



Janusz FLESZYŃSKI, Adam TYMAŃ

Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Politechnika Wroclawska

## Diagnostyka elektroenergetycznych izolatorów kompozytowych w eksploatacji

**Streszczenie.** W diagnostyce izolatorów kompozytowych w eksploatacji stosuje się metody: wizualnej inspekcji, inspekcji z wykorzystaniem przetworników elektronowo-optycznych, termografii w podczerwieni, badań rozkładu pola elektrycznego, badań emisji akustycznej. Metody te opisano oraz przedstawiono dotychczasowe doświadczenia światowe w ich zastosowaniu.

**Abstract. (In-service diagnostics of composite insulators).** In diagnostic of composite insulators in service, the following methods are used: visual inspections, vision observation with an image intensification equipment, infrared thermography, electrical field measurement and acoustic emission detection. In the paper, these methods are described as well as hitherto existing world experiences are presented.

**Słowa kluczowe:** linia elektroenergetyczna, izolator kompozytowy, diagnostyka w eksploatacji.

**Keywords:** power line, composite insulator, in-service diagnostics.

### Wstęp

Izolatory kompozytowe są coraz powszechniej stosowane w elektroenergetycznych liniach przesyłowych i rozdzielczych w wielu krajach na świecie [1, 2, 3]. Mają one wiele zalet w porównaniu z tradycyjnymi izolatorami porcelanowymi i szklanymi, do których należą przede wszystkim mniejszy ciężar, większa wytrzymałość elektryczna w napowietrznych warunkach zabrudzeniowych, mniejsze koszty transportu, łatwiejszy i zajmujący mniej czasu montaż na liniach. Mają jednak podstawową wadę: ich odporność na starzenie w warunkach eksploatacyjnych jest mniejsza niż izolatorów ceramicznych i szklanych. Starzeniu ulegają zwłaszcza obszary mikroskopowych i makroskopowych powierzchni granicznych [4]. Mikroskopowe powierzchnie graniczne tworzą się w miejscach styku żywicy z ziarnami napelnacza (osłona) lub włóknami wzmacniającymi (rdzeń). Makroskopowe powierzchnie graniczne dotyczą natomiast styku zewnętrznej powierzchni osłon z powietrzem oraz wewnętrznej powierzchni rozdziału osłona-rdzeń. Pod działaniem narażeń eksploatacyjnych – elektrycznych, mechanicznych i środowiskowych – następuje degradacja właściwości izolatorów (zmniejsza się np. zdolność osłon z kauczuku silikonowego do hydrofobizacji zabrudzeń) oraz mogą się tworzyć defekty zagrażające dalszej pracy izolatorów (np. głęboka lokalna erozja osłony silikonowej, odsłaniająca rdzeń szkło-epoksydowy, nieodporny na działanie wilgoci). Groźne defekty mogą powstawać po długim czasie pracy izolatorów i mają wówczas charakter starzeniowy. Mogą jednak rozwijać się w stosunkowo krótkim czasie i są wówczas wynikiem błędów technologiczno-konstrukcyjnych w produkcji izolatorów lub nieprawidłowego ich doboru.

Badania diagnostyczne izolatorów kompozytowych mają zatem trzy główne cele:

- wykrycie i identyfikację defektów izolatorów stwarzających duże ryzyko awarii,
- ocenę – w aspektach starzeniowych – stanu technicznego izolatorów,
- identyfikację źle wykonanych i niewłaściwie dobranych izolatorów.

Badania wykonuje się metodami wymagającymi wyłączenia linii elektroenergetycznej z eksploatacji oraz metodami w eksploatacji, tj. podczas pracy linii. W artykule

zostaną przedstawione stosowane metody badań diagnostycznych izolatorów kompozytowych w eksploatacji.

### Metody badań diagnostycznych

W diagnostyce konwencjonalnych izolatorów porcelanowych i szklanych od dawna stosuje się metody badań w eksploatacji. Są one skuteczne, zwłaszcza w wykrywaniu przebitych ogniw łańcuchów izolatorów kołpakowych.

Metody eksploatacyjnych badań diagnostycznych izolatorów kompozytowych ze względu na ich specyfikę muszą być odpowiednio modyfikowane. Poszukuje się również nowych metod, konkurencyjnych dla metod tradycyjnych.

Do metod diagnostycznych stosowanych w eksploatacji izolatorów kompozytowych należą [3, 5, 6]:

- wizualna inspekcja,
- inspekcja z wykorzystaniem przetworników elektronowo-optycznych,
- termografia w podczerwieni,
- badanie rozkładu pola elektrycznego,
- badanie emisji akustycznej.

Podstawową metodą diagnostyki izolatorów kompozytowych jest wizualna inspekcja. Jest ona dokonywana z użyciem odpowiednich lunet lub lornet z poziomu ziemi, ze słupów elektroenergetycznych lub z helikopterów, zazwyczaj raz w roku. Powinno się w niej dążyć do wykrycia zwłaszcza następujących defektów: erozja powierzchniowa w postaci tzw. „skóry krokodyla” lub wyraźnie zdegradowanej szorstkiej powierzchni (rys. 1), erozyjne lub zwęglone ścieżki na powierzchni izolatora, przebite klosza, przebite osłony rdzenia, pęknięcie klosza lub osłony na rdzeniu, uszkodzenie uszczelnienia okuć, głębokie uszkodzenie osłony odsłaniające rdzeń szkło-epoksydowy (rys. 2). Szczególnie groźne są uszkodzenia umożliwiające penetrację wilgoci oraz kwaśnych wodnych roztworów (kwaśne deszcze) do wnętrza izolatorów. Mogą one powodować awarie mechaniczne izolatorów wskutek kruchych pęknięć włókien szklanych lub awarie elektryczne wskutek rozwoju wyładowań wzdłuż powierzchni granicznej rdzeń-osłona. Tak zdefektowane izolatory powinny być jak najszybciej wymienione.

Dzięki obserwacjom izolatorów z użyciem elektronowo-optycznych przetworników (EOP) można stwierdzić, czy występują na nich niezupełne wyładowania elektryczne (wyładowania ulotowe, wyładowania powierzchniowe).



Rys. 1. Zdegradowana powierzchnia osłony silikonowej na pniu izolatora

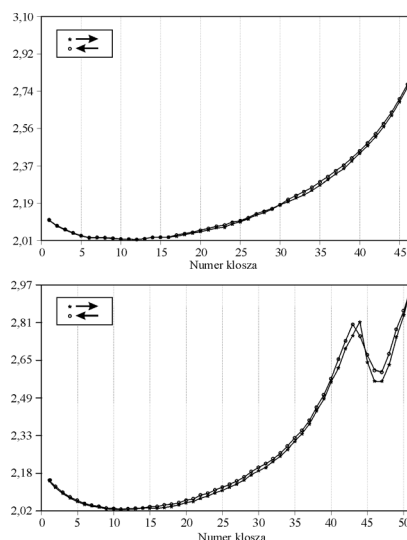


Rys. 2. Głęboka erozja osłony silikonowej, odsłaniająca rdzeń szkło-epoksydowy przy okuciu izolatora

Ponieważ widmo energetyczne wyładowań niepełnych leży głównie w zakresie ultrafioletu (UV-A) w przedziale od 300 do 380 nm [5], więc konieczny jest odpowiedni dobór EOP (duża czułość w tym przedziale ultrafioletu, soczewki kwarcowe). Możliwa jest wówczas obserwacja i rejestracja wyładowań niepełnych nawet o małej intensywności. W badaniach należy zwracać uwagę na charakter rozwijających się wyładowań, zwłaszcza w aspekcie ich stabilności i działania degradacyjnego. Stabilne i skoncentrowane wyładowania stanowią duże zagrożenie. W wyniku ich działania tworzą się bowiem ścieżki erozyjne na osłonach silikonowych i zwęglone ścieżki na osłonach etyleno-propylenowo-dienowych. Dotychczas badania wykonywano w nocy z użyciem przetworników noktowizyjnych. Niedawne pojawienie się na rynku aparaturowym nowych kamer elektronowo-optycznych, opracowanych specjalnie do badań wyładowań elektrycznych w świetle dziennym, niewątpliwie spowoduje rozwój tej metody badań.

Defekty o zwiększonej przewodności elektrycznej powodują wydzielanie się ciepła, co można wykorzystać w diagnostyce metodą termografii w podczerwieni (termografia IR). Nowoczesne kamery termowizyjne z odpowiednimi układami optycznymi umożliwiają czułą rejestrację rozkładu temperatury na izolatorach kompozytowych z dużej odległości, z powierzchni ziemi. Wyraźnie wyższa temperatura lokalna może być spowodowana defektem zarówno na powierzchni osłony, jak i we wnętrzu izolatora (rdzeń, powierzchnia rozdziału rdzeń-osłona). Dla wiarygodnego wnioskowania diagnostycznego konieczna jest jednak eliminacja wpływu czynników zewnętrznych, takich jak nasłonecznienie, wiatr, deszcz. Dlatego badania termograficzne powinny być wykonywane w czasie pochmurnej, bezdeszczowej i bezwietrznej pogody. Dotychczasowe doświadczenia

wskazują, że metoda ta daje dobre efekty i ma perspektywy szerszego stosowania [3].



Rys. 3. Rozkład natężenia pola elektrycznego (jednostki względne) na izolatorach kompozytowych na linii 735 kV [9]: a) izolator nieuszkodzony, b) izolator z przewodzącym defektem w części zbliżonej do okucia pod napięciem; → pomiary w kierunku od okucia uziemionego do okucia pod napięciem, ← pomiary w kierunku od okucia pod napięciem do okucia uziemionego

Badania rozkładu napięć na łańcuchach izolatorów kołpakowych mają na celu wykrycie przeбитych ogniw. Wykonuje się je na liniach z użyciem iskiernika lub woltomierza elektrostatycznego zamontowanego na drążku izolacyjnym. Bardzo mała pojemność i bardzo duża rezystancja izolatorów kompozytowych praktycznie uniemożliwiają wykorzystanie tych przyrządów pomiarowych. Głównie z tego względu w Laboratorium Hydro-Quebec opracowano tester, którego podstawowymi elementami są: sonda pola elektrycznego i mikroprocesorowy układ elektroniczny, służący do rejestracji i zapamiętywania wyników pomiarów [7, 8]. Tester ten, zamontowany na drążku izolacyjnym, jest w badaniach rozkładu pola elektrycznego przesuwany wzdłuż izolatora kompozytowego. Rozkład pola elektrycznego na silikonowych izolatorach kompozytowych – nieuszkodzonym i zdeformowanym – zamontowanych na linii 735 kV, przedstawiono na rys. 3. Tester wykrywa przewodzące defekty (zwęglone ścieżki na osłonach, częściowe przebicia wewnętrzne), ale wyłącznie o dużych rozmiarach. Jest on obecnie produkowany przez firmę POSITRON na licencji Laboratorium Hydro-Quebec [9].

Wyładowania elektryczne są źródłem emisji akustycznej. Podejmuje się próby wykorzystania tego zjawiska w diagnostyce izolatorów kompozytowych, przede wszystkim do wykrywania wyładowań występujących we wnętrzu izolatorów. Zastosowanie tej metody w praktyce, a zwłaszcza na liniach najwyższych napięć, bardzo utrudniają zakłócenia akustyczne i elektromagnetyczne generowane przez wyładowania na przewodach oraz wyładowania rozwijające się z metalowej armatury izolatorów.

#### Doświadczenia światowe

Wyniki doświadczeń światowych dotyczące zastosowania i badań izolatorów kompozytowych w eksploatacji zostały opublikowane przez CIGRE w 2000 roku [3]. Podstawę publikacji stanowiła ankieta wypełniona przez 74 zakłady energetyczne (towarzystwa energetyczne) z wielu krajów na świecie (niestety z USA, gdzie zainstalowano bardzo dużo izolatorów kompozytowych,

odpowiedzi na ankietę były nieliczne). Badaniem ankietowym objęto około 700.000 izolatorów kompozytowych zainstalowanych na liniach elektroenergetycznych,

co stanowi próbkę reprezentatywną do analizy (szacuje się, że na świecie było wówczas zainstalowanych około 3.500.000 izolatorów kompozytowych).

Tabela 1. Izolatory kompozytowe uszkodzone w eksploatacji oraz parametry charakteryzujące awaryjność izolatorów [3]

Miejsce uszkodzenia	Awaryjność izolatorów				Liczba sumaryczna
	$U < 200$ kV	$200 \leq U < 300$ kV	$300 \leq U < 500$ kV	$U \geq 500$ kV	
Oslona z kloszami	25	8	0	0	33
Powierzchnia graniczna osłona-rdzeń	51	10	6	2	69
Rdzeń	23	8	101	1	133
Wysunięcie rdzenia z okucia	4	2	0	0	6
Metalowe okucie	2	0	0	0	2
Liczba sumaryczna	105	28	107	3	243
Liczba izolatorów ujętych ankietą	456835	174482	59446	1413	692176
Awaryjność [%]	0,023	0,016	0,18	0,21	0,035
Parametr pracy $\Sigma$ (izolator $\times$ lata pracy)	2 991 000	1 102 000	558 000	28 000	4 679 000
Wskaźnik awaryjności	0,35	0,25	1,9	1,1	0,52

Tabela 2. Stosowane metody eksploatacyjnych badań diagnostycznych izolatorów kompozytowych [3]

Rodzaj badań	Australia	Kanada	Europa	Świat
Obserwacje z powierzchni ziemi	3/8	7/10	14/33	33/74 (20/31)
Obserwacje ze słupa	1/8	7/10	14/33	31/74 (10/31)
Termografia IR	0/8	2/10	6/33	11/74 (2/31)
Obserwacja nocna z użyciem EOP	0/8	3/10	1/33	10/74 (5/31)
Badania rozkładu pola elektrycznego	0/8	1/10	1/33	2/74
Badania emisji akustycznej	0/8	2/10	0/33	2/74

Wyniki oceny awaryjności izolatorów kompozytowych zestawiono w tabeli 1. Podano w niej liczbę uszkodzonych izolatorów kompozytowych w zależności od napięcia linii i wskazano uszkodzone elementy izolatorów (miejsce uszkodzenia). Podano w niej także obliczone parametry awaryjności izolatorów kompozytowych. Tylko 0,035% zainstalowanych izolatorów uległo uszkodzeniu, co po uwzględnieniu czasu ich pracy daje wskaźnik awaryjności równy 0,52 (wskaźnik jest określony liczbą uszkodzonych izolatorów w ciągu jednego roku pracy 10 000 izolatorów). Dla porównania wskaźnik awaryjności izolatorów kołpakowych jest zawarty w granicach od 0,5 do 1,5. Z danych zamieszczonych w tabeli 1 wynika również, że nierzadkimi elementami izolatorów kompozytowych są rdzeń i powierzchnia graniczna rdzeń-osłona.

W tabeli 2 zestawiono wyniki ankiety na temat stosowanych w eksploatacji badań diagnostycznych izolatorów kompozytowych. Podano w niej dane uzyskane z Australii, Kanady i Europy oraz od wszystkich 74 respondentów z całego świata. Liczby w nawiasach zamieszczone w kolumnie "Świat" przedstawiają wyniki poprzedniej ankiety CIGRE z 1990 roku. Do istotnych spostrzeżeń wynikających z tej tabeli należą:

- najczęściej stosowaną metodą diagnostyki jest wizualna inspekcja,
- wykorzystanie diagnostyczne termografii w podczerwieni wyraźnie się zwiększa,
- badania rozkładu pola elektrycznego i emisji akustycznej są jeszcze rzadko stosowane,
- badania z wykorzystaniem elektronowo-optycznych przetworników były dotychczas wykonywane jedynie nocą.

## Wnioski

Podstawową i najczęściej stosowaną metodą badań diagnostycznych izolatorów kompozytowych w eksploatacji jest wizualna inspekcja. Wykonujący te badania pracownicy służb elektroenergetycznych powinni być przeszkoleni w celu szczegółowego poznania budowy, właściwości, procesów starzeniowych oraz defektów izolatorów kompozytowych.

Ze względu na rozwój specjalistycznej aparatury w ostatnich latach należy się spodziewać powszechniejszego zastosowania w praktyce termografii w podczerwieni, badań rozkładu pola elektrycznego oraz badań z użyciem elektronowo-optycznych przetworników obrazu przystosowanych do rejestracji wyładowań niezupełnych w świetle dziennym.

Artykuł opracowano w ramach zlecenia badań statutowych nr 341 510, finansowanego przez Komitet Badań Naukowych

## LITERATURA

- [1] Hackam R., Outdoor HV Composite Polymeric Insulators. *IEEE Trans. DEI*, Vol. 6, 1999, No. 5, pp. 557-585
- [2] Kikuchi T., Nishimura S., Nagano M., Izumi K., Kubota Y., Sakata M., Survey on the Use of Non-ceramic Composite Insulators. *IEEE Trans. DEI*, Vol. 6, 1999, 548-556
- [3] CIGRE Working Group 22.03, Worldwide Service Experience with HV Composite Insulators. *Electra*, August 2000, No. 191, pp. 27-43
- [4] Janssen H., Seifert J.M., Kärner H.C., Interfacial Phenomena in Composite High Voltage Insulation. *IEEE Trans. DEI*, Vol. 6, 1999, No. 5, pp. 651-659.
- [5] CIGRE Working Group 22.03, Review of In-service Diagnostic Testing of Composite Insulators. *Electra*, December 1996, No. 169, pp. 105-119
- [6] Phillips A., EPRI's Experience with In-service Inspection of Non-ceramic Insulators. *Insulator News and Market Report*, Vol. 7, 1999, No. 6, pp. 42-45
- [7] Vaillancourt G.M., Hamel M., Frate J., Experience with two Faulty Composite Insulators Detection Methods in Hydro-Quebec. *10<sup>th</sup> Int. Symp. on High Voltage Engineering*, Montreal, 25-29 August 1997
- [8] Vaillancourt G.M., Carignan S., Jean C., Experience with the Detection of Faulty Composite Insulators on High-Voltage Power Lines by the Electric Field Measurement Method, *IEEE/PES - Summer Power Meeting*, Berlin, 20-24 July 1997
- [9] Materiały firmy POSITRON: Positron Insulator Tester

**Autorzy:** prof. Janusz Fleszyński, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław. E-mail: [janusz.fleszynski@pwr.wroc.pl](mailto:janusz.fleszynski@pwr.wroc.pl); dr inż. Adam Tymań, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław. E-mail: [adam.tyman@pwr.wroc.pl](mailto:adam.tyman@pwr.wroc.pl)