



Barbara Florkowska*, Paweł Zydrón*

OBRAZY FAZOWO-ROZDZIELCZE WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W DIAGNOSTYCE GAZOWYCH UKŁADÓW IZOLACYJNYCH Z SF₆

Streszczenie: 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. Badania mają na celu opracowanie wskaźników opisowych mechanizmów wnz w SF₆ dla ich systemu diagnostycznego.

Słowa kluczowe: wyładowania niezupełne, gazowe systemy izolacyjne, diagnostyka

1. Wstęp

Gazowe układy izolacyjne z sześciofluorkiem siarki (SF₆), znajdujące szerokie zastosowanie w elektroenergetyce z powodu swych niewątpliwych zalet, wymagają właściwych systemów diagnostycznych dla określenia przyczyn ich awarii i identyfikacji powodujących je defektów w konstrukcjach tych układów [11, 14].

Pomiary wyładowań niezupełnych należą do metod oceny rozdzielni z izolacją z SF₆ (GIS — *Gas Insulated Substation*) zarówno podczas prób odbiorczych i okresowych, jak i w eksploatacji. Przyczyną wyładowań niezupełnych są defekty technologiczne w konstrukcji tych urządzeń stwarzające warunki dla lokalnego silnego pola elektrycznego. Inicjowane wyładowania niezupełne, powodując rozkład chemiczny gazu w procesach zależnych od energii wyładowania, czystości SF₆ i zawartości pary wodnej, prowadzą do spadku wytrzymałości elektrycznej gazu oraz procesów starzeniowych w izolacji stałej. Ocena stężenia różnych związków w gazie stanowi problem eksploatacyjny dla urządzeń z sześciofluorkiem siarki [8].

Liczne prace badawcze skupiają się nad doskonaleniem metod diagnostyki i monitoringu rozdzielni z SF₆, a celem ich jest rozpoznanie źródeł wyładowań [5, 7, 10].

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Zakład Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

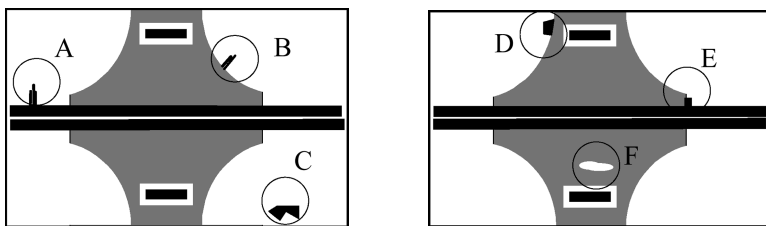
W pracach tych zmierza się do uzyskania odpowiedniej czułości układu pomiarowego, wystarczającej do wykrycia impulsów o bardzo małej amplitudzie, generowanych przez mikrodefekty. Z praktycznego punktu widzenia jest to problem poprawy stosunku sygnał/szum oraz korelacji: sygnał – defekt.

Przy pomiarach wyładowań w instalacjach GIS szczególnie problem stanowi sposób detekcji sygnału. W praktyce częste zastosowanie znajdują czujniki UHF (*Ultra High Frequency*) [6, 9, 13]. Wykonywane są one m.in. jako pojemnościowe czujniki pomiarowe pola elektrycznego o charakterystyce filtru górnoprzepustowego dla częstotliwości powyżej 180 MHz. Pomiary w zakresie UHF umożliwiają, w odróżnieniu od metod klasycznych, detekcję sygnałów generowanych przez wzn niezależnie od wielkości instalacji GIS. Ze względu na zakres częstotliwości, w którym odbywa się pomiar (~ 1 GHz), wpływ na jego wyniki mają: 1) parametry sygnału wzn: m.in. kształt impulsu prądowego, miejsce wyładowania; 2) efekty propagacji sygnału: m.in. efekty jego opóźnienia, tłumienia i odbicia; 3) parametry czujnika UHF: m.in. czułość, charakterystyka detekcyjna oraz, co niekorzystne — 4) wzajemne położenie miejsca wyładowania i czujnika UHF. Przy praktycznym zastosowaniu metody analizy obrazów fazowych należy uwzględnić użycie tego sposobu detekcji sygnałów wyładowań.

Przedstawione wyniki badań nad identyfikacją defektów w układzie izolacyjnym z SF₆, w których zastosowano rejestrację obrazów fazowo-rozdzielczych wyładowań, mają na celu rozpoznanie charakterystycznych cech tych obrazów dla różnych warunków generowania impulsów wyładowań, z odniesieniem do mechanizmów fizykalnych tych zjawisk.

2. Charakterystyka defektów i układy modelowe

Defekty inicjujące wyładowania w układzie izolacyjnym rozdzielni SF₆ stanowią: przewodzące cząstki, mikroostrza stałe lub wędrujące w ośrodku gazowym, umiejscowione na powierzchni elektrody wysokonapięciowej i/lub izolatorów, a także swobodnie przemieszczające się w przestrzeni gazowej. Możliwe są również inkluzje gazowe w izolatorach (rys. 1).



Rys. 1. Przykłady defektów w gazowych systemach izolacyjnych: A, B — mikroostrza stałe, C — wędrujące, D, E — na powierzchni izolatora, F — inkluzje gazowe w izolatorach

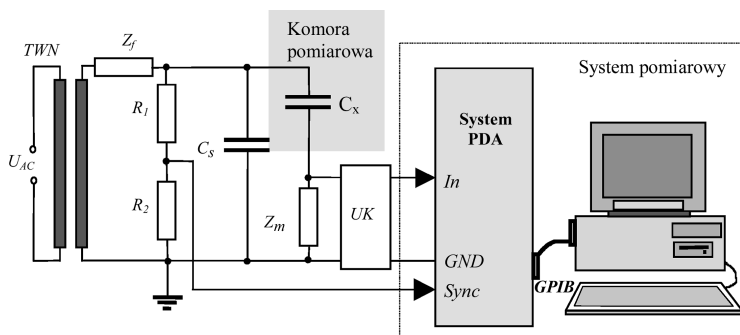
W badaniach zastosowano komorę probierczą z SF₆ przy ciśnieniach w zakresie od 100 kPa do 300 kPa, w której zainstalowane układy elektrod umożliwiały badania wyładowań inicjowanych:

- z mikrostrzy o promieniach krzywizny od $30\mu\text{m}$ do $500\mu\text{m}$ przy różnej odległości od elektrody płaskiej (typ A)
- z mikrostrzy na powierzchni izolatora zlokalizowanych przy elektrodzie wysokonapięciowej (typ E)
- przez swobodne cząstki przewodzące na powierzchni izolatora (typ D);
- przez przewodzące cząstki wędrujące (typ C).

Podstawowym czynnikiem w mechanizmie wyładowań niezupełnych w gazowych systemach izolacyjnych jest usytuowanie defektu względem elektrody wysokonapięciowej i izolatora [12].

3. Metoda rejestracji obrazów fazowo-rozdzielczych

W pomiarach zastosowano klasyczny układ detekcji wyładowań z impedancją pomiarową Z_m oraz z użyciem systemu pomiarowego PDA [4], umożliwiającego fazowo-rozdzielczą rejestrację wyładowań w czasie rzeczywistym (rys. 2).



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego do badań wyładowań niezupełnych

Elementami stanowiska pomiarowego są: transformator wysokiego napięcia TWN , filtr Z_f , rezystancyjny dzielnik wysokonapięciowy R_1/R_2 , kondensator sprzęgający C_s , komora probiercza z SF_6 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.

Przyjęto, że napięciem początkowym U_0 jest wartość napięcia probierczego przy której liczba wyładowań o danej biegunowości przy przyjętym czasie rejestracji 60 s wynosi 3000, co oznacza pojawienie się średnio jednego stabilnego impulsu w jednej połowie okresu.

4. Wyniki badań i analiza

Dla rozwoju wyładowań w gazach elektroujemnych decydujące znaczenie ma efektywny współczynnik jonizacji zderzeniowej elektronowej $\alpha_{ef} = \alpha - \eta$, gdzie α —

współczynnik jonizacji zderzeniowej elektronowej, η — współczynnik wychwytywania elektronów, gdyż w warunkach w których stosunek natężenia pola elektrycznego do ciśnienia E/p jest mniejszy od wartości $(E/p)_{\text{krytyczne}}$, z powodu przewagi współczynnika η nad α rozwój lawiny nie jest możliwy. Warunki takie występują w SF₆ wówczas, gdy wartość $E/p \geq 87,7 \text{ Vpa}^{-1}\text{m}^{-1}$ [1]. W wyładowaniu strimerowym rola ładunku przestrzennego dotyczy równowagi pomiędzy procesami jonizacji i wychwytywania elektronów, z uwzględnieniem warunków dla fotojonizacji.

Mikroostrza na elektrodzie wysokonapieciowej

Przedstawione na rys. 3 przykłady obrazów fazowych dla mikroostrzy o różnych promieniach krzywizny, wyznaczone przy wzrastającym napięciu probierczym, zawierają typową postać obrazu w ujemnej połowie okresu, charakterystyczną dla wyładowań ulotowych (które w powietrzu powstają przy znacznie niższym napięciu początkowym U_0) oraz występujące przy napięciu równym ok. $1,2 \div 1,3 U_0$ impulsy biegunowości dodatniej, o ładunkach maksymalnych większych od ładunków impulsów ujemnych.

Napięcie początkowe U_0 rośnie ze wzrostem promienia krzywizny ostrza r , co wynika ze zmiany rozkładu pola elektrycznego. Przy napięciu początkowym U_0 powstaje pierwszy impuls wyładowania przy wartości maksymalnej napięcia w ujemnej połowie okresu (kąt fazowy 270°). Przy napięciu $U > U_0$ kolejne impulsy wyładowań zlokalizowane są symetrycznie wokół pierwszego, posiadają prawie jednakowe amplitudy (rozkład statystyczny), a ich liczba w połowie okresu (częstość) rośnie ze wzrostem napięcia probierczego. Jednak zarówno czas trwania wyładowań t_w w połowie okresu, czyli zakres fazowy z_φ , jak i odstęp czasu między impulsami są funkcjami napięcia probierczego. Średnia liczba wyładowań w połowie okresu wynosi:

$$N = \frac{z_\varphi}{t^-} \quad (1)$$

gdzie: t^- — czas przebywania jonów w przestrzeni międzyelektrodowej, czyli odstęp czasu między impulsami.

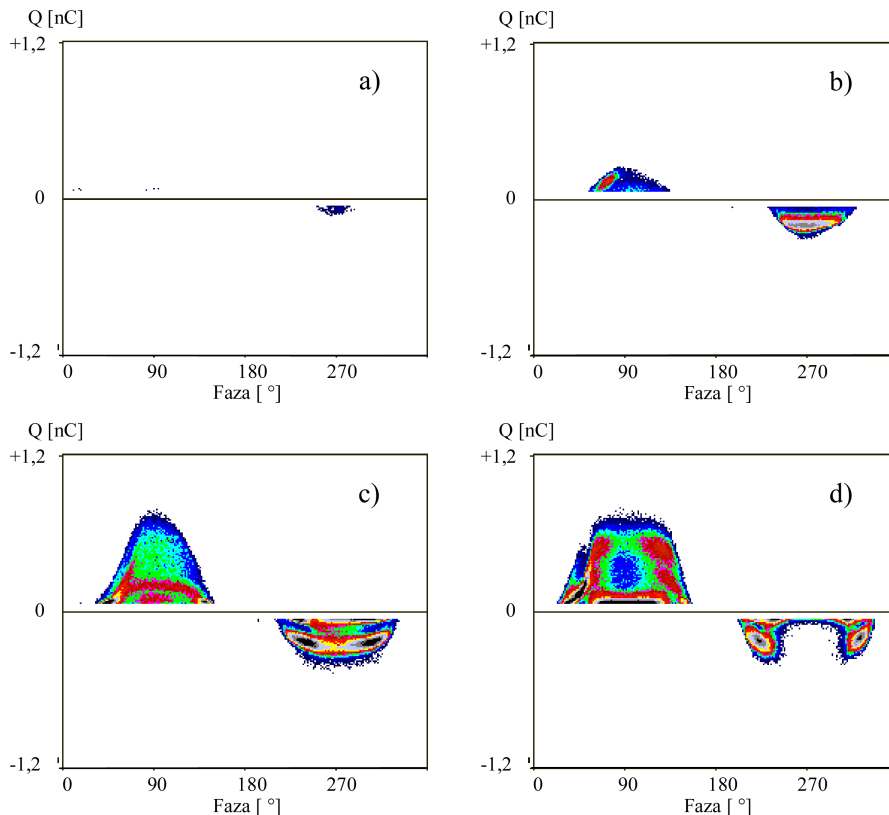
Jeśli wg [3]:

$$t^- = \int_0^a \frac{dx}{u^- E(x)} \quad (2)$$

gdzie: u^- — ruchliwość jonów ujemnych, $E(x)$ — składowa natężenia pola elektrycznego w kierunku osiowym od elektrody ostrzowej, a — odległość między elektrodami — to po uwzględnieniu wzoru na rozkład natężenia pola elektrycznego w modelowym układzie elektrod ostrze-płaszczyzna [3], i jego wartości w punkcie z , w którym natężenie pola elektrycznego E jest większe od natężenia początkowego jonizacji E_j , to wyrażenie na czas ruchu jonów ujemnych w przestrzeni międzyelektrodowej, czyli czas wyładowania, w przybliżeniu wyraża wzór:

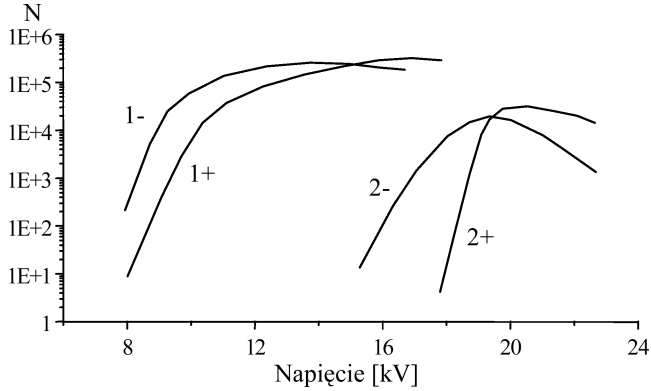
$$t^- = \frac{1}{3} a^2 \frac{\ln(4a/r)}{u^- U} \quad (3)$$

Przy określonej ruchliwości jonów ujemnych u^- i geometrii układu modelowego znajomość czasu t^- pozwala na obliczenie teoretycznej zależności częstości wyładowań N przy napięciu probierczym $U > U_0$. W przybliżeniu liniowa zależność $N(U)$ obowiązuje do momentu zaniku impulsowej formy wyładowań, co oznacza zmniejszanie się liczby wyładowań N przy napięciu większym od krytycznego [2] (rys. 3c, d).



Rys. 3. Obrazy fazowe wyładowań w SF_6 dla układu modelowego typu A ($r = 150\mu m$, $a = 15\text{ mm}$) dla napięć: a) 8 kV, b) 10 kV, c) 14 kV, d) 18 kV

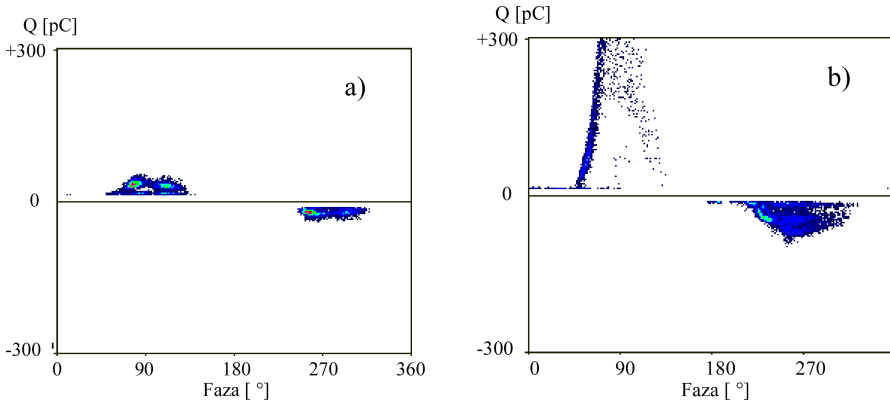
Powyższe stwierdzenie ilustrują zależności $N(U)$ przedstawione na rys. 4, które ponadto wykazują: wzrost napięcia U_0 przy większym promieniu krzywizny r (przy czym $U_0(SF_6) \cong 2U_0(\text{powietrze})$, wpływ biegunowości napięcia na liczbę wyładowań oraz zakres napięć stabilnego ulotu do napięcia równego w przybliżeniu $2U_0$. Przy napięciu wyższym prąd ciągle występuje przy obydwu biegunowościach, co oznacza charakterystyczny podział obrazu w każdej połowie okresu. W badaniach mechanizmu wyładowań w układach izolacyjnych z SF_6 jest to problem zaniku strimerowej formy wyładowań [10]. Ładunek średni wyładowań Q_{sr} wzrasta w przybliżeniu do napięcia $2U_0$ po czym maleje, a jego wartość jest większa dla elektrod o większym promieniu krzywizny.



Rys. 4. Częstość wyładowań jako funkcja napięcia dla elektrod o promieniach krzywizny r : 1) $150\ \mu\text{m}$, 2) $500\ \mu\text{m}$, przy $a = 15\ \text{mm}$

Cząstki przewodzące na powierzchni izolatora przy elektrodzie wysokonapięciowej

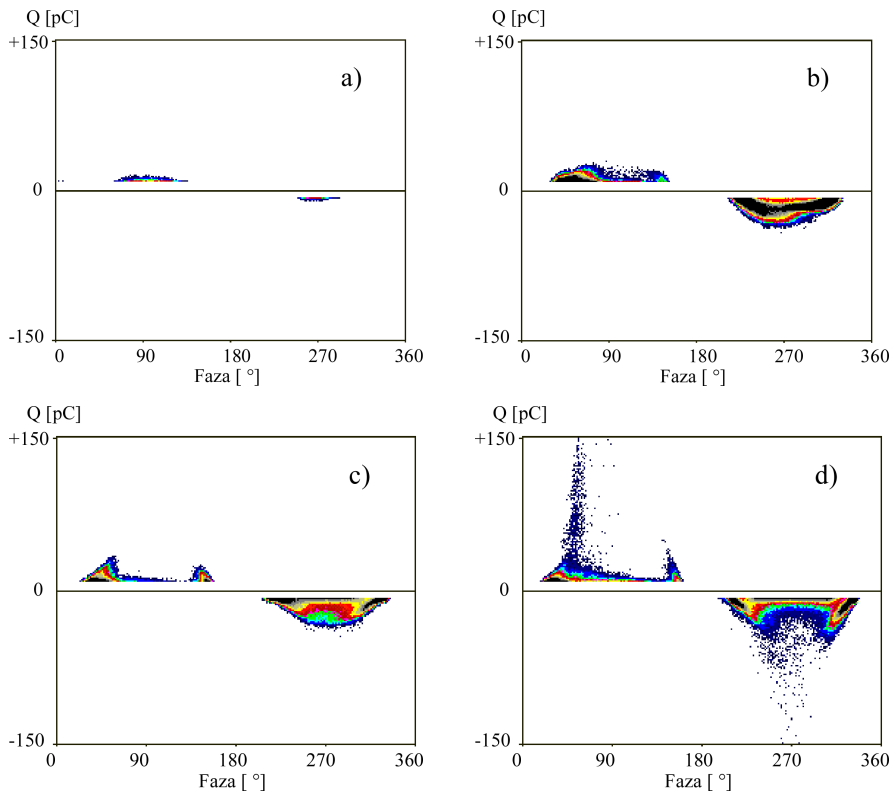
Zainicjowanie tej formy wyładowań w SF_6 (w tzw. punkcie potrójnym, defekt typu E) wymaga w porównaniu z powietrzem znacznie wyższego napięcia. W przyjętym układzie modelowym wartość U_0 była dla SF_6 dwukrotnie wyższa niż dla powietrza (odpowiednio $14\ \text{kV}$ i $7,5\ \text{kV}$). Obrazy fazowe na rys. 5 pokazują charakterystyczną asymetrię obrazów w powietrzu (rys. 5b), wynikającą z wyładowań w obecności materiału izolacyjnego stałego, która w przypadku SF_6 wymaga znacznie wyższego napięcia.



Rys. 5. Obrazy fazowe wyładowań dla układu modelowego typu E: a) SF_6 $20\ \text{kV}$, b) powietrze $10\ \text{kV}$

Swobodne cząstki przewodzące na powierzchni izolatora

Układ modelowy dla badań przypadku lokalizacji cząstki przewodzącej na powierzchni izolatora, w pewnej odległości od elektrody uziemionej, stwarza warunki dla równoczesnego rozwoju wyładowań w polu wybitnie niejednostajnym cząstki, reprezentowanych przez zbiory ładunków w otoczeniu kątów fazowych 90° i 270° (rys. 6).



Rys. 6. Obrazy fazowe wyładowań w SF_6 w układzie modelowym typu D dla napięć: a) 9 kV, b) 16 kV, c) 20 kV, d) 24 kV

Wzrost napięcia powoduje: zwiększenie intensywności wyładowań w zbiorach ładunków obu biegunowości, zanik impulsowej formy wyładowań w dodatniej, a następnie ujemnej połowie okresu, rozwój wyładowań powierzchniowych przy odpowiednio wysokim napięciu.

5. Zakończenie

Przedstawione wyniki badań stanowią część szerszego programu zastosowania metody rejestracji obrazów fazowo-rozdzielczych do diagnostyki gazowych układów izolacyjnych z SF_6 . Pozwalają one na sformułowanie następujących wniosków:

- Informacje zawarte w obrazach fazowo-rozdzielczych zawierają dane o wielkościach charakteryzujących mechanizmy wyładowań niezupełnych w SF₆ i tendencjach ich przemian.
- Obrazy fazowe rejestrowane metodą „impuls po impulsie” wykazują statystyczny charakter wyładowań zarówno pod względem amplitudy, jak i fazy występowania w okresie co jest wynikiem działania zespołu czynników przypadkowych takich jak np. chwilowe wahania napięcia, a przede wszystkim statystyczny charakter mechanizmu jonizacji i rozwoju lawin elektronowych.
- Różne rodzaje defektów w układzie izolacyjnym z SF₆ generują zasadniczo odmienne formy wyładowań, więc i różne rodzaje obrazów fazowych.
- Jest możliwe znalezienie korelacji pomiędzy obrazami fazowymi wnz, a rodzajami defektów w układzie izolacyjnym z SF₆, a więc utworzenie bazy dla systemu diagnostycznego.

Literatura

- [1] **Cooke C. M.:** *Ionization, electrode surfaces and discharges in SF₆ at extra high voltages*, IEEE Trans. PAS-94, pp. 1518–1523, 1975
- [2] **Florkowska B.:** *Wyładowania niezupełne w układach izolacyjnych wysokiego napięcia — analiza mechanizmów, form i obrazów*, Wydawnictwo PAN-IPPT, Warszawa, 1997
- [3] **Florkowska B., Włodek R.:** *Pulse high analysis of partial discharges in air*, IEEE Trans. EI-28, Vol. 28, No. 6, pp. 932–940, 1993
- [4] **M. Florkowski:** *Partial discharge image recognition using neural network for high voltage insulation systems*, Wyd. AGH, Rozprawy i Monografie nr 45, Kraków, 1996
- [5] **Fumihiko Endo, Tokio Yamagiwa, Izumi Yamada:** *Insulation diagnostic system of GIS*, Proc. 8th Int. Symp. On High Voltage Eng. ISH-93, paper 66.01, Yokohama, 1993
- [6] **Hampton B. F., Meats R. J.:** *Diagnostic measurement at UHF in gas insulated substations*, IEE Proc. Vol. 135, Pt C, No. 2, pp. 137–144, 1988
- [7] **Herbst I., Pietsch R.:** *The fast and slow signal components of partial discharges in SF₆ measurements of the electron and ion contributions to PD-signal*, Proc. IEEE Int. Symp. On El. Insul. 1994, pp. 283–287, 1994
- [8] **Jankowicz S.:** *Gaz SF₆ i produkty jego rozkładu w rozdzielniach osłoniętych z izolacją gazową*, Wiadomości Elektrotechniczne, nr 7, str. 253–255, 1992
- [9] **Kurrer R., Feser K.:** *The application of Ultra-High-Frequency partial discharge measurements in Gas-Insulated-Substations*, IEEE Trans. PD-13, Vol. 13, No. 3, pp. 777–782, 1998
- [10] **Okubo H., Kato T., Hayakawa N., Hikita N.:** *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
- [11] **Praehauser T.:** *Rapport d'activite du Comit d'Etudes 15 (Materiaux isolants) pour 1990–1991*, Electra, nr 142, pp. 38–48, 1992
- [12] **Visintin M., Niemayer L., Rabach G.:** *The characteristics of partial discharge from particles in GIS*, Proc. IEEE Int. Symp. On Electrical Insulation, pp. 277–282, Pittsburg, USA, June 1994

- [13] **Stone G. C., Sedding H. G., Fujimoto N., Braun J. M.:** *Practical implementation of ultra-wideband partial discharge detectors*, IEEE Trans. EI, Vol. EI-27, No. 1, pp. 70–81, 1992
- [14] *Partial discharge testing of gas insulated substations, A discussion paper from the IEEE Substation Committee, Working Group K4, GIS Diagnostic Methods*, IEEE Trans. PD-7, vol. 7, No. 2, pp. 499–505, 1992

PHASE-RESOLVED PATTERNS OF PARTIAL DISCHARGES IN DIAGNOSTIC OF SF₆
GAS-INSULATED-SUBSTATION

This paper describes using of phase-resolved partial discharge (PD) patterns for diagnostic aim in SF₆ gas insulated substations. Results of measurements carried out on insulating system in presence of typical defects have been presented. The PD patterns show correlation with kind of defect, what could be used for defect recognition in future GIS diagnostic system.

Część prac i badań przedstawionych w niniejszym referacie zrealizowano w ramach umów nr: 10.10.120.138/p oraz 10.10.120.510/p finansowanych przez Komitet Badań Naukowych