

Nr 70/2019

Studentrapport

Bruk av SF₆ i kraftsektoren og alternative isolasjons- og brytningsmedier til SF₆

.....

Kristine Bjørnsen

Anne Marthe ter Woerds Christensen



Ekstern rapport nr 70-2019

Bruk av SF₆ i kraftsektoren og alternative isolasjons- og brytningsmedier til SF₆

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat

Forfatter: Kristine Bjørnsen
Anne Marthe ter Woerds Christensen

Trykk: NVEs hustrykkeri

ISBN: 978-82-410-1938-8

Sammendrag: SF₆, svovelheksafluorid, er en av de sterkeste klimagassene vi kjenner og har egenskaper som gjør den enestående som isolasjon- og brytermedium i kompakte gassisolerte bryteranlegg (GIS-anlegg). Derfor er SF₆ dominerende for GIS-anlegg på høyere spenningsnivå.

Denne rapporten viser at det i dag finnes kommersielle alternativer uten SF₆ for GIS-anlegg med spenningsnivå opp til 145 kV. Dette var ikke tilfelle for bare få år siden og NVE opplever at interessen for alternativer til SF₆ øker blant anleggseiere.

Rapporten er utarbeidet av studenter ved NMBU og NTNU, på oppdrag fra NVE.

Emneord: Effektbrytere
Gassisolerte koblingsanlegg
Klimagasser

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstua
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95
Epost: nve@nve.no
Internett: www.nve.no

09.10.2019



NORGES VASSDRAG- OG ENERGIDIREKTORAT

SOMMERPROSJEKT

Bruk av SF_6 i kraftsektoren og alternative isolasjons- og brytningsmedier til SF_6

Kristine Bjørnsen og Anne Marthe ter Woerds Christensen

VEILEDET AV

Thomas Mo Willig og Lars Eirik Eilifsen

23. august 2019

1 Forord

SF_6 er en mye brukt gass i kraftsektoren både i Norge og resten av verden. Den har gode isolasjons- og brytningsegenskaper, men er også en sterk klimagass. De siste årene har det derfor blitt økt fokus på å finne gode alternativer som kan erstatte SF_6 . Sommeren 2019 engasjerte Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE) to studenter for å lage en rapport som omhandler bruk av SF_6 i kraftsektoren og alternativer til SF_6 . Det er seksjonen for Kraftsystemer (EK) som har organisert prosjektet.

Studentene som har jobbet med prosjektet er Kristine Bjørnsen og Anne Marthe ter Woerds Christensen. Kristine studerer Miljøfysikk og fornybar energi ved NMBU og Anne Marthe studerer Energi og Miljø ved NTNU.

Vi vil gjerne takke alle som har bidratt med hjelp til prosjektet, både internt i NVE og eksternt.

2 Sammendrag

Koblingsanlegg brukes i store deler av kraftnettet og er helt sentrale for å kunne styre strømflyten når det trengs. Gassisolerte koblingsanlegg (GIS) blir ofte valgt over luftisolerte anlegg (AIS) på grunn av blant annet arealbegrensninger og klimatiske forhold. På spenninger over 52 kV benyttes hovedsakelig gassen SF_6 som isolasjons- og brytningsmedium. SF_6 har mange gode elektriske egenskaper, men er også den sterkeste klimagassen vi kjenner til. De siste årene har det blitt økt fokus på å finne alternative isolasjons- og brytningsmedier som kan erstatte SF_6 i GIS-anlegg.

En viktig komponent i koblingsanlegget er effektbryteren som kan bryte både normal laststrøm og feilstrømmer. Effektbrytere med SF_6 er vanlige å bruke både i GIS- og AIS- anlegg, men de siste årene har det kommet flere brytningsmedier på markedet som kan erstatte SF_6 i effektbryteren. SF_6 brukes også som isolasjonsmedium rundt strømledende deler ellers i GIS-anlegget.

SF_6 har mange egenskaper som gjør den godt egnet som isolasjons- og brytningsmedium i GIS-anlegg og alle de nye alternativene er nødt til å kunne konkurrere med SF_6 på disse punktene. Noen av de viktigste egenskapene til SF_6 er:

- Høy dielektrisk holdfasthet
- Høy spesifikk varmekapasitet
- Den rekombinerer

2.1 Regulering av SF_6

I Kyotoprotokollen fra 1997 blir SF_6 identifisert som den mest potente klimagassen i verden, og dette førte til at det ble et større fokus på å regulere bruk og utslipp av klimagassen, spesielt i EU og California.

Det er idag ingen avgift på SF_6 i Norge slik det er på utslipp av diverse andre miljøskadelige gasser. I 2002 ble det opprettet en avtale mellom Miljøverndepartementet og kraftsektoren som skulle minke utslipp av SF_6 gjennom opplæring og opplysning om tekniske forbedringer og tiltak i GIS-anlegg. Det ble i slutten av 2018 innført rapporteringsplikt på beholdning og forbruk av SF_6 i Norge.

2.2 Alternativer til SF_6

I jakten på løsninger som kan erstatte SF_6 er det spesielt tre alternativer som virker lovende. Disse er blue GIS som bruker vakuum i effektbryteren og teknisk ren luft som isolasjon, Green Gas for Grid, eller g^3 , som er en gassblanding bestående av fluornitrilet Novec 4710, CO_2 og O_2 og AirPlus som består av en blanding av Novec 5110, O_2 og N_2 eller CO_2 . Green Gas for Grid og AirPlus

brukes både i effektbryteren som brytningsmedium og ellers i anlegget som isolasjonsmedium. Per idag er det mulig å få tak i SF₆-frie GIS-anlegg opp til 170 kV. På spenningsnivåer over dette er det ikke produsert anlegg uten SF₆ enda, men flere produsenter jobber med videre utvikling for høyere spenningsnivåer.

I Norge har BKK Nett og Lyse Elnett installert SF₆-frie GIS-anlegg. Interessen for GIS-anlegg uten SF₆ virker å øke for flere nettselskaper, da stadig flere sender inn konsesjonssøknader til NVE der de søker om SF₆-frie GIS-anlegg. I en undersøkelse utført i forbindelse med rapporten kom det også frem at nettselskaper i Norge er positive til alternative løsninger til SF₆ i GIS-anlegg, og den underbygger også at interessen er begrunnet med at selskapene ønsker mer miljøbevisste løsninger. I tillegg til dette begrunnes også interesse for alternativer til SF₆ med at det kan komme restriksjoner på SF₆ som man helst vil unngå.

Innholdsfortegnelse

1	Forord	i
2	Sammendrag	ii
2.1	Regulering av SF ₆	ii
2.2	Alternativer til SF ₆	ii
3	Innledning	1
3.1	Forklaringer	2
4	Generelt om SF₆	3
4.1	Historisk bruk av SF ₆	3
4.2	Egenskaper til SF ₆	3
4.3	Bruk av SF ₆ i kraftsektoren i Norge	5
4.4	Regulering av SF ₆	6
4.4.1	EU og Norge	7
4.4.2	California	7
5	GIS-anlegg	9
5.1	Effektbrytere	10
5.1.1	Teori	10
5.1.2	SF ₆ -brytere	12
5.1.3	Vakuumbrytere	13
5.1.4	Karbondioksid som et alternativ i effektbrytere	14
5.2	Isolasjon utenom effektbryterne	15
6	Alternativer til SF₆ i GIS-anlegg	16

6.1	Vakuum og ren luft	16
6.2	Fluornitril	17
6.3	Fluorketon	18
6.4	SF ₆ -frie anlegg solgt og i drift	19
6.5	Livssyklusanalyser for SF ₆ -frie GIS-anlegg	20
6.6	Sammenlikning av alternativene	21
6.6.1	Prissammenlikning	22
6.7	Mulige fremtidige løsninger	22
6.8	Interesse for alternative isolasjons- og brytningsmedier i GIS-anlegg i Norge	23
6.8.1	Spørreundersøkelse	23

7 Diskusjon 27

Figurer

1	Gjennomslagsspenning som funksjon av avstand	4
2	Fordeling av SF ₆ i anleggsmassen i 2018	5
3	Rapporterte utslipp og anleggsmasse (kg SF ₆)	6
4	Måling av SF ₆ -konsentrasjon ved Zeppelin observatoriet på Svalbard	7
5	Eksempler på GIS-anlegg	9
6	Bryter i en krets	10
7	Effektbryter i GIS-anlegg	11
8	Strøm og spenning når bryter åpnes	12
9	Puffer effektbryter	13
10	Illustrasjon av innsiden av en vakuumbryter	14
11	Faktisk bilde av innsiden til en vakuumbryter	14

12	GIS-anlegg figur ABB	15
13	Figur som viser hva som er hva på GIS-anlegg	15
14	Gjennomslagsspenning for Novec 4710	17
15	Gjennomslagsspenning for Novec 5110	19
16	Hvorfor ble GIS-anlegg med SF ₆ valgt?	24
17	Hvilke type GIS-anlegg er mest aktuelle?	25
18	Hvorfor er bedriften/selskapet positiv til andre løsninger enn SF ₆ ?	26

Tabeller

1	Sammenlikning av de elektriske egenskapene til ulike isolasjons- og brytningsmedier	22
---	---	----

3 Innledning

Det er idag mye bevissthet rundt klima og menneskelige utslipp av klimagasser til atmosfæren både blant privatpersoner og bedrifter. Dette var ikke tilfellet på 1960-tallet da kraftindustrien tok i bruk SF₆ som isolasjons- og brytningsmedium i blant annet gassisolerte effektbrytere og anlegg. Da var fokuset på at SF₆, eller svovelheksafluorid, hadde ypperlige egenskaper for å bryte lysbuer og isolere elektriske komponenter. Fokuset var ikke at SF₆ er den sterkeste klimagassen som finnes, med et globalt oppvarmingspotensial over 23 000 ganger så stort som CO₂.

Ettersom bevisstheten rundt klima øker, øker også interessen for mer klimavennlige løsninger innenfor kraftindustrien. Flere produsenter av gassisolerte brytningsanlegg har satset stort på å finne nye alternative isolasjons- og brytningsmedium som kan erstatte SF₆, men dette har vist seg å være vanskelig ettersom SF₆ er et så godt isolasjons- og brytningsmedium. Selv om det er funnet flere gode alternativer har ingen like gode eller bedre egenskaper enn SF₆. De nye løsningene har derimot mye lavere globalt oppvarmingspotensial.

Denne rapporten har som formål å samle tilgjengelig informasjon og gi en oversikt over SF₆-bruk i gassisolerte bryteranlegg og alternative erstattere av SF₆ i kraftsektoren. Det er innhentet informasjon fra flere produsenter som satser på SF₆-frie GIS-anlegg, samtaler med fagpersoner på området, samt annen offentlig informasjon. Det er også utført en undersøkelse med mål om å kartlegge bruk av SF₆ i kraftsektoren og interessen for nye alternativer til SF₆ i GIS-anlegg. Undersøkelsen ble sendt ut til relevante medlemmer i brukergruppen for SF₆.

Store deler av informasjonen som var å finne om de nye alternativene til GIS-anlegg med SF₆ kommer fra produsentene. Siden de alternative løsningene fortsatt er nye ligger det lite uavhengig informasjon og undersøkelser tilgjengelig.

3.1 Forklaringer

GIS-anlegg	Gas insulated switchgear, eller gassisolerte koblingsanlegg som det omtales på norsk, er bryteranlegg som bruker gass som isolator. Hele anlegget er innkapslet.
AIS-anlegg	Air insulated switchgear, eller luftisolerte koblingsanlegg som det omtales på norsk, er bryteranlegg som bruker luft som isolator. Anlegget er ikke innkapslet.
RMU	Ring main units eller ringkabelanlegg på norsk, er et anlegg som inneholder effekt- og lastskillebrytere i et ringnett og er vanligvis plassert i distribusjonsnettet.
Kondensere	Prosessen der et stoff går fra gassform til væskeform.
Elektrisk leder	Materiale som leder elektrisk strøm godt.
Elektrisk isolator	Materiale som ikke leder elektrisk strøm godt.
Gjennomslagspenning	Når spenningen når et punkt der isolasjonsmediet begynner å lede istedenfor å isolere.
GWP	Global warming potential brukes for å sammenlikne strålingspådrivet fra ulike drivhusgasser over tid i atmosfæren og regnes utifra strålingspådrivet til CO_2 , $\text{GWP}_{\text{CO}_2} = 1$.
Dielektrisk holdfasthet	Mål på når isolasjonsmediet slutter å isolere. Dette skjer ved gjennomslagspenning.
Impedans	Forholdet mellom spenning og strøm i en vekselstrømskrets.
Spesifikk varmekapasitet	Mengden varme et stoff kan ta opp og holde på.
Lysbue	Elektrisk strømbane gjennom en gass mellom to strømførende ledere.
Plasma	Ionisert gass.
Ioniserende	Det dannes ioner, som er positivt eller negativt ladde atomer.
Nullgjennomgang	Det punktet der vekselstrømmen blir null.
Strømklipping	En hendelse der lysbuen slukkes før nullgjennomgangen.
Elektronnegativ gass	En gass som lett tar opp elektroner og danner ioner.
Effektbryter	Apparatur som kan bryte normal laststrøm og feilstrømmer.
Lastskillebryter	Apparatur som kun bryter normal laststrøm og anvendes oftest i distribusjonsnettet.
Skillebryter	Skillebryteren åpner kretsen for å lage et synlig skille. Den kan ikke bryte strømmen.
Jordbryter	Kobler deler av anlegget til jord.
Strømtransformator	Transformerer ned strømmen i anlegget slik at den kan leses av med måleinstrument.
Spenningstransformator	Transformerer ned spenningen i anlegget slik at den kan leses av med måleinstrument.
Lavspentsnivå	$< 1 \text{ kV}$
Mellomspentsnivå	$1 - 52 \text{ kV}$
Høyspentsnivå	$> 52 \text{ kV}$
TWA	Står for Time Weighted Average, eller tidsvektet gjennomsnitt på norsk, baserer seg på en åtte timers arbeidsdag og 40 timers uke, og sier om det er trygt å bli eksponert for et stoff.

4 Generelt om SF₆

SF₆, eller svovelheksafluorid, er en gass som er mye brukt i kraftsektoren som et isolasjons- og brytningsmedium. Dette er på grunn av en rekke egenskaper som gjør gassen spesielt godt egnet som elektrisk isolator og til å bryte lysbuer. Som et isolasjonsmedium skal den skille elektrisk ledende deler av utstyret fra hverandre, og som et brytningsmedium skal den bryte strømmen ved å slukke lysbuen som oppstår når to ledere under høy spenning blir skilt fra hverandre.

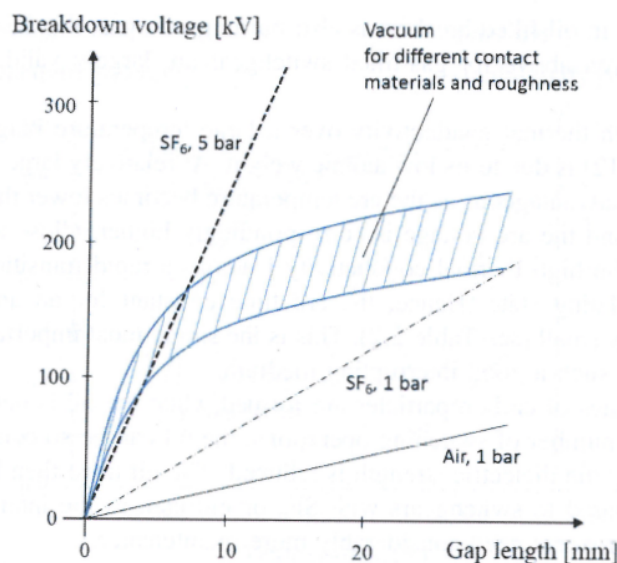
4.1 Historisk bruk av SF₆

SF₆ ble for første gang fremstilt i Frankrike i 1900 [1], men først på slutten av 1930-tallet ble dens gode isolasjonsegenskaper oppdaget. De første gassisolerte effektbryterne ble tatt i bruk på 60-tallet [2]. I GIS-anlegg har SF₆ lenge vært det eneste alternativet brukt som isolasjons- og brytningsmedium på høyere spenningsnivå. Før SF₆ ble vanlig å bruke som isolasjonsmedium var det hovedsakelig olje som ble brukt. Olje var lett tilgjengelig og hadde gode isolasjons- og nedkjølingsegenskaper, men var også brennbar, noe som gikk ut over sikkerheten til arbeiderne og anlegget [3]. I 1973 kom det første 145 kV SF₆-anlegget i drift i Norge.

SF₆ har også bruksområder utenfor kraftsektoren, som i medisinsk utstyr og forskningsutstyr, der gassen blir brukt som elektrisk isolasjonsmedium, i vinduer som akustisk isolasjon og i metallurgiske prosesser i aluminium- og magnesiumsindustrien [1].

4.2 Egenskaper til SF₆

Den høye dielektriske holdfastheten til SF₆ er en av egenskapene som gjør den så godt egnet som isolator. Dielektrisk holdfasthet er et mål på hvor mye spenning et medium tåler før det oppstår gjennomslag. Et elektrisk gjennomslag er fenomenet der spenningen blir så høy at det går strøm gjennom isolatoren som skiller to spenningssatte ledere. SF₆ er en elektronegativ gass, som gjør den dielektriske holdfastheten høy. Elektronegative molekyler kan ta opp frie elektroner slik at det blir dannet tunge molekyler som beveger seg sakte og hindrer strømmen fra å flyte [1]. Når gassen tar til seg frie elektroner vil det heller ikke være elektroner til å danne et elektronskred som er essensielt for dannelsen av lysbuen.



Figur 1: Figuren viser gjennomslagsspenning for ulike isolasjonsmedium som funksjon av avstand mellom to ledere [4].

I figur (1) vises gjennomslagsspenningen for SF₆ sammenlignet med vakuum og luft. Det kommer tydelig frem av figuren at trykksatt SF₆ har langt høyere dielektrisk holdfasthet enn vakuum og luft. Det fører til at det er mulig å bygge anlegg mer kompakte med SF₆, ettersom det trengs kortere avstand mellom spenningsatte ledere for å unngå gjennomslag. Den teoretiske dielektriske holdfastheten til trykksatt SF₆ er nesten tre ganger høyere enn luft. Det er hovedgrunnen til at et GIS-anlegg med SF₆ er mindre arealkrevende enn et AIS-anlegg. For en nærmere sammenligning mellom GIS og AIS henvises det til NVEs rapport nr 55-2017, *Gassisolerte og luftisolerte bryteranlegg* [5]. Fordelen med komprimerte anlegg er at man i tettbebygde strøk med høyere arealpriser kan bygge på et mindre areal eller at anlegg i områder som er utsatt for ytre miljøpåkjenninger fra f. eks hav, vær eller forurensning kan bygges innendørs. At anleggene er mindre fører også til at det trengs mindre materialer.

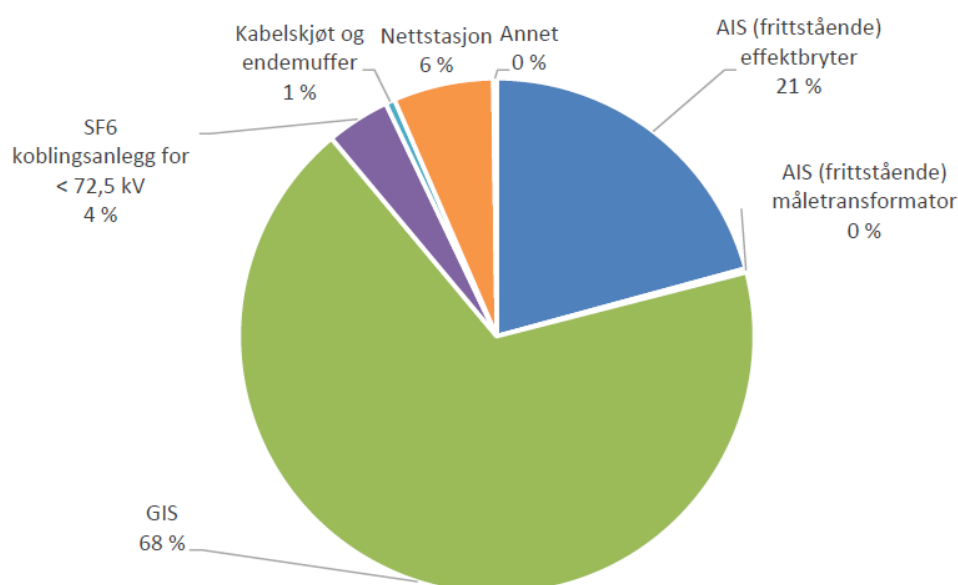
Lysbuen som dannes under brytningen av strømmen kan oppnå temperaturer på 19 500 °C [6]. Det er derfor viktig at brytningsmediet effektivt kan redusere opphetning i det elektriske utstyret og kjøle ned lysbuen. SF₆ har en spesifikk varmekapasitet på 0,097 kJ/mol*K [7]. Luft har til sammenligning en spesifikk varmekapasitet på 0.021 kJ/mol*K, som gjør at SF₆ kan ta til seg mer varme fra lysbuen for å kjøle den ned enn luft kan.

Ved temperaturer på 1 800 °C til 12 300 °C spaltes SF₆ til andre stoffer [1]. En lysbue kan bli mye varmere enn dette og SF₆ spaltes derfor under slukking av lysbuen. Spaltningsproduktene til SF₆ under lysbueslukking er SOF₂(SF₄), SOF₄, SF₄, S₂F₁₀, SO₂F₂, SO₂, AlF₃ og HF [8]. Det er spesielt tre av spaltningsproduktene som er giftige. Disse er SF₄ og SOF₂ som lukter intenst og angriper lungene, samt det hvite pulveret AlF₃. Pulveret blir etsende i kontakt med fuktighet [9]. På grunn av de giftige spaltningsproduktene er det strenge krav til opplæring av ansatte og håndtering av anlegget. Når lysbuen er slukket vil temperaturen i beholderen synke og SF₆-gassen rekombineres. Den forbrukes altså ikke selv om den spaltes under høye temperaturer.

I tillegg til egenskapene over har SF_6 et lavt kokepunkt slik at gassen ikke kondenserer under normale forhold, men ettersom kokepunktet vil stige ved høyere trykk kan ikke gassen trykkes med mer enn fem til seks bar. Ved høyere trykk er det fare for at gassen kondenserer ved lavere temperatur enn $-25\text{ }^\circ\text{C}$. Det er ikke ønskelig at SF_6 skal endre fase fra gassform til væskeform under drift. SF_6 er ikke brennbar eller giftig, men tettheten til gassen er på $6,14\text{ kg/m}^3$ som gjør den tyngre enn luft og den vil derfor fortrenge oksygen. Dersom det oppstår lekkasje kan det medføre kvelningsfare, og det må tas med i sikkerhetsmessige hensyn ved drift av anlegg med SF_6 .

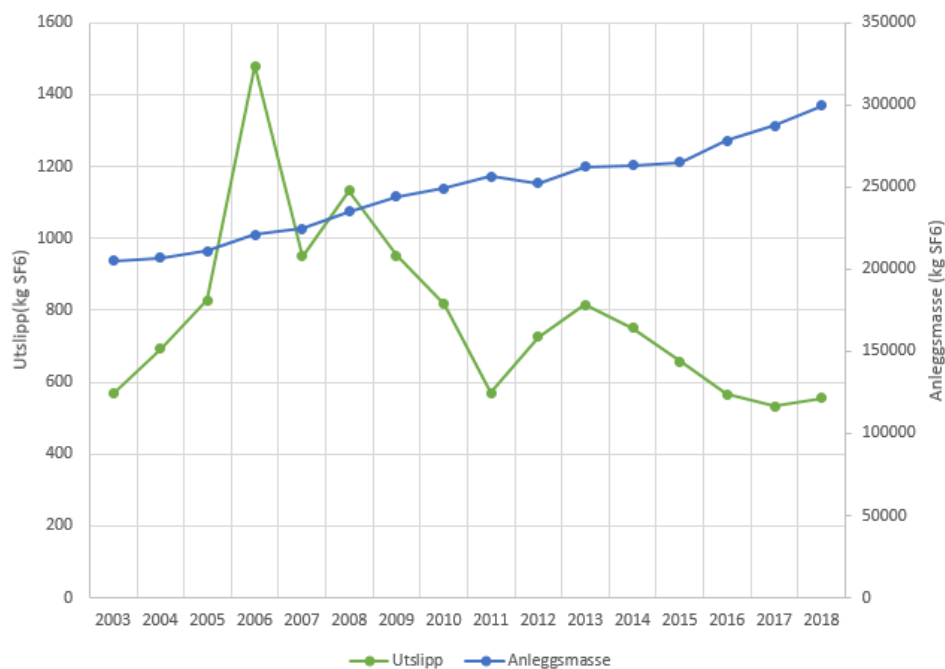
4.3 Bruk av SF_6 i kraftsektoren i Norge

I Norge er anleggsmassen av SF_6 fordelt som vist i sektordiagrammet under.



Figur 2: Fordeling av SF_6 i innrapportert anleggsmasse i 2018. Hentet fra Brukergruppen for SF_6 -anlegg [10]. Prosentandelene er avrundet.

Figur (2) viser at GIS-anlegg har 68 % av oppgitt beholdning av SF_6 i kraftsektoren. Etter dette er det effektbrytere i AIS-anlegg som står for en betydelig andel. I AIS-anlegg blir SF_6 brukt i effektbryteren som brytningsmedium. Dette diagrammet viser ikke eksakt hvor anleggsmassen av SF_6 er, da ikke alle som rapporterer inn til Brukergruppen for SF_6 -anlegg oppgir enkeltkomponenter der SF_6 er i beholdning. I stedet kan det bli rapportert samlet, og GIS-anlegg vil derfor stå for en større andel enn det i virkeligheten gjør. Vi kan av figuren likevel se hvilke komponenter som inneholder SF_6 .

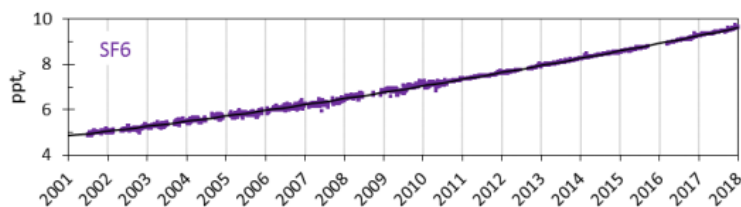


Figur 3: Utvikling av beholdning og rapporterte utslipp av SF₆ fra 2003 til 2018.

Figur (3) viser anleggsmasse og rapporterte utslipp av SF₆ i kraftsektoren i Norge etter tall fra Brukergruppen for SF₆-anlegg. Anleggsmassen øker jevnt til en beholdning på 299 610 kg SF₆ i 2018, mens de rapporterte utslippene har gått ned. Omregnet til kg CO₂-ekvivalenter utgjør anleggsmassen i 2018 over syv millioner kg CO₂. Det er viktig å påpeke at det er frivillig å rapportere om utslipp, som gjør at tallet ikke nødvendigvis er representativt for utslipp av SF₆, men heller gir en pekepinn på utviklingen. Det kan tolkes av figuren at gjennomsnittlige utslipp per anlegg har gått ned.

4.4 Regulering av SF₆

Etter at SF₆ ble omtalt i Kyotoprotokollen i 1997 som en klimagass har det blitt fokus på å redusere og regulere bruken av gassen. I følge IPCCs femte hovedrapport fra 2014 har SF₆ et globalt oppvarmingspotensial (GWP) på 23 500 CO₂-ekvivalenter over en 100-årsperiode og en levetid på 3 200 år i atmosfæren [11]. Den er dermed den sterkeste kjente klimagassen i verden. I figur (4) kan man se hvordan konsentrasjonen av SF₆ nesten har blitt doblet siden den første målingen ble gjort i 2001. Dette sammen med en stadig økning av gassen i kraftsektorens anleggsmasse kan gi grunn til bekymring, spesielt ettersom at gassen har en lang levetid i atmosfæren. Det gjør at utslipp vil akkumuleres i atmosfæren uten å brytes ned.



Figur 4: Måling av SF₆-konsentrasjon ved Zeppelin observatoriet på Svalbard fra 2001 til og med 2017. Konsentrasjonen er oppgitt i ppt, parts per trillion. Kilde: NILU - Norsk institutt for luftforskning [12].

4.4.1 EU og Norge

EU har gjennomført to forordninger om regulering av fluorholdige gasser. Gjennom EØS-avtalen er Norge forpliktet til å gjennomføre regelverk som faller innenfor områder avtalen omfatter. Den første forordningen trådte i kraft i 2006 og omhandlet blant annet reduksjon av SF₆-utslipp og spesifiserte at bruken av SF₆ til magnesiumsstøping forbys, med unntak for støperier med forbruk på under 850 kg i året [13]. Mens andre gasser gjennom forordningen ble pålagt avgift, ble SF₆ unntatt dette.

I 2002 ble det opprettet en avtale mellom kraftsektoren og det daværende Miljøverndepartementet (nå Klima- og Miljødepartementet) som resulterte i Brukergruppen for SF₆-anlegg. Den skulle redusere utslipp av SF₆ gjennom opplæring og tekniske tiltak på bryteranlegg. Selv om avtalen gikk ut i 2010 driver Brukergruppen for SF₆-anlegg fortsatt arbeidet.

I 2014 trådte den reviderte f-gassforordningen i kraft i EU. Forordningen er ikke implementert i EØS-avtalen og Norge har derfor ikke gjennomført den i norsk rett. Den har som formål å redusere utslippene av klimagassene HFK, PFK og SF₆ med to tredjedeler innen 2030. I tillegg fikk magnesiumindustrien et totalforbud mot bruk av SF₆ i 2018. Annen skjerping gjennom den reviderte forordning innebærer blant annet krav til lekkasjetesting av elektriske brytere med SF₆, samt sertifisering for personer som jobber med GIS-anlegg [14]. Selv om forordningen ikke er gjennomført i norsk rett har Brukergruppen for SF₆-anlegg arbeidet med å oppfylle kravene i forordningen. Magnesiumindustrien ble lagt ned i Norge i 2006 etter en gradvis nedfasing som reduserte utslippene i industrien fra 90 tonn årlig til null [15] [16]. I 2020 skal EU på nytt vurdere ytterligere restriksjoner eller forbud mot bruk av SF₆. I slutten av 2018 sendte Europakommisjonen derfor ut et anbud som blant annet skal "undersøke eksistensen av alternativer til svovelheksafluorid (SF₆) i koblingsutstyr og vurdere deres mulighet og markedspotensial" [17]. I Norge ble det i desember 2018 innført rapporteringskrav for SF₆-gass for importører og anleggseiere [18].

4.4.2 California

Siden 2011 har CARB (California Air Resources Board) regulert SF₆ utslipp i California. Alle som eier og driver anlegg med SF₆ er pålagt å sende en årsrapport til CARB innen 1. juni hvert år for aktiviteter og utslipp som skjedde i det foregående kalenderåret [19]. Når reguleringen ble tatt

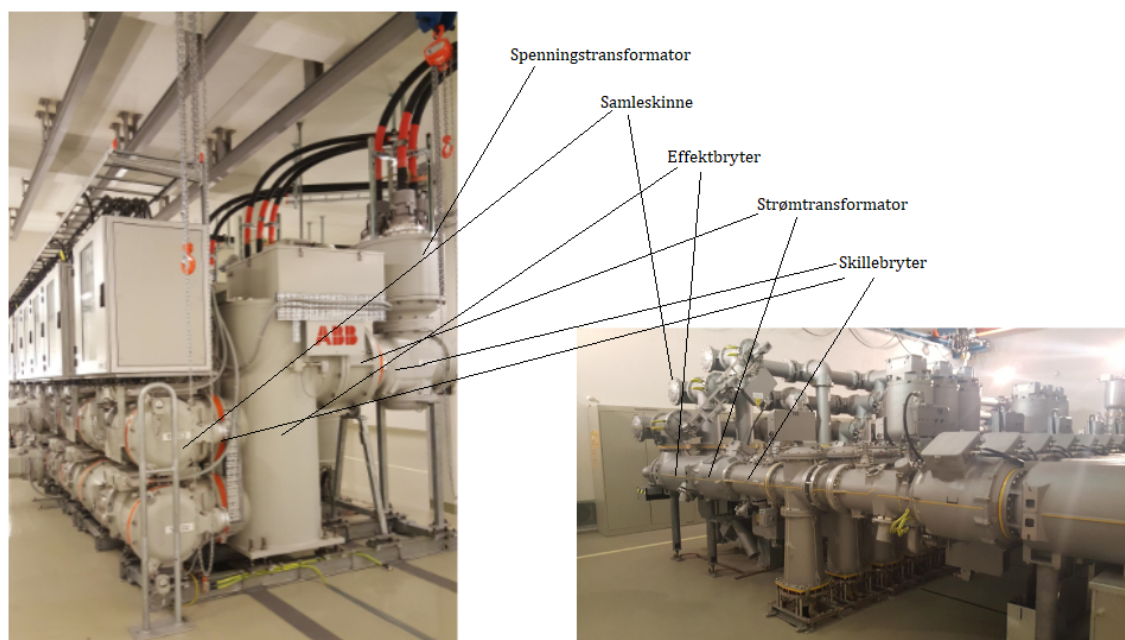
i bruk i 2011 var det tillatt med årlige utslipp på 10 % for hver GIS-eier, men i 2020 skal det bare være tillatt med 1 % utslipp. California har strenge regler for loggføring både av hva som er i beholdning og hvor mye SF₆ som slippes ut [20].

CARB foreslår også en tidsramme for utfasing av SF₆ i nye gassisolerte komponenter. Innen 31. desember 2024 skal SF₆ være fullstendig utfaset i alt utstyr på 72 kV eller mindre, mens 31. desember 2030 skal være måldato for fullstendig utfasing av SF₆ på alle spenningsnivåer [21].

5 GIS-anlegg

Gas Insulated Switchgear, GIS-anlegg, er gassisolerte elektriske bryteranlegg. Anleggene brukes til å styre strømflyt og beskytte nettet. Anlegget kan bryte strømmen både ved normal laststrøm og ved feilstrømmer.

Noen av de viktigste komponenten i et GIS-anlegg er effektbrytere, skillebrytere, jordbrytere, strømtransformatorer og spenningstransformatorer.



Figur 5: To ulike GIS-anlegg. Anlegget til venstre er produsert av ABB og installert i 2019, og anlegget til høyre er et eldre anlegg produsert av Sprecher Energie.

I figur (5) vises to eksempler på GIS-anlegg med SF_6 . I anlegget fra ABB kan man lengst til venstre se de to samleskinnene og den vertikale sylindren som inneholder effektbryteren. Til høyre for den er strømtransformatoren, skillebryteren og spenningstransformatoren. SF_6 -gassen befinner seg inne i kapslingen. I det eldre anlegget levert av Sprecher Energie vises samleskinnen med tre faser lengst bort i bildet, deretter det lange røret med effektbryter, strømtransformator og skillebryter i den rekkefølgen før sokkelen som går ned i gulvet på midten av bildet. En annen samleskinne er koblet til fra den andre siden av bildet og er symmetrisk med venstresiden. Jordbryteren befinner seg på nedsiden av skillebryteren. En stor forskjell på de to anleggene er at det nye anlegget har alle de tre fasene i samme kapsling, mens det eldre anlegget har hver fase innkapslet for seg. Funksjonen til de ulike komponentene blir forklart nedenfor.

Effektbryteren er den komponenten som bryter strømmen i kretsen. Den skal kunne bryte alle strømmer i vanlig drift og kortslutningsstrømmer i tilfeller med feil. Skillebryteren åpner kretsen, men kan ikke bryte strømmen. Den skal være et synlig skille dersom kretsen er åpen, av sikkerhetsmessige grunner. Jordbrytere blir brukt til å koble deler av anlegget til jord, og skal kunne

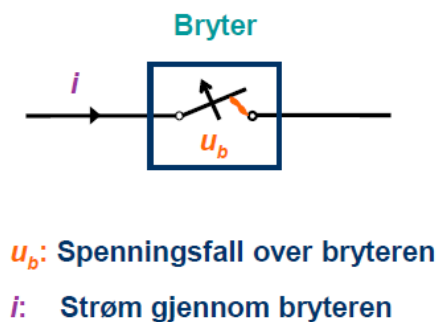
lede strøm til jord om nødvendig. Strøm- og spenningstransformatorer benyttes til å måle strøm og spenning i anlegget. I et GIS-anlegg er alle disse komponentene isolert med en gass i tillegg til at det brukes et brytningsmedium i effektbryteren. Noen av gassene som blir brukt til isolasjon brukes også som brytningsmedium, men for noen løsninger trengs to ulike medier.

I distribusjonsnettet blir det også brukt SF₆-gass i ringkabelanlegg, eller Ring Main Units (RMU). Et ringkabelanlegg er et bryteranlegg laget for spenninger fra 11 kV til 24 kV. Her brukes SF₆ til å isolere kablene slik at anlegget kan bygges mer kompakt. Det virker som de fleste produsentene av RMU bruker effektbrytere med vakuum, men det finnes også med SF₆. Et ringkabelanlegg er forseglet for hele levetiden til anlegget, og SF₆ blir ikke etterfylt. Selv om det vil være lekkasje også ved disse anleggene, vil de inneholde nok SF₆ til å fungere hele levetiden til anlegget.

5.1 Effektbrytere

5.1.1 Teori

Brytere bidrar til å kontrollere strømflyten i en krets. Dersom bryteren er lukket skal strøm kunne flyte fritt gjennom den, men i åpen tilstand skal den bryte forbindelsen mellom to ledere og hindre strømmen fra å flyte. I et kraftnett er dette viktig med tanke på å kunne kontrollere hvor en ønsker at strømmen skal flyte. Figur (6) illustrerer en bryter som åpnes i en krets. Strømmen i går mot null, mens det blir et spenningsfall over bryteren [4].



Figur 6: Figuren illustrerer en del av en krets der det flyter en strøm i som blir brutt av en bryter og hvordan det da dannes et spenningsfall u_b over bryteren [22].

Bryteren er en av de viktigste komponentene i kraftsystemet og det stilles derfor strenge krav til dens egenskaper som elektrisk leder og isolator. Den skal fungere som en nesten perfekt elektrisk leder i lukket tilstand, samtidig som den skal være en perfekt isolator når den er åpen [4].

De vanligste bryterne er lastbrytere og effektbrytere. Lastbrytere anvendes hovedsakelig i distribusjonsnettet. Dette siden de kun klarer å bryte strømmer som er lavere eller like store som den

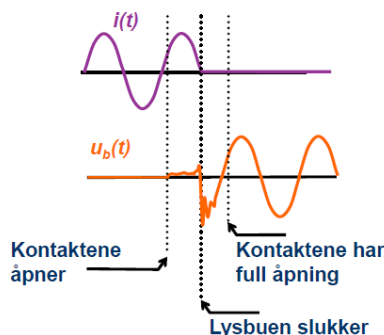
nominelle laststrømmen. Effektbryteren kan anvendes på alle spenningsnivåer på grunn av dens gode egenskap til å bryte alle strømmer, inkludert feilstrømmer, men brukes som regel for spenninger over 11 kV [8]. Figur (7) viser effektbryteren i et SF₆ GIS-anlegg.



Figur 7: Figuren viser hvor effektbryteren er plassert i et GIS-anlegg opp til 145kV fra Siemens. Bildet er tatt med tillatelse fra Siemens.

Figur (8) viser vekselstrømmen $i(t)$ og den tilhørende spenningen $u_b(t)$ over bryteren når den åpnes. Når effektbryteren åpnes brytes ikke kretsen umiddelbart. Det dannes en strømførende lysbue mellom endepunktene på de to lederne som separeres.

Effektbryteren åpnes før nullgjennomgangen, og lysbuen dannes slik at det fortsatt går en strøm mellom de to lederne. Idet strømmen når nullgjennomgangen og blir null skal lysbuen slukkes. Slukkingen skal ideelt skje på første forsøk [22]. Når lysbuen slukkes vil spenningen mellom lederne bygges opp. Da er det den dielektriske holdfastheten til isolasjonsmediet som avgjør om lysbuen gjentennes eller ikke. Jo mer strøm som flyter i kretsen, jo varmere blir lysbuen. I anlegg med høy spenning er det vanskeligere å bryte lysbuen enn for lavere spenninger siden brytermediet er nødt til å kunne holde på mye varme og hindre kammeret rundt fra å varmes opp. Dersom kammeret rundt blir for varmt kan det slites eller i verste fall sprenges. Dette er en av hovedgrunnene til at SF₆ er et så godt alternativ å bruke i effektbrytere. Den har høy spesifikk varmekapasitet som gjør at gassen kan ta til seg mye varme og er derfor et effektiv kjølemedium.



Figur 8: Figuren illustrerer strømmen $i(t)$ gjennom en krets og det tilhørende spenningsfallet $u_b(t)$ over bryteren idet kontakten mellom lederne åpnes. [22]

Effektbryteren klarer ikke alltid å slukke lysbuen på første nullgjennomgang. Når to ledere separeres blir det en spenning mellom de to punktene, dette kalles tilbakevendende spenning og den avgjør om en ny lysbue antennes etter strømmen er blitt null. En antenning vil oppstå dersom den tilbakevendende spenningen overstiger den dielektriske holdfastheten i gapet mellom lederne.

5.1.2 SF₆-brytere

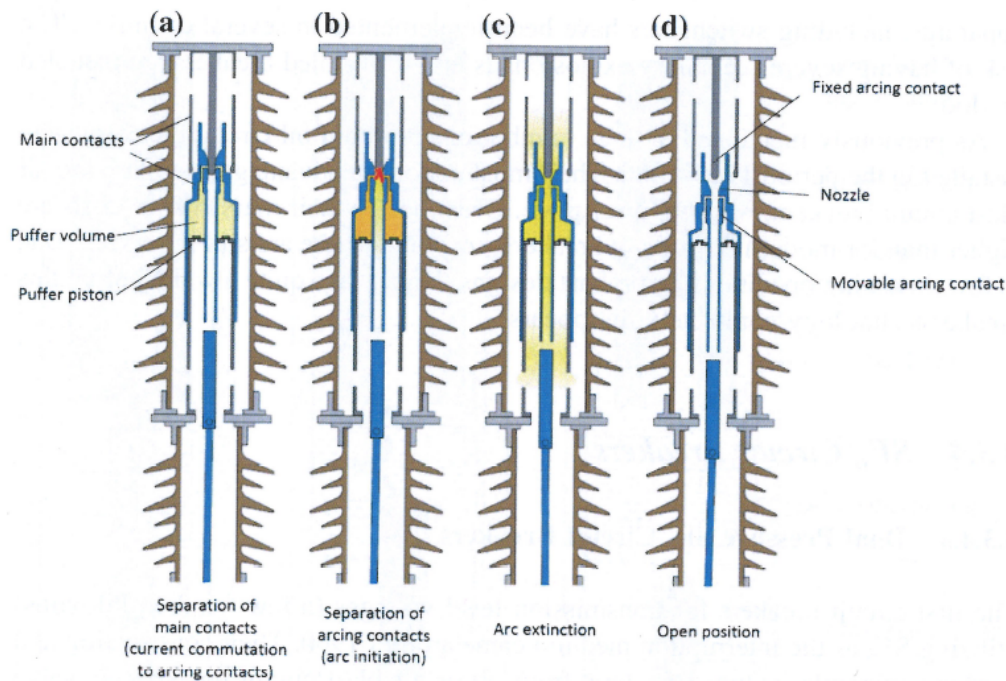
Det er i hovedsak to ulike brytere som inneholder SF₆, dobbel trykkbryter og enkel trykkbryter. Den doble trykkbryteren var populær når den først ble produsert rundt 1960, men på 1970-tallet ble den utkonkurrert av den enkle trykkbryteren. Det finnes fremdeles anlegg som bruker den doble, men den installeres ikke i nye anlegg [23].

Den enkle trykkbryteren kan være en "puffer"-type, en "self-blast"-type eller en blanding av begge. Bryteren av type "puffer" er illustrert i figur (9). Den består blant annet av et stempel, et avbruddskammer, en dyse og en sylinder fylt med SF₆-gass. Før gassen slippes ut for å kjøle ned lysbuen som blir generert når bryteren åpnes, øker trykket i gassen. Det som skiller de enkle trykkbryterne er at "puffer"-typen bruker mekanisk energi fra styringsmekanismen til å øke trykket, mens self-blasttypen bruker varmen generert fra lysbuen. Når den bevegelige kontaktdelen i "puffer" bryteren blir dratt ned minker volumet i sylindren, gassen blir komprimert og trykket øker. I del (b) av figur (9) er lysbuen tent og gassen har fått et økt trykk, mens det i del (c) vises at SF₆-gassen slippes ut og slukker lysbuen [4].

Tilstandsligningen for ideelle gasser,

$$P = \frac{nRT}{V} \quad (1)$$

viser godt hvorfor trykket øker når enten volumet minker eller temperaturen øker. P er trykket målt i Pascal, V er volumet i liter, n er stoffmengden målt i mol, R er den universelle gasskonstanten og T er temperatur i Kelvin.

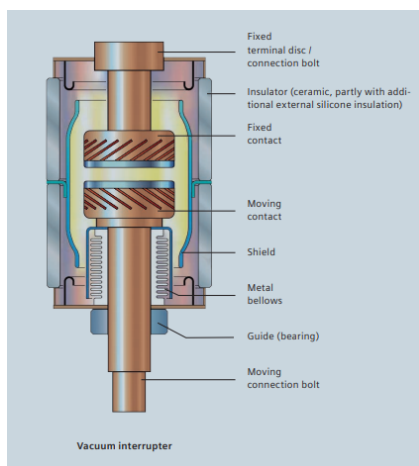


Figur 9: Figuren illustrerer hvordan en puffertype effektbryter fungerer. Når bryteren er lukket leder den strøm (a), men når den åpnes blir SF₆-gassen i sylindren presset sammen (b). Bilde (c) viser at den sammenpressede SF₆-gassen slukker lysbuen. Det siste bildet (d) viser at lysbuen er slukket [4]

5.1.3 Vakuumbrytere

Vakuumbetør betyr tomt rom, det vil si at det ikke er molekyler tilstede i et område med vakuum. I praksis er dette vanskelig å oppnå, og normalt regnes trykk lavere enn 1 Pa som vakuum. Lysbuen trenger ioner for å kunne dannes. I vakuum er det få atomer eller molekyler som kan ioniseres, derfor isolerer vakuum godt. I figur (1) ble det illustrert at vakuum har god dielektrisk holdfasthet frem til rundt 200 kV, etter dette flater kurven ut og større kontaktgap hjelper ikke lengre for å isolere bedre.

Vakuumbryteren er illustrert i figur (10) og (11) og viser innsiden av vakuumbryteren. Den består av to ledere som i lukket tilstand er i kontakt med hverandre og leder strømmen godt. Når lederne separeres vil det kunne dannes en lysbue selv om det ikke befinner seg nok ioniserbart materiale mellom lederne. Dette kommer av at partikler på kontaktflatene danner lysbuen. Derfor har begge kontaktflatene utskjæringer som tvinger lysbuen til å spre seg utover hele flaten istedenfor å lede gjennom ett enkelt punkt. Dersom den leder gjennom ett punkt blir lysbuen sterkere og vanskeligere å bryte, i tillegg til at materialet i dette punktet på kontaktflatene vil ioniseres og bidra til å opprettholde lysbuen. Spredningen av lysbuen blir hjulpet av at kontaktflatene i tillegg roterer og når strømmen er i nullgjennomgangen vil lysbuen slukkes. Det kan også tas i bruk et magnetfelt i effektbryteren til å hjelpe å spre lysbuen ytterligere [24]. På grunn av mangelen på ioniserende partikler i vakuumbryteren kan ikke lysbuen gjenntennes og bryteren slukker derfor alltid lysbuen ved første nullgjennomgang. Vakuumbryteren er forseglet hele sin levetid og er vedlikeholdsfri [25].



Figur 10: Figuren er hentet fra Siemens og viser en vakuumbryter der den øverste kontakten er fast, mens den nederste kan dras frem og tilbake [26].



Figur 11: Figuren viser hvordan en av Siemens vakuumbrytere ser ut på innsiden. Bildet er tatt med tillatelse fra Siemens.

Tradisjonelt opplever vakuumbrytere høyere hyppighet av strømklipping enn SF₆-brytere. Strømklipping skjer når strømmen blir brutt før nullgjennomgangen. Da vil det oppstå overspenninger på grunn av rask endring i strømmen som kan være skadelig for noen typer komponenter. For å unngå skadelige overspenninger brukes avledere [27]. Selv om strømklippingen skjer hyppigere i vakuumbrytere ser det ikke ut som at det er et stort problem for anlegget [28].

Vakuumbrytere i åpen spenningsatt tilstand sender ut røntgenstråling. Denne strålingen har Siemens målt til å være 0,1 μSv per time for 145 kV bryteren, dersom du står en meter fra bryteren. Til sammenligning ligger normal gjennomsnittlig bakgrunnsstråling som en person opplever i løpet av et år på rundt 3,5 mSv årlig [25]. Dette tilsvarer 0,4 μSv per time, som er fire ganger høyere enn for en åpen, spenningsatt vakuumbryter. Strålingsnivået er i utgangspunktet lavt, i tillegg er det lite sannsynlig at en person blir stående ved siden av en åpen bryter over lengre tid. [28].

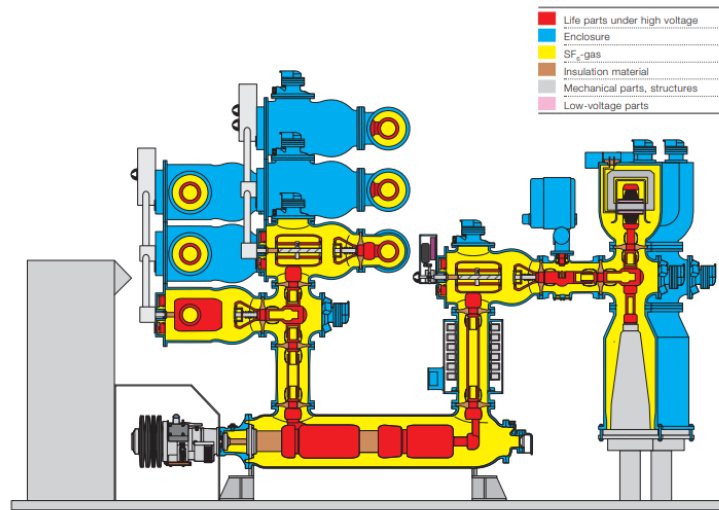
5.1.4 Karbondioksid som et alternativ i effektbrytere

ABB tilbyr kommersielt effektbrytere til 72,5 kV for bruk i utendørs AIS-anlegg som inneholder CO₂ som brytningsmedium istedenfor SF₆. Karbondioksid tåler lave temperaturer uten å kondensere, og er derfor godt egnet til å bruke utendørs [29]. Den dielektriske holdfastheten ligger på 30 % av den til SF₆ [23]. Som nevnt tidligere settes SF₆ under trykk på fem eller seks bar. CO₂ trykkes til nesten det dobbelte, ca 11 bar. En av årsakene til at karbondioksid ikke er like egnet for GIS-anlegg er utfordringer knyttet til det høye fyllingstrykket som må benyttes for CO₂, noe kapslingen ikke tåler [30].

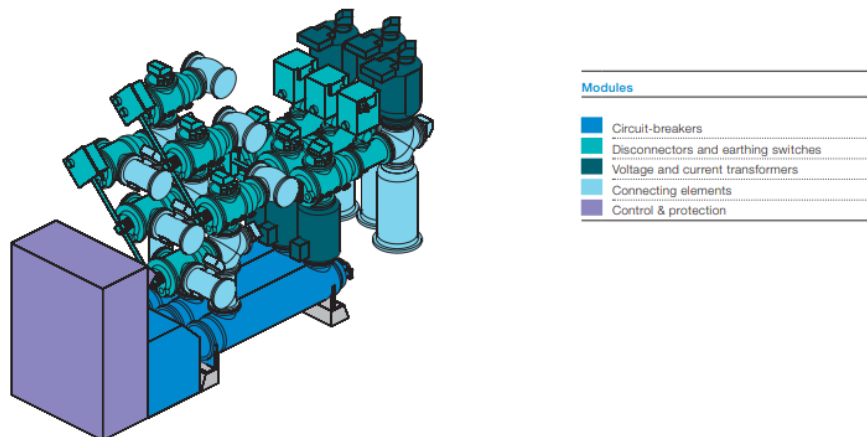
5.2 Isolasjon utenom effektbryterne

Selv om mesteparten av fokuset i rapporten har vært på effektbrytere, er det ikke bare de som inneholder isolasjonsgass. I GIS-anlegg er andre nøkkelkomponenter slik som kontakter og ledere beskyttet med isolasjonsgass.

Figur (12) viser GIS-anlegget ELK-14 fra ABB. De gule områdene er områder med isolasjonsgassen SF_6 . Alle de røde områdene som er strømledende deler utsatt for høy spenning, er beskyttet med SF_6 . Figur (13) viser hva de ulike komponentene i figur (12) er.



Figur 12: Figuren er hentet fra produkt brosjyren til ABB sitt GIS-anlegg ELK-14. Det gule området viser hvor SF_6 gassen befinner seg [31].



Figur 13: Figuren illustrerer hva de ulike delene av ELK-14 er. Det er effektbrytere, skillebrytere, jordingsbrytere, spenning og strøm transformatorer, koblingselementer og kontroll og beskyttelsesboks [31].

6 Alternativer til SF₆ i GIS-anlegg

På mellomspenningsnivåer, fra en til 52 kV, dominerer vakuumbrytere over SF₆ brytere, men på spenningsnivåer over dette brukes hovedsakelig SF₆ i effektbryteren [32]. Vakuum brukes ikke som isolasjonsmedium, bare som brytningsmedium. På mellomspenningsnivå er det mange produsenter av bryteranlegg og de fleste benytter seg av vakuum som brytningsmedium og luft som isolasjonsmedium. Blant disse finner vi Eaton, Schneider Electric og Nuventura. [33] [34] [35]. Hitachi selger også vakuumbrytere opp til 72 kV og Meiden til 145 kV [36] [37]. Eaton og Toshiba produserer også bryteranlegg med vakuumbrytere og epoxyisolasjon opp til henholdsvis 24 kV og 40,5 kV [38] [39]. Denne isolasjonen består av fast stoff og kan ikke omtales som et GIS-anlegg, men har fått betegnelsen "Solid Insulated Switchgear", forkortet SIS.

På det norske markedet er det ABB, GE og Siemens som er de største leverandørene av GIS-anlegg. Alle tre har per idag ulike løsninger for å erstatte SF₆ både som isolasjons- og brytningsmedium. De leverer alle tre SF₆-frie anlegg for spenningsnivå opp til 145 kV.

På høyere spenningsnivå enn 145 kV minker utvalget av tilgjengelige GIS-anlegg uten SF₆. Foreløpig har ABB et anlegg som fungerer opp til 170 kV, mens Siemens annonserte i august 2018 at de utvikler et SF₆-fritt GIS-anlegg som skal fungere opp mot 170 kV [40]. ABB har også annonsert at de skal oppgradere et anlegg på 380 kV for TransnetBW i Tyskland som skal være SF₆-fritt.

6.1 Vakuum og ren luft

Som nevnt er vakuumbrytere og luftisolasjon teknologier som er mye brukt på mellomspenningsnivå og som en har mye erfaring med. På spenningsnivåer over 145 kV finnes det foreløpig ingen anlegg av denne typen. Det er fordi den dielektriske holdfastheten til luft er mye lavere enn for SF₆, og for vakuum stagnerer den dielektriske holdfastheten på dette nivået. For å gi luft en bedre dielektrisk holdfasthet har det blitt satset på bruk av tørr luft og teknisk ren luft. I tørr luft er vanddampen i gassblandingen fjernet, mens teknisk ren luft består av en blanding av nitrogengass og oksyngengass.

Det satses på utvikling i teknologien med vakuumbrytere og luftisolasjon på høyspentnivå, både fordi det er mye erfaring med vakuumbrytere i GIS-anlegg på mellomspenningsnivå og fordi vakuum og luft ikke har noe globalt oppvarmingspotensial. Hovedkilden til utslipp av SF₆ i kraftsektoren er lekkasje fra anlegg under drift, ved gassbehandling (fylling/tømming) eller ulykker. Ved å benytte luft blir utslipp uproblematisk fordi luft ikke har globalt oppvarmingspotensial. Dessuten vil lekkasje av isolasjonslufta heller ikke utgjøre en helseisiko for mennesker da den består av vanlige, ufarlige gasser som allerede befinner seg i lufta. Derfor vil det være mindre risiko knyttet til vedlikehold og drift av anlegget, som også reduserer mengden opplæring av personell [25].

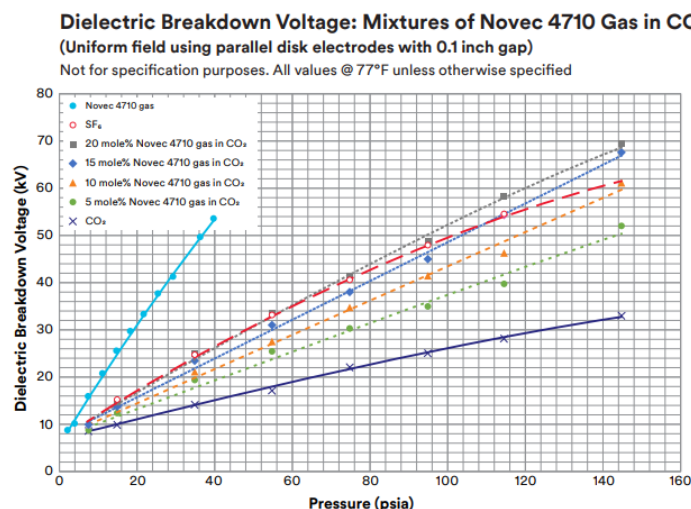
Siemens GIS type "8VN1 blue GIS" for 145 kV bruker vakuum som brytningsmedium og teknisk ren luft, en blanding av 80 % N₂ og 20 % O₂ som isolasjonsmedium [41]. Ren luft isolerer bedre enn vanlig luft, men dårligere enn SF₆. Ren luft har en dielektrisk holdfasthet som er 43 % av den til SF₆. På grunn av dette må dimensjonen på anlegget økes når SF₆ byttes ut med ren luft. Siemens

blue GIS-anlegg for spenninger opp til 145 kV har samme størrelse som deres SF₆-anlegg for 170 kV [25].

I 2025 forventer Siemens at de skal ha produsert et blue GIS-anlegg for spenninger opp til 420 kV. Det virker ikke sannsynlig at selve vakuumbryteren kan få større dielektrisk holdfasthet. Derfor løser de problemet ved å koble to vakuumbrytere i serie. Dette vil føre til flere bruddsteder som gjør anlegget mer komplisert. For SF₆ vil hvor stort dette anlegget er nødt til å være for å få gode nok isolasjonsegenskaper vet man ikke helt enda, men det forventes at anlegget blir større enn et tilsvarende GIS-anlegg med SF₆ [25].

6.2 Fluornitril

Fluornitrilet Novec 4710 er utviklet som et alternativ til SF₆ av 3M. Det består av fluor, karbon og nitrogen med kjemisk formel (CF₃)₂CFCN. I ren gassform har fluornitrilet en dielektrisk holdfasthet som er dobbelt så høy som SF₆ [42]. Gassen har derimot et kokepunkt på -4,72°C [43], som er for høyt til at den kan brukes i ren form. Den må derfor blandes med CO₂ og O₂ og den dielektriske holdfastheten blir da beregnet til å være i området 80 til 100 % av SF₆ [42], og kan tåle temperaturer ned til -30°C i GIS-anlegg før gassen kondenserer. GE har utviklet løsningen Green Gas for Grid, eller g³, som bruker Novec 4710 i gassblanding med CO₂ og O₂. g³ ble valgt som isolasjons- og brytningsmedium på grunn av egenskapene som skal gjøre den mulig å anvende på alle spenningsnivå [44].



Figur 14: Figuren viser gjennomslagsspenning for ulike isolasjonsmedium som funksjon av trykk. (Grafen er hentet fra databladet om Novec 4710 fra 3M [43].)

Figur (14) viser den dielektriske holdfastheten for gassen Novec 4710 i ren form og blandet ut med ulike konsentrasjoner av CO₂ sammenlignet med SF₆ og CO₂. Novec 4710 på fem molprosent blandet med CO₂ ligger på omtrent 80 % av den dielektriske holdfastheten til SF₆.

Den høye dielektriske holdfastheten gjør at dimensjonene på g^3 GIS-anlegg holdes på nivå med SF_6 GIS-anlegg. Nye GIS-anlegg med g^3 er compatible med SF_6 dersom en bytter ut noen deler av anlegget. Her er det hovedsakelig effektbryteren som må endres. Det at de nye g^3 anleggene er bygd nesten helt like som de allerede eksisterende SF_6 -anleggene gjør at anleggene kan driftes veldig likt SF_6 -anlegg. Utstyr til kontroll av gass og anlegg skal i stor grad kunne opereres som ved SF_6 -anlegg [44].

Novec 4710 har $GWP = 2100$ og en levetid i atmosfæren på 30 år [43], som er en reduksjon på over 90 % sammenlignet med SF_6 , men fortsatt mer enn andre alternativer. g^3 er en gassblanding med seks molprosent Novec 4710, ti molprosent O_2 og resten CO_2 , og derfor blir det globale oppvarmingspotensialet betraktelig lavere. For en sammensetning av g^3 med 6 % Novec 4710 er det beregnet en GWP -verdi på 467. Det blir da brukt i et 145 kV GIS-anlegg [45]. Det er en reduksjon på 98 % i globalt oppvarmingspotensial sammenlignet med SF_6 . Anlegget skal ha en maksimal lekkasje på 0,2 % av beholdningen per år [44].

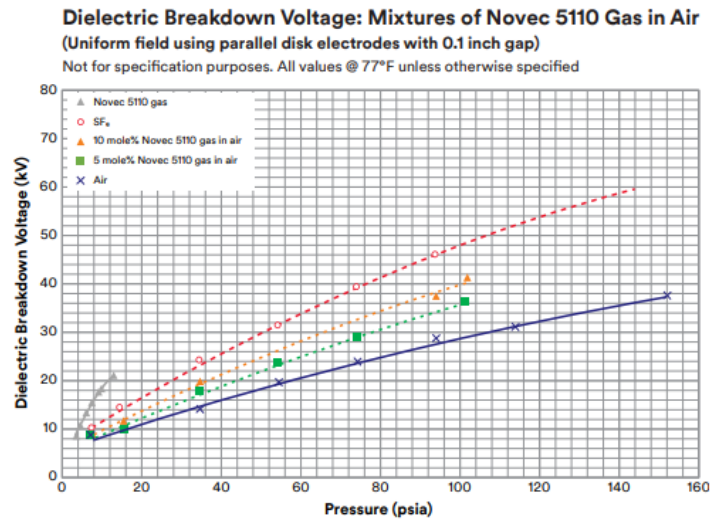
Novec 4710 er ikke brennbar, men den er mildt giftig. Den har en TWA-verdi på 65 ppm som betyr at det i løpet av en åtte timers arbeidsdag, fem dager i uken over en periode på mer enn 30 år er trygt å bli eksponert for denne mengden av gassen [46]. Til sammenligning har karbonmonoksid en TWA på 25 ppm som er en betydelig lavere verdi det er trygt å bli eksponert for. I gassblandingen g^3 vil konsentrasjonen bli enda mindre og den regnes derfor ikke som giftig.

g^3 kan brukes både som brytningsmedium i effektbrytere og som isolasjonsmedium. Per dags dato tilbyr GE kommersielt opp til 145 kV GIS-anlegg, opp til 420 kV gassisolerte linjer, GIL, strømtransformatorer opp til 245 kV og spenningstransformatorer opp til 132 kV. Av disse er det installert 12 GIS-anlegg, fem GIL og tre strømtransformatorer. GIS-anlegg opp til 420 kV er under utvikling, men det ventes på høyere etterspørsel for at det skal produseres [44].

6.3 Fluorketon

Et annet alternativ til SF_6 er fluorketonet Novec 5110, også utviklet av 3M. Novec 5110 er et C_5 -fluorketon som består av karbon, fluor og oksygen. Den kjemiske formelen er $CF_3C(O)CF(CF_3)_2$ [47]. Gassen har en dielektrisk holdfasthet som er 1,4 ganger høyere enn SF_6 , men kokepunktet er på 27°C. Det er for høyt til at gassen kan brukes i ren form under driftsforhold ned mot -30°C, i tillegg til at kokepunktet også vil øke når gassen blir trykksatt. Den må derfor, i likhet med fluornitril, blandes ut for å opprettholde gassform og dermed kunne brukes i GIS-anlegg. Da minker den dielektriske holdfastheten [48]. Fluorketonet blandes med gassene O_2 , N_2 og CO_2 [49], og det er dette ABB bruker i sin løsning AirPlus i SF_6 -frie GIS-anlegg. AirPlus består av 5 - 8 % Novec 5110 og resten en blanding av de tre andre gassene, og den kan brukes som både isolasjons- og brytningsmedium. Nivået av Novec 5110 i gassblandingen og sammensetningen av de andre gassene varierer med spenningsnivå og type utstyr. Det brukes høyere prosentandel Novec 5110 i effektbryteren enn ellers i GIS-anlegget [30].

I figur (15) ser man at Novec 5110 i ren form har høyere dielektrisk holdfasthet enn SF_6 , men at utblandet Novec 5110 ikke isolerer like bra.



Figur 15: Figuren illustrerer dielektrisk gjennomslagsspenning for Novec 5110, utblandet Novec 5110 og SF₆ som funksjon av trykk. Grafen er hentet fra databladet om Novec 5110 fra 3M [47].

Som fluornitrilet er gassen er ikke brennbar, men mildt giftig da Novec 5110 har en TWA-verdi på 225 ppm [50]. Dette gjelder for ren Novec 5110, mens det i AirPlus bare vil være maksimalt 8 % av ren Novec 5110 tilstede. Derfor vil det ved utslipp i form av større lekkasjer være lave konsentrasjoner av gassen tilstede, og med gode rutiner ved håndtering av gassen forventes det ikke å være et stort problem [50]. Novec 5110 har et globalt oppvarmingspotensial som er mye lavere enn for SF₆ med GWP ≤ 1, noe AirPlus-løsningen dermed også har. I tillegg er levetiden til Novec 5110 i atmosfæren 0,04 år [47], som tilsvarer 15 dager.

ABB leverer GIS-anlegget "ELK-04 AirPlus" for spenninger opp til 170 kV [51]. GIS-anlegg med AirPlus er bygd opp veldig likt som deres SF₆ anlegg, men dimensjonene blir større. For et AirPlus-anlegg på 145 kV vil dimensjonene bli det samme som for et 170 kV SF₆-anlegg. De har også et anlegg for 380 kV under utvikling, og forventer at de skal kunne levere anlegg for enda høyere spenninger dersom det er etterspørsel for det.

6.4 SF₆-frie anlegg solgt og i drift

BKK Nett tar som de første i verden i bruk Siemens' blue GIS-anlegg for spenningsnivå på 132 kV med vakuum og teknisk ren luft som henholdsvis isolasjons- og brytningsmedium. Anlegget skal stå ferdig våren 2020 på Koengen i Bergen. Siden dette er et pilotprosjekt som enda ikke er ferdigstilt, vil det ta flere år før en kan si med sikkerhet at det er et godt alternativ til GIS-anlegg med SF₆ på tilsvarende spenningsnivå. Det er foreløpig forventet mindre vedlikeholdsarbeid på anlegget sammenliknet med SF₆, da en slipper å håndtere farlige gasser og organisering av opplæring rundt dette. BKK vil ha fokus på ny teknologi i fremtidige utbygginger av GIS-anlegg, og signerte 1. juli 2019 en kontrakt med Siemens om et nytt blue GIS-anlegg på Bildøybakken [52].

I Norge har Siemens også solgt 145kV blue GIS-anlegg til Røros Elektrisitetsverk og Trønderenergi [53].

ABB startet i 2015 et 36 måneders prosjekt sammen med nettselskapet Liander i Nederland der de testet RMU-anlegg på 20 kV med AirPlus istedenfor SF₆. De testet hvordan AirPlus klarte seg i forhold til SF₆. De samlede dataene og gassprøvene viser at isolasjonsgassen fungerer bra til både å bryte og isolere. Anlegg med AirPlus skal altså fungere like godt som SF₆-anlegg. [54].

I 2015 installerte også ABB sitt første AirPlus GIS-anlegg opp til 170 kV i Zürich i Sveits. Det nye anlegget erstattet et AIS-anlegg fra 1949 og tok bare opp 30 % av plassen i forhold til det gamle anlegget [55]. Det er ikke lagt ut offentlig informasjon om hvordan dette pilotprosjektet har klart seg.

I Norge har Lyse Elnett installert AirPlus GIS-anlegg for spenninger opp til 40,5 kV fra ABB. De ser ut til å være de første i Norge som tar i bruk denne løsningen [56].

I 2018 mottok ABB en ordre på 40 millioner dollar fra tyske transmisjonsnettoperatør TransnetBW for å oppgradere et høyspenningsanlegg i Obermoowweiler i Baden-Wuerttemberg. Det nye GIS-anlegget skal være på 380 kV og skal inneholde en miljøvennlig alternativ gass til SF₆. Dette vil være det første GIS-anlegget på 380 kV med en alternativ gass [57]. Konstruksjonen av anlegget er planlagt for 2019 til 2021 [58], men anlegget er ikke levert enda [29].

Den sveitsiske energigruppen Axpo bestilte i 2017 et g³ GIS-anlegg for 145 kV fra GE. Fluornitrilgassen er brukt både som isolasjon- og som brytningsmedie i anlegget. 21. november 2017 ble vellykkete høyspentstester utført på anlegget foran både kjøperne og andre interesserte fra Nederland, Frankrike og Sveits. Anlegget skal fungere akkurat som et tilsvarende SF₆-anlegg, og oppnå samme ytelse, med samme størrelse, under de samme temperaturforholdene ned til -25°C, men med en mindre global oppvarmingseffekt sammenlignet med SF₆-fylt GIS [59].

I Danmark har GE en avtale med det danske nettselskapet Cerius om å installere to nye GIS-anlegg med til sammen 13 felt til 72,5 kV med g³. Cerius mener at de nye, mer miljøvennlige anleggene vil fungere like bra som tilsvarende SF₆ GIS-anlegg [60].

Frem til nå har produsentene solgt og levert ut GIS-anlegg opp til 170 kV, men ikke høyere. En av hovedgrunnen til dette er at de venter på etterspørsel fra markedet.

6.5 Livssyklusanalyser for SF₆-frie GIS-anlegg

Samtlige av leverandørene av GIS-anlegg uten SF₆ har laget livssyklusanalyser der de ser på miljøpåvirkningen til SF₆-frie anlegg over hele livsløpet til et anlegg. Her kan alle vise til en reduksjon i antall CO₂-ekvivalenter anleggene bidrar med gjennom levetiden sammenlignet med et GIS-anlegg med SF₆. Rammene for analysene fra hver leverandør har vært ulike, og det er derfor vanskelig å sammenligne de tre anleggene fra Siemens, GE og ABB på likt grunnlag. De viser derimot fordelene med et SF₆-fritt GIS-anlegg, og grunnen til at disse anleggene har blitt utviklet

som alternativer til SF₆.

6.6 Sammenlikning av alternativene

Fluornitril- og fluorketongassene brukes både som isolasjons- og brytningsmedium, mens GIS-anlegg med vakuumbryter er nødt til å inneholde et annet isolasjonsmedium, som foreksempel ren luft. Fordelen med ren luft i forhold til fluornitril og fluorketon er at den ikke inneholder fluorgasser og ikke har et globalt oppvarmingspotensial, men ulempen med ren luft er at den har dårligere dielektrisk holdfasthet.

De nye alternative GIS-anleggene bygger alle sammen på produsentenes SF₆-anlegg som de har mye erfaring med. Dette gir en ekstra trygghet, ettersom personell ikke trenger mye opplæring i nytt utstyr. Dimensjonene på anleggene har økt en størrelse på Siemens og ABBs løsning, mens GEs anlegg holder den samme størrelsen som et tilsvarende SF₆ anlegg.

Alle løsningene er gode løsninger som har gjennomgått omstendig testing før godkjenning til bruk i kraftnettet. De har ulike begrensninger, avhengig av hvilke teknologier produsentene har satset på. For løsningen med vakuum og teknisk ren luft er det fortsatt usikkert hvordan størrelsen på anlegget vil være for de høyeste spenningsnivåene i kraftnettet. Før alternativer på spenningsnivå over 145 kV blir kommersielt tilgjengelig er det nødvendig med ytterligere utvikling av teknologien. Til gjengjeld er teknisk ren luft hverken skadelig for miljøet eller giftig. Det gjør at man ikke trenger like strenge sikkerhetsrutiner som for de andre alternativene, men dersom det må gjøres arbeid på anlegget kan teknisk ren luft slippes rett ut. Det er ingen fare for at giftige spaltningsprodukter produseres i vakuumbryteren.

Løsningene med fluorketon og fluornitril bruker begge gassblandinger som må overvåkes og som man trenger rutiner på lik linje som ved bruk av SF₆ ved håndtering av gassen dersom den må evakueres fra anlegget eller byttes/etterfylles. Det medfører mer opplæring av personell. Begge gassblandingen har den fordelen at den dielektriske holdfastheten er såpass høy at begge produsentene av GIS-anleggene mener de kan levere anlegg til spenninger over 145 kV dersom det blir større etterspørsel. Fluorketonet i Novec 5110 har en lav GWP, mens den til fluornitril i ren Novec 4710 fortsatt har et høyt oppvarmingspotensial.

I tabell (1) er egenskapene til SF₆ og de alternative løsningene lagt inn. Egenskapene til Novec-gassene gjelder for ren form. Det er lite informasjon å finne om verdiene til de utblandede gassene. Verdiene av spesifikk varmekapasitet gjelder for gass under 1 bar trykk og 25 °C. Den dielektriske holdfastheten er satt opp i forhold til SF₆, altså har ren Novec 5110 1,4 så god dielektrisk holdfasthet enn SF₆, mens Novec 4710 er dobbelt så god og karbondioksid og ren luft har dårligere dielektrisk holdfasthet. Novec-gassene er tidligere nevnt som mildt giftige, men de har så lav toksisitet at gassblandingen ikke regnes som giftige.

Tabell 1: Sammenlikning av de elektriske egenskapene til ulike isolasjons- og brytningsmedier

	Medium					
	Svoelheksafluorid	Novec 5110	Novec 4710	Vakuum	Karbondioksid	Ren luft
Kjemisk formel	SF ₆	CF ₃ C(O)CF(CF ₃)	(CF ₃) ₂ CFCN	-	CO ₂	N ₂ og O ₂
Dielektrisk holdfasthet	1	1,4	2		0,33	0,43
Spesifikk varmekapasitet kJ/mol · K	0,097	0,351	0,160*	-	0,037	
Kokepunkt °C	-64	26,9	-4,7	-	-57	-183
Tetthet kg/m ³	6,15	1547	8,11	-	1,67	
Giftig	✗	mildt giftig	mildt giftig	✗	✗	✗
Brennbar	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Rekombinasjon	✓	✗	✗	-	✗	-
GWP	23 500	<1	2100	0	1	0
Levetid i atmosfæren år	3200	0,04	30	-	~300	-
Bryttermedium	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Isolator	✓	✓	✓	✗	✓	✓

Verdiene for dielektrisk holdfasthet er oppgitt relativt til SF₆, spesifikk varmekapasitet er oppgitt ved 25°C og 1 bar. Her er verdiene for isobarisk spesifikk varmekapasitet oppgitt.

*ved 20°C

6.6.1 Prissammenlikning

Foreløpig er de nye GIS-anleggene dyrere enn et konvensjonelt SF₆-anlegg, men ettersom det er flere aktører med konkurrerende løsninger kan det forventes at prisen vil falle [52]. Dersom EU i sin neste vurdering av SF₆ kommer frem til ytterligere restriksjoner på gassen, kan dette også føre til at de nye løsningene får et økonomisk fortrinn.

For mellomspenningsnivå er forventet kostnad på et GIS-anlegg med vakuumbryter og luftisolasjon lavere enn et SF₆-anlegg [61].

6.7 Mulige fremtidige løsninger

En gass som det har blitt forsket en del på i forbindelse med søket etter andre mulige erstattere av SF₆ er CF₃I. Denne gassen har en dielektrisk holdfasthet som 1,23 ganger høyere enn SF₆. Det globale oppvarmingspotensialet ligger mellom en og fem med en atmosfærisk levetid på 0,005 år. Dette er den eneste gassen omtalt i denne rapporten som har et potensial til å bryte ned ozon i atmosfæren, men det er fortsatt lavt sammenlignet med kjente ozonnedbrytende gasser. Gassen er ikke brennbar, men kan være mildt giftig. Dessuten er noen av spaltningsproduktene som kan oppstå i kontakt med en lysbue giftige, i likhet med spaltningsprodukter fra SF₆. Det må likevel påpekes at det er en veldig liten del av gassen som blir dekomponert i kontakt med en lysbue [2].

CF₃I har et relativt høyt kokepunkt på -22,5°C. Dette gjør at gassen må blandes ut for å kunne holdes i gasstilstand ved lavere temperaturer og høyere trykk. Da synker den dielektriske holdfastheten i likhet med blandingene av fluornitril og fluorketoner.

Det er foreløpig ingen produsenter som har tatt i bruk denne gassen, og det virker som om det er uenighet om gassen er egnet til bruk i GIS-anlegg [2] [23].

6.8 Interesse for alternative isolasjons- og brytningsmedier i GIS-anlegg i Norge

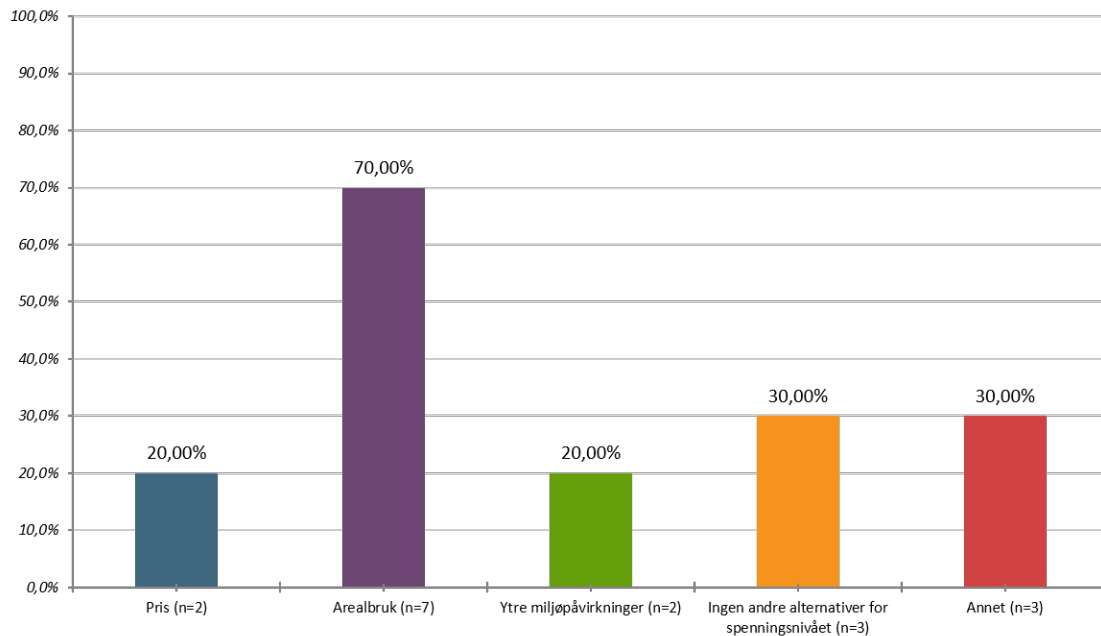
I Norge virker det som om interessen for SF₆-frie GIS-anlegg på høyspentnivå øker, ettersom stadig flere nettselskaper sender inn konsesjonsøknader der GIS-anlegg på 132 kV uten SF₆ er satt opp enten som det eneste alternativet eller som et av flere alternativer som vurderes. "blue GIS" fra Siemens er nevnt av flere og begrunnes blant annet med at den bygger på en allerede velprøvd teknologi, vakuumbryteren. Ellers begrunnes valg av SF₆-frie anlegg med et ønske om å være mer miljøvennlig, lavere risiko for driftspersonell og mindre årlige vedlikeholdskostnader.

6.8.1 Spørreundersøkelse

I starten av sommeren 2019 ble det sendt ut en spørreundersøkelse til relevante medlemmer i brukergruppen for SF₆-anlegg. Undersøkelsen hadde som mål å kartlegge bruk av SF₆ i kraftsektoren og interessen for nye alternativer til SF₆ i GIS-anlegg.

På grunn av blant annet ferie kunne ikke alle svare. Det endte derfor opp med at 17/37 svarte på undersøkelsen. På alle spørsmålene gjengitt i rapporten har man kunnet velge flere svaralternativer, og det var også mulighet til ikke å svare på et spørsmål. Svarprosenten oppgitt over hver søyle viser hvor mange som har svart det aktuelle alternativet ut av antall svar på spørsmålet.

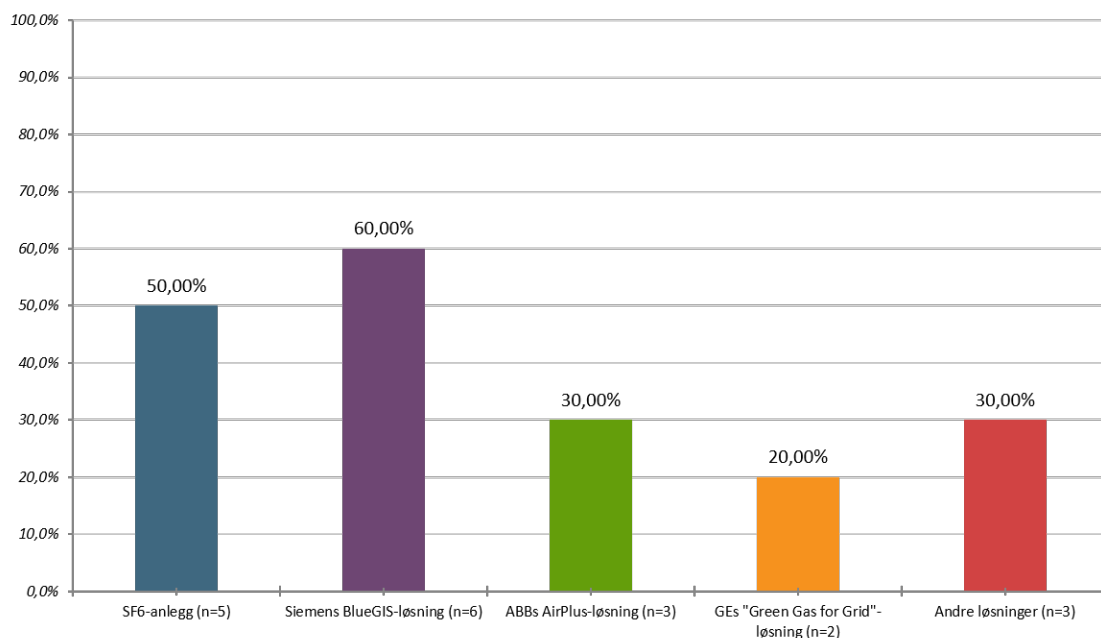
Hvorfor ble GIS-anlegg med SF₆ valgt?



Figur 16: I dette diagrammet viser x-aksen andelen svar i prosent, mens y-aksen viser de ulike svaralternativene for spørsmålet om hvorfor det ble valgt GIS-anlegg med SF₆ når de tidligere anskaffet anlegg.

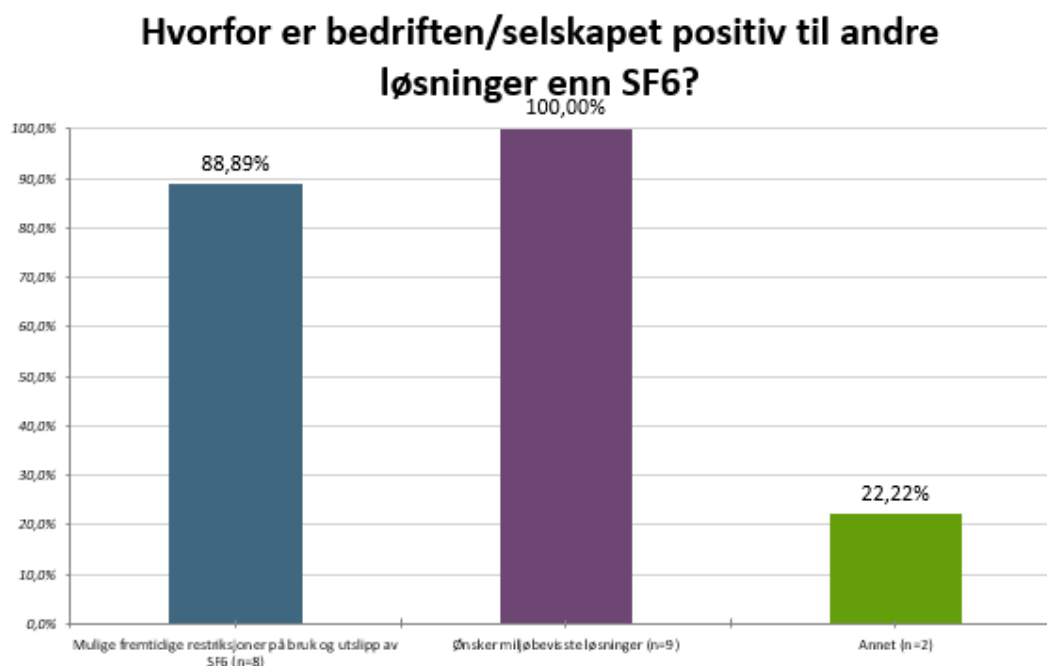
I figur (16) vises andelen svar på hvorfor det ble valgt å bygge GIS med SF₆ da anlegg i den eksisterende anleggsmassen ble bygd. Dette underbygger det som tidligere er sagt om at GIS blir valgt over AIS på grunn av arealbruk, og at GIS med SF₆ ble valgt da det ikke var alternative GIS med andre gasser tilgjengelig på spenningsnivået som ble bygd ut. Ytre miljøpåvirkninger er påvirkningen av beliggenhet og vær på anlegget, og det ble også oppgitt under "Annet". Pris har vært av mindre viktighet enn de andre alternativene.

Hvilke type GIS-anlegg er mest aktuelle?



Figur 17: I dette diagrammet viser x-aksen andelen svar i prosent, mens y-aksen viser de ulike svaralternativene for spørsmålet om hvilke type GIS-anlegg som er mest aktuelle når de skal bygge nytt anlegg eller erstatte et eldre.

På et spørsmål om planlegging av nye anlegg de neste 5 årene svarte 9 at de planlegger nye anlegg. For de fleste gjelder dette anlegg på 132-145 kV, men noen få svarte at de planlegger anlegg for høyere spenninger. I figur (17) vises hvilke typer anlegg de som har svart mener er mest aktuelle for dem. Av de som svarte på undersøkelsen er det blue GIS som flest er interessert i. Under andre løsninger går det igjen at det er flere løsninger som er aktuelle og de ikke har noen løsninger de foretrekker over de andre. Alternativet å bygge nye SF₆-anlegg scorer også høyt, som viser at det fortsatt er aktuelt å bygge GIS med SF₆. Noen grunner til dette kan være enten at det fortsatt er billigere, at det er det eneste tilgjengelige alternativet over 145 kV eller at det ikke har vært god nok åpenhet rundt teknologiene og forventet leveringstid på de nye anleggene.



Figur 18: I dette diagrammet viser x-aksen andelen svar i prosent, mens y-aksen viser de ulike svaralternativene for spørsmålet om hvorfor de er positive til andre løsninger enn SF₆.

Figur (18) viser hvorfor selskapene er interesserte i å bygge nye GIS-anlegg uten SF₆. Det stemmer med det som blir begrunnet i konsesjonssøknader for valg av nye løsninger der alle oppgir at de ønsker miljøbevisste løsninger. I tillegg viser det at selskapene vil kjøpe anlegg uten SF₆ for å unngå å møte på restriksjoner i fremtiden.

7 Diskusjon

Innledningsvis ble det nevnt at store deler av informasjonen som er å finne i rapporten om alternativer til SF₆ i GIS-anlegg er hentet direkte fra produsentene, enten i form for informasjon tilgjengelig på internett eller fra samtaler med talspersoner fra bedriftene. Dette har resultert i en informasjonssamling som ikke fullstendig baserer seg på uavhengige kilder. Likevel mener vi at dette er troverdige kilder, fordi de sitter på mye kunnskap om sitt produkt. Etterhvert som teknologien blir mer utprøvd og det skaffes erfaringer fra utbygde anlegg forventes det å komme mer uavhengig informasjon om de alternative løsningene til SF₆ som kan gi et bedre helhetlig bilde av de nye løsningene.

ABB, GE og Siemens mener alle tre at de kan utvikle SF₆-fri GIS-anlegg opp mot 420 kV, dersom det er etterspørsel for det. Dette kan tyde på at teknologien er kommet ganske langt på kort tid og at det ikke vil være for store utfordringer med å produsere GIS-anlegg for de høyeste spenningsnivåene.

I rapporten har vi tatt utgangspunkt i de svarene vi fikk på spørreundersøkelsen som gir en del informasjon om hvordan nettselskapene tenker rundt alternative løsninger til SF₆ i GIS-anlegg. Halvparten av de som fikk tilsendt undersøkelsen svarte i løpet av fristen, så svarene er ikke nødvendigvis representativt for hvordan alle tenker.

På spørsmål om hvorfor en er positiv til andre løsninger enn SF₆ kom det frem i spørreundersøkelsen at ønsket om miljøbevisste løsninger veide tyngst, men at mulige restriksjoner på bruk og utslipp av SF₆ også var en viktig grunn. I nylige konsesjonssøknader sendt inn til NVE skriver også mange at de vurderer og ønsker mer miljøvennlige alternativer til SF₆. Ut fra dette kan nødvendigheten for avgifter på SF₆ diskuteres.

Et ønske om miljøbevisste løsninger kan vise hvordan selskaper eller bedrifter av eget initiativ vil gå vekk fra SF₆ og heller satse på nye teknologiske løsninger uten et stort globalt oppvarmingspotensiale. Med en slik innstilling kan utviklingen og overgangen fra SF₆ til alternative isolasjons- og brytningsmedier skje av seg selv.

Det andre svaret som også var en viktig grunn, mulige fremtidige restriksjoner på bruk og utslipp av SF₆, viser at deler av den interessen vi har sett til nå også kan begrunnes med at man vil unngå restriksjoner. Det kan vise at avgifter på SF₆ vil kunne ha en nytte ved å fremskynde et skifte til alternative løsninger dersom det er ønskelig. Restriksjoner på bruk og utslipp av SF₆ kan også bidra til en utvikling der anlegg med høyere lekkasjerate blir faset ut, mens nyere anlegg med lavere lekkasjerate eller andre gasser blir prioritert fra et økonomisk perspektiv.

Denne rapporten har i liten grad tatt for seg miljøpåvirkningen av GIS-anlegg med SF₆ sammenlignet med de nye alternativene over hele livsløpet til anleggene. Slike livssyklusanalyser (LCA) har blitt utført av produsentene av anleggene, men ettersom det ligger lite informasjon tilgjengelig om hvordan analysene har blitt utført og om resultatene har de ikke blitt inkludert i rapporten. En LCA utført av en uavhengig part, som kan sammenligne alle de ulike tilgjengelige alternativene av GIS-anlegg, vil kunne gi god innsikt i og si mye om den totale effekten av å fase ut SF₆ i bryteranlegg.

Referanser

- [1] Koch, D. (2003). *Cahier technique no. 188 - SF₆ properties, and use in MV and HV switchgear* (rapport) Schneider Electric.
- [2] Xiao, S., Zhang, X., Tang, J & Liu, S. (2017). *A review on SF₆ substitute gases and research status of CF₃I gases.* (Rapport 4(2018)s. 486-496). Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484717301178?via%3Dihub> (Hentet: 21.06.2019).
- [3] Rouabeh, J. M'barki, L. Hammami, A. Jallouli, I & Driss, A. (2019) *Studies of different types of insulating oils and their mixtures as an alternative to mineral oil for cooling power transformers* Tilgjengelig fra: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6423702/>. (Hentet: 08.07.2019).
- [4] Niayesh, K & Runde, M. (2017). *Power Switching Components - Theory, Applications and Future Trends.* Trondheim: Springer international publishing.
- [5] Skotland, C. H. (2017) *Gassisolerte og luftisolerte bryteranlegg - En sammenligning av kostnader, miljøpåvirkning og forsyningssikkerhet* (NVE-rapport 55-2017) Oslo: NVE. Tilgjengelig fra: http://publikasjoner.nve.no/rapport/2017/rapport2017_55.pdf (Hentet: 04.07.2019).
- [6] GE. *The Basics of Arc Flash.* Tilgjengelig fra: https://www.geindustrial.com/sites/geis/files/gallery/The-Basics-of-Arc-Flash-Article_GE_Industrial_Solutions_0.pdf. (Hentet: 08.07.2019).
- [7] Solvay Special Chemicals. *Sulphur Hexafluoride.* Tilgjengelig fra: https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/2018-08/SF6-Sulphur-Hexafluoride_0.pdf (Hentet: 23.08.2019).
- [8] Rondeel, W., Syed, S. & Bonden, A. (2017). *SF₆ i høyspentssektoren - En rapport om dagens anvendelse av SF₆, prognoser fram til år 2030 samt mulige alternativer til SF₆.* (Bergfald rapport M-737—2017) Bergfald Miljørådgivere AS.
- [9] Bane nor. *Instruks for drift og vedlikehold av SF₆-anlegg og brytere for Energi .* Tilgjengelig fra: <https://www.banenor.no/elkraft/ih/docs/sty/STY-600523.pdf>. (Hentet: 09.07.2019).
- [10] Sintef (2019) *Gassregnskap 2018* Brukergruppen for SF₆-anlegg. (Hentet: 05.07.2019)
- [11] Greenhouse Gas Protocol. *Global Warming Potential Values.* Tilgjengelig fra: https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf (Hentet: 21.06.2019).
- [12] Myhre, C. L. m. fl. (2018) *Monitoring of greenhouse gases and aerosols at Svalbard and Birkenes in 2017 - Annual report* NILU report (29/2018). Tilgjengelig fra: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m1124/m1124.pdf> (Hentet: 15.08.2019).
- [13] Regjeringen.no (2010). *F-gassforordningen.* Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/sub/eos-notatbasen/notatene/2004/nov/f-gassforordningen/id2431723/>. (Hentet: 08.07.2019).
- [14] Regjeringen.no (2018) *Revidert F-gassforordning.* Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/sub/eos-notatbasen/notatene/2014/juni/revidert-f-gassforordning-/id2434380/> (Hentet: 20.06.2019).
- [15] Herøya Industripark. *Vår historie* Tilgjengelig fra: <https://www.heroya-industripark.no/om-industriparken/vaar-historie> (Hentet: 04.07.2019).
- [16] Gaustad, A. (2019). Presentasjon: *Om SF₆.* Miljødirektoratet
- [17] Europakommisjonen. (2018). *call for tenders clima/A.2/SER/2018/0011.*
- [18] Lovdata (2019). *Forskrift om begrensning i bruk av helse- og miljøfarlige kjemikalier og andre produkter (produktforskriften) - Kapittel 6a. Regulering av fluorholdige stoffer* Tilgjengelig fra: https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-922/KAPITTEL_8#%C2%A76a-5. (Hentet: 21.08.2019).
- [19] California Air Resources Board. *Electricity Transmission and Distribution Greenhouse Gas Emissions: Annual Reporting.* Tilgjengelig fra: <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/elec-tandd/annual-reporting>. (Hentet: 05.07.2019).

- [20] California Air Resources Board. *Final regulation order*. Tilgjengelig fra: <https://ww3.arb.ca.gov/regact/2010/sf6elec/completesf6.pdf>. (Hentet: 05.07.2019).
- [21] Latham & Watkins LLP. (2019). *CARB Amending SF6 Regulation: Stricter Requirements for California Electrical Equipment*. Tilgjengelig fra: <https://www.globalelr.com/2019/03/carb-amending-sf6-regulation-stricter-requirements-for-california-electrical-equipment/>. (Hentet: 08.07.2019).
- [22] Runde, M & Støa-Aanensen, N. (2015). Presentasjon: *Strømbrytning i likestrømnett*. Sintef Energiforskning AS.
- [23] Eves, M. (2018). *A Literature Review on SF6 Gas Alternatives for use on the Distribution Network*. (Rapport) Western power distribution.
- [24] Komatsu, H., Saito, H., Furuhashi, T. (2015) *Progress of Vacuum interrupter (VI) and Recent Technical Trends* MEIDEN REVIEW. Tilgjengelig fra: <https://pdfs.semanticscholar.org/e7b8/22eee76524aacfde322662f4343bd540e03c.pdf> (Hentet: 15.08.2019).
- [25] Stadheim, L & Grossmann P. (28.06.2019). Market Manager for Siemens Norge & sjef for internasjonal kundebehandling (Siemens). Møte.
- [26] Siemens. (2016). *Vacuum Switching Technology and Components for Medium Voltage*. Tilgjengelig fra: https://www.siemens.be/in/documentation/upload/documents/Vacuum_Switching_Technology_and_Components_for_Medium_Voltage_Catalog_HG_11.01_2016_7548.pdf. (Hentet: 02.07.2019).
- [27] Venna, K. Urbanek, H Anger N. (2017). *Difference between switching of motors generators with vacuum technology*. Siemens AG
- [28] Runde, Magne. Sintef. (05.08.2019). Telefonsamtale.
- [29] Lysaker-Christiansen, E & Torbergsen, G. (15.08.2019) Oslo: Møte. ABB.
- [30] Torbergsen, G. (19.08.2019). E-postkorrespondanse.
- [31] ABB. (2011). Produktbrosjyre: *Gas-insulated Switchgear Type ELK-14, The modular system for GIS, 300kV* Tilgjengelig fra: https://library.e.abb.com/public/9af6bccabda35c6bc1257956003aaf12/ELK-14_300_1HC0008262AKEn.pdf. (Hentet: 24.06.2019).
- [32] T & D Europe. (2018). *Technical report on alternative to SF6 gas in medium voltage high voltage electrical equipment*. (Rapport).
- [33] Nuventura. (2018). *Gas Insulated Switchgear*. Tilgjengelig fra: <https://www.nuventura.com/product> (Hentet: 21.08.2019).
- [34] Schneider Electric. (2019). *Medium Voltage Switchgear*. Tilgjengelig fra: <https://www.schneider-electric.com/en/product-category/87897-medium-voltage-switchgear/?filter=business-6-medium-voltage-distribution-and-grid-automation> (Hentet: 21.08.2019).
- [35] Eaton. (2018). *Primary Switchgear*. Tilgjengelig fra: <http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/PrimarySwitchgear/index.htm> (Hentet: 21.08.2019).
- [36] Hitachi. (2019). *Dead Tank Non-Sulfur Hexafluoride (Non-SF6) Vacuum Circuit Breakers*. Tilgjengelig fra: http://www.hitachi-tds.com/products/Vacuum_CB.html (Hentet: 21.08.2019).
- [37] Meidensha Corporation. *Vacuum Circuit Breaker (VCB)*. Tilgjengelig fra: https://www.meidensha.com/products/energy/prod_01/prod_01_01/index.html (Hentet: 21.08.2019).
- [38] Eaton. (2014). *Medium Voltage Switchgear*. Tilgjengelig fra: <http://www.eaton.no/EatonNO/ProdukterLosninger/Elektriske/Dinvirkksomhet/Datasenter-konsulenter/DataCentreSolutions/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/index.htm> (Hentet: 21.08.2019).
- [39] Toshiba Corporation. (2016). *Solid Insulated Switchgear*. Tilgjengelig fra: <https://www.toshiba.co.jp/sis/railwaysystem/en/event/inno-trans2016/pdf/c1SolidInsulatedSwitchgear.pdf> (Hentet: 21.08.2019).

- [40] Siemens Energy Management. (2018). *Siemens and Iljin Electric develop the first SF6-free 170 kV gas-insulated switchgear with vacuum switching technology*. Tilgjengelig fra: [https://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2018/energymanagement/pr2018080270emen.htm&content\[\]=GP](https://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2018/energymanagement/pr2018080270emen.htm&content[]=GP). (Hentet: 25.06.2019).
- [41] Rønningen, T., Haagensen, E, F. & Stadheim, L, I. (2017). Presentasjon: *145 kV Gassisolert anlegg med teknisk ren luft som isolasjonsmedium og vakuum effektbryter*. Siemens AS Energy Management.
- [42] Gautschi, D. (2017). Presentasjon: *GEs løsning - Green Gas for Grid*. GE.
- [43] 3M. (2017). *3M Novec 4710 Insulating Gas*. Tilgjengelig fra: <http://multimedia.3m.com/mws/media/11321240/3m-novec-4710-insulating-gas.pdf>. (Hentet: 24.06.2019).
- [44] Borge, J., Simonsen, F. (07.08.2019) Møte: *Green Gas for Grid som alternativ til SF6 i GIS anlegg*. GE, Oslo.
- [45] Simonsen, F. (22.08.2019). E-postkorrespondanse.
- [46] 3M. (2017) *3M Novec 4710 Insulating Gas - Environmental, Health and Safety Summary*. Tilgjengelig fra: http://multimedia.3m.com/mws/media/14187310/12633-novec-insulating-gas-tech-bulletin-4710-a4-celum.pdf?fn=prodinfo_novec1230.pdf (Hentet: 21.08.2019).
- [47] 3M. (2017). *3M Novec5110 Insulating Gas*. Tilgjengelig fra: <http://multimedia.3m.com/mws/media/11321230/3m-novec-5110-insulating-gas.pdf>. (Hentet: 24.06.2019).
- [48] Sintef. (2018). *Koblingsanlegg uten SF6*. Tilgjengelig fra: <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/koplingsanlegg-uten-sf6/>. (Hentet: 24.06.2019).
- [49] Geugjes, J. (2017). Presentasjon: *Uniquely positioned and a pioneering technology leader, enhancing eco-efficiency*. ABB.
- [50] 3M. (2017) *3M Novec 5110 Insulating Gas - Environmental, Health and Safety Summary*. Tilgjengelig fra: http://multimedia.3m.com/mws/media/14187320/12634-novec-insulating-gas-tech-bulletin-5110-a4-celum.pdf?fn=prodinfo_novec1230.pdf (Hentet: 21.08.2019)
- [51] ABB. (2019). *Eco-efficient gas-insulated switchgear with new gas mixture as alternative to SF6*. Tilgjengelig fra: <https://new.abb.com/high-voltage/gis/eco-efficient-gas-insulated-switchgear>. (Hentet: 24.06.2019).
- [52] Norevik, A. BKK (02.07.2019). Telefonsamtale.
- [53] Stadheim, L. (12.08.2019). E-postkorrespondanse.
- [54] ABB. (2017). *RMU with eco-efficient gas mixtures: field experience*. Tilgjengelig fra: <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107045A3423&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>. (Hentet: 25.06.2019).
- [55] ABB. *ewz Oerlikon substation, Switzerland World's first gas-insulated switchgear installation with eco-efficient gas mixture*. Tilgjengelig fra: <https://new.abb.com/high-voltage/gis/reference-ewz-oerlikon-substation-switzerland>. (Hentet: 25.06.2019).
- [56] ABB. (2018). *ABB's eco-efficient AirPlus technology delivered to Norwegian smart grid*. Tilgjengelig fra: <https://new.abb.com/news/detail/6392/abbs-eco-efficient-airplus-technology-delivered-to-norwegian-smart-grid>. (Hentet: 02.07.2019).
- [57] Industry Europe. *ABB Awarded \$40 Million Contract For Eco-Efficient Substation*. Tilgjengelig fra: <https://industryeurope.com/abb-awar-40-million-order-for-eco-efficient-substation/>. (Hentet: 16.08.2019).
- [58] Transnet bw. *Ersatzneubau 380-kV-Schaltanlage obermoeweiler*. Tilgjengelig fra: <https://www.transnetbw.de/de/netzentwicklung/projekte/ersatzneubau-380-kv-schaltanlage-obermoeweiler>. (Hentet: 16.08.2019).

- [59] GE. (2017). *Customers Witness Success of World-first g3-Substation Testing at 145 kV*. Tilgjengelig fra: <https://www.think-grid.org/customers-witness-success-world-first-g3-substation-testing-145-kv>. (Hentet: 05.07.2019).
- [60] General Electric. (2019). *Cerius, an example of a green-alternative distribution utility using g3*. Tilgjengelig fra: <https://www.think-grid.org/cerius-example-green-alternative-distribution-utility-using-g3>.
- [61] Benner, J., van Lieshout, M., Croezen, H. (2012) *Abatement cost of SF6 emissions from medium voltage switchgear* (12.3753.42) Delft: CE Delft. Tilgjengelig fra: <https://www.ce.nl/publicaties/download/1312> (Hentet: 15.08.2019).



NVE

Norges vassdrags- og energidirektorat

.....

MIDDELTHUNSGATE 29
POSTBOKS 5091 MAJORSTUEN
0301 OSLO
TELEFON: (+47) 22 95 95 95

www.nve.no