



Janusz Fleszyński*, Jacek Wańkiewicz**

OCENA STANU TECHNICZNEGO IZOLATORÓW KOMPOZYTOWYCH PO WIELOLETNIEJ EKSPLOATACJI

Streszczenie: Wykonano badania laboratoryjne 7 izolatorów kompozytowych po wieloletniej eksploatacji poligonowej w liniach elektroenergetycznych 110 kV oraz w Terenowej Stacji Badań Zabrudzeniowych Izolatorów (6 izolatorów z osłonami z kauczuku silikonowego RTV i 1 izolator z osłoną z EPDM). W referacie przedstawiono wyniki: badań hydrofobowości powierzchni izolatorów, prób wysokonapięciowych oraz badań właściwości izolacyjnych rdzeni izolatorów i powierzchni granicznych rdzeń–osłona. Oceniono pozytywnie stan techniczny izolatorów silikonowych oraz ich przydatność do dalszej eksploatacji.

Słowa kluczowe: izolator kompozytowy, eksploatacja poligonowa, badanie laboratoryjne

1. Wstęp

Prace badawcze i konstrukcyjno-technologiczne zmierzające do uruchomienia w kraju produkcji izolatorów kompozytowych dla linii napowietrznych 110 kV podjęto na początku lat siedemdziesiątych we Wrocławiu — w Instytucie Elektrotechniki i na Politechnice w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii. Były one sponsorowane i częściowo współrealizowane przez Oddziały Energoprojektu w Krakowie i w Poznaniu. Na początku lat osiemdziesiątych, po wykonaniu niezbędnych prac badawczych i kompletacji urządzeń technologicznych, rozpoczęto małoseryjną produkcję izolatorów kompozytowych, której celem było wykonanie izolatorów dla próbnej eksploatacji poligonowej. Izolatory te zainstalowano w wybranych liniach elektroenergetycznych 110 kV oraz w Terenowej Stacji Badań Zabrudzeniowych Izolatorów, zbudowanej w Hucie Miedzi w Głogowie [1].

* Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

** Instytut Energetyki w Warszawie, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa

W czasie wieloletniej eksploatacji poligonowej izolatory były systematycznie obserwowane oraz okresowo badane w laboratorium [2]. W 1997 r. wykonano kompleksowe badania laboratoryjne 5 wybranych izolatorów. Program badawczy obejmował próby wysokonapięciowe oraz badania: strukturalne powierzchniowych warstw materiału osłon i zabrudzeń izolatorów, konduktywności powierzchniowej i ESDD, hydrofobowości powierzchni osłon, właściwości izolacyjnych rdzeni izolatorów i powierzchni granicznych rdzeń-osłona. Uzyskane wyniki badań przedstawiono na Sesji Plenarnej CIGRE w Paryżu w 1998 r. [3].

W 1998 r. badaniom poddano następane, wybrane izolatory w celu zwiększenia danych doświadczalnych służących ocenie stanu technicznego izolatorów po wieloletniej poligonowej eksploatacji. Wyniki tych badań przedstawiono w niniejszym referacie.

2. Badane izolatory

Badaniom poddano 7 izolatorów przedstawionych w tabeli 1, w której podano dane materiałowe i konstrukcyjne oraz informacje o warunkach i czasie eksploatacji izolatorów.

Izolatory te pod względem materiałowym, konstrukcyjnym i technologicznym należą do tzw. pierwszej generacji izolatorów kompozytowych. Osłony izolatorów były wykonane z kauczuku silikonowego firmy Rhone-Pulenc — wulkanizowanego w temperaturze pokojowej (SR-RTV-1) lub w podwyższonej w 60°C (SR-RTV-1*) — oraz z elastomeru etyleno-propylenowo-dianowego (EPDM). Rdzenie wszystkich izolatorów stanowiły pręty z włókna szklanego syconego żywicą epoksydową. Izolatory pracowały w liniach elektroenergetycznych (LE) w drugiej strefie zabrudzeniowej (II SZ), pod napięciem 110/ $\sqrt{3}$ kV oraz w Terenowej Stacji Badań Zabrudzeniowych Izolatorów (TSBZ) w czwartej strefie zabrudzeniowej (IV SZ), pod napięciem 70 kV. Wykonano również badania jednego izolatora nieeksploatowanego, przechowywanego przez 16 lat w magazynie.

Tabela 1. Zestawienie badanych izolatorów kompozytowych

Nr izolat.	Materiał osłony	Dł. izolat. [cm]	Dł. drogi upływu [cm]	Średnica [cm]			Ilość kloszy	Warunki i czas eksploatacji
				kloszy	pnia	rdzenia		
1	SR-RTV-1	127	242	12,5	2,6	1,6	18	LE, 110/ $\sqrt{3}$ kV, II SZ, 16 lat
2	SR-RTV-1	127	242	12,5	2,6	1,6	18	TSBZ, 70 kV, IV SZ, 16 lat
3	SR-RTV-1	127	242	12,5	2,6	1,6	18	TSBZ, 70 kV, IV SZ, 17 lat
4	SR-RTV-1	127	242	12,5	2,6	1,6	18	Przechowywany 16 lat w magaz.
5	SR-RTV-1*	129	238	12,5	3,7	1,6	18	LE, 110/ $\sqrt{3}$ kV, II SZ, 16 lat
6	SR-RTV-1*	129	238	12,5	3,7	1,6	18	LE, 110/ $\sqrt{3}$ kV, II SZ, 16 lat
7	EPDM	127	338	13,0	3,1	1,6	26	TSBZ, 70 kV, IV SZ, 11 lat

Pręty nośne (rdzenie) izolatorów kompozytowych były wykonywane technologią ciągłą. Po obróbce i pokryciu środkiem adhezyjnym, nakładano na nie osłony z kauczuku silikonowego SR-RTV-1, metodą odlewania „krok po kroku”. Natomiast osłony z kloszami z kauczuku silikonowego SR-RTV-1* (wulkanizowany w temperaturze

60°C) i EPDM były odlewane i wulkanizowane w odpowiednich formach. Montowano je na rdzeniach szkło-epoksydowych z zastosowaniem uszczelnienia z pasty silikonowej. Podczas okuwania izolatorów klosze ściskano celem lepszego uszczelnienia [4].

3. Metody badań

Program badań obejmował:

- a) oględziny i badania hydrofobowości powierzchni izolatorów,
- b) próby wysokonapięciowe izolatorów,
- c) badania właściwości rdzeni i powierzchni granicznych rdzeń-osłona na próbkach wyciętych z izolatorów.

Stan hydrofobowości powierzchni izolatorów określano metodą siedmiostopniowej skali HC według propozycji STRI [5]. Metoda ta umożliwia wprawdzie tylko szacunkową ocenę hydrofobowości powierzchni, ale jest bardzo dogodna do badań na izolatorach w eksploatacji. Odznacza się przy tym prostotą i szybkością wykonywania badań oraz wystarczającą dla celów praktycznych dokładnością. Ocenie poddawano górne i dolne powierzchnie kloszy, umiejscowionych w górnej, środkowej i dolnej części izolatorów.

Próby wysokonapięciowe polegały na pomiarach — przy napięciu przemiennym 50 Hz i udarowym piorunowym ($1,2/50 \mu s$) — pięćdziesięcioprocentowego napięcia przeskoiku ($U_{p50\%}$) oraz na badaniach stromo narastającymi udarami ($850 \text{ kV}/\mu s$), w których istnieje możliwość wystąpienia w zdefektowanym izolatorze przebiecia rdzenia lub powierzchni granicznej rdzeń-osłona. Wykonano również pomiary prądów upływu przy wysokim napięciu stałym.

Po wykonaniu badań wg punktów a) i b) izolatory pocięto celem przygotowania próbek do badań rdzenia i powierzchni granicznych. Wykonano następujące badania:

- próby przenikania barwnika i dyfuzji wody wg normy IEC 1109 [6],
- pomiary napięć przebiecia próbek izolatorów.

Z każdego z badanych izolatorów wycięto 9 próbek o długości $10 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ (dla próby przenikania barwnika) i 9 próbek o długości $30 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ (dla próby dyfuzji wody). Próbki te wycięto z górnej, środkowej i dolnej części izolatorów. Pomiary napięć przebiecia wykonano również na 9 próbkach wyciętych z różnych części każdego z izolatorów. Próbki miały długość $50 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ i składały się z rdzenia i osłony z jednym kloszem. Próbki te, po umyciu czterochlorkiem węgla i pokryciu równoległych powierzchni czołowych (powierzchnie przecięcia) grafitem koloidalnym, umieszczano w oleju izolacyjnym między płaskimi elektrodami o średnicy 70 mm i mierzone — przy napięciu przemiennym 50 Hz — napięcia przebiecia.

4. Wyniki badań

4.1. Oględziny i ocena hydrofobowości powierzchni izolatorów

W oględzinach szczególną uwagę zwracano na rozmieszczenie zanieczyszczeń i ślady wyładowań elektrycznych na powierzchni izolatorów. Najmniej zanieczyszczeń aku-

muluje się w pobliżu krawędzi kloszy oraz na pniu i przylegających do niego najbardziej nachylonych częściach kloszy. Rozkłady zanieczyszczeń wzdłuż izolatora były w przybliżeniu równomierne, oprócz powierzchni zbliżonych do okuć gdzie akumulacja zanieczyszczeń była trochę większa. Oczywiście izolatory z TSBZ były znacznie silniej zanieczyszczone niż izolatory z LE.

Na izolatorach silikonowych z TSBZ występowały niewielkie ślady palenia się łuków małoprądowych w postaci ścieżek erozyjnych o długościach około 1 cm i głębokościach około 0,5 mm. Natomiast na izolatorze z osłoną z EPDM, mimo znacznie krótszego czasu eksploatacji i dużo większej drogi upływu, ścieżki erozyjne były wielokrotnie liczniejsze, osiągały kilkucentymetrowe długości i głębokości przekraczające 1 mm. Koncentrowały się zwłaszcza na pniu, na powierzchniach między kloszami, a więc w miejscach o największej gęstości prądu.

Wyniki badań hydrofobowości powierzchni izolatorów przedstawia tabela 2.

Tabela 2. *Hydrofobowość badanych izolatorów kompozytowych*

Nr izolatora	Klasa hydrofobowości
1	HC 4
2	HC 3
3	HC 3
4	HC 1
5	HC 4
6	HC 4
7	HC 7

Jak widać izolator z osłoną z EPDM (izolator nr 7) był po 11 latach eksploatacji całkowicie zwilżalny wodą (najgorsza klasa 7 hydrofobowości wg STRI), natomiast izolatory z osłonami silikonowymi po dłuższym czasie eksploatacji posiadały dość dobrą hydrofobowość powierzchni. Zaskakującym wynikiem tych badań było stwierdzenie trochę lepszej hydrofobowości izolatorów eksploatowanych w TSBZ w czwartej strefie zabrudzeniowej niż izolatorów z linii elektroenergetycznych z drugiej strefy zabrudzeniowej. Być może zanieczyszczenia, gromadzące się intensywniej w czwartej strefie, chronią powierzchnię izolatorów przed starzeniowym działaniem ultrafioletu.

4.2. Próby wysokonapięciowe

Próby izolatorów na sucho napięciem przemiennym 50 Hz wykazały, że wartości pięćdziesięcioprocentowego napięcia przeskoku $U_{p50\%}$ praktycznie nie zależą od materiału, konstrukcji i historii starzenia badanych izolatorów. Do podobnych wniosków prowadzi analiza wyników próby napięciem udarowym biegunowości dodatniej, w której uzyskano również bardzo zbliżone wartości $U_{p50\%}$ dla wszystkich badanych izolatorów. Próby te były powtórzeniem badań wykonanych na izolatorach w 1992 r. [2]. Porównanie wartości $U_{p50\%}$ wykazuje, że w okresie od ostatniego badania, tj. około 6 lat eksploatacji izolatorów, ich wytrzymałość elektryczna nie uległa zmianie.

Dla zbadania szczelności osłon izolatory poddano tygodniowemu zanurzeniu w wodzie, a następnie — po powierzchniowym wyschnięciu — ponownym badaniom

$U_{p50\%}$. Brak zmian w wartościach $U_{p50\%}$ oraz nie wystąpienie przebiecia żadnego z izolatorów wskazują, że w czasie moczenia izolatorów woda nie penetrowała do ich wnętrza. Potwierdziły to pomiary prądu upływu. Wartości prądu upływu, mierzone przy wysokim napięciu stałym (85 kV), były nawet wyraźnie mniejsze po próbie zanurzenia w wodzie niż przed próbą, co tłumaczyć należy zmyciem zanieczyszczeń z powierzchni izolatorów.

Wynik badania stromo narastającymi udarami (850 kV/ μ s) był również dodatni. Nie spowodowały one bowiem nie tylko przebiecia zupełnego izolatorów, lecz również widocznych przebiec niezupełnych. Stwierdzono to po pocięciu izolatorów na próbki przygotowane do dalszych badań (p. 4.3).

5. Badania właściwości izolacyjnych rdzeni izolatorów i powierzchni granicznych rdzeń – osłona

Badania, wykonane na próbkach opisanych w p. 3, obejmowały:

- próbę penetracji barwnika wg IEC 1109,
- próbę dyfuzji wodnej wg IEC 1109,
- pomiary napięć przebiecia.

W próbie penetracji barwnika próbki stykają się dolną powierzchnią czołową (powierzchnia cięcia) z barwnikiem — 1% roztworem fuksyny w etanolu. Wynik badania uznaje się za dodatni, jeśli w ciągu 15 minut próby barwnik nie pojawi się na górnej powierzchni czołowej żadnej z badanych próbek (barwnik penetrować może do wnętrza rdzeni lub wzdłuż powierzchni granicznych wskutek zjawiska kapilarnego).

Próba dyfuzji wodnej polega na gotowaniu próbek przez 100 godzin w wodzie dejonizowanej zawierającej 0,1% wagowych NaCl, a następnie poddaniu ich jednoczynowej próbie napięciem przemiennym o częstotliwości 50 Hz i wartości skutecznej 12 kV. Wynik tej próby jest dodatni wówczas, gdy nie wystąpi przebiecie lub przeskok powierzchniowy oraz jeśli mierzony prąd upływu nie przekroczy wartości 1 mA.

Wyniki tych prób oraz wyniki pomiarów napięć przebiecia próbek zanurzonych w oleju izolacyjnym przedstawia tabela 3.

Badania wykazały, że właściwości izolacyjne wnętrza badanych izolatorów kompozytowych, tj. rdzenia i powierzchni granicznej rdzeń–osłona, są zróżnicowane. Dobre właściwości posiadały próbki z czterech izolatorów — nr 2, 4, 5, 7 — natomiast właściwości próbek z trzech izolatorów — nr 1, 3, 6 — były dużo gorsze. Probki wycięte z izolatorów nr 1, 3, 6 uzyskały ujemne wyniki próby penetracji barwnika i dyfuzji wodnej oraz charakteryzowały się niskimi — w porównaniu do próbek z izolatorów nr 2, 4, 5, 7 — wartościami napięcia przebiecia, zwłaszcza próbki z izolatorów nr 3 i 6. Istotnych informacji dostarczyły również obserwacje miejsc przebiecia próbek. W przypadku izolatorów nr 3 i 6 przebieciu ulegały rdzenie, natomiast w przypadku izolatora nr 1 przebiecia rozwijały się wzdłuż powierzchni granicznej rdzeń — osłona. Bardzo duża wartość odchylenia standardowego dla próbek izolatora nr 1 świadczy przy tym o szczególnej niejednorodności jego powierzchni granicznej.

W badaniach tych na szczególne podkreślenie zasługuje również bardzo dobra korelacja wyników uzyskanych trzema metodami badania.

Tabela 3. Wyniki badań próbek wyciętych z izolatorów kompozytowych

Nr izolatora	Wynik próby penetracji barwnika	Wynik próby dyfuzji wodnej	Wynik pomiarów napięcia przebicia [kV]	
			wartość średnia	odchylenie standardowe
1	ujemny	ujemny	84	39
2	dodatni	dodatni	159	21
3	ujemny	ujemny	42	8
4	dodatni	dodatni	123	10
5	dodatni	dodatni	130	7
6	ujemny	ujemny	42	5
7	dodatni	dodatni	120	14

6. Wnioski

- Badania wykazały dobre właściwości osłon z kauczuku silikonowego RTV-1 w długotrwałej eksploatacji izolatorów kompozytowych. Po 17 latach eksploatacji posiadają one znaczną jeszcze hydrofobowość powierzchni oraz zapewniają izolatorom szczelność, uniemożliwiającą penetrację wilgoci do wnętrza izolatorów.
- Wyraźnie gorszym materiałem osłonowym w eksploatacji w trudnych warunkach zabrudzeniowych jest EPDM. Po 11 latach eksploatacji w TSBZ (IV strefa zabrudzeniowa) izolator z osłoną z tego materiału jest już całkowicie hydrofilny. Występujące na jego powierzchni rozległe i głębokie ślady erozyjne świadczą o intensywnym rozwoju wyładowań powierzchniowych, mimo konstrukcji zapewniającej dużą drogę upływu. Doprowadzić one mogą nie tylko do przeskoku powierzchniowego, lecz również przebicia wskutek rozszczelnienia osłony w postępującym procesie erozyjnym.
- Właściwości izolacyjne rdzeni i powierzchni granicznych badanych izolatorów są bardzo zróżnicowane. Złe właściwości 3 spośród 7 badanych izolatorów mogą być wynikiem zarówno wad materiałowo-technologicznych powstałych już w fazie produkcji, lub rozwijających się w czasie długotrwałej eksploatacji izolatorów. Mimo złych tych właściwości izolatory pracowały bezawaryjnie, dzięki szczelności osłon oraz ze względu na stosunkowo niewielkie naprężenia elektryczne występujące w izolatorach liniowych 110 kV.
- Pozytywna ocena stanu technicznego silikonowych izolatorów kompozytowych po wieloletniej eksploatacji poligonowej rekomenduje izolatory tego typu do szerszego zastosowania w krajowych liniach elektroenergetycznych. Należy tutaj zaznaczyć, że badane izolatory należały do tzw. pierwszej generacji izolatorów kompozytowych. Bardzo istotne postępy materiałowo-technologiczne powodują, że obecnie produkowane izolatory kompozytowe drugiej generacji powinny posiadać znacząco lepsze właściwości w aspekcie długotrwałej, bezawaryjnej pracy. Zbyt krótki jeszcze czas eksploatacji tych izolatorów uniemożliwia jednak bezpośrednio wykazanie słuszności tego wniosku.

Literatura

- [1] **Pohl Z., Wańkowicz J.:** *Terenowa stacja badawcza napowietrznych izolatorów wysokiego napięcia w warunkach silnych zabrudzeń.* Wiadomości Elektrotechniczne, 1982, nr 10, s. 307–309
- [2] **Pohl Z., Wańkowicz J., Murach G.:** *Odporność powłok osłonowych izolatorów kompozytowych z tworzyw sztucznych na narażenia środowiskowe i zabrudzeniowe.* Archiwum Energetyki, 1993, nr 1–2, s. 113–125
- [3] **Wańkowicz J., Fleszyński J. i inni:** *Experience with application of polymeric materials to outdoor high-voltage insulators in Poland.* 37th CIGRE Session, Paris 1998, ref. 15–301
- [4] **Cyraniak M.:** *Izolatory kompozytowe z tworzyw sztucznych z osłoną z kauczuku EPDM.* Praca doktorska, IPEE PWr., Wrocław 1984
- [5] STRI Guide 92/1: *Hydrophobicity Classification Guide.* Swedish Transmission Research Institute
- [6] Publication IEC 1109: *Composite insulators for AC overhead lines with nominal voltage greater than 1000 V*, 1992

EVALUATION OF TECHNICAL CONDITION OF COMPOSITE INSULATORS AFTER THEIR PROLONGED OUTDOOR OPERATION

Laboratory tests of 7 pieces of composite insulators after prolonged outdoor operation in 110 kV distribution lines and at the Field Station for Testing the Polluted Insulators (6 pieces of SR composite insulators and one unit made of EPDM) were carried out. In this paper results of hydrophobicity investigations on insulator surfaces, high voltage tests and investigations of insulating properties of RBGF cores of the insulators as well as investigations of properties of the core-housing boundary areas were presented. Technical condition of the tested SR composite insulators and their applicability to further outdoor operation were positively verified.

Pracę wykonano w ramach Projektu Badawczego Nr 8T10B02614, nt.
„Metody badań i kryteria oceny elektroenergetycznych izolatorów kompozytowych”,
finansowanego przez Komitet Badań Naukowych