



# Markkinakartoitus SF<sub>6</sub>-eristys- kaasun korvaavista keskijänni- teteknologioista

Lauri-Ilmari Kuusisto

OPINNÄYTETYÖ  
Huhtikuu 2023

Talotekniikan tutkinto-ohjelma  
Sähköinen talotekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Talotekniikan tutkinto-ohjelma  
Sähköinen talotekniikka

KUUSISTO, LAURI-ILMARI:  
Markkinakartoitus SF<sub>6</sub>-eristyskaasun korvaavista keskijänniteteknologioista

Opinnäytetyö 60 sivua, joista liitteitä 6 sivua  
Huhtikuu 2023

---

Ympäristöystävällisyyteen kiinnitetään nykyisin paljon huomiota, ja tästä näkökulmasta myös sähkötekniikassa on kehitettävää. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kerätä tietoa uusimmista keskijänniteteknologioista, jotka tulevat korvaamaan nykyisen SF<sub>6</sub>-teknologian. Tavoitteena oli tutkia isoimpien valmistajien innovaatioita ja kerätä keskeisin sisältö suunnittelutyön tukemiseksi. Opinnäytetyö tehtiin A-Insinöörit Teollisuus- ja talotekniikka Oy:n toimeksiannosta. Yritys suunnittelee keskijännitekojeistoja useisiin projekteihin osana rakennusten sähkönselujärjestelmiä.

Opinnäytetyössä tutkittiin erityyppisten SF<sub>6</sub>-keskijännitekojeistojen rakenteita ja toiminnallisuuksia sekä selvitettiin tärkeimpien keskijännitekomponenttien toimintaperiaatteita ja käyttötarkoituksia. Työssä selvitettiin myös Euroopan unionin asettamia rajoituksia ja niiden aiheuttamia vaikutuksia keskijännitekojeistojen kehittämiseen ja suunnitteluun. Tiedonlähteenä työssä käytettiin ammattikirjallisuutta, laitevalmistajien tuoteluetteloita ja dokumentteja sekä haastateltiin laitevalmistajien edustajia.

Työn lopputuloksena voidaan todeta, että laitevalmistajat ovat selkeästi löytäneet ratkaisuja KJ-kojeistojen kehittämiseen, jotta SF<sub>6</sub>-kaasusta voitaisiin tulevaisuudessa luopua. Työssä saatiin koottua kolmen suuren kojeistovalmistajan ratkaisut ja huomattiin, että niiden väliltä löytyi niin eroavaisuuksia kuin yhteneväisyyksiä. Työn tuloksena syntyi tiivis katsaus tämän hetken markkinatilanteesta, ja näin saatiin tieto helpommin löydettävään muotoon.

---

Asiasanat: keskijännite, sf<sub>6</sub>-kaasu, kj-kojeisto, f-kaasuasetus

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Building Services Engineering  
Electrical Systems

KUUSISTO, LAURI-ILMARI:  
Replacement of SF<sub>6</sub> Shielding Gas with Other Medium Voltage Technologies  
A Market Survey

Bachelor's thesis 60 pages, appendices 6 pages  
April 2023

---

Nowadays more attention is being paid to eco-friendliness and therefore the design of more eco-friendly switchgears is a very topical issue. The purpose of this thesis was to collect information of on the latest medium voltage technologies that replace existing SF<sub>6</sub>-technology.

The thesis was commissioned by an engineering and consulting company A-Insinöörin Teollisuus- ja talotekniikka Oy. The company plans medium voltage switchgears for several projects as part of the electricity distribution system for buildings. The theoretical section explores parts of the different medium voltage switchgear components and the operational characteristics of the SF<sub>6</sub>-gas. The thesis also examined the restrictions imposed by the European Union and their impact on the medium voltage devices. The data for this study was obtained from professional literature, product lists of equipment manufacturers and interviews with the equipment manufacturers.

As a result, it was observed that switchgear manufactures have found solutions to replace SF<sub>6</sub>-technology. The thesis makes it easier for designers to find information about the products of three large manufactures.

---

Key words: medium-voltage, sf<sub>6</sub>-gas, switchgear, eco-friendly

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	KESKIJÄNNITEKOJEISTOT .....	7
2.1	Primäärikojeistot.....	7
2.1.1	Vaunukatkaisijakojeiston toimintaperiaate .....	9
2.2	Sekundäärikojeistot.....	10
3	KATKAISIJAT JA KYTKINLAITTEET.....	13
3.1	Katkaisijat ja katkaisutapahtuman periaatteet .....	13
3.1.1	Vanhemmat katkaisijateknologiat .....	14
3.1.2	SF <sub>6</sub> -katkaisijat.....	16
3.1.3	Tyhjiökatkaisijat .....	17
3.2	Kytkinlaitteet.....	18
3.2.1	Eroin .....	18
3.2.2	Kuormanerotin .....	20
3.2.3	Varokekuormanerotin .....	20
3.2.4	Maadoituskytkin / maadoituserotin .....	20
3.2.5	Kolmiasentokytkin / kolmiasentoerotin.....	21
4	SF <sub>6</sub> -TEKNOLOGIA .....	23
4.1	SF <sub>6</sub> -kaasu .....	23
4.2	Kaasun käyttöominaisuudet .....	24
5	F-KAASUIHIN KAAVAILLUT RAJOITTEET.....	26
5.1	Fluoratut kasvihuonekaasut .....	26
5.1.1	Rikkiheksafluoridin (SF <sub>6</sub> ) ympäristövaikutus.....	28
5.2	Euroopan unionin F-kaasuasetus.....	29
6	KORVAAVIA TEKNOLOGIOITA SF <sub>6</sub> -KAASUN KORVAAMISEKSI....	32
6.1	ABB.....	32
6.1.1	Primäärikojeistot – ABB.....	33
6.1.2	Sekundäärikojeistot – ABB .....	35
6.2	Schneider Electric .....	36
6.2.1	Sekundäärikojeistot – Schneider Electric .....	36
6.2.2	RMU-Sekundäärikojeistot – Schneider Electric .....	37
6.3	Siemens .....	39
6.3.1	Sekundäärikojeistot – Siemens .....	40
6.3.2	RMU-Sekundäärikojeistot – Siemens .....	43
6.3.3	Kolmiasentokytkin – blue Switch .....	45
7	YHTEENVETO JA POHDINTA.....	48
	LÄHTEET.....	50

LIITTEET .....	55
Liite 1. Luettelo fluoratuista kasvihuonekaasuista .....	55
Liite 2. Schneider Electric AirSeT KJ-kojeistot .....	57
Liite 3. RM AirSet KJ-kojeiston mittatiedot .....	58
Liite 4. Siemens blue GIS 12kV- ja 24kV-kojeistot datalehti .....	59

## 1 JOHDANTO

Ilmaston lämpenemisen hidastaminen ja ilmakehämme suojeleminen on otettu Euroopassa jo pitkään vakavasti. EU:ssa on annettu uusia rajoitteita ja säädöksiä, joilla pyritään vähentämään tai estämään kokonaan ilmakehälle haitallisten päästöjen syntymistä. Tästä huolimatta sähkötekniikassa on pitkään käytetty sähkökytkinlaitosten ja -kojeistojen pääeristeaineena kaasua, joka on ilmakehään päästessään erittäin haitallista ilmakehän suojelemisen kannalta.

Laitevalmistajat ovat kehittäneet korvaavia teknologioita, jotka ovat ympäristölle suotuisampia ratkaisuja. Sähkösuunnittelijan on uusia kojeistoja suunnitellessaan huomioitava myös ympäristönäkökulmia ja tehdä laitteistojen valinnat sen mukaisesti. Lähitulevaisuudessa tiukentuviin määräyksiin koskien kojeistojen eristeaineita on siis jo reagoitu.

Tässä opinnäytetyössä käsitellään työn alkupuolella nykyisten SF<sub>6</sub>-kaasueristeisten keskijännitekojeistojen eri rakenteita ja SF<sub>6</sub>-kaasun ominaisuuksia. Luvusta viisi alkaen tutkitaan EU:n tulevien uusien asetusten vaikutusta kojeistojen suunnitteluun sekä tehdään markkinakartoitus uusista teknologioista, jotka tulevat korvaamaan SF<sub>6</sub>-kaasueristeiset keskijännitekojeistot. Uusia teknologioita tutkittaessa tuodaan esille kolmen suuren laitevalmistajan innovaatiot ja perehdytään niiden ominaisuuksiin. SF<sub>6</sub>-kaasu on laajasti käytössä myös korkeammillakin jännitteillä, mutta tässä työssä aihealue on rajattu keskijännitteeseen (1–36 kV).

Työ tehdään A-Insinöörit Teollisuus- ja talotekniikka Oy:n toimeksiannosta. Yritys on erikoistunut teollisuus- ja talotekniikka-alan suunnitteluun ja konsultointiin. Sähköyksikössä osana muuta laaja-alaista osaamista on keskijännitekojeistojen suunnittelu moniin erityyppisiin kohteisiin. Opinnäytetyön tavoitteena on kerätä tietoa erityyppisten laitteistojen ominaisuuksista ja käyttömahdollisuuksista. Tämä mahdollistaa hyödyllisen tiedon löytämisen yhdestä paikasta suunnittelua tehtäessä.

## 2 KESKIJÄNNITEKOJEISTOT

Kojeistolla tarkoitetaan sähkötekniikassa rakennekokonaisuutta, johon sisältyy kunkin käyttökohteen mukaan tarvittavat kytkentä-, suojaus-, ohjaus- sekä valvontalaitteet. Kojeistojen ydinrakenne koostuu katkaisijoista, erottimista, mittamuuntajista sekä erinäisistä suojauslaitteista. Kojestorakenteet jaetaan suur-, keski- ja pienjännitekojeistoihin. Tässä opinnäytetyössä aihealue rajataan käsittelemään vain keskijännitekojeistoja.

Seuraavaksi tutkitaan keskijännitekojeistojen rakenteita sekä eri rakenneosien ominaisuuksia ja tehtäviä osana laitekokonaisuutta. Lisäksi tutkitaan kojeistojen sijaintia sähköverkossamme niiden tyypillisten käyttökohteiden avulla.

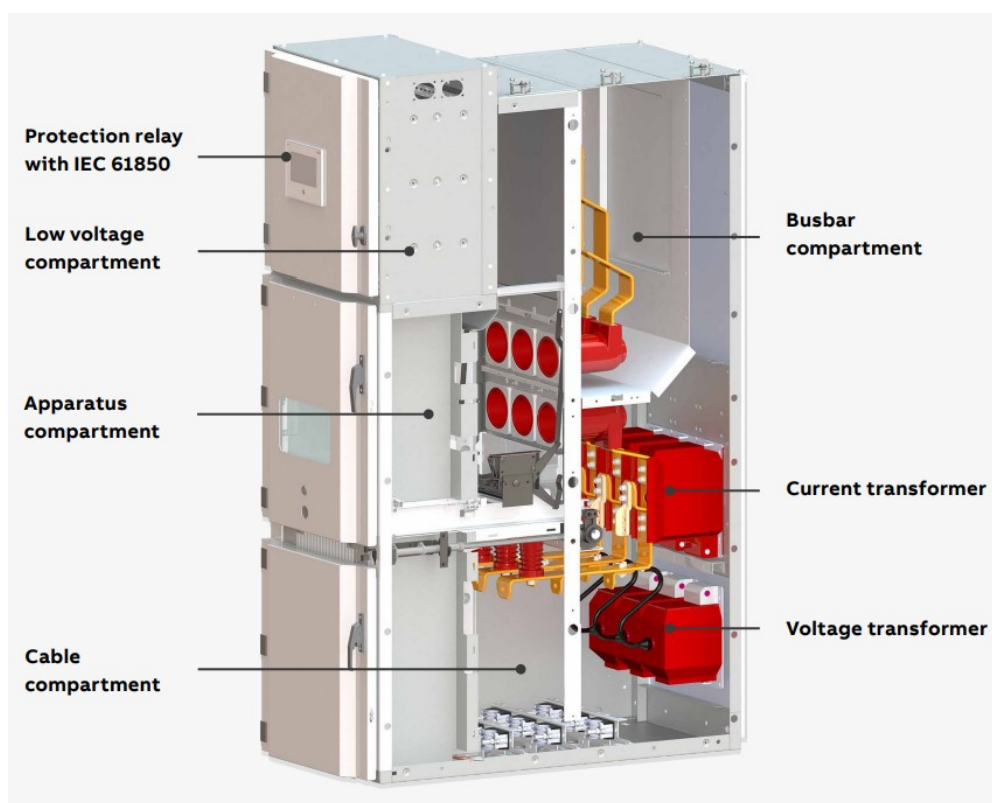
### 2.1 Primäärikojeistot

Sähköverkkoa tarkasteltaessa voidaan sähköasemilla olevista kojeistoista käyttää termiä ensiö- tai primäärikojeisto. Sähköasemilla, jotka syöttävät jakeluverkkoa sekä teollisuuslaitoksien sähköasemilla on tyypillisesti toteutettu keskijännitteiset kytkinasemat järeinä katkaisijakojeistoina (Elovaara & Haarla 2011, 124).

Sähköasemilla käytetään tyypillisesti katkaisijakojeistona vaunukatkaisijakennoja, joissa on kiinteät maadoituserottimet. Vaunukatkaisijakojeistoissa kojeistotyyppi on nykyisin metalliosastoitu ja itse katkaisijan eristeaineena käytössä on tyhjiö tai SF<sub>6</sub>-kaasu. Muutoin kojeisto on metalliosastoinnin lisäksi eristetty ilmalla. Tämän tyyppistä osastoitua kojestoratkaisua kutsutaan myös tilakoteloiduksi kojeistoksi. Nimitys tulee siitä, että sen eri toiminnot on jaettu omiin osastoihin erillisten ovien taakse, jotka voidaan avata yksitellen. Tällä tavoin ei ole esimerkiksi laitteen huoltoa tehtäessä vaaraa jännitteisistä osista. (Elovaara & Haarla 2011, 125.)

Kuvassa 1 on esitetty yhden tyyppisen tilakoteloidun keskijännitekojeiston rakennetta. Vasemmalla ylhäällä on pienjännitetila (low voltage compartment), jossa

sijaitsee suojausreleet (protection relay) ja kaikki muut ohjaus- ja suojaustoiminnot. Pienjännitetilän ovesta on käyttö-/näyttöpaneeli, josta pystyy mm. ohjaamaan katkaisijan tilaa ja lukemaan kojeiston tilatietoja sekä mahdollisia virheilmoituksia. Pienjännitetilassa on ohjauskaapeliin kytkennot riviliittimiin ja releisiin. Laitetila (apparatus compartment) on osio, jossa katkaisija sijaitsee. Kaapelitilassa (cable compartment) on kytkentäpisteet tulo- ja syöttökaapeliin liitännöjien varten. Lisäksi tilassa on virtamuuntaja/-muuntajat (current transformer) sekä jännitemuuntajat (voltage transformer). Tila on mitoitettu siten, että sinne mahtuu kolme virtamuuntajaa. Mikäli kojeiston käytön kannalta kaikki virtamuuntajat eivät ole tarpeen, niin niiden tilalle asennetaan virtamuuntajien korvikkeet. Kojekabinin takaosassa yläpuolella on virtakiskotila (busbar compartment). Tilassa sijaitsee haarakiskot ja niiden tukieristimet, haarakiskojen jatkeena olevat kiinteät kosketimet sekä kokoojakiskot.



KUVA 1. Leikkauskuva tyypillisestä tilakoteloidusta keskijännitekojeistosta (ABB 2021).





Kuvan 2 vaunukatkaisijakojeiston komponentit on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Vaunukatkaisijakojeiston komponentit (ABB 2004b).

10	Kennon runko	10.4	Eristysaineinen väliseinä
10.3	Purkausluukku	10.5	Eristysaineinen suljin (shutter)
10.2	Pienjännitetilän ovi	44.4	Ohjauskaapeloinnin liitäntäpistoke
10.1	Katkaisija- ja kaapelitilan ovi	44	Vaunu
41	Haarakisko	61	Maadoituskytkimen ohjausmekanismi
40	Kokoojakisko	61.2	Maadoituskytkimen ohjausakseli
41.1	Haarakiskojen tukieristimet	60.1	Siirtomekanismi (katkaisijavaunuun)
41.2	Kiinteä kosketin	60.5	Vipu (sulkimen nosto)
46.1	Maadoituskytkin	60.6	Aukiohjauspainike
45.1	Virtamuuntajat	60.7	Kiinniohjauspainike
11.2	Päämaadoituskisko	45.2	Jännitemuuntajat
11.1	Kaapelikiinnike	12.1	Vaunun ohjauskiskot

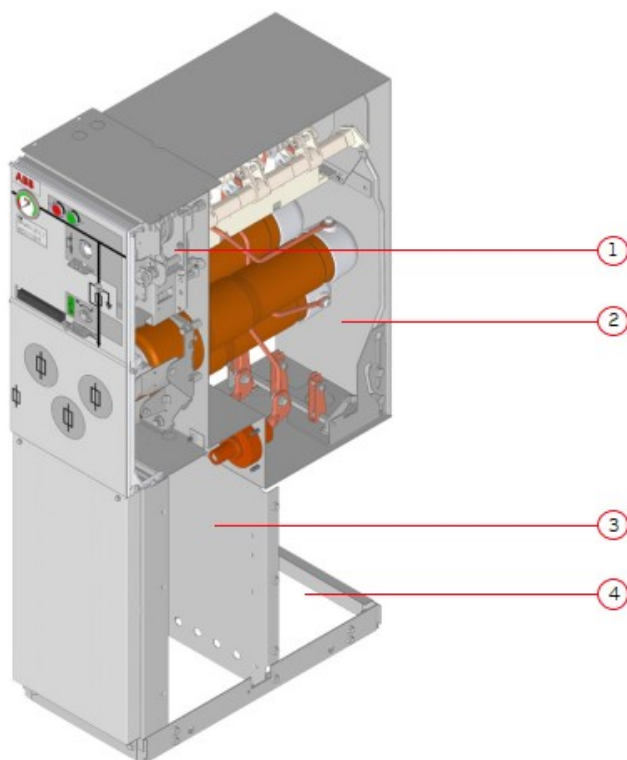
## 2.2 Sekundäärikojeistot

Toisio- /sekundäärikojeistot sijoitetaan keskijänniteverkossa usein puistomuuntamoiden sisälle ja kiinteistömuuntamoiden tapauksessa rakennuksen sisätiloihin. Yleisessä verkossa tyypillisin kojeistotyyppi on RMU-kojeisto (ring main unit), jolla tarkoitetaan rengasverkon tarpeisiin suunniteltua kompaktia ja modulaarista kojeistoratkaisua. (Elovaara & Haarla 2011, 136–139; Euroopan Komissio 2020.)

RMU-kojeisto on siis silmukoidun keskijänniteverkon kuormanerotinkojeisto, jonka avulla on mahdollista liittää T-haaraliitäntäinen muuntaja osaksi silmukkaa. RMU-kojeiston avulla pystytään muuntaja erottamaan verkosta molempiin syöttösuuntiin. Perusrakenteina RMU-kojeistolla on järjestelmä, jossa on yhteinen iso kaasutila ulkokuorien sisällä ja ennalta määritetty määrä kaapelilähtöjä. Toinen vaihtoehto rakenteelle on rinnakkain asennetut ja itsenäiset kennot, jolloin kennojen lukumäärää voidaan tarvittaessa jälkikäteen helposti lisätä. (Elovaara & Haarla 2011, 136–139.)

RMU-kojeiston rakenne on tyypillisesti sellainen, että kuormanerotin ja maadoitusveitset sijaitsevat samassa yhtenäisessä teräslevystä tehdyssä kaasutilassa. Kaasutilassa on jäännöskosteuden sekä SF<sub>6</sub>-kaasun hajoamistuotteiden suodatus. Yhtenäisen kaasutilan takia kytkinlaitteet, jotka sijaitsevat kaasutilassa eivät ole huollettavissa. Tämän seurauksena kytkinlaitteiden toimintavarmuus tulee olla erinomaisella tasolla, jotta vältetään ongelmilta kojeiston toiminnassa. Kaapeli- ja varoketilojen liitynnöissä hyödynnetään kaasutiiviitä läpivientejä. Varokkeiden vuotovirtamahdollisuutta eliminoidaan varokkeiden sijoittamisella ilmaeristeisiin yksivaiheisiin koteloihin tai kouruihin. Sovelluksissa, joissa on tarpeen pystyä suojaamaan suurikokoinen muuntaja on varokekuormanerotin korvattu kokonaan SF<sub>6</sub>- tai tyhjiökatkaisijalla. Kaasutilassa on 0,2–0,5 bar ylipaine. (Elovaara & Haarla 2011, 138.)

Kuvassa 3 on esitetty tyypillisen RMU-kojeiston rakenne poikkileikkauksen avulla. Kojeistossa ylhäällä etuosassa on tila, jossa on kojeiston mekaanisia toimintoja. Numerolla kaksi on osoitettu SF<sub>6</sub>-kaasulla täytetty yhtenäinen kaasutila. Kaapelitilaa on merkattu numerolla kolme. Kaapelitilassa kaapeleille on kaasutiiviiden läpivientien lisäksi vedenpoistoa varten kiinnityspisteet. RMU-kojeiston takaosassa on valokaaripaineen vapautumiselle suunniteltu tila (merkattu numerolla neljä). Valokaaripaine voidaan johtaa monella eri tavalla ulos kojeistosta, kuten suoraan kojeiston alla mahdollisesti olevaan kaapelitilaan tai erillisillä purkauskanavilla haluttuun suuntaan. (ABB 2022b.)



KUVA 3. Leikkauskuva tyypillisen RMU-kojeiston rakenteesta (ABB 2022b).

RMU-kojeistojen lisäksi toinen yleinen kojeistotyyppi keskijänniteverkon sekundääripuolella on moduulikojeistot. Moduulikojeistot eroavat rakenteeltaan RMU-kojeistoista siten, että niitä pystytään jälkikäteen laajentamaan modulaarisen rakenteensa ansiosta. Moduulikojeistot koostuvat siis erilaisia toimintoja sisältävistä kennoista. Kennot asennetaan vieriviereen ja yhdistetään kokoojakiskoilla. Standardien mukaisia kennotyyppejä ovat kaapelinousukennot, kiskonousukennot, kuormanerotinkennot, muuntajakennot ja mittauskennot. (ABB. 2000.)

### 3 KATKAISIJAT JA KYTKINLAITTEET

#### 3.1 Katkaisijat ja katkaisutapahtuman periaatteet

Katkaisijalla tarkoitetaan kytkinlaitetta, joka kykenee katkaisemaan, sulkemaan ja johtamaan kuormitusvirtaa sekä lisäksi myös oikosulkuvirtaa. Katkaisijat kykenevät siis avaamaan ja sulkemaan oikosulkupiirin, jossa virta nousee moninkertaiseksi katkaisijan omaan nimellisvirtaan nähden. Katkaisijat voivat toimia käsiohjauksella sekä automaattisesti. Automaattisesta katkaisusta voidaan esimerkkinä mainita avautuminen oikosulku- tai maasulkuvirran vaikutuksesta. (Elovaara & Laiho 1999, 245; ABB 2000.)

Virtapiirin katkaisussa virta ei katkea saman tien koskettimien avautuessa, vaan virtapiiriä pitää suljettuna valokaari. Valokaaren osuus virran katkaisussa on merkittävä. Suuren johtavuuden ansiosta valokaari antaa aikaa koskettimille avautua riittävän etäälle toisistaan, jolloin koskettimien välille syntyy lopulta riittävän suuri väli, joka kestää täyden jännitteen valokaaren sammumisen jälkeen. (Elovaara & Laiho 1999, 246.)

Katkaisutapahtuma pyritään pitämään riittävän lyhyenä, jotta katkaisu voi onnistua ja vältetään katkaisijan mahdollinen vaurioituminen. Vaihtovirtakatkaisijoiden kohdalla hyödynnetään virran luonnollisia nollakohtia. Valokaarta pidennetään, jaetaan useaan osaan ja jäähdytetään katkaisunaikana tehokkaasti. Näiden lisäksi valokaarta ympäröivä aine eli eristeaine valitaan niin, että se edesauttaa valokaaren sammumista katkaisu tilanteessa. Tärkeimpinä valokaaren ositus- ja jäähdytyslementteinä toimii ympäröivät seinärakenteet ja kulloinkin kojeistoon valikoitu väliaine. Seinärakenteiden tarkoituksena on jäähdyttää valokaarta seinämien lämpökapasiteetin avulla, kun valokaari koskettaa seinämää. Väliaineet puolestaan hajoavat valokaaren vaikutuksesta kaasuiksi, jotka deionisoivat sekä jäähdyttävät valokaarta ja näin ollen edesauttavat valokaaren sammumista. (Elovaara & Haarla 2011, 164–165.)

### 3.1.1 Vanhemmat katkaisijateknologiat

Öljykatkaisijat ja vähäöljykatkaisijat voidaan nykyisin sijoittaa vanhentuneiden katkaisijateknologioiden listalle, sillä niitä ei uutena enää juuri näe. Katkaisijoissa käytetty öljy on mineraaliöljyä, joka kaasuuntuu sekä hajaantuu osiin valokaaren vaikutuksesta. Näin ollen valokaaren ympärille syntyvä kaasuvaippa sammuttaa valokaarta voimakkaasti. Öljykatkaisijoissa on käytetty suuren paineen kestäväää öljysäiliötä, jolla saatiin parannettua katkaisukykyä. Suurella paineella pystyttiin edesauttamaan valokaaren sammumista. Öljykatkaisijoita on rakenteeltaan myös sellaisia, joissa koskettimien ympärillä on tiiviit eristysaineesta valmistetut sammutuskammiot. Kammioissa on pieniä reikiä, jotka mahdollistavat öljyn hitaan vaihtumisen sekä virtauksen. Tällöin sammutuskammiossa oleva öljy kaasuuntuu valokaaren aiheuttamasta vaikutuksesta ja paine nousee kammiossa 6–8 MPa tasolle. Paineen nousu edistää koskettimien liikettä ja aiheuttaa öljyn virtauksen. Mineraaliöljyä käytettiin paljon etenkin Yhdysvaltojen suosimissa ns. dead-tank-katkaisijoissa aikana ennen kuin SF<sub>6</sub>-kaasu oli käytettävissä. (Elovaara & Haarla 2011, 174–175.)

Vähäöljykatkaisija (minimum-oil circuit-braker) kehiteltiin, kun öljykatkaisijoiden suurta öljymäärää pidettiin haasteellisena. Suuresta öljymäärästä on haittaa, sillä se voi aiheuttaa suurta tuhoa räjähtäessään. Sisään rakennettujen öljykatkaisijoiden kohdalla saattoi jopa koko kytkinlaitosrakennus tuhoutua räjähdysten voimasta. Vähäöljykatkaisijoissa on kullakin vaiheella oma sammutuskammio, joissa on öljyä. Erillisten sammutuskammioiden takia öljyn määrä on huomattavasti pienempi, kuin öljykatkaisijoissa ja näin ollen vahinkoriski on pienempi, mikäli virran katkaisu epäonnistuisi. (Elovaara & Haarla 2011, 175.)

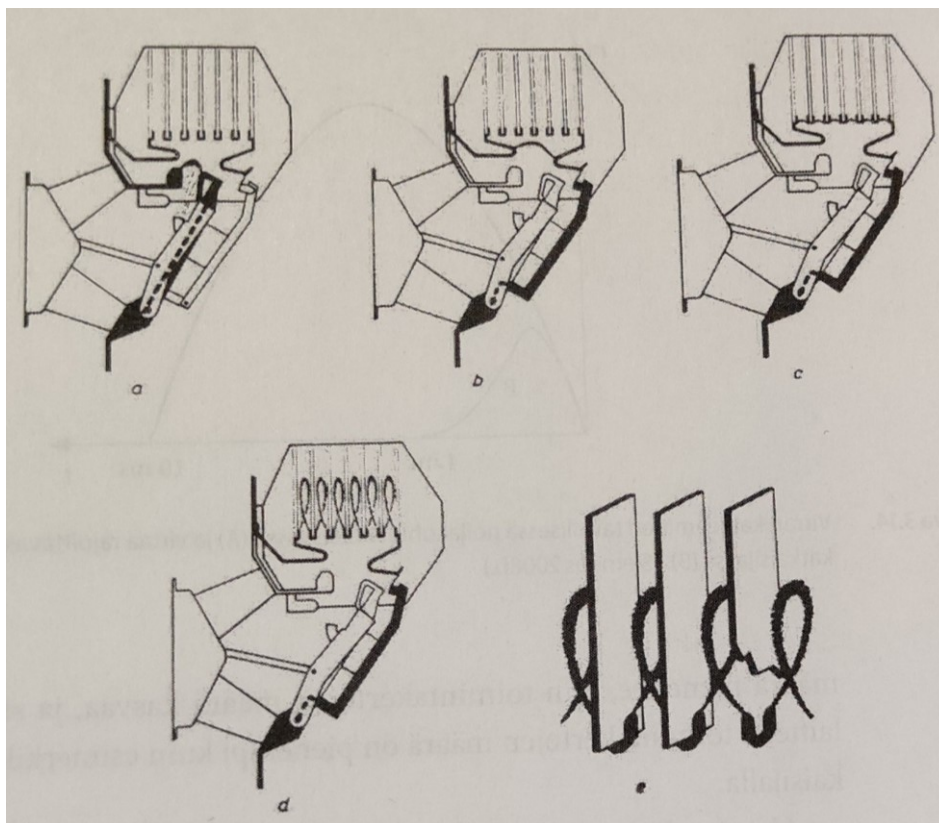
Vähäöljykatkaisijoiden valokaaren sammutus perustuu öljyn höyrystyessä nousevaan paineeseen, jonka myötä syntyy kaasun ja öljyn virtaus. Paine voi nousta vähäöljykatkaisijoissa jopa 10 MPa suuruiseksi. Öljyn virtausta on tehostettu erilaisilla pumppauslaitteilla, joiden avulla pystytään suuntaamaan öljy tehostetummin kohti valokaarta tai poikittain sitä vasten. Öljyn pumppaamisen merkitys kasvaa pienempiä virtoja katkaistaessa, sillä valokaaren itsensä synnyttämä paineen nousu on vähäistä pienillä virroilla. Vähäöljykatkaisijoiden pääasiallisena käyttöalueena on ollut 7,2–123 kV jännitteet. Lisäksi paikat, joissa vähäöljykatkaisijaa

on käytetty ovat kytkentätiheyksiltään sekä oikosulkuvirroiltaan kohtuullisia. (Elovaara & Haarla 2011, 176.)

Ilmakatkaisija on kolmas katkaisijatyyppe, jonka voidaan todeta olevan vanhentunutta teknologiaa. Ilmakatkaisijassa toiminta on rakennettu siten, että katkaisukärjet ovat normaalipaineisessa ilmassa suojattuna eristävillä sekä tulenkestävillä suojoilla. Suojatun rakenteen sisällä on tyypillisesti useita välilevyjä, joilla tehostetaan valokaaren sammumista. Yleisesti ilmakatkaisijoissa on kahdet erilliset koskettimet, joista käytetään termiä pää- ja valokaarikoskettimet. Katkaisutilanteessa pääkoskettimet avautuvat ennen valokaarikoskettimia, jolloin valokaari syntyy valokaarikoskettimien väliin. Tällä tavoin pääkoskettimet säilyvät ehjänä pidempään. (Elovaara & Haarla 2011, 172.)

Usein ilmakatkaisijat on varustettu magneettisella puhalluksella. Puhalluksella tarkoitetaan virran aiheuttaman sähkömagneettisen voiman kohdistumista poikittain valokaareen. Puhallus työntää tällä tavoin valokaaren kohti sammutuskammion sammutuskennostoja. Tällä tavoin valokaarta saadaan pidennettyä, jolloin sen vastus kasvaa ja virta alkaa pienentyä. Sammutuskammiossa valokaari jäähtyy ja lopulta sammuu kokonaan. (Elovaara & Haarla 2011, 173–174.)

Magneettipuhalluksella varustetun ilmakatkaisijan toimintaperiaate on esitetty kuvassa 5. Kohdassa a, pääkoskettimet avautuvat ja valokaari syttyy. Kohdassa b, valokaari siirtyy kipinä-/ valokaarikoskettimille. Kohdassa c, valokaari siirtyy sammutuskammioon ja jakautuu osiin välilevyjen väliin. Kohdassa d, magneettipuhalluksen vaikutuksesta valokaaren osat pidentyvät välilevyjen välissä. Viimeisessä kohdassa (e) on esitetty vielä lähikuva valokaaren pidentymisestä. (Elovaara & Haarla 2011, 174.)



KUVA 5. Magneettipuhalluksella varustetun ilmakatkaisijan toimintaperiaate (Elovaara & Haarla 2011, 174).

### 3.1.2 SF<sub>6</sub>-katkaisijat

SF<sub>6</sub>-katkaisijat ovat edellisessä luvussa 3.1.1 mainittuja kolmea teknologiaa kehittyneempi katkaisijatyyppe. Isoimpina etuina vanhempiin teknologioihin verrattuna SF<sub>6</sub>-katkaisijoilla on niiden palamattomuus, suuri valokaaren jäähdytyskyky sekä yhdellä katkaisuyksiköllä saavutettava suurempi palaavan jännitteen kesto-kyky. Näiden syiden takia myös katkaisuteho on paljon suurempi kuin muilla teknologioilla. Keskijänniteverkon tapauksessa keskeisimmät ominaisuudet ovat vähäinen huollon tarve, palamattomuus sekä pienet katkaisuylijännitteet. Keskijännitteisillä SF<sub>6</sub>-katkaisijoilla saadaan vaihevälit ja kojeistojen fyysinen koko pieniksi sillä katkaisijan kuoret voidaan valmistaa valuhartsista kaikki jännitteelliset osat suojaten. (Elovaara & Laiho 1999, 259; Elovaara & Haarla 2011, 177–179.)

SF<sub>6</sub>-katkaisijat ovat huoltotarpeeltaan ja käyttöikänsä pitkäkestoisia, sillä niiden käyttöikä on yleensä 5000–10000 toimintakertaa. Katkaisuelimet kestävät täy-



dellä oikosulkuvirralla tyypillisesti 10–20 katkaisua sekä tuhansia katkaisuja nimellisvirralla. Edellä mainituista ominaisuuksista johtuen SF<sub>6</sub>-katkaisijoiden huoltovälit ovat nykyisin yli 10 vuotta. Pitkä huoltoväli vaikuttaa sähköasemilla suunnitteluun. Erottimia katkaisijan ympärillä ei pidetä välttämättöminä ja sähköasemilla voidaan käyttää tavallisten SF<sub>6</sub>-katkaisijoiden sijasta erottavia katkaisijoita, jolloin saavutetaan edullisempi sekä yksinkertaisempi järjestelmä rakenne. (Elovaara & Haarla 2011, 180–181.)

SF<sub>6</sub>-katkaisijoiden ongelmat liittyvät pitkälti niissä käytettävän kaasun ominaisuuksiin. Kaasun ominaisuuksista on kerrottu tarkemmin luvussa neljä.

### 3.1.3 Tyhjiökatkaisijat

Tyhjiökatkaisijat (vacuum circuit-breaker) ovat rakenteeltaan yksinkertaisempia kuin muut katkaisijatyypit. Kaikessa yksinkertaisuudessaan kiinteä ja liikkuva kosketin sijoitetaan tyhjiösäiliöön. Koskettimien avautuessa valokaari jää palaamaan ionisoituneeseen kaasuun ja kun virran nollakohta saavutetaan, metallihöyryn ionisoituminen lakkaa ja höyry tiivistyy. Valokaaren syttymiseen, palamiseen ja sammumiseen vaikuttaa katkaisijan kosketinpinnoilla käytettävät elektrodiaineet. (Elovaara & Haarla 2011, 182.)

Tyhjiökatkaisijoiden kuorirakenteen tulee olla erittäin tiivis, jonka vuoksi jännite ja virta täytyy tuoda keraamisten läpivientieristimien avulla katkaisuelektrodeille. Tyhjiökatkaisijoissa koskettimet vaativat lisäksi jatkuvan ulkoisen puristusvoiman, jotta katkaisija kykenee johtamaan mitoitus- ja oikosulkuvirtoja ilman liian suurta lämpenemistä. Käyttäjälle tyhjiökatkaisijan rakenne on hyvin samankaltainen kuin muillakin teknologioilla. Tyhjiökatkaisijat elinikä on täydellä oikosulkuvirralla 20–100 toimintakertaa ja nimellisvirralla 10000–20000 toimintakertaa. Tyhjiökatkaisijan kilpailukyky taloudellisuutta mitattaessa perustuukin hyvään huoltovarmuuteen. Tyhjiökatkaisijatekniikka on käytössä myös keskijänniteverkon kytkimissä ja kontaktoreissa, sillä siten saadaan rakennettua vähän tilaa vaativia laiteratkaisuja. (Elovaara & Haarla 2011, 182–184.)

## 3.2 Kytkinlaitteet

Kirjassa Sähköverkot II ovat Elovaara ja Haarla kiteyttäneet kytkinlaitteiden tehtävä kuvauksen seuraavasti:

Kytkeinlaitteiden tehtävänä on muuttaa tarvittaessa verkon topologiaa ja siten ohjata sähköenergian kulkua verkossa, erottaa viallinen verkoston osa nopeasti irti verkosta vahinkojen ja vaarojen välttämiseksi ja toimia tarvittaessa erotuskohtana verkoston eri osien välillä. (Elovaara & Haarla 2011, 161.)

Kaikilla kytkinlaitteilla on normaalitila ja toimintatila, jotka edellyttävät kytkinlaitteelta täysin erilaisia käyttöominaisuuksia. Normaalitilassa kytkinlaitteen tulee kyetä johtamaan kuormitusvirrat ilman suuria häviöitä ja ylikuumenemista. Toimintatilassa kytkinlaite muuntuu eristeeksi tai eristeestä johtavaksi kappaleeksi. (Elovaara & Haarla 2011, 162.)

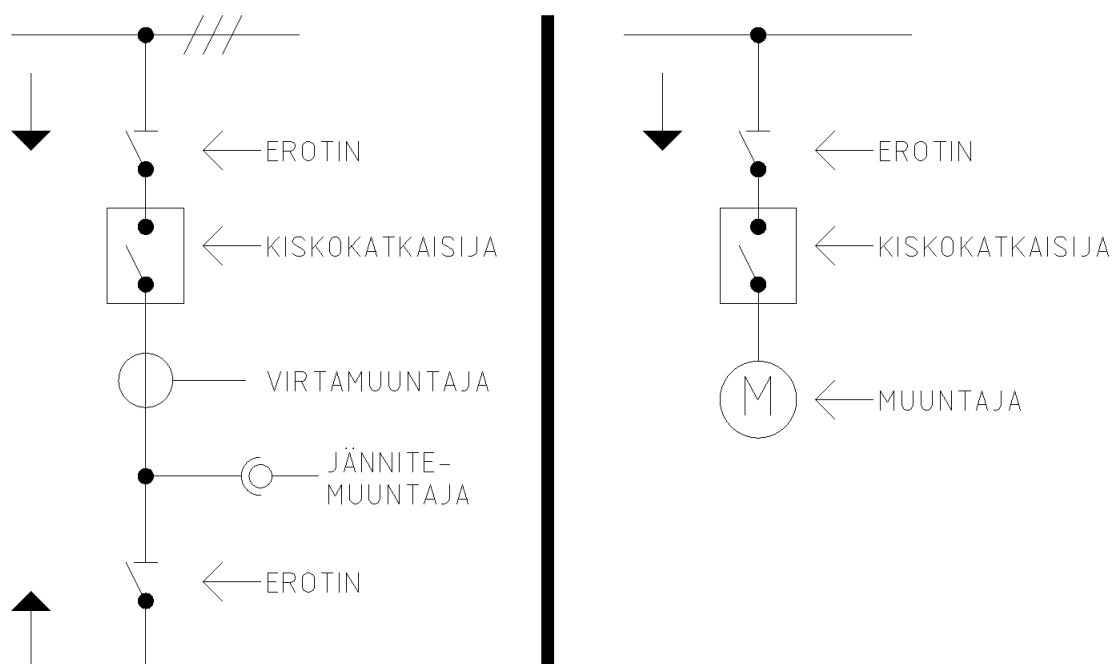
### 3.2.1 Erotin

Erottimella (disconnector) on kaksi toimintoa, joiden vuoksi erottimella muodostettava avausväli tulee olla erittäin luotettava. Nämä toiminnot ovat turvallisen avausvälin muodostaminen virtapiiriin ja muun laitoksen välille sekä kyky saada jokin laitoksen osista jännitteettömäksi mahdollistaen turvallisen työskentelyn. Tämän takia erottimen avausvälin tulee olla luotettava tai vaihtoehtoisesti avausväli on kyettävä todentamaan luotettavalla mekaanisella asennonosoittimella. Erottimelta vaaditaan myös suurempaa jännitelujuutta kuin ympäröivällä eristyksellä, esimerkiksi maan ja vaiheen välinen eristyksen jännitelujuus. Jännitelujuus vaatimukset on määritelty SFS-standardissa 6001 (yli 1kV vaihtojännite) ja SFS-standardissa 6000 ( $\leq 1\text{kV}$  vaihtojännite). Erottimia ei ole tarkoitettu käytettäväksi kuormitetun virtapiiriin avaamiseen eikä sulkemiseen, joten niiltä ei myöskään vaadita virran katkaisu- tai sulkemiskykyä. (Elovaara & Haarla 2011, 76–77, 190.)

Erottimelta vaaditaan turvallisuussyistä, että se on pystyttävä lukitsemaan auki sekä kiinniasentoon. Lukitsemisen vaatimuksena on, että sen on estettävä erottimen vaarallinen käyttö kuten erottimen auki-ohjaus virrallisena. Lisäksi erotti-

men tulee kyetä suljettuna johtamaan kuormitus- sekä oikosulkuvirrat. Syötettäessä sähköenergiaa vain yhdestä suunnasta riittää tällöin yksi erotin, joka sijoitetaan syöttävän kiskoston ja katkaisijan väliin. Mikäli sähköenergian syöttö tapahtuu kahdesta suunnasta, on erottimia oltava katkaisijan molemmin puolin. Asennuksessa ja sijoittamisessa kiskostoon nähden on otettava huomioon, että erotin on pyrittävä asentamaan siten, että auki-asennossa erottimen veitset ovat jännitteettömät. Erottimia ei myöskään saa asentaa siten, että eri vaiheiden virtatiet olisivat päällekkäin sillä silloin veitsien avautuessa valokaari voi nousta ylöspäin muihin vaiheisiin ja aiheuttaa siten vaiheiden välille oikosulun. Erottimia käytetään paljon hyödyksi, kun halutaan mahdollistaa jonkin laitteen tai laitteiston tekeminen jännitteettömäksi esimerkiksi huoltotöitä varten. (Elovaara & Haarla 2011, 190–191.)

Havainnollistava kuva erottimen mahdollisesta sijainnista virtapiirissä on esitetty kuvassa 6. Kuvassa mustilla nuolilla on merkattu sähköenergian syöttösuunnat.



KUVA 6. Havainnollistava kuva erottimen mahdollisesta sijainnista virtapiirissä. (Elovaara & Haarla 2011, 191).

### 3.2.2 Kuormanerotin

Kuormanerotin (switch-disconnector) kykenee edellisessä luvussa esitellyn erottimen tehtävien lisäksi katkaisemaan melko suuria kuormitusvirtoja sekä kytkeämään pienehköjä oikosulkuvirtoja. Kuormanerotimia on Suomen keskijänniteverkossa käytössä laajalti paikoissa, joissa kuormitusvirrallisia verkon osia joudutaan erottamaan toisistaan tai kohteissa, joissa kuormittamaton muuntaja tai kaapeliverkko erotetaan verkosta. (Elovaara & Haarla 2011, 195–196.)

Kuormanerottimessa on tyypillisesti erilliset pää- ja katkaisukoskettimet sekä joussilaite, joka mahdollistaa nopean sulkemisen. Kuormanerottimen avautuessa pääveitset avautuvat ensin ja muutaman millisekunnin viiveen jälkeen valokaarikoskettimet, jotka suorittavat varsinaisen katkaisun. Kuormanerotimet ovat Suomessa usein kolme asentoisia, joka tarkoittaa, että kuormanerotin voi olla kiinni, auki tai maadoitettu asennossa. Kuormanerotimet on tyypillisesti sijoitettu KJ-kojeistoissa epoksihartsista valettuun kennoon, jossa eristeaineena on SF<sub>6</sub>-kaasu. (ABB 2004; Elovaara & Haarla 2011, 195.)

### 3.2.3 Varokekuormanerotin

Varokekuormanerottimella tarkoitetaan vapaalaukaisulaitteella sekä sulakkeilla varustettua kuormanerotinta. Tyypillisimpänä käyttökohteena varokekuormanerottimelle ovat jakelumuuntajan kytkinlaitteena, suojauksessa ja kokoojakiskojen jännitemittauksessa toimiminen. Kolme asentoisen varokekuormanerottimen yhdenkin sulakkeen toiminta aiheuttaa erottimen auki-ohjautumisen ja piirin kaikkien napojen erottamisen. (ABB 2004; Elovaara & Haarla 2011, 196.)

### 3.2.4 Maadoituskytkin / maadoituserotin

Maadoituskytkimellä ja maadoituserottimella tarkoitetaan käytännössä samaa asiaa. Maadoituskytkimen avulla laitteisto tai laitteiston osia maadoitetaan, jolloin puhutaan työmaadoituksesta. Keskijännitekojeistoissa kojeiston runko on kaut-

taaltaan galvaanisesti kytketty eli se toimii maadoituksen yhdysjohtona. Kojeistossa on maadoituskisko, johon kojeiston runko yhdistetään. Kun kojeisto on erotettu jännitteestä, maadoituskytkimellä oikosuljetaan kiskotilan ulkopuoliset osat ja näin ollen kojeiston muissa osissa on turvallista työskennellä. Kojeeistoissa lukitukset on suunniteltu siten, että maadoituskytkimen ollessa kiinni ei kojeistoa pysty kytkemään jännitteelliseksi. Lukitukset toimivat myös niin päin, että maadoituskytkintä ei pysty kytkemään kiinni, kun kojeisto on kytketty jännitteiseksi. Maadoituskytkimille on yleensä suunniteltu laitteistoissa joko sähköinen tai mekaaninen lukitus, jolla pystytään estämään tahaton auki kytkentä.

### 3.2.5 Kolmiasentokytkin / kolmiasentoerotin

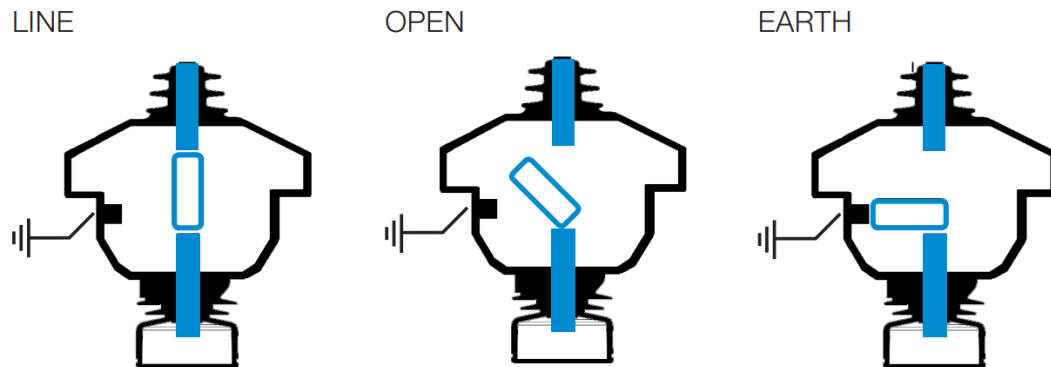
Kolmiasentokytkimellä tarkoitetaan erotinta, jolla on normaalien auki- ja kiinniasentojen lisäksi maadoitusasento. Toisin sanoen edellisessä luvussa 3.2.4 mainittu maadoituskytkin on liitetty osaksi erotinta. Kuvassa 7 on esitettynä yhden tyyppinen kaasueristeinen kuormanerotin, jossa on kolme kytkentä asentoa.



KUVA 7. SF<sub>6</sub>-erotin kolmiasentokytkimellä. (ABB 2023).

Kolmiasentokytkin erottaa maadoitusasennossa kiskostotilan ja kaapelipäätetilan omiksi osastoiksi sekä maadoittaa kaapelipäätteen ja katkaisijan molemmin puolin. Näin ollen esimerkiksi kojeiston katkaisijan pystyy vaihtamaan tai huoltamaan turvallisesti. Kojeeistoissa on laitevalmistajista riippumatta erityyppisiä lukituksia,

joilla estetään kolmiasentokytkimen väärän aikainen ohjaus. Esimerkkinä lukituksesta on maadoituskytkimen kiinniohjauksen estäminen kuormituspuolen kennossa, mikäli verkon puolen kuormanerotinta ei ole lukittu auki-asentoon. Kuvassa 8 on vielä kuvitettuna kolmiasentokytkimen eri asennot.

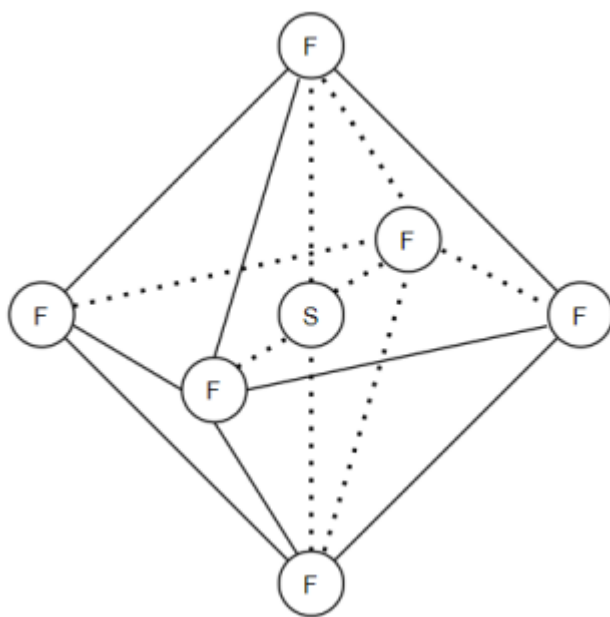


KUVA 8. Kuvituskuva kaasueristeisen kolmiasentokytkimen toiminta-asennoista. (ABB 2018a).

## 4 SF<sub>6</sub>-TEKNOLOGIA

### 4.1 SF<sub>6</sub>-kaasu

GIS-kojeistojen (Gas insulated switchgear) eristeaineena on ollut jo pitkään käytössä SF<sub>6</sub>-kaasu eli rikkiheksafluoridi. GIS-kojeistot ovat SF<sub>6</sub>-kaasun ansiosta pystytty tekemään käyttövarmuudeltaan hyviksi ja lähes huoltovapaiksi. SF<sub>6</sub>-kaasu eli rikkiheksafluoridi on jo vuosikymmeniä sitten tunnistettu hyväksi eristeaineeksi sähkötekniikan tarpeisiin. Hyvän sähkölujuuden lisäksi sillä on ominaisuuksia kuten myrkyttömyys, palamattomuus sekä hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet, jonka vuoksi SF<sub>6</sub>-kaasu on erinomainen myös valokaaren sammutuskaasuna. SF<sub>6</sub>-kaasu on yksi raskaimmista tunnetuista kaasuista. Kaasun tiheys on 6,2 kg/m<sup>3</sup>, joka tarkoittaa sen olevan 5,1 kertainen suhteessa ilman tiheyteen 1,2 kg/m<sup>3</sup> (normaali-ilmakehän tiheys meren pinnan tasossa). SF<sub>6</sub>-molekyylin rakenne muodostuu yhdestä rikkiatomista ja kuudesta fluoriatomista, jotka ovat asettuneet symmetrisesti rikkiatomin ympärille. Näiden rakenteellisten seikkojen takia kaasu on stabiili säilyen ilmakehässä noin 3200 vuotta ja pysyessään muuttumattomana noin 500 °C lämpötilaan asti. Kuvassa 9 on esitettynä rikkiheksafluoridin kemiallinen rakenne. (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2015, 112; Haapanen 2016, 9.)



KUVA 9. Rikkiheksafluoridin kemiallinen rakenne (Aro ym. 2015, 112).

Täysin puhdas SF<sub>6</sub>-kaasu ei ole myrkyllinen aine. Vaara muodostuu kuitenkin suurten kaasuvuotojen tapauksissa, jolloin kaasu syrjäyttää hapen ja aiheuttaa näin ollen tukehtumisvaaran. Muita ihmiselle haitallisia vaaratilanteita aiheutuu kaasun hajoamistuotteiden hengittämisestä. Hajoamistuotteita syntyy esimerkiksi kytkinlaitteesta ulospurkautuneen kaasun takia. Katkaisijoissa tapahtuvien valokaarien sekä osittaispurkauksien aiheuttamana SF<sub>6</sub>-kaasu hajoaa, jolloin syntyy kaasumaisia ja kiinteitä yhdisteitä. Nämä yhdisteet voivat olla korroosiota aiheuttavia ja myrkyllisiä. Edellä mainitut haitat on otettava huomioon mahdollisten katkaisijoiden kaasuvuotojen, valokaarivian tai muun onnettomuuden sattuessa. Hajoamistuotteen mukana on tionyylidifluoridia (SOF<sub>2</sub>), jonka pystyy tunnistamaan sille tunnusomaisesta pistävästä hajusta sekä silmien ja limakalvojen mahdollisena ärtymisenä. (Aro ym. 2015, 112–113.)

SF<sub>6</sub>-kaasulla on siis vaikutuksia ympäristöömme ja ilmakehään, joihin tulee suhtautua asiaan kuuluvalla vakavuudella. Kaasun ympäristövaikutuksia käsitellään tarkemmin luvussa 5.1.1.

## 4.2 Kaasun käyttöominaisuudet

Yksi SF<sub>6</sub>-kaasun käyttöön liittyvistä haasteista on se, että riittävän alhaisessa lämpötilassa ja suuressa paineessa kaasu alkaa nesteytyä. Nesteytymistä voi esiintyä esimerkiksi kaasun täyttöpaineen ollessa 6,0 bar (absoluuttinen paine), jolloin nesteytymisraja saavutetaan noin -30 °C lämpötilassa. Tämän takia Suomen ilmasto-olosuhteissa nesteytyminen tulee huomioida järjestelmäkokonaisuuksia suunniteltaessa. (Aro ym. 2015, 112–113.)

Nesteytyminen heikentää tai poistaa jopa joitakin ominaisuuksia kokonaan katkaisijalta ja näin ollen katkaisija ei toimi kuten sen on suunniteltu toimivan. Kokeusperäiseen tietoon pohjaten voidaan todeta, että nesteytyminen ei ole aiheuttanut suomessa läpilyöntiä. Nesteytymisen aiheuttama ongelma, joka pahimmassa tapauksessa tuhoaa kojeiston ja asettaa käyttäjän vaaraan on se, että SF<sub>6</sub>-kaasu menettää kykynsä sammuttaa valokaaren, joka syntyy katkaisijan



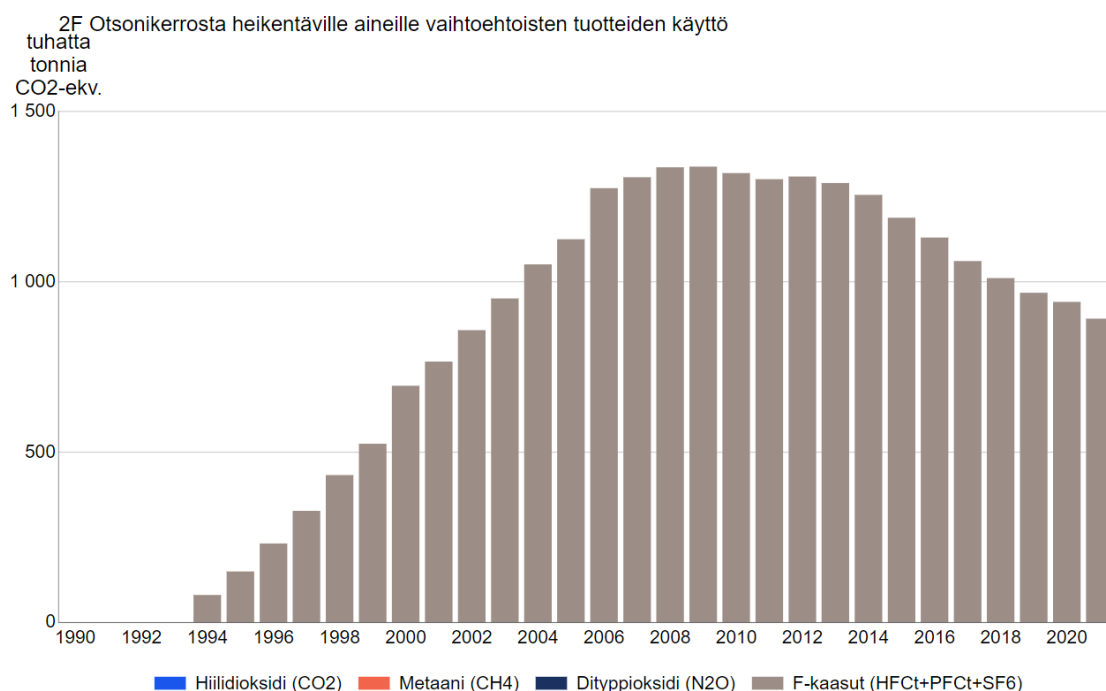
avaus tilanteessa. Valokaari hajottaa katkaisijan ja riski suuremmalle sähköpölylle on ilmeinen.

Nesteytymistä voidaan kuitenkin estää esimerkiksi typen avulla. Korvaamalla osa SF<sub>6</sub>-kaasusta typellä saadaan nesteytymislämpötilaa huomattavasti alemmaksi. Lämpilyöntilujuus säilyy riittävällä tasolla, sillä se ei ole merkittävästi huonompi kuin puhtaalla SF<sub>6</sub>-kaasulla. Valokaaren sammutusominaisuudet tosin heikkenevät typpeä käytettäessä, jonka vuoksi SF<sub>6</sub>-kaasun ja typen suhde on valittava halutun katkaisukyvyyn ja sallitun nesteytymislämpötilan optimoimisella. Lisäksi etuina tämän tyyppisellä seoskaasulla on sen pienempi herkkyys epäpuhtauksille ja elektrodipinnan epätasaisuuksille sekä kustannussäästö. (Aro ym. 2015, 112–113.)

## 5 F-KAASUIHIN KAAVAILLUT RAJOITTEET

### 5.1 Fluoratut kasvihuonekaasut

Fluoratut kasvihuonekaasut eli F-kaasut ovat erittäin voimakkaita kasvihuonekaasuja, joiden lämmitysvaikutus on jopa 23000-kertainen verrattuna hiilidioksidin aiheuttamaan lämmitysvaikutukseen. F-kaasut eivät ole haitallisia otsonikerrokselle ja siitä syystä niiden käyttö on lisääntynyt vuosien saatossa voimakkaasti (kuvio 1), kun niillä on korvattu kielletyksi tulleita aineita. Kuviosta 1 voidaan myös nähdä selkeä laskeva trendi alkaen vuodesta 2014, juuri tuolloin astui voimaan EU:n vielä tällä hetkellä voimassa oleva asetus (EU) N:o 517/2014 koskien F-kaasuja.



KUVIO 1. F-kaasujen käytön lisääntyminen (Tilastokeskus 2022).

F-kaasun käytön määrään vaikuttaa voimakkaasti erilaisten lämpöpumppujen ja ilmastointilaitteiden yleistyminen, sillä niiden kylmäaineissa on laajalti käytössä F-kaasuihin lukeutuvia aineita. F-kaasuihin lukeutuvat muun muassa fluorihilivedyt (HFC-yhdisteet), perfluoratut hiilivedyt (PFC-yhdisteet), typpitrifluoridi (NF<sub>3</sub>) ja tässä työssä jo aikaisemmin luvussa neljä mainittu rikkiheksafluoridi (SF<sub>6</sub>). (Tulli 2021; Ympäristöministeriö 2022b.)

Ympäristöministeriön vuoden 2022 ilmastovuosikertomuksesta selviää rikkiheksafluoridin osuus Suomen vuoden 2021 F-kaasujen kokonaispäästömäärästä. Kuviossa 2 esitettynä oleva kaksi prosenttia sähkölaitteistoista johtuneita päästöjä tarkoittaa siis käytännössä suoraan rikkiheksafluoridia, jota on syystä tai toisesta vuotanut kojeistoista ja kytkinlaitteista. Kuviosta 2 nähdään hyvin, kuinka suuri osuus F-kaasupäästöistä syntyy kylmä- ja ilmastointilaitteista. Näissä laitteissa käytetään pitkälti HFC-yhdisteitä kylmäaineissa, joka selittää suuren prosenttiosuuden kokonaismäärästä. Vaikka rikkiheksafluoridin osuus päästöissä on määrällisesti pieni muihin yhdisteisiin nähden niin on huomioitava, että rikkiheksafluoridin lämmityspotentiaali on huomattavasti muita F-kaasuja voimakkaampi. Tästä johtuen siitä aiheutuvat päästöt ovat kokonaisuus huomioiden merkittävästi ilmakehää kuormittavia ja kasvihuoneilmiötä edistäviä. (Ympäristöministeriö 2022b.)



KUVIO 2. F-kaasupäästöjen jakautuminen vuonna 2021 (Ympäristöministeriö 2022b).

Fluoratuista kasvihuonekaasuista voimakkain tunnettu kaasu on siis rikkiheksafluoridi. Rikkiheksafluoridin GWP-arvo eli lämmityspotentiaali on 22800, kun tarkastelujakson pituutena on 100 vuotta. GWP-arvo on suhdeluku, joka kuvaa kulloinkin kyseessä olevan aineen kykyä lämmittää ilmastoa verrattuna hiilidioksidiin ( $\text{CO}_2$ ). Hiilidioksidin GWP-arvo on yksi. GWP-arvot on määritelty vertaamalla niiden yhden kilogramman päästön aiheuttamaa säteilypakotetta maan pinnalla ( $\text{W/m}^2$ ) hiilidioksidin vastaavaan säteilypakotteeseen. Liitteessä 1 on esitettynä

luettelo fluoratuista kasvihuonekaasuista ja niiden GWP-arvot. Toinen F-kaasuihin oleellisesti liittyvä yksikkö on hiilidioksidiekvivalenttitonni (t CO<sub>2</sub>-ekv.). Tällä tarkoitetaan kasvihuonekaasun määrää tonneina ilmaistuna kaavan 1 avulla

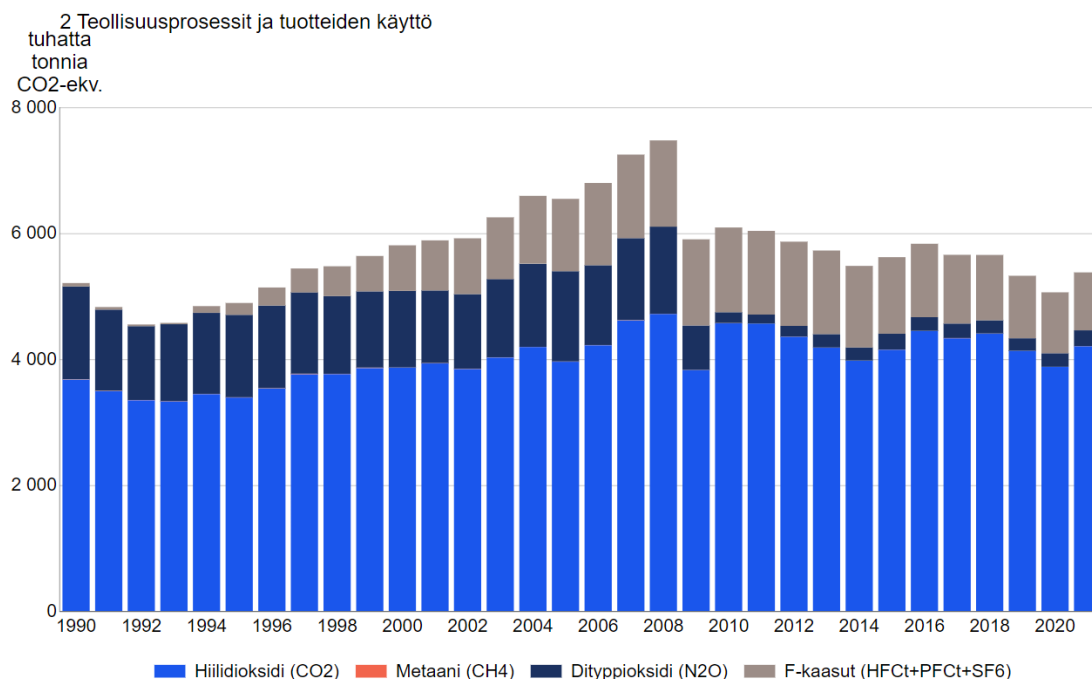
$$t \text{ F-kaasu} * \text{GWP} = t \text{ CO}_2 - \text{ekv.} \quad (1)$$

Kaavassa 1, t F-kaasu on kaasun massa tonneina ja GWP kaasun suhdeluku. (Tulli 2021; Tilastokeskus 2022; Ympäristöministeriö 2022b.)

### 5.1.1 Rikkiheksafluoridin (SF<sub>6</sub>) ympäristövaikutus

Rikkiheksafluoridin sekoittuminen ilmaan johtumalla tai diffuusion kautta on hidas tapahtuma, mutta niiden sekoituttua sitä ei kyetä enää erottamaan. Rikkiheksafluoridin myrkyttömyyden takia sen ei ole todettu vaikuttavan akuutisti eikä pitkäaikaisesti ympäristöön ja eliöihin sillä ne eivät liukene veteen kovinkaan helposti. Edellä mainitun takia myöskään pohja- tai pintavedet eikä maaperä vaarannu SF<sub>6</sub>-kaasusta. SF<sub>6</sub>-kaasu ei myöskään vaikuta stratosfääriseen otsonikatoon, sillä seoksessa ei esiinny klooria eikä myöskään bromia. (SESKO ry 2018, 11–14.)

SF<sub>6</sub>-kaasun vuotaminen laitteistoissa on hyvin vähäistä suhteessa määrään, kuinka paljon sitä kokonaisuudessaan on sähköasemilla ja laitteistoissa. Kojeistojen osastoiduista rakenteista johtuen kaasuvuodot ovat tyypillisesti hyvin paikallisia. Esimerkiksi Tilastokeskuksen pikaennakkotietojen mukaan F-kaasujen päästöt muodostavat Suomessa teollisuusprosessien ja tuotteiden käytöstä syntyvistä päästöistä lähes viisi prosenttia ja tästä rikkiheksafluoridin osuus on noin 0,1 prosenttia. Tätä ilmiötä on selvennetty kuvion 3 avulla, jossa nähdään F-kaasujen suuresti kasvanut osuus 1990-luvun puolivälistä lähtien. (SESKO ry 2018, 11–14; Tilastokeskus 2022; Ympäristöministeriö 2022a, 48.)



KUVIO 3. Teollisuusprosessien ja tuotteiden käytön kasvihuonekaasupäästöt Suomessa (Tilastokeskus 2022).

## 5.2 Euroopan unionin F-kaasuasetus

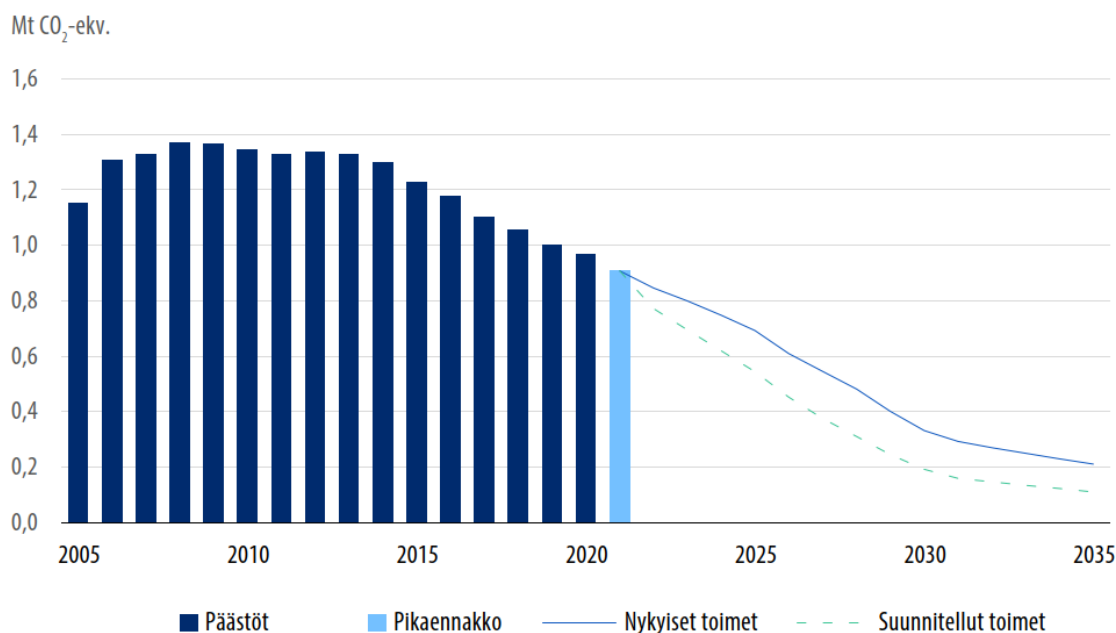
Euroopan unionin kasvihuonekaasu päästöjä on EU:n ilmastolain (EU) N:o 1119/2021 mukaan vähennettävä 55 prosentilla vuoteen 2030 mennessä sekä lisäksi ilmastoneutraaliuus on saavutettava viimeistään vuoteen 2050 mennessä. Voimassa olevalla F-kaasuasetuksella (EU) N:o 517/2014 on pyritty vaikuttamaan voimakkaasti kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen ja siinä on onnistuttu. Vuonna 2014 voimaan astunut asetus sekä siinä määritetyt ja määrätyt toimenpiteet ovat jäämässä riittämättömiksi vuosikymmenen lopussa. Otsonikerrosta heikentäviä aineita säätelee kansainvälinen ympäristösopimus, niin kutsuttu Montrealin pöytäkirja. Kyseisellä pöytäkirjalla on määritelty sitova sopimus HFC-yhdisteiden tuotannon ja kulutuksen vähentämisaikataulusta. Montrealin pöytäkirjassa HFC-yhdisteitä koskevat rajoitukset on toimeenpanttu F-kaasuasetuksella. F-kaasuasetuksen muutospainetta syntyy siitä, että vuoden 2030 jälkeen asetus ei täytä Montrealin pöytäkirjassa määriteltyjä kansainvälisiä vaatimuksia. (Ympäristöministeriö 2022a.)

Euroopan parlamentin ja neuvoston toimesta on laadittu asetusehdotus, jolla kumottaisiin nykyinen F-kaasuja säätelevä asetus (EU) N:o 517/2014. Asetusehdotusta laatiessaan Euroopan komissio on suorittanut laaja-alaisen sidosryhmien kuulemisen. Yksittäiset vastaukset sekä niistä koottu yhteenveto on kaikkien luettavissa komission verkkosivuilla. Yleisesti sidosryhmien mielestä nykyinen F-kaasuasetus on ollut toimiva, mutta sitä tulisi kuitenkin päivittää ja lisäksi EU-tason toimintaa pidetään välttämättömänä eli jäsenvaltiotason toimintaa ei siis koeta riittäväksi. Asetusehdotusta varten komissio on myös suorittanut vaikutusten arviointia, jossa vertaillaan kolmea vaihtoehtoista toimintatapaa. Näissä vaihtoehtoisissa on tarkasteltu tuloksellisuutta, jolla tavoitteet saavutettaisiin. (Euroopan komissio 2022.)

Komissio toteaa vaikutusten arvioinnin lopputulemana yhden vaihtoehtoista parhaaksi ja, että sillä saavutetaan kaikista kolmesta vaihtoehdosta tarkoituksenmukaisin kustannushyötysuhde. Tässä toteutustavassa suoritettaisiin toimenpiteitä päästövähennyksien ja paremman täytöntöönpanon saavuttamiseksi. Komissio tavoittelee tällä ratkaisulla, että toimialojen ei tarvitsisi maksaa päästöjen vähentämisen alakohtaisia marginaalikustannuksia enempää. Marginaalikustannuksilla tarkoitetaan kustannuksia, jotka odotetaan syntyvän koko taloudelle hiilineutraaliuus tavoitteeseen pääsemisestä vuoteen 2050 mennessä. Vuoteen 2030 mennessä tällä asetusehdotuksella odotetaan saavan lisävähennyksiä EU-tasolla kumulatiivisena määränä 40 Mt CO<sub>2</sub>-evk. Edellä mainittu määrä lisävähennystä on siis nykyisellä asetuksella arvioidun 430 Mt CO<sub>2</sub>-evk lisäksi saavutettava vähennys. Komissio arvioi, että vuoteen 2050 mennessä saavutetaan päästöjen lisävähennyksiä noin 310 Mt CO<sub>2</sub>-evk. (Euroopan komissio 2022.)

Suomen yhteenlasketut kokonaispäästöt vuonna 2021 oli 47,7 Mt CO<sub>2</sub>-ekv. Viitenä edellisvuotena päästövähennystahti on Suomessa ollut keskimäärin 4 prosenttia. F-kaasupäästöjen osuus vuonna 2021 oli pikaennakkotietojen mukaan 0,9 Mt CO<sub>2</sub>-ekv, joka tarkoittaa F-kaasupäästöjen vähentyneen vuodesta 2008 lähes 30 prosenttia. Tästäkin huolimatta F-kaasupäästöt ovat 20 prosenttia korkeammat kuin 1990-luvulla. Kuviolla 4 on esitetty F-kaasupäästöjen kehitystä Suomessa vuodesta 2005 alkaen. Kuvaajassa vuoden 2021 päästömäärä on vielä arvio, sillä vahvistetut tiedot saadaan vasta alkukesästä 2023. Kuvaajaan

on mallinnettu nykyisillä asetuksen (EU) N:o 517/2014 mukaisilla toimilla saavutettava päästövähennys vuoteen 2035 mennessä ja sitä kuvaava käyrä. Kuvaajassa on katkoviivalla merkitty uuden ehdotuksen mukaisten toimien vaikutus päästöjen määrään. Uuden asetusehdotuksen mukaisilla toimilla saavutettaisiin siis huomattavasti nopeampia päästövähennyksiä vuoteen 2035 mennessä ja mahdollistettaisiin Suomen pysyminen EU:n asettamassa päästövähennysaika-  
taulussa. (Ympäristöministeriö 2022b.)



KUVIO 4. Kuvaaja F-kaasupäästöistä vuosina 2005–2021 ja arvio nykytoimilla sekä suunnitelluilla toimilla saavutettavasta päästöjen kehityksestä (Ympäristöministeriö 2022b).

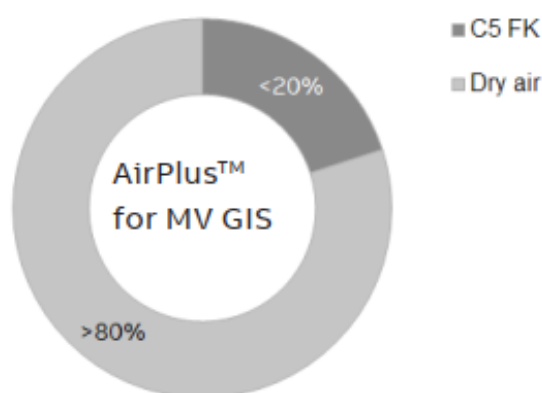
Uusi asetus on voimaan astuessaan kaikkia jäsenvaltioita velvoittava. Asetuksen ja siinä määriteltyjen toimenpiteiden ja rajoitusten voimaantulomiseksi ei siis tarvita jäsenvaltioissa erillisiä lakitarkasteluja, valtionjohdon päätöstä tai muita valtionjohdollisia toimenpiteitä. Tästä syystä laitevalmistajat ovat jo varautuneet tulevaan kehittämällä laitteistoja ympäristöystävällisempään suuntaan, vaikkakin sähkölaitteistojen osuus kokonais f-kaasupäästöistä on pieni verrattuna kylmä- ja jäähdytyslaitteistoissa käytettäviin HFC-yhdisteisiin.

## 6 KORVAAVIA TEKNOLOGIOITA SF<sub>6</sub>-KAASUN KORVAAMISEKSI

### 6.1 ABB

ABB:lla on kahta eri eristysteknologiaa SF<sub>6</sub>-kaasun korvaajiksi. Kuiva ilma on kojeistojen eristeaineena primääri- sekä sekundäärijakelussa 12 kV asti. Nämä kojeistomallit ovat nimeltään PrimeGear ZX0 (primääri kojeisto) sekä SafeRing Air ja SafePlus Air (sekundääri kojeistoja). 24 kV ja 36 kV nimellisjännitteillä ABB käyttää kuivan ilman ja fluoriketonin (C5) yhdistelmää SF<sub>6</sub>-kaasun korvaajana. Primäärijakelun 24 kV kojeistona on PrimeGear ZX0 moduulikojeisto ja sen lisäksi primäärijakeluun on ZX2 AirPlus kojeisto, joka on nimellisjännitteeltään 36 kV kojeisto. Sekundäärijakeluun on RMU-kojeisto, joka kulkee nimellä SafeRing AirPlus sekä moduulikojeisto SafePlus AirPlus.

ABB:n käyttämä AirPlus eristyskaasuseos on yli 80 prosenttisesti ilmaa ja loput vajaan 20 prosenttia koostuu fluoriketonista. Fluoriketonin GWP-luku on yksi ja AirPlus kaasuseoksen GWP-luku on alle yksi, sillä se koostuu suurimmalta osin ilmasta. Kaasuseoksella ei ole otsonikerrosta tuhoavaa vaikutusta ja lisäksi sen avulla AirPlus kojeistoissa on pystytty säilyttämään sama fyysinen koko kuin SF<sub>6</sub>-eristeisissä kojeistoissa. Kuvassa 6 on selvitetty AirPlus eristeaineen rakenteen koostumusta. (ABB 2018b; Becker 2019.)



KUVA 6. ABB AirPlus eristeaineen rakenne (ABB 2018b).



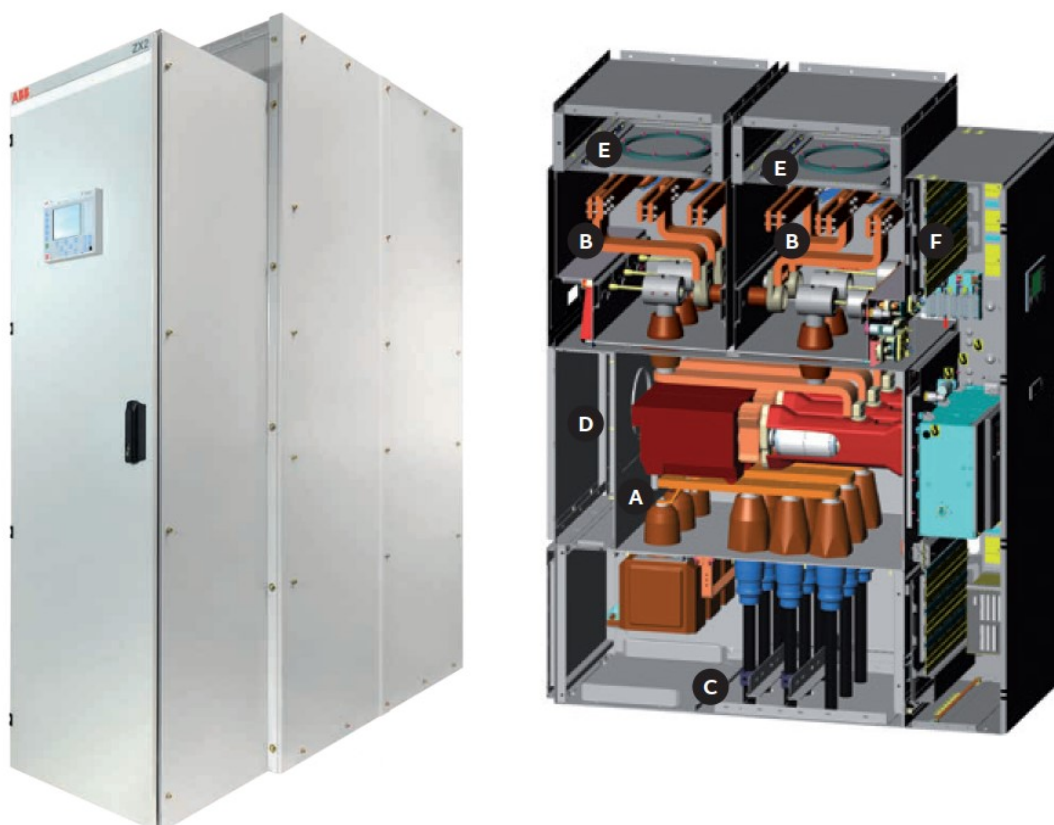
### 6.1.1 Primäärikojeistot – ABB

24 kV PrimeGear ZX0 kojeisto (kuva 7) on tarkoitettu primäärijakeluun ja siinä hyödynnetään AirPlus kaasua eristeaineena SF<sub>6</sub>-kaasun sijaan. Kojeistossa hyödynnetään tyhjiökatkaisija teknologiaa. Kojeisto on moduulirakenteinen ja moduuleita on leveydeltään kolmea eri kokoa (450 mm, 600 mm ja 900 mm). Moduulien koko määräytyy nimellisvirtojen perusteella, nimellisvirtoja ovat: 800 A, 1250 A, 2000 A ja 2500 A. Kojeistolle on määritelty ympäröivän ilman osalta normaaliksi käyttölämpötilaksi -5 °C – (+40 °C). Haluttaessa korkeampaa lämpötilaa tulee sitä pyytää erikseen, mutta tietoa siitä kuinka paljon korkeampiin lämpötiloihin kojeistoa on mahdollista tyypittää ei kerrota. Myös asennuskorkeudesta suhteessa merenpinnan tasoon ilmoitetaan vastaavalla tavalla maksimiksi 1000 m, mutta erillisestä pyynnöstä kojeisto voidaan valmistaa vaativampiinkin olosuhteisiin. Tyhjiökatkaisijan ilmoitetaan kestävän 30000 katkaisua nimellisvirralla ja 50 katkaisutapahtumaa nimellisellä oikosulkuvirralla. Fyysisiltä mitoiltaan kojeisto on samankokoinen kuin vastaava SF<sub>6</sub>-eristeinen kojeisto. (ABB 2022a.)



KUVA 7. ABB PrimeGear ZX0 KJ-kojeisto (ABB 2022a).

ZX2 AirPlus kojeisto on toinen primääri kojeistotyyppi, jossa käytetään ABB:n uutta AirPlus kaasuseosta. Tätä kojeistotyyppiä on saatavana 12 kV, 24 kV sekä 36 kV nimellisjännitteellä. Myös tässä kojeisto tyypissä käytetään tyhjiökatkaisijaa, jolle ilmoitetaan käyttöäksi nimellisvirralla 20000–30000 katkaisua ja suurimmalla sallitulla oikosulkuvirralla 50 toimintakertaa. Katkaisukertojen määrä vaihtelee hieman valitun tyhjiökatkaisija tyypin ominaisuuksien mukaan. Moduulien fyysinen leveys on 600 mm, 800 mm tai 840 mm riippuen mitä toimintoja kyseiseen moduuliin on suunniteltu. Yksittäisen moduulin käyttöäksi on luvattu yli 40 vuotta. Kojeeistoa on saatavissa nimellisvirraltaan aina 2000 A asti ja nimellinen oikosulkuvirta aina 31,5 kA asti. Kuvassa 8 on nähtävissä kaksikiskojärjestelmällisen kojeiston rakenne. Kaasulla täytettyjä tiloja ovat katkaisijatila (A) sekä virtakiskotilat (B). Jokainen tila on yksittäinen erillinen kokonaisuus. Muita kuvassa merkittyjä osia ovat kaapelitila (C), kaapeli- ja katkaisija tilan valokaaripaineen poistokammio (D), virtakiskotilan valokaaripaineen poistokammio (E) ja pienjännitetila (F). (ABB 2020.)



KUVA 8. ABB ZX2 AirPlus KJ-kojeiston moduuli (ABB 2020).

### 6.1.2 Sekundäärikojeistot – ABB

SafeRing AirPlus on RMU-kojeisto sekundäärijakeluun (kuva 9). Kojeistosta 12 kV nimellisjännitteisessä versiossa eristeaineena on ilma ja 24 kV kojeistossa eristeaineena on AirPlus kaasuseos. Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan 24 kV kojeistoa, sillä kyseinen jännitetaso on Suomessa tyypillisempi. Kojeiston nimellisvirta on 630 A ja nimellinen oikosulkuvirta on 16 kA. Kojeiston fyysinen korkeus on ilman pienjännitetilaa 1336–2002 millimetriä riippuen valitusta moduulista. Pienjännitetilaa on saatavissa 470 mm ja 700 mm korkuisena moduulina, jotka siis lisäävät kojeiston kokonaiskorkeutta. (ABB 2022c.)



KUVA 9. ABB SafeRing AirPlus 24 kV RMU-kojeisto (ABB 2022c).

SafePlus AirPlus eroaa edellä mainitusta SafeRing kojeistosta siten, että sen modulaarisen ja kompaktin kokonsa vuoksi siitä pystytään rakentamaan useita räätälöityjä kokoonpanoja kunkin kohteen tarpeiden mukaan. Kojeisto kasataan haluttuun kokoonpanoonsa vasta asennuskohteessa. Ulkoisesti nämä kaksi kojeistoa näyttävät samalta, toki kohteen mukaan räätälöinti tuo yksilöllisen ulkonäön ja fyysiset mitat. (ABB 2022c.)

## 6.2 Schneider Electric

Schneider Electric on tuonut SF<sub>6</sub>-eristeisten KJ-kojeistojen korvaajiksi AirSeT nimisen tuoteperheen, johon kuuluu kolme erityyppistä keskijännitekojeisto mallia (liite 2). Nämä kojeistotyyppit kulkevat nimillä SM AirSeT, RM AirSeT ja GM AirSeT (liite kaksi). Kojestot ovat ilmaeristeisiä kuten nimistä voi päätellä ja niissä on katkaisijatekniikkana hyödynnetty tyhjiökatkaisijoita. Jälkimmäisenä mainittu GM AirSeT kojeisto on primääripuolelle kehitetty moduulikojeisto, mutta sitä ei ole vielä julkaistu myyntiin. Tarkempi aikataulu julkaisun suhteen ei ole tätä työtä tehdessä tiedossa.

### 6.2.1 Sekundäärikojeistot – Schneider Electric

SM AirSeT on moduulikojeisto verkon sekundääripuolelle. Kojestoa on saatavilla neljällä eri nimellisjännitteellä (7,2 kV, 12 kV, 17,5 kV ja 24 kV). Nimellisvirraltaan kojeistosta on vaihtoehtoina 400 A, 630 A ja 1250 A. Nimellinen oikosulkuvirta on 24kV kojeistolla 20 kA. Kojeston käyttölämpötila on ympäröivän ilman osalta -25 °C – (+40 °C). Kojeston ilmoitetaan toimivan aina 3000 m korkeuteen merenpinnasta. SM AirSeT kojeistot on tarkoitettu asennettavaksi sisätiloihin. Kojeston fyysiset mitat määrittyvät aina tapauskohtaisesti valittujen toimintojen perusteella, sillä niiden mukaan määräytyy yksittäisten moduulien mitat. Leveydeltään kojeisto voi olla 375 mm ja 1500 välillä, syvyydeltään 340 mm ja 1400 mm välillä sekä korkeudeltaan 1600 millimetristä 2250 millimetriin. Kojestoon on saatavilla tai tulee myöhemmin saatavaksi yhteensä 24 eri moduulia erityyppisillä toiminoilla. Edeltäjänsä eli SM6 tuoteperheeseen (SF<sub>6</sub>-eristeinen KJ-kojeisto) verraten Schneider on saanut kojeiston fyysiset mitat pidettyä yhtä kompaktissa koossa, näin ollen tulevaisuudessa nykyisten kojeistojen korvaamisessa ei tule tilanpuutteesta johtuvia hankaluuksia. Kuvassa 10 on havainnollistettu miltä uusi SM AirSeT kojeisto perusperiaatteeltaan näyttää. (Schneider Electric 2023.)



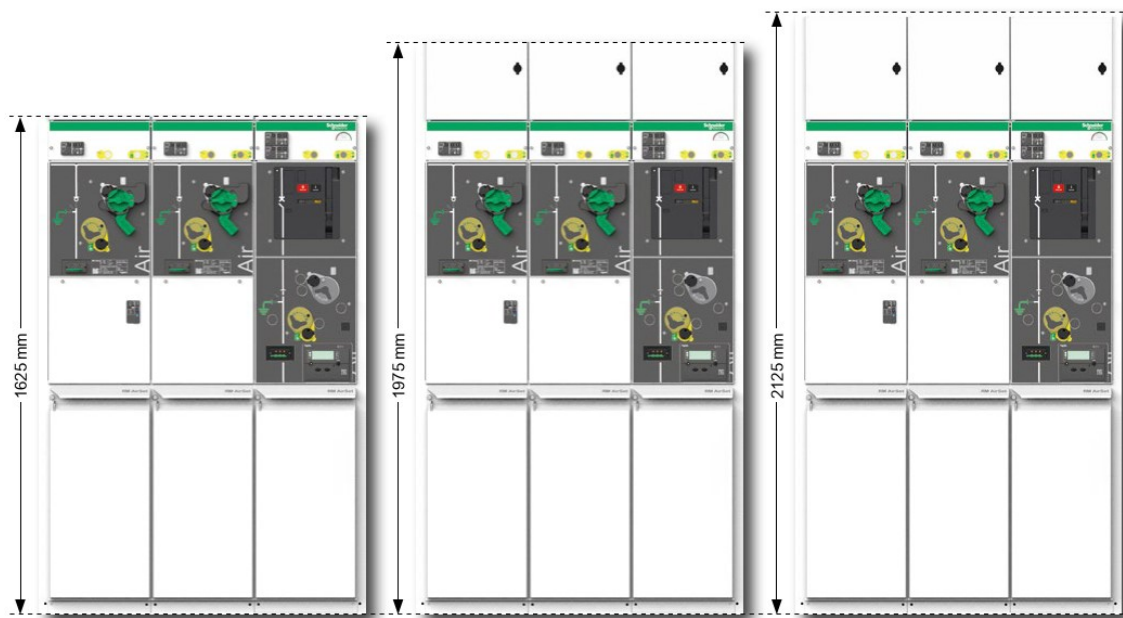
KUVA 10. SM AirSeT KJ-moduulikojeisto yhden tyyppisellä kokoonpanolla (Schneider Electric 2023).

### 6.2.2 RMU-Sekundäärikojeistot – Schneider Electric

RM AirSeT keskijännitekojeisto on Schneiderin uusi RMU-kojeisto malli, jossa hyödynnetään puhdistettua ilmaa sekä tyhjiökatkaisija tekniikkaa. Kojekoisto on tarkoitettu sisätiloihin asennettavaksi. Käyttölämpötila on  $-25\text{ °C}$  ja  $40\text{ °C}$  välillä. Nimellisjännitteeltään kojeistoa on saatavissa 12 kV ja 24 kV jännitteillä. Nimellisvirraltaan kojeistot ovat 630 A ja nimellinen oikosulkuvirta on 20 kA. RM AirSeT kojeistot on varusteltu kolmiasentokytkimellä, jossa katkaisu tapahtuu tyhjiössä. Käyttöikä kojeistolle luvataan 40 vuotta normaaleissa käyttöolosuhteissa. (Schneider Electric 2021a.)

Kojeiston mitat korkeussuunnassa määräytyvät pienjännitetilan korkeuden mukaan. Kuvassa 11 vasemmalla on esitetty ratkaisu, jossa ei ole laajennettua pien-

jännitetilaa. Keskellä kuvassa puolestaan on 350 mm korkea laajennus pienjännitetilalle, jolloin kojeistoon on mahdollista asentaa suojaus sekä mittauslaitteita. Kolmannessa vaihtoehdossa pienjännitetilän korkeus on 500 mm. (Schneider Electric 2021a.)



KUVA 11. RM AirSeT KJ-kojeisto erikokoisilla pienjännitetilailloilla (Schneider Electric 2021a).

Kojeiston mittoja verrattaessa vastaavaan SF<sub>6</sub>-eristeiseen Schneiderin RMU-kojeistoon (RM6), voidaan todeta ilmaeristeisen kojeiston olevan korkeudeltaan kaasueristeistä kojeistoa suurempi. Korkeuden lisäksi myös ilmaeristeisen kojeiston paino voi olla kenttien määrästä riippuen jopa 200 kg suurempi, kuin SF<sub>6</sub>-kaasulla eristetyn kojeiston. Korkeudessa eroa on noin 500 mm kun verrataan ilmaeristeisen kojeiston standardikokoista eli ilman laajennettua pienjännitetilaa olevaa kojeistoa RM6-tyypin kaasueristeisen RMU-kojeiston korkeuteen. Uuden RM AirSeT KJ-kojeiston mittatietoja on esitetty tarkemmin liitteessä 3. (Schneider Electric 2021a; Schneider Electric 2021b.)

### 6.3 Siemens

Siemens on kehittänyt keskijännitekojeistojaan F-kaasuvapaisiin ratkaisuihin konseptilla, joka kantaa nimeä blue GIS. Uudet keskijännitekojeistot on suunniteltu käyttämään eristeaineena puhdasta ilmaa, jonka myötä eristeaineen haitallisuus ympäristölle poistuu kokonaan. Katkaisijateknologiana uusissa kojeistoissa Siemens hyödyntää tyhjiökatkaisija tekniikkaa SF<sub>6</sub>-katkaisijoiden sijasta. Siemens on tuonut jo markkinoille 12kV jännitteelle blue GIS kojeistot, 24kV kojeistojen portfolio valmistuu markkinoille vuosien 2023–2025 aikana ja 33kV kojeistojen markkinoille tulemiselle ei vielä ole tarkempaa aikataulua.

Siemensin blue GIS tuotevalikoimaan kuuluu nykyisin jo markkinoilla olevat 12kV kojeistot (8DAB 12) ja (8DJH 12), näistä ensimmäisenä mainittu on modulaarinen katkaisijakojeisto ja jälkimmäinen rengassyöttökojeisto eli RMU-kojeisto. Suomessa 12kV kojeistoja käytetään jonkin verran teollisuudessa ja muutamissa jakeluverkkoyhtiöissä, mutta yleisemmin Suomessa käyttötarve on jakeluverkon rakenteesta johtuen 24kV jännitteellä. 24kV blue GIS kojeistoina Siemens on tuomassa markkinoille primääripuolen kojeistona NCPLUS C 24 mallin ja puolestaan RMU-kojeiston tuotenimenä on 8DJH 24. Aikanaan markkinoille tullessaan 33kV kojeistojen tuoteniminä on 8DAB 40 ja 8DJH 40. Kuvassa 12 on esiteltynä havainnollistava kuva tuoteperheestä ja liitteessä 4 on tuoteperheen teknisiä tietoja.



KUVA 12. Siemens blue GIS tuoteperhe (Siemens AG 2022b).

### 6.3.1 Sekundäärikojeistot – Siemens

8DAB 12 tyyppin blue GIS keskijännitekojeistosta on olemassa 7,2 kV sekä 12 kV nimellisjännitteellä olevat vaihtoehdot. Kojeistotyyppiä on mahdollista saada yksikisko- sekä kaksikiskojärjestelmällä. Nimellisvirraltaan kojeistoa saa neljässä eri portaassa 1250 A:sta aina 2750 A asti molemmilla edellä mainituilla nimellisjännitteillä. Oikosulkuvirtakestoisuus kojeistoilla on 40 kA. Kojeistolle on käyttölämpötilaksi ympäröivän ilman osalta vakiona määritelty  $-5^{\circ}\text{C}$ – $(+55^{\circ}\text{C})$ , mutta sitä on mahdollista saada myös  $-25^{\circ}\text{C}$ – $(+55^{\circ}\text{C})$  käyttölämpötiloihin. Normaaleissa käyttöolosuhteissa laitteiston käyttöiäksi on luvattu vähintään 35 vuotta. (Siemens AG 2022a.)

Poikkileikkauksen avulla on kuvassa 13 esitetty 8DAB 12 keskijännitekojeiston rakenteen pääkohdat numeroituna. Kuvassa esitettyjen mittaviivojen yksikkö on millimetri. Kuvan kojeisto on yksikiskojärjestelmällä varustettu ja mitat ovat sitä vastaavat. Syvyysuunnassa kaksikiskojärjestelmällä varustettu kojeisto kasvaa 1625 mm aina 2665 mm asti. Virtakiskot (1) kulkevat eristetyissä tiloissaan ja eristeaineena on puhdistettu ilma, joka on korvannut Siemensin aiemmin vastavissa kojeistoissa käyttämän  $\text{SF}_6$ -kaasun. Tyhjiökatkaisija sijaitsee numerolla kaksi merkityssä kohdassa oven takana. Tyhjiökatkaisijalle on määritetty käyttöiäksi nimellisvirralla 10000 toimintakertaa ja nimellisellä oikosulkuvirralla 50 katkaisutapahtumaa. Kojeiston alaosassa KJ-kaapeleiden liitäntäpiste (3) sekä jännitemuuntaja (5) ja virtamuuntaja (6). Pienjännitetila (4) voi kalustuksesta riippuen olla korkeussuunnassa 850 mm tai 1200 mm. Kolmiasentokytkimen (7) sijainti oven takana.

Kolmiasentokytkin voidaan rakentaa mekaanisesti sekä sähköisesti käytettäväksi. Numeroilla kahdeksan ja yhdeksän on kuvassa merkitty sisäinen ja ulkoinen suojaus. Kojeiston sisäosan rakenteet ovat hermeettisesti suojattuja ja korroosiota kestävästä alumiiniseoksesta valmistettuja. Ulkoapäin kojeisto on suojattu siten, että osastojen avaus tapahtuu työkaluilla, jolloin epähuomiossa tapahtuvat kojeiston osien avaamiset on estetty. (Siemens AG 2022a.)





KUVA 13. Leikkauskuva Siemens 8DAB 12 KJ-kojeistosta (Siemens AG 2022a).

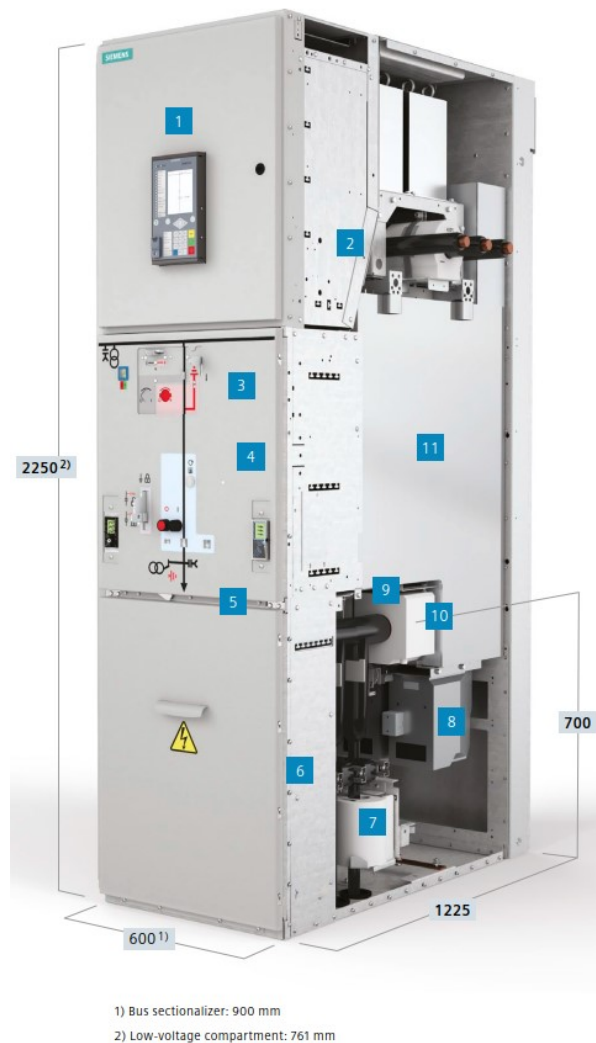
NXPLUS C 24 blue GIS keskijännitekojeistosta on markkinoilla tai tulossa markkinoille viisi eri jännitetasoa 7,2 kV:sta aina 24 kV asti. Näistä tärkeimpänä 12 kV ja 24 kV kojeistot, joista jälkimmäinen julkaistaan myyntiin vuosien 2023–2025 aikana. Tämä kojeistotyyppi on yksikiskojärjestelmällinen primääripuolen KJ-kojeisto. Nimellisvirraltaan 24 kV kojeisto on 2500 A ja nimellinen oikosulkuvirtakes-  
toisuus on 25 kA. Ympäröivän ilman osalta käyttölämpötilaksi sekä kojeiston käyttöäksi on määritetty samat lukuarvot kuten edellä mainitulla 8DAB 12 tyy-  
pin kojeistolla. (Siemens AG 2021c.)

Kojeistotyyppistä valmistetaan kolmea erilaista moduulia, joissa on kojeiston eri toiminnot. Kojeiston katkaisija- ja erotinkenttä ovat leveydeltään 600 mm, pitkit-  
täiskatkaisijakenttä on leveydeltään 900 mm ja kaikki kentät ovat syvyydeltään 1225 mm sekä korkeudeltaan 2250 mm. Mikäli kojeistoon halutaan korkeampi

vaihtoehto pienjännitetilasta, niin kojeiston korkeus on tällöin 2650 mm. Yhden 600 mm levyisen kojeistomoduulin painoksi ilmoitetaan noin 800 kg ja vastaavasti 900 mm levyiselle noin 1400 kg. (Siemens AG 2021c; Siemens AG. 2022b.)

Vastaavaan SF<sub>6</sub>-eristeiseen kojeistoon nähden painon ja fyysisten mittojen osalta blue GIS ratkaisu on lähes samanlainen. Yksittäinen eroavaisuus on siinä, että blue GIS mallissa ei ole vaihtoehtona 450 mm leveydeltään olevaa moduulia, vaan pienin on edellä mainittu 600 mm.

NXPLUS C 24 keskijännitekojeiston rakennetta on havainnollistettu poikkileikkauksen avulla kuvassa 14. Pienjännitetilalla (1) on saatavissa kahdessa eri korkeudessa, jotka ovat 761 mm ja 1161 mm. Virtakiskot (2) ovat yksittäin suojatut profiililtaan pyöreät ja eristetty silikonikumilla. Kolmiasentokytkin (3) sijaitsee oven takana ja sen alapuolella on tyhjiökatkaisija (4). Numerolla viisi on merkitty kojeiston etuosassa olevat oikosulkuilmaisimet ja maasulkutunnistin. Kaapelitila (6) on korkeudeltaan 700 mm ja syvyydeltään 590 mm. Yhtä vaihetta kohden on mahdollista kytkeä neljä kaapelia. Kaapelitilassa on lukitukset, jotta tilan oven avaus on mahdollista vain, kun kojeisto on erotettu ja maadoitettu. Virtamuuntajat (7) ja jännitemuuntajat (8) sijaitsevat kojeiston alaosassa. Jännite- ja virtasensorit (9) sekä integroidut jännite, virta ja lämpötilamittaukset (10) sijaitsevat jännitemuuntajan yläpuolella. Kojisto on osastoitu ja hermeettisesti suojattu ruostumatomalla teräsrakenteella (11). (Siemens AG 2021c.)



KUVA 14. Leikkauskuva Siemens NXPLUS C 24 KJ-kojeistosta (Siemens AG 2021c).

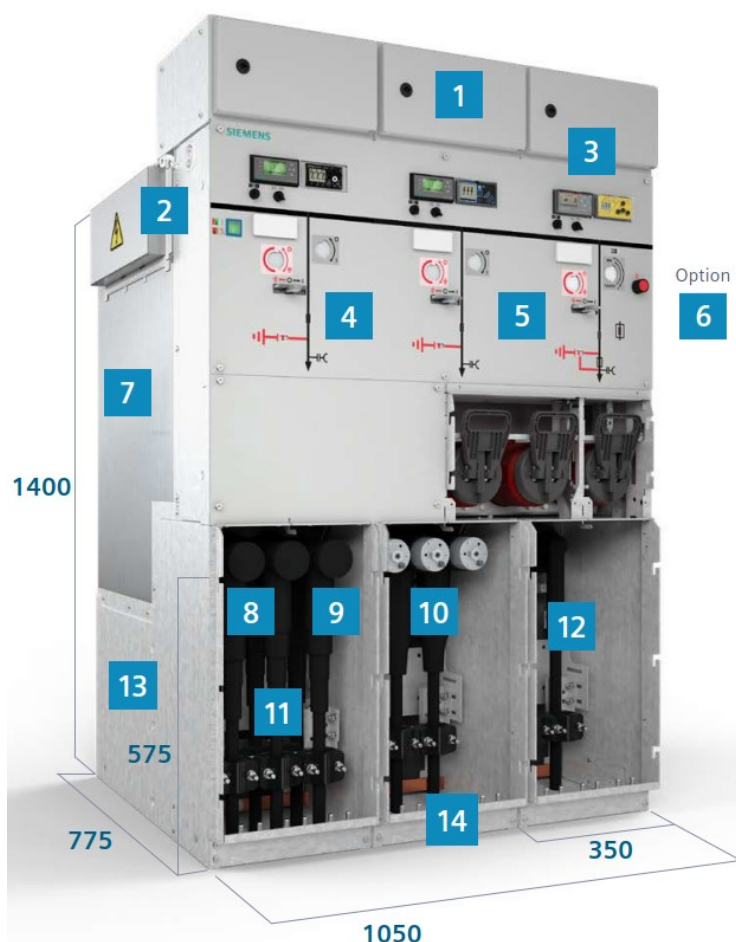
### 6.3.2 RMU-Sekundäärikojeistot – Siemens

Tässä luvussa esiteltävät blue GIS kojeistot ovat RMU-kojeistoja. 8DJH 12 kojeistosta on nimellisjännitteeltään 7,2 kV ja 12 kV vaihtoehdot. Kojisto on toiminnallisuuksiltaan ja komponenteiltaan saman kaltainen kuin 8DJH 24 kojeisto, jonka vuoksi keskitytään tässä työssä tarkemmin Suomessa yleisimmin käytettyyn jännitteeseen eli 20 kV. 8DJH 24 on siis RMU-kojeisto, josta on blue GIS konseptissa 15 kV, 17,5 kV ja 24 kV nimellisjännitteeltään olevat vaihtoehdot. Nimellisvirraltaan kojeisto on 630 A ja sen nimellinen oikosulkuvirtakestoisuus on 21 kA. Kojiston korkeus ilman pienjännitetilaa on 1400 mm, pienjännitetilan

kanssa kojeiston korkeuteen tulee 200 millimetristä 600 millimetriin lisää korkeutta riippuen minkä kokoinen pienjännitetila kojeistoon on valittu kolmesta saatavilla olevasta vaihtoehdosta (200 mm, 400 mm ja 600 mm). Syvyys suunnassa kojeisto on 775 mm leveä ilman valokaaripaineen purkauskanavaa ja purkauskanavan kanssa kojeisto kasvaa syvyys suunnassa 890 millimetriin. Kojeston fyysisiä mittoja verrattaessa vastaavaan Siemensin SF<sub>6</sub>-kaasueristeiseen kojeistoon voidaan niiden todeta olevan täysin samat. SF<sub>6</sub>-kaasun käyttöä on tukenut yhtenä ominaisuutena mahdollisuus kompaktiin rakenteeseen, mutta tässä Siemens on onnistunut tekemään myös RMU-kojeiston blue GIS versiosta kompaktin. (Siemens AG 2021b; Siemens AG 2022e.)

Fyysisten mittojen pysyminen ennallaan on hyvä asia, kun kojeistoja vaihdetaan ajansaatossa nykyisten SF<sub>6</sub>-eristeisten tilalle. Ilmaeristeiset kojeistot ovat tyypillisesti olleet fyysisesti isompia, jolloin niiden sovittaminen suoraan SF<sub>6</sub>-eristeisen kojeiston tilalle on haasteellista tilanpuutteen vuoksi.

8DJH 24 tyypin RMU-kojeiston rakennetta on havainnollistettu kuvassa 15. Pienjännitetilat (1) ovat kojeiston yläreunassa ja kuten aiemmin on mainittu, pienjännitetiloista on saatavissa kolmea eri korkuista moduulia. Kojisto on mahdollista tilata rakenteeltaan sellaisena, että virtakiskojen jatkaminen ja kojeiston kasvataminen lisäämällä moduuleja on mahdollista tehdä ilman eristettyjen rakenteiden avaamista (2). Numerolla kolme on merkattu kojeiston indikaattoreiden sijainti, kuten oikosulun ja maasulun näyttö sekä jännitemuuntajien näytöt. Rengassyötökenttä (4), jossa on kolmiasentokytin. Muuntajakenttä (5) ja optiona mahdollista lisätä tyhjiökatkaisijakenttä (6), jossa on kolmiasentoerotin ja siihen liittyvät käyttömekanismit. Galvanoitu teräslevyrakenne (7), joka on hermeettisesti suojattu. Kaapelipäätteet, joissa integroitu virta, jännite ja lämpötilamittaus (8). Virtamittaus (9) yksi- tai kolmivaiheisena ja jännitemittaus (10). Muita kojeiston alaosassa olevia toimintoja ovat virtamuuntajat (11), kaapelitila (12) ja valokaaripaineenpurkaus alaspäin. Numerolla 13 on esitetty huomioitavaksi kaapelitilan syvyyden mitat. Valokaaripaineenpurkaus mahdollista suunnitella myös kojeiston takaosaan johdettuna ylöspäin (14). (Siemens AG 2021b.)

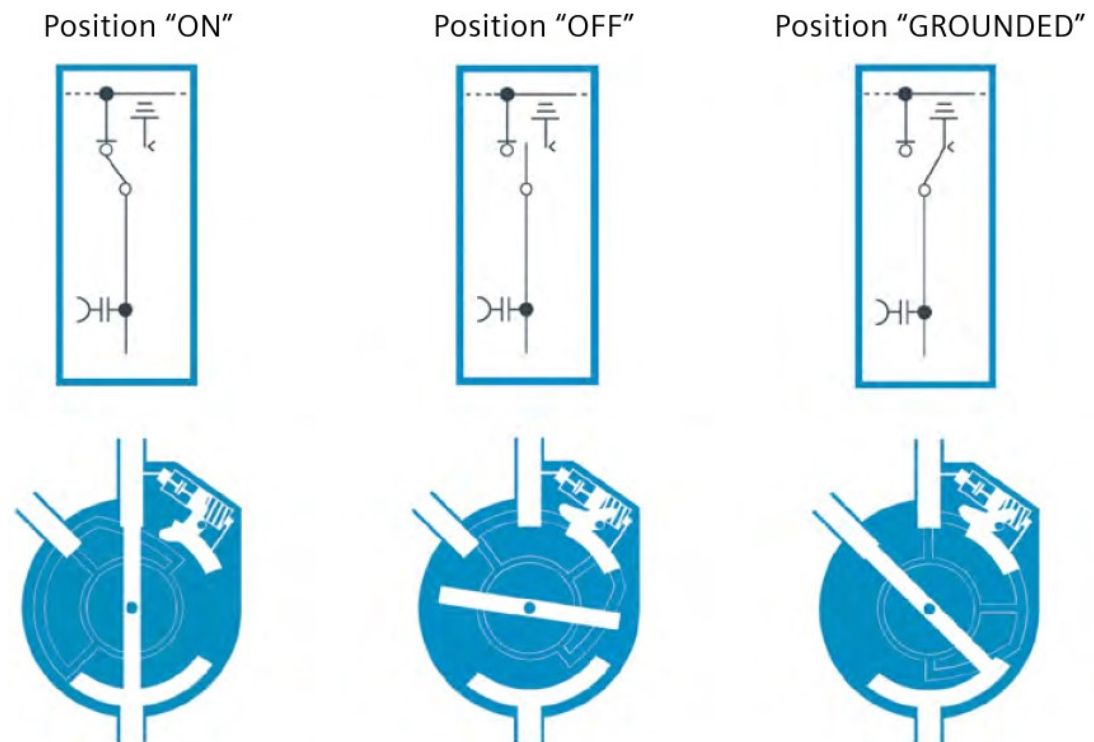


KUVA 15. Havainnekuva 8DJH 24 blue GIS RMU-kojeistosta (Siemens AG 2021b).

### 6.3.3 Kolmiasentokytkin – blue Switch

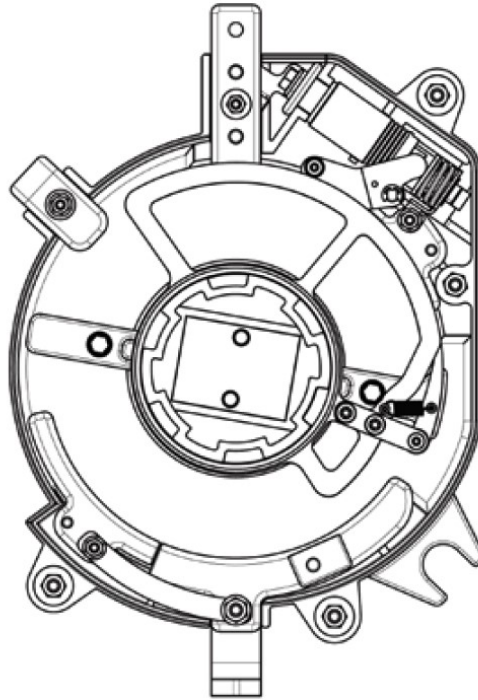
Siemens on jo vuosia pyrkinyt kehittämään kolmiasentokytkintä/-erotinta, joka ei käyttäisi eristeenä ja valokaaren sammutusaineena SF<sub>6</sub>-kaasua. Nyt osana blue GIS konseptia on kehitetty kolmiasentokytkin, joka hyödyntää tyhjiöteknologiaa SF<sub>6</sub>-kaasun sijaan. Kolmiasentokytkimen toimintaperiaatteena on, että kytkintä käännettäessä kiinniasennosta aukiasentoon päävirtareitti katkeaa ja virta ohjautuu toissijaiselle virtatielle. Tällöin virta ohjautuu kulkemaan tyhjiökatkaisijan läpi. Tämän jälkeen kolmiasentokytkimen avausliikkeen jatkuessa ohjauslevy avaa tyhjiökatkaisijan synnyttäen valokaaren tyhjiökatkaisijan kosketinpintojen välille, joka sammuu muutamissa millisekunneissa tyhjiössä. Laitteisto on tämän jälkeen erotettu ja kolmiasentokytkin on "off"-asennossa. Laitteisto saadaan maadoitettua kääntämällä kytkintä edelleen maadoitusasentoon. Kolmiasentokytkintä

käännettäessä takaisin päin kohti aukiasentoa ei tyhjiökatkaisijaan synny valo-  
kaarta kiinni kytkettäessä. Kuvassa 16 on esitetty kolmiasentokytkimen eri tilat.  
(Siemens AG 2022c.)



KUVA 16. Kolmiasentokytkimen asennot (Siemens AG 2022c).

Siemens on testannut ja todennut, että blue switch kolmiasentokytkin on ominaisuuksiltaan sopiva komponentti myös RMU-kojeistojen tarpeisiin. RMU-kojeistoilla katkaisukertoja syntyy tyypillisesti useammin niiden käyttöiän aikana, jolloin kytkinlaitteelta vaaditaan myös pitkäkestoisuutta katkaisukertojen määrässä mitattuna. Kuvassa 17 on esitetty tarkemmin kolmiasentokytkimen rakenne. (Siemens AG 2022c.)



KUVA 17. Rakennekuva Siemens blue switch kolmiasentokytkimestä (Siemens AG 2022c).

## 7 YHTEENVETO JA POHDINTA

Opinnäytetyössä käsiteltiin keskijännitekojeistojen tärkeimpiä komponentteja ja tutkittiin niiden toimintaperiaatteita. Työssä selvitettiin tyypilliset kojeistoratkaisut keskijänniteverkon primääri- ja sekundäärijakelussa sekä näiden kojeistojen rakenteelliset ominaisuudet. Keskijänniteteknologiat ovat vuosikymmenien aikana kehittyneet ja työssä todettiin että, osa teknologioista on vanhentunut.

Euroopan unionin nykyisellä asetuksella on rajoitettu F-kaasujen käyttöä, mutta kuten työn aikana kävi ilmi, asetusta ollaan päivittämässä. Työssä käsiteltiinkin asetusehdotuksia, joiden pohjalta uusi F-kaasuasetus aikanaan laaditaan. Tutkittaessa asetusehdotuksia ja tilastodataa F-kaasupäästöistä Suomessa todettiin, että valtaosa F-kaasupäästöistä on HFC-yhdisteistä peräisin. Mainitut HFC-yhdisteet ovat olleet laajassa käytössä kylmä- ja jäähdytyslaitteistoissa, mutta ei sähkötekniikassa. Sähkölaitteistoista vuotavan SF<sub>6</sub>-kaasun aiheuttaman päästöhaitan todettiin olevan selvästi pienempi. On kuitenkin ymmärrettävää, että EU:ssa halutaan ohjata myös sähköala löytämään SF<sub>6</sub>-kaasulle korvaajia, sillä nykyisin pyritään löytämään kaikki keinot ja kehityskohteet ilmaston suojelemiseksi.

Laitevalmistajien kannalta hyvänä asiana voidaan pitää sitä, että kehitystyötä on tehty jo pidemmän aikaa, eli on osattu ennakoida säännösten tulevia muutoksia. Sähköalan edustajat ja asiantuntijat ovat useissa asiayhteyksissä tuoneet päätäjille esiin, että siirtyminen pois SF<sub>6</sub>-eristeisistä laitteistoista tulee tapahtua luonnollisen siirtymän kautta, eli laitteistot käytetään elinkaarensa loppuun. Perehtyessä asetusehdotuksiin vaikuttaa siltä, että tämä asia on kuultu EU:n päättävissä elimissä ja sen myötä myös laitekehitystä pystytään jatkamaan saaden markkinoille toimivia ratkaisuja.

Opinnäytetyössä tutkittiin tämän hetken markkinatarjontaa kolmen suurimman laitevalmistajan osalta. Markkinakartoituksen avulla huomattiin, että kaikki kolme työhön valittua valmistajaa hyödyntävät paljon vanhaa tekniikkaa eli eristeaineena ilmaa sekä tyhjiöteknologiaa. Nämä molemmat edellä mainitut teknologiat ovat olleet käytössä vuosikymmeniä, mutta SF<sub>6</sub>-kaasulla on saatu kojeistoista



kompaktin kokoisia sekä toimintavarmuudeltaan todella luotettavia. Tässä työssä tehdyn laitevertailun perusteella kävi ilmi, että jokainen valmistaja on onnistunut kojeistojen fyysisten mittojen osalta. Kaikilla valmistajilla kojeistojen koko on pysynyt samoissa mitoissa kuin vastaavan SF<sub>6</sub>-eristeisen kojeiston ja se on merkittävä asia, kun nykyisiä käytössä olevia kojeistoja ryhdytään korvaamaan. Usein sähkötiloissa, joissa kojeistot sijaitsevat, tilat on käytettävä tehokkaasti hyväksi ja lisätilaa isommalle tilantarpeelle ei useinkaan löydy.

Paljon on siis kehitystyöllä saatu aikaan ja joitain eroavaisuuksiakin valmistajien välillä löydettiin. Näistä esimerkkinä ABB:n uusi eristyskaasuseos, joka korvaa SF<sub>6</sub>-kaasun. Ero on selvä kahteen muuhun tarkasteltuun valmistajaan, sillä Siemens ja Schneider hyödyntävät puhdistettua ilmaa eristeaineena. Uusien laitteistojen markkinoille saattamisen aikataulussa huomattiin eroavaisuuksia, sillä esimerkiksi Siemens julkistaa 24 kV kojeistonsa myyntiin vasta kuluvan vuoden (2023) ja vuoden 2025 välisenä aikana. Lisäksi Siemensin 33 kV kojeiston tarkempi julkaisuajankohta ei ole tiedossa. Sen sijaan ABB ja Schneider ovat jo tuoneet saataville koko tuotevalikoiman kaikille keskiännitetasoille.

Työn avulla saatiin hyvä yleiskäsitys vallitsevasta markkinatilanteesta ja saatiin kerättyä tietoa uusista kojeistoratkaisuista sekä tuotua ne yhteen dokumenttiin tiiviiksi tietolähteeksi. Uusista tässä opinnäytetyössä käsitellyistä KJ-kojeistoista ei ole vielä riittävästi dataa ja käyttökokemusta, jotta voitaisiin tutkia niiden teknistä toimivuutta verrattuna SF<sub>6</sub>-kaasueristeisiin edeltäjiinsä. Jatkotutkimuksena olisikin hyvä selvittää, kuinka uudet kojeistoratkaisut ovat teknisesti kentällä toimineet. Tähän vaaditaan kuitenkin useita vuosia aikaa, jotta kojeistot ovat ehtineet olla käytössä riittävän pitkään luotettavien ja vertailukelpoisten tulosten saamiseksi. Lisäksi olisi hyvä tutkia aiheutta enemmän myös kustannusten näkökulmasta, sillä siihen ei tässä työssä keskitytty. Kustannuksiin syventyminen vaatisi projektin, johon kojeistoja ollaan suunnittelemassa, sillä hankintahinnat ovat yleensä projektikohtaisia.

## LÄHTEET

ABB. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. 10. painos. Vaasa: Ykkös-Offset Oy.

ABB. 2004a. Uniswitch Keskijännitekojeisto. PDF-dokumentti. Viitattu 4.1.2023. <https://library.e.abb.com/pub-lic/0c8cf4b3a630586fc12573d2004b1e1d/UNIS5FI%200801.pdf>

ABB. 2004b. Uniswitch – Käyttö- ja huolto-opas. PDF-dokumentti. Viitattu 5.1.2023. <https://library.e.abb.com/pub-lic/11b174ae75459d3ac12573d7004962b4/UNIS14FI%2008-01%20kaytto.pdf>

ABB. 2018a. GSec. Instructions for installation, operation and maintenance. PDF-dokumentti. Viitattu 27.2.2023. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VCD601151%202015.10&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

ABB. 2018b. SafePlus AirPlus 24kV. Eco-efficient compact switchgear. PDF-dokumentti. Viitattu 28.2.2023. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VDD006311%20EN&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

ABB. 2020. ZX2. Gas-insulated medium voltage switchgear. PDF-dokumentti. Viitattu 29.3.2023. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VBA680502P0102&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

ABB. 2021. UniGear ZS1 - Medium-voltage air-insulated switchgear up to 24 kV. PDF-dokumentti. Viitattu 5.1.2023. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VCP000138&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

ABB. 2022a. PrimeGear ZX0. Gas-insulated medium-voltage switchgear. PDF-dokumentti. Viitattu 28.3.2023. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1YHA000299%20EN&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

ABB. 2022b. SafeRing/SafePlus 12-24kV. Gas-insulated ring main unit SafeRing and Compact switchgear SafePlus. PDF-dokumentti. [https://library.e.abb.com/pub-lic/bb38f74c9b404b4b89745cde2a4b0dba/1VDD006104\\_Catalogue\\_SR-SP\\_12-24kV\\_EN\\_07-2022.pdf](https://library.e.abb.com/pub-lic/bb38f74c9b404b4b89745cde2a4b0dba/1VDD006104_Catalogue_SR-SP_12-24kV_EN_07-2022.pdf)

ABB. 2022c. SafeRing/SafePlus - Air 12kV. SafeRing/SafePlus - AirPlus 24kV. Gas-insulated ring main unit and compact switchgear. PDF-dokumentti. Viitattu 29.3.2023. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VDD006404%20EN&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

ABB. 2023. IEC indoor secondary gas switch-disconnector GSec. Verkkosivut. Viitattu 27.2.2023. <https://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/isolators-switches-disconnectors/indoor-switches/gas-insulated-switches/iec-secondary-gas-switch-disconnector-gsec>

Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K. & Palva, V. 2015. Suurjännitetekniikka. 4. korjattu ja täydennetty painos. Helsinki: Otatieto.

Becker, P.E. 2019. Alternative Insulating Fluids to SF<sub>6</sub> Gas. Status and Strategy Considerations. Gas management seminar. PDF-dokumentti. Viitattu 29.3.2023. [https://dilo.com/fileadmin/dilo\\_us/8\\_Trainings\\_and\\_Seminars/2019\\_Seminar\\_Presentations/Becker-Alt\\_Gas\\_Mixtures\\_Status\\_and\\_Strategy\\_Considerations .pdf](https://dilo.com/fileadmin/dilo_us/8_Trainings_and_Seminars/2019_Seminar_Presentations/Becker-Alt_Gas_Mixtures_Status_and_Strategy_Considerations.pdf)

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

Elovaara, J. & Laiho, Y. 1999. Sähkölaitostekniikan perusteet. 4. korj. painos. Helsinki: Otatieto.

Euroopan Komissio. 2020. Komission kertomus. Sellaisten fluorattujen kasvihuonekaasujen vaihtoehtojen saatavuuden arvioinnista, joita käytetään kytkinlaitteissa ja niihin liittyvissä laitteissa, mukaan lukien keskijännitekojeistot. PDF-dokumentti. [https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/api/files/C\(2020\)6635\\_0/de0000000045369?rendition=false](https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/api/files/C(2020)6635_0/de0000000045369?rendition=false)

Euroopan Komissio. 2022. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetukset ehdotus. Fluoratuista kasvihuonekaasuista, direktiivin (EU) 2019/1937 muuttamisesta ja asetuksen (EU) N:o 517/2014 kumoamisesta. PDF-dokumentti. Viitattu 2.3.2023. [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:ecf2b875-b59f-11ec-b6f4-01aa75ed71a1.0017.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:ecf2b875-b59f-11ec-b6f4-01aa75ed71a1.0017.02/DOC_1&format=PDF)

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetukset fluoratuista kasvihuonekaasuista ja asetuksen (EY) N:o 842/2006 kumoamisesta 16.4.2014/517. Viitattu 20.2.2023. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&from=RO>

Haapanen, E. 2016. Aerodynamiikkaa. Lentäjille ja lentomekaanikoille. 3. uudistettu painos. PDF-versio. Jämsä: Suomen Ilmailuliitto ry. <https://www.aerodynamiikka.fi/images/Pdf/Aerodynamiikka-2016.pdf>

Pusa, E. 2020. Jakeluverkkoyhtiön sähköasemahankinnan kojeistomäärittelyt. Diplomityö. [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161136/Diplomityo\\_Pusa\\_Erkki.pdf?sequence=1](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161136/Diplomityo_Pusa_Erkki.pdf?sequence=1)

Schneider Electric. 2020. SM6 modular units. Air insulated switchgear Up to 36kV. PDF-dokumentti. Viitattu 23.3.2023. [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=Catalog&p\\_File\\_Name=SM6\\_AMTED398078EN\\_1020.pdf&p\\_Doc\\_Ref=AMTED398078EN](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=SM6_AMTED398078EN_1020.pdf&p_Doc_Ref=AMTED398078EN)

Schneider Electric. 2021a. RM AirSeT. Ring Main Unit & Modular Switchgear. PDF-dokumentti. Viitattu 27.1.2023. [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_Doc\\_Ref=NRJCAT20014EN&p\\_enDocType=Catalog&p\\_File\\_Name=RM+AirSeT\\_NRJCAT20014EN\\_0224.pdf](https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=NRJCAT20014EN&p_enDocType=Catalog&p_File_Name=RM+AirSeT_NRJCAT20014EN_0224.pdf)

Schneider Electric. 2021b. RM6. Gas Insulated Ring Main Unit Up to 24 kV. PDF-dokumentti. Viitattu 27.3.2023. [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_Doc\\_Ref=AM-TED398032EN&ga=2.159299578.1596232282.1679900010-1406773570.1648716733](https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=AM-TED398032EN&ga=2.159299578.1596232282.1679900010-1406773570.1648716733)

Schneider Electric. 2022. AIR. Discover the future of energy distribution with the SF<sub>6</sub> -free GM AirSeT. PDF-dokumentti. Viitattu 23.3.2023. [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_Doc\\_Ref=998\\_21443915\\_GM&p\\_enDocType=Brochure&p\\_File\\_Name=998-21443915\\_GMAirSeT\\_GMA\\_e-brochure.pdf](https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=998_21443915_GM&p_enDocType=Brochure&p_File_Name=998-21443915_GMAirSeT_GMA_e-brochure.pdf)

Schneider Electric. 2023. SM AirSET. Fully air insulated switchgear up to 24 kV. PDF-dokumentti. Viitattu 23.3.2023. [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=Catalog&p\\_File\\_Name=SMAirSeT\\_NRJCAT21009EN\\_1122.pdf&p\\_Doc\\_Ref=NRJCAT21009EN&ga=2.107837194.949311474.1679557038-1406773570.1648716733](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=SMAirSeT_NRJCAT21009EN_1122.pdf&p_Doc_Ref=NRJCAT21009EN&ga=2.107837194.949311474.1679557038-1406773570.1648716733)

Schüpferling, B., Venna, K.R, Wolfrum, F. 2023. F-Gas-Free Power Distribution. Make a Difference – whit blue GIS. Germany: Siemens AG. PDF-dokumentti. Viitattu 14.3.2023. <https://www.siemens.com/global/en/products/energy/medium-voltage/systems/medium-voltage-blue-gis.html#MakeaDifferencewithblueGIS>

SESKO ry. 2018. SFS-EN IEC 60376:2018. Vaatimukset sähkölaitteissa käytettävälle tekniselle rikkiheksafluoridille (SF<sub>6</sub>) ja SF<sub>6</sub>-seoskaasuissa käytettäville li-säkaasuille. PDF-dokumentti. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsa-hko/CENELEC/ID2/6/767994.html.stx>

Siemens AG. 2016. Vacuum Switching Technology and Components for Medium Voltage. PDF-dokumentti. Viitattu 26.1.2023. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:0550395ac2c0303ddc4fa49e6f3f4bdcea4b1be2/vacuum-switching-technology-and-components-for-medium-voltage-ca.pdf>

Siemens AG. 2019. Air-Insulated Medium-Voltage Switchgear NXAIR and NXAIR M. PDF-dokumentti. Viitattu 26.1.2023. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:78bf32f3-4865-4cde-9a98-9267cc6b7f0b/ha-25-71-en.pdf>

Siemens AG. 2021a. 8DJH 12 – blue GIS. Load-break switchgear for the secondary distribution level. PDF-dokumentti. Viitattu 20.3.2023. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:e7aa2b49-b51a-4ec4-98f6-2ac01f6457c3/8DJH12-blue-GIS-brochure-EN.pdf>

Siemens AG. 2021b. 8DJH 24 – blue GIS. Load-break switchgear for the secondary distribution level. PDF-dokumentti. Viitattu 20.3.2023. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b085361e-f2be-4b57-a4a4-5ff4727b56c5/8DJH24-blue-GIS-brochure-EN.pdf>

Siemens AG. 2021c. NXPLUS C 24 – blue GIS. Gas-Insulated Medium-Voltage Switchgear. PDF-dokumentti. Viitattu 20.3.2023. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:0e957e5a-4a1d-41ce-86dc-d85015dc3441/NXPLUS-C-24-blue-GIS-brochure-EN.pdf>

Siemens AG. 2022a. 8DAB 12 – blue GIS. Gas-Insulated Medium-Voltage Switchgear. PDF-dokumentti. Viitattu 20.3.2023. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:1f9b0bd0-faaa-4890-9aa9-053ca28a8066/8DAB-12-Blue-Broschuere-EN.pdf>

Siemens AG. 2022b. blue GIS 100 % Innovation. Sustainability makes the difference. PDF-dokumentti. Sähköpostiviesti 20.2.2023.

Siemens AG. 2022c. Brand new switch disconnecter controls current flow on the secondary distribution level. Viitattu 22.3.2023. <https://www.siemens.com/global/en/products/energy/medium-voltage/systems/medium-voltage-blue-gis/white-paper-blue-switch.html>

Siemens AG. 2022d. Sustainability – the only way for better future. The planned new F-gas regulation supports our vision. Viitattu 15.3.2023. <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/sustainability-only-way-better-future-planned-new-f-gas-regulation-supports-our-vision>

Siemens AG. 2022e. Switchgear Type 8DJH for Secondary Distribution Systems up to 24 kV. Gas-Insulated. PDF-dokumentti. Viitattu 22.3.2023. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:60f3dbd7588876438a66d3503921eedeadc95ad2/8djhcompact-en-cataloge.pdf>

Tilastokeskus. 2022. Kasvihuonekaasupäästöjen raportoinnissa alkaa uusi kausi. Viitattu 1.3.2023. <https://stat.fi/julkaisu/cktlew2c03aln0a515eyjyxe8>

Tulli. 2021. Rajoituskäsikirja. Fluoratut kasvihuonekaasut. PDF-dokumentti. Viitattu 1.3.2023. <https://tulli.fi/documents/2912305/3048504/Fluoratut%20kasvi-huonekaasut/e52be2f7-014d-4804-9dfe-d33160c9a779>

Ympäristöministeriö. 2022a. Euroopan komission ehdotus Euroopan parlamentin ja neuvoston asetukseksi fluoraatuista kasvihuonekaasuista, direktiivin (EU) 2019/1937 muuttamisesta ja asetuksen (EU) N:o 517/2014 kumoamisesta. Viitattu 28.2.2023. [https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/Kirjelma/Documents/U\\_46+2022.pdf](https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/Kirjelma/Documents/U_46+2022.pdf)

Ympäristöministeriö. 2022b. Ilmastovuosikertomus. PDF-dokumentti. Viitattu 3.3.2023. [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164392/YM\\_2022\\_24.pdf](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164392/YM_2022_24.pdf)

## LIITTEET

### Liite 1. Luettelo fluoratuista kasvihuonekaasuista

(EU N:o 517/2014 1 luku 2 artikla.)

1 (2)

#### 2 ARTIKLAN 1 ALAKOHDASSA TARKOITETUT FLUORATUT KASVIHUONEKAASUT

Aine			GWP (1)
Teollisuuden nimitys	Kemiallinen nimi (yleisnimi)	Kemiallinen kaava	
1 ryhmä: Fluorihilivedyt (HFC)			
HFC-23	trifluorimetaani (fluoroformi)	CHF <sub>3</sub>	14 800
HFC-32	difluorimetaani	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	675
HFC-41	fluorimetaani (metyylifluoridi)	CH <sub>3</sub> F	92
HFC-125	pentafluorietaani	CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	3 500
HFC-134	1,1,2,2-tetrafluorietaani	CHF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	1 100
HFC-134a	1,1,1,2-tetrafluorietaani	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	1 430
HFC-143	1,1,2-trifluorietaani	CH <sub>2</sub> FCHF <sub>2</sub>	353
HFC-143a	1,1,1-trifluorietaani	CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	4 470
HFC-152	1,2-difluorietaani	CH <sub>2</sub> FCH <sub>2</sub> F	53
HFC-152a	1,1-difluorietaani	CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	124
HFC-161	fluorietaani (etyylifluoridi)	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F	12
HFC-227ea	1,1,1,2,3,3,3-heptafluoripropaani	CF <sub>3</sub> CHFCF <sub>3</sub>	3 220
HFC-236cb	1,1,1,2,2,3-heksafluoripropaani	CH <sub>2</sub> FCF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	1 340
HFC-236ea	1,1,1,2,3,3-heksafluoripropaani	CHF <sub>2</sub> CHFCF <sub>3</sub>	1 370
HFC-236fa	1,1,1,3,3,3-heksafluoripropaani	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	9 810
HFC-245ca	1,1,2,2,3-pentafluoripropaani	CH <sub>2</sub> FCF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	693
HFC-245fa	1,1,1,3,3-pentafluoripropaani	CHF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	1 030

## 2 (2)

Aine			GWP <sup>(1)</sup>
Teollisuuden nimitys	Kemiallinen nimi (yleisnimi)	Kemiallinen kaava	
HFC-365 mfc	1,1,1,3,3-pentafluoributaani	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	794
HFC-43-10 mee	1,1,1,2,2,3,4,5,5,5-dekafluoripentaani	CF <sub>3</sub> CHFCHFCF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	1 640
2 ryhmä: Perfluorihiilivedyt (PFC)			
PFC-14	tetrafluorimetaani (perfluorimetaani, hiilitetrafluoridi)	CF <sub>4</sub>	7 390
PFC-116	heksafluorietanaani (perfluorietanaani)	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	12 200
PFC-218	oktafluoripropaani (perfluoripropaani)	C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	8 830
PFC-3-1-10 (R-31-10)	dekafluoributaani (perfluoributaani)	C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	8 860
PFC-4-1-12 (R-41-12)	dodekafluoripentaani (perfluoripentaani)	C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>	9 160
PFC-5-1-14 (R-51-14)	tetradekafluorihexaani (perfluorihexaani)	C <sub>6</sub> F <sub>14</sub>	9 300
PFC-c-318	oktafluorisyklobutaani (perfluorisyklobutaani)	c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	10 300
3 ryhmä: Muut perfluoratut yhdisteet			
	rikkiheksafluoridi	SF <sub>6</sub>	22 800

<sup>(1)</sup> Perustuu hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin neljänteen arviointikertomukseen, jollei toisin mainita.



## Liite 2. Schneider Electric AirSeT KJ-kojeistot

(Schneider Electric 2021a.)

AirSeT is a consistent range  
Insulation with PURE AIR – Breaking-switching with vacuum

### SM AirSeT



#### Modular – Secondary AIS

Air & vacuum  
Air Insulated Switchgear

AIS: Busbar in ambient Air

### RM AirSeT



#### RMU – Secondary GIS

Air & vacuum  
Gas\* Insulated Switchgear

(\*) GIS: Main Circuit in a sealed compartment - "Gas" is pure air

### GM AirSeT



#### Primary GIS

Air & vacuum  
Gas\* Insulated Switchgear

All pictures of the catalogue illustrate the product in an environment close to reality. They were taken off-line. For live operation the PPE. (personal protective equipment) must be used in accordance with the regulations of the place of installation.

### Liite 3. RM AirSet KJ-kojeiston mittatiedot

(Schneider Electric 2021a.)

#### RM AirSeT dimensions and weights <sup>(1)</sup>

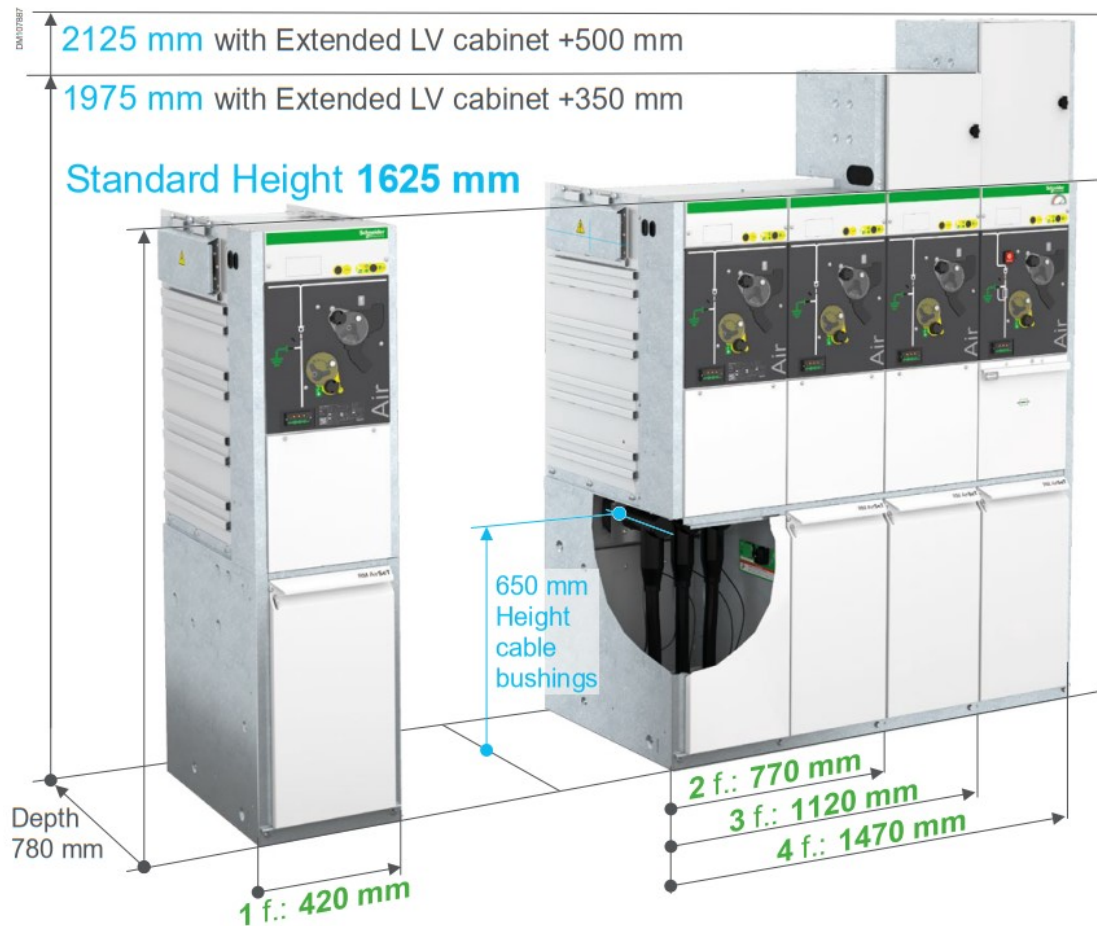
Number of functions	Width (L) <sup>(2)</sup> / mm	Depth (D) / mm	Height (H) <sup>(4)</sup> / mm		Weight (W) <sup>(3)</sup> / kg
			MV	If LV cabinet	
1	420	780	1625 Including the Basic integrated LV compartment	1975	260 to 365
2	770	780		with Extended LV cabinet +350	300 to 425
3	1120	780		2125	400 to 560
4	1470	780		with Extended LV cabinet +500	500 to 700

(1) Applicable to all RMAirSeT with switch-disconnector, Circuit Breaker, Fuse-switch, Compact (NE) or extensible (LE / RE / DE).

(2) L is the Width of the frame, including extensions: There is no space between 2 switchgears that are assembled.

Busbar extensibility: For safety of operators, before energizing a switchgear, it is essential that cover-s with insulating caps are mounted on the busbar extension bushings, when the busbar extension is not connected to another RM AirSeT. (1 cover per RM AirSeT type "RE" or "LE"; 2 covers per RM AirSeT type "DE"). Each cover increases the Length by X = +2 cm on the respective side. It is removed when the 2nd extensible switchgear is assembled.

(3) The weight depends on configuration and options.



## Liite 4. Siemens blue GIS 12kV- ja 24kV-kojeistot datalehti

(Schüpfertling, Venna & Wolfrum 2023.)

1(2)

# The portfolio: 100% future-proof!

## Switchgear for primary distribution



### Circuit-breaker switchgear

8DAB 12

NXPLUS C 24

Single- and double-busbar  
system

Single-busbar  
system

Gas-insulated, hermetically enclosed

Compact dimensions

Single-pole enclosure,  
no phase-to-phase faults

Connection to existing  
SF<sub>6</sub>-insulated NXPLUS C  
switchgear possible

Offers a high design flexibility thanks to modularity

## Switchgear for secondary distribution



### Load-break switchgear

8DJH 12

8DJH 24

Compact dimensions

Combined panel functions in typical block versions

Gas-insulated, hermetically enclosed

Proven operational concept for the vacuum circuit-breaker  
and the three-position switch-disconnector

Prepared for easy retrofitting of motor operating mechanisms  
and sensors – digitally ready

On request, completely digital remote operation  
and monitoring are possible – ex works

Our blue GIS portfolio is subject to consistent further development. The next steps comprise the extension of the operating range up to 40.5 kV, higher currents, typicals, and block versions.



## Switchgear for primary distribution

		8DAB 12	NXPLUS C 24
<b>Rated voltage</b> up to	<b>kV</b>	12	24
<b>Rated short-duration power-frequency withstand voltage</b> up to	<b>kV</b>	28	50
<b>Rated lightning impulse withstand voltage</b> up to	<b>kV</b>	75	125
<b>Rated frequency</b>	<b>Hz</b>	50/60	50/60
<b>Rated current</b>	<b>A</b>		
Busbar		2750	2500
Feeders		2750	1250
<b>Rated short-circuit making current</b>	<b>kA</b>	100/104	67.5
<b>Rated short-circuit breaking current</b>	<b>kA</b>	40	25
<b>Insulating medium</b>		Clean Air	Clean Air
<b>GWP (Global Warming Potential)</b>		< 1	< 1
<b>Rated filling level (abs.)</b>	<b>kPa</b>	240	190
<b>Panel width</b>	<b>mm</b>	600	600, 900
<b>Panel depth</b>	<b>mm</b>		
Single busbar		1625	1225
Double busbar		2665	
<b>Panel height</b>	<b>mm</b>	2350	2250
<b>Temperature range of the ambient air</b>	<b>°C</b>	(-25) -5 to +55	(-25) -5 to +55
<b>Classification</b>		IEC 62271-1/-100/-102/-200	IEC 62271-1/-100/-102/-200

## Switchgear for secondary distribution

		8DJH 12	8DJH 24
<b>Rated voltage</b> up to	<b>kV</b>	12	24
<b>Rated short-duration power-frequency withstand voltage</b> up to	<b>kV</b>	28	50
<b>Rated lightning impulse withstand voltage</b> up to	<b>kV</b>	75	125
<b>Rated frequency</b>	<b>Hz</b>	50	50
<b>Rated current</b>	<b>A</b>	630	630
<b>Rated short-circuit making current</b>	<b>kA</b>	52.5	52.5
<b>Rated short-circuit breaking current</b>	<b>kA</b>	21	21
<b>Insulating medium</b>		Clean Air	Clean Air
<b>GWP (Global Warming Potential)</b>		< 1	< 1
<b>Rated filling level (abs.)</b>	<b>kPa</b>	160	190
<b>Panel width</b>	<b>mm</b>	310/430/500/840	350/450/550/840
<b>Panel depth</b>	<b>mm</b>	775	775
<b>Panel height</b>	<b>mm</b>	1200/1400	1200/1400
<b>Temperature range of the ambient air</b>	<b>°C</b>	(-40) -25 to +55 (+70)	(-40) -25 to +55 (+70)
<b>Classification</b>		IEC 62271-1/-100/-102/-103/-200	IEC 62271-1/-100/-102/-103/-200