



Høgskulen på Vestlandet

Bacheloroppgave

ELE350

Predefinert informasjon

Startdato:	08-05-2023 09:00 CEST	Termin:	2023 VÅR
Sluttdato:	22-05-2023 14:00 CEST	Vurderingsform:	Norsk 6-trinns skala (A-F)
Eksamensform:	Bacheloroppgave		
Flowkode:	203 ELE350 1 O 2023 VÅR		
Intern sensor:	Lasse Hugo Siuvertsen		

Deltaker

Naun:	Martin Kiserud Norendal
Kandidatnr.:	276
HVL-id:	585016@hvl.no

Informasjon fra deltaker

Egenerklæring *: Ja
**Inneholder besvarelsen
konfidensielt
materiale?:** Nei
**Jeg bekrefter at jeg har
registrert
oppgavetittelen på
norsk og engelsk i
StudentWeb og vet at
denne vil stå på
vitnemålet mitt *:** Ja

Gruppe

Gruppenavn: Bachelor BO23EB-55
Gruppenummer: 30
**Andre medlemmer i
gruppen:** Ørjan Liverød Hagen

Jeg godkjenner autalen om publisering av bacheloroppgaven min *

Ja

Er bacheloroppgaven skrevet som del av et større forskningsprosjekt ved HVL? *

Nei

Bachelor B023EB-55

Nytt høyspenningslaboratorium og miljøvennlige alternativ til SF6

Ørjan Liverød Hagen
Martin Kiserud Norendal

22. mai. 2023

Dokumentkontroll

<i>Rapportens tittel:</i> BO23EB-55	<i>Dato/versjon</i> 22. mai. 2023/13.05
	<i>Rapportnummer:</i> BO23EB-55
<i>Forfatter(e):</i> Martin Kiserud Norendal Ørjan Liverød Hagen	<i>Studieretning:</i> ELK20
	<i>Antall sider m/vedlegg</i> 87
<i>Høgskolens veileder:</i> Lasse Sivertsen	<i>Gradering:</i> Åpen
<i>Eventuelle Merknader:</i> Vi tillater at oppgaven kan publiseres.	
<i>Oppdragsgiver:</i> Høgskulen på Vestlandet	<i>Oppdragsgivers referanse:</i>
<i>Oppdragsgivers kontaktperson(er) (inkludert kontaktinformasjon):</i> Lasse Sivertsen – lsi@hvl.no	

Forord

Denne Bacheloroppgaven markerer avslutningen av et 3-årigt studieløp i Elkraft teknikk ved Høgskolen på Vestlandet. Prosjektet sin oppdragsgiver er HVL.

Oppgaven har vært omfattende og krevende, men også gitt oss masse kunnskap og nye perspektiver på en dagsaktuell problemstilling.

I forbindelse med oppgaven har vi vært i kontakt med en rekke ressurspersoner og fagmiljøer. Tusen takk til alle som har bidratt til oppgaven vår med stort og smått. En spesiell takk rettes til:

- Lars Manger Ekroll for omfattende hjelp og støtte til gjennomføring av praktiske laboratorieforsøk.
- Lasse Sivertsen for veiledning, råd og tips underveis.
- Behjelpelige ansatte på Institutt for sikkerheit, kjemi- og bioingeniørfag med all hjelp ifm. gasstestene.
- Siemens Energy for sjenerøst å dele av sin tid og kunnskap på området.

God lesning!

Sammendrag

Denne bacheloroppgaven er delt inn i flere deler. Den består av en innledende del som består av kvalitetstesting av høyspenningsutstyr. Deretter ser vi nærmere på dielektrisk holdfasthet til gasser, og utfordringer knyttet til utfasing av SF6 som isolerende og brytende medium.

Høgskolen på Vestlandet har et moderne høyspenningslaboratorium. Dette har ikke vært benyttet på grunn av problemer med elektromagnetiske felter de siste årene. Høsten 2022 har disse problemene blitt løst ved å bygge et moderne Faradays bur. I denne sammenheng presenterer vi en del grunnleggende begreper og prinsipper innen fysikken. Disse forklarer hvordan et Faradays bur fungerer, og hva som faktisk skjer under høyspenningsforsøkene.

For å verifisere at funksjonalitet og kvalitet av høyspenningslaben er som forventet, tester vi i første del av oppgaven noe av høyspenningsutstyret. Dette ble utført ved å teste overslagsspenninger på hengeisolatorer.

Forsøkene viste at hengeisolatorer sin isolasjonsevne svekkes betydelig hvis de påføres fuktighet, i særlig grad saltvann. Videre kunne man konkludere med at installert Faradays bur løste tidligere problemer med elektromagnetisk støy. Høyspenningsutstyret på laboratoriet fungerte som forventet, men målekondensatoren på høyspenningssiden ga tidvis upålitelige verdier. Det var mer forutsigbart å benytte trafoens primærspenning og multiplisere omsetningsforholdet. Vi konkluderte med at våre gjennomsnittsmålinger er en god tilnærming til virkeligheten, men vi kan få store avvik på enkeltforsøk.

Videre i bachelorrapporten ser vi på alternativ til SF6. SF6 er en gass som finnes i energiinstallasjoner og høyspenningsanlegg over hele verden. Gassen benyttes som isolerende medium, og til å kvele og slukke lysbuer i effektbrytere. Til dette formålet fungerer SF6 utmerket, og er en helt ideell gass. På tross av dette, er søkelyset satt på gassen på grunn sin negative påvirkning på klima og miljø. Gassen er den kraftigste drivhusgassen vi kjenner til. Globale klimaendringer har ført til at man ønsker å fase ut bruken av SF6.

Vi har sett på hvilke alternative gasser som finnes, og egenskapene til disse. Hovedfokuset har vært på 420 kV nivå i GIS anlegg. Der har sett på alternativer til SF6, både som isolasjons- og brytergass. Hva som finnes tilgjengelig per i dag, og hva som forventes å komme på markedet i fremtiden.

I dette arbeidet har vi søkt mye i litteraturen, vi har hatt kontakt med produsenter av høyspenningsutstyr, snakket med nettselskaper. Utover dette har vi også utført praktiske laboratorieforsøk for å undersøke hvilken betydning trykksetting av gasser har for dielektrisk holdfasthet.

Konklusjonen etter de praktiske laboratorieforsøkene er at gasser har en tilnærmet lineær stigning i overslagsspenning ved økende trykk. Dette er i henhold til litteraturen og Paschens lov. Vi fikk bekreftet at vakuum i praksis fungerer som en svært dårlig isolator.

Som erstatning for SF6 er det utviklet flere gasser. GE og Hitachi Energi har utviklet en gass sammen som de kaller hhv. g3 og EconiQ. Dette er en langt mer miljøvennlig gass en SF6, men denne gassblandingen inneholder fortsatt noen fluorforbindelser. Gassen virker svært bra som

isolasjonsmedium, og kan allerede nå erstatte SF6 på de fleste spenningsnivå. Gassen fungerer også bra som brytergass, og komplette GIS-anlegg på 420 kV hevder begge produsentene at de kan levere.

Siemens Energy satser på Clean Air og vakuum i sine brytere. De er ikke kommet like langt i sin utvikling. På den annen siden er gassene deres 100% klimavennlige. EU antyder ytterligere restriksjoner på stoffer som inneholder fluorforbindelser. Hvis Siemens kommer med en komplett løsning på 420 kV GIS, vil miljørestriksjoner kunne begrense ytterligere utvikling av Hitachi og GE sin teknologi. Siemens mener de skal ha en total løsning til GIS 420 kV innen 2026.

Det oppfattes uansett som at SF6-frie løsninger skal kunne leveres til alle spenningsnivå i løpet av få år. Kostnaden forbundet med utskiftning av anlegg og anleggsdeler er imidlertid svært høy. Dermed vil utfasing av SF6 ta tid, og en verden totalt fri for SF6 i høyspenningsutstyr synes å ligge flere tiår frem i tid.

Abstract

This bachelor's thesis is divided into several parts. It consists of an introductory part that focuses on the quality testing of high-voltage equipment. Then, we delve into the dielectric strength of gases and the challenges associated with phasing out SF₆ as an insulating and breaking medium.

The Western Norway University of Applied Sciences has a modern high-voltage laboratory that has not been utilized due to electromagnetic field problems in recent years. These issues have been resolved by constructing a modern Faraday cage in the autumn of 2022. In this context, we present fundamental concepts and principles in physics that explain how a Faraday cage works and what actually happens during high-voltage experiments.

To verify the functionality and quality of the high-voltage laboratory, we conducted tests on some of the available high-voltage equipment in the first part of the thesis. This involved testing flashover voltages on suspension insulators. The experiments revealed that the insulation capacity of suspension insulators significantly deteriorates when exposed to moisture, particularly saltwater. Furthermore, it was concluded that the installed Faraday cage solved previous issues with electromagnetic noise. The high-voltage equipment in the laboratory performed as expected, although the measurement capacitor on the high-voltage side occasionally provided unreliable values. It was more predictable to use the primary voltage of the transformer and multiply it by the transformation ratio. We concluded that our average measurements are a good approximation of reality, but individual experiments can yield significant deviations.

In the subsequent part of the bachelor's thesis, we explore alternatives to SF₆. SF₆ is a gas used as an insulating medium and for quenching and extinguishing arcs in circuit breakers in energy installations and high-voltage systems worldwide. Although SF₆ is an excellent gas for these purposes and an ideal choice, attention has been focused on its negative impact on climate and the environment. It is the most potent greenhouse gas known to us. Global climate changes have led to a desire to phase out the use of SF₆.

We have examined the available alternative gases and their properties, with a primary focus on the 420 kV level in gas-insulated switchgear (GIS) systems. We have explored alternatives to SF₆ both as an insulation gas and as a switching gas, considering what is currently available and what is expected to enter the market in the future.

In this work, we extensively researched the literature, engaged with manufacturers of high-voltage equipment, and consulted with power grid companies. Additionally, we conducted practical laboratory experiments to investigate the impact of gas pressurization on dielectric strength.

The conclusion drawn from the practical laboratory experiments is that gases exhibit an approximately linear increase in breakdown voltage with increasing pressure, in accordance with the literature and Paschen's law. We confirmed that vacuum, in practice, functions as a very poor insulator.

As a substitute for SF₆, several gases have been developed. GE and Hitachi Energy have jointly developed a gas called g3 and EconiQ, respectively. These gases are much more environmentally friendly than SF₆, although they still contain some fluorinated compounds. The gases perform

excellently as insulating media and can already replace SF6 at most voltage levels. They also function well as a switching gas, and both manufacturers claim to offer complete GIS systems at the 420 kV level.

Siemens Energy focuses on Clean Air and vacuum in their circuit breakers. They have not made as much progress in their development. On the other hand, their gases are 100% environmentally friendly. The EU suggests further restrictions on substances containing fluorinated compounds. If Siemens provides a complete solution for 420 kV GIS, environmental restrictions may eventually halt the progress of Hitachi and GE. Siemens aims to have a total solution for 420 kV GIS by 2026.

It is perceived that SF6-free solutions will be available for all voltage levels within a few years. However, the cost associated with replacing equipment and components is very high. As a result, the phase-out of SF6 will take time, and a world completely free of SF6 in high-voltage equipment seems to be several decades away.

1 Innhold

Dokumentkontroll	2
Forord	3
Sammendrag	4
Abstract	6
Tabell-liste	11
Figur-liste	11
1 Innledning.....	13
1.1 Organisering av rapporten	13
1.2 Oppdragsgiver	13
1.3 Bakgrunn	13
1.4 Problemstilling.....	14
1.5 Metode	14
1.6 Forkortelser og ordforklaringer	15
2 Laborietetester av høyspenningsutstyr	16
2.1 Teori.....	16
2.1.1 Coulombs lov og elektriske felt	16
2.1.2 Elektrisk potensial og Gauss lov	17
2.1.3 Faradays bur	18
2.1.4 Kapasitans.....	19
2.1.5 Dielektrikum og Korona Utladning	20
2.1.6 Testrommet	21
2.2 Test av hengeisolator	23
2.2.1 Test oppsett.....	23
2.3 Generell sikkerhetsprosedyre ved tester i høyspenningslaboratoriet.....	25
2.3.1 Prosedyre for sikring av testrom:	25
2.3.2 Test rutiner	27
2.3.3 Ozon.....	27
2.4 Resultater ved tester på hengeisolator	28
2.5 Diskusjon innledende tester	28
2.5.1 Diskusjon hengeisolator	28
2.5.2 Andre observasjoner og erfaringer etter innledende tester.....	29
2.6 Konklusjon innledende tester - hengeisolatorer.....	31
3 SF6	32

3.1	Innledning.....	32
3.2	Bakgrunn	32
3.3	Egenskaper til SF6.....	33
3.3.1	Spesifikasjoner SF6	34
3.4	Regulering og kontroll av SF6	34
3.5	Utslipp	35
3.6	Avgifter	36
3.7	GIS- og AIS-anlegg.....	36
4	Egenskaper til en ideell gassmiks	38
4.1	Naturlige gasser.....	39
4.2	Syntetiske Gasser	40
4.2.1	<i>Fysiske egenskaper ved 3M's Novec 4710 og Novec 5110</i>	40
4.2.2	Molekylær Elektrostatisk Potensial	41
4.2.3	Isolerende Karakteristikk.....	42
4.2.4	Homogenitet av Gassmiks	42
4.2.5	Varmetransport.....	43
4.2.6	Giftighet.....	44
4.2.7	Miljøpåvirkning.....	44
4.2.8	Andre syntetiske gasser.....	44
5	Alternativ Isolerende gasser.....	45
5.1	Clean Air	45
5.2	Air Plus.....	46
5.3	g3 (Green Gas for Grid)	47
5.4	Hitachi EconiQ	48
5.5	Vakuum.....	49
6	LAB-testing gasser	51
6.1.1	Paschens lov	51
6.1.2	Intro gasstester.....	52
6.1.3	Testresultater CO2.....	54
6.1.4	Testresultater Nitrogen	55
6.1.5	Testresultater tørr trykkluft.....	56
6.1.6	Testresultater normal trykkluft	57
6.1.7	Testresultater vakuum	58
6.1.8	Testresultater 1 ATM.....	58

6.2	Drøfting test av isolasjonsegenskaper.....	58
6.2.2	Konklusjon Isolasjonstester	62
7	SF6 i brytere.....	63
7.1	Tradisjonelle brytere	63
7.1.1	Oppbygging og funksjon.....	63
7.2	Brytere uten SF6.....	65
7.2.1	Vakuumbrytere.....	65
7.2.2	g3 som brytergass.....	67
8	Status fra flere aktører	68
8.1.1	Lifegrid-prosjektet	68
8.1.2	Siemens – eneste leverandør uten F-gasser	69
8.1.3	Erfaringer nettselskaper og Statnett	70
9	Diskusjon	73
9.1.1	Utvikling.....	73
9.1.2	Utfasing	75
9.1.3	Konkurransen	75
10	Konklusjon	77
	Referanser	78
Appendiks A	Prosjektledelse og styring.....	84
A.1	Prosjektorganisasjon	84
A.2	Arbeidsform.....	84
Appendiks B	Fremdriftsplan	84
Appendiks C	Økonomi	84
Appendiks D	Kontaktliste.....	85
Appendiks E	Prosjektlogg.....	86
Appendiks F	Kommentarer	87
F.1	Praktiske utfordringer vedrørende Lab-tester	87

Tabell-liste

Tabell 1 Sammenligner N2 og CO2 med SF6 under visse forhold	39
Tabell 2 Fysiske egenskaper Novec vs. SF6 [23]	40
Tabell 3 Molekylær elektrostatisk potensialet [23].....	41

Figur-liste

Figur 1 Forklaring feltlinjer [1].....	16
Figur 2 Batteri [1].....	17
Figur 3 Oppførsel til et elektrisk felt [1]	17
Figur 4 Positiv ladet ball i en ledende bøtte [1]	18
Figur 5 Faradays bur sett fra innsiden	18
Figur 6 Ladning i ytterkant blir utjevnet med jord	19
Figur 7 Kondensator [1].....	19
Figur 8 Elektrisk felt og elektrisk potensial [1]	20
Figure 9 Teststrømmet sett fra utsiden	21
Figur 10 Kabler inn og ut av testrom jordet	21
Figur 11 Slokkeanlegg og varselamp	22
Figur 12 Brannalarm	22
Figur 13 Manuelt slokkeanlegg og slokkeapparat.....	22
Figur 14 Hengeisolator oppsett	23
Figur 15 Styrepult	24
Figur 16 Jordingsspyd foran dør	25
Figur 17 Overgangsmotstand og koblingspunkt direkte mot jord	26
Figur 18 Overslag saltvann	29
Figur 19 Salt på skjerm	29
Figur 20 Bakside styrepult	30
Figur 21 Variac.....	30
Figur 22 Oscilloskop.....	30
Figur 23 SF6 [8].....	33
Figur 24 Utslipp av SF6-gassen per år [16]	35
Figur 25 AIS og GIS [19]	37
Figur 26 Gass-utvikling prosess [10].....	38
Figur 27 Novec 4710 og Novec 5110 [23].....	40
Figur 28 Når gass kondenserer i forhold til trykk og temperatur [23]	41
Figur 29 Dielektrisk styrke i forhold til trykk [23]	42
Figur 30 Homogenitet i gassmiks [23]	42
Figur 31 GIL [25]	43
Figur 32 Temperaturøkning som funksjon av trykk [23]	43
Figur 33 Simens Energy [30]	45
Figur 34 ABB [34].....	46
Figur 35 g3 [34].....	47
Figur 36 EconiQ [37]	48
Figur 37 Paschen kurve for tørr luft [41]	50

Figur 38 Forhold mellom spenning, trykk og avstand mellom elektroder [44].....	51
Figur 39 Testoppsett gass.....	52
Figur 40 Sammenligning av testresultat for gasser	58
Figur 41 Avfallsstoff nitrogen	59
Figur 42 Avfallsstoff vakuum	60
Figur 43 Korrosjon og degenerering på testkulene.....	61
Figur 44 SF6 entrykks-effektbryter [48]	63
Figur 45 Vakuumbryter [41]	65
Figur 46 Strømfordelere [40].....	66
Figur 47 Lifegrid [53]	68
Figur 48 420 kV GIS effektbryter presentert på CIGRE messen [53]	68
Figur 49 Simens framdriftsplan	73
Figur 50 Hitachi sin framdriftsplan	74
Figur 51 GE sin framdriftsplan	74

1 Innledning

1.1 Organisering av rapporten

Rapporten er delt i 4 deler:

1. Testing av høyspenningsutstyr, verifisere funksjonen til nytt Faradays bur.
2. Miljøvennlige alternativ til SF6 som isolerende gass.
3. Testing av dielektrisk styrke av forskjellige naturlige gasser.
4. Ser på alternativer til SF6 som slukkemedium i brytere.

1.2 Oppdragsgiver

Høgskolen på Vestlandet.

Høgskolen er innehaver av et høyspenningslaboratorium som kan kjøre høyspenningstester opp mot 385 kV AC og 400 kV DC.

1.3 Bakgrunn

Høyspenningslaboratoriet på HVL har ikke vært benyttet de to siste årene grunnet problemer med elektromagnetiske felter under bruk. I 2022 ble det installert et moderne Faradays bur i testrommet hvor høyspenningstestene utføres. HVL har et behov for å verifisere at testfasilitetene fungerer som ønsket.

SF6 er en gass som har vært benyttet i høyspenningsanlegg i mer enn 40 år. Den har svært gode isolasjonstekniske og slukkemessige egenskaper. Gassen er imidlertid klassifisert som en potent klimagass som bidrar til global oppvarming. Industrien og forskningsinstitusjonene har nå et stort fokus på å prøve å framstille en, eller flere gasser som kan erstatte SF6 i høyspenningsanlegg.

1.4 Problemstilling

Oppgaven og problemstillingen er delt:

Første del:

Testing av høyspenningsutstyr

Høyspenningslaboratoriet på HVL har ikke vært i bruk de siste årene på grunn av problemer med elektromagnetiske felter. I 2022 ble det installert et moderne Faradays bur i testrommet hvor alle høyspenningstestene utføres. I Bacheloroppgavens første del testes deler av høyspenningsutstyret for å undersøke at kvalitet og funksjonalitet er som forventet etter montering av Faradays buret.

Andre del:

Miljøvennlige alternativer til SF6

SF6 er en gass som har vært benyttet i høyspenningsanlegg i mange år. Gassen fungerer svært godt både som isolerende medium, og til slukking av lysbuer i brytere. På grunn av at SF6 er en svært kraftig drivhusgass ønsker både industri og myndigheter verden over å erstatte gassen med en mer miljøvennlig løsning.

I bachelorrapporten vil vi se nærmere på hvilke alternativer som finnes til SF6 i dag, både som isolasjons- og brytergass. Ved praktiske forsøk vil vi også se på sammenhengen mellom trykksetting av gasser og dielektrisk holdfasthet. Her skal vi verifisere at litteraturen samsvarer med virkeligheten.

1.5 Metode

En betydelig del av oppgaven er løst med en dyptgående litteraturstudie omkring miljøvennlige alternativer til SF6. For å verifisere enkelte funn i litteraturen på området, er deler av oppgaven utført som praktiske laboratorieforsøk på Høgskolen sitt høyspenningslaboratorium. Det er også blitt innhentet erfaringer og meninger ute hos norske nettselskaper, samt hos produsenter av høyspenningsanlegg. Kontakten har foregått per telefon, fysiske møter og e-post.

1.6 Forkortelser og ordforklaringer

Forkortelser	Forklaring
GWP	Global Warming Potensial, GWP på en, tilsvarer en kg CO ₂
ODP	Ozon Depletion Potensial, gassen sin påvirkning på ozonlaget?
GIS	Gas Insulated Switchgear, gassisolerte anlegg
AIS	Air Insulated Switchgear, luft isolerte anlegg
GIL	Gas Insulated Lines, gass isolerte linjer
PFAS	Poly-Fluor-Alkyl-Stoffer, svært stabile stoffer med lang nedbrytningstid
SF ₆	Svovelheksafluorid
g ₃	Green Gas for Grid
O ₂	Oksygen
N ₂	Nitrogen
CO ₂	Karbondioksid
TRV	Transient Recovery Voltage

2 Laborrietester av høyspenningsutstyr

2.1 Teori

Laborrietestene involverer en del grunnleggende fysikkforståelse. Innledningsvis vil vi presentere viktige begreper og prinsipper innen fysikken, samt forklare hvordan selve høyspenningslaborriet er bygget opp. Teorigjennomgangen omfatter de mest vesentlige momentene omkring temaet, og gir ikke en fullstendig beskrivelse.

2.1.1 Coulombs lov og elektriske felt

Elektriske krefter påvirkes av avstanden mellom ladde partikler. En ladd partikkel har enten en positiv eller negativ ladning. En partikkel med positiv ladning danner et elektrisk felt som går radielt ut fra partikkelen. Er partikkelen negativt ladet går det elektriske feltet innover mot partikkelen [1]. To like ladninger tiltrekkes av hverandre, mens to ulike ladninger frastøtes. De elektriske kreftene mellom to ladninger blir beskrevet slik av Coulomb:

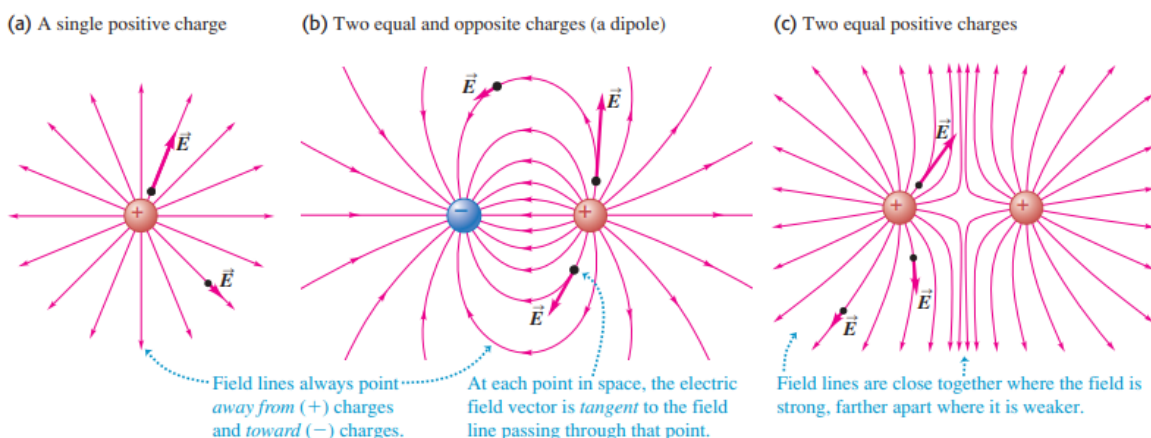
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2}$$

Formelen beskriver at skalar størrelsen på de elektriske kreftene er proporsjonal med absolutt produktet til to ladninger, og inversproporsjonal med kvadratet av avstanden. Retningen på de elektriske kreftene blir påvirket av ladningen til partikkelen som befinner seg i det elektriske feltet.

Utrykket $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ er en konstant med ϵ_0 («epsilon-null») som blir kalt for den elektriske konstanten [1].

Permittivitet, $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$, uttrykker hvor mye et dielektrisk medium blir polarisert av et elektrisk felt [2]. Den elektriske konstanten bruker vakuum som medium, mens ϵ_r er den relative permittiviteten til mediet i forhold til ϵ_0 . ϵ er alltid større enn ϵ_0 , det vil si et eksternt elektrisk felt inducerer vakuum minst av alle stoff [1].

Dette var en kort introduksjon til elektriske krefter. Elektriske felt trenger også en rask beskrivelse. Et ladd legeme produserer eller skaper et elektrisk felt i et valgt punkt. Punktet blir påvirket av avstanden og hvilken type ladning den ladde partikkelen har. Det elektriske feltet eksisterer selv om



Figur 1 Forklaring feltlinjer [1]

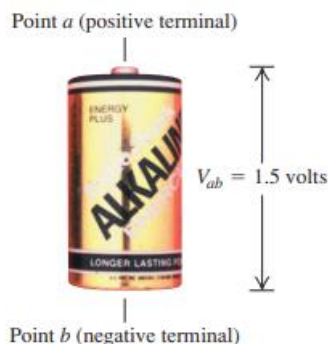
det ikke er noen punkt i feltet som kan «oppleve» det. Det betyr at vi bare trenger å vite ladningen til den ladde partikkelen:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q|}{r^2} \rightarrow E = \frac{F_0}{q_0}$$

Formelen forteller at vi ikke trenger testladningen q_0 (et tilfeldig punkt med ladning) for å vite hvordan det elektriske feltet oppfører seg. F_0 (de elektriske kreftene på q_0) sin retning blir bestemt av q_0 . Positiv q_0 , gir F_0 i retning E . Negativ q_0 , gir F_0 i retning $-E$. Hvis det finnes flere ladde objekt og man skal bestemme det elektriske feltet i et punkt, benyttes superposisjon. De elektriske feltene summeres sammen. Elektriske feltlinjer brukes for å visualisere det elektriske feltet.

2.1.2 Elektrisk potensial og Gauss lov

Det er vesentlig å forstå elektrisk potensial når vi senere skal se på Paschens lov og problemene knyttet til det tidligere høyspenningslaboratoriet. Spenning, eller elektrisk potensial, er beskrevet som: $V = \frac{U}{q_0}$. Formelen forteller at spenningen er lik den elektriske potensialenergien per enhets ladning [1]. På figur 2 kan man se et vanlig batteri. Spenningen over batteriet er: $V_{ab} = V_a - V_b$, det vil si den elektriske potensielle energien per positive ladningsenhet i a, minus den elektriske potensielle



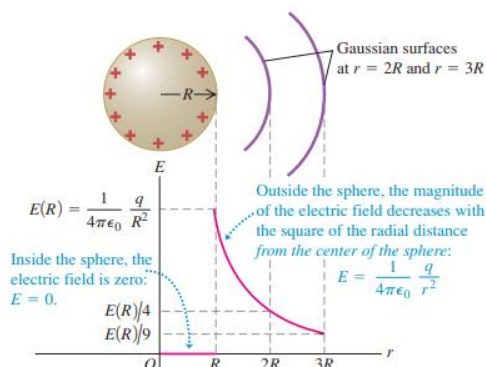
energien per negative ladningsenhet i b. Hvis det er en kontinuerlig distribusjon av ladningsenheter, f.eks. over en linje, vil man dele opp ladningene i infinitesimale deler, for deretter å integrere:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r}$$

Jo nærmere man kommer en positiv ladning, jo mer øker spenningen. Det motsatte er tilfellet med en negativ ladning, men absoluttverdien er den samme.

Figur 2 Batteri [1]

For å forklare funksjonen til et Faradays bur må vi se på Gauss lov. Elektrisk fluks er et mål på hvor stort elektrisk felt som «flyter» eller «går» gjennom en overflate. Den totale elektriske fluksen



Figur 3 Oppførsel til et elektrisk felt [1]

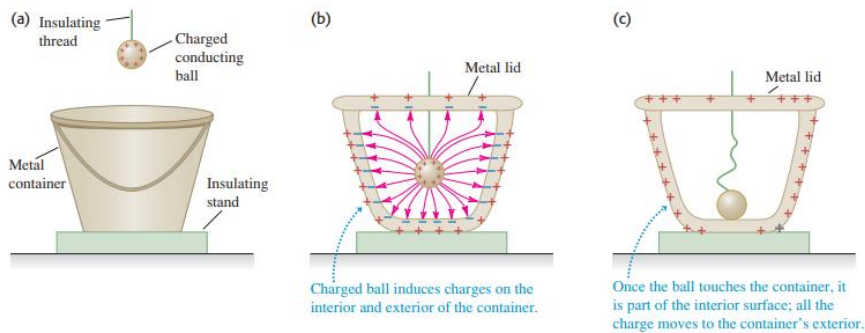
gjennom en lukket overflate, er lik den totale elektriske ladningen på innsiden av overflaten, delt på den elektriske konstanten. Følgende formel beskriver dette:

$$\Phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Ofta vil vi vite hvor store elektriske felt som blir produsert ved en ladningsfordeling på et ledende material. I praksis viser det seg at all

overskuddsladning blir plassert på lederens overflate ved elektrostatiske situasjoner (der ladningene ikke har en konstant bevegelsestendens), illustrert i figur 3. Den totale elektriske fluksen gjennom et ledende materiale fra en ekstern kilde vil derfor være null, fordi det elektriske feltet er null på innsiden av materialet. På innsiden blir også den totale ladning null.

Figur 4, situasjon a) illustrerer en ladet ball utenfor en elektrisk ledende metallbøtte. I situasjon b) tiltrekker ballen de negative ladningene i den lukkede bøtten ved induksjon. I det ballen berører metallbøtten i situasjon c) vil ballen være ladningsnøytral, og all ladning finnes i ytterkant av bøtten. Dette prinsippet benyttes også i et Faradays bur.



Figur 4 Positiv ladet ball i en ledende bøtte [1]

2.1.3 Faradays bur

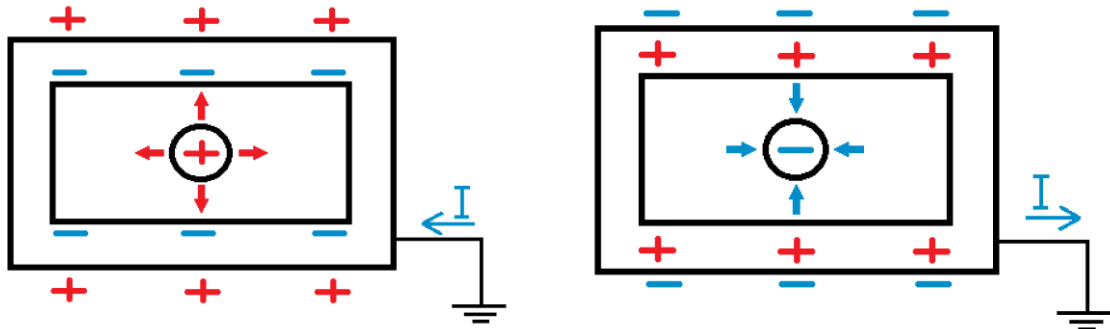
Et Faradays bur har som funksjon å beskytte ømfintlige apparat mot elektrisk støy. Elektrisk støy kan føre til feilmålinger på elektronisk måleutstyr. Laboratoriet på Høgskolen har løst dette ved at høyspenningsapparatene er flyttet inn i et Faradays bur, slik uønskede elektriske felt ikke skal kunne påvirke annet elektronisk utstyr på utsiden av testrommet.

Når man setter spenning på høyspenningskomponentene inne i testrommet, vil det dannes sterke elektriske felt. Faradays buret bruker de samme prinsippene som ballen og bøtten (Figur 4). Høyspenningskomponentene vil indusere elektriske ladninger i det omkringliggende ledende materialet. De induserte ladningene vil sette opp et elektriske felt som gjør at det totale elektriske feltet inne i buret blir null, som Gauss-lov forteller oss. Samtidig vil det være sterke ladninger på overflaten. Disse ladningene ledes vekk med høyspenningsjorden. Hadde det ikke vært for høyspenningsjorden ville disse ladningene ført til sterke elektriske felt radielt ut fra burets overflate. Resultatet er at den elektriske støyen skapt inne i testrommet ikke kommer lenger enn overflaten på rommets metallvegger, og instrumenter på utsiden er ikke lenger påvirket.



Figur 5 Faradays bur sett fra innsiden

Høyspenningssjorden sørger for en elektronstrøm. Elektronstrømmen kan gå i retning fra jord, eller til jord, avhengig av om strømmen er i negativ eller positiv halvperiode? Dette skifter i takt med frekvensen til nettet (vekselstrømskrets). Figur 6 illustrerer en enkel modell av testrommet, hvor ladningen i sentrum representerer høyspenningsutstyret sitt potensiale ved positiv og negativ halvperiode. Denne ladningen bestemmer hvilken ladning man får på overflaten av buret på grunn av induksjon.



Figur 6 Ladning i ytterkant blir utjevnet med jord

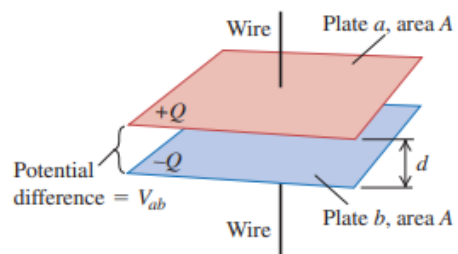
Strømretningen er definert som retningen elektronene strømmer. Kraften som virker på elektronene, er bestemt av det elektriske feltet og den elektriske ladningen. Den er beskrevet slik: $F = E \cdot q$. Siden elektronet er negativt ladd, vil elektronene strømme i motsatt retning av det elektriske feltet. Er overflaten positivt ladet vil elektroner fra jord strømme til overflaten for å nøytralisere ladningen. Det motsatte er tilfellet ved en negativ overflate.

2.1.4 Kapasitans

En kondensator er en enhet som lagrer elektrisk potensiell energi og elektrisk ladning. For å lage en kondensator trenger man to ledere og et medium som isolerer dem. Kapasitans beskriver hvor mye energi en kondensator kan lagre. Kapasitansen mellom parallelle plater i vakuum blir beskrevet slik:

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

Kapasitans er et forhold mellom ladning og det elektriske potensiale mellom dem. Jo større ladning man har for et visst spenningsnivå, jo mer energi kan kondensatoren lagre.



Figur 7 Kondensator [1]

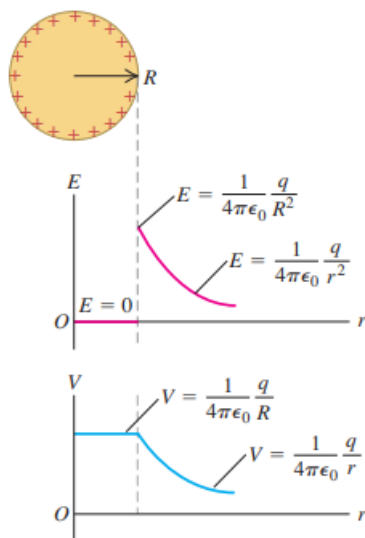
Det interessante er at kapasitansen for de aller fleste isolerende stoff kun er avhengig av utformingen, størrelsen, avstand mellom lederne og permittiviteten. Hvis det er noe annet enn et vakuum mellom lederne, vil man multiplisere med den relative permittivitetskonstanten til stoffet. Blir også kalt den dielektriske konstanten.

Formelen over bruker to plater. I våre forsøk benytter vi to like kuler. Hvis avstanden mellom kulene er betydelig mindre enn deres radius, vil kapasitansen være tilnærmet lik som ved to plater med samme areal og avstand mellom. Dermed gir formelen en god tilnærming også til to like kuler som kondensator [1].

2.1.5 Dielektrikum og Korona Utladning

Et isolerende medium kalles for et dielektrikum. Det ligger mellom to ledere for å svekke det elektriske feltet og spenningen over dette. Hvis man måler spenningen over en kondensator med vakuum som isolasjonsmedium, vil man få den faktiske spenningen over lederne. Ved å benytte et dielektrikum i stedet, vil spenningen reduseres med den dielektriske konstanten til stoffet. Grunnen til at spenningen reduseres, er at dielektrikumet blir induisert av det elektriske feltet slik at det blir satt opp et motsatt rettet elektrisk felt. Ved hjelp av superposisjon blir det totale feltet redusert. Dermed øker et dielektrikum overslagsspenningen mellom to ledere [1].

Vi kommer til å bruke isolasjonsholdfasthet eller dielektrisk styrke for å forklare når en gass går fra isolerende til ledende. Når en gass blir ledende, kaller vi det for et plasma, eller at gassen er blitt ionisert. Med andre ord vil alle kondensatorer ha et maksimalt spenningsnivå. Blir dette nivået passert vil en lysbue (plasma) oppstå. Det blir som en kortslutning over lederne.



For å forstå korona må vi se på sammenhengen mellom spenning, elektrisk felt og radiusen til en leder. Vi tar utgangspunkt i en positiv ladning. Figur 8 viser at det største elektriske feltet og spenning finnes i overflaten til ladningen. Jo lenger unna overflaten, jo mer reduseres disse parameterne. Ergo, den maksimale spenningen er lik $V_m = RE_m$. Der R er radiusen til lederen og E_m er det maksimale elektriske feltet. R er proporsjonal med den maksimale spenningen, som indikerer at stor radius gir en stor gjennomslagspenning.

Figur 8 Elektrisk felt og elektrisk potensial [1]

Luft har en dielektrisk styrke på ca. 3 kV/mm. En kule med radius på 1 cm i luft har en maksimal spenning på 30 kV. Det vi si at hvis man har små overflater som er ujevne, vil man kunne få lokale overskridelser av det maksimale spenningsnivået. Da vil luften i disse områdene lede strøm og det kan observeres små lysbuer eller lysglimt. Det er dette som er korona utladninger. Feltfordelerne på høyspenningsutstyret har stor radius nettopp for å unngå korona utladninger.

2.1.6 Testrommet

Høgskolen på Vestlandet sitt testrom for høyspenningsforsøk befinner seg inne på D418. Et Faradays bur ble montert for å løse tidligere problemer med elektromagnetiske felter. Dette gjør høyspenningslaboratoriet komplett, og tilfører Høgskolen en ny og topp moderne testfasilitet.

Testrommet er på ca. 37 m² og har aluminiumsplater i tak og gulv. Ellers er det omgitt i galvanisert stål med to millimeters tykkelse. Utenfor metallplatene er det montert 45 m² med lydtetningsplater. Et gitter sørger for å blokkere elektromagnetisk støy ved avtrekk og ventilasjon. Testrommet har dobbelt sett med dører, som begge må lukkes for å få spenning i rommet. De tre vinduene er satt opp for å få innsikt inn til rommet, men er konstruert slik at elektromagnetisk støy ikke slipper ut.



Figure 9 Testrommet sett fra utsiden

Alle høyspenningskomponenter skal ha en sikkerhetsavstand til veggen på 110 cm. De elektriske feltene blir svekket med avstand som nevnt tidligere, og ved 110 cm kan Faradays buret garantere for null støy ut (i praksis null). Alle spenningssatte komponenter skal stå på aluminiumsplatene midt i rommet. Alt av metall er jordet til en egen høyspenningsjord. På figur 10 under kan man se kabler inn og ut av testrommet. Alle kabler som ikke var i bruk ble kortsluttet til jord. Dette for å hindre koronautladninger eller støy ut av rommet.

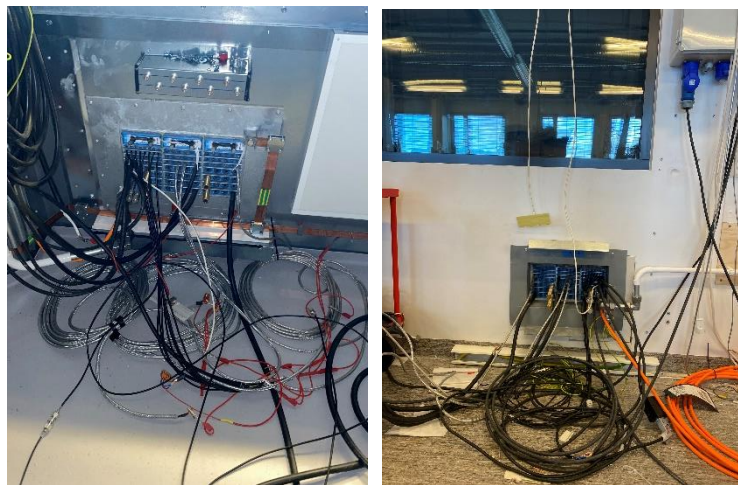


Figure 10 Kabler inn og ut av testrommet ble jordet

Testrommet har et eget brann- og slukkesystem. På figurene vises de ulike varsellampene som skal signalisere om det er brann eller slukkegass i testrommet. Slukkeanlegget kan også settes på manuelt ved behov.

Det grønne lyset lyser hvis primærsiden på styrepulten er lagt inn, rødt varsellys varsler at sekundærsiden er lagt inn og rommet er spenningsatt.

Figur 12 Brannalarm



Figur 11 Slukkeanlegg og varsellamper



Figur 13 Manuelt slukkeanlegg og slukkeapparat

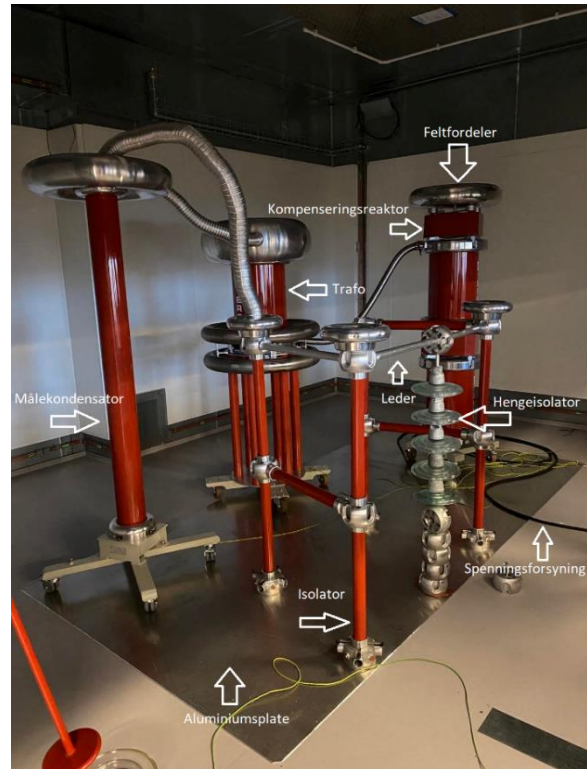
2.2 Test av hengeisolator

For å teste om Faradays buret fungerte etter hensikten, samt at øvrig utstyr hadde funksjonalitet og kvalitet som forventet, kjørte vi innledningsvis høyspenningstester på hengeisolator. Ved å teste overslagsspenninger på hengeisolatorer kunne vi avdekke om de tidligere problemene knyttet til sterke elektriske felter var løst.

2.2.1 Test oppsett

En hengeisolator er en elektrisk isolator av herdet glass som man finner på kraftledningene ute i strømmettet. På bildet til høyre kan man se at vi bruker fem isolatorer. Disse har kontakt med aluminiums-platen på gulvet. Hver isolator skal i teorien tåle en overslagsspenning på 70 kV i tørr luft. Med dette oppsettet forventes det overslag og lysbue ved maksimalt 350 kV.

I oppsettet bruker vi tre trafoer som har et teoretisk omsetningsforhold på $\frac{100 \text{ kV}}{220 \text{ V}} = 454,55$. Vi kan oppnå en maksimal spenning på ca. 385 kV. Trafoene er koblet i serie og potensialet i overgangene er like. På toppen av utstyret er det plassert feltfordelere for å unngå koronautladinger. Feltfordelerne er utformet som en torus (smultring) og trafoen med høyest spenning har den største feltfordeleren. De smale, røde rørene fungerer som isolatorer. De grå rørføringene er ledere. Den store målekondensatoren på venstre side i bildet måler spenning. Den sender signaler direkte til styrepulten gjennom en UHF-kabel (høy frekvens kabel).



Figur 14 Hengeisolator oppsett

På grunn av høye spenningsnivåer blir det store kapasitive effekter. For å motvirke dette, er det satt inn to kompensasjonsreaktorer. De grønne og gule ledningene er til jord, og disse er direkte koblet til høyspenningsjorden. Den sorte kabelen forsyner trafoene med spenning direkte fra styrepulten.

Styreputen blir forsynt med spenning fra fordelingsskapet inne på høyspentlaben. Den mottar signal direkte fra målekondensatoren, og vi kan lese av spenningen på displayet. Verdien av spenningen og strømmen over viklingene på primærsiden til trafo i styrepulten vises også.

«Dørbryteren» skal simulere at døren inn til testrommet er låst. Blir ikke denne bryteren holdt inne, er testrommet spenningsløst. Jordingsanviseren skal i utgangspunktet stå inne på testrommet, men på grunn av pågående arbeider på laboratoriet var denne midlertidig plassert på styrepulten. Peker anviseren opp, slik som på figur 15, er testrommet jordnet.

Hovedsakelig benyttes styrepulten sitt panel til å legge inn primærside og sekundærside på trafo og regulere spenning. Videre befinner det seg en stor rød knapp for nødstopp der. Styrepulten skrues av og på med bryter og nøkkel.



Figur 15 Styrepult

2.3 Generell sikkerhetsprosedyre ved tester i høyspenningslaboratoriet

Med tanke på sikkerhet ved testing ble det i samarbeid med laboratorieingeniør Lars Ekroll utarbeidet egne sikkerhetsprosedyrer. Disse rutineene ble vurdert mot NEK IEC 660060-3:2006 og ble funnet å være i henhold til IEC-standarder.

For å utføre høyspenningstester på en trygg og sikker måte, kreves det at man på forhånd har definert spesifikke roller og oppgaver i gruppen. I og med at gruppen kun bestod av to deltakere, valgte vi å dele oppgavene slik:

- Sikkerhetsansvarlig:
Overordnet ansvar for å se til at gjeldene sikkerhetsprosedyrer ble fulgt. Var også den som noterte resultatene underveis.
- Ansvarlig for kobling og operatør:
Var den som utførte eksperimentet og kontrollerte styrepulten. Ansvarlig for nøkkel til styrepult. Verifiserte at alt var koblet korrekt og klart til testing.

For læring og trening i begge roller, byttet gruppen på oppgavene underveis.

Ved høyspenningstester kreves det at labingeniør er til stede til enhver tid. Må labingeniør av en eller annen grunn forlate høyspenningslaboratoriet, skal også forsøkene oppholde. Labingeniør verifiserer at sikkerhetsansvarlig og koblingsansvarlig sitt arbeid er utført korrekt.

2.3.1 Prosedyre for sikring av testrom:

Før test:

- Før eksperiment starter skal man sammen med labingeniør se til at alle ledene deler i testrommet er jordnet.
- Koblingsansvarlig er sistemann ut av testrom. Vedkommende fester jordingsspyd på krok ved inngangsdør, slik at denne ligger på skrå, tvers over inngangsdør. Når dette er utført skal man ved ny entre inn i rommet alltid anta at rommet har vært spenningsatt.
- Koblingsansvarlig lukker de to dørene til testrommet. Sikkerhetsansvarlig ser til at dette utføres tilfredsstillende, og sikrer at ingen gjenværende personer befinner seg inne i testrommet.
- Labingeniør legger inn spenning til trafo, og overleverer styrepultnøkkel til laboperatør.
- Laboperatør setter nøkkel i styrepult. Styrepult skrur på, og eksperimenter utføres.



Figur 16 Jordingsspyd foran dør

Under test:

- For å spenningssette trafo med styrepulten, må dørbryter holdes inne. Når man deretter trykker på primær knappen, kan man visuelt observere at jordkniv faller ned. Dette indikere at testrom er spenningsatt. I tillegg lyser rød varselampe. Siste steg for å få spenning inn på primærsiden på første trafo, er å presse sekundær-knappen på displayet.
- Ved overslag kutter overbelastningsvernet i styrepulten forsyningen. Laboperatør slipper dørbryter, spenning på trafo opphører, og jordkniv vil indikere jordet testrom.

Etter test:

- Etter endt eksperiment skrus styrepult av, laboperatør tar nøkkel ut av styrepult, og beholder denne i sin lomme.
- Utgangspunktet er at testrommet er spenningsatt, inntil det er bekreftet spenningsløst. Koblingsansvarlig er den personen som først skal entre rommet. Vedkommende er ansvarlig for å utjevne alle ledende forbindelser med referansejord. Dette gjøres ved at jordingsspydet føres bort til alle ledende deler. Spesielt viktig er det at kondensatorer lades ut. For å lade ut kondensator så skal først motstanden til jordingsspydet berøre kondensatoren, deretter koblingspunktet for direkte jord.
- Når koblingsansvarlig har utjevnet alle forbindelser, og festet jordingsspyd på trafo som på figur 17, kan koblingsansvarlig bekrefte at rommet er gjort spenningsløst. Sikkerhetsansvarlig og laboperatør ser samtidig til at dette blir korrekt utført. Deretter kan andre gå inn i rommet.



Figur 17 Overgangsmotstand og koblingspunkt direkte mot jord

Stenging av testrom:

- Samme prosedyre som ved etter test, synlig jordingsspyd må være på plass. Dører til testrom lukkes. Nøkkel styrepult overleveres til labingeniør. Labingeniør kobler fra spenningen til høyspenningslaboratoriet.

2.3.2 Test rutiner

Vi valgte å kjøre tre tester. Under første test var hengeisolatorene tørre. Deretter tørket vi over skjermene med en våt klut, og ved siste test ble skjermene sprayet med mettet saltvann (ca. 30 g/l). Vann og saltvann ble påført både på oversiden og undersiden av skjermene. Ønsket med forsøket er å se hvor mye gjennomslagsspenningen ble svekket som følge av dette. Problemstilling er særlig aktuell ved kysten der fuktigheten ofte er høyere som følge av dis eller sjøsprøyt. Dette svekker holdfastheten betydelig. For å få et driftssikkert nett må dette tas i beregningene.

Hver testserie inneholdt fem repetisjoner inntil overslag. Det ble lagt inn 30 spenningsløse sekunder etter hver lysbue, før oppstart av neste repetisjon. Spenningen ble økt gradvis, ca. 1,7 V/s (lavspenningsiden) inntil lysbue oppstod. Ved lysbue kuttet overbelastningsvernet spenningen inn til teststrømmet automatisk, med en liten tidsforsinkelse.

Etter gjennomført testserie undersøkte vi om det hadde oppstått noe på overflaten til skjermene. Isolatorene valgte vi å bruke slik de var, altså vi vasket de ikke før hver test. Vi fulgte sikkerhetsrutinene beskrevet tidligere.

2.3.3 Ozon

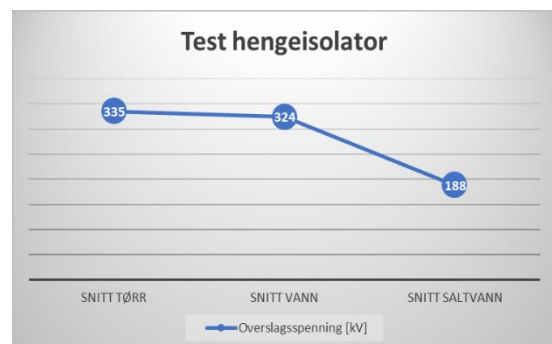
Ventilasjonen til teststrømmet var koblet fra pga. pågående arbeider. Derfor fantes det ingen avtrekk av ozongasser som oppstår ved elektriske utladninger. Ved høye spenninger (> 300 kV) dannes betydelige mengder ozon. Antall tester på dette spenningsnivået var begrenset, slik at ozonnivået aldri var kritisk. Vernemasker ble vurdert som unødvendige pga. mengden og tiden eksponert for ozon. Ozonet kunnet likevel observeres i form av lukt, og god utlufting av lokalet ble iverksatt.

2.4 Resultater ved tester på hengeisolator

Test tørre hengeisolatorer	
Overslagsspenning [kV]	
Test 1:	335
Test 2:	330
Test 3:	348
Test 4:	324
Test 5:	337
Snitt	334,9

Test hengeisolatorer fuktet m/vann	
Overslagsspenning [kV]	
Test 1:	319
Test 2:	319
Test 3:	314
Test 4:	340
Test 5:	328
Snitt	324,0

Test hengeisolatorer fuktet m/saltvann	
Overslagsspenning [kV]	
Test 1:	130
Test 2:	140
Test 3:	150
Test 4:	250
Test 5:	270
Snitt	188,0



2.5 Diskusjon innledende tester

2.5.1 Diskusjon hengeisolator

Vi observerer at holdfastheten reduseres med fuktighet, spesielt med saltvann. På forhånd hadde vi forventet en større forskjell mellom tørre skjermer og skjermer fuktet med vann. Årsaken til at denne differansen ikke ble større er nok på grunn av at vi ikke fikk fuktet undersiden av skjermene godt nok. Her var det vanskelig å komme til. Selv om vi kunne påført enda mer vann, ser man at holdfastheten reduseres raskt allerede ved lett fuktet overflate. Dette da vann leder strøm bedre enn luft, og ved en sammenhengende vannvei har man en leder for strøm.

I og med at vi repeterte testene fem ganger etter hverandre, med pausevarighet av 30 sekunders intervaller, er det sannsynlig at noe av fuktigheten fordampet underveis. Dette sannsynliggjøres ved at de siste testene i testserien til både vann og saltvann viste høyere overslagsspenninger sammenliknet med de første forsøkene i testseriene.

Ved saltvannstesten benyttet vi sprayflaske til å påføre fuktighet med, og her sprayet vi på rikelig med væske. Saltet forurenses den glatte overflaten til isolatoren. Ved overslag vil korrosjon oppstå. Noe av saltet vil svi seg fast, og lage en ujevn overflate. Dette kan føre til koronautladninger og lage en fysisk vei for strømmen å gå. Overslag med saltvann lager et karakteristisk gult lys. Dette som en konsekvens av at saltet «brenner». Overslagene med tørre isolatorer, og fuktige isolatorer med ferskvann, ga fra seg et kaldt blått lys.



Figur 18 Overslag saltvann



Figur 19 Salt på skjerm

Tilbake til 2016 utførte en gruppe studenter en rekke høyspenningsforsøk i sin Bacheloroppgave. Vi vil videre referere til den som Fischer-rapporten. De kjørte blant annet overslagstester på hengeisolatorer. Ved sammenligning av resultatene ser man at disse harmonerer rimelig godt. I forsøkene med tørre hengeisolatorer oppnådde gruppen til Fischer et gjennomsnitt på 322,9 kV [3]. Våre forsøk endte på 334,9 kV i gjennomsnittlig overslagsspenning. Lik tendens etter påføring av vann/saltvann.

I teorien skal isolatorene tåle en gjennomslagsspenning opptil 350 kV. Imidlertid var de benyttede skjermene godt brukte, flere hadde både sprekker og hakk. De skarpe kantene i sprekkenes kan forårsake korona. Dette ble observert i praksis, da vi i forkant av overslag og lysbue kunne registrere koronautladninger i enkelte områder på skjermene. Videre hang ikke isolatorene fullstendig parallelt, og gransker man figur 18 ser man at avstand mellom de to nederste skjermene er noe ujevn. Alle disse faktorene kan ha bidratt til at vi fikk overslag før det teoretiske maksimalnivået.

2.5.2 Andre observasjoner og erfaringer etter innledende tester

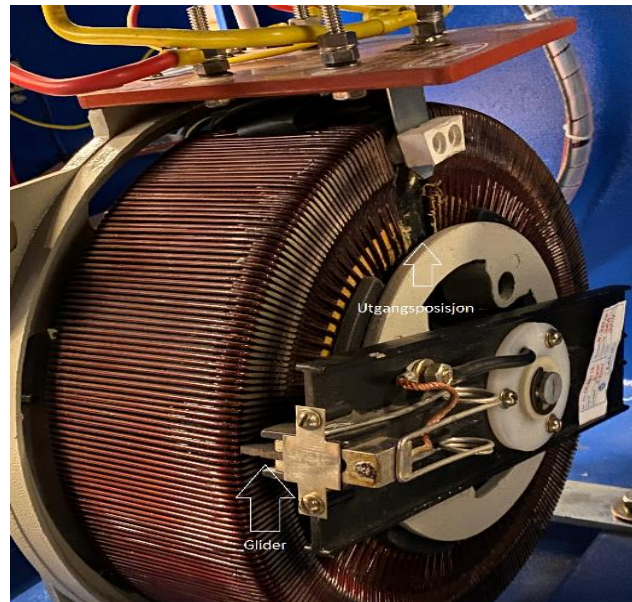
Innledende tester viste oss at sekundærspenningen ikke var til å stole på. Underveis i forsøkene kunne vi notere oss til del store differanser i verdiene avlest fra målekondensatoren. Altså kunne like verdier på primærspenningen føre til helt ulike verdier på sekundærspenningen. Målingene korresponderte ikke alltid med hverandre. I Fischer-rapporten kvalitets testet de omsetningsforholdet til trafoene. Det viste seg da at forholdstallet på 454,54 ikke var helt nøyaktig, men hadde en feilmargen på inntil 10% sammenliknet med teoretisk verdi [3]. I tillegg er kvaliteten på spenningen inn på styrepulten avhengig av nettet. Gruppen til Fischer sammenliknet styrepulten sitt måleutstyr med et eksternt voltmeter. Dette gav et avvik opp mot 4 V, som er betydelig.

Variacen som er plassert inne i styrepulten er en annen mulig feilkilde. En Variac er en type trafo som man bruker for å regulere spenningen i en krets. Strømkilden er koblet til primærviklingen, og sekundærsiden til lasten. Primærsiden har en glider, se figur 20. Ved å justere posisjonen til glideren på primærviklingen, vil spenningen ut på lasten kunne varieres. Dette er det en el-motor som gjør, og denne kan styres med to brytere (en rask og en treg). Akkurat i det glideren står mellom to viklinger, er det knyttet usikkerhet til hva spenningen blir i nettopp dette øyeblikket. Det betyr at reguleringen kan være litt ujevn.



Figur 20 Bakside styrepult

Som nevnt erfarte vi ved enkelte tester at sekundærspenningen ble unormalt høy i forhold til primærspenningen. Tilsynelatende oppstod «hoppet» i sekundærspenning akkurat i det øyeblikket vi kunne registrere lysbue og strømvernet slo inn. For å undersøke dette nærmere ønsket vi å se hva som hendte med strømmen og spenningen ut fra styrepulten. Til dette benyttet vi et oscilloskop («skopet»). Dette er et apparat som kan måle og tegne elektrisk signal. Oscilloskopet behandler signalene og fremviser de som grafer i en tids- og spenningsakse. Det gule signalet er strømmen, spenningen er blå.



Figur 21 Variac

Under denne testen økte vi spenningen langsomt til lysbue oppstod og overbelastningsvernet brøyt strømmen. På figur 22 ser man tre forskjellige stadier. Normal strøm, strøm i metning og strømbrudd. Når overvåkingsreleet leser av for høy strøm, er en tidsforsinkelse satt til 100 ms før den gir beskjed videre til overbelastningsvernet. Vernet har videre en tidsforsinkelse på 80 ms før den bryter. På grafen ser man at det er ca. ni perioder med strøm i metning. $9 \times \frac{1}{50 \text{ s}} = 180 \text{ ms}$. Dette samsvarer godt.



Figur 22 Oscilloskop

Når vernet bryter, oscillerer spenningen veldig før den stabiliseres rundt null, sammen med strømmen. Triggeren er stilt inn på den positive halvperioden. På kurven observerer vi at strøm først går i metning ved negativ halvperiode.

Siden triggeren slår ut i den positive halvperioden, kan vi ikke vite om overslaget allerede har startet i den negative halvperioden. Dvs. skopets målinger kan ikke fortelle oss nøyaktig når lysbuen faktisk startet. Det interessante for oss er å se at spenningen ut fra styrepult oscillerer veldig i brytningsøyeblikket. Målekondensatoren blir som en svingekrets akkurat på dette tidspunktet. Dette kan være en årsak til at man iblant fikk uventede resultater fra målekondensatoren.

2.6 Konklusjon innledende tester - hengeisolatorer

Etter de innledende eksperimentene konkluderte vi med at vi burde bruke primærspenningen på styrepulten som referanse, fremfor å bruke målekondensatorene sine resultat. Målekondensatoren ga for unøyaktige og varierende resultat. Denne kunnskapen tok vi med oss til gasstestene, hvor vi brukte primærspenningen og beregnet den tilsvarende verdien ved hjelp av forholdstallet.

Videre kan man konkludere med at Faradays buret som er installert ble en suksess. Fischer-rapporten påpekte flere problemer og utfordringer ved det gamle høyspenningslaboratoriet. I sin rapport nevnte de sterke elektriske felt, korona utladninger og induserte spenninger. Flere av komponentene utenfor testrommet fungerte ikke som forventet under høyspenningstester. De forteller at vinduskarmer og komponentstativ inne i testrommet ble betydelig påvirket av de elektriske feltene. Videre at kondensatorene i komponentstativet ble ladet opp og lange lysbuer ble oppdaget ved sikring av testrom. Provisoriske løsninger som å direkte jorde vinduskarmer og pakke inn multimeterne i aluminiumsfolie ble anvendt (enkelt Faradays bur).

Alle disse problemene synes nå å være løst. Vinduene er oppgradert slik at støy blir sendt til høyspenningsjord. Spenning i vinduskarmene kunne ikke lenger registreres. Brannalarm, styrepult og dørlåser var upåvirket av spenningen i testrommet, noe som tidligere har vært et problem.

Når det gjelder selve hengeisolatortestene ser man tydelig at isolasjonsevnen til hengeisolatorene svekkes etter påføring av væske, spesielt med saltvann. Våre testresultater har flere mulige feilkilder, men vi har fått resultater som samsvarer godt med teori og sammenliknbare forsøk. Vi konkluderer med at våre gjennomsnittresultat er en god tilnærming til virkeligheten, men vi kan få store avvik på enkeltforsøk.

3 SF6

3.1 Innledning

Svovelheksafluorid, heretter omtalt som SF6, er en gass som er svært mye benyttet i nettstasjoner, bryter- og koblingsanlegg over hele verden. Den omfattende bruken har sammenheng med gassen sine uovertrufne egenskaper som isolasjons- og strømbrytningsmedium. På tross av dette ønsker man å redusere, og på sikt fullstendig erstatte, bruken av SF6 som bryter- og isolasjonsmedium i høyspenningsanlegg. Årsaken er at gassen er en svært potent drivhusgass. Med økende fokus på klima og miljø tvinges det frem et behov for å utvikle alternativer til SF6.

3.2 Bakgrunn

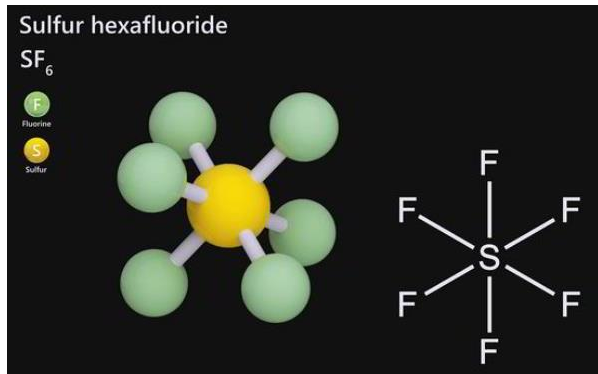
SF6 er i hovedsak en kunstig fremstilt gass, selv om naturlige forekomster av gassen også er funnet. Første gang gassen ble oppdaget var ved laboratorieforsøk i Paris i år 1900 [4]. Vanligvis så produseres gassen ved å skape en relasjon mellom svovel og fluor. Svovel brennes i en fluoratmosfære for å skape en reaksjon der svovel- og fluormolekylene fester seg til hverandre og danner SF6.

På 1930-tallet forstod man at gassen kunne benyttes som isolasjon i elektriske installasjoner, og i 1939 patenterte Thomson-Houston prinsippet med å benytte SF6 som isolasjonsmedium i kabler og kondensatorer [1].

Anvendelsen av gassen ble utviklet videre, og i løpet av 1960-tallet ble de første gassisolerte effektbryterne som benytter SF6 som isolasjonsmedium produsert i USA [5]. I 1966 ble verdens første SF6-isolerte anlegg installert i Paris, og i 1973 ble det første 145 kV SF6-anlegget i Norge installert [6]. Siden den gang har utallige høyspenningsapplikasjoner blitt installert verden over. Til bruk som bryte- og sløkkemedium er SF6 suveren, men utover 1990-tallet begynte man bli oppmerksom på gassen sitt klimaavtrykk. Fra og med Kyotoprotokollen 1997 ble SF6 klassifisert som en klimagass [7]. Konsekvensen av dette var et økende fokus på å begrense bruken og utslippene av SF6.

3.3 Egenskaper til SF₆

På grunn av SF₆ sine gode isolasjons- og bryteregenskaper har gassen siden 1960-tallet vært den mest benyttede gasstypen i høyspenningsanlegg og transformatorstasjoner på verdensbasis. Det er få ulemper med å benytte gassen, men det finnes et par utfordringer knyttet til bruken av denne.



Figur 23 SF₆ [75]

SF₆ er omtrent fem ganger tyngre enn luft. Dette vil si at gassen vil kunne fortrenge ren luft og oksygen i kummer, beholdere og lavtliggende nivåer. Det er derfor kvelningsfare for arbeidende personell i anlegg med uoppdagete og ukontrollerte utslipp. Siden gassen er både fargeløs og luktfri krever dette at forhåndsregler og prosedyrer følges.

Gassen i seg selv ikke giftig, men det dannes spaltningsprodukter når det oppstår lysbue i SF₆ gass. Det er spesielt tre giftige biprodukter som dannes. Det er gassene SF₄ og SOF₂ og spaltningsproduktet AlF₃ (Aluminium fluorid). De to førstnevnte gassene er meget giftige og angriper lungene. Sistnevnte fremstår som et hvitt pulver, og dette blir etsende i kontakt med fuktighet [8]. Konsekvensen av dette er at ved oppstått overslag i bryterkammer eller gassrom, må nøye regulerte prosedyrer følges forut og under inspeksjon for å unngå skade på personell. Prosedyrer og instruks er utarbeidet av Statnett.

Tilbake til 1960-årene, da SF₆ gass i koblings og bryteranlegg bredte om seg verden over, var de miljømessige konsekvensene ved bruken av gassen ofret få tanker. Denne problemstillingen har verden derimot gradvis blitt mer oppmerksom på. I 1997 identifiserte Kyotoprotokollen SF₆ som en av de seks mest sentrale drivhusgassene. Gassen har et enormt klimaavtrykk ved utslipp. Med god margin er SF₆ gassen med høyest GWP (Global Warming Potential) som vi kjenner til. Vi snakker altså om en svært potent klimagass. Oppgitt GWP for gassen varierer fra ulike studier og undersøkelser, men oppgitte verdier ligger mellom 22 500 til 25 000, der den hyppigst nevnte verdien er 23 500.

GWP-verdien beskriver det globale oppvarmingspotensialet til en gass, der CO₂ er referanseverdien. Dette vil si at utslipp av 1 kg SF₆ i atmosfæren tilsvarer utslipp av omkring 23 500 kg CO₂. Gassen har i tillegg en nedbrytningstid i atmosfæren på 3200 år. Det betyr at SF₆-utslipp vil akkumuleres i atmosfæren uten å brytes særlig ned.

Med andre ord, til tross for at SF₆ har egenskaper som egner seg ypperlig i høyspenningsapplikasjoner isolert sett, så tvinges det frem et behov for alternative løsninger av miljømessige hensyn.

3.3.1 Spesifikasjoner SF6

Bakgrunnen for den utstrakte bruken av SF6 i høyspenningsapplikasjoner henger sammen med gassen sine egenskaper. Blant mange fordelaktige egenskaper kan følgende punkter nevnes:

- ✓ SF6 har en meget god dielektrisk styrke, tre ganger bedre enn luft, dvs. 9 kV/mm ved 1 bar [9].
- ✓ Den er «kjemisk reaksjonstreg» eller «kjemisk stabil». Dette er en positiv egenskap i høyspenningsapplikasjoner, men nedbrytningstiden er lang. Antatt levetid atmosfæren er 3200 år [10].
- ✓ Elektronnegativ, god til å tiltrekke seg frie elektroner for å hindre lysbuer.
- ✓ Koepunkt 1 bar: -64 grader celsius [10].
- ✓ Høyt fordampningspunkt på 21, 49 bar [11].
- ✓ God varmekapasitet på 0,097 kJ/mol · K [12]. Skal mye til å øke temperaturen i gassen.
- ✓ God termisk ledningsevne på $1,9 \cdot 10^{-5}$ cal/sec/moC [12].
- ✓ Rekombineres etter lysbueslukking [12]. Går raskt fra ledende til isolerende etter lysbuebrudd.
- ✓ Korroderer ikke [11].
- ✓ Gassen er ikke giftig, men kvelningsfare [12].
- ✓ Spalteproduktene er giftige, strenge krav til håndtering [12].
- ✓ Luktfri og smaksfri
- ✓ Ikke radioaktiv
- ✓ Ikke brennbar [12].
- ✓ GWP: 23 500 (hyppigst oppgitte verdi) [10].
- ✓ Ingen ODP.
- ✓ Spaltes ved temperaturer mellom 1800 til 12300 grader celsius [12].
- ✓ Trykk kan ikke overstige 5-6 bar pga. koepunktet stiger ved høyere trykk. Høyere trykk enn 6 bar og lavere temperatur enn -25C vil SF₆ sannsynligvis kondensere [12]. Væskedannelse trykk ved -30 grader celsius: 5,2 bar [11].

3.4 Regulering og kontroll av SF6

Som nevnt ble SF6 identifisert som en klimagass i Kyotoprotokollen i 1997. Norske myndigheter ønsket å få bedre kontroll over bruk og utslipp av gassen, og i mars 2002 ble det undertegnet en avtale mellom elektrobransjen sine organisasjoner og Miljøverndepartementet. Avtalens innhold var at elektrobransjen årlig måtte rapportere lager, installert beholdning og utslipp av SF6 til Klima- og forurensningsdirektoratet [13].

Bedrifter og selskaper i elektrobransjen som benytter SF6 gass ble samlet i «Brukergruppen for SF6-anlegg» allerede i 1991. Gruppens medlemmer utveksler erfaringer omkring drift, vedlikehold og utvikling av gassisolerte koblingsanlegg. Gruppen har også kommunikasjon med myndighetene. Det er brukergruppen som samler inn lager- og utslippsdata av SF6 og rapporterer til myndighetene.

Videre er det brukergruppen som holder sertifiseringskurs i SF6 håndtering. Dette er en nødvendig miljøsertifisering som alle som skal utføre arbeid på SF6 anlegg må gjennomføre, etter EUs forordning 517/2014 [13]. Forordningen sier noe om hvilke aktiviteter og arbeidsoppgaver som involverer SF6 som krever sertifisering.

3.5 Utslipp

I § 6a-4.Rapporteringskrav for SF6-gass for importører og anleggseiere finner man følgende:

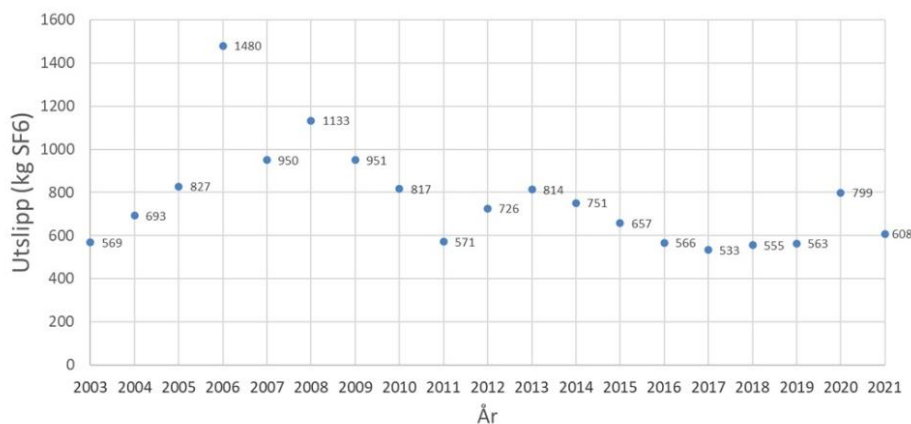
«Importører av SF6-gass og eiere av anlegg som har installert SF6-gass skal innen 15. mars hvert år sende Miljødirektoratet informasjon om beholdning, import og forbruk av SF6-gass det foregående året, samt informasjon om gjenvinning og behandling av SF6-gass fra anlegg som har slik gass installert» [14].

Dette er det Brukergruppen for gassisolerte koblingsanlegg som tar hånd om.

Siste tilgjengelig år med data er for 2021. Da ble det rapportert utslipp på 608 kg. Som man leser av figur 24 var dette et normalår. Årene med høye utslipp er ofte forårsaket av større havarier og/eller revisjoner på anlegg. De 608 kg-ene med SF6 har en ekvivalent på 14 288 tonn CO2 (608 kg ganger 23,5 kg/ tonn). Dette utgjør ca. 0,029% av Norges totale utslipp (2021). Dette viser at selv med små mengder SF6, så blir miljøavtrykket stort [15].

Samtidig melder SSB at det totale utslippet av SF6 i Norge (2021) er på 60 000 tonn CO2 ekvivalent [16]. Innrapportering av SF6 utslipp er vanskelig å få nøyaktig, samtidig som SF6 blir brukt i andre industrier også, som f.eks. i magnesiumindustrien. Brukergruppen skriver selv at de ønsker en oversikt på alle gassisolerte anlegg over 72,5 kV, som betyr at innrapporteringen ikke er fullstendig. SSB tar for seg det totale utslippet i Norge, der høyspenningsbransjen bidrar absolutt mest.

Total anleggsmasse for Brukergruppen er i 2021 på 379 809 kg SF6. Utslipp i 2021 utgjør 0,16% av anleggsmassen [15].



Figur 24 Utslipp av SF6-gassen per år [15]

3.6 Avgifter

Inntil helt nylig fantes det ingen avgifter tilknyttet bruk av SF6 i Norge, til tross for at det har eksistert avgiftsordninger for andre klimagasser. Produksjon og import av såkalte HFK- og PFK gasser (hydrofluorkarboner og perfluorkarboner) har vært avgiftsbelagt siden 2003 [17].

Fra og med 1. januar 2023 skal det betales avgift ved innførsel og produksjon av ren SF6 og SF6 som inngår i produkter.

Satsen for ren SF6 er på kr 22 372 per kilo gass. Avgiften på SF6 som inngår i produkter, beregnes ved å multiplisere andelen SF6 i produktet med en sats på kr 4 332 per kilo gass [18]. Det synes nå å være økonomiske intensiver til å etablere SF6-frie bryter- og koblingsanlegg.

3.7 GIS- og AIS-anlegg

GIS står for «Gas Insulated Switchgear», eller på norsk gassisolerte bryteranlegg. AIS står for «Air Insulated Switchgear», eller luftisolerte bryteranlegg. I disse anleggene har det tradisjonelt vært SF6 som isolasjons- og brytergass (GIS) eller kun som brytergass (AIS). Senere i rapporten kommer vi til å se på alternativ til SF6 både som isolerende- og brytende-gass. Med en isolerende gass, mener vi hovedsakelig mediet som isolerer fasene fra hverandre og fase-jord. Kort sagt, unngå spenningsoverslag. Blir ofte omtalt som en gass i de «passive delene» av anlegget. En brytende gass skal hovedsakelig slukke lysbuer i effektbrytere. Ofte referert som de «aktive delene» av anlegget, som består delvis av bevegelige deler.

Siemens, ABB, Hitachi og GE har alle utviklet sine SF6-frie alternativer til GIS. Opp til 145 kV har disse vist seg å fungere bra. Utfordringen ligger i fullstendig SF6 frie 420 kV GIS anlegg, hvor effektbryterne er hovedproblemet.

Hovedforskjellen mellom GIS og AIS er arealbruk. AIS benytter den naturlige luft som isolasjon, og dermed må avstanden mellom spenningsførende deler være relativt stor. Med gassisolerte SF6 anlegg kan anleggene redusere arealbruken med så mye som 70% sammenliknet med AIS [19]. På områder med begrenset areal er derfor GIS anlegg å foretrekke. Dette kan være inne i fjellhaller, eller i bynære strøk der areal er begrenset og tomtepriser er høye. Det kan nevnes at GIS anlegg med nye og moderne gasser er noe større i omfang sammenliknet med GIS anlegg med SF6, men forskjellene er relativt begrenset. I alle fall på de lavere spenningsnivåene. For eksempel opptar Siemens sitt «Blue GIS anlegg» for 145 kV den samme plassen som et 172 kV SF6 anlegg.



Figur 25 AIS og GIS [19]

En annen fordel med GIS anlegg er at det står innendørs, og anlegget er forseglet. GIS er dermed svært motstandsdyktig på luftforurensning. AIS anlegg i kystnære strøk kan for eksempel ha utfordringer med salter som fester seg på anleggsdelene, noe som kan øke faren for overslag i anlegget.

I AIS-anleggene benyttes som nevnt luft som isolasjonsmedium, men man finner likevel SF₆ i effektbryterne. Imidlertid i betydelig mye mindre mengder enn i GIS-anlegg. I et 145 kV GIS-anlegg vil man eksempelvis finne omkring 85 kg SF₆ per bryterfelt sammenliknet med ca. 7 kg i et AIS-anlegg på samme spenningsnivå [20]. Vår spørreundersøkelse hos et utvalg nettselskaper viser at disse foretrekker å bygge AIS-anlegg nettopp fordi man reduserer behovet for å håndtere og bruke SF₆. Dessuten er et AIS-anlegg enklere å utvide og modulere på senere tidspunkt, sett opp mot GIS-anlegg. Forutsetningen er at man har tilstrekkelig areal til å bygge AIS.

Når det gjelder driftssikkerhet så finnes det også fordeler og ulemper med begge typer anlegg. GIS anlegg har minst feil. Feilfrekvensen for last- og effektbrytere er $\frac{1}{4}$ i GIS-anlegg sammenliknet med AIS-anlegg, og på samleskinnene er det nesten 10 ganger mer feil på AIS enn GIS [19]. På den andre siden så er feilrettingstiden betydelig lenger på GIS-anlegg. GIS er mer komplisert, behøver ofte eksterne operatører til feilrettingen, reservedeler er sjeldnere og har lenger leveringstid. På mange måter oppveier derfor disse faktorene hverandre. Vår erfaring, etter kontakt med nettselskapene, er at aspektet driftssikkerhet vektet lavere enn miljø og plasshensyn når type anlegg skal bestemmes.

Per i dag er det begrenset hvor mange GIS-anlegg som er installert hos norske nettselskap. Vi kjenner til at Siemens Energy har overlevert 19 av sine Blue GIS anlegg på 145 kV til norske kunder, de aller fleste av disse er allerede satt i drift. De kan videre melde om flere anlegg i bestilling. På Hamang transformatorstasjon i Sandvika oppgraderer Statnett til nytt, delvis SF₆ fritt GIS anlegg på 420 kV. Her snakker vi SF₆ fritt på GIL (Gas Insulated Lines) og samleskinnene, altså de passive delene. Komplette GIS-anlegg uten SF₆ (over 145 kV) er på pilotstadiet flere steder i verden, men enda ikke fullt ut klare for lansering.

Siden GIS har den største SF₆ utfordringen og har et mer omfattende krav til gasegenskaper sammenliknet med AIS, har vi valgt å fokusere på GIS i rapporten.

4 Egenskaper til en ideell gassmiks

En gass som skal erstatte SF₆ må ha egnede fysiske og kjemiske egenskaper. Det er mange krav til sikkerhet og drift når vi snakker om høyspenningssystemer, også gassene som skal benyttes i et GIS-anlegg [21].

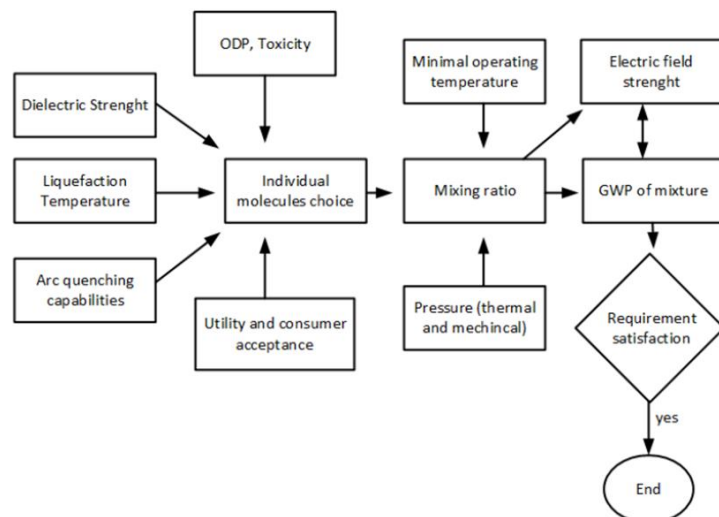
Følgende momenter bør være på plass for at en gass skal kunne benyttes som en isolerende- og brytende mediet i GIS:

- ✓ Inneha høy dielektrisk styrke.
- ✓ Effektiv med tanke på å slukke lysbuer.
- ✓ Gode varmeledningsegenskaper.
- ✓ Høy spesifikk varmekapasitet. Varme stabilitet for temperaturer over 400 K over lang tid
- ✓ Kjemisk stabil
- ✓ Lavt kokepunkt og høyt fordampingstrykk ved høyt trykk
- ✓ Kompatibilitet med andre materialer og plass effektiv
- ✓ Kreve lite vedlikehold.
- ✓ Gassen holder på egenskaper etter lysbuebrudd
- ✓ Elektronnegativ

Foruten egnede tekniske egenskaper, må også miljø og sikkerhetskrav imøtekommes:

- ✓ Lav GWP
- ✓ Lav ODP
- ✓ Lav på giftighet
- ✓ Ildsikker og ikke eksplosivt

Å finne et velfungerende alternativ til SF₆ er en vanskelig prosess. På figur 26 kan man se fremgangsmetoden til 3M i utviklingen deres av en syntetisk gass. Helt siden Kyoto-avtalen i 1997 har industrien og forskere forsøkt å finne gode alternativ. Det optimale er å finne en gassmiks som både kan være i de passive og aktive delene i anleggene, slik som SF₆.



Figur 26 Gass-utvikling prosess [10]

4.1 Naturlige gasser

O₂ (oksygen), N₂ (nitrogen) og CO₂ (karbondioksid) er naturlige gasser. Disse gassene har egenskaper som er velegnet å benytte i gassmikser som kan erstatte SF₆. Naturlig luft har dielektriske egenskaper som er bedre enn ren CO₂ og N₂ alene [11]. Komposisjonen av vanlig luft er 78,09 % N₂, 20,95% O₂, 0,93% argon, resten består av andre gasser, blant annet CO₂ [11].

Sammenliknet med SF₆ så er isolasjonsevnen til de nevnte naturlige gassene en plass mellom 30 – 43 %. I stigende rekkefølge er gassene rangert slik: CO₂, N₂ og luft, hvor luft har best holdfasthet. For å kunne utfordre SF₆ på dielektrisk styrke, må trykket til disse gassene økes. Evt. må avstanden på ledende komponenter økes.

Gas	N ₂	CO ₂	SF ₆
Breakdown voltage [kV/cm.bar]	32.9	30.1	89.0
GWP for 100 Years	0	1	23,900

Tabell 1 Sammenligner N₂ og CO₂ med SF₆ under visse forhold

Alle disse gassene har lave kokepunkt og et høyt fordampningstrykk. Dette er essensielle egenskaper i en gassmikser som skal operere under lave temperaturer. Luft, N₂ og CO₂ er ikke giftige, de er ikke brennbare, og innehar både lav GWP og ODP. Imidlertid kan CO₂ kan fortrenge luft, noe som kan føre til kveldningsfare ved store mengder. Ren O₂ er ustabil, og kan derfor ikke være en isolerende gass i alene, men kan benyttes i en mikser.

I gassmikser ser man ofte at det er CO₂ som blir foretrukket framfor N₂. Dette på tross av at N₂ har litt bedre dielektrisk styrke enn CO₂, og dessuten ingen GWP. Årsaken til dette synes å være at N₂ har svakere evne til å tiltrekke seg elektroner, sammenliknet med CO₂. CO₂ er mer elektronnegativ og dette er avgjørende for å unngå elektronskred. CO₂ viser seg også mer stabil enn N₂, og har lavere grad av avvik ved gjentatte forsøk på dielektrisk holdfasthet [11]. Stabile og konsistente resultat, sammen med bedre bryteegenskaper gir CO₂ et fortrinn i en gassmikser over N₂ [11]. Samtidig har forskere slitt med å kun bruke CO₂ som brytergass. Siden den dielektriske styrken er så lav, må trykket være veldig kraftig ved høye spenningsnivå. Da må anlegget bli dimensjonert større, fordi kapslingene i anlegget sliter med å være helt tett når trykket er så stort.

Grafittdannelse er et problem i effektbrytere, og noe gassprodusentene må ta hensyn til. Hvis avfallsstoffer akkumuleres, vil man få ujevnheter mellom elektrodene. Dermed blir det vanskeligere å bryte en lysbue. Det viser seg at ved å ha kun en liten mengde med O₂ i gassmiksen, vil grafittproduksjonen reduseres og fordampningstemperaturen til grafitten dempes. Med tilstrekkelig O₂ i gassmiksen kan man forhindre grafittdannelsen fullstendig [22].

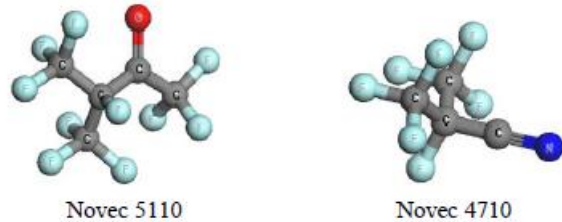
CO₂ kan endre fordampningstemperaturen til grafittprosessen slik at den totale produksjonen blir mindre. Den kan ikke redusere mengden, bare flytte produksjonsintervallet i forhold til temperatur. N₂ har ingen gunstige innvirkning på grafittproduksjon. Derimot kan N₂ stabiliserer fordampningstemperaturen som inntreffer i nullgjennomgangen til lysbuen. Dette er et ugunstig tidspunkt for dannelse av grafitt, da dette er et ledende material. Med andre ord er N₂ lite

hensiktsmessig å ha i en brytergass. Blant annet derfor ABB tidligere utviklet to gassmikser for høyspenning under navnet «Airplus». Den ene for å isolere, den andre som brytergass.

4.2 Syntetiske Gasser

Selskapet 3M har siden 90-tallet forsket på alternativer til SF₆ til bruk i høyspenningssystemer. Etter gjentatte eksperimenter med ulike gasser har 3M utviklet en kombinasjon av gasser som har de foretrukne egenskapene med tanke på

funksjon, sikkerhet og miljø. 3M har utviklet og kommersialisert «3M™ Novec™ Insulating Gases» [23]. To produkter og alternativer er lansert: Novec 5110 (C₅ fluorketon, C₅F₁₀O) og Novec 4710 (C₄ fluornitril, C₄F₇N).



Figur 27 Novec 4710 og Novec 5110 [23]

Begge disse gassene har bedre dielektrisk styrke, har ingen ODP og har betydelig lavere GWP enn SF₆. Ved å benytte disse gassene kan man redusere de potensielle utslippene av drivhusgasser med 98% eller mer, sammenliknet med SF₆ [23]. 3M har samarbeidet tett med industrien i utviklingen av gassene slik at de tar hensyn til industriens ønsker. Spesielt viktig er det at gassen er stabil over lengere tid uten at det oppstår korrosjon eller andre effekter på utstyret [23]. Studier har vist at både Novec 5110 og Novec 4710 kan erstatte SF₆ i dielektriske applikasjoner. GE og Hitachi benytter Novec 4710 i sine produkter, ABB har satset på Novec 5110.

4.2.1 Fysiske egenskaper ved 3M's Novec 4710 og Novec 5110

Den dielektriske styrken som kan leses fra tabellen til høyre gjelder for ublandet Novec 4710 og Novec 5110. De dielektriske testene er utført med disk med en avstand på 2,5 mm, slik at det er et relativt uniformt felt. Her overgår Novec gassene SF₆, særlig 4710 med ca. to ganger den elektriske styrken relativ til SF₆.

Novec gassene har imidlertid et mye høyere kokepunkt, og et mye lavere fordampingstrykk sammenliknet med SF₆. Novec gassene er avhengig av å bli mikset med naturlige gasser for å

oppnå ønskede egenskaper og kunne brukes i kjøligere klima. Hvis ikke risikerer de å kondensere og dermed få ubrukelige egenskaper. Samtidig er volatiliteten til Novec gassene lav, så de kan fremdeles være i gassform selv under kokepunktet [23]. Volatiliteten er evnen et stoff eller substans har for å

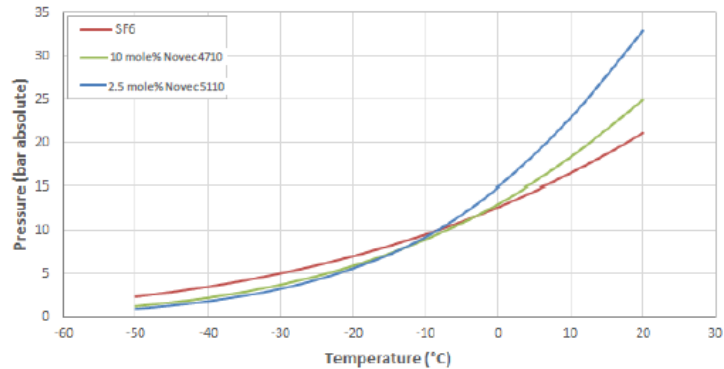
PHYSICAL PROPERTIES OF NOVEC 5110, NOVEC4710, AND SF₆

Property (at 25°C)	Novec 5110	Novec 4710	SF ₆
Molecular Weight (g/mol)	266	195	146
Flash Point (°C)	Nonflammable	Nonflammable	Nonflammable
Freezing Point (°C)	-110	-118	-51
Boiling Point (°C)	27	-5	-64 *
Vapor Pressure (kPa)	94	297	2149
Gas Density at 1 bar (kg/m ³)	10.7	7.9	5.9
Dielectric Strength at 1 bar (kV over 2.5 mm gap)	18.4 at sat'n	27.5	14.0
Atmospheric Lifetime (years)	0.04	30	3200
Ozone Depletion Potential (CFC-11 = 1)	0	0	0
Global Warming Potential (100-yr ITH, IPCC 2013 method)	< 1	2100	23500
Greenhouse Gas Emission Reduction relative to SF ₆	≥ 99.99%	≥ 98%	---

Tabell 2 Fysiske egenskaper Novec vs. SF₆ [23]

fordampe. Siden molekylvekten til Novec gassene er relativt tung, og de intermolekylære kreftene i gassen er rimelig sterke, vil volatiliteten være relativt lav [24].

Figur 28 viser trykk som en funksjon av temperatur. Her sammenlignes SF₆, og gassmikser med Novec 4710 og 5110 i tørr luft og CO₂ (forholdet stod ikke spesifisert). Grafene illustrerer når gassene kondenserer i forhold til trykk og temperatur [23]. Det man ser av disse grafene er at begge Novec gassene kan oppnå lave kokepunkt med en blanding av naturlige gasser. Når en lav konsentrasjon av 4710 eller 5110 er iblandet en naturlig gass, kan gassene utfordre SF₆ sitt kokepunkt med et litt lavere trykk [23]. Novec 4710 er bedre enn 5110 med et kokepunkt på -5 grader celsius kontra 27 grader celsius. Man kan dermed bruke en høyere konsentrasjon av 4710 kontra 5110.



Figur 28 Når gass kondenserer i forhold til trykk og temperatur [23]

4.2.2 Molekylær Elektrostatisk Potensial

For å vurdere en gass sin evne til lysbueslukking ser man blant annet på hvor elektronnegativ gassen er. Da må vi ned på molekylnivå. Man må betrakte det molekylære elektrostatiske potensialet (ESP) til molekylene i gassene. Dette deles opp i positive og negative punkt. Hovedsakelig er man ute etter antall positive ESP punkt, og det totale positive overflate-arealet fordi dette vil tiltrekke negative ladninger [23]. Som man ser fra tabell 3 har begge Novec gassene flere positive ESP punkt og et større positivt overflateareal enn SF₆. Dvs. at 4710 og 5110 skal ha bedre kapasitet til å trekke til seg frie elektroner, og dermed slukke lysbuer.

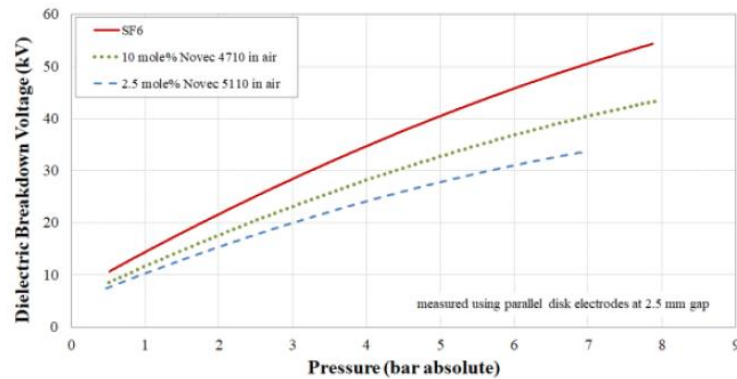
ESP AND MOLECULAR SURFACE AREA OF SF₆, NOVEC 5110, AND NOVEC 4710

	SF ₆	Novec 4710	Novec 5110
Number of surface points	3586	5500	6388
Number of positive ESP points	2157	4630	4859
Number of negative ESP points	1429	870	1529
Molecular surface area (Å ²)	101.9	152.6	179.1
Positive surface area (Å ²)	61.3	128.5	136.2
Negative surface area (Å ²)	40.6	24.1	42.9

Tabell 3 Molekylær elektrostatisk potensialet [23]

4.2.3 Isolerende Karakteristikk

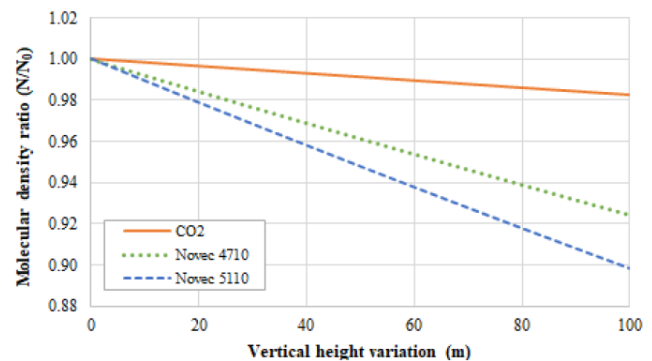
Novec gassene utblandet har en redusert dielektrisk styrke. Til høyre ser man grafer på den dielektriske styrken til 10 mol% Novec 4710 og 2,5 mol% Novec 5110, iblandet luft. SF6 er referanseverdien. Disse forsøkene er igjen utført med diskere med 2,5 mm avstand. Ved 3 bar ser man at 5110 oppnår 20 kV, mens 4710 oppnår 24 kV før overslag. Sammenliknet med SF6 er dette ca. 71 % og 86% av den dielektriske styrken [23]. Dette er imponerende resultater siden konsentrasjon av begge Novec gassene var såpass begrenset. Ved å øke trykket ytterligere, ser man at Novec 4710 har samme holdfasthet ved 4 bar, som SF6 har ved 3 bar. Novec 5110 i utblandet form må opp i 5,2 bar for å prestere det samme som SF6 ved 3 bar [23].



Figur 29 Dielektrisk styrke i forhold til trykk [23]

4.2.4 Homogenitet av Gassmik

Et problem som må belyses er homogeniteten til gassene. Begge Novec gassene har en tung molekylær vekt i forhold til andre gasser. I dette tilfelle sammenlikner vi med CO₂. En bekymring er at gassene kan separere seg vertikalt over en viss tid. CO₂, som har en lettere molekylær vekt, endrer molekylærtettheten mindre ved høydevariasjoner enn Novec gassene. Dette kommer av at trykket i en gass endres med høyde. Når molekylærtettheten ved ulike høyder endres ulikt mellom gassene, vil de da separeres over tid? Forsøk har blitt utført, der Novec 4710 og CO₂ ble lagret i en 2 meter høy tank over 6 måneder. Temperaturen ble regulert til -15 grader celsius [23]. Komposisjonen av gassene i tanken var uendret på tross av høydeforskjellen. Konklusjonen fra forsøket var: så lenge gassen ikke kondenserer så vil gassmiksen ikke separeres over en kortere eller lengre tidsperiode, på tross av forskjellig molekylær vekt. Så lenge gassene blir mikset riktig, vil de ikke skilles i gassform [23].

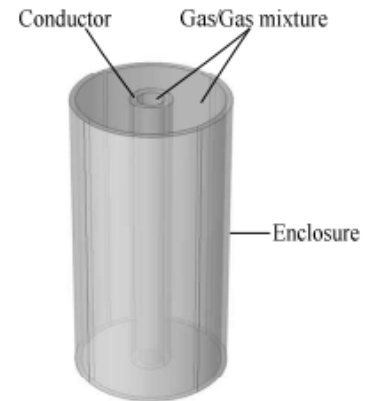


Figur 30 Homogenitet i gassmik [23]

4.2.5 Varmetransport

Varmetransport egenskapene er kritisk for en gass som skal benyttes som isolasjonsmedium. I gassisolerte system vil konduktansen reduseres i takt med at temperaturen i ledematerialet øker [23].

Forskere har testet varmetransport egenskapene til to ulike blandinger av Novec 4710 og CO₂, samt SF₆. Eksperimentet skulle simulere en koaksial gass isolerte linje (GIL). Som man observerer på figur 31 er lederen plassert i sentrum av sylindren. Gassen blir fylt i tanken. GIL-en i forsøkene ble satt opp som en faktisk GIL med 2000 A som test strøm. Grensen for temperatur økning i GIL-en er på 65 K [23]. Lederen var av aluminium med en ytre diameter på 85mm. Ved å anta at all energien mellom leder og gass går til varme, blir resultatene slik som presentert på grafene under i figur 32 der temperaturen er en funksjon av trykket [23].



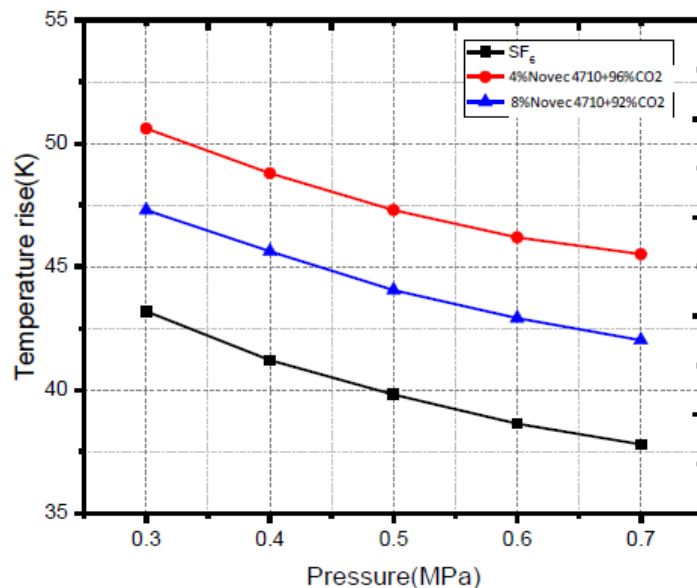
Figur 31 GIL [66]

Det som kan tolkes av grafene er at jo høyere trykk, jo lavere temperaturøkning dannes i GIL lederen. Det betyr at varmetransport egenskapene til gassene blir bedre når trykket øker. F.eks. ved 5 bar er temperaturen lavere for alle gassene enn ved 3 bar. Man kan også registrere at alle gassene er godt innenfor grensen på 65 K

temperatur økning. Ved å sammenligne Novec gassene, ser man at høyere konsentrasjon av Novec 4710 gir lavere temperatur økning i lederen. Det betyr at 4710 har gode varmetransport egenskaper. I dette studiet konkluderte man også med at 5110 hadde varmetransport egenskaper som var gode. Den konklusjon kom på bakgrunn av at CO₂ var hovedgrunnen til temperaturøkningen i GIL-en [23].

Som ren gass vet vi at den spesifikke varmekapasiteten til Novec 5110 og Novec 4710 er på 0,351 kJ/mol*K og 0,160 kJ/mol*K. Dvs. at begge gassene har bedre varmekapasitet enn SF₆ (0,097 kJ/mol*K). Dette gjør at Novec gassene motstår temperaturendring bedre.

Fluornitrigasser og Novec 4710 er stabile opp til 700 K [11]. Kravet er en stabilitet på 400 K over lang tid. Novec 5110 er stabil mellom 200-300 K [25]. Dette vil si at den må blandes med f.eks. CO₂ (termisk stabilitet på 700 K) for å oppnå kravet på 400 K [25].



Figur 32 Temperaturøkning som funksjon av trykk [23]

4.2.6 Giftighet

Hvor trygge Novec 4710 og Novec 5110 er for eksponering har blitt evaluert gjennom «giftighetstester». LC50-4h for Novec 4710 er giftig mellom 10 000 – 15 000 ppmv (parts per million by volume), mens Novec 5110 ligger mellom 14 000 – 20 000 ppmv [23]. Det betyr at disse gassene er litt mer giftig enn SF6 (50 000 ppmv), men at det i praksis er liten forskjell. 3M Medical Department har etablert OEL (occupational exposure limit) på 65 ppmv for Novec 4710. Det betyr at man kan eksponeres av denne mengden gass gjennom 30 år, fem dager i uken, åtte timer om dagen uten fare for helsen [12]. Novec 5110 har en OEL på 225 ppmv. Siden begge Novec gassene blandes ut med andre gasser, har man en veldig god margin til disse grensene [23].

Novec isolerende gasser har en lav giftighet og har gode sikkerhetsmarginer til gjeldene regelverk. Sammenlignbare sikkerhetsrutiner og krav til opplæring stilles likevel til håndterende personell, som ved SF6 [12].

4.2.7 Miljøpåvirkning

Novec 4710 og Novec 5110 påvirker miljøet i mye mindre grad enn SF6. I tabell 2 kan man se at GWP-en til Novec 4710 er 2100. Novec 5110 har en GWP på under en. Nedbrytningstid i atmosfæren er henholdsvis 30 år og 0,04 år. Novec 4710 sin GWP på 2100 er betydelig, men når gassen blir mikset med naturlige gasser vil total GWP bli relativt lav. Man ser at begge Novec gassene har lite miljøavtrykk, men at 5110 kommer klart best ut av de to.

4.2.8 Andre syntetiske gasser

Gjennom litteratursøk har vi også sett på andre syntetiske gasser. På nåværende tidspunkt virker imidlertid Novec gassene å være bedre enn alternativene. Forskere har testet en gassmiks med HFO4E og N2 som fungerte som erstatning for SF6 til mellomspenningsnivå (opp til 125 kV). Ved høyere spenningsnivå falt den dessverre igjennom. CF3I er også en gass som er testet ut. Den hadde flere gode tekniske egenskaper, men er kreftfremkallende, kan gi mutasjoner og er giftig. Den påvirker dessuten ozonlaget, og kan derfor ikke brukes i industrien [26].

Med andre ord virker det som at Novec gassene er de som industrien vil satse på og benytte de kommende årene. Flere av gassene som de store aktørene innenfor høyspenningsutstyr benytter, inneholder mikser av Novec gassene. De vil bli omtalt nærmere senere i oppgaven.

5 Alternativ Isolerende gasser

5.1 Clean Air

Clean Air er gassen som Siemens benytter som isolasjonsmedium i sine Blue Gis anlegg. Siden dette er ren luft, er GWP verdien null.



Figur 33 Simens Energy [30]

Clean Air består av 80% nitrogen og 20% oksygen.

Gassen er rensset for CO₂, og fri for luftfuktighet [27]. Gassen er meget stabil. Tester Siemens har utført viser at gassen opprettholder sine egenskaper i anlegget, uten å reagere kjemisk med materialene som øvrig er benyttet i koblingsutstyret [28].

Siemens Energy ramser videre opp en rekke fordeler ved å benytte denne gassen i sine GIS-anlegg [29]:

- Clean Air har ingen påvirkning på verken GWP eller ODP (Ozone Depletion Potential).
- Ikke giftig eller antennelig
- Ingen kvelningsfare som ved SF₆, ingen spesielle krav til ventilasjon.
- Lavt kokepunkt, og dermed ingen kondensering av isolasjonsmediet ved lavere temperaturer.
- Ingen spesielle krav til transport, installasjon, drift, rapportering, resirkulering eller trening av personell som skal håndtere gassen.
- Operasjonstemperatur mellom -50 til +55 grader celsius
- Kan slippes ut i omgivelsene etter bruk.

Det kan også påpekes at Clean Air ikke er et patentert produkt. Syntetisk luft kan leveres av de fleste selskaper som selger og distribuerer gass. Dette sikrer tilgjengelighet, og er med på å holde kostnadene nede for nettselskapene.

5.2 Air Plus

AirPlus er gassblandingen som ABB har utviklet i samarbeid med 3M. AirPlus består av 5-20 % Novec 5110, blandet inn i syntetisk luft, eller en miks av oksygen og CO₂ [30]. Det synes som om blandingen med syntetisk luft er vanligst. GWP verdien til gassen, uansett miks er godt under 1.



Figur 34 ABB [34]

Blandingsforholdet er avgjørende for egenskapene til gassen, blant annet kokepunktet. Faktorer som spiller inn i gassmiksen kan være omgivelsestemperatur og høyde over havet [31].

Den dielektriske styrken er sammenliknbar med SF₆. Med mindre modifikasjoner så er GIS med AirPlus tilsvarende i størrelse som SF₆ anlegg på samme spenningsnivå [31]. AirPlus er heller ikke like kjemisk stabil som SF₆, så reaksjoner med materialer i anlegget kan forekomme.

I september 2020 hadde ABB et webinar omhandlende AirPlus, der de besvarte en del spørsmål omkring isolasjonsgassen [32]. Følgende ble beskrevet der:

- Marginalt giftig – tilsvarende SF₆
- Trenger ikke spesiell sertifisering som ved SF₆ for håndtering, men ellers samme krav når det gjelder sikkerhet og behandling. Samme sikkerhetsprosedyrer som ved SF₆ anbefalt.
- Mindre giftige biprodukter enn SF₆
- Ingen fare for personell ved lekkasje

Med tanke på GWP er Air Plus mye bedre for klima sammenliknet med SF₆. Imidlertid har Air Plus et høyt kokepunkt, og er derfor ikke et egnet alternativ i kalde områder ved de høyeste spenningsnivåene. Videre solgte ABB i 2021 sin divisjon for høyspenningsapplikasjoner til Hitachi Energy, og selger i dag ikke utstyr for spenninger over 60 kV [33]. Vi velger derfor å se bort fra Air Plus videre i oppgaven.

5.3 g3 (Green Gas for Grid)

g3 er gassblanding utviklet i samarbeid mellom GE og 3M og uttales «g cubed». Den utnytter egenskapene til Novec 4710, CO₂ og O₂. g3 har:

- ✓ Høy dielektrisk styrke
- ✓ Lavt kokepunkt og høyt fordampningstrykk
- ✓ Gode varmeledningsegenskaper
- ✓ Lav GWP
- ✓ Ingen ODP
- ✓ Kompatibel med eksisterende materiale
- ✓ Utstyr kan designes kompakt
- ✓ Ikke giftig
- ✓ Ikke brennbar
- ✓ Samme standarder til sikkerhet i industrien som SF₆
- ✓ Kjemisk- og termisk stabil



Figur 35 g3 [34]

g3 er en god erstatter for SF₆ som isolerende gass, også på de høye spenningsnivåene (420 kV). Sammenligner man g3 og SF₆, vil egenskapene være ganske like. g3 har en dielektrisk styrke mellom 87 – 96 % relativ til SF₆. Samtidig kan GWP reduseres med 99%. Hvis Storbritannia hadde erstattet all SF₆ i sine høyspentanlegg med g3, vil det være ekvivalent med å fjerne 150 000 biler av veien [34].

g3 er designet til å operere ned til -25 grader celsius for GIS under 7 bar trykk [35]. Ved spesielle omstendigheter kan man benytte varmelanter for å unngå kondensering. Da snakker man om temperaturer ned til -40 grader celsius. Dette varmelanteret benyttes forøvrig også for SF₆ i enkelte tilfeller.

Produsenten har utarbeidet prosedyrer omkring monitorering, behandling og gjenbruk av g3. For å verifisere trykket kan man bare oppdatere sensorene til det nye nivået. Kvalitetssjekk av selve gassen blir gjort ved å se på forholdet mellom CO₂ og Novec 4710, samt å måle luftfuktighet. g3 kommer ferdigblandet i gassflasker under trykk, klare til bruk. En spesialutviklet fylleenhet sørger for å holde homogeniteten i gassmiksen under påfyllprosessen. Siden g3 er en gassmikse, så er behovet for å beholde homogeniteten kritisk ved påfylling. Her varmer man opp gassen slik at den når et «superkritisk» punkt der det er lett å holde den homogen. Gjenbruk av g3 skal enten skje ved å gjenbruke gassen ved å holde gassmikseforholdet likt eller separere og mikse de på nytt. Dette skal de undersøke nærmere, men tidligere erfaringer med gassmikser tilsier at dette ikke skal være noe problem [35].

5.4 Hitachi EconiQ

I 2021 signerte GE og Hitachi en banebrytende avtale for å redusere miljøpåvirkningen i elektrisitetsforsyningen, der begge selskapene vil komplementere immaterielle eiendeler relatert til deres respektive SF6-frie løsninger [36]. GE har vært avgjørende i

utviklingen av g3, og Hitachi har valgt å gå inn i en krysslisensieringsavtale for å utveksle erfaringer i teknologiutviklingen og implementere g3 også i deres produkter.

Hos Hitachi heter imidlertid ikke gassen g3, men er navnsatt under paraplybetegnelsen «EconiQ». EconiQ er Hitachi sitt navn på alt SF6 fritt-utstyr, herunder isolasjon- og brytergassene.

Hitachi benytter en rekke ulike gasser i sin portefølje, men de er som nevnt alle betegnet som en EconiQ gass. Ellen Lysaker hos Hitachi Energy Norge kan fortelle at gassen de benytter mest er en gasstype som likner svært mye på g3 [33]. Følgelig er egenskapene svært like g3. Lysaker påpeker imidlertid at Hitachi bruker flere ulike gassmikser, avhengig av hvilke komponenter gassen skal benyttes til. For eksempel blandes Novec 4710 i andre konsentrasjoner og med forskjellige gasser, betinget av om gassmiksen skal brukes som isolasjon- eller brytermedium. Videre kan hun fortelle at Hitachi også benytter gassmikser som likner mye på ABB sin Air Plus, og også har gassmikser som er helt uten fluor. Da likner gassene mer på Siemens sin Clean Air. Noen nærmere beskrivelse av denne porteføljen ønsket ikke Lysaker gå ut med, da dette er klassifisert som bedriftshemmeligheter.

Selv om Hitachi valgt å holde kortene tett til brystet med tanke på hvilke gasser de faktisk benytter i sine produkter, kunne Lysaker stolt fortelle om deres EconiQ retrofill. Dette er en gassmikse som kan erstatte SF6 i passive deler av GIS-anlegget på 420 kV. Dette kan gjøres i en enkel operasjon. Man tapper av eksisterende SF6 i anlegget, monterer nytt manometer og EconiQ retrofill fylles på [33].



Figur 36 EconiQ [37]

5.5 Vakuum

I fullstendig vakuum eksisterer det ikke partikler. Dermed vil det heller ikke være noen elektrisk ledenevne i vakuum. I utgangspunktet skulle vakuum være den perfekte isolator. I praksis er det likevel ikke slik. Ideelt vakuum er en teoretisk tilstand som er umulig å oppnå.

Kvaliteten av vakuum kan defineres som antall partikler i en cm^3 . For å beskrive antall partikler i vakuum benyttes uttrykket «mean free path». Uttrykket er en beskrivelse av hvor langt et molekyl statistisk kan bevege seg før det kolliderer med et annet molekyl [37]. Sterkere vakuum øker «mean free path» og gir færre molekyler i vakuumbeholderen.

Vakuum kan også klassifiseres etter hvor stor grad av vakuum man har. Det finnes ingen internasjonal standard for denne klassifiseringen, men de fleste ligner tabellen under. Denne tabellen er hentet fra Wikipedia [38]. SI benevnelsen for vakuum er pascal, men ofte benyttes også millibar eller torr. Tabellen under er omregnet fra pascal til bar, da bar er enheten som ellers er benyttet i denne rapporten.

1. Medium grad av vakuum	$< 1 \times 10^{-3}$ til 1×10^{-6} Bar
2. Sterk grad av vakuum (HV)	$< 1 \times 10^{-6}$ til 1×10^{-11} Bar
3. Ultra sterk grad av vakuum (UHV)	$< 1 \times 10^{-11}$ til 1×10^{-14} Bar
4. Ekstremt sterkt vakuum (XHV)	under 1×10^{-14} Bar

Til bruk i vakuumbrytere benyttes vakuum i klasse 2.

Overslag i vakuum

I boken «Advances in High Voltage Insulation and Arc Interruption in SF6 and Vacuum», fra Naidu og Maller [39] kan man lese at det i hovedsak er tre prosesser som er identifisert ved overslag i vakuum. Disse tre prosessene er beskrevet under, og er alle hentet fra boken:

1. «Field Emmision»
På overflatene til elektrodene kan det befinne seg mikroskopiske ujevnheter, oksydert film eller adsorberte partikler. Alle disse faktorene kan trigge elektron utslipp når elektrodene settes under spenning. Tilstrekkelig høy spenning fører til elektronskred og overslag.
2. «Microdischarges»
Man har også observert det man kaller mikroutladninger på elektrodeoverflatene i vakuum. Disse utladningene kommer som følge av for eksempel marginale gasslag som er kondensert på elektrodeoverflaten. Mikroutladningene fører ikke til sammenbrudd i isolasjonen alene, men bidrar til at holdfastheten svekkes.

3. «Microparticle transfer»

Mikropartikler er klynger av atomer som er dratt ut fra elektrodeoverflaten og som beveger seg over elektrodegapet. Dette fenomenet ble tidlig etablert som en teori for å forklare uventede overslag i vakuum. Senere har forskere observert disse hendelsene i praksis.

Disse tre prosessene virker ikke alene, men kan oppstå samtidig, men i ulik utstrekning. Summen av reaksjoner fører til sammenbrudd i dielektrisk holdfasthet.

Pre-breakdown phenomena

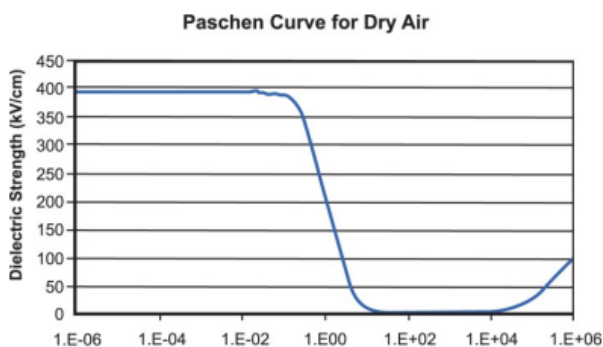
Før faktisk overslag i vakuum inntreffer kan man observere en «pre-breakdown current», noe som er en målbar strøm som flyter mellom elektrodene [39].

- Over små gap vil man allerede ved lave spenninger kunne observere en relativt kontinuerlig strøm begynne å flyte.
- I større gap (> 10 mm), vil en kvasi-kontinuerlig strøm kunne flyte, og mikroutladninger vil produseres. Strømmen blir kontinuerlig ved økende spenning. [39].

Ytterligere spennings økning vil kunne føre til overslag i begge tilfeller.

Disse pre-breakdown strømmene er induert av de tre hovedprosessene knyttet til overslag i vakuum. Allerede ved lave spenninger oppstår disse fenomenene, noe som gir seg til syne ved pre-breakdown strømmen. Ytterligere spennings økning vil kunne føre til overslag.

Vakuum når sin maksimale dielektriske holdfasthet ved cirka 0,01 millibar [40]. Over dette nivået så vil «Townsend Avalanche Phenomena» begrense den dielektriske ytelsen. Under denne verdien vil feltutslipp og mikroskopiske forurensninger og partikler føre til overslag [39].



Figur 37 Paschen kurve for tørr luft [41]

Oppsummert vil all form for vakuum kontamineres i form av tilstedeværelsen av isolerende materialer og metalliske overflater/elektroder i vakuumbeholderen. Det er ikke lenger «ingenting» i beholderen. Partikler vil følge med. Dette gjør at vakuum har svært begrensede egenskaper som isolasjonsmedium.

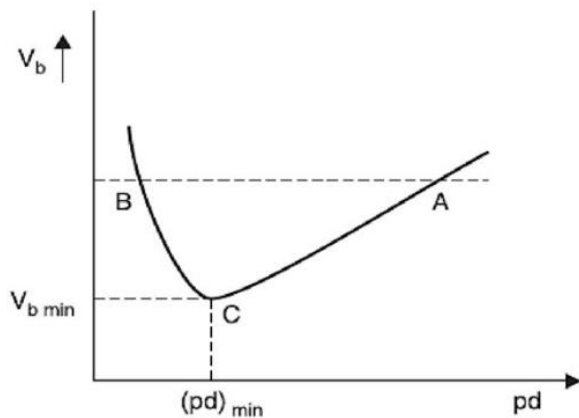
6 LAB-testing gasser

6.1.1 Paschens lov

Paschens lov kan hjelpe oss å analysere om en gass er et godt isolasjonsmedium. Den sier noe om hvor stor gjennomslagspenningen er ved ulike forutsetninger. Har avstandene mellom elektrodene betydning? Påvirkes gjennomslagspenningen til gassen ved ulike trykk? Loven er oppkalt etter Friedrich Paschen som beviste sammenhengene mellom spenning, trykk og avstander i 1889 [42].

$$U_{gj} = f(p \cdot d)$$

Formelen over viser gjennomslagspenningen som en funksjon av trykket multiplisert med avstanden. Paschen benyttet to plater med spenning over, og en gass med konstant trykk. Grafen til figur 38



Figur 38 Forhold mellom spenning, trykk og avstand mellom elektroder [44]

[43]. Når avstanden er liten er det få atomer mellom platene, dermed vil få ionisasjoner oppstå selv med et sterkt elektrisk felt [43]. Punkt C er minimumspunktet for overslag, der vil avstanden være liten og det er mange nok atom til å hurtig starte et elektrisk kred. Punkt A viser det store området der økt trykk eller en økning i plateavstand vil føre til større isolasjonsholdfasthet. Med andre ord er formelen til Paschen en god tilnærming etter minimumspunktet C. Her i fra får man i praksis en lineær funksjon.

I våre forsøk holder vi avstanden fiksert. Dvs. vi forventer at overslagspenningen er rimelig proporsjonal med trykket. Samtidig vet vi at den dielektriske styrken er vanskelig å fastslå. Den blir påvirket av flere faktorer som f.eks. temperatur, ujevnheter, partikler, luftfuktighet osv.

viser gjennomslagspenningene ved eksperimentet [43]. Grunnen til at Paschen anvendte to plater var for å få et homogent felt. I våre eksperimenter benyttet vi to kuler, men siden de er like og avstanden mellom er liten, skal det i teorien oppstå et homogent felt også mellom dem. Grafen til venstre illustrerer tre forskjellige punkt som beskriver hvordan isolasjonsholdfastheten oppfører seg.

I punkt B er avstanden mellom platene liten, ergo det elektriske feltet er sterkt. $E = \frac{U}{d}$ viser at feltet blir sterkere jo mindre avstanden er

6.1.2 Intro gasstester

Litteraturen kan fortelle at gasser øker sin dielektriske holdfasthet når de trykkes. Videre forventer man at holdfastheten øker tilnærmet lineært ved stigende trykknivåer. For å verifisere dette testet vi isolasjonsevnen til N₂ og CO₂, samt vanlig trykkluft i to varianter. Bakgrunnen for å velge disse gassene ble gjort på grunn av tilgjengelighet og økonomi. I tillegg er de nevnte gasstypene mye brukt som blandegasser i moderne isolasjons- og brytergasser. Det ville derfor være interessant å se på deres egenskaper som isolerende medium i praksis.

N₂ og CO₂ benyttet i forsøkene var av kvalitet 5.0. Gassene har da en renhet på 99,999%. Trykkluften som vi videre omtaler som «tørr» har vært gjennom en vannutskiller. Fuktighetsnivået til denne luften var ukjent for oss, men luften var tørrere enn trykkluften vi omtaler som «vanlig». Den vanlige trykkluften ble produsert med en ordinær kompressor på høyspenningslaben. Fuktighetsnivået på denne trykkluften var som luften i omgivelsene.

Avslutningsvis testet vi også isolasjonsevnen til vakuüm, samt isolasjonsevnen til vanlig luft ved en atmosfærisk trykk.

6.1.2.1 Testbeskrivelse

For testing av dielektrisk holdfasthet i gasser ble testoppsettet under benyttet.



Figur 39 Testoppsett gass

Testkammeret kan trykksettes inntil 6 bar, og inneholder to 50 mm sfæriske stålkuler. I våre tester startet vi med 5 bar som maksimalt trykk, og kulene ble satt opp med en avstand på 9,4 mm.

For å kontrollere og observere trykket i testkammeret er det tilkoblet en digital trykkmåler.

På samme måte som ved testene av hengeisolatorer er målekondensatoren tilkoblet med en UHF-kabel til styrepulten.

I dette oppsettet benyttes kun en trafo. Dette da man forventer overslag på under 100 kV. Omsetningsforholdet til trafoen er fortsatt 454,54.

6.1.2.2 Testprosedyre gass

Følgende testprosedyre ble etablert.

1. Rengjør kammer og kuler med vann og mikrofiberklut.
2. Stiller inn avstand for kulegap. Benytter gjenstand i plast på 9,4 mm for kontroll.
3. Kammer settes sammen, monteres slik at det er fullstendig lukket.
4. Luft i kammer trekkes ut med vakuumpumpe
5. Testgass fylles i kammer. Trykksettes til 5,2 bar.
6. Gjør fem overslagstester på ett trykknivå.
Primærspenningen justeres ned til omkring 40 V under forventet overslagsspenning. På dette nivået er man sikret at startstrømmen ikke er så stor at man får umiddelbart overslag. Sekundærsiden legges inn. Øker deretter spenningen gradvis, 1,7 V per sekund, ved at vrideren for langsom spenningsjustering holdes inne konstant, inntil overslag inntreffer. Leser av trykk ved første og siste test. To min mellom hver test.
7. Entrer testrom (se egen beskrivelse av sikkerhetsprosedyre). Trykket i testbeholder reduseres med 1 bar. Deretter som ved punkt 6.
8. Punkt 6 og 7 repeteres til vi er på 0,5 bar.
9. Testserie avsluttet. Kammer demonteres. Kuler avinstalleres og sjekkes for smuss og urenheter ved å gni overflaten av kulene mot hvitt papir.
10. Tilbake til punkt 1, ny gass og ny testserie.

6.1.3 Testresultater CO2

5 bar (start: 4,90 - slutt: 4,65)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	168	76,4
Test 2:	167	75,9
Test 3:	167	75,9
Test 4:	167	75,9
Test 5:	167	75,9
Snitt	167,2	76,0

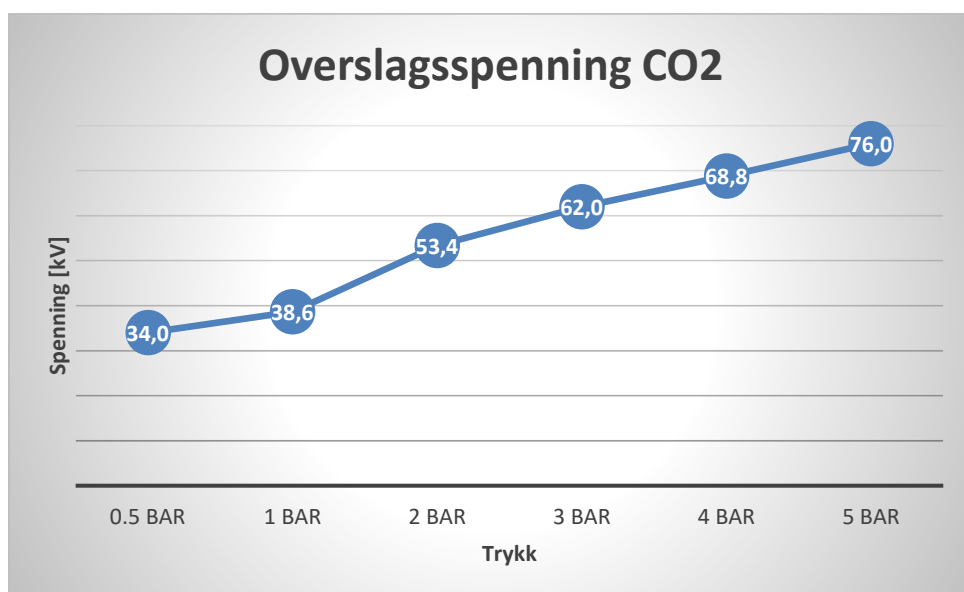
2 bar (start: 2,10 - slutt: 2,00)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	111	50,5
Test 2:	125	56,8
Test 3:	124	56,4
Test 4:	100	45,5
Test 5:	127	57,7
Snitt	117,4	53,4

4 bar (start: 4,11 - slutt: 3,88)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	146	66,4
Test 2:	150	68,2
Test 3:	157	71,4
Test 4:	153	69,5
Test 5:	151	68,6
Snitt	151,4	68,8

1 bar (start: 1,05 - slutt: 1,01)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	82	37,3
Test 2:	88	40,0
Test 3:	87	39,5
Test 4:	80	36,4
Test 5:	88	40,0
Snitt	85,0	38,6

3 bar (start: 3,13 - slutt: 2,95)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	134	60,9
Test 2:	137	62,3
Test 3:	126	57,3
Test 4:	148	67,3
Test 5:	137	62,3
Snitt	136,4	62,0

0,5 bar (start: 0,50 - slutt: 0,48)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	60	27,3
Test 2:	72	32,7
Test 3:	94	42,7
Test 4:	70	31,8
Test 5:	78	35,5
Snitt	74,8	34,0



6.1.4 Testresultater Nitrogen

5 bar (start: 4,97 - slutt: 4,51)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	200	90,9
Test 2:	197	89,5
Test 3:	196	89,1
Test 4:	185	84,1
Test 5:	185	84,1
Snitt	192,6	87,5

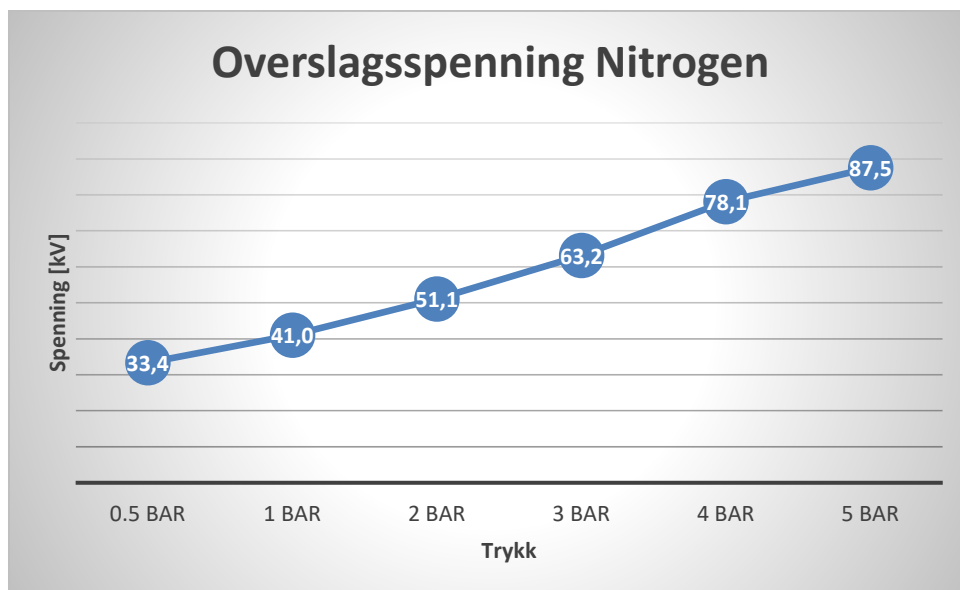
2 bar (start: 2,12 - slutt: 2,02)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	114	51,8
Test 2:	115	52,3
Test 3:	112	50,9
Test 4:	110	50,0
Test 5:	111	50,5
Snitt	112,4	51,1

4 bar (start: 4,13 - slutt: 3,84)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	175	79,5
Test 2:	173	78,6
Test 3:	171	77,7
Test 4:	170	77,3
Test 5:	170	77,3
Snitt	171,8	78,1

1 bar (start: 1,05 - slutt: 1,00)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	94	42,7
Test 2:	91	41,4
Test 3:	90	40,9
Test 4:	94	42,7
Test 5:	82	37,3
Snitt	90,2	41,0

3 bar (start: 3,12 - slutt: 2,95)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	145	65,9
Test 2:	141	64,1
Test 3:	136	61,8
Test 4:	143	65,0
Test 5:	130	59,1
Snitt	139,0	63,2

0,5 bar (start: 0,51 - slutt: 0,50)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	75	34,1
Test 2:	78	35,5
Test 3:	70	31,8
Test 4:	74	33,6
Test 5:	70	31,8
Snitt	73,4	33,4



6.1.5 Testresultater tørr trykkluft

5 bar (start: 5,15 - slutt: 4,85)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	189	85,9
Test 2:	211	95,9
Test 3:	210	95,5
Test 4:	178	80,9
Test 5:	219	99,5
Snitt	201,4	91,5

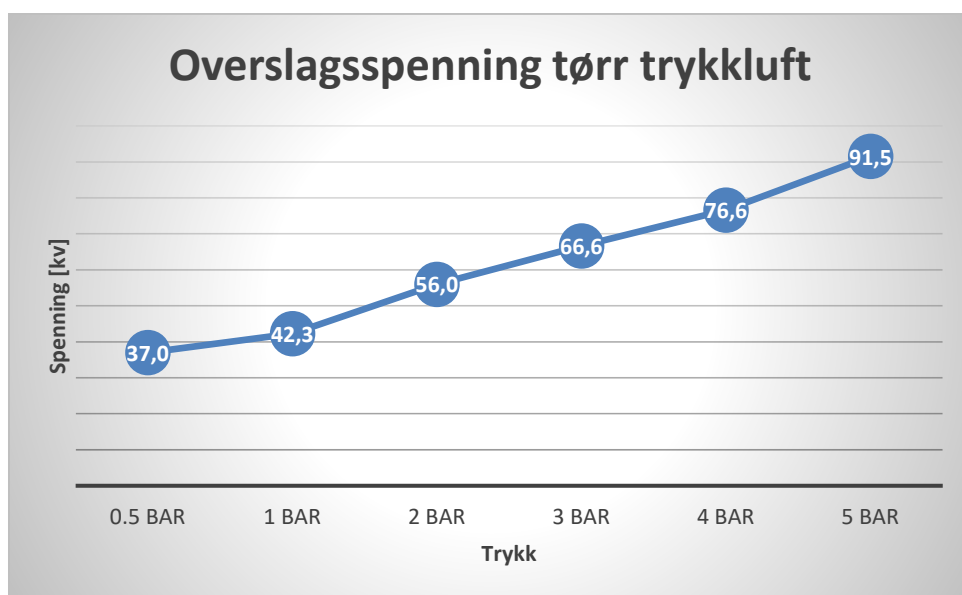
2 bar (start: 2,20 - slutt: 2,18)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	123	55,9
Test 2:	120	54,5
Test 3:	118	53,6
Test 4:	130	59,1
Test 5:	125	56,8
Snitt	123,2	56,0

4 bar (start: 4,25 - slutt: 4,02)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	192	87,3
Test 2:	155	70,5
Test 3:	160	72,7
Test 4:	157	71,4
Test 5:	179	81,4
Snitt	168,6	76,6

1 bar (start: 1,05 - slutt: 1,03)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	99	45,0
Test 2:	93	42,3
Test 3:	88	40,0
Test 4:	89	40,5
Test 5:	96	43,6
Snitt	93,0	42,3

3 bar (start: 3,07 - slutt: 3,00)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	148	67,3
Test 2:	144	65,5
Test 3:	150	68,2
Test 4:	147	66,8
Test 5:	144	65,5
Snitt	146,6	66,6

0,5 bar (start: 0,51 - slutt: 0,50)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	83	37,7
Test 2:	80	36,4
Test 3:	85	38,6
Test 4:	84	38,2
Test 5:	75	34,1
Snitt	81,4	37,0



6.1.6 Testresultater normal trykkluft

5 bar (start: 5,00 - slutt: 4,80)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	209	95,0
Test 2:	197	89,5
Test 3:	177	80,5
Test 4:	211	95,9
Test 5:	206	93,6
Snitt	200,0	90,9

2 bar (start: 2,05 - slutt: 2,02)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	120	54,5
Test 2:	120	54,5
Test 3:	120	54,5
Test 4:	120	54,5
Test 5:	114	51,8
Snitt	118,8	54,0

4 bar (start: 4,05 - slutt: 3,95)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	178	80,9
Test 2:	148	67,3
Test 3:	175	79,5
Test 4:	174	79,1
Test 5:	177	80,5
Snitt	170,4	77,5

1 bar (start: 1,05 - slutt: 1,03)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	89	40,5
Test 2:	91	41,4
Test 3:	87	39,5
Test 4:	91	41,4
Test 5:	89	40,5
Snitt	89,4	40,6

3 bar (start: 3,17 - slutt: 3,05)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	146	66,4
Test 2:	150	68,2
Test 3:	146	66,4
Test 4:	143	65,0
Test 5:	143	65,0
Snitt	145,6	66,2

0,5 bar (start: 0,50 - slutt: 0,50)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	76	34,5
Test 2:	81	36,8
Test 3:	76	34,5
Test 4:	76	34,5
Test 5:	71	32,3
Snitt	76,0	34,5



6.1.7 Testresultater vakuum

Vakuum (start: 0,04 bar - slutt: 0,05 bar)		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	14,0	6,4
Test 2:	14,0	6,4
Test 3:	13,0	5,9
Test 4:	14,0	6,4
Test 5:	14,0	6,4
Snitt	13,8	6,3

6.1.8 Testresultater 1 ATM

1 atm etter tørr trykklufttest		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	55	25,0
Test 2:	61	27,7
Test 3:	56	25,5
Test 4:	67	30,5
Test 5:	56	25,5
Snitt	59,0	26,8

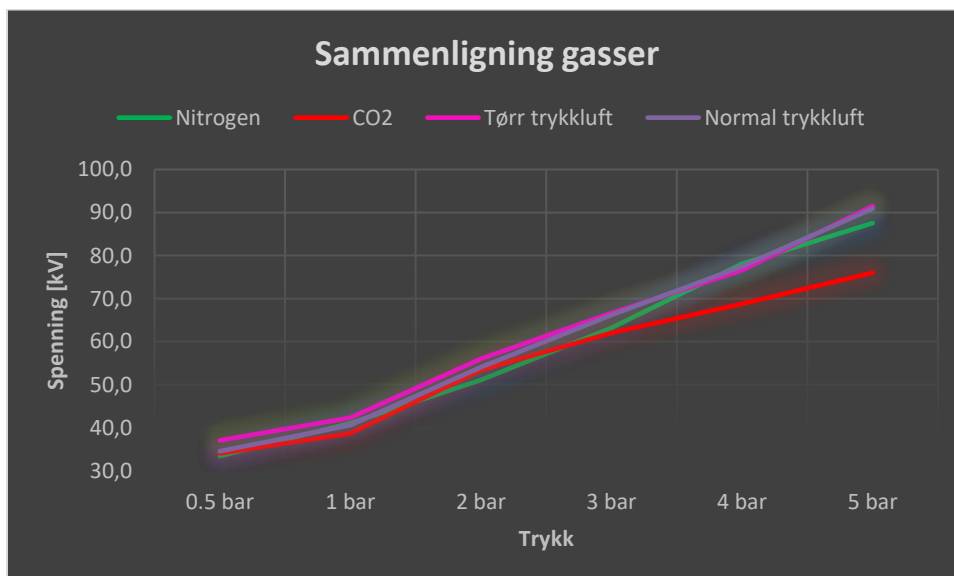
1 atm etter normal trykklufttest		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	53	24,1
Test 2:	47	21,4
Test 3:	47	21,4
Test 4:	50	22,7
Test 5:	42	19,1
Snitt	47,8	21,7

1 atm etter vakuumtest		
	Primærspenning [V]	Overslag [kV]
Test 1:	48	21,8
Test 2:	48	21,8
Test 3:	49	22,3
Test 4:	54	24,5
Test 5:	47	21,4
Snitt	49,2	22,4

6.2 Drøfting test av isolasjonsegenskaper

6.2.1.1 Gasstestene

Utførte tester kan presenteres som tilnærmede lineære kurver for alle gassene. Dette er i henhold til Paschens lov. Under kan man se de fire gassvariantene samlet i et linjediagram.



Figur 40 Sammenligning av testresultat for gasser

CO₂ har den dårligste isolasjonsevnen. Som forventet hadde den tørre trykkluften best holdfasthet. Normal trykkluft ligger rett bak den tørre og nitrogen ligger litt under den normale. Dette samsvarer med litteraturen og rangeringen av dielektrisk styrke under «4.1 Naturlige Gasser».

Forskjellene mellom den tørre trykkluften og den vanlige trykkluften er relativt liten. Gransker man resultatene nærmere ser man likevel at holdfastheten til den tørre trykkluften er noe bedre ved alle trykk. Den vanlige trykkluften har høyere luftfuktighet, og innehar dermed bedre ledeevne enn den tørre. At overslagsspenningen ville være noe lavere ved fuktig luft sammenliknet med tørr luft var som antatt.

Clean Air som Siemens kaller isolasjonsgassen sin, omtales også som syntetisk luft. Clean Air er i prinsippet luften vi omgir oss med, rensert for alt annet utenom nitrogen og oksygen, inkludert luftfuktighet. Av de naturlige gassene er dermed Clean Air den mest optimale løsningen som isolasjonsgass.

Testene viser at vi ved 5 bar oppnår luft og nitrogen ca. samme isolasjonsevne som SF₆ ved 1 bar. Dette viser at når naturlige gasser settes under trykk kan man oppnå samme isolasjonsevne som i SF₆. Ved å benytte høyt trykk og øke avstander mellom ledende deler, viser det seg at det er mulig å bygge GIS anlegg uten bruk av SF₆ som isolasjonsmedium. Som tidligere nevnt har Siemens Blue GIS for 145 kV samme størrelse som deres SF₆ anlegg for 172 kV. Nominelt trykk på 145 kV Blue GIS anlegg er forøvrig 7 bar [29].

Etter hver testserie sjekket vi for smuss og urenheter på kulenes overflater. Generelt var det svært liten dannelse av avfallsstoffer på kulene etter alle testene. For å se om urenheter kunne avdekkes ble kulene dratt over ett hvitt papir gjentatte ganger etter hver testserie. Til høyre har vi avbildet resultatet etter nitrogentesten. Inne i den røde ringen kan man se antydninger til urenheter fra den ene kulen. Dette var den eneste observasjonen vi gjorde etter gasstestene. N₂ har, som tidligere nevnt, dårlige egenskaper i forhold til grafitt dannelse. Dermed var det ikke helt uforventet at vi så noe mer urenheter på nitrogen enn på luft og CO₂.



Figur 41 Avfallsstoff nitrogen

6.2.1.2 Vakuumtest

Disse testene bekreftet vakuum som en dårlig isolator. Krypstrømmen som tidligere er omtalt i teorien kunne observeres umiddelbart i det sekundærspenningen ble lagt inn. Allerede ved 1 V primærspenning (det vil si 454 V sekundær) kunne man tydelige se koronautladninger. Disse var stadig til stede, med økende intensitet inntil overslag inntraff. I gjennomsnitt slo det over ved 6,3 kV, noe som selvsagt er en begrenset dielektrisk styrke. Som tidligere nevnt er det vanskelig å ha et «rent» vakuum. Selv om det i teorien er en god isolator, fungerer det ikke enda i praksis.

Som nevnt tidligere, har vakuum sin maksimale dielektriske holdfasthet ved cirka 0,01 millibar. Tilgjengelig utstyr ga oss ikke muligheten til å teste vakuum på dette nivået. Vakuum testet var langt lavere, omkring 4-5 millibar. Som illustrert i figur 37 tidligere, er det nettopp omkring dette nivået av vakuum man forventer dårligst isolasjonsevne. Kun noen få kV. Dette er da i overensstemmelse med våre resultater.

Det var etter vakuumentestene vi kunne avdekke mest smuss på kulene. Resultatet sees på bildet til høyre. Sammenlignet med forsøkene med gasser under trykk, var det ved vakuum man observerte mest smussdannelse.

Utringet i rødt ser man mengden urenheter avgitt fra kulene. Det er naturlig å anta at dannelse av urenheter på overflaten her var kraftigst, da varmeutviklingen også var høyest. Helt fra sekundærspenningen ble lagt inn, på 454 V, inntil overslagene inntraff på omtrent 6,3 kV, kunne det observeres koronautladninger og krepstrøm. Det er rimelig å anta at kulenes lange eksponeringstid for varme skapte mer smuss og avfallsstoffer.



Figur 42 Avfallsstoff vakuuum

6.2.1.3 1 atm tester

Det er kjent at luft har dielektrisk holdfasthet på 3 kV per mm. For å kvalitetssjekke eget testoppsett testet vi også isolasjonsevnen til luft ved 1 atmosfæres trykk. Disse forsøkene ble utført umiddelbart etter testene av henholdsvis tørr trykkluft, vanlig trykkluft, og vakuum. Beholderen ble åpnet, slik at det gjenstående overtrykket, eller undertrykket ble utliknet. På den ene siden var dette en åpenbar svakhet ved testene med tanke på å faktisk måle dielektrisk holdfasthet i luft. Da det nettopp var kjørt en testserie forut, kan dette påvirke resultatet. På den andre siden var det interessant å se om gasstypen som akkurat hadde vært i beholderen fortsatt påvirket resultatet.

I teorien burde man få tre ganske like testserier. Dielektrisk holdfasthet i vanlig luft er som nevnt 3 kV per mm. Vårt testoppsett med kuleavstand på 9,4 mm skulle gi teoretisk overslag ved 28 200 V.

Ved alle tre testene fikk vi overslag på lavere spenninger enn teoretisk verdi. De høyeste overslagsspenningene oppnådde man etter tørr trykklufts test. Deretter oppnådde man faktisk høyere overslagsspenninger etter vakuum, sammenliknet med etter normal trykkluft. Dette kan ha vært på grunn av tilfeldigheter. Vår alternative hypotese at overslaget kom tidligere etter normal trykklufts test, sammenliknet med vakuum, da det var mer luftfuktighet igjen i kammeret etter trykkluften. Forutgående vakuum hadde sørget for at mye av fuktigheten var trukket ut.

Selv om resultatene våre var noe lavere enn teoretisk verdi vet vi at oppsettet har flere feilkilder som tidligere nevnt under punkt 2.5. F.eks. vet vi at omsetningsforholdet er noe høyere. Noe som ville ført til at tørrluft resultatet ville overgått anslaget på 28 200 V.

6.2.1.4 Usikkerhetsmomenter og begrensninger ved utførte tester

- Det var ikke mulig å få testkammeret 100% tett. Dette kom tydeligst til syne ved testene på de høyeste trykknivåene. En testserie hadde varighet på 10 minutter. Ved testene på 4 og 5 bar sank trykket i kammeret fra 0,3 til i underkant av 0,5 bar i løpet av denne tiden. Denne endringen så likevel ut til å ha mindre betydning for måleresultatene. Det var ikke mulig å se en klar tendens til hurtigere overslagsspenning på slutten av testserien sammenliknet med i starten.
- Påfylling av gass i testkammeret ble utført som tidligere beskrevet i testprosedyren. Hvilken renhet gassen i testkammeret faktisk oppnådde, hadde vi ingen mulighet til å kontrollere. Videre ble beholderen rengjort med mikrofiberklut og vann imellom hver testserie. Metoden ga et rent kammer, men ikke på et klinisk nivå. Altså i hvilken grad vi hadde kontaminering av andre gasser og partikler i beholderen, og på hvilket nivå dette påvirket forsøkene, er usikkert.
- Ved overslag kan det oppstå avfallsstoffer og smuss på kulene, som følge av lysbuen og den sterke varmeutviklingen. Ved granskning av kulene etter hver testserie fant vi svært lite smussdannelse på kulenes overflater. Vi antar derfor at dette har hatt liten påvirkning på testene.
- Selve kulene består av fornicket stål. Kulene var benyttet til tester tidligere, og man kunne observere noe korrosjon og degenerering av forniklingen allerede ved oppstart. Visuelt så det ut som korrosjonen holdt seg stabil underveis i vår testperiode, men det kan tenkes korrosjonen og krakeleringen i overflaten økte noe underveis i testperioden. Vi antar likevel med rimelig sikkerhet at dette var av mindre betydning for våre resultater.
- Avstanden mellom kulene ble kontrollert med en gjenstand på 9,4 millimeter. I hver ende av beholderen var det montert gjengefester som kulene ble skrudd inn i, inntil ønsket avstand var oppnådd. Man kan tenke seg at avstanden kunne endret seg noe i løpet av en testserie. Ved at kulene ble utsatt for stor energi i hvert overslag er det mulig at kulene sine gjengefester kunne skru seg noe ut. Avstanden ble derfor kontrollert før og etter test. Man kunne ikke observere endringer av avstander underveis, disse var i så fall mikroskopiske. Vi anså dermed ikke dette som er reell feilkilde ved våre forsøk.



Figur 43 Korrosjon og degenerering på testkulene

- Etter våre erfaringer med hengeisolatortestene benyttet vi primærspenningen sin verdi ved overslag. Deretter brukte vi omsetningsforholdet 454,54 for å regne oss frem til sekundærspenningen. Som nevnt under testene med hengeisolatorer var heller ikke primærspenningen 100% til å stole på. Avvik inntil 4 Volt primært gir nesten 2 kV differanse sekundært.
- I noen av forsøkene viste styrepulten sitt display overslagsverdier over 1000 kV. Dette viser viktigheten av å ikke benytte resultatene fra målekondensatoren.
- Andre usikkerhetsmoment og begrensninger ved selvet oppsettet er nevnt tidligere i punkt 2.5

6.2.2 Konklusjon Isolasjonstester

Utførte tester bekrefter at trykksetting av gasser betyr svært mye for den dielektriske holdfastheten. Testoppsettet og tilgjengelig utstyr har noen begrensninger, men likevel er resultatene i tråd med litteraturen på området. Man ser for eksempel at alle testede gasser har en tilnærmet lineær stigning i overslagsspenning ved økende trykk. Videre ser overslagsspenningene fornuftige ut ift. litteraturen på de gitte trykknivåene for alle gassene.

Det ser også ut til at luftfuktighet er av betydning med tanke på isolasjonsevne. Man ser dette ved direkte sammenligning mellom den tørre og den vanlige trykkluften. Man kan muligens også antyde dette etter testene på ett atmosfærisk trykk. 1 atm trykktestene ble som nevnt utført umiddelbart etter testene med trykkluft og vakuum. Man oppnådde noe høyere holdfasthet i den gjenværende, tørre luften i testkammeret sammenliknet med holdfastheten utført etter vanlig luft. Det kan det gi en indikasjon på hva luftfuktighet betyr for isolasjonsevnen. Interessant nok var vakuum også bedre, til tross for at man i etterkant kunne observere en del smussdannelse på kulene. Ved vakuum har man trolig klart å trekke ut en del fuktighet av beholderen. Deretter viser det muligens at luftfuktighet betyr mer for holdfastheten, enn forskjellen i urenheter på elektrodene. Her kan vi imidlertid ikke konkludere for sikkert, da flere feilkilder kan ha påvirket resultatene.

7 SF6 i brytere

7.1 Tradisjonelle brytere

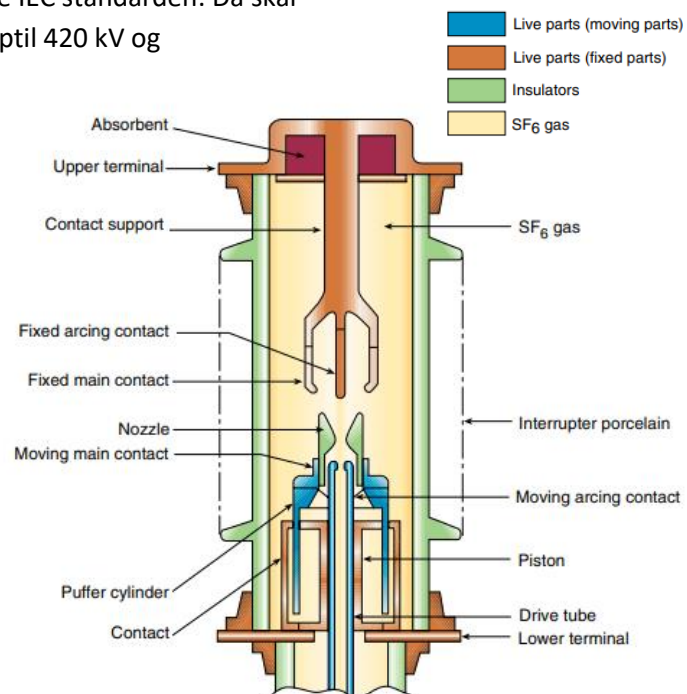
I et høyspenningsanlegg så må det være tilstrekkelig med vern for å beskytte komponenter og ansatte. I tillegg er det viktig å begrense nedetid i anleggene. Kortslutninger kan oppstå på linjene eller i komponenter. Det kan være isolasjonsfeil mellom fasene. Enpolt (mellom fase og jord), topolt (mellom to faser) og trepolt (mellom alle tre fasene) er eksempler på kortslutninger som kan oppstå på et trefasesystem med direkte koblet nullpunkt [43]. Atmosfæriske utladninger (lynneslag) kan gi korslutningsstrømmer opptil 300kA [43]. Disse gir en enorm utladningseffekt som kan utøve stor skade. For å redusere de verste skadene i høyspenningsanlegg brukes blant annet effektbrytere. SF6 benyttes ikke bare som isolasjonsmedium, men blir også brukt som brytergass i effektbrytere.

De nyeste GIS-anleggene med SF6 må følge IEC standarden. Da skal effektbrytere måtte tåle spenningsnivå opptil 420 kV og korslutningsstrømmer inntil 63 kA [44]. Det betyr at gassen i effektbryteren må kunne håndtere ekstreme forhold. Effektbryteren skal tåle å bryte strøm ved overbelastning og kortslutninger. Når en kortslutning oppstår vil kontrollenheten, som sitter lokalt i effektbryteren, registrere et avvik fra måletrafoene og gi beskjed om å bryte [45].

7.1.1 Oppbygging og funksjon

En effektbryter består av bevegelige og stasjonære deler, isolasjon og gass. Det finnes flere typer. Her vil vi konsentrere oss om å forklare prinsippet til en entrykksbryter, da denne er den mest utbredte i Norge [46]. I figur 44 ser man en åpen SF6 bryter. Ved vanlig last går strømmen gjennom «fixed main contact» til «moving main contact», videre gjennom «puffer cylinder» og deretter til «contact» [47] Når det blir detektert overlast, eller kortslutning vil det oppstå en lysbue mellom «fixed arcing contact» og «moving arcing contact». Isoleringen beskytter fase mot fase, fase mot jord og isolere lysbuen fra hovedkontaktene.

Når bryteren går fra lukket til åpen posisjon, blir de bevegelige kontaktene og «puffer cylinder» dratt nedover. Det betyr at de bevegelige og stasjonære kontaktpunktene blir separert og en lysbue oppstår mellom de to kontaktene. Bevegelsen til sylindrene komprimerer SF6 gassen mot de stasjonære stemplene slik at det genereres en kraftig utblåsing av SF6 i brytergapet gjennom dysene [47]. Dvs. at trykket til SF6 gassen lokalt i brytergapet blir høyere enn trykket i hele systemet. Da får



Figur 44 SF6 entrykks-effektbryter [48]

SF6 gassen det tilstrekkelige trykket for å slukke lysbuen. «The experimental data demonstrate that, as pressure rises, the coefficient of thermal conductivity grows for all the gases» [48].

Når en kortslutning oppstår, vil de induktive komponentene i høyspenningsnettet sette opp en induert spenning for å motvirke endringen i strømmen. Induktansene i nettet dominerer som regel kapasitansene, noe som fører til at strømmen vanligvis er induktiv. Kapasitive strømmer oppstår hvis man brått mister lasten, akkurat som å kjøre nettet i tomgang. Når en strøm er induktiv, er det enkleste å tenke at strømmen ligger 90 grader etter spenningen. Dvs. at når strømmen har sin nullgjennomgang, vil spenningen ha sin amplitudespenning [43]. Etter at lysbuen slukkes ved strømmens nullgjennomgang, kan spenningspåtrykket over brytergapet bli dobbelt så stor som påtrykt spenningsamplitude uten gjentening [43]. Ved gjentening på verst mulig tidspunkt i første halvperiode kan spenningspåtrykket over brytergapet bli tre ganger amplitudespenningen. Derfor er det viktig at avstanden mellom elektrodene er stor nok, slik at den transiente tilbakevendende spenningen (TRV eller transient recovery voltage) er mindre enn gjennomslagsspenningen i brytergapet. Spenningen på linjen etter et brudd vil forholde seg konstant på amplitudeverdien. På andre siden av brytergapet vil TRV bygge seg opp til amplitudeverdi. Med andre ord, jo flere gjenteninger man har, jo større blir spenningen over brytergapet. Det er kritisk for effektbrytere å hindre gjenteninger.

Det finnes to ulike grunner til gjentening over brytergapet. Man har termisk- og dielektrisk gjentening. Termisk gjentening oppstår på grunn av den ekstreme varmen en lysbue avgir. Når en lysbue oppstår, vil den varme opp SF6 gassen. SF6 gå fra isolerende til ledende ved ca. 2000 K. En lysbue vil ha en temperatur på ca. 10 000 K, noe som vil varme opp SF6 gassen betydelig. SF6 har gode varmeledningsegenskaper og det som avgjør om det blir en termisk gjentening er temperaturen. I det SF6 blir blåst over brytergapet via dysene, samtidig som temperaturen på lysbuen reduseres betraktelig når strømmen har sin nullgjennomgang, vil temperaturen over brytergapet reduseres kraftig. I det øyeblikket strømmen passerer nullgjennomgangen, vil temperaturen til SF6 gassen rundt lysbuen reduseres slik at den blir isolerende. Pga. at SF6 gassen er veldig elektronnegativ vil mange av de frie elektronene over brytergapet fjernes. Fluor er den mest negative av dem alle ifølge Pauling's elektronnegativitetsskala. Frie elektroner under høye temperaturer har høy kinetisk energi som fører til «kollisjoner» med andre molekyl som kan «slå løs» andre elektron. Da kan vi få et «elektronskred», gassen blir ionisert (plasma) og gjentening av lysbue kan oppstå [43].

Dielektrisk gjentening kan oppstå fordi det er for liten avstand mellom elektrodene og redusert isolasjonsholdfasthet grunnet lysbuens varmeutstråling. Når lysbuen slukker vil det bli et «kappløp». Hele fasespenningen vil ligge over brytergapet og den transiente tilbakevendende spenningen vil øke spenningen raskt. Samtidig er avstanden mellom elektrodene voksende, som styrker den elektriske holdfastheten mellom brytergapet. Hvis TRV øker for raskt vil det bli gjennomslagsspenning, og det oppstår en dielektrisk gjentening. Dette stiller store krav til både den mekaniske hurtigheten i bryteren og til gassens dielektriske styrke. Når vi snakker om isolerende- og brytende egenskaper, så trenger en brytergass gode isolerende egenskaper også. Egenskapene er i flere sammenhenger avhengige av hverandre.

7.2 Brytere uten SF6

Frem til i dag har det kun vært SF6 effektbrytere som har vært i stand til å bryte spenninger over 145 kV. Produsentene av effektbrytere arbeider på høygir for å finne alternative løsninger også for de høyeste strøm og spenningsnivåene. I de kommende avsnittene ser vi nærmere på hvilke bryteralternativer som finnes uten SF6 per i dag.

7.2.1 Vakuumbrytere

I området «medium spenningsnivå» er vakuumbrytere den mest benyttede teknologien. Selv om det ikke finnes noen offisielle definisjoner, vil medium spenningsnivå som oftest referere til spenninger i området 1000 V til 45 kV. De siste årene har det blitt flere og flere 145 kV Blue GIS anlegg som utnytter vakuumbrytere.

Ved dette spenningsnivået er vakuumbryteren pålitelig, miljøvennlig, krever lite vedlikehold og har lang levetid [49]. Vakuumbrytere er mer effektive, mindre i størrelse og rimeligere enn alternative gass-brytere. Samtidig kreves lite, til ingen vedlikehold.

7.2.1.1 Konstruksjon

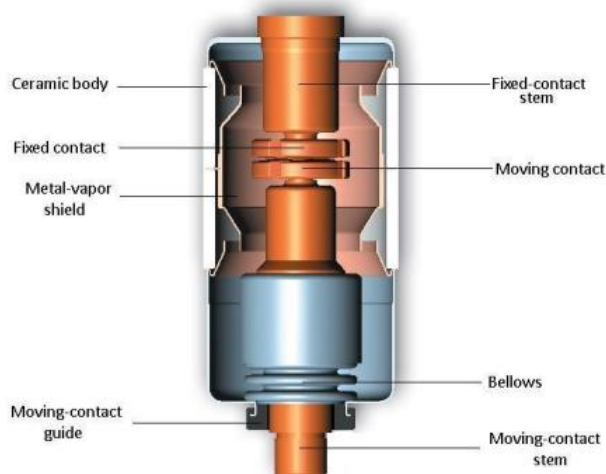
Konstruksjonen er enkel sammenliknet med andre brytere. Konstruksjonen er hovedsakelig delt inn i en fiksert del, en bevegelig del og en beskyttelseskappe. Den ytre delen av vakuumbryteren er laget av glass. Dette for å lettere kunne undersøke bryteren fra utsiden. Hvis glasset blir matt og melkeaktig indikerer dette at bryteren har mistet vakuum.

Den fikserte og den bevegelige delen er plassert på innsiden av beskyttelseskappen. Fra produksjon er vakuumet i bryteren omkring 10^{-9} bar.

Den bevegelige delen i bryteren kan flytte seg mellom 5-10 mm, avhengig av hvilket spenningsnivå man opererer under.

Metallkapselen som er laget av rustfritt stål brukes for å bevege den bevegelige elektroden. Designet av metallkapselen er av stor betydning for levetiden til vakuumbryteren, da komponentene skal kunne utføre denne operasjonen igjen og igjen på en optimal måte.

Når feil oppdages i systemet vil elektrodene i vakuumbryteren bevege seg fra hverandre, og lysbuer vil skapes mellom dem. På grunn av dette vil man få en svært høy temperatur, og det vil oppstå en



Figur 45 Vakuumbryter [41]

ionisering. Ioniseringen vil føre til fordampning av damp og positive ioner fra overflaten til elektrodene.

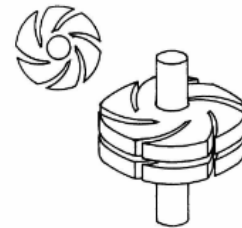
I det kontaktene i bryteren åpnes i vakuum oppstår en lysbue mellom kontaktpunktene pga. ioniseringen av metalledamp. Bryteren bryter strømmen i første halvperiode, i det strømmen passerer null. Lysbuen vil da slukkes som følge av at metalledampen, elektroner og ioner produsert under lysbuen vil kondensere på overflaten til bryterens kontaktpunkter med ekstrem hurtighet [50].

7.2.1.2 Brytning av strøm

En vakuumbryter bryter strømmen i strømmens nullgjennomgang. Når elektrodene beveger seg fra hverandre skapes små lysbuer mellom bryterne, noe som betyr at det flyter strøm. Ved begrenset strøm og spenning fordeler lysbuen seg naturlig over kontaktflatene til elektrodene [51]. Dermed kan strømmen brytes relativt enkelt, og elektrodene til vakuumbrytere beregnet for mindre feilstrømmer er av en flat type.

I det feilstrømmene blir større, skapes en kraftigere lysbue. Denne ønsker man å fordele jevnt over elektrodene for å unngå for høy temperatur lokalt på elektrodene, samt at brytning er enklere om ikke lysbuen er for intens. Det finnes ulike metoder for å fordele lysbuen. En tidlig løsning var å lage radiale spor i elektrodene som på illustrasjonen ved siden av. Disse fordeler den elektromagnetiske spenningen, som i sin tur fordeler strømmen i mange mindre lysbuer over elektrodens kontaktflate. Man får altså mange mindre lysbuer som lettere kan slukkes. Fremdeles er dette en mye brukt løsning.

Andre metoder for å spre den elektromagnetiske spenningen eksisterer også, men prinsipielt fungerer disse på tilsvarende måte.



Figur 46 Strømfordelere [39]

7.2.2 g3 som brytergass

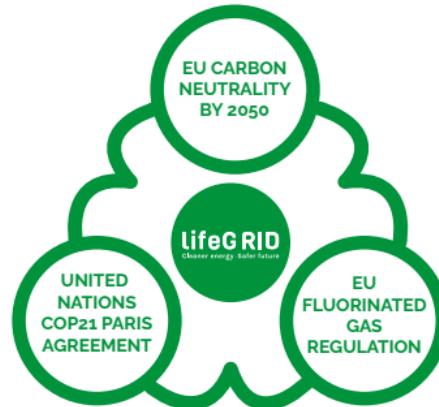
g3 fungerer også godt som en brytergass. GE og 3M har forventninger om å erstatte SF6 i effektbryterne på alle spenningsnivå. Gassen leder bort varme fra brytergapet på en god måte, den er elektronnegativ og homogen. Videre er g3 kompatibel med eksisterende materialer i bryteranlegg, har relativt lavt kokepunkt og har en god varmekapasitet. Bi-produktene fra lysbuebrudd er i samme giftighetsklasse som SF6. g3 i effektbryterne har et kokepunkt på -25 grader celsius, men også her kan det benyttes varmeløst ved lavere temperaturer. Ved høyt trykk og høye temperatur er g3 veldig stabil. Når lysbuen slukkes, vil lysbuen raskt gå fra ledende til isolerende. Dvs. at gassen er kapabel til å holde igjen den transiente tilbakevendende spenningen ved ny positiv halvperiode. Bryterne utviklet for g3 er av tilsvarende størrelse som SF6 effektbryterne.

Utfordringene knyttet til g3 og bryteregenskaper relateres til gassen sitt innhold av CO2. CO2-molekylet er lite og har begrensede termiske bryteregenskaper. Grunnet størrelsen på CO2-molekylet så blir gassflyten i kammeret påvirket. Forskningsmiljøet har hatt utfordringer med å oppnå et høyt nok trykk over elektrodene til slukking. Dette er en av hovedårsakene til at man ikke direkte kan erstatte SF6 med g3 i dagens effektbrytere. Bryterne utviklet for g3 er samtidig på ca. lik størrelse som SF6 effektbryterne. Det samme kan vi si om bryteregenskapene til Hitachi sin EconiQ gass.

8 Status fra flere aktører

8.1.1 Lifegrid-prosjektet

Lifegrid prosjektet er et initiativ fra EU for å hjelpe kraftindustrien i en mer miljøvennlig retning. Det finansieres av EUs LIFE-program og er en organisasjon som skal jobbe mot at EU sine miljøkrav for Europa- og Paris-avtalen skal overholdes. Blant annet skal Europa redusere GHG (Green House Gases) med 55 % innen 2030, sammenliknet med 1990. Bruken av SF6 skal kuttes med 2/3 innen 2030, i forhold til 2014. Ved å utvikle en god erstatning til SF6 på alle spenningsnivå, vil det bli ulovlig å bruke SF6 i bryteranlegg [52].



Figur 47 Lifegrid [53]

Lifegrid har troen på at g3 teknologien kan avskaffe SF6 fra alle spenningsnivå, som GE og 3M-Company har utviklet. g3-gassen består av en blanding av Novac 4710, CO2 og O2 [52]. g3 opererer allerede på 145 kV GIS anlegg, men det har vært en utfordring å få brytere til å fungere på 420 kV GIS med denne gassen.

Imidlertid kan man lese i Layman's rapporten (2022) fra Lifegrid at GE har klart å utvikle en effektbryter som kan brukes på 420 kV, og bryte kortslutningsstrømmer på 63 kA. De har slått sammen to 245 kV (63 kA) effektkammerer i serie for å designe en effektbryter for 420 kV GIS. Prototypene ble testet i henhold til IEC standarder. I mars 2022 kunne GE stolt presentere den første 420 kV GIS g3-effektbryteren på et virtuelt seminar for kraftbransjen.



Figur 48 420 kV GIS effektbryter presentert på CIGRE messen [52]

I et g3 anlegg må alle komponentene skreddersys den nye miljøgassen, ikke kun effektbryterne. Blant annet må spenning- og strøm trafoer, skillebrytere, overspenningsavledere og gasstette monitører tilpasses [53]. En samlebetegnelse for alle disse komponentene, blir referert til som en «GIS bay». Et industri-lag fra Aix-les-Bains, Frankrike, jobber med å lage alle komponentene til en GIS-bay. Kommersiell lansering av et komplett 420 kV GIS med g3-teknologi er forventet innen 2023.

De siste testene på prototypene ble fullført i mars 2022. Lifegrid må evaluere det totale miljøavtrykket til et 420 kV g3 GIS, før de kan konkludere med at det er bedre enn et SF6-anlegg. En EU-kommisjon, som representerer overføring- og distribuerings industrien i Europa, ønsker en total vurdering på livssyklusen til alle produktene i et 420 kV g3 GIS. Med andre ord er det ikke kun GWP verdien fra gassen som må betraktes, men hvor stort miljøavtrykket fra produktet er i hele dets levetid. Det håper de å ha kartlagt innen 2023.

«SSEN Transmission» ble en del av Lifegrid prosjektet i 2020 og er et skotsk nettselskap. «GE Grid Solutions» inngikk kontrakt med det skotske nettselskapet om å levere verdens første SF6 frie 420 kV g3 GIS til Kintore Aberdeenshire i [52]. Dette anlegget forventer å spare 350 000 tonn CO2 ekvivalenter på det skotske nettet. Neste steg for Lifegrid initiativet er å levere de ni første «GIS-bayene» til SSEN Transmission's Kintore transformatorstasjon i 2024. Lifegrid skriver at de snart vil komme med offisielle pressemeldinger rundt ferdigstillingen av et fullstendig 420 kV g3 GIS, og den første leveringen til Kintore. Prosjektet på Kintore er et prestisjeprosjekt for Lifegrid. Hvis Kintore-anlegget blir en suksess kan disse anleggene etableres flere steder i Europa.

Lifegrid ønsker flere samarbeidspartnere i industrien for at verden raskere skal kunne unnvære SF6. De ønsker flere bidrag med å ferdigstille g3 sin produktportefølje, og har ambisjoner om å fullføre dette innen 2026. Da skal alle Europeiske spenningsnivå være dekket, også for spenningsnivåer over 420 kV.

8.1.2 Siemens – eneste leverandør uten F-gasser

Siemens Energy sin filosofi har vært å utvikle høyspenningsanlegg helt uten bruk av miljøskadelige gasser. Derfor har de satset stort på sine Blue Gis anlegg som benytter Clean Air som isolasjonsmedium, og vakuum i bryterne. Leif Ingar Stadheim hos Siemens Energy kan fortelle at selskapet bevisst har satset på dette av flere grunner.

For det første har grunntanken hele tiden vært å utvikle teknologi som er mest mulig miljøvennlig. Dette elementet blir ivaretatt med Clean Air og vakuum i deres Blue GIS. GWP verdien til både Clean Air og vakuum er lik null, og er videre helt ufarlig for miljøet.

For det andre kan han peke på en del usikkerhetsmomenter som omhandler de isolasjons- og brytergassene en del av de konkurrerende selskapene satser på. Blant annet er det foreslått forbud i EU mot fluorgasser og PFAS (poly-fluor-alkyl-stoffer) forbindelser. Stadheim peker blant annet på:

- ✓ EU foreslår ny regulering av fluorgasser, der man blant annet fra 2028 forbyr gasser i høyspenningsanlegg med GWP > 10 (Gjelder nye anlegg, inntil 145 kV, spesielle forhold kan gi unntak) [54].
- ✓ Staten Main i USA er den første som forbyr PFAS produkter fullstendig fra 01.01.2030 [55]
- ✓ California innfører et gradvis forbud mot SF6 fra 2025 [56].
- ✓ 3M skal slutte å produsere PFAS innen 2025 [57]
- ✓ National Grid i Storbritannia ønsker å redusere sine SF6 utslipp ned 50% innen 2030, og ønsker at alle anlegg er helt SF6 frie innen 2050. [58]

Strengere restriksjoner og forbud mot alle fluorgasser vil selvsagt ha enorme konsekvenser for de selskapene som har satset på denne teknologien. Samtidig ser Siemens Energy lyst på situasjonen. De føler seg sikre på at de i løpet av få år har teknologi som fungerer på alle spenningsnivåer. Helt uten SF6 og fluorgasser.

Det må nevnes at et forbud mot fluorgasser i GIS anlegg over 145 kV, ikke kan forekomme hvis det ikke fins noen reelle alternativ. Kommer det restriksjoner og Simens klarer å utvikle løsninger for GIS over 145 kV, vil de få et kjempe fortrinn.

8.1.3 Erfaringer nettselskaper og Statnett

Vi har tatt kontakt med noen av de største nettselskapene i Norge og spurt dem om hva de tenker om SF6 og utfordringene knyttet til denne klimagassen. For oversiktens skyld er høyeste spenningsnivå i selskapenes nett listet opp under.

- ✓ BKK: 300 kV
- ✓ Glitre 132 kV
- ✓ Elvia 145/132 kV
- ✓ Norgesnett 132 kV

8.1.3.1 BKK

¼ av alle anleggene til BKK er GIS. BKK opplyser at de bygger alle nye anlegg uten SF6. Ved revisjon vurderes fornying i stedet, og etter endt levetid erstattes anleggene med SF6 frie anlegg. Plassering av anlegget avgjør om man velger GIS eller AIS anlegg. På nåværende tidspunkt har BKK tre nye moderne SF6 frie GIS anlegg, der eldste anlegg er fire år. På bakgrunn av dette er erfaringene med den nye teknologien begrenset.

Alle installerte anlegg er fra samme leverandør (Simens). Dette da leverandøren var først ute med ønsket teknologi. BKK forventer at andre leverandører kommer på banen med miljøvennlige alternativer i årene fremover, og vil da naturlig vurdere disse.

BKK har som mål å ha SF6 frie anlegg, men det vil ta tid da det er SF6-anlegg i vår portefølje som bare er 7-8 år. Dermed rettes det større fokus på vedlikehold og reduksjon av lekkasje i stedet.

For øvrig følger BKK nøye med på EU sine vurderinger rundt SF6 med tanke på nye reguleringer og krav omkring bruk av gassen. Implementeres nytt regelverk i Norge for bruk av SF6 ønsker BKK å være forberedt.

8.1.3.2 Glitre

Glitre har svært få GIS anlegg, kun tre stykker totalt. Derfor begrenset erfaring med disse. Strategien har vært å bygge AIS anlegg så langt som det er mulig. På denne måten unngår man bruk av SF6 som isolasjonsmedium. Glitre sitt hovedfokus er derfor å erstatte gamle SF6-brytere med vakuumbrytere etter endt levetid. Av miljøhensyn prioriteres dette, til tross for at vakuumbrytere dobler investeringskostnaden sammenliknet med SF6-brytere. Man antar at det vil ta svært lang tid før hele anleggsmassen er skiftet ut og blir SF6 fri, da levetiden på anleggene er minimum 50 år.

8.1.3.3 Elvia

Elvia har totalt 377 koblingsanlegg i drift, av disse er 35 GIS anlegg.

I fremtiden er strategien til Elvia å kjøpe nye anlegg uten SF6 for 145 kV anlegg der GIS må benyttes. For 11 og 22 kV anlegg i transformatorstasjoner har man alltid foretrukket AIS. Dette gjelder regionalnett. For distribusjonsnettet har man foreløpig ingen klar strategi for reduksjon av SF6.

For valget mellom GIS eller AIS på 145 kV er det som oftest begrenset plass som gjør at man bygger GIS. AIS anlegg bygges der det er plass til det. Høye tomtekostnader eller vanskelige grunnforhold kan også medføre at man velger GIS fremfor AIS.

Per i dag har ikke Elvia noen SF6-frie GIS i drift, men de har et anlegg under bygging. Dette er deres pilotprosjekt for alternative gasser, og vil danne grunnlaget for veien videre. De har valgt GIS fra GE som deres første moderne GIS alternativ. Valget ble gjort på bakgrunn av teknologi, tilgjengelig kompetanse, tilgang på service og reservedeler, og selvfølgelig pris.

For 145 kV GIS har vi svært små utslipp. Det å bytte ut et GIS er svært kostbart. Vi utbedrer lekkasjen med en gang det evt. skulle bli lekkasje. For frittstående effektbrytere kan det nok være lavere terskel for å skifte den ut fremfor å utbedre en lekkasje, spesielt på eldre brytere.

Elvia har ingen spesifikke mål om når anleggsparken skal være SF6-fri. Det å bytte ut et GIS er svært kostbart. Man har fokus på å begrense lekkasjer av SF6. SF6-holdige anlegg vil derfor sannsynligvis beholdes ut deres levetid, da man har begrenset med utslipp fra disse. Men, nye lover og regler vil ha påvirkning for disse beslutningene fremover. For frittstående effektbrytere kan nok terskelen for utskiftning, fremfor lekkasje utbedring, bli lavere i årene fremover.

Generelt er Elvia opptatt av å ta miljøhensyn, men det er en oppfatning av at teknologien omkring SF6-frie GIS anlegg på de høyeste spenningsnivåene fortsatt er noe uferdig. Etter deres oppfatning er at det er for tidlig, og for høy risiko å begynne å kjøpe inn anlegg med alternative gasser i stor skala. Så her sitter man nok litt på gjerdet og ser an utviklingen foreløpig.

8.1.3.4 Norgesnett

Norgesnett har besluttet at alle nye anlegg som etableres kjøpes inn som SF6-fri. Har god erfaring med de nye anleggene så langt. Per i dag ingen vesentlige ulemper erfart med SF-frie anlegg sammenliknet med SF6 anlegg.

Ved behov for nye anlegg så anskaffes nytt materiell i det åpne markedet basert på pris, teknologi og tilgjengelighet. Norgesnett ser ikke at det finnes en overlegen teknologi eller leverandør per i dag.

Før total anleggsmasse er helt SF6 fri vil det gå mange år. Gamle anlegg byttes fortløpende med moderne og miljøvennlige alternativer, slik at utskiftningen vil gå gradvis. Kostnaden ville vært alt for stor om alle anlegg skulle vært skiftet til SF6-frie anlegg på bare få år.

8.1.3.5 Statnett

Statnett skal for første gang benytte en SF6 fri løsning i GIS anlegg på høyeste spenningsnivå (420 kV). Hamang transformatorstasjon er planlagt ferdig i 2024 og skal bruke g3 i de passive delene av anlegget. Senior prosjektleder, Thomas Weisser Fennefoss, skriver at de vil spare ett tonn SF6 gass på dette. Han skriver videre: «Når vi bestilte dette for over 2 år siden var det ikke mulig å bestille g3 løsning for 420kV effektbrytere. Så vidt jeg vet er det fremdeles ikke et kommersielt produkt som er enkelt å bestille og kan ikke leveres i dag» [59].

Dessverre fikk vi ikke svar fra fagmiljøet han videreførte oss til, men virker som at Statnett ikke enda er klar over noen kommersielle løsninger for å erstatte SF6 i effektbrytere på 420 kV GIS.

9 Diskusjon

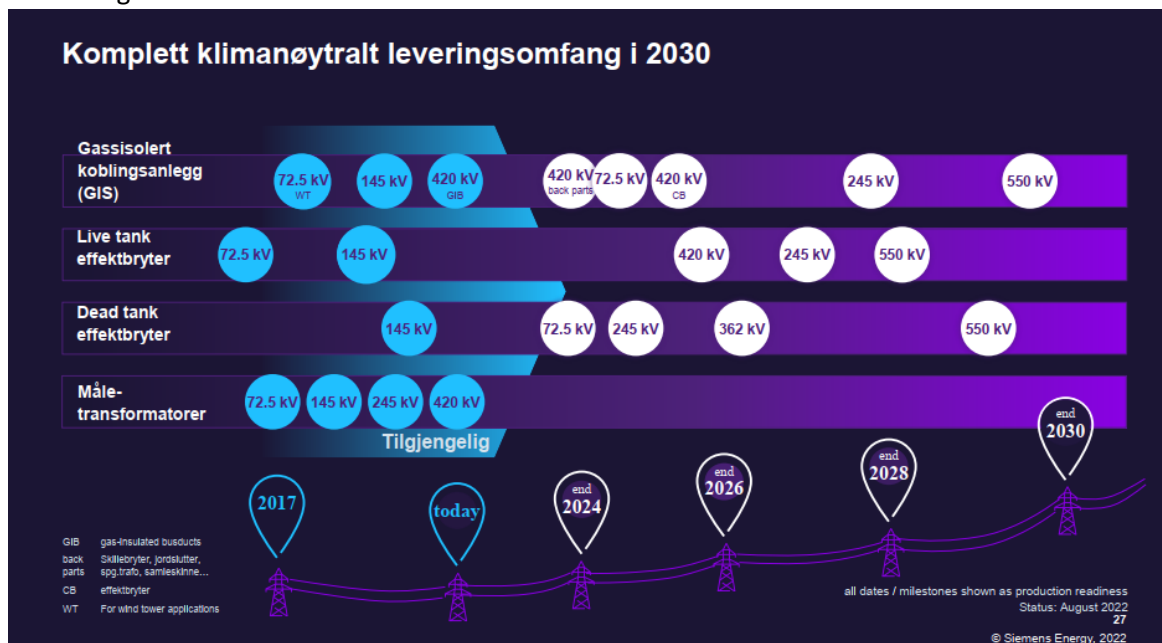
9.1.1 Utvikling

SF6 er som kjent den kraftigste klimagassen vi kjenner til. Global oppvarming og stadig økende fokus på miljø gjør at bruken av SF6 er under press. Dessverre, kan man si, fungerer gassen fantastisk bra i høyspenningsanlegg. Både til bruk som isolerende medium, og til bruk i brytere. SF6-frie anlegg opp til 145 kV har vært vanlig i noen år allerede, men på de høyeste spenningsnivåene har det ikke vært alternativer tilgjengelig i GIS anlegg.

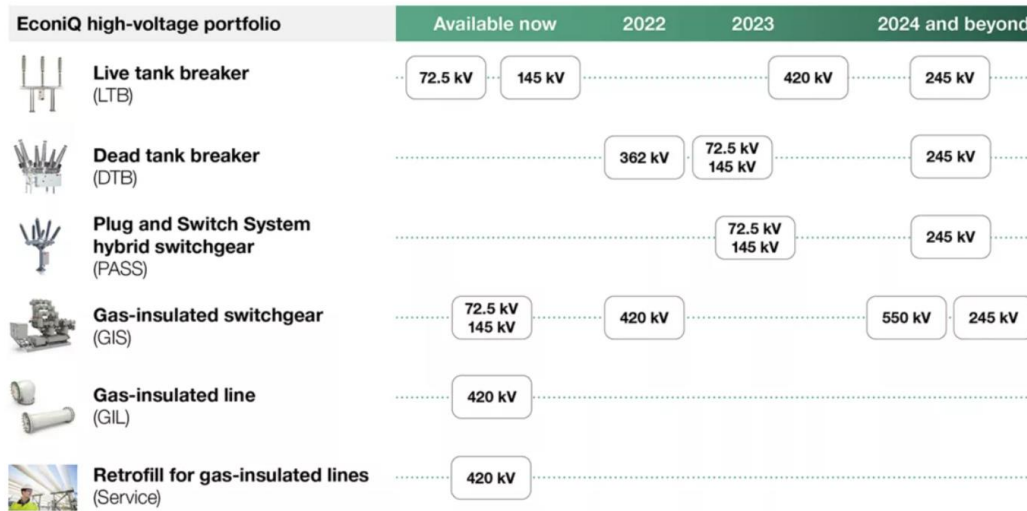
Per i dag finnes det ikke løsninger for å kvitte seg med SF6 fullstendig. Vi vet at g3 og EconIQ fungerer på passive deler i GIS 420 kV. Før leverandørene kan tilby komplette løsninger på de aller høyeste spenningsnivåene, må de først vise til et velfungerende og komplett anlegg. Men, som det er skrevet om tidligere i oppgaven arbeides det med flere spennende pilotprosjekter. Hitachi forteller selv at de har utviklet komplette GIS-anlegg på 420 kV nivå, men at de ikke er testet ut i stor skala. GE forteller at de skal ferdigstille sin GIS-bay i løpet av 2023 og sende det til sitt pilotprosjekt på Kintore i Skottland. Hitachi har et lignende prosjekt på «Bengeworth Road substation» i London [60]. Hvis disse prosjektene blir vellykket, som både Hitachi og GE har tro på, vil nok mange aktører følge etter.

Nedenfor presenteres tre av de store produsentene av høyspenningsutstyr sine lanseringsplaner. Siemens, Hitachi og GE planlegger alle å lansere SF6-frie komponenter de kommende årene. Senest innen 2030 forventer alle tre leverandørene å kunne levere komplette anlegg på alle spenningsnivå, helt uten SF6. GE og Hitachi er lengere fram i løypa sammenlignet med Siemens. Samtidig som Siemens kun baserer seg på naturlige gasser.

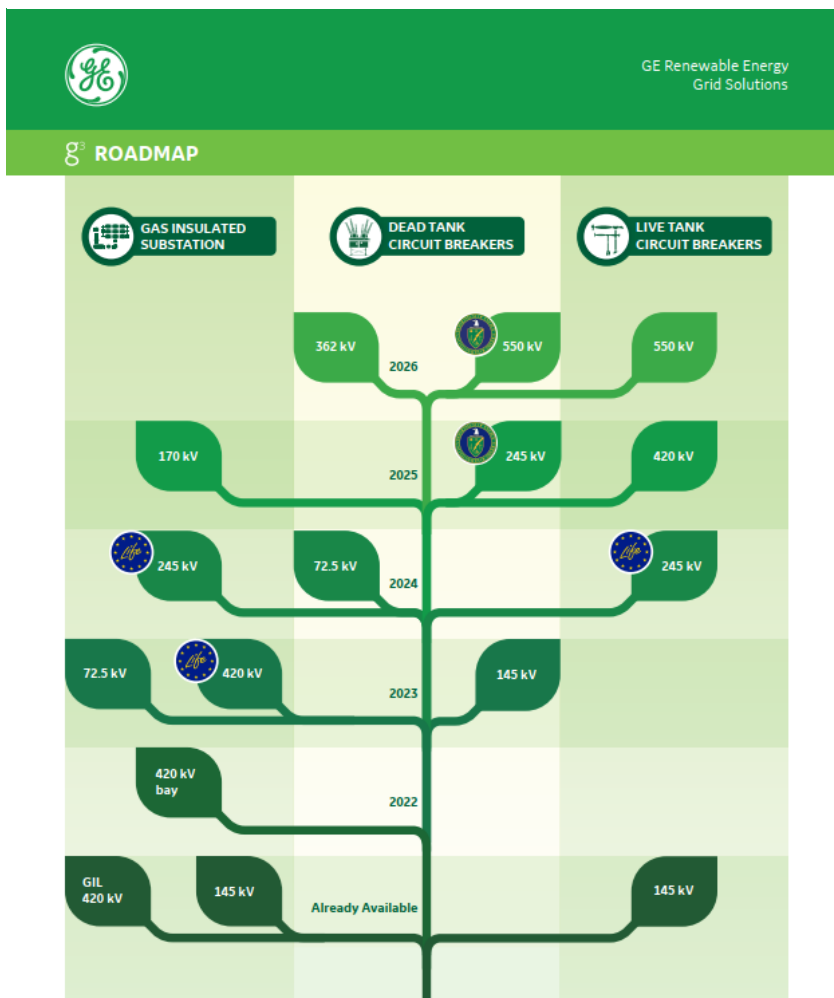
Vi har hatt fokus på GIS og effektbryterne der. Live- og dead-tank effektbrytere har vi sett bort ifra pga. vårt fokus på GIS. Vi har også fått inntrykket at å utvikle effektbrytere i GIS er den største utfordringen.



Figur 49 Simens framdriftsplan [29]?



Figur 50 Hitachi sin framdriftsplan [81]



Figur 51 GE sin framdriftsplan [82]

9.1.2 Utfasing

Det synes som at det kan leveres anlegg på alle spenningsnivå, helt uten SF6, i løpet av få år. Med dette er en barriere brutt, og man kan starte utfasingen av den potente klimagassen. Spørsmålet er i hvilken hastighet vil denne utfasingen foregå?

Høyspenningsanlegg er kostbare anlegg. Det vil koste enormt mye penger å bytte ut alle anlegg og anleggsdeler med SF6, til anlegg uten denne gassen. I denne sammenheng er Hitachi sin EconiQ retrofill et meget spennende produkt, som kan erstatte SF6 som isolasjonsmedium på eksisterende anlegg. Dette er allerede gjort hos National Grid, Richborough, Storbritannia på 420 kV GIL [61]. Hitachi skal snart i gang med et lignende prosjekt i Danmark, og det er også planlagt i Norge [33]. En slik løsning sparer både store ressurser og kostnader. GE sin g3 har også mulighet til å direkte erstatte SF6 på passive deler [35].

Kontakten vår med norske nettselskaper avdekker et betydelig fokus på SF6. Det er ingen tvil om at de tar miljøspørsmålet på alvor, og ønsker å redusere bruken av klimagassen. Samtidig er de åpne om at dette er et kostnadsspørsmål. GIS anlegg har en levetid på 40-50 år. De nyeste anleggene har gjerne 40-45 år igjen av sin levetid. Kostnaden med en komplett utskiftning av disse ville være overveldende.

Dessuten må man ta for seg hele miljøregnskapet. Karbonavtrykket som etterlates ved produksjon av hvert enkelt anlegg er også betydelig, og det er kanskje ikke klimavennlig å erstatte SF6-anlegg for enhver pris.

Oppsummert vil nok SF6 finnes i høyspenningsanlegg i mange år fremover. Store kostnader ved utskiftning er nevnt, men også usikkerhet omkring ny teknologi nevnes av nettselskapene. Enkelte nettselskaper var tydelige på at de inntil videre sitter på gjerdet. De ønsker å se an kvalitet og funksjon på de nye løsningene, før de investerer i dette selv. Hos disse var prioriteringen heller å unngå lekkasjer og utslipp av SF6 i størst mulig grad.

9.1.3 Konkurransen

Økende oppmerksomhet på miljø har gitt de store produsentene av høyspenningsanlegg insentiver til finne løsninger uten SF6. For Siemens, GE, Hitachi med flere, så er dette et kappløp. For disse er det både prestisje og stolthet i å løse problematikken først. Men, det er selvsagt også snakk om profitt og fortjeneste. Det er ingen av selskapene som ønsker å tape markedsandeler fordi de ikke kan tilby hva markedet etterspør.

Etter vår oppfatning vil det ikke ta lang tid før en av selskapene bryter målsnøret først, og tilbyr komplette løsninger på 420 kV nivå. Hitachi hevder de kan levere komplette GIS-anlegg på 420 kV med EconiQ allerede [33]. For enda høyere spenningsnivåer er det fortsatt en vei å gå. Det er også en stund til produsentene kan levere enkeltkomponenter som er SF6-frie på de høyeste spenningsnivåene. For at SF6-frie brytere skal fungere over 145 kV må hele anlegget være tilpasset dette.

Av Hitachi, GE og Siemens er det kun sistnevnte som tilbyr en helt ren teknologi. De benytter som nevnt syntetisk luft og vakuüm. De er klare på at de har et konkurransefortrinn sammenliknet med konkurrentene. Dette da det også er knyttet usikkerhet til fremtiden for andre fluorgasser ifølge EU. Hitachi og GE benytter i prinsippet samme gass. For dem ville det være katastrofalt om også fluornitriler ble satt under strenge restriksjoner, eller forbudsliste, på lik linje med SF6. Lysaker hos Hitachi Energy Norge deler imidlertid ikke disse bekymringene.

Selv om 3M skulle slutte å produsere F-gasser, har Hitachi og GE andre gassprodusenter som kan levere gassen. Tilgjengelighet er dermed ikke noe problem. Når det gjelder miljøaspektet påpeker Lysaker at Hitachi sin teknologi totalt sett etterlater et mindre karbonavtrykk enn Siemens. Dette fordi Siemens sine anlegg er større i størrelse. Dette mener hun er underkommunisert i miljøspørsmålet omkring høyspenningsanlegg. Hitachi hevder at myndigheter og bestemmende organer ikke kan se bort i fra dette aspektet, og at fluorgasser vil få dispensasjon til bruk i høyspenningsutstyr. Som tidligere nevnt har ikke GE enda gjort et totalregnskap av miljøavtrykket deres, noe som skal komme i løpet av 2023. Antar at det blir nesten identisk som Hitachi.

Siemens sin tilnærming har vært å utvikle GIS-anlegg fullstendig uten fare for giftige utslipp. På grunn av dette ligger de litt bak Hitachi og GE i SF6-fri produktportefølje i dag, men allerede innen 2026 regner de med å kunne tilby komplette GIS anlegg til 420 kV. Ved blant annet å øke trykket i isolerende deler til 11 bar, samt øke avstander noe, regner de med at dette skal være mulig [29]. Dette fører selvsagt til noe større anlegg, ref. påstander fra Hitachi omkring totalt klimaavtrykk. På den annen siden er gassene til Siemens helt naturlige. Hvis det skulle bli restriksjoner på fluorgasser i fremtiden vil Siemens være enerådende på markedet. Konkurrentene vil trenge flere år på å ta igjen forspranget, da deres teknologi må utvikles på nytt.

10 Konklusjon

Utviklingen av SF6-frie løsninger innen høyspenningsanlegg har vært formidabel til seneste årene. I løpet av få år er vi overbeviste om at man ikke lenger behøver å benytte SF6, verken som isolasjonsmedium, eller som bryter. Uansett spenningsnivå. Det viser seg at gassen til GE og Hitachi, med ulike mikser av Novec 4710, er både en god isolasjonsgass og brytergass. Syntetisk luft viser seg som en god isolasjonsgass, så lenge den trykkes tilstrekkelig. Komponentene som skal designes for syntetisk luft må tåle høyere trykk, samtidig som de ikke bør ta for mye plass. Her blir det spennende å se hva Siemens kan utrette. Vakuum er ikke et alternativ som isolasjonsmedium, men fungerer svært bra som bryter. På noe lenger sikt er Siemens overbevist om at de kan utvikle vakuumbrytere også for de høyeste spenningsnivåene.

Utfasingen av SF6 vil imidlertid ta tid. Det er kostbart for nettselskap å erstatte komponenter og anlegg. Miljøgebyrer fra myndighetene kan påvirke utskiftingstakten av anlegg, men flere nettselskaper antyder at de vil beholde fungerende SF6 anlegg i flere tiår til. Hitachi Energi sin løsning med EconiQ retrofill vil kunne øke utskiftingstakten betraktelig, og redusere behovet for bruk av SF6 som isolerende gass. Det er å forvente at iallfall GE vil lansere liknende løsninger i fremtiden. Omstillingen for å fjerne SF6 som isolerende gass i GIS på 420 kV nivå er allerede i gang.

Per i dag hevder både GE og Hitachi at de kan levere komplette GIS-anlegg for 420 kV uten bruk av SF6. Men de må først demonstrere dette i full skala i et pilotprosjekt før det blir kommersielt. Disse anleggene baserer seg på samme teknologi og begge mener at deres GIS effektbrytere på 420 kV fungerer godt. Siemens forventer å kunne lansere sitt Blue Gis-anlegg for 420 kV innen utgangen av 2025. Til gjengjeld har Siemens flere vel etablerte GIS-anlegg for 145 kV allerede, i Norge antas de å være markedsledende i dette segmentet.

Produsentene har satset på ulike teknologier, der hvert selskap har stor tro på sin løsning. Her er det ulike syn på hvilken strategi som er best for miljøet. Siemens har satset 100% på klimavennlige gasser i sitt utstyr. Hitachi hevder til tross for dette at Siemens etterlater seg et større CO2 avtrykk som følge av produksjon og materialbruk. De mener derfor at de har den beste totalløsningen. Det blir spennende å se hvilke løsninger som blir ledende i fremtiden. Miljøhensyn kan føre til politiske avgjørelser der alle fluorforbindelser settes under kraftigere restriksjoner. Kommer Siemens med en løsning på de høyeste spenningsnivåene, vil de ha et kjempefortrinn over sine konkurrenter. Da vil mest sannsynligvis EconiQ og g3 bli erstattet med Clean Air og vakuum.

For miljøet sin skyld er det fordelaktig om det finnes flere aktører på banen. Det fører til ytterligere innovasjon og utvikling. Ikke minst blir bransjen mer konkurransutsatt basert på prissetting av produktene. Skulle man få enerådende aktør vil det være uheldig for konkurransesituasjonen. Da ville nettselskaper, og i sluttenden forbrukerne måtte betale en høyere pris enn nødvendig for et bedre miljø. Regningen for klima og miljø er det viktig at vi tar sammen, produsenter, leverandører og forbrukere.

Referanser

- [1 R. A. F. Hugh D. Young, University Physics, Fifteenth Edition in SI Units red., Person Education] Limited, 2020.
- [2 «Wikipedia,» 2023. [Internett]. Available:] https://no.wikipedia.org/wiki/Permittivitet#Elektrisk_polarisasjon.
- [3 M. H. A. S. A. A. Thomas Fischer, «Høyspenninglaboratoriet,» Høgskulen i Bergen (Bachelor),] Bergen, 2016.
- [4 D. KOCH, «SF6 properties, and use in MV and HV switchgear,» Cahier Technique Schneider Electric] no. 188, 2003.
- [5 X. Z. T. L. Song Xiao, «Sciencedirect.com,» Elsevier, 2018 November 2018. [Internett]. Available:] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484717301178>. [Funnet 01 Januar 2023].
- [6 T. R. L. I. S. Erik F. Haagensen, «145 KV GASSISOLERT ANLEGG MED TEKNISK REN LUFT SOM] ISOLASJONSMEDIUM OG VAKUUM EFFEKTBRYTER,» Siemens AS, 2017.
- [7 D. a. K. T. Gielen, «The role of non-CO2 greenhouse gases in meeting Kyoto targets,» Paper] prepared for the workshop: “Climate Change and Economic Modelling: Background Analysis for the Kyoto Protocol”. OECD Headquarters, Paris, 1998.
- [8 A. Granheim, *Instruks for arbeid med SF6-anlegg og SF6-effektbrytere og*, Oslo: Statnett, Revidert] siste gang 30.12.2022.
- [9 J. A. B. M. R. F. B. Andreas Hopf, «IEEE Xplore,» 2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 10] August 2017. [Internett]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8004635>.
- [1 R. A. R. M. S. K. M. F. M. Y. Rizwan Ahmed, «Feasibility of Fluoronitrile (C4F7N) as a Substitute to 0] Sulphur Hexafluoride (SF6) in Gas Insulated Application: A Review,» 2022 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), 2022.
- [1 A. (. H. Abderrahmane Beroual, «Recent Advances in the Quest for a New Insulation Gas with a 1] Low Impact on the Environment to Replace Sulfur Hexafluoride (SF6) Gas in High-Voltage Power Network Applications,» Energies 2017, 10, 1216; doi:10.3390/en10081216, www.mdpi.com/journal/energies, 2017.
- [1 A. M. t. W. C. Kristine Bjørnsen, «NVE, Bruk av SF₆ i kraftsektoren og alternative isolasjons- og 2] brytningsmedier til SF₆,» 2019. [Internett]. Available: https://publikasjoner.nve.no/eksternrapport/2019/eksternrapport2019_70.pdf.
- [1 S. v. Istad, «Sintef.no,» Sintef, 16 03 2022. [Internett]. Available: 3] <https://www.sintef.no/projectweb/sf6/>. [Funnet 23 01 2023].

- [1 Klima- og miljødepartementet, «Forskrift om begrensning i bruk av helse- og miljøfarlige 4] kjemikalier og andre produkter (produktforskriften),» Klima- og miljødepartementet, 24. Juni 2004 (sist endret 01.01.2023). [Internett]. Available: https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-922/*#*. [Funnet 30. Januar 2023].
- [1 M. Istad, «blogg.sintef.no,» Sintef, 09. April 2021. [Internett]. Available: 5] <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/sf6-gassregnskap/>. [Funnet 31. Januar 2023].
- [1 «ssb.no,» 3 November 2022. [Internett]. Available: [https://www.ssb.no/natur-og-6\] miljo/forurensning-og-klima/statistikk/utslipp-til-luft/artikler/klimagassutslippene-gikk-ned-0-7-prosent-i-2021](https://www.ssb.no/natur-og-6] miljo/forurensning-og-klima/statistikk/utslipp-til-luft/artikler/klimagassutslippene-gikk-ned-0-7-prosent-i-2021).
- [1 S. S. A. B. Prof. Wilhelm Rondell, «SF6 i Høyspentsektoren,» Bergfald Mjørådgivere AS på oppdrag 7] fra Miljødirektoratet, 2017.
- [1 Skatteetaten, «[Skatteetaten.no](http://skatteetaten.no),» Skatteetaten, [Internett]. Available: 8] <https://www.skatteetaten.no/bedrift-og-organisasjon/avgifter/saravgifter/om/sf6/innforing/>. [Funnet 23 01 2023].
- [1 E. Csyani, «<https://electrical-engineering-portal.com/>,» 02 12 2016. [Internett]. Available: 9] <https://electrical-engineering-portal.com/gas-insulated-substation-gis-vs-ais>. [Funnet 16 3 2023].
- [2 Heen Skotland et al, «Gassisolerte og luftisolerte bryteranlegg,» NVEs hustrykkeri, Oslo, 2017. 0]
- [2 G. W. H. S. J. S. H.-K. J. a. G.-S. K. Baofeng Pan, «Green Gas for Grid as an Eco-Friendly Alternative 1] Insulation Gas to SF6: A Review,» Applied Sciences MDPI, 2020.
- [2 P. A. S. M. S. N. E. André-Maouhoub, «Production of Graphite During the Extinguishing Arc,» 2020. 2]
- [2 J. G. O. J. B. A. Z. C. W. Y. T. Ang Xiao, «Environmentally Friendly Insulating Gases as SF6 Alternatives 3] for Power Utilities,» 3M Company and Beijing Key Laboratory of High Voltage & EMC, 2019.
- [2 H. H. N, «no.lambdageeks.com,» 2023. [Internett]. Available: 4] <https://no.lambdageeks.com/boiling-point-and-pressure-2/>.
- [2 G. D. M. C. M. I. P. I. Abubakr Ayub, «ADVANCED THERMODYNAMIC POWER CYCLES UTILIZING 5] CARBON DIOXIDE BASED MIXTURES AS WORKING FLUIDS FOR HIGH TEMPERATURE WASTE HEAT RECOVERY,» 2021.
- [2 P. P. Y. K. John G. Owens, «Think Grid,» 2015. [Internett]. Available: [https://www.think-6\] grid.org/search-sf6-replacement](https://www.think-6] grid.org/search-sf6-replacement).
- [2 K. K. U. K. Mark Kuschel, «Technically advanced and SF6 Free 145 Kv blue GIS,» *Transformers 7] Magazine*, pp. 110-115, 11 2019.

- [2 D. K. R. V. a. B. S. Florian Wolfrum, «Make a Difference – with Blue GIS,» Siemens AG, 2 Erlangen, 8] 2023.
- [2 L. Stadheim, Interviewee, *Besøk hos Siemens Energy Bergen*. [Intervju]. 23 04 2023. 9]
- [3 M. G. a. P. P. Sebastian Glomb, «“Alternative Gases” and Gas Mixtures Part 1,» DILO Armaturen 0] und Anlagen GmbH, Babenhausen, 2020.
- [3 M. H. a. S. Zache, «"Alternative insulation gas for medium-voltage switchgear",» Petroleum and 1] Chemical Industry Conference Europe (PCIC Europe), Berlin, 2016.
- [3 ABB, «AirPlus Technology Webinar,» 2020. 2]
- [3 E. Lysaker, Interviewee, *Telefonintervju med Hitachi Energy Norge*. [Intervju]. 16 05 2023. 3]
- [3 P. Ponchon, «think-grid.org,» 2018. [Internett]. Available: [https://www.think-grid.org/g3-in-the-4\] air](https://www.think-grid.org/g3-in-the-4] air).
- [3 Y. K. E. L. David Gautschi, «Think-grid.org,» GE, 23 8 2016. [Internett]. Available: 5] <https://www.think-grid.org/gas-insulated-substations-are-switching-g%C2%B3-sf%E2%82%86-free-solution>.
- [3 A. J. Cohen, «ge.com,» GE, 21 April 2021. [Internett]. Available: [https://www.ge.com/news/press-6\] releases/ge-og-hitachi-abb-power-grids-signerer-en-banebrytende-avtale-for-a-redusere](https://www.ge.com/news/press-6] releases/ge-og-hitachi-abb-power-grids-signerer-en-banebrytende-avtale-for-a-redusere). [Funnet 18 05 2023].
- [3 J. M. a. O. P. W. Menz, *Microsystem Technology*, Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2001, pp. 110-116. 7]
- [3 Wikipedia, «wikipedia.org,» [Internett]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum>. [Funnet 8] 18 04 2023].
- [3 V. N. a. M. Maller, *Advances in High Voltage Insulation and Arc Interruption in SF6 and Vacuum*, 9] Oxford: Pergamon Press Ltd., 1981, pp. 186-272.
- [4 J. S. J. O.-S. Władysław Opydo, «Review and comparison of electro-insulation properties of vacuum 0] and sulphur hexafluoride,» Poznań University of Technology, Poznan, 2013.
- [4 J. C. a. F. Ledbetter, «Predicting the Remaining Life of Vacuum Interrupters in the field,» Doble 1] Engineering Company, 2014.
- [4 M. A. L. A. J. Lieberman, «Wikipedia,» 3 Mars 2023. [Internett]. Available: 2] https://en.wikipedia.org/wiki/Paschen%27s_law.

[4 L. Sivertsen, Høyspenningssystemer, Bergen: Fagbokforlaget, 2020.

3]

[4 «search.abb.com/,» ABB, 2011. [Internett]. Available:

4] <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1HC0029799&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionId=AG>. [Funnet Søndag Februar 2023].

[4 T. H. Økland, «Implementering av logisk styrt automatikk i 22kV distribusjonsnett,» NTNU,

5] Trondheim.

[4 S. S. o. J. H. Sebergesen, Energiproduksjon og engeridistribusjon, Gyldendal, 2002.

6]

[4 A. Nashik, «5.imimg.com,» CG, Smart solutions. Strong Relationship, [Internett]. Available:

7] <https://5.imimg.com/data5/TV/QW/MY-1842773/gas-circuit-breaker.pdf>.

[4 Y. V. Polezhaev, «thermopedia.com,» Thermopedia, 9 februar 2011. [Internett]. Available:

8] <https://www.thermopedia.com/content/1186/>.

[4 T. K. a. P. G. N. N. Götte, «"Series Connection of Gas and Vacuum Circuit Breakers as a Hybrid

9] Circuit Breaker in High-Voltage Applications,"» *IEEE Transactions on Plasma Science*, nr. Vol. 48, no.7, pp. 2577 - 2584, 07 2020.

[5 Online Electrical and Electronics Study, «EEEGUIDE.COM,» [Internett]. Available:

0] <https://www.eeeguide.com/principle-of-vacuum-circuit-breaker/>. [Funnet 17 04 2023].

[5 L. Falkingham, «THE EVOLUTION OF VACUUM INTERRUPTER ARC CONTROL SYSTEMS,» CIRE -

1] 18th International Conference on Electricity Distribution, 2005.

[5 Y. Kieffel, «lifegrid.eu,» Lifegrid, 2022. [Internett]. Available: [https://www.lifegrid.eu/wp-](https://www.lifegrid.eu/wp-content/uploads/2019/09/LifeGRID_Laymans_report_2022_11.pdf)

2] [content/uploads/2019/09/LifeGRID_Laymans_report_2022_11.pdf](https://www.lifegrid.eu/wp-content/uploads/2019/09/LifeGRID_Laymans_report_2022_11.pdf).

[5 M. Abdel-Salam, «www.taylorfrancis.com,» 2000. [Internett]. Available:

3] <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781482290035-10/gas-insulated-switchgear-anis>.

[5 EU, «www.europarl.europa.eu,» 30 03 2023. [Internett]. Available:

4] https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0092_EN.html. [Funnet 02 05 2023].

[5 Maine.gov, «PFAS in Products,» 18 04 2023. [Internett]. Available:

5] <https://www.maine.gov/dep/spills/topics/pfas/PFAS-products/>. [Funnet 02 05 2023].

[5 California Air Resotces Board, «www.arb.ca.gov,» 20 09 2020. [Internett]. Available:

6] <https://ww2.arb.ca.gov/rulemaking/2020/sf6>. [Funnet 02 05 2023].

[5 3M, «news.3m.com,» 3M, 20 12 2022. [Internett]. Available: <https://news.3m.com/2022-12-20-7>] 3M-to-Exit-PFAS-Manufacturing-by-the-End-of-2025. [Funnet 02 05 2023].

[5 C. Bennett, «www.nationalgrid.com,» 09 12 2021. [Internett]. Available: 8] <https://www.nationalgrid.com/electricity-transmission/beginning-removal-sf6-greenhouse-gas-our-operations>. [Funnet 02 05 2023].

[5 T. W. Fennefoss, 2023.
9]

[6 Hitachi, «hitachi.com,» 21 Desember 2022. [Internett]. Available: 0] <https://www.hitachi.com/New/cnews/month/2022/12/221222.html?fbclid=IwAR0mkTL-MHP3yII1yMQIZnmkTbE4vohoJgKcDzisE2y-am4IEtAscQGDw>.

[6 Hitachi Energy, «hitachienergy.com/,» Hitachi Energy, 09 12 2021. [Internett]. Available: 1] <https://www.hitachienergy.com/news/press-releases/2021/12/hitachi-energy-partners-with-national-grid-on-world-s-first-replacement-of-sf6-in-existing-high-voltage-equipment>. [Funnet 18 05 2023].

[6 HiB, UiB, NHH, UiO og Nasjonalbiblioteket, «Søk og Skriv,» 12 12 2014. [Internett]. Available: 2] <http://sokogskriv.no/>. [Funnet 12 12 2014].

[6 «Chint,» Chint, Empower the world, 2022. [Internett]. Available: 3] <https://chintglobal.com/blog/protection-relay/>.

[6 (. © OCDE, «OECD GUIDELINE FOR THE TESTING OF CHEMICALS,» 7 September 2009. [Internett]. 4] Available: <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264076037-en.pdf?expires=1675095413&id=id&accname=guest&checksum=F02B3492DE684E762846DE2BF171D030>.

[6 H. Z. H. E. E. Yulianta Siregar, «Dielectric Strength of SF6-N2 and SF6-CO2 due to Temperature and 5] Pollutants,» 022 Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS), 2022.

[6 Y. T. C. W. Y. C. H. J. H. Z. H. J. Geng Chen, «Analysis on Temperature Distribution and Current- 6] Carrying Capacity of GIL Filled with Fluoronitriles-CO2 Gas Mixture».

[6 Schneider Electric, «se.com,» 30 09 2021. [Internett]. Available: 7] <https://www.se.com/ae/en/faqs/FA238151/>. [Funnet 16 03 2023].

[6 V. M. a. M. Naidu, Advances in High Voltage Insulation and Arc Interruption in SF6 and Vacuum, 8] Oxford: Pergamon Press Ltd., 1981, pp. 186-272.

[6 N. S. S. P. Ashwina Gharde, «STUDY OF 6.6KV VACUUM CIRCUIT BREAKER,» National Power 9] Training Institute, Nagpur, 2016.

[7 Electrical4U, «electrical4u.com,» 23 10 2020. [Internett]. Available: 0] https://www.electrical4u.com/vacuum-circuit-breaker-or-vcb-and-vacuum-interrupter/?utm_content=cmp-true. [Funnet 17 04 2023].

[7 S. Transmission, «lifegrid.eu,» 2021. [Internett]. Available: <https://www.lifegrid.eu/ssen-1-transmission-becomes-the-first-utility-to-benefit-from-lifegrids-420-kv-sf6-free-circuit-breaker/>.

[7 «www.hitachienergy.com,» Hitachi, 2023. [Internett]. Available: 2] <https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/high-voltage-switchgear-and-breakers/gas-insulated-switchgear/gis-for-72-5-1200-kv/gis-elk-5-up-to-1200-kv>.

[7 R. Bleasdale, «hitachienergy.com,» 1 Juli 2021. [Internett]. Available: 3] <https://www.hitachienergy.com/news/press-releases/2021/07/no-hitachi-abb-power-grids-utvikles-til-bli-hitachi-energy-og-utvider-sitt-engasjement-for-en-b-rekraftig-fremtid>.

[7 S. Sverre Gullikstad Johnsen, «norwegianscitechnews.com,» 17 juni 2020. [Internett]. Available: 4] <https://norwegianscitechnews.com/2020/06/how-a-plasma-gasifier-can-reduce-co2-emissions/>.

* For å oversette "Sammendraget" utnyttet vi Chat GPT

Appendiks A Prosjektledelse og styring

A.1 Prosjektorganisasjon

Flat struktur. Fordeling av ansvar og oppgaver diskutert og fordelt fortløpende.

A.2 Arbeidsform

- Individuelt:
 - o Litteratursøk og skrivning teori.
- Felles:
 - o Ukentlige møter. Video eller fysisk. Delt individuelt arbeid. Diskusjoner og statusoppdatering. Korreksjoner, revideringer, nye planer og oppgaver fordelt.
 - o Laboratorieforsøk
- Skyløsning benyttet for deling av arbeid og dokumenter

Appendiks B Fremdriftsplan

								2023	
								Uke	
								Man	
								Fre	
								6/1 13/1 20/1 27/1 3/2 10/2 17/2 24/2 3/3 10/3 17/3 24/3 31/3 7/4 14/4 21/4 28/4 5/5 12/5 19/5 26/5 2/6 9/6 16/6	
#	Aktivitet	Beskrivelse	Resultat	Plant. Arbeid [timer]	Start Dato	Slutt Dato	Fram drift	Ansvarlig	
1	Eksamensperiode januar				3/1	6/1	100%		
2	Møter med veileder(e)	ukentlig møte	møtereferater/logg	40	9/1	15/5	0%	Martin, Ørjan, veil	
3	Møter i gruppa	ukentlig møte	møtereferater/logg	40	9/1	15/5	0%	Martin, Ørjan	
2	Litteratursøk	Søke/lese teori	Notater/tekst til teori	60	9/1	31/3	0%	Martin, Ørjan	
4	Metode undervisning	delta på	Notater	30			40%	Institutt	
5	Forprosjekt arbeid		Forprosjekt rapport	150	9/1	6/2	0%	Martin, Ørjan	
6	Forprosjekt innlevering	Milepæl		0		6/2	0%	Martin, Ørjan	
6	Lab-tester	Oppstart		100	9/2	31/3	0%	Martin, Ørjan	
		Undersøker							
8	Gasser til test	Hiljengelighet	Bestilles	6		17/2	0%	Martin, Ørjan	
8	Kontakt bedrifter opprettet	Spørreund.		10	10/2		0%	Martin, Ørjan	
		Forberede midtveis							
10	Midtveis presentasjon forberede	presentasjon	Midtveispresentasjon	40	6/3	19/3	0%	Martin, Ørjan	
15	Midtveispresentasjon	Milepæl		0	20/3	31/3	0%	Martin, Ørjan	
11	Sammenfatte kvalitets tester	Skrive/sortere/excel	Data	60	TBD	TBD	0%	Martin, Ørjan	
12	Midtveispresentasjon	TBD		60	TBD	TBD	0%	Martin, Ørjan	
13	Sammenfatte isolasjonstester	Skrive/sortere/excel	Data	60	TBD	TBD	0%	Martin, Ørjan	
14	Påskeferie	Milepæl		3/4	10/4		0%	Martin, Ørjan	
15	Refleksjonsnotat	Milepæl		15		24/4	0%	Martin, Ørjan	
16	Bacheloroppgave skrive	strukturere, skrive,		150	11/4	22/5	0%	Martin, Ørjan	
18	Ordinær eksamen		Bacheloroppgave		8/5	7/6	0%	Martin, Ørjan	
19	Koente eksamen				8/6	14/6	0%	Martin, Ørjan	
	Oppgave ferdigstilles, seneste								
20	Inn 22. Mai	Milepæl		20		22/5	0%	Martin, Ørjan	
	Bachelor oppgave muntlig								
23	presentasjon	Muntlig eksamen		2	?		0%	Martin, Ørjan, sensor	
22	EXPO23	Delta på EXPO		16		14/6	0%	Martin, Ørjan	
23	Avslutningsfest					15/6	0%	Institutt	

Vi lagde en grov framdriftsplan i starten av prosjektet. Den har vi fulgt rimelig godt, men lab-delen ble vanskelig å planlegge. Vi satt oss som mål å være ferdig innhold før 1. mai, noe vi klarte. Vi var derimot litt overrasket over arbeidsmengden som måtte til for å få en rød tråd gjennom teksten, pluss alle smådetaljer.

Appendiks C Økonomi

Laboratorieingeniør Lars Ekroll kjøpte inn nødvendig materiell til prosjektet. Den nøyaktige kostnaden har vi derfor ikke klart for oss, men det var ikke snakk om store summer. Nødvendig gass fikk vi kostnadsfritt av institutt for kjemi, dvs. de dekket denne kostnaden for oss.

Appendiks D Kontaktliste

Vi har hatt korrespondanse med følgende ressurspersoner og selskaper under utarbeidelsen av Bacheloroppgaven. Listen inkluderer personlig kontakt, telefon og e-post.

- ✓ Nippon gases
- ✓ Vidar Stene, DILO (gass leverandør)
- ✓ Behjelpelige ansatte HVL, Institutt for sikkerhet, kjemi- og bioingeniørfag
- ✓ BKK v/Denan Klucanin
- ✓ Elvia v/Martin Nygård
- ✓ Glitre v/Trond Eriksen
- ✓ Norgesnett v/Erik Hansen
- ✓ 3M Norge (ikke svar)
- ✓ Brukergruppen for SF6 v/Marit Istad (ikke svar)
- ✓ Siemens Energy v/Bjarte Trengereid og Leif Ingar Stadheim
- ✓ Hitachi Energy v/Ellen Lysaker
- ✓ Chauvot, Veronique (GE Renewable Energy)
- ✓ Allison J. Cohen (GE)
- ✓ Eli Jerpseth, GE Renewable Energy (ikke svar)

Appendiks E Prosjektlogg

Uke 2: Struktur og oversikt. Første veiledningsmøte med Lasse Sivertsen 09.01.23

Uke 3: Struktur og oversikt. Diskusjon rundt framgangsmåte. Litteratursøk.

Uke 4: Andre veiledningsmøte med Lasse. Skrevet referat fra møtet. Første møte med Lars, skrevet referat. Litteratursøk.

Uke 5: Forstudiet innlevering som er fokus. Skrivning.

Uke 6: Andre lab møte med Lars, her har det oppstått en forsinkelse så vi får ikke testet utstyret 9. feb som håpet. Sendt ut mail til bedrifter og fikset IEC tilgang på biblioteket. Ny lab-dato 21. feb, isolator test.

Uke 7: Skrivning og litteratursøk. Kontakt selskaper angående SF6.

Uke 8: I gang på lab. Testkjørt lab i forhold til hengeisolator. Jobbet tirsdag og onsdag fra 10 til 16:30, og torsdag 10-16.

Uke 9: Planlegger testing av gasser. Beskjeden er at det skal være arbeid uke 10 og 11 på laben. Får kontrabeskjed, og gjør så mye vi kan i uke 10. Det byr på utfordringer siden Lars har tre grunnlaber, Ørjan skal på jobb og Martin flyr fredag.

Uke 10: Vi møtes mandag og torsdag. Mandag går med til klargjøring av gasstester. Torsdag innledende testing, fikk spenningssatt systemet. Bli enige om å møtes i uke 12. Deretter kontrabeskjed, tester må bli fredag. Kjørte gjennom CO2 og N2.

Uke 11: Ingen testing. Skrivning

Uke 12: ingen testing. Skrivning.

Uke 13: Onsdag testet ferdig alle gasser, inkl. vaakum og trykkluft (tørr og fuktig) Kjørte variac test torsdag.

Uke 14: Påskeferie

Uke 15: Kontakt med bedrifter og selskaper per telefon og e-post med spørsmål som har dukket opp, som f.eks. hvorfor de ikke har g3 gassen i effektbrytere på Hamang. Forsøker å avtale et møte med Siemens.

Uke 16: Møte med Siemens Energy

Uke 17: Skrive refleksjonsnotat

Uke 18 => 20: Gjøre ferdig tekst og struktur i oppgaven. Diskuterer og konkluderer

Uke 21: Oppgave leveres!

Appendiks F Kommentarer

F.1 Praktiske utfordringer vedrørende Lab-tester

Vi hadde en rekke utfordringer på laben som vi ikke hadde sett for oss. Arbeidet med å ferdigstille høyspenningslaboratoriet gikk senere enn forventet. Testene av hengeisolatorene måtte utsettes. 25. januar og 9. februar ble satt av for testing, ved begge anledninger var ikke Faradays buret klart. Det var flere ting som skulle jordes og det var ikke noen spenning inn på laben. 22. februar ble første mulighet for å kjøre tester.

Planlegging av gasstester tok overraskende lang tid. Måtte søke mye i litteratur, finne IEC teststandarder og snakke med leverandør av gass. For å få tak i gassen måtte vi snakke med kjemi avdelingen på HVL. Behjelpelige, men forutsetning var at de hadde kontroll på prosessen. Det var flere gasser vi hadde lyst til å prøve som ikke var mulig for oss å teste. SF6, g3 og Air plus var f.eks. enten for dyrt eller ikke forsvarlig sikkerhetsmessig. Det å få tak i en trykkmåler som kunne gjøre målinger for forskjellige gasser var også en utfordring.

Flere spørsmål dukket opp. Hvordan skulle vi teste gassene i praksis? Skal vi endre på trykket eller avstanden mellom kulene? Hvordan skal vi rengjøre kammeret? Blir holdfastheten til gassene svekket etter flere brudd? Hvor mye gass trenger vi? Er kammeret tett? Hvordan skal vi fylle kammeret med gass? Finne riktig overgang fra kontaktpunkt i vegg til koplingspunkt beholder. Skal vi tømme kammeret først for luft? Hvordan skal vi måle trykket? Dette var noen av spørsmålene vi måtte stille oss. Fikk heldigvis god hjelp av Lars Ekroll. Han stilte også med sin egen trykkmåler til testene.



Kondensatoren som vi skulle bruke for gasstestene hadde ikke nok olje. Måtte demontere annen, og «stjele» fra den. Tilsynelatende lite problem, men som førte til forsinkelser.

Oppsummert tok det praktiske arbeidet mye lenger tid enn forventet. Det dukket stadig vekk opp utfordringer og «småting» vi måtte gjøre før vi satt i gang. Den ene gangen under testene så slo effektbryteren ut nede i hovedtalen i bygget. Labingeniør måtte tilkalle ekstern elektriker og be han fikset dette. Kunne nevnt flere lignende situasjoner. Totalt antall timer på laben endte en plass mellom 100-120 timer. I tillegg måtte vi utsette mange lab-dager pga. arbeid på laben. Det førte til at vårt oppsett måtte tas opp og ned. Som man ser på bildet var det til tider litt kaos der inne.



Arbeidet med oppgaven har altså bydd på en del praktiske utfordringer grunnet parallell ferdigstilling av laboratoriet underveis med vårt arbeid.