



SF₆-kaasun käyttö suurjännite- katkaisijoissa

Eemeli Andstén

OPINNÄYTETYÖ
Marraskuu 2021

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

ANDSTÉN, EEMELI:
SF₆-kaasun käyttö suurjännitekatkaisijoissa

Opinnäytetyö 41 sivua, joista liitteitä 1 sivu
Marraskuu 2021

Opinnäytetyö laadittiin yhteistyössä NRC Group Finland Oy:n kanssa. NRC Group on Pohjoismaissa toimiva infra-alan yritys, jonka yhteen osaamisalueeseen kuuluu kytkinasemien rakentaminen ja saneeraus. Opinnäytetyön tarkoituksena oli laatia NRC Groupille työohje SF₆-kaasun käytöstä suurjännitekatkaisijoissa, joita käytetään kytkinasemilla.

Opinnäytetyössä käydään läpi SF₆-kaasun rakenne sekä yleiset ominaisuudet. Lisäksi tutkitaan SF₆-kaasun ympäristövaikutuksia sekä kaasua koskevia lakeja ja asetuksia. Työssä esitellään SF₆-kaasun käyttökohteita suurjännitelaitteistoissa ja käydään läpi SF₆-katkaisijan kaasutuksessa käytettävä laitteisto ja itse katkaisijan kaasutus. Työssä pohditaan myös SF₆-kaasun mahdollisia korvaavia vaihtoehtoja suurjännitelaitteistoissa tulevaisuudessa.

Opinnäytetyössä hyödynnettiin monipuolisia lähteitä sekä sähköalan ammattilaisten tietotaitoa. Opinnäytetyön teoriaosuudet perustuvat sähköiseen sekä painettuun sähköalan materiaaliin. Lisäksi opinnäytetyöhön sisältyi kenttätyöskentelyä Pysäysperän sähköasemalla Haapajärvellä, jossa SF₆-katkaisijan rakentaminen ja kaasutus tapahtui.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin kattava tutkielma SF₆-kaasusta, sen käyttökohteista suurjännitelaitteistoissa sekä mahdollisista korvaavista vaihtoehtoista tulevaisuudessa. Lisäksi onnistuttiin luomaan käyttökelpoinen työohje, joka sisältää SF₆-katkaisijan kaasutuksen.

Asiasanat: SF₆-kaasu, kytkinlaitteistot, katkaisija

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering
Power Engineering

ANDSTÈN EEMELI:
The Use of SF₆ Gas in High Voltage Circuit Breakers

Bachelor's thesis 41 pages, appendices 1 page
November 2021

This thesis was prepared in collaboration with NRC Group Finland Oy. NRC Group is a Nordic infrastructure company whose one area of expertise is the construction and renovation of substations. The purpose of the study was to produce a work instruction for NRC Group on the use of SF₆ gas in high voltage circuit breakers.

The structure and general properties of SF₆ gas are reviewed in this thesis. In addition, the environmental impact of SF₆ gas, as well as gas laws and regulations, are studied. The applications of SF₆ gas in high voltage equipment are presented and the equipment used in the gasification of the SF₆ circuit breaker and the gasification of the circuit breaker itself are reviewed in this study. The study also considers possible alternatives to SF₆ gas in the future.

Data were collected by means of a literature review and interview of a professional working in the field of electrical power. In addition to this, the thesis includes field work at the Pysäysperä substation in Haapajärvi, where the construction and gasification of the SF₆ circuit breaker took place.

As a result of this study, a report was obtained on SF₆ gas, its applications in high voltage equipment and potential alternatives in the future. In addition, a work guide was created for handling SF₆ gas in high voltage circuit breakers.

Key words: SF₆ gas, switchgear, circuit breaker

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	SF ₆ -KAASU.....	7
	2.1 Yleiset ominaisuudet.....	7
	2.2 Ympäristövaikutukset.....	8
	2.3 Laki ja asetukset	10
3	SF ₆ -KAASU SUURJÄNNITELAITTEISTOISSA	12
	3.1 Katkaisijat.....	12
	3.1.1 Katkaisijoiden historiaa.....	13
	3.1.2 SF ₆ -katkaisijat.....	14
	3.2 GIS-järjestelmät	20
4	SUURJÄNNITEKATKAISIJAN KAASUTUS.....	23
	4.1 Käytettävä laitteisto	23
	4.2 Kaasutus	24
5	KORVAAVAT VAIHTOEHDOT SF ₆ -KAASULLE.....	32
	5.1 SF ₆ -vapaaat vaihtoehdot suurjännitekytkinlaitteistoissa.....	32
	5.1.1 Korvaava kaasu.....	32
	5.1.2 Tyhjiö tekniikat.....	33
6	POHDINTA	36
	LÄHTEET.....	37
	LIITTEET	41
	Liite 1. ABB:n LTB 145D1/B -katkaisijan merkkikilpi	41

LYHENTEET JA TERMIT

AIS	Air insulated Switchgear
dead tank	maan potentiaalissa oleva katkaisukammio
F-kaasut	Fluoratut kaskihuonekaasut
GIS	Gas insulated Switchgear
GWP	Global Warming Potential
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change
live tank	jännitteen potentiaalissa oleva katkaisukammio
ppmv	tilavuuden miljoonasosa
ppmw	painon miljoonasosa
RMU	Ring Main Unit

1 JOHDANTO

SF₆-kaasu eli rikkiheksafluoridi on synteettinen kaasu, jonka ensimmäinen teollinen käyttö tapahtui vuonna 1937, jolloin sitä käytettiin eristysaineena kaapeleille. Ydinvoimateollisuuden myötä 1950-luvulla SF₆-kaasua alettiin valmistaa suuria määriä ja sen käyttö laajentui suurjännitekatkaisijoihin katkaisuväliaineeksi. Nykyään SF₆-kaasua käytetään paljon erilaisissa suurjännitelaitteistoissa sen yliverstaisten ominaisuuksien ja suhteellisen halvan hinnan vuoksi. (Smeets, R., Van der Sluis, L., Kapetanovic, M., Peelo, D. F. & Janssen A. 2015, 182)

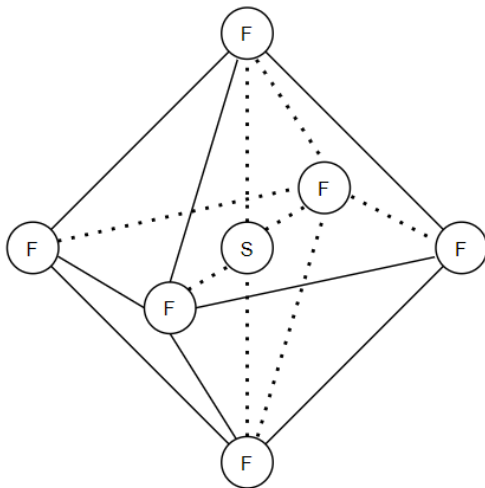
SF₆-kaasu kuuluu kuitenkin fluorattuihin kasvihuonekaasuihin ja on niistä voimakkain. Tämän takia sen käyttö on hyvin säädeltyä ja siihen vaaditaan Suomessa Turvallisuus- ja kemikaaliviraston hyväksymä pätevyys. SF₆-kaasun käyttömäärät ovat lisääntyneet viime vuosina muun muassa uusien kytkinlaitosten rakentamisen johdosta. Tähän ovat vaikuttaneet tuuli- ja aurinkoenergian kasvun määrä, minkä vuoksi sähköverkon liityntäpisteiden ja tätä kautta kytkinlaitosten määrä on kasvanut. Suomessa SF₆-kaasun määrä kojeistoissa on noussut vuodesta 2015 vuoteen 2020 lähes 70000 kiloa. (Adato Energia Oy 2021, 3; Tekniikan maailma 2019; Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu 2021)

NRC Group Finland Oy työskentelee Suomessa infra-alalla ja sen toimialaan kuuluvat muun muassa sähköasemaprojektit ja junaradan sähköverkkoa syöttävät syöttöasemaprojektit. Tällaisissa projekteissa työskennellään usein SF₆-kaasua sisältävien katkaisijoiden parissa. Tässä opinnäytetyössä pyritään luomaan yksityiskohtainen ohje SF₆-katkaisijan kaasutukselle.

2 SF₆-KAASU

2.1 Yleiset ominaisuudet

SF₆-kaasu rakentuu yhdestä rikkiatomista ja kuudesta sitä ympäröivästä fluoriatomista (KUVA 1). Tällainen rikin ja fluorin kemiallinen sidos on erittäin pysyvä. SF₆-kaasun sähkönlujuus on noin kolme kertaa suurempi kuin ilman ja katkaisukyky noin kymmenen kertaa suurempi kuin ilman. Myös sen lämmönsiirto ominaisuudet ovat hyvät. (SFS-EN IEC 60376:2018, 11)



KUVA 1. SF₆-kaasun kemiallinen rakenne. (Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen K. & Palva, V. 2015, 112)

SF₆-kaasun valmistus tapahtuu elektrolyysin avulla ja itse valmistusprosessi on yksinkertainen. Tästä syystä SF₆-kaasu on suhteellisen edullista. Standardissa IEC 60376 on asetettu ylärajat sähkövoimatekniikassa käytettävän SF₆-kaasun epäpuhtauksille. Tällä varmistetaan, ettei kaasu sisällä korroosiota aiheuttavia tai myrkyllisiä aineita. (Aro, M ym. 2015, 112)

Puhtaana SF₆-kaasu on väritöntä, mautonta, hajutonta, myrkytöntä ja palamaton kaasua. Lisäksi se on kemiallisesti pysyvä ja reagoimaton. SF₆-kaasu on normaaliolosuhteissa (20 °C, 100 kPa) noin viisi kertaa tiheämpää kuin ilma ja näin ollen yksi raskaimmista kaasuista. Vuototilanteissa kaasu hakeutuu mataliin paikkoihin, kuten esimerkiksi kaapelikanaviin ja vaikka se on myrkytöntä saattaa

se aiheuttaa tukehtumisvaaran syrjäyttäessään hapen. Sen sekoittuminen ilmaan on hidasta, mutta sekoituttuaan niitä ei voi enää erottaa. (Aro, M ym. 2015, 112; SFS-EN IEC 60376:2018, 11)

SF₆-kaasu on voimakkaasti elektronegatiivinen, minkä takia se omaa hyvät eristeominaisuudet. Elektronegatiivisuus tarkoittaa sitä, että aine vetää puoleensa vapaita elektroneja ja muodostaa näin pysyviä ioneja, jolloin elektronien siirtyminen on todella vaikeaa. SF₆-kaasu on myös todella hyvä väliaine valokaaren katkaisuun, koska se omaa alhaisen erottautumislämpötilan ja suuren erottautumisenergian. SF₆-kaasun kemiallisen sidoksen hajoaminen vaatii siis paljon energiaa, mutta se tapahtuu suhteellisen alhaisessa lämpötilassa. (SFS-EN IEC 60376:2018, 13) Taulukossa 1 on esitetty SF₆-kaasun tärkeimpiä ominaisuuksia.

TAULUKKO 1. SF₆-kaasun oleelliset ominaisuudet. (SFS-EN IEC 60376:2018, 11–13)

Tiheys lämpötilassa 20°C ja paineessa 100 kPa	6,07 kg/m ³
Lämmönjohtokyky lämpötilassa 25 °C	0,013 W/(m·K)
Hajoamislämpötila kvartsisäiliössä	500 °C
Kriittinen läpilyöntiarvo suhteessa paineeseen (<i>B</i>)	89 V·m ⁻¹ ·Pa ⁻¹
Kriittinen lämpötila	45,58 °C
Kriittinen paine	3,759 MPa

Taulukossa 1 kriittisellä lämpötilalla ja kriittisellä paineella tarkoitetaan pistettä, jota suuremmilla lämpötilan tai paineen arvoilla SF₆-kaasu ei voi enää nesteytyä, vaan esiintyy vain kaasuna. SF₆-kaasu hajoaa yli 500 °C lämpötilassa, jolloin vapautuu ihoa ja silmiä ärsyttäviä hajoamistuotteita, kuten sulfuryyli- ja tionyylifluorideja sekä erittäin myrkyllisiä fluorivety- ja rikkioksidihuuruja. (Linde-gas 2013, 8; Luoma, M. n.d.)

2.2 Ympäristövaikutukset

Kun kaasuja käsitellään, on mahdollisuus, että niitä pääsee ilmakehään. Tällöin täytyy ottaa huomioon myrkyllisten kaasujen vaikutus ympäristöön ja eliöihin

(ekotoksikologia), kaasujen vaikutus otsonikerrokseen (otsonikato) ja kasvihuonekaasujen lisääntymisestä aiheutuva vaikutus ilmaston lämpenemiseen (kasvihuoneilmiö). (SFS-EN IEC 60376:2018, 14)

SF₆-kaasu on kuitenkin myrkytön kaasu eikä sillä ole havaittu olevan vaikutusta ympäristöön tai eliöihin. Se myös liukenee huonosti veteen ja tästä syystä siitä ei ole vaaraa maaperälle tai pohjavesille. SF₆-kaasu ei myöskään kerry ravintoon, joten sillä ei ole haitallista vaikutusta ekosysteemiin. Se kuitenkin saattaa aiheuttaa tukehtumisvaaran kertyessään alaviin paikkoihin. SF₆-kaasu ei myöskään vaikuta otsonikerroksen ohentumiseen, koska se ei sisällä klooria. (SFS-EN IEC 60376:2018, 14)

SF₆-kaasu kuuluu fluorattuihin kasvihuonekaasuihin (F-kaasut). Nämä kaasut voimistavat ilmaston lämpenemistä eli kasvihuoneilmiötä. SF₆-kaasu on F-kaasuista voimakkain kasvihuonekaasu ja sen Global Warming Potential -, eli GWP-indeksi sadalle vuodelle laskettuna on ollut 23500. GWP-indeksi tarkoittaa kyseisen kaasun vaikutusta ilmaston lämpenemiseen suhteessa hiilidioksidiin. Hiilidioksidin (CO₂) GWP-indeksi on siis 1. SF₆-kaasun elinikä ympäristössä on todella pitkä. Sen elinikänä on pidetty jopa 3200 vuotta. Kuitenkin tuoreimman IPCC:n (Intergovernmental Panel on Climate Change) arviointiraportin mukaan SF₆-kaasulle tehdyt tutkimukset osoittavat sen eliniän olevan noin 1000 vuotta. Sadalle vuodelle laskettu GWP-indeksikin muuttuu myös hieman edellisestä raportista ja on uusimmassa arviointiraportissa 25200. Vaikka SF₆-kaasun GWP-indeksi on todella korkea ja siitä syystä sen ilmastoja lämmittävät vaikutukset ovat suuret, sitä pääsee vuotamaan ilmakehään vähän. Suuret laiterikot sähkötekniisissä laitteissa ovat harvinaisia ja vuotomäärät ovat pieniä, koska sähkölaitteiden SF₆-kaasutilat ovat osastoituja, jolloin vuoto kohdistuu pienelle alueelle. Kaiken kaikkiaan SF₆-kaasun vaikutus ilmastonlämpenemiseen sen kaikissa käyttömuodoissa on alle 0,1 % kaikista kasvihuonekaasuista. (IPCC 2021, 2–22, 7SM-29; SFS-EN IEC 60376:2018, 15; Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu 2020)

2.3 Laki ja asetukset

SF₆-kaasun ilmastoja lämmittävän vaikutuksen vuoksi sitä koskevia lakeja ja asetuksia on paljon. Ensimmäiset kasvihuonekaasuja ja siten SF₆-kaasua koskevat määräykset otettiin käyttöön 2000-luvun alkupuolella niin sanotussa Kioton pöytäkirjassa. Sen pohjalle on jälkeenpäin rakennettu alue- ja maakohtaisia asetuksia. Lisäksi SF₆-kaasulle ja sen käytölle on laadittu IEC standardeja kuten IEC 60480:2019 ja IEC 60376:2018, joissa annetaan ohjeita sähkölaitteista poistettavalle SF₆-kaasulle sekä vaatimuksia sähkölaitteistoissa käytettävälle SF₆-kaasulle.

Kioton pöytäkirja astui voimaan vuonna 2005 ja se asetti oikeudellisesti sitovat velvoitteet kasvihuonekaasujen päästöille kehittyneissä maissa. Se on ensimmäinen oikeudellisesti sitova sopimus, jolla on pyritty vähentämään päästöjä kansainvälisesti. Kioton pöytäkirja asetti jokaiselle siihen sitoutuneelle maalle päästömäärät, joita ei saa ylittää. Lisäksi jokainen sopimukseen sitoutunut maa on veloitettu raportoimaan kasvihuonekaasupäästöistä vuosittain. Ensimmäisenä velvoitekautena (2008–2012) Suomen tavoite oli pysyä vuoden 1990 päästötasolla ja se onnistui siinä. Kioton pöytäkirjan toinen velvoittava kausi (2013–2020) ei astunut voimaan, koska siihen ei sitoutunut tarvittavaa määrää maita. Pariisin sopimuksen toimeenpanoon valmistautuminen ohjaakin tällä hetkellä ilmastopolitiikkaa laajemmin, kuin Kioton pöytäkirja. (Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu 2019; Ympäristöministeriö n.d)

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:o 517/2014 eli F-kaasuasetus annettiin 16.5.2014 ja se korvaa aikaisemmin annetun asetuksen (EY) N:o 842/2006. Uuden asetuksen tavoitteena on vähentää fluorattujen kasvihuonekaasujen päästöjä ja näin suojella ympäristöä. Asetuksessa säädetään fluorattujen kasvihuonekaasujen käytöstä, niiden vuotojen estämisestä, talteenotosta ja hävittämisestä sekä säännöistä, jotka liittyvät niiden liittämisalustoimenpiteisiin. Asetuksen tärkeimmät SF₆-kaasua ja sen käyttöä sähköisissä kytkinlaitteistoissa koskevat määräykset ovat: fluorattujen kasvihuonekaasujen päästöjen ehkäiseminen, vuototarkastukset, vuotojen havaitsemisjärjestelmät, kirjanpito, talteenotto sekä koulutus ja päteväntoiminta. Lisäksi asetuksessa annetaan ehtoja fluorattuja

kasvihuonekaasuja sisältävien laitteiden markkinoille saattamiselle ja fluorattujen kasvihuonekaasujen käyttötavoille. (F-kaasuasetus (EU) N:o 517/2014)

Ympäristösuojelulaissa ja valtioneuvoston asetuksessa 766/2016 säädetään Suomessa fluorattuja kasvihuonekaasuja käsittelevän henkilön ja toiminnanharjoittajan pätevyysvaatimuksista ja niiden todentamisesta. Laki ja asetus on jatkoa Euroopan parlamentin ja neuvoston asetukselle (EU) N:o 517/2014, myöhemmin F-kaasuasetus, jossa määrättiin EU:n jäsenmaita perustamaan pätevöintijärjestelmä F-kaasuja käsitteleville henkilöille. Asetuksessa määrätään, että F-kaasuja sisältäville kytkinlaitteistoille huolto-, asennus- tai muita toimenpiteitä tekevän henkilön on hyväksytysti suoritettava koe, joka sisältää asetuksessa määritellyt asiat. Lisäksi ympäristösuojelulaissa on määrätty, että henkilön, joka on hyväksytysti suorittanut pätevyyden todistavan kokeen, on tehtävä pätevyyden todentamista varten ilmoitus Turvallisuus- ja kemikaalivirastolle. Vaatimukset täyttävä henkilö saa Turvallisuus- ja kemikaalivirastolta pätevyystodistuksen. (Valtioneuvoston asetus 766/2016; Ympäristösuojelulaki 27.6.2014/527)

3 SF₆-KAASU SUURJÄNNITELAITTEISTOISSA

3.1 Katkaisijat

Katkaisija kuuluu kytkinlaitteisiin, joiden tehtävä on muuttaa sähköverkon topologiaa tarvittaessa. Tällä tavalla kytkinlaitteet ohjaavat sähköenergian kulkua verkossa, ne erottavat verkon viallisen osan nopeasti irti vahinkojen ja vaarojen välttämiseksi ja toimivat tarvittaessa erotuskohtana verkon eri osien välillä. Suurvoiman siirrossa tärkeimmät kytkinlaitteet ovat katkaisijat, erottimet, kytkimet ja kuormanerotimet. (Elovaara & Haarla 2011, 161)

Katkaisija on laite, joka kykenee sekä sulkemaan että katkaisemaan jännitteisen ja kuormitetun virtapiirin. Katkaisijan on siis kyettävä katkaisemaan sekä sulkemaan virtapiirin suurin mahdollinen kuorma- tai oikosulkuvirta. Katkaisija voi toimia joko käsinohjauksella tai automaattisesti. Automaattisesti toimiva katkaisija avautuu suoja-alueen ohjaamana tavallisesti vikatilanteen aiheuttaman ylivirran vaikutuksesta. Vikatyyppejä voivat olla esimerkiksi oikosulku- tai maasulkutilanne. Katkaisija voi myös sulkeutua automaattisesti jälleenkytkentä-releistyksen ohjauksella. Automaattiohjauksella avautumis- ja sulkeutumiskäskyn katkaisijalle antaa siis virtapiiriin kytketty suoja-alue. (Elovaara, J. Laiho, Y. 2001, 245; Korpinen, L. n.d., 13)

Katkaisijan avautuessa virtapiiriin virta ei katkea heti, vaan se pysyy suljettuna valokaaren avulla. Valokaari syntyy, kun katkaisijan koskettimet avautuvat. Tällöin kosketusvastus kasvaa ja koskettimien pinnat lämpenevät voimakkaasti. Koskettimien irtautuessa toisistaan niiden välille syntyy sula metallinen kanava, joka höyrystyy ja sen johtavuus huononee. Tästä seuraa läpilyönti kosketinvälissä, jolloin höyrystynyt metalli ja sitä ympäröivä väliaine ionisoituvat ja muodostavat johtavan kaasuplasman eli valokaaren. Tasavirtakatkaisijoissa valokaari pyritään sammuttamaan venyttämällä valokaari mahdollisimman nopeasti pitkäksi ja jäähdyttämällä sitä samalla tehokkaasti. Vaihtovirtakatkaisijoissa valokaarta myös venytetään ja jäähdytetään samanaikaisesti, mutta katkaisussa käytetään hyväksi lisäksi virran luonnollisia nolakohtia. Myös valokaarta ympäröivä väliaine valitaan valokaaren sammumista edesauttavaksi. Katkaisijat voidaankin jakaa

sammutusväliaineen perusteella öljy-, ilma-, vähäöljy-, paineilma-, tyhjiö-, ja SF₆-katkaisijoihin. Näistä tänä päivänä käytetään eniten tyhjiö-, vähäöljy-, ja SF₆-katkaisijoita. Sammutusväliaineen lisäksi katkaisijat voidaan lajitella katkaisukammion potentiaalin mukaan. Katkaisukammio voi olla maan- (dead tank) tai katkaistavan jännitteen (live tank) potentiaalissa. Suomessa on lähes poikkeuksetta käytössä katkaistavan jännitteen potentiaalissa olevan katkaisukammion omaavia, eli live tank -katkaisijoita. (Elovaara & Haarla 2011, 169; Elovaara, J. Laiho, Y. 2001, 246–247; Korpinen, L. n.d., 13)

3.1.1 Katkaisijoiden historiaa

Ensimmäiset suurjännitekatkaisijat olivat öljykatkaisijoita (Bulk-oil circuit breaker). Niiden käyttö aloitettiin 1900-luvun alussa, jolloin ne riittivät hyvin sen ajan vaatimuksiin. Tällaisen öljykatkaisijan toimintaperiaate on yksinkertainen. Katkaisijan koskettimet on upotettu suljettuun öljysäiliöön, jossa virtapiirin katkaisu ja sulkeminen tapahtuu öljyn toimiessa sekä katkaisuväliaineena että eristeenä. Tällaiset öljykatkaisijat toimivat dead tank -periaatteella. Öljykatkaisijat vaativat kuitenkin paljon huoltoa ja niiden mekaaninen ja sähköinen kestävyys oli heikkoa verrattuna nykyaikaisiin tekniikkoihin. Öljykatkaisijoiden valmistus lopetettiin 1990-luvulla, mutta niitä on edelleen käytössä. (Smeets, R. ym. 2015, 202–203)

Öljyn korkean hinnan vuoksi katkaisijoiden hintaa haluttiin alentaa ja näin kehitettiin vähäöljykatkaisija (minimum-oil circuit breaker). Katkaisijassa on jokaiselle vaiheelle omat eristetyt kammiot, joissa öljymäärä on erittäin pieni. Katkaisijan toimintaperiaate perustuu öljyn höyrystyessä kehittämään paineeseen ja öljynvirtaukseen. Vähäöljykatkaisijat ovat live tank -periaatteella toimivia katkaisijoita. Vähäöljykatkaisijat hallitsivatkin katkaisutekniikan alalla aina 1970-luvulle asti edullisen hinnan, kevyen rakenteen ja yksinkertaisen huollon ansiosta. (Korpinen, L. n.d., 13; Smeets, R. ym. 2015, 204)

Paineilmakatkaisija oli pitkään vähäöljykatkaisijan ohella tärkein katkaisija. Paineilmakatkaisijassa katkaisijan ohjaus ja valokaaren sammutus tapahtuu paineilman avulla. Niitä on rakennettu aina korkeimpiin käytettäviin jännitteisiin sekä

katkaisuvirtoihin asti. Huonona puolena niissä on kuitenkin tarve paineilmaverkostolle, jossa on tehokas ilmankuivausjärjestelmä sekä katkaisutilanteessa syntävä suuri melu. (Elovaara, J. Laiho, Y. 2001, 256)

Tyhjiökatkaisijoiden ensimmäiset käytännön kokeet tehtiin 1920-luvulla ja nykyään niiden käyttö on lisääntynyt merkittävästi. Tyhjiökatkaisijan toimintaperiaate perustuu katkaisukammiossa vallitsevaan todella alhaiseen paineeseen, jossa ilmalla on parempi sähkönlujuus. Tyhjiö onkin teoriassa täydellinen eriste, koska siinä ei ole vapaita varauksenkuljettajia. (Aro, M ym. 2015, 115; Korpinen, L n.d., 14; Smeets, R. ym. 2015, 223)

1970- ja 80-luvuilla katkaisijatekniikassa koettiin suuri murros, joka johti SF₆- ja tyhjiökatkaisijoiden suureen yleistymiseen. SF₆-katkaisijat ovatkin syrjäyttäneen lähes kaikki muut katkaisijatyypit suurjännitteillä. Sen sijaan tyhjiö-, vähäöljy- ja SF₆-katkaisijat kilpailevat voimakkaasti keskijännitealueella. Suurjännite luokitellaan usein jännitteeksi, jonka tehollisarvo (U_n) on välillä $36 \text{ kV} < U_n < 150 \text{ kV}$ ja keskijännite puolestaan jännitteeksi, jonka tehollisarvo on välillä $1 \text{ kV} < U_n \leq 36 \text{ kV}$. Kuitenkin esimerkiksi Suomen kanta-, ja alueverkossa suurjännitteet ovat 110 kV, 220 kV ja 400 kV ja jakeluverkossa keskijännite on 20 kV. (Stuk 2021; Elovaara, J. Laiho, Y. 2001, 250; SFS EN 50160:2010, 9–10)

3.1.2 SF₆-katkaisijat

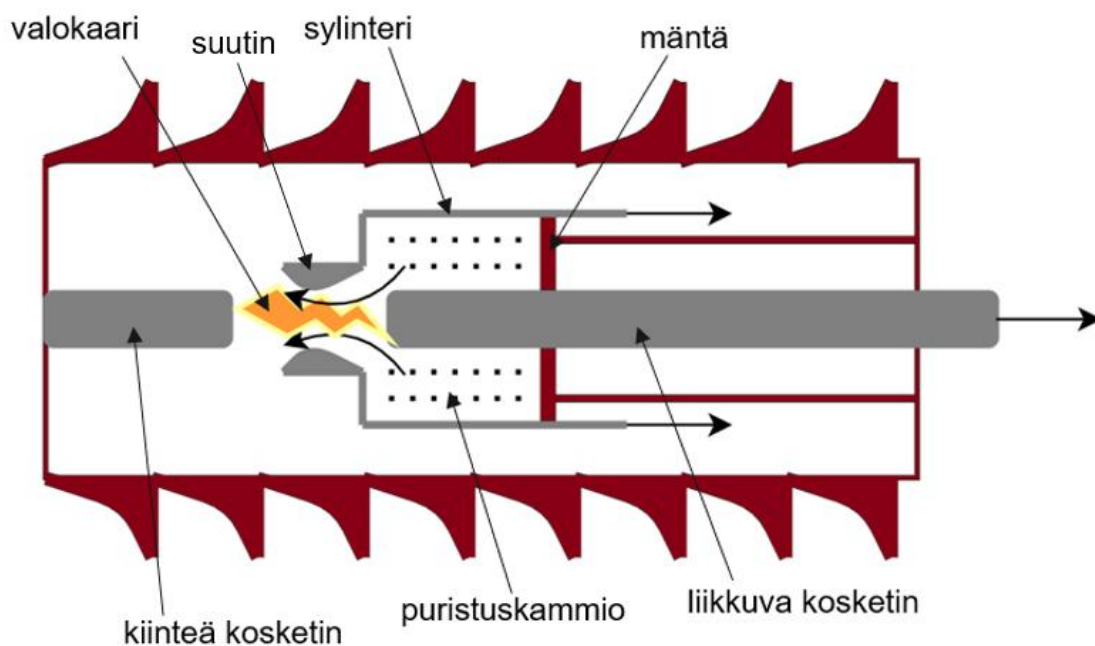
Ensimmäiset SF₆-katkaisijat tulivat teolliseen käyttöön 1950-luvulla. SF₆-kaasun erinomaisten katkaisuominaisuuksien vuoksi sillä pystyttiin katkaisemaan suuria virtoja. Tämän vuoksi SF₆-katkaisijoiden käyttö yleistyi ja ne tulivat vallitsevaksi katkaisutekniikaksi kantaverkoissa 1980-luvun alkupuolella. (Fingrid 2020; Smeets, R. ym. 2015, 207)

SF₆-katkaisijoita on olemassa neljää eri tyyppiä: kaksipainekatkaisija, pufferikatkaisija, self-blast-tekniikkaa käyttävä katkaisija ja valokaaren pyöritys tekniikkaa käyttävä katkaisija. Lisäksi niitä valmistetaan sekä live tank, että dead tank -periaatteella. Kaksipainekatkaisijat olivat ensimmäisiä kehittyneempiä SF₆-katkaisi-

joita. Ne vaativat kuitenkin useita apulaitteita ja tästä syystä SF₆-katkaisijat alkoivat yleistyä vasta, kun kehitettiin yksipainejärjestelmä eli pufferikatkaisija. Self-blast- ja valokaaren pyöritys tekniikkaa hyödyntävät katkaisijat jalostettiin, kun haluttiin vähentää pufferikatkaisijan vaatimaa suurta käyttövoimaa ja etenkin self-blast- ja pufferitekniikkaa yhdisteleviä eli ns. auto-pufferi-katkaisijoita on laajasti käytössä tänä päivänä. Auto-pufferi-katkaisijoihin on lisäksi kehitetty kaksoisliike- ja kaksoisnopeustekniikoita, jotka parantavat katkaisijan katkaisukykyä ja vähentävät edelleen katkaisijan ohjaukseen vaadittavaa käyttövoimaa. Nykyaikaisissa SF₆-katkaisijoissa kaasun täyttöpaineteleee 0,15–0,6 MPa:n välillä ja käytettävän kaasun määrä 5–30 kg:n välillä. SF₆-katkaisijat saivat alun perin käyttövoimansa moottori- tai käsiviritteisistä jousiohjaimista. Yli 100 kV jännitteillä käytettiin napakohtaisia hydraulisia ja pneumaattisia ohjaimia katkaisijan vaatiman suuren käyttövoiman takia. Katkaisutekniikan kehityksen johdettua pienempiin vaadittaviin käyttövoimiin nykyaikaisissa SF₆-katkaisijoissa käytetään moottorijousiohjaimia aina 800 kV asti. Etenkin kylmissä olosuhteissa voidaan käyttää niin kutsuttuja seoskaasukatkaisijoita. Tällöin SF₆-kaasuun sekoitetaan typpeä (N₂) tai perfluorimetaania (CF₄), jotka estävät SF₆-kaasun nesteytymistä. Seoskaasukatkaisijan katkaisuteho ei eroa merkittävästi puhtaan SF₆-kaasu katkaisijan katkaisutehosta. Suomen olosuhteissa SF₆-katkaisijan luotettava toiminta edellyttää kaasun tiheysvahtia, joka seuraa katkaisukammion kaasunpainetta oikealla tavalla ottaen huomioon vallitsevan lämpötilan. (Fingrid 2020; Elovaara & Haarla 2011, 181; Elovaara, J. Laiho, Y. 2001, 259; Smeets, R. ym. 2015, 210)

Kaksipainekatkaisija koostuu korkea- ja matalapaineosasta. Korkeapaineosassa SF₆-kaasu on puristettu 1,5–2 MPa:n paineeseen, josta kaasu johdetaan koskettimien avautuessa matalapaineosaan, jossa SF₆-kaasu on 0,4 MPa:n paineessa. Kaasuvirtauksen avulla valokaari jäähtyy ja sammuu. Jokaisen katkaisun jälkeen SF₆-kaasu kierrätetään suodattimien läpi ja puristetaan uutta katkaisua varten korkeapainesäiliöön. SF₆-kaasu kuitenkin nesteytyy 1,6 MPa:n paineessa jo 6–10 °C lämpötilassa, joten korkeapainesäiliö vaatii lämmittimen. Muun muassa sen, sekä muutenkin monimutkaisen ja suuren rakenteen takia ne katosivat markkinoilta. (Elovaara, J. Laiho, Y. 2001, 259; Smeets, R. ym. 2015, 210)

Yksipaine- eli pufferikatkaisijassa kaasun virtaukseen tarvittava paine-ero saadaan aikaiseksi liikkuvan koskettimen yhteyteen rakennetulla mäntä-sylinteri-järjestelmällä, jossa liikkuvan koskettimen avautuessa mukana liikkuva sylinteri puristaa kaasua mäntää vasten sylinterin puristuskammioon, josta se johdetaan koskettimien irtautuessa valokaareen. Kuviossa 1 on esitetty pufferikatkaisijan rakenne.

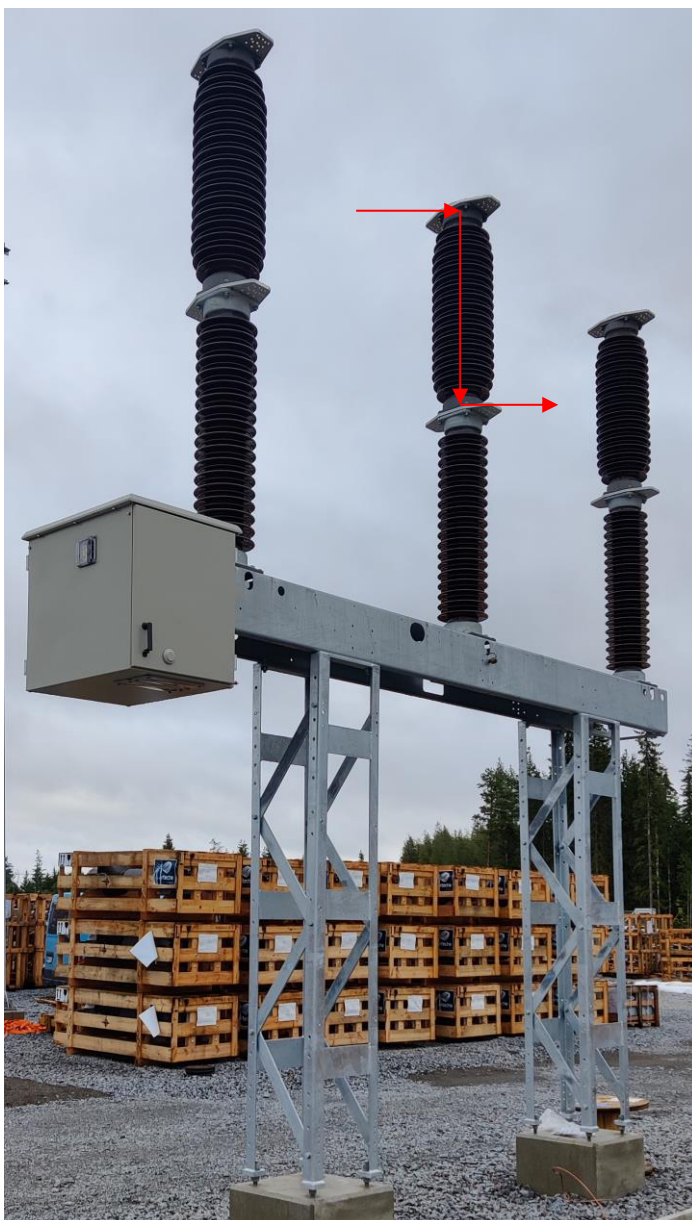


KUVIO 1. SF₆-pufferikatkaisijan toimintaperiaate (Smeets, R. ym. 2015, 211)

Kuviossa 1 on kuvattu pufferikatkaisijan poikkileikkaus, missä katkaisija on avautuvassa liikkeessä ja valokaari palaa koskettimien välillä. Liikkuvan koskettimen avautuessa sylinteri liikkuu saman aikaisesti mäntää vasten ja puristaa SF₆-kaasua puristuskammiossa, jolloin kaasun paine nousee. Koskettimien irtautuessa puristuskammion suutin avautuu, mutta syttyvä valokaari estää kaasun tehokkaan purkautumisen suuttimen kautta. Valokaaren synnyttämä lämpö nostaa myös kaasun painetta entisestään puristuskammiossa. Koskettimien avautuessa enemmän ja virran lähentyessä nolaa myös valokaaren halkaisija pienenee ja puristunut kaasu pääsee virtaamaan täydellä teholla ja näin antamaan tarvittavan jäähdytystehon oikealla hetkellä ja sammuttamaan valokaaren virran nolakohdassa. (Smeets, R. ym. 2015, 211)

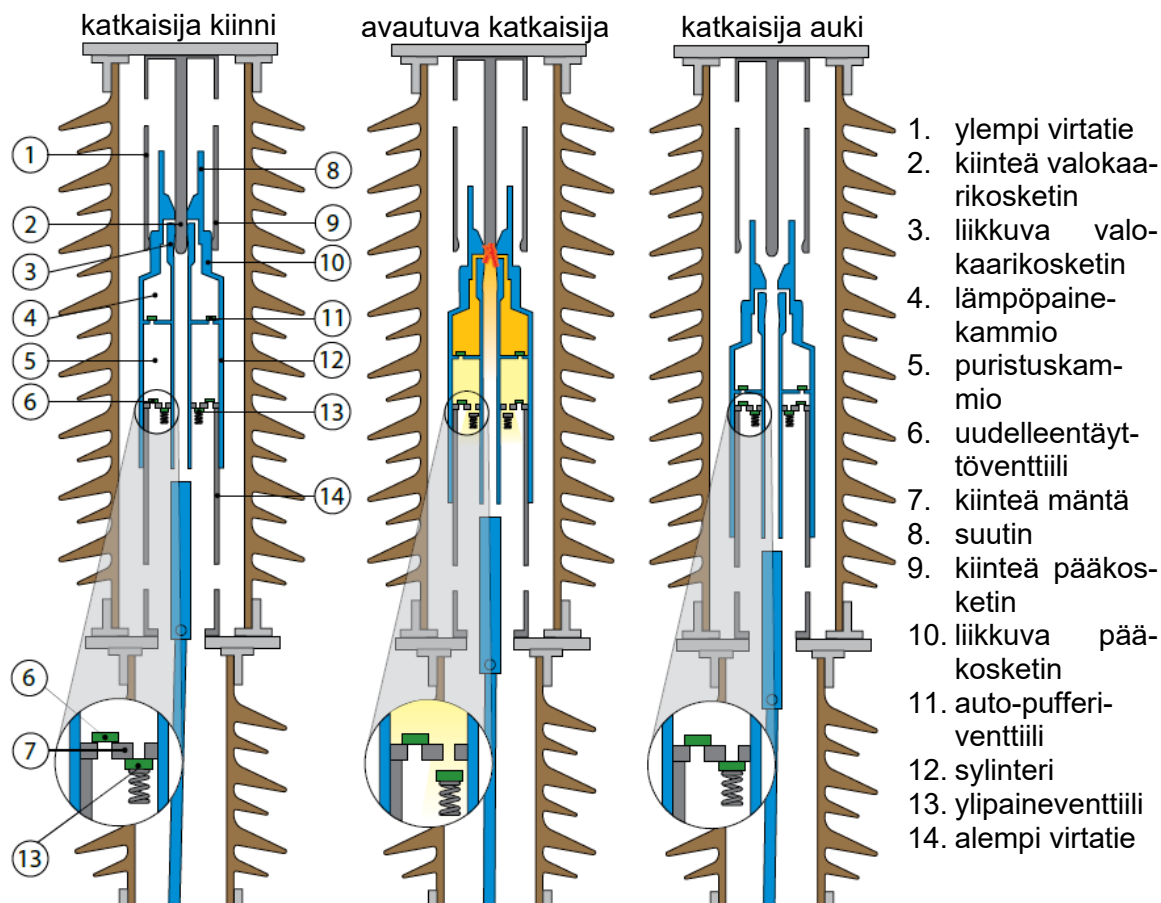
Pufferikatkaisijassa kaasun paine on tavallisesti 0,15–0,6 MPa:n välillä. Puristus-kammiossa kaasun paine voi katkaisuhetkellä nousta jopa yli 2 MPa:iin. Tämän takia pufferikatkaisijan ohjainyksiköltä vaaditaan suurta käyttövoimaa, ettei katkaisuliike pääse hidastumaan tai pysähtymään kokonaan suuren vastapaineen vaikutuksesta. Käytännössä mitä suurempi virta täytyy katkaista, sitä suurempi on ohjainyksiköltä vaadittava käyttövoima. Tämän takia pufferikatkaisijat vaativat tehokkaat ohjainmekanismit. Katkaisijan sulkemiseen tarvittava käyttövoima on paljon avaamista pienempi. (Elovaara, J. Laiho, Y. 2001, 259; Smeets, R. ym. 2015, 211)

Self-blast-, tai auto-pufferi-menetelmää käyttävä katkaisija toimii alun perin pelkästään valokaaren lämmön avulla nostetun kaasun paineen ja tätä kautta syntyneen kaasun virtauksen avulla. Pienen virran katkaisu ei aiheuttanut kuitenkaan riittävän voimakasta valokaarta ja tätä kautta riittävän suurta lämpötilaa ja paineen nousua. Tämän takia nykyaikaiset auto-pufferi-menetelmää käyttävät SF₆-katkaisijat hyödyntävät sekä pufferi-, että self-blast-menetelmää. Kuvassa 2 on esitetty ABB LTB 145D1/B auto-pufferi-katkaisija.



KUVA 2. ABB LTB 145D1/B-katkaisija.

Kuvan 2 katkaisija toimii live tank -periaatteella, jolloin itse katkaisukammio on eristetty maan potentiaalista. Katkaisijassa on jokaiselle vaiheelle omat katkaisijanavat. Katkaisijanavan ylempi osa on katkaisukammio, jossa katkaisu tapahtuu ja alempi osa on eristinosa. Yhden vaiheen virtatie on piirretty kuvaan punaisilla nuolilla. Kuvan vasemmassa reunassa näkyvä ohjainkotelo sisältää ohjainlaitteet kolmivaiheisen katkaisijan synkroniseen auki- tai kiinni ohjaukseen. Kuviossa 2 on esitetty vastaavasti ABB:n LTB-tuoteperheen auto-pufferi-katkaisijoiden toimintaperiaatekuva.



KUVIO 2. ABB:n LTB-tuoteperheen auto-pufferi-katkaisijoiden toimintaperiaate (ABB n.d., 8)

Kuvion 2 auto-pufferi-katkaisija toimii pieniä virtoja katkaistaessa samalla tavalla, kuin pufferikatkaisija. Tällöin valokaaren lämmön nostattama paine ei saa auto-pufferi-venttiilejä (11) suljettua, vaan lämpöpainekammio (4) ja puristuskammio (5) toimivat yhtenä puristuskammiona ja kaasun virtaukseen tarvittava paine saadaan ohjauksmekanismin avausliikkeestä, jossa paineen nousu saadaan aikaan puristamalla kaasua kiinteää mäntää (7) vasten. Suuria virtoja katkaistaessa (kuvion 2 avautuvan katkaisijan tilanne) valokaari nostattaa lämpöpainekammion (4) paineen niin suureksi, että auto-pufferi-venttiilit (11) painuvat kiinni. Tällöin kaikki katkaisuun tarvittava kaasu on lämpöpainekammiossa. Koskettimien avautuessa lisää painekammion (5) paine ylittää rajan, joka saa ylipaineventtiilin (13) avautumaan ja vapauttamaan painekammion paineen. Tämä vähentää ohjainmekanismilta tarvittavaa käyttövoimaa noin 50–70 % verrattuna pufferikatkaisijoihin, koska kaasun paine painekammiossa ei pääse nousemaan suurilla virroilla niin suureksi. Koskettimien avauduttua tarpeeksi valokaaren halkaisija pienenee ja kaasu pääsee virtaamaan tehokkaasti lämpöpainekammion (4) suuttimen (8)

läpi ja sammuttaa valokaaren virran nollakohdassa. Katkaisijan sulkeutuessa uudelleentäyttöventtiili (6) avautuu ja painekammio (5) sekä lämpöpainekammio (4) pääsevät täyttymään kaasulla uutta katkaisua varten. (Smeets, R. ym. 2015, 217)

Valokaaren pyöritys tekniikkaa hyödyntävässä katkaisijassa valokaarta pyöritetään SF₆-kaasua sisältävässä katkaisukammiossa. Pyöritysliike saadaan aikaan Lorentzin voimalla magneettikentässä, joka syntyy virran vaikutuksesta. Tässä tekniikassa virralta vaaditaan riittävän suuri magneettikenttä, jotta saadaan aikaan tarpeeksi tehokas pyörimisliike valokaarelle ja näin virta katkeamaan tehokkaasta pyörimisliikkeestä aiheutuneen valokaaren viilentymisen avulla. Tekniikan suurimpia etuja ovat lyhyt vaadittava kosketusväli ja näin pienempi katkaisija rakenne, sekä ohjaimelta vaadittava pieni käyttövoima. Valokaaren pyöritystekniikka ei ole kuitenkaan ollut vielä yhtä tehokas katkaisutekniikka suurjännitteillä, kuin pufferikatkaisutekniikat. (Smeets, R. ym. 2015, 222)

SF₆-katkaisijoiden mekaaninen elinikä on 5000–10000 katkaisukertaa. Katkaisuelimet kestävät tyypillisesti 10–20 katkaisua täydellä oikosulkuvirralla ja tuhansia katkaisukertoja nimellisvirralla. Katkaisijoiden huonoina puolina voidaan mainita katkaisutilanteessa katkaisukammioon syntyvät myrkylliset ja kosteuden kanssa korroosiota aiheuttavat yhdisteet, ison ohjausenergian tarve suurilla jännitteillä sekä kaasun nesteytyminen alhaisissa lämpötiloissa. (Elovaara, J. Laiho, Y. 2001, 259)

3.2 GIS-järjestelmät

GIS-järjestelmät (Gas insulated switchgear), eli SF₆-eristeiset kytkinlaitokset ovat yleistyneet tänä päivänä nopean asennuksen ja käyttöönoton sekä pienemmän tilantarpeen vuoksi. Ensimmäinen GIS-järjestelmä otettiin käyttöön vuonna 1967 Saksassa 110 kV:n jännitteellä. Nykyään GIS-järjestelmiä käytetään aina 12 kV:sta 800 kV:iin asti. (Elovaara, J. Laiho, Y. 2001, 320; IEE Explore 1995, 2)

GIS-järjestelmässä kytkinlaitoksen jännitteiset osat on hermeettisesti suljettu SF₆-kaasua sisältäviin maadoitettuihin metallikoteloihin. GIS-järjestelmissä SF₆-

kaasun määrä voi vaihdella sadoista jopa tuhansiin kiloihin. Tällaisella järjestelmällä säästetään luonnollisesti tilaa, kun jännitteiset ja maadoitetut osat saadaan sijoitettua lähemmäksi toisiaan SF₆-kaasun erinomaisten eristysominaisuuksien avulla. Karkeasti ottaen GIS-järjestelmä vie noin kymmenesosan siitä tilasta, mitä vastaava AIS-järjestelmä (Air insulated switchgear) veisi. GIS-järjestelmät ovat lisäksi käyttövarmoja, vähän huoltoa tarvitsevia sekä omaavat pitkän käyttöiän ja varman kosketussuojauksen maadoitetun metallikotelon ansiosta. GIS-järjestelmiä on sekä suur- että keskijännitteille. Kuvassa 2 on esitetty Fingridin Länsisalmen sähköaseman 400 kV GIS-kojeisto. (ABB TTT-käsikirja 2000, 5; Elovaara, J. Laiho, Y. 2001, 320–321; Fingrid 2020; Parrel, D 2019, 5)



KUVA 3. Fingridin Länsisalmen 400 kV GIS-kojeisto. (ABB 2019)

Yli 170 kV jännitteillä GIS-sovelluksissa käytetään yksivaihekotelointia, kuten kuvassa 3. Jokainen vaihe on sijoitettu omaan koteloon. Suurjännitekojeistossa, kuten kuvassa 3, SF₆-kaasu paineistetaan yleensä 0,3–0,6 MPa ylipaineeseen ympäristöön nähden. Suomen olosuhteissa suurjännitteiset GIS-laitokset täytyy rakentaa lämmitettyyn tilaan, jotta estetään SF₆-kaasun nesteytyminen suurissa pakkaslukemissa sekä helpotetaan huolto- ja korjaustöitä. Suurjännitteisissä GIS-järjestelmissä kojeet ja kiskot jaetaan omiin kaasutiloihin, joiden välillä on kaasutiivis läpivientieristin. Tämä helpottaa muun muassa huoltotyötä, joka vaatii kaasun tyhjänsä. Katkaisijoina käytetään pysty- tai vaaka-asentoon sijoitettuja

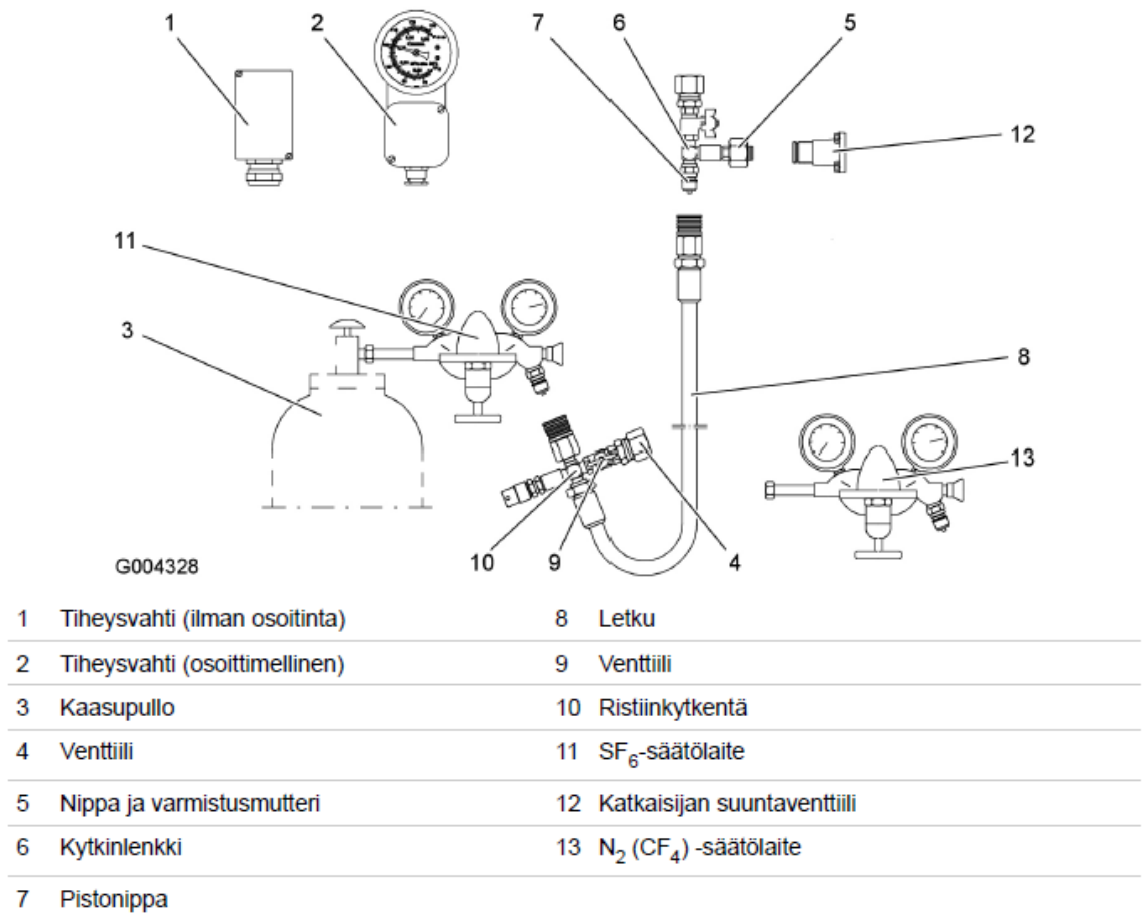
SF₆-katkaisijoita. Erottimina käytetään moottoriohjattuja erottimia, joiden kärjet ovat erikoismuotoiltuja. Tämä johtuu avausliikkeen synnyttämien jälleensyttymisten aiheuttamista suuritaajuisista ilmiöistä. Erottimen asentotunnistin voi olla mekaaninen tai erottimen kotelo voidaan varustaa ikkunalla asennon havaitsemiseksi. Virtamuuntajina käytetään tavallisesti rengasvirtamuuntajia ja jännitemuuntajina magneettisia tai kapasitiivisia jännitemuuntajia. GIS-kytkinlaitokset liitetään muuntajiin tai ulkopuoliseen verkkoon. Liityntätapoina käytetään avojohto-, kaapeli-, ja koteloituja liityntöjä. Ulkoiset liitynnät vievätkin eniten tilaa GIS-järjestelmissä. (Elovaara, J. Laiho, Y. 2001, 320–324)

Keskijännitteellä käytetään GIS-järjestelmiä katkaisijakytkinlaitoksina sekä muuntamokojeistoina. Katkaisijakytkinlaitoksissa koko keskijännitealue sisältyy yhteen rakenteeseen, jossa SF₆-kaasun ylipaine on tavallisesti 0,12–0,15 MPa. Kokoojakiskot, katkaisijat ja kaapelipäätteet ovat kuitenkin tavallisesti omissa kaasutiloissaan. Muuntamokojeistossa eli RMU:ssa (Ring Main Unit), jota käytetään kaapeloidussa keskijänniteverkossa kuormanerotuskojeistona, SF₆-kaasun ylipaine on vain 0,02–0,05 MPa. Tämän vuoksi laitteisto ei välttämättä vaadi lämmitettyä tilaa, koska SF₆-kaasu ei pääse nesteytymään vielä -40 °C lämpötilasakaan. Muuntamokojeistot sijoitetaan joko kiinteistömuuntamoihin sisätiloihin tai puistomuuntamoihin ulkotiloihin. (Elovaara, J. Laiho, Y. 2001, 325–326)

4 SUURJÄNNITEKATKAIJIAN KAASUTUS

4.1 Käytettävä laitteisto

SF₆-kaasu toimitetaan nesteytettynä kaasuna painesäiliössä, josta kaasu siirretään kaasutuslaitteiston avulla katkaisijaan. SF₆-katkaisijan kaasutuksessa tarvittava laitteisto on esitetty kuviossa 3.



KUVIO 3. SF₆-katkaisijan kaasuntäyttöosat. (ABB 2018, 69)

Kuvion 3 SF₆-säätölaite (11) koostuu kahdesta mittarista ja kahdesta venttiilistä. Vasemmanpuoleinen mittari näyttää kaasupullon paineen ja oikeanpuoleinen mittari kaasun syöttöpaineen. Kaasun syöttöpainetta voidaan säätää mittarien alapuolella olevalla venttiilillä. Mittarien oikealla puolella olevalla venttiilillä kaasun virtaus saadaan suljettua tai avattua. Kaasuntäyttölaitteiston liittimet sekä

katkaisijan suuntaventtiili on varustettu takaiskuventtiileillä kaasun ilmakehään pääsemisen minimoimiseksi.

SF₆-kaasutusta varten markkinoilla on saatavilla myös SF₆-kaasuntäyttökärriä, joihin on kaasuntäyttövälineiden lisäksi asennettu kaasupullovaaka. Vaa'an avulla käytettävän SF₆-kaasun määrä saadaan selville tarkasti ja helposti. Kaasutuslaitteiston lisäksi kaasutuksessa tarvitaan SF₆-kaasu analysaattori, jonka avulla SF₆-kaasu analysoidaan katkaisijasta täytön jälkeen.

4.2 Kaasutus

Ennen töiden aloittamista täytyy tarkistaa sähkölaitteen tila yksityiskohtaisesti. Paikallisten turvallisuusmääräysten lisäksi sähkölaitte täytyy sammuttaa ja erottaa. Lisäksi täytyy varmistaa, ettei sähkölaitte kytkeydy uudelleen päälle ja, että sähkölaitte on jännitteetön. Tämän jälkeen sähkölaitte täytyy maadoittaa ja oikosulkea sekä lähellä olevat jännitteiset osat täytyy peittää tai eristää suoja-aidoin. SF₆-kaasua saa käsitellä vain päteväksi hyväksytty henkilö. Kaasua käsiteltäessä syöminen, juominen ja tupakointi on kiellettyä. Lisäksi, kun toimitaan paineistettujen kaasujen kanssa, äkillinen tilavuuden laajentuminen aiheuttaa paikallisen lämpötilan alentumisen, mikä puolestaan voi aiheuttaa jäätymisen. Tämän vuoksi eristäviä käsineitä ja suojalaseja täytyy käyttää, kun työskennellään paineistettujen putkistojen, venttiilien ja yhteiden kanssa kaasun täyttötoimenpiteiden aikana. SF₆-kaasun tai SF₆-seoskaasun, jota käytetään sähkölaitteissa, on täytettävä taulukon 2 vaatimukset. (SFS-EN IEC 60480:2019, 15–18)

TAULUKKO 2. Sähkölaitteissa käytettävän teknillisen SF₆-kaasun vaatimukset. (SFS-EN IEC 60376:2018, 8)

Aine	Konsentraatio
SF ₆	> 98,5 % tilavuus kaasulomuodossa Seoskaasuina käytettäessä: > 99,7 % tilavuus kaasulomuodossa
Ilma	< 10000 µl/l (1 % tilavuudesta) tekniselle SF ₆ kaasulle Seoskaasuina käytettäessä: < 2000 µl/l (0,2 % tilavuudesta)
CF ₄	< 4000 µl/l (0,4 % tilavuudesta) tekniselle SF ₆ -kaasulle Seoskaasuina käytettäessä: < 800 µl/l (0,08 % tilavuudesta)
H ₂ O (Vesi)	< 200 µl/l (0,02 % tilavuudesta)
Mineraaliöljy	< 10 mg/kg (10 ppmw)
Kokonaishap- pamuus	< 7 µl/l (7 ppmv)

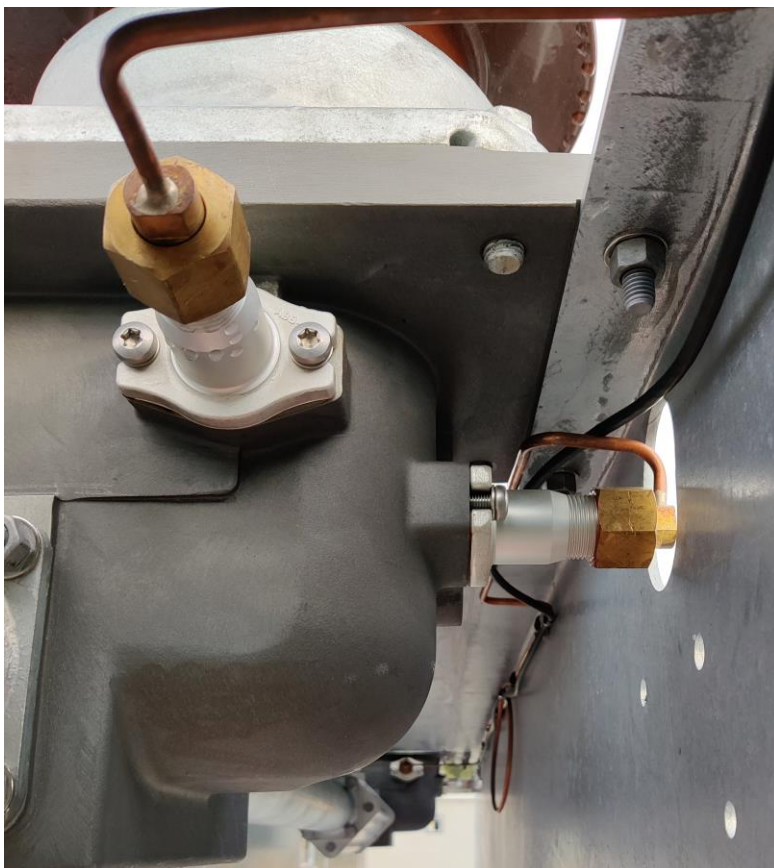
Taulukossa 2 ppmv tarkoittaa tilavuuden miljoonasosaa ja ppmw painon miljoonasosaa. Sähkölaitteistoissa käytettävä SF₆-kaasu analysoidaan kaasun täytön jälkeen SF₆-analysointorilla. Tällä tavalla voidaan varmistaa, että käytettävä SF₆-kaasu täyttää taulukon 2 vaatimukset.

Kaasutuksessa kaasun täyttöpaine täytyy tarkistaa lämpötilan mukaan. Kaasun täyttöpaine 20 °C lämpötilassa lukee katkaisijanavan merkkikilvessä (Liite 1). Täyttöpaine pitää kuitenkin korjata täyttöhetkellä vallitsevan lämpötilan mukaan. Täyttöpaineet eri lämpötilojen mukaan löytyvät katkaisijan mukana tulevasta käyttöohjeesta. Taulukossa 3 on esitetty ABB:n LTB 145D1/B-katkaisijan kaasun täyttöpaineet eri lämpötilojen mukaan.

TAULUKKO 3. ABB:n LTB 145D1/B-katkaisijan kaasun täyttöpaineet (ABB 2018, 70)

Lämpötila kaasua täyttäessä (°C)	Täyttöpaine (absoluuttinen) (MPa)
+40	0,54
+30	0,52
+20	0,50
+10	0,48
0	0,46
-10	0,44
-20	0,42
-30	0,39

ABB:n LTB 145D1/B-katkaisijan kaikkien vaiheiden katkaisunapojen kaasutilat on yhdistetty toisiinsa kuvan 4 mukaisesti kaasuputkilla. Katkaisijan eri vaiheiden katkaisunapoja ei siis tarvitse kaasuttaa erikseen, vaan kaasutus onnistuu yhden navan vapaana olevasta suuntaventtilistä.



KUVA 4. Katkaisijanapojen kaasutilojen yhdistys.

Kuvassa 4 näkyy keskimmäisen eli vaiheen 2 katkaisunapa, joka on yhdistetty kaasuputkilla vaiheen 1 ja 3 katkaisunapoihin. Kaasutusta ei täten voi suorittaa keskimmäisen navan liittimistä, koska tämän kautta vaiheiden 1 ja 3 napojen kaasutilat yhdistyvät toisiinsa. ABB:n LTB 145D1/B-katkaisijassa oleva kaasun tiheysvahti on kytketty katkaisijan ohjainta lähinnä olevaan katkaisijanavan suuntaventtiiliin. Tästä johtuen kaasutus suoritetaan tässä katkaisijatyypissä ohjaimesta kauimpana olevan katkaisunavan suuntaventtiilistä. Tiheysvahti on esitetty kuvassa 5.



KUVA 5. Katkaisijan kaasun tiheysvahti

Katkaisijan katkaisukyky riippuu SF₆-kaasun tiheydestä. Tämän takia LTB-katkaisija on varustettu kaasun tiheysvahdilla. Tiheysvahdissa on lämpötilakompensoitu painekeytkin, joka antaa hälytysignaalin paineen laskiessa hälytysrajan alle vuototilanteessa. Painekeytkimessä on myös katkaisijan lukitustoiminto, joka estää katkaisijan toimimisen paineen laskiessa vuototilanteessa lukitusrajan alle. F-

kaasuasetuksessa vaaditaan vuotojen havaitsemisjärjestelmä vähintään 500 hiidioksidiekvivalenttonnia sisältäville sähköisille kytkinlaitteille, jotka on asennettu 1.1.2017 jälkeen. Tämä tarkoittaa noin 19,8 kg SF₆-kaasua sisältäviä sähköisiä kytkinlaitteita. Tässä työssä kaasutettavan LTB 145D1/B-katkaisijan kokonaistäyttömäärä on noin 6 kg, joten se ei F-kaasuasetuksen kannalta vaatisi vuotojen havaitsemisjärjestelmää. (ABB n.d., 15; F-kaasuasetus (EU) N:o 517/2014, 4. ja 5. artikla; GOV.UK 2014)

NRC-Groupilla on käytössä WIKA:n SF₆- kaasuntäyttökärri. Ennen kaasutuksen aloitusta kaasupullo asetetaan kaasuntäyttökärriin vaa'alle ja kiinnitetään siihen hihnoilla. Kaasuntäyttökärri täytyy sijoittaa tasaiselle alustalle lähelle kaasutettavaa katkaisijaa. Ennen kaasupullon liittämistä SF₆-säätölaitteeseen täytyy tarkistaa, että säätölaitteen venttiilit on suljettu, jonka jälkeen kaasupullo voidaan liittää säätölaitteeseen. Tämän jälkeen kaasutusletku liitetään sovitusaadapterin avulla katkaisijan vapaaseen suuntaventtiiliin kuvan 7 mukaisesti. Ennen kaasun lisäämistä katkaisijaan kaasupulloveraa "taarataan" TARE-näppäimellä (KUVA 6). Tällöin kaasupulloveraan tulee näyttää 0,0 kg. Kaasutus aloitetaan avaamalla ensin kaasupullon venttiili. Tämän jälkeen voidaan avata SF₆-säätölaitteen venttiili. Kun SF₆-säätölaitteen venttiili on avattu, kaasun syöttöpainetta voidaan alkaa nostamaan mittarien alapuolella olevalla venttiilillä, jolloin kaasu alkaa virrata kaasupulloverasta katkaisijaan. Kaasun syöttöpainetta ei suositella kuitenkaan nostettavaksi yli katkaisijan lopullisen täyttöpaineen. Kaasun vähentyessä kaasupulloverasta vaa'an lukema muuttuu negatiiviseksi näyttäen katkaisijaan virranneen kaasun painon. Katkaisijaan virranneen kaasun painoa ja kaasupullon kokonaispainoa voidaan vertailla MODE-näppäimellä (KUVA 6).



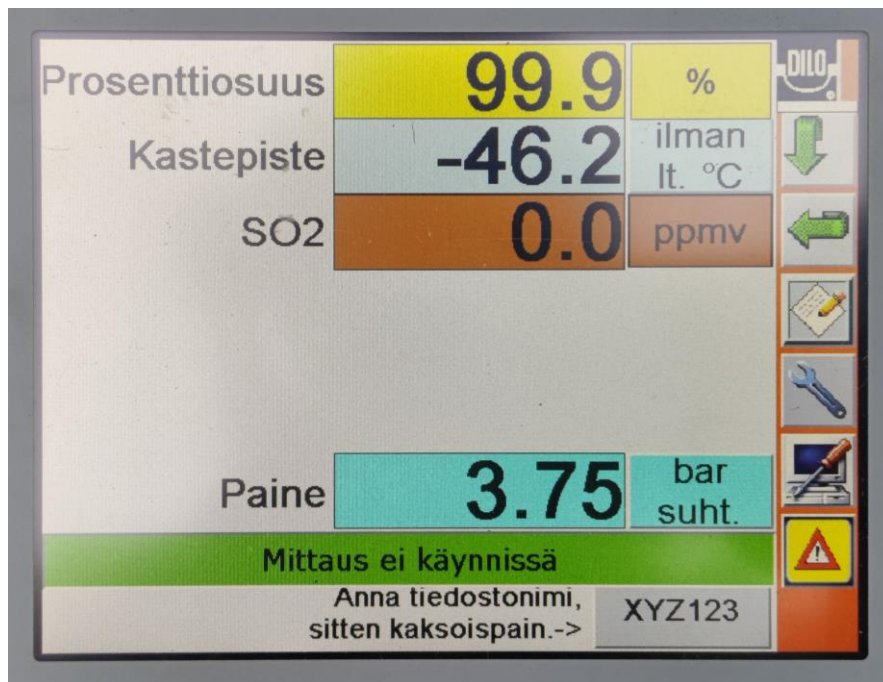
KUVA 6. WIKAI:n kaasutäyttökärryn digitaalinäyttö.

Kuvan 6 kaasutustilanteessa katkaisijaan on virrannut 0,235 kg kaasua, joka näkyy miinus merkkisenä kaasuntäyttökärryn digitaalinäytöltä. Katkaisijan kaasun painetta seurataan täytön aikana katkaisijan tiheysvahdin painemittarista. Kaasun paineen noustessa katkaisijan lukitusrajalle, joka on esitetty kuvassa 5 keltaisella alueella (alkaen 0,43 MPa), tarkistetaan lukituskytkimen toiminta katkaisijan riviliittimiltä yleismittarin jatkuvuustoiminnolla. Tällöin lukituskytkimen täytyy muuttaa olotilaa, kun lukitustoiminto kytkeytyy pois päältä. Sama toistetaan katkaisijan hälytyskytkimelle paineen noustessa hälytysrajalle (0,45 MPa). Katkaisijan tiheysvahdin lukitus ja hälytysrajat löytyvät katkaisijan merkkikilvestä (Liite 1). Kun hälytys ja lukitustoiminto on todettu toimiviksi, katkaisijan kaasun paine nostetaan taulukon 3 mukaisesti haluttuun arvoon.



KUVA 7. Katkaisijan kaasutustilanne

Kun katkaisijan kaasun paine on saatu nostettua halutuksi, kaasun virtaus katkaistaan venttiilillä ja kaasuntäyttökärryn kaasuletku voidaan irrottaa katkaisijan suuntaventtiiliin kiinnitetystä sovitusaadapterista. Tämän jälkeen SF₆-kaasuanalyysaattori kytketään katkaisijaan analysaattorin omalla kaasuletkulla ja sopivalla sovitusaadapterilla. SF₆-kaasun analysointi aloitetaan analysaattorin ”aloita mittaus” -painikkeella. Analysaattori analysoi kaasun automaattisesti ja pumppaa tutkitun kaasun takaisin katkaisijaan. Analysointi on valmis, kun näytöllä lukee ”mittaus ei käynnissä” (KUVA 8).



KUVA 8. DILO:n SF₆-kaasuanalysointilaitteen tulokset

SF₆-kaasuanalysointilaitteet antavat analysoinnin tuloksena SF₆-kaasun pitoisuuden, kastepisteen sekä rikkidioksidipitoisuuden (SO₂). Mittaustuloksena saadaan lisäksi katkaisijan suhteellinen paine baareina. Absoluuttinen paine saadaan laskettua lisäämällä ilmanpaine (1,01325 bar) suhteelliseen paineeseen. (WIKA n.d.) Kaasutuksen ja kaasun analysoinnin jälkeen kaasutetun SF₆-kaasun paino ja analysoidut mittaustulokset kirjataan ylös ja ilmoitetaan eteenpäin esimerkiksi pääurakoitsijalle tai projektin tilaajalle.

5 KORVAAVAT VAIHTOEHDOT SF₆-KAASULLE

5.1 SF₆-vapaaat vaihtoehdot suurjännitekytkinlaitteistoissa

SF₆-vapaita kytkinlaitteistoja on pyritty kehittämään viimevuosina SF₆-kaasun ilmastoa lämmittävien ominaisuuksien vuoksi. Vaihtoehtoja GIS-järjestelmille ja katkaisijoille löytyy jo jonkin verran ja esimerkiksi Fingrid pyrkii luopumaan SF₆-kaasusta tulevaisuudessa vähitellen. SF₆-kaasun korvaaminen ei kuitenkaan ole mahdollista, jos laitteistoa ei uusita. Tämän vuoksi SF₆-vapaaseen tekniikkaan siirtyminen tapahtuu pitkällä aikavälillä, sitä mukaa kun vanha laitteisto tulee tiensä päähän. (Fingrid 2020)

Seuraavissa kappaleissa on käyty läpi SF₆-vapaita tekniikoita suurjännitekytkinlaitteistoille. Kappaleissa on esitetty tällä hetkellä eri valmistajilta saatavia suurjännitekatkaisijoita ja GIS-järjestelmiä. SF₆-vapaita tekniikoita löytyy monelta suurelta valmistajalta tänä päivänä. General Electric ja ABB käyttävät SF₆-kaasun korvaavia ympäristöystävällisempiä kaasuseoksia ja Siemens ja Hitachi taas käyttävät tyhjiötekniikoita. (Rak, T. 2017, 7)

5.1.1 Korvaava kaasu

Amerikkalainen General Electric (GE) on kehittänyt yhdessä 3M:n kanssa suurjännitekytkinlaitteistoihin SF₆-kaasun korvaavan g³-kaasun. g³-kaasu on sekoitus happea, hiilidioksidia ja 3M Novec 4710 -kaasua, joka on peräisin 3M-fluorinitriili-tuoteperheestä. g³ on myrkytön ja palamaton kaasu, kuten SF₆ ja omaa näin saman turvallisuusluokituksen. Lisäksi g³-tuotteet toimivat ilman rajoituksia aina -30 °C asti. g³-kaasun GWP-indeksi on noin 400, mikä on lähes 99 % pienempi, kuin SF₆-kaasun GWP-indeksi. g³-katkaisijat toimivat jousiviritteisellä kaksoisliikettä hyödyntävällä autopufferitekniikalla, jolloin tarvittava avausenergia on pieni. GE:ltä löytyy suurjännitteille g³-katkaisijoita ja GIS-järjestelmiä 72,5 kV:sta aina 145 kV:iin asti. (GE grid solutions 2017; GE grid solutions 2021; Rak, T. 2017, 9)

Myös ruotsalaisveitsiläinen ABB on kehittänyt suurjännitekytkinlaitteistoihin 3M:n kanssa Airplus-kaasun, joka sisältää kuivaa ilmaa (O_2 , N_2 ja CO_2), johon on sekoitettu 3M Novec 5110 -kaasua. Airplus-kaasun GWP-indeksi on alle 1, joka on lähes 100 % pienempi, kuin SF_6 -kaasun. ABB:n LTB-tuoteperheestä löytyy Airplus-kaasua käyttäviä suurjännitekatkaisijoita 72,5 kV:sta 145 kV:iin ja GIS-järjestelmiä 170 kV:iin asti. Airplus-katkaisijat toimivat ilman rajoituksia jopa $-50^\circ C$ asti, joten esimerkiksi Suomen oloissa ne ovat varteenotettava vaihtoehto. Tulevaisuudessa Airplus-GIS-järjestelmiä pyritään kehittämään 420 kV:iin asti. Kuvassa 9 on esitetty ABB:n LTB 145D1 AirPlus -katkaisija. (ABB 2019; ABB 2020; Rak, T. 2017, 9; 3M 2017)



KUVA 9. ABB:n n LTB 145D1 AirPlus -katkaisija (ABB 2020)

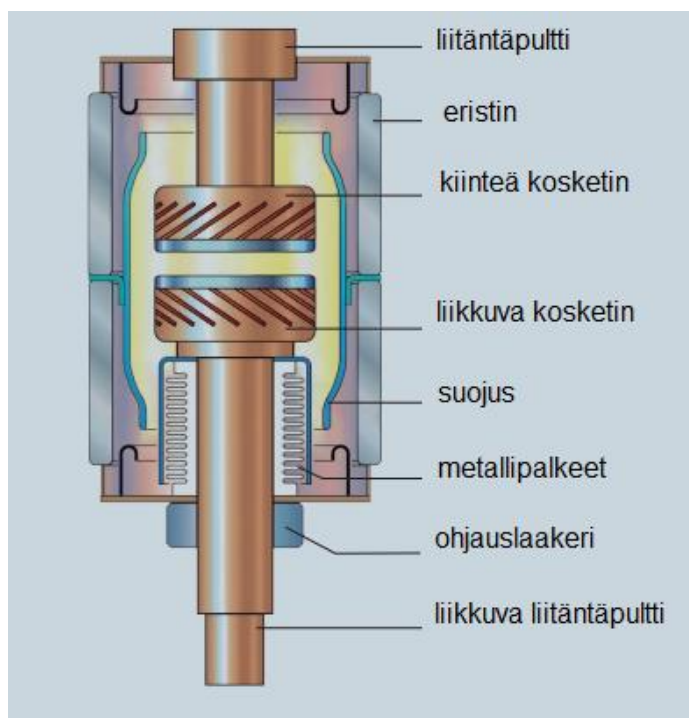
Kuvan 9 Airplus-katkaisija on hyvin saman näköinen ja kokoinen, kuin SF_6 -kaasua hyödyntävät live tank -katkaisijat. Lisäksi se toimii samalla auto-pufferi-tekniikalla.

5.1.2 Tyhjiö tekniikat

Hitachi ja Siemens Energy tarjoavat SF_6 -vapaana suurjännitekytkinlaitetekniikkana tyhjiötekniikkaa. Tyhjiön käyttö on todella ympäristöystävällinen vaihtoehto, koska ilman GWP-indeksi on nolla. Hitachin valikoimasta löytyy 72,5 kV:n dead

tank katkaisija. Tämä jousiviritteinen katkaisija toimii aina $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja niiden mekaaninen kesto on testattu 10 000 katkaisukertaan asti. Siemens on taas kehittänyt Blue-tuoteperheen, joka tarjoaa tyhjiötekniikalla toimivia live tank ja dead tank katkaisijoita sekä clean air -kaasuseosta eristysaineenaan käyttäviä GIS-järjestelmiä. Clean air -kaasuseos on 80 % typpeä ja 20 % happea, mikä vastaa läheisesti ilman koostumusta. GIS-järjestelmissä Siemens käyttää tyhjiötekniikkaa hyödyntäviä katkaisijoita, koska Clean air -kaasuseos ei sovellu virran katkaisuun. Siemensin Blue-tuoteperheestä löytyy GIS-järjestelmiä ja suurjännitekatkaisijoita aina 145 kV:iin asti. (Hitachi n.d.; idw 2016; Siemens Energy n.d.)

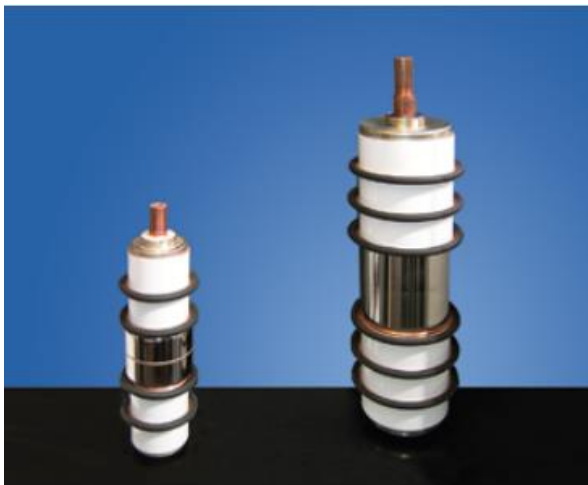
Tyhjiökatkaisijat ovat muihin suurjännitekatkaisijoihin verrattuna varsin yksinkertaisia. Periaatteessa tarvitaan ainoastaan kiinteä ja avautuva kosketin, jotka sijoitetaan tyhjiökammioon. Lisäksi tyhjiön hyvän jännitelujuuden vuoksi katkaisuun riittää varsin pieni (5–15 mm) avausväli, jolloin katkaisija mahtuu pieneen tilaan. Kuviossa 4 on esitetty poikkileikkaus tyhjiökatkaisukammioista.



KUVIO 4. Tyhjiökatkaisijan poikkileikkaus (Siemens Energy 2016, 7)

Kuviosta 4 käy hyvin ilmi tyhjiökatkaisijan yksinkertainen ja vähän tilaa vievä rakenne. Tyhjiökatkaisijan koskettimiin on yleensä suunniteltu uria, joiden vaikutuksesta valokaarta pyöritetään suurilla virroilla valokaarivirran synnyttämän magneettikentän avulla. (Elovaara, J. Laiho, Y. 2001, 260–261)

Tyhjiökatkaisijan kuorirakenteen on oltava luonnollisesti ehdottoman tiivis. Tämän takia voidaan käyttää esimerkiksi keraamisia eristimiä, jotka voidaan kova-juottaa metalliosien kanssa, jolloin vältetään tiivisteongelmat. Kuvassa 10 on esitetty kaksi Siemensin tyhjiökatkaisukammiota.



KUVA 10. Siemensin 72,5 kV ja 145 kV katkaisukammiot (Siemens Energy 2018)

Kuvan 10 katkaisukammioita käytetään Siemensin Blue-tuoteperheen 3AV1-katkaisijoissa. Katkaisijoiden mekaaninen kesto on testattu Hitachin tyhjiökatkaisijan tavoin 10000 katkaisukertaan asti. Täydellä oikosulkuvirralla katkaisuelimet kestävät 30 katkaisua ja nimellisvirralla jopa 10000 katkaisua. Lisäksi ne toimivat jopa $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ asti. (Siemens Energy 2018)

6 POHDINTA

Opinnäytetyön tuloksena saatiin kattava tietopaketti SF₆-kaasusta ja sen käytöstä suurjännitetekniikassa. Työssä tutkittiin SF₆-kaasun ominaisuuksia, sitä koskevia lakia ja asetuksia, eri käyttösovelluksia suurjännitetekniikassa sekä eri valmistajien korvaavia tekniikoita SF₆-kaasulle. Lisäksi kenttätöiden tuloksena saatiin muodostettua kattava työohje suurjännitekatkaisijan kaasutuksesta.

SF₆-kaasu on tällä hetkellä ajankohtainen aihe sähkötekniikassa sen ympäristöä lämmittävien ominaisuuksien vuoksi. Tämän vuoksi aiheesta löytyy paljon aineistoa verkosta sekä kirjallisuudesta. Opinnäytetyössä käytetty aineisto on pyritty valitsemaan luotettavasti todentamalla asia useista eri lähteistä ja näin käytetty aineisto on luotettavaa ja ajankohtaista.

Tulevaisuudessa SF₆-kaasun käyttö tulee todennäköisesti vähenemään suurjännitelaitteistoissa, kun korvaavia ympäristöystävällisempiä tekniikoita alkaa olla saatavilla enemmän ja tämän päivän energia- ja ympäristöpolitiikka sääntelee kohti puhtaampaa tulevaisuutta. Tähän viittaa muun muassa se, että Suomessa kantaverkon haltija Fingrid on päättänyt luopua SF₆-kaasusta vähitellen. Siirtymä uusiin tekniikoihin voi olla kuitenkin vielä pitkä, koska SF₆-kaasun korvaamisesta on puhuttu jo lähes kaksikymmentä vuotta ja silti SF₆-kaasun käyttömäärät ovat lisääntyneet viimevuosiin asti. Tällä hetkellä ympäristöystävällisemmät tekniikat kuitenkin rajoittuvat noin 145 kV jännitteeseen. Suomessa suurimmat siirtojännitteet ovat 400 kV ja maailmalla jopa 1000 kV, joten vaihtoehtoiset tekniikat vaativat vielä kehitystyötä, jotta SF₆-kaasu saadaan korvattua myös suurimmilla jännitteillä.

LÄHTEET

ABB. 2018. Käyttöohje LTB 72.5-170D1/B. Ohjauslaite BLK 222. 3-napainen toiminta / 2 pilarin jalustaa

ABB. 2019. Live Tank Breaker AirPlus™ Leading the way for a greener grid. Luettu 19.9.2021. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107492A8346&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionId=B>

ABB. 2019. Länsisalmen sähköasema GIS-aikakauteen. Julkaistu 13.8.2019. Luettu 7.9.2021. <https://new.abb.com/news/fi/detail/29084/lansisalmen-sahkoasema-gis-aikakauteen>

ABB. 2020. Ekotehokas vaihtoehto SF₆-kasvihuonekaasuun pohjautuville suurjännitekatkaisijoille. Julkaistu 7.5.2020. Luettu 19.9.2020. <https://new.abb.com/news/fi/detail/61852/ekotehokas-vaihtoehto-sf6-kasvihuonekaasuun-pohjautuville-suurjannitekatkaisijoille>

ABB. 2020. High-voltage AirPlus™ switchgear for eco-efficiency. Julkaistu 4.2.2020. Luettu 19.9.2021. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/19._mahdizadeh_navid_-_hvdc_workshop_abb_eco_switchgear.pdf

ABB. n.d. Live Tank Circuit Breakers. Buyer's Guide - Section LTB family. <https://library.e.abb.com/public/9c1ec4b8ebf937f0c1257cc9004b0cda/B.G.%20HV%20LT%20Circuit%20Breakers%20Ed%206en%20LTB%20family.pdf>

ABB TTT käsikirja. 2000. Luku 13. 13.2. Kaasueristeiset kojeistot (GIS) suurjännitteille.

Adato Energia Oy. 2021. RIKKIHEKSAFLUORIDIN (SF₆) KÄYTTÖ SÄHKÖNJAKELULAITTEISSA – yhteenveto verkonhaltijoille tehdystä kyselystä, tilastovuosi 2020. Julkaistu 3.5.2021. Luettu 5.10.2021. https://energia.fi/files/5946/SF6-kaasu_2020.pdf

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

Asetus (EU) N:o 517/2014. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus fluoraatuista kasvihuonekaasuista. Annettu 16.5.2014. Luettu 20.8.2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0517>

Asetus 766/2016. Valtioneuvoston asetus fluorattuja kasvihuonekaasuja tai otsonikerrosta heikentäviä aineita sisältävien laitteiden käsittelijän pätevyysvaatimuksista. Annettu 19.6.2016. Luettu 20.8.2021. <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20160766>

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot 2, Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto.

Elovaara, J. Laiho, Y. 2001. Sähkölaitostekniikan perusteet. Helsinki: Otatieto.

Fingrid. 2020. SF6: Erinomainen eristekaasu toimii valvotussa ympäristössä. Julkaistu 24.4.2020. Luettu 23.8.2021. <https://www.fingridlehti.fi/sf6-eristekaasu-toimii-valvotusti/>

Fingrid. 2020. Fingrid luopuu ilmastolle haitallisesta SF6-eristekaasusta vähitellen. Julkaistu 22.10.2020. Luettu 12.9.2021. <https://www.fingridlehti.fi/fingrid-luopuu-ilmastolle-haitallisesta-sf6-eristekaasusta-vahitellen/>

GE grid solutions. 2017. National Grid Begins Journey to SF6-free HV Substations. Luettu 18.9.2021. https://www.gegridsolutions.com/press/gepress/grid-gs-l5-sellindge_gil_g3-1597-2017_08-en.pdf

GE grid solutions. 2021. GE and Hitachi ABB Power Grids sign landmark agreement to reduce environmental impact in the electrical transmission industry. Luettu 18.9.2021. <https://www.gegridsolutions.com/press/gepress/ge-and-hitachi-abb-power-grids-sign-landmark-agreement.htm>

GOV.UK. 2014. Calculate the carbon dioxide equivalent quantity of an F gas. Julkaistu 31.12.2014. Luettu 22.10.2021. <https://www.gov.uk/guidance/calculate-the-carbon-dioxide-equivalent-quantity-of-an-f-gas>

Hitachi. n.d. Dead Tank Non-Sulfur Hexafluoride (Non-SF6) Vacuum Circuit Breakers. Luettu 25.9.2021. http://www.hitachi-tds.com/products/Vacuum_CB.html

idw. 2016. Switchgear: Stopping Flashovers with Clean Air. Julkaistu 19.12.2016. Luettu 27.10.2021. <https://idw-online.de/de/news?print=1&id=665415>

IEE Explore. 1995. Gas-Insulated Switchgear (GIS) at transmission and distribution levels. Julkaistu 14.11.1995. Luettu 5.9.2021. <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=494815>

IPCC. 2021. Climate Change 2021 The Physical Science Basis. Julkaistu 7.8.2021. Luettu 15.8.2021. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf

Korpinen, L. n.d. Muuntajat ja sähkölaitteet. Luettu 22.8.2021. http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/9muuntajat_ja_sahkolaitteet.pdf

Linde-gas. 2013. Käyttöturvallisuustiedote. Rikkiheksafluoridi. Julkaistu 16.01.2013. Päivitetty 27.03.2020. Luettu 3.10.2021. https://www.linde-gas.fi/fi/images/Rikkiheksafluoridi_1.1_FI_tcm634-448671.pdf

Luoma, M. n.d. Olomuodot ja niiden muutokset. Luettu 3.10.2021. <https://peda.net/kaustinen/keskuskoulu7-9/oppiaineet2/kemia/marjo-luoma/materiaaliarkisto/5ki/olomuodot>

Parrel, D. 2019. An Introduction to Gas Insulated Electrical Substations. Julkaistu 9.2019. Luettu 10.9.2021. <https://www.cedengineering.com/userfiles/An%20Introduction%20to%20Gas%20Insulated%20Electrical%20Substations%20R1.pdf>

SFS EN 50160:2010. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. Luettu 6.10.2021. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index/>

SFS-EN IEC 60376:2018. Vaatimukset sähkölaitteissa käytettävälle tekniselle rikkiheksafluoridille (SF₆) ja SF₆-seoskaasuissa käytettäville lisäkaasuille. Luettu 8.8.2021. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index/>

Siemens Energy. n.d. Presenting Zero: the Blue portfolio. Luettu 19.9.2021. <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/innovation/blue-high-voltage-products.html>

Siemens Energy. 2016. Vacuum Switching Technology and Components for Medium Voltage. Luettu 26.9.2021. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:0550395ac2c0303ddc4fa49e6f3f4bdcea4b1be2/version:1602668806/vacuum-switching-technology-and-components-for-medium-voltage-ca.pdf>

Siemens Energy. 2018. 3AV1 blue circuit-breakers. Luettu 26.9.2021. <https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:ff40988f-3326-48ea-8443-c8f88cfd964e/3av1-blue-circuit-breakers-flyer-en.pdf>

Smeets, R., Van der Sluis, L., Kapetanovic, M., Peelo, D. F. & Janssen A. 2015. Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems. John Wiley & Sons, Incorporated.

Stuk. 2021. Sähkönsiirto ja -jakelu. Luettu 9.10.2021. <https://www.stuk.fi/aiheet/sahkonsiirto-ja-voimajohdot/sahkonsiirto-ja-jakelu>

Rak, T. 2017. SF6 Free HV GIS and Breakers. Luettu 19.9.2021 https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-02/documents/rak_presentation_2017_workshop.pdf

Tekniikan Maailma. 2019. Sähköteollisuudella on ”likainen salaisuus” – Kaikkein voimakkain kasvihuonekaasu SF6 lämmittää ilmastoa 23 500 kertaa enemmän kuin CO₂, ja uusiutuvan energian kasvu lisää sen päästöjä. Julkaistu 16.9.2019. Luettu 12.8.2021. <https://tekniikanmaailma.fi/sahkoteollisuudella-on-likainen-salaisuus-kaikkein-voimakkain-kasvihuonekaasu-sf6-lammittaa-ilmastoa-23-500-kertaa-enemman-kuin-co2-ja-uusiutuvan-energian-kasvu/>

WIKA. n.d. Absoluuttinen paine, suhteellinen paine ja paine-ero. Luettu 7.11.2021. https://www.wika.fi/landingpage_differential_pressure_fi_fi.WIKA

Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. 2019. Kasvihuonekaasupäästöjen seuranta ja raportointi. Julkaistu 26.4.2019. Luettu 15.8.2021. https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ilmasto_ja_ilma/Kasvihuonekaasupaastojen_raportointi_ja_seuranta

Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. 2020. Fluorattujen kasvihuonekaasujen ominaisuudet ja päästöt. Fluorattujen kasvihuonekaasujen päästölähteet. Julkaistu 14.4.2020. Luettu 13.8.2021. https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ilmasto_ja_ilma/Kasvihuonekaasupaastojen_raportointi_ja_seuranta/Kasvihuonekaasupaastojen_seuranta_Suomessa/Fkaasujen_ominaisuudet_ja_paastot

Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. 2021. Fluoratut kasvihuonekaasut. Julkaistu 6.2.2017. Päivitetty 18.5.2021. Luettu 12.8.2021. https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ilmasto_ja_ilma/Kasvihuonekaasupaastojen_raportointi_ja_seuranta/Kasvihuonekaasupaastojen_seuranta_Suomessa/Fluoratut_kasvihuonekaasut

Ympäristöministeriö. n.d. Kioton pöytäkirja. Luettu 15.8.2021. <https://ym.fi/kioton-poytakirja>

Ympäristösuojelulaki 27.6.2014/527. Luettu 22.8.2021. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140527#L17P162>

3M. 2017. Gas insulated medium voltage switchgear from ABB with eco-efficient ABB AirPlus™ and 3M™ Novec™ 5110 Insulating Gas. Luettu 19.9.2021. https://multimedia.3m.com/mws/media/1418736O/3m-novec-insulating-gases-abb-joint-flyer-2017-fv-pdf.pdf?fn=proinfo_novec1230.pdf

LIITTEET

Liite 1. ABB:n LTB 145D1/B -katkaisijan merkkikilpi

ABB		Sisältää fluorattuja kasvihuonekaasuja		Made in Sweden	
Katkaisijan tyyppi	LTB 145D1/B	Ohjaimen laji	BLK 222		
-valm. no	1HSB02118009	-valm. no	1HSB02118009-A1		
Tilaus	KD0001643/5	Valmistusvuosi	2021		
Nimellisjännite	145 kV	Standardi	IEC 62271-100		
Eristystaso	≤ 1000 m	Maata vasten	Avoimella pilarilla		
Syöksyjännitelujuus		650 kV	650 kV		
Kytentäjännitelujuus		- kV	- kV		
Vaihtojännitelujuus		275 kV	275 kV		
Nimellistaajuus	50 Hz	Max. Työpaine	0.80 MPa (gauge)		
Nimellisvirta	3150 A	Kaasunpaine (+20°C)			
Oikosulkuvirran katkaisukyky	40 kA	Täyttöpaine	0.50 SF6 MPa (abs)		
Tasavirtakomponentti	51 %	Hälytys	0.45 MPa (abs)		
Katkaisukerroin	1.5	Ohjauksen esto	0.43 MPa (abs)		
Sulkemiskyky	100 kA	Tilavuus napaa kohti	59 l		
Terminen kestovirta	3 s	40 kA	Kaasun paino	(137 tonnia CO2e)	6 kg
			Kokonaispaino		1541 kg
Avojohton katkaisukyky	31.5 A	Kytentäjakso	0-0.3s-CO-1min-CO		
Mekaaninen luokitus	M2	Lämpötilaluokka	-40 °C		
ABB is a registered trademark of ABB Asia Brown Boveri Ltd. Manufactured by/for a Hitachi Power Grids company					