



Barbara FLORKOWSKA, Paweł ZYDRŃ

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki

Analiza form wyładowań niezupełnych w układzie izolacyjnym z SF₆ dla celów diagnostyki GIS

Streszczenie. Artykuł dotyczy problemów diagnostyki rozdzielnic gazowych z SF₆. Przedstawiono zastosowanie metody rejestracji obrazów fazowo-rozdzielczych wyładowań niezupełnych (wnz) inicjowanych w SF₆ w obecności defektów modelujących typowe warunki ich występowania w gazowych układach izolacyjnych.

Abstract. (Analysis of partial discharge forms in SF₆ for diagnostics of GIS). The application of phase-resolved partial discharge (PD) patterns for diagnostics of gas insulated substations was described. Results of measurements carried out on insulating system in presence of typical defects have been presented. The PD patterns show correlation with different kinds of defects.

Słowa kluczowe: gazowe układy izolacyjne, sześćsiofluorek siarki SF₆, wyładowania niezupełne, obrazy fazowo-rozdzielcze wnz.
Keywords: gas insulation systems, sulphur hexafluoride SF₆, partial discharges (PD), phase resolved patterns of PD.

Wstęp

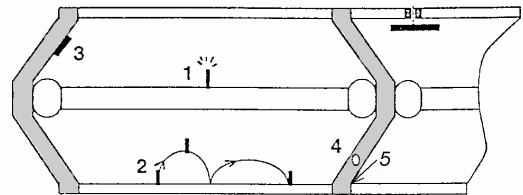
Gazowe układy izolacyjne GIS (Gas Insulated Systems) z sześćsiofluorkiem siarki SF₆ jako medium izolacyjnym, eksploatowane są w Polsce od przeszło 40 lat, przy czym są to przeważnie rozdzielnice na napięcie średnie. Na podstawie wieloletnich badań dla oceny ich awaryjności prowadzonych w licznych ośrodkach na świecie, stwierdzono, że niezawodność rozdzielnic można uznać za zadowalającą tylko dla napięć znamionowych do 145 kV, natomiast dla napięć wyższych jest ona zbyt niska [1].

Równocześnie główny kierunek zastosowań rozdzielnic gazowych w energetyce dotyczy napięć wysokich i najwyższych. Z tego powodu prowadzone są badania nad opracowaniem metod diagnostycznych, w tym metod monitorowania wyładowań niezupełnych, z możliwością detekcji sygnałów o bardzo małej amplitudzie. Oceniając awaryjność rozdzielnic gazowych na podstawie liczby zwarć doziemnych pól rozdzielczych w określonym czasie, oraz przyjmując ustaloną przez CIGRE [10] krytyczną awaryjność rozdzielnic równą 0,1 uszkodzeń na 100 pól rozdzielczych na rok, z ankiety awaryjności wynika, że średni poziom awaryjności jest około dziewięć razy większy od poziomu krytycznego. W przypadku napięć najwyższych może być nawet kilkaset razy większy.

Sześćsiofluorek siarki praktycznie nie ulega procesom degradacji w eksploatacji przy roboczym natężeniu pola elektrycznego, jeżeli nie występują w nim wyładowania niezupełne. Procesom tym nie ulega również materiał izolatorów, gdy nie ma w nim zanieczyszczeń oraz inkluzji gazowych, stanowiących ośrodki wyładowań niezupełnych. Zagrożenie od wyładowań niezupełnych jest jednak realne i ma istotne znaczenie dla eksploatacji rozdzielnic gazowych. Przyczyną rozwoju wyładowań niezupełnych są nierówności powierzchni elementów konstrukcyjnych, różnego rodzaju defekty oraz śladowe zawartości wody i tlenu.

Defekty w konstrukcjach rozdzielnic gazowych

Wytrzymałość elektryczną izolacji rozdzielnic ograniczają zjawiska wyładowań niezupełnych, których źródła stanowią defekty w elementach konstrukcji rozdzielnic. Można wyodrębnić „stabilne” źródła wyładowań albo „dynamiczne” utworzone przez swobodne cząstki przewodzące, wędrujące w objętości gazu lub po powierzchni elementów przewodzących i izolatorów (rys.1)



Rys.1. Przykłady defektów w module rozdzielni: 1 – mikroostrza na szynie prądowej, 2 – swobodne cząstki, 3 – cząstki przewodzące (zanieczyszczenia) na powierzchni izolatora, 4 – inkluzja gazowa w żywicy, 5 – cząstka w „punkcie potrójnym”.

Podstawowe rodzaje defektów stanowią:

- mikroostrza na powierzchni szyny wysokonapięciowej i/lub na obudowie rozdzielni,
- cząstki „wędrujące” w objętości gazu (mikroopiłki, zanieczyszczenia) zlokalizowane na nieustalonym potencjale,
- przewodzące cząstki osadzone na powierzchni izolatora,
- wtrąciny gazowe w izolacji stałej (żywicy epoksydowej) izolatorów odstępnikowych.

Wspólną cechą wymienionych defektów jest ich wpływ na rozkład natężenia pola elektrycznego w układzie izolacyjnym w konstrukcji rozdzielni, przy czym mogą one stwarzać warunki dla lokalnego silnego pola elektrycznego, przekraczającego natężenie początkowe wyładowań niezupełnych. Wzmocnienie pola elektrycznego w otoczeniu defektu o dużej krzywiznie powoduje zwiększenie współczynnika jonizacji zderzeniowej elektronowej α [2], co może spowodować rozkład chemiczny gazu i zmniejszenie jego wytrzymałości elektrycznej.

Według Kołtunowicza [1]: z punktu widzenia koordynacji izolacji każdy defekt, którego cechy wskazują na możliwość wywołania przeskoku zarówno w czasie prób pomontażowych, jak i w czasie eksploatacji rozdzielni, należy uznać za krytyczny, gdyż powoduje on obniżenie napięcia wytrzymywanego przez izolację rozdzielni poniżej napięcia koordynacyjnego. Napięcie koordynacyjne [11] stanowi najniższa wartość napięcia wytrzymywanego przez rozdzielnicę w przyjętym czasie jej pracy w układzie elektroenergetycznym.

Szczególne zagrożenie w gazowych systemach izolacyjnych z SF₆ stwarzają przepięcia. W obecności mikroostrzy przepięcia mogą zapoczątkować wyładowania,

a ich efektem jest dekompozycja gazu z wytworzeniem cząsteczek naładowanych i dalszy rozwój wyładowania zmieniający stan fizyczny gazu.

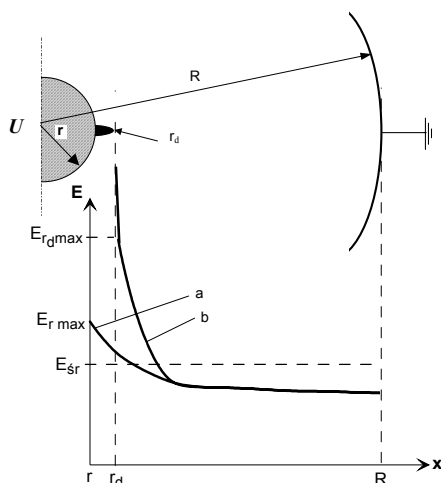
Wyniki badań wpływu długości mikroostrzy na szynie przewodzącej na wartość napięcia przeskoku przy napięciu przemennym, standardowych udarach piorunowych i standardowych udarach łączeniowych [1] wykazały, iż przy każdym z wymienionych napięć możliwe jest zidentyfikowanie rodzaju defektu na podstawie wartości napięcia przeskoku. Stwierdzenie obniżenia napięcia przeskoku w obecności mikroostrzy jest możliwe jednak tylko w warunkach pomontażowych prób napięciowych rozdzielnic. Natomiast w eksploatacji – podstawowym kryterium wytrzymałości elektrycznej jej układu izolacyjnego, a więc kryterium diagnostycznym - jest pomiar wyładowań niezupełnych.

Podstawowe cele w diagnostyce gazowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia opartej, na pomiarach wyładowań niezupełnych, to: określenie intensywności wyładowań niezupełnych z uwzględnieniem obecności szumów i zakłóceń, identyfikacja i lokalizacja defektów stanowiących źródła wyładowań, monitoring wyładowań *on-line* w eksploatacji.

Jednym z głównych parametrów konstrukcyjnych rozdzielnic gazowych jest robocze natężenie pola elektrycznego i jego rozkład w torach prądowych. Układ izolacyjny rozdzielnic tworzą rury aluminiowe lub miedziane (tory prądowe) w cylindrycznej obudowie ze stopów aluminium lub stali, wypełnione SF₆, o ciśnieniu w zakresie od 0,2 MPa do 0,5 MPa.

Rozkład pola elektrycznego w otoczeniu lokalnych defektów – źródeł wyładowań niezupełnych

Lokalny wzrost natężenia pola elektrycznego w otoczeniu wierzchołka mikroostrza na powierzchni szyny przewodzącej (rys.1 i 2) opisuje współczynnik $\beta = E_{rdmax} / E_{sr}$, którego wartość zależy od promienia krzywizny defektu r_d , natomiast jego kształt (stożkowy lub walcowy) praktycznie nie ma znaczenia.



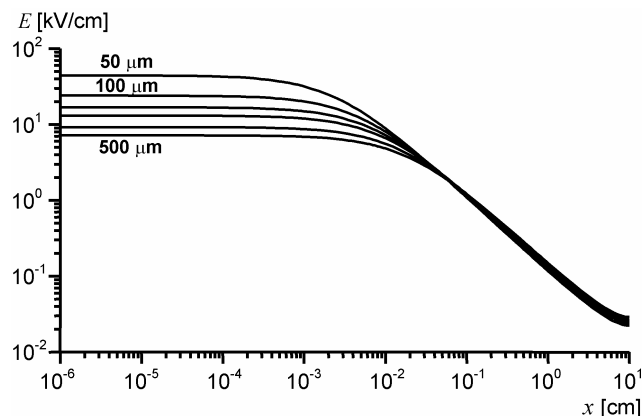
Rys.3. Rozkład natężenia pola elektrycznego w układzie szynowym w obecności defektu o promieniu r_d (obszar 1 na rys.1)

Analiza powyższego przypadku prowadzi w praktyce do wyznaczenia rozkładu pola elektrycznego w układzie modelowym np. ostrze-płaszczyzna, z elektrodą ostrzową w postaci np. hiperboloidy obrotowej [4]. Wówczas natężenie pola elektrycznego w odległości x od wierzchołka mikroostrza wynosi:

$$(1) \quad E(x) = 2U / \left[(2x + r_d - \frac{x^2}{a}) \ln \frac{4a}{r_d} \right] \quad \text{dla } 0 \leq x \leq a$$

gdzie: U – napięcie pomiędzy ostrzem a płaszczyzną

Maksymalne natężenie pola występuje w punkcie $x = 0$. Zależności $E(x)$ obliczone przy umownej wartości napięcia $U = 1\text{kV}$ oraz promieniach r_d w zakresie od $50 \mu\text{m}$ do $500 \mu\text{m}$ (rys.3) wskazują na obszar w odległości do około 10^{-1}cm będący strefą jonizacji i ładunku przestrzennego. Równocześnie, odległość większa od kilku cm praktycznie nie wpływa już na rozkład pola elektrycznego przy elektrodach ostrzowych o różnej krzywiznie.



Rys.3. Rozkład natężenia pola elektrycznego w układzie modelowym ostrze-płaszczyzna ($U = 1\text{kV}$).

Mechanizmy inicjowania wyładowań niezupełnych

Analizując zjawiska inicjowania i rozwoju wyładowań w SF₆ należy uwzględnić konstrukcję obiektu, która stanowi określony układ elektrod, rodzaje defektów, stanowiących źródła wyładowań, warunki inicjowania wyładowań, możliwości rozwoju wyładowań lawinowych i strimerowych, różnorodność form wyładowań, impulsowy charakter tych zjawisk. Amplituda impulsów wyładowań oraz ich występowanie w okresie napięcia przemiennego o częstotliwości 50Hz mają bezpośredni związek z formą wyładowań w układzie izolacyjnym.

W przypadku mikroostrzy „stałych” lub „wędrujących” powstają wyładowania typu ulotowego, związane z jonizacją gazu w silnym polu elektrycznym (rys.1). Cząstki przewodzące, umiejscowione na powierzchni izolatorów lub w „punkcie potrójnym”, sprzyjają rozwojowi wyładowań powierzchniowych, natomiast wtrąciny wewnętrzne w izolatorach są przyczyną erozji wewnętrznej i rozwoju kanałów drzewiastych w materiale izolatorów. W przypadku mikroostrzy na powierzchni przewodników warunki inicjowania wyładowań wynikają ze zjawiska emisji polowej w wyniku efektu tunelowego zachodzącego przy ujemnej biegunowości elektrody, jaką stanowi mikroostrze.

Prawdopodobieństwo emisji polowej na powierzchni granicznej przewodnik/gaz, zależy od wartości natężenia pola E_{rd} , przy powierzchni mikroostrza (rys.2). Wydajność prądowa emisji polowej zależy od:

- natężenia pola elektrycznego E_d przy mikroostrzu,
 - natężenia pola elektrycznego w układzie E ,
 - efektywnej pracy wyjścia elektronów z metalu,
- i jest określona wzorem Fowlera-Nordheima [7]:

$$(2) \quad N_{eFN} = \pi^2 \cdot A_1 \frac{\beta^2 \cdot E^2}{\Phi_{ef}} \exp \left[- \frac{A_2 \Phi_{ef}^{\frac{3}{2}}}{\beta \cdot E} \right] \quad [\text{Cs}^{-1}]$$

w którym:

Φ_{ef} – efektywna praca wyjścia z powierzchni katody [eV],

A_1, A_2 – stałe:

$$A_1 = 1,54 \cdot 10^{-6} \quad [\text{eV} \cdot \text{A} \cdot \text{V}^{-2}],$$

$$A_2 = 6,79 \cdot 10^9 \quad [(\text{eV})^{-3/2} \cdot \text{V} \cdot \text{m}^{-1}]$$

Intensywność efektu tunelowego jest największa przy wierzchołku mikroostrza, lecz dla jego wystąpienia mikro-

ostrze powinno posiadać pewną minimalną wysokość. Związane jest to z kształtem i szerokością bariery potencjału przy powierzchni metalu, koniecznymi dla wystąpienia tego efektu. Wartość pracy wyjścia Φ_{ef} zależy od stanu powierzchni mikroostrza, w tym od obecności na niej zaadsorbowanych atomów innych pierwiastków, które mogą ją obniżyć lub podwyższyć, a także od rodzaju powierzchni granicznych np. metal/gaz, metal/dielektryk stały. Warunek inicjowania wyładowań wskutek emisji polowej wynika zatem z zależności $N_{eFN} = f(\beta \cdot E)$. Przy współczynnika mikrogeometrii równym np. $\beta = 100$ warunek ten jest spełniony przy wartościach natężenia pola elektrycznego w zakresie $6 \cdot 10^6 \text{ Vm}^{-1}$ do $15 \cdot 10^6 \text{ Vm}^{-1}$ dla układu metal-próżnia, oraz w zakresie od $1 \cdot 10^6 \text{ Vm}^{-1}$ do $3 \cdot 10^6 \text{ Vm}^{-1}$ dla układu metal-dielektryk stały [7]. Są to wartości robocze natężenia pola elektrycznego w układach izolacyjnych, zazwyczaj w zakresie $1 \cdot 10^6 \text{ Vm}^{-1}$ do $15 \cdot 10^6 \text{ Vm}^{-1}$.

Rozwój wyładowania

Rozwój przestrzenny lawin elektronowych w gazie zależy od procesów jonizacji zderzeniowej elektronowej, charakteryzowanych przez współczynnik α , a w przypadku gazu elektryczniejemnego, jakim jest SF_6 , również od współczynnika wychwytywania elektronów η , od którego zależy liczba elektronów w lawinie. Rozwój lawiny jest możliwy tylko, gdy $\alpha > \eta$. Dalszy rozwój wyładowania w postaci strimerów do ograniczonego obszaru w gazie ponad wierzchołkiem mikroostrza, oznacza samopropagację lawin elektronowych w efekcie wzmocnienia pola elektrycznego na obszarze jonizacji polem ładunku przestrzennego. Lokalne natężenie pola elektrycznego jest wówczas większe od wartości krytycznej E_{kr} . Ta z kolei zależy od ciśnienia gazu. Rozwój lawin elektronowych jest możliwy, gdy $(E/p) > (E/p)_{kr}$ [2].

W układzie elektrod o polu jednostajnym lub prawie jednostajnym w sześciofluorku siarki wartość $(E/p)_{kr}$ przy temperaturze 300K wynosi $89 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1} \text{Pa}^{-1}$. Ze względu na możliwe lokalne zniekształcenie rozkładu pola elektrycznego oraz przepięcia występujące w eksploatacji, przyjmuje się, iż wartość natężenia pola elektrycznego na powierzchni szyny przewodzącej nie powinna przekraczać $8,9 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ [3]. Przy ciśnieniu gazu w rozdzielni równe np. 0,5 MPa natężenie pola elektrycznego przy powierzchni szyny wysokonapięciowej wynosi $4,5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ($4,5 \text{ kV/mm}$). Kierunek i obszar rozwoju wyładowania strimerowego zależą od rodzaju defektu w rozdzielni.

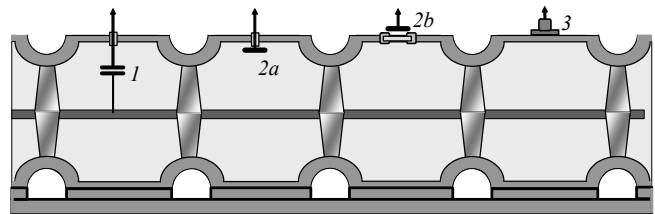
W przypadku defektów w postaci mikroostrzy na elementach przewodzących, trójwymiarowy obszar wyładowania w gazie, można w przybliżeniu zastąpić przewodzącą kulą, gromadzącą ładunek wyładowania. W przypadku, gdy defekty w rozdzielni tworzą przewodzące cząstki przylegające do powierzchni izolatora, powstaje w przybliżeniu dwuwymiarowy obszar na powierzchni izolatora, gromadzący ładunek wyładowania. Efektem wyładowań zainicjowanych w otoczeniu powyższych defektów, będą różne formy wyładowań: w pierwszym przypadku zbliżone do ulotowych, w drugim – do powierzchniowych [7].

Metody detekcji wyładowań niepełnych

Wyładowania niepełne, występujące w obszarach, w których przekroczona została krytyczna wartość natężenia pola elektrycznego, generują impulsy prądowe, fale akustyczne oraz promieniowanie o określonej długości fali. W pomiarach metodami elektrycznymi, z powodu bardzo małych pojemności wewnętrznych w rozdzielni ok. $20 \div 100 \text{ pF}$, otrzymuje się ekstremalnie szybkie wyładowania. Z tego powodu pomiary wyładowań niepełnych w tych układach wykonuje się nie tylko metodą klasyczną

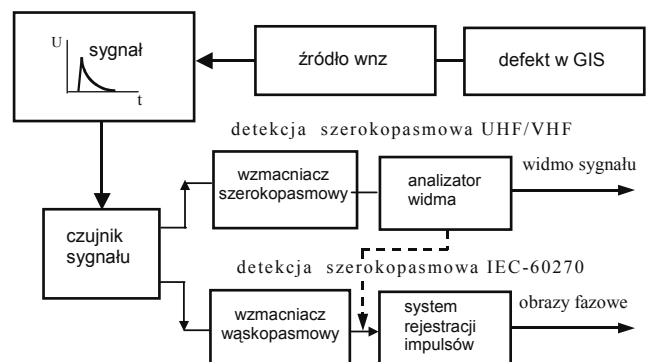
według normy IEC60270 [12], ale przede wszystkim z zastosowaniem specjalnych detektorów pracujących w paśmie UHF do kilku GHz, z zastosowaniem sond pojemnościowych umieszczonych wewnątrz lub na zewnątrz (za oknem dielektrycznym) rozdzielni. Zakres częstotliwości od ok. 300MHz do ok. 2GHz, w którym najczęściej wykonywane są pomiary, zawiera się w zakresie decymetrowym promieniowania mikrofalowego. Pomiary w tak wysokim paśmie częstotliwości stwarzają możliwość uzyskania większej czułości oraz eliminowania zakłóceń i interferencji. Czujniki i sondy rozmieszczone są w separowanych komorach rozdzielni (rys.4). Są to:

- kondensatory sprzęgające dla bezpośredniej detekcji wyładowań metodą elektryczną,
- czujniki dla detekcji UHF zainstalowane wewnątrz komory lub na zewnątrz z zastosowaniem dielektrycznego okna,
- czujniki dla detekcji emisji akustycznej.



Rys. 4. Przykłady czujników wzn w komorach GIS [8]: 1) kondensator sprzęgający, 2a) wewnętrzny czujnik UHF, 2b) zewnętrzny czujnik UHF, 3) czujnik akustyczny (lub akcelerometr)

Tory pomiarowe przedstawione na rysunku 5 schematycznie opisują detekcję szerokopasmową UHF/VHF z analizą widma oraz detekcję „szerokopasmową” wg normy IEC-60270.



Rys. 5. Systemy detekcji wyładowań niepełnych

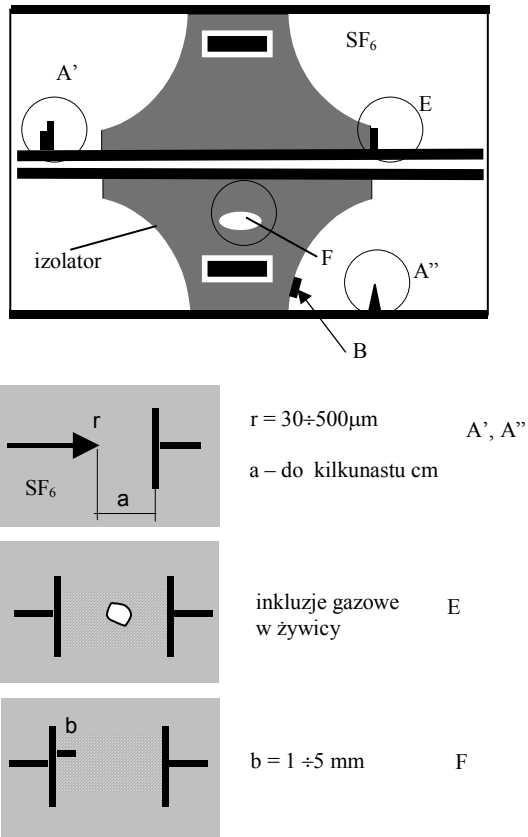
W prezentowanych w artykule badaniach mechanizmów wyładowań niepełnych w SF_6 zastosowano rejestrację obrazów fazowych wyładowań [8].

Rejestracja obrazów fazowych wyładowań

Podstawowym czynnikiem w mechanizmie wyładowań w rozdzielni gazowej, jest usytuowanie defektu względem szyny wysokonapięciowej i izolatora.

W badaniach laboratoryjnych modelowano źródła wyładowań w SF_6 stosując odpowiednie konfiguracje elektrod (rys. 6) umieszczonych w komorze z SF_6 przy ciśnieniach w zakresie od 0,1 MPa do 0,3 MPa. Defekty w postaci mikroostrzy w komorze gazowej zastępowane były układem modelowym elektrod ostrze-płaszczyzna. Przy konfiguracji elektrod reprezentującej mikroostrze na powierzchni przewodzącej (wyładowanie ulotowe) – defekt typu A' , A'' – badano wpływ promienia krzywizny mikroostrza r_d (100 μm , 200 μm , 500 μm), który ma zasadnicze znaczenie w me-

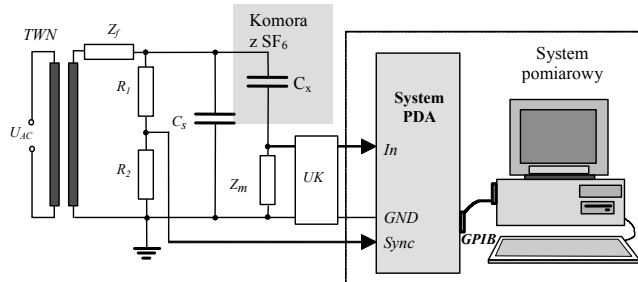
chanizmie inicjowania wyładowań ze względu na wartość natężenia pola elektrycznego, oraz w wyładowaniu stimerowym – ze względu na wielkość wytworzonego ładunku przestrzennego. Rejestrowano obrazy fazowe wyładowań dla ich porównania w przypadkach inicjowania wyładowań w obecności różnych rodzajów defektów. Badano wpływ napięcia na postać obrazu fazowego, dla wyznaczenia formy bezimpulsowej w wyładowaniach inicjowanych przez defekty ostrzowe. Porównano obrazy fazowe wyładowań w SF₆ i w powietrzu.



Rys.6. a) Defekty w komorze rozdzielnic, b) Konfiguracje elektrod

Układ pomiarowy

W pomiarach modelowych stosowano układ detekcji wyładowań zgodny z normą IEC60270 [12] podając sygnały do systemu pomiarowego PDA, pozwalającego na rejestrację obrazów fazowo-rozdzielczych (rys. 8).



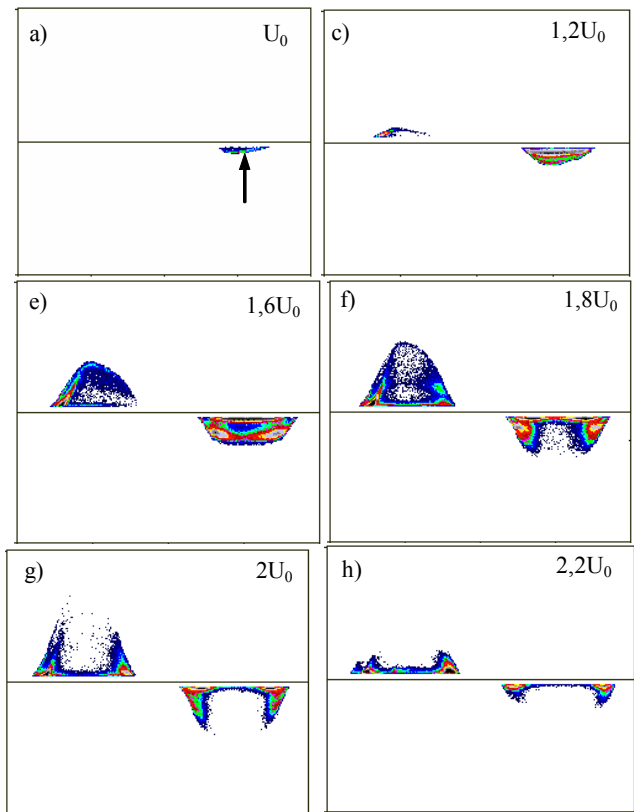
Rys.7. Układ pomiarowy wyładowań niezupełnych

Elementami stanowiska pomiarowego były: transformator wysokiego napięcia *TWN*, filtr *Z_f*, rezystancyjny dzielnik wysokonapięciowy *R₁/R₂*, kondensator sprzęgający *C_s*, komora probiercza z SF₆ reprezentowana przez pojemność *C_x*, impedancja pomiarowa *Z_m*, układ kształtowania sygnału *UK*, oraz system pomiarowy *PDA* wraz z interfejsem *GPiB* i komputerem nadzorującym pomiary.

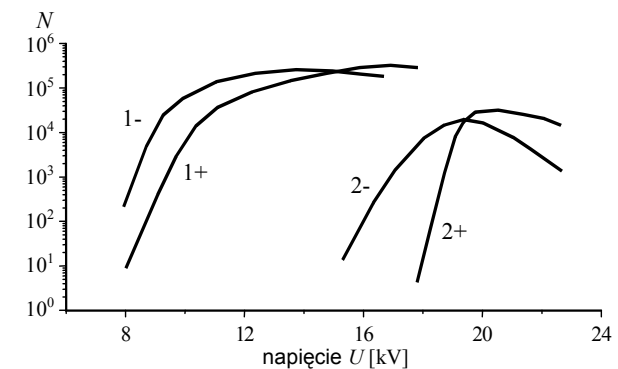
Obrazy fazowe wyładowań

Mikroostrza na elemencie szynowym

Wyładowania w otoczeniu mikroostrzy (rys.6, A') reprezentowane przez obrazy fazowe na rysunku 8, zostają zainicjowane w ujemnej połowie okresu (kąt fazowy 270°) przy napięciu początkowym *U_o*. Przy napięciu *U > U_o* kolejne impulsy wyładowań zostają zlokalizowane symetrycznie wokół pierwszego, przy czym ich amplitudy pozostają praktycznie stałe (rozkład statystyczny).



Rys.8. Obrazy fazowe wyładowań w układzie modelowym A'



Rys.9. Całkowita liczba wyładowań w połowie okresu jako funkcja napięcia, gdy promienie krzywizny elektrody ostrzowej *r_d* wynoszą: 1) 150µm, 2) 500 µm, przy *a = 15mm*.

Ze wzrostem napięcia: zwiększa się zakres fazowy wyładowań w połowach okresu, liczba wyładowań rośnie (rys.9). Obrazy powyższe mogą reprezentować wyładowania przy danym napięciu w obiekcie rzeczywistym, pochodzące od mikroostrzy o różnej krzywiznie lub wysokości. Wówczas obrazy a) i b) na rysunku 8 należy odnieść do defektów o wyższym napięciu początkowym, a obrazy np. c) i d) mogą

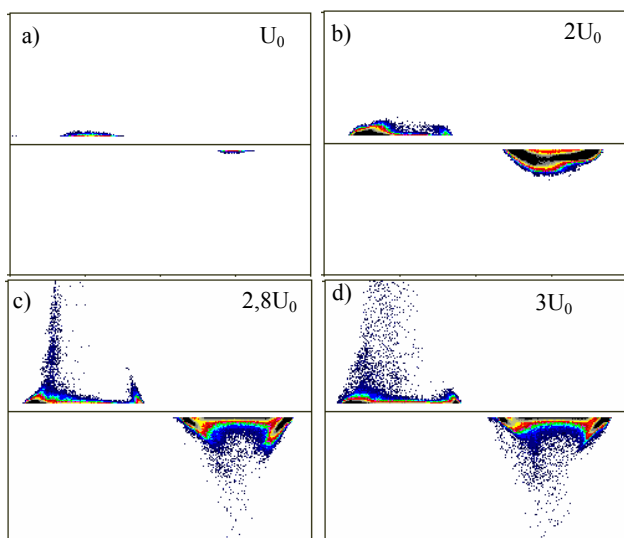
pochodzić od defektów, przy których wyładowania wystąpiły przy napięciu niższym. Ta druga grupa oznacza zatem defekty stanowiące większe zagrożenie, gdyż występujący zakres fazowy wyładowań bezimpulsowych, oznacza prąd ciągły w gazie [4].

Napięcie początkowe U_0 rośnie ze wzrostem promienionowania krzywizny ostrza r_d , co jest efektem zmiany rozkładu pola elektrycznego. W przybliżeniu liniowa zależność $N(U)$ obowiązuje do momentu zaniku impulsowej formy wyładowań, co oznacza zmniejszenie się liczby wyładowań N przy napięciu większym od krytycznego [4] (rys.9).

Cząstki przewodzące na powierzchni izolatora

Zainicjowanie wyładowań przy powierzchni izolatora (rys.7, B) wymaga wyższej wartości napięcia w porównaniu z przypadkiem lokalizacji cząstki przewodzącej na szynie prądowej (typ A'). Oznacza to wystąpienie superpozycji wyładowań "powierzchniowych" i "ulotowych" (rys.10). Charakteryzuje go:

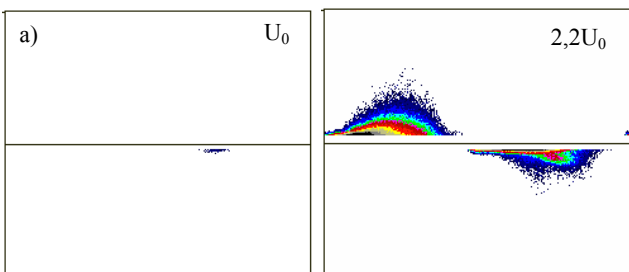
- rozwój wyładowań w obu półokresach (rys. 10a),
- zanikanie formy impulsowej (rys.10 c),
- rozwój wyładowań powierzchniowych (rys.10d), o ładunku maksymalnym większym niż dla wyładowań ulotowych.



Rys.10. Obrazy fazowe wyładowań w układzie modelowym B.

Wyładowania w „punkcie potrójnym” (Rys.6, E)

Wyładowania zostają zainicjowane w ujemnej połowie okresu i mają postać wyładowań powierzchniowych o charakterze wyładowań "podtrzymywanych" w całym okresie napięcia (rys.11.).



Rys.11. Obrazy fazowe wyładowań powierzchniowych w układzie modelowym E

Zakończenie

Obrazy fazowe charakteryzują mechanizmy wyładowań niezupełnych w SF₆ i tendencje ich przemian. Różne rodzaje defektów w układzie izolacyjnym z SF₆ generują zasadniczo odmienne formy wyładowań a więc i różne rodzaje obrazów fazowych. Występuje korelacja pomiędzy obrazami fazowymi wyładowań niezupełnych, a rodzajami defektów w układzie izolacyjnym SF₆.

LITERATURA

- [1] Kołtunowicz W: *Badania diagnostyczne izolacji gazowych rozdzielnic wysokiego napięcia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003
- [2] Florkowska B.: *Wytrzymałość elektryczna gazowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia*. Wyd. Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, 2003
- [3] Maksymiuk J., Pochanke Z.: *Obliczenia i badania diagnostyczne aparatury rozdzielczej*. Warszawa, WNT 2001
- [4] Florkowska B., Włodek R.: *Pulse high analysis of partial discharges in air*, IEEE Trans.EJ, vol.28, No 6, 1993, pp. 932-940
- [5] Florkowska B., Zydrón P.: *Obrazy fazowo-rozdzielcze wyładowań niezupełnych w diagnostyce gazowych układów izolacyjnych z SF₆*. *Materiały VII Sympozjum EUI*, str.101-109, Zakopane, 1999
- [6] Visintin M., Niemayer L., Rabach G.: *The characteristics of partial discharge from particles in GIS*. Proc IEEE Int.Symp.on El.Insulation, pp.277-282, Pitsburg, USA, June 1994.
- [7] Florkowska B.: *Wyładowania niezupełne w układach izolacyjnych wysokiego napięcia – analiza mechanizmów, form i obrazów*. Wyd. PAN-IPPT, Warszawa, 1997
- [8] Florkowska B, Florkowski M, Włodek R, Zydrón P, *Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia*, *Wyd. IPPT PAN*, Warszawa 2001
- [9] Zhang S. et al.: *The impact of electrode dielectric coating on the insulation integrity of GIS with metallic particle contaminants*. IEEE Trans.on Power Delivery, vol.17, no 2, 2002
- [10] Kołtunowicz W.: *Insulation Coordination of GIS: return of experience. On Site Tests and Diagnostic Techniques*. CIGRE WG 33/23.12, Electra vol.176, February 1998
- [11] IEC 60071-1: *Insulation coordination. Part 1: Definitions, principles and rules*.
- [12] IEC-60270: *Partial discharge measurement*.
- [13] Pearson J.S., et al.: *Partial discharge diagnostics for gas insulated substations*, IEEE Trans. on DEI, vol.2, no 5., pp.893-905, 1995
- [14] Hampton B.: *UHF diagnostics for gas insulated substations*, 11th ISH, IEE Conf. Publ. No.467, vol.5, pp.6-16, London, 1999
- [15] Okubo H., et al.: *Temporal development of partial discharge and its application to breakdown prediction in SF₆ gas*, IEEE Trans. PD-13, vol.13, no 2., pp.440 –445, 1998

Autorzy:

prof. dr hab. Inż. Barbara Florkowska, E-mail: beflor@agh.edu.pl,
dr inż. Paweł Zydrón, E-mail: pzydron@agh.edu.pl; Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków