



Matias Sihvo

SF₆-vapaiden suurjännitteisten GIS-kojeistojen toiminta ja kunnossapito

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

10.5.2023

Tiivistelmä

Tekijä:	Matias Sihvo
Otsikko:	SF ₆ -vapaiden suurjännitteisten GIS-kojeistojen toiminta ja kunnossapito
Sivumäärä:	33 sivua
Aika:	10.5.2023
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine:	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Tuomo Heikkinen Sähköasemapalvelut-tulosyksikön sopimuspäällikkö Jani Gratschev

Insinööritöyssä oli tarkoitus selvittää SF₆-kaasun korvaavien teknologioiden toimintaa ja kunnossapitoa suurjännitteisissä GIS-kojeistoissa. Infratek Finland Oy:n näkökulmasta tavoitteena oli vertailla uusia teknologioita perinteiseen SF₆-teknologiaan ja täten auttaa yritystä palvelustrategian laadinnassa SF₆-vapaiden kojeistojen kunnossapitopalveluiden tarjoamiseen.

Työssä selvitettiin SF₆-kaasun ympäristönäkökulmaan liittyviä ominaisuuksia sekä syitä siihen, miksi SF₆-kaasun käyttö aiotaan lopettaa. Työhön kuului SF₆-kojeiston kunnossapitoon liittyvien asioiden selvittämistä, jotta uusien teknologioiden kunnossapitoa voitiin vertailla olemassa oleviin menetelmiin. Työssä selvitettiin myös korvaavan teknologian kriteereitä. Sen tulee olla huomattavasti ympäristöystävällisempää kuin SF₆-teknologian. Sen on oltava yhtä toimintavarmaa ja edullista kuin SF₆-teknologian. Sen tulisi toimia samanlaisissa ilmastollisissa olosuhteissa kuin SF₆-kaasun. Sen eristysominaisuuksien tulisi olla riittävän hyvät, jotta GIS-kojeiston fyysinen koko ei kasvaisi huomattavasti.

Insinööritöön sisällön pääpaino oli uusien teknologioiden tutkimisessa. Työssä tutkittiin General Electricin g³-teknologiaa ja Siemens Energyn Clean air -teknologiaa. Selvitystyö sisälsi kojeistojen valmistajien materiaalien tutkimista sekä valmistajien ja asiantuntijoiden haastattelemista. Valmistajat ovat lähteneet kehittämään korvaajaa SF₆-kaasulle lähinnä kahdella eri tavalla. General Electricin g³-teknologia perustuu SF₆-kaasun korvaamiseen ympäristöystävällisemmällä kaasulla pitäen kojeiston toiminnan ja rakenteen lähes samanlaisena SF₆-kojeiston kanssa. Siemens Energyn ratkaisu perustuu puhtaalla ilmalla eristämiseen ja tyhjiökatkaisijaan, jotka ovat ympäristöystävällisiä, mutta kojeiston rakenne eroaa hieman enemmän SF₆-kojeistosta. Molemmat ratkaisut osoittautuivat päteviksi korvaajiksi SF₆-kaasulle ja niiden kunnossapito on hyvin samanlaista kuin SF₆-teknologian.

Työn tuloksena saatiin selvyys siitä, että uudet teknologiat ovat päteviä korvaamaan SF₆-kaasun. Lisäksi selvisi, että yrityksellä, joka tarjoaa kunnossapitopalveluita SF₆-kojeistoihin, on matala kynnyks lähteä tarjoamaan palveluitaan myös SF₆-vapaisiin kojeistoihin.

Avainsanat: SF₆, SF₆-vapaa, GIS-kojeisto, tyhjiökatkaisija

Abstract

Author:	Matias Sihvo
Title:	Functioning and Maintenance of SF ₆ -free High Voltage Switchgear
Number of Pages:	33 pages
Date:	10 May 2023
Degree:	Bachelor of Engineering
Degree Programme:	Electrical and automation engineering
Professional Major:	Electrical power engineering
Supervisors:	Tuomo Heikkinen, Senior Lecturer Jani Gratschev, Electric station service-unit contract manager

The purpose of this thesis work was to investigate the functioning and maintenance of alternative technologies to SF₆-gas in high voltage gas-insulated switchgears. Work was carried out for Infratek Finland Oy and from the company's perspective, the aim was to compare new technologies to traditional SF₆-technology and in this way help the said company prepare a strategy to offer maintenance services to SF₆-free switchgear.

SF₆-gas's features concerning the environment, as well as reasons to quit using SF₆-gas as insulation gas were investigated in this thesis work. The work included familiarizing with maintenance of SF₆-switchgear, so that new SF₆-free technologies could be compared to traditional switchgear. A part of this job was to clarify the criteria that an alternative to SF₆-gas and switchgear should meet. It should be clearly more environment-friendly than SF₆-technology. It should be as reliable and inexpensive and it should work in similar climatic conditions as SF₆-gas. Its insulation features should be sufficient enough so that the new switchgear would not have to be significantly bigger.

This thesis work's main focus was on investigating new technologies. There were two companies' solutions to SF₆-technology that were studied: General Electric g³ and Siemens Energy Clean air. The investigation included studying these switchgear manufacturers' materials and interviewing experts. General Electric g³ is an alternative insulation gas which is more environment-friendly, keeping the design and functioning of the switchgear quite similar to SF₆-switchgear. Siemens Energy Clean air is based on insulating with clean air and using vacuum circuit breaker. It is highly more environment-friendly than SF₆, although the functioning and design of the switchgear differs a bit more from traditional switchgear. Both of these solutions appear to be competent alternatives to SF₆-technology and maintaining them is quite similar to SF₆-technology.

This work shows that these new technologies are competent to replace SF₆-gas. Additionally, it was clarified that a company that is already offering services to SF₆-switchgear has a low threshold to start offering services to SF₆-free switchgear.

Keywords: SF₆, SF₆-free, gas-insulated switchgear, vacuum circuit breaker

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	SF ₆ -kaasu	4
2.1	SF ₆ -tekniologian haitat ympäristölle ja ihmiselle	5
2.2	SF ₆ -kojeiston kunnossapito	6
2.3	SF ₆ -tekniologian korvaaminen	9
3	General Electric g ³	11
3.1	g ³ -tekniologian ympäristövaikutus	13
3.2	g ³ -kojeiston toiminta ja kunnossapito	15
3.3	g ³ -tekniologian haasteet	18
4	Siemens Blue GIS ja Clean air	20
4.1	Clean air -tekniologian ympäristövaikutukset	21
4.2	Blue GIS -kojeiston toiminta ja kunnossapito	22
4.3	Clean air -tekniologian haasteet	24
5	Johtopäätökset	26
	Lähteet	28

Lyhenteet

C ₄ F ₇ N:	<i>Heptafluoributyronitrili</i> . Hyvät eristeominaisuudet omaava eriste-kaasu.
CF ₄ :	<i>Hiilitetrafluoridi</i> . Kaasu, jota voidaan sekoittaa eristekaasuun ja siten laskea sen nesteytymislämpötilaa.
EOL:	<i>End-of-life</i> . Käyttöiän loppu, tuotteen eliniän vaihe, jossa tuotteen suunniteltu käyttötarkoitus loppuu.
g ³ :	General Electricin eristekaasu.
GE:	<i>General Electric</i> . Yhdysvaltalainen sähkö- ja elektroniikka-alan yri-tys.
GIL:	<i>Gas-Insulated Line</i> . Kaasulla eristetty johdin.
GIS:	<i>Gas-Insulated Switchgear</i> . Kaasulla eristetty kojeisto.
GWP:	<i>Global Warming Potential</i> . Ilmaston lämmityspotentiaali, kasvihuo-nekaasun päästön aiheuttama suhteellinen lämmitysvaikutus verrat-tuna hiilidioksidiin massayksikköä kohden.
LCA:	<i>Life cycle assessment</i> . Elinkaariarviointi, tuotteen tai palvelun koko elinkaaren ympäristövaikutuksen tutkiminen.
SF ₆ :	<i>Rikkiheksafluoridi</i> . Sähkötekniikassa yleisesti käytetty eristekaasu.
SOF ₂ :	<i>Tionyylidifluoridi</i> . Eräs SF ₆ -kaasun hajoamistuote.

1 Johdanto

Sähkönjakeluverkossa on usein tarvetta rakentaa kytkinlaitoksia mahdollisimman pieniksi ja suojaetuiksi. Tilanpuutteen, likaantumista aiheuttavan ympäristön tai maisemallisten syiden takia kytkinlaitoksia sijoitetaan sisätiloihin. Näissä tilanteissa ratkaisuna toimii useimmiten koteloitu kaasueristetty kytkinlaitos, josta puhutaan myös GIS-kojeistona (Gas-insulated switchgear, kuva 1). Koteloidussa eristyksessä käytetään normaalia ilmanpainetta suuremmassa paineessa olevaa eristekaasua, jotta eristekaasun eristelujuus saadaan riittävän hyväksi. Myös ulkokytkinlaitosten tiettyjä komponentteja eristetään tarvittaessa koteloidulla kaasulla. (Aro ym. 2015: 109.)



Kuva 1. ABB:n SF₆-kaasueristeinen ELK-04, 110 kV:n GIS-kojeisto Fingridin Tammiston sähköasemalla.

Eristekaasulla on kaksi tarkoitusta GIS-kojeistossa. Sillä eristetään jännitteisiä osia, mutta sillä on myös tärkeä rooli valokaaren sammuttamisessa. Katkaisijassa ja erottimissa syntyy avaamistilanteessa valokaari, joka ei suuren jännitteen ja virran takia normaaleissa olosuhteissa sammuisi itsestään. Itsepuhalluskatkaisijoissa katkaisijan avaamistilanteessa GIS-kojeiston katkaisijassa syntyvää valokaarta kohti puhalletaan eristekaasua, joka sammuttaa valokaaren katkaisemalla sen. (SF₆ Circuit Breakers 2021.)

Eristeenä GIS-kojeistoissa käytetään valtaosin SF₆-kaasua (rikkiheksafluoridi). Sitä on pitkään pidetty käytännössä ainoana vaihtoehtona suurjännite-GIS-kojeistojen eristämiseen sen erinomaisten ominaisuuksien ja edullisen hinnan takia. SF₆-kaasulla on kuitenkin paljon haittapuolia. Se on kaikkein voimakkain kasvihuonekaasu. Vikavirtatilanteissa ja valokaarien aiheuttamana sen sekaan syntyy myrkyllisiä palamisaineita. Vuototilanteissa se syrjäyttää hapen, minkä vaarallisuus korostuu siinä, että SF₆-kaasu on puhtaana hajutonta ja mautonta. (SF₆ Circuit Breakers 2021; Aro ym. 2015: 112–113; SFS-EN IEC 60376:2018: 11.)

Ympäristösyistä SF₆-kaasun käyttö on kielletty jo melkein kaikissa sovelluksissa. Se on saanut erityisaseman sähkötekniikassa, sillä sille ei ole aikaisemmin löydetty pätevää korvaajaa. Euroopan Unioni on kuitenkin entisestään tiukentamassa SF₆-kaasun käyttöä, ja sen käyttö on suunniteltu kiellettävän kokonaan. Kaasukielto tulisi täyteen voimaansa vuonna 2031, jolloin fluorikaasujen käyttö kiellettäisiin kaikissa uusissa käyttökohteissa. (Uusi innovaatio syrjäyttää ilmastopahiksena tunnetun SF₆-kaasun 2022; Green Deal: Phasing down fluorinated greenhouse gases 2022.)

Useat GIS-kojeistojen valmistajat ovat lähteneet kehittämään SF₆-vapaita tekniikoita hyvissä ajoin ennen kiellon voimaanastumista. SF₆-kaasun korvaamiseen on kehitetty lähinnä kahta eri tapaa. Tässä työssä tutkitaan kahden eri valmistajan ratkaisua suurjännitesovelluksiin, yhdysvaltalaisen General Electricin g³-kaasulla eristettyä GIS-kojeistoa sekä saksalaisen Siemens Energyn Blue GIS-

kojeistoa, jossa käytetään teollista ilmaa sekä tyhjökatkaisijaa. Molemmat yritykset ovat merkittäviä toimijoita Suomen GIS-kojeistomarkkinoilla. Työn tavoitteena on selvittää kojeistojen ja uusien eristekaasujen ominaisuuksia, toimintaa ja kunnossapitoa sekä verrata niitä perinteisen SF₆-kojeiston ominaisuuksiin. (g³: The SF₆-free solution in practice 2021: 2; 8VN1 Blue GIS up to 145 kV 2021: 1–2.)

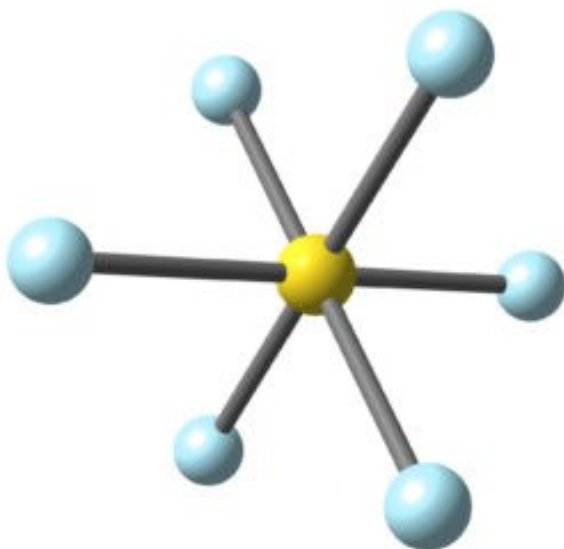
Insinööritöön on tilannut Infratek Finland Oy ja Omexom. Omexom on ranskalaisen Vinci Energies -yhtiön kansainvälinen tuotebrändi. Infratek Finland Oy kuuluu juridisena suomalaisena maayhtiönä Omexom-brändin alle. Omexom toimii Suomessa energianjakeluketjussa tuotannosta siirto- ja jakeluverkkoihin ja sieltä aina kotitalouksiin asti. Sähköasemien kunnossapito, johon tämä opinnäytetyö liittyy, on Omexomin palvelutarjontaan liittyvä yksi palvelukokonaisuus Suomessa.

Opinnäytetyön aihe on tilaajalle hyvin merkittävä, koska SF₆-vapaa teknologia on Suomessa uutta ja kojeistoja on vielä vähän. Vastaavia selvitystöitä ei ole työn teettäjän käsityksen mukaan tehty alan palveluyrityksissä aiemmin. Aihepiiri on uutta myös Omexomin Suomen toiminnoissa. Opinnäytetyötä tullaan hyödyntämään palvelustrategian laatimisessa ja päätösten tekemisessä. Omexomin sähköasemien kunnossapitopalveluja toimittava yksikkö tulee käyttämään tämän työn tulosta palvelukokonaisuuden laatimiseen ja palvelujen kehittämiseen.

2 SF₆-kaasu

SF₆-kaasu on sähkötekniikassa yleisesti käytetty kaasu. Se on erityisesti tunnettu hyvänä eristekaasuna. SF₆-kaasua käytetään sähkövoimateollisuudessa hyvin laajasti johtuen sen monista hyvistä ominaisuuksista. Sen lämmönsiirto-ominaisuudet mahdollistavat SF₆-kaasun käytön valokaaren sammutuksessa, joten samalla kaasulla voidaan sekä eristää jännitteisiä osia että sammuttaa valokaari. SF₆ on puhtaana palamaton ja myrkytön. Se ei myöskään reagoi muiden kemiallisten aineiden kanssa. (Aro ym. 2015: 112–113; SFS-EN IEC 60376:2018: 11.)

SF₆-molekyylä koostuu rikkiatomista, jonka ympärille on asettunut kuusi fluoriatomia (kuva 2). SF₆ on rakenteensa vuoksi hyvin stabiili. Sen elinikä on noin 3200 vuotta, ja se pysyy muuttumattomana noin 500 °C:n lämpötilaan asti. SF₆-kaasun tiheys on 6,2 kg/m³, eli se on noin 5,1 kertaa ilmaa raskaampaa. (Aro ym. 2015: 112–113; SFS-EN IEC 60376:2018: 11.)



Kuva 2. 3D-malli rikkiheksafluoridista, joka koostuu kuudesta fluoriatomista kiinnittyneenä rikkiatomin ympärille (Vainio 2020).

SF₆-kaasu valmistetaan elektrolyysin avulla, minkä takia SF₆-kaasu on suhteellisen halpaa. Standardissa IEC 60376 (2018: 8) on asetettu ylärajat sähkövoimatekniikassa käytettävän SF₆-kaasun epäpuhtauksille. Epäpuhtauksien määrän rajoittamisella varmistetaan, ettei käytettävä SF₆-kaasu sisällä haitallisia määriä korroosiota aiheuttavia tai myrkyllisiä aineita. (Aro ym. 2015: 112–113; SFS-EN IEC 60376:2018: 8.)

EU:n alueella on annettu sähkönsiirtoteollisuudelle SF₆-kaasun käyttöön erivapaus johtuen sen hyvistä ominaisuuksista. Vapaus edellyttää toimijoilta määriteltäviä vapaaehtoisuustoimia. SF₆-kaasu tulee aina pitää suljetuissa paineastioissa. SF₆-kaasun vuodot tulee minimoida ja vuodoista ja päästöistä tulee raportoida. SF₆-kaasu tulee puhdistaa, kierrättää ja hävittää asiaankuuluvalla tavalla. (Aro ym. 2015: 112–113; SFS-EN IEC 60376:2018: 10, 15.)

2.1 SF₆-teknologian haitat ympäristölle ja ihmiselle

GWP (Global Warming Potential) eli lämmityspotentiaali on kerroin, jota käytetään ilmaisemaan kasvihuonekaasun päästön aiheuttamaa lämmitysvaikutuksen suhteellista voimakkuutta verrattuna hiilidioksidin massayksikköä kohden. GWP-luku osoittaa, kuinka moninkertainen vaikutus tietyllä kaasulla on ilmaston lämpenemiseen suhteessa massaltaan samaan määrään hiilidioksidia. GWP ottaa huomioon sekä kaasun lämpösäteilyn läpäisyominaisuudet että kaasujen viipymäajat ilmakehässä. (Lämmityspotentiaali GWP 2014.)

SF₆-kaasu on maailman voimakkain kasvihuonekaasu. Sen GWP on noin 24 000. Maailman sähköistyessä yhä enemmän SF₆-kaasun haitat korostuvat SF₆-kaasun laajan käytön vuoksi. Vuosittain arviolta 8 000 tonnia SF₆-kaasua pääsee ilmakehään, mikä vastaa keskimääräisesti 100 miljoonan auton hiilidioksidipäästöjä. Vuoteen 2030 mennessä SF₆-kaasun käytön odotetaan lisääntyvän 75 % vuoden 2019 tasosta. (Vainio 2020; De Bruyckere & Ottersbach 2022.)

Puhtaana SF₆-kaasu ei ole myrkyllinen. Suuren kaasuvuodon ilmetessä riskinä on kuitenkin se, että SF₆-kaasu syrjäyttää hapen ja aiheuttaa tukehtumisvaaran. Koska SF₆-kaasu on ilmaa raskaampaa, se hakeutuu kaapelikanaviin ja -kellareihin sekä muihin mataliin paikkoihin. Näissä tilanteissa SF₆-kaasun vaarallisuus korostuu, sillä se on hajutonta ja väritöntä. (Aro ym. 2015: 112–113; SFS-EN IEC 60376:2018: 11.)

SF₆-kaasun hajotessa valokaaren tai osittaispurkauksen takia syntyy korrodoivia ja myrkyllisiä yhdisteitä. Hajoamistuotteiden aiheuttama ongelma tulee ottaa huomioon kaasuvuodon, valokaarivian tai onnettomuuden yhteydessä. Hajoamistuotteet sisältävät aina tionyylidifluoridia (SOF₂), jonka tunnistaa hyvin pistävästä ja epämiellyttävästä hajusta. Kaasumaiset hajoamistuotteet voidaan huomata ilmasta jo hyvin vähäisinä pitoisuuksina sekä hajun takia että silmien ja limakalvojen ärtymisestä. (Aro ym. 2015: 112–113.)

Eräs SF₆-kaasun käyttöön liittyvä ongelma on myös suhteellisen alhainen kastepiste. Kaasu nesteytyy sitä korkeammassa lämpötilassa, mitä suurempi kaasun paine on. Suomen oloissa nesteytyminen tulee ottaa huomioon, sillä kaasun ollessa esimerkiksi kuuden baarin absoluuttisessa paineessa 20 °C:n lämpötilassa kastepiste saavutetaan noin –30 °C:n lämpötilassa. Nesteytyminen vältetään sekoittamalla SF₆-kaasuun tyypeä (N₂) tai hiilitetrafluoridia (CF₄). Hiilitetrafluoridia käytetään erityisesti silloin, kun eristekaasulta edellytetään hyviä lämmönsiirto-ominaisuuksia, kuten suuren oikosulkuvirran katkaisukyvyyn omaavissa yksikammioisissa katkaisijoissa. Sekoitettaessa SF₆-kaasuun muita kaasuja sen valokaaren sammutuskyky huononee. Tämän takia SF₆-katkaisijoissa on tasapainoteltava tarvittavan virrankatkaisukyvyyn ja nesteytymislämpötilan optimoinnilla. (Aro ym. 2015: 112–113.)

2.2 SF₆-kojeiston kunnossapito

Turvallisuus- ja kemikaaliviraston ohjeen mukaan sähkölaitteiston määräaikaistarkastus on yksi keinoista, joilla varmistetaan sähkökäytön turvallisuus. Tietty-

jen sähkölaitteistojen määräaikaistarkastukset ovat lakisääteisiä. Verkkoyhtiöiden sähköverkot tulee tarkistaa viiden vuoden välein. (Tukes-ohje 16/2017: 3–4.) Sähköturvallisuuslain (1135/2016: § 48) mukaan velvoite huolehtia sähkölaitteistosta on sen haltijalla. (Tukes-ohje 16/2017 Sähkölaitteistot ja tarkastukset 2017: 3–4.)

GIS-kojeiston takuuajan jälkeen omistaja huolehtii sen kunnossapidosta ja määräaikaistarkastuksista valmistajan ohjeiden mukaan. Pääsääntöisesti kunnossapitoa suorittaa ulkopuolinen yritys, jonka kanssa on tehty sähköasemien kunnossapitosopimus. GIS-kojeiston kunnossapito voidaan tilata myös erillistyönä alan palveluyritykseltä. Kunnossapitoyritys selvittää huollon sisällön ja aikataulun suoraan valmistajalta. Eri valmistajien kunnossapito-ohjeet eivät kuitenkaan juuri eroa toisistaan kojeistojen ja eristekaasun yhtäläisyyksien takia. (Rikberg 2023.)

SF₆-kaasun käsittely on luvanvaraista toimintaa. Henkilön, joka käsittelee SF₆-kaasua, tulee hankkia muodollinen pätevyys suorittamalla EU:n komission täytäntöönpanoasetuksen 2015/2066 (2015) määrittämä käsittelykoulutus. Lisäksi käytännön kokemus SF₆-kaasun käsittelystä varmistaa henkilön kunnossapitotaidot SF₆-kaasua sisältävien sähkökojeiden huoltotoissa. (Täytäntöönpanoasetus (EU) 2015/2066 2015).

SF₆-kojeiston tarkastuksia tehdään vuosisykleissä pääasiassa yhden, viiden, kymmenen ja 20 vuoden välein. Yleisesti kunnossapidossa seurataan valmistajan ohjeita, mutta omistaja voi halutessaan tilata kojeistolle lisähuoltoja tai esimerkiksi lyhentää huolto- ja tarkastusvälejä. (Rikberg 2023.)

SF₆-kojeiston tarkastuksissa tarkkaillaan sekä kaasun että kojeiston kuntoa. SF₆-kaasun kohdalla seurataan erityisesti SF₆-kaasun pitoisuutta koko kaasumäärästä sekä kaasun puhtautta. Eristekaasun sekaan syntyy palamistuotteita katkaisijoissa ja erottimissa tapahtuvien valokaarien takia. Kaasun kastepistettä seurataan, sillä kosteus huonontaa kaasun eristysominaisuuksia. Kaasun tiheyttä seurataan tiheysvahdeilla, jotka suhteuttavat kaasun paineen sen lämpötilaan. Toinen vaihtoehto on mitata erikseen kaasun paine ja sen lämpötila,

joista voidaan laskea sen tiheys. Monet huoltotoimenpiteet vaativat kaasutilan tyhjentämistä. Tyhjennys suoritetaan kaasunkäsittelylaitteistolla, jolla voidaan pumpata kaasu pulloihin ja pulloista takaisin kaasutilaan. (Rikberg 2023.)

Useat eri valmistajat tarjoavat työkaluja SF₆-kaasun käsittelyyn (kuva 3). Valmistajia ovat muun muassa Dilo, Wika ja Vaisala. Kaasunkäsittelylaitteiden lisäksi työkalujen valmistajilta löytyy myös vuotoilmaisimia vuotopaikkojen etsimiseen. Kaasunanalysointilaitteet ovat yleensä salkkumaisia, helposti liikuteltavia laitteita. Vuotoilmaisimet ovat tyypillisesti helposti käsiteltäviä, kädessä pidettäviä työkaluja. (Rikberg 2023.)



Kuva 3. SF₆-kaasun analysointilaitte DILLO Multi-Analyzer SF₆. (Devices for the Determination of the SF₆ Gas Quality 2020).

GIS-kojeiston kuntoa seurataan tarkistamalla komponenttien toimivuus ja laatu. Katkaisija koekäytetään, sen koskettimien kuntoa seurataan ja sen ylimeno-resistanssia mitataan. Katkaisijan oikosulkukestoisuus heikkenee katkaisijan käyttökertojen mukaan. Katkaisijaa voidaan myös säätää, jos se on kulunut. Kuluneita osia voidaan uusia varaosien saatavuuden mukaan, ja katkaisija voidaan tarvittaessa vaihtaa uuteen. Katkaisijan ja muiden komponenttien kiinnitykset tarkastetaan. Jousivirittaisen katkaisijan virittimen moottorin toiminta-aika

ja virta mitataan. Näin voidaan todeta jousen ja moottorin kunto. Pienentynyt virta voi viitata jousen kuoleentumiseen, kun taas pidentynyt viritysaika moottorin toiminnan heikkenemiseen. Erottimen toimintaa testataan samankaltaisilla toimenpiteillä. Sen toiminta tarkastetaan, koskettimien kuntoa seurataan ja sähköisen erottimen toiminta-aika mitataan. (Rikberg 2023.)

Kojeiston paineenhäilytyksen toimintaa testataan manuaalisesti. Kaasuntiheysvahti irrotetaan kojeistosta ja siihen pumpataan painetta tarkkuuspainemittarilla varustetulla käsipumpulla. Tällä menetelmällä varmistetaan paineenhäilytyksen raja-arvot. (Rikberg 2023.)

Tehtaalla kojeiston komponentit koeponnistetaan heliumkaasulla, jotta mahdolliset vuotokohdat löydetään ennen kojeiston toimittamista. Sähköasemalla kokoonpantua kojeistoa ei ponnisteta enää kaasulla ennen käyttöönottoa. Kojeiston osille suoritetaan osittaispurkaustesti sekä tehtaalla että käyttöönottestin yhteydessä sähköasemalle kasattuna. Testissä kojeiston komponentteja kuormitetaan ylijännitteellä ja mahdollisia osittaispurkauksia mitataan oskilloskoopilla. Näin varmistetaan, että kojeistoon ei ole jäänyt epäpuhtauksia, asennuksen aikaisia tarvikkeita ja että kaikki eriste-etäisyydet ovat riittävät kyseiselle jännitetasolle. (Rikberg 2023.)

2.3 SF₆-teknologian korvaaminen

SF₆-kaasun erinomaiset ominaisuudet asettavat korkeat kriteerit korvaavalle teknologialle. Hyvän läpilyöntilujuuden lisäksi SF₆-kaasu on erinomainen väliaine sammuttamaan valokaaren sen erittäin pienen lämmönjohtavuuden takia. Suomen oloissa tulee ottaa huomioon myös eristekaasun kastepiste, joka SF₆-kaasulla puhtaana on noin -30 °C:n lämpötilassa, mutta sekoittamalla SF₆-kaasuun muita kaasuja, esimerkiksi typpeä, voidaan eristekaasuseoksen kastepistettä laskea alemmaksi. Korvaavalla teknologialla tulee siis olla hyvät eristysominaisuudet, sen tulee kyetä sammuttamaan valokaari tehokkaasti ja Suomen kaltaisissa ympäristöissä sen kastepisteen tulee olla riittävän alhainen. (Aro ym. 2015: 112–113.)

Korvaavan teknologian tulee ennen kaikkea olla SF₆-kaasua huomattavasti ympäristöystävällisempää SF₆-kaasun ympäristöhaitallisuuden ollessa kriittisin syy sen käytön kieltämiselle. Korvaavan teknologian tulisi olla yhtä edullista kuin SF₆-teknologian, sillä se vauhdittaa SF₆-vapaata siirtymää. GIS-kojeiston tulee olla helposti huollettava ja kunnossapidettävä, eristekaasun laatua tulee pystyä valvomaan ja kojeiston käytön tulee olla turvallista. (Uusi innovaatio syrjäyttää ilmastopahiksena tunnetun SF₆-kaasun 2022; Green Deal: Phasing down fluorinated greenhouse gases 2022.)

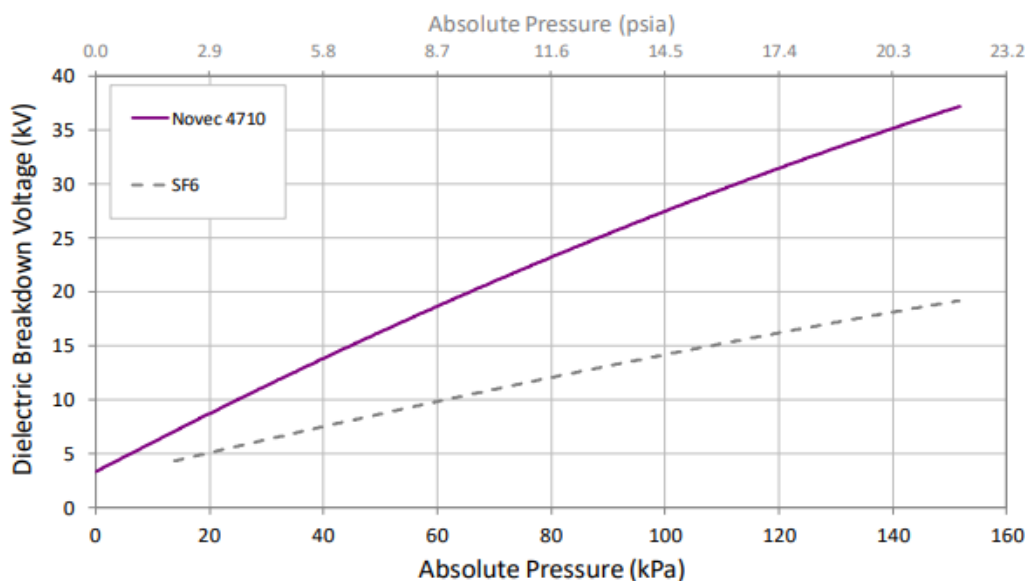
3 General Electric g³

Yksi tavoista korvata SF₆-kaasun käyttö sähkövoimatekniikassa on korvata se ympäristöystävällisemmällä eristekaasulla. Seuraavissa luvuissa kerrotaan General Electric g³-kaasusta ja sen käytöstä GIS-kojeistoissa.

Yhdysvaltalainen General Electric Company (GE) on yksi maailman suurimmista teknologia-alan yrityksistä. GE perustettiin jo vuonna 1892. Yhtiön toiminta ulottuu aina sähköteollisuuden tuotteista lentokoneen moottoreihin. Sen päämaja sijaitsee Yhdysvaltojen Bostonissa. (General Electric 2022.)

General Electric on kehittänyt g³-eristekaasun (Green Gas for Grid, lausutaan g-kolme) SF₆-kaasun korvaajaksi. g³-kaasu on kehitetty yhteistyössä 3M-yhtiön kanssa. 3M on yhdysvaltalainen monialayritys, joka kehittää esimerkiksi kemikaali-, henkilösuojaus- ja terveydenhoitotuotteita. g³-kaasu on yhdistelmä happea, hiilidioksidia ja 3M:n dielektristä Novec 4710 nestettä. Kun etsittiin kaasua, joka vastaisi sähkövoimatekniikan suorituskykyvaatimuksiin, Novec 4710 yhdistettynä happeen ja hiilidioksidiin osoittautui parhaaksi SF₆-kaasun korvaajaksi. Tämä yhdiste ei vaadi GIS-kojeiston koon kasvattamista sekä on selkeästi ympäristöystävällisempi. g³-kaasun GWP on noin 300, ja sen massa suhteutettu GWP on 99 % matalampi SF₆-kaasuun verrattuna. (g³: The SF₆-free solution in practice 2021: 2; Tietoja 3M:stä; GE unveils world's 1st 420 kV 2022.)

Novec 4710 pohjautuu C₄F₇N-yhdisteeseen (heptafluoributyronitriili, käytetään joskus myös C₃F₇CN-merkintää). Novec 4710:n läpilyöntilujuus on noin kaksinkertainen SF₆-kaasuun verrattuna, joten g³-kaasua tarvitaan massaltaan noin puolet vähemmän, jotta saavutetaan sama eristävyys kuin SF₆-kaasulla. Kuvassa 4 vertaillaan Novec 4710:n ja SF₆:n läpilyöntijännitettä 25 °C:n lämpötilassa eri paineissa. Kuvasta nähdään, kuinka Novec 4710:n läpilyöntijännite on noin kaksinkertainen SF₆:n läpilyöntijännitteeseen verrattuna. (g³: The SF₆-free solution in practice 2021: 2; GE unveils world's 1st 420 kV 2022; Technical Data 3M™ 2022.)



Kuva 4. Novec 4710:n ja SF₆:n paineiden suhteet niiden läpilyöntijännitteisiin. (Technical Data 3M™ 2022: 3).

Ensimmäinen prototyyppi 420 kV:n g³-katkaisijasta esiteltiin vuonna 2014. Tällä hetkellä GE:ltä löytyy täysin SF₆-vapaa 145 kV:n GIS-kojeisto. Ensimmäisen g³-kaasulla eristetyin 420 kV:n GIS-kojeiston odotetaan tulevan kaupalliseen käyttöön vuoden 2025 aikana. (g³: The SF₆-free solution in practice 2021: 2.)

Fingrid rakentaa vuosien 2023–2024 aikana useita g³-kaasueristeisiä kojeistoja. Syksyllä 2024 Framnäsiin valmistuu uusi 110 kV:n SF₆-vapaa GIS-kojeisto, joka liitetään Masalan sähköaseman rinnalle. Kauppilan sähköasema uusitaan SF₆-vapaata teknologiaa hyödyntäen, ja se valmistunee vuoden 2024 aikana. (Fingridin investoinneilla lisää liityntävalmiuksia 2021; Fingrid rakentaa Kirkkonummelle 2022; Peltola 2023.)

Myös Japanilaisen Hitachin tytäryhtiö Hitachi Energy, entinen Hitachi ABB Power Grids, on kehittänyt omaa EconiQ-suurjänniteportfolioaan, jossa käytetään samaa eristeainetta kuin GE:n g³-kojeistoissa eli 3M:n Novec 4710 -eristekäasua sekoitettuna happeen ja hiilidioksidiin. Hitachi Energyllä on tarjolla 145 kV:n jännitetasolle SF₆-vapaa kojeisto ja SF₆-vapaata kojeistoa suuremmille jännite-tasolle kehitetään parhaillaan. (Mahdizadeh 2021; The Big Switch 2021: 7; EconiQ - Eco-efficient high-voltage portfolio 2022.)

3.1 g³-teknologian ympäristövaikutus

g³-teknologia mahdollistaa sähkönsiirtoteollisuuden käyttämien komponenttien toimivuuden vastaavalla suorituskyvyllä kuin SF₆-teknologia. g³-kojeiston fyysisen koon kanssa ei tarvitse tehdä kompromisseja. Taulukossa 1 vertaillaan SF₆-kaasun arvoja seokseen, jossa on 3,5 % Novec 4710 -eristekaasua sekoitettuna hiilidioksidiin. (g³: The SF₆-free solution in practice 2021: 2.)

Taulukko 1. Novec 4710 -seoksen ja SF₆-kaasun vertailu. (Technical Data 3M 2022, 2).

KAASU	3,5 % NOVEC 4710 KAASUA HIILIDIOKSI- DISSA	100 % SF ₆
KAASUN PAINE (BAR)	6	4
KAASUN TIHEYS 25 °C LÄMPÖTILASSA (KG/M ³)	11,9	23,6
KAASUSEOKSEN GWP	292	23 500
GWP:N VÄHENTYMINEN SUHTEESSA SF ₆ -KAASUUN	98,8 %	-
KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT (TONNIA CO ₂ /M ³)	3,5	554
KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖJEN VÄHENTYMINEN	99,4 %	-

Taulukosta 1 nähdään, että Novec 4710 -seoksen tiheys on noin puolta pienempi kuin SF₆-kaasun, mikä tarkoittaa sitä, että kaasua käytetään puolet vähemmän samassa sovelluksessa. Tämä korostaa entisestään Novec 4710 -kaasuun pohjautuvien seoksien ympäristöystävällisyyttä. Novec 4710:n elinikä ilmakehässä on noin 30 vuotta, kun taas SF₆-kaasun noin 3200 vuotta. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentyminen on laskettu 100 vuoden aikaikkunasta, mutta verrattuna SF₆-kaasun todelliseen elinikään kasvihuonekaasupäästöjen vähentyminen on todellisuudessa suurempi kuin 99,9 %. (Technical Data 3M 2022: 2.)

SF₆-kaasun GWP on noin 24 000, kun g³-kaasun GWP on vain 327. Korvaamalla yhden kilogramman SF₆-kaasua g³-kaasulla on sama vaikutus kuin poistaisi noin 23 500 kilogrammaa hiilidioksidia käytöstä. Vaikutus voidaan laskea vähentämällä korvaavan kaasun GWP alkuperäisen kaasun GWP:stä. Tämä huomioon ottaen g³-kaasun ilmaston lämpenemisen vähentämisen potentiaali korostuu merkittävästi, kun tarkastellaan globaalisti käytetyn SF₆-kaasun määrää. Arvioiden mukaan SF₆-kaasua asennetaan globaalisti vuosittain 10 000 tonnia, josta 80 % asennetaan sähkönsiirtoteollisuuteen. (National Grid Begins Journey 2021: 3.)

Ympäristöystävällisyys, joka g³-kaasulla luonnostaan on, ei huononna kaasun teknisiä ominaisuuksia. g³-kojeistot ovat teknisesti yhtä suorituskykyisiä kuin SF₆-kojeistot, ja ne toimivat samanlaisissa ilmastollisissa olosuhteissa, jopa –30 °C:een lämpötilaan asti. g³-kojeistot ovat fyysisiltä mitoiltaan samankokoiset kuin SF₆-kojeistot. g³-kaasu on myrkytön ja täysin turvallinen käyttäjälle. (National Grid Begins Journey 2021: 3.)

EU:n ympäristöystävällisiä hankintoja koskevien ohjeiden (European Platform on Life Cycle Assessment (LCA) 2016) mukaan tuotteen koko eliniän ympäristövaikutukset tulisi arvioida tuotteen hankintavaiheessa. GE:n g³-eristeiselle 420 kV:n GIL-kojeistolle (Gas Insulated Line) sekä 145 kV:n GIS-kojeistolle suoritettiin GE:n toimesta eliniän arviointi (LCA). Näiden tuloksia vertailtiin vastaavien

SF₆-kojeistojen eliniän arviontiin. Eliniän arvioinnissa tarkasteltiin ilmastomuutoksen vähentymistä ottaen huomioon tuotteen koko elinajan raakamateriaalin erottamisesta sen eliniän loppuun asti. Arviointi suoritettiin standardien ISO 14040 (2020) ja ISO 14044 (2006) mukaan, joissa määritellään arvioinnin periaatteet ja vaatimukset. (European Platform on Life Cycle Assessment (LCA) 2016; g³: The SF₆-free solution in practice 2021: 4.)

Arvioinnissa otettiin huomioon kojeiston valmistus mukaan lukien kaikki materiaalit, tuotteen kuljetus maalla ja merellä, tuotteen käyttö sen eliniän ajan tehohäviöt ja kaasuvuodot huomioiden sekä kaasun loppukäsittely. Vertailun mukaan g³-kojeiston vaikutus ilmastomuutokseen on vähintään 70 prosenttia pienempi kuin vastaavalla SF₆-kojeistolla. GIS-kojeisto koostuu pääosin alumiinista, jonka tuotanto kuormittaa ympäristöä. Vaikka g³-kojeistossa on 4,4 prosenttia enemmän alumiinia kuin vastaavassa SF₆-kojeistossa, muut tekijät vaikuttavat niin positiivisesti ilmastomuutoksen vaikutukseen, että koko g³-kojeiston GWP on 99 prosenttia pienempi kuin SF₆-kojeiston. Pelkästään g³-kaasun GWP on 98 prosenttia pienempi kuin SF₆-kaasun. (g³: The SF₆-free solution in practice 2021: 4.)

g³-kaasu vaikuttaa kuitenkin 15 prosenttia enemmän otsonikatoon, sillä g³-kaasun ominaisuuksien takia g³-katkaisijassa käytetään enemmän polytetrafluorieeniä (PTFE). PTFE:n määrä katkaisijassa on kuitenkin hyvin pieni, jolloin sen kokonaisvaikutus on merkityksettömän pieni kojeiston eliniän aikana. Tutkimuksesta voidaan päätellä, että g³-teknologia tarjoaa saman teknisen suorituskyvyn kuin SF₆-teknologia samalla vähentäen ympäristöllistä vaikutusta yli 99 prosentilla (g³: The SF₆-free solution in practice 2021: 4–5.)

3.2 g³-kojeiston toiminta ja kunnossapito

g³-kojeisto (kuva 5) eroaa SF₆-kojeistosta hyvin vähän. g³-katkaisija on yksikammioinen itsepuhalluskatkaisija, jota ohjataan moottorijousiohjaimella. Kat-

kaisija ja kojeisto ovat fyysisiltä mitoiltaan samankokoiset kuin SF₆-kaasua sisältävät. Myös kaasun asennus ja kojeiston käyttö vastaavat SF₆-kojeiston käyttöä. (g³: The SF₆-free solution in practice 2021: 2.).



Kuva 5. General Electricin 145 kV:n g³-kojeisto F-35-41g Norjan Heggedalissa. (GE's g³ technology to accelerate decarbonization efforts in Norway 2021).

g³-kojeiston kunnossapito vastaa käytännössä SF₆-kojeiston kunnossapitoa. Kojeistot toimivat samoilla periaatteilla ja rakentuvat samankaltaisista komponenteista. g³-kaasun laatua tarkkaillaan SF₆-kaasun tavoin ja kojeiston komponenttien toimintaa testataan samankaltaisissa sykleissä. Kunnossapito hoidetaan valmistajien ohjeiden mukaan. (Peltola 2023.) SF₆-kojeiston kunnossapitoa on käsitelty tarkemmin luvussa 2.

g³- ja SF₆-kojeiston kaasuja ei kuitenkaan tule sekoittaa keskenään. g³-kaasussa on komponentteja, jotka ovat tiheydeltään harvempia kuin SF₆-kaasun. Tästä syystä esimerkiksi g³-kojeiston tiivistemateriaalit ovat erilaisia. Myös katkaisijan katkaisupään rakenne on erilainen johtuen g³-kaasun heikommasta valokaaren sammutuskyvystä. g³-katkaisijan täytyy siis olla hieman kestävämmäksi suunniteltu. (Peltola 2023.)

General Electricillä on vakiintuneita kumppaneita teollisen kaasun toimittajien keskuudessa. Näitä ovat muun muassa Air Liquide, 3M ja Invetec. Nämä kaasunvalmistajat ovat kehittäneet g³-kaasun eri komponenttien sekoittamiseen tiettyjä välineitä ja prosesseja. Vastaavat laitteet, joilla on seurattu SF₆-kaasun puhtautta ja kuivuutta, on adaptoitu g³-sovelluksiin (kuva 6). Laitteilla tarkastetaan esimerkiksi g³-kaasun eri komponenttien suhdetta. Vaikka mittalaitteita on muokattu, ovat pääperiaatteet pysyneet samoina. g³-kaasu on SF₆-kaasun tavoin turvallinen mittalaitteita käsittelevälle henkilöstölle. (g³: The SF₆-free solution in practice 2021: 2–3; Peltola 2023.)



Kuva 6. 3M:n Novec 4710 -kaasua sisältävien seosten käsittelyyn sopiva Dilo Multi Analyzer ^{C4} (Multi Analyzer ^{C4}).

g³-kaasua voi hankkia 3M:n kautta. Yhteen B50-kokoiseen kaasupulloon mahtuu noin 22 kilogrammaa nestemäistä g³-kaasuseosta. Näitä pulloja käytetään sovelluksissa, joissa vaaditaan suurehkoja määriä kaasua, esimerkiksi GIS- tai GIL-kojeistojen täytöissä. g³-kaasua on saatavilla myös pienemmissä 2 kilogramman pulloissa, joissa g³-kaasu on kaasumaisessa olomuodossa. Näitä voidaan käyttää niin sanotuissa gas-to-gas-operaatioissa eli sovelluksissa, joissa

jo kaasua sisältävään kaasutilaan lisätään kaasua. GE:n kumppanit ovat kehittäneet erityisiä kaasukärryjä, jotka mahdollistavat sekä suurten että pienten kaasumäärien täyttöä ja talteenottoa SF₆-laitteiden tavoin. (g³: The SF₆-free solution in practice 2021: 3.)

Jotta kaasun eri komponenttien oikeista suhteista voidaan varmistua, g³-kaasun täytyy olla homogeenistä, kun se muutetaan nesteestä kaasuksi. g³-kaasukärryillä tämä on mahdollista automaattisesti, sillä kaasupulloja lämmitetään automaattisella induktiivisella tai resistiivisellä vastuksella. Tämä on ainoa merkittävä ero SF₆-kaasun käsittelyyn, jossa lämmitys ei ole tarpeellista kylmiä olosuhteita lukuun ottamatta. (g³: The SF₆-free solution in practice 2021: 3.)

3.3 g³-teknologian haasteet

Tällä hetkellä g³-kaasuja on käytössä niin vähän ja teknologia on vielä niin uutta, että g³-kaasun kierrätystä ei voida taata. Kaikki vanhentuneet tuotteet tulee hävittää tähän erikoistuneiden yhtiöiden kautta. Tämä vastaa SF₆-kaasukorjaajien tuotannon alkuaikojä, jolloin niissä käytetyn kaasun hävittäminen oli yleisempää kuin kierrättäminen. Ajan kuluessa uusia kierrätysprosesseja kehitettiin siten, että SF₆-kaasun eri komponentteja voitiin erottaa toisistaan. Nykyään jopa saastuneet SF₆-kaasut voidaan kierrättää. Samaa voidaan odottaa g³-kaasun tulevaisuudelta. General Electric tutkii tällä hetkellä Novec 4710:n talteenottoon kahta eri lähestymistapaa, jotka mahdollistaisivat g³-kaasun kierrätyksen ja talteenoton tulevaisuudessa. (g³: The SF₆-free solution in practice 2021: 4.)

Vaikka g³-kaasun GWP on erityisen matala verrattuna SF₆-kaasuun, sen rooli eristekaasuna voi silti tulevaisuudessa olla uhattuna. Jos Euroopan Unionilta tulisi linjaus, että eristekaasujen tulisi olla täysin päästöttömiä, olisi General Electricillä ja muilla g³-kaasua käyttävillä yrityksillä, kuten Hitachi Energyllä, edessään uuden kaasun tai teknologian kehittäminen. 3M on ilmoittanut lopetta-

vansa kaikkien fluorikaasujen valmistamisen vuoteen 2025 mennessä, mutta tulee avaaman patentin muiden käytettäväksi, joten g³-kaasun valmistus on turvattu jatkossakin. (Peltola 2023.).

4 Siemens Blue GIS ja Clean air

Toinen tapa korvata SF₆-kaasu sähkövoimatekniikassa on eristää GIS-kojeiston osat puhtaalla teollisella ilmalla ja hoitaa valokaaren sammutus tyhjiötekniikalla. Seuraavissa kappaleissa kerrotaan Siemens Energyn Clean air -teknologiasta.

Saksalainen Siemens on toiminut energia-alalla jo noin 150 vuotta. Se on yksi maailman suurimmista toimijoista sähkö- ja elektroniikka-alalla. Siemens Energy on perustettu vasta vuonna 2020, mutta se seuraa Siemens Gamesa Renewable Energyn jalanjäljissä itsenäisenä yhtiönä Siemens-brändin alla. Siemens Energyn päätoimipiste sijaitsee Saksan Münchenissä. (The History of Energy at Siemens.)

Siemens Energy on kehittänyt tyhjiökatkaisijaan ja puhtaalla ilmalla eristämiseen perustuvan Siemens Blue GIS -kojeiston. Siemens Blue on tuotemerkki, jota Siemens Energy käyttää SF₆-vapaista tuotteistaan. Siemensin puhtaalla ilmalla eristämiseen perustuvan teknologian nimi on Clean air. Clean air -teknologia on täysin fluorikaasuista vapaa eristeratkaisu. Clean airin eristeaine on teollista ilmaa, joka koostuu 80 prosenttisesti tyypestä ja 20 prosenttisesti hapesta. Kaasu on täysin puhdistettua ja kuivaa. Puhdas ilma ei kuitenkaan ole pätevä väliaine katkaisijaan, koska valokaari ei sammu ilmassa niin lyhyellä avausvälillä, jota GIS-kojeistojen katkaisijoissa yleisesti käytetään. Siemens Blue -tuotteissa valokaari sammuu katkaisijassa olevan tyhjiön ansioista. Tyhjiökatkaisija ei tarvitse valokaaren sammuttamiseen väliainetta, sillä tyhjiössä valokaari sammuu itsestään virran nollapisteessä. (8VN1 Blue GIS up to 145 kV 2021: 1–2; Vacuum Circuit Breaker 2019.)

Clean air -teknologiaa on saatavilla 145 kV:n GIS-kojeistoina sekä mittamuuntajissa jo 420 kV:iin asti. 420 kV:n GIS-kojeistojen odotetaan tulevan markkinoille vuosien 2025–2026 aikana. Jännitetasolle 550 kV tullaan esittelemään komponentteja ja kojeistoja portaittain vuoteen 2030 asti. Virkkalaan valmistui

vuonna 2022 Suomen ensimmäinen ja siihen aikaan Euroopan suurin SF₆-vapaa 110 kV:n GIS-kojeisto (kuva 7). (Blue Products for sustainable 2021: 1; For a greener Finland 2021.)



Kuva 7. Siemens 8VN1 Blue GIS -kojeisto Lohjalla Virkkalassa Fingridin sähköasemalla.

Virkkalan uuden Blue GIS-aseman ansiosta Fingrid vähensi käytössä olevan SF₆-kaasun määrää 2500 kg:lla, mikä vastaa 57 000 tonnia hiilidioksidia. (Blue Products for sustainable 2021: 1; For a greener Finland 2021).

4.1 Clean air -teknologian ympäristövaikutukset

Vaikka Clean air ei yllä eristysominaisuuksiltaan aivan SF₆-kaasun tasolle, Clean air korostaa fluorikaasuvapaiden teknologioiden ekologista puolta tarjoten samalla monia muita hyviä ominaisuuksia. Clean air ei ole vaarallinen aine, eli sen pääseminen ilmakehään ei ole ihmiselle eikä ympäristölle haitallista. Puhdistetun ilman hankinta ja käsittely on edullista, eikä ilmaa tarvitse kierrättää.

Clean air on myrkytön ja turvallinen eristeaine. Siemens Blue GIS -kojeiston hiilijalanjälki on yli 30 % pienempi kuin vastaavan SF₆-GIS-kojeiston, vaikka se onkin fyysiseltä kooltaan hieman suurempi. (8VN1 Blue GIS up to 145 kV 2021: 1–2.)

Tyhjiötekniikan ansioista katkaisu- tai vikavirtatapahtumissa ei synny hajoamistuotteita. Clean air on myrkytöntä, joten se ei vaadi sähköasemalle erityistä ilmanvaihtoa mahdollisia kaasuvuotoja varten eikä esimerkiksi hiilidioksidipitoisuuden valvontaa asemalla. Clean air tyhjiötekniikkoineen on huolto- ja sääntelyvaapaata, eikä teollista ilmaa tarvitse käsitellä sen käyttöään lopussa. Clean air -teknologialla on esimerkiksi näiden asioiden takia matalammat eliniän kustannukset verrattuna f-kaasueristeisiin GIS-kojeistoihin. (8VN1 Blue GIS up to 145 kV 2021: 1–2; Stelzer 2022: 16.)

4.2 Blue GIS -kojeiston toiminta ja kunnossapito

Tyhjiökatkaisijan rakenne on hyvin yksinkertainen. Käytännössä siinä on tyhjiöön sijoitettu kiinteä kosketin sekä liikkuva kosketin, joiden avausväliksi riittää suuremmissakin jännitteissä 5–30 mm. Tästä syystä tyhjiökatkaisijan koko on jopa pienempi kuin perinteisen SF₆-katkaisijan. (Stelzer 2022: 7, 14.)

Tyhjiötekniikalla saavutetaan hyvää oikosulkukytkentäkykyä ilman komponentin huonontumista ajan saatossa. Tyhjiökatkaisija kestää jopa 30 000 katkaisukertaa nimellisvirralla säilyttäen alkuperäisen suorituskykynsä. Siemens lupaa katkaisijoissa käytetyn tyhjiön säilyvän koko kojeiston eliniän ajan (Siemens Energy Blue high-voltage products 2022: 27–28; Stelzer 2022: 16.) Tyhjiön kuntoa ei kuitenkaan voi tarkistaa eikä sitä voi huoltaa, sillä se on suljettu. Mahdolliset katkaisijan vaihdot tulee tilata Siemensin kautta. (Sepp 2023.)

Clean air -teknologiaa voidaan Siemensin mukaan käyttää jopa –60... +55 °C:n lämpötiloissa (Siemens Energy Blue high-voltage products 2022: 28). Clean air -kojeiston elinikä on 50 vuotta. Ensimmäinen suurempi tarkastus kojeistolle tehdään vasta 25 vuoden iässä. Siemens Energy (8VN1 Blue GIS up to 145 kV

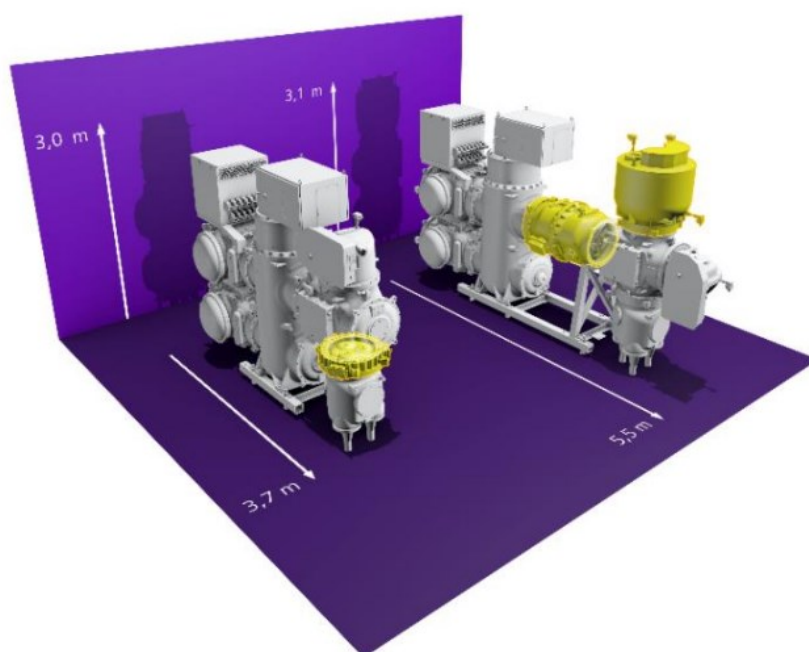
2021: 1) mainostaa tyhjiökatkaisijaa huoltovapaana, mutta Blue GIS -kojeistoa tulee muuten huoltaa ja kunnossapitää vastaavalla tavalla kuin muitakin kojeistoja. Takuuajan jälkeen kunnossapitoa suoritetaan valmistajan ohjeiden mukaan. Kojeston komponenttien kiinnityksiä tarkistetaan ja katkaisijan ylimeno-resistanssia voidaan mitata vastaavasti kuin SF₆-katkaisijoiden. Teollisen ilman kosteutta ja puhtautta voidaan mitata. Kojeston mittarien ja vahtien, esimerkiksi tiheysvahdin, toimintaa voidaan testata samanlaisilla metodeilla kuin perinteistenkin kojeistojen. (8VN1 Blue GIS up to 145 kV 2021: 1; Siemens Energy Blue high-voltage products 2022: 28.)

Kaasun kuljetus tai käsittely ei ole luvanvaraista toimintaa, eli sen käyttöön ei tarvitse erikseen kouluttaa henkilökuntaa. Clean air -kaasua voidaan käsitellä samanlaisilla tyhjiöpumpuilla, joita käytetään SF₆-kojeistoissa. Clean air -kaasuseoksessa on vain ilmakehästä luonnostaan löytyviä aineita, minkä takia mahdollisissa vuototilanteissa vuotopaikkoja ei voi etsiä vuotoilmaisimilla. Blue GIS -kojeiston vuoto ei kuitenkaan ole ympäristölle vaarallista. Vuotoja seurataan jatkuvalla valvonnalla etäluettavilla tiheysvahdeilla. Eristeaineen eli tässä tapauksessa puhtaan ilman paineen ei anneta laskea niin alas, että eristeaineen läpilyöntilujuus laskisi liian alas. Vuotopaikkojen sijainti tiedetään kaasutilan tarkkuudella, kun jokaisessa kaasutilassa on oma tiheysvahtinsa. Vuotavan kaasutilan löytymisen jälkeen mahdollinen vuotopaikka on etsittävä esimerkiksi irrottamalla kojeiston komponentteja. Jos vuotopaikkaa ei voida paikallistaa, on ratkaisuna vaihtaa vuotavia kojeiston osia uusiin. (8VN1 Blue GIS up to 145 kV 2021: 1–2; Sepp 2023.)

Rakentamisvaiheessa Blue GIS -kojeisto täytetään SF₆-kojeiston tapaan heliumilla, jolloin rakentamisvaiheessa syntyneitä vuotokohtia voidaan etsiä heliumilmaisimella. Vuotopaikkojen etsimisen jälkeen kojeisto tyhjennetään heliumista tyhjiöpumpulla ja täytetään teollisuusilmalla. (Sepp 2023.)

4.3 Clean air -teknologian haasteet

Blue GIS -tuotteet ovat fyysisiltä mitoiltaan hieman perinteisiä SF₆-kojeistoja suurempia puhtaan ilman huonompien eristysominaisuuksien takia. Jännitteisten osien sekä kojeiston rungon välisen eristevälin tulee siis olla suurempi, mistä kojeiston suurempi koko johtuu. Siemens on kuitenkin onnistunut rajaamaan Blue GIS -kojeiston kasvua optimoimalla muita komponentteja. Esimerkiksi mittamuuntajien kokoa ja painoa saatiin pienemmäksi optimoimalla sensoreiden kokoa ja kiinnitystapaa. Mittamuuntajissa virta- ja jännitemuuntajat yhdistettiin, mikä säästää koko kojeiston kokoa ja painoa. Kuvassa 8 vertaillaan Siemensin GIS-kojeistojen kokoa eri mittamuuntajien kanssa. (Blue High Voltage Products; Low-Power Instrument Transformer (LPIT) 2021.)



Kuva 8. Siemens 8VN1 GIS -kojeistojen vertailu erilaisten mittamuuntajien kanssa. (Low-Power Instrument Transformer (LPIT) 2021).

Kuvassa 8 vasemmanpuoleisena Siemensin GIS-kojeisto LPIT-mittamuuntajan kanssa (Low-Power Instrument Transformer) ja oikealla vastaava kojeisto perinteisten mittamuuntajien kanssa. Kuvasta nähdään, kuinka mittamuuntajaa optimoimalla kojeiston kokoa voidaan pienentää huomattavasti. Tällä on merkittävä

vaikutus Siemens Blue GIS -kojeiston fyysisiin mittoihin. Siemensin muut Blue-tuotteet eli ulkokojeistoihin asennettavat komponentit sekä muualla maailmassa yleisemmin käytetyt GIL-tuotteet on jo saatu samoihin mittoihin SF₆-komponenttien kanssa. (Low-Power Instrument Transformer (LPIT) 2021.)

Blue GIS -kojeiston kunnossapitoa haastaa myös haisteltavan komponentin puute, joka vaikeuttaa vuotopaikkojen löytämistä. Pahimmillaan kokonaisina kojeiston kaasutiloja tulee avata ja kojeiston alumiiniosia irrottaa, jotta vuotopaikka löytyy. Nämä tilanteet ovat suuritöisiä, sillä kojeiston jännitteisiä osia täytyy kytkeä kuormattomaksi ja jännitteettömäksi. Eliniäksi suljettu tyhjiökatkaisija tarkoittaa, että tyhjiön kuntoa ei voida tarkistaa. Tyhjiökatkaisijat ovat huoltovapaita, mutta niitä ei myöskään voi mahdollisessa vikaantumis- tai rikkotilanteessa huoltaa, säätää tai korjata, vaan ne on aina vaihdettava uuteen. (Siemens Energy Blue high-voltage products 2022: 27–28; Sepp 2023.)

5 Johtopäätökset

Tarve korvata SF₆-kaasua käyttävä teknologia on todellinen, sillä SF₆-kaasun haitat käyttäjälle ja ympäristölle ovat huomattavat. Myös EU:n asettama kieltö rakentaa uusia SF₆-kaasua sisältäviä kojeistoja lähestyy. Alati lisääntyvä sähköenergian tarve lisää välillisesti eristekaasujen käyttöä, jolloin käytettävien eristekaasujen ympäristöystävällisyyden ja turvallisuuden merkitys korostuu. Kustannussyistä toimivia SF₆-eristeisiä sähköasemia ei tulla todennäköisesti korvaamaan uusilla vaihtoehtoilla ennen kuin niiden käyttöikä loppuu, vaan ala uudistuu hitaasti uusien asemien ollessa enenevissä määrin SF₆-vapaita.

SF₆-kaasua pidettiin pitkään korvaamattomana, minkä takia sen käyttö sai erityisluvan sähkönsiirtoteollisuudessa. Viime vuosina suuret GIS-kojeistoja valmistavat yritykset ovat kuitenkin lähteneet omatoimisesti suunnittelemaan uusia ratkaisuja, vuosia ennen viranomaisten asettamia SF₆-kaasun käytön takarajoja. Uudet teknologiat vaikuttavat olevan hyvin käyttökelpoisia SF₆-kaasun korvaajia: joidenkin ominaisuudet suurjännite-eristämisessä voivat olla jopa parempia kuin SF₆-kaasun ollen samalla huomattavasti ympäristöystävällisempiä.

Markkinoilla on nyt kehitteillä kaksi erilaista tapaa korvata SF₆-kaasu. Toisessa SF₆-kaasu korvataan ympäristöystävällisemmällä eristekaasulla, jonka GWP ei kuitenkaan ole 0. Tässä on etuna kojeiston lähes täydellinen vastaavuus perinteiseen SF₆-kojeistoon, mutta haittapuolena on ilmastonlämmityspotentiaali, jota ei ole täysin voitu minimoida. Toinen tapa korvata SF₆-kaasu on puhtaalla teollisella ilmalla eristetty kojeisto ja tyhjiökatkaisija. Tällä tavalla kojeiston GWP on 0, sen käytössä ei synny ollenkaan päästöjä eikä palamistuotteita, mutta sen täytyy olla hieman suurempi teollisen ilman huonomman eristelujuuden takia. Lisäksi sen kunnossapidossa voi olla haasteita esimerkiksi vuotopaikkojen etsimisessä.

Molemmat tavat ovat päteviä tapoja korvata SF₆-kaasu ja molempia teknologioita tullaan varmasti näkemään tulevaisuudessa. Siemens Energy, General Electric ja muut valmistajat ovat lähivuosina saamassa valmiiksi omat

SF₆-vapaat 400 kV:n GIS-kojeistot. 400 kV:n GIS-kojeistoa pidetään varsinkin Suomessa lopullisena tavoitteena, sillä 400 kV on korkein jännitetaso Suomen sähkönsiirtoverkossa. Kun 400 kV:n SF₆-vapaa teknologia valmistuu, voidaan teoriassa koko Suomen sähkönsiirtoverkko rakentaa SF₆-vapaaksi.

Uusien teknologioiden hinnat ovat tällä hetkellä vielä korkeammalla kuin perinteisten SF₆-kojeistojen. SF₆-vapaiden kojeistojen hinnat tulevat todennäköisesti kuitenkin laskemaan, sillä uudet teknologiat eivät sinänsä ole kalliimpia, vaan ne ovat vielä sen verran harvinaisempia, että suunnittelu ja valmistuskulut ovat korkeammalla. Valmistajien (Siemens Energy Blue high-voltage products 2022: 28) mukaan uusien SF₆-vapaiden kojeistojen valmistaminen ja kunnossapito tulevat todennäköisesti olemaan jopa edullisempia, kun SF₆-kaasun käsittelystä johtuvista kustannuksista päästään (Peltola 2023; Stelzer 2022: 16.)

Kunnossapitoammattilaisten näkökulmasta SF₆-vapaat kojeistot ovat markkinoille erittäin tervetulleita. Kunnossapitäjän terveydestä ja turvallisuudesta huolehtiminen helpottuu, kun mahdollisissa kaasuvuodoissa ja vikatilanteissa henkilökuntaan ei kohdistu enää terveydellistä vaaraa. Suurissa vikavirtatilanteissa ei ole tarvetta siivota myrkyllistä sähköasemalle levittynyttä palamistuotetta suojavarustukseen pukeutuneena. Kojeistojen samanlaisuus SF₆-kojeistoihin nähden helpottaa kunnossapitoyrityksen palvelustrategian laatimista. Uudenlaiset eristekaasut vaativat toki uusien kaasunkäsittelylaitteistojen hankintaa, mutta kojeistojen huolto- ja kunnossapito on muuten niin lähellä perinteisiä SF₆-kojeistoja, että työhön kouluttautumiseen ei tule kulumaan paljoa resursseja.

Lähteet

8VN1 Blue GIS up to 145 kV. 2021. Verkkoainesto. Siemens Energy. <<https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:59070569-88fe-487b-8226-fdce58cb2dc4/flyer-8vn1-blue-gis-145kv-non-eu.pdf>>. Julkaistu 2021. Luettu 22.2.2023.

Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen K. & Palva, V. 2015. Suurjännitetekniikka. Helsinki: Otatieto.

Blue High Voltage Products. Siemens Energy. Verkkoaineisto. <<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/innovation/blue-high-voltage-products.html>>. Luettu 22.2.2023.

Blue Products for sustainable and greenhouse gas free power grids. 2021. Verkkoainesto. Siemens Energy. <<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/technical-papers/download-blue-portfolio-white-paper.html>>. Julkaistu 7/2021. Luettu 22.2.2023. Vaatii kirjautumisen.

De Bruyckere Luka & Ottersbach Nicholas. 2022. Europe has a unique chance to phase out SF₆ – the world's strongest polluter. Verkkoainesto. Energy Monitor. <<https://www.energymonitor.ai/tech/networks-grids/europe-has-a-unique-chance-to-phase-out-sf6-the-worlds-strongest-polluter/>>. Julkaistu 29.3.2022. Luettu 25.2.2023.

Devices for the Determination of the SF₆ Gas Quality. 2020. Verkkoaineisto. DILO. <https://dilo.com/fileadmin/dilo_us/1._SF6_Gas/1._Products/6._Measuring_Devices/1._Gas_Analyzers/PDFs/Multi_Analyzer_SF6/3-038R-RV2-Multi-Analyzer_DS_Rev_2021.pdf>. Julkaistu 12.10.2020. Luettu 22.3.2023.

EconIQ - Eco-efficient high-voltage portfolio. 2022. Verkkoainesto. Hitachi Energy. <<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentId=9AKK107992A1307&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. Julkaistu 30.8.2022. Luettu 20.3.2023.

European Platform on Life Cycle Assessment (LCA). 2016. Verkkoaineisto. Euroopan komissio. <<https://ec.europa.eu/environment/ipp/lca.htm>>. Julkaistu 23.11.2016. Luettu 7.2.2023.

Fingrid rakentaa Kirkkonummelle uuden sähköaseman turvaamaan alueen sähkönsaantia. 2022. Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/ajankoh-taista/tiedotteet/2022/fingrid-rakentaa-kirkkonummelle-uuden-sahkoaseman-tur-vaamaan-alueen-sahkonsaantia/>>. Julkaistu 29.9.2022. Luettu 3.4.2023.

Fingridin investoinneilla lisää liityntävalmiuksia ja käyttövarmuutta Jyväskylän ja Joroisten alueen kantaverkkoon. 2021. Verkkoaineisto. ePressi. <<https://www.epressi.com/tiedotteet/energia/fingridin-investoinneilla-lisaa-liityn-tavalmiuksia-ja-kayttovarmuutta-jyvaskylan-ja-joroisten-alueen-kantaverk-koon.html>>. Julkaistu 28.9.2021. Luettu 3.4.2023

For a greener Finland: Siemens Energy seals largest order for SF₆-free gas-insulated switchgear in Europe. 2021. Verkkoaineisto. Siemens Energy. <<https://press.siemens-energy.com/eu/en/pressrelease/greener-finland-sie-mens-energy-seals-largest-order-sf6-free-gas-insulated-switchgear>>. Julkaistu 27.4.2021. Luettu 22.2.2023.

g³: The SF₆-free solution in practice. 2021. Verkkoainesto. General Electric. <<https://www.gegridsolutions.com/app/resources.aspx?prod=g3&type=13>>. Julkaistu 20.4.2021. Luettu 2.2.2023.

General Electric. 2022. Verkkoaineisto. Britannica. <<https://www.britan-nica.com/topic/General-Electric>>. Julkaistu 28.11.2022. Luettu 20.2.2023.

GE's g³ technology to accelerate decarbonization efforts in Norway. 2021. Verkkoaineisto. General Electric. <<https://www.ge.com/news/press-releases/ge-g3-technology-to-accelerate-decarbonization-efforts-in-norway>>. Julkaistu 14.9.2021. Luettu 28.3.2023.

GE unveils world's 1st 420 kV SF₆-free g3 circuit-breaker for gas-insulated substations. 2022. Verkkoainesto. General Electric.
<<https://www.ge.com/news/press-releases/ge-unveils-world-1st-420-kv-sf6-free-g3-circuit-breaker-for-gas-insulated-substations>>. Julkaistu 29.3.2022. Luettu 2.2.2023.

Green Deal: Phasing down fluorinated greenhouse gases and ozone depleting substances. 2022. Verkkoainesto. Euroopan komissio. <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_2189>. Julkaistu 5.4.2022. Luettu 25.2.2023.

ISO 14040:2006+A1:2020. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. 2020.

ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. 2006.

Low-Power Instrument Transformer (LPIT). 2021. Verkkoaineisto. Siemens Energy. <<https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:973869a8-0f87-4011-bf7f-04fc691686b9/flyer-lpit-en-2021-03.pdf>>. Julkaistu 2021. Luettu 22.2.2023.

Lämmityspotentiaali GWP. 2014. Verkkoaineisto. Tieteen termipankki.
<<https://tieteentermipankki.fi/wiki/Geofysiikka:l%C3%A4mmityspotentiaali>>. Päivitetty 1.10.2014. Luettu 10.3.2023.

Mahdizadeh Navid. 2021. Game-changing EconIQ high-voltage technologies towards a carbonneutral future. Verkkoainesto. Hitachi Energy. <<https://library.e.abb.com/public/03e0c85be1cb4723a3b7830a4f510719/White%20paper%20-%20Game-changing%20EconIQ%20high-voltage%20technologies%20towards%20a%20carbon-neutral%20future.pdf?x-sign=m3ldNZu5UK-DTUqdiCVNkSRhWgKsUyRr6buA4xcfUuPAWUkE9gHU2Cd9eMIKKUKna>>. Julkaistu 21.8.2021. Luettu 20.3.2023.

Multi Analyzer ^{C4}. Verkkoainesto. DILLO. <<https://dilo.com/alternative-gase/geraete-fuer-alternative-gase/messgeraete/multi-analyser-c4>>. Luettu 22.3.2023

National Grid Begins Journey to SF₆-free HV Substations in their Southeast England Network. 2021. Verkkoaineisto. General Electric. <<https://www.gegrid-solutions.com/app/resources.aspx?prod=g3&type=13>>. Julkaistu 20.4.2021. Luettu 2.2.2023. Vaatii kirjautumisen.

Peltola, Risto. 2023. Myyntijohtaja, GE Grid Solutions, Helsinki. Keskustelu 17.2.2023.

Rikberg, Harry. 2023. Sähköasentaja, Infratek Finland Oy/Omexom, Helsinki. Keskustelu 15.3.2023.

Sepp, Innar. 2023. Työmaapäällikkö, Siemens Energy, Espoo. Sähköpostikeskustelu 9.3.2023.

SF₆ Circuit Breakers – Construction, Types and Working. 2021. Verkkoaineisto. Study Electrical. <<https://studyelectrical.com/2014/07/sulphur-hexafluoride-sf6-circuit-breaker-construction-working-advantages.html>>. Julkaistu 19.7.2021. Luettu 6.4.2023.

SFS-EN IEC 60376:2018. Vaatimukset sähkölaitteissa käytettävälle teknisille rikkiheksafluoridille (SF₆) ja SF₆-seoskaasuissa käytettäville lisäkaasuille. 2018

Siemens Energy Blue high-voltage products. 2022. Verkkoainesto. Siemens Energy. <<https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:1e83b691-89a5-42f0-a42a-8d70c62832b7/2020-08--siemens-energy-blue-portfolio-customer-presentation-en-.pdf>>. Julkaistu 8/2022. Luettu 22.2.2023.

Stelzer Andreas. 2022. Vacuum Interrupter – Basic switching technology. Verkkoaineisto. Siemens Energy. <<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:3a9e9c5a-89e4-4e62-b4d7-5276d1c16413/19-var2022-stelzer->

vacuuminterrupter-20220905-revb-pub.pdf>. Julkaistu 12.9.2022. Luettu 5.4.2023.

Sähköturvallisuuslaki. 2016. 1135/16.12.2016.

Technical Data 3M™ Novec™ 4710 Insulating Gas. 2022. Verkkoaineisto. 3M. <<https://multimedia.3m.com/mws/media/1132124O/3m-novec-4710-insulating-gas-tech-data-sheet.pdf>>. Julkaistu 12/2022. Luettu 22.3.2023.

The Big Switch: A game-changing technology towards a carbon-neutral future. 2021. Verkkoaineisto. Hitachi Energy. <<https://go.hitachienergy.com/fluoronitrile-gas-webinar-2021>>. Julkaistu 14.10.2021. Luettu 20.3.2023.

The History of Energy at Siemens. Verkkoaineisto. Siemens Energy. <<https://www.siemens-energy.com/global/en/company/about/history.html>>. Luettu 6.3.2023.

Tietoja 3M:stä. Verkkoaineisto. 3M. <https://www.3msuomi.fi/3M/fi_FI/company-ndc/>. Luettu 22.3.2023.

Tukes-ohje 16/2017 Sähkölaitteistot ja tarkastukset. 2017. Verkkoaineisto. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. <<https://tukes.fi/documents/5470659/6372867/Tukes-ohje+-+S%C3%A4hk%C3%B6laitteistot+ja+tarkastukset/a7ba0010-6bd4-4d97-a737-978db5d53dea/Tukes-ohje+-+S%C3%A4hk%C3%B6laitteistot+ja+tarkastukset.pdf>>. Julkaistu 10.1.2017. Luettu 25.2.2023.

Täytöntöönpanoasetus (EU) 2015/2066. 2015. Verkkoaineisto. EUR-Lex. <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32015R2066>>. Julkaistu 18.11.2015. Luettu 15.3.2023.

Uusi innovaatio syrjäyttää ilmastopahiksena tunnetun SF₆-kaasun. 2022. Verkkoainesto. Schneider Electric. <<https://www.sttinfo.fi/tiedote/uusi-innovaatio-syrjayttaa-ilmastopahiksena-tunnetun-sf6-kaasun?publisherId=69818837&releaseId=69956708>>. Julkaistu 8.11.2022. Luettu 24.1.2023.

Vacuum Circuit Breaker (VCB) – Principle, Construction and Working. 2019. Verkkoaineisto. Study Electrical. <<https://studyelectrical.com/2014/11/vacuum-circuit-breaker-vcb-working-construction.html>>. Julkaistu 10.9.2019. Luettu 6.4.2023.

Vainio, Vesa. Fingrid luopuu ilmastolle haitallisesta SF₆-eristekaasusta vähitellen. 2020. Verkkoainesto. Fingrid. <<https://www.fingridlehti.fi/fingrid-luopuu-ilmastolle-haitallisesta-sf6-eristekaasusta-vahitellen/>>. Julkaistu 22.10.2020. Luettu 24.1.2023.