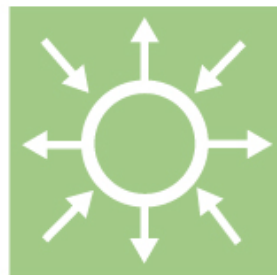




Analys av SF₆gas

Tillståndsbedömning av SF₆brytare

Elforsk rapport 09:14



Bengta Andersson

januari 2009

ELFORSK

Analys av SF₆gas

Tillståndsbedömning av SF₆brytare

Elforsk rapport 09:14

Förord

En havererad brytare medför stora kostnader, merparten av haverierna är av mekanisk orsak och främst drabbar manöverdonen. Att man på ett tidigt stadium kan se brytarstatusen skulle medföra att man kan sätta in rätt åtgärder. Detta leder till att man skulle kunna undvika ett haveri eller avvakta med underhållet av brytaren. Då en gasanalys medför ett kortare driftavbrott skulle man kunna tjäna på att använda sig av gasanalys för förebyggande underhåll av brytare. Detta projekt går ut på att ta reda på hur SF₆gasens kemiska sammansättning förändras för en brytare i drift.

Det är SF₆gasens egenskaper som en starkt inert gas med en hög dielektrisk styrka och termisk stabilitet som har gjort att SF₆gasen används som brytmedium.

En av SF₆gasen viktigare egenskaper är att den återbildas efter att strömmen har brutits. Om det inte finns någon yttre påverkan så återbildas all SF₆gas men om det förekommer föroreningar i brytare så återbildas inte all SF₆gasen.

Då det inte finns så mycket skrivet om SF₆brytare på svenska. De första kapitlen ger en översikt av SF₆gasen och hur gasen fungerar.

Styrgruppen för projektet har bestått av följande personer:

Ulf Lager E.ON Elnät Sverige AB

Jan-Olof Falk, Vattenfall Eldistribution AB

Lars Wallin Svenska Kraftnät

Jörgen Hasselström och Per Bengtsson Fortum Distribution

Rickard Tjäder, Grontmij, har varit projektledare mellan 2004 och 2007 och Bengta Andersson, Grontmij, projektledare mellan 2007 och 2009.

Projektansvarig har varit Sven Jansson Elforsk AB. Projektet har kunnat genomföras tack vare finansörerna i projektet som är:

Svenska Kraftnät

Vattenfall Eldistribution AB

Fortum Distribution AB

Sydkraft Nät AB/ E.ON Elnät Sverige AB

Göteborg Energi Nät AB

Skellefteå Kraft Elnät AB

Jämtkraft Elnät AB

Umeå Energi Elnät AB

Öresundskraft AB

Gävle Energi AB

Ennergiverken i Halmstad/Halmstad Energi och Miljö AB

Växjö Energi Elnät AB

Eskilstuna Energi och Miljö AB

Sundsvall Elnät AB

Luleå Energi AB

Borlänge Energi AB

Varberg Energi AB

Härnösand Energi och Miljö AB

Landskrona Kommun Tekniska Verken

Elverket Vallentuna AB

Stockholm 21 januari 2009

Sven Jansson

Sammanfattning

Att använda sig av gasanalys för att se brytaren status tar upp till 2 månader om allt fungerar. Av de sju provomgångarna som har genomförts så har en analys förkastas på grund av föroreningar i gastuberna.

Om man skulle använda sig av ett laboratorium i Norden skulle tiden kunna kortas ned. Det optimala vore att göra analyserna ute på fältet.

Projektets mål var att se hur SF₆gasen i brytarna åldras. Någon direkt åldring av gasen har vi inte kunnat påvisa. Vi har sett att gasens sammansättningar förändras mellan provtillfällen men förändringen har aldrig varit onormal. Ingen av brytarna har havererat under projektens gång eller uppvisat restprodukter som överstiger tillåtna gränsvärden för SF₆gas i brytare. Då projektet har löpt över 4 år har brytarna fyllts på med SF₆gas vilket har förbättrat gasens sammansättning i brytaren och andelen restprodukter har hållits inom gränsvärdena.

I dagsläget kan inte SF₆analys rekommenderas som metod för att kontrollera brytarstatusen. Detta då gasanalys har visat sig vara en kostsam och krånglig process med ifrågasättande av analysresultaten. Manöverdon och mekanik står för cirka 90% av felen som uppstår i brytarna, dessa fel täcks inte in i av gasanalysen

Många SF₆brytare för mellanspänning är hermetisk förslutna och gasanalys kan alltså inte användas för dessa.

Summary

The goal of this project has been to see how the of SF₆gas changes in a breaker over the years of operation. We have not found that during the 4 year of the project there have been any significant change in the composition of the gas. All of the test analysis results show no sign of an increment of decay products in the gas above the threshold values of SF₆gas in gas breakers.

During the course of the project the breakers have been refilled whit gas duo to normal leakage. This has shown no negative impact on the gas.

Since no laboratory in Sweden does gas analysis on SF₆gas the average time for a gas analysis is two month. The possibility of field testing or shortening of the transportation of the gas samples would be preferred. Of the 7 test one has been rejected due to contamination of the gas vessels.

At present SF₆analysis can not be recommended as a method for maintenance of gas breakers, due to cost of an analysis and the complications of carrying out the tests. Over 90% of the failures of breakers are due to mechanical failures, these failures will not show in gas analysis.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Projekt mål.....	1
1.3	Projektets förutsättningar	1
1.4	Val av brytare	1
1.5	Projekthistorik	2
1.6	Projekt uppbyggnaden	3
1.6.1	Gasinsamling	3
1.6.2	Gasanalys	4
1.7	Ekonomi	5
1.8	Tid	5
2	SF₆gas	6
2.1	Allmänt om SF ₆ gas	6
2.2	SF ₆ gasens miljöpåverkan.....	6
2.2.1	Ekosystemet.....	6
2.2.2	Ozon	6
2.2.3	Kyotoavtalet.....	7
2.2.4	Växthuseffekten	7
2.2.5	Livscykelanalys	7
2.2.6	Påverkan på människor.....	7
2.2.7	Biprodukter	7
2.3	Hur gasen fungerar.....	7
2.4	Temperaturpåverkan	8
2.5	Föroreningar.....	9
2.5.1	Fukt	9
2.5.2	Daggpunkten.....	9
2.5.3	Rörliga partiklar	9
3	Nedbrytning av SF₆gas	11
3.1	Ideal SF ₆ gas	11
3.2	Restprodukter och föroreningar	12
3.3	Fukt	13
3.4	Fasta partiklar	14
3.5	Teflon.....	14
3.6	Kol	15
3.7	Koppar.....	15
3.8	Wolfram.....	16
3.9	Aluminium.....	16
3.10	Gränsvärden för restprodukter	16
4	Resultat av gasanalysen	17
4.1	Brytare med gemensamt gasutrymme, 130kV	17
4.2	Brytare med polvis separerade gasutrymmen, 400 kV.....	21
5	Slutsats	25
5.1	Gasanalysen	25
5.2	Slutsatser av projektet	25

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Analys av SF₆gasen i SF₆brytare utförs inte i Sverige medan det i USA och Canada är en vanligt förekommande del av underhållet på SF₆brytare. Genom gasanalysen kan man i vissa avseenden få reda på brytarstatusen och utifrån denna planera underhåll.

1.2 Projekt mål

Målet med projektet har varit att se om det är tekniskt och ekonomiskt möjligt att genomföra analys på SF₆brytare som en del av underhållet av SF₆brytarna.

1.3 Projektets förutsättningar

Från början var det meningen att projektet skulle utföras under 2004 och innefatta 12 stycken brytare varav 6 stycken brytare med polvis separerade gasutrymmen, de övriga 6 brytarna har gemensamt gasutrymme. Det skulle utföras 48 stycken gasanalyser. För varje brytare/fas skulle det tas två prover med ett halvårs mellanrum för att visa om det skedde någon förändring i gasen. För att ge en tydligare bild av hur gasen åldras så valdes att genomföra tre stycken gasanalyser per brytare istället för två då antalet brytare i projektet minskade. Från början var det meningen att analysen skulle utföras i Norden men inget laboratorium hade möjlighet att utföra de gasanalyser som behövdes. Valet föll istället på ett laboratorium i USA, TJH2B. En analysomgång beräknades ta en månad, och man skulle kunna utföra sex stycken samtidigt. Att utföra en analysomgång visade sig dock ta betydligt längre tid än en månad.

1.4 Val av brytare

Brytarna i projektet valdes specifikt för att få en bild om valet av tillverkningsår eller tillverkare påverkade resultatet. Under projektets gång ändrades antalet brytare och slutligen analyserades SF₆gas från sju stycken brytare.

Applikation	Fabrikant	Brytartyp	Spänning	År
Kondensator	ABB	LTB 145	130 kV	1995
Kondensator	Alstom	S1-145 F1 SYN INT	130 kV	2000
Kondensator	ABB	LTB 145	130 kV	1993
Kondensator	ABB	LTB 145	130 kV	1993
Kondensator	Alstom	S1-145 F1 SYN INT	130 kV	2000

Kondensator	ABB	LTB 145	130 kV	1994
Reaktor	Sprecher	HGF 116/2B	400 kV	1996

1.5 Projekthistorik

Under november 2003 lämnade Mårten Svensson på Grontmij in projektbeskrivningen och under 2004 påbörjades projektet. Meningen var att projektet skulle avslutas 2004 men problem hos laboratoriet och problem med frakt av gastuber mellan Sverige och övriga världen har medfört att projektet tagit längre tid.

- 2004 Förberedelser i form av inköp av tuber för gasprov. Val av laboratorium och vilka restprodukter som ska analyseras görs. Från början fördes samtal med ett laboratorium i Norden men de blev uppköpta och beslöt att inte göra nödvändiga investeringar för att kunna genomföra SF₆ gasanalys. Ett laboratorium i USA används.
- 2004 dec Provomgång 1 påbörjas. ElektroSandberg tar gasproverna.
- 2005 maj Tuberna och analysen för provomgång 1 kom tillbaka från USA. Det visade sig vara svårare att skicka tuber fyllda med gas till USA än vad som antagits.
- 2005 sep Provomgång 2 påbörjas. ElektroSandberg tar gasproverna
- 2006 apr Analysen för provomgång 2 kommer tillbaka från USA. Laboratoriet har haft problem med sin vakuumpump.

Tuberna kommer inte tillbaka till ElektroSandberg och det är svårt att få kontakt med laboratoriet. Det visar sig att laboratoriet har behållit tuberna då fakturan inte har betalats. Fakturan har skickats till ElektroSandberg istället för till Grontmij.
- 2006 maj För att minska transporttiderna tas kontakt med ett laboratorium i England inom samma företag som laboratoriet i USA för att undvika avvikelser i analysmetoden.
- 2006 okt Provomgång 3 påbörjas. ElektroSandberg tar gasproverna.
- 2006 nov Tuberna och analysen för provomgång 3 kommer tillbaka från England. Laboratoriet i England har haft problem med trasiga detektorer och strömförsörjning.
- 2007 mars Provomgång 4 påbörjas. ElektroSandberg tar gasproverna.
- 2007 okt Ny projektledare, Bengta Andersson på Grontmij.
- 2007 okt Proverna sänds till laboratoriet i England.
- 2007 dec Tuberna och analysen för provomgång 4 kommer tillbaka från England.

2007 dec	Beslut tas om att minska antalet mätpunkter och att istället en analysomgång till ska genomföras på varje mätpunkt.
2008 jan	Provomgång 5 påbörjas. ElektroSandberg tar gasproverna
2008 feb	Tuberna anländer till England, de meddelar att de har problem i laboratoriet.
2008 mars	Analysen för provomgång 5 kommer från England, värdena på nästan samtliga föroreningar i gasen har minskat.
2008 mars	Efter samtal med laboratoriet framkommer det att provomgång 3 har blivit förorenad. TJH2Bs expert på SF ₆ i USA tror att felet har uppkommit då tuberna rengjordes innan de sändes tillbaka till ElektroSandberg.
2008 maj	Tuberna kommer tillbaka från laboratoriet i England. Laboratoriet i England hävdar att de inte har gjort något fel vid evakueringen och rengöringen av tuberna för analysomgång 3. Men projektgruppen beslutar att ta om proverna för dessa mätobjekt.
2008 maj	Provomgång 6 påbörjas. ElektroSandberg tar gasproverna
2008 juli	Tuberna och analysen för provomgång 6 kommer tillbaka från England.
2008 aug	Provomgång 7 påbörjas. ElektroSandberg tar gasproverna
2008 nov	Tuberna och analysen för provomgång 7 kommer tillbaka från England. Analysresultatet ifrågasätts.
2009 feb	Projektet avslutas.

1.6 Projekt uppbyggnaden

1.6.1 Gasinsamling

Insamlingen av SF₆gas utförs av ElektroSandberg i Sege. För att undvika avvikelser i hanteringen så utförs alla gasinsamlingar av samma person. Insamlingen av gas skedde mellan december 2004 och september 2008.

Förarbete

Då gastuberna levereras från laboratoriet i England till ElektroSandberg Sege så lämnas en avbrottsbegäran för brytarna in. Det finns sex gastuber till förfogande. En gastub behövs per brytare/fas.

Gasinsamlingen

- Man börjar med att ta daggprov på den fränkopplade brytaren.
- Trycket i tuberna kontrolleras, tuberna innehåller vakuum för att kunna fyllas med SF₆gas.
- Tuberna fylls med SF₆gas.
- Tuberna paketeras och sänds till laboratoriet i England alternativt USA.



Övre raden: Daggpunkts mätning, kontroll av gastubernas tryck och insamling av SF₆gas.

Nedre raden: Gastuberna paketerade inför frakten samt montage för gas insamling.

1.6.2 Gasanalys

Analysen av gasproverna har gjorts i USA och England av TJH2B, de restprodukterna som man letat efter i analyseras är:

- H₂ Väte [ppm]
- O₂ Syre [ppm]
- N₂ Kväve [ppm]
- CF₄ KARBONTETRAFLUORID [ppm]
- CO₂ KOLDIOXID [ppm]
- SF₆ SVAVELHEXAFLUORID [ppm]
- SO₂F₂ SULFURILFLUORID [ppm]
- SOF₂ SVAVELMONOOXIDDIFLUORID [ppm]
- SOF₄ SVAVELMONOXIDTETRAFLUORID [ppm]
- COS KARBONSULFID [ppm]
- SO₂ SVAVELDIOXID [ppm]
- CC₁₂F₂ Freon R-12 [ppm]

- WF_6 Wolframhexafluorid [ppm]
- Fuktigheten [ppm]
- Elektrisk genomslagshållfasthet [kV]

Valet av dessa analysobjekt har gjorts i samarbete med TJH2bs experter, och är de restprodukter som man använder sig av för att bestämma brytares status i USA.

$$\text{ppm}_w = \frac{\text{ppm}_v}{8,1}$$

ppm = parts per million

ppm_w = parts per million by weight

ppm_v = parts per million by volume

Själva gasanalysen genomförs med gaskromatografi. Efter gasanalysen återvinns SF_6 gasen.

1.7 Ekonomi

En gasanalys i England kostar runt 12 000 Skr. Denna siffra varierar beroende på var brytarna är lokaliserade. Tas flera gasprover samtidigt minskar insamlings- och fraktkostnaderna. Att frakten är dyr beror på att det är fyllda gasbehållare som fraktas.

En grov uppskattning för analys av ett gasprov

Frakt till England	4 000
Insamling av SF_6 gas	6 000
Analys av SF_6 gas	2 000
Summa:	12 000

1.8 Tid

Detta är en uppskattning av tidsåtgången för en gasanalys utan problem.

Avbrottsbegäran	2 månader
Gas insamling	2 veckor
Frakt	2 veckor
Gasanalys	2 månader
Sammanlagd tid	5 månader

2 SF₆gas

2.1 Allmänt om SF₆gas

Karaktäristisk data	Enhet	SF ₆ IEC
Minimum av SF ₆	% vikt	99,9
Maximum av luft	% vikt	0,05
Maximum av CF ₄	% vikt	0,05
Maximalt vatteninnehåll	ppm vikt	15 (12ppmv)
Syrehalt av maximal HF ekvivalenter	ppm vikt	0,3
Hydrolys fluorider av maximal HF ekvivalenter	ppm vikt	1
Maximal mineralolja	ppm vikt	10
Toxiskt (metod 376/A IEC standard)	Testat på möss	Ej giftig

Fig. karaktäristisk data för SF₆gas som används i starkströmssammanhang enl. IEC 376 normer [5].

Av den SF₆gas som produceras i världen används ca 25 % inom elindustrin.

2.2 SF₆gasens miljöpåverkan

SF₆gasen är en av de sex växthusgaserna som nämns i Kyotoprotokollet, 1997. Gasen är en stark växthusgas och dess påverkan på miljön är stor. Det är därför viktigt att minimera läckage av SF₆ till naturen.

Under 1998 användes totalt 8,000 ton SF₆gas i världen

SF₆gasen påverkan på miljön, enligt IEC (60480/FDIS) beskrivs under följande rubriker:

2.2.1 Ekosystemet

SF₆gas påverkar inte ekosystemet då SF₆gasen är en tung gas och har en låg löslighet i vatten. Gasen har ingen farlig påverkan på yt- och grundvatten eller jorden.

2.2.2 Ozon

SF₆gasen bidrar inte till nedbrytning av ozonskiktet

2.2.3 Kyotoavtalet

SF₆ är en av de sex växthusgaserna som nämns i Kyotoprotokoll från 1997.

2.2.4 Växthuseffekten

SF₆gasen är en växthusgas. SF₆gasen har en 22 200 gånger större uppvärmningsfaktor (GWP₁₀₀=Global Warming Potential) än koldioxiden, CO₂. SF₆gasen har en lång nedbrytnings tid ca 2 300 år.

Växthusgas	Kemisk beteckning	GWP ₁₀₀
Koldioxid	CO ₂	1
Metan	CH ₄	21
Dikväveoxid, lustgas	N ₂ O	310
Ofullständiga florerade kolväten exempel	HFC 134a	1 300
Perfluormetan	FC(CF ₄)	6 500
Svavelhexafluorid	SF ₆	22 200

Källa: Naturvårdsverket

För människans totala påverkan i form av växthuseffekten står SF₆gasen för 0,1%. Detta innefattar alla användningsområden för SF₆gas och inte enbart från elindustrin.

2.2.5 Livscykelanalys

Slutsatsen av en livscykelanalys är att de ekologiska fördelarna är större med SF₆brytare än med andra brytare. Detta gäller då SF₆gasen ingår i en sluten livscykel, där gasen tas om hand och återvinns då den anses ha för stora föroreningar för att fungera enligt krav för brytaren.

2.2.6 Påverkan på människor

Enligt IEC 376 har SF₆ ingen toxisk påverkan på människor, men då gasen är fem gånger tyngre än luft får den en kvävande effekt vid inandning.

2.2.7 Biprodukter

De fasta biprodukterna AlF₃, CuF₂ och WO₃ är toxiska om de andas in eller tas in via föda eller dryck.

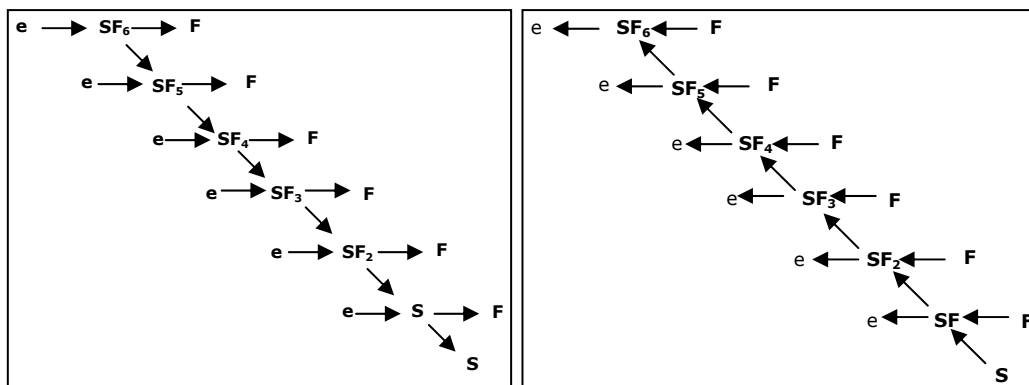
CF₄ är en växthusgas. Då gasen är tung kan den förorsaka kvävning.

2.3 Hur gasen fungerar

SF₆gasen är en starkt dielektrisk gas, för att SF₆gasen ska brytas ned behövs det en kvantenergi på 6 eV. Detta kan jämföras med gummi som har en

dielektrisk konstant på 2,3-4 eV eller luft, vid atmosfärtryck, som har den dielektriska konstanten 1 eV.

Vid en ljusbåge bryts SF_6 gasen ned till fluorid och svavel, när ljusbågen är släckt så återbildas i idealfallet SF_6 gasen fullt ut.



Vänstra bilden visar hur SF_6 gasen bryts ned vid en ljusbåge.

Högra bilden visar hur SF_6 gasen återbildas då ljusbågen slocknat.

2.4 Temperaturpåverkan

SF_6 gasen är en elektronegativ gas av hög densitet med goda egenskaper både i det termiska och dielektriska området men vid temperaturer lägre än -30°C eller -40°C (beroende på fyllningstrycket) kondenseras SF_6 gasen. Kondenseringen medför densitetsförändringar vilka medför reduktion av isolations- och brytförmåga.

För brytare som befinner sig i kallare klimat kan man blanda ut SF_6 gasen. Blandgasfyllning med SF_6 och N_2 gas ger en något sämre termisk brytförmåga samt något försämrade dielektriska brytarförmåga i jämförelse med enbart SF_6 gasfyllda brytare. Blandgasfyllda brytare med N_2 och SF_6 medför ofta en reduktion av brytarförmågan med ett märkbrytsströmsteg t ex 40kA reduceras till 31,5kA.

Gas	Lägsta omgivnings-temperatur	Fyllningstryck vid $+20^\circ\text{C}$ absoluttryck	Brytardata
SF_6	-30°C	0,7 MPa	Beror på bryartyp
SF_6	-40°C	0,5 MPa	Beror på bryartyp
SF_6/N_2	-55°C	0,36 MPa SF_6 + 0,34 MPa $\text{N}_2=0,7\text{MPa}$	Reduktion ett brytströmsteg
SF_6/CF_4	-55°C	0,36 MPa SF_6 + 0,34 MPa $\text{CF}_4=0,7\text{MPa}$	Bibehållen brytarförmåga

[1]

2.5 Föroreningar

SF₆gasen är en starkt inert gas vilket medför att den inte reagerar med andra gaser eller molekyler. Men vid en ljusbåge bryts gasen ned till svavel och fluorider, då SF₆gasen är nedbruten så kan nya föroreningar i brytaren reagera med den nedbrutna gasen.

Det finns tre sätt som man kan få in föroreningar i brytaren

- Föroreningar som tillkommer då brytaren fylls med SF₆gas
- Föroreningar från brytarmaterialets yta eller håligheter
- Läckage

Innan brytaren tas i bruk så används vakuum för att tömma brytarkammaren. Om brytarkammaren inte evakueras helt innan SF₆gasen fylls på kommer det att finna restprodukter i form av fukt.

Under de närmsta veckorna efter att brytaren har fyllts med SF₆gas så kommer fukt och luft att fortsätta att tas upp från ytan och håligheter i brytaren.

Läckage sker trots att brytaren har högre atmosfärsikt tryck än omgivningen, enligt Grahams lag om Effusion. Fukt och luft kommer att fortsätta att läcka in i brytaren till dess att dessa gasers individuella partikeltryck är lika i brytaren som utanför. På samma sätt kommer SF₆gasen att läcka ut ur brytaren. [4]

Under de första veckorna ökar fuktigheten i brytaren då detta beror på att fukt frigörs från brytarens material, fukten är även temperaturberoende. Flertalet SF₆brytare har torkmedel som tar hand om detta.

2.5.1 Fukt

Fukt i brytare bidrar till att SF₆gasen inte återbildas. Man vill därför hålla fuktigheten inne i brytaren på en låg nivå. Ny SF₆gas ska enligt IEC 60376 inte innehålla mer än 122ppm_v, 15mg/kg. För påfyllnadsgas är en högre fuktighetshalt godkänd.

2.5.2 Daggpunkten

Daggpunkten är den temperatur vid ett visst tryck och luftfuktighet som vattenånga kondenseras. Daggpunkten förändras i förhållande till temperaturen. Enligt IEC 62271-1 ska daggpunkten ligga under -5°C. Under 0°C så kommer man aldrig att få dagg i brytaren utan det övergår istället direkt till frost på ytan, då metallen blir kallast först.

2.5.3 Rörliga partiklar

Inne i brytaren förekommer rörliga partiklar vilka härstammar från bland annat mekanisk erosion och läckage.

I brytarpolerna finns material som innehåller teflon, wolfram och aluminium. Materialens uppgift är att säkerställa att brytarpolerna klarar den höga

temperaturen som uppstår då brytaren manövreras. Varje gång brytaren öppnas så slits brytarytan på kontakter och dysor, detta medför att brytaren försämras samt att partiklar lösgörs från brytarpolernas yta.

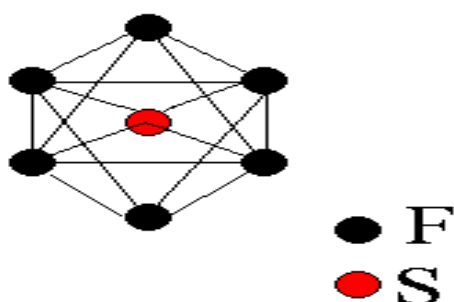
De partiklar som rör sig fritt i brytaren kan göra så med hjälp av AC fältet. Vid en ljusbåge så bryts SF_6 gasen ned till svavel och fluorider som reagerar med de fasta partiklar som finns i brytaren.

3 Nedbrytning av SF₆gas

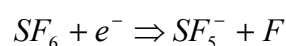
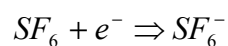
SF₆gasen är färglös, smaklös och luktlös. Det är en stabil gas vid rumstemperatur och är inte lättantändlig. Gasen är fem gånger så tung som luft. Detta medför att gasen vid läckage inomhus samlas vid golvet och tränger undan luften.

3.1 Ideal SF₆gas

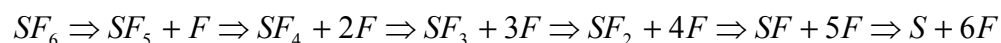
SF₆gas är en lukt och färglös stabil gas, den är varken brandfarlig eller giftig



SF₆gasen är en stabil elektronegativ gas. Men då SF₆gasen vid en elektriskurladdning, ljusbåge, tillförs elektroner så bryts gasen ned enligt



För att SF₆gasen ska ta upp elektronen krävs det att det tillför en energi på 0,1eV till 0,05eV medan för att en fluorid ska brytas loss krävs en energi på 0,1eV.



För att sedan återbildas igen då ljusbågen är släckt.

3.2 Restprodukter och föroreningar

I brytarens gaskammare finns föroreningar som binder sig till SF₆gasen då den befinner sig i ett nedbrutet stadium. De olika föroreningarna innebär att all SF₆gas inte återbildas.

Källa till förorening	Orsak till förorening	Tänkbar förorening
Under framställning och underhåll	Läckage, föroreningar i gasen pga. av ofullständig evakuering. Desorption	Luft, olja, H ₂ O
Isolering	Urladdning, corona och gnista	HF, SO ₂ , SOF ₂ , SOF ₄ SO ₂ F ₂
Brytare utrustning	Ljusbåge erosion	H ₂ O, HF, SO ₂ , SOF ₂ , SOF ₄ , SO ₂ F ₂ , CuF ₂ , SF ₄ , WO ₃ , CF ₄ , AlF ₃
Brytare utrustning	Mekanisk erosion	Metall damm, partiklar
Ljusbåge	Smältning och nedbrytning av material	Luft, H ₂ O, HF, SO ₂ , SOF ₂ , SOF ₄ , SO ₂ F ₂ , SF ₄ , CF ₄ Metalldamm, partiklar, WO ₃ , CuF ₂ , AlF ₃ , FeF ₃

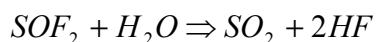
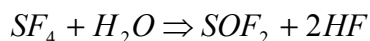
Föroreningarna i brytaren uppstår från olika källor, en del av föroreningarna beror på läckage andra tillkommer via slitage eller då brytaren fylls på med mera SF₆gas på grund av läckage.



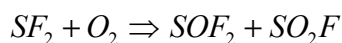
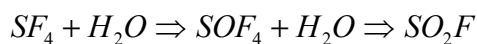
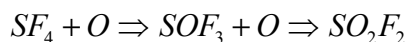
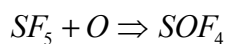
En vanlig källa till läckage är åldrade eller trasiga o-ringar som släpper igenom luft till brytaren och läcker SF₆gas.

3.3 Fukt

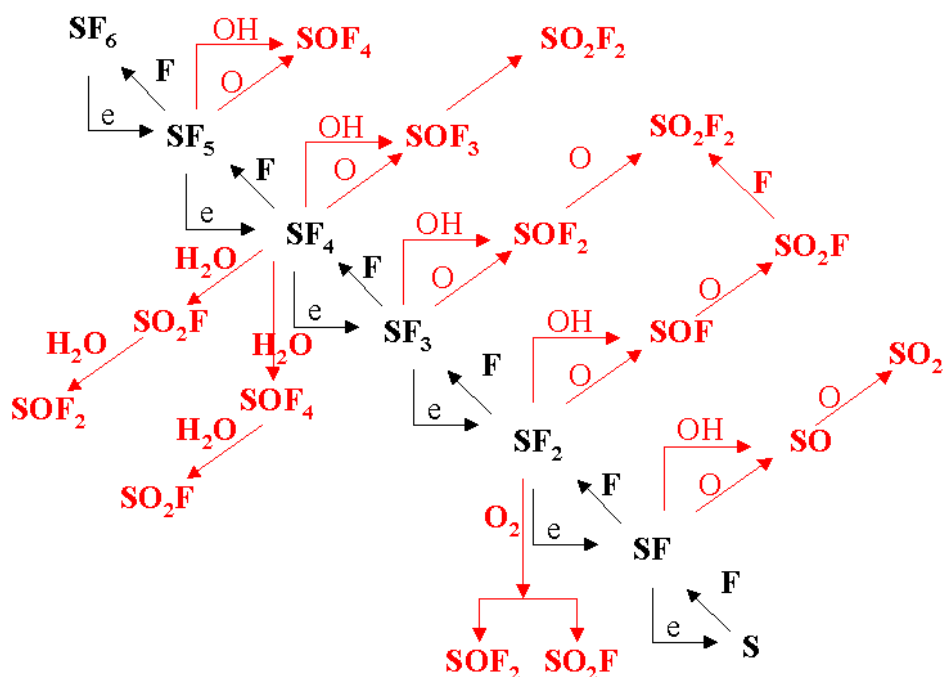
Fukten dvs. vatten i gasform är med i flera olika steg i nedbrytningen av SF_6 . Fukten binds till den sönderfallna SF_6 gasen i två steg



Beroende på vilket stadium av nedbrytningen som SF_6 gasen befinner sig i så bildas olika föroreningar i kombination med vattnet. Det är även beroende utifrån vilken sammansättning som vattnet befinner sig i.



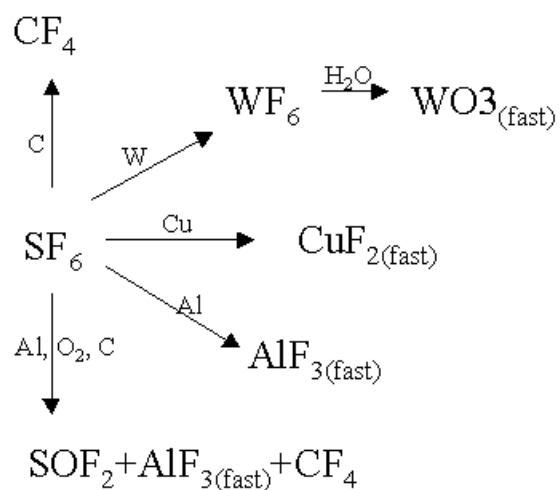
Restprodukter: Svavelmonooxiddifluorid SO_2F_2 , sulfurylfluorid SO_2F_2 , Svavelmonooxiddifluorid SO_2F , Thionyl fluorid, SOF_2 , svaveldioxid, SO_2 , och fluorväte, HF. Thionyl fluoriden och fluorvätet är hälsofarliga ämnen. [2]



Vatten binds till den nedbrutna SF_6 gasen i flera olika steg av gasens nedbrytning och återbildning.

3.4 Fasta partiklar

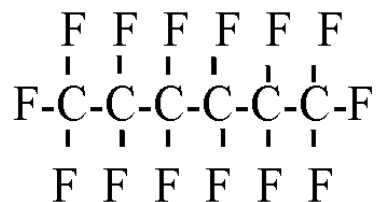
Förutom vattnets direkta påverkan på SF_6 gasens nedbrytning och återbildning så påverkar vattenmolekylen den andel av SF_6 gasen som återbildas i kombination med andra föroreningar i gasbehållaren.



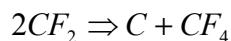
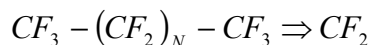
3.5 Teflon

Teflonet finns i brytarpolen för att brytarpolen ska klara de höga temperaturer som uppstår då brytaren öppnas och sluts.

Teflonet är uppbyggt i en lång kedja.



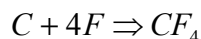
Vid ljusbågen så spjälkas teflonkedjan upp.



En biprodukt av teflon är kol, C. Kolen reagerar med SF₆gasen vid ljusbåge då SF₆gasen är nedbruten i svavel och fluorider.

3.6 Kol

Kolen som återfinns som en restprodukt av teflonet reagerar med svavlet och fluoriderna enligt

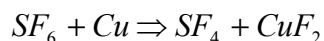


Då kolet binds till fluoriden undviker man sotning.

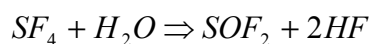
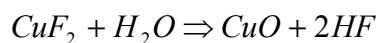
Tetrafluoridmetan, CF₄gas, är en elektronegativ.

3.7 Koppar

Kopparn i brytaren kommer från kontakter i brytaren.



Restprodukter som Svavelmonoxiddifluorid SOF₂, sulfuryl fluorid SO₂F₂ och svavelmonoditetrafluorid SOF₄ är bra dielektrider i fast form på isolatorns yta och påverkar inte driften/brytaren. Men vid förekomst av fukt bryts restprodukterna ned enligt:

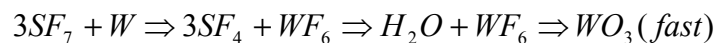


Restprodukter är Svaveltetrafluorid, SF₄ och koppardifluorid CuF₂ som i sin tur bryts ned till CuO, svavelmonoxiddifluorid SOF₂ och vätefluorid HF då fukt finns i brytaren.

Vätefluoriden, HF, som bildas i brytarna är kraftigt korrigerande och bör alltså undvikas.

3.8 Wolfram

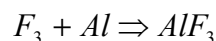
Wolfram finns i brytarpolen för att den ska klara de höga temperaturer som uppstår då brytaren bryter strömmen.



Wolframhexafluorid bildas i samband med erosion av brytarytorna. Wolframtrioxiden förekommer i fastform.

3.9 Aluminium

Aluminiumet finns i brytarpolen för att brytarpolen ska klara de höga temperaturer som uppstår då brytaren bryter strömmen.



Aluminiumfluorid, AlF_3 , är i fastform.

SOF_2 och CF_3 förekommer i fastform.

Det vita pulvret som återfinns i brytarpolerna utgörs av bildade fluorider

3.10 Gränsvärden för restprodukter

Gränsvärden i ppm för restprodukter i SF_6 gasen (USA)		
SO_2	Svaveldioxid	2 000 ppm (vol)
SF_4	Svaveltetrafluorid	100 ppm (vol)
SOF_2	Svavelmonodifluorid	2 000 ppm (vol)
SO_2F_2	Sulfuryl fluorid	2 000 ppm (vol)
SOF_4	Svavelmonooxiddetrafluorid	100 ppm (vol)
WF_6	Wolframhexafluorid	100 ppm (vol)
CF_4	Karbondetrafluorid	3 % vol
	Fuktighet	4 000 ppm (vol 1 atm)
	Luft	3 % vol

CIGRE SF_6 Recycling Guide #117

4 Resultat av gasanalysen

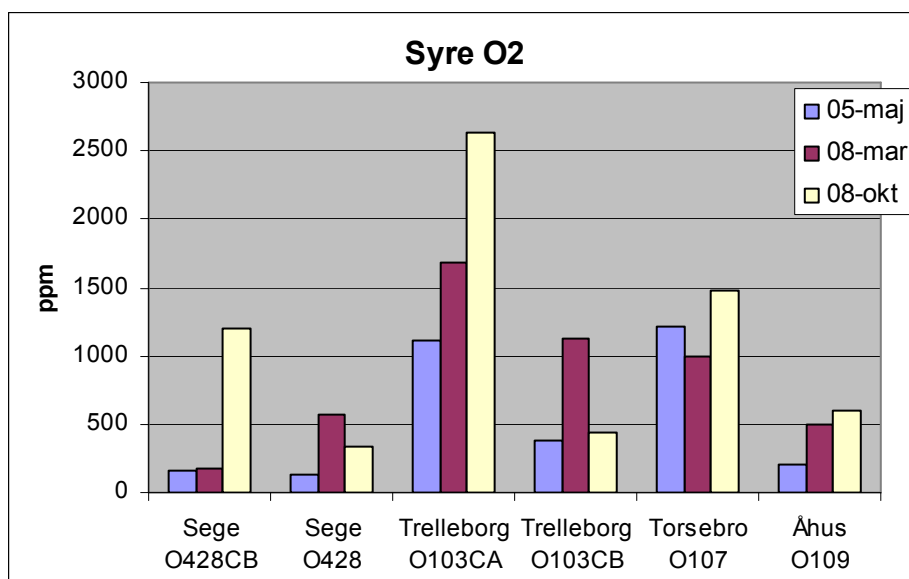
Från analysresultaten kan man läsa ut statusen från brytarna. Detta genom att se vilka halter av föroreningar som skiljer sig från de andra brytarna samt hur sammansättningen av SF₆gasen och föroreningarna i brytaren förändras.

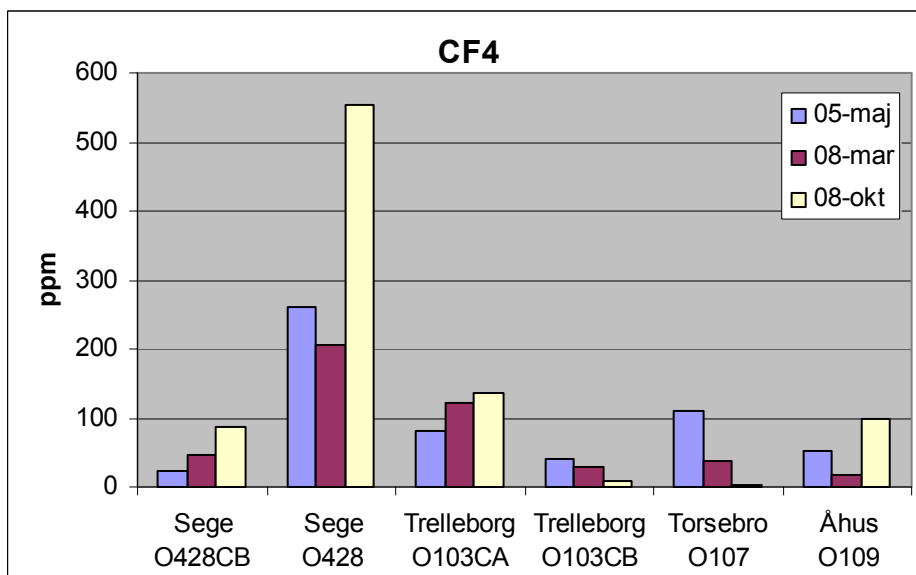
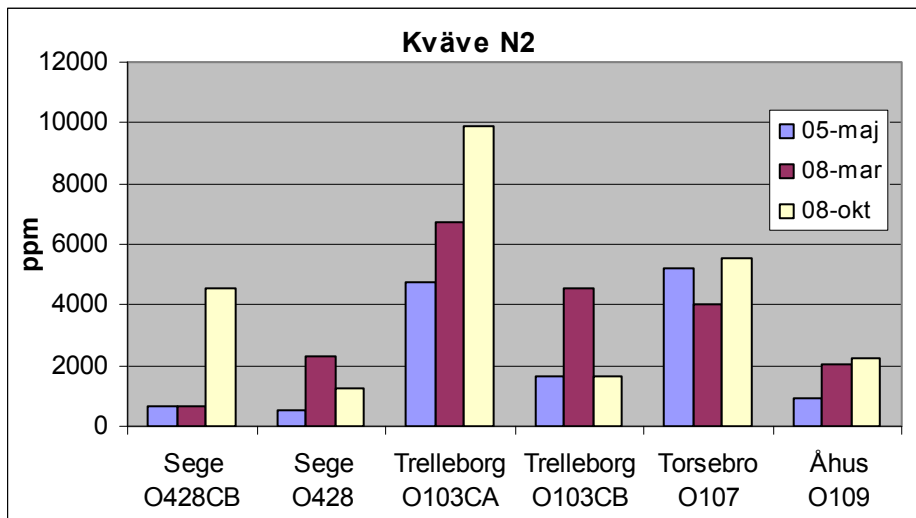
Ett utslag av SOF₄ är en indikation på en elektrisk urladdning. Ingen av gasanalyserna har gett utslag på SOF₄.

Rester av H₂ och CO₂ uppstår vid felaktigheter i brytarmaterialet. Oftast då små hål finns i brytarmaterialet, härrör dessa från tillverkningen.

4.1 Brytare med gemensamt gasutrymme, 130kV

För 130 kV brytarna har ett prov per brytare tagits. Dessa brytare har gemensamt uttag för SF₆gasen.

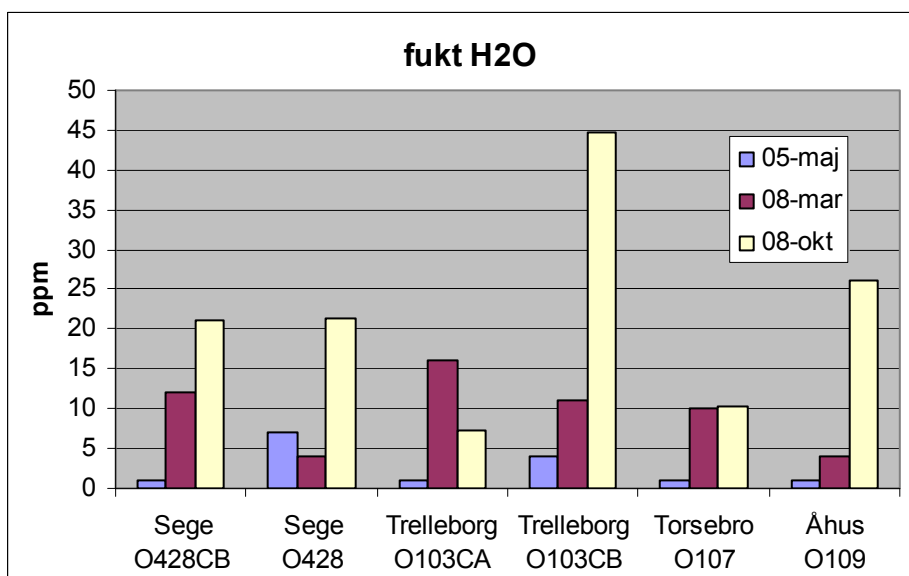
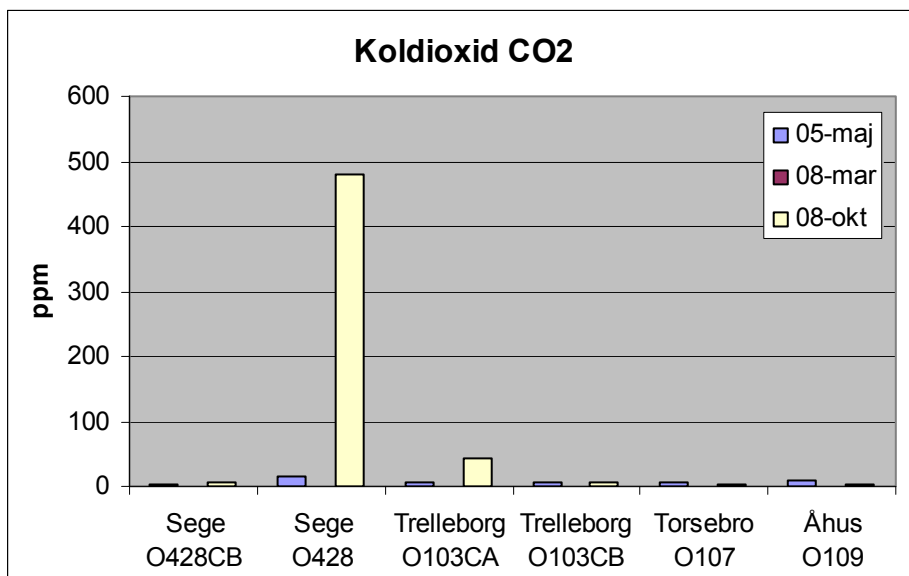


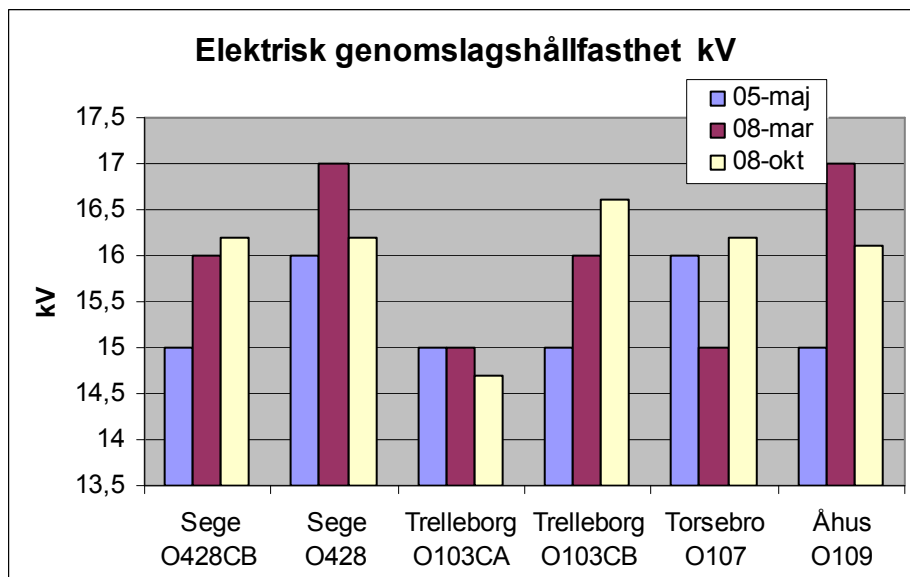
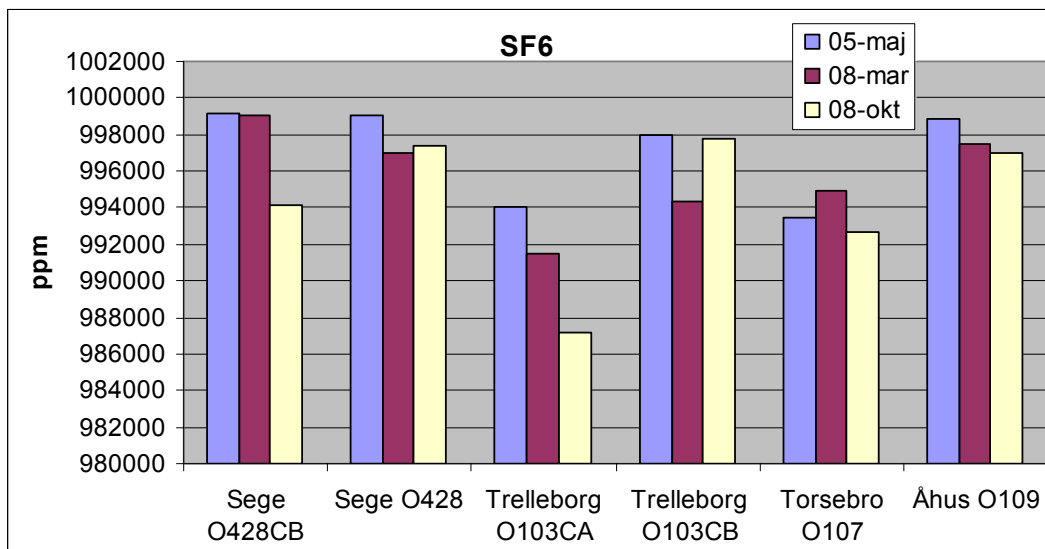


CF₄ är en restprodukt då

- teflonet bryts ned
- När kolet binds till fluoriderna och sotning undviks.

CF₄ är en elektronegativ gas som bildas när ljusbågen påverkar teflondysan och SF₆gasen.

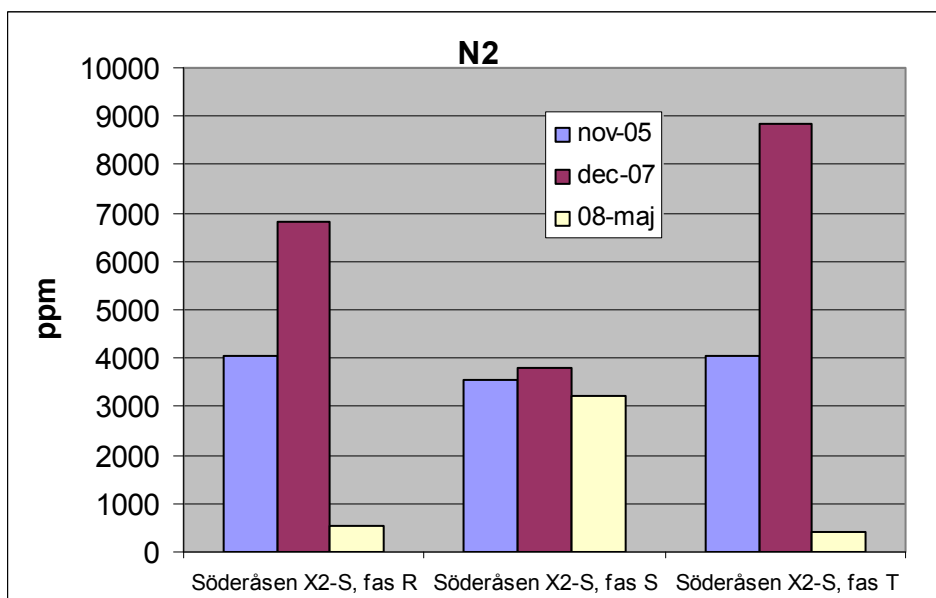
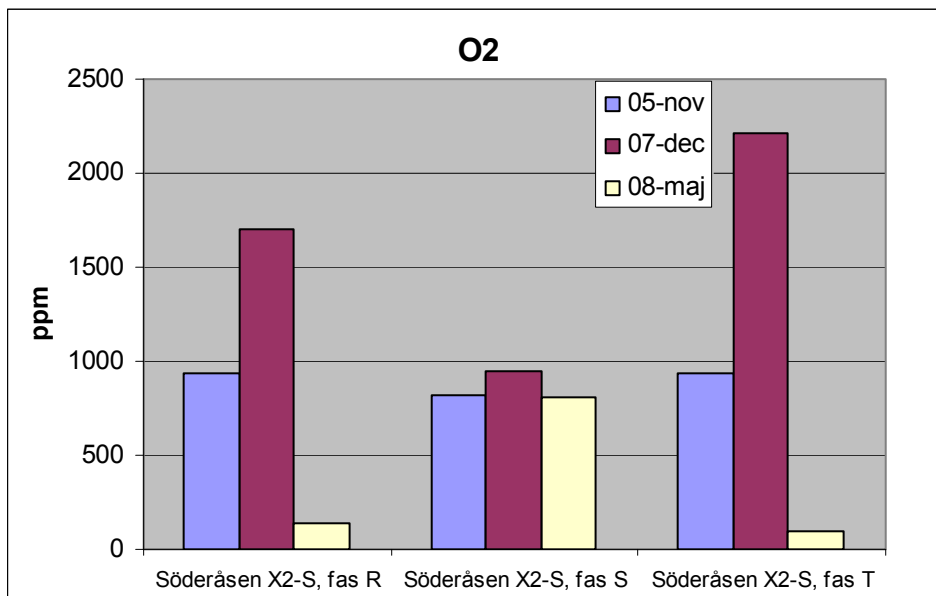


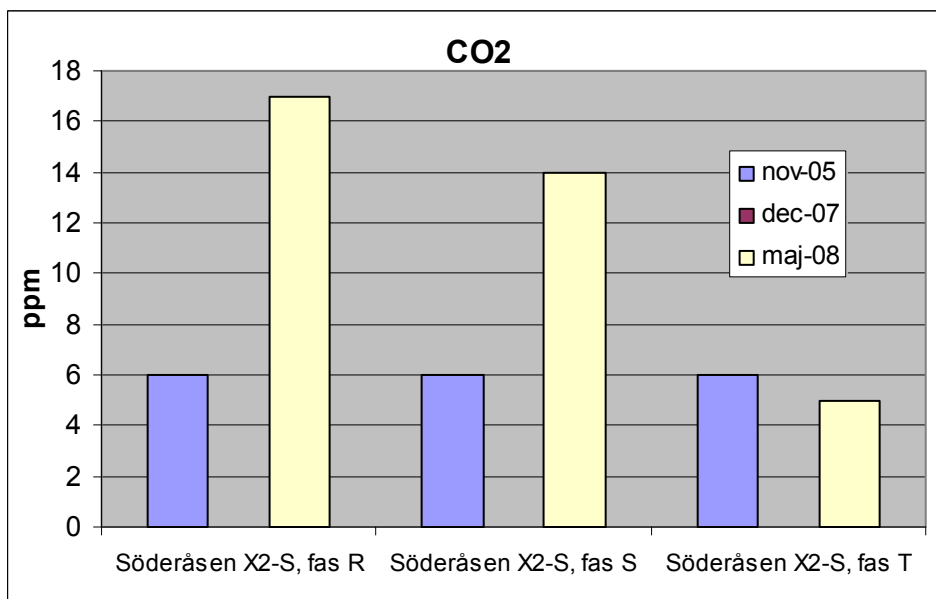
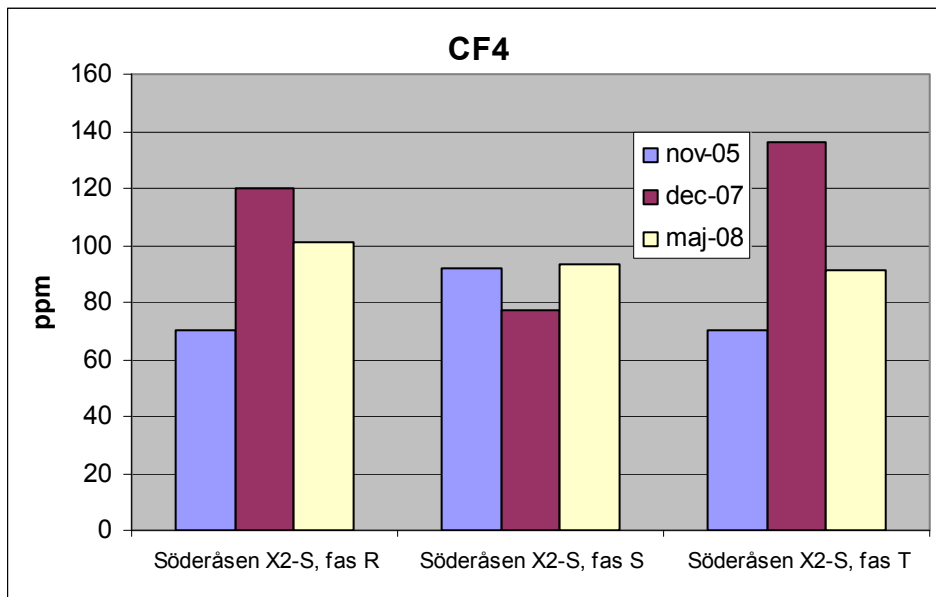


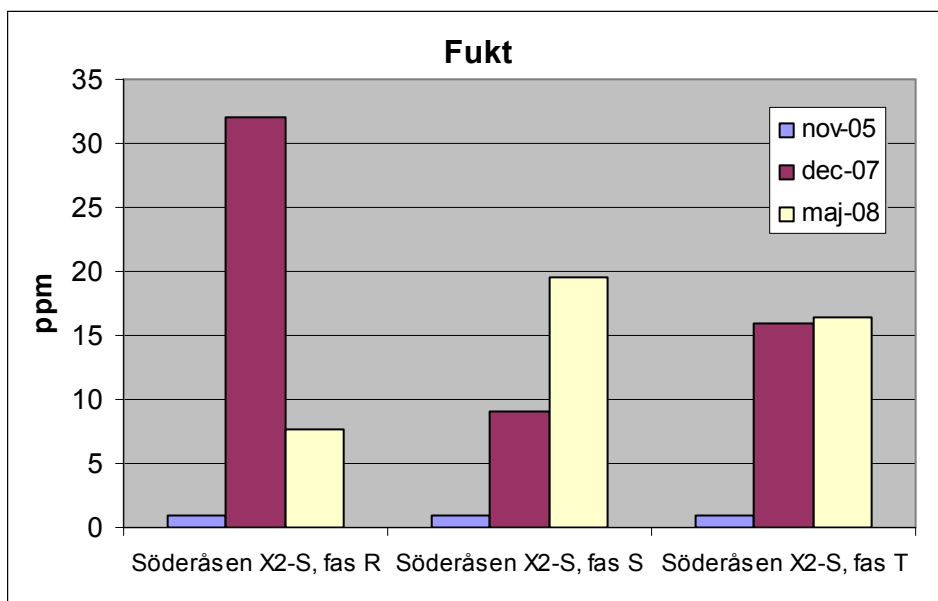
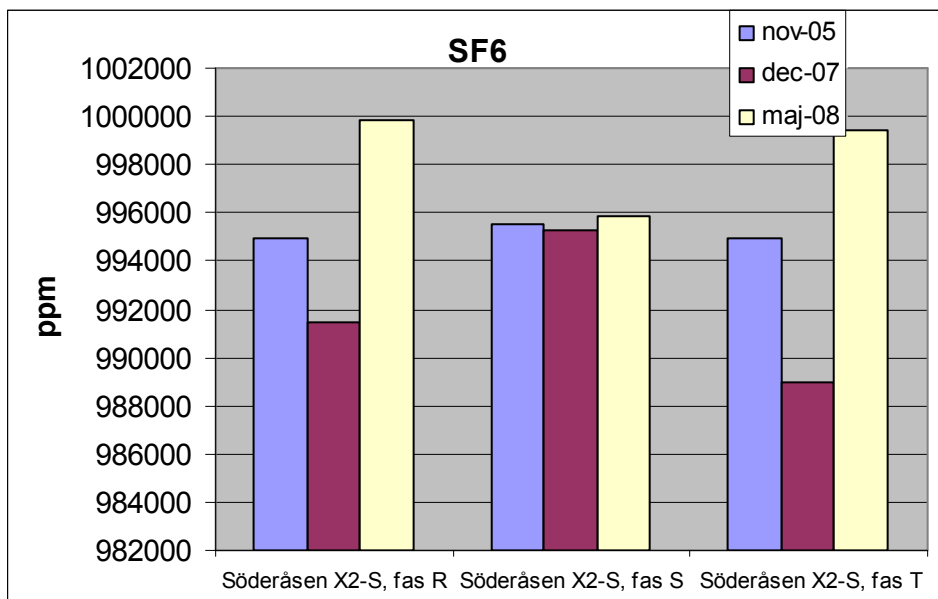
De enda av brytarna som skiljer sig något är Trelleborg O103CA. Denna brytare har en högre halt av N₂ och O₂ men om man ser på dielektriska egenskapen så påverkar inte detta något nämnvärt. Ingen av brytarna uppvisar någon anmärkningsvärd förhöjd halt av restprodukter i analysresultaten.

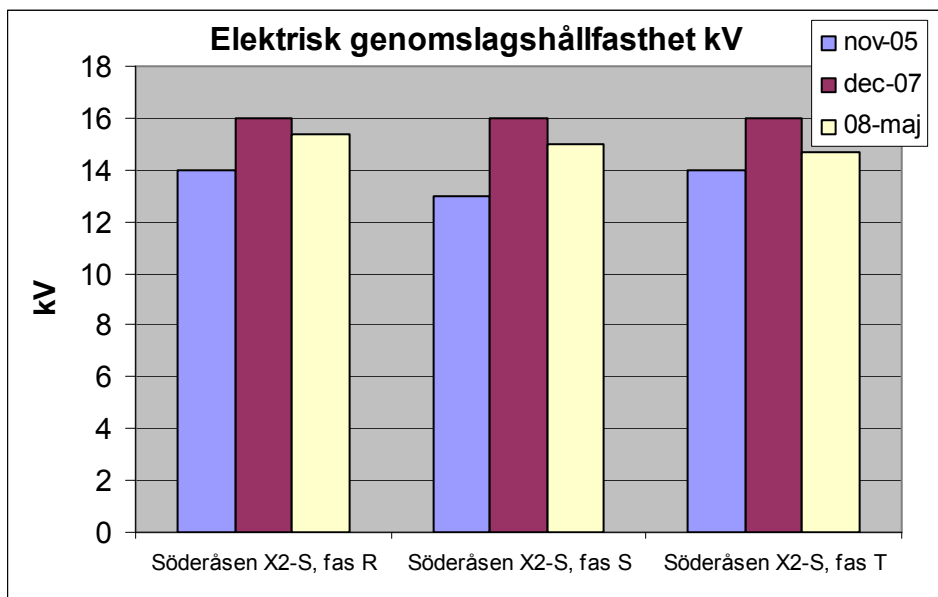
4.2 Brytare med polvis separerade gasutrymmen, 400 kV

För brytarna med polvis separerade gasutrymmen har den yttre påverkan från omgivningen varit den samma, så olika föroreningar i brytarens poler härrör från produktionsfel, fel vid påfyllning av SF₆gas och vilken påverkan ljusbågen har haft.









Analysen av brytarna med polvis separerade gasutrymmen visar att brytarpolerna har en liknande sammansättning restprodukter.

Vi har inte sett några restprodukter av SO_2 , SOF_2 och HF , vilka är resultaten av en kemisk reaktion mellan gaserna i brytaren och fukt på ytorna i brytarelement. Dessa restprodukter uppstår efter många års användning.

5 Slutsats

5.1 Gasanalysen

I dagsläget tar en gasanalys av en SF₆brytare framför allt tid. Från själva provtagningen till färdig analys tar det ungefär två månader. Om man kunde förenkla denna process skulle gasanalys vara intressantare.

Tuberna som används för insamling av SF₆gas innehåller mellan 0,3-0,5kg gas. Brytarna som har ingått i projektet innehåller 5-7kg SF₆gas per gasutrymme. När gasen har samlats in för analyseras fylls brytaren på med ny SF₆gas.

SF₆gas är en stark växthusgas och utsläpp av gasen ska hållas på en låg nivå.

Det användningsområde som finns för gasanalys idag är då man misstänker ett fel på brytaren eller om man vill avvakta med underhållet av brytare.

5.2 Slutsatser av projektet

Av de brytare som innefattas av projektet kan man se hur förhållandet mellan de olika brytarnas gassammansättning förändras. Men ingen av brytarna sticker ut onormalt. Alla restprodukter håller sig inom gränsvärdena.

Man kan i provresultaten se att det har skett en påfyllning av SF₆gas i brytarna.

Den ekonomiska aspekten

Kostnaden för en gasanalys måste ställas mot kostnaden för underhåll på brytaren eller ett haveri på brytare. Vid underhåll eller haveri tas brytaren ur drift en längre tid medan en insamling av gas går på ett par timmar. Själva analysen tar runt två månader.

Tidsaspekten

Det har varit mycket problem att genomföra gasanalyserna. Tuberna har varit på villovägar och laboratoriet har haft problem med sin utrustning. Om en analysomgång fungerar tar det runt 3 månader, då är inte tiden för avbrottsbegäran inräknad. Från att man lämnar in avbrottsbegäran på brytaren tills gasprovet kan genomföras är runt 2 månader.

Analysvarets trovärdighet

Vi har under projektets gång ifrågasatt några av provresultaten. En analysomgång, nummer 3, har uteslutits ur projektet. Detta berodde på felaktig behandling från analysföretaget vid evakueringen av tuberna.

I dagsläget kan inte SF₆analys rekommenderas som metod för att kontrollera brytarstatusen på brytare. Detta då gasanalys har visat sig vara en kostsam och krånglig process med ifrågasättande av analysresultaten. Manöverdon och mekanik står för cirka 90% av felen som uppstår i brytarna, dessa fel täcks inte in i av gasanalysen

Många SF₆brytare för mellanspänning är hermetisk slutna och gasanalys kan alltså inte användas för dessa.

Referenser

- [1] Information om SF₆gas samt gasblandningar typ SF₆/CF₄ samt SF₆/N₂ vid användning som bryt- och isolermedier, ABB HV Switchgear Info-No. 5409 719-3
- [2] Electricity supply using SF₆technology, Life cycle assessment, http://unfccc.int/files/methods_and_science/other_methodological_issues/interactions_with_ozone_layer/application/pdf/wamatt051_1.pdf 2008-04-24
- [3] Sulfur Hexafluoride Gas Analysis Technical paper TJH2B
- [4] Using SF₆ analysis for condition based maintenance of circuit breakers and gas insulated substations, David Hanson, David Burns, and John Bruhn
- [5] SF₆ recycling, Mr. Patrice Rollet, Dr Joseph Micozzi Promosol/Dehon group Vincennes France
<ftp://ftp.ecn.nl/pub/www/library/conf/ipcc99/m99a7-2.pdf>
- [6] Long-term performance of SF₆insulated systems, Cigre 15-301
http://energy.ee.unsw.edu.au/AP15/15_301E.PDF

Sammanställning av analysresultaten av brytarna med gemensamt gasutrymmen

Analys	Test tillfälle	Brytare	H ₂ ppm	O ₂ ppm	N ₂ ppm	CF ₄ ppm	CO ₂ ppm	SF ₆ ppm	SO ₂ F ₂ ppm	SOF ₂ ppm	SOF ₄ ppm	COS ppm	SO ₂ ppm	CC ₁₂ F ₂ ppm	Fukt ppm	Eg kV	Rv antal
1	maj-05	Sege O428CB	0	154	661	22	3	999161	0	0	0	0		0	1	15	1972
1	maj-05	Sege O428	0	129	552	260	15	999045	0	0	0	0		0	7	16	1717
1	maj-05	Trelleborg O103CA	0	1106	4748	80	7	994058	0	0	0	0		0	1	15	1261
1	maj-05	Trelleborg O103CB	0	382	1642	40	5	997931	0	0	0	0		0	4	15	1062
1	maj-05	Torsebro O107	0	1217	5225	111	7	993439	0	0	0	0		0	1	16	914
1	maj-05	Åhus O109	0	208	894	53	8	998837	0	0	0	0		0	1	15	3276
5	mar-08	Sege O428CB	0	171	683	45	0	999101	0	0	0	0		0	12	16	3228
5	mar-08	Sege O428	0	569	2279	207	0	996945	0	0	0	0		0	4	17	
5	mar-08	Trelleborg O103CA	0	1685	6741	121	0	991453	0	0	0	0		0	16	15	1876
5	mar-08	Trelleborg O103CB	0	1133	4533	29	0	994305	0	0	0	0		0	11	16	1205
5	mar-08	Torsebro O107	0	1000	4000	38	0	994962	0	0	0	0		0	10	15	1632
5	mar-08	Åhus O109	0	503	2012	17	0	997468	0	0	0	0		0	4	17	
7	okt-08	Sege O428CB	0	1206	4535	86	5	994168	0	0	0	0	0	0	21,1	16,2	1215
7	okt-08	Sege O428	0	330	1241	555	481	997354	0	0	0	0	39	0	21,3	16,2	2473
7	okt-08	Trelleborg O103CA	0	2635	9915	135	44	987166	0	0	0	0	92	0	7,4	14,7	1955
7	okt-08	Trelleborg O103CB	0	443	1666	8	6	997730	0	0	0	0	147	0	44,7	16,6	3505
7	okt-08	Torsebro O107	0	1472	5537	3	3	992668	0	0	0	0	229	0	10,4	16,2	1813
7	okt-08	Åhus O109	0	599	2254	98	3	997003	0	0	0	0	43	0	26,1	16,1	3587

* Eg = Elektrisk genomslagshållfasthet

**Rv = räkneverk, dvs antal gånger brytaren har manövrerats

Sammanställning av analysresultaten av brytarna med polvis separerade gasutrymmen

Analys	Test tillfälle	Brytare	H ₂ ppm	O ₂ ppm	N ₂ ppm	CF ₄ ppm	CO ₂ ppm	SF ₆ ppm	SO ₂ F ₂ ppm	SOF ₂ ppm	SOF ₄ ppm	COS ppm	SO ₂ ppm	CC ₁₂ F ₂ ppm	Fukt ppm	Eg kV	Rv antal
2	nov-05	Söderåsen X2-S, fas R	0	940	4037	70	6	994947	0	0	0	0	0	0	1	14	0
2	nov-05	Söderåsen X2-S, fas S	0	824	3536	92	6	995542	0	0	0	0	0	0	1	13	2173
2	nov-05	Söderåsen X2-S, fas T	0	940	4037	70	6	994947	0	0	0	0	0	0	1	14	0
4	dec-07	Söderåsen X2-S, fas R	0	1703	6812	120	0	991485	0	0	0	0	0	4	32	16	420
4	dec-07	Söderåsen X2-S, fas S	0	950	3800	77	0	995250	21	5	21	5	5	0	9	16	420
4	dec-07	Söderåsen X2-S, fas T	0	2208	8823	136	0	988960	0	0	0	0	0	0	16	16	420
6	08-maj	Söderåsen X2-S, fas R	0	133	533	101	17	999821	0	0	0	0	0	0	7,6	15,4	2653
6	08-maj	Söderåsen X2-S, fas S	0	804	3216	93	14	995873	0	0	0	0	0	0	19,5	15	2654
6	08-maj	Söderåsen X2-S, fas T	0	100	402	91	5	999402	0	0	0	0	0	0	16,4	14,7	2657

* Eg = Elektrisk genomslagshållfasthet

**Rv = räkneverk, dvs antal gånger brytaren har manövrerats