

Łańcuchy złożone z izolatorów kompozytowych i kołpakowych

Streszczenie. Artykuł opisuje łańcuchy linii wysokonapięciowych składających się z izolatora kompozytowego i izolatorów kołpakowych. Szeregowo połączony izolator kołpakowy nie tylko wyrównuje rozkład napięcia wzdłuż izolatora kompozytowego ale także obniża natężenie pola elektrycznego na izolatorze polimerowym. Ceramiczny izolator kołpakowy może dodatkowo być wykorzystany jako wskaźnik uszkodzenia izolatora kompozytowego.

Abstract. This paper describes high voltage insulator chains consisted of one composite insulator and cap and pin insulators. The cap and pin insulator connected in series not only equalizes the voltage distribution along the composite insulator but also reduces the electrical field intensity at the polymer insulator. The ceramic disc insulator can be additionally applied as an indicator of composite insulator failure. (**Chains consisted of composite insulators and cap and pin insulators**).

Słowa kluczowe: izolator kompozytowy, izolator kołpakowy, natężenie pola elektrycznego, starzenie elektryczne, diagnostyka.

Keywords: composite insulator, cap and pin insulator, electric field intensity, electrical aging, diagnostics.

Wstęp

Ponad 30-letnie doświadczenia z eksploatacji izolatorów kompozytowych z osłonami silikonowymi potwierdzają ich zalety, zwłaszcza w rejonach o podwyższonym zanieczyszczeniu środowiska. Jest to związane z hydrofobowością powierzchni silikonu oraz z efektem hydrofobizacji warstwy zabrudzeniowej na powierzchni osłony silikonowej [1-4]. Obecnie izolatory kompozytowe skutecznie konkurują z izolatorami klasycznymi w całym zakresie napięć linii elektroenergetycznych AC i DC [5]. Długość izolatorów może osiągać 10 m o wytrzymałości mechanicznej przewyższającej 1000 kN. Znamienna jest ich liczba szacowana w roku 2010 na 20 mln sztuk w liniach o napięciu równym lub wyższym od 66 kV [5, 6]. W Chinach, w nowych liniach najwyższych napięć (1000 kV, 750 kV, ± 800 kV i ± 500 kV), udział izolatorów kompozytowych przekracza 55%. Większa wytrzymałość izolatorów kompozytowych w warunkach zabrudzeniowych pozwala zmniejszyć ich długość i wymiary słupów, a tym samym zmniejszyć nakłady inwestycyjne.

Dzięki najnowszym technologiom i surowej kontroli jakości niezawodność obecnie produkowanych izolatorów jest podobna do niezawodności izolatorów ceramicznych (tab. 1) [7]. Podkreślić należy, że poziom niezawodności znacząco zależy od właściwego wyboru konstrukcji izolatora. Ich parametry elektryczne i mechaniczne powinny być dopasowane do rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych izolatorów w całym, przewidywanym okresie eksploatacyjnym. Duże znaczenie ma wyrównywanie rozkładu napięcia wzdłuż izolatora i obniżenie maksymalnej wartości natężenia pola elektrycznego za pomocą odpowiednich pierścieni sterujących.

Tabela 1. Dane eksploatacyjne izolatorów w chińskich sieciach o napięciu równym lub wyższym od 66 kV [7]

| Typ izolatorów | Okres po 2012 | |
|-------------------------|---------------|------------|
| | zamontowane | uszkodzone |
| Kołpakowe porcelanowe | 37,7% | 0,059% |
| Kołpakowe szklane | 25,0% | 0,020% |
| Polimerowe | 37,0% | 0,068% |
| Porcelanowe długopniowe | 0,3% | 0,044% |

Niestety nie rozwiązano jeszcze problemu oceny ostatecznego okresu eksploatacji izolatorów co pozwoliłoby we właściwym czasie przeprowadzić prace remontowe lub wymienić stare izolatory na nowe. Pomimo licznych metod i przyrządów do diagnostyki izolatorów kompozytowych, metody oceny bezpiecznego okresu eksploatacji izolatorów

nie zostały jeszcze opisane w uznanych normach międzynarodowych.

Metody diagnostyczne

Znane są następujące metody diagnostyczne izolatorów kompozytowych:

- ocena wzrokowa i oszacowanie hydrofobowości,
- termografia w podczerwieni IR,
- kamery wykorzystujące promieniowanie UV do detekcji wylądowań niezupełnych,
- pomiary natężenia pola elektrycznego.

Pierwszy sposób kontroli polega na określeniu liczby widocznych uszkodzeń na osłonie izolatora po wejściu na konstrukcję wsporczą linii. Oczywiście nie można w ten sposób wykryć ukrytych wad pod osłoną, np. ślady pękne na pręcie szkło-epoksydowym. Badania kamerami IR i UV uważa się za bardzo skuteczne [5], jednakże interpretacja zebranych obserwacji wzrokowych często bywa niejednoznaczna jeśli przyczyny powodujące zarejestrowane promieniowanie nie są związane z odszukanyimi śladami uszkodzeń na osłonie. Takie sygnały mogą być spowodowane przez wylądowania na powierzchni zabrudzonych izolatorów, dlatego wyniki diagnostyki kamerami IR/UV trzeba porównać z wynikami innych metod pośrednich. Metodę pomiaru rozkładu pola elektrycznego wzdłuż izolatora można zaklasyfikować jako metodę bezpośrednią [9, 10]. Przez porównanie rozkładu pola elektrycznego badanego izolatora z wzorcem ustala się miejsce i stopień niewidocznego uszkodzenia izolatora. Wskutek znacznej pracochłonności tego rodzaju pomiarów, wykonuje się je tylko na izolatorach, w których wykryto ewentualne uszkodzenia podczas badań kamerami IR/UV.

Należy podkreślić ciągłe udoskonalenia zarówno aparatury diagnostycznej jak i metod interpretacji danych pomiarowych mających za zadanie wykrycie i określenie rodzaju uszkodzenia izolatora.

Efekty połączenia izolatora kompozytowego z izolatorem kołpakowym

Obniżenie natężenia pola elektrycznego

Zadanie zmniejszenia wartości natężenia pola elektrycznego izolatorów kompozytowych realizowano już od dawna poprzez odpowiedni kształt oku i zastosowanie pierścieni sterujących. Już w 1988 zaproponowano zmniejszenie natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolatora kompozytowego przez dołączenie do niego izolatorów kołpakowych od strony przewodu fazowego i od strony uziemionej [11]. Wykonane później obliczenia rozkładu pola elektrycznego wzdłuż łańcuchów złożonych z

izolatorów kompozytowych i kołpakowych [12, 13] pokazały celowość stosowania takiego rozwiązania.

Wyniki obliczeń wykonanych dla izolacji linii 110 kV z jednakową długością montażową równą standardowemu izolatorowi kompozytowemu FXBW3-110/70 podane zostały w tabeli 2. W łańcuchu zamontowano standardowy szklany izolator kołpakowy FC-100/70.

Tabela 2. Wyniki obliczeń dotyczące rozkładu potencjału oraz maksymalnego natężenia pola dla izolatorów 110 kV z jednakową długością montażową [12]

| n – liczba izolatorów kołpakowych FC-100/70 | 0 | 1 | 2 | 0 + pierścień sterujący | 1 + pierścień sterujący |
|---|-----|------|------|-------------------------------|-------------------------------|
| Różnica potencjałów na izolatorze polimerowym [%] | 100 | 73 | 56 | 100 | 71 |
| Maksymalne natężenie pola [kV/mm] | 1,2 | 0,54 | 0,34 | 0,39 | 0,23 |
| Różnica potencjałów na 20% długości izolatora kompozytowego od strony wysokonapięciowej [%] | 58 | 40 | 44 | 46 | 38 |

Jak wynika z tabeli 2, przy jednakowej długości montażowej łańcucha, dołączenie jednego izolatora kołpakowego od strony przewodu fazowego powoduje dwukrotne obniżenie wartości maksymalnego pola elektrycznego. Badania metodą stałej warstwy zabrudzeniowej wykazały, że dodanie izolatora kołpakowego nie obniża napięcia przeskoku zabrudzeniowego. W pracy [12] podano, że opierając się o wyniki badań przeprowadzone w 2008 r. izolacja linii 110 kV Shabao w Chinach o długości 14,1 km (48 konstrukcji wsporczych) została wzmocniona szklanymi izolatorami kołpakowymi i pierścieniami sterującymi (rys.1). Dzięki temu w znaczący sposób podwyższono napięcie przeskoku przy udarach piorunowych i zredukowano niebezpieczeństwo starzenia izolatora polimerowego.



Rys.1. Wzmocniona izolacja linii 110 kV Shabao (Chiny) przez dodanie izolatora kołpakowego i pierścienia sterującego [12]

Według badań wykonanych dla linii 1000 kV optymalna liczba izolatorów kołpakowych w łańcuchu może wynosić aż 9 sztuk. Wówczas osiąga się dopuszczalne wartości pola elektrycznego zarówno przy powierzchni izolatora polimerowego, na pierścieniach sterujących jak i na izolatorach kołpakowych.

Wskaźnik uszkodzenia izolatora polimerowego

Izolator kołpakowy połączony z izolatorem kompozytowym można również wykorzystać jako wskaźnik uszkodzenia izolatora polimerowego. Wynika to z ogólnych

przesłanek: po powstaniu ładunków elektrycznych wewnątrz izolatora kompozytowego, np. pod osłoną silikonową, zgodnie z zasadą ciągłości prądu:

$$(1) \quad \operatorname{div} j = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

gdzie: j – wektor gęstości prądu, ρ - gęstość ładunku elektrycznego.

Należy oczekiwać pojawienia się ładunku elektrycznego na powierzchni izolatora kołpakowego o wielkości proporcjonalnej do ładunku na izolatorze polimerowym. To znaczy, że wewnętrzne procesy elektryczne powodują pojawienie się ładunku na powierzchni izolatora kołpakowego.

Przez całkowanie równania Laplace'a metodą elementów skończonych, jakimi są miejsca uszkodzenia lub zawilgocenia rdzenia szkło-epoksydowego, przeprowadzono obliczenia pola elektrycznego izolatorów dla napięć równych lub większych od 35 kV [14, 15].

W pracy [15] zbadano trzy typy izolacji do linii 330 kV z izolatorem kompozytowym LK70/330 o długości montażowej $L = 2880$ mm:

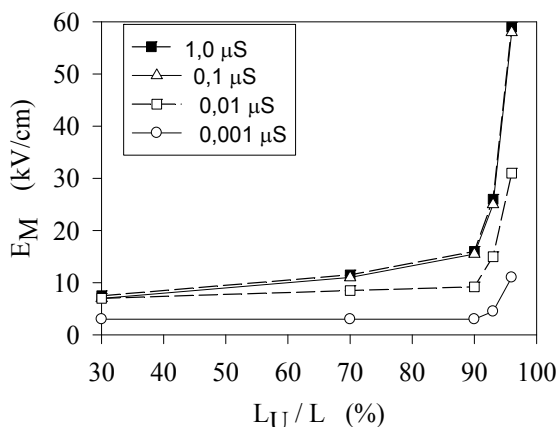
- izolator kompozytowy LK70/330,
- izolator kompozytowy LK70/330 z dołączonym od strony konstrukcji wsporczej standardowym szklanym izolatorem kołpakowym PS 120B (PS120B + LK70/330),
- izolator kompozytowy LK70/330 z dołączonym od strony przewodu fazowego standardowym szklanym izolatorem kołpakowym PS 120B (LK70/330 + PS120B).

Przyjęto następujące hipotezy utraty elektrycznej wytrzymałości izolatora polimerowego wzdłuż granicy rdzeń szkło-epoksydowy – osłona silikonowa:

- rozhermetyzowanie od strony okucia, zawilgocenie, wzrost natężenia pola elektrycznego, zapłon wyładowań niezupełnych i wydłużanie śladu pełnego (przewodzących ścieżek). Kolejne zawilgocenie, zwiększenie natężenia pola elektrycznego E_m na granicy uszkodzenia, zwiększenie natężenia pola do wartości krytycznej E_m , przebicie lub przeskoki wzdłuż nieuszkodzonego odcinka izolatora co prowadzi do kompletnej utraty własności izolacyjnych;
- uszkodzenie warstwy adhezyjnej w wyniku starzenia cieplnego (spowodowane np. działaniem łuku elektrycznego), kondensacja wilgoci w przyległym obszarze, zmniejszenie powierzchniowej rezystancji i tworzenie przewodzących ścieżek przez wyładowania niezupełne. Takie procesy mogą przebiegać wzdłuż całej długości izolatora i z czasem doprowadzić do jego elektrycznego zniszczenia.

Pierwszą hipotezę degradacji izolatora można nazwać procesem dynamicznym a drugą kwazistatycznym procesem starzenia, który jest rozwinięciem tego pierwszego. Uwzględniono dwa kierunki propagacji uszkodzenia: od okucia wysokonapięciowego i od okucia uziemionego. Rezultaty obliczeń przedstawiono na rysunkach 2 i 3.

Na rysunku 2 dobrze widać, że efekt zmian pola elektrycznego jest najważniejszy. Jeśli konduktywność powierzchniowa wzdłuż granicy rdzeń szkło-epoksydowy – osłona silikonowa przekroczy wartość 0,01-0,1 μS , zwłaszcza gdy uszkodzona strefa osiągnie długość krytyczną L_U równą około 80-90% całkowitej długości izolacyjnej L . Znamiennym jest, że maksymalne natężenie pola E_M przy konduktywności powierzchniowej większej od 1 μS zmienia się bardzo nieznacznie (rys.2), ponadto pole staje się równomierne wzdłuż prawie całej długości izolatora.



Rys.2. Zależność maksymalnego natężenia pola elektrycznego E_M na izolatorze polimerowym od długości strefy uszkodzonej L_U/L . Parametr – konduktywność powierzchniowa κ_S (μS) na uszkodzonym przecie szkło-epoksydowym

Wyniki obliczeń pokazały, że natężenie pola na zewnętrznej stronie osłony silikonowej jest 1,5-1,6 razy większe niż na jej stronie wewnętrznej. Wytrzymałość elektryczna po wewnętrznej stronie osłony jest wyższa niż wytrzymałość powietrza atmosferycznego, dlatego przy pewnej głębokości uszkodzenia rdzenia szkło-epoksydowego, na zewnętrznej stronie osłony silikonowej mogą zapalić się wyładowania powierzchniowe. Oczywiście intensywność tak zewnętrznych jak i wewnętrznych wyładowań niepełnych można ocenić jako natężenie prądu upływu płynącego po uszkodzonej powierzchni izolatora:

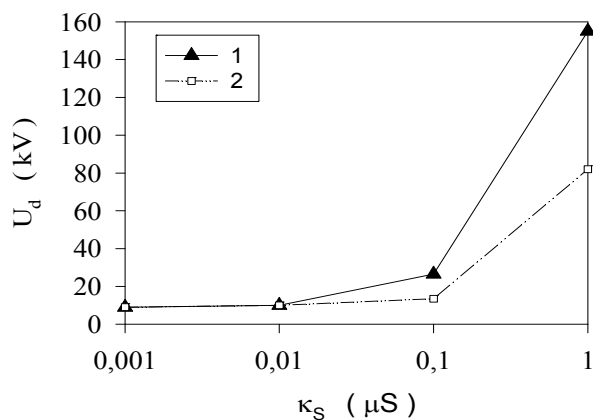
$$(2) \quad I = \pi \cdot d \cdot \kappa_S \cdot E$$

gdzie: d – średnica rdzenia szkło-epoksydowego, κ_S – konduktywność powierzchniowa, E – natężenie pola wzdłuż uszkodzonego rdzenia.

Prąd I jest wartością maksymalną składowej o niskiej częstotliwości możliwą do zmierzenia gdy na całej długości uszkodzonego izolatora utworzyły się przewodzące ścieżki o konduktywności powierzchniowej κ_S .

Można się przekonać, że przy konduktywności powierzchniowej $\kappa_S \approx 0,1 \mu S$ widać znaczny wzrost maksymalnej wartości natężenia pola elektrycznego E_M (rys.2), prąd upływu jest znacznie mniejszy od 1 mA. Dlatego częściowe bocznikowanie nieuszkodzonego odcinka izolatora przez powierzchniowe wyładowania niepełne nie może wywołać przeskoку wzdłuż całego izolatora. Pełna utrata wytrzymałości izolatora kompozytowego, jest możliwa, gdy zgodnie z równaniem (2), prąd w kanałach iskrowych osiągnie wartość setek miliamperów.

Wcześniej wykazano, że dla przebadanych łańcuchów kolejno dołączane izolatory kołpakowe nie powodują znacznych zmian pola elektrycznego wzdłuż izolatora kompozytowego. Jednocześnie w miarę pogarszania się stanu izolatora kompozytowego i zbliżania się uszkodzonej strefy do przeciwnego okucia, wzrasta napięcie na izolatorze kołpakowym. Wielkość ustalonego napięcia na izolatorze kołpakowym zależy od miejsca jego zamontowania w łańcuchu i od uszkodzonej strefy na izolatorze kompozytowym. Oczywiście jeśli przyjąć, że proces starzenia zachodzi na całej długości rdzenia szkło-epoksydowego, ($L_U \rightarrow L$), wówczas napięcie na izolatorze kołpakowym zależy tylko od jego położenia i średniej wartości konduktywności powierzchniowej (rys.3).



Rys.3. Napięcie U_d obliczone na izolatorze kołpakowym łańcucha: 1 – LK70/330 + PS120B, 2 – PS120B + LK70/330 w zależności od konduktywności powierzchniowej na izolatorze polimerowym

Przy $L_U \rightarrow L$ (rys.3) napięcie na izolatorze kołpakowym, jeśli jest on zamontowany od strony przewodu fazowego a konduktywność powierzchniowa wzdłuż izolatora kompozytowego przekroczy $\kappa_S > 0,1 \mu S$, może osiągnąć poziom wystarczający do wywołania intensywnego ulotu. Przy postępującej degradacji izolatora kompozytowego napięcie na izolatorze kołpakowym może osiągnąć wartość zbliżoną do napięcia przeskoку powodując bardzo intensywne wyładowania powierzchniowe. Oczywiście intensywne wyładowania niepełne na powierzchni izolatora kołpakowego wydłużają się aż do spełnienia warunku przejścia z przeskoку lokalnego do przeskoку pełnego lub przebicia.

Widoczne wyładowania powierzchniowe na izolatorze kołpakowym umieszczonym w łańcuchu LK70/330 + PS120B przy napięciu roboczym przedstawiono na rysunku 4. Fotografię wykonano nieprofesjonalnym aparatem w zaciemnionym laboratorium. W tym eksperymencie wewnętrzne uszkodzenie izolatora kompozytowego zamodelowano przez zabrudzenie powierzchni szkło-epoksydowego rdzenia roztworem chlorku potasu KCl. Konduktywność powierzchniowa warstwy zabrudzeniowej zawierała się w granicach 0,1-1 μS . Te doświadczenia pozwalają również lepiej zrozumieć mechanizm powstawania skoncentrowanych wyładowań i stref suchych na izolatorach linii wysokich napięć opisanych w pracy [16].



Rys.4. Fotografia izolatora PS120B z intensywnymi wyładowaniami powierzchniowymi

Podczas eksperymentów z modelami izolatorów z zadanymi wewnętrznymi uszkodzeniami, stosunkowo łatwo można było zauważyć wyładowania powierzchniowe na izolatorze kołpakowym z odległości 30-40 m. Jednakże nie udało się zaobserwować wyraźnych wyładowań na powierzchni izolatora polimerowego, gdy był połączony z izolatorem kołpakowym, jak również gdy nie był z nim połączony.

Jak widać, dołączenie izolatora kołpakowego do izolatora kompozytowego istotnie ułatwia diagnostykę izolatora polimerowego za pośrednictwem analizy pola elektrycznego.

Wnioski

Podczas eksperymentów z modelami izolatorów z zadanymi wewnętrznymi uszkodzeniami, stosunkowo łatwo można było zauważyć wyładowania powierzchniowe na izolatorze kołpakowym z odległości 30-40 m. Jednakże nie udało się zaobserwować wyraźnych wyładowań na powierzchni izolatora polimerowego gdy był on połączony z izolatorem kołpakowym jak również gdy nie był z nim połączony.

Dołączenie izolatora kołpakowego do izolatora kompozytowego istotnie ułatwia diagnostykę izolatora polimerowego za pośrednictwem analizy pola elektrycznego. Wystarczy zmierzyć napięcie na izolatorze kołpakowym i porównać z wcześniej ustalonymi wartościami wzorcowymi.

Autorzy: Prof. dr hab. inż. En Dar Kim, Laboratorium Wysokich Napięć, Sławiański, Ukraina, E-mail: ykim@meta.ua; dr hab. inż. Krystian Chrzan, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: krystian.chrzan@pwr.edu.pl

LITERATURA

- [1] ERRI Survey of Application of Overhead Transmission Line Polymer Insulators in North America & Summary of EPRI Polymer Insulator Failure Database. *World Conference & Exhibition on Insulations, Arresters & Bushings*. Marbellu, Spain, 2003, 147-157
- [2] Krawczenko W.A., Solomonik E.A., Razrobotka, izgotowlienije, opyt eksploataciji i proizvodstwo polimiernych izolatorow dlia WL i podstacii napriazienijem 35-500 kV w Rossiji. *Mieznarodnaja konferencija*, Sant Petersburg, 2006
- [3] Chrzan K.L., Vosloo W.L., and Holtzhausen J.P., Leakage Current on Porcelain and Silicone Insulators Under Sea or Light Industrial Pollution. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 26, No. 3 July 2011, 2051-2052
- [4] EPRI, Development of a Tool to Assess the Electrical Condition of Composite Insulators Prior to Live Work. www.epri.com, Product ID 101452, 11/1/2006
- [5] Schmuck F., Seifert J., Gutman I., Pignini A., Assessment of the condition of overhead line composite insulators. *CIGRE*, Paris 2012, b2-214
- [6] Pignini A., HV composite insulators today: market size & reliability. *INMR* Issue 1, Quarter 1, 2011, Vol. 19, No. 1
- [7] www.inmr.com/coating-line-insulator-with-rtv-silicone/
- [8] CIGRE WG 22.03, Review of in service diagnostic testing of composite insulators, *ELECTRA* No. 169, December 1996, 105-119
- [9] Vaillancourt G.H., Carignan S., Jean S., Experience with the detection of faulty composite insulators on high voltage power lines by the electric field measurement method. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 13, April 1998, 661-666
- [10] Gorur S., Sivasubramaniyam S., Defects in Nonceramic Insulators: Can they be Detected in a Timely Manner? <https://www.google.com.ua/search>
- [11] А.с., СССР. Гирлянда изоляторов для крепления и изоляции проводов / Е.Д. Ким, В.Н. Соломатов, Ю.Н. Яшин, Н.Ф. Тарасова, В.А. Аксенов. - SU1607628 A-1 H01 B17/04 от 05.12.1988
- [12] Yang Q, Wang R., Sima W, Yuan T., Liao L., Improvement of the Electric Field Distribution around the Ends of Composite Insulator with Series Connection of Glass Insulator, *Przeгляд Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 1b/2013, 248-252
- [13] Wang J., Chen Y., Liao J, Peng Z., Voltage and E-field Distribution of UHV Composite Insulator with Connection of Porcelain Insulators, ISBN: 978-1-4799-8903-4, 2015 *IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, 628-631
- [14] Ким Е.Д., Сиченко, В.Л. Калмыков. Исследование электрического поля полимерных изоляторов с внутренним электрическим дефектом. *Залезничний транспорт України*, 2007 - №5 – С. 61-63.
- [15] Ким Е.Д., Калмыков В.Л., Розов В.А., Демидов О.А. Стекланный изолятор как индикатор внутреннего электрического состояния полимерного изолятора. *Енергетика та електрифікація*, 2009. - №4 – С. 29-33
- [16] Chrzan K.L., Moro F., Concentrated discharges and dry bands on polluted outdoor insulators, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 22, No. 1, Jan. 2007, 466-471