

Władysław OPYDO\*  
Jerzy STAWICKI\*\*

## ANALIZA PORÓWNAWCZA PRÓŻNI I SZEŚCIOFLUORKU SIARKI JAKO IZOLACJI WYSOKIEGO NAPIĘCIA

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów wytrzymałości elektrycznej przy napięciu przemiennym (50 Hz) układów izolacyjnych: próżniowego, z sześćciofluorkiem siarki ( $\text{SF}_6$ ) i z olejem mineralnym. Badane układy miały elektrody płaskie wykonane ze stali nierdzewnej lub aluminium. Stwierdzono, że układy izolacyjne: próżniowy, z  $\text{SF}_6$  o ciśnieniu  $3 \cdot 10^5$  Pa oraz układ z olejem mineralnym, przy tym samym kilkumilimetrowym odstępem międzyelektrodowy, mają w przybliżeniu taką samą wytrzymałość elektryczną. Wskazano na zalety i wady próżni,  $\text{SF}_6$  i oleju mineralnego w kontekście zastosowania tych ośrodków jako izolacji wysokonapięciowej w określonym rodzaju urządzeń elektrycznych. Do opracowania matematycznego wyników badań wykorzystano program komputerowy Statistica [3].

### 1. WSTĘP

Próżnia stwarza możliwość bezkolizyjnego przejścia wprowadzonym w nią cząstkom neutralnym lub naładowanym. Ponadto cechuje ją naturalny brak nośników ładunku elektrycznego. Ta pierwsza cecha została wykorzystana w lampach elektronowych i rentgenowskich, w separatorach i akceleratorach cząstek oraz w mikroskopach elektronowych. Naturalny brak nośników ładunku elektrycznego natomiast, został wykorzystany w kondensatorach próżniowych, kablach kriogenicznych oraz w próżniowych wyłącznikach wysokiego napięcia. Gwałtowny wzrost zainteresowania próżnią jako izolacją wysokonapięciową nastąpił w drugiej połowie ubiegłego wieku i był wynikiem znacznego postępu technologii wysokiej próżni, który wówczas nastąpił.

Sześćciofluorek siarki ( $\text{SF}_6$ ) został po raz pierwszy otrzymany w 1900 r., we Francji przez H. Moissana i P. Lebeau [4]. Jednakże pierwsze rozleglejsze badania właściwości elektrycznych  $\text{SF}_6$  wykonali dopiero w 1939 r. H. C. Pollock i F. S. Cooper [7]. Te badania i kolejne wykazały, że  $\text{SF}_6$  jest gazem chemicznie trwałym, nawet w warunkach wyładowania elektrycznego, a jego wytrzymałość elektryczna jest znacznie większa od wytrzymałości elektrycznej powietrza, np. [2], [6], [9].  $\text{SF}_6$  jest gazem bezbarwnym, bezwonym, niepalnym oraz całkowicie

\* Politechnika Poznańska.

\*\* Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy.

nietoksycznym dla ludzi zwierząt; toksyczne są tylko jego produkty rozpadu w wylądowaniu elektrycznym. Gęstość SF<sub>6</sub> w warunkach normalnych wynosi 6,08 g/dcm<sup>3</sup>. Jest to więc jeden z najcięższych znanych gazów.

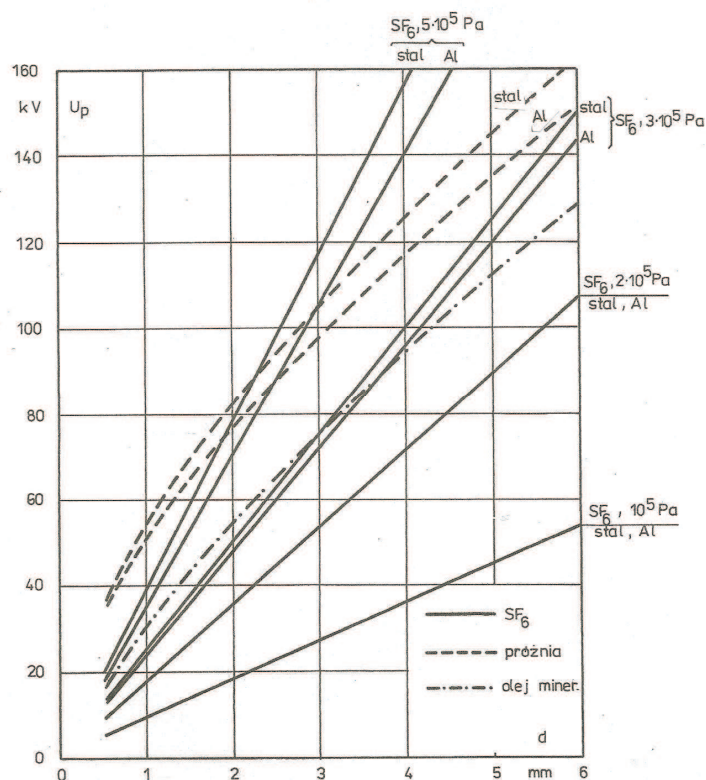
W elektrotechnice SF<sub>6</sub> znajduje coraz szersze zastosowanie jako ośrodek gaszący łuk w wyłącznikach wysokiego napięcia oraz jako ośrodek izolujący wysokie napięcie w generatorach elektrostatycznych, urządzeniach rentgenowskich, kondensatorach układów pomiarowych dla najwyższych napięć, kablach elektroenergetycznych, rozdzielnicach wysokonapięciowych osłoniętych, transformatorach (niepalnych i niewybuchowych). W trzech ostatnich rodzajach urządzeń, a szczególnie w transformatorach, wykorzystuje się SF<sub>6</sub>, także jako czynnik chłodzący.

## 2. KONKURENCYJNOŚĆ OŚRODKÓW ELEKTROIZOLACYJNYCH

Dla konstruktora urządzeń elektrycznych podstawowe znaczenie ma konkurencyjność tych dwóch ośrodków względem siebie oraz ewentualnie, w stosunku do alternatywnego dla nich obecnie jeszcze ośrodka izolacyjnego – oleju mineralnego.

Na rysunku 1 przedstawiono pomierzone przez autorów zależności wytrzymałości elektrycznej, przy napięciu przemiennym o częstotliwości 50 Hz, SF<sub>6</sub> o ciśnieniu 10<sup>5</sup> Pa, 2·10<sup>5</sup> Pa, 3·10<sup>5</sup> Pa i 5·10<sup>5</sup> Pa, próżni o ciśnieniu oraz oleju mineralnego w dobrym stanie technicznym od długości odstepu międzyelektrodowego. Badane układy izolacyjne miały elektrody płaskie wykonane ze stali nierdzewnej lub aluminium i krawędzie zaokrąglone wg wzoru Rogowskiego. Z rysunku 1 wynika, że w zakresie eksperymentu, SF<sub>6</sub> o ciśnieniu 3·10<sup>5</sup> Pa ma wytrzymałość elektryczną zbliżoną do wytrzymałości oleju mineralnego i nieco mniejszą od wytrzymałości elektrycznej próżni. Należy przy tym zaznaczyć, że próżniowe układy izolacyjne przy ciśnieniu 10<sup>-3</sup> Pa mają już wysoką wytrzymałość elektryczną – wartość ciśnienia, poniżej której wytrzymałość elektryczna próżniowego układu izolacyjnego jest wysoka i praktycznie nie zależy od wartości ciśnienia wynosi około 10<sup>-1</sup> Pa.

Jeśli konkurencyjność tych trzech ośrodków izolacyjnych rozpatrywać, w stosunku do siebie, pod kątem zastosowania ich jako wysokonapięciowej izolacji w rozdzielnicach osłoniętych [2], to SF<sub>6</sub> jest zdecydowanie lepszym ośrodkiem od oleju mineralnego. Wynika to przede wszystkim z zagrożenia pożarowego i wybuchowego, które użycie oleju mineralnego stwarza, konieczności budowy specjalnych zbiorników awaryjnych, zdolnych pomieścić cały olej, w związku z możliwością jego wycieku podczas eksploatacji i ewentualnej awarii, oraz uciążliwą koniecznością poddawania oleju zabiegom regeneracyjnym, w związku z jego starzeniem.



Rys. 1. Zależności wytrzymałości elektrycznej, przy napięciu przemiennym o częstotliwości 50 Hz (amplituda), od długości odstepu międzyelektrodowego – SF<sub>6</sub> o ciśnieniu  $10^5$  Pa,  $2 \cdot 10^5$  Pa,  $3 \cdot 10^5$  Pa,  $5 \cdot 10^5$  Pa, próżni o ciśnieniu  $10^{-3}$  Pa i oleju mineralnego w dobrym stanie technicznym; układ izolacyjny miał elektrody płaskie wykonane ze stali nierdzewnej i aluminium

Zbliżone do siebie wytrzymałości SF<sub>6</sub> o ciśnieniu  $3 \cdot 10^5$  Pa i próżni (rys. 1) wskazują na porównywalną konkurencyjność tych dwóch ośrodków jako wysokonapięciowej izolacji. Należy jednak zaznaczyć, że obudowa urządzenia z SF<sub>6</sub> o ciśnieniu  $3 \cdot 10^5$  Pa, jako z izolacją wysokiego napięcia, mającego zbliżoną wytrzymałość elektryczną do analogicznego urządzenia z wysokonapięciową izolacją próżniową, musi wytrzymać mechanicznie różnicę ciśnień SF<sub>6</sub> i atmosfery ziemskiej, wynoszącą w tym przypadku  $2 \cdot 10^5$  Pa, podczas gdy obudowa analogicznego urządzenia z izolacją próżniową będzie poddana tylko ciśnieniu atmosferycznemu działającemu z zewnątrz na tę obudowę. Ponadto, jeśli w tych urządzeniach zachodzi możliwość pojawienia się łuku elektrycznego, to łuk ten w przypadku urządzenia z SF<sub>6</sub> będzie źródłem fali ciśnieniowej dodatkowo oddziałującej na obudowę, która musi te naprężenia mechaniczne wytrzymać. Wynika z stąd

konieczność zastosowania znacznie mocniejszej obudowy urządzenia w przypadku zastosowania SF<sub>6</sub>, w porównaniu z zastosowaniem próżni.

W przypadku zamiarów budowy urządzeń z izolacją próżniową, mających duże gabaryty (np. takich jak rozdzielnice osłonięte) pojawia się jeszcze problem utrzymania we wnętrzu urządzenia ciśnienia gazów resztkowych, na poziomie niższym od około 0,1 Pa, zapewniającym dużą wytrzymałość układu izolacyjnego próżniowego. Bowiem wskutek przenikania gazów przez obudowę o dużych gabarytach, ciśnienie to zwiększa się stosunkowo szybko i powyżej około 0,1 Pa spowoduje silne obniżenie się wytrzymałości elektrycznej urządzenia. Toteż w przypadku urządzeń elektrycznych mających duże gabaryty konieczne jest zastosowanie tzw. próżni dynamicznej, tj. ciągłej pracy pomp próżniowych.

### 3. PODSUMOWANIE

Stwierdzono, że układ izolacyjny z SF<sub>6</sub> cechuje duża, w stosunku do próżniowego układu izolacyjnego, stabilność wytrzymałości elektrycznej. Odchylenie standardowe względne pomiarów napięcia przeskoku w układzie izolacyjnym z SF<sub>6</sub> zwykle nie przekracza kilku procent, podczas gdy przy pomiarach wytrzymałości próżniowego układu izolacyjnego wartość tego odchylenia wynosi często kilkanaście procent. Jest to skutkiem stosunkowo małej liczby czynników, w znacznym stopniu wpływających na wytrzymałość elektryczną SF<sub>6</sub>, w porównaniu z analogiczną liczbą czynników wpływających na wytrzymałość elektryczną próżni. Czynniki te zestawiono w tabeli 1. Przy każdym czynniku podano szacunkowy stopień wpływu tego czynnika na wytrzymałość elektryczną.

Z tabeli 1 wynika, że duży wpływ na wytrzymałość elektryczną SF<sub>6</sub> wywierają tylko trzy czynniki: ostęp między elektrodami, ciśnienie oraz stopień niejednostajności pola elektrycznego makroskopowego. W przypadku układów izolacyjnych próżniowych liczba czynników o dużym stopniu wpływu na wytrzymałość elektryczną zwiększa się o następujące czynniki: czystość powierzchni elektrod i próżni, gładkość powierzchni elektrod i sposób kondycjonowania. Ponieważ niedotrzymanie tylko jednego z parametrów pracy układu izolacyjnego może prowadzić do przeskoku, to większa liczba czynników mających duży wpływ na wytrzymałość elektryczną próżni wymaga przy budowie urządzeń z wysokonapięciową izolacją próżniową stosowania bardziej nowoczesnych technologii aniżeli technologie stosowane przy budowie urządzeń z SF<sub>6</sub>.

Właściwości elektroizolacyjne próżni są natomiast zdecydowanie korzystniejsze od analogicznych właściwości SF<sub>6</sub>, jeśli porówna się prędkości odzyskiwania wytrzymałości połukowej tych ośrodków. Stwierdzono [1] mianowicie, że próżnia już po kilku mikrosekundach od zgaszenia łuku

elektrycznego odzyskuje około 70% swojej wytrzymałości elektrycznej, podczas gdy SF<sub>6</sub> potrzebuje na to czasu trzy rzędy dłuższego.

Tabela 1. Zestawienie stopnia wpływu (subiektywne), na wytrzymałość elektryczną ( $U_p$ ) SF<sub>6</sub> oraz próżni, podstawowych czynników stanu układu izolacyjnego; stopień wpływu czynnika oznacza, że czynnik może powodować następujące zmiany wytrzymałości elektrycznej: zmiana  $< 10\% U_p$  – mały wpływ, zmiana  $10 \dots 50\% U_p$  – średni wpływ, zmiana  $> 50\% U_p$  – duży wpływ

Lp.	Rodzaj czynnika	Stopień wpływu czynnika na wytrzymałość elektryczną	
		SF <sub>6</sub>	próżni
1.	Odstęp między elektrodami	duży	duży
2.	Ciśnienie	duży	mały (ciśnienia poniżej 0,1 Pa)
3.	Stopień niejednostajności pola elektrycznego makroskopowego	duży	duży
4.	Rodzaj materiału elektrod	średni	średni
5.	Czystość powierzchni elektrod i ośrodka izolacyjnego	średni	duży
6.	Gładkość powierzchni elektrod	średni	duży
7.	Wartość pola powierzchni elektrod	średni	duży
8.	Sposób kondycjonowania	mały	duży

Do wad SF<sub>6</sub> należą także stosunkowo wysoka cena i stosunkowo wysoka temperatura skraplania, np. wynosząca 243 K przy ciśnieniu  $5 \cdot 10^5$  Pa – nawet częściowe skroplenie gazu w rządzeniu zmniejsza jego ciśnienie oraz gęstość i powoduje zmniejszenie wytrzymałości elektrycznej.

Te wady można skutecznie eliminować stosując jako ośrodek izolacyjny mieszaninę SF<sub>6</sub> z innym gazem, np. z azotem lub helem. Stwierdzono np., że mieszanina zawierająca 20% SF<sub>6</sub> z azotem ma wytrzymałość elektryczną tylko około 25% mniejszą niż czysty SF<sub>6</sub> [8].

## LITERATURA

- [1] Cobine J. D., Research and development leading to the high power vacuum interrupter, IEEE Transaction, 1963, t. PAS-82, s. 201.
- [2] Knothe S., Rozdzielnice wysokonapięciowe izolowane, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1976.
- [3] Lesińska E., Statistica Pl, StatSoft Polska, Kraków 1997.

- [4] Moissan H., Lebeau P., Sur un nouveau corps gazeux: le perfluorure de soufre SF<sub>6</sub>, Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie de Sciences, 1900, t. 130, s. 865.
- [5] Opydo W., Ranachowski J., Właściwości próżniowych układów izolacyjnych przy napięciu przemiennym, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
- [6] Opydo W., Właściwości gazowych i próżniowych wysokonapięciowych układów izolacyjnych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2008.
- [7] Pollock H. C., Cooper F. S., The effect of pressure on the positive point-to-plane discharge SO<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>, CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, Ar, He, and H<sub>2</sub>. Phys. Rev., 1939, t. 56, s. 170.
- [8] Wieland A., Gasdurchlagmechanismen in elektronegativen Gasen (SF<sub>6</sub>) und in Gasgemischen, Elektrotechnischen Zeitschrift, 1973, A. 94, nr 7, s. 370.
- [9] Zakrzewski S., Opydo W., Wpływ podwójnej warstwy elektrycznej na wytrzymałość elektryczną powietrza i sześćfluorku siarki, Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering, 2012, nr 70, ss. 113.

#### **COMPARATIVE ANALYSIS OF VACUUM AND SULFUR HEXAFLUORIDE AS A HIGH VOLTAGE INSULATION**

The paper presents the results of the measurements of electric strength under a. c. voltage (50 Hz) of the insulation systems based on vacuum, sulfur hexafluoride and pure mineral electric insulating oil. The studied systems had electrodes with rounded-off edges of Rogowski's profile, made of stainless steel or aluminum.

The study revealed that the insulation systems based on vacuum, sulfur hexafluoride at  $3 \cdot 10^5$  Pa pressure and mineral oil with the same a few millimeters interelectrode gap spacing have similar electric strength. Advantages and disadvantages of vacuum, sulfur hexafluoride and mineral oil were pointed out regarding the use of these media as a high voltage insulation in particular type of electric devices.

Statistica [3] software was used for mathematical analysis of the results.