

Witold BRETUJ¹, Adam PELESZ¹

Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny,
Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii (1)

Napięcie zapłonu wyładowań niezupełnych na zwilżonej kroplami wody powierzchni gumy silikonowej

Streszczenie. W pracy przedstawiono wpływ konfiguracji geometrycznej układu kropli wody osadzonych na powierzchni płaskich próbek z gumy silikonowej na napięcie zapłonu wyładowań niezupełnych przy napięciu przemiennym 50 Hz. Dla wyznaczonego eksperymentalnie napięcia początkowego wyładowań niezupełnych określono odpowiadające mu średnie natężenie pola elektrycznego. Wykonane symulacje rozkładu pola elektrycznego umożliwiły oszacowanie wartości pola elektrycznego na obrzeżach kropli.

Słowa kluczowe: guma silikonowa, krople wody, rozkład pola elektrycznego, wyładowania niezupełne

Wstęp

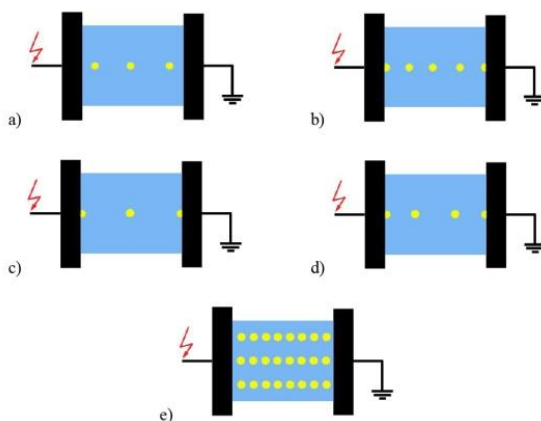
W początkowym okresie eksploatacji izolatory kompozytowe posiadają silne właściwości hydrofobowe. Ich powierzchnia, nawet w czasie atmosferycznych opadów wody, charakteryzuje się wysoką wartością rezystancji, która wpływa na ograniczanie wartości prądu upływu izolatorów i energii elektrycznych wyładowań powierzchniowych.

W niekorzystnych warunkach eksploatacyjnych, w zależności od intensywności i czasu działania narażeń, silikonowe osłony izolatorów mogą okresowo zmieniać swoje właściwości. Degradacja zewnętrznej powierzchni izolatorów jest procesem energochłonnym i w początkowym okresie eksploatacji związana jest głównie z oddziaływaniem promieniowania UV, ozonu i pola elektrycznego [1]. Istotnym czynnikiem powodującym starzenie izolatorów są wyładowania niezupełne między kroplami wody osadzonymi na powierzchni osłon w czasie opadów deszczu i mgły. Powierzchniowe wyładowania elektryczne dostarczają energii termicznej, która w obecności wilgoci umożliwia rozwój procesów starzeniowych. W zależności od temperatury osiągananej lokalnie przez powierzchnię silikonu mogą występować reakcje hydrolytyczne, sieciowanie, a powyżej 400°C nawet termiczny rozkład powierzchni materiału osłony w wyniku pirolizy wiązań Si-O łańcucha głównego elastomeru [2, 3]. W czasie eksploatacji postępująca degradacja właściwości osłon izolatorów kompozytowych umożliwia zwiększoną akumulację wody na ich powierzchni i w niekorzystnych warunkach pogodowych jest przyczyną wzrostu wartości prądu upływu oraz dalszej intensyfikacji elektrycznych wyładowań powierzchniowych. Zjawiska te mogą doprowadzić do zniszczenia osłony izolatora na skutek erozji wgłębnej osłony rdzenia lub przeskoku.

Przyczyną wzmocnienia lokalnego pola elektrycznego przez kroplę wody jest duża wartość przenikalności elektrycznej wody $\epsilon_w=80$. Najwyższe wartości pola elektrycznego występują na obrzeżu kropli, w miejscu styku faz: stałej, ciekłej i gazowej (tzw. punkt potrójny). Wzmocnienie pola elektrycznego na czole kropli zależy od jej objętości i kąta pod jakim zwilża ona powierzchnię osłony. Pojedyncze krople wody osadzone na osłonie rdzenia izolatora kompozytowego mogą generować wyładowania niezupełne przy średniej wartości natężenia pola elektrycznego wynoszącej 4÷5 kV/cm [4, 5]

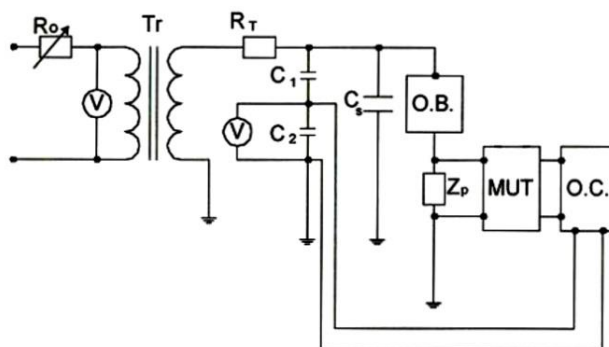
Metodyka badań

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu konfiguracji geometrycznej układu kropli wody, osadzonych na powierzchni płaskich próbek z gumy silikonowej LSR, na napięcie zapłonu wyładowań niezupełnych. Badania wykonano przy wysokim napięciu przemiennym 50 Hz na próbkach z kroplami wody rozmieszczonymi w sposób przedstawiony na rysunku 1 oraz próbce zwilżonej w komorze mgielnej opadającymi kropelkami mgły.



Rys. 1. Wybrane schematy rozmieszczenia kropli wody na powierzchni próbki w przestrzeni międzyelektrodowej w czasie pomiarów napięcia zapłonu wyładowań niezupełnych.

W badaniach zamodelowano przypadek pola elektrycznego równoległego do powierzchni izolacyjnej co odpowiada sytuacji występującej w obszarze pnia izolatora kompozytowego. Dla napięć poniżej 18 kV i nie zwilżonej powierzchni próbki układ probierczy (Rys. 2) nie generował mierzalnych wyładowań niezupełnych.



Rys. 2. Schemat układu do pomiaru napięcia zapłonu wyładowań niezupełnych: R_o - opornik ograniczający, V - woltomierz, Tr - transformator w.n.TP 60, R_T - opornik tłumiący, C_1/C_2 - dzielnik napięcia DUC 110, C_s - kondensator sprzęgający, O.B. - obiekt badany, Z_p - impedancja pomiarowa H18-A, MUT - miernik wyładowań niezupełnych MUT 8, O.C. - oscyloskop cyfrowy.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

Krople wody o konduktywności $200 \mu\text{S}/\text{cm}$ наносzono na powierzchnię próbek za pomocą nastawnej pipety. Zmiennymi parametrami były: liczba, objętość oraz sposób rozmieszczenia kropli wody między elektrodami. Próbki posiadały wymiary $50 \times 46 \times 4$ mm (długość, szerokość, grubość) i były wklejone centralnie, między elektrody iskiernika płaskiego, za pomocą silikonu RTV. W celu zabezpieczenia układu do pomiaru wyładowań niepełnych przed skutkami ewentualnego przeskoaku elektrycznego na mosiężne elektrody o średnicy 54 mm nałożono krążki wytoczone z polimetakrylanu metylu o grubości 10 i 27 mm w sposób przedstawiony na rysunku 3b. Ekwipotencjalizację przestrzeni w miejscu połączenia metalowych elektrod z dielektrycznymi nakładkami zrealizowano poprzez napylenie warstwy grafitu na powierzchnię dielektryku.

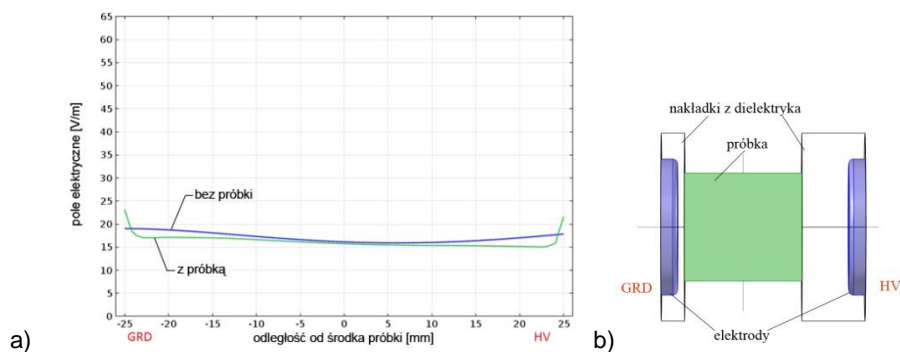
Obliczenia rozkładu pola elektrycznego na powierzchni próbek wykonano metodą elementów skończonych w programie COMSOL MULTIPHYSICS.

Wyniki badań

Na rysunku 3a przedstawiono wykonane w programie symulacyjnym wykresy rozkładu natężenia pola elektrycznego w iskierniku pomiarowym dla dwóch przypadków:

- płaskiej próbki z gumy silikonowej wklejonej centralnie między dielektryczne nakładki,
- bez wklejonej próbki.

Wyliczone komputerowo, dla 1 V różnicy potencjałów elektrod, wartości średniego pola elektrycznego na powierzchni próbki wynosiły 16,89/15,96 V/m (bez próbki / z próbką). Obliczenia średniego pola elektrycznego na całej powierzchni próbki oraz dla linii przechodzącej przez środek próbki wykazały, że płytka z gumy silikonowej obniża średnią wartość pola elektrycznego w iskierniku o około 6%.



Rys. 3. Wpływ umieszczenia próbki na zmianę wartości natężenia pola elektrycznego w przestrzeni międzyelektrodowej (a), schemat badanego obiektu (b).

Uwzględniając wyniki symulacji komputerowej przyjęto, że umieszczenie w przestrzeni międzyelektrodowej płytki z kauczuku silikonowego nie wpływa w sposób istotny na wartość natężenia pola elektrycznego działającego na osadzone na powierzchni próbki krople wody.

Przy takim założeniu natężenie pola elektrycznego na powierzchni próbki E_{wn} można obliczyć jako natężenie pola elektrycznego w jednej z warstw kondensatora płaskiego z izolacją dwuwarstwową [6].

$$(1) \quad E_{wn} = \frac{U_{wn}}{a_2 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} a_1}$$

gdzie: a_1 , ε_1 – grubość i przenikalność elektryczna polimetakrylanu metylu,
 a_2 , ε_2 – grubość i przenikalność elektryczna powietrza.

Wyznaczone eksperymentalnie wartości napięć zapłonu wyładowań niezupełnych U_{wn} pozwoliły na obliczenie wartości średniego natężenia pola elektrycznego E_{wn} , przy którym następował zapłon wyładowań niezupełnych (Tab. 1).

Tabela 1. Napięcie zapłonu wyładowań niezupełnych U_{wn} , odpowiadające mu średnie natężenie pola elektrycznego E_{wn} wyliczone na podstawie wzoru (1) oraz maksymalne wartości pola elektrycznego E_m na obrzeżu kropli dla wybranych konfiguracji geometrycznych kropli w przestrzeni międzyelektrodowej.

Roźmieszczenie kropli	Objętość kropli [μ l]	Ilość kropli	U_{wn} [kV]	E_{wn} [kV/cm]	E_m [kV/cm]
Rys. 1a	50	3	17,0	3,3	14,6
Rys. 1b	50	5	15,7	3,1	17,5
Rys. 1c	100	3	16,4	3,2	16,8
Rys. 1d	100	4	14,7	2,9	17,8
Rys. 1e	20	24	11,6	2,3	14,8
losowe (mgła)	mała	duża	9,5	1,9	-

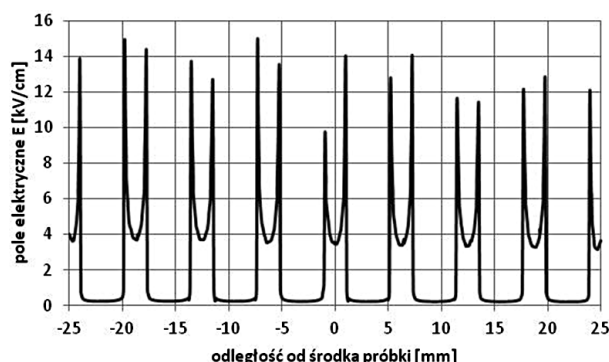
Przedstawione w Tabeli 1 wyniki badań wykazały, że:

- zwiększanie ilości lub objętości kropli osadzanych na powierzchni próbki jest przyczyną zmniejszania się wartości średniego natężenia pola elektrycznego E_{wn} , przy którym następuje zapłon wyładowań niezupełnych
- na obniżenie wartości E_{wn} najsilniejszy wpływ ma zwiększenie ilości kropli osadzonych na próbce,
- w skrajnym przypadku, dla próbki zwilżonej w komorze mgielnej, wartość natężenia pola elektrycznego, przy której następuje zapłon wyładowań niezupełnych kształtuje się na poziomie około 2 kV/cm.

Wykonane symulacje rozkładu pola elektrycznego umożliwiły oszacowanie maksymalnych wartości pola elektrycznego E_m na obrzeżach kropli (Tab. 1). Wyliczona w programie komputerowym średnia wartość maksymalnego pola elektrycznego na obrzeżach kropli, przy którym następuje jonizacja powietrza wynosi 16,3 kV/cm.

Na rysunku 4 przedstawiono wykres rozkładu natężenia pola elektrycznego dla kropli wody osadzonych na powierzchni próbki zgodnie z rys.1e. Wyższe wartości pola elektrycznego występuje w pobliżu elektrody uziemionej. Jest to spowodowane niejednakową grubością dielektrycznych nakładek na elektrodach. Widoczne na rysunku różnice w wartości pola elektrycznego występujące na obrzeżu tej samej kropli można przypisać błędom numerycznym symulacji komputerowej.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016



Rys. 4. Rozkład natężenia pola elektrycznego E dla kropli wody osadzonych na powierzchni próbek zgodnie z konfiguracją przedstawioną na rys. 1e.

Wnioski

Wyniki badań potwierdziły, że zwiększenie akumulacji wody (ilości i objętości kropli wody) na powierzchni silikonowej osłony rdzenia napowietrznych izolatorów kompozytowych jest przyczyną obniżenia wartości średniej natężenia pola elektrycznego, przy której może nastąpić zapłon powierzchniowych wyładowań elektrycznych o charakterze niezupełnym.

Badania wykazały, że w warunkach zwilżenia powierzchni polimeru kroplami mgły istnieje możliwość pojawienia się wyładowań elektrycznych z kropli wody już przy średniej wartości natężenia pola elektrycznego rzędu 2 kV/cm. W warunkach działania mgły lub rosy izolatory kompozytowe mogą zatem być narażone na działanie wyładowań niezupełnych przy średnich natężeniach pola elektrycznego znacząco niższych od określonego w literaturze poziomu 4÷5 kV/cm.

Literatura

1. Mościcka-Grzesiak H. (redaktor pracy zbiorowej), *Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce*, tom I, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, p.: 48-63, 1996.
2. Gustavsson T. G., Gubański S. M., *Aging of silicone rubber under ac or dc voltages in a coastal environment*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 8 No.6, p. 1029-1039, 2001.
3. Yoshimura N., Kumagai S., *Electrical and environmental aging of silicone rubber used in outdoor insulation*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 6 No. 5, p. 632-650; 1999.
4. Phillips A. J., Childs D. J., Schneider H.M., *Aging of non-ceramic insulators due to corona from water drops*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, p. 1081-1086, 1999.
5. Swift D. A., *AC flashover mechanism for water droplets on a hydrophobic insulator*, 8th International Symposium on High Voltage Engineering, Yokohama, Japan, 1993.
6. Juchniewicz J., Lisiecki J., *Wytrzymałość dielektryczna i układy izolacyjne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1976.

Autorzy: dr inż. Witold Bretuj; mgr inż. Adam Pelesz, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektroenergii, Wydział Elektryczny, Politechnika Wrocławska, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: witold.bretuj@pwr.edu.pl adam.pelesz@pwr.edu.pl