



Witold BRETUJ, Janusz FLESZYŃSKI, Krzysztof WIECZOREK

Politechnika Wroclawska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii

Badania starzeniowe modelowych izolatorów kompozytowych w komorze czystej mgły

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań modelowych izolatorów kompozytowych różniących się kształtem silikonowej osłony, narażonych na działanie wysokiego napięcia i cyklicznych opadów czystej mgły. Obserwowano stopniową degradację właściwości powierzchniowych materiału osłony i rozwój prądu upływu. Stwierdzono istotny wpływ kąta nachylenia kloszy na poprawę odporności izolatorów na starzenie w warunkach mgielnych.

Abstract. (Aging tests of composite model insulators in a clean fog chamber). In this paper tests results of composite model insulators that had different shape of silicone housing were described. Insulators were stressed by high voltage and clean fog. Gradually degradation of surface properties of housing and increase of leakage current were observed. Significant influence of sheds angle inclination on improvement of degradation resistance in the clean fog condition was found.

Słowa kluczowe: izolator kompozytowy, kauczuk silikonowy, test starzeniowy, czysta mgła

Keywords: composite insulator, silicone rubber, aging test, clean fog

Wstęp

Mgły i deszcze stanowią istotne narażenie starzeniowe wysokonapięciowych izolatorów kompozytowych z osłonami z kauczuku silikonowego, nazywanych silikonowymi izolatorami kompozytowymi.

Laboratoryjne badania starzeniowe w komorach słonej mgły są często wykonywane [1-3]. Badania takie są wymagane przez normę PN-IEC 61109 w próbach konstruktorskich izolatorów kompozytowych [4], są także zalecane przez CIGRE dla badań materiałowych [5]. W badaniach w komorach słonej mgły stosuje się duże zasolenie wody, co powoduje wysoką jej przewodność. Z tego między innymi względu narażenia starzeniowe w próbach laboratoryjnych w słonej mgłę są znacznie ostrzejsze od narażeń występujących w praktyce. Celowe zatem są również badania izolatorów kompozytowych w komorach tzw. czystej mgły, lepiej odwzorujące rzeczywiste narażenia.

W bogatej literaturze dotyczącej silikonowych izolatorów kompozytowych niewiele jest informacji o wpływie kształtu i parametrów konstrukcyjnych na zachowanie się izolatorów w eksploatacji. Nic zatem dziwnego, że rozwiązania konstrukcyjne silikonowych izolatorów kompozytowych, produkowanych przez liczne firmy na świecie, są zdeterminowane analogią do długopniowych izolatorów porcelanowych. Tymczasem specyficzne właściwości powierzchniowe kauczuków silikonowych powodują, że mgły, deszcze i zabrudzenia wywołują inne skutki starzeniowe niż na izolatorach ceramicznych. Zdaniem specjalistów problem optymalizacji kształtu i parametrów konstrukcyjnych izolatorów kompozytowych jest ważny. Uważa się bowiem, że optymalizacja ta umożliwi lepsze wykorzystanie hydrofobowych właściwości izolatorowych kauczuków silikonowych [2,6-8]. Jest przy tym istotne, że technologie wytwarzania izolatorów polimerowych stwarzają większe możliwości konstrukcyjne w porównaniu z technologiami ceramicznymi. Problem jest jednak złożony i wymaga kompleksowych badań. Podjęto je w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej. Realizowany projekt badawczy, finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, zakłada możliwość ograniczenia degradacji starzeniowej silikonowych izolatorów kompozytowych dzięki optymalizacji kształtu i parametrów konstrukcyjnych kloszy

i układów kloszowych. Program badań obejmuje badania starzeniowe w wysokonapięciowej komorze deszczowej i mgielnej specjalnie wykonanych modelowych izolatorów [8]. W badaniach stosujemy te same podstawowe parametry prób (napięcie probiercze, przewodność wody), co umożliwia interesujące porównanie narażeń starzeniowych mgielnych i deszczowych. Artykuł ten, publikujący fragment zrealizowanych badań, wskazuje na procesy starzeniowe silikonowych izolatorów kompozytowych rozwijające się pod działaniem wysokiego napięcia i mgły, opisuje metodykę badań izolatorów w komorze mgielnej oraz przedstawia wyniki badań dwóch modelowych izolatorów różniących się kątem nachylenia kloszy.

Procesy starzenia izolatorów w warunkach mgielnych

Obszarami o największej intensywności procesów starzeniowych są powierzchnie międzyfazowe wewnątrz i na zewnątrz polimeru [9]. Większość narażeń starzeniowych w warunkach napowietrznych dotyczy zewnętrznej powierzchni osłony izolatora

Jednymi z najgroźniejszych narażeń starzeniowych w warunkach eksploatacyjnych są opady deszczu oraz mgły. Powodują one nierównomierną utratę właściwości hydrofobowych silikonowych izolatorów kompozytowych na skutek wymywania frakcji niskomolekularnych z powierzchni kauczuku silikonowego, wyładowań między kroplami wody, podciągania i akumulacji wody przy obrzeżach kloszy izolatora.

Opadająca mgła zwilża izolator, zwłaszcza górne powierzchnie kloszy i pień, bardziej równomiernie niż deszcz. Gęsto osadzone na powierzchni osłony drobne krople mgły powodują wzmocnienie lokalnego pola elektrycznego [10]. Efektem silnego sprzężenia między wzmocnieniem lokalnego pola elektrycznego a zjawiskami elektrohydrodynamicznymi jest rozciąganie się i koalescencja kropelek wody, prowadzące do dalszej intensyfikacji pola elektrycznego i generowania starzących powierzchni wyładowań niezupełnych [11].

Możliwość rozwoju prądu upływu ograniczają mniej zwilżone obszary pod kloszami, gdzie penetracja mgły jest mniejsza. Wzrost akumulacji wody na górnych powierzchniach kloszy sprzyja jednak intensyfikacji procesów starzeniowych pod kloszami. Postępująca

degradacja właściwości hydrofobowych dolnych powierzchni kloszy prowadzi do rozwoju w tych obszarach niskoprądowych wyładowań powierzchniowych i utworzenia się sieci przewodzących prąd ścieżek wodnych. Zwiększenie zwilżalności kloszy prowadzi w konsekwencji do wzrostu wartości prądu upływu i pojawienia się wyładowań powierzchniowych o charakterze łukowym na osuszonym przez prąd upływu pniu izolatora. Skoncentrowane wyładowania łukowe, silnie oddziałujące erozyjnie na elastomery silikonowe [13], są bardzo groźne. Głęboka erozja osłony na pniu, odsłaniająca rdzeń szkło-epoksydowy, stanowi bowiem poważne uszkodzenie izolatora kompozytowego [13].

Metodyka badań

Przedmiotem badań były modelowe izolatory kompozytowe z osłoną z kauczuku silikonowego HTV (rys. 1). Izolatory posiadały bardzo zbliżone drogi przeskoku na sucho oraz drogi prądu upływu, co wynika z uwzględnienia podstawowych kryteriów klasyfikujących izolatory kompozytowe pod względem elektrycznym, zawartych w normie IEC 61466-2. Izolatory różniły się natomiast wyraźnie kątem nachylenia kloszy. Podstawowe parametry konstrukcyjne izolatorów zestawia tabela 1.

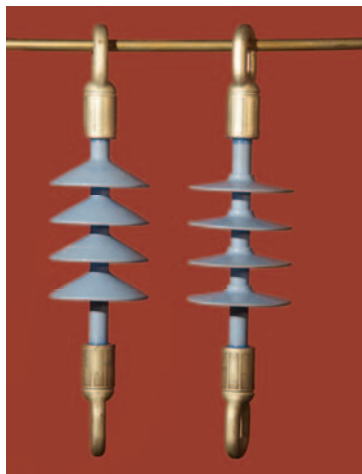
Tabela 1. Parametry konstrukcyjne badanych izolatorów

Nr izolatora	n	d	s	α	ln	lp
		mm	mm	deg	mm	mm
1	4	135	50	10	655	280
2	4	130	50	30	650	275

Oznaczenia: n - liczba kloszy, d - średnica kloszy, s - odstęp między kloszami, α - kąt nachylenia kloszy, ln - droga upływu prądu, lp - droga przeskoku w powietrzu (na sucho).

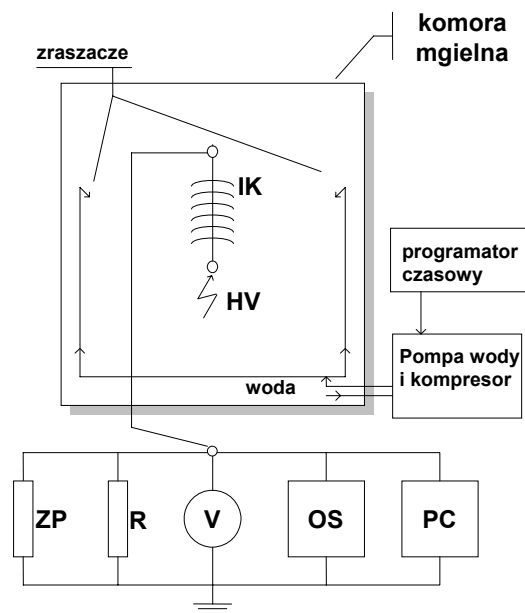
Badania przeprowadzono w wysokonapięciowej komorze mgielnej, która została wykonana w Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej. Komorę wyposażono w znormalizowany układ dysz, umieszczonych w przeciwległych rogach komory. Układ do wytwarzania mgły składał się z kompresora olejowego oraz pompy i pracował w obiegu zamkniętym sterowanym programatorem czasowym. Konduktywność użytej wody wynosiła 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Przyjęty program testu składał się z 7 godzin starzenia, w których każda godzina obejmowała dwa 15 minutowe cykle zraszania mgłą oraz dwa 15 minutowe okresy bez wytwarzania mgły. Pozostałe 17 godzin to czas „odoczynku”. Izolatory starzono napięciem przemiennym 50 Hz o wartości 40 kV.



Rys. 1. Izolatory kompozytowe o kącie nachylenia kloszy 30° i 10°.

Do rejestracji prądu upływu wykorzystano komputer klasy PC oraz miernik uniwersalny METEX. Schemat stanowiska komory mgielnej przedstawiono na rysunku 2.



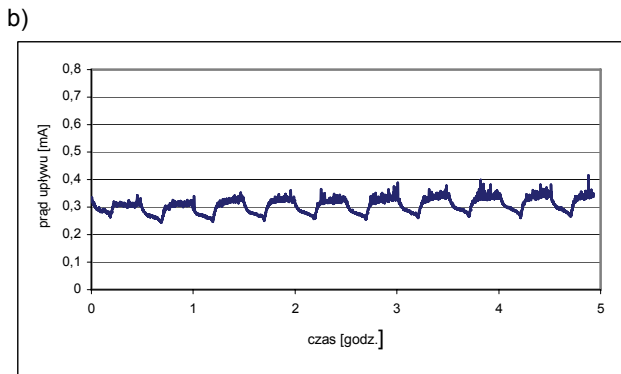
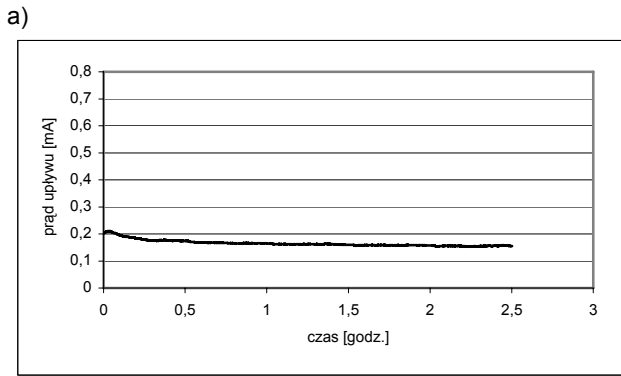
Rys. 2. Schemat układu pomiarowego komory mgielnej: IK – badany izolator kompozytowy; PC – komputer osobisty klasy PC; OS – oscyloskop; V – woltmierz; R – rezystor; ZP – zabezpieczenie przeciwzpięciowe

Wyniki badań

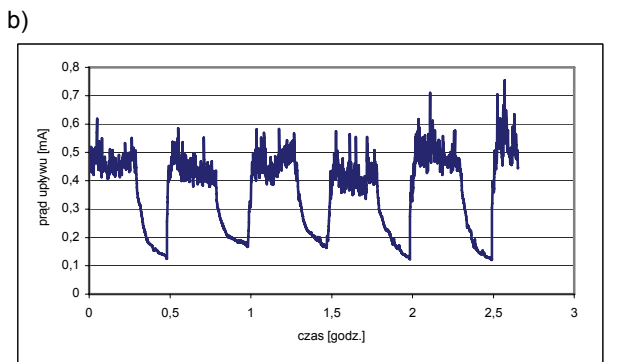
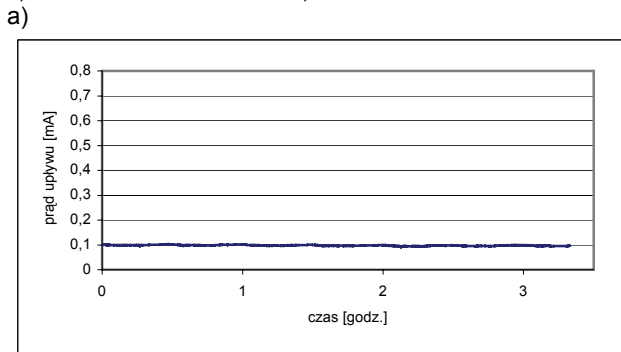
Przeprowadzone badania miały charakter badań porównawczych. Starzono izolatory wykonane w tej samej technologii i z tego samego elastomeru silikonowego. Wyniki badań wykazały bardzo istotny wpływ kąta nachylenia kloszy na rozwój zjawisk, istotnych z punktu widzenia starzenia polimerowych izolatorów kompozytowych pod działaniem wysokiego napięcia oraz mgły. Przy stromych kloszach woda spływa z ich powierzchni równomiernie. Na powierzchniach kloszy o małym kącie nachylenia woda gromadzi się, powodując tworzenie się dużych kropeł wody, które spadając mostkami odstępów międzykloszowe. W warunkach mgielnych przy stromych kloszach obserwuje się również mniejszą penetrację kropełek wody w obszary podkloszowe.

Podczas prób starzeniowych izolatorów w komorze mgielnej automatycznie rejestrowano wartości prądów upływu. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wybrane przebiegi prądów upływu. Wartość prądu upływu w 21. dniu starzenia na izolatorze o kącie nachylenia kloszy 30° utrzymywała się na poziomie 0,15 mA (rys. 3a.); dla izolatora o kącie nachylenia 10° prąd ten przekraczał wartość 0,7 mA (rys.4b).

Nawet w 44. dniu starzenia na izolatorze o kącie nachylenia kloszy równym 30° nie obserwowano wyładowań powierzchniowych. Wyładowania powierzchniowe na izolatorze o kącie nachylenia kloszy 10° pojawiły się natomiast już w 21. dniu starzenia. Rozwój prądów upływu, przedstawiony na rysunkach, świadczy o różnej dynamice procesów starzeniowych badanych izolatorów. W okresie 21. dni starzenia wartość prądu upływu na izolatorze o mniejszym kącie nachylenia kloszy wzrosła około siedmiokrotnie (rys.4a-b). W przypadku izolatora o większym kącie nachylenia kloszy wzrost ten w okresie 44. dni starzenia był niewielki (rys.3).



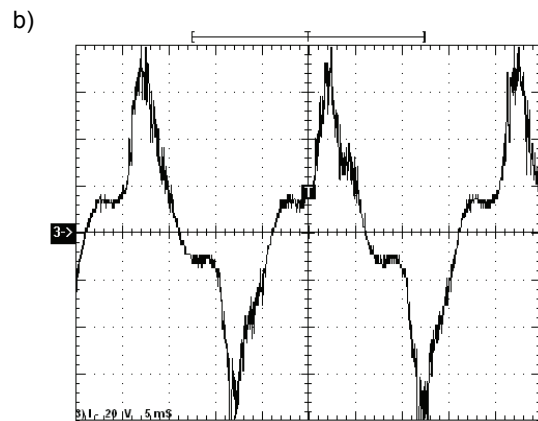
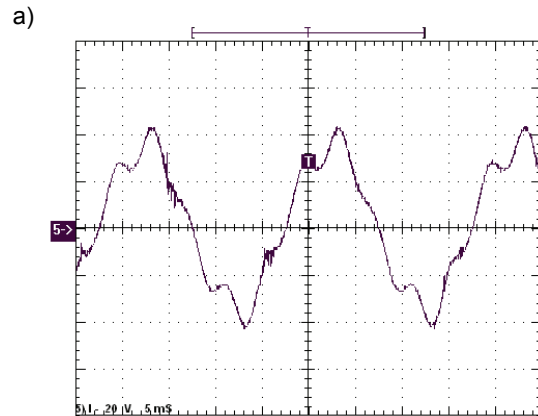
Rys. 3. Prąd upływu na izolatorze o kącie nachylenia kloszy 30° ; a) 21. dzień starzenia, b) 44. dzień starzenia.



Rys. 4. Prąd upływu na izolatorze o kącie nachylenia kloszy 10° ; a) 2. dzień starzenia, b) 21. dzień starzenia.

Rysunek 5 przedstawia oscylogramy rejestrowanego prądu w 21. dniu starzenia izolatorów. Dla izolatora o kącie nachylenia kloszy 10° prąd jest wyraźnie większy, widoczne są impulsy niskoprądowych wyładowań powierzchniowych (rys. 5b.). Obserwowane wyładowania miały postać niebieskich nitek, rozwijających się na dolnych powierzchniach kloszy, zwłaszcza pod pierwszym kloszem od strony wysokiego napięcia. Pojawienie się i rozwój tych

wyładowań stanowi istotne zagrożenie dla izolatorów kompozytowych.



Rys. 5. Oscylogramy przebiegów prądowych w 21. dniu starzenia w komorze mgielnej: a) izolator o kącie nachylenia kloszy 30°, b) izolator o kącie nachylenia kloszy 10°.

Przeprowadzone badania wskazują, że zwiększenie kąta nachylenia kloszy wpływa wyraźnie na dynamikę procesu starzenia, zwiększając odporność izolatorów na narażenie opadem mgły. Jest bardzo istotne, że taki wpływ kąta nachylenia kloszy stwierdzono również w badaniach w komorze mgły solnej [1,3] oraz w komorze deszczowej [14,15].

Niekorzystnym efektem zastosowania kloszy o dużym kącie nachylenia jest jednak zwiększenie nierównomierności rozkładu pola elektrycznego i naprężeń skierowanych wzdłuż pnia izolatora w miejscu jego połączenia z kloszem [1,3]. Dla badanych, stosunkowo krótkich izolatorów na napięciu 24 kV nie zaobserwowano negatywnych skutków. Na degradację materiału osłony pod kloszami w sąsiedztwie pnia mogą być jednak narażone konstrukcje izolatorów na wyższe napięcia, charakteryzujące się większą nierównomiernością rozkładu pola elektrycznego. Problem ten powinien być brany pod uwagę w dalszych badaniach.

Wnioski

Badania wykazały, że próby w wysokonapięciowej komorze czystej mgły umożliwiają ocenę odporności starzeniowej silikonowych izolatorów kompozytowych. Uzyskane wyniki wskazują, że kąt nachylenia kloszy jest ważnym parametrem konstrukcyjnym. Strome nachylenie kloszy powoduje wzrost odporności starzeniowej izolatorów na rozwój prądów upływu i wyładowań powierzchniowych.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr 3 T10B 097 28 pt. „Badania elektroenergetycznych izolatorów kompozytowych w aspekcie optymalizacji ich kształtu i parametrów konstrukcyjnych”, finansowanego przez Departament Badań Naukowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

- [1] El-Hag H.A., Jayaram S. H., Cherney E. A., Influence of shed parameters on the aging performance of silicone rubber insulators in salt-fog, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 10, No. 4, 2003, 655-664
- [2] Marungsri B., Shinokubo H., Matsuoka R., Kumagai S., Effect of specimen configuration on deterioration of silicone rubber for polymer insulators in salt fog ageing test, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 13, No. 1, 2006, 129-138
- [3] El-Hag H.A., Jayaram S. H., Cherney E. A., Effect of insulator profile on aging performance of silicone rubber insulators in salt-fog, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 14, No. 2, 2007, 352-359
- [4] PN-IEC 1109:1999, Izolatory kompozytowe do linii napowietrznych prądu przemiennego o znamionowym napięciu powyżej 1000V. Composite insulators for AC overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 kV- *Definitions, test methods and acceptance criteria*, (1999)
- [5] CIGRE Working Group 15.4, Development of a test technique to assess of polymer's long term ability to suppress leakage current under high voltage and low conductivity salt fog conditions. *Electra*, No.201, 2002, 8-19
- [6] Gorur R.S., The shape aspect of composite polymer insulators, *Insulator News and Market Report*, Vol. 9, No. 4, 2001, 54-58
- [7] Gubański S.M., From the research view – Geometric design in composite insulator performance, *Insulator News and Market Report*, Vol. 12, No. 2, 2004, 14
- [8] Fleszyński J., Pohl Z., Różecki S., O potrzebie optymalizacji kształtu i parametrów konstrukcyjnych elektroenergetycznych izolatorów kompozytowych, *Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje*, Nr 1, 2006, 75-78
- [9] Jansen H., Seifert J. M., Kärner H.C., Interfacial phenomena in composite high voltage insulation, *Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 6, No 5, 1999, 651-659
- [10] El-Kishky H., Gorur R. S., Electric field computation on an insulating surface with discrete water droplets, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1996, Vol. 3, No. 3
- [11] Krivda A., Birtwhistle D., Electrohydrodynamic phenomena related to water drops on polymer surfaces”, 2001 *IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics*, June 25-29, 2001, Eindhoven, 345 – 350
- [12] Fleszyński J., Lisowski M., Świerzyńska Z., Resistance to tracking and erosion of silicone elastomers used in composite insulators, *Przegląd elektrotechniczny, Zeszyt specjalny, APTADM2001*, 2001, 225-228
- [13] Fleszyński J., Tymań A., Diagnostyka elektroenergetycznych izolatorów kompozytowych w eksploatacji, *Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje*, Nr 1, 2003, 54-56
- [14] Bretuj W., Fleszyński J., Wieczorek K., Metoda badania odporności starzeniowej izolatorów kompozytowych na narażenia deszczowe, *VIII Ogólnopolska Konferencja Napowietrzna Izolacja Wysokonapięciowa w Elektroenergetyce*, Szklarska Poręba, 12-15.06.2007
- [15] Bretuj W., Fleszyński J., Wieczorek K., Kąt nachylenia kloszy – ważny parametr konstrukcyjny izolatorów kompozytowych, *VIII Ogólnopolska Konferencja Napowietrzna Izolacja Wysokonapięciowa w Elektroenergetyce*, Szklarska Poręba, 12-15.06.2007

Autorzy: prof. dr hab. inż. Janusz Fleszyński, Politechnika Wroclawska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, pl. Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław, E-mail: Janusz.Fleszyński@pwr.wroc.pl

mgr inż. Witold Bretuj, Politechnika Wroclawska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, pl. Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław, E-mail: Witold.Bretuj@pwr.wroc.pl

dr inż. Krzysztof Wieczorek, Politechnika Wroclawska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, pl. Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław, E-mail: Krzysztof.Wieczorek@pwr.wroc.pl