

Damir Megla, dipl. ing. sig.  
HEP – ODS d.o.o., Elektra Zagreb  
[damir.megla@hep.hr](mailto:damir.megla@hep.hr)

Stjepan Megla, mag. ing. el.  
HEP – ODS d.o.o., Zagreb  
[stjepan.megla@hep.hr](mailto:stjepan.megla@hep.hr)

mr. sc. Milivoje Mrdak  
HEP – ODS d.o.o., Elektra Zagreb  
[milivoje.mrdak@hep.hr](mailto:milivoje.mrdak@hep.hr)

## SIGURNOSNI ASPEKTI UPORABE SUMPOROVOG HEKSAFLUORIDA (SF<sub>6</sub>) U ELEKTRODISTRIBUCIJSKIM POSTROJENJIMA

### SAŽETAK

Plin sumporov heksafluorid (SF<sub>6</sub>) koristi se kao medij za izolaciju i/ili gašenje luka u sklopnim aparaturama srednjeg i visokog napona. S obzirom na činjenicu da je sumporov heksafluorid prisutan u velikom broju elektrodistribucijskih postrojenja, te da će broj instalirane opreme sa SF<sub>6</sub> i dalje rasti, predlaže se u programe osposobljavanja za rad na siguran način u HEP – Operatoru distribucijskog sustava d.o.o. uvrstiti dodatno upoznavanje djelatnika sa karakteristikama i potencijalnim opasnostima ovog plina. Kao osnova za ove aktivnosti trebale bi poslužiti dosad izrađene studije o postrojenjima sa sumporovim heksafluoridom, u kojima je djelomično obrađena i problematika sigurnosti zaposlenika koji dolaze u kontakt sa ovom opremom.

**Ključne riječi:** sumporov heksafluorid, elektrodistribucijska postrojenja, sigurnost zaposlenika

## SAFETY ASPECTS OF SULPHUR HEXAFLUORIDE (SF<sub>6</sub>) APPLICATION IN POWER DISTRIBUTION PLANTS

### SUMMARY

Sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) is a gas used in medium and high voltage switching apparatuses as insulation and/or arc extinguishing medium. In view of the fact that sulphur hexafluoride is present in a great number of power distribution facilities and that the number of SF<sub>6</sub> gas containing equipment will continue to grow, safety at work training programs in HEP – Distribution System Operator should include the additional familiarization of employees with the characteristics and potential hazards linked with the use of this gas. Already elaborated studies on facilities filled with sulphur hexafluoride, in which the issue of safety at work of employees coming into contact with such equipment has been partially elaborated, should serve as the basis for devising such instructions.

**Key words:** sulphur hexafluoride, power distribution plants, occupational safety

### 1. UVOD

Sumporov heksafluorid (u daljnjem tekstu SF<sub>6</sub>) je neotrovan, neagresivan, kemijski stabilan plin (pri atmosferskom tlaku i temperaturi <500°C), bez boje i mirisa. Njegova molekula sastoji se od šest atoma fluora simetrično raspoređenih oko jednog atoma sumpora, tvoreći tako pravilan oktaedar. Ovaj

plin ne postoji u prirodi, nego se dobiva direktnom sintezom fluora i tekućeg sumpora egzotermičkom reakcijom u posebnim postrojenjima [1].

SF<sub>6</sub> nije zapaljiv niti sa zrakom stvara zapaljive eksplozivne smjese, ali se pri visokim temperaturama razgrađuje na vrlo otrovan plin fluorovodik (HF<sub>3</sub>) i okside sumpora (SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>), koji su jaki nadražljivci. SF<sub>6</sub> je pet puta teži od zraka - gustoća mu je 6.139 kg/m<sup>3</sup> kod atmosferskog tlaka i temperature 20 °C.

Njegova velika gustoća, elektronegativnost, dobra toplinska vodljivost i mala vremenska konstanta luka osiguravaju mu iznimne dielektričke i deionizacijske karakteristike te se stoga upotrebljava u elektroindustriji kao medij za gašenje luka u SN i VN prekidačima, te kao izolacija u SN i VN postrojenjima.

## 2. UPORABA SUMPOROVOG HEKSAFLUORIDA U ELEKTRODISTRIBUCIJSKIM POSTROJENJIMA

Industrijska proizvodnja plina SF<sub>6</sub> započinje 1948. godine, a 1955. proizveden je prvi komercijalni visokonaponski SF<sub>6</sub> prekidač. Od tada se SF<sub>6</sub> počeo sve više primjenjivati u sklopnim aparatima. Od navedenih svojstava, za primjenu plina SF<sub>6</sub> u tehnici prekidanja struje najvažnija je činjenica da spada u skupinu elektronegativnih plinova, odnosno plinova koji pokazuju izraziti afinitet prema negativnim nositeljima naboja, elektronima. Zbog deionizacijskih svojstava SF<sub>6</sub> je danas praktički istisnuo iz upotrebe sve ostale medije za gašenje luka u prekidačima visokog napona. Naime, za uspješnost prekidanja struje potrebno je postići što brže gašenje električnog luka koji gori između kontakata prekidača, za što je potrebno u što kraćem vremenu ukloniti ionizirane čestice između kontakata i time uspostaviti dielektričnu čvrstoću međukontaktnog prostora. Kod plina SF<sub>6</sub> je uspostavljanje dielektrične čvrstoće međukontaktnog prostora zbog elektronegativnosti, a time je gašenje luka gotovo trenutačno.

Osim kao medij za gašenje električnog luka, SF<sub>6</sub> se počeo primjenjivati i kao izolacija u metalom oklopljenim i plinom izoliranim postrojenjima srednjeg i visokog napona zbog odličnih dielektričnih svojstava za koja su zaslužni velika gustoća i elektronegativnost ovog plina. Zahvaljujući ovim karakteristikama SF<sub>6</sub> postrojenja su puno manjih dimenzija u odnosu na ona izolirana zrakom. Problem nedostatka prostora u naseljenim urbanim središtima otežava izgradnju klasičnih visokonaponskih rasklopnih postrojenja izoliranih zrakom, koja zahtijevaju veliku površinu, tako da izgradnja VN metalom oklopljenih postrojenja izoliranih SF<sub>6</sub> (GIS – eng. Gas Insulated System) predstavlja izuzetno učinkovito rješenje u pogledu uštede potrebnog prostora. Za smještaj ovih postrojenja upotrebljavaju su zgrade relativno malih dimenzija koje se mogu oblikovati tako da se svojim izgledom uklope u okolinu. Time se osim uštede prostora, umanjuje i moguć negativni vizualni utjecaj elektroenergetskih postrojenja u urbaniziranim zonama. U Republici Hrvatskoj je ova tehnologija u primjeni od 1982. godine, kada je u transformatorsku stanicu 110/10(20) kV Ksaver u Zagrebu prvi put ugrađeno visokonaponsko rasklopno postrojenje tipa GIS (Slika1.).



Slika 1. VN GIS postrojenje u TS 110/10 (20) kV Ksaver (Zagreb)

Primjena plina SF<sub>6</sub> u sklopnim aparatima srednjeg napona - za srednjenaponske razvode u distribucijskim trafostanicama 10(20)/0,4 kV, kao i za srednjenaponska postrojenja u transformatorskim stanicama 110/10(20) kV - u Republici Hrvatskoj započinje početkom devedesetih godina prošlog stoljeća, kako u novoizgrađenim objektima, tako i u već postojećim trafostanicama prilikom njihove

rekonstrukcije (Slika 2.). U starijim izvedbama SN sklopnih aparatura plin  $\text{SF}_6$  koristio se istovremeno za izolaciju te kao medij za gašenje električnog luka. Međutim, zbog otkrića štetnosti produkata razgradnje koji nastaju u procesu sklapanja u sklopnim aparaturnama uvedeno je tehničko rješenje s korištenjem dvaju medija - visokog vakuumu za proces sklapanja i plina  $\text{SF}_6$  za izolaciju. Time je uklonjen problem razgradnje sumporovog heksafluorida prilikom procesa sklapanja [2]. Na visokom naponu za sada ne postoji alternativa za sumporov heksafluorid prilikom procesa sklapanja tako da je za očekivati nastavak njegove primjene u visokonaponskim prekidačima.



Slika 2. SN postrojenje tipa KSMA u TS 110/10 (20) kV Rakitje (Zagreb)

Velika prednost postrojenja izoliranih plinom  $\text{SF}_6$  je činjenica da ne zahtijevaju gotovo nikakvo eksploatacijsko održavanje. Pri tome se redovno održavanje praktički svodi na dopunu postrojenja plinom u slučaju njegovog curenja. Uz to, tropsko oklopanje omogućuje manju dužinu brtvila na prirubnim spojevima tako da je postignuta velika nepropusnost uz mali gubitak plina u normalnim pogonskim uvjetima. Stoga ovakva postrojenja danas predstavljaju dominantno tehničko rješenje kao u Republici Hrvatskoj tako i u svijetu.

### 3. POTENCIJALNE OPASNOSTI ZA ZAPOSLENIKE

U pogledu opasnosti kojima potencijalno mogu biti izloženi zaposlenici koji rade na poslovima upravljanja ili održavanja elektrodistribucijskih postrojenja koja sadrže  $\text{SF}_6$  potrebno je razlikovati dvije osnovne kategorije: opasnosti od čistog (nerazgrađenog)  $\text{SF}_6$  te opasnosti od produkata razgradnje  $\text{SF}_6$ .

Količine plina  $\text{SF}_6$  koje se u normalnom pogonu gube zbog istjecanja variraju s obzirom na tip postrojenja i veće su kod postrojenja višeg napona jer ona obično sadrže veće količine plina na višim tlakovima i zato što su zabrtvljene površine mnogo veće. Za opremu koja koristi hermetički zatvorene sisteme proizvođači kažu da mogu postići relativne stope istjecanja od 0,1% godišnje [3].

Kada se razmatra istjecanje  $\text{SF}_6$ , osim smanjivanja funkcionalnosti postrojenja potrebno je voditi računa i o sigurnosti osoblja. Iako je  $\text{SF}_6$  na normalnim temperaturama kemijski neaktivan i nije otrovan, on djeluje kao inertni zagušljivac istiskujući zrak. Kao takav može predstavljati potencijalnu opasnost u slučaju ispuštanja u većim količinama u zatvorenom prostoru [4]. Pri tome posebnu pozornost treba posvetiti činjenici da se zbog velike specifične težine  $\text{SF}_6$  nakuplja u donjim dijelovima prostorija, a moguće je i nakupljanje na etaži ispod one na kojoj je smješteno postrojenje. S obzirom na količine sumporovog heksafluorida u određenim vrstama postrojenja, može se zaključiti da je ova opasnost daleko izraženija u transformatorskim stanicama sa VN postrojenjem tipa GIS. U distribucijskim TS 10(20)/0,4 kV zbog razmjerno male količine plina, kao i izvedene prirodne ventilacije na dnu vrata transformatorskih komora ova se opasnost može zanemariti.

U transformatorskim stanicama sa VN postrojenjima tipa GIS izvodi se prisilna ventilacija u prostoriji u kojoj je smješteno samo postrojenje. Slijedom navedenog može se pretpostaviti da je u pogledu taloženja  $\text{SF}_6$  u ovakvim trafostanicama potencijalno najrizičniji prostor ispod etaže na kojoj se nalazi VN postrojenje, a gdje do sada u pravilu nije ugrađivan stabilni sustav za detekciju  $\text{SF}_6$ , niti sustav prisilne ventilacije. Stoga je u slučaju pada tlaka plina  $\text{SF}_6$  u postrojenju, prilikom ulaska u ove prostorije potrebno koristiti prijenosni detektor plina (tzv. njuškalo) za mjerenje koncentracije  $\text{SF}_6$  u zraku.

Prilikom nadopunjavanja postrojenja sa novim plinom SF<sub>6</sub> može doći do istjecanja određenih količina plina u okolni prostor, te treba osigurati prikladnu ventilaciju. Osim opasnosti od istjecanja, prilikom nadopunjavanja postrojenja ili sklopnih aparata prisutne su i opasnosti karakteristične za posude koje sadrže ukapljene plinove - eksplozije boca pod tlakom u slučaju njihovog pada ili prevrtanja, odnosno izloženosti povećanoj temperaturi. Isto tako može doći do izazivanja smrzotina u slučaju naglog i nekontroliranog ispuštanja plina te kontakta s ljudskom kožom. Stoga je prilikom obavljanja ovih poslova nužno da cijevi budu prikladno zaštićene od mehaničkih oštećenja, ventili i regulatori pravilno održavani, manometri redovito kalibrirani, te je obavezna uporaba odgovarajućih zaštitnih rukavica te primjena ostalih općih pravila za posude koje sadrže ukapljene plinove pod tlakom.

Prilikom radova u prostorijama u kojima se nalaze postrojenja sa SF<sub>6</sub> zabranjeno je korištenje otvorenog plamena ili zavarivanje prije prethodnog mjerenja koncentracije SF<sub>6</sub> u atmosferi, jer u dodiru sa plamenom može doći do njegove razgradnje i udisanja štetnih produkata razgradnje. Ako su radnici izloženi znatnoj koncentraciji produkata razgradnje SF<sub>6</sub> u zraku, mogu se pojaviti određeni znakovi opasnosti – karakterističan neugodan miris i/ili iritacija gornjeg respiratornog trakta i očiju. Ovi se simptomi javljaju unutar nekoliko sekundi, mnogo prije nego što može doći do ozbiljnijeg trovanja. U slučaju pojave ovakvih simptoma potrebno je odmah napustiti pogonske prostorije.

I iz samog postrojenja u pogonu može isticati plin koji sadrži produkte razgradnje. Stupanj onečišćenja plina varira obzirom na tip postrojenja i režima njegovog rada, a najveći je kod prekidača koji su često prekidali struje kratkog spoja. Naime, prilikom gorenja električnog luka dolazi do razgradnje SF<sub>6</sub>, a većina produkata koji nastaju takvom razgradnjom (SOF<sub>2</sub> - tionil fluorid, SO<sub>2</sub> - sumporni dioksid, HF - vodikov fluorid, SF<sub>4</sub> - sumporov tetrafluorid, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> - sumporni difluorid, S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> - disumporni dekafluorid) je otrovna. Posebnu opasnost predstavljaju izvanredne situacije do kojih može doći radi unutarnjeg kvara ili požara na postrojenju. U tom slučaju dolazi do ispuštanja plina u okolinu zbog prorade zaštitne membrane ili pregaranja stjenke kućišta. Zbog unutarnjeg lučnog kvara u kućištu sklopne aparature, dolazi do porasta tlaka i temperature te razgradnje plina SF<sub>6</sub>. S obzirom da u ovom slučaju nastaju otrovni kruti i plinoviti produkti razgradnje SF<sub>6</sub>, potrebno je provesti trenutnu evakuaciju zaposlenika te ventilaciju prostora u kojemu se stvorila toksična atmosfera. U slučaju ovakvih havarija, uz produkte razgradnje SF<sub>6</sub>, u atmosferi mogu biti prisutne i metalne pare, izgorjele plastike, izolacije kabela, boje i slično, koje dodatno povećavaju toksičnost atmosfere. Prilikom otklanjanja onečišćenja, osim ventilacije prostora, čime se smanjuje koncentracija plinovitih produkata, potrebno je provesti i prikupljanje krutih produkata razgradnje SF<sub>6</sub>. Ovakva sanacija zahtijeva posebna osobna zaštitna sredstva kao što su jednokratni nepropusni kombinezoni od polipropilena, nitrilske ili neoprenske rukavice, zaštitne naočale, instrumente za mjerenje prisutnosti plinovitih produkata razgradnje, kao i posebnu opremu za prikupljanje krutih produkata razgradnje (posebni usisavači visoke učinkovitosti sa filtrima koji hvataju mikronske čestice) [5]. S obzirom na nisku vjerojatnost nastanka ovakve situacije, a istovremeno visoke zahtjeve u pogledu osposobljenosti osoblja i potrebne opreme, optimalno rješenje jest prepuštanje ovakvih poslova specijaliziranoj tvrtki koja raspolaže potrebnim ljudskim i tehničkim resursima za njihovo provođenje, odnosno servisnoj službi proizvođača postrojenja.

#### **4. OSPOSOBLJAVANJE ZAPOSLENIKA ZA RAD NA SIGURAN NAČIN NA POSTROJENJIMA KOJA SADRŽE SUMPOROV HEKSAFLUORID**

Zakonom o zaštiti na radu, definirana je obveza poslodavca da radnike obavijesti i dade pisane upute o svim opasnostima i štetnostima koje utječu ili bi mogle utjecati na sigurnost i zdravlje radnika. Isto tako obveza je poslodavca da radnike osposobi za rad na siguran način te da im osigura informacije i upute vezane za njegovo mjesto rada.

Osposobljavanje radnika za rad na siguran način u HEP – Operatoru distribucijskog sustava provodi se temeljem programa osposobljavanja koje je za Hrvatsku elektroprivredu izradio Fakultet elektrotehnike i računarstva 1998. godine. Problematika mogućih opasnosti od SF<sub>6</sub> obrađena je u "Temeljnem programu osposobljavanja za rad na siguran način" u poglavlju "Opasnosti i mjere zaštite kod rada s plinovima", gdje su dane osnovne informacije o karakteristikama ovog plina.

Problematika uporabe SF<sub>6</sub> u koju je uključen i aspekt sigurnosti zaposlenika detaljnije je obrađena i u trima studijama koje je za HEP – Operator distribucijskog sustava izradio Končar – Institut za elektrotehniku. Rezultati ovih studija, čiji je dio prezentiran i u ovom članku, mogu poslužiti kao osnova za detaljnije upoznavanje djelatnika koji rade na postrojenjima koja sadrže SF<sub>6</sub>.

## 5. ZAKLJUČAK

S obzirom na dosadašnje osnovno upoznavanje radnika HEP – Operatora distribucijskog sustava koji rade na elektrodistribucijskim postrojenjima koja sadrže SF<sub>6</sub> o karakteristikama ovog plina te potencijalnim opasnostima, a istovremeno postojanje kvalitetnih podloga u vidu dosad izrađenih studija, predlaže se da se djelatnicima u sklopu osposobljavanja djelatnika za rad na siguran način daju detaljnije informacije o potencijalnim opasnostima i štetnostima u slučaju izloženosti sumporovom heksafluoridu ili produktima njegove razgradnje te o mjerama za njihovo otklanjanje.

## LITERATURA

- [1] K. Meštrović: "Sklopni aparati srednjeg i visokog napona", Graphis, Zagreb, 2006.
- [2] R. Milošević, S. Ivančić - Unger: "Metalom oklopljeni i plinom izolirani kompaktni sklopni moduli za gradnju električnih sklopnih postrojenja srednjeg napona" – U: Prvo savjetovanje hrvatskog ogranka međunarodne elektrodistribucijske konferencije, Zbornik radova. - Zagreb, 2008. str. 26 – 39.
- [3] „Tehnički aspekti primjene plina SF<sub>6</sub> u sklopnim aparatima i postrojenjima HEP-a“, studija, Končar – Institut za elektrotehniku, 2002.
- [4] „Zbrinjavanje sklopnih aparata i postrojenja izoliranih plinom SF<sub>6</sub> u HEP-u nakon isteka radnog vijeka“, studija, Končar – Institut za elektrotehniku, 2003.
- [5] "Procjena opasnosti i operativne procedure u slučaju lučnog kvara i požara u plinom SF<sub>6</sub> izoliranim sklopnim aparaturama 110 kV", studija, Končar – Institut za elektrotehniku, 2006.