure may be more durable, energy-efficient, and less prone to faults compared to current above-ground solutions.

The thesis presents the current above-ground distribution grid construction method and methods for underground construction. Additionally, cost and energy efficiency assessments of underground infrastructure construction are presented, comparing them to the current construction method. Preliminary assessments indicate that underground construction may be a significantly cost-effective way for a distribution system operator to build and maintain the distribution grid compared to the current above-ground construction method.

The conclusion of the thesis is that underground construction can better safeguard societies critical infrastructure and offer significant benefits to the distribution system operator and customers compared to current solutions. The thesis addresses topics for further research into underground construction methods and potential future areas of product development.

SISÄLLYS

1	SUOMEN SÄHKÖENERGIAJÄRJESTELMÄ	8
1.1	Sähköverkot osana kriittistä infrastruktuuriamme	8
1.2	Kantaverkon modernisointi	9
1.3	Jakeluverkon modernisointi	10
2	SÄÄVARMA JA ÄLYKÄS JAKELUVERKKO TUTKIMUSPROJEKTI	13
2.1	Säävarma laitesuoja	13
2.1.1	Kompensointireaktori	16
2.1.2	Jakelumuuntaja 50 kVA	17
2.2	Säävarma mittaussuoja	18
2.3	Älykkään ja säävarman jakeluverkon rakennus	20
3	SÄÄVARMA JA ÄLYKÄS JAKELUVERKKOINFA TUTKIMUSMIT- TAUKSET	23
3.1	Kompensointireaktorin tehdastestit	25
3.2	Kenttämittaukset	26
3.3	Rakentamisen aikaiset mittaukset	29
3.4	Koekäyttömittaukset asennustapa A	31
3.4.1	Kuumin mittausjakso	34
3.4.2	Kostein mittausjakso	35
3.5	Koekäyttömittaukset asennustapa B	36
3.5.1	Kuumin mittausjakso	39
3.5.2	Kostein mittausjakso	40
3.6	Koekäyttömittaukset asennustapa C	41
3.6.1	Kuumin mittausjakso	45
3.6.2	Kostein mittausjakso	46
3.7	Koekäyttömittausten yhteenveto	46
3.8	Jakelumuuntajan suurjännitelaboratoriotestit	48
3.8	Maanalaisen laitesuojan suurjännitelaboratoriotestit	51
3.8.1	Laitesuojan lämpenemä vapaasti jäähtyvänä	52
3.8.2	Lämpötilan vaikutus energiatehokkuuteen	53
3.9	Suurjännitelaboratoriomittausten yhteenveto	56
3.10	Tutkimusmittausten yhteenveto	57
3.10.1	Laitesuojan lämpötilan hallinta	57
3.10.2	Laitesuojan kosteuden hallinta	59
3.11	Tutkimusmittausten vertailu	60
4	RAKENNUSTAPA JA KUSTANNUSVERTAILU	61

4.1	Nykyinen rakennustapa.....	61
4.2	Maanalainen rakennustapa.....	61
4.3	Rakennustavan vertailu.....	62
4.4	Kustannusten vertailu.....	63
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	64
6	JATKOTUTKIMUS SEKÄ TUOTEKEHITYS	66
6.1	Jakeluverkot.....	66
6.2	Droonijärjestelmät	66
	LÄHTEET	67
	LIITTEET	70
	Liite 1. Kompensointireaktori tehdastestiraportti, 2022	70
	Liite 2. 50 KVA muuntaja tehdastestiraportti, 2022	70
	Liite 3. 50 KVA muuntaja lämpenemätestiraportti, 2022	70

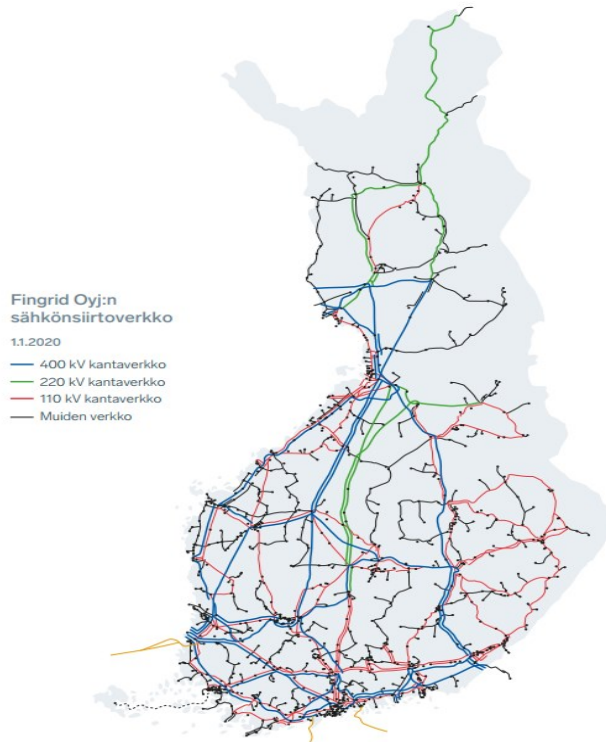
1 SUOMEN SÄHKÖENERGIAJÄRJESTELMÄ

1.1 Sähköverkot osana kriittistä infrastruktuuriamme

Kriittinen infrastruktuuri tarkoittaa yhteiskunnan turvallisuuden ja toimintakyvyn mahdollistavien rakennelmien ja järjestelmien kokonaisuutta. Kriittinen infrastruktuuri pyrkii tarjoamaan esimerkiksi vedenjakelun, viestijärjestelmät, energianjakelun, liikenneverkoston, sekä jätehuollon yhteiskunnalle. Kriittinen infrastruktuuri voi olla myös yhteiskuntien välistä, kuten maiden väliset energia- ja logistiikkaväylät. Kriittisen infran suojaamista nimitetään termillä CIP, critical infrastructure protection. Suojaamisella pyritään mahdollistamaan kriittisen infrastruktuurin toiminta kaikissa olosuhteissa. (Huoltovarmuuskeskus)

Sähköenergian tuotanto ja jakelu ovat erittäin tärkeä osa kriittistä infrastruktuuriamme ja isossa roolissa yhteiskunnan turvallisessa ja toimivassa arjessa, sekä ilmaston muutoksen torjumisessa. Suomen sähköenergiajärjestelmän kehitys alkoi 1900-luvun alussa, se on kasvanut kylien ja kaupunkien sisäisistä siirtojärjestelmistä koko valtakunnan kattavaksi sähköenergian jakeluverkoksi. Nykyinen sähköverkko voidaan jakaa jännitetasojen perusteella suuri-, keski- ja pienjännitteiseen verkkoon, sekä käyttötarkoituksen perusteella kanta- ja jakeluverkoksi.

Suurikapasiteettiset voimalaitoksemme, kuten ydin- ja vesivoimalat liittyvät suurjännitteiseen kantaverkkoon, kuten myös suuret kuluttajat, esimerkiksi öljy- ja terästeollisuus. Suomessa vuosittain siirrettävästä energiasta yli 75 % siirtyy kantaverkon kautta loppukuluttajalle. Kantaverkkoyhtiö Fingrid siirtää energiaa isoille kuluttajille valtakunnallisesti. Kaupunkien ja alueellisen sähköenergianjakelun tarjoavat Suomessa jakeluverkkoyhtiöt, joiden keski- ja pienjänniteverkkoon suurin osa henkilöasiakkaista on liittynyt. Näiden lisäksi Suomessa operoi verkonhaltijoita esimerkiksi suurien tehdasalueiden sisällä, kuten Aurora Infrastructure Oy Kilpilahdessa. Kuvassa 1 on esitetty kantaverkon rakenne jännitetasojen perusteella. (Fingrid 2023a)



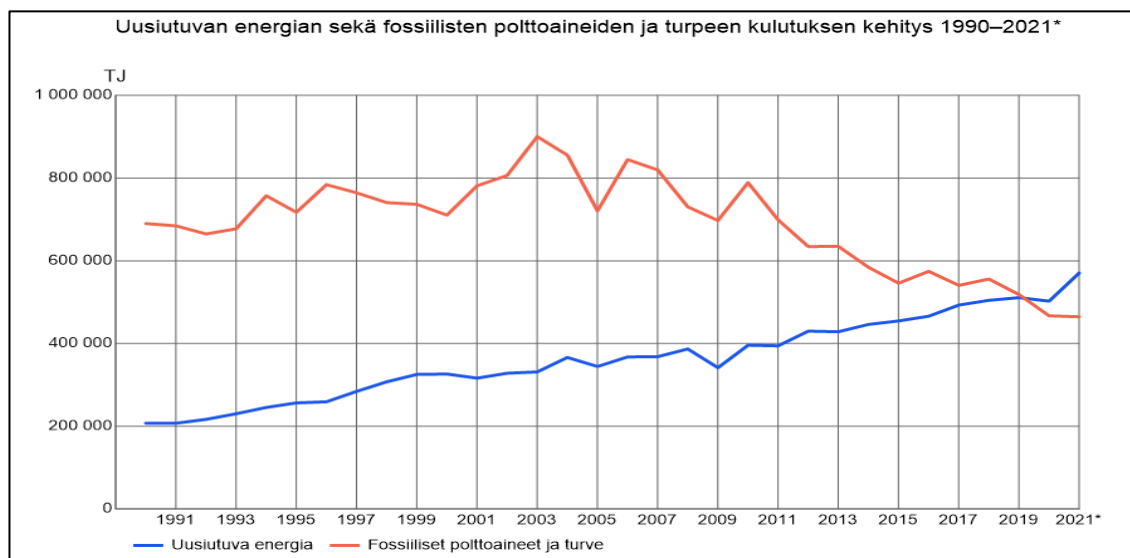
Kuva 1. Suomen kantaverkon rakenne 2020. (Fingrid 2023)

1.2 Kantaverkon modernisointi

Suomi ja kantaverkkomme ovat osa pohjoismaista sähköenergianjakelun synkronijärjestelmää yhdessä Norjan, Ruotsin, ja Itä-Tanskan kanssa. Synkronijärjestelmä toimii samalla taajuudella maiden välillä, jolloin sähkönsiirto voidaan tehdä suoraan vaihtosähkön avulla. Tasasähköisiä HVDC-siirtoyhteyksiä on synkronialueen sisällä, esimerkiksi Suomen ja Ruotsin välillä. Synkronijärjestelmän ulkopuolelta sähköenergiaa viedään ja tuodaan kansallisesti tasasähköjärjestelmillä, kuten Estlink 1 ja Estlink 2 Viron ja Suomen välillä. Pohjoismaiden ja Baltian alueen sähköenergian kaupankäynti käydään sähköpörssissä, Nord poolissa. (Fingrid 2023b)

Ilmastonmuutoksen hidastamiseksi on keskeistä luopua fossiilisten polttoaineiden käytöstä ja nopeuttaa uusiutuvien sähköenergiantuotantotapojen käyttöön-ottoa, sekä yhteiskunnan eri osa-alueiden kuten teollisuuden, lämmityksen ja liikenteen sähköistämistä. Euroopan vihreän kehityksen ohjelman tavoite on, että Euroopasta tulee ilmastoneutraali maanosana vuoteen 2050 mennessä, uu-

siutuvan energian tuotantotavoite on 40 % vuoteen 2030 mennessä. Suomessa fossiilisen energian kulutus on vähentynyt ja uusiutuvan energian kasvanut 1990-luvulta asti, kuvaaja 1 osoittaa, että Suomessa uusiutuvan energian kulutus ylitti fossiilisten polttoaineiden ja turpeen kulutuksen vuonna 2020. (Euroopan komissio 2023)



Kuvaaja 1. Suomen energiankulutus 1990–2021. (Tilastokeskus 2023)

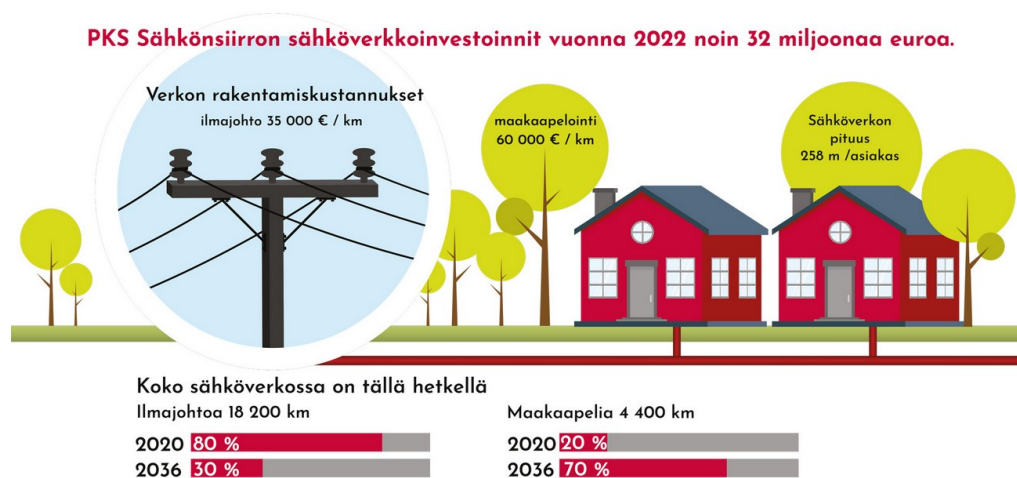
Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid investoi uusiutuvan energiantuotannon siirtokapasiteetin lisäämiseksi kantaverkkoon rakentamalla uusia kantaverkon voimajohtoyhteyksiä, sähköasemia, sekä toteuttamalla uusia maiden välisiä siirtoyhteyksiä. Investointien arvioitu tarve on yli 4 miljardia euroa seuraavan 10 vuoden aikana. (Fingrid 2023c)

1.3 Jakeluverkon modernisointi

Suomessa tapahtui 2001–2011 useita laajoja sähkönjakelun suurhäiriöitä myrskytuhojen vuoksi. 2013 Suomen eduskunta sääti sähköenergianjakelun toimitusvarmuudelle kansallisia vaatimuksia. Tästä alkoi jakeluverkkojen uusiminen ilmakaapeloiduista pylväsmuuntajajärjestelmistä kohti maakaapeloituja puistomuuntamojärjestelmiä. (Jarmo Partanen 2018)

Myrskyvarmemman verkon rakentaminen on nostanut sähköverkon luotettavuutta, ja asiakkaiden kokemat keskeytysajat ovat laskeneet. Maakaapelijärjestelmän etu on, että maan alle haudattujen kaapeliosuuksin vikaantuminen on huomattavasti vähäisempää sääilmiöiden vuoksi, siksi maakaapeloituja osuuksia kutsutaan säävarmaksi verkoksi. (Partanen ym. 2020)

Kuvassa 2 esitetty PKS Sähkönsiirron verkon rakentamisen kustannuksia ja sähköverkkoinvestoinnit.



Kuva 2. PKS Sähkönsiirron investoinnit 2022. (PKS Sähkönsiirto Oy 2023)

Maakaapelointi vaatii suuria investointeja jakeluverkon haltijoilta ja maksaa kaksinkertaisesti ilmajohtoverkon rakentamiseen verrattuna. Maakaapelijärjestelmissä muuntajat ja kompensointiyksiköt ovat yleensä suojattu omilla laitesuojillaan tai sijoitettu esimerkiksi kiinteistöjen teknisiin tiloihin kaupunkialueilla. Ilmajohtoverkossa muuntajat ovat yleensä kiinni pylväissä.

Haja-asutusalueiden säävarman maakaapeliverkon jakelumuuntamot ovat kookkaita rakenteita, joiden kuoren tehtävä on suojata sisällä olevaa jakeluinfraa, kuten jakelumuuntajia ja kompensointireaktoreita, sääilmiöiltä, eläimiltä, ilkeivallalta, sekä estää jännitteellisiin osiin pääsy.

Jakeluverkon muuntajakoneiden ja laitesuojien lämpenemää hallitaan ensisijaisesti passiivisen jäähdyttämisen keinoin, kuten laitesuojan tilavuutta kasvattamalla. Laitesuojan lämpenemäluokka vaikuttaa suoraan muuntajien ja kompen-

sointilaitteiden energiatehokkuuteen ja elinikään, puistomuuntamot ovat näistä syistä usein kookkaita rakennelmia. Kuvassa 3 haja-asutusalueen puistomuuntamo Suomessa.



Kuva 3. Säävarman maakaapeloidun järjestelmän puistomuuntamo. (Atte Saarni 2022)

Laitesuoja on usein betoniperusteinen ja varustettu öljyn vuotoaltaalla, muuntajien tai kompensointilaitteiden sisältämä öljy ei saa aiheuttaa ympäristölle vaaraa. Muuntajien ja reaktorien kierrätys on erityistä osaamista vaativaa työtä, osa vaativimmista laitteista lähetetään muihin maihin jatkokierrätykseen. (Kuusankoski 2023)

2 SÄÄVARMA JA ÄLYKÄS JAKELUVERKKO TUTKIMUSPROJEKTI

Tutkimuksessa kehitetään ja tutkitaan ilmastonmuutoksen kestävä ja myrskyvarmaa älyverkkoa. Tutkimus esittelee millaisia eroavaisuuksia jakeluverkkoinfran asentamisella maanalaisiin järjestelmiin on verrattuna nykyiseen maanpäälliseen rakennustapaan.

Tutkimusprojektissa rakennettiin sähköverkon modernisoimisen tutkimusta ja tuotekehitystä varten Smart Grid kokeilualusta. Kokeilualusta rakennettiin Tampereen aikuiskoulutuskeskuksen Sähkökenttä -oppimisympäristöön. Koealustalla testataan ilmastonmuutoksen kestävien laitteiden ja laitesuojien toimintaa ja tiedonkeruujärjestelmiä sensoreineen.

2.1 Säävarma laitesuoja

Säävarma laitesuoja mahdollistaa kriittisen infrastruktuurin, kuten sähköenergianjakelussa tärkeiden muuntajien ja kompensointilaitteiden, asentamisen maan alle suojaan ympäröiviltä luonnonvoimilta. Sen pölyn- ja vedenkestävä rakenne suojaa, sekä jäähdyttää jakeluverkkoinfran pitäen laitteet toimintakuntoisina tulvissa, hirmumyrskyissä, sekä pitkissä helleaalloissa.

Säävarma laitesuoja on kehitetty suojaamaan yhteiskunnan kriittistä infraa, kuten sähköenergian jakelun ja käytön kriittiset komponentit, sähköautojen latausverkot, sekä pelastus ja aluevalvonnassa käytettävät dronijärjestelmät.

- Kenttäerottimet ja katkaisijat
- Muuntajat ja kompensointilaitteistot
- Ilma- ja maakaapeliverkon vianpaikannus ym. mittauslaitteet
- Droonien lataus- ja laskualustat
- Mobiilituki-asetat
- Sähköautojen latausinfra
- Akustot

Kuvassa 4 Säävarma laitesuoja sekä kompensointireaktori Sähkökentän varastointialueella. Laitesuoja on suunniteltu varastoitavaksi ulkotiloihin. Säävarman laitesuojan alumiinirakenteen vahvuus on 2–3 mm, sisähalkaisija 1500 mm ja korkeus 2000 mm.



Kuva 4. Säävarma laitesuoja. (Atte Saarni 2022)

Laitesuojan runko on kierresaumattua putkea, vastaavaa rakennetta käytetään esimerkiksi tiealueilla rummuissa, silloissa ja maanalaisissa käytävissä. Se on erittäin kestävä, pitkään käytössä ollut ja useassa kohteessa testattu infrarakenne. Rakenteen suunniteltu käyttöikä on 100 vuotta $-50 - +50$ °C lämpötila-alueella. (Viacon 2023)

Materiaali on alumiini 5754, se on kestävä ja erinomaisesti korroosiota vastustava alumiiniseos. Korroosion kestävyys ja hyvä hitsattavuutensa vuoksi sitä käytetään yleisesti esimerkiksi meriteollisuuden tarpeisiin. Kuvassa 5 vastaava rakenne käytössä tiesiltana. (Thyssenkrupp 2023)



Kuva 5. Siltarumpuja kierresaumatusta putkesta. (Viacon 2023)

Tutkimuksessa mitattiin jakeluverkon toiminnan kannalta kriittisiä komponentteja, kuten jakelumuuntamo ja kompensointiyksikköä. Nämä esitetty tarkemmin seuraavissa kappaleissa 2.1.1–2.1.2

2.1.1 Kompensointireaktori

Maakaapelin rakenne varaa paljon kapasitiivista energiaa sähkökenttäänsä. Verrattuna ilmajohtoverkkoon se tuottaa kymmeniä kertoja enemmän maasulkuvirtaa purkaantuessaan vikatilanteessa. Tämän takia kosketusjännitteet sähköverkossa voivat nousta hengenvaarallisille tasoille, ellei niitä rajoiteta induktiivisilla kompensointijärjestelmillä, kuten kompensointireaktoreilla. Maasulkuvirran lisäksi reaktorit kompensoivat loistehoa parantaen verkon siirtokapasiteettia ja energiatehokkuutta. (A. Nikander, R. Quinn, P. Rasilo. 2020)

Kuvassa 6 kompensointireaktori tehtaalla. Kuivareaktori ei sisällä syttyviä materiaaleja, eikä öljyä. Kuvassa näkyvät punaiset sylinterit ovat reaktorin hartsiin valetut kupariset käämit ja musta teräksinen rakenne reaktorin sydän. Rakenne on suunniteltu huoltovapaaksi.



Kuva 6. Kompensointireaktori. (Atte Saarni 2022)

Suomen sähköturvallisuuslaki määrää luokan 3 sähkölaitteistojen, kuten verkonhaltijan siirto-, jakelu- ja muut vastaavat sähköverkot, tekemään viiden vuoden välein määräaikaistarkastuksen laitteistoille. Lakisääteisten tarkastusten

ohella suositellaan kompensointireaktorin pulttikiinnityksien tarkastamista, sekä tekemään aistinvarainen tarkastus. (Suomen sähköturvallisuuslaki, 2016)

Reaktori on kapasiteetiltaan optimoitu niin, että se voidaan asentaa jakeluverkkoon esimerkiksi maakaapelijatkon kohdalle. Tällöin se kompensoi toisiinsa liitetyt kaapelit, sekä mahdollistaa maakaapeliverkon kriittisen komponentin eli maakaapelijatkon kunnonvalvonnan. Reaktorin tarkemmat tekniset tiedot löytyvät taulukosta 1.

<p>3、 Main technical parameters</p> <ol style="list-style-type: none">1. Rated capacity: 31.68 kvar2. Rated voltage: 20000 V3. Rated frequency: 50 Hz4. Rated current: 0.89 A5. Rated reactance: 13258.4 Ω6. Insulation level:<ol style="list-style-type: none">(1) power frequency withstand voltage: 50 kV (effective value) / 1 min;(2) Lightning impulse voltage: 125 kV (peak) / 1s;(3) Number of phases: three phases;(4) Connection method: Star connection (YN connection).
--

Taulukko 1. Kompensointireaktorin tekniset tiedot. (Atte Saarni 2023)

2.1.2 Jakelumuuntaja 50 kVA

Jakelumuuntaja on öljytön ja rakenteeltaan hartsiin valettu kuparikääminen kuivamuuntaja, kuvassa 7. Tuotekehitystä varten valmistetun jakelumuuntajan teho on 50 kVA, se on yleinen koko keskijänniteverkon satelliittimuuntamoille haja-asutusalueilla.



Kuva 7. 50 kVA Jakelumuuntaja. (Atte Saarni 2022)

Muuntajan päälle on suunniteltu laitepeti, tämä näkyy päällä sinisenä tasona kuvassa 7. Laitepetiin voi asentaa esimerkiksi erottimen, jolloin muuntajan voi kytkeä irti jakeluverkosta etäohjauksena. Muuntaja on varustettu myös kahdella puhaltimella. Taulukossa 2 esitetty tarkemmin muuntajan tekniset tiedot.

Type of product	SCH15-50/20	Rated power	50 kVA
Rated voltage	20 / 0.41 kV	Rated current	1.443 / 70.411 A
Rated frequency	50 Hz	Connection	Dyn11
Tapping range	$\pm 2 \times 2.5$ %	Phases	3

Taulukko 2. Jakelumuuntajan tekniset parametrit. (Tammerfast 2022)

2.2 Säävarma mittaussuoja

Säävarma mittaussuoja on laitesuojaa vastaava rakenteeltaan, mutta mitoitettu suojaamaan maakaapeliverkon mittalaitteita ja kommunikaatiovälineitä. Näitä ovat esimerkiksi vika-analysaattorit ja energiamittarit. Kuvassa 8 säävarma mittaussuoja ennen maakaapeliin asennusta, kuvassa 9 maakaapeli on vedetty suojan läpi.



Kuva 8. Säävarma mittausuoja Sähkökentällä. (Atte Saarni 2022)

Säävarman mittausuojan sisällä IoT-mittalaitteet voidaan kytkeä kaapeliin sekä huoltaa ja kalibroida käyttökeskeytyksettä ja turvallisesti. Mittalaitteilla voidaan esimerkiksi tarkkailla maakaapelijatkon kuntoa ja mitata kaapelin vaihe- ja maadoitusvirtoja maakaapeliverkon vikojen paikantamiseksi.



Kuva 9. Säävarma mittausuoja ilman kantta. (Atte Saarni 2022)

2.3 Älykkään ja säävarman jakeluverkon rakennus

Tutkimushankkeen tavoite on luoda äärimmäisiä ympäristön olosuhteita kestäviä älykkäitä jakeluverkon laitesuojia, sekä komponentteja, jotka ovat energiatehokkaampia, turvallisempia ympäristölle, sekä lähes huoltovapaita verrattuna nykyisiin ratkaisuihin. Taulukossa 3 on kuvattu säävarman ja älykkään jakeluverkkoinfran tuotekehityksessä tavoiteltuja ominaisuuksia.

Tavoite / ominaisuus	Ratkaisu
Laitteiden suojaaminen luonnonvoimilta.	Säävarma laitesuoja asennetaan maan alle, vesi- ja pölytiivis rakenne.
Energiatehokkuus	Energiatehokkaat laitteet ja jäähdytys maaperästä.
Paloturvallisuus	Kuivamuuntajat eristetty syttymättömällä hartsilla.
Ympäristöystävällisyys	Öljytön ja kierrätettävä tekniikka.
Elinikä	Laitteille optimoitu lämpötila ja kosteus.
Huoltovapaus	Ei liikkuvia osia, pölytön ja kuiva rakenne.
Älykkyys	IoT-etämittaukset mahdollistavat olosuhdedatan keräämisen.

Taulukko 3. Tuotekehityksen tavoitteita. (Atte Saarni 2022)

Kuvassa 10 maakaapelireitin kaivaminen ja säävarman laitesuojan sekä kompensointireaktorin siirto laitepedille. Maakaapeliin asennetaan säävarman laitesuojan ja kompensoinnin lisäksi myös säävarma mittaussuoja.



Kuva 10. Säävarman laitesuojan ja kompensointireaktorin asennus käynnissä Tampereen aikuiskoulutuskeskuksen Sähkökentällä. (Atte Saarni 2022)

Kuvassa 11 näkyy rakentamisen aikaiset olosuhteet, työmaa oli talvella luminen ja jäinen.



Kuva 11. Säävarma mittaussuoja ja kompensointireaktori kaapelointi. (Atte Saarni 2022)

Tutkimusta varten säävarmaan laitesuojaan ja Sähkökentälle asennettiin IoT-etämittaukset, sekä käyttöön otettiin etävalvontajärjestelmä. Maanalaisen rakennustavan tuotekehityksen innovaatioita voidaan näin koekäyttää ja testata oikeissa käyttöolosuhteissa. Kuvassa 12 säävarma laite- ja mittaussuoja asennettuna.



Kuva 12. Säävarma mittaussuoja ja laitesuojassa kompensointireaktori asennettuna, asennustapa A. (Atte Saarni 2023)

Maanalaista verkkoinfraa on aiemmin tutkittu Tampereen yliopiston ja Energiateollisuus Ry:n Sähkötutkimuspoolin kanssa yhteistyössä toteutetussa tutkimushankkeessa. Energiateollisuus Ry edustaa energia-alan yrityksiä, Sähkötutkimuspoolissa on jäsenenä jakeluverkko-operaattoreita sekä alan yrityksiä. Sähkötutkimuspoolin tarkoitus on edistää alan tutkimusta ja energiajärjestelmien kehitystä. (Energiateollisuus Ry)

2020 valmistuneessa tutkimushankkeessa on käsitelty uudenlaisen maanalaisen hajautetun kompensoinnin toteutettavuutta ja siitä on julkaistu raportti. Tutkimushankkeessa haastateltiin viittä suomalaista jakeluverkkoyhtiötä, jotka olivat kaikki Sähkötutkimuspoolin jäseniä. Haastatteluista käy ilmi, että maanalaiselta kompensoinnilta toivotaan kustannustehokkuutta, vähintään nykyisen suojauksen veroista suorituskykyä, mahdollisuutta erottaa kompensointilaite verkosta, sekä pitkää elinikää. (A. Nikander, R. Quinn, P. Rasilo. 2020)

3 SÄÄVARMA JA ÄLYKÄS JAKELUVERKKOINFA TUTKIMUSMITTAUKSET

Säävarman laitesuojan kompensointireaktoriin ja Sähkökentälle asennettiin IoT-etämittaukset reaaliaikaista olosuhdemonitorointia varten, järjestelmä kerää datan säilytykseen pilvipalveluun. Kuvassa 13 etämittari sivulta.



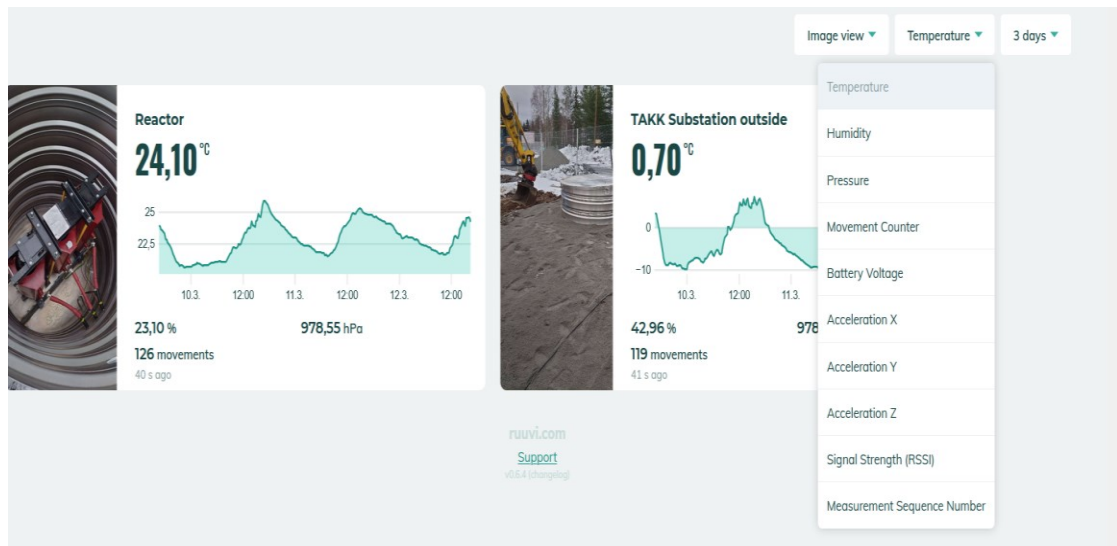
Kuva 13. Ruuvitag etämittaus. (Ruuvi Innovations 2023)

Kuvassa 14 etämittari asennettuna reaktoriin. Mittauspisteeksi valittiin keskimäinen käämi, koska sen arvoja voitiin verrata laitevalmistajan määrittämiin turvallisen käytön rajoihin.



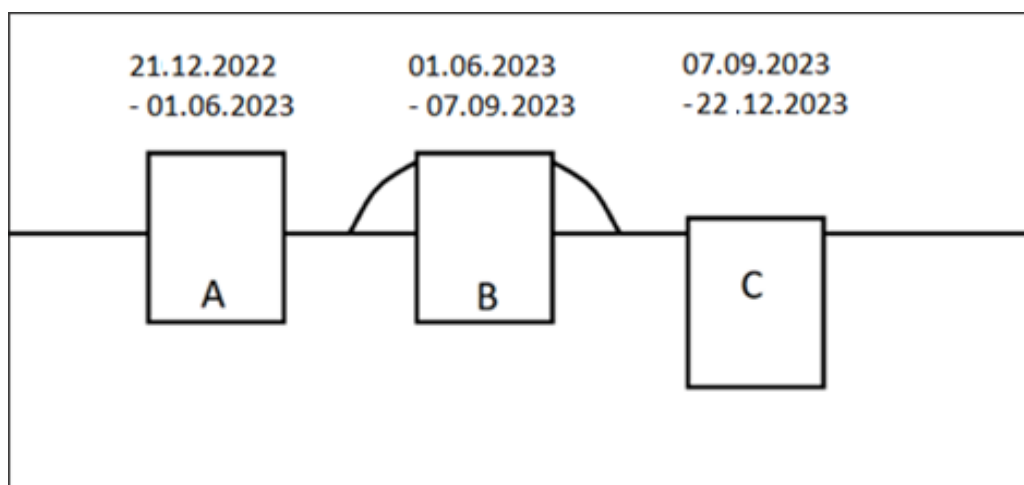
Kuva 14. Etämittari reaktorin keskimmäisen käämin päällä. (Atte Saarni 2022)

Mittarit lähettävät tietoa lämpötilasta, kosteudesta, ilmanpaineesta, sekä liikkeestä. Lisäksi ne lähettävät tietoa esimerkiksi akkujensa varaustasosta. Tieto kerätään pilvipalveluun, josta sitä voi tarkastella etänä selaimella tai mobiilisovelluksella. Etämonitorointijärjestelmän selainkäytöstä näyttö kuvassa 15. (Ruuvi Innovations Oy 2023)



Kuva 15. Etämittausjärjestelmän työpöytänäkymästä kuva. (Atte Saarni 2023)

Mittauksilla olosuhteita laitesuojassa ja Sähkökentällä voidaan seurata reaaliaikaisesti. Kuvassa 16 esitetty säävarman laitesuojan asennustavat A, B, C, joita testattiin Sähkökentällä 21.01.2022 - 22.12.2023.



Kuva 16. Säävarman laitesuojan asennustavat mittausten aikana. (Atte Saarni 2023)

3.1 Kompensointireaktorin tehdastestit

Laitevalmistaja on tehnyt kompensointireaktorille tehdastestit, joiden perusteella reaktorin on todettu toimivan suunnitellun mukaisesti ja turvallisesti. Tehdastestiraportti liitteessä 1. Esimerkiksi testiraportin taulukossa 4 on mittaustuloksia reaktorin lämpenemättestistä 120 % vaihevirrolla. Lämpenemällä tarkoitetaan komponentin jatkuvassa käytössä saavuttamaa lämpötilaeroa suhteessa ympäristön lämpötilaan.

Temperature rise test record									
Rated current value	A	12 times current value	1,068 A	start time	8:20	Noise	45 dB	ambient temperature	°C
Sampling time	A Phase coil	B Phase coil	C Phase coil	A Phase coil	B Phase coil	C Phase coil	ambient temperature	remarks	
1	9:40	38.5	39.5	36.5		42.5		28.5	
2	10:40	42.9	46.8	47.0		47.8		28.7	
3	11:40	44.0	47.0	48.5		54.0		29.1	
4	12:40	45.4	46.7	48.1		54.5		29.4	
5	13:40	46.2	47.0	47.3		55.0		29.5	
6									

Taulukko 4. Tehtaalla tehtyjen lämpenemätestien tuloksia. (Atte Saarni 2023)

Kompensointireaktorin tehdastestituloksista voi havaita, että keskimääräinen käämi B saavuttaa 47 °C lämpötilan ulkolämpötilan ollessa 29,5 °C. Tällöin käämin lämpenemä on 18K (47°C - 29,5°C). Tästä on päätelty, että kompensointireaktorin hartsikäämien lämpenemä jatkuvassa käytössä vapaasti ilma-jäähtyvänä voisi olla 12,5°C (18°C / (1,2 / 1)²).

Reaktorin hukkatheho on 20 KV jakeluverkkojärjestelmässä 800W, 2,67 ampeerin nimellisvirralla.

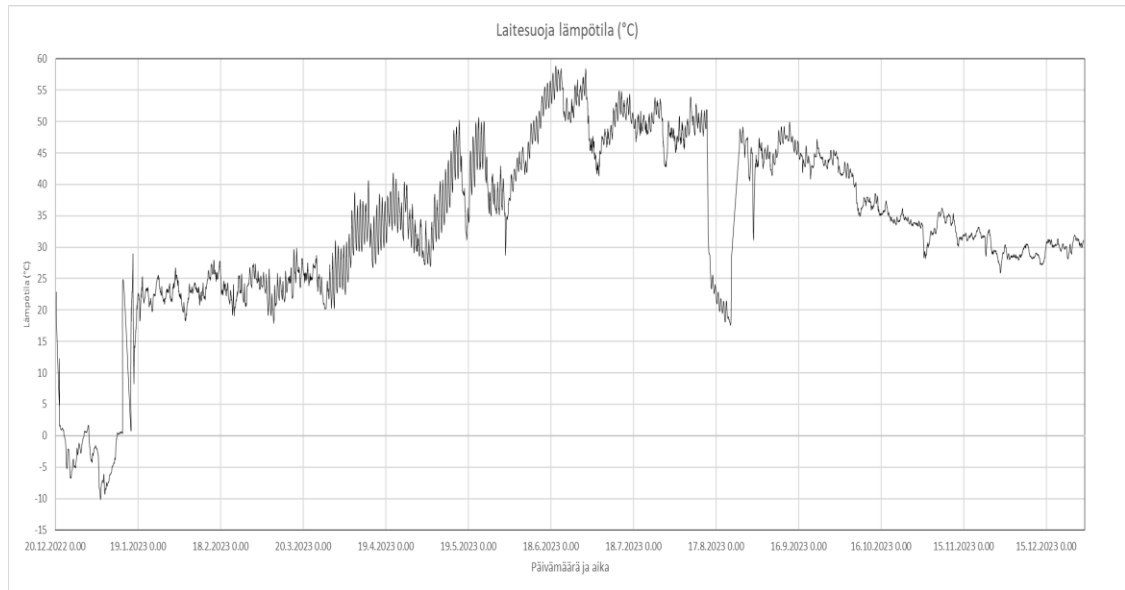
3.2 Kenttämittaukset

Mittauksia tehdään verkon rakentamisen ja kompensointireaktorin koekäytön aikana. Olosuhdemittauksia suoritettiin aikavälillä 21.12.2022 – 22.12.2023 Sähkökentällä. Olosuhdemittauksilla kerättiin tietoa laitteiden ja ympäristön lämpötilasta, kosteudesta sekä ilmanpaineesta. Etämittaukset kentällä ja säävarmassa laitesuojassa lähettävät mittaustiedon järjestelmään 15 minuutin välein, tämä todettiin hyväksi päivitystaajuudeksi mitattujen ilmiöiden muutosnopeuteen verrattuna.

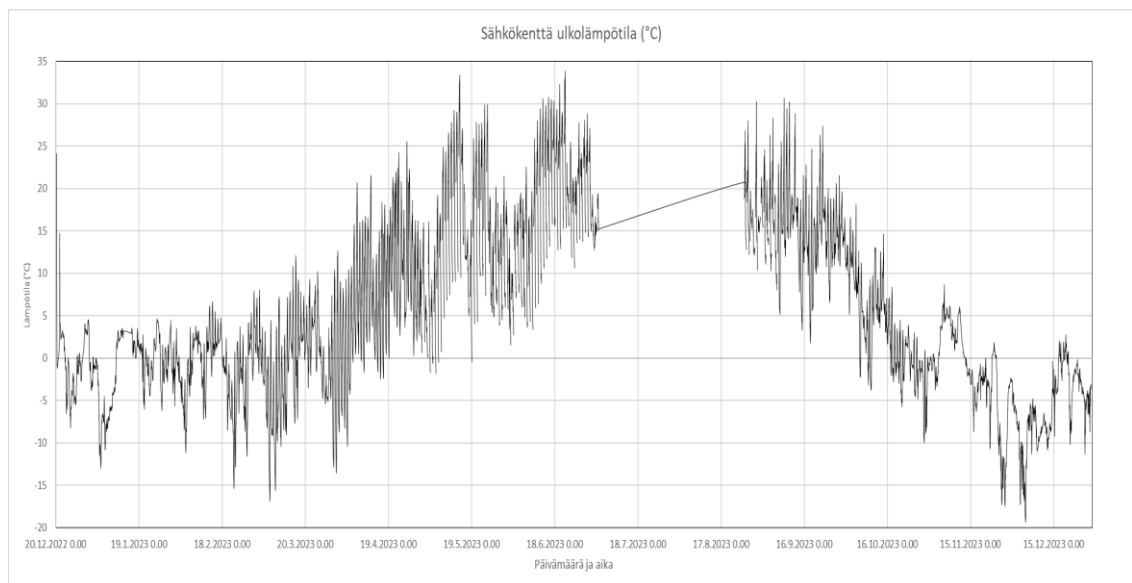
Rakentamisen ja koekäytön aikaisten mittauksien ja käyttökokemuksen perusteella IoT-etämittausjärjestelmä todettiin tehokkaaksi keinoksi kerätä tarkkaa tietoa laitteiden ja ympäristön olosuhteista esimerkiksi ennakoivaa kunnossapitoa varten. Myös datan automaattinen pilvitalletus ja etämonitorointi selaimella tai mobiilisovelluksella havaittiin helpoksi ja tehokkaaksi tavaksi tarkkailla yhtä aikaa usean eri laitteen olosuhteita.

13 – 24.8.2023 välillä reaktori oli jännitteetön, joka näkyy laitesuojan lämpötilan putoamisena ja kosteuden nousuna ajanjaksolla. Sähkökentän ulkolämpötilan etämittausta ei tehty 03.07 - 25.8.2023. Sähkökentän mittausta on tehty 24 h aikavälillä 21.12.2022 – 01.05.2023, sekä 07.09 – 22.12.2023. 01.05 – 07.09.2023 mittausta on tehty päivittäin klo.10:00 - 05:00.

Mittaukset voidaan jakaa kahteen jaksoon, rakentamiseen sekä koekäyttöön. Kuvaajissa 2 ja 3 on esitetty mittaushistoria lämpötilalle säävarman laitesuojan kompensointireaktorin ja Sähkökentän etämittauksista. 13-19.1.2023 välillä on tehty säävarman laitesuojan ja kompensointireaktorin tarkastuksia, kuvaajista puuttua tietoa tällä aikavälillä tai se on vääristynyttä.



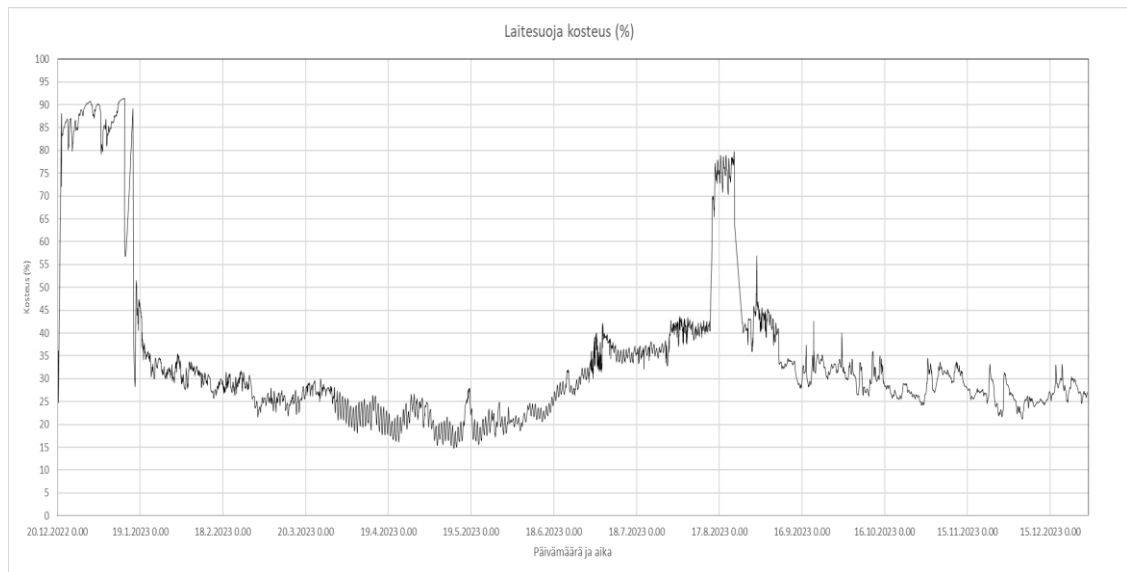
Kuvaaja 2. Sävarman laitesuojan lämpötilä mittausjaksolla 21.12.2022 – 22.12.2023. (Atte Saarni 2023)



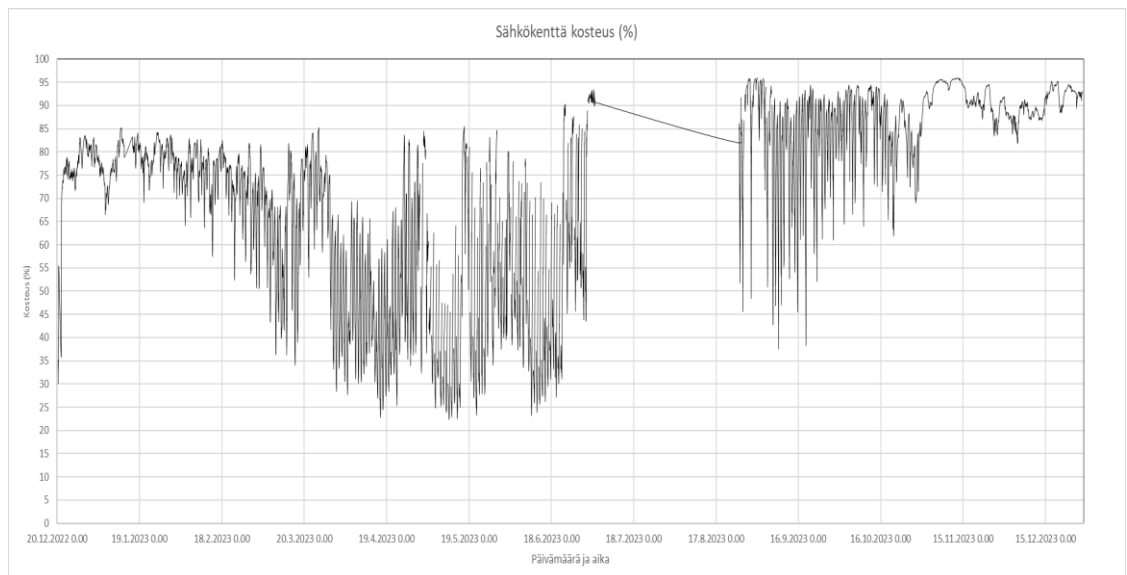
Kuvaaja 3. Sähkökentän ulkolämpötilä mittausjaksolla 21.12.2022 – 22.12.2023. (Atte Saarni 2023)

Kuvaajissa 4 ja 5 on esitetty mittaushistoria kosteudelle sävarman laitesuojan kompensointireaktorin ja Sähkökentän etämittauksista. Koekäytön mittausjakso asennustavalle A alkoi 20.01.2023. Tämän voi havaita laitesuojan lämpötilan ja kosteuden kuvaajissa 2 ja 4, laitesuojan lämpötilä nousee ja kosteus laskee

reaktorin jännitteelliseksi kytkemisen jälkeen. Rakentamisen ja koekäytön mitauksia on esitelty tarkemmin omissa osioissaan.



Kuvaaja 4. Sävarman laitesuojan kosteus mittausjaksolla 21.12.2022 – 22.12.2023. (Atte Saarni 2023)

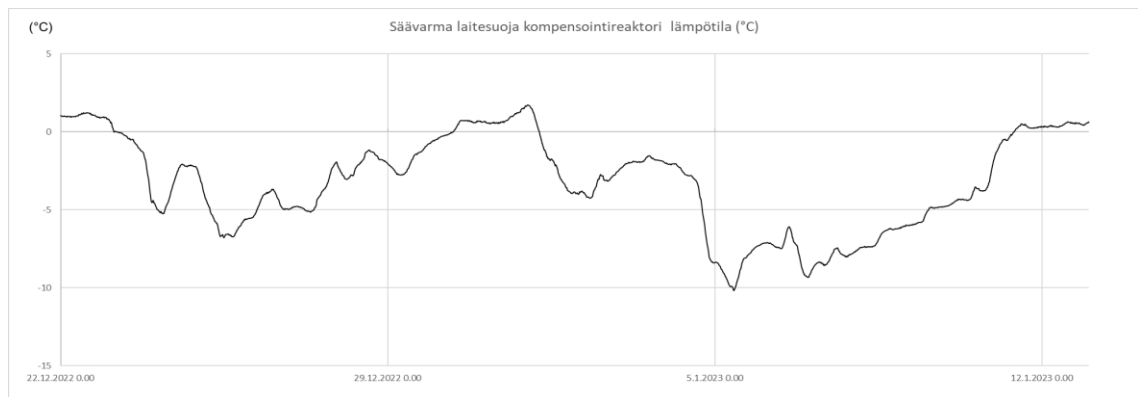


Kuvaaja 5. Sähkökenttä kosteus mittausjaksolla 21.12.22 – 22.12.2023. (Atte Saarni 2023)

3.3 Rakentamisen aikaiset mittaukset

Olosuhdedatan keräys aloitettiin 21.12.2022 talvipäivänseisauksena. Mittauksia tehtiin rakentamisen aikana säävarman laitesuojan kompensointireaktorista ja Sähkökentältä. Monitorointijärjestelmän mobiilitiedonsiirtoa ja muita toiminnallisuksia testattiin ja ne todettiin toimiviksi.

Kuvaajissa 6 ja 7 on esitetty laitesuojasta ja kentältä mitattu lämpötila aikavälillä 22.12 – 12.1.2023. Lämpötilamittausten voi havaita toimivan, säävarman laitesuojan kompensointireaktorin lämpötilamittaus seuraa Sähkökentän ulkolämpötilamittauksen muutoksia. Säävarman laitesuojan lämpötila oli mittausjatkolla suurimmillaan +3°C ja matalimmillaan -11°C. Sähkökentällä lämpötila oli samalla ajanjaksolla suurimmillaan +4°C ja matalimmillaan -13°C.

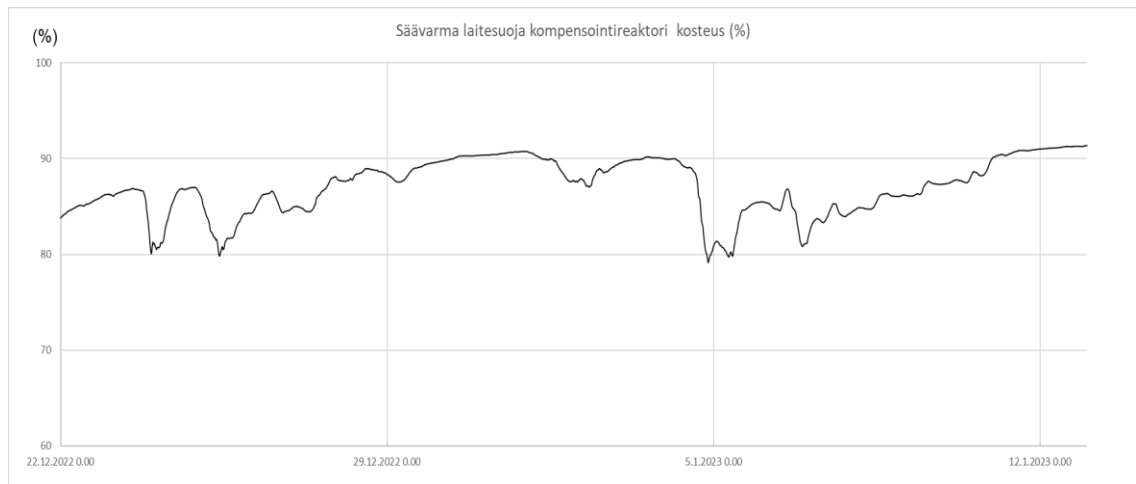


Kuvaaja 6. Säävarman laitesuojan lämpötila rakentamisen aikana. (Atte Saarni 2023)

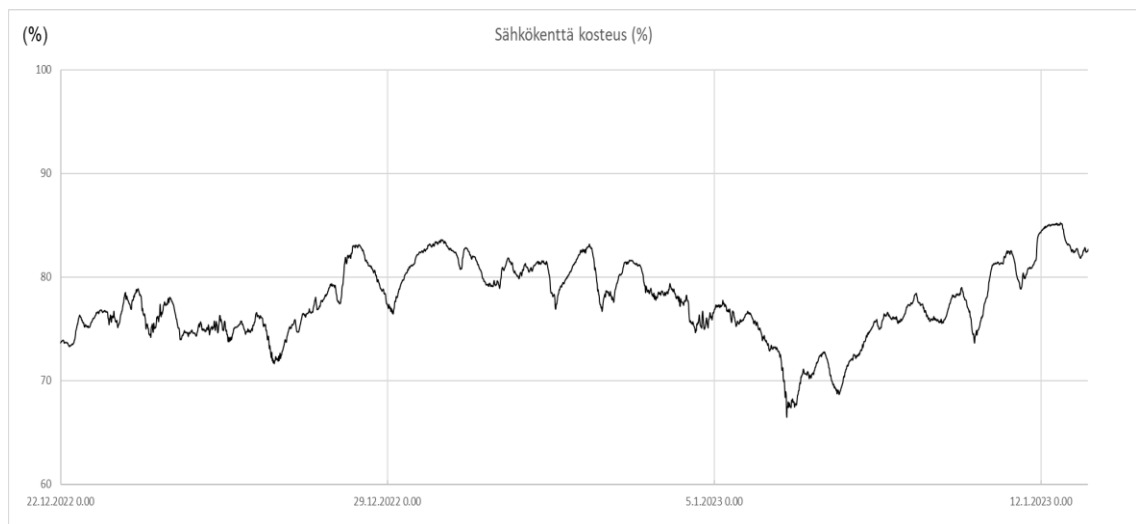


Kuvaaja 7. Sähkökenttä lämpötila asennusten aikana. (Atte Saarni 2023)

Kuvaajissa 8 ja 9 on esitetty laitesuojasta ja kentältä mitattu kosteus aikavälillä 22.12 – 12.1.2023. Vertaamalla kuvaajaa 8 ja 9, voi havaita, että kompensointi-reaktori on rakentamisen aikana työmaalla hyvin kosteissa olosuhteissa. Tämä johtuu siitä, että asennuksia tehtiin talvella ja kuoren sisälle kulkeutui paljon lunta ja kosteutta. Säävarman laitesuojan sisällä oli rakentamisen mittausjakson aikana kosteampaa kuin Sähkökentällä.



Kuvaaja 8. Säävarman laitesuojan kosteus asennusten aikana. (Atte Saarni 2023)



Kuvaaja 9. Sähkökenttä kosteus asennusten aikana. (Atte Saarni 2023)

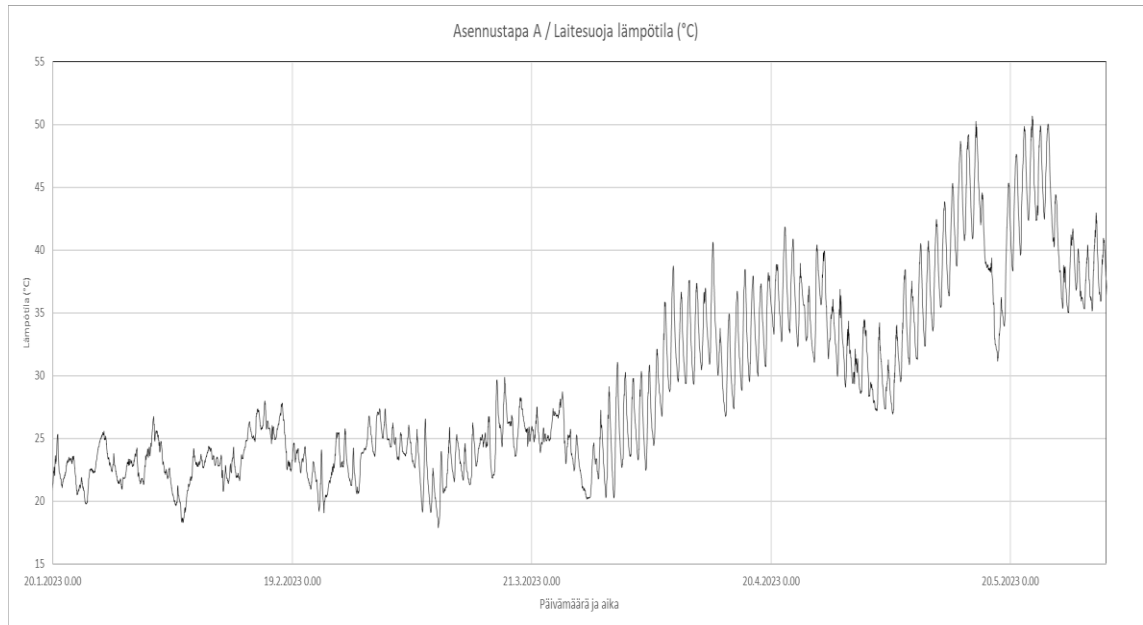
3.4 Koekäyttömittaukset asennustapa A

Kompensointireaktorin koekäyttö aloitettiin 20.01.2023 asennustapa A:lla. Testimittauksia varten laitesuoja ja kompensointireaktori asennettiin 1 metrin syvyyteen. Kuvassa 17 laitesuoja asennettuna.

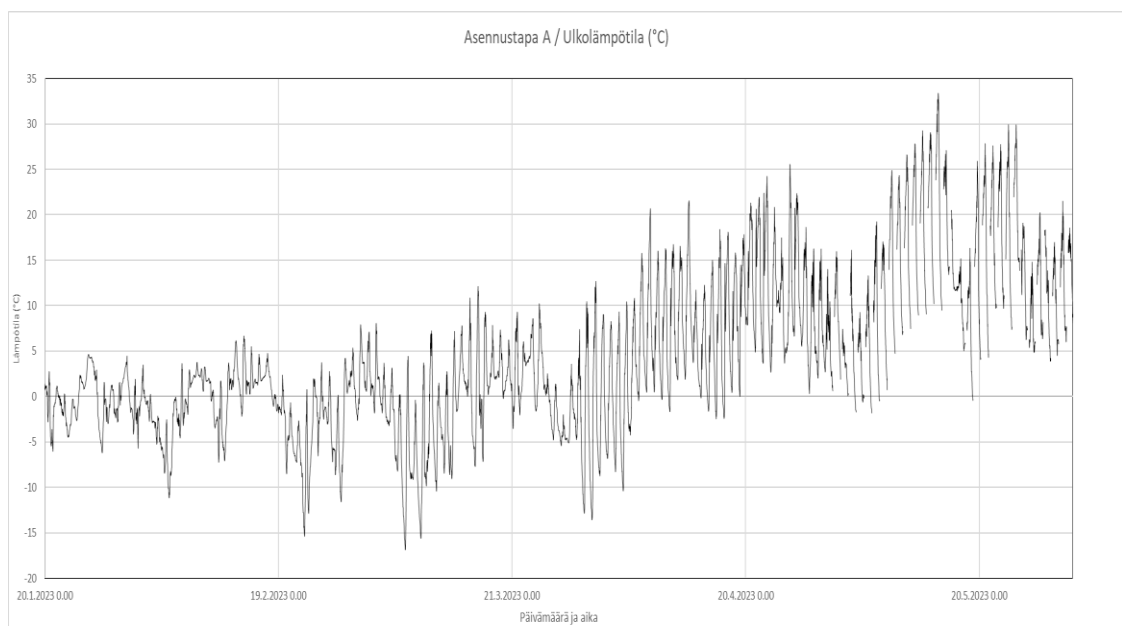


Kuva 17. Säävarma laitesuoja ja kompensointireaktori asennettuna Sähkökentällä, asennustapa A. (Atte Saarni 2023)

Kuvaajissa 10 ja 11 on esitetty lämpötilamittaukset laitesuojasta ja Sähkökentältä aikavälillä 20.1 – 01.06.2023. Säävarman laitesuojan lämpötila oli mittausjatkolla suurimmillaan $+51^{\circ}\text{C}$ ja matalimmillaan $+18^{\circ}\text{C}$. Sähkökentällä lämpötila oli samalla ajanjaksolla suurimmillaan $+33^{\circ}\text{C}$ ja matalimmillaan -17°C .

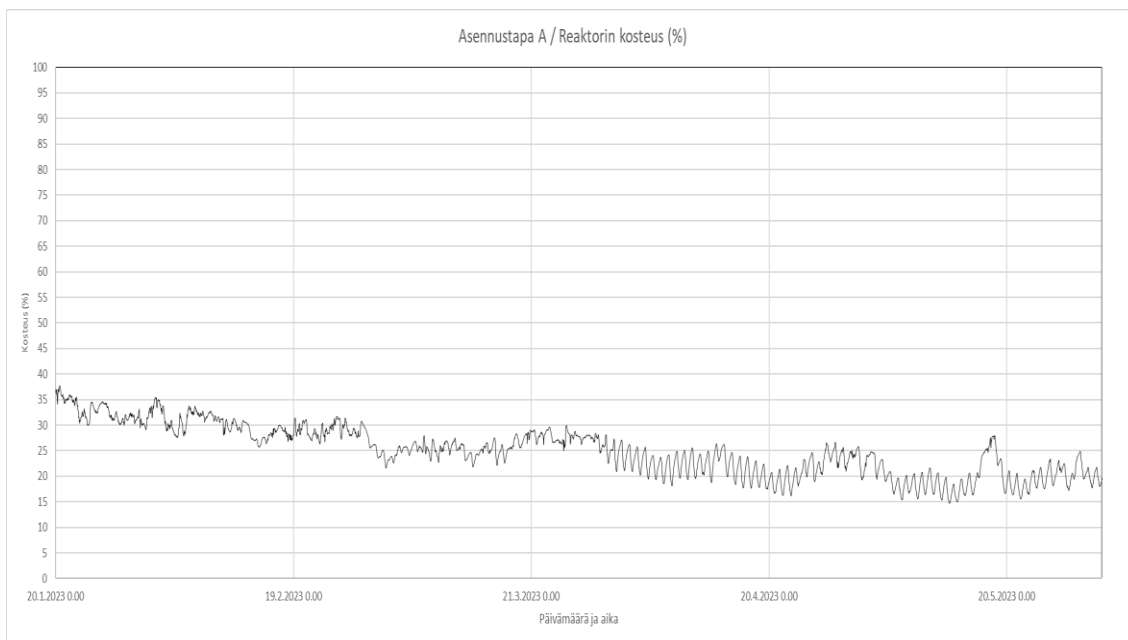


Kuvaaja 10. Säävarman laitesuojan lämpötila koekäytön aikana, asennustapa A. (Atte Saarni 2023)

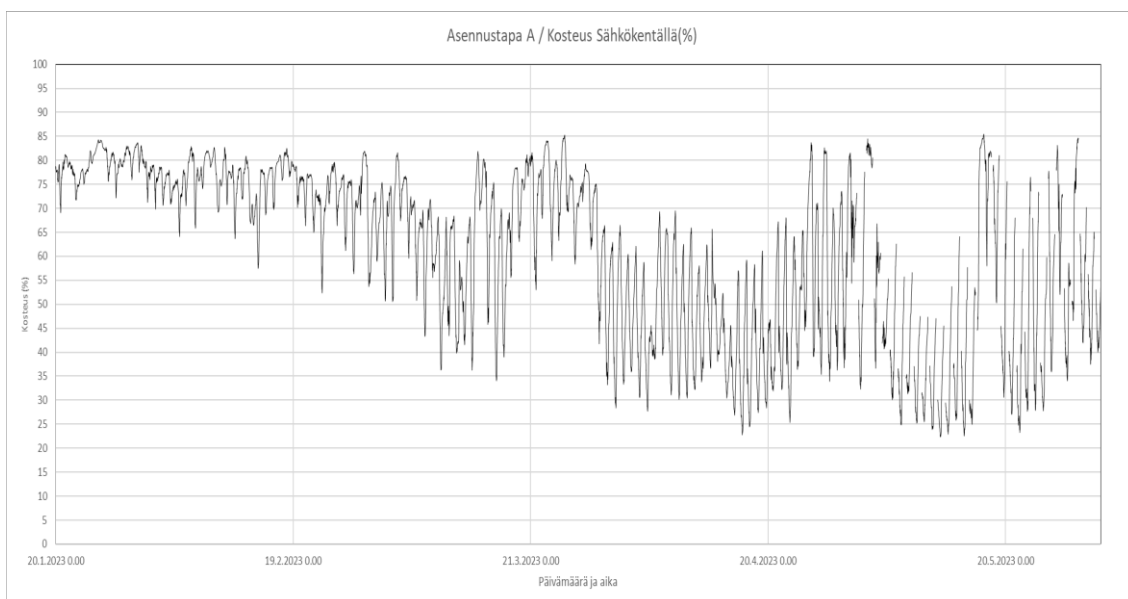


Kuvaaja 11. Sähkökenttä ulkolämpötila koekäytön aikana, asennustapa A. (Atte Saarni 2023)

Kuvaajissa 12 ja 13 on esitetty laitesuojasta ja kentältä mitattu kosteus aikavälillä 20.01 – 01.06.2023. Säävarman laitesuojan reaktorin kosteus oli mittausjatkolla suurimmillaan 38 % ja matalimmillaan 15 %. Sähkökentällä kosteus oli samalla ajanjaksolla suurimmillaan 86 % ja matalimmillaan 22 %.



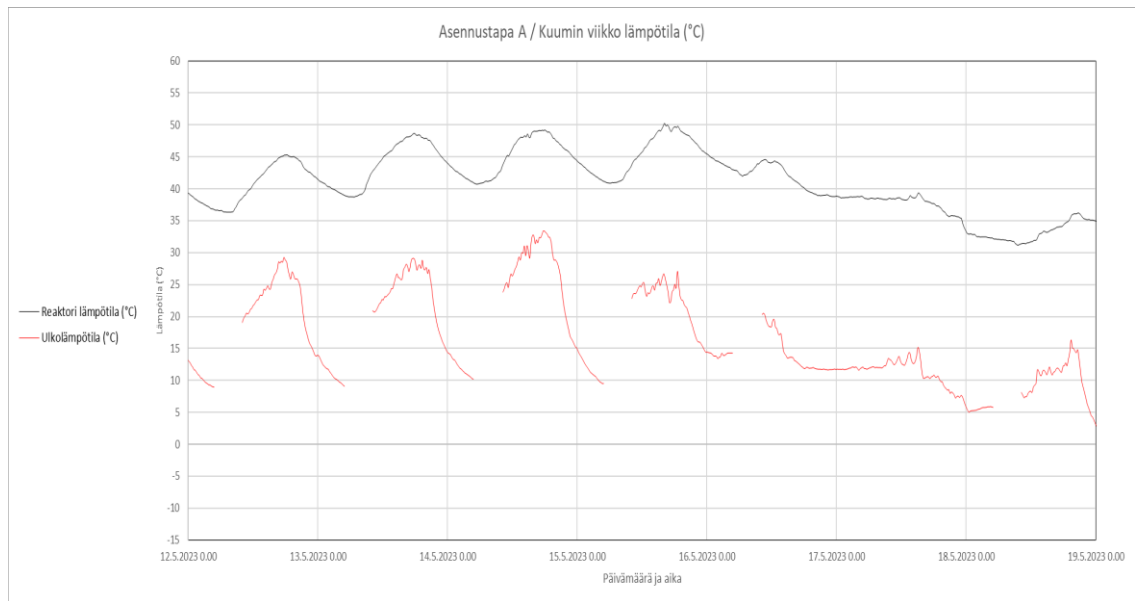
Kuvaaja 12. Säävarman laitesuojan kosteus koekäytön aikana, asennustapa A. (Atte Saarni 2023)



Kuvaaja 13. Sähkökenttä kosteus koekäytön aikana, asennustapa A. (Atte Saarni 2023)

3.4.1 Kuumien mittausjakso

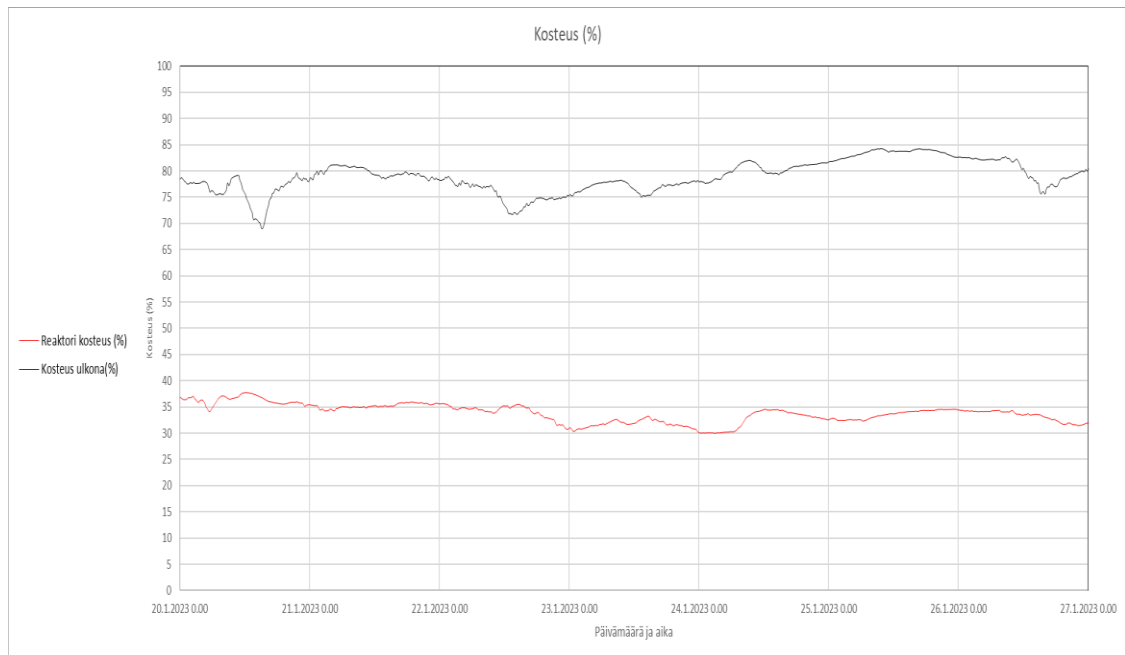
Kuvaajassa 14 on esitetty lämpötilamittaukset laitesuojasta ja Sähkökentältä aikavälillä 12.5. – 19.05.2023. Säävarman laitesuojan lämpötila oli mittausjatkol- la suurimmillaan +51°C ja matalimmillaan +32°C. Sähkökentällä lämpötila oli samalla ajanjaksolla suurimmillaan +33°C ja matalimmillaan +4°C.



Kuvaaja 14. Sähkökentän kuumien viikko koekäytön aikana, asennustapa A. (Atte Saarni 2023)

3.4.2 Kostein mittausjakso

Kuvaajassa 15 on esitetty laitesuojasta ja kentältä mitattu kosteus aikavälillä 20.01 – 27.01.2023. Säävarman laitesuojan reaktorin kosteus oli mittausjatkolla suurimmillaan 38 % ja matalimmillaan 30 %. Sähkökentällä kosteus oli samalla ajanjaksolla suurimmillaan 85 % ja matalimmillaan 68 %.



Kuvaaja 15. Sähkökentän kostein viikko koekäytön aikana, asennustapa A. (Atte Saarni 2023)

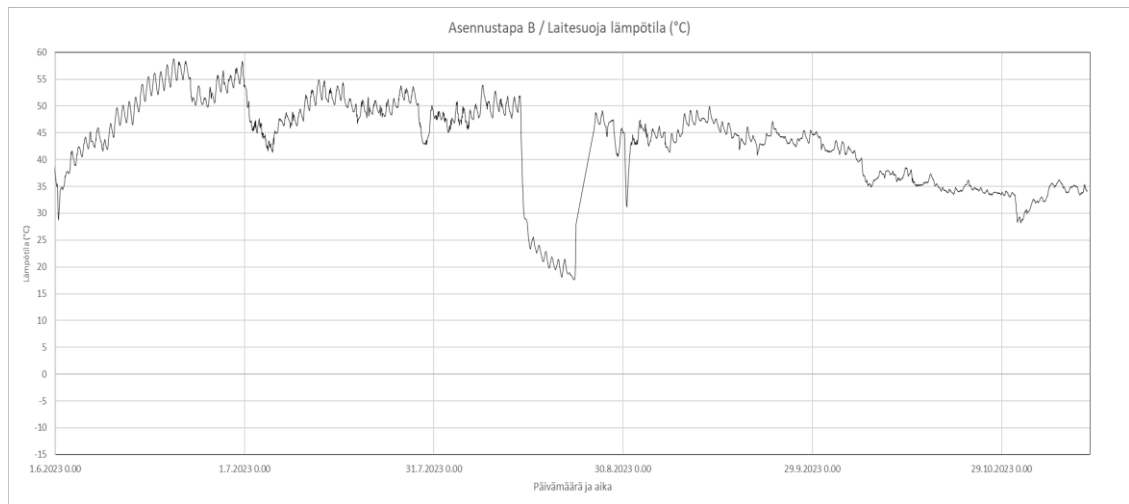
3.5 Koekäyttömittaukset asennustapa B

Kompensointireaktorin koekäyttöä jatkettiin 01.06.2023 asennustapa B:llä. Testimittauksia varten laitesuoja ja kompensointireaktori peitettiin sivuistaan. Kuvassa 18 laitesuoja asennettuna.

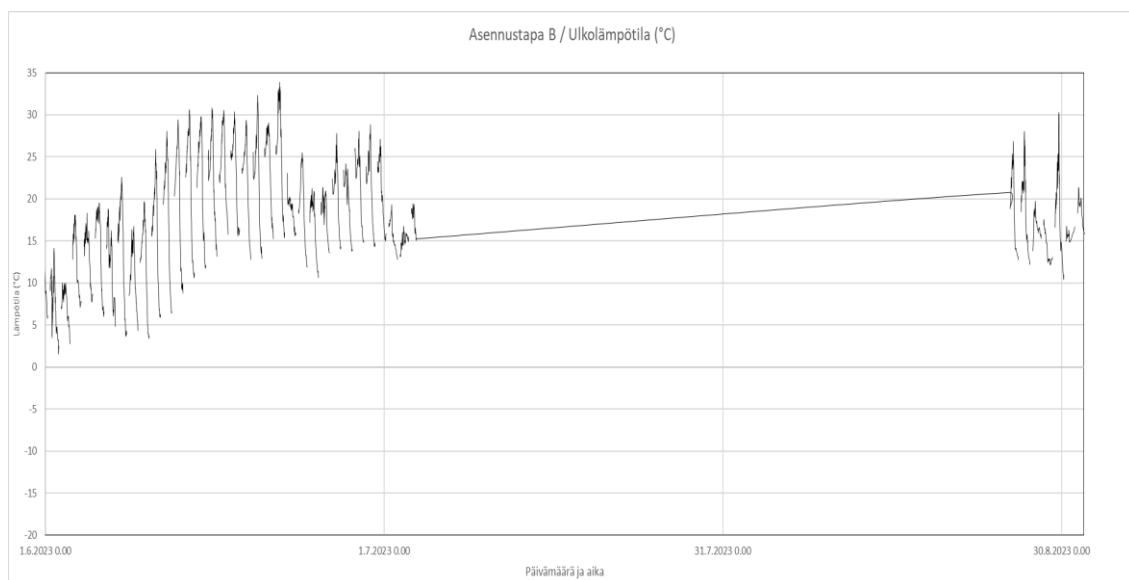


Kuva 18. Säävarma laitesuoja ja kompensointireaktori asennettuna Sähkökentällä, asennustapa B. (Atte Saarni 2023)

Kuvaajissa 16 ja 17 on esitetty lämpötilamittaukset laitesuojasta ja Sähkökentältä aikavälillä 01.06 – 07.09.2023. 13.8 – 24.8.2023 reaktori oli jännitteetön, tätä ajanjaksoa on tarkasteltu kosteimman viikon kohdalla kappaleessa 3.5.2. Käytössä ollessaan säävarman laitesuojan lämpötila oli mittausjatkolla suurimmillaan $+59^{\circ}\text{C}$ ja matalimmillaan $+29^{\circ}\text{C}$. Sähkökentällä lämpötila oli samalla ajanjaksolla suurimmillaan $+34^{\circ}\text{C}$ ja matalimmillaan $+2^{\circ}\text{C}$.

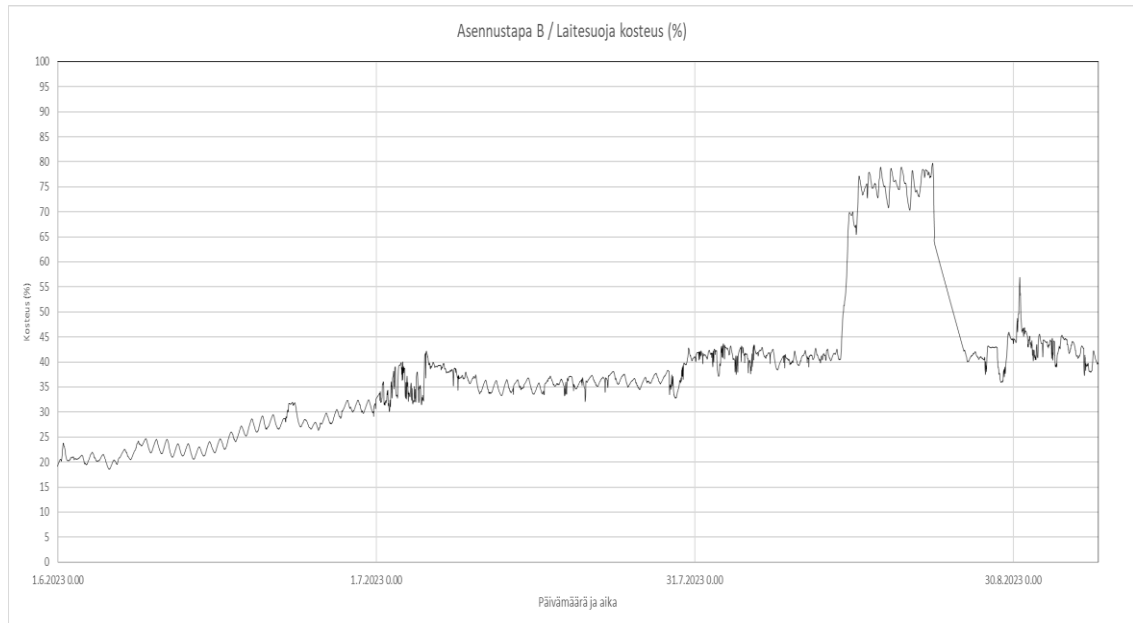


Kuvaaja 16. Säävarman laitesuojan lämpötila koekäytön aikana, asennustapa B. (Atte Saarni 2023)

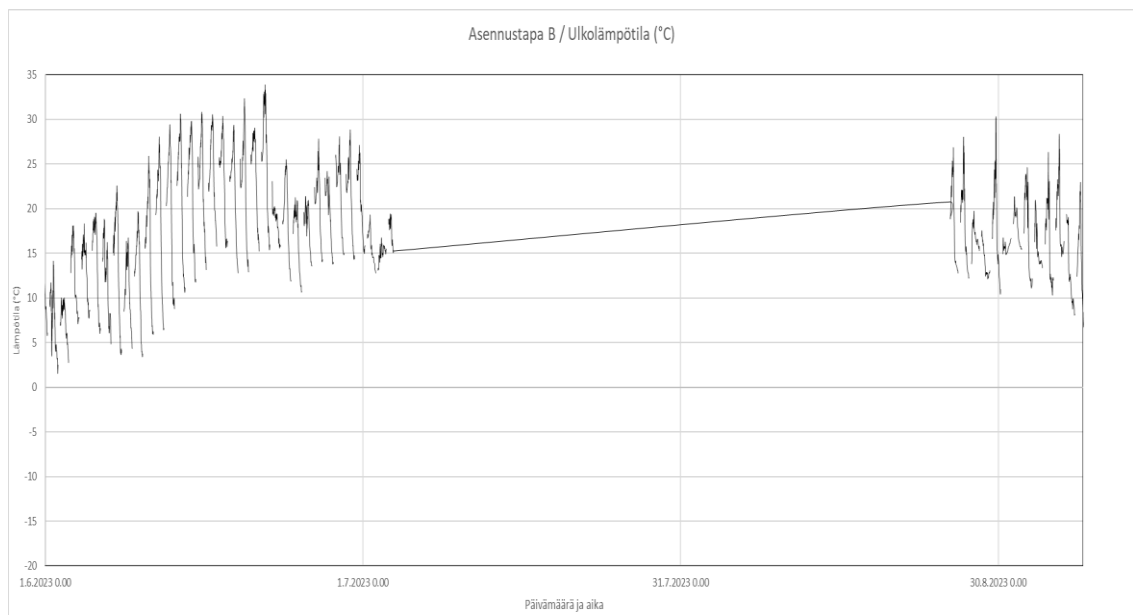


Kuvaaja 17. Sähkökenttä lämpötila koekäytön aikana, asennustapa B. (Atte Saarni 2023)

Kuvaajissa 18 ja 19 on esitetty laitesuojasta ja kentältä mitattu kosteus aikavälillä 01.06 – 07.09.2023. Säävarman laitesuojan reaktorin kosteus oli mittausjatkolla suurimmillaan 44 % ja matalimmillaan 19 %. Sähkökentällä kosteus oli samalla ajanjaksolla suurimmillaan 96 % ja matalimmillaan 23 %.



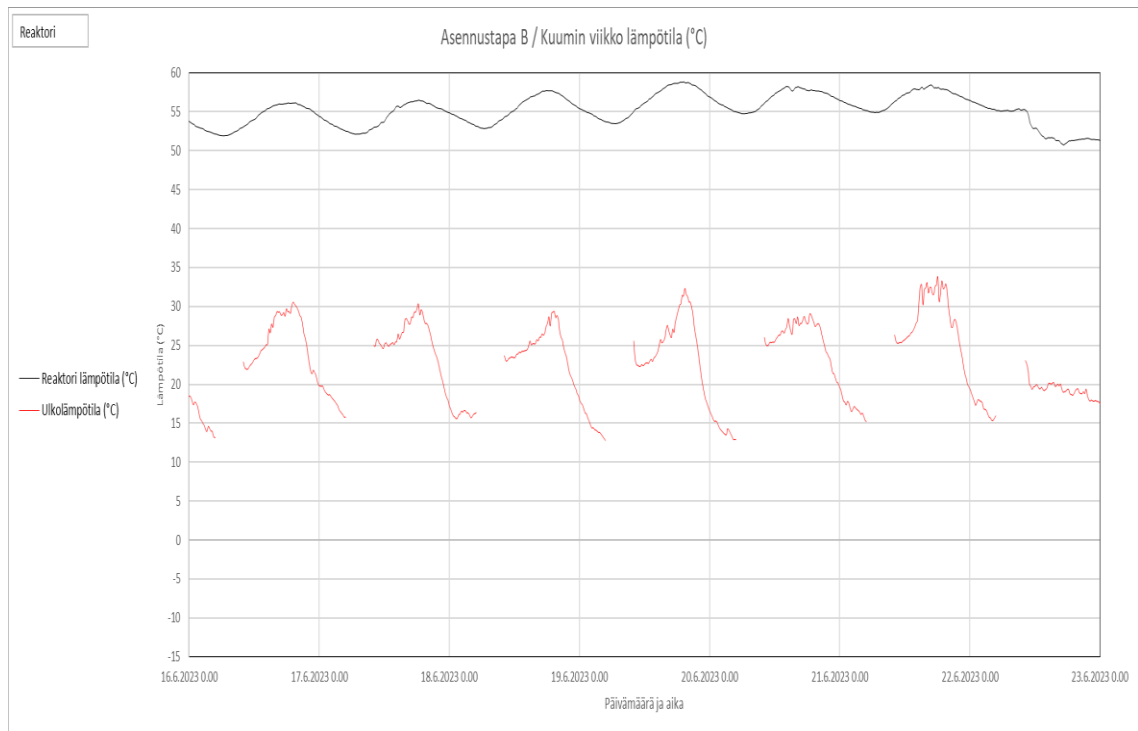
Kuvaaja 18. Säävarman laitesuojan kosteus koekäytön aikana, asennustapa B. (Atte Saarni 2023)



Kuvaaja 19. Sähkökenttä kosteus koekäytön aikana, asennustapa B. (Atte Saarni 2023)

3.5.1 Kuumin mittausjakso

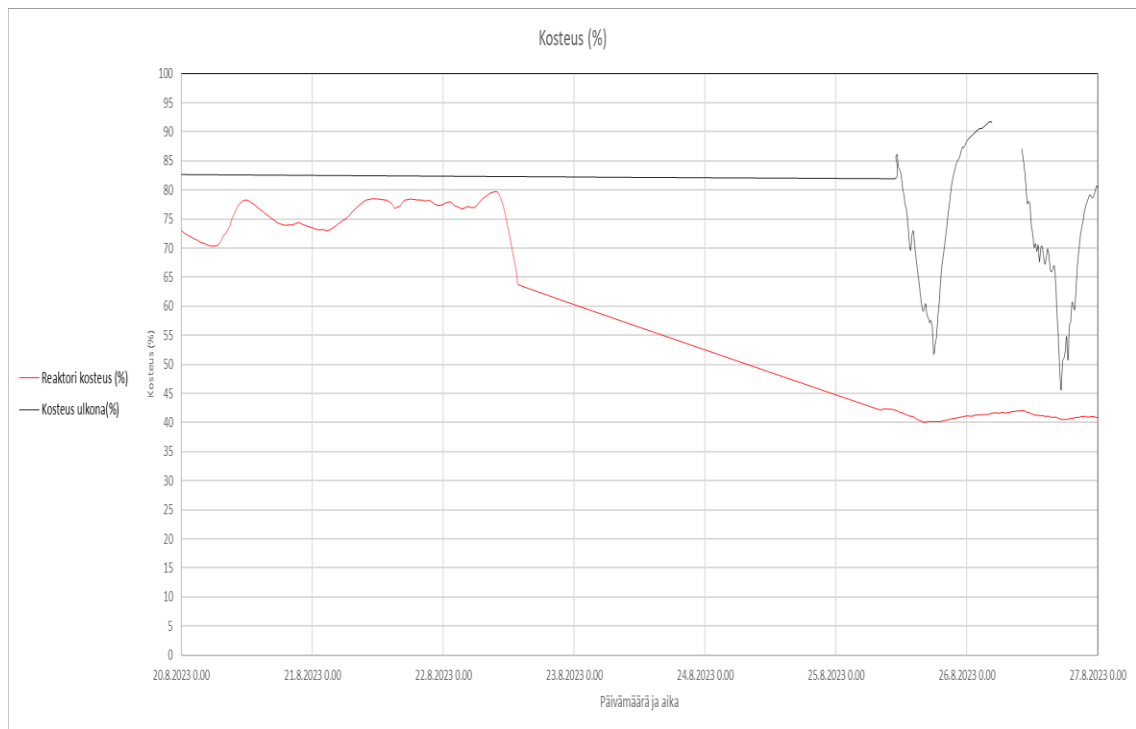
Kuvaajassa 20 on esitetty lämpötilamittaukset laitesuojasta ja Sähkökentältä aikavälillä 16.6. – 23.06.2023. Sävarman laitesuojan lämpötila oli mittausjatkolla suurimmillaan +59°C ja matalimmillaan +51°C. Sähkökentällä lämpötila oli samalla ajanjaksolla suurimmillaan +34°C ja matalimmillaan +8°C.



Kuvaaja 20 Sähkökentän kuumin viikko koekäytön aikana, asennustapa B. (Atte Saarni 2023)

3.5.2 Kosteusmittausjakso

Kuvaajassa 21 on esitetty laitesuojasta ja kentältä mitattu kosteus aikavälillä 20.08 – 27.08.2023. Reaktori on jännitteetön. Säävarman laitesuojan reaktorin kosteus oli mittausjatkolla suurimmillaan 80 % ja matalimmillaan 40 %. Sähkökentällä kosteus oli samalla ajanjaksolla suurimmillaan 92 % ja matalimmillaan 46 %.



Kuvaaja 21 Sähkökentän kostein viikko koekäytön aikana, asennustapa B. (Atte Saarni 2023)

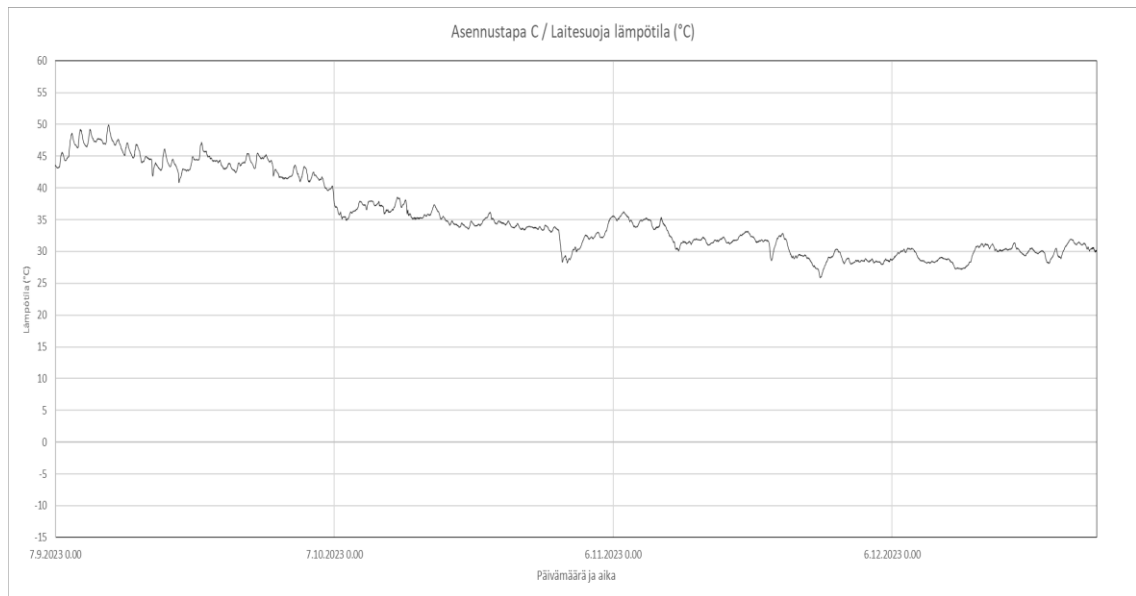
3.6 Koekäyttömittaukset asennustapa C

Kompensointireaktorin koekäyttöä jatkettiin 07.09.2023 asennustapa C:llä. Testimittauksia varten laitesuoja ja kompensointireaktori peitettiin 2 metrin syvyyteen lisäämällä maata testialueelle. Kuvassa 19 laitesuoja ja mittaussuoja asennettuna.

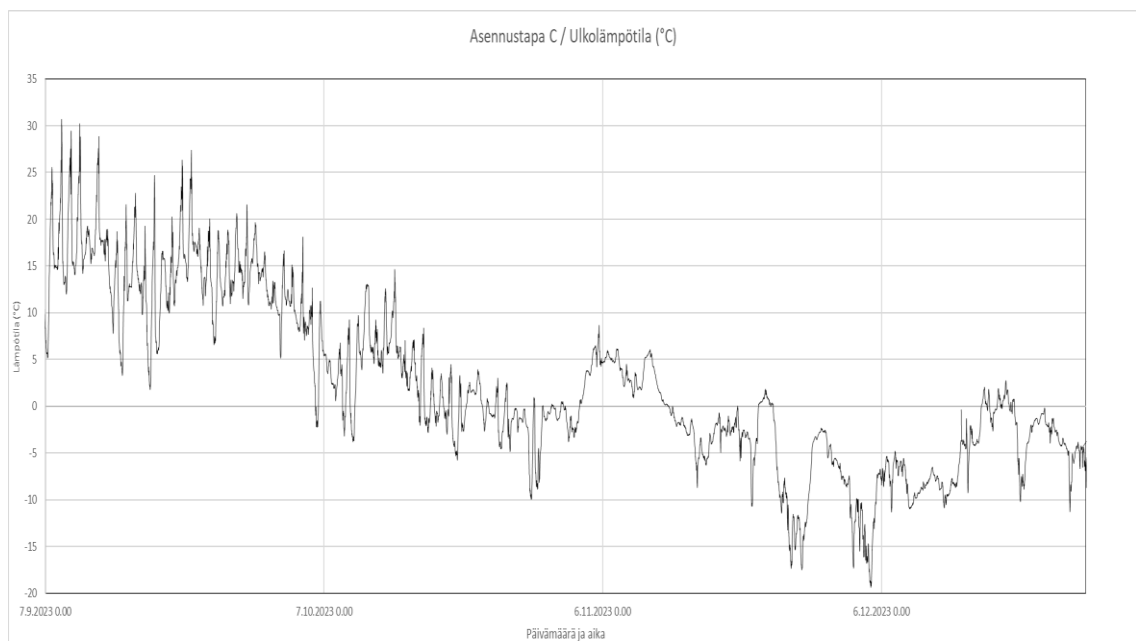


Kuva 19. Säävarma laitesuoja ja kompensointireaktori asennettuna Sähkökentällä, asennustapa C. (Atte Saarni 2023)

Kuvaajissa 22 ja 23 on esitetty lämpötilamittaukset laitesuojasta ja Sähkökentältä aikavälillä 07.09 – 22.12.2023. Säävarman laitesuojan lämpötila oli mittausjatkolla suurimmillaan +50°C ja matalimmillaan +26°C. Sähkökentällä lämpötila oli samalla ajanjaksolla suurimmillaan +31°C ja matalimmillaan -19°C.

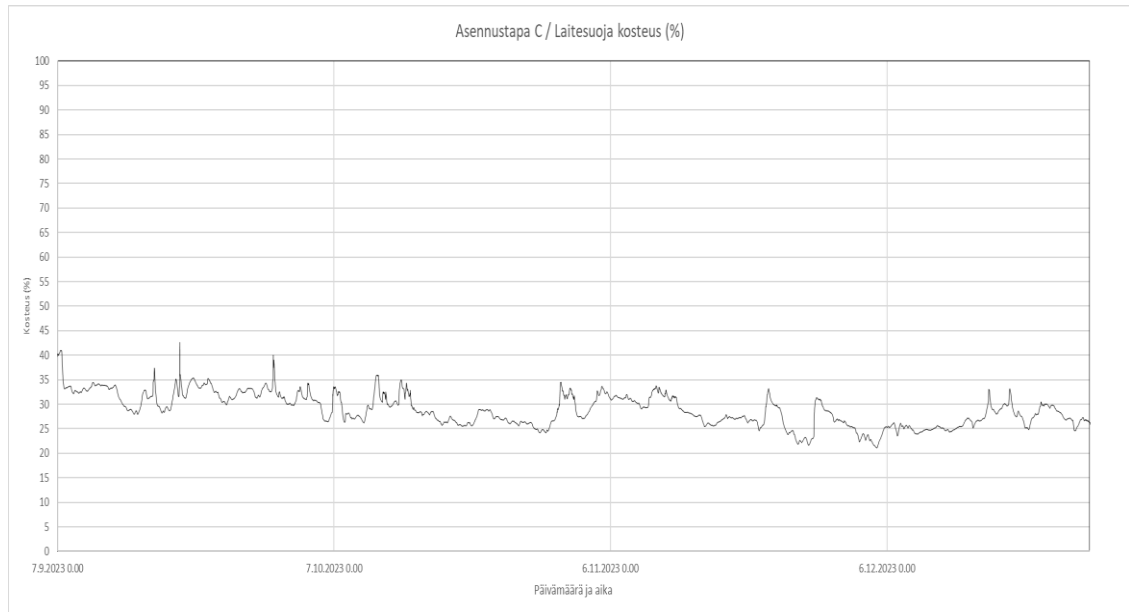


Kuvaaja 22. Säävarman laitesuojan lämpötila koekäytön aikana, asennustapa C. (Atte Saarni 2023)

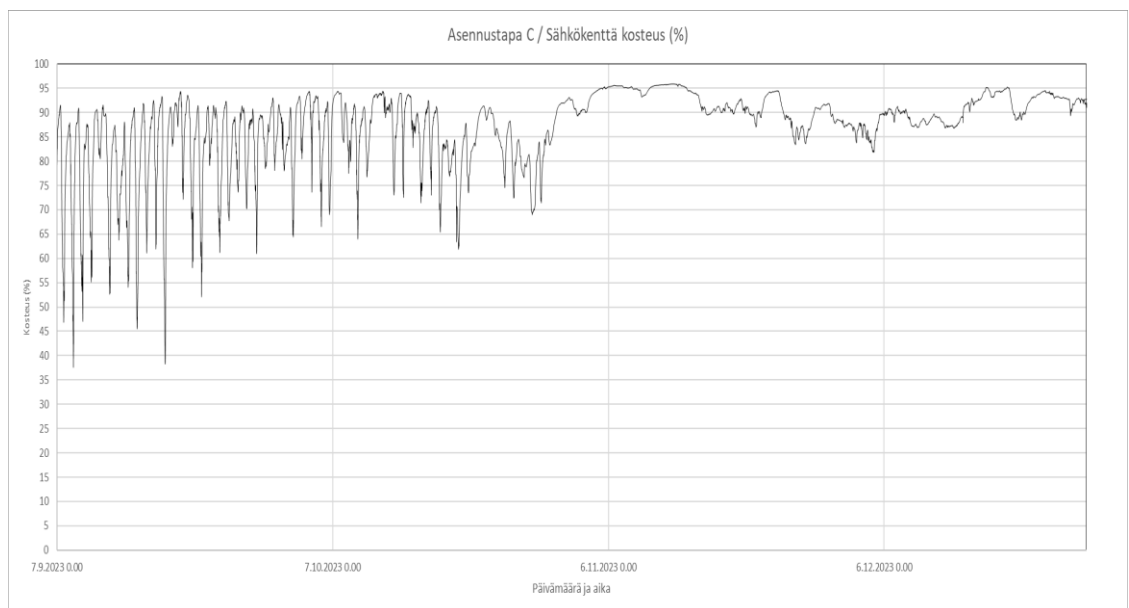


Kuvaaja 23. Sähkökenttä lämpötila koekäytön aikana, asennustapa C. (Atte Saarni 2023)

Kuvaajissa 24 ja 25 on esitetty laitesuojasta ja kentältä mitattu kosteus aikavälillä 07.09 – 22.12.2023. Sävarman laitesuojan reaktorin kosteus oli mittausjatkolla suurimmillaan 43 % ja matalimmillaan 21 %. Sähkökentällä kosteus oli samalla ajanjaksolla suurimmillaan 96 % ja matalimmillaan 38 %.



Kuvaaja 24. Sävarman laitesuojan kosteus koekäytön aikana, asennustapa C. (Atte Saarni 2023)



Kuvaaja 25. Sähkökenttä kosteus koekäytön aikana, asennustapa C. (Atte Saarni 2023)

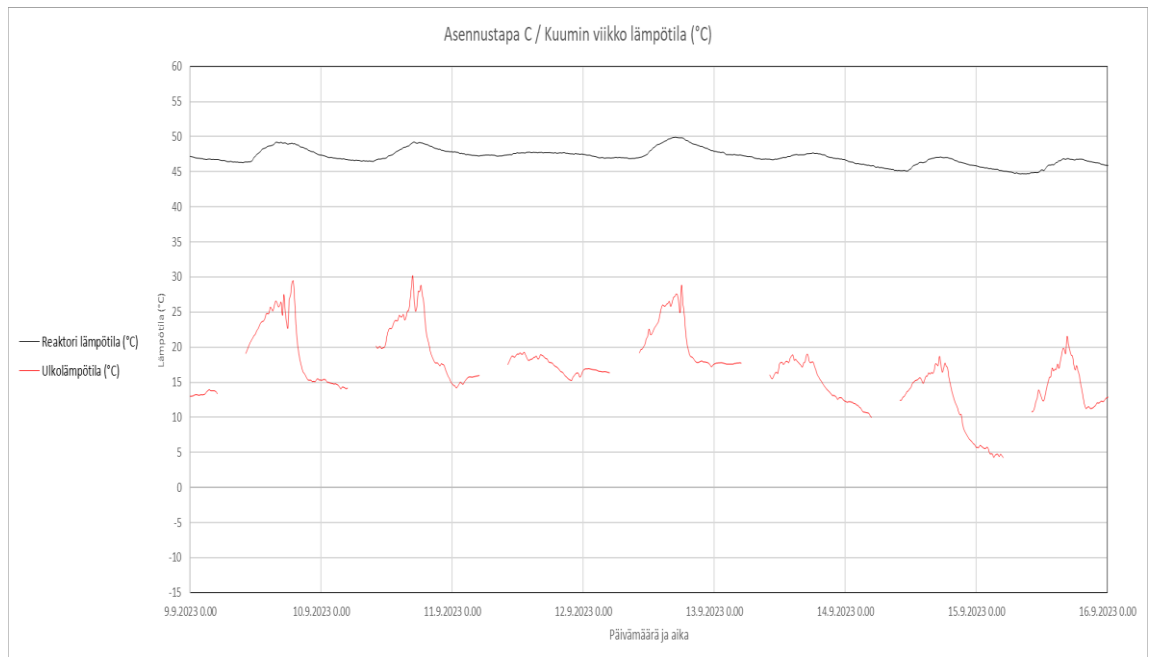
Kuvassa 20 säävarma laitesuoja asennettuna. Kuvasta voi huomata, että muuntamo pysyy lumesta ja jäädästä vapaana hukkatehon vaikutuksesta. Lunta Sähkökentällä arviolta noin 30 cm.



Kuva 20. Säävarma laitesuoja asennustapa C. Kuva otettu 14.12.2023. (Atte Saarni 2023)

3.6.1 Kuumin mittausjakso

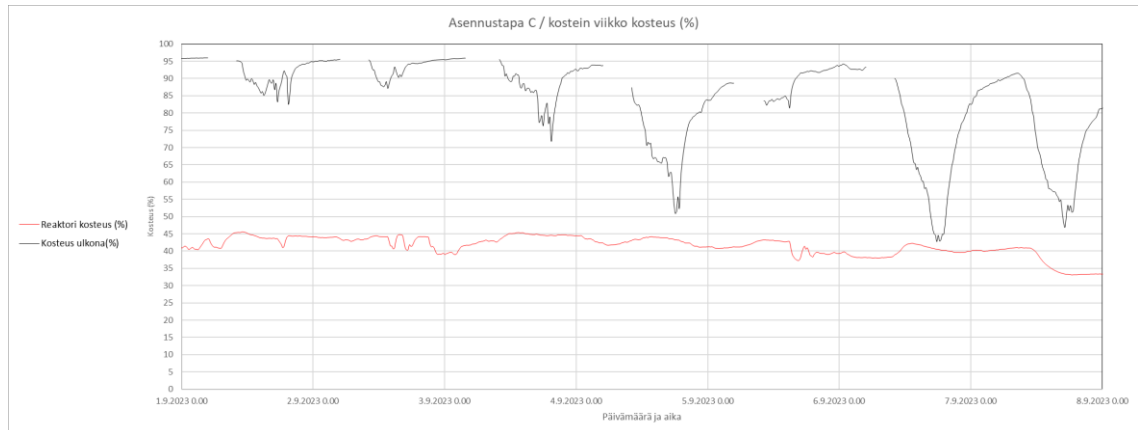
Kuvaajassa 26 on esitetty lämpötilamittaukset laitesuojasta ja Sähkökentältä aikavälillä 09.09. – 16.09.2023. Säävarman laitesuojan lämpötila oli mittausjatkolla suurimmillaan +50°C ja matalimmillaan +45°C. Sähkökentällä lämpötila oli samalla ajanjaksolla suurimmillaan +31°C ja matalimmillaan +4°C.



Kuvaaja 26. Sähkökentän kuumin viikko koekäytön aikana, asennustapa C. (Atte Saarni 2023)

3.6.2 Kostein mittausjakso

Kuvaajassa 27 on esitetty laitesuojasta ja kentältä mitattu kosteus aikavälillä 01.09 – 08.09.2023. Säävarman laitesuojan reaktorin kosteus oli mittausjatkolla suurimmillaan 43 % ja matalimmillaan 21 %. Sähkökentällä kosteus oli samalla ajanjaksolla suurimmillaan 96 % ja matalimmillaan 38 %.



Kuvaaja 27. Sähkökentän kostein viikko koekäytön aikana, asennustapa C. (Atte Saarni 2023)

3.7 Koekäyttömittausten yhteenveto

Koekäyttömittauksia tehtiin rakentamisen ja eri asennustapojen aikana. Taulukoon 5 on kerätty käytön aikaiset mittaukset säävarmasta laitesuojasta, ja sähkökentältä. Taulukossa 5 on esitetty lämpötila, kosteus, sekä lämpenemä.

Asennustapa A käy tilanteissa, joissa laitesuojaa ei saada täysin haudattua, esimerkiksi maaperän kallion vuoksi. Puoleksi haudatun laitesuojan keskiarvo kokonaislämpenemälle on 25,5°C, sekä kosteudelle 25 %.

Asennustapa B käy tilanteissa, joissa laitesuojaa ei saada täysin haudattua, esimerkiksi maaperän kallion vuoksi, mutta sivut halutaan suojata esimerkiksi ilkivaltaa tai pienikaliiperisia aseita vastaan. Metrin syvyyteen haudatun ja sivuistaan suojatun laitesuojan keskiarvo kokonaislämpenemälle on 35,7°C, ja kosteudelle 32,5 %.

Asennustapa C käy tilanteissa, joissa laitesuojalle halutaan paras suojaus ympäröiviltä olosuhteilta. Kahden metrin syvyyteen haudatun laitesuojan keskiarvo kokonaislämpenemälle on 33,8°C, sekä kosteudelle 29,3 %.

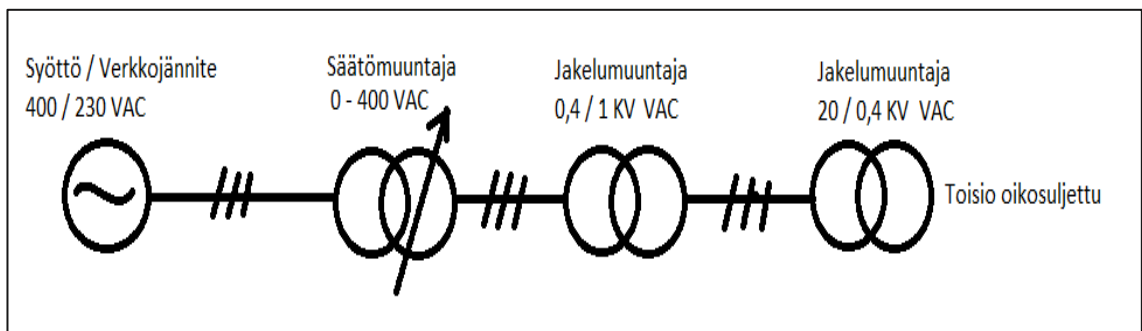
Asennustapa A 20.01 - 01.06.2023	Lämpötila (°C)			Kosteus (%)			Lämpenemä (°C)		
	Min (°C)	Max (°C)	KA (°C)	Min (%)	Max (%)	KA (%)	Min (°C)	Max (°C)	KA (°C)
Säävarma laitesuoja	17,9	50,7	29,1	14,7	37,8	25,0	11,1	45,9	25,5
Sähkökenttä	-16,9	33,4	4,0	22,4	85,5	61,5			
Asennustapa B 01.06 - 07.09.2023	Lämpötila (°C)			Kosteus (%)			Lämpenemä (°C)		
	Min (°C)	Max (°C)	KA (°C)	Min (%)	Max (%)	KA (%)	Min (°C)	Max (°C)	KA (°C)
Säävarma laitesuoja	28,7	58,9	49,2	18,6	43,7	32,5	15,0	56,6	35,7
Sähkökenttä	1,6	33,8	17,5	23,2	96,0	64,8			
Asennustapa C 07.09 - 22.12.2023	Lämpötila (°C)			Kosteus (%)			Lämpenemä (°C)		
	Min (°C)	Max (°C)	KA (°C)	Min (%)	Max (%)	KA (%)	Min (°C)	Max (°C)	KA (°C)
Säävarma laitesuoja	25,9	49,9	35,4	21,1	42,6	29,3	13,6	50,9	33,8
Sähkökenttä	-19,4	30,6	2,4	37,6	95,9	87,2			

Taulukko 5. Koekäyttömittausten yhteenveto. (Atte Saarni 2023)

Kaikille asennustavoille on yhteistä laitesuojan hyvä lämmönhallinta, erinomainen kosteuden hallinta, sekä huomattava turvamarginaali turvallisen käytön rajoihin. Sekä kompensointireaktorin, että jakelumuuntajan eristystasoluokka on F. Tämä eristystasoluokka sallii maksimissaan 105°C kuumimman kohdan lämmöksi, ns. hot spot -lämpötilaksi. Reaktoreissa ja muuntajissa hot spot muodostuu keskimmäisen käämin yläosaan. (NEMA Insulation Classes)

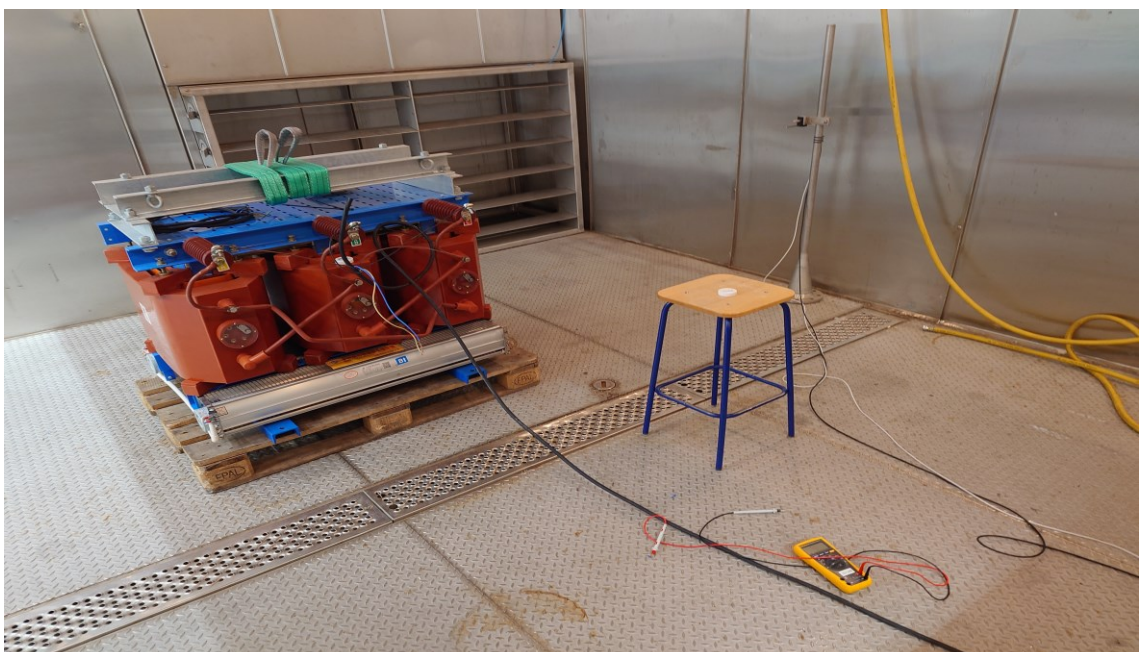
3.8 Jakelumuuntajan suurjännitelaboratoriotestit

Jakelumuuntajan lämpenemän käyttäytymistä testattiin Tampereen yliopiston suurjännitelaboratorion säahuoneessa 27 - 30.11.2023. Kuvassa 21 on esitetty mittausjärjestely. Mittauksissa käytettiin 1 kilovoltin jännitettä jakelumuuntajan ja laitesuojan testeissä, matalampi jännitetaso paransi työturvallisuutta mittausjärjestelyissä.



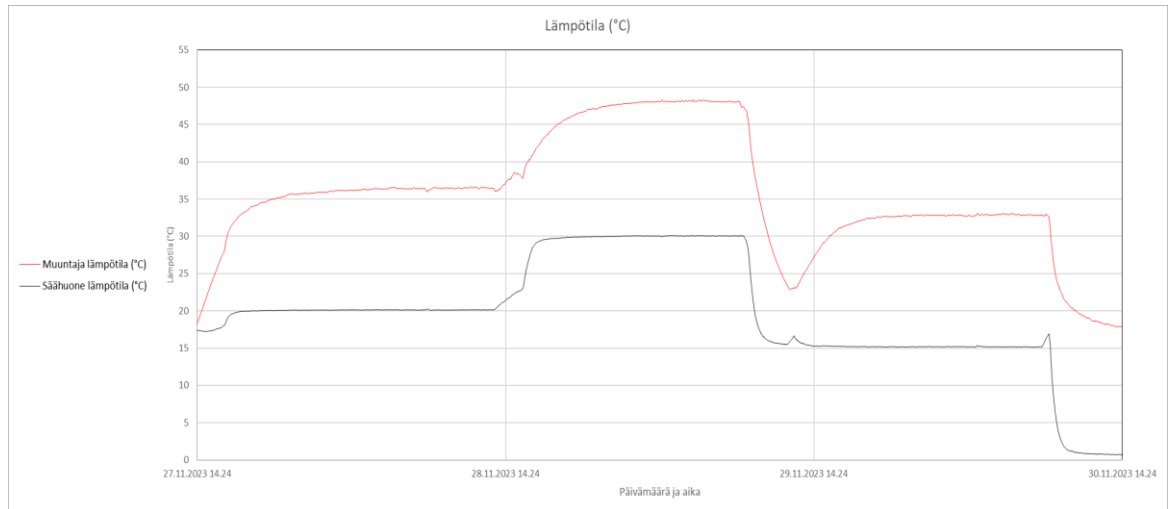
Kuva 21. Mittausjärjestely. (Atte Saarni 2023)

Mittaukset suurjännitelaboratorion säahuoneessa suoritettiin muuntajan ja säavarman laitesuojan lämpenemäprofiilin määrittämiseksi, sekä maanalaisen jakeluverkkoinfrastruktuurin tutkimuksen ja kehityksen avuksi. Kuvassa 22 testijärjestelyjen rakennus säahuoneessa.



Kuva 22. 50 KVA kuivamuuntaja säahuoneessa. (Atte Saarni 2023)

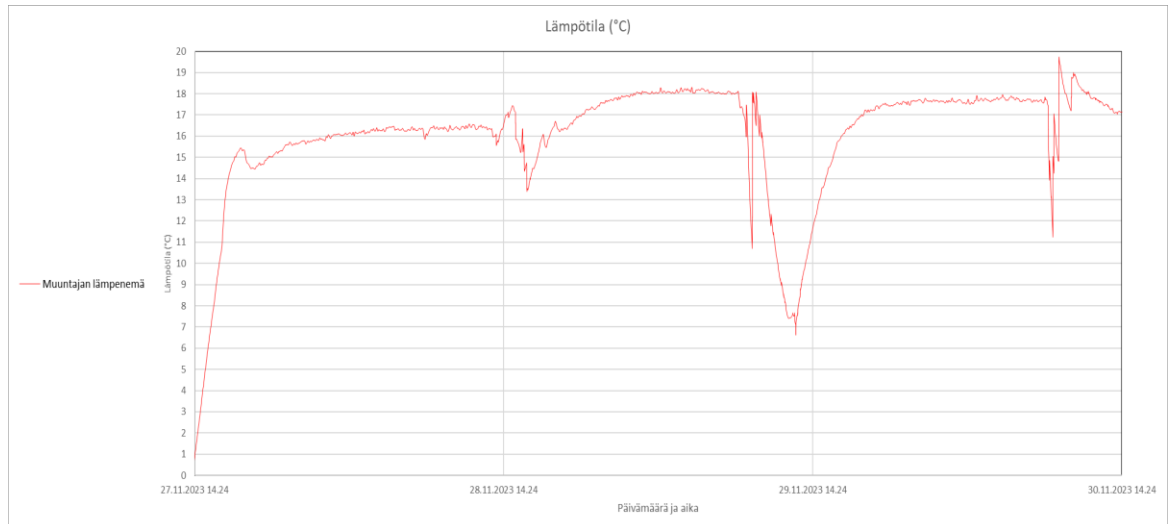
Lämpötilamittausten osalta järjestely vastaa kentällä tapahtuvaa olosuhdemonitorointia. Lämpötilasensori mittaa keskimmäisen käämin pintalämpötilaa, ulkolämpötilamittaus sensori säähuoneen lämpötilaa. Kuvaajassa 28 on esitetty lämpötilamittaukset muuntajasta ja säähuoneesta.



Kuvaaja 28. Muuntajan ja Säähuoneen lämpötilamittaukset. (Atte Saarni 2023)

Muuntajan hukateho on 20 KV jakeluverkkojärjestelmässä 1323W, 1,44 ampeerin nimellisvirralla. Mittauksissa muuntajan primääripuolelle syötettiin virtaa (1,5–1,549A) ja sekundääripuoli oikosuljettiin. Lämpenemä testattiin Säähuoneessa lämpötiloissa 0°C, 15°C, 20°C ja 30°C.

Kuvaajassa 29 on esitetty muuntajan lämpenemä testilämpötiloissa ja näistä muodostunut lämpenemäprofiilin kuvaaja. Kokeen nopeuttamiseksi muuntaja kytkettiin jännitteettömäksi testien välillä, tämä aiheuttaa kuvaajan piikit.



Kuvaaja 29. Muuntajan lämpenemäprofiili. (Atte Saarni 2023)

Kuvaajasta 29 voi tulkita, että vapaasti jäähtyvänä muuntajan keskimmäisen käämin lämpenemä asettui suurimmillaan 18°C asteeseen. Mittauksilla tutkittiin pintalämpötilamittauksen suhdetta lämpenemään. Muuntajan virallinen IEC testiprotokollan mukainen lämpenemä on testattu laitevalmistajan tehtaalla, tästä tulokset esitetty liitteessä 3.

3.8 Maanalaisen laitesuojan suurjännitelaboratoriotestit

50 KVA kuivamuuntajan ja maanalaisen laitesuojan yhteistestit suoritettiin 18.12 - 29.12.2023. Muuntaja asennettiin laitesuojan sisälle ja sitä kuormitettiin vaihtelevissa lämpötiloissa. Mittausjärjestelyt olivat kuvan 21 mukaiset. Säähuoneen ja jakelumuuntajan olosuhteiden lisäksi mitattiin jakelumuuntajan primääri-, ja sekundääripuolen resistanssia ja niiden muutosta lämpötilan funktiona. Kuvassa 23 käynnissä laitesuojan mittausjärjestelyjen teko.



Kuva 23. Säävarma laitesuoja 50 KVA kuivamuuntaja sisällään. Etualalla 1/0,4 KV testimuuntaja. (Atte Saarni 2023)

3.8.1 Laitesuojan lämpenemä vapaasti jäähtyvänä

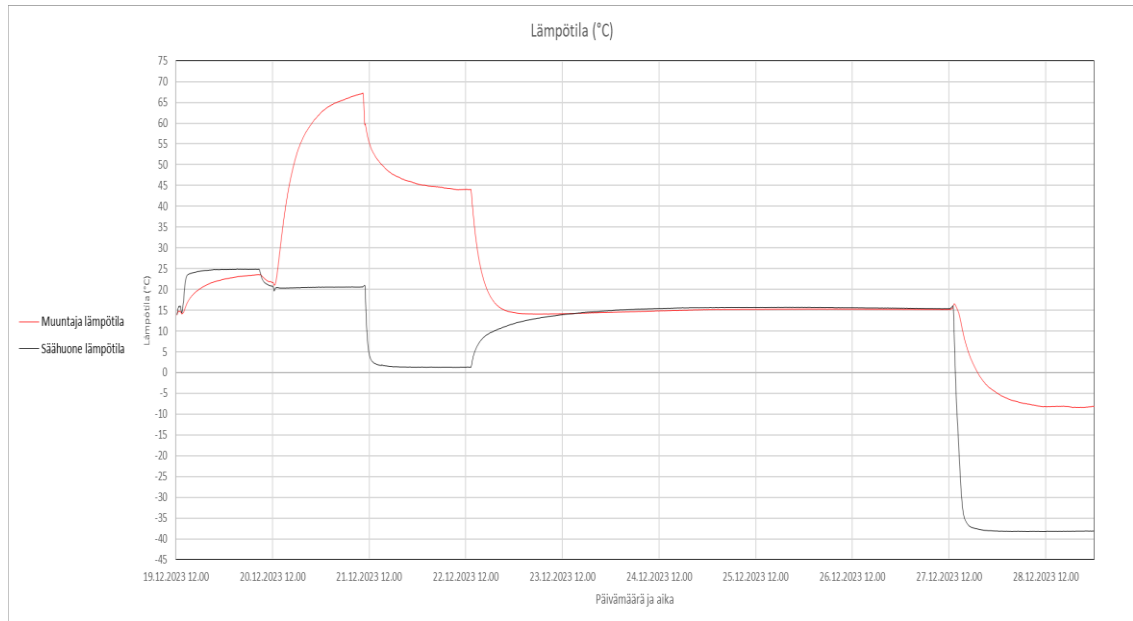
Laitesuoja on suunniteltu ja mitoitettu haudattavaksi, tätä ei voitu käytännön vuoksi toteuttaa laboratorio-olosuhteissa. Vapaasti jäähtyvän laitesuojan mitaustietoa voidaan hyödyntää maajäähdytyksen tehon arvioinnissa, sekä energiatehokkuuden ja lämpötilan suhteen määrittämisessä.

Kuvassa 24 säävarma laitesuoja ja 50 KVA jakelumuuntaja säähuoneessa.



Kuva 24. Säävarma laitesuoja ja kuivamuuntaja lämpenemättestissä. (Atte Saarni 2023)

Kuvaajassa 30 on esitetty säävarman laitesuojan ja 50 KVA jakelumuuntajan yhteislämpenemä vapaasti jäähtyvänä säähuoneen lämpötiloissa -40°C , 0°C , 20°C .



Kuvaaja 30. Laitesuojan lämpenemäprofiili. (Atte Saarni 2023)

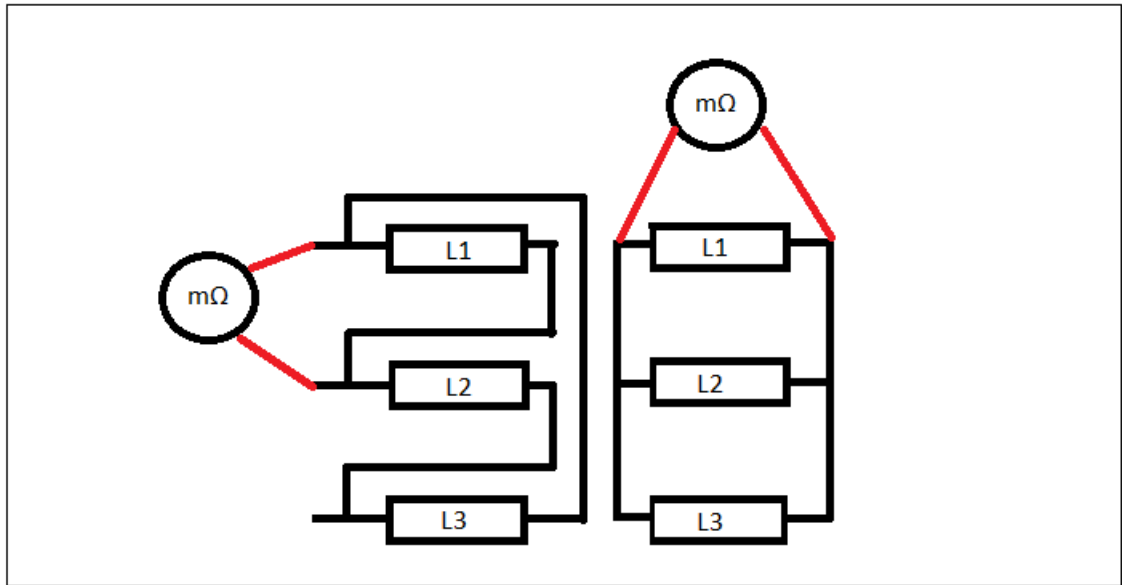
Kuvaajasta 30 voi havaita, että maan päälle asennettuna ja vapaasti jäähtyvänä laitesuoja saavuttaa 68°C lämpötilan, kun ulkolämpötila on 20°C . Vastaavasti, kun ulkolämpötila on -40°C , laitesuojan lämpötila on -8°C .

Mittausten perusteella laitesuojaa voidaan käyttää turvallisesti myös vapaasti jäähtyvänä, maan päälle asennettuna. Tällöin suojattujen laitteiden energiatehokkuus ja elinikä laskee. Laitesuojaa voidaan käyttää väliaikaisesti hätäasennuksena katastrofialueen sähkönjakelun palauttamiseksi, ennen lopullista asennusta.

3.8.2 Lämpötilan vaikutus energiatehokkuuteen

Lämpenemätestien aikana mitattiin jakelumuuntajan primääri- ja sekundääripuolten resistanssin arvoja eri lämpötiloissa milliohmi -mittarilla. Mittausten ajaksi muuntaja varmistettiin jännitteettömäksi ja syöttö purettiin primääripuolelta. Primääripuolella mittaus tehtiin vaiheiden L1 – L2 väliltä. Sekundääripuolella

käämit pidettiin oikosuljettuna ja käämien L1 – L2 – L3 muodostama rinnakkaisresistanssi mitattiin. Mittausjärjestely esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Jakelumuuntajan resistanssimittausten järjestely. (Atte Saarni 2023)

Taulukossa 6 on esitetty mittausten tulokset eri lämpötiloissa. Taulukossa vaalean sinisellä pohjalla esitetyt resistanssimittaukset ovat kylmämittauksia, jakelumuuntajaa ei kuormitettu ja sen annettiin tasaantua säähuoneen lämpötilaan ennen mittausten suorittamista. Taulukkoon on lisätty myös laskennallinen kuparin ideaali resistanssi sekundääripuolella. Referenssipisteenä on käytetty kylmämittaustulosta $8,7 \Omega$ muuntajan lämpötilan ollessa $21,7^{\circ}\text{C}$.

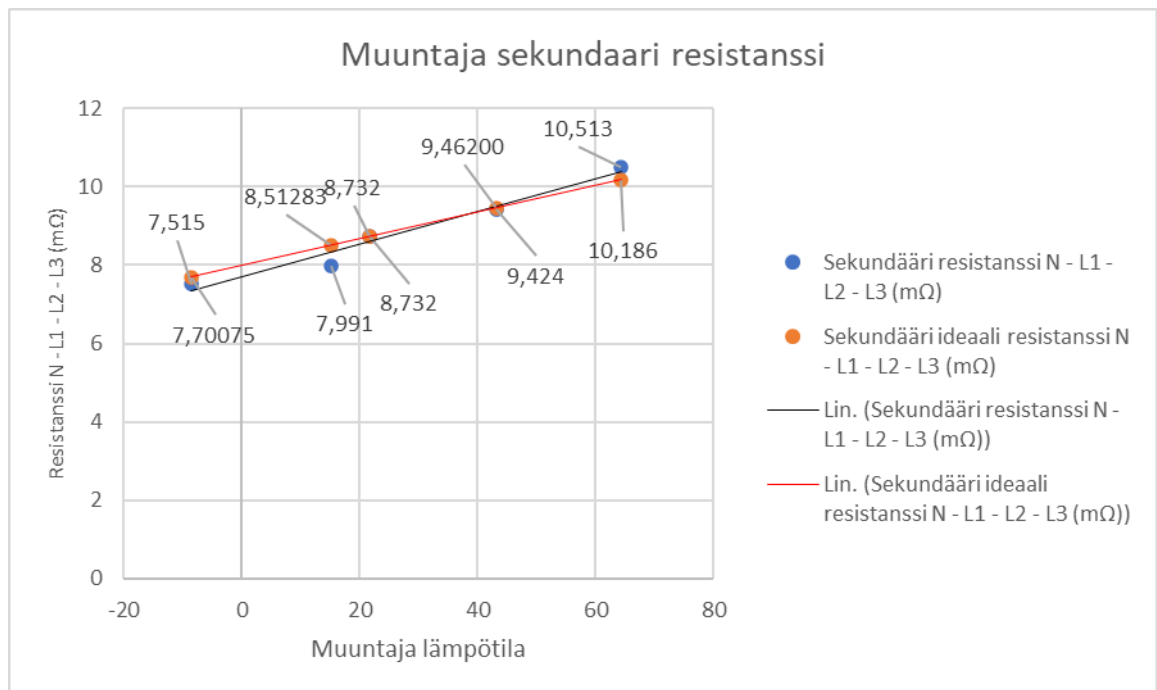
Päivämäärä	Säähuone lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)	Muuntajan lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)	Primääri resistanssi L1 - L2 (Ω)	Sekundääri resistanssi N - L1 - L2 - L3 (m Ω)	Sekundääri ideaali resistanssi N - L1 - L2 - L3 (m Ω)
20.12.2023 11:55	20,9	21,7	250,6	8,7	8,7
21.12.2023 10:40	21,0	64,4	299,4	10,5	10,2
22.12.2023 13:20	1,4	43,1	274,6	9,4	9,5
27.12.2023 12:25	15,6	15,3	235,0	8,0	8,5
29.12.2023 10:10	-36,7	-8,6	237,1	7,5	7,7

Taulukko 6. Lämpenemätestin aikana suoritettujen resistanssimittausten tulokset. (Atte Saarni 2023)

Taulukosta 6 voi huomata, että käämikuparin resistiivisyys muuttuu lämpötilan mukaan. Lämpötilan noustessa resistanssi kasvaa ja vastaavasti laskee lämpö-

tilan laskiessa. Mittauksista tarkempina pidettiin sekundääripuolen resistanssimittauksia, jakelumuuntajan kuparihäviöt aiheutuvat suurimmaksi osaksi sekundääripuolen käämityksissä.

Kuvaajassa 31 on esitetty mittaustulokset jakelumuuntajan sekundääripuolen resistanssista, ideaalin kuparin resistanssin laskennalliset arvot, sekä molemmista piirretty lineaarinen trendiviiva.



Kuvaaja 31. 50 KVA jakelumuuntajan sekundääripuolen resistanssi eri lämpötiloissa. (Atte Saarni 2023)

Kuvaajan perusteella voi huomata, että resistanssimittaukset vastaavat hyvin kuparin ideaalin resistanssin teoreettista muutosta lämpötilan vaikutuksesta.

Tästä on päätelty, että laitesuojan lämpötilalla on suora vaikutus laitteiden energiatehokkuuteen ja lämpötilamittaus on luotettava tapa arvioida energiatehokkuutta. Kuparin lämpötilakerroin on $0,0039/^\circ\text{C}$. Lämpötilan nousu 20°C asteen verran kasvattaa muuntajan resistanssia, joka lisää häviöitä 7,8 %. Tällöin myös muuntajien hyötysuhde ja energiatehokkuus laskevat 7,8 %.

3.9 Suurjännitelaboratoriomittausten yhteenveto

Tampereen yliopiston sähkötekniikan osaston suurjännitelaboratoriossa suoritettiin mittauksia ja testejä säävarmalle jakeluverkkoinfralle 27 - 30.11.2023 ja 19.12 - 29.12.2023. Testeissä kerättiin olosuhdemittauksia 50 KVA jakelumuuntajasta ja laitesuojasta. Mittauksilla tutkittiin säävarman laitesuojan ja muuntajan lämpötiloja ja niistä johdettuja lämpenemiä. Lisäksi tutkittiin vapaasti jäähtyvän laitesuojan suorituskykyä ja turvallisuutta, sekä lämpötilan vaikutusta energiatehokkuuteen. Testejä tehtiin säähuoneen lämpötiloissa -40°C - $+30^{\circ}\text{C}$.

Testien perusteella laitesuojaa ja 50 KVA jakelumuuntajaa on mahdollista käyttää turvallisesti myös maanpäälle asennettuna. Asennustapa laskee energiatehokkuutta ja suojattujen laitteiden elinikää, mutta mahdollistaa nopean väliaikaisen asennuksen. Tämä voi olla hyödyllistä esimerkiksi laajan myrskytuhon tai hyökyaallon jälkeen, jotta yhteiskunnan kriittiset toiminnot saadaan palautettua nopeasti.

Mittaustietoa voidaan hyödyntää passiivisen ja aktiivisen jäähdytyksen optimointiin. Laitesuojan halkaisijaa ja korkeutta kasvattamalla, sekä alumiinin vahvuudella voidaan vaikuttaa laitesuojan passiiviseen jäähdytyskykyyn. Jakelumuuntajan puhaltimia voi hyödyntää esimerkiksi lämpötilaennusteeseen perustuvan ohjauksen kautta. Tällöin hellejaksoihin voidaan varautua jäähdyttämällä laitesuojaa puhaltimilla.

Energiatehokkuuden arvioinnissa käytettiin menetelmänä resistanssin muutoksen mittausta lämpötilan vaikutuksesta. Mittaukset vastaavat hyvin tunnettua tietoa kuparin resistanssin lämpötilakertoimesta. Kuparikäämisen muuntajan energiatehokkuuden voi olettaa laskevan lämpötilan noustessa. Lämpötilan nousu heikentää energiatehokkuutta $3,9\ \%/10^{\circ}\text{C}$.

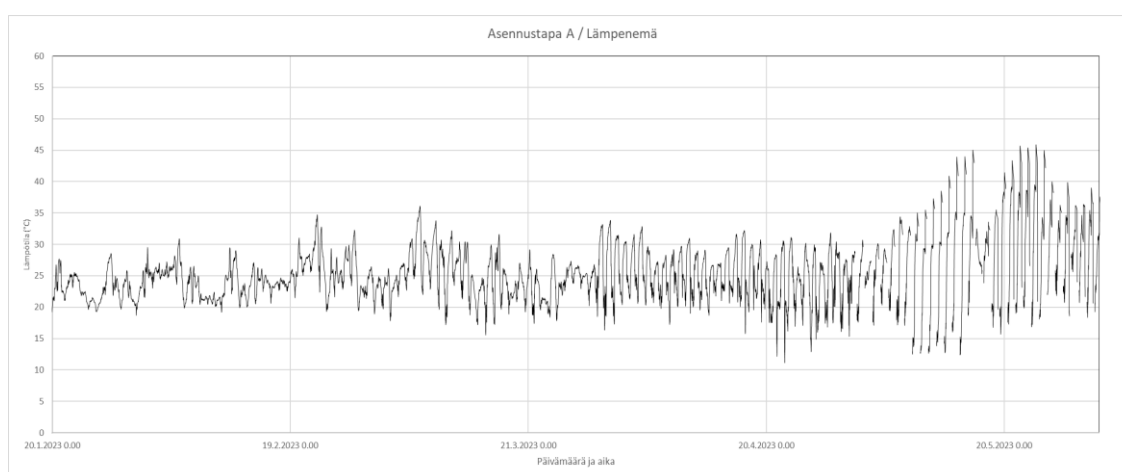
3.10 Tutkimusmittausten yhteenveto

Maanalaisen äly sähköverkon rakentamisesta ja koekäytöstä on kerätty tietoa 2022–2023 yli 8700 tuntia. Säävarman laitesuojan lämpötila ja kosteusmittaukset ovat mahdollistaneet tuotekehityksen ratkaisujen testaamisen kenttäkokeilla sähkölaboratoriokokeiden lisäksi.

3.10.1 Laitesuojan lämpötilan hallinta

Kuvaajassa 32 on esitetty säävarman laitesuojan ja reaktorin yhteislämpenemä 20.1.2023 - 1.6.2023, asennustapa A. Yhteislämpenemä on säävarman laitesuojan reaktorin ja Sähkökentän lämpötilan välinen erotus. Säävarman laitesuojan ja kompensointireaktorin lämpenemä oli asennustapa A:n mittausjatkolla suurimmillaan 45,9°C ja matalimmillaan 11,1°C.

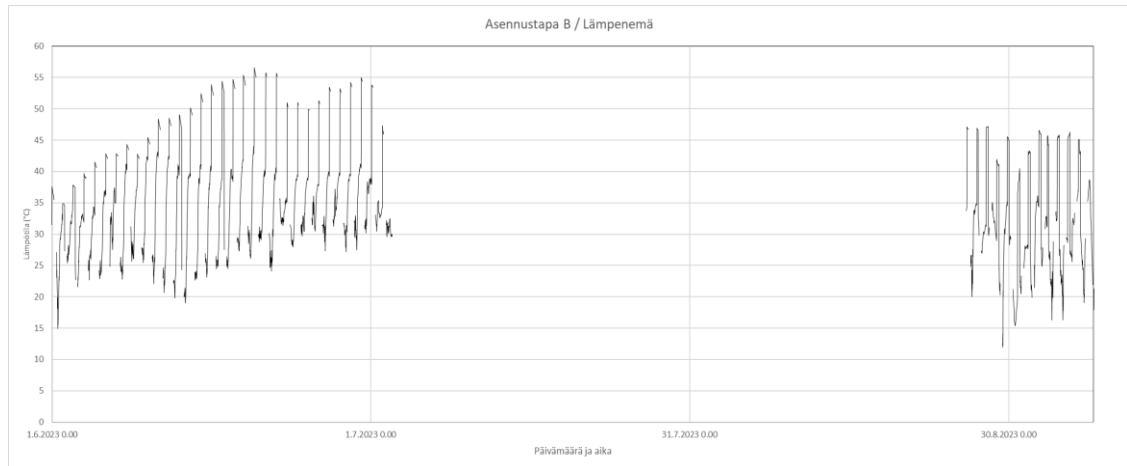
Mittausjakson keskiarvo lämpenemälle on 25,5°C. Tehdastestien perusteella reaktorin lämpenemä on kokonaislämpenemästä 12,5°C, jolloin asennustapa A:n mittausjakson keskiarvo säävarman laitesuojan lämpenemäluokalle on 13K.



Kuvaaja 32. Säävarma laitesuoja ja kompensointireaktori yhteislämpenemä, asennustapa A. (Atte Saarni 2023).

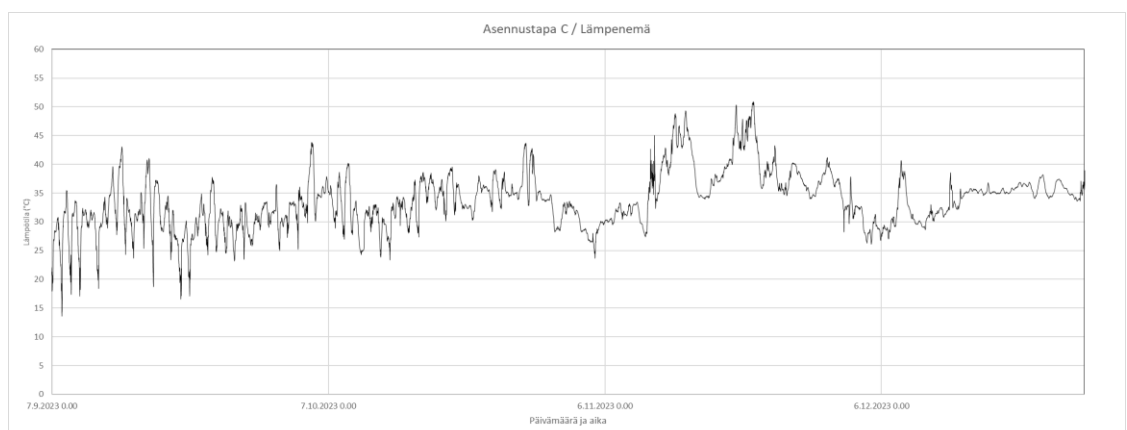
Kuvaajassa 33 on esitetty säävarman laitesuojan ja reaktorin yhteislämpenemä 01.06.2023 – 07.09.2023, asennustapa B. Säävarman laitesuojan ja kompen-

sointireaktorin lämpenemä oli mittausjatkolla suurimmillaan 56,6°C ja matalimmillaan 15°C. Asennustapa B:n mittausjakson keskiarvo lämpenemäluokalle on 23,2K.



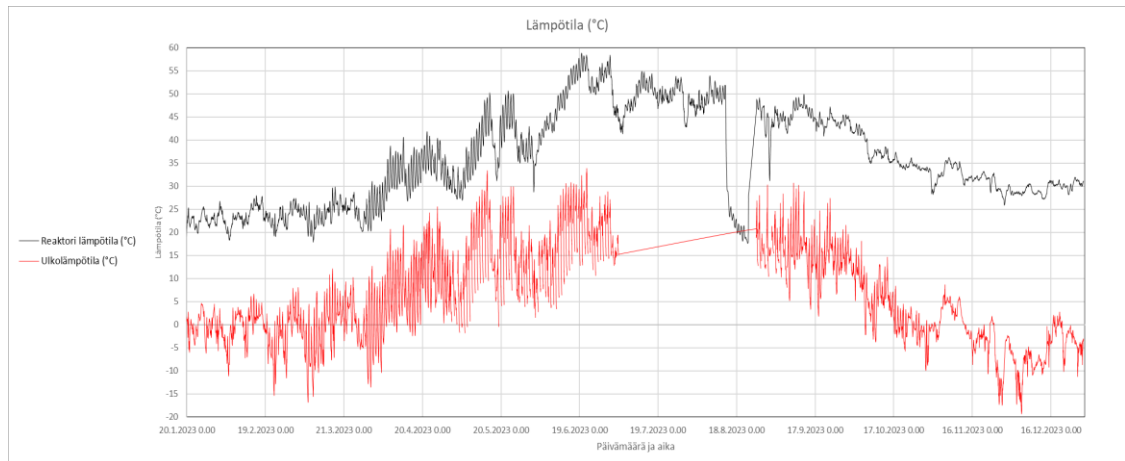
Kuvaaja 33. Säävarma laitesuoja ja kompensointireaktori yhteislämpenemä, asennustapa B. (Atte Saarni 2023)

Kuvaajassa 34 on esitetty säävarman laitesuojan ja reaktorin yhteislämpenemä 01.09.2023 – 22.12.2023, asennustapa C. Säävarman laitesuojan ja kompensointireaktorin lämpenemä oli mittausjatkolla suurimmillaan 50,9°C ja matalimmillaan 13,6°C. Asennustapa C:n mittausjakson keskiarvo lämpenemälle on 21,3K.



Kuvaaja 34. Säävarma laitesuoja ja kompensointireaktori yhteislämpenemä, asennustapa C (Atte Saarni 2023)

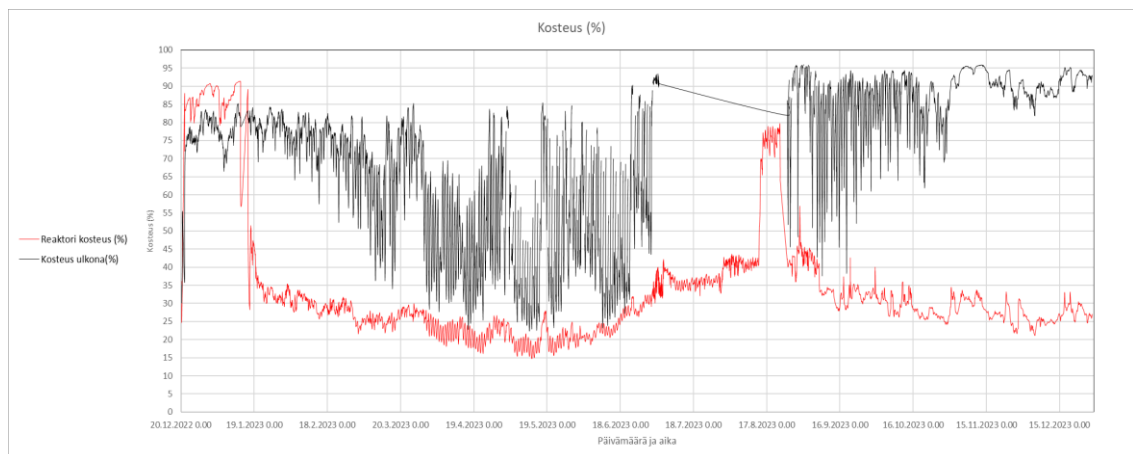
Kuvaajassa 35 on esitetty säävarman laitesuojan ja Sähkökentän lämpötilamittaukset. Säävarman laitesuojan lämpötilan vaihteluväli oli asennustavalla A 32,8°C, Sähkökentällä 53°C. Asennustapa B säävarman laitesuojan lämpötilan vaihteluväli 30,1°C, Sähkökentällä 32,2°C. Asennustapa C säävarman laitesuojan lämpötilan vaihteluväli 24,1°C, Sähkökentällä 50°C.



Kuvaaja 35. Sähkökentän ja säävarman laitesuojan lämpötilat koekäytön aikana. (Atte Saarni 2023)

3.10.2 Laitesuojan kosteuden hallinta

Laitesuojan lämpötilan lisäksi tärkeä olosuhdemittaus on kosteus. Ei toivotut reaktiot kuten metallien hapettuminen ja eristeiden jännitekestoisuuden laskeminen tapahtuvat suurissa ympäristön kosteuksissa. Kuvaajassa 36 Sähkökentän ja säävarman laitesuojan kosteusmittaukset.



Kuvaaja 36. Sähkökenttä ja säävarma laitesuoja kosteus koekäytön aikana, asennustapa A. (Atte Saarni 2023)

Säävarman laitesuojan koekäyttöjen aikainen kosteuden suuruus ja vaihteluväli on huomattavasti pienempi kaikilla asennustavoilla, verrattuna Sähkökenttään. Säävarman laitesuojan kosteuden vaihteluväli oli asennustavalla A 23 %, Sähkökentällä 63,1 %. Asennustapa B säävarman laitesuojan kosteuden vaihteluväli 25,1 %, Sähkökentällä 72,8 %. Asennustapa C säävarman laitesuojan kosteuden vaihteluväli 21,5 %, Sähkökentällä 58,3 %.

3.11 Tutkimusmittausten vertailu

Suomalainen jakeluverkkoyhtiö toteutti verkossaan 2019 tutkimuksen erottimilla varustettujen puistomuuntamoiden kosteusolosuhteista. Tutkimuksen suoritti P2 Engineering Oy. Mittauksia suoritettiin 9.4.2019 – 09.07.2019. Tutkimuksessa seurattiin erottimien ja eristimien kosteuden käyttäytymistä, sekä Leca -soran ja lisälämmittimien vaikutusta kosteusmittauksiin. Mittaukset suoritettiin useasta kohtaa puistomuuntamon sisältä ja niitä verrattiin ulkomittauksiin.

Tutkimuksen perusteella, kennojen eristimistä ja kaapelipääteistä kerätyt kosteusmittaukset olivat kesällä -5 % - -10 % ulkokosteusmittauksia pienempiä. Lisälämmittimellä ja puhaltimella saavutettiin -10 % kuivempi sisäilmaan. (P2 Engineering Oy, Pasi Lauri, 2019)

Tästä voi päätellä, että kyseisten puistomuuntamoiden sisällä vallitsee lähes ulkotiloja vastaavat olosuhteet kosteuden osalta. Tämä aiheuttaa haasteita suojattavan infran käyttöolosuhteille ja esimerkiksi kondensointi voi aiheuttaa ruostumista ja läpilyöntejä. Helleaallossa pitkäjatkoiset korkeat lämpötilat voivat aiheuttaa vikaantumisia, sekä energiatehokkuuden ja komponenttien eliniän laskua.

4 RAKENNUSTAPA JA KUSTANNUSVERTAILU

4.1 Nykyinen rakennustapa

Nykyisen rakennustavan puistomuuntamon rakentaminen voidaan jakaa maanrakennustöihin, laitesuojan ja muuntajakoneen asennukseen, sekä kaapelointiin.

Maanrakennus käsittää asennusalueen raivauksen ja mahdolliset puiden poiston, pintamaan vaihdon, läpivientiputkitusten ja maadoitusten asennuksen. Tämän lisäksi saatetaan kopin alusta myös routaeristää eristyslementeillä.

Perustuksille asennetaan usein myös sokkeli, jonka päälle varsinainen laitesuoja tulee. Muuntajakone nostetaan usein laitesuojan katon kautta laitesuojan muuntajakennoon.

Kaapelointi käsittää keski- ja pienjännitekaapelien vedon läpivientien kautta muuntamon kennoihin, sekä niiden päättämistä ja kytkentää.

4.2 Maanalainen rakennustapa

Maanalaisessa rakennustavassa säävarmaa laitesuojaa varten kaivetaan laitepeti, johon laitesuoja lasketaan. Suojattava komponentti, kuten reaktori tai muuntaja asennetaan tehtaalla laitesuojaan. Tämän lisäksi läpiviennit, pienjännitekeskus ja mittauslaitteisto voidaan lisätä tehtaalla.

Keski- ja pienjännitekaapelit tuodaan laitesuojan läpivienneistä lisälle ja ne päätetään ja kytketään. Pienjännitekaapelointi voidaan toteuttaa laitesuojan viereen tai kylkeen asennetussa pienjännitekeskuksessa.

4.3 Rakennustavan vertailu

Taulukossa 7 on esitetty nykyisen ja maanalaisen rakentamisen eroja. Olen lisäksi arvioinut tarvittavaa henkilöstömäärää, kalustoa, sekä asennuksiin käytettyä työtuntimäärää. Näistä voi saada alustavaa käsitystä rakentamisen logistiikan ja kustannusten määristä.

	Nykyinen rakennustapa	Maanalainen rakennustapa
Logistiikka	Sokkeli, laitesuoja ja muuntajakone toimitetaan työmaalle varastoon tai lähelle sijoituspaikkaa joko yhdessä tai erikseen. Maa-aines toimitetaan työmaalle erikseen. Kuorma-auto tai rekka.	Laitesuoja laitteineen toimitetaan ka- sattuna paikoilleen. Nostimella varus- tettu auto.
Maatyöt	Pintamaa poistetaan 4 m x 4 m x 0,5 m alueelta ja maa-aines vaihdetaan. Peittely ja täytöt asennuksen jälkeen uudella maa-aineksella.	Laitepeti 2,5 m x 2,5 m x 2 m kaivu- peittely poistetulla maalla.
Asennus	Sokkelin nosto paikoilleen, laitesuojan nosto sokkelin päälle, katon irrotus ja muuntajakoneen nosto laitesuojaan, kaapelointi. 2–3 asentajaa, nostokalusto, 16–24 työtuntia.	Laitesuojan lasku laitepedille, kaapelointi. 2 asentajaa, nostimella varustettu auto, 8 työtuntia.

Taulukko 7. Rakennustapojen yhteenveto. (Atte Saarni 2023)

Alustavan arvion mukaan maanalainen rakennustapa on työmäärältään vähemmän henkilöstöä ja kalustoa vaativa verrattuna nykyiseen maanpäälliseen rakennustapaan. Työmaan logistiikasta johtuvat kulut ja päästöt on arvioitu nykyistä tapaa pienemmiksi. Laitteet toimitetaan valmiiksi kasattuina ja kompaktin rakenteen vuoksi niitä voidaan lastata kerralla useampi kyytiin vähentäen tarvittavan logistiikan määrää.

4.4 Kustannusten vertailu

Jakeluverkon puistomuuntamoiden ja kompensointiyksiköiden kustannukset voidaan jakaa laiteinvestointeihin, rakennuskustannuksiin, sekä kunnossapitokustannuksiin. Laiteinvestointien kustannuksia voi arvioida Suomen Energiaviraston ylläpitämän yksikköhintaluettelon avulla. (Energiavirasto, 2022)

Taulukossa 8 on vertailtu nykyisen ja maanalaisen rakennustavan kustannuksia. Laiteinvestointien kustannuksien arvioidaan olevan samankaltaisia rakennustapojen välillä. Rakennuskustannuksilta maanalainen rakennustapa voi olla nykyistä rakennustapaa 50 % – 75 % kustannustehokkaampaa. Maanalainen jakeluverkkoinfran olosuhdetietoja keräämällä voidaan tehdä ennakoivaa huoltoa tarvittaessa. Kunnossapitokustannukset arvioidaan noin 90 % nykyisiä pienemmiksi.

	Nykyinen rakennustapa	Maanalainen rakennustapa
Investointi ja rakennuskustannukset	Energiaviraston yksikköhintaluettelo 2023.	Pienemmät.
Huolto ja tarkastukset	Öljynäytteet, koestukset, graffitien ja ruostumien poisto ja pintakäsittely.	Huoltovapaa, 24/7 etämonitorointi
Energiatehokkuus	Tier 2	Parempi.

Taulukko 8. Rakennustapojen kustannusten vertailua. (Atte Saarni 2023)

Energiatehokkuutta parannetaan passiivisen ja aktiivisen jäähdytyksen keinoin, sekä energiatehokkaiksi suunnitelluilla muuntajilla ja reaktoreilla. Tuotekehityksellä pyritään EU: ekodirektiivin määräämää Tier 2:ta energiatehokkaampiin laitteisiin. (Euroopan unionin komissio, 2014)

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkielmassa tarkastellaan kriittistä infrastruktuuria, Suomen kanta- ja jakeluverkon modernisaatiota, sekä esitellään säävarman ja älykkään jakeluverkon tutkimushankkeen mittaustuloksia sekä havaintoja. Tutkimusmittaukset kattavat 20.12.2022 - 22.12.2023 jakson, joka sisältää älyverkon rakentamisvaiheen ja koekäyttömittaukset. Tulokset auttavat maanalaisen jakeluverkoinfrastruktuurin kehittämisessä.

Tutkimushankkeen alustavien mittaustulosten perusteella säävarma laitesuoja suoriutuu hyvin kaikissa olosuhteissa. Säävarman laitesuojan asennustapojen kosteusmittausten keskiarvo oli 31,7 %, tämä on erinomainen käyttöympäristö useimmille sähkölaitteille.

Tutkielman tulokset osoittavat, että säävarma laitesuoja kykenee hallitsemaan hyvin lämpötilaa ja kosteutta. Tämä parantaa laitteiden luotettavuutta ja energiatehokkuutta ja vähentää ei-toivottujen reaktioiden, kuten metallien hapettumisen ja eristeiden jännitekestoisuuden laskemisen, todennäköisyyttä.

Säävarman laitesuojan asennustapojen lämpötilan vaihteluvälin keskiarvo oli 23,2°C, Sähkökentällä 44,2°C. Kosteuden osalta säävarman laitesuojan vaihteluvälin keskiarvo asennustapojen aikana oli 25 %, Sähkökentällä 64,2 %. Nämä tulokset osoittavat, että säävarma laitesuoja tarjoaa tasaisen ja suotuisan toimintaympäristön yhteiskunnan kriittiselle infrastruktuurille.

Tampereen Yliopistolla suoritettujen suurjännitelaboratoriotestien perusteella laitesuojaa on mahdollista käyttää pinta-asennettuna turvallisesti. Maanpäällinen asennustapa mahdollistaa nopean asennuksen, mutta korkeampi lämpötila laitesuojoissa väistämättä laskisi pitkällä aikavälillä suojattavien laitteiden elinikää. Tämä voi olla perusteltu asennustapa myrskytuho- ja konfliktialueilla sähköenergianjakelun nopean palauttamisen mahdollistamiseksi.

Suurjännitelaboratoriomittauksilla saatiin osoitettua, että lämpötila vaikuttaa suoraan muuntajan kääniresistansseihin ja energiatehokkuuteen. Tätä tietoa voidaan hyödyntää jäähdytyksen ohjauksessa. Yhdistämällä mittaustieto laite-

suojasta sääennusteeseen ja sähköenergian hintatietoon, voidaan luoda yksinkertainen koneoppimismalli, joka ohjaa jäähdytystä optimaalisesti.

Rakentamisen ja kunnossapidon kustannuksia arvoitiin vertaamalla rakennustapoja, sekä kunnossapidon ja huollon tarvetta. Laiteinvestointien kustannukset arvioidaan olevan tällä hetkellä nykyisiä ratkaisuja vastaavia. Massavalmistettuina maanalaisen rakennustavan laitteet voivat olla kuitenkin merkittävästi nykyisiä ratkaisuja kustannustehokkaampia.

Rakentamisen osalta maanalainen rakennustapa voi olla 50 % - 75 % kustannustehokkaampaa verrattuna nykyiseen rakennustapaan. Maanalaisessa rakennustavassa on vähemmän työvaiheita, johtuen tehtaalla tehtävästä esikasauksesta. Kompaktit laitteet vähentävät myös tarvittavan logistiikan määrää. Kustannuksien lisäksi tämä vähentää jakeluverkon rakentamisen hiilijalanjälkeä.

Kunnossapitoa ja huolto voi olla maanalaisessa rakennustavassa merkittävästi kustannustehokkaampaa. Tämä johtuu huoltovapaista laitteista, laitesuojan tarjoamista olosuhteista, sekä etämonitoroinnista. Maanalaisen infrastruktuurin kunnossapidon kustannuksien arvioidaan olevan 90 % pienemmät verrattuna nykyiseen rakennustapaan

Yhteenvetona voidaan todeta, että maanalainen rakennustapa tarjoaa etuja nykyiseen rakennustapaan verrattuna. Säävarma laitesuoja mahdollistaa tehokkaan lämpötilan ja kosteuden hallinnan. Tämä parantaa laitteiden luotettavuutta, energiatehokkuutta, sekä elinikää. Nämä tulokset ovat tärkeitä maanalaisen jakeluverkkoinfran kehittämisen kannalta.

6 JATKOTUTKIMUS SEKÄ TUOTEKEHITYS

Maanalaisen rakentamisen hyödyt ovat sovellettavissa ja skaalattavissa mo-
neen käyttötarkoitukseen. Tutkielma keskittyy jakeluverkkojen kriittisten kompo-
nenttien suojaamiseen. Laitesuoja voidaan varustaa droonijärjestelmien lasku-,
lataus- ja viestijärjestelmällä, tai valmiilla rajapinnalla jälkiasennuksen mahdol-
listamiseksi.

6.1 Jakeluverkot

Ilmastonmuutoksen vaikutusta sähköenergiajärjestelmään tutkitaan paljon.
Maanalainen rakennustapa on keino suojata sähköverkkoa tulevaisuuden sää-
ilmiöiltä. Jatkotutkimus maaperän kyvystä suojata ja jäähdyttää rakenteita voisi
tuota lisätietoa laitteiden kehitystä varten. Tämän lisäksi vikapaikan rajaamista
ja paikantamista nopeuttavat menetelmät parantaisivat verkon luotettavuutta.
Säävarma mittaussuoja mahdollistaa mittalaitteiden sijoittamisen maakaapeliin,
jolloin vikamittausten tarkkuutta voitaisiin parantaa lisäämällä mittauksia jakelu-
verkkoon.

6.2 Dronijärjestelmät

Dronijärjestelmiä varten säävarman laitesuojan kansi voidaan varustaa lasku-
ja latausalustalla. Tämä mahdollistaisi yhteisen lataus- ja laskualustan drooneil-
le. Dronit voivat esimerkiksi valvoa jakeluverkon kuntoa, osallistua pelastus-
tehtäviin, sekä suorittaa aluevalvontaa. Tällainen järjestelmä voisi olla jakelu-
verkko-operaattorin, puolustusvoimien ja pelastusviranomaisten yhteiskäytössä.
Yhteiskäyttö vähentäisi päällekkäisiä järjestelmiä ja vähentäisi kustannuksia.

LÄHTEET

Huoltovarmuuskeskus. 2005. CIP – kriittisen infrastruktuurin turvaaminen. Viitattu 27.01.2024.

https://www.huoltovarmuuskeskus.fi/files/019d67575f48fdb84212fd8bd9164b8ac8829ccd/cip-raportti_final.pdf

Fingrid. 2023a. Toimintakertomus ja tilinpäätös. Viitattu

07.03.2023. <https://www.sttinfo.fi/data/attachments/00044/4ed92d05-0fd7-4ed4-9e23-d8778073d751.pdf>

Viitattu
07.03.2023. <https://www.sttinfo.fi/data/attachments/00044/4ed92d05-0fd7-4ed4-9e23-d8778073d751.pdf>

Fingrid. 2023b. Yleisesite. Viitattu

07.03.2023.

https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/fingrid_yleisesite_fi.pdf

Euroopan komissio. 2023. Euroopan vihreän kehityksen ohjelman toteuttaminen. Viitattu

07.03.2023. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_fi

Fingrid 2023c. Tilinpäätöstiedote 2023. Viitattu 7.3.2023.

<https://www.sttinfo.fi/tiedote/fingrid-oyjn-tilinpaatostiedote-tammi-joulukuu-2022-yhtion-investointiohjelma-toteuttaminen-eteni-suunnitelmallisesti-yritystalous-sailyi-vankkana-energiakriisin-keskella?publisherId=69819787&releaseId=69967731>

J. Partanen, J. Lassila, J. Haakana. 2020. Sähkönjakeluverkkoliiketoiminnan sääntely ja kehittäminen. Viitattu

07.03.2023.

https://energia.fi/files/5637/Sahkonjakeluverkkoliiketoiminnan_saantely_ja_kehittaminen_LUT_2020.pdf

Kuusankoski Oy. 2023. Muuntajien käsittely ja kierrätys. Viitattu 13.03.2023. <https://www.kuusankoski.com/fi/finland/toimialat/sahko-ja-energia/muuntajien-kasittely-ja-kierratys/>

Tammerfast Oy. 2018. Transmission cable joint for a medium voltage underground cable system. Viitattu 8.3.2022. <https://patents.google.com/patent/WO2020043955A9>

A. Nikander, R. Quinn, P. Rasilo. 2020. Maakaapeliverkon maasulkuvirran kompensointimenetelmien kehittäminen. Viitattu 27.01.2024. <https://energia.fi/julkaisut/maakaapeliverkon-maasulkuvirran-kompensointimenetelmien-kehittaminen-sahkotutkimuspoolin-julkaisu/>

Viacon Oy. 2023. Kierresaumaputket. Viitattu 8.3.2023. <https://viacon.fi/wp-content/uploads/2023/02/ViaCon-Kierresaumaputket-esite-2023.pdf>

Thyssenkrupp. 2023. Material Data Sheet. Viitattu 9.3.2023. https://d2zo35mdb530wx.cloudfront.net/_legacy/UCPthyssenkruppBAMXUK/assets.files/material-data-sheets/aluminium/5754.pdf

Energiateollisuus Ry. Sähkötutkimuspooli. Viitattu 27.1.2024. <https://energia.fi/meista/tutkimus/sahkotutkimuspooli/#collapse-header-42077>

Ruuvi innovations Oy. Wireless Temperature, Humidity, Air Pressure and Motion Sensor. Viitattu 9.3.2023. <https://ruuvi.com/ruuvitag/>

Vattenfall Oy. Kosteusvaurioiden riski juuri nyt suurimmillaan – kostea ilma ja lämpö saavat homeen kasvamaan. Viitattu 24.3.2023 <https://www.vattenfall.fi/ajankohtaista/ajankohtaista-2016/kosteusvaurioiden-riski-juuri-nyt-suurimmillaan/>

Jarmo Partanen. Selvitys sähkön siirtohinnoitteluun vaikuttavista tekijöistä ja ja toimintavarmuuden toteuttamisen vaihtoehdoista. Viitattu 28.12.2024. https://tane.fi/documents/1410877/2132296/Siirtohinnoittelu_selvitt%C3%A4j%20vaikuttavista%20tekij%C3%B6ist%C3%A4%20ja%20toimintavarmuuden%20toteuttamisen%20vaihtoehdoista.pdf

C3%A4_Partanen_291118.pdf/32bcfb9b-dce7-aebc-ae3f-1faf82669767/Siirtohinnoittelu_selvitt%C3%A4j%C3%A4_Partanen_291118.pdf

Suomen eduskunnan säätämä laki. Sähköturvallisuuslaki 1135/2016. Viitattu 29.12.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161135>

The Engineering ToolBox (2004). *NEMA Insulation Classes*. Viitattu 30.12.2023. https://www.engineeringtoolbox.com/nema-insulation-classes-d_734.html

P2 Engineering Oy, Pasi Lauri. Sisäiseen käyttöön tarkoitettu tutkimusraportti. Viitattu 29.12.2023.

Suomen Energiavirasto. Verkkokomponentit, yksikköhinnat (alv 0 %) ja pitoajat vuosille 2022–2023. Viitattu 29.12.2023.

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjUse_xs7eDAxXKKRAIHZxfBgQQFnoECBgQAQ&url=https%3A%2F%2Fenergiavirasto.fi%2Fdocuments%2F11120570%2F12766832%2FS%25C3%25A4hk%25C3%25B6verkot_Yksikk%25C3%25B6hinnat%2BJ%25C3%25A4mf%25C3%25B6rpriser%2B2022-2023.xlsx%2F5b3437a9-5b3d-03c7-f5a2-fbf68248b0de%3Ft%3D1640157186109&usg=AOvVaw3IQoxYuWPbYwpFIlwTUGGG&opi=89978449

Euroopan unionin komissio. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2009/125/EY täytäntöönpanosta pienten, keskikokoisten ja suurten muuntajien osalta. Viitattu 29.12.2023. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex%3A32014R0548>

LIITTEET

Liite 1. Kompensointireaktori tehdastestiraportti, 2022

Liite 2. 50 KVA muuntaja tehdastestiraportti, 2022

Liite 3. 50 KVA muuntaja lämpenemätestiraportti, 2022

LIITE 1

Factory No.	2105015K-1	Rated voltage	20 kV	model	BKSC-31.6920	weight	640 kg			
inductance		terminal voltage	11800 V	Rated current	0.89267 A	Power frequency withstand voltage/lightning impulse	50 / 125 kV			
Reactor test data and conclusion										
No	Test items	test equipment	Test items							
1	Appearance inspection	Visual inspection	Nameplate test report <input type="checkbox"/> appearance <input type="checkbox"/> bolts <input type="checkbox"/> size <input type="checkbox"/> Grounding and identification <input type="checkbox"/>							
2	Direct current Resistance test	XD2505	ambient temperature	A-X	B-Y	C-Z				
			26.2 °C	97.64 Ω	98.80 Ω	98.44 Ω				
3	Insulated electricity Resistance test	ZC25-3	Winding to ground	Alternate	Core pair clamp	Effect of through screw on iron core clamp				
			2000 Ω	2500 Ω	1000 Ω	500 Ω				
4	Inductance test Loss test Insulation test Test items Appearance inspection Direct current	Electric energy comprehensive test platform	Commissioning of semi finished products			Delivery				
			A	11843 V	0.8965 A	0.893 A	A	11838 V	0.879 A	13469.109 Ω
			B	11806 V	0.9044 A	0.904 A	B	11823 V	0.885 A	13354.795 Ω
			C	11951 V	0.9041 A	0.893 A	C	11951 V	0.891 A	13413.019 Ω
			average	V	A		average	13412.38 Ω		
conversion	A			deviation	%					
5	Resistance test	Measured loss	800 W	75 °C loss	866 W	Loss temperature	24 °C			
6	Insulated electricity	TNUH-10Withstand voltage tester	Coil to ground	50 kV	time	60 S				
			Inter-phase	50 kV	time	60 S				
Operator		Date		Test conclusion						

Temperature rise test record

Rated current value	A	1.2 times current value	1.068 A	start time	8:20	Noise	45 dB	ambient temperature	°C
Sampling time	A Phase coil	B Phase coil	C Phase coil	A Phase coil	B Phase coil	C Phase coil	ambient temperature	remarks	
1	9:40	38.5	39.5	36.5		42.5	28.5		
2	10:40	42.9	46.8	47.0		47.8	28.7		
3	11:40	44.0	47.0	48.5		54.0	29.1		
4	12:40	45.4	46.7	48.1		54.5	29.4		
5	13:40	46.2	47.0	47.3		55.0	29.5		
6									
7									
8									
10									
11									
12									
13									
14									

LIITE 1

Temperature rise measurement by resistance method											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ambient temperature	
105.12	105.09	105.05	105.02	104.99	104.96	104.93	104.90	104.87	104.84	29.6	
Cold resistance		ambient temperature		Hot spot temperature rise		Average temperature rise					
Rated inductance				When the current is 1.35 times, the decrease rate of inductance is: 1			At 1.2 times of current, the decrease rate of inductance is as follows:				
A	V	A	Ω	A	V	A	Ω	A	14100V	1.076A	Ω
B	V	A	Ω	B	V	A	Ω	B	14060V	1.075A	Ω
C	V	A	Ω	C	V	A	Ω	C	14250V	1.066A	Ω
average	Ω			average	Ω			average	Ω		
deviation	%			deviation	%			deviation	%		
Operator		Date		Test conclusion							

LIITE 2

Parameter of product

Type of product	SCH15-50/20		Rated power	50		kVA	
Rated voltage	20 / 0.41		kV	Rated current	1.443 / 70.411		A
Rated frequency	50	Hz	Connection symbol		Dyn11	Insulation	F Class
Tapping rang	$\pm 2 \times 2.5\%$		Phases	3	Phase		

1、Measurement of voltage ratio and check of connection symbol)

HV winding		LV winding	Value of ratio	Deviation (%)		
Tapping	(kV) Voltage	(kV) Voltage		AB/ab	BC/ bc	CA/ca
1-2	21.000	0.41	51.220	0.15	0.14	0.14
2-3	20.500		50.000	0.13	0.13	0.12
3-4	20.000		48.780	0.20	0.18	0.18
4-5	19.500		47.561	0.17	0.18	0.18
5-6	19.000		47.341	0.16	0.16	0.16
Connection symbol			Dyn11			

2、Measurement of winding resistance

(Temperature) : 29 ℃

	Tapping	$R_{AB}(\Omega)$		$R_{BC}(\Omega)$		$R_{CA}(\Omega)$		unbalanced Rate (%)
HV winding	I	200.3		199.7		199.8		0.30
	II	195.4		194.8		194.9		0.31
	III	190.5		189.9		189.9		0.32
	IV	185.7		185.0		185.2		0.38
	V	180.8		180.2		180.3		0.33
LV winding	ab	0.05144	bc	0.05139	ca	0.005142	0.10	

LIITE 2

3. Measurement of dielectric character Humidity

Humidity: 58 % Temperature: 29 °C

Measurement part	HV-(LV+Ground)	LV-(HV+Ground)
Insulation resistance	2500 MΩ	2500 MΩ

4. Phase-ground ACSD test

f = 50Hz

Applied voltage	Voltage (kV)	Duration (s)	Result
HV-(LV+Ground)	50	60	Pass
LV-(HV+Ground)	3	60	

5. Induced over-voltage withstand test (IOW)

Applied voltage	Frequency	Duration (s)	Result
2Ue	150Hz	40S	Pass

6. Measurement of no-load loss and no-load current

No-load current		No-Load loss
(A)	%	(W)
0.1815	0.26	67.5

7. Measurement of short-circuit impedance and load loss

Tapping	Short-circuit impedance (%)	Load loss (W)
3-4	120 °C	
	5.94	1322.8

8. Measurement of partial discharge

Max. voltage Um = 12 kV		
Supplied voltage (kV)	1.3 Ur	
Duration (s)	180	
Quantity of apparent discharge (pC)	A	7.8
	B	8.5
	C	8.0

LIITE 3

Temperature rise test reportType of product: SCH15-50/20Symbol of product: 202208095Test date: Aug 23,2022

The simulated load method was used in the test. The test time was 22h, and the applied voltage was 0.41kV under no-load loss. Under the load loss, the specified current 1.443A should be applied, and the actual applied current 1.443A

Measurement results of no-load loss

Winding	Resistance measurement(Ω)		Ambient temperature($^{\circ}\text{C}$)		Winding temperature rise (K)
	Thermal resistance	Cold resistance	Measuring thermal resistance	Measuring cold resistance	
High pressure side	190.0	191.0	25.9	30	2.74
Low pressure side	0.05176	0.05122			6.92

Measurement results under load loss

Winding	Resistance measurement(Ω)		Ambient temperature($^{\circ}\text{C}$)		Winding temperature rise (K)
	Thermal resistance	Cold resistance	Measuring thermal resistance	Measuring cold resistance	
High pressure side	219.2	191.0	29.0	30	40.2
Low pressure side	0.05959	0.05122			44.3

Temperature rise calculation results

Winding temperature rise (K)		Test value	Required value
		High pressure side	41.3
	Low pressure side	47.7	100