

Alfred KAŁUŻNY¹, Michał KAŁUŻNY¹, Marek SAS²

Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów (1), Górnośląski Zakład Elektroenergetyczny – Gliwice (2)

Analiza przyczyn pęknięcia izolatorów ceramicznych wysokiego napięcia

Streszczenie. Artykuł stanowi rozszerzenie dotychczasowego stanu wiedzy o przyczynach samoistnego pęknięcia izolatorów długopniowych przyjmując, że czynnikiem inicjującym mechanizm pęknięcia izolatorów są wyładowania niezupełne silnoprądowe na powierzchni izolatora. Awarie izolatorów długopniowych związane z samoistnym ich zerwaniem powodują duże trudności eksploatacyjne i koszty. Wyjaśnienie możliwych przyczyn samoistnego pęknięcia izolatorów jest przedmiotem niniejszego artykułu.

Abstract. (Reasons analysis of high voltage insulators breakdowns). The paper widens a range of knowledge about causes of unaffected breakdowns of long-rod insulators putting a thesis that the high-current partial discharges can be a cause of these breakdowns. Failures of the long-rod insulators connected with their unaffected breakdowns cause big operational costs and difficulties. Explanation of those breakdowns' causes is just a subject matter of the paper.

Słowa kluczowe: izolatory długopniowe, awarie linii, technika elektroizolacyjna.

Keywords: long-rod insulator, lines failures, electroinsulating technique.

Wprowadzenie

Izolatory długopniowe ceramiczne ulegają zerwaniam podczas eksploatacji. Awaryjne te są obserwowane od wielu lat i w tym czasie wielu autorów podjęło badania statystyczne i laboratoryjne dla wyjaśnienia przyczyn zerwania izolatora. Istotne znaczenie w tych badaniach miały prace prof. J. Ranachowskiego [1, 7] w zakresie materiałowym. W wyniku tych prac ustalono, że główną przyczyną zapoczątkowania procesu starzenia porcelany i obniżenia się wytrzymałości mechanicznej izolatora są wady technologiczne w procesie produkcji izolatorów.

Nie negując wyników dotychczasowych prac naukowo-badawczych autorzy referatu w oparciu o analizy teoretyczne oraz badania i obserwacje terenowe postawili tezę, że proces starzenia się porcelany izolatorowej prowadzący do zerwania izolatora jest zainicjowany silnoprądowymi wyładowaniami niezupełnymi – łukami cząstkowymi palącymi na powierzchni izolatora. Zapłon łuków cząstkowych jest wynikiem zmiany stanu powierzchni izolatora spowodowany tworzącą się warstwą zabrudzeń. Zarówno rodzaj zabrudzeń tworzących warstwę zabrudzeniową oraz intensywność i sposób oddziaływania czynników samooczyszczania się izolatora mają istotny wpływ na zapłon oraz charakter palenia się łuku cząstkowego. Czynniki te w sposób zasadniczy będą określały możliwość zainicjowania procesu starzenia się porcelany związany z tworzeniem się naprężeń w materiale izolacyjnym wywołujące mikropęknięcia i zmiany w strukturze dielektryku o budowie jonowej.

Badania i obserwacje terenowe

Przedmiotem pomiarów i obserwacji terenowych izolatorów liniowych napowietrznych były warunki atmosferyczne, zabrudzeniowe oraz stan cieplny izolatorów z osprzętem, które eksploatowane były na terenie Rejonu Wysokich Napięć ZE Gliwice w latach 1987–2002.

Autorzy, jako podstawę do wnioskowania o możliwości zapłonu silnoprądowych wyładowań niezupełnych – łuków cząstkowych – na izolatorach zerwanym, przyjęli strefę zabrudzeniową, która obowiązuje wg PN [4] w rejonie eksploatacji izolatorów. Właśnie intensywność i rozkład warstwy zabrudzeniowej warunkują zapłon, stabilizację położenia i intensywność palenia się łuków cząstkowych. Możliwość oraz skutki istnienia wyładowań niezupełnych –

łuków cząstkowych palących się na określonej części drogi upływu izolatorów określono w oparciu o pomiary termowizyjne stanu cieplnego izolatorów długopniowych ceramicznych z osprzętem. Istotnym czynnikiem badań dla potwierdzenia postawionej tezy były oględziny izolatorów po zerwaniu. Szczególną uwagę poświęcono stanowi okuć i tworzywa ich mocowania oraz stanowi powierzchni izolatora i profilu przełamu izolatora.

Analiza warunków środowiskowych eksploatacji izolatorów awaryjnych

Badania warunków środowiskowych związane z zerwaniami izolatorów liniowych długopniowych przeprowadzono dla terenu byłego Rejonu Wysokich Napięć ZE Gliwice [2].

Wpływ czynników otoczenia na awaryjność izolatorów długopniowych najlepiej ilustruje zależność liczby zerwań od pory roku, którą zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie zależności liczby zerwań izolatorów długopniowych porcelanowych od pory roku

Typ izolatora	Liczba zerwań w latach 1995–2002			
	wiosna	lato	jesień	zima
VKLS 75/21	10	1	7	18
LP 75/22	11	4	9	27
LP 75/17	1	0	1	2
VKLF 75/16	1	0	1	3

Z zestawienia tego wynika, że bardzo istotnym czynnikiem środowiskowym wpływającym na zrywalność izolatorów jest temperatura otoczenia. Wyniki doświadczeń eksploatacyjnych zależności liczby zerwań izolatorów porcelanowych od temperatury otoczenia zmieniającej się w określonych zakresach w ciągu doby zestawiono w tabeli 2.

Z zestawienia tego wynika, że największy strumień zerwań izolatorów odnotowano przy zmianach temperatury w ciągu doby w zakresie $-8\text{ }^{\circ}\text{C} \div +6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Autorzy referatu uważają, w przeciwieństwie do dotychczasowych poglądów literaturowych, że wpływ na zrywalność izolatorów nie ma stan cieplny masy ceramicznej wywołany temperaturą otoczenia, której zmiany odbywają się w stosunkowo długim przedziale czasu. Zmieniająca się temperatura otoczenia ma istotny wpływ na stan powierzchni izolatora i związaną z tym możliwość zapłonu wyładowań zabrudzeniowych silnoprądowych łuków cząstkowych. Zapłon silnoprądowych

wyładowań niepełnych – łuków cząstkowych na powierzchni izolatora powoduje oddziaływanie bardzo silnych źródeł ciepła – stopy łuku – na bardzo małej powierzchni. W zależności od rozkładu warstwy zabrudzeniowej po obwodzie izolatora i wzdłuż drogi upływu, kształtuje się sposób palenia łuku cząstkowego. Zapłon łuku cząstkowego w pobliżu kołpaka górnego powoduje oparcie się stopy łuku o dolną krawędź brzegu żeliwnego kołpaka, a druga stopa łuku opiera się na warstwie zabrudzeń.

Tabela 2. Liczba zerwań izolatorów długopniowych porcelanowych od przedziału zmian temperatury w ciągu doby

Przedziały zmian temperatury °C	Liczba zerwań	Przedziały zmian temperatury °C	Liczba zerwań
-19 ÷ -10	3	-4 ÷ +4	6
-14 ÷ -1	6	-2 ÷ +4	2
-11 ÷ -3	2	-6 ÷ +7	5
-11 ÷ +3	4	-1 ÷ +6	5
-10 ÷ -1	3	-5 ÷ +10	5
-8 ÷ +3	5	-1 ÷ +11	8
-6 ÷ +4	3	+1 ÷ +10	1
-7 ÷ +8	7	+1 ÷ +12	2
-6 ÷ +6	3	+3 ÷ +19	4
-7 ÷ +5	4	+11 ÷ +20	8
-7 ÷ +4	3		
-6 ÷ +6	8		

Oddziaływanie lokalnego źródła ciepła o bardzo wysokiej temperaturze powoduje gwałtowną zmianę stanu cieplnego porcelany pod stopą anodową i katodową łuku warstwy porcelanowej oraz kołpaka i spoiwa. W procesie zmiany lokalnego stanu cieplnego izolatorów należy brać pod uwagę również wpływ promieniowania słonecznego, zwłaszcza w porze zimowo-jesienno-wiosennej.

Analizując wpływ pory dnia na możliwość zerwania izolatora zebrano dane eksploatacyjne, których wyniki zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Liczba zerwań izolatorów w zależności od pory dnia w latach 1995 ÷ 2002 w wybranym terenie RWN

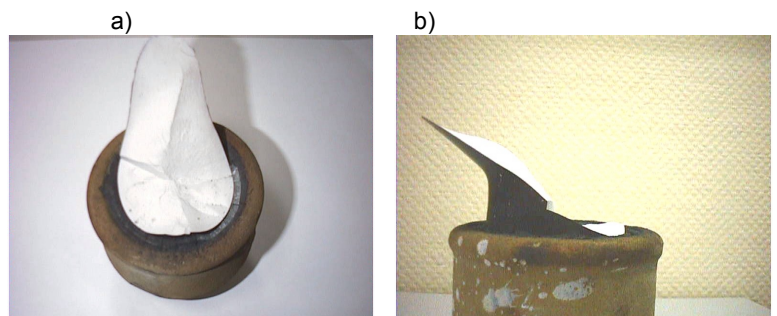
godziny	Liczba zerwań izolatorów			
	6.00 ÷ 12.00	12.00 ÷ 16.00	16.00 ÷ 22.00	22.00 ÷ 6.00
VKLS 75/21 (NRD)	14	1	4	0
LP 75/22 Jugosłowiańskie	14	1	4	0
LP 75/17 Polskie – ZAPEL	3	0	1	0
VKLF 75/16	3	0	1	0

Z zestawienia tego również wynika, że zerwania izolatorów mają miejsce w godzinach rannych i wieczornych, czyli wtedy, gdy zasadniczo zmieniają się warunki otoczenia i stanu powierzchni zabrudzonego izolatora. Rozkład strumienia zerwań izolatorów w czasie doby jest analogiczny do strumienia przeskoków zabrudzeniowych na izolatorach. Przedłożone wyniki doświadczeń terenowych uzasadniają tezę, że jedną z głównych przyczyn zerwania izolatorów, oprócz składu chemicznego masy porcelanowej i procesu technologicznego produkcji, jest wyładowanie niepełne zabrudzeniowe.

Analiza przełamu zerwanych izolatorów długopniowych

Przełam pnia izolatora długopniowego, który uległ zerwaniu w warunkach eksploatacyjnych jest źródłem bardzo istotnych, dla wyjaśnienia przyczyn zerwania, informacji. Na rysunkach 1 i 2 pokazano fotografie charakterystycznego przełamu izolatorów.

Fotografia na rysunku 1a w sposób bardzo wyrazisty pokazuje zjawiska towarzyszące procesowi niszczenia struktury porcelanowej. Na brzegu kołpaka widać bardzo wyraźne ślady oddziaływania stopy łuku cząstkowego w postaci nadtopienia metalu na stosunkowo niewielkim odcinku po obwodzie kołpaka. W otoczeniu miejsca posadowienia stopu łuku widoczne są ubytki i pęknięcia w spoiwie izolatora. Na rysunku 1b widoczny jest sposób działania siły niszczącej na pień izolatora. Przełam połowy powierzchni pnia od strony gdzie są zlokalizowane ślady stopy łuku cząstkowego na obwodzie kołpaka jest prawie płaski z widocznymi wgłębieniami. Natomiast druga część przełamu posiada charakter odłamania ukośnego, co świadczy o istnieniu bardzo dużych naprężeń wewnętrznych w części przełamu płaskiego działających na zasadzie klina powodując odłamanie pozostałej części pnia porcelanowego.



Rys. 1. Przykładowe charakterystyczne przełamy izolatorów długopniowych



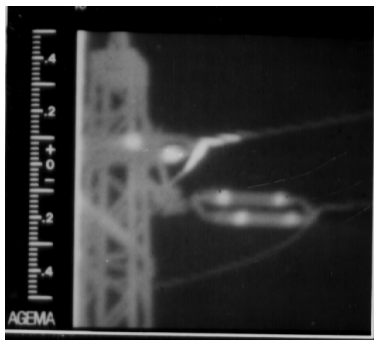
Rys. 2. Przełam izolatora długopniowego

Fotografia na rysunku 2 pokazuje przełam pnia izolatora o nieco innym charakterze, lecz tej samej przyczynie. Ślady stopy łuku cząstkowego przemieszczającej się po powierzchni dolnej brzegu kołpaka obejmują ponad połowę (ok. 60%) obwodu masy wiążącej (spoiwa) izolatora, a przełam części płaskiej, w której w wyniku wzrostu naprężeń w strukturze materiału, tworzą się mikropęknięcia obejmuje również większą powierzchnię ok. 2/3 powierzchni przełamu. Charakterystyczne odłamanie pozostałej części przekroju poprzecznego pnia, jako efekt wzrostu objętości masy ceramicznej w wyniku szybkiego wzrostu temperatury jest również widoczne.

Przedstawione przykładowo przełamy pnia zerwanych izolatorów są bardzo charakterystyczne dla prawie wszystkich przypadków obserwowanych przez autorów. Różnice, które można dostrzec z analizy powierzchni przełamu izolatorów związane są ze sposobem tworzenia się i rozwoju mikropęknięć masy ceramicznej, co uwarunkowane jest składem chemicznym porcelany. Widocznym skutkiem oddziaływania łuku cząstkowego na izolatorze długopniowym są złuszczenia szkliva oraz ubytki i popęknięcie spoiwa.

Analiza mechanizmu zerwania izolatorów

Autorzy uważają, że podstawową przyczyną inicjacji i rozwoju mikropęknięć w masie ceramicznej izolatorów jest lokalne źródło ciepła powodujące lokalną zmianę stanu cieplnego masy ceramicznej wyrażającą się znacznym gradientem temperatury w stosunku do pozostałej ustalonej na stosunkowo niskim poziomie temperatury. O tym, że stan cieplny izolatorów długopniowych jest zasadniczo różny w porównaniu z pozostałą częścią masy ceramicznej pnia izolatora przekonują termogramy z pomiarów termowizyjnych linii elektroenergetycznych, które pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Pomiary termowizyjne stanu cieplnego osprzętu linii [6]

Mechanizm funkcjonowania lokalnego źródła ciepła na proces starzenia się porcelany i obniżenie wytrzymałości mechanicznej izolatorów uwarunkowany jest również składem chemicznym, od którego zależy przewodnictwo cieplne i rozszerzalność objętościowa masy ceramicznej izolatora. Przyczyną lokalnego wzrostu temperatury porcelany o zadanej objętości V może być również oddziaływanie promieniowania słonecznego, przy niskiej temperaturze otoczenia i intensywnym chłodzeniu wiatrem oraz zapłon wyładowań niezupełnych zabrudzeniowych – silnopiędowych łuków cząstkowych. Wyładowanie zabrudzeniowe – łuk cząstkowy – przy nierównomiernym rozkładzie warstwy zabrudzeń po obwodzie i wzdłuż drogi upływu izolatora może palić się przy niewielkim przemieszczaniu się stopy łuku ok. 1/2 obwodu brzegu kołpaka i po dłuższych odcinkach, ok. 2/3 obwodu izolatora. Łuk elektryczny cząstkowy paląc się oddaje ciepło poprzez stopy łuku oraz kolumnę łukową. Największą ilość ciepła łuk cząstkowy oddaje wokół stopy opartej o kołpak górny izolatora. W określonym przedziale czasu dt łuk stabilizuje swoje położenie i oddaje część energii do materiału kołpaka, spoiwa i porcelany powodując zmianę ich stanu cieplnego. Przyrost temperatury materiałów jest nierównomierny w poszczególnych materiałach ze względu na różną ich przewodność cieplną. Wzrost temperatury porcelany o małym współczynniku przewodzenia cieplnego $\lambda = (2,1+2,9) \cdot 10^{-3}$ [m²/h] [8] w porównaniu do żeliwa i spoiwa następuje w małej objętości. Lokalny wzrost temperatury porcelany przy stosunkowo niskiej temperaturze otaczającego powietrza (-6 do +6°C) powoduje wg [8] lokalny wzrost objętości porcelany wg zależności (1)

$$(1) \quad dV = \alpha V d\vartheta$$

gdzie: dV - lokalny przyrost objętości masy porcelanowej, α - współczynnik rozszerzalności cieplnej, $\alpha = 3,5 \div 5 \times 10^{-6} K^{-1}$, V - objętość porcelany w normalnym ustalonym stanie cieplnym, $d\vartheta$ - lokalny przyrost temperatury [°K].

Lokalnemu przyrostowi objętości masy ceramicznej izolatora towarzyszy wzrost naprężeń sprężystych

rozciągających wewnątrz porcelany, którego wartość wyznacza się wg zależności (2):

$$(2) \quad E \cdot \alpha \Delta \vartheta = \Delta R$$

gdzie: E - moduł Younga, α - współczynnik rozszerzalności cieplnej porcelany, $\Delta \vartheta$ - lokalny przyrost temperatury, ΔR - przyrost naprężeń rozciągających w porcelanie.

Jeżeli naprężenie rozciągające w porcelanie ($R+\Delta R$) przekroczy wytrzymałość materiału na rozciąganie R_m , to rozpoczyna się proces mikropęknięć i rozwarstwień w strukturze porcelany. Rozwój mechanizmu destrukcji struktury porcelany w lokalnej objętości ΔV podobne jest do działania klina powoduje dalsze pęknięcie porcelany, które przy obciążeniu roboczym prowadzi do zerwania pnia izolatora.

Podsumowanie i wnioski

Awaryjne przesyłowe wysokiego napięcia spowodowane samoistnym zerwaniem izolatorów długopniowych stanowią jedną z poważniejszych awaryjnych wyłączeń urządzeń elektroenergetycznych. Istnieje uzasadniona potrzeba wyjaśnienia przyczyn samoistnych zerwań izolatorów długopniowych, zarówno z punktu widzenia producentów izolatorów i służb eksploatacji linii przesyłowych wysokiego napięcia. W oparciu o analizę danych eksploatacyjnych z wybranego Rejonu Wysokich Napięć można stwierdzić, że:

- zerwania izolatorów długopniowych mają miejsce w terenie przemysłowym o zanieczyszczonej atmosferze w obszarze oddziaływania chłodni kominowych oraz akwenów wodnych, jak rzek, stawów i jezior;
- w okresie jesienno-zimowym i wczesnowiosennym rejestruje się zwiększoną ilość zerwań izolatorów (w temperaturach zbliżonych do 0°C);
- zerwania różnych typów następują przeważnie w godzinach rannych (6.00–12.00) i wieczornych (18.00–22.00);
- strumień uszkodzeń (zerwań) izolatorów zmienia się w zależności od czasu eksploatacji; czas eksploatacji do zerwania zależy od składu chemicznego porcelany i częstości zapłonu wyładowań niezupełnych.

LITERATURA

- [1] Ranachowski J. i in.: Metody badania wytrzymałości i trwałości tworzyw oraz izolatorów ceramicznych. *Mat. Konf. N-T, Boguchwała*, 1994.
- [2] Kucharski K.: Analiza i przyczyny zerwań porcelanowych izolatorów długopniowych. *Opracowanie BbiSt. ZE-Gliwice*, nr 149, 1988
- [3] Lieberman J.: Rola kwarcu w porcelanie elektrotechnicznej. „*Szkło i ceramika*”, rocznik 54, 2003, str. 6.
- [4] PN-E-06303.
- [5] Informacja firmy LAPP Insulator GmbH na temat izolatorów kompozytowych.
- [6] Badania termowizyjne linii elektroenergetycznych wykonane przez Energopomiar dla GZE S.A., 1999
- [7] Bertrand J. i in.: Badania termomechaniczne izolatorów długopniowych oraz ocena stanu i określenie ich przydatności do dalszej eksploatacji. *Ekspertyza IEn E/NWN/19/91/92* (nie publikowane)
- [8] Ashby M.F., Jones D.R.: Materiały inżynierskie. *WNT*, Warszawa, 1996.

Autorzy: dr hab. inż. Alfred Kałużny, Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: elektroizolacja@interia.pl; Michał Kałużny, Politechnika Śląska, student; Marek Sas, Górnosłaski Zakład Elektroenergetyczny S.A., Zakład Utrzymania Sieci, ul. Wybrzeże Armii Krajowej, 44-100 Gliwice, e-mail: Marek.Sas@interia.pl