

Władysław OPYDO*
Zdzisław JUSZCZYK**

WPLYW RODZAJU MATERIAŁU ELEKTROD, TEMPERATURY I GĘSTOŚCI SZEŚCIOFLUORKU SIARKI NA JEGO WYTRZMAŁOŚĆ ELEKTRYCZNĄ

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu na wytrzymałość elektryczną SF₆ przy napięciu stałym: rodzaju materiału elektrod, temperatury, gęstości gazu oraz odstępów elektrod. Badane układy miały obydwie elektrody płaskie bądź jedną elektrodę płaską, a drugą (katodę) w kształcie pręta o średnicy 3 lub 30 mm, zakończonego półkulą. Elektrody były wykonane ze stali nierdzewnej lub aluminium. Stwierdzono, że zmiany temperatury SF₆ w zakresie od 243 K do 293 K, przy stałej gęstości SF₆, nie powodowały zmian wytrzymałości elektrycznej gazu. Ponadto, wpływ rodzaju materiału elektrod na wytrzymałość elektryczną SF₆ występował tylko w układach z polem elektrycznym jednostajnym makroskopowo i pojawiał się ze wzrostem gęstości gazu powyżej 15 kg/m³, co odpowiada ciśnieniu SF₆ około 2,5·10⁵ Pa przy temperaturze 293 K. Do opracowania matematycznych wyników badań wykorzystano program komputerowy Statistica [4].

SŁOWA KLUCZOWE: sześćciofluorek siarki, inicjowanie przeskoku, wytrzymałość elektryczna

1. WSTĘP

Sześćciofluorek siarki (SF₆) znajduje coraz szersze zastosowanie jako ośrodek gaszący łuk elektryczny w wyłącznikach wysokiego napięcia oraz jako ośrodek izolujący wysokie napięcie w generatorach elektrostatycznych, urządzeniach rentgenowskich, kondensatorach układów pomiarowych najwyższych napięć, kablach elektroenergetycznych, rozdzielnicach wysokonapięciowych osłoniętych [2] i transformatorach (niepalnych i niewybuchowych). Jest gazem elektroujemnym, to znaczy jego cząsteczki mają zdolność wiązania elektronów, co powoduje, że wytrzymałość elektryczna SF₆ jest znacznie większa od wytrzymałości elektrycznej powietrza i innych gazów. Badania właściwości elektrycznych układów izolacyjnych z SF₆ wykazały, że rodzaj materiału elektrod układu wywiera wpływ na wytrzymałość elektryczną SF₆, np. [1], [3], [5], [6], [8]. Stwierdzono, że szereg materiałów elektrodowych zestawiony zgodnie z rosnącą

* Politechnika Poznańska.

** TAURON Dystrybucja S.A., Oddział w Będzinie.

wartością napięcia przeskoku w układach z SF₆ jest taki sam, jak szereg materiałów zestawiony według rosnących wartości pracy wyjścia elektronu z materiałów elektrod tych układów [3], [8]. Wskazuje to, że na inicjowanie przeskoku w układzie z SF₆ może mieć wpływ emisja połowa elektronów z elektrody o biegunowości ujemnej układu – katody. Intensywność emisji połowej elektronów zależy, oprócz wartości natężenia pola elektrycznego przy powierzchni emitującej elektrony, od wartości pracy wyjścia elektronu z materiału powierzchni emitującej oraz od temperatury tej powierzchni. Dlatego postanowiono zbadać wpływ, na wytrzymałość elektryczną SF₆ przy napięciu stałym, następujących czynników stanu układu izolacyjnego: rodzaju materiału elektrod, temperatury, ciśnienia gazu, odstępów elektrod oraz stopnia niejednostajności makroskopowego pola elektrycznego przy katodzie.

2. OPIS STANOWISKA I METODY BADAWCZEJ

W badaniach wykorzystano cylindryczną komorę stalową, mającą podwójne ściany. Przepływ alkoholu metylowego oziębianego w urządzeniu chłodniczym między ścianami komory umożliwiał chłodzenie SF₆ oraz układu elektrod. Do pomiaru temperatur gazu i elektrod wykorzystano termopary podłączone do woltomierzy rejestrujących. Jako temperaturę odniesienia dla termopar przyjęto temperaturę 0°C uzyskiwaną z mieszaniny wody destylowanej z lodem.

Badano wytrzymałość elektryczną SF₆ w układach z obydwooma elektrodami płaskimi oraz w układach z jedną elektrodą płaską i drugą mającą kształt pręta zakończony półkulą. Elektrody płaskie były krążkami o średnicy 125 mm, których krawędzie zaokrąglono wg wzoru Rogowskiego. Natomiast elektrody prętowe miały średnice 3 mm lub 30 mm. Elektrody wykonano ze stali nierdzewnej i aluminium.

Przed umieszczeniem elektrod w komorze dokładnie je szlifowano i polerowano do lustrzanego połysku, a następnie myto acetonem, wodą destylowaną i alkoholem etylowym w płuczce ultradźwiękowej.

Konstrukcja komory umożliwiała z zewnątrz płynną regulację i pomiar odstępów międzyelektrodowego.

Przed napełnieniem komory SF₆ odpompowywano ją, za pomocą próżniowej pompy obrotowej olejowej, do ciśnienia około 1 Pa. Następnie, poprzez kolumnę z silikazelem, włączano do komory SF₆.

Badany układ izolacyjny łączyło ze źródłem wysokiego napięcia stałego za pomocą wysokonapięciowego kabla, którego pojemność łącznie z pojemnością wewnętrzną źródła wynosiła 1230 pF.

Przy badaniu układów z polem elektrycznym niejednostajnym elektrodę mającą kształt pręta łączyło z ujemnym zaciskiem źródła wysokiego napięcia.

Podczas pomiarów wytrzymałości elektrycznej napięcie podnoszono z prędkością około 0,5 kV/s.

Po zamontowaniu nowych elektrod w komorze, celem stabilizacji wartości napięcia przeskoku, układ kondycjonowano przeskokami. Proces ten polegał na wywołaniu w układzie z SF₆ o ciśnieniu 10⁵ Pa i temperaturze 293 K, dla każdego z odstępów międzyelektrodowych z przedziału 1 ÷ 10 mm, zmienianych co 1 mm, dziesięciu przeskoków kondycjonujących.

Pomiary wytrzymałości elektrycznej wykonywano w trzech niezależnych seriach pomiarowych, używając w każdej serii nowego zestawu elektrod. Przy tym w każdej serii, dla określonej wartości ciśnienia SF₆, temperatury i odstępów międzyelektrodowych mierzono wartości napięcia 6 kolejnych przeskoków.

Do opracowania matematycznego wyników badań wykorzystano program komputerowy Statistica [4]. Ponieważ stwierdzono, że wielokrotne pomiary napięcia przeskoku w badanych układach podlegają rozkładowi normalnemu, jako wartość reprezentatywną wytrzymałości elektrycznej danego układu przyjmowano średnią arytmetyczną wartości napięć przeskoku pomierzonych w trzech niezależnych seriach (sześć przeskoków w serii).

3. WYNIKI POMIARÓW I ICH OMÓWIENIE

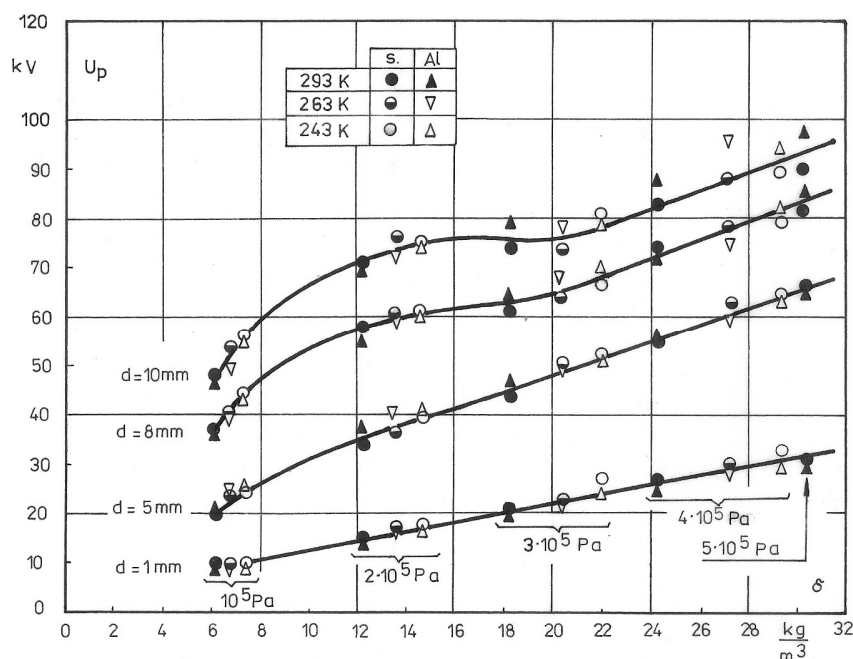
Ponieważ wytrzymałość elektryczna gazu nie zależy bezpośrednio od ciśnienia gazu, ale od jego koncentracji, gęstości [7], więc wyniki pomiarów wytrzymałości elektrycznej SF₆ zostały na rysunkach przedstawiane jako zależności od gęstości. Rysunki zawierają także informacje o wartości ciśnienia i temperaturze SF₆, przy których określony wynik został uzyskany.

Wyznaczone zależności napięcia przeskoku w SF₆ od gęstości gazu o temperaturze 243 K, 263 K i 293 K, dla układów z elektrodami wykonanymi ze stali nierdzewnej oraz aluminium, oddalonymi od siebie na odległość $d = 1, 5, 8$ i 10 mm, przedstawiono na rys. 1. Elektroda połączoną z ujemnym zaciskiem źródła wysokiego napięcia stałego był pręt o średnicy 3 mm zakończony półkulą, a elektrodą przeciwną, połączoną z dodatnim zaciskiem źródła, była płaskim krążkiem z zaokrąglonymi krawędziami.

Na rys. 1 punkty pomiarowe zależności wytrzymałości elektrycznej SF₆ od gęstości gazu, pomierzone przy różnych temperaturach (243 K, 263 K i 293 K), dla układów z elektrodami wykonanymi ze stali nierdzewnej bądź aluminium, układają się w istocie na tych samych charakterystykach. Można zatem stwierdzić, że zmiany zarówno rodzaju materiału elektrod (stal nierdzewna, aluminium) jak i temperatury (w zakresie 243 ÷ 293 K), przy stałej gęstości SF₆, nie powodowały zmian wytrzymałości elektrycznej badanych układów.

Na rys. 2 przedstawiono zależności wytrzymałości elektrycznej SF₆ o temperaturze 293 K od gęstości gazu, dla układów izolacyjnych, które miały

elektrody wykonane ze stali nierdzewnej bądź aluminium, oddalone od siebie na odległość $d = 1, 3, 5, 8$ lub 10 mm. Elektroda połączoną z ujemnym zaciskiem źródła wysokiego napięcia był pręt o średnicy 30 mm zakończony półkulą. Przeciwległą elektrodą, połączoną z dodatnim zaciskiem źródła, była płaskim krążkiem z zaokrąglonymi krawędziami.

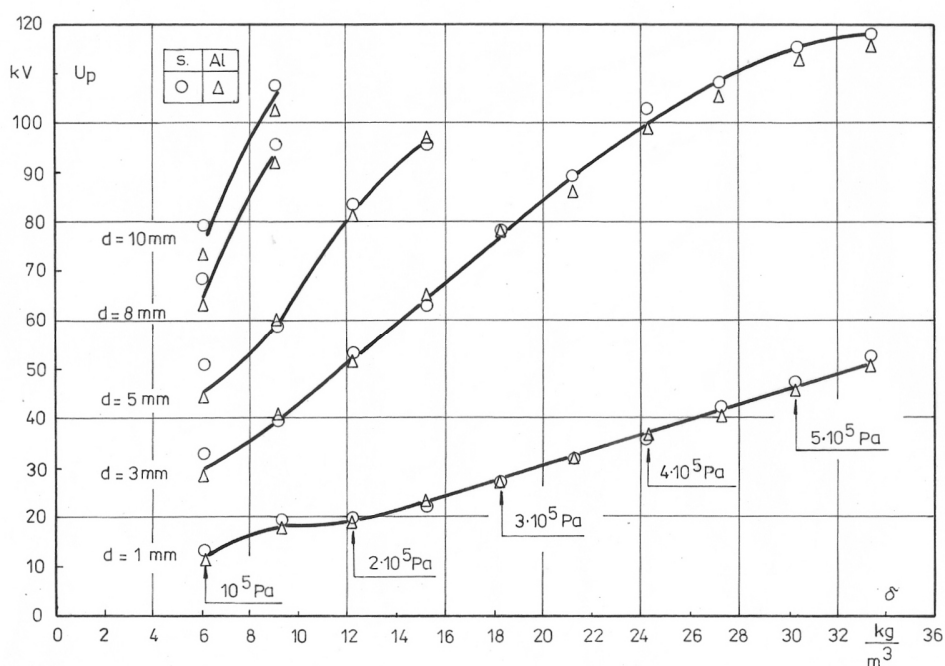


Rys. 1. Zależność napięcia przeskoku w SF_6 od gęstości gazu o temperaturze 243 K, 263 K i 293 K, dla układów z różnymi odstępami elektrod (d); badane układy miały elektrody wykonane ze stali nierdzewnej lub aluminium, elektrodą o biegunowości ujemnej był pręt o średnicy 3 mm zakończony półkulą, a elektroda o biegunowości dodatniej miała kształt krążka o średnicy 125 mm z krawędziami zaokrąglonymi wg wzoru Rogowskiego

Z rys. 2 wynika, że pomiary wytrzymałości elektrycznej układów z SF_6 z elektrodami wykonanymi ze stali nierdzewnej, pokrywają się w istocie z wynikami pomiarów układów z elektrodami aluminiowymi. Można zatem stwierdzić, że także w układach, w których znacznie zmniejszono stopień niejednorodności makroskopowego pola elektrycznego przy katodzie, przez zwiększenie średnicy elektrody prętowej, mającej półkuliste zakończenie, z 3 mm do 30 mm, rodzaj materiału elektrod na wpływ na wytrzymałość elektryczną SF_6 . Jednocześnie, to zmniejszenie stopnia niejednorodności pola elektrycznego, spowodowało znaczny wzrost wytrzymałości elektrycznej układów.

Na rys. 3 przedstawiono zależności wytrzymałości elektrycznej SF_6 od gęstości gazu o temperaturze 243 K, 263 K i 293 K, dla układów z obydwoma elektrodami

płaskimi, mającymi kształt krążków z zaokrąglonymi krawędziami, wykonanymi ze stali nierdzewnej bądź aluminium. Odstęp elektrod wynosił $d = 1, 2, 3$ lub 5 mm.

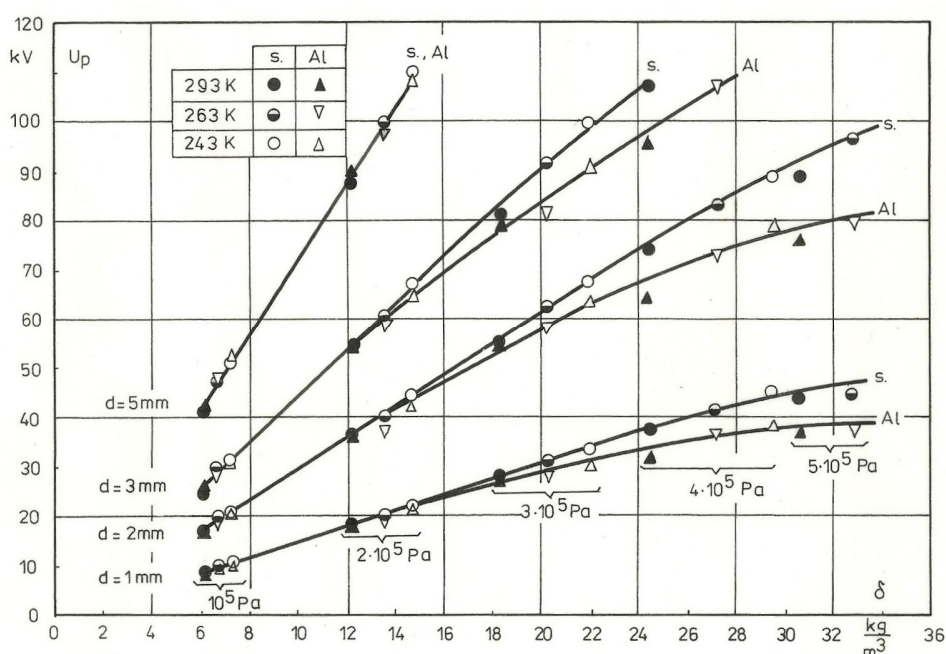


Rys. 2. Zależność napięcia przeskoku w SF_6 od gęstości gazu o temperaturze 293 K, dla układów z różnymi odstępami elektrod (d); badane układy miały elektrody wykonane ze stali nierdzewnej lub aluminium, elektrodą o biegunowości ujemnej był pręt o średnicy 30 mm zakończony półkulą, a elektrodą o biegunowości dodatniej miała kształt krążka o średnicy 125 mm z krawędziami zaokrąglonymi wg wzoru Rogowskiego

Wyniki pomiarów przedstawione na rys. 3 wykazują, że zmiana temperatury SF_6 w zakresie od 243 K do 293 K, przy stałej gęstości gazu, praktycznie nie wpływa na wytrzymałość elektryczną zarówno układów z elektrodami wykonanymi ze stali nierdzewnej jak i z aluminium. Z rys. 3 wynika także, że ze wzrostem gęstości SF_6 , powyżej 15 kg/m^3 (co odpowiada przy temperaturze 293 K ciśnieniu SF_6 około $2,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) pojawia się, i ze wzrostem gęstości gazu staje się coraz silniejszy, wpływ rodzaju materiału elektrod na wytrzymałość elektryczną. Przy tym układy izolacyjne z elektrodami wykonanymi ze stali nierdzewnej miały większą wytrzymałość elektryczną, od wytrzymałości elektrycznej analogicznych układów z elektrodami aluminiowymi.

Porównując wyniki badań przedstawionymi na rys. 1 i 2 z wynikami z rys. 3 można stwierdzić, że wpływ rodzaju materiału elektrod na wytrzymałość elektryczną SF_6 występował tylko w układach z polem elektrycznym

makroskopowo jednostajnym (rys. 3). Nawet stosunkowo niewielkie zwiększenie stopnia niejednorodności makroskopowego pola elektrycznego przy katodzie powodowało, że wpływ rodzaju materiału elektrod na wytrzymałość elektryczną zanikał (rys. 2). Ponadto zwiększenie stopnia niejednorodności makroskopowego pola elektrycznego, przez zastąpienie płaskiej katody elektrodą prętową o średnicy 30 mm zakończoną półkulą, praktycznie nie powodowało obniżenia wytrzymałości elektrycznej układu (rys. 3 i rys. 2).



Rys. 3. Zależność napięcia przeskoku w SF₆ od gęstości gazu o temperaturze 243 K, 263 K i 293 K, dla układów z różnymi odstępami elektrod (d); badane układy miały elektrody płaskie o kształcie krążka o średnicy 125 mm z krawędziami zaokrąglonymi wg wzoru Rogowskiego i były wykonane ze stali nierdzewnej lub z aluminium

Natomiast, zastąpienie płaskiej katody, elektrodą prętową o średnicy 3 mm zakończoną półkulą, prowadziło już do obniżenia wytrzymałości elektrycznej. Przy tym obniżenie to było względnie (procentowo) tym większe, im większy był odstęp elektrod (rys. 1 oraz rys. 2 i rys. 3 dla porównania).

Interpretacja fizyczna wyników tych badań jest trudna. Problemem jest już np. samo przyjęcie rodzaju mechanizmu inicjowania przeskoku w badanych układach izolacyjnych. Wynika to z faktu, że wartości iloczynu ciśnienia i odległości elektrod ($p \cdot d$), obliczone dla warunków, w których przeprowadzono badania, tworzą zbiór wartości zbliżonych do 10^5 Pa·cm. Ta wartość jest górną granicą występowania

mechanizmu Townsenda i dolną granicą odmiany strimerowej mechanizmu kanałowego [7], [9].

Wydaje się, że punktem wyjścia do interpretacji fizycznej otrzymanych wyników może być założenie, że w badanych układach z polem makroskopowo jednostajnym przeskoczyć był inicjowany przez mechanizm Townsenda. Wg tego mechanizmu wolne elektrony w przestrzeni międzyelektrodowej przyspieszone przez pole elektryczne powodują jonizację zderzeniową cząsteczek gazu, tworząc jony dodatnie. Ponieważ SF₆ jest gazem elektroujemnym to intensywność tej jonizacji jest ograniczone przez zjawisko wiązania (przechwytu) wolnych elektronów przez cząsteczki gazu i tworzenie jonów ujemnych.

Powstałe jony dodatnie przyspieszają w polu elektrycznym, bombardują katodę i wyzwala ją z niej elektrony w wyniku emisji wtórnej jonowo-elektronowej. Bombardowanie to powoduje także miejscowy wzrost temperatury katody spowodowany zamianą przynajmniej części energii kinetycznej jonów bombardujących w ciepło. Wzrost temperatury katody pobudza cieplnie elektrony metalu i aktywuje emisję polową elektronów z któregoś z podgrzanych mikrostrzy katody. Intensywność tej emisji polowej zależy od pracy wyjścia elektronu z materiału powierzchni katody [6], [7]. Przy tym materiał charakteryzujący się mniejszą wartością pracy wyjścia elektronu emituje, w tych samych warunkach, wiązkę elektronową o większej gęstości. Elektrony emitowane wskutek aktywowanej emisji polowej wspomagają inicjowanie wyładowania.

Ponieważ do wystąpienia emisji polowej elektronów konieczne jest silne pole elektryczne, więc emisja polowa elektronów występuje przy znacznych wartościach natężenia pola elektrycznego. Dlatego wpływ rodzaju materiału katody na wytrzymałość elektryczną SF₆ występuje przy wartościach natężenia pola elektrycznego makroskopowego większych od 20 ÷ 25 kV/mm. Przy tym szereg układów izolacyjnych z SF₆, ułożony zgodnie z rosnącą wartością ich wytrzymałości elektrycznej, jest zgodny z analogicznym szeregiem układów, zestawionym zgodnie z rosnącą wartością pracy wyjścia elektronu z materiałów katod tych układów.

W układzie z polem jednostajnym makroskopowo elektrony emitowane z katody wskutek emisji wtórnej jonowo-elektronowej oraz emisji polowej przyspieszają pod wpływem pola elektrycznego w kierunku obszaru przestrzeni międzyelektrodowej, z którego pochodziły jony dodatnie bombardujące katodę. Powoduje to zwiększenie liczby elektronów w tworzącej się tam lawinie elektronowej i wspomaga rozwój wyładowania.

Natomiast, w przypadku układu z polem elektrycznym makroskopowo niejednostajnym przy katodzie (katoda w kształcie pręta zakończony półkulą, anoda płaska) prawdopodobieństwo, że elektrony emitowane z katody wskutek emisji wtórnej jonowo-elektronowej oraz emisji polowej, w takim rozkładzie pola

elektrycznego, trafią do obszaru przestrzeni międzyelektrodowej, z którego pochodziły jony dodatnie bombardujące katodę, jest bardzo małe.

Zatem formująca się lawina elektronowa, w układzie z polem elektrycznym makroskopowo niejednostajnym przy katodzie, w zasadzie nie jest „zasilana” elektronami z katody, w odróżnieniu od lawiny formującej się w układzie z polem elektrycznym makroskopowo jednostajnym. Utrudnia to inicjowanie wyładowania mechanizmowi Townsenda i do przeskoku dochodzi w wyniku strimerowej odmiany mechanizmu kanałowego. W strimerowej odmianie mechanizmu kanałowego elektrony emitowane z katody nie odgrywają znaczącej roli w procesie inicjowania przeskoku. Dlatego w badanych układach z polem makroskopowo niejednostajnym rodzaj materiału katody nie wpływał na wytrzymałość elektryczną.

Ta zmiana rodzaju mechanizmu inicjowania przeskoku, spowodowana zmianą rozkładu makroskopowego pola elektrycznego, z rozkładu jednostajnego na umiarkowanie niejednostajny, wyjaśnia dlaczego wytrzymałość układów z polem umiarkowanie niejednostajnym makroskopowo przy katodzie nie zależy od rodzaju materiału katody (rys. 2) i jest prawie równa wytrzymałości elektrycznej układów z polem elektrycznym makroskopowo jednostajnym (rys. 3).

4. WNIOSKI

Z pracy wynikają następujące wnioski istotne dla konstruktorów urządzeń elektroenergetycznych, którzy zamierzają wykorzystywać SF₆ jako wysokonapięciową izolację:

1. Zmiany temperatury SF₆ w zakresie od 243 K do 293 K, przy stałej gęstości SF₆, w zasadzie nie powodowały zmian wytrzymałości elektrycznej gazu.
2. Wpływ rodzaju materiału elektrod na wytrzymałość elektryczną SF₆ występował tylko w układach z polem elektrycznym jednostajnym makroskopowo. Pojawiał się on ze wzrostem gęstości gazu powyżej 15 kg/m³ (co odpowiada ciśnieniu SF₆ o temperaturze 293 K około 2,5·10⁵ Pa), przy naprężeniach przeskoku przekraczających 20 kV/mm i stawał się coraz silniejszy ze wzrostem gęstości SF₆. Przy tym układy izolacyjne z elektrodami wykonanymi ze stali nierdzewnej miały większą wytrzymałość elektryczną od wytrzymałości elektrycznej układów z elektrodami aluminiowymi.
3. Nawet stosunkowo mała zmiana makroskopowego rozkładu pola elektrycznego przy katodzie, z jednostajnego na umiarkowanie niejednostajny, tj. zastąpienie płaskiej katody elektrodą w kształcie pręta o średnicy 30 mm zakończonego półkulą, powodowała, że zanikał wpływ rodzaju materiału elektrod na wytrzymałość elektryczną SF₆. Przy czym ta zmiana nie powodowała praktycznie zmniejszenia wytrzymałości elektrycznej.

LITERATURA

- [1] Cookson A. H., Electrical breakdown for uniform fields in compressed gases, Proc. IEE, 1970, t. 117, s. 269.
- [2] Knothe S., Rozdzielnice wysokonapięciowe izolowane, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1976.
- [3] Kuffel E., Opydo W., Wpływ materiału elektrod i temperatury na wytrzymałość elektryczną sześćciufluorku siarki w polu jednostajnym, Archiwum Elektrotechniki, 1980, t. 29, s. 841.
- [4] Lesińska E., Statistica Pl, StatSoft Polska, Kraków 1997.
- [5] Luxa G., Opperman G., Vigreux J., Paschen curve for sulphur hexafluoride, Electra, CIGRE, 1974, nr 32, s. 75.
- [6] Opydo W., Problemy wysokonapięciowej izolacji próżniowej, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997.
- [7] Opydo W., Właściwości gazowych i próżniowych wysokonapięciowych układów izolacyjnych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2008.
- [8] Opydo W., Opydo J., Porównanie właściwości elektroizolacyjnych próżni i sześćciufluorku siarki, Archiwum Elektrotechniki, 1994, t. 43, s. 403.
- [9] Wieland A., Gasdurchlagmechanismen in elektronegativen Gasen (SF₆) und in Gasgemischen, Elektrotechnischen Zeitschrift, 1973, A. 94, nr 7, s. 370.

EFFECT OF ELECTRODE MATERIAL, TEMPERATURE AND SULFUR HEXAFLUORIDE DENSITY ON ITS ELECTRIC STRENGTH

The paper presents results of the study on the effects of electrode material, temperature, gas density and electrode separation on SF₆ electric strength under constant voltage. Tested systems consisted of two plane electrodes or one plane electrode and the second one (cathode) rod-shaped, 3 or 30 mm diameter, tipped with hemisphere. Electrodes were made of stainless-steel or aluminum. The results revealed that SF₆ temperature variations within the range of 243 K to 293 K, under stable SF₆ density, did not result in changes of electric strength of the gas. Moreover, effect of electrode material on SF₆ electric strength was observed only in systems with macroscopically uniform field and appeared with the increasing density of gas in system, exceeding 15 kg/m³, which corresponds to SF₆ pressure of approximately $2,5 \cdot 10^5$ Pa, at the temperature of 293 K. Statistica [3] software was used for mathematical analysis of the results.