



Jacek KIERNICKI

Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej

## Metody badania wytrzymałości elektrycznej izolatorów pokrytych warstwą lodu

**Streszczenie.** Akumulacja lodu na powierzchni izolatorów linii i stacji napowietrznych zmniejsza w znacznym stopniu wytrzymałość elektryczną izolacji. Zagrożenie lodowe izolatorów jest porównywalne z zagrożeniem zabrudzeniowym. Istotną rolę w procesie badania własności elektrycznych oblodzonych izolatorów odgrywają metody badawcze i odpowiednie wyposażenie laboratoriów. W obszarach, gdzie oblodzenia występują często należy stosować specjalne zabiegi ograniczające ilość lodu, która może zgromadzić się na izolatorach.

**Abstract. (Test methods of electrical strength of iced insulators).** Ice and snow accretions are serious problems with power transmission systems. The presence of ice on insulators under certain conditions does produce a dramatic loss of electrical strength leading to insulator flashover. The flashover of the cleaned and iced insulators is approximately equal that the insulators contaminated by salt. The establishment of standard test methods for measuring the flashover voltage of ice-coated insulators seems to be necessary. The insulators reliability in icing conditions can be improved by using some of the special techniques.

**Słowa kluczowe:** warunki klimatyczne, akumulacja lodu, przeskok zupełny, metody pomiaru.

**Keywords:** climatic conditions, ice accumulation, flashover, test methods.

### Wstęp

Akumulacja lodu na przewodach, strukturach nośnych i izolatorach napowietrznych linii i stacji wysokich napięć powoduje zdecydowane pogorszenie poziomu niezawodności sieci elektroenergetycznej i w konsekwencji zmniejszenie pewności zasilania odbiorców.

Wytworzenie pokrywy lodowej na powierzchni izolatorów obniża poważnie własności izolacyjne obiektów elektroenergetycznych i w odpowiednich warunkach atmosferycznych prowadzi nierzadko do wyładowań zupełnych, a tym samym do poważnych zakłóceń w procesie przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. W kwietniu 1988 na skutek przeskoku zupełnego spowodowanego obecnością lodu na izolatorach stacji elektroenergetycznej 735 kV, Arnaud, należącej do kompanii Hydro Québec nastąpiła katastrofa, która pozbawiła energii elektrycznej całą południowo-wschodnią część Kanady [1]. Pogorszenie izolacji linii przesyłowej wywołane nagromadzeniem lodu na izolatorach prowadzić może czasami do konieczności podjęcia decyzji o obniżeniu jej napięcia roboczego. Taki przypadek wystąpił w sieci przesyłowej w Zachodniej Kanadzie, gdzie na skutek oblodzenia izolatorów, dla utrzymania stabilności sieci, obniżono napięcie pracy linii 315 kV do poziomu 230 kV [2].

W normalnych warunkach pracy napięcie sieci przesyłowej nie jest stałe i zmienia się losowo w pewnych granicach w zależności od chwilowego obciążenia i zachodzących zjawisk komutacyjnych. Wartości maksymalne napięć w poziomie maksymalnym mogą przekraczać nawet o 6,5% poziom normalny [3]. W takim przypadku osłabiona pokrywą lodową izolacja może nie wytrzymać przyłożonego napięcia i nastąpi przeskok zupełny.

W Tabeli 1 porównano napięcie maksymalne jakie może wystąpić normalnie w sieci NN HQ z maksymalnym napięciem wytrzymywanym przez izolatory liniowe typu standard IEEE pokryte lodem o grubości 2 cm. Dane w niej zawarte wskazują, że niebezpieczeństwo przeskoku zupełnego staje się zupełnie realne w przypadku izolatorów pokrytych lodem o grubości 2 cm, już dla linii napowietrznych o napięciu rzędowym 315 kV.

Tabela 1. Porównanie maksymalnych wartości napięć występujących normalnie w sieci HQ NN z maksymalną wartością napięcia wytrzymywanego przez izolatory typu *standard IEEE* pokryte warstwą lodu o grubości 2 cm

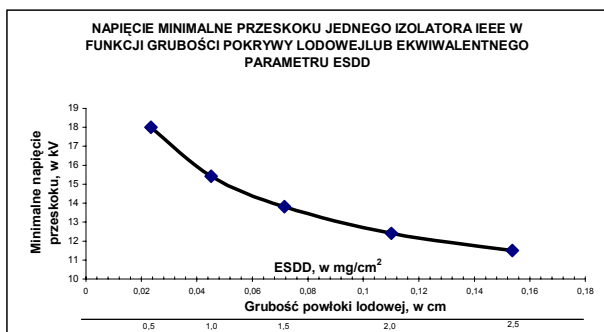
Napięcie rzędowe (między-przewodowe) [kV]	Napięcie maks. (faza - ziemia), przeliczone na 1 m długości ścieżki łuku [kV/m]	Maks. napięcie wytrzymywane izolatorów pokrytych lodem, $\epsilon = 2$ cm, przeliczone na 1 m długości ścieżki łuku [kV/m]
230	77,2	75,2
315	78,9	
735	90,2	

### Porównanie zagrożenia lodowego z zagrożeniem zabrudzeniowym

Degradację własności izolacyjnych wywołaną przez akumulację lodu na powierzchniach izolatorów można porównać w przybliżeniu do degradacji własności izolacyjnych wywołanej efektem zabrudzenia [4]. Wyniki badań laboratoryjnych prowadzonych w laboratorium GRIEA (Research Group on Atmospheric Environment Engineering), Université du Québec w Chicoutimi, Kanada [4] celem ustalenia relacji pomiędzy narażeniem zabrudzeniowym a narażeniem "lodowym" izolatorów pokazują: tabela 2 i rysunek 1.

Tabela 2. Porównanie zagrożenia wywołanego grubością powłoki lodowej z zagrożeniem odpowiadającym parametrowi ESDD

Grubość powłoki lodowej $\epsilon$ , w cm	Parametr ESDD mg/cm <sup>2</sup>	
0,5	0,02	zabrudzenie "stabe"
1,0	0,0	
1,5	0,07	
2,0	0,13	zabrudzenie "średnie"
2,5	0,15	



Rys. 1. Napięcie minimalne przeskoku przeliczone na 1 izolator IEEE w funkcji parametru ESDD lub grubości powłoki lodowej

### Badania laboratoryjne zagrożenia lodowego

Napięcie minimalne przeskoku zupełnego izolatorów pokrytych powłoką lodową zależy od wielu czynników takich jak: zewnętrzne warunki atmosferyczne, struktura i morfologia lodu, kształt, rodzaj, materiał i ustawienie przestrzenne izolatorów. Stwierdzono [5], że zasadnicze znaczenie dla wartości napięcia minimalnego przeskoku ma ilość zgromadzonego lodu, oceniana na podstawie grubości zakumulowanej warstwy powłoki lodowej, rodzaj lodu, jednorodność powłoki lodowej i konduktywność wody, z której w procesie termodynamicznym został wytworzony lód.

Wpływ tych parametrów na wartość minimalnego napięcia przeskoku sprawdzany jest zwykle w warunkach laboratoryjnych, które powinny zapewnić precyzyjne ustalenie wszelkich parametrów mających istotny wpływ na wynik badań, a przede wszystkim zapewnić powtarzalność wykonywanych testów.

Podstawowym czynnikiem decydującym o wiarygodności i rzetelności badań jest wybór właściwych warunków i rygorów eksperymentu. Niestety, do dnia dzisiejszego nie dopracowano jeszcze standardowej metody badawczej własności elektrycznych oblodzonych izolatorów, która stosowana przez badaczy z różnych krajów pozwalała by na bezpośrednie porównanie i ocenę uzyskanych rezultatów [6]. W tej sytuacji do badania izolatorów pokrytych lodem stosuje się na ogół zmodyfikowane metody stosowane zwykle do badania izolatorów zabrudzonych. Badania wytrzymałości elektrycznej izolatorów pokrytych lodem mogą być prowadzone w warunkach naturalnych lub w laboratorium. W warunkach naturalnych obserwuje się zjawiska meteorologiczne towarzyszące formowaniu się lodu na izolatorach czynnych linii i stacji przy jednoczesnym monitorowaniu zachodzących zjawisk elektrycznych występujących podczas akumulacji lodu i po jej zakończeniu. Badania laboratoryjne są bardziej wygodne i dokładne. W laboratorium można symulować zjawiska atmosferyczne prowadzące do oblodzenia izolatorów, a następnie badać w miarę precyzyjnie wartości napięcia przeskoku. W chwili obecnej badania laboratoryjne stanowią podstawowe narzędzie badawcze dla pełnego poznania tak wpływu czynników atmosferycznych na rodzaj akumulowanego lodu jak i samego mechanizmu przeskoku zupełnego w warunkach oblodzenia.

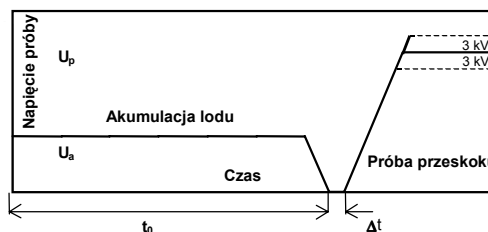
Badanie laboratoryjne składa się zwykle z dwóch odrębnych czynności: akumulacji lodu na umieszczonym w komorze klimatycznej izolatorze i próbie wytrzymałości elektrycznej oblodzonego izolatora. Formowanie powłoki lodowej może odbywać się w stanie beznapięciowym lub, co jest bardziej zbliżone do warunków rzeczywistych, pod napięciem. W przypadku akumulacji pod napięciem gromadzenie się lodu na powierzchni izolatora jest w dużej mierze

uzależnione od zjawisk elektrycznych, dość znaczny prąd upływu i wyładowania ulotu mogą powodować silne topienie lodu, a w skrajnym przypadku nawet całkowity jego upadek. Uzyskanie powłoki lodowej o wymaganej grubości i jednorodności jest wtedy bardzo utrudnione. Pożądany rodzaj lodu, lód mokry, lód suchy czy śnieg uzyskuje się przez odpowiednią kombinację temperatury, prędkości generowanego wiatru i objętości przechłodzonych kropelek wody.

### Zalecane metody prób wytrzymałości elektrycznej izolatorów pokrytych lodem

Próby wytrzymałości elektrycznej oblodzonych izolatorów przeprowadzane są zwykle według jednej z dwóch metod. W metodzie pierwszej podaje się napięcie probiercze o stałej wartości i zwiększa się w czasie eksperymentu ilość akumulowanego lodu aż do pojawienia się przeskoku zupełnego. W metodzie drugiej stosuje się dwa poziomy napięć, napięcie towarzyszące akumulacji, relatywnie niskie i znacznie wyższe napięcie probiercze do badania wytrzymałości elektrycznej, w metodzie tej ilość akumulowanego lodu jest stała.

Badanie wytrzymałości elektrycznej wykonuje się według metody zalecanej normą IEC 507 (PN-IEC 507) dla izolatorów sztucznie zabrudzonych, adaptowanej dla izolatorów oblodzonych. Przebieg badania jest następujący: po zakończeniu okresu akumulacji lodu i po krótkiej trwającej około 3 minut przerwie na czynności pomocnicze podaje się napięcie probiercze, które narasta z prędkością 3,9 kV/s do ustalonej wcześniej wartości napięcia próby. Jeśli podczas 30 minut od chwili podania napięcia próby nie pojawi się przeskok zupełny to uważa się, że wytrzymałość elektryczna izolatora nie została naruszona. Próbę napięciową powtarza się aż do uzyskania trzykrotnie (na 4 próby), na danym poziomie napięcia, wyniku wskazującego na zachowaną wytrzymałość elektryczną. Rysunek 2 przedstawia schematycznie proces badania wytrzymałości elektrycznej izolatora pokrytego powłoką lodową.



Rys. 2. Zasada badania napięcia przeskoku izolatora pokrytego lodem,  $U_a$  - napięcie podczas akumulacji lodu,  $U_p$  - napięcie próby,  $t_0$  - czas akumulacji,  $\Delta t$  - czas przerwy.

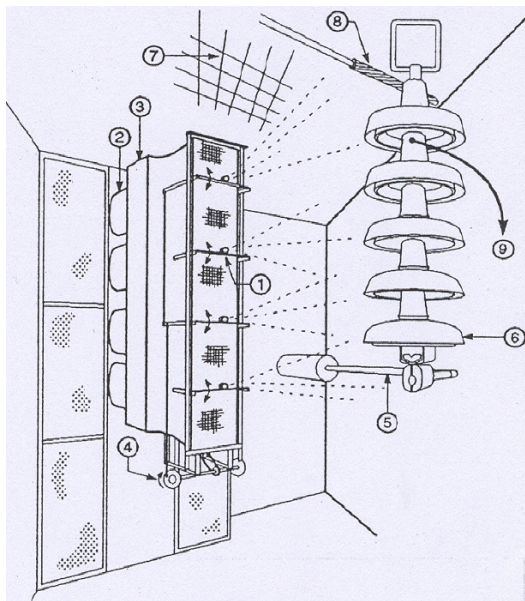
Laboratorium przystosowane do badań wpływu oblodzenia na wartość napięcia przeskoku izolatorów musi posiadać urządzenia do formowania lodu w różnych warunkach atmosferycznych oraz układ probierczy WN do przeprowadzania prób napięciowych [6,7]. Wyposażenie laboratoryjne zależy w dużym stopniu od sposobu przeprowadzania testów i od będących w dyspozycji zasobów finansowych. W dostępnych publikacjach można znaleźć opisy komór klimatycznych, w których utrzymuje się jedynie niską temperaturę, a badany izolator pokrywany jest lodem naturalnym dostarczonym z zewnątrz, lub też komora służy do formowania lodu, ale próba napięciowa wykonywana jest poza nią. Optymalnym, ale drogim rozwiązaniem jest połączenie w jednym pomieszczeniu obu czynności: wytwarzania lodu i próby napięciowej.

Podstawowym urządzeniem takiego laboratorium jest odpowiednio obszerna komora klimatyczna zdolna pomieścić badane izolatory (łańcuchy izolatorów kołpakowych, izolatory długopniowe lub izolatory

wsporcze). Komora klimatyczna, która pozwala na symulowanie warunków atmosferycznych podobnych do tych jakie występują w naturze wyposażona jest zwykle w:

- układ chłodzący o zakresie temperatur od 0°C do 20°C, zapewnia jednolity rozkład temperatury w całej objętości komory,
- układ do formowania kropelek wody o średnicy od kilkudziesięciu mikrometrów do kilku milimetrów sprzężony z zespołem wentylatorów wytwarzających labilny, jednolity strumień powietrza o regulowanej wydajności, niezbędny do transportu kropelek wody od wtryskiwaczy na powierzchnię izolatora,
- układ probierczy do przeprowadzania testów napięciowych składający się z transformatora jednofazowego o górnym napięciu powyżej 100 kV, mocy rzędu 200 kVA i napięciu zwarcia nie przekraczającym 5%, regulatora napięcia o dużym zakresie regulacji oraz systemu akwizycji i przetwarzania danych; szybkie zabezpieczenie zwarcie chroni układ probierczy od skutków przetężeń w przypadku zaistnienia przeskoku zupełnego.

Na rysunku 3 przedstawiono wyposażenie komory klimatycznej stosowanej do początku roku 2000 w kierowanym przez profesora Masouda Farzaneha laboratorium GRIEA w Université du Québec w Chicoutimi. Komora ta posiadała wszystkie niezbędne urządzenia gwarantujące rzetelność i wiarygodność wykonywanych prób.



Rys. 3. Schemat komory klimatycznej (GRIEA) przeznaczonej do badań wytrzymałości elektrycznej izolatorów pokrytych lodem [6]:

1. dysze wtryskiwaczy wody (formowanie kropelek),
2. zespół wentylatorów
3. komora wyrównująca strumień powietrza,
4. system napędowy wtryskiwaczy,
5. instalacja WN,
6. łańcuch badanych izolatorów,
7. sufit dyfuzyjny zapewniający jednolity rozkład temperatury w pomieszczeniu,
8. miernik grubości pokrywy lodowej,
9. odczyt do systemu akwizycji danych.

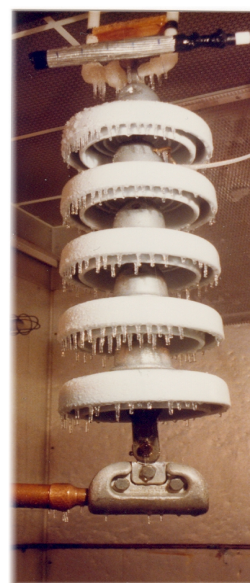
Na zamieszczonych zdjęciach przedstawiono wnętrze nowoczesnej komory klimatycznej do badań wytrzymałości elektrycznej oblodzonych izolatorów (rys. 4) i wygląd łańcuchów izolatorów pokrytych lodem przygotowanych do wykonania próby napięciowej (rys. 5 i rys. 6). Rysunek 7 pokazuje propagację łuku elektrycznego wewnątrz pokrywającej izolator powłoki lodowej.



Rys. 4. Wnętrze nowoczesnej komory klimatycznej w laboratorium CIGELE (Industrial Chair on Atmospheric Icing on Power Network Equipment – Univ. du Québec, Chicoutimi, Kanada) do badania napięcia przeskoku izolatorów pokrytych lodem



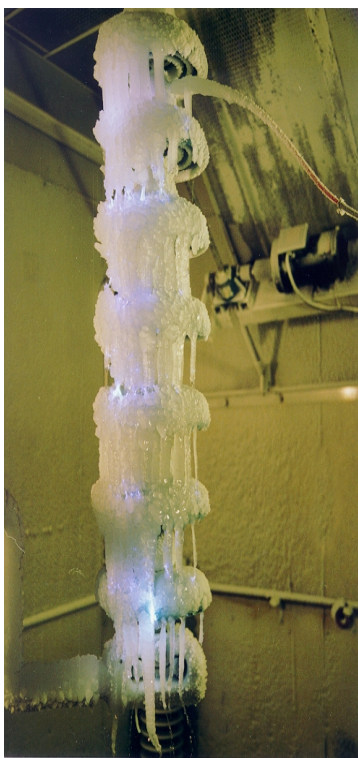
Rysunek 5. Łańcuch izolatorów standardowych IEEE pokryty warstwą lodu "mokrego" o grubości 2 cm (zdjęcie wykonane przez autora w laboratorium GRIEA)



Rys. 6. Łańcuch izolatorów przeciwmgielnych pokrytych lodem o grubości 0,5 cm, w górnej części widać wskaźnik grubości lodu (zdjęcie wykonane przez autora w laboratorium GRIEA)

### Sposoby zmniejszania zagrożenia lodowego

Szczególną uwagę na zagrożenie spowodowane oblodzeniem izolatorów linii i stacji należy zwracać w tych obszarach gdzie występują duże opady śniegu, marznącej mżawki czy też w pobliżu dużych zbiorników wody, które w niskich temperaturach są źródłem gęstych mgieł osadzających się w postaci szronu na zimnych powierzchniach. W takich miejscach należy stosować różnego rodzaju zabiegi pozwalające na zwiększenie niezawodności pracy osłabionych lodem układów izolacyjnych [7]. Znaczne zwiększenie niezawodności pracy uzyskuje się przez stosowanie w sieciach NN izolatorów w układzie V, układ taki zapobiega mostkowaniu przez lód odstępów izolacyjnych pomiędzy kłozami, a tym samym nie dopuszcza redukcji długości ścieżki upływu. W przypadku układów jednorzędowych pionowych można uniknąć mostkowania przez lód stosując izolatory o wyraźnie zróżnicowanych średnicach kłozy. Dobre efekty uzyskuje się również dzięki pokrywaniu izolatorów lakierami półprzewodzącymi, przepływający po powierzchni prąd upływowi o natężeniu  $\sim 1$  mA zapobiega nadmiernej akumulacji lodu i zmniejsza ryzyko przeskoku zupełnego [7]. Dla ochrony izolatorów przed wtórną akumulacją lodu pochodzącą z topienia śniegu lub lodu zgromadzonych na górnych okucjach stosuje się czasami specjalne daszki osłonowe. Korzystne jest też zmniejszanie w miarę możliwości liczby punktów izolacyjnych równoległych. Stosowanie pierścieni ochronnych dla długich łańcuchów izolatorów pokrytych lodem ogranicza naprężenia elektryczne i zwiększa znacząco ich wytrzymałość. W skrajnych przypadkach stosuje się czasami obniżenie napięcia pracy linii, której izolacja została osłabiona na skutek oblodzenia [2, 7].



Rys. 7. Propagacja łuku na oblodzonym łańcuchu izolatorów standardowych IEEE (zdjęcie wykonane przez autora w laboratorium GRIEA)

### Wnioski

Wyniki prac laboratoryjnych wskazują, że częściowa utrata własności izolacyjnych przez układy izolatorów pokrytych lodem może w pewnych przypadkach doprowadzić do wyładowań zupełnych przy roboczym napięciu linii i stacji, szczególne zagrożenie pojawia się podczas wszelkiego rodzaju przepięć awaryjnych i łączeniowych

Efekt akumulacji lodu na powierzchniach izolatorów można porównać z efektem zabrudzenia. Stwierdzono, że pokrywa lodowa o grubości równej w przybliżeniu  $2,5$  cm wywołuje taki sam efekt jak zabrudzenie równe  $0,1$  mg/cm<sup>2</sup> ESDD [6].

Bardzo istotnym problemem w studiach nad wytrzymałością elektryczną oblodzonych izolatorów jest ustalenie standardowej, obowiązującej we wszystkich ośrodkach badawczych, metody badawczej. Metoda dwustopniowa opracowana w laboratorium GRIEA wydaje się odpowiadać potrzebom.

Stosowanie w przyszłości standardowej metody badawczej wymagać będzie odpowiedniego wyposażenia laboratoriów w urządzenia do symulacji warunków atmosferycznych i w wysokonapięciowe układy probiercze.

Zagrożenie lodowe w strefach charakteryzujących się zjawiskami sprzyjającymi akumulacji lodu można zmniejszyć dzięki odpowiedniej dyspozycji układów izolacyjnych, dzięki odpowiedniej konstrukcji izolatorów, przez stosowanie pokryć z lakierów półprzewodzących, jak również, w skrajnych przypadkach, przez obniżanie napięć roboczych oblodzonych elementów sieci elektroenergetycznej.

*Dziękuję serdecznie Panu Profesorowi Masud'owi Farzaneh'owi organizatorowi i kierownikowi laboratorium CIGELE (dawniej GRIEA) w Université du Québec w Chicoutimi za pomoc naukową podczas wykonywania prac badawczych, które stanowiły podstawę do napisania powyższego artykułu.*

### LITERATURA

- [1] Hydro-Québec, Analysis of the Hydra-Québec System Blackout on April 1988, Rapport Officiel d'Hydro-Québec, Montréal, lipiec 1988
- [2] Khalifa M.M, Moris R.M, Performance of Line Insulators Under Rime Ice, IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-86, nr 6, 1966, 692 - 698
- [3] Kawai M., AC Flashover Test at Project UHV on Ice Coated Insulators, IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-89, nr 8, 1970, 1800 - 1804
- [4] Farzaneh M., Kiernicki J., Chaarani R., Drapeau J.-F., Martin R., Influence of Wet-Grown Ice on the Flashover Performance of Ice-Covered Insulators, 9<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, Austria, Article nr 3176, 1995, 1 - 4
- [5] Kiernicki J., Chrzan K.L., Oblodzenie izolatorów napowietrznych, NIWE'2003, Energetyka, Zeszyt Tematyczny I/2003, 68 - 72
- [6] Farzaneh M., Kiernicki J., Flashover Problems Caused by Ice Build-up on Insulators, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, nr 2, 1995, 5 - 17
- [7] Task force 33.04.09, Influence of Ice and Snow on the Flashover Performance of Outdoor Insulators, Part I, Effects of Ice, Electra, nr 187, 1999, 90 - 111

**Autor:** dr inż. Jacek Kiernicki, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej (w latach 1989 - 1996 prof. nzw. Université du Québec), E-mail: [jkiernik@wp.pl](mailto:jkiernik@wp.pl)