



Mariusz Trojnar*, Mariusz Gamracki*, Stanisław Wyderka*

WYBRANE PROBLEMY BADANIA WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNYCH IZOLACJI WYSOKONAPIĘCIOWEJ

Streszczenie: Spośród przedstawionych w dostępnej literaturze aktualnych problemów metrologicznych w zakresie badania właściwości elektrycznych izolacji wysokonapięciowej do najważniejszych można zaliczyć: problem wpływu zjawisk występujących w polu elektrycznym w cieczy izolacyjnej na wyniki pomiarów jej przewodności elektrycznej, problem zależności wyników pomiarów przewodności dielektryków stałych od rodzaju zastosowanych elektrod pomiarowych, problem badania pojemności i stratności elektrycznej dielektryków w obecności wyładowań niezupełnych oraz problem badania stratności elektrycznej układów izolacyjnych urządzeń wysokonapięciowych w czasie ich eksploatacji. W referacie przedstawiono wymienione problemy oraz proponowane sposoby ich rozwiązania.

Słowa kluczowe: izolacja wysokonapięciowa, właściwości elektryczne, badania

1. Wstęp

Badania podstawowych właściwości elektrycznych materiałów izolacyjnych, takich jak przewodność, przenikalność i stratność, wiążą się często z koniecznością rozwiązywania szeregu problemów metrologicznych. Jednym z warunków uzyskania miarodajnych wyników badań jest identyfikacja wszystkich zjawisk towarzyszących pomiarowi danej wielkości, związanych np. z obecnością pola elektrycznego w próbce materiału i wokół niej, a także związanych z wpływem zastosowanej metody badawczej. Identyfikacja niepożądanych zjawisk towarzyszących pomiarom powinna prowadzić w miarę możliwości do ich eliminacji przez zmianę lub udoskonalenie zastosowanej metody badawczej lub powinna prowadzić do dokonywania oceny ilościowej ich wpływu na wyniki pomiarów.

* Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

Postępy w zakresie inżynierii materiałowej i techniki izolacyjnej stawiają przed metrologią coraz trudniejsze zadania. W dostępnej literaturze dotyczącej badań podstawowych właściwości materiałów izolacyjnych można znaleźć opisy i analizy wielu konkretnych problemów metrologicznych oraz wyniki badań prowadzących do ich rozwiązania.

Niżej przedstawiono wybrane problemy badania przewodności oraz pojemności (związanej bezpośrednio z przenikalnością elektryczną) i stratności elektrycznej materiałów izolacyjnych.

2. Badanie przewodności cieczy izolacyjnych

Pomiar przewodności cieczy izolacyjnej polega, ogólnie rzecz biorąc, na umieszczeniu próbki cieczy w naczyniu z elektrodami pomiarowymi, doprowadzeniu napięcia do elektrod i pomiarze prądu przepływającego przez ciecz. Można także wyznaczyć przewodność cieczy izolacyjnej pośrednio przez pomiar jej stratności ($\text{tg } \delta$) metodą mostkową.

Norma międzynarodowa [1] wymaga przeprowadzania pomiaru przewodności cieczy izolacyjnej przy odległości elektrod pomiarowych od 1 do 2,5 mm i natężeniu stałego pola elektrycznego 250 V/mm.

Pole elektryczne w badanej cieczy izolacyjnej, spowodowane przyłożonym do elektrod napięciem, jest przyczyną wielu zjawisk utrudniających pomiar jej rzeczywistej przewodności. Ma wpływ na powstawanie, przemieszczanie się i usuwanie nośników ładunku elektrycznego. Ma więc wpływ na wartość prądu przewodzenia i jego zmienność w czasie.

Rozwiązanie tego problemu polega na stworzeniu warunków pomiaru, w których opisane zjawiska nie wystąpią lub będą miały pomijalny wpływ na otrzymane wyniki. Zgodnie z ustaleniami przedstawionymi w [2] można to uzyskać dobierając odpowiednio kształt i wartość napięcia U_p , odstęp między elektrodami d oraz czas pomiaru prądu przewodzenia t_p .

Nośniki ładunku elektrycznego tworzące prąd przewodzenia w cieczy izolacyjnej pochodzą ze śladowych ilości domieszek dysocjujących oraz mogą pochodzić z elektrod w obecności wystarczająco silnego pola elektrycznego. Ponadto wartość prądu przewodzenia może być zwiększona przez zjawisko elektrokonwekcji.

Wartość natężenia pola elektrycznego, przy którym nie występuje jeszcze wstrzykiwanie nośników ładunku z elektrod do cieczy oraz nie występuje zjawisko elektrokonwekcji, a także nie jest zauważalnie zakłócona równowaga termodynamiczna cieczy mająca wpływ na intensywność dysocjacji, wynosi według [2] 100 V/mm. Dla pewności zaleca się stosowanie wartości mniejszych, np. $U_p \leq 10$ V na każdy milimetr odstęp między elektrodami. Istotnym czynnikiem jest także kształt przyłożonego do elektrod napięcia, który pośrednio wiąże się z odstępem między elektrodami d i czasem pomiaru prądu przewodzenia t_p .

Właściwy dobór odstępów między elektrodami d polega na uniknięciu wpływu na prąd przewodzenia warstw jonów występujących w sposób naturalny na powierzchniach elektrod zanurzonych w badanej cieczy. Grubość g takiej warstwy dla

temperatury pokojowej można obliczyć ze wzoru Debye'a

$$g = \sqrt{\frac{\nu\varepsilon}{40\sigma}} \quad (1)$$

gdzie: ν — ruchliwość jonów, ε — przenikalność elektryczna cieczy, σ — przewodność elektryczna względna cieczy.

Dla cieczy izolacyjnych, np. dla oleju transformatorowego grubość warstwy jonów na każdej z elektrod jest rzędu 0,1 mm. Warstwy te nie mają wpływu na prąd przewodzenia, gdy odstęp między elektrodami jest wielokrotnie większy od ich grubości, np. w [2] przyjęto $d = 3,5$ mm.

Dla uniknięcia wpływu na wyniki pomiarów polaryzacji elektrod i usuwania nośników ładunku z przestrzeni międzyelektrodowej napięcie o danej polaryzacji powinno być przyłożone do elektrod przez czas nie dłuższy niż 1 s. Warunek ten można spełnić stosując napięcie przemiennie o kształcie prostokątnym i częstotliwości 0,5...1 Hz. W każdej połowce napięcia prąd przewodzenia zaczyna płynąć od nowa zmniejszając się w czasie jej trwania. Jego pomiar powinien być wykonany na początku połowki napięcia w czasie t_p możliwie krótkim w stosunku do czasu jej trwania. Zaleca się wykonanie serii pomiarów w kolejnych połówkach napięcia i wyliczenie wartości średniej.

3. Wpływ elektrod na przewodność elektryczną dielektryków stałych

Prawidłowe przeprowadzenie badań właściwości elektrycznych materiałów izolacyjnych wymaga m.in. właściwego przygotowania próbek badanego materiału oraz zastosowania odpowiednich elektrod. Wybór rodzaju elektrod pomiarowych w oparciu o zalecenia norm może nie gwarantować uzyskania miarodajnych wyników badań, szczególnie z punktu widzenia przewidywanego zastosowania badanego materiału izolacyjnego.

Przykładem potwierdzającym powyższe stwierdzenie są wyniki badań przedstawione w [3]. Zbadano m.in. wpływ rodzaju elektrod pomiarowych na pomierzoną przewodność elektryczną polietylenu usieciowanego XLPE stosowanego na izolację kabli elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Interesujące jest porównanie wartości przewodności cienkich (~40 mm) próbek polietylenu uzyskanych dla dwóch rodzajów elektrod pomiarowych. Jeden z zestawów próbek wykonano z elektrodami aluminiowymi, nanosząc je metodą naporowania katodowego. Elektrody drugiego zestawu próbek wykonano z polietylenu półprzewodzącego w taki sam sposób, jak wykonuje się warstwy półprzewodzące w procesie wytwarzania kabli z izolacją polietylenową.

Przewodność polietylenu pomierzona na próbkach z elektrodami z polietylenu półprzewodzącego była średnio 20 razy większa od pomierzonej na próbkach z elektrodami aluminiowymi. Pomiarzy wykonano w temperaturze od 20 do 90°C, przy natężeniu pola elektrycznego w próbkach od 10^4 do 10^6 V·cm⁻¹. Oznacza to, że pomiary wykonane z zastosowaniem elektrod aluminiowych dały wyniki w istotnym

stopniu niemiarodajne, jeżeli przyjąć, że badany polietylen miał być zastosowany na izolację kabli.

4. Badanie pojemności i stratności elektrycznej w obecności wyładowań niezupełnych

Pomiary stratności elektrycznej $\text{tg } \delta$ oraz pojemności C (w oparciu o którą można wyznaczyć przenikalność elektryczną ϵ) są przeprowadzane na próbkach izolacji lub na całych układach izolacyjnych i należą do klasycznych badań izolacji stałej i mieszanej (ciekło-stałej). Pomiary przeprowadza się za pomocą zmiennoprądowych mostków Scheringa lub mostków pojemnościowych. Wyznacza się zwykle charakterystyki napięciowe pojemności i stratności elektrycznej układu izolacyjnego.

Dla napięć probierczych, przy których nie występują wyładowania niezupełne w badanej izolacji pomiary C i $\text{tg } \delta$, których wartości leżą w zakresie pomiarowym zastosowanego mostka, nie sprawiają istotnych problemów. Trudności pojawiają się kiedy ustalenie charakterystyk tych wielkości obejmuje zakresy napięć, w obrębie których w badanej izolacji występują wyładowania niezupełne. Ma to miejsce np. przy badaniu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych wysokiego napięcia. Tradycyjne podejście polegające na doprowadzeniu mostka do równowagi jest niekiedy bardzo trudne, czasochłonne i daje wynik obciążony znacznym błędem.

Dla uniknięcia tych problemów, zamiast równoważenia mostka w celu wyznaczenia C i $\text{tg } \delta$ można zastosować metodę zaproponowaną w [4]. Metoda ta polega na wstępnym zrównoważeniu mostka przy napięciu probierczym, przy którym nie występują jeszcze wyładowania niezupełne. Następnie przy wyższych wartościach napięcia przeprowadza się pomiar (detekcję) składowej czynnej i składowej pojemnościowej sygnału nierównowagi mostka dla określonej częstotliwości pomiarowej. Na podstawie tych pomiarów można w prosty sposób obliczyć wartości pojemności i stratności elektrycznej badanej izolacji.

Wstępne zrównoważenie mostka przy niższym napięciu jest konieczne, pozwala uzyskać porównywalne wartości składowej pojemnościowej i składowej czynnej sygnału nierównowagi przy napięciach powodujących wyładowania niezupełne. Właściwości diagnostyczne takiego mostka można znacznie rozszerzyć [4] przez przystosowanie go do pomiarów przy różnych częstotliwościach detekcji sygnału nierównowagi.

5. Badanie stratności elektrycznej układów izolacyjnych podczas ich eksploatacji

Współczynnik strat elektrycznych $\text{tg } \delta$ jest jedną z najczęściej stosowanych miar stanu izolacji wysokonapięciowej. Pomiary tej wielkości wiążą się często z określonymi trudnościami, np. z opisanymi wyżej w punkcie 4. Wyniki pomiarów $\text{tg } \delta$ izolacji urządzenia wysokonapięciowego uzyskane w laboratorium mogą różnić się (niekiedy znacznie) od rzeczywistej stratności izolacji występującej w czasie normalnej eksploatacji tego urządzenia. Jednym z powodów tych rozbieżności są różnice między

obciążeniami napięciowymi układu izolacyjnego w czasie jego eksploatacji i w czasie badania.

Stosowane obecnie układy pomiarowe (mostki prądu przemiennego) są przystosowane do pomiaru przy napięciach probierczych do kilkudziesięciu kilowoltów. Ograniczenie to wynika głównie z wytrzymałości napięciowej izolacji kondensatorów wzorcowych. Wprawdzie można zbudować kondensator wzorcowy na wystarczająco wysokie napięcie, ale użycie go łącznie z pozostałymi elementami mostka do pomiaru stratności izolacji urządzenia w warunkach jego eksploatacji byłoby bardzo kłopotliwe.

Wydaje się możliwe zastosowanie prostszej metody pomiaru stratności izolacji urządzeń wysokonapięciowych w czasie ich pracy. Wartość $\operatorname{tg} \delta$ można wyznaczyć w oparciu o pomiar kąta δ jako dopełnienia do 90° kąta między napięciem przemienym przyłożonym do badanego układu izolacyjnego a prądem przepływającym przez niego.

Realizacja techniczna tej metody polega na detekcji obydwóch wielkości przemiennych i pomiarze kąta przesunięcia między nimi. Informację o przebiegu prądu przepływającego przez izolację można uzyskać mierząc spadek napięcia na niewielkim oporniku wpiętym między normalnie uziemioną elektrodę badanego układu izolacyjnego a ziemię. Wartość rezystancji tego opornika powinna być na tyle mała, żeby nie wpływała na fazę prądu przepływającego przez układ izolacyjny oraz, żeby napięcie na nim nie zagrażało obsłudze i przyrządom pomiarowym.

Drugą potrzebną informację, tzn. o przebiegu napięcia przyłożonego do badanego obiektu można uzyskać korzystając z miernika pola elektrycznego. Pole elektryczne w pobliżu badanego obiektu jest w fazie z wytwarzającym go napięciem. Sondę miernika pola elektrycznego należy umieścić na poziomie ziemi.

Obydwa uzyskane w ten sposób sygnały należy poddać odpowiedniej obróbce (dopasowanie amplitudowe, prostowanie jednopółkwoke, przyspieszenie sygnału z miernika pola elektrycznego o 90°). Następnie uformowane sygnały należy podać na wejście fazomierza. Ze względu na to, że wartości $\operatorname{tg} \delta$ praktycznych układów izolacyjnych nie są zwykle większe niż 0,01, to wartości kąta δ wskazywane przez fazomierz w radianach są równe liczbowo wartości $\operatorname{tg} \delta$ z pomijalnym błędem.

Literatura

- [1] IEC 247, 1978: *Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor and dc resistivity of insulating liquids*
- [2] **Tobazéon R., Filippini J. C., Marteau C.**: *On the measurement of the conductivity of highly insulating liquids*. IEEE Trans. on Diel. and Electr. Insul., Vol. 1, No 6, December 1994, pp. 1000–1004
- [3] **Suh K. S., Lee C. R., Noh J. S., Tanaka J., Damon D. H.**: *Electrical conduction in polyethylene with semiconductive electrodes*. IEEE Trans. on Diel. and Electr. Insul., Vol. 1, No 2, April 1994, pp. 224–230
- [4] **Burnley K. G., Exon J. L.**: *Diagnostic measurement based on bridge out-of-balance signals*. IEEE Trans. on Electr. Insul., Vol. 26, No 2, April 1991, pp. 200–209

SELECTED PROBLEMS OF TESTING OF ELECTRIC CHARACTERISTICS OF HIGH
VOLTAGE INSULATION

Among up-to-date measuring problems in the investigation domain of electric characteristics of high voltage insulation the most important are: the problem of influence of effects having place in electric field in insulating liquid on measurement results of its electric conductivity, the problem of dependence of conductivity measuring results of solid dielectrics on the type of measuring electrodes used, the problem of capacitance and dielectric loss measurement of insulation materials in the presence of partial discharges, and the problem of dielectric loss measurement of insulation systems of high voltage devices during their operating time. The paper presents the listed above problems and proposed ways of their solution.