

Jerzy Słowikowski<sup>1</sup>

## U PROGU ZASTOSOWANIA MIESZANIN N<sub>2</sub> /SF<sub>6</sub> W URZĄDZENIACH ROZDZIELCZYCH

**Streszczenie :** W 1997r. Komisja ONZ d/s Zmian Klimatycznych podjęła decyzję o zaliczeniu SF<sub>6</sub> do grupy gazów cieplarnianych. W ślad za tą decyzją nastąpiła duża presja na ograniczenie emisji tego gazu do atmosfery. Z drugiej strony jednak, wzrasta popyt na urządzenia z SF<sub>6</sub> ze względu na ich niezawodność i trwałość. Ażeby zaspokoić ten popyt przy jednoczesnym minimalizowaniu zakłóceń środowiska coraz bardziej zasadne staje się wykorzystanie właściwości mieszanin N<sub>2</sub> /SF<sub>6</sub>. Na tle analizy emisji SF<sub>6</sub> z urządzeń elektroenergetycznych omówiono doświadczenia wskazujące na możliwość zastosowania mieszaniny azotu z niedużą ilością SF<sub>6</sub> w tych urządzeniach elektroenergetycznych, gdzie gaz spełnia wyłącznie rolę czynnika izolacyjnego.

### 1. Wstęp

Bezpośrednio po stwierdzeniu wyjątkowo niekorzystnych właściwości sześćofluorku siarki jako gazu cieplarnianego, koła naukowe USA<sup>2</sup> zaproponowały ograniczenie ilości jego stosowania. Jednym z doraźnych sposobów, pozornie łatwych do spełnienia, była wymiana SF<sub>6</sub> w urządzeniach aktualnie znajdujących się w eksploatacji (z wyjątkiem aparatury łączeniowej) na mieszaninę SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> przy jednoczesnym, niewielkim podniesieniu ciśnień nominalnych [1]. Powyższej propozycji sprzeciwili się jednak konstruktorzy urządzeń, którzy uznali tego rodzaju przedsięwzięcie za zbyt ryzykowne. Tym samym, problem masy SF<sub>6</sub> użytkowanej w urządzeniach elektroenergetycznych, od której przede wszystkim zależy ilość tego gazu emitowanego do atmosfery ziemskiej, pozostał nadal kwestią otwartą. O zaliczeniu SF<sub>6</sub> do gazów cieplarnianych zdecydowały dwa czynniki [2] :

- największy jednostkowy przyczynek do efektu cieplarnianego spośród wszystkich substancji należących do grupy gazów cieplarnianych . Przyczynek ten, mierzony globalnym współczynnikiem ocieplenia GWP (global warming potential), liczony w stosunku do CO<sub>2</sub> , wynosi 24900 (1 Mg SF<sub>6</sub> odpowiada 24900 Mg CO<sub>2</sub>),

<sup>1</sup> Instytutu Elektrotechniki, 04-703 Warszawa

<sup>2</sup> National Institute of Standards and Technology, USA

- stwierdzony w latach 1970-94 bardzo szybki, w porównaniu do innych gazów cieplarnianych, wzrost koncentracji SF<sub>6</sub> w górnych warstwach atmosfery ziemskiej (tzw. chemisfery).

W tym czasie, roczne zapotrzebowanie światowej elektroenergetyki stanowiło ok. 80 % całkowitej rocznej sprzedaży tego gazu.

## 2. Działania na rzecz zmniejszenia emisji SF<sub>6</sub>

Jednym z następstw II Konferencji Stron Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w Sprawie Zmian Klimatu Ziemi, która odbyła się w Kioto w 1997r, jest sprecyzowanie wymagań dotyczących ograniczenia emisji gazów cieplarnianych oraz określenie procedury [3] obliczania tej emisji przez poszczególne kraje. Ważną zasadą stosowaną przy kontroli realizacji zobowiązań sygnatariuszy w/w „Konwencji” jest to, że bierze się pod uwagę sumaryczną ilość wyemitowanych gazów przez dany kraj, czyli tzw. „koszyk gazów cieplarnianych”. Polska do 2012r. [2] zobowiązała się do zredukowania emisji gazów cieplarnianych o 6% tj. o 35000 Mg (przeliczonych na ilość CO<sub>2</sub>). W/g obliczeń szacunkowych emisja SF<sub>6</sub> w 2010r. nie powinna przekroczyć 34000 Mg/CO<sub>2</sub>. Porównując obydwie w/w liczby staje się oczywiste, że spełnienie podjętych przez naszą gospodarkę zobowiązań, zależy od zmniejszenia o ok. 6% emisji CO<sub>2</sub> w innych gałęziach gospodarki co jest jak najbardziej możliwe biorąc pod uwagę, że emisja tego gazu w 1996r. tj. po upływie 8 lat od 1988r, zmalała o ok. 22% (tj. o ok. 104000 Mg) [2]. W wyżej wymienionym wariantcie obliczeń emisji (SF<sub>6</sub>) przyjęto założenie, że wdrożone zostaną zalecenia CIGRE [4] dotyczące gospodarki gazem .

W 2001r. opublikowane zostały dane statystyczne dotyczące niezawodności i trwałości rozdzielnic [5] i wyłączników [6] z SF<sub>6</sub>. Jeśli chodzi o rozdzielnice to jedną z najważniejszych obserwacji było stwierdzenie, że na ich awaryjność w w/w okresie nie wywierały wpływu procesy starzeniowe. Przeważająca większość ankietowanych użytkowników uznała za możliwe utrzymanie rozdzielnic w ruchu w ciągu 30-50 lat.

(8% ankietowanych – powyżej 50 lat). Stwierdzono ponadto znaczny spadek awaryjności (o ok. 50%) rozdzielnic produkowanych począwszy od 1985r. w porównaniu do poprzednich generacji. Drugi z raportów [6] dotyczył wszystkich rodzajów wyłączników na napięcie powyżej 60 kV. Spośród nich, wyłączniki z SF<sub>6</sub> (monociśnieniowe) charakteryzują się najdłuższym średnim okresem międzyremontowym, wynoszącym 14 lat .

Cytowane raporty wskazują na możliwość zapewnienia w nowych generacjach urządzeń z SF<sub>6</sub> szczelności 0.1% rocznie w ciągu całego spodziewanego okresu eksploatacji. Na VIII Konferencji „Gaseous Dielectrics” w 1995r. przedstawiony został przez prof. W.Boeckę [7] raport dotyczący przyczynki jaki wnosi koncentracja SF<sub>6</sub> w chemisferze. Oszacowano, że przyczynka ten stanowił wówczas ok. 0.1% w porównaniu do oddziaływania sumarycznej koncentracji innych gazów cieplarnianych.

Zwrócono jednak uwagę, że obecny trend wskazuje na trzykrotnie większą liczbę zainstalowanych urządzeń w 2025r, w porównaniu do 1995r, co zdaniem autora raportu skłania do zastosowania mieszanin N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> w tych wszystkich urządzeniach, w których nie są wykorzystywane właściwości SF<sub>6</sub> jako medium służącego gaszeniu łuku elektrycznego. Na tejsze Konferencji, przedstawiciel firmy Hitachi (Japonia) T.Yamagiwa [7] stwierdził, że zastosowanie hybrydowych rozwiązań rozdzielnic, w których SF<sub>6</sub> byłby stosowany tylko do

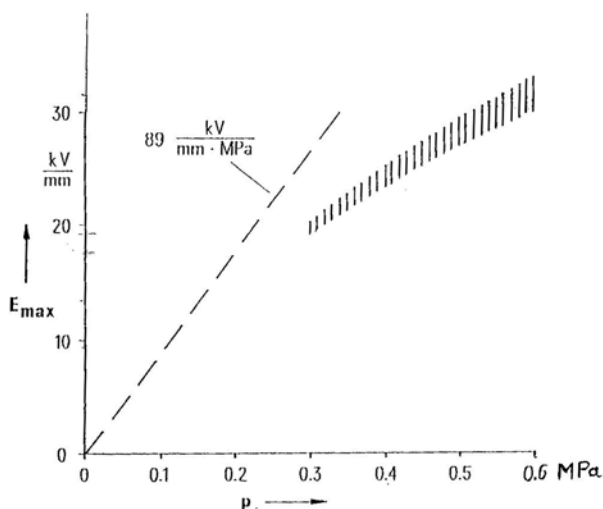
wyłączników, zaś pozostałe przedziały byłyby napełniane mieszaniną  $N_2/SF_6$  w stosunku 95%/5%, doprowadziłyby do zaoszczędzenia ok. 50%  $SF_6$ .

### **3. Badania nad zastosowaniem mieszanin $N_2/SF_6$ o małym udziale $SF_6$**

Przypomnijmy, że podstawową cechą gazów elektroujemnych, decydującą o wytrzymałości elektrycznej, jest wychwyty swobodnych elektronów. Konsekwencją wychwyty jest zamiana energii kinetycznej elektronu na energię wzbudzenia molekuł/atomów i/lub ich dysocjacji oraz utworzenie ładunku przestrzennego w postaci jonów ujemnych. Z chwilą odłączenia elektronu, powrót do stanu podstawowego molekuł i/lub atomów łączy się z wypromieniowaniem energii wzbudzenia. Wychwyty jest zatem procesem konkurencyjnym do jonizacji, z którą łączy się tworzenie elektronów swobodnych. Zapoczątkowanie tworzenia się lawiny elektronów następuje z chwilą przewagi procesów jonizacji nad wychwytem, to jest w momencie kiedy współczynnik jonizacji  $\alpha_j$  jest większy od współczynnika wychwyty  $\eta$ . Wadą  $SF_6$  jest silna zależność  $\eta$  od energii elektronu jaką nabywa on w swoim dryfie na drodze swobodnej w polu elektrycznym; największa wartość  $\eta$  wypada przy dziesiątych częściach eV. Tym niemniej zrównanie wartości  $\alpha_j$  i  $\eta$  (efektywny współczynnik jonizacji  $\alpha = (\alpha_j - \eta) = 0$ ) następuje przy wartości natężenia pola  $E$  zredukowanego do ciśnienia (in. koncentracji  $SF_6$  przy 20°C) o wartości  $(E/p)_{kr} = 89$  kV/mm.MPa, to jest przy wartości 3.3 większej od powietrza [8]. W wielu podręcznikach, przy podawaniu tej liczby mówi się, iż wytrzymałość elektryczna  $SF_6$  jest właśnie tylokrotnie większa od wytrzymałości powietrza.. Przy dzisiejszym stanie wiedzy ta informacja, nawet jeśli ją odnieść do układu elektrod nazywanym kwazijednorodnym, nie jest ścisła. Pojęcie kwazijednorodności rozkładu pola, zaczerpnięte z powietrznych układów izolacyjnych i definiowane określoną wartością stosunku maksymalnego natężenia pola do średniej wartości natężenia pola, obliczonych na podstawie geometrii układu elektrod, jeśli chodzi o układy z  $SF_6$  nie jest miarodajne i może być traktowane jedynie orientacyjnie. Powodem tego jest strimerowy mechanizm i/lub liderowy mechanizm przebicia wywołany lokalnym rozkładem pola, który odgrywa tym większą rolę im większa jest koncentracja  $SF_6$ ; zwrócił na to uwagę Pedersen [9] już w 1970r. Zależność  $\eta$  od energii elektronów powoduje, że o wytrzymałości elektrycznej rzeczywistych układów izolacyjnych najczęściej decydują defekty z rodzaju chropowatości powierzchni lub cząstki pozostałe po obróbce elementów konstrukcyjnych. W rezultacie, współcześnie przy projektowaniu urządzeń elektroenergetycznych, konstruktorzy kierują się obliczeniem maksymalnej wartości pola, wynikającej z geometrii układu, która może wystąpić przy największym narażeniu to jest przy przepięciu pochodzenia atmosferycznego, kierując się ponadto doświadczeniem w doborze technologii wykonania układu w tym również – gładzi powierzchni elementów konstrukcyjnych. O powyższym świadczy rysunek 1, na którym nanie­siono aktualnie przyjmowane wartości maksymalnych natężeń pola  $E_m$  w urządzeniach elektroenergetycznych w zależności od ciśnienia znamionowego [10].

Łatwo zauważyć, że w miarę wzrostu ciśnienia wartości  $E_m$  coraz bardziej odchylają się od linii prostej odpowiadającej warunkowi  $\alpha = 0$ . Nie jest to tylko wynikiem asekuracji, ale pewnych, nie do końca wyjaśnionych, zjawisk fizycznych. Jest prawdopodobne, że jedną z przyczyn tego efektu jest oddziaływanie wzajemne wzbudzonych jonów ujemnych. Oddziaływanie to wzrasta w miarę zwiększania się koncentracji gazu [11] i może prowadzić do

wzrostu koncentracji wolnych elektronów. Zależność wytrzymałości od parametrów układu izolacyjnego i spodziewanych jego niedoskonałości powoduje, że wprowadzenie mieszanin łączy się z koniecznością przeprowadzenia wielu prób, z których duża część wymaga posługiwania się modelami w skali 1:1.



Rys. 1. Wartości szczytowe napięcia udarowego zakładane przez konstruktorów.

Zasadność podjęcia prób wprowadzenia mieszaniny  $N_2/SF_6$  wynikała z przesłanek teoretycznych oraz doświadczalnego zbadania właściwości mieszaniny o małym udziale  $SF_6$ . Teoretyczną przesłanką były właściwości molekuł  $SF_6$ , które odgrywają rolę czynnika spowalniającego elektron w kolejnych elastycznych kolizjach, odbierając część jego energii kinetycznej [14]. Drugą przesłanką było stwierdzenie efektu synergizmu polegającego na tym, że przy stosunkowo niewielkim udziale  $SF_6$ , mieszanina  $N_2/SF_6$  nabiera cech gazu elektrycznego. Posługując się obserwacją zmian charakteru wyładowań niezupełnych T. Yamada i in. [13] stwierdzili, że już przy udziale wynoszącym powyżej 10 ppm, zaznacza się wpływ  $SF_6$  na charakterystykę WNZ. W poniższej tabeli 1 podano wartości  $(E/p)_{kr}$  mieszaniny  $N_2/SF_6$  wyznaczone eksperymentalnie [14]. Ograniczono się przy tym do podania wartości zmierzonych przy ciśnieniu nie przekraczającym 4MPa. W miarę wzrostu ciśnienia stwierdzono nieznaczne obniżanie się w/w wartości.

Tabela 1. Wyznaczone doświadczalnie wartości  $(E/p)_{kr}$  mieszanin  $N_2/SF_6$  w zakresie 1 ÷ 4bar [14]

Udział %-owy $SF_6$ w mieszaninie	100	50	20	10	5	1
Wartość bezwzględna $(E/p)_{kr}$ ; kV/mm, MPa	89	81	74	63	58	50
Wartość $(E/p)_{kr}$ , w % w stosunku do $SF_6$	100	91	83	71	65	56

Jednym z podstawowych warunków zastosowania mieszanin  $N_2/SF_6$  było porównanie „wrażliwości” ich wytrzymałości na zakłócenia rozkładu pola wywołane wzmiankowanymi powyżej defektami technologicznymi. Spośród licznych badań w tym względzie ograniczono

się jedynie do przedstawienia wyników badań uzyskanych przez Piemontesi i in [15]. W badaniach tych kierowano się założeniem, że powodem przebicia rzeczywistych układów izolacyjnych są defekty natury technologicznej; zakłócenia rozkładu pola powodowane przez te defekty prowadzą do inicjacji wyładowania strimerowego. W wyniku badań stwierdzono co następuje :

- w przypadku wystąpienia typowej chropowatości o nierówności równej 50  $\mu\text{m}$ , wytrzymałość udarowa (przy biegunowości dodatniej) mieszaniny z 10%-ową zawartością  $\text{SF}_6$  jest niższa o ok. 10% w stosunku do czystego  $\text{SF}_6$ . Różnicę tę można łatwo skompensować podniesieniem ciśnienia mieszaniny.
- w przypadku cząstek metalicznych – wytrzymałość udarowa badanego układu, w porównaniu do układu pozbawionego defektu spadała w tym samym stosunku. I w jednym i drugim przypadku powyżej 5 bar zaobserwowano podobny efekt zmniejszania się wpływu ciśnienia na wzrost napięcia przebicia.

Powyższe badania nie wykazały zatem większej wrażliwości wytrzymałości badanej mieszaniny na defekty technologiczne w porównaniu do  $\text{SF}_6$ .

Ważnym przyczynkiem do porównania wytrzymałości udarowej układów z czystym  $\text{SF}_6$  i mieszaninami były wyniki badań segmentu gazowej linii przesyłowej o izolacji gazowej (GIL) z zasymulowanym defektem zlokalizowanym na wewnętrznej powierzchni osłony (R.Graf, W.Boeck [16]). Badania te wykazały, że przy jednakowej wytrzymałości udarowej tego samego układu przy  $\text{SF}_6$  i mieszaninach  $\text{N}_2/\text{SF}_6$  (w tym drugim przypadku o odpowiednio zwiększonym ciśnieniu) nie ma różnic w rozkładach statystycznych czasów do przebicia.

#### 4. Wnioski

Nagromadzone doświadczenia wskazują na możliwość zastosowania mieszanin  $\text{N}_2/\text{SF}_6$  o małej zawartości  $\text{SF}_6$  do urządzeń rozdzielczych, w których gaz pełni funkcję izolacji. Zastosowanie tego rodzaju mieszanin może doprowadzić do znacznego zredukowania ilości użytkowanego  $\text{SF}_6$ , co przyczyni się do ograniczenia emisji tego gazu do atmosfery.

#### Literatura

- [1] **Christophorou L. G., Van Brunt R.J.:** *SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> Mixtures – Basic and HV Insulation Properties*, IEEE Trans. on Dielectr. a.Electr. Insul., vol.2, No5, October 1995
- [2] **Barc W., Słowikowska H.,** *Własności cieplarniane SF<sub>6</sub> i międzynarodowe działania na rzecz ograniczenia jego emisji do atmosfery ziemskiej*, Konferencja j.w.
- [3] *Emission of SF<sub>6</sub> from electrical equipment and other sources*, IPCC Good Practice Guidance and Uncertainly Management in National Greenhouse Gas Inventories 2000r.
- [4] *SF<sub>6</sub> Recycling Guide*, Raport CIGRE nr 117, August 1997,
- [5] *Report on the Second International Survey on High Voltage Gas Insulated Substations (GIS). Service Experience*, Raport CIGRE nr. 150, February 2000
- [6] *Life Management of Circuit-Breakers*, Raport CIGRE nr. 165, August 2000
- [7] *Gaseous Dielectrics VIIIConf. , Section 11: Discussion Groups*, Proc. Ed.Loucas G.Christophorou a. James K. Olthoff; Kluwer Academic/Plenum Publishers N.York,1998

- [8] **Dakin T., W., Luxa G., Oppermann G., Vigreux J., Wind H., Winkelkemper H**, *Breakdown of Gases in Uniform Fields*, ELECTRA 1974r.
- [9] **Pedersen A.**, *Criteria for Spark Breakdown in SF<sub>6</sub>*, IEEE Trans. on Power App.a.Syst., vol Pas-89, nr.8, 1970
- [10] **Diesner A.**, *Insulation Characteristics of Industrial SF<sub>6</sub> - insulated GIS components*, CIGRE TF 15.03.10, 1999
- [11] **Christophorou L. G., Olthoff J., K.**, *Electron Interactions with Excited Atoms and Molecules*, Advances Atomic Molecular and Optical Physics, vol 44
- [12] **Massey H.**, *Zderzenia atomowe i cząsteczkowe*, PWN Warszawa 1982
- [13] **Diesner A.**, *Insulation Characteristics of Industrial SF<sub>6</sub> - Insulated GIS Components*, CIGRE Session 1986, Report 33-06
- [14] **Pecastaing L., Rees T., Espel P., Paillol J., Gibert A., Domens P.**, *High Voltage Engineering Symposium*, 22-27 August 1999 Publ. No.467
- [15] **Piemontesi M., Koenig F., Niemeyer L., Heitz C.**, *Insulation Performance of 10% SF<sub>6</sub>/90% N<sub>2</sub> mixture*, CEIDP Conference, Austin 1999
- [16] **Graf R., Boeck W.**, *Statistical Breakdown Behaviour of N<sub>2</sub> - SF<sub>6</sub> Gas Mixtures Under LI Stress*, High Voltage Engineering Symposium, 1999, Publ. No. 467.

#### AT A THRESHOLD OF UTILISING N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> MIXTURES IN DISTRIBUTION EQUIPMENT

Against the background of SF<sub>6</sub> emission from GIS and SF<sub>6</sub> circuit-breakers, results in the field of the experiments with N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> mixtures with small amount of SF<sub>6</sub> are discussed. The results indicate to the possibility of applying these mixtures in electric HV equipment where the gas fulfils exclusively the role of insulation. Application of such kind of mixtures will contribute to significant decrease in the amount of SF<sub>6</sub> used and by this - to limitation of the SF<sub>6</sub> emission to atmospheric air.