

## NADZOR I ODRŽAVANJE ELEKTROENERGETSKE OPREME IZOLOVANE SF<sub>6</sub> GASOM

Ksenija Drakić, Vladana Rajaković  
*Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd*

**Sadržaj:** U radu je dat prikaz procedura za nadzor i održavanje elektroenergetske opreme izolovane SF<sub>6</sub> gasom. Pokazano je da elektroenergetska oprema srednjeg i visokog napona izolovana SF<sub>6</sub> gasom zahteva periodičan nadzor i održavanje - zbog praćenja stanja izolacionih karakteristika opreme i zbog potencijalnog zagađenja radnog okruženja. Nadzor i održavanje podrazumevaju praćenje promena hemijskog sastava dielektrika kao i kontrolu eventualnih mehaničkih oštećenja tokom transporta ili eksploatacije, koje imaju za posledicu izlivanje gasa u radnu sredinu i njenu kontaminaciju. U radu je dat prikaz procedura ispitivanja hemijskog sastava izolacije u terenskim i laboratorijskim uslovima. Posebno je razmatrana oprema koja omogućava praćenje koncentracije SF<sub>6</sub> gasa u samoj okolini elektroenergetske opreme, čime bi se realizovale dodatne zaštitne funkcije uklopljene u postojeće sisteme upravljanja i nadzora.

**Cljučne reči:** SF<sub>6</sub> gas, oprema, nadzor i održavanje

### 1 UVOD

Izuzetne izolacione karakteristike gasa SF<sub>6</sub> dovele su do ekspanzije upotrebe elektroenergetske opreme sa visokonaponskom i sredjenaponskom izolacijom realizovanom korišćenem ovog gasa. Primena SF<sub>6</sub> gasa postala je standard u prekidačkoj opremi srednjeg i visokog napona, kao i u visokonaponskim transformatorima. Realizacija instalacija za jednosmerni prenos električne energije (HVDC) praktično je nezamisliva bez upotrebe SF<sub>6</sub> izolacije – prilikom realizacije visokonaponskih energetske pretvarača, prenosnog sistema baziranog na izolovanim visokonaponskim kablovima i visokonaponskih sabirnica postrojenja za jednosmerni prenos. Takođe, dosadašnja praktična iskustva u primeni SF<sub>6</sub> izolacije otvaraju mogućnost njene primene u projektovanju različitih tipova visokonaponskih energetske pretvarača. Pored klasičnih HVDC postrojenja, od posebnog interesa za distributivne prenosne mreže su sistemi sa jednosmernim naponom, snaga do 5 MW i napona do 10kV. Pošto ovi prenosni sistemi zahtevaju realizaciju kompaktnih AC/DC i DC/AC pretvarača velikih snaga, neophodno je primeniti visokonaponsku izolaciju i sistem hladjenja konvertora malih zapremina i visokog stepena performansi. Za te primene, kao idealna alternativa za jedinstveno rešenje problema naponske izolacije i rashladnog sistema, javlja se gas SF<sub>6</sub>.

Generalno, primena SF<sub>6</sub> izolacije omogućava realizaciju kompaktnije elektroenergetske opreme, sa kvalitetnijom i dugotrajnijom izolacijom. Ipak, primena SF<sub>6</sub> gasa unosi i negativne aspekte druge prirode – u vezi sa mogućnostima kontaminacije radnog okruženja opreme. Zbog toga svaka primena opreme sa SF<sub>6</sub> gasom podrazumeva realizaciju pratećeg sistema za automatsku detekciju koncentracije SF<sub>6</sub> gasa u radnom okruženju.

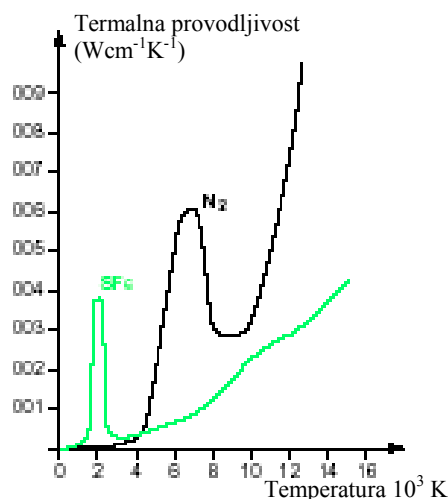
Praktična iskustva pokazuju da je u toku eksploatacije opreme najčešći uzrok smanjenja izolacionih karakteristika gasa postepeno povećanje koncentracije vlage. Zbog toga je u radu je dat prikaz procedura za ispitivanje koncentracije vlage, pošto su one od posebnog interesa za uslove eksploatacije SF<sub>6</sub> opreme u domaćim uslovima.

## 2 FIZIČKE KARAKTERISTIKE

Sa stanovišta upotrebe elektroenergetske opreme na bazi SF<sub>6</sub> gasa od posebnog značaja su termalna provodljivost i gustina .

### 2.1. Termalna provodljivost

Kriva toplotne provodljivosti SF<sub>6</sub> gasa otkriva jednu od posebnih kvaliteta gasa, to je sposobnost gašenja luka. Pik termalne provodljivosti korespondira temperaturi disocijacije molekula. U toku procesa disocijacije molekula gasa apsorbuje se velika količina toplote koja se oslobađa kada se molekul reobrazuje na periferiji luka, olakšavajući pri tom brzu razmenu toplote sa toplih i hladnih regiona.



Sl 1 - Termalna provodljivost SF<sub>6</sub> gasa i azota

Na Sl. 1 dati su grafički prikazi zavisnosti između temeperature i termalne provodljivosti gasa SF<sub>6</sub> i azota. Analizom grafika može se zaključiti da je termalna provodljivost gasa SF<sub>6</sub> najveća u trenutku pojave luka, što SF<sub>6</sub> gas čini idealnim termičkim izolatorom u procesu gašenja luka u sredjenaponskim i visokonaponskim prekidačima. Takođe, analizom grafika na Sl. 1 može se zaključiti da prekidači sa SF<sub>6</sub> izolacijom imaju bolju karakteristiku gašenja luka u poređenju sa vazдушnim prekidačima. Dobre karakteristike termalne provodljivosti gasa SF<sub>6</sub> omogućavaju projektovanje prekidača velikih snaga i visokih napona kompaktnih veličina i malih težina. Treba napomenuti da SF<sub>6</sub> gas zadržava istu karakteristiku termalne provodnosti i nakon više desetina hiljada prekidanja.

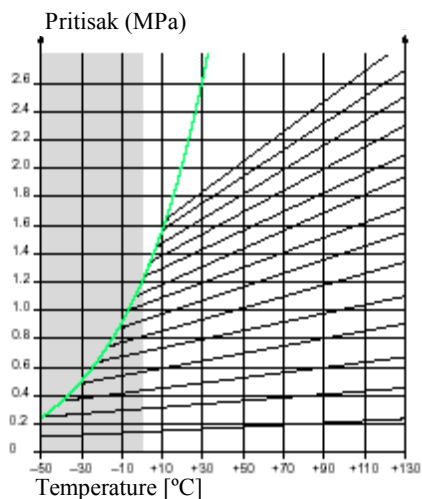
### 2.2. Gustina gasa

SF<sub>6</sub> gas spada u najteže gasove. Njegova gustina na 20°C je 6.139kg/m<sup>3</sup>, odnosno pet puta je viša u odnosu na vazduh. Ove karakteristike su veoma važne, jer gas oslobođen iz opreme ima tendenciju zadržavanja u nižim slojevima vazduha što znatno

povećava verovatnoću ozbiljne kontaminacije radne sredine. Takođe, dekompoziti u oslobođenom SF<sub>6</sub> gasu reaguju sa konstrukcijskim delovima prekidača, što može dovesti do kvarova prekidača mehaničke prirode. Otuda proizilazi potreba stalnog monitoringa koncentracije gasnog izolatora u radnom okruženju opreme.

#### **Relacija temperature i pritiska**

Sa stanovišta kvaliteta eksploatacionih karakteristika SF<sub>6</sub> opreme od posebne je važnosti relacija između temperature i pritiska gasa.



*Sl. 2 - Kriva pritiska gasa SF<sub>6</sub> u zavisnosti od temperature*

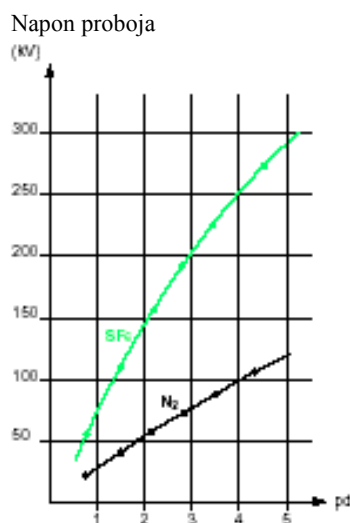
Na Sl. 2 data je karakteristika pritiska SF<sub>6</sub> gasa u zavisnosti od temperature. Analizom grafika može se zaključiti da je varijacija pritiska sa promenom temperature linearna i relativno mala u opsegu radnih temperatura od -25 do +50°C. Pošto pritisak gasa ima direktnog uticaja na električne karakteristike izolacije, može se zaključiti da gas SF<sub>6</sub> malo menja svoje izolacione karakteristike u širokom opsegu radnih temperatura – što ga čini posebno pogodnim za upotrebu u industrijskim uslovima eksploatacije.

### **3 ELEKTRIČNE OSOBINE**

Zbog svojih izvanrednih karakteristika SF<sub>6</sub> ima široku primenu u prekidačkim postrojenjima visokog i srednjeg napona. Naime, SF<sub>6</sub> gas ima veoma dobre dielektrične osobine zahvaljujući elektronegativnom karakteru njegovog molekula. Otuda, dielektrične osobine SF<sub>6</sub> gasa 2.5 puta su veće u poređenju sa osobinama vazduha.

Na Sl. 3 date su karakteristike probojnog napona SF<sub>6</sub> gasa i azota u zavisnosti od proizvoda pritiska gasa i debljine dielektrika. Prednost SF<sub>6</sub> u poređenju sa vazduhom, sa stanovišta dielektrične čvrstoće je očigledna.

Na osnovu priloženih karakteristika može se zaključiti da je SF<sub>6</sub> gas moguće primeniti za izolaciju srednje i visoko naponske elektroenergetske opreme. Takođe, ova osobina SF<sub>6</sub> gasa omogućava njegovu primenu u širem spektru elektroenergetskih instalacija kompaktnih dimenzija i dugotrajnog veka eksploatacije.



Sl. 3 - Karakteristike probojnog napona izolatora u zavisnosti od proizvoda pritiska i debljine dielektrika

#### 4 IZOLACIONE KARAKTERISTIKE GASA SF<sub>6</sub>

Izolacija elektroenergetske opreme realizuje se korišćenje različitih vrsta izolacionih medijuma. Izolacioni medijumi, odnosno dielektrici, mogu biti čvrsti ili tečni, i kao takvi čine jedinstveni izlacioni sistem. Kombinacija izvanrednih električnih, fizičkih, hemijskih i toplotnih osobina čini SF<sub>6</sub> gas jedinstvenim i neophodnim materijalom u elektropremi. Osobine kao što su nezapaljivost, netoksičnost svojstvo gašenja luka, kao i relativno pristupačna cena opravdavaju upotrebu SF<sub>6</sub> gasa u izolaciji enegetske opreme. Uslovi eksploatacije opreme podrazumevaju kontinualno praćenje izolacionih karakteristika gasa, u smislu merenja sadržaja vode, koncentracije produkata degradacije i detekcije curenja gasa.

U nastavku, dat je prikaz seta predloženih metoda ispitivanja izolacionih karatkeristika SF<sub>6</sub> gasa, prilagođenih uslovima eksploatacije opreme u EPS-a.

##### 4.1. Merenje sadržaja vode u SF<sub>6</sub> gasu

Obzirom da je SF<sub>6</sub> gas hemijski inertan, ne uzrokuje koroziju. Međutim, u prisustvu vlage, primarni i sekundarni produkti sputavaju prirodnu rekombinaciju molekula SF<sub>6</sub> nakon gašenja električnog luka. Ovi produkti razgradnje formiraju korozivne elektrolite vodonik fluorida (HF). Stepem destrukcije opreme zavisi od koncentracije HF. Da bi se obezbedio nizak nivo korozivnih elektrolita neophodno je meriti sadržaj vlage u gasom napunjenoj opremi. Postoji više različitih metoda, verifikovanih u važećim standardima: higrometar smrznutog ogledala, električni higrometar, elektrohemijski senzori.

Zbog pristupačne cene, jednostavnog načina rukovanja i pouzdanosti metode autori predlažu primenu metode elektrohemijskog senzora na bazi aluminijum oksida. Ova metoda se zasniva na osobini vlage da menja dielektrične karakteristike poroznog aluminijum oksida, koje se odražavaju na njegovu kapacitivnost. Rezultujuća kapacitivnost se detektuje pomoću elektronskog mernog pretvarača, pomoću koga se meri sadržaj vlage. Postoji niz proizvođača, koji obezbeđuju adekvatnu opremu za elektrohemijsko merenje vlage.

Sledeća aparatura je neophodna za realizovanje ispitnih procedura detektovanja prisustva vlage:

- portabl detektor vlage na bazi poroznog aluminijum oksida, koji se vezuje direktno na opremu,
- portabl aparati za gasnu hromatografiju,
- laboratorijska aparatura za gasnu hromatografiju, koja se bazira na ispitivanju uzoraka gasa korišćenjem detektora termalne provodljivosti,
- infracrveni spektrofotometar (Fourier Transform InfraRed Technology).

Navedena aparatura omogućava off-line laboratorijska ispitivanja prisustva vode u SF<sub>6</sub> gasu, kao i ispitivanja hemijskog sastava izolacije u realnom vremenu. Ukoliko se, pomoću aparature, detektuje prisustvo vlage preko dozvoljene vrednosti od 15 ppm za prekidačku opremu i 40 ppm za ostalu opremu, ona se ne sme koristiti.

#### 4.2. Analiza produkata degradacije SF<sub>6</sub> gasa

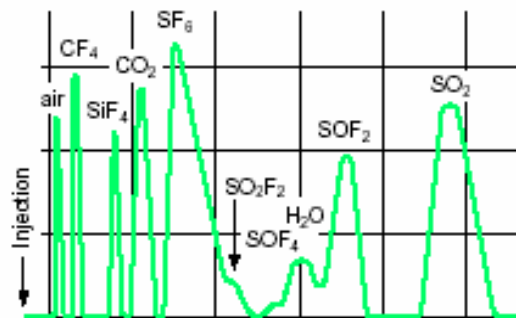
Pored detektovanja sadržaja vlage u SF<sub>6</sub> gasnoj izolaciji, neophodno je ispitati i prisustvo produkata degradacije. Naime, pod uslovima izbijanja električnog luka, SF<sub>6</sub> apsorbuje veliku količinu energije pri čemu disocira na SF<sub>5</sub>+F. Većina gasova disosuje reverzibilno nakon prestanka varničenja – gde rekombinacija nije uvek perfektna. To znači da većina molekula ponovo nagradi SF<sub>6</sub>, a manji deo ostaje u obliku delova molekula. U toku izbijanja luka mogu biti prisutni kiseonik, vlaga iz atmosfere, ugljenik iz teflon prekidačkih komponenti, bakar i volfram sa kontakta koji mogu reagovati sa različitim produktima degradacije SF<sub>6</sub>. Pri normalnim temperaturama SF<sub>6</sub> gas je nekoroziivan i skoro inertan, ali na temperaturama od 500 °C dolazi do razgradnje gasa, pri čemu nastaju produkti degradacije.

nečistoće	maksimalno dozvoljene
CF <sub>4</sub>	500 ppm
O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	500 ppm
H <sub>2</sub> O	15 ppm
HF	0,3 ppm
hidrosolubilni fluoridi	1,0 ppm izraženog kao HF

*Tabela 1. Maksimalne koncentracije nečistoća dozvoljene u opremi*

Oni su najčešće nekompatibilni sa konstrukcijskim materijalom SF<sub>6</sub> opreme. Upravo zbog mogućih pojava ovakvih promena, nameće se potreba periodične preventivne kontrole sastava gasa.

U Tabeli 1, date su maksimalne dozvoljene koncentracije nečistoća u SF<sub>6</sub> gasu. Utvrđivanje stepena čistoće gasa, kao i ispitivanje sadržaja produkata degradacije tokom eksploatacije moguće je utvrditi gasnohromatografskim ispitivanjem ili infracrvenim spektrofotometrom (FTIR).



Sl. 4 - Tipičan gasni hromatogram produkata degradacije SF<sub>6</sub> gasa

Na Sl. 4 dati su rezultati dobijeni gasnohroma-tografskom analizom, korišćenjem detektora termalne provodnosti TCD. Rezultati ispitivanja predstavljaju koncentracije produkata degradacije i nečistoća, i izražavaju se u procentima ili u milionitim delovima (ppm). U slučaju detekcije prisustva produkata degradacije preko sledećih dozvoljenih vrednosti:

- 12 ppm za (SO<sub>2</sub> + SOF<sub>2</sub>), ili,
- 25 ppm za HF, ili,
- 50 ppm svih primesa,

oprema se ne sme koristiti

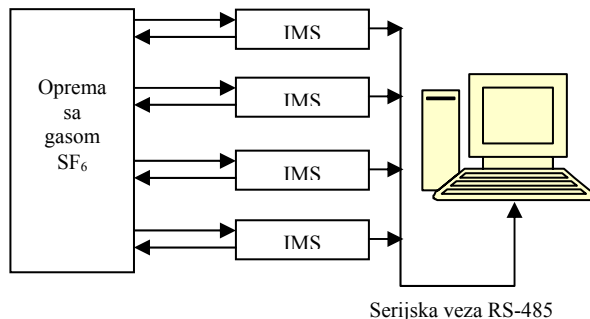
Pored hemijskih promena gasnog dielektrika moguća su i mehanička oštećenja koja izazivaju curenje gasa u radnu okolinu. Pošto curenje gasa izaziva gubljenje svih izolacionih osobina i kontaminaciju vazduha neophodno je obezbediti detektore. U nastavku, prikazan je skup metoda za detektovanje curenja gasa u radnom okruženju opreme.

#### 4.3. Detekcija curenja SF<sub>6</sub> gasa

Obzirom da je SF<sub>6</sub> gas nevidljiv, bez ukusa boje i mirisa, veoma je teško utvrditi njegovo prisustvo, odnosno izvršiti detekciju curenja gasa SF<sub>6</sub> iz opreme. Tradicionalana metoda uključuje primenu sapunice, gde se na mestu oslobađanja gasa pojavljuju mehuri vazduha. Ovaj pristup je neprihvatljiv sa aspekta utroška vremena i troškova obzirom da zahteva isključivanje opreme tokom manipulacije.

Najsavremenije metode detekcije curenja podrazumevaju primenu laserskih kamera. Kamera omogućava detekciju sa bezbedne razdaljine i predstavlja kombinaciju CO<sub>2</sub> lasera podešenog na na infracrvenu apsorpciju talasne dužine SF<sub>6</sub> gasa i infracrvenog sistema koji obezbeđuje korisnicima vizuelan efekat prisustva gasa u radnom okruženju. Mana ovog pristupa sastoji se u potrebi nadzora opreme od strane stručnog osoblja.

Automatsko praćenje prisustva gasa omogućava primena davača baziranih na IMS (Ion Mobility Spectrometer), koji rade na principu detekcije kretanja jona gasa pod uticajem električnog polja detektora. Automatski davači curenja, bazirani na IMS metodi detekcije, projektuju se tako da omogućavaju povezivanje senzora u nadređeni sistem za upravljanje i nadzor postrojenja.



*Sl.5 - Automatsko praćenje prisustva gasa*

Na Sl. 5 data je šema karakterističnog distribuiranog sistema za nadzor SF<sub>6</sub> opreme. Automatski detekcioni sistemi najčešće se ugrađuju u razvodnim postrojenjima sa visokonaponskim energetskim transformatorima, izolovanim SF<sub>6</sub> gasom.

## 5 ZAKLJUČAK

Tokom proteklih nekoliko decenija, u elektroenergetskoj opremi korišćeni su različiti izolacioni medijumi. SF<sub>6</sub> gasni dielektrik našao je široku primenu u srednje i visoko naponskoj prekidačkoj opremi, kablovima i transformatorima. Novi dizajn elektroenergetske opreme je kompaktniji, zahteva manji nadzor i održavanje u odnosu na konvencijalan tip izolacije kao što je mineralno ulje. Zbog svojih malih dimenzija i visokog stepena prilagodljivosti prema okruženju, postrojenja izolovana SF<sub>6</sub> gasom konstantno stiču prednost u odnosu na postrojenja klasičnog tipa. Prednosti ovakve opreme su: minimalni zahtevi za prostorom, potpuna zaštita od delova koji su pod visokim naponom, veći izbor lokacije postavljanja i zaštita životne sredine.

Obzirom da se ovakava oprema koristi i kod nas, ispitivanje pogonskog stanja odnosno upotrebljivosti SF<sub>6</sub> gasa daje uvid u procese koji se dešavaju u opremi. Uvođenjem preventivne kontrole ove vrste opreme omogućeno je bolje sagledavanje elektrohemijskih procesa koji se dešavaju unutar samog dielektrika i kao i očuvanje dielektričnih osobina gasa. Na taj način se dolazi do podataka o prisustvu gasa u radnoj okolini, mogućnostima njene zaštite i smanjenja emisije gasa u atmosferu. Rezultati ispitivanja daju uvid u ispravnost rada opreme, preostalo vreme eksploatacije do narednog servisa opreme, uz mogućnost predviđanja njenih eksploatacionih karakteristika u narednom periodu.

## LITERATURA

- [1] IEC 60376
- [2] CIGRE Recommendation for SF<sub>6</sub> Gas Handling (DRAFT May, 2000)
- [3] [3] J.I. Bamach, P. Pilzeker, E. Trindade, Monitoring of Circuit Breakers using Ion Mobility Spectrometry to detect SF<sub>6</sub> – Decomposition.
- [4] Bob Hardy, RH Systems, Albuquerque, NM, Daniel Mutter, MBW Calibration, Wettingen, Switzerland, Measurement of Water Vapor in Sulphur Hexafluoride, SF<sub>6</sub>

- [5] HVDC Light- DC transmission based on voltage sourced converters ABB Review 1/1998
- [6] Insulating liquids: their uses, manufacture and properties, N. Parkman, J. R. Tillman, Institution of Electrical Engineers, London and New York 1980.

**Abstract:** The paper presents the set of procedures for the supervision and maintenance of equipment insulated by SF<sub>6</sub> gas. This equipment requires the periodical inspection of insulating characteristics for the SF<sub>6</sub> based dielectric installed in the equipment. Procedures contain set of electrochemical experiments that provide information about the gas leakage and presence of the impurities (water and SF<sub>6</sub> gas decomposition products). Together with the necessary set of procedures, the adequate measuring devices are proposed.

#### **SUPERVISION AND MAINTENANCE OF EQUIPMENT INSULATED BY SF<sub>6</sub> GAS**

Ksenija Drakić, Vladana Rajaković