

Wyładowania niezupełne na izolatorach kompozytowych

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań porównawczych powierzchniowych wyładowań niezupełnych na modelowych izolatorach kompozytowych z osłoną z kauczuku silikonowego typu HTV o różnym kształcie osłon i różnym stopniu zesterzenia ich powierzchni. Wykazano, że wyniki pomiarów wyładowań niezupełnych mogą być wykorzystane w ocenie diagnostycznej stanu powierzchni izolatorów kompozytowych z eksploatacji.

Abstract. In the paper results of the comparison tests of the partial discharges on the surface of model HTV composite insulators were shown. Insulators differed in shape of housings and degree of aging their surfaces. It has been shown that the results of the measurement of partial discharges can be used in the diagnostic evaluation of composite insulators in service. (**Partial discharges on the composite insulators surfaces**).

Słowa kluczowe: izolator kompozytowy, wyładowania niezupełne, diagnostyka, odporność starzeniowa.

Keywords: composite insulator, partial discharges, diagnostic, aging resistance.

Wstęp

Zastosowanie wysokonapięciowych izolatorów kompozytowych w liniach napowietrznych stanowi obecnie atrakcyjną alternatywę dla izolatorów klasycznych – ceramicznych i szklanych. Ich zalety zostały docenione w wielu krajach, a blisko czterdziestoletnie doświadczenia eksploatacyjne zaowocowały opracowaniem już czwartej ich generacji. Znaczący postęp w dziedzinie produkcji materiału osłon i rdzeni jak również poprawa procesu technologicznego produkcji spowodowały wyeliminowanie niektórych wad pierwszych konstrukcji oraz zwiększyły ich odporność starzeniową w warunkach eksploatacyjnych [1].

W czasie opadów atmosferycznych oraz mgły właściwości hydrofobowe powierzchni polimerowych osłon izolatorów ograniczają rozwój prądu upływu uniemożliwiając tworzeniu się ciągłej warstwy przewodzącej [2]. Stopniowa utrata hydrofobowości spowodowana narażeniami eksploatacyjnymi może prowadzić do pojawienia się groźnych wyładowań powierzchniowych [3-5]. Powodują one lokalne nagrzewanie się materiału, a także są źródłem promieniowania ultrafioletowego, którego energia niszczy wiązania chemiczne polimerowej osłony [6]. Konsekwencją tego zjawiska oprócz utraty właściwości hydrofobowych jest zmiana właściwości mechanicznych – osłona staje się krucha i łamiwa [7]. Dlatego też ta znacząco mniejsza odporność izolatorów kompozytowych na oddziaływanie wyładowań powierzchniowych w porównaniu do izolatorów klasycznych jest wskazywana jako ich podstawowa wada, która determinuje ich spodziewany „czas życia” w liniach napowietrznych.

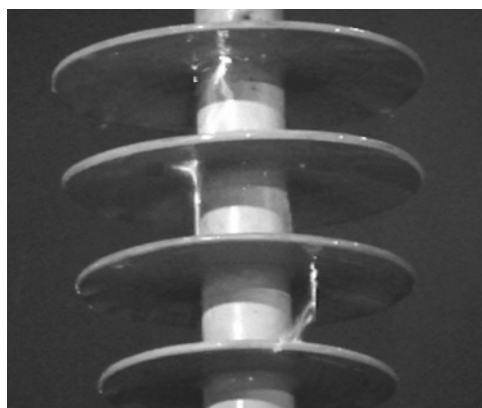
Oddziaływanie wielu różnych czynników starzeniowych (tj. opady deszczu, mgły, obecność zabrudzeń, radiacja słoneczna promieniowanie ultrafioletowe, wyładowania powierzchniowe) prowadzi do nierównomiernej utraty właściwości powierzchniowych polimerowej osłony [8,9]. Z tego powodu ważnym problemem jest opracowanie programu badań diagnostycznych izolatorów z eksploatacji, którego wyniki pozwoliłyby na ocenę ich stanu i na podejmowanie właściwych decyzji dotyczących perspektywy dalszej eksploatacji bądź wymiany [7].

Jednym z interesujących wskaźników odnoszącym się do stopnia zesterzenia materiału osłony może być wynik pomiaru powierzchniowych wyładowań niezupełnych.

Proces rozwoju wyładowań powierzchniowych

Wysokonapięciowe izolatory kompozytowe zainstalowane w liniach napowietrznych narażone są na wpływ różnych czynników starzeniowych. Do

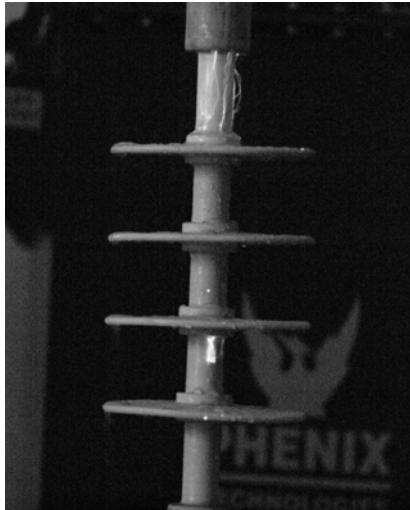
najgroźniejszych należą opady atmosferyczne. Długotrwałe oddziaływanie wody na powierzchnie elastomeru silikonowego, z którego wykonana jest osłona prowadzi do wymywania oleistych frakcji niskomolekularnych oraz reorientacji grup metylowych i w konsekwencji do utraty właściwości hydrofobowych [3]. Jeśli proces ten trwa zbyt długo to materiał osłony może się nie zregenerować. Ponieważ izolator nie jest zwilżany w sposób jednakowy na całej powierzchni, dlatego traci swoje właściwości powierzchniowe w sposób nierównomierny [9]. Najbardziej na działanie wody narażane są górne powierzchnie kloszy, na których gromadzą się krople wody. W obecności działania sił pola elektrycznego krople te zmieniają swój kształt rozciągając się łączą się w większe oczka. Zmniejsza się również kąt ich przylegania do powierzchni, tworzą się wodne ostrza, które stają się źródłem wyładowań niezupełnych pogłębiających jeszcze proces degradacji. Woda zaczyna grawitacyjnie przemieszczać się do krawędzi kloszy tworząc większe zwilżone obszary. W kolejnym stadium nagromadzona woda spływa z górnych powierzchni kloszy. Pomiędzy spadającymi rozciągniętymi pod wpływem działania sił pola elektrycznego i grawitacyjnego kroplami wody występują wyładowania niezupełne, tworzą się mostki zwierające klosze (rys. 1) [11,12].



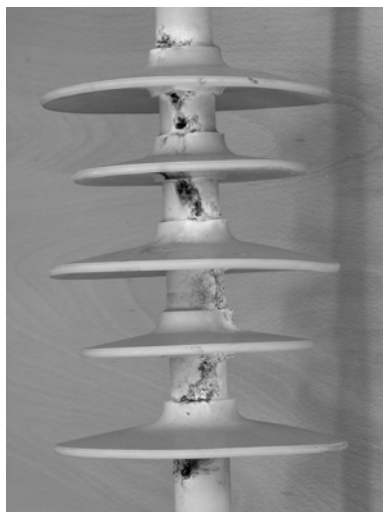
Rys. 1. Mostki wodne zwierające klosze

Utworzenie się ścieżek przewodzących na powierzchniach kloszy powoduje zmianę rozkładu napięcia i natężenia pola elektrycznego na izolatorze. W obszarze stref suchych – na odcinkach pnia oraz pod kloszami – napięcia chwilowe mogą przekroczyć parametry krytyczne konieczne do zainicjowania procesów jonizacyjnych,

których konsekwencją będzie pojawienie się wyładowań powierzchniowych. W początkowym stadium rozwoju są to wyładowania niskoprądowe w postaci niebiesko świecących nitek (rys. 2). Erozja materiału w miejscu wyładowań przyjmuje kształt hydrofilnych ścieżek, które w obecności wilgoci są przewodzące. Pogłębiający się proces degradacji osłony prowadzi do wzrostu wartości prądu upływu i zmiany formy wyładowań na krótkie wyładowania łukowe, których energia powoduje już głęboką erozję często odsłaniającą szklano-epoksydowy rdzeń (rys. 3).



Rys.2. Niskoprądowe wyładowania powierzchniowe



Rys.3. Erozja osłony spowodowana wyładowaniami powierzchniowymi

Cel i opis badania

Przedmiotem badań były modelowe izolatory kompozytowe z osłoną z kauczuku silikonowego typu HTV, wykonane z tych samych materiałów i w tej samej technologii, przeznaczone do pracy przy napięciu 20 kV. Izolatory spełniały wymagania normy PN-IEC 61466-2 [13] pod względem długości drogi przeskoku „na sucho” oraz drogi prądu upływu, różniły się kątami nachylenia górnej płaszczyzny kloszy – wynoszącymi 0 (rys. 2) i 30 stopni.

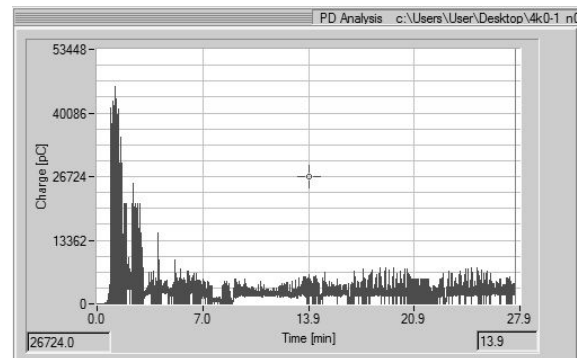
Celem badań była analiza porównawcza powierzchniowych wyładowań niepełnych na zwilżonych izolatorach kompozytowych o różnych kształtach osłon i różnym stopniu hydrofobowości ich powierzchni.

Izolatory zwilżano zraszczem ogrodowym, a stan ich powierzchni oceniano metodą STRI [14].

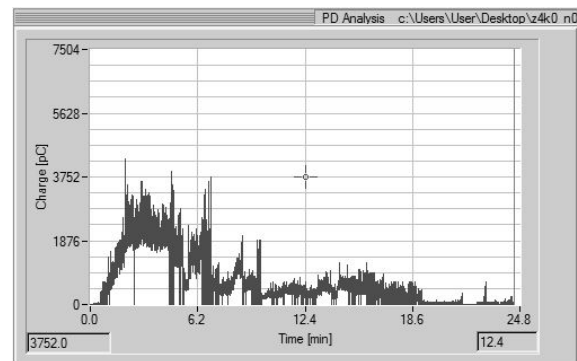
Porównano wyniki badań izolatorów nowych, których stan zwilżalności powierzchni był na poziomie klas HC1-HC2 w skali STRI tzn. były hydrofobowe oraz izolatorów postarzonych, których stan oceniono na HC4 – HC5. Pomiary wykonano wykorzystując układ do pomiaru wyładowań niepełnych firmy Doble Lemke typ LDS-6.

Wyniki badań

Parametry zmierzonych wyładowań niepełnych występujących na izolatorach świeżych i postarzonych zostały przedstawione na rys.4 -7.



a) izolator nowy,



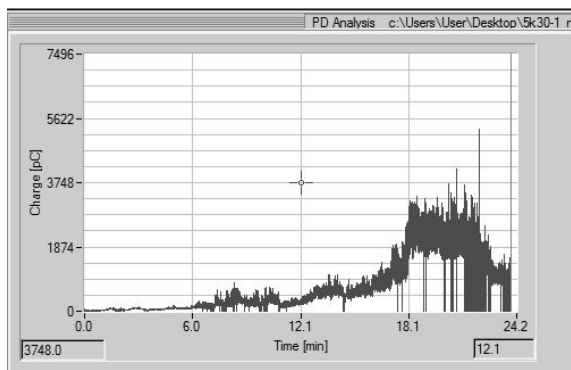
b) izolator postarzony,

Rys.4. Wartości ładunku pozornego na izolatorze o kloszach płaskich – a) nowy i b) postarzony

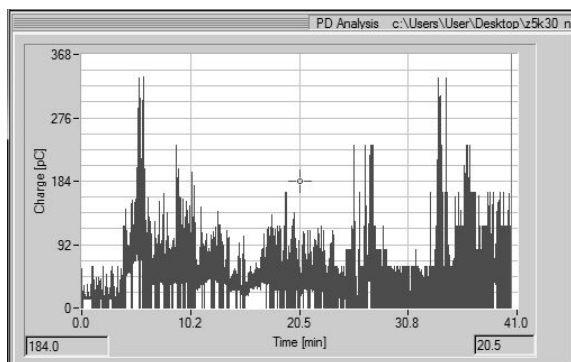
Porównanie spektrum impulsów wyładowań na nowych próbkach wskazuje, że w przypadku konstrukcji z płaskimi kloszami impulsy o największej amplitudzie zarejestrowano w pierwszych minutach pomiaru, po których następuje wyraźne obniżenie i stabilizacja przebiegu. W początkowej fazie oddziaływania pola elektrycznego źródłem wyładowań o największej amplitudzie były wyładowania pomiędzy odseparowanymi kroplami wody. Natomiast w przypadku izolatora wyposażonego w klosze o stromym nachyleniu obserwuje się stopniowy wzrost amplitudy wyładowań, które osiągają wartość maksymalną po około 20 minutach pomiaru. Pod wpływem działania sił pola elektrycznego krople wody stopniowo wydłużając się na stromych powierzchniach tworzyły wodne ostrza, które inicjowały zapłon wyładowań niepełnych.

Maksymalna wartość zmierzonego ładunku pozornego zmniejszyła się na postarzonych izolatorach z płaskimi kloszami około 10-krotnie (rys. 4), natomiast w przypadku izolatorów z kloszami o nachyleniu górnych powierzchni 30 stopni prawie 16-krotnie (rys. 5). Wyraźne zmniejszenie wartości maksymalnego ładunku pozornego jest wynikiem wzrostu zwilżalności powierzchni, na których tworzy się ciągły film wodny. Ilość odseparowanych kropeł wody osadzonych na osłonach izolatorów - będących źródłem wyładowań niepełnych między kroplowych - uległa znaczącej redukcji. W przypadku konstrukcji wyposażonej

w stromo nachylone klosze krople wody grawitacyjne spływają z ich górnych powierzchni ograniczając tym samym rozwój prądu upływu i wyładowań elektrycznych [15].

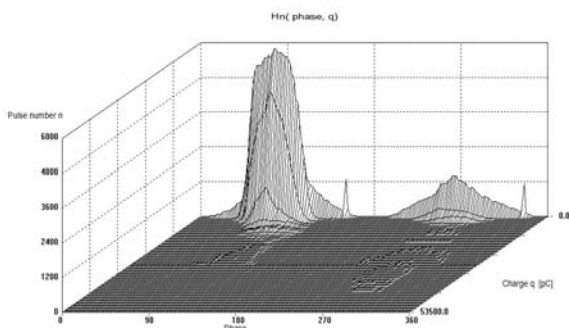


a) izolator nowy,

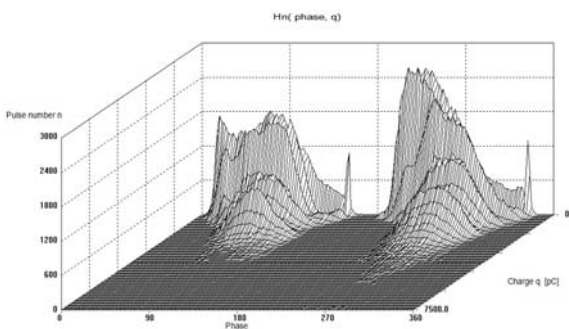


b) izolator postarzony,

Rys.5. Wartości ładunku pozornego na izolatorze z kloszami o nachyleniu górnych powierzchni 30 stopni – a) nowy i b) postarzony



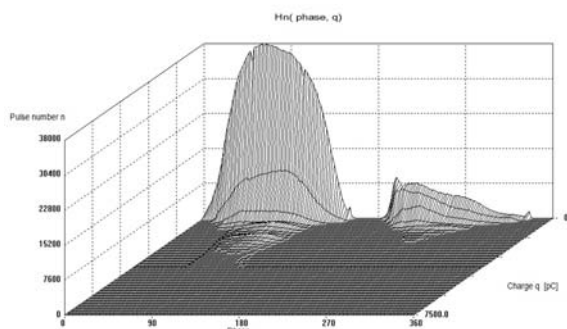
a) izolator nowy,



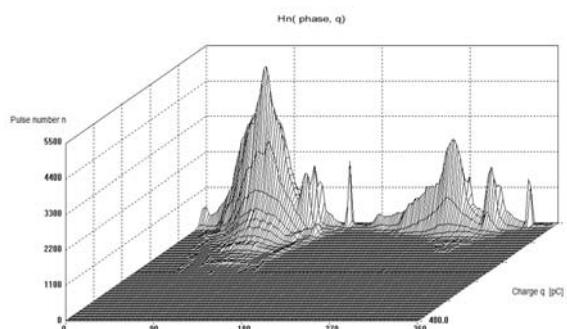
b) izolator postarzony,

Rys.6. Wartości ładunku pozornego, ilości impulsów i ich biegunowości zmierzona na izolatorze o kloszach płaskich – a) nowy i b) postarzony

Analogiczne znaczące zmniejszenie liczby impulsów wyładowań niepełnych zaobserwowano na powierzchniach postarzonych. W przypadku izolatorów z płaskimi kloszami około 3-krotnie podczas gdy dla izolatorów ze stromymi kloszami około 7-krotnie. Wzajemne porównanie konstrukcji wskazuje, że chociaż liczba impulsów wyładowań niepełnych na izolatorze ze stromymi kloszami jest większa to dotyczą one jednak wyładowań o małej energii i stosunkowo niewielkim ładunku w porównaniu do układu z płaskimi kloszami (rys. 6 i 7). Dominującymi wyładowaniami na obu nowych konstrukcja były wyładowania o biegunowości dodatniej. Wzrost zwilżalności powierzchni sprzyjał natomiast wzrostowi liczby wyładowań o biegunowości ujemnej, które przyjmowały około 2-krotnie wyższe wartości dla konstrukcji z płaskimi kloszami (rys. 6) podczas gdy dla układu ze stromymi kloszami zmniejszyły się około 3-krotnie (rys. 7).



a) izolator nowy,



b) izolator postarzony,

Rys.7. Wartości ładunku pozornego, ilości impulsów i ich biegunowości zmierzona na izolatorze z kloszami o nachyleniu górnych powierzchni 30 stopni – a) nowy i b) postarzony

Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań porównawczych wpisują się w aktualną i ważną tematykę związaną z diagnostyką izolatorów kompozytowych z eksploatacji. W opracowaniu grupy roboczej CIGRE [7] zaproponowano przykładowe programy badawcze obejmujące różne testy laboratoryjne, których celem jest ocena stopnia zesterzenia izolatorów. Propozycje takie obejmują pomiary poziomu zabrudzeń powierzchniowych, stanu hydrofobowości osłony, testy wytrzymałości mechanicznej jak również testy elektryczne takie jak pomiar napięcia przeskoku czy test stromo narastającym udarem napięciowym.

Wyniki przeprowadzonych pomiarów wyładowań niepełnych na kompozytowych osłonach izolatorów nowych i postarzonych są wyraźnie zróżnicowane. Wzrost zwilżalności powierzchni sprzyjał tworzeniu się ciągłych ścieżek przewodzących i redukował ilość odseparowanych

wzajemnie kropel wody, które pod wpływem działania pola elektrycznego inicjowały wyładowania niezupełne. Obniżenie się poziomu intensywności wyładowań niezupełnych oraz zmierzonego sumarycznego ładunku pozornego związane było - w przypadku obu konstrukcji kloszowych - z procesem starzeniowym, którego skutkiem była utrata hydrofobowości. Porównanie wyników badań wskazuje także, że poziom wyładowań niezupełnych zmierzony na zwilżonych izolatorach kompozytowych uzależniony jest również od kształtu ich osłon. W przypadku konstrukcji wyposażonej w stromo nachylone klosze wartość zmierzonego sumarycznego ładunku pozornego była o jeden rząd niższa w porównaniu do układu z płaskimi kloszami. Podobny różnicę pomiędzy wynikami otrzymano dla próbek postarzonych. Otrzymane wnioski dotyczące kształtu osłon są zgodne z wynikami badań przedstawionych w pracy [15].

Wyniki pomiarów wyładowań niezupełnych mogą być wykorzystane w ocenie diagnostycznej stanu powierzchni izolatorów kompozytowych.

Autorzy: dr inż. Krzysztof Wieczorek, Politechnika Wroclawska, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, pl. Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław, E-mail: Krzysztof.Wieczorek@pwr.edu.pl, dr inż. Maciej Jaroszewski, Politechnika Wroclawska, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, pl. Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław, E-mail: Maciej.Jaroszewski@pwr.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Gubański S.M., Światowe doświadczenia z izolatorami kompozytowymi w napowietrznych liniach wysokich napięć, *Energetyka, zeszyt tematyczny* 1/2003, (2003), 52-55
- [2] Karady G. G., Flashover mechanism of non-ceramic insulators, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 6, No. 5, (1999), 718-723
- [3] Reynders J. P., Jandrell I. R., Reynders S. M., Surface Ageing Mechanisms and their Relationship to Service Performance of Silicone Rubber Insulation, *High Voltage Engineering Symposium, (Conf. Publ. No. 467)*, Vol. 4, 23-27 August (1999), 54-58
- [4] Ramirez-Vazquez I., Hernandez-Corona R., Montoya-Tena G., Diagnostics for Nonceramic Insulators in Harsh Environments, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol.25, No 6, (2009), 28-33
- [5] Hackam R., Outdoor HV composite polymeric insulators, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 6, No. 5, (1999), 557-585
- [6] Youshimura N., Kumagai S., Nishimura S., Electrical an Enviromental Aging of Silicone Rubber Used in Outdoor Insulation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 6, No. 5, (1999), 632-650
- [7] CIGRE Working Group B2.21: Guide for the Assessment of Composite Insulators in the Laboratory after their Removal from Service, No 481, December 2011.
- [8] Wańkowicz J., Doświadczenia eksploatacyjne z izolatorami kompozytowymi linii napowietrznych WN i powłokami z elastomeru silikonowego RTV w Polsce, *VI Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego EUJ'97*, (1997), 419-425
- [9] Xiong Y., Rowland S. M., Robertson J., Hoffmann S., Characterization of Field-Aged 400 kV Silicone Rubber Composite Insulators, *Ed. 2006 IEEE: 2006 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, (2006), 417-420
- [10] Gubanski S., Swedish Research on the Application of Composite Insulators in Outdoor Insulation, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol.11, No 5, (1995), 24-31
- [11] Bretuj W., Fleszyński J., Wieczorek K., Zjawiska wyładowań na zabrudzonych i zawilgoconych izolatorach kompozytowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10, (2008), 1-4
- [12] Bretuj W., Wieczorek K., Żyłka P., Rola kropli wody w procesie rozwoju przeskoku elektrycznego na izolatorach kompozytowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 5, (2010), 272-274
- [13] Norma PN-IEC 61466-2., Izolatory kompozytowe wiszące do linii napowietrznych o znamionowym napięciu powyżej 1000 V - Część 2: Wymiary i właściwości elektryczne, (2002)
- [14] STRI Guide 92-1, *Hydrophobicity Classification Guide*, Swedish Transmission Research Institute, (1992)
- [15] Bretuj W., Fleszyński J., Wieczorek K., The Effect of the Shapes of Insulator Housings and the Working Positions of Composite Insulators on their Ageing Resistance under Conditions of High Voltage Impact and Water Precipitation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 19, No. 3, (2012), 1044-1052