

Rozwój badań wyładowań niezupełnych w kablach elektroenergetycznych wysokiego napięcia w ramach prób poprodukcyjnych

Streszczenie. Artykuł zawiera charakterystykę badań wyładowań niezupełnych wprowadzanych w kolejnych etapach produkcji kabli elektroenergetycznych o izolacji z papieru nasyconego i polietylenu, na wszystkich poziomach napięć znamionowych tj. średnich, wysokich i najwyższych. Zwrócono uwagę na prace CIGRE w tej dziedzinie i działalność Konferencji Wielkich Sieci Elektrycznych, których efektem był pierwszy projekt programu badań poprodukcyjnych kabli wysokiego napięcia opisany w Przeglądzie Elektrotechnicznym nr 1 w 1931 roku. W dalszej części niniejszego artykułu opisano metody pomiaru wyładowań niezupełnych realizowane w systemach pomiarowych zapewniających przetwarzanie przebiegów impulsowych wyładowań do postaci obrazów fazowych. Przedstawiono również wyniki badań laboratoryjnych oddziaływania wyładowań niezupełnych na materiały izolacyjne, w tym identyfikację procesów erozyjnych w źródłach wyładowań i skutki migracji ładunków elektrycznych na powierzchniach granicznych w układach izolacyjnych.

Abstract. The article contains the characteristics of the partial discharge tests introduced in the subsequent stages of the production of power cables with insulation made of impregnated paper and polyethylene, at all voltage levels, i.e. medium, high and ultra-high voltage. Attention was paid to the work of CIGRE in this field and the activity of the Conference of Large Electric Systems, the effect of which was the first draft program for post-production testing of high-voltage cables, described in the article in the Przegląd Elektrotechniczny No. 1 in 1931. The methods of partial discharges measurement implemented in diagnostics systems ensuring the processing of discharge pulse waveforms to the form of phase-resolved images are described. The article also presents the results of laboratory tests of the effect of partial discharges on insulating materials, including the identification of erosion processes in discharge sources and the effects of electric charge migration on the boundary surfaces of insulating systems. (The characteristics of the partial discharge tests introduced in the subsequent stages of the production of power cables with insulation made of impregnated paper and polyethylene.)

Słowa kluczowe: kable elektroenergetyczne, wyładowania niezupełne, współczynnik strat dielektrycznych, wysokie napięcie.

Keywords: Power cables, partial discharges, loss factor, high voltage.

Wstęp

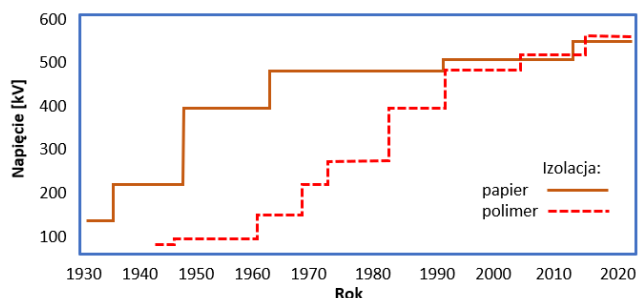
Przesył i rozdział energii elektrycznej liniami kablowymi o coraz większym napięciu znamionowym jest elementem rozwoju elektroenergetyki na przestrzeni ubiegłego wieku. Postęp w technice kablowej w odniesieniu do kabli elektroenergetycznych wysokiego napięcia jest efektem wprowadzania zmian w procesach technologicznych ich produkcji, zarówno z izolacją z papieru nasyconego jak i polimerową wytłaczaną, oraz doskonalenia konstrukcji układów izolacyjnych kabli [1-4]. W obydwu przypadkach celem podstawowym jest optymalizacja konstrukcji układów izolacyjnych, dla zwiększenia ich zdolności przesyłowych, co w przypadku kabli wysokiego napięcia dotyczy bezpośrednio wpływu narażeń elektrycznych, w tym skutków działania pola elektrycznego w izolacji kablowej. Jest to problem wyładowań niezupełnych i inicjowanych przez nie procesów degradacji izolacji kablowej, sygnalizowany już w najwcześniejszym etapie produkcji kabli elektroenergetycznych wysokiego napięcia w latach 30-tych ubiegłego wieku [5-7]. W historycznym ujęciu przedstawiono etapy wprowadzania pomiarów wyładowań niezupełnych do programów badań kabli na napięcie średnie (SN), wysokie (WN) i najwyższe (NN). Dobór materiałów izolacyjnych do konstrukcji kabli wysokiego napięcia ma szczególne znaczenie ze względu na wymaganą wytrzymałość elektryczną i odporność na działanie wyładowań niezupełnych, przy równoczesnym dążeniu do zwiększania wartości roboczego natężenia pola elektrycznego. Odporność materiałów izolacyjnych na działanie wyładowań niezupełnych jest oceniana w próbach długoterminowych z zastosowaniem układów modelowych reprezentujących źródła wyładowań w izolacji kablowej, co pozwala równocześnie na uzyskanie nowych informacji do opisu mechanizmów wyładowań w dielektrykach [8, 9]. Nowoczesne systemy pomiarowe wyładowań niezupełnych umożliwiają detekcje i rejestracje ich przebiegów

impulsowych oraz przetwarzanie do obrazów fazowo-rozdzielczych. Ich zastosowanie oraz metodę oceny stanu powierzchni dielektryka po wyładowaniach, nazwaną „mapowaniem rezystywności”, przedstawiono w artykule.

Wzrost napięć znamionowych kabli elektroenergetycznych

Pierwsze konstrukcje kabli elektrycznych pochodzą z początku XIX wieku [10]. Projekt kabla energetycznego w geometrii koncentrycznej opracował Ferranti w 1890 roku. Wprowadzenie z końcem XIX wieku kabli z izolacją papierową nasyconą olejem mineralnym pozwoliło na rozwój pierwszych sieci przesyłowych. Pionierem budowy kabli z izolacją celulozową nasyconą był włoski inżynier Luigi Emanueli. Duże zasługi w rozwoju technologii kablowych miał Martin Hochstadter, twórca konstrukcji wysokonapięciowych kabli, w których – dla wyrównania rozkładu pola elektrycznego - zastosował na izolacji papierowo-olejowej każdej żyły ekran z perforowanej folii aluminiowej [11]. Spowodowało to wyeliminowanie w izolacji kabli trójżyłowych obszarów o dużym natężeniu pola elektrycznego, ważne szczególnie w kablach wysokich napięć ze względu na inicjowanie i rozwój w izolacji wyładowań niezupełnych. W kablach z izolacją z polietylenu ekran na izolacji tworzy warstwa polietylenu półprzewodzącego. W opisie kabli wysokonapięciowych, o napięciu powyżej 6 kV, litera H oznacza „ekran Hochstadtera”. W 1926 roku opracował on kabel, w którym podwyższone ciśnienie oleju powodowało zmniejszenie poziomu wyładowań w izolacji. Momentem przełomowym było zastosowanie polietylenu w 1942 roku w konstrukcjach kablowych jako materiału izolacyjnego. Dalszy rozwój tej technologii doprowadził do opracowania polietylenu sieciowanego (XLPE – *Cross Linked Polyethylene*) w roku 1963 i pierwszych kabli wysokonapięciowych w 1968 roku.

Rysunek 1 przedstawia wzrost napięć znamionowych kabli elektroenergetycznych wysokiego napięcia przemiennego w latach 1930-2020.



Rys. 1. Wzrost napięć znamionowych kabli elektroenergetycznych wysokiego napięcia przemiennego z izolacją papierową i polimerową [10].

Jest on efektem doskonalenia procesów technologicznych kabli o izolacji z papieru nasyczonego, a następnie wprowadzenia – w przybliżeniu w latach 70-tych ubiegłego wieku – technologii kabli z izolacją polimerową wytłaczaną.

Zasadniczym czynnikiem postępu w technologiach wysokonapięciowych jest stosowanie materiałów izolacyjnych spełniających określone wymagania wynikające z rodzaju i poziomu narażeń eksploatacyjnych, w tym głównie elektrycznych i termicznych. Znaczenie mają również prace teoretyczne, w szczególności analizy pola elektrycznego i jego współpracy z polem cieplnym w kablu.

Odrębna grupa zagadnień dotyczy postępu w dziedzinie techniki pomiarów i w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych, w szczególności w ramach badań odbiorczych i badań typu kabli. Jest to głównie problem prób napięciowych oraz pomiaru wyładowań niezupełnych sygnalizowany i rozwijany w kolejnych etapach produkcji kabli wysokiego napięcia. Temat powyższy był i ciągle jest przedmiotem analiz teoretycznych i prac doświadczalnych koordynowanych przez międzynarodowe stowarzyszenie CIGRE (*Conseil International des Grands Réseaux Électriques*) począwszy od lat 20-tych ubiegłego wieku.

Problematyka kablowa w pracach Konferencji Wielkich Sieci Elektrycznych w latach 30-tych XX wieku

Wraz z rozwojem kabli wysokiego napięcia aktualnie było zagadnienie oceny ich jakości oraz możliwości zastosowania coraz większych wartości napięć roboczych w ich konstrukcjach. Sprawą ujednoczenia norm i przepisów, dotyczących metod prób i badań fabrykacyjnych od dawna zajmowała się Konferencja Wielkich Sieci Elektrycznych (WSE), organizacja międzynarodowa z siedzibą w Paryżu, powstała w roku 1921. Już w roku 1927 na wniosek Holendra Bellaara Spruyta ustanowiona została przy konferencji WSE osobna Komisja Kablowa, a jej celem było zebranie różnych norm krajowych i przepisów. Efekty działania Komisji Kablowej przedstawił jej przewodniczący G.J.Th.Bakker podczas obrad VI Konferencji WSE, która odbyła się w dniach od 18-27 czerwca 1931 roku w Paryżu (Rys. 2).



Rys.2. VI Konferencja Wielkich Sieci Elektrycznych w Paryżu w dniach 18-27 czerwca 1931 roku [12].

Sprawozdanie z obrad oraz przebieg dyskusji są treścią artykułu w Przeglądzie Elektrotechnicznym nr 1 z dnia 1 października 1931 roku, pod tytułem „Zagadnienie badania kabli wysokiego napięcia” (Rys. 3), którego autorem był inż. Stanisław Bładowski (miał wówczas 29 lat).

Należy podkreślić, iż niedawno minęło 90-lat od ukazania się tego artykułu, w którym to okresie prace w dziedzinie techniki kablowej doprowadziły do konstrukcji kabli na napięcie 500 kV aktualnie.

Stanisław Bładowski (Rys. 4), od 1947 roku profesor w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, twórca wielu konstrukcji kabli wysokiego napięcia jest założycielem Katedry Urządzeń i Sieci Elektrycznych (w następnych latach Katedra Elektroenergetyki) w AGH oraz Laboratorium Wysokich Napięć (LWN) na Wydziale Elektrycznym, w którym według projektu i pod nadzorem prof. Bładowskiego uruchomiony został wówczas generator napięć udarowych 100 kV. W bieżącym roku przypada 120 rocznica urodzin Profesora Stanisława Bładowskiego. Uczestnikami VI Konferencji WSE byli również profesorowie Kazimierz Drewnowski i Stanisław Szpor.



Rys. 3. Kopia artykułu w Przeglądzie Elektrotechnicznym w roku 1931 [5].

Podczas VI Konferencji WSE Komisja Kablowa ustaliła i zatwierdziła program badań po produkcji kabli wysokiego napięcia. Program ten dotyczył:

- kabli trójfazowych o napięciu roboczym do 66 kV, oraz
- kabli jednofazowych o napięciu roboczym do 50 kV,

z izolacją z papieru nasyconego syciwem mineralnym.

W odniesieniu do układu izolacyjnego kabli program ten obejmował:

- próby napięciowe,
- próbę na przebicie,
- pomiar *spółczynnika stratności dielektrycznej* (obecnie współczynnika strat dielektrycznych),
- pomiary pojemności i rezystancji izolacji,

oraz dodatkowo: pomiar grubości izolacji i próbę na zginanie.

Jednym z najważniejszych punktów tego programu było wprowadzenie pomiaru *spółczynnika stratności dielektrycznej* dla zasygnalizowania konieczności zwrócenia uwagi na zjawisko określone jako *jonizacja w kablach*, będące przyczyną dodatkowych strat mocy. Komisja

Kablowa uznała jednogłośnie za celowe wprowadzenie pomiarów strat dielektrycznych do oceny kabli elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Program pomiarów zaleconych przez Komisję Kablową obejmował pomiary *spółczynnika stratności dielektrycznej* w funkcji napięcia w następujących warunkach:

- w temperaturze otoczenia,
- po nagraniu kabla do temperatury 40°C i utrzymaniu w tej temperaturze przez ½ godziny.



Rys. 4. Profesor Stanisław Bładowski (1902-1971).

Po oziębieniu kabla do temperatury 10-15°C należało napięcie zwiększać w zakresie od 0,5 do 2,5 napięcia roboczego, wykonując pomiary przy ośmiu jego wartościach. Jako napięcie, przy którym zachodzi inicjowanie zjawiska – *napięcie jonizacji* – przyjęto wartość napięcia, powyżej której straty dielektryczne zwiększały się bardziej niż z kwadratem napięcia.

Określono również wartość dopuszczalną *spółczynnika stratności dielektrycznej* powyżej *napięcia jonizacji*, która w wymienionym reżimie pomiarowym nie powinna przekraczać wartości 0,02 w temperaturze otoczenia. Sprecyzowano również wartości dopuszczalne *spółczynnika stratności dielektrycznej* mierzonego w podwyższonej temperaturze. W dyskusji proponowano inne wartości kryterialne w pomiarach *spółczynnika stratności dielektrycznej*, zwrócono także uwagę na wpływ czynników eksploatacyjnych, takich jak podwyższona temperatura, cykle obciążenia kabla na warunki inicjowania i rozwoju zjawisk jonizacji w izolacji kablowej w polu elektrycznym. Jednym z ważniejszych tematów było podkreślenie faktu, iż straty dielektryczne występują w całej długości kabla, a miejsce jonizacji jest lokalnym źródłem strat dodatkowych, które może nie ujawnić się w pomiarach zależności współczynnika strat od napięcia. Obecnie zjawisko jonizacji określane jest mianem wyładowań niezupełnych i dotyczy wszystkich układów izolacyjnych, tzn. stałych, ciekłych i gazowych.

Stosowany wówczas w pomiarach strat dielektrycznych mostek Scheringa jest w zmodyfikowanej formie stosowany również obecnie. Charakterystyka zależności współczynnika strat dielektrycznych od napięcia nie daje jednoznacznej informacji o wartości napięcia jonizacji (napięcia początkowego wyładowań niezupełnych), gdyż mierzona wartość tego napięcia odnosi się do wartości średniej strat w całym odcinku kabla. Określenie napięcia początkowego wyładowań niezupełnych miało szczególne znaczenie w związku z wymaganiami odbiorców kabli aby wartość tego napięcia nie była mniejsza od napięcia roboczego kabla. W tym okresie nie były jeszcze znane metody techniczne pomiaru przebiegów impulsowych generowanych przez zjawiska jonizacji w dielektrykach. Równocześnie wzrastała świadomość zagrożenia jakie niesie to zjawisko ze względu na możliwość rozwoju

procesów degradacji w izolacji i skrócenia czasu pracy urządzenia. Potrzeba ograniczenia lub eliminowania zjawiska jonizacji w izolacji kablowej oznaczała konieczność poprawy procesu technologicznego wykonywania izolacji nasyczonej papierowej i zapewnienia braku wtrącin gazowych stanowiących źródła wyładowań. Zjawisko jonizacji stanowiło główne ograniczenie tempa rozwoju kabli na coraz wyższe napięcia znamionowe.

Lata 30-te ubiegłego wieku to okres wzrostu zainteresowania rozwojem układów izolacyjnych obiektów dla elektroenergetyki, w tym badań mechanizmów wyładowań niezupełnych i metod ich detekcji. Należy wymienić podstawową pozycję w tej dziedzinie, jaką jest artykuł Gemanta i Philippoffa w roku 1932 oraz przedstawiony w nim model dielektryka z źródłem wyładowań tzw. model „a-b-c” [13]. Propozycja metod badań jonizacji opisana w artykule Armana i Starra [14] wykorzystuje w tych badaniach zastosowanie układu mostkowego opracowanego przez H.Scheringa w 1919 roku.

Zakres metod badań kabli z izolacją z papieru nasyczonego na napięcie znamionowe do 40 kV

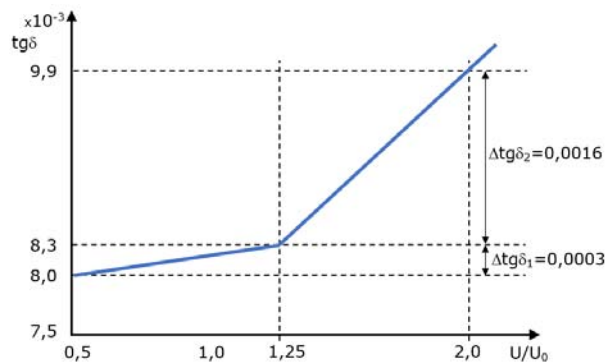
Zalecenia Komisji Kablowej z 1931 roku wprowadzane były i uzupełniane w następnych latach w przepisach badań fabrycznych, kiedy to rozwijana była produkcja kabli wysokiego napięcia z izolacją z papieru nasyczonego. Dokumentem zawierającym program badań fabrycznych kabli elektroenergetycznych z izolacją papierową nasyczoną na napięcie znamionowe U_0/U nie przekraczające 23/40 kV (U_0 – napięcie fazowe) była Polska Norma PN-76/E-90250 [15]. Do grupy wymienionych w niej badań elektrycznych należą przede wszystkim próby napięciowe i pomiar współczynnika strat dielektrycznych, w tym:

- sprawdzenie odporności izolacji na napięcie probiercze o częstotliwości przemysłowej równe $2,5U_0$ (dla kabli na napięcie znamionowe 23/40kV jest to wartość 57kV),
- sprawdzenie odporności izolacji na długotrwałe napięcie probiercze równe $4U_0$ w czasie 4 godzin (dla kabli na napięcie znamionowe 23/40kV jest to wartość 92kV),
- sprawdzenie odporności izolacji na napięcie udarowe,
- sprawdzenie współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$ przy napięciach $0,5U_0$, U_0 , $1,25U_0$ i $2U_0$. Jego wartość przy napięciu $0,5U_0$ nie powinna przekraczać 0,008, a maksymalny jego przyrost w zakresie od $1,25U_0$ do $2U_0$ nie powinien być większy od 0,0016 (dotyczy kabli na napięcie 40 kV, syciwo zwykłe).
- sprawdzenie zależności współczynnika strat dielektrycznych od temperatury,
- sprawdzenie względnej różnicy pojemności.

Dla przykładu wykres zależności $\text{tg}\delta(U)$ dla kabla na napięcie 18/30 kV przedstawia wykres na rysunku 5.

Do wymienionej normy PN76-/E-90250 wprowadzono w roku 1999 uzupełnienia (PN76-E-90250/Az3) [16], a następnie w roku 2003 norma ta została zastąpiona przez nową normę PN-HD621 [17]. W normie tej dodatkowo wprowadzono pomiar wyładowań niezupełnych. Zalecana metoda pomiaru wyładowań niezupełnych jest opisana w normie IEC60270 [18] i scharakteryzowana w kolejnej sekcji tego artykułu.

Wyładowania niezupełne w izolacji z papieru nasyczonego stanowią istotną przyczynę uszkodzeń tego typu kabli. Są inicjowane w inkluzjach gazowych pozostałych po procesie technologicznym lub powstałych w eksploatacji w wyniku np. cyklicznych zmian temperatury.



Rys. 5. Zależność $\text{tg}\delta(U)$ dla kabla o izolacji z papieru nasyczonego na napięcie 30 kV; $\Delta\text{tg}\delta_1 = 0,0003$, $\Delta\text{tg}\delta_2 = 0,0016$.

Wyładowania niezupełne mogą rozwijać się po powierzchni taśm papierowych i między nimi, doprowadzając do przebicia izolacji. Zdjęcie na rysunku 6 przedstawia ślady wyładowań na powierzchni taśmy papieru izolacyjnego zdjętej z kabla po jego uszkodzeniu.



Rys. 6. Ślady wyładowań na powierzchni papieru kablowego.

Zakres metod badań kabli elektroenergetycznych o izolacji wytłaczanej polimerowej w grupach napięciowych SN, WN i NN

Napięcie średnie (SN)

Etap prac prowadzonych nad konstrukcjami kabli o izolacji wytłaczanej polimerowej (z polietylenu PE, gumy etylenowo propylenowej EPR) wykonywanych w ramach badań pełnych, niepełnych i pomontażowych w zakresie napięć średnich do 40 kV podsumowany został w międzynarodowej normie IEC 502 w roku 1983, będącej następnie podstawą opracowanej w Polsce w roku 1999 normy PN-E/90410 [19]. W normie tej przedstawione są wymagania dotyczące badań pełnych i niepełnych kabli z izolacją z polietylenu na napięcie znamionowe od 3,6/6 kV do 18/30 kV. W grupie badań elektrycznych oprócz prób napięciowych napięciem przemiennym (w temperaturze otoczenia i podwyższonej), próby długotrwałej, próby napięciem udarowym, znajdują się badania dla oceny właściwości izolacji, bezpośrednio lub pośrednio wynikających z jej odporności na działanie wyładowań niezupełnych. Należy tu:

- sprawdzenie współczynnika strat dielektrycznych w zależności od napięcia (w kablach uprzednio poddanych nawijaniu). Zmierzony w temperaturze otoczenia przy napięciu U_0 nie powinien przekraczać 0,004, a jego przyrost przy zwiększaniu napięcia od $0,5U_0$ do $2U_0$ nie powinien przekroczyć 0,002.
- sprawdzenie intensywności wyładowań niezupełnych, która przy napięciu $2U_0$ nie powinna przekroczyć 5 pC.

Wyładowania niezupełne w izolacji polietylenowej są następstwem wad procesu technologicznego, w szczególności obecności wtrącin gazowych w objętości izolacji lub mikrostrzy na powierzchni ekranów na żyłę kablowej i na izolacji, dających początek mechanizmowi drzewienia elektrycznego (*electrical trening*).

Napięcie wysokie (WN)

Wymagania i badania dotyczące kabli na napięcie znamionowe od 30 kV do 150 kV z grupy WN z szeregu napięciowego U_0/U : 26/45 kV, 36/69 kV, 64/110 kV, 76/132 kV, 87/150 kV, sformułowane są w normie międzynarodowej IEC60840, przy czym: I wyd. 1988 dotyczy badań kabli, II wyd. 1999 r. dodatkowo badań osprzętu, III wyd. 2004 r. badań kompletnego systemu kablowego. Badania typu kompletnego systemu kablowego zawierają (w kolejności wykonywania):

- próbę odporności na zginani kabla,
- pomiar wyładowań niepełnych w temperaturze otoczenia,
- pomiar współczynnika strat dielektrycznych $\tan\delta$,
- próbę napięciową z cyklami grzejnymi,
- pomiary wyładowań niepełnych w temperaturze otoczenia i podwyższonej,
- próbę napięciem udarowym,
- próbę napięciem przemiennym o częstotliwości przemysłowej,
- badania osprzętu i kompletnego systemu kablowego.

Procedura pomiarów wyładowań niepełnych przedstawiona w normie IEC 60885-3 [20] obejmuje pomiary intensywności wyładowań z czułością 5 pC lub lepszą przy napięciu $1.75U_0$ utrzymywanym przez 10 sekund, a następnie pomiar przy napięciu $1.5U_0$. Pomiar wyładowań niepełnych może być również wykonywany w podwyższonej temperaturze.

Pomiar współczynnika strat dielektrycznych na odcinkach próbnym kabla wykonywany jest przy zwiększaniu napięcia do wartości U_0 , przy czym jego wartość nie powinna przekraczać 0,001.

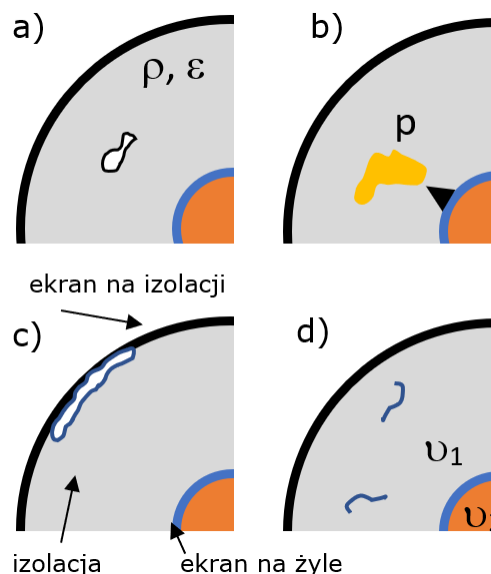
Napięcie najwyższe (NN)

Najwyższy poziom napięć znamionowych reprezentują kable z grupy NN z szeregiem napięciowym U_0/U : 127/220 kV; 160/275 kV; 190/330 kV; 220/380 kV; 290/550 kV. Zakres badań kabli NN sformułowany w normie IEC62067 [21, 22] w odniesieniu do badań wyładowań niepełnych i współczynnika strat dielektrycznych obejmuje wymienione wcześniej badania zalecane dla kabli grupy WN [23]. W pomiarach wykonywanych zgodnie z IEC60885-3 [20] intensywność wyładowań nie powinna przekraczać 5 pC przy napięciu $1.5U_0$, a wartość współczynnika strat dielektrycznych przy napięciu U_0 nie powinna być większa niż 0,001.

Charakterystyka źródeł wyładowań niepełnych w izolacji kablowej

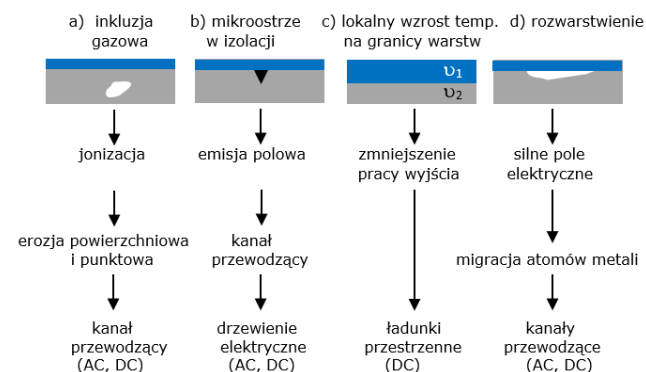
Jednym z efektów działania pola elektrycznego w układach izolacyjnych są różne formy wyładowań elektrycznych. Zgodnie z międzynarodową normą IEC60270 [18] wyładowanie niepełne jest to lokalne wyładowanie w polu elektrycznym ograniczone do części objętości lub powierzchni układu izolacyjnego, przylegającej do jednej z elektrod lub nieprzylegającej, które w sposób bezpośredni nie powodują powstania zwarcia międzyelektrodowego, natomiast długotrwałe działanie wyładowań jest przyczyną przemian w strukturach materiałów izolacyjnych i prowadzi do przebicia elektrycznego. Norma definiuje detekcję elektryczną wyładowań niepełnych w paśmie częstotliwości do 1 MHz. Procesy degradacji materiałów w wysokonapięciowych układach izolacyjnych są zatem efektem obecności i transportu ładunków elektrycznych, zarówno własnych, jak i wprowadzonych przez wyładowania niepełne. Przyczyną przewodnictwa własnych nośników ładunków elektrycznych jest

zawilgocenie oraz zanieczyszczenie materiałów, powodujące wzrost konduktywności elektrycznej izolacji. Możliwe defekty w izolacji kablowej, stanowiące źródła ładunków wprowadzonych w wyniku wyładowań niepełnych przedstawia rysunek 7.



Rys. 7. Przykłady defektów w izolacji kablowej: a) inkluzja gazowa, b) mikroostrze na powierzchni ekranu na żyłę kablowej, c) zła przyczepność izolacji do ekranu lub rozwarstwienie na granicy izolacja-ekran, d) wtrącenia przewodzące w izolacji; p - ładunki przestrzenne, ρ - rezystywność elektryczna izolacji, ε - przenikalność elektryczna, U_1 , U_2 - temperatura izolacji i żyły kablowej.

Charakterystyczne defekty w izolacji stanowiące miejsca inicjowania wyładowań niepełnych i przemian w strukturach dielektryków oraz etapy ich rozwoju przedstawiają schematy na rysunku 8.



Rys. 8. Przykłady etapów rozwoju wyładowań niepełnych w izolacji.

Przykłady na rysunku 8 ilustrują mechanizmy procesów w izolacji inicjowanych przez wyładowania niepełne. Są nimi:

- Jonizacja w inkluzji gazowej w objętości izolacji, której efektem jest erozja jej powierzchni. W makroskopowym opisie oznacza to zmniejszenie rezystywności powierzchniowej dielektryka w źródle wyładowań i tworzenie się lokalnych kraterów.
- Wyładowania w polu elektrycznym silnie niejednostajnym w otoczeniu przewodzących mikroostrzy w izolacji lub powstałych na powierzchni ekranów. Wyładowania te, będące efektem emisji polowej Fowlera-Nordheima są przyczyną mechanizmu drzewienia elektrycznego (*electrical treeing*).

- c) Różnice temperatur powierzchni w miejscu styczności przewodnika i dielektryka mogą być przyczyną wyzwania elektronów z powodu zmniejszenia pracy wyjścia w wyniku efektu Schottkiego. Jest to przyczyna zmian zależności temperaturowej konduktywności elektrycznej i zwiększania się jej wartości.
- d) Rozwarstwienie na granicy przewodnik / dielektryk (mikroinkluzja przyelektrodowa) w silnym polu elektrycznym jest miejscem emisji jonów metalu i ich migracji w głąb dielektryka stałego.

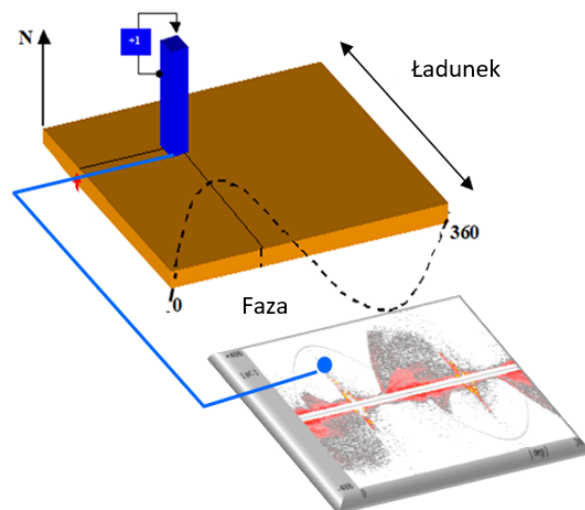
e)

Metody elektryczne pomiaru wyładowań niezupełnych

Podstawą elektrycznych metod pomiarów wyładowań niezupełnych w wysokonapięciowych układach izolacyjnych jest stwierdzenie powodowanych przez wyładowania strat mocy oraz ich impulsowy charakter wynikający ze zjawisk jonizacji w defektach struktury materiałów izolacyjnych. W pierwszym przypadku zastosowanie mają na przykład metody mostkowe, w tym wspomniany już mostek Scheringa, zastosowany w pracach Armana i Starra [14]. Mechanizm jonizacyjny wyładowań elektrycznych jest opisany w teorii lawin elektronowych J.F.Townsenda i w rozszerzonej teorii strimerowej H.Raethera. Jonizacja przestrzenna w gazie, tworzenie się lawin elektronowych, wyzwianie elektronów z powierzchni przewodnika lub dielektryka (w zależności od usytuowania źródła wyładowań w izolacji) oraz ruch skierowany ładunków, wskazują na impulsowy przebieg tych zjawisk. Odstęp czasu między kolejnymi impulsami jest wyznaczany przez wartości napięć zapłonu i gaśnięcia wyładowań i przy napięciu przemiennym jest rzędu mikrosekund. W latach 60-tych XX wieku T.Dakin zapoczątkował pomiary wizualizujące wyładowania w odniesieniu do kąta fazowego, zwykle w postaci elipsy [23]. Przełomowym momentem była nie tylko wizualizacja wyładowań na fazie ale też ilościowy pomiar, uwzględniający statystyczny charakter wyładowań na płaszczyźnie fazowo-rozdzielczej, określane mianem PRPDA (*Phase Resolved Partial Discharge Analysis*) [24]. Rozpoznanie możliwości technicznych pomiaru przebiegów impulsowych wyładowań elektrycznych w dielektrykach dało początek systemom pomiarowym o coraz większej czułości, rejestrujących wymagane przebiegi funkcyjne. Obecnie najczęściej stosowaną metodą w pomiarach wyładowań niezupełnych w układach izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia jest analiza fazowo-rozdzielcza PRPDA. Reprezentację obrazu fazowego wyładowań przedstawia graficznie rysunek 9. Metoda ta pozwala na rejestrację w czasie rzeczywistym kolejnych impulsów wyładowań niezupełnych w odniesieniu do położenia kąta fazowego wysokiego napięcia. Realizacją sprzętową jest sprzężony analizator wielokanałowy, w którym jeden kanał odpowiada za kwantyzację amplitudy, a drugi za skalowanie osi czasu zgodnie z pozycją fazową wysokiego napięcia. Procesy fizyczne wyładowań niezupełnych wykazują charakter stochastyczny, stąd różne formy wyładowań, np. wyładowania w inkluzjach gazowych, powierzchniowe, wyładowania od mikrostrzy, przejawiają się różnymi wzorcami na płaszczyźnie fazowo-rozdzielczej. Zawartość macierzy akwizycji odzwierciedla statystyczny rozkład wyładowań niezupełnych pod względem liczby impulsów wyładowań o określonym kącie fazowym i amplitudzie.

Zmieniające się warunki fizyko-chemiczne materiałów w próbach długotrwałych pod działaniem wyładowań niezupełnych mają wpływ na postać obrazów fazowych. Identyfikacja zbiorów impulsów w okresach fazowych z etapami przemian (procesów degradacji) w strukturach materiałów izolacyjnych stanowi kierunek badań nad

doborem materiałów do wysokonapięciowych układów izolacyjnych.



Rys. 9. Metodologia pomiarów fazowo-rozdzielczych wyładowań niezupełnych.

Stochastyczny charakter wyładowań wykorzystywany jest we współczesnej diagnostyce bazującej na ich analizie fazowo-rozdzielczej, w której to metodzie różne formy wyładowań reprezentowane są przez odmienne typy obrazów. Dodatkowo metoda ta umożliwia wyróżnienie zewnętrznych zakłóceń, lub przebiegów niekoherentnych z wysokim napięciem. Ważnym elementem dla interpretacji obrazów fazowych wyładowań jest czystość widmowa napięcia zasilającego i niewystępowanie w nim harmonicznych napięcia, mających istotny wpływ na mechanizm wyładowań. W przypadku pomiarów wyładowań w kablach istnieje możliwość lokalizacji źródeł wyładowań na podstawie analizy fal bezpośrednio docierających do detektora oraz odbitych, znając parametry propagacji. Oprócz metod elektrycznych stosowane są także metody akustyczne, elektromagnetyczne i optyczne detekcji wyładowań niezupełnych w układach izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych. Wiele praktycznych wskazówek i rekomendacji pomiarowych zawartych jest w literaturze opracowanej przez IEEE i CIGRE [np. 26-29].

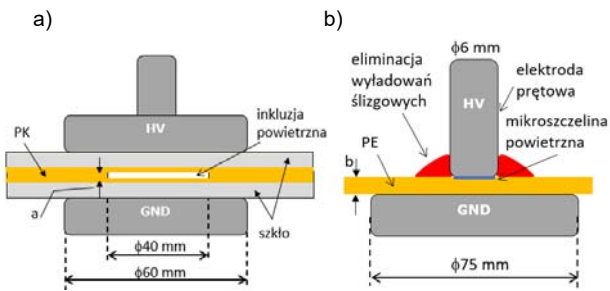
Badania laboratoryjne mechanizmów fizykalnych wyładowań niezupełnych

W badaniach laboratoryjnych wyładowań niezupełnych stosowane są odpowiednie układy modelowe, zapewniające wymagany rozkład pola elektrycznego – jednostajny lub niejednostajny. Celem badań laboratoryjnych jest:

- poznanie etapów rozwoju wyładowań,
- ocena odporności materiałów izolacyjnych na wyładowania,
- poznanie wpływu czynników zewnętrznych na mechanizm wyładowań, np. temperatury, rodzaju napięcia i innych,
- wykorzystanie próbek materiałów po działaniu wyładowań do analiz fizyko-chemicznych.

W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych skutków oddziaływania wyładowań niezupełnych na materiały izolacyjne (papier kablony, polietylen), zastosowane w próbkach modelowych reprezentujących:

- A) wyładowania w defektach w izolacji w inkluzji gazowej między warstwami papieru kablony (PK) (Rys. 10a),
- B) wyładowania w miejscu styczności przewodnika i dielektryka (polietylen) w silnym polu elektrycznym (Rys. 10b).



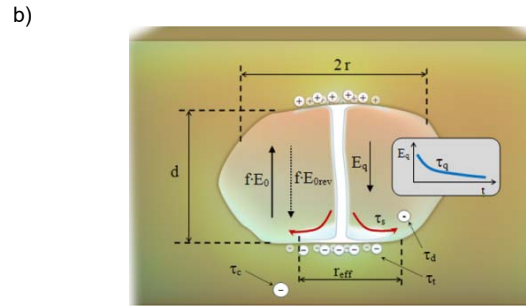
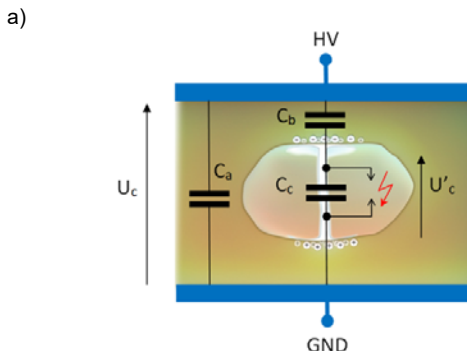
Rys. 10. Próbki modelowe: a) inkluzja gazowa, $a=240 \mu\text{m}$; b) defekt przyelektrodowy, $b=1 \text{ mm}$.

Model A

Fragment dielektryka stałego z inkluzją gazową będącą źródłem wyładowań w polu elektrycznym, wraz ze schematem zastępczym oraz model źródła wyładowań z zjonizowanym kanałem i rozplywem ładunków przedstawiają odpowiednio rysunki 11a i 11b. Pojemności w schemacie zastępczym reprezentują części dielektryka: C_a - wolną od wyładowań; C_b - wolną od wyładowań lecz przewodzącą prąd wyładowania; C_c - inkluzji gazowej, w której występują wyładowania. W modelu tym ładunek mierzony na zaciskach badanego obiektu zwany jest ładunkiem pozornym. Skutki energetycznego oddziaływania wyładowań na powierzchnię dielektryka stałego w ich źródłach można wyjaśniać modelem zmian pola elektrycznego w tym źródle, przedstawiony na rysunku 11b [9]. Zmiany stanu powierzchni dielektryka stałego można łączyć ze mianami natężenia pola elektrycznego E_q w źródle wyładowań. Gromadzenie się ładunków na powierzchni inkluzji gazowej następujące interakcje poprzez dodatkowe efekty polowe, stwarza warunki dla inicjowania kolejnych wyładowań [30]. Na modelu źródła wyładowań symbolicznie reprezentuje ten efekt pole E_q zanikające ze stałą czasową τ_q , które jest w superpozycji z zewnętrznym polem pochodzącym od wysokiego napięcia. Zanik pola E_q wynika z szeregu czynników jak: obecności prądu jonowego w dielektryku, wartości jego przewodności powierzchniowej i skrośnej, zjawisk rekombinacji i pułapkowania nośników ładunków. Dynamika zmian tego pola decyduje m.in. o intensywności wyładowań oraz efektach powierzchniowych. Kanał wyładowania przemieszcza się przestrzennie i oddziałuje na powierzchni graniczne, tworząc tzw. efektywne powierzchnie wyładowań.

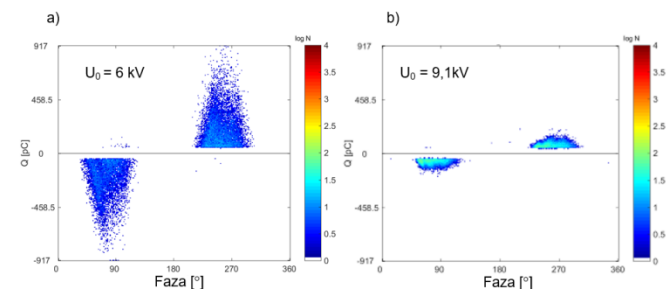
W toku próby czasowej w ciągu 10 godzin działania wyładowań przy napięciu $U=1.5U_i$ (U_i - napięcie początkowe wyładowań) rejestrowane obrazy fazowe wykazały zmniejszenie się intensywności wyładowań (Rys. 12).

Potwierdził to pomiar napięcia początkowego U_i , które zwiększyło się od napięcia początkowego równego 6 kV do 9 kV po czasie próby. Istotną częścią eksperymentu była ocena stanu powierzchni papieru kablowego po próbie czasowej [31, 32].



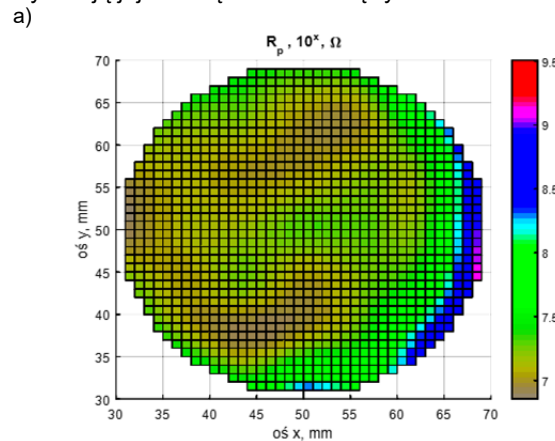
Rys. 11. Inkluzja gazowa w dielektryku stałym a) schemat zastępczy pojemnościowy, b) kanał wyładowania w inkluzji gazowej; C_a - pojemność dielektryka stałego, C_b - pojemność dielektryka szeregowego, C_c - pojemność inkluzji gazowej, E_0 - pole elektryczne od napięcia zewnętrznego, E_q - pole od ładunków powierzchniowych po wyładowaniu, d - grubość inkluzji, r - promień inkluzji, r_{eff} - efektywna powierzchnia wyładowań.

Przykład oceny efektywnej powierzchni wyładowań w badaniach laboratoryjnych, przedstawiono stosując metodę „mapowania” wielopunktowego rezystywności powierzchniowej. Mapa powierzchni papieru kablowego w źródle wyładowań wykazuje obszary o różnych wartościach rezystywności elektrycznej powierzchniowej w zakresie od $10^7 \Omega$ do $10^9 \Omega$ (Rys. 13), podczas gdy rezystywność materiału nie narażanego wynosiła $8,9 \cdot 10^{10} \Omega$. Widoczne jest formowanie się lokalnych centrów na powierzchni papieru kablowego.

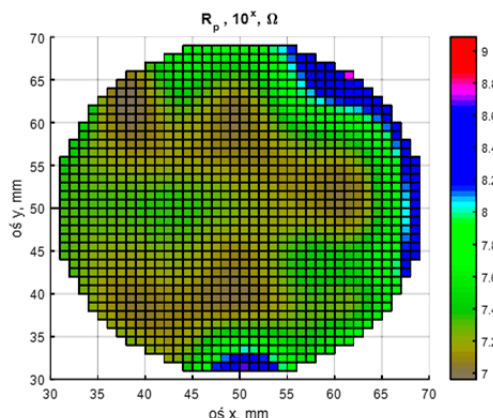


Rys. 12. Obrazy fazowe wyładowań niepełnych w modelu A z papierem kablowym: a) przy napięciu początkowym wyładowań $U_0=6,0 \text{ kV}$, na początku próby, b) przy napięciu $U_0=9,1 \text{ kV}$, po 10h próby.

Losowo rozproszone obszary działania wyładowań na powierzchniach inkluzji gazowej tworzą w toku próby lokalne klastry o zmniejszonej rezystywności powierzchniowej, utożsamiane z efektem erozji. Mapy rezystywności powierzchniowej papieru kablowego wykazują jej zmianę o około 2 rzędy wielkości.



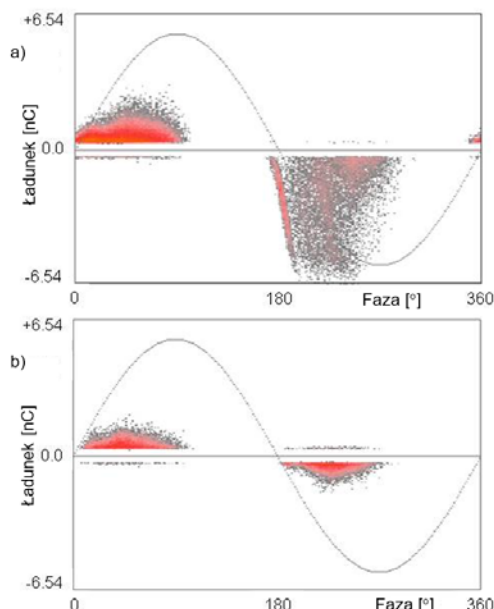
b)



Rys. 13. Mapy rezystywności powierzchniowej papieru kablowego w inkluzji gazowej po próbie czasowej. Powierzchnie inkluzji: a) górna; b) dolna.

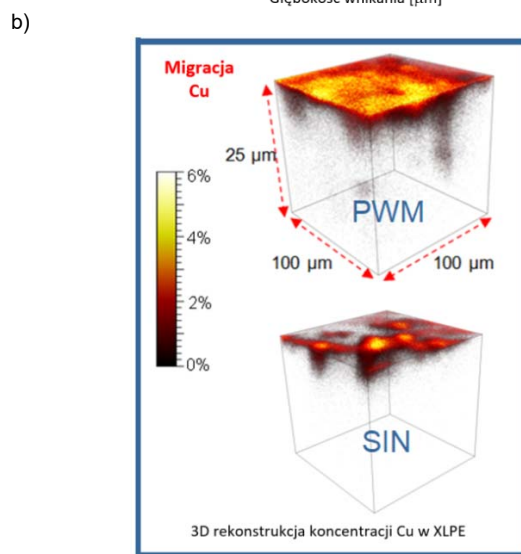
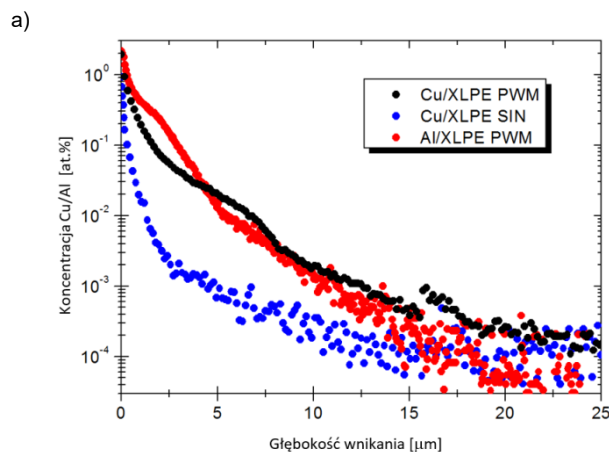
Model B

Model na rysunku 10b ilustruje fragment układu izolacyjnego w miejscu styczności przewodnika (elektrody prętowej miedzianej lub aluminiowej) z powierzchnią dielektryka (polietylen), przy czym między nimi istnieje mikroszczelina powietrzna o grubości rzędu mikrometrów. Szczelina ta tworzy z dielektrykiem stałym uwarstwienie szeregowe w polu elektrycznym, w którym natężenie pola elektrycznego w niej przy napięciu 5 kV wynosi kilka do kilkanaście kV/mm. W warunkach prób oddziaływania wyładowań niepełnych, z których każda trwała 200 godzin stosowano napięcie stałe, przemienne i impulsowe o modulowanej szerokości impulsu (fala PWM dwupoziomowa, o podstawowej częstotliwości 50 Hz, czasie narastania zbocza 600 ns) o amplitudzie 5 kV. W celu eliminowania wyładowań ślizgowych zastosowane zostało pokrycie półprzewodzące w postaci stożka w otoczeniu elektrody prętowej (Rys. 10b). Efekt eliminowania wyładowań ślizgowych przy napięciu 5 kV przedstawiają obrazy fazowe na rysunku 14.



Rys. 14. Obrazy fazowe dla próbki modelowej B przy napięciu 5 kV: a) w obecności wyładowań ślizgowych, b) po ich wyeliminowaniu.

Górna powierzchnia sześciangu odpowiada powierzchni styku elektrody wysokonapięciowej z polietylenem.



Rys. 15. a) Profil penetracji Cu i Al. Przy napięciu sinusoidalnym i impulsowym; b) 3D rekonstrukcja koncentracji Cu przy narażeniu SIN i PWM.

Obserwacje powierzchni polietylenu po działaniu wyładowań niepełnych i badaniach metodą spektrometrii masowej wykazały obecność atomów metali w dielektryku stałym [33]. Najmniejsza głębokość wnicania atomów metali występują przy napięciu stałym, natomiast przy narażeniu impulsowym PWM jest o około 2 rzędy większa w porównaniu z narażeniem sinusoidalnym.

Rysunek 15a przedstawia koncentrację atomów Cu i Al (materiały elektrod) w funkcji głębokości ich wnicania w głąb dielektryka stałego, przy narażeniach sinusoidalnym (Cu) i PWM (Al, Cu). Rysunek 15b przedstawia rekonstrukcję przestrzenną koncentracji atomów miedzi w głąb dielektryka stałego.

Powyższa wizualizacja ilustruje efekt migracji atomów miedzi i głębokość ich wnicania, która przy narażeniu PWM wynosi około 25 μm. Mechanizm penetracji atomów metali do dielektryka zależy od temperatury i został zaobserwowany w obszarze powierzchni granicznej styczności przewodnik-dielektryk w silnym polu elektrycznym, pod wpływem wyładowań niepełnych. W dużym uproszczeniu można traktować ten efekt jako tzw. drzewienie metaliczne (*metallic treeing*), przez analogię do drzewienia elektrycznego lub wodnego w dielektrykach. Wyładowania niepełne w warunkach opisanych na modelu B mogą inicjować lub wspomagać mechanizm drzewienia elektrycznego. Mechanizm transportu jonów odnosi się zarówno do silnego pola elektrycznego jak i podwyższonej temperatury w źródle wyładowań.

Podsumowanie

Wyładowania niepełne w wysokonapięciowych układach izolacyjnych są przyczyną procesów degradacji w strukturach tworzących je dielektryków. Pomiar wyładowań niepełnych znajdują się w programach badań kabli elektroenergetycznych wysokiego napięcia na wszystkich poziomach napięciowych, od 3,6 kV do 500 kV obecnie, a ich wyniki są wskaźnikami stanu izolacji po procesie technologicznym.

Pomiary wyładowań niepełnych w wysokonapięciowych kablach elektroenergetycznych, będących efektem zjawisk jonizacji w izolacji, zapoczątkowane już w latach 30-tych ubiegłego wieku, są kontynuowane na wszystkich poziomach napięciowych kabli. Wraz ze wzrostem napięć znamionowych i towarzyszącym mu zwiększaniem się roboczego natężenia pola elektrycznego w izolacji kablowej, wymagana jest większa czułość pomiarów wyładowań oraz mniejsze są dopuszczalne maksymalne wartości współczynnika strat dielektrycznych i jego przyrostów na charakterystyce zależności od napięcia. Badania mechanizmów fizykalnych tych zjawisk wskazują na różne skutki ich oddziaływania na materiały izolacyjne, w tym: erozję powierzchniową, erozję punktową, migracje atomów metali. Wyjaśnienie mechanizmów fizykalnych tych zjawisk służy ocenie odporności materiałów izolacyjnych na ich działanie w eksploatacji.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Barbara Florkowska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: beflor@agh.edu.pl;
dr hab. inż. Marek Florkowski, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: marek.florkowski@agh.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Mazzanti, G., Issues and Challenges for HVDC Extruded Cable Systems, *Energies*, 2021, 14, 4504
- [2] Sun J., Du B., Li J., Li Z., Electrical tree degradation in high-voltage cable insulation: progress and challenges, *IET High Voltage*, 2020, 5, 353-364
- [3] Elfaraskoury A., Gouda O., Mokhtar M., Mehann M., Experience of partial discharge with IEC type testing and after installation testing for extruded cables, *CIGRE Conf.*, B1 – Insulated cables, 2014
- [4] Rakowska A., Linie kablowe najwyższych napięć prądu przemiennego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2008, 4, 39-45
- [5] *Przegląd Elektrotechniczny* nr 1, 1931, <https://dbc.wroc.pl>
- [6] Florkowska B., Florkowski M., Zydrón P., Pomiar i analiza wyładowań niepełnych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia przy narażeniach eksploatacyjnych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2010, 4, 241-244
- [7] Krüger M., Hummel R., Böhler S., Ufferhardt M., McGuigan A., Partial Discharge Measurement and Monitoring on High Voltage XLPE Cables, *CIGRE*, 2013
- [8] Rynkowski A., Kable i linie kablowe wysokich napięć – wytrzymałość elektryczna i prognozowanie żywotności, *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2015, 83, 30-35
- [9] Florkowski M., Partial discharges in high-voltage insulating systems – mechanisms, processing, and analytics, ISBN 978-83-66364-75-2, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2020
- [10] Black R.M., *The History of Electric Wires and Cables*, ISBN-10-0863410014, 1983
- [11] Florkowska B., Włodek R., Florkowski M., Kuniewski M., Wysokienapięcie w elektroenergetyce – wybrane zagadnienia i obliczenia, ISBN 978-83-66364-35-6, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2020.
- [12] Foto: <https://electra.cigre.org/312-october-2020/centennial-celebration/the-inter-war-years.html>
- [13] Gemant A., Philippoff W., Die FunkenstreckemitVorkondensator, *ZeitschriftfürTechn.Physik*, 1932, 13, 425–430
- [14] Arman A.N., Starr A.T., The Measurement of Discharges in Dielectrics, *Journal of Inst. of Electr.Eng.*, 1936, 79, 67–81
- [15] PN-76/E-90250 "Kable elektroenergetyczne o izolacji papierowej i powłoce metalowej na napięcie znamionowe nie przekraczające 23/40kV. Ogólne wymagania i badania"
- [16] PN-E-90250:1976/Az3:1999 "Kable elektroenergetyczne o izolacji papierowej i powłoce metalowej na napięcie znamionowe nie przekraczające 23/40 kV - Ogólne wymagania i badania"
- [17] PN-HD 621 S1:2003 "Kable elektroenergetyczne średniego napięcia o izolacji papierowej przesyconej"
- [18] IEC 60270 "High voltage test techniques – charge based measurement of partial discharges"
- [19] PN-E-90410:1994/Az1:1999 "Kable elektroenergetyczne o izolacji z polietylenu usieciowanego na napięcie znamionowe od 3,6/6 kV do 18/30 kV -- Ogólne wymagania i badania"
- [20] IEC 60885-3:2015 "Electrical test methods for electric cables - Part 3: Test methods for partial discharge measurements on lengths of extruded power cables"
- [21] IEC 62067 "Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV up to 500 kV - Test methods and requirements"
- [22] Czaszejko T., Nowe wymagania dla badań kwalifikacyjnych i badan typu kabli energetycznych wysokiego napięcia, *X Symp. Problemyeksploatacjiukładówizolacyjnychwysokiegonapięcia*, EU'05, 2005
- [23] IEC 60840:2020 "Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV up to 150 kV - Test methods and requirements"
- [24] Dakin T.W., Malinaric P.J., A capacitive bridge method for measuring integrated corona charge transfer and power loss per cycle, *Trans AIEE PAS*, 1960, 79
- [25] Fruth B., Niemeyer L., Hassig M., Fuhr J., Dunz T., Phase Resolved Partial Discharge Measurements and Computer Aided Partial Discharge Analysis Performed on Different High Voltage Apparatus, *6th Int. Symp. On High Voltage Eng.*, ISH89, New Orleans, USA, 1988
- [26] IEEE Standard 400.3 "IEEE Guide for partial discharge testing of shielded power cable systems in a field environment"
- [27] CIGRÉ Technical Brochure No. 182, "Partial discharge detection in installed HV extruded cable systems", WG 21.16, 2001
- [28] CIGRÉ Technical Brochure No. 366, "Guide for electrical partial discharge measurements in compliance to IEC 60270", WG D1.33, 2008
- [29] CIGRÉ Technical Brochure No. 728, "On-site partial discharge assessment of HV and EHV cable systems", WG B1.28, 2018.
- [30] Pan C., Wu K., Chen G., Florkowski M., Lv Z., Tang J., Understanding Partial Discharge Behavior from the Memory Effect Induced by Residual Charges: A Review, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insul.*, 2020, 27, 1936-1950
- [31] Florkowski M., Florkowska B., Kuniewski M., Zydrón P., Mapping of discharge channels in void creating effective partial discharge area, *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, 2018, 25, 2220 - 2228
- [32] Pan C., Wu K., Meng Y., Cheng Y., Tang J., The effect of discharge area variation on stochastic characters of PD magnitude, *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, 2017, 24, 217- 226
- [33] Florkowski M., Florkowska B., Rybak A., Zydrón P., Migration effects at conductor / XLPE interface subjected to partial discharges at different electrical stresses, *IEEE Trans. on Dielect. and Electr. Insul.*, 2015, 22, 456 – 462