



Adam Tymań*, Frank Y. Chu**, Jean M. Braun**

ZMIANY NA POWIERZCHNI IZOLATORA STACJI SF₆ 500 kV POD WPŁYWEM NISKOENERGETYCZNYCH WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Streszczenie: Przedstawiono wyniki badań oddziaływania niskoenergetycznych wyładowań elektrycznych na degradację własności powierzchni izolatorów epoksydowych. Wyładowania niepełne (WN) wytwarzano nad próbką umieszczoną w płaskim układzie elektrod z wysokim lokalnym polem elektrycznym. Próbki wycięto z dwóch izolatorów stacyjnych różniących się rodzajem napełniacza. Powierzchnie próbek po narażeniach poddano badaniom i analizom chemicznym. Wyniki pokazały, że powstałe pod wpływem WN produkty rozkładu SF₆ oraz zmiany na powierzchni próbek są charakterystyczne dla niskoenergetycznych wyładowań elektrycznych. Przy długotrwałym oddziaływaniu wyładowań na powierzchni próbek rozwinął się wyraźny ślad pełzny. Taki mechanizm niszczenia może być odpowiedzialny za występujące w praktyce uszkodzenia izolatorów w przypadku np. obłuzowania się ekranów na izolatorach stacji SF₆.

Słowa kluczowe: sześćsiofluorek siarki, wyładowania niepełne, izolator, ślad pełzny, żywica epoksydowa

1. Wstęp

Wysoka niezawodność gazowych układów izolacyjnych SF₆ jest określana nie tylko własnościami samego gazu, dokładnością wykonania kształtu i powierzchni elektrod, jakością montażu i kontroli ale również w bardzo wysokim stopniu niezbędnymi

* Politechnika Wroclawska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

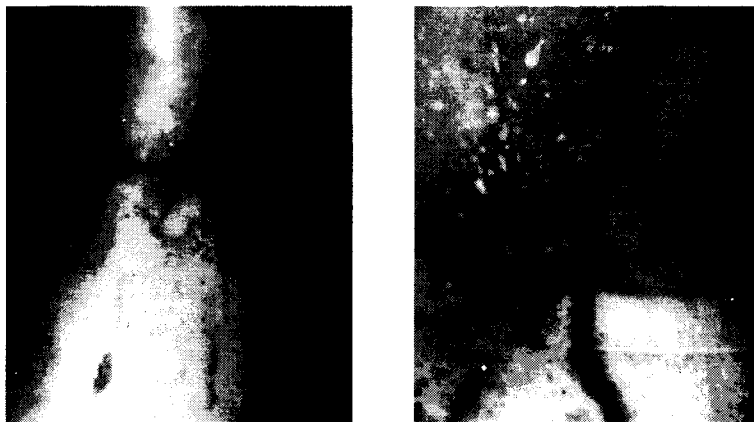
** Ontario Hydro, Research Division, Toronto, Canada

w konstrukcjach praktycznych izolatorami. Konieczność stosowania izolatorów obniża wytrzymałość elektryczną do około 50% jej wartości teoretycznej [1]. Oprócz zadania izolacji elektrycznej służą one do podtrzymania żyły (przewodnika), elementów wyłączników, tworzą szczelne bariery, przenoszą ruch na elementach ruchomych. W zależności od podstawowego przeznaczenia izolatory (najczęściej epoksydowe) posiadają różne kształty: dyskowe, stożkowe, pręty i inne [2]. Izolatory wpływają na zniekształcenie rozkładu pola elektrycznego, wtórną emisję powierzchniową, gromadzenie się na ich powierzchni cząstek zanieczyszczeń oraz ładunków powierzchniowych. Ponieważ izolatory epoksydowe są jednym z najbardziej krytycznych elementów konstrukcji stacji i wyłączników gazowych musi być zapewniona nie tylko wysoka jakość ich produkcji ale również duża dokładność oceny ich wykonania. Ze względu na przewidywany 50 letni okres życia dla wysokonapięciowych urządzeń SF₆ [3], zwraca się bardzo uwagę, szczególnie na instalacjach ultra wysokich napięć (500 kV), na możliwość stwierdzenia niedoskonałości objętościowych (drobne cząstki metaliczne, pęcherze). Defekty te są odpowiedzialne za trwałość i przedwczesne uszkodzenia nawet gdy ich obecność jest poniżej poziomu detekcji ≤ 1 pC [4]. Trudność oceny trwałości wynika tutaj z dość jeszcze krótkiego okresu pracy instalacji na tym poziomie napięciowym. Niemniej już w pierwszym dziesięcioleciu ich pracy miało miejsce szereg wyłączeń spowodowanych uszkodzeniami izolatorów po wystąpieniu na nich przeskoku powierzchniowego. Przeskok taki może wystąpić już w trakcie montażu instalacji podczas prób napięciowych lub w okresie pracy. Może on być inicjowany cząstkami zanieczyszczeń lub w wyniku lokalnego wzrostu pola elektrycznego w miejscu mocowania izolatora [5].

1.1. Motywacja badań

Po awarii wyłącznika na jednej ze stacji SF₆ (Ontario Hydro) ustalono, że najbardziej prawdopodobną przyczyną uszkodzenia było powstanie, w okresie kilkuletniej pracy, śladu pełnego w wyniku oddziaływania (WN). Wyładowania te rozwijały się w pobliżu ekranu wyrównującego potencjał przy mniejszej średnicy izolatora stożkowego. Po demontażu izolatora stwierdzono ślad pełny w którym znaczna ilość żywicy epoksydowej uległa erozji. Obszar erozji oraz rozmiary kanału śladu pełnego wskazywały, że powstał on w wyniku wyładowań niskoenergetycznych. Został on zainicjowany w miejscu gdzie ekran jest mocowany do izolatora od strony żyły, rys. 1. Ślad pełny rozwijał się pod ekranem a potem wzdłuż powierzchni izolatora, obniżając na tyle jego wytrzymałość powierzchniową, że przypadkowe nawet niezbyt wysokie przepięcie mogło spowodować przeskok wzdłuż powierzchni izolatora. Taki scenariusz niszczenia powierzchni mógł mieć miejsce gdy wadliwie zamocowany ekran utracił kontakt elektryczny z żyłą np. wskutek korozji aluminium spowodowanej oddziaływaniem produktów rozkładu SF₆. W celu potwierdzenia tych przypuszczeń założono wykonanie badań na próbkach wyciętych z rzeczywistych izolatorów stosowanych na tej stacji. Były one wykonane z bisfenolowej żywicy z napełniaczem SiO₂ lub Al₂O₃. Wykonano badania długotrwałego oddziaływania niskiego poziomu produktów rozkładu SF₆ (100 ppm HF) na powierzchniową wytrzymałość przy napięciu udarowym, wpływu kolejnych przeskoków (oddziaływanie kanału iskry) na tą wytrzymałość oraz badania degradacji powierzchni badanych materiałów pod wpływem niskoenerge-

tycznych (WN). Wyniki badań wytrzymałości udarowej przedstawiono w [6, 7, 8], pokazały one, że materiał z Al_2O_3 obniża nieznacznie wytrzymałość impulsową po narażeniu HF ($4 \cdot 10^3$ h) natomiast na materiale z SiO_2 powstały pęcherze zawierające materiał elektrolityczny powodujący znaczne obniżenie wytrzymałości powierzchniowej. Narażenie kolejnymi przeskokami było natomiast silniejsze dla materiału z Al_2O_3 , dlatego badane izolatory z tym napełniaczem wykonane tą technologią nie powinny być stosowane w miejscach zwiększonego ryzyka wystąpienia przeskoków [5, 9].



Rys. 1. Śląd pełzny na uszkodzonym izolatorze stacji SF_6 500 kV

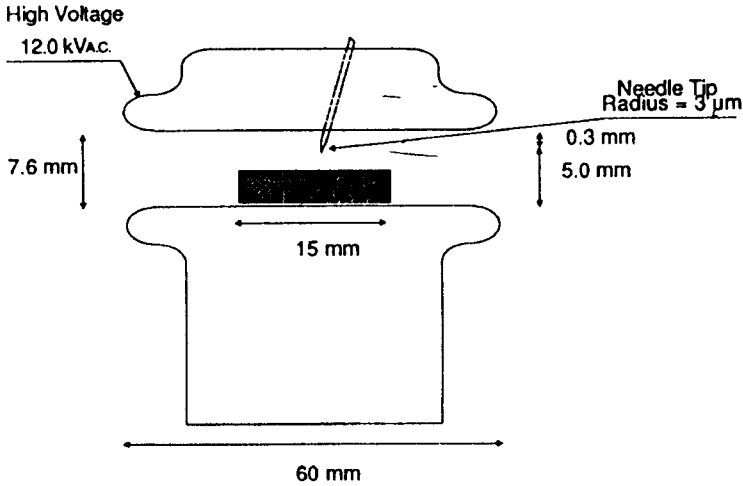
Literaturowa definicja śladu pełnego mówi, że: „śląd pełny powstanie jeżeli pęknięcia najsłabszych wiązań spowoduje powstanie lotnych produktów rozkładu materiału a pozostałe elementy struktury zawierają niewysyczone wiązania lub ich pęknięcia tworzące stabilne wolne rodniki, które charakteryzują się własnościami przewodzącymi lub mogą rekombinować dając struktury podobne do grafitu” [10].

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań możliwości rozwoju śladu pełnego na obu materiałach w wyniku miejscowego, skoncentrowanego oddziaływania (WN).

2. Układ badawczy

Efekt oddziaływania niskoenergetycznych wyładowań elektrycznych na degradację własności powierzchni badano w układzie elektrod przedstawionym na rysunku 2. Próbki z badanych materiałów o grubości 5 mm były umieszczane na dolnej elektrodzie w płaskim układzie elektrod. W górnej wysokonapięciowej elektrodzie umieszczano igły o promieniu ostrza 3 mm; odległość do próbki wynosiła 0,3 mm. Elektrody i próbki umieszczano w komorach napełnianych SF_6 (135 kPa). Napięcie przemienne 60 Hz podnoszono do momentu pojawienia się przy ostrzu (WN) o wartości 1,5 pC. Przy tej wartości przy ostrzu pojawiały się bardzo słabe wyładowania świetlące co stwierdzano za pomocą specjalnej konstrukcji mikroskopu (long distance microscop).

Aparatura pomiarowa umożliwiała ponadto pomiar amplitudy i liczby wyładowań w zadanych przedziałach czasowych oraz ich komputerową rejestrację.

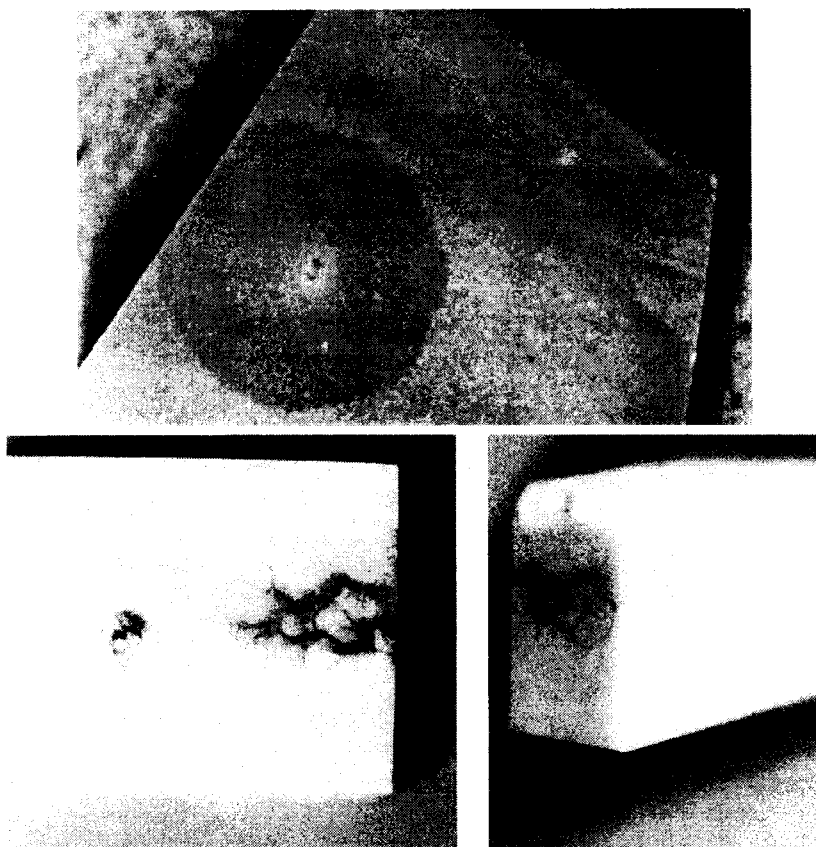


Rys. 2. Schemat układu elektrod

3. Wyniki badań

Wyniki badań pokazały, że charakterystyki (WN) silniej zmieniają się w funkcji czasu dla badań w SF_6 aniżeli w porównawczych badaniach dla suchego powietrza. Oddziaływania produktów rozkładu gazowych i stałych, bombardowanie elektronami oraz modyfikacja powierzchni materiału próbek musiała lokalnie zmieniać wartości natężenia pola elektrycznego. Po kilkudziesięciu godzinach oddziaływania (WN) na powierzchni próbek pojawiała się kropla cieczy, tuż pod igłą oraz zmieniał się kolor powierzchni. Analiza mikroskopowa (SEM), rentgenowska i ESCA powstałych kropli wykazała, że są to roztwory wodne fluorku siarczanu zawierające śladowe ilości jonów żelaza. Obszary zabarwione i czyste zawierały również wysoką atomową koncentrację fluoru i siarki. Obecność żelaza jest dowodem przenoszenia cząstek metalicznych z ostrza igły i reakcji z produktami rozkładu SF_6 . Analiza chemiczna gazu w komorach badawczych wykazała oprócz obecności SOF_2 i SO_2F_2 również CF_4 co świadczy o reakcji i niszczeniu żywicy epoksydowej. Zmiany chemiczne na powierzchni powodują zmiany własności elektrycznych, rezystywności [9] i powierzchniowej wytrzymałości elektrycznej [6, 7, 8]. Po dłuższym 300–500 godzinnym starzeniu (WN) na powierzchni próbek powstał ślad pełzny, rys. 3.

Pomimo, tego że w badaniach tych zostało jeszcze wiele zagadnień wymagających dalszych badań, stwierdzono silne oddziaływanie nawet słabych wyładowań na materiał izolatorów epoksydowych zastosowanych w niektórych rozdzielniach SF_6 .



Rys. 3. *Modyfikacja powierzchni próbki z napętniaczem SiO_2 oraz ślad pełzny na próbce z napętniaczem Al_2O_3 po dłuższym okresie oddziaływania wyładowań niezupełnych*

4. Wnioski

Powierzchnia materiału izolatorów stosowanych w rozdzielniach SF_6 narażona na niskoenergetyczne wyładowania elektryczne podlega pewnym modyfikacjom morfologicznym i chemicznym wskutek oddziaływania produktów rozkładu i bombardowania elektronami i jonami. Oddziaływanie to powoduje zmiany barwy powierzchni, odkładanie się na niej związków fluoru, siarki i cząstek metalicznych. Erozja powierzchni w konsekwencji prowadzi do rozwoju śladu pełnego co w przypadku rzeczywistych izolatorów może w długim okresie czasu powodować wyładowanie zupełne niszczące izolator.

Literatura

- [1] **Trinh G. N.**: *Failure mechanisms of Gas Insulation and at Gas-Insulated Equipment*, Gaseous Dielectrics VI, Plenum Press, N.Y., 1991, pp. 517-528
- [2] **Cockson A. H.**: *Review of High Voltage Gas Breakdown and Insulators in Compressed Gases*, Sixth Intern. Conf. on Gas Discharges and Their Applications, Review Lectures, pp. 21-43
- [3] **Diesner A., Luxa G., Neyer W.**: *Electrical Aging Tests on Epoxy Insulators in GIS*, IEEE Trans. on Electr. Insulat., vol. 24, No. 2, 1989, pp. 277-283
- [4] **Braun J. M., Ford G. L., Fujimoto N., Rizzetto S., Stone G. C.**: *Reliability of GIS EHV Epoxy Insulators: The Need and Prospects for more Stringen, Acceptance Criteria*, IEEE Trans. on Power Delivery, vol .8, No. 1, 1993, pp. 121-131
- [5] **Boggs S. A., Chu F. Y., Fujimoto N.**: *Gas Insulated Substations, Technology and Practise*, Pergamon Press, 1986
- [6] **Chu F. Y., Braun J. M., Tyman A., Susnik M.**: *Impulse Voltage Withstand of Epoxy Spacers After Long Term Exposure to SF₆ Arc Byproducts*, Sixth Intern. Symp. High Voltage Eng., New Orleans, 1989
- [7] **Braun J. M., Chu F. Y., Tyman A.**: *Studies of Epoxy Spacers Subjected to Internal and External Partial Discharge and SF₆ Byproducts*, Proceed. of the 3rd Intern. Conf. And Breakdown in Solid Dielectrics, Trondheim, Norway, 1989
- [8] **Tymań A.**: *Badanie izolatorów epoksydowych narażonych na wyładowania niezupetne i produkty rozkładu SF₆*, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznanskiej, Elektryka Nr 42, Inżynieria Wysokich Napięć — IW 92, 1992, s. 25-28
- [9] **Chu F. Y.**: *SF₆ Decomposition in Gas-Insulated Equipment*, IEEE Trans. on Electr. Insulat.. E-I 21, No. 5, 1986, pp. 683-725
- [10] **Bilings M. J., Smith A.**: *Tracking in Polymeric Insulation*, IEEE Trans. on Electr. Insulat. , E-I-2, No. 3, 1967, pp. 131-137

SURFACE DEGRADATION OF 500 kV SF₆ STATION INSULATOR CAUSED
BY LOW ENERGY PARTIAL DISCHARGES

The effects of low energy PD on dielectric surface degradation of filled epoxy resin insulators have been investigated. The obtained results indicated that insulators surface suffer morphology and chemical modification. The action of PD caused surface discoloration the deposition of byproducts. At final stage a track developed on the surface.