



Helena Słowikowska\*, Jerzy Słowikowski\*

## **PODSTAWY DIAGNOZOWANIA URZĄDZEŃ Z SF<sub>6</sub> W OPARCIU O BADANIA STANU GAZU**

**Streszczenie:** Na tle ogólnych wymagań ekologicznych w tym roli SF<sub>6</sub> w efekcie cieplarnianym przedstawiono doświadczenia z badań diagnostycznych urządzeń elektroenergetycznych z SF<sub>6</sub> na podstawie analizy stanu gazu. Omówiono ponadto narażenia wywołane obecnością produktów rozkładu SF<sub>6</sub> powstałych na skutek wyładowań wysoko- i niskoenergetycznych.

**Słowa kluczowe:** sześćfluorek siarki, analiza zanieczyszczeń w SF<sub>6</sub>, recykling w urządzeniach z SF<sub>6</sub>

### **1. Wstęp**

Sześćfluorek siarki SF<sub>6</sub> uważany jest jak dotąd za najlepszy dielektryk gazowy, który poza wysoką wytrzymałością elektryczną ma wyjątkową zdolność gaszenia łuku elektrycznego. Wykorzystanie tych jego cech doprowadziło w latach 60-tych do powstania całkowicie nowej generacji urządzeń zwanych potocznie — urządzeniami elektroenergetycznymi z SF<sub>6</sub>.

Ponad 30 letnie doświadczenia eksploatacyjne wykazały dużą trwałość i niezawodność tych urządzeń przy czym dotychczas nie stwierdzono, ażeby powodem ich awaryjności były procesy starzeniowe [1]. SF<sub>6</sub> jest jak wiadomo gazem chemicznie obojętnym, a toksyczne związki jego rozkładu, tworzące się podczas niepełnych i pełnych wyładowań elektrycznych są łatwo zobojętniane i tylko w pewnych okolicznościach mogą stanowić zagrożenie dla personelu obsługi, które to zagrożenie przy zachowaniu odpowiednich warunków bhp, jest całkowicie do uniknięcia [2].

---

\* Zakład Wysokich Napięć Instytutu Elektrotechniki, Warszawa

Zagrożeniem dotyczącym celowości dalszego rozwoju ww. urządzeń stały się natomiast właściwości ekologiczne SF<sub>6</sub>. Nagromadzenie się bowiem tego gazu w atmosferze ziemskiej może stać się powodem zwiększenia tzw efektu cieplarnianego<sup>1</sup>. W 1997 r., na III konferencji Krajów Sygnatariuszy Konwencji ONZ (wśród nich — Polski) dotyczącej zmian klimatycznych, SF<sub>6</sub> został zaliczony do gazów cieplarnianych, których emisja powinna być ograniczana [3] mimo, że jego przyczynek w 1995 r. do efektu cieplarnianego, wywołanego działalnością człowieka, oszacowano na poniżej 0,1%. Impulsem jednak do powzięcia tej decyzji była nie tyle aktualna ilość tego gazu w atmosferze ile szybki przyrost jego stężenia (8,7% rocznie [4]) co biorąc pod uwagę, iż efektywność<sup>2</sup> SF<sub>6</sub> w tworzeniu zjawiska cieplarnianego została określona jako 23 900 razy większa od CO<sub>2</sub>, spowodowało zrozumiałe zaniepokojenie. Nie ulega zatem wątpliwości, że podstawowym warunkiem dalszego stosowania SF<sub>6</sub> jest ograniczenie jego emisji do atmosfery.

W celu spełnienia powyższego warunku za niezbędne uznano:

- zaostrzenie wymagań dotyczących szczelności urządzeń z SF<sub>6</sub>,
- stosowania zasady recyklingu SF<sub>6</sub> co wiąże się z koniecznością wprowadzenia szczegółowych zasad postępowania w przypadkach rewizji, napraw oraz złomowania urządzeń zawierających ten gaz w tym — odpowiednich przepisów bhp dotyczących zarówno ochrony osobistej personelu obsługi jak i ochrony środowiska.

Nagromadzone doświadczenia eksploatacyjne [5] wskazują, że roczny ubytek gazu w urządzeniach wyprodukowanych przed 1985 r. nie przekracza na ogół 0,5%, a niekiedy nawet — 0,1% [3]. Ostatnio niektórzy producenci gwarantują nieszczelność nie przekraczającą 0,2%. W każdym razie przyjmowana początkowo za dopuszczalną — nieszczelność 2% w skali rocznej jest aktualnie, ze względów ekologicznych, nie do zaakceptowania ponieważ w skrajnym przypadku, cała ilość nominalnie używanego SF<sub>6</sub>, po 50 latach eksploatacji, mogłaby przejść do atmosfery co byłoby już znaczącym przyczynkiem do efektu cieplarnianego [4]. W oczekiwaniu na zaostrzenie przepisów, gwarancja szczelności stała się ważnym elementem konkurencyjności nowych urządzeń.

Postępowanie zapewniające recykling SF<sub>6</sub>, nazwane inaczej — gospodarką gazową, poza procedurą techniczną musi uwzględniać również procedurę formalną. Ta ostatnia, powinna m.in. zabezpieczyć obrót zużytym gazem. Gaz ten bowiem, po odpowiednich zabiegach, powinien nadawać się do ponownego użytku spełniając warunki przewidziane dla produktu nowego.

W gospodarce gazem należy mieć na uwadze, że sposób wykonywania procesu recyklingu, a tym samym i jego koszt zależy od poziomu i rodzaju zanieczyszczeń SF<sub>6</sub>. Tak np, szczególnie kosztowne jest usuwanie zanieczyszczeń powietrzem; duże zanieczyszczenie produktami rozkładu — powoduje, iż zużyty gaz będzie wymagał

<sup>1</sup> Dla przypomnienia, efekt cieplarniany powstaje na skutek gromadzeniu się w atmosferze ziemskiej gazów absorbujących promieniowanie podczerwone. W wyniku tej absorpcji zachwiana zostaje równowaga pomiędzy energią pobieraną przez kulę ziemską z kosmosu (głównie energią słoneczną) a energią wydalaną w kosmos — przede wszystkim — w postaci promieniowania podczerwonego. Nowy stan równowagi osiągany jest przy podwyższeniu średniej temperatury ziemi. Wzrostowi tej temperatury przypisywanych jest wiele zjawisk o charakterze katastroficznym.

<sup>2</sup> Miarą efektywności jest tzw. potencjał cieplarniany.

bardziej złożonej procedury oczyszczania. W szczególnych przypadkach, jako gaz toksyczny wykazujący ponadto działanie korozyjne, będzie wymagać transportu (realizowanego wg określonych zasad) do wyspecjalizowanej firmy (np. producenta gazu), która zdecyduje o celowości jego recyklingu bądź o potraktowaniu go jako odpadu<sup>3</sup>. W każdym przypadku zatem zachodzi konieczność oceny stopnia zanieczyszczenia gazu zawartego w urządzeniu.

Należy mieć na względzie, że wycofanie urządzenia z ruchu, w przypadku gdy dalsza eksploatacja grozi jego rozszczelnieniem, z reguły będzie wymagała usunięcia gazu z jego wnętrza i poddania go procesowi recyklingu.

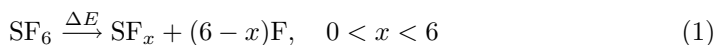
Jak z powyższego wynika, reguły gospodarki gazowej wymagają znajomości stanu zużycia urządzenia, jak również — stanu zawartego w nim gazu. Celem niniejszego artykułu jest zwrócenie uwagi na rolę analizy gazu w gospodarce SF<sub>6</sub> oraz w ocenie stanu urządzenia.

## 2. Analiza gazu w diagnostyce urządzeń z SF<sub>6</sub>

Badania gazu w urządzeniach z SF<sub>6</sub> zainicjowane zostały w krajach przodujących technicznie, w których zainstalowane zostały rozdzielnice i wyłączniki na bardzo wysokie napięcia pierwszej generacji [5]. Czas życia tych urządzeń, w szeregu przypadkach sięga obecnie 30 lat.

Przedmiotem obserwacji są zmiany jakościowe składu gazu oraz zmiany ilościowe poszczególnych jego zanieczyszczeń. Przez zanieczyszczenie rozumie się w tym przypadku wszystkie dodatkowe produkty znajdujące się w technicznie czystym SF<sub>6</sub> oraz produkty powstałe w czasie montażu, podczas prób odbiorczych oraz w warunkach eksploatacji.

SF<sub>6</sub> ulega dysocjacji wskutek działania wysokiej temperatury (powyżej 500°C) oraz procesów jonizacyjnych towarzyszących wyładowaniom elektrycznym. Proces ten najogólniej można wyrazić następującym wzorem [6]:



gdzie:  $\Delta E$  — ilość dostarczonej energii,  $x$  — w zależności od  $\Delta E$  przybiera wartości od 0 do 6.

Oznacza to, że w skrajnym przypadku, np. przy silnym wyładowaniu łukowym, SF<sub>6</sub> ulega rozkładowi z wydzieleniem siarki i wolnego fluoru, tj. pierwiastka o szczególnie wysokiej aktywności chemicznej.

Poza obszarem narażenia następuje bardzo szybki proces rekombinacji SF<sub>6</sub>. Przeszkodę jednak w tym procesie stanowią reakcje chemiczne z zanieczyszczeniami gazu, głównie tlenem i wodą oraz reakcje z elementami konstrukcji urządzenia. Najczęściej spotykane w praktyce, krótkotrwałe pierwotne produkty rozkładu SF<sub>6</sub>, do których należą SF<sub>3</sub>, SF<sub>4</sub>, SF<sub>5</sub> i wolny fluor, reagują ze śladami wilgoci tworząc związki o zwiększonej trwałości. Do najważniejszych z nich pod względem oddziaływania zarówno na elementy konstrukcyjne jak i na środowisko (wskutek nieszczelności urządzenia) należą

<sup>3</sup> Odpad ten wymaga przetworzenia na produkt nie zagrażający ekosystemowi.

tlenofluorki siarki:  $\text{SF}_4$ ,  $\text{SOF}_2$ ,  $\text{SO}_2\text{F}_2$  oraz fluorowodór HF. Część z wymienionych związków, podatnych na hydrolizę, w przypadku kontaktu z wilgocią jest źródłem tworzenia  $\text{SO}_2$ . Schematycznie proces ten można scharakteryzować następująco:



W warunkach pracy urządzeń należy się liczyć głównie z obecnością  $\text{SOF}_2$  i  $\text{SO}_2\text{F}_2$ , tj. związkami, które — w przypadku pojawienia się wyładowań elektrycznych — występują w największych ilościach. Możliwy jest zwykle ich pomiar zarówno metodami laboratoryjnymi jak i technicznymi. Podstawą oceny charakteru i intensywności narażenia są przy tym zarówno stężenia obu związków jak i ich wzajemne stosunki. Fluorowodór, który towarzyszy zachodzącym reakcjom, ze względu na łatwość wykraplania się w temperaturze zbliżonej do pokojowej oraz silne działanie korozyjne w obecności wilgoci, jest szczególnie niepożądany. Związek ten nie jest jednak wykrywany bezpośrednio; o jego obecności można wnioskować na podstawie przewidywanego przebiegu reakcji jeśli w badanym gazie wykryta została obecność wody, tlenofluorków oraz  $\text{SO}_2$  jak również na podstawie pomiaru ogólnej kwasowości gazu metodą analityczną (wg IEC480).

Do związków sygnalizujących niekorzystne zmiany zachodzące w urządzeniu należy czterofluorek węgla  $\text{CF}_4$ . Powstaje on w następstwie oddziaływania wyładowań elektrycznych na powierzchnię polimeru. Oddziaływanie to może mieć charakter bezpośredni (kiedy wyładowania dochodzą do powierzchni izolatora) i pośredni (kiedy wyładowania występują jedynie w przestrzeni gazowej). Jak stwierdzono, i w jednym i w drugim przypadku tworzy się  $\text{CF}_4$ . Badania skutków działania WNZ [7, 8] wykazały, że w przypadku bezpośredniego narażenia — naruszenie powierzchni polega na tworzeniu się charakterystycznych kraterów. Przy działaniu pośrednim natomiast — następuje rozprzestrzenione naruszenie warstwy wierzchniej izolatora, charakterystyczne dla oddziaływania korozyjnego [7]. Osadzające się na powierzchni dielektryka związki, w tym krople HF, fluorosiarczki oraz cząstki elektrody generującej WNZ, tworzą warunki sprzyjające rozwojowi wyładowania pełnego [9].

Gazy trwałe, tj. powietrze ( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ) i  $\text{CF}_4$  oraz wilgoć, w formie śladowej występują w  $\text{SF}_6$  w stanie dostawy. Według standardu IEC736, ilości powietrza nie powinny przekraczać 0,5% (500 ppmv),  $\text{CF}_4$  — 0,05% (500 ppmv), zaś wilgoci — 0,017% (170 ppmv).

Po napełnieniu urządzenia ilości te mogą ulec zwiększeniu na skutek nieprawidłowości w procedurze napełniania urządzenia, a w szczególności:

- pozostawienia znaczącej ilości powietrza (w tym — wilgoci) w odpompowywanym zbiorniku,
- niedostatecznym wysuszeniu elementów konstrukcyjnych (zwłaszcza izolatorów tworzywowych),
- nieszczelności lub niedostatecznym usunięciu powietrza i wilgoci z przewodów łączących zbiornik z butlami zawierającymi  $\text{SF}_6$ .

Jeśli chodzi o stan równowagi pomiędzy zawartością wilgoci w fazie gazowej i w elementach konstrukcyjnych to jest on osiągany po kilku miesiącach [5].

Następnym etapem, podczas którego mogą nastąpić zmiany składu gazu, są próby odbiorcze urządzenia na miejscu jego zainstalowania. Dotyczy to przypadków kiedy w trakcie tych prób wystąpią wyładowania zupełne lub niezupełne wywołane np. obecnością cząstek ruchomych, których wpływ, z różnych powodów [1] może mieć charakter przejściowy. Spór o sposób i zakres diagnozowania urządzeń z SF<sub>6</sub> w czasie ich eksploatacji jest bardzo żywy do dzisiaj. Kontrargumentem przeciwko zwolnieniu ograniczenia diagnostyki do kontroli gęstości gazu „on line”, stało się wymaganie ekologiczne jak najdalej idącego zmniejszenia emisji SF<sub>6</sub> do atmosfery. Konsekwencją tego wymagania jest ograniczenie stosowania SF<sub>6</sub> do urządzeń o zapewnionej szczelności przez cały okres eksploatacji na końcu którego gaz zostanie poddany recyklingowi. Wymaganiu temu wyszli naprzeciw producenci urządzeń opracowując udoskonalone systemy uszczelnień. Pozornie, takim zabezpieczeniem przed emisją SF<sub>6</sub> są ogólnie stosowane czujniki gęstości gazu. Zadaniem tych czujników jest jednak przede wszystkim zapewnienie poprawności funkcjonowania urządzenia pod względem izolacyjnym i/lub łączeniowym. Z tych względów jednak dopuszczalny margines zmian gęstości SF<sub>6</sub> jest z uzasadnionych powodów na tyle duży, że sygnalizują one pogorszenie szczelności urządzenia ze znacznym opóźnieniem. Zasada działania tych czujników, polegająca na reagowaniu na zmiany ciśnienia i weryfikowaniu przyczyny tych zmian poprzez pomiar lokalnej temperatury, bywa, że staje się przyczyną fałszywych alarmów w przypadkach raptownych zmian temperatury otoczenia. Podwyższanie czułości ww. czujników prowadziłoby zatem do zwiększenia prawdopodobieństwa wystąpienia fałszywych alarmów.

Biorąc pod uwagę liczne wyniki badań laboratoryjnych, symulujących narażenia w urządzeniach oraz nielicznie publikowane doświadczenia eksploatacyjne, zagrożenia wynikające ze zmian zachodzących w układach izolacyjnych z SF<sub>6</sub> można podzielić na doraźne i wolnorozwijające się.

Przykładem zagrożenia doraźnego jest kondensacja pary wodnej na powierzchni izolatorów w następstwie wystąpienia niskiej temperatury. Kondensacja ta, jak wskazują doświadczenia, powoduje obniżenie wytrzymałości elektrycznej [1]. W celu zapobieżenia tym efektom wprowadza się wymagania na najwyższą dopuszczalną zawartość wody w zależności od najniższej spodziewanej temperatury roboczej. Doraźnym zagrożeniem są również wyładowania niezupełne wywołane obecnością cząstek swobodnych. Do zagrożeń wolnorozwijających się należy inicjacja przebicia pełnego wywołana bezpośrednim lub pośrednim oddziaływaniem wyładowań niezupełnych, a w aparaturze łączeniowej — wskutek oddziaływania produktów rozkładu SF<sub>6</sub> tworzących się w następstwie łuku elektrycznego.

Występowanie WNZ ma charakter na tyle losowy, że jak dotąd nie jest im przypisywana rola czynnika, który byłby powodem wzrostu awaryjności urządzeń w miarę upływu czasu eksploatacji. W aparaturze łączeniowej, jak wiadomo, z reguły stosowane są sorbenty pochłaniające produkty rozkładu SF<sub>6</sub> oraz wilgoć. Wychwyty tych produktów następuje w drodze dyfuzji, która nie przebiega jednak w sposób natychmiastowy. Dlatego z pewnym oddziaływaniem korozyjnym należy się liczyć nawet w obecności poprawnie działającego sorbenta. Sytuacja ulega zasadniczemu zaostrze-

niu z chwilą wyczerpania się zdolności sorbcyjnej sorbenta. Takie przypadki były zaobserwowane przez autorów w wyłącznikach po ich wieloletniej eksploatacji.

Jak już wspomniano, o narażeniu powierzchni elementów izolacyjnych, w tym również dyszy wyłącznika, sygnalizuje pojawiający się w gazie czterofluorek węgla  $CF_4$ . Związek ten nie jest pochłaniany przez sorbent. Należy mieć na uwadze, że procesom korozyjnym sprzyja wzrost zawartości powietrza i wilgoci. Wzrost ten następuje w przypadku nieszczelności urządzenia. Kontrola okresowa urządzeń z  $SF_6$  na podstawie analizy gazu stosowana jest w szczególności w USA i Kanadzie w których czas życia urządzeń instalowanych począwszy od lat 60-tych, osiąga obecnie 30 lat [5].

### 3. Analiza gazu w procesie recyklingu

Na proces recyklingu składają się czynności realizowane w systemie zamkniętym, w skład których wchodzi: odpompowanie gazu z urządzenia przed jego otwarciem, jego oczyszczenie i sprężenie dla ponownego użytkowania (reuse). Analiza gazu stanowi podstawę doboru warunków pracy agregatu i kontroli efektywności jego działania. W fazie końcowej — decyduje o ponownym zastosowaniu gazu w urządzeniu.

O konieczności przeprowadzenia recyklingu decyduje rodzaj stwierdzonego defektu urządzenia, bądź wzrost stężenia produktów rozkładu  $SF_6$  stwierdzony w wyniku prób kontrolnych. W tym względzie, ze strony CIGRE, zaproponowany został poziom graniczny zanieczyszczeń  $SF_6$ . Poziom ten został przedstawiony w tabeli 1, która zawiera ponadto wymagania dotyczące gazu nadającego się do ponownego użytku. Dane zawarte w tabeli zostały zgłoszone do projektu nowelizacji normy IEC 480.

**Tabela 1.** Projekt wymagań na czystość  $SF_6$  w eksploatowanych urządzeniach [3]

Zanieczyszczenie	Graniczny poziom zanieczyszczeń w $SF_6$ w urządzeniach pracujących	Wymagania na zawartość zanieczyszczeń w $SF_6$ do ponownego użytkowania
Powietrze, $CF_4$	3%	2%
$SF_4$ , $SOF_4$ $SOF_2$ , $SO_2$ , HF, $SO_2F_2$	100 ppmv 2000 ppmv	50 ppmv (sumarycznie) lub 12 ppm ( $SO_2 + SOF_2$ )
$H_2O$	200 ppmv przy 2 MPa	120 ppmv dla gazu sprężonego do fazy ciekłej (przy 0°C)

### 4. Wnioski

- Ilościowe i jakościowe oznaczenie produktów rozkładu  $SF_6$  oraz zawartości wody i tlenu pozwala na dokonanie oceny stanu urządzenia pod względem zagrożeń wynikających z procesów korozyjnych jak również wystąpienia przebicia pełnego powierzchni izolatorów.
- Spełnienie wymagań dotyczących zawartości wody jest istotne ze względu na spadek powierzchniowej wytrzymałości elektrycznej izolatorów w przypadku kondensacji pary wodnej w niskich temperaturach.

- Stosowane obecnie czujniki zmian gęstości gazu mogą okazać się nie wystarczające do kontroli „on line” szczelności urządzeń z punktu widzenia wymagań dotyczących ograniczenia emisji SF<sub>6</sub>.
- W porównaniu do ogólnie znanej roli analizy gazów rozpuszczonych w oleju w odniesieniu do transformatorów mocy, w przypadku urządzeń z SF<sub>6</sub> poza diagnostyką prawidłowości ich działania dochodzi ponadto kwestia optymalizacji procesu recyklingu gazu, w tym — kosztów tego procesu.

## Literatura

- [1] *Dielectric diagnosis of electrical equipment for AC applications and its effects on insulation coordination*, CIGRE, 1990 Session, Study Committees 15 and 33
- [2] **Słowikowska H.**: *Problematyka ekologiczna związana z rozwojem zastosowań w urządzeniach elektroenergetycznych*, Wiadomości Elektrotechniczne, Rok, LXIV, nr. 9, 1996
- [3] *SF<sub>6</sub> Recycling Guide*, CIGRE Rap. 117, Task Force 23.10.01. August 1997
- [4] **Christophorou L. G., Olthoff J. K., Green D. S.**: *Gases for electrical insulation and arc interruption: possible present and future alternatives to pure SF<sub>6</sub>*, NIST Technical Note 1425 (1997)
- [5] **Chu F. Y.**: *Gas Analysis as a Diagnostic Tool for Gas-Insulated Equipment*, Gaseous Dielectrics V Ed. by Christophorou Loucas G. and James D. R., Plenum Press, New York, 1987
- [6] *High-voltage switchgear and controlgear – Use and handling of sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) in high-voltage switchgear and controlgear*, IEC Technical Report 1634, 1995
- [7] **Słowikowska H., Słowikowski J., Lampe J.**: *Some test results on the effect of SF<sub>6</sub> decomposition products on superficial properties of epoxy resin composites*, IEEE Symp. Philadelphia 1978
- [8] **Latour-Słowikowska H., Lampe J., Słowikowski J.**: *On reactions occurring in the gaseous phase in decomposed SF<sub>6</sub>*, Gaseous Dielectrics IV Ed. by Christophorou L. G. and James D. R., Plenum Press, New York, 1984
- [9] **Tymań A., Chu F. Y., Braun J. M.**: *Zmiany na powierzchni izolatora stacji 500 kV pod wpływem niskoenergetycznych wyladowań niezupełnych*, VI Symp. „Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia”, Zakopane, 23–25 października 1997
- [10] **Słowikowska H., Słowikowski J.**: Prace IEL, niepublikowane

### FOUNDATIONS OF DIAGNOSING EQUIPMENT WITH SF<sub>6</sub> BASING ON GAS CONDITION TESTING

Experience gained from diagnostic investigations of power engineering equipment with SF<sub>6</sub>, basing on gas condition analysis is presented against the background of ecological requirements. Moreover, the exposure caused by the presence of SF<sub>6</sub> decomposition products created by high- and low-energy discharges is discussed.