

Zachowanie się układu hybrydowego izolatorów kompozytowego i ceramicznego w warunkach eksploatacyjnych

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki rozkładów napięcia na połączonych w łańcuch izolatorach: kompozytowym na 110 kV i pojedynczym izolatorze kółkowym pokrytym warstwą silikonu RTV. Zasyulowano zmianę właściwości powierzchniowych izolatorów w czasie eksploatacji. Stwierdzono, że dołączenie do izolatora kompozytowego niewielkiego izolatora ceramicznego, powleczonego silikonem RTV, w istotny sposób łagodzi występującą na izolatorze kompozytowym nierównomierność rozkładu napięcia.

Abstract. The article presents the results of voltage distribution at the coupled insulators: composite 110 kV and single-insulator cup and pin covered with a layer of silicone RTV. During experiment changing the surface properties of insulators was simulated. It was found that the presence of small ceramic insulator coated with RTV silicone greatly reduced unequal voltage distribution on the composite insulator. (The behavior of the composite and ceramic insulators hybrid arrangement in operating conditions).

Słowa kluczowe: izolatory liniowe, układ hybrydowy izolatorów, właściwości powierzchniowe, rozkład napięcia

Keywords: overhead insulator, hybrid arrangement of insulators, surface properties, voltage distribution.

Wstęp

Lokalizacja wielkich elektrowni w pobliżu źródeł surowców niezbędnych do zasilania generatorów: kopalni lub wody, sprawiła, że koniecznością stał się przesył wytworzonej energii elektrycznej do odległych odbiorców. Zapewnienie niezawodności dostaw energii elektrycznej wymaga zachowania przez izolatory zastosowane do konstrukcji linii energetycznych odpowiednich odstępów mechanicznych i elektrycznych między przewodami linii, konstrukcją nośną oraz obiektami na powierzchni ziemi w całym okresie eksploatacji. Oprócz występujących w sposób ciągły narażeń związanych z napięciem roboczym, izolacja linii poddana jest działaniu licznych, zmiennych w czasie czynników środowiskowych takich jak: promieniowanie słoneczne, temperatura, wilgotność powietrza, atmosferyczne opady wody, wiatry, osadzanie się na powierzchni izolatora naturalnych i przemysłowych zabrudzeń.

Właściwości eksploatacyjne liniowych izolatorów wynikają z cech użytych materiałów, koncepcji ich budowy, technologii produkcji i narażeń związanych z warunkami pracy.

Tradycyjnie stosowanymi do konstrukcji izolatorów i sprawdzonymi przez ponad 100 lat eksploatacji materiałami są porcelana i szkło. Ich zaletami są: trwałość, dobre właściwości mechaniczne, duża odporność na działanie czynników środowiskowych i wyładowań powierzchniowych. Do wad można zaliczyć kruchość i wysoką wartość swobodnej energii powierzchniowej. Ze względu na dużą wartość swobodnej energii powierzchniowej izolatory te łatwo pokrywają się warstwą obecnych w powietrzu zabrudzeń stałych a osadzona na nich woda rozlewa się tworząc warstwę filmu wodnego. Konsekwencją przyjmowania zabrudzeń i zwilżalności powierzchni są duże wartości prądu upływu i zagrożenie wystąpienia na tych izolatorach przeskoku zabrudzeniowego.

Długotrwałe zwiększenie wytrzymałości zabrudzeniowej, nawet już zainstalowanych izolatorów porcelanowych, może zostać osiągnięte poprzez ich pokrycie warstwą silikonu RTV [1-4]. Zaletą takiego rozwiązania jest również zmniejszenie kosztów eksploatacji spowodowanych koniecznością okresowego czyszczenia i powlekania powierzchni izolatorów hydrofobowymi pastami i smarami [5].

Izolatory z materiałów nieceramicznych stosowane do izolacji napowietrznych linii przesyłowych i rozdzielczych reprezentowane są przez izolatory kompozytowe. Elementem przenoszącym naprężenia mechaniczne w tych

izolatorach jest pręt szklano-epoksydowy z zaciśniętymi na nim okuciami. Ochronę od narażeń środowiska zewnętrznego i odpowiednio długą drogę upływu zapewnia osłona z gumy silikonowej HTV lub LSR.

Ze względu na niską wartość swobodnej energii powierzchniowej nowe izolatory kompozytowe charakteryzują się silną hydrofobowością powierzchni. Unikatową właściwością elastomerów silikonowych jest zdolność do hydrofobizacji zabrudzeń i samoczynnej regeneracji dobrych właściwości powierzchniowych w przypadku ich czasowej utraty w wyniku działania niekorzystnych czynników środowiskowych. W efekcie izolatory kompozytowe posiadają dużą odporność na zabrudzenia. Ich zastosowanie w rejonach o dużej koncentracji zabrudzeń umożliwia poprawienie niezawodności dostaw energii elektrycznej [6-10]. Zaletami izolatorów kompozytowych są również mały ciężar oraz konkurencyjna cena. Podstawową wadą jest natomiast niższa, w porównaniu z izolatorami wykonanymi z materiałów tradycyjnych a charakterystyczna dla tworzyw sztucznych, odporność starzeniowa [11, 12].

Rozkład napięcia wzdłuż suchych, nie modyfikowanych powierzchniowo, długopniowych izolatorów wynika z rozkładu pojemności elementów izolatora i charakteryzuje się silną nierównomiernością [13-16]. Nieliniowość rozkładu napięcia zwiększa się ze wzrostem napięcia znamionowego oraz długości izolatorów, i jest jednym z czynników przyczyniających się do nierównomiernej degradacji właściwości polimerowej osłony [17].

W położonych w pobliżu przewodu wysokiego napięcia obszarach izolatorów kompozytowych na napięcie 500 kV natężenie pola elektrycznego może osiągać wartości około 5 kV/cm [18]. Nie stwarza to zagrożenia pojawienia się wyładowań niepełnych, ponieważ w warunkach normalnych, do jonizacji powietrza przy powierzchni suchego izolatora, potrzeba natężenia pola elektrycznego wynoszącego około 18 kV/cm. W przypadku pojawienia się na powierzchni izolatorów kropel wody może jednak dojść do zapłonu wyładowań niepełnych generowanych przez krople wody, które wzmacniają lokalnie pole elektryczne. Wyładowania niepełne stanowią groźne narażenie starzeniowe prowadzące do degradacji właściwości powierzchniowych materiału osłony. Synergiczne oddziaływanie powierzchniowych wyładowań elektrycznych o charakterze niepełnym i wilgoci łączy oddziaływanie elektro-chemiczno-termiczne [16]. Ich skutkiem może być degradacja właściwości powierzchniowych izolatora: utrata

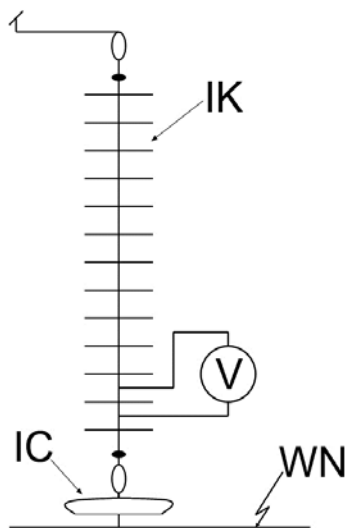
hydrofobowości, erozja powierzchni i zmiany chemiczne w przypowierzchniowej warstwie osłony. Ze względu na silną nieliniowość rozkładu napięcia i pola elektrycznego wzdłuż izolatorów na pogorszenie swoich właściwości powierzchniowych najbardziej narażone są te obszary izolatorów kompozytowych, które znajdują się w pobliżu przewodów wysokiego napięcia.

Na czas bezawaryjnej pracy izolatora zasadniczy wpływ ma rodzaj i poziom narażeń eksploatacyjnych oraz odporność izolatora na występujące narażenia. Koncepcja poprawy właściwości eksploatacyjnych i zwiększenia odporności starzeniowej produkowanych aktualnie izolatorów kompozytowych czwartej generacji opiera się głównie na zastosowaniu nowych, bardziej odpornych materiałów oraz doskonalszych technologii. Do poprawy warunków pracy izolatorów kompozytowych, poprzez obniżenie poziomu narażenia, stosowana jest specjalna armatura (pierścienie sterujące) do wyrównania rozkładu napięcia.

Zmniejszenie poziomu narażenia napięciem roboczym na izolatorze kompozytowym można również osiągnąć stosując, przedstawione w artykule, rozwiązanie polegające na utworzeniu hybrydowego łańcucha złożonego z izolatora kompozytowego i niewielkiego, izolatora ceramicznego umieszczonego przy przewodzie wysokiego napięcia, w nierzadkim obszarze największego natężenia pola elektrycznego.

Metodyka pomiarów

Przedstawione wyniki dotyczą rozkładu napięcia, w symulowanych warunkach eksploatacyjnych, na łańcuchu izolatorów przedstawionym schematycznie na rysunku 1. Łańcuch składał się z izolatora kompozytowego na 110 kV typu CS120 i pojedynczego izolatora kołpakowego typu EE80156. Izolator kompozytowy posiadał 13 sekcji klosze (klosze: duży, mały). Izolator kołpakowy pomalowano elektroizolacyjnym kauczukiem silikonowym RTV Polastosil M-2000 i umieszczono przy przewodzie wysokiego napięcia.



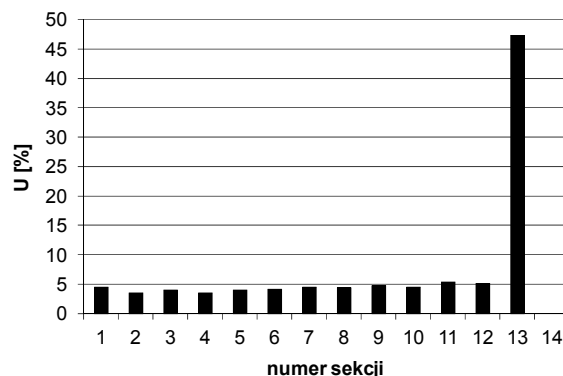
Rys.1. Schemat badanego układu izolatorów: IK – izolator kompozytowy 110 kV, IC – izolator ceramiczny, powlekany silikonem RTV, V – woltomierz elektrostatyczny typ C96, WN – napięcie probiercze 30 kV

Poziom napięcia probierczego 30 kV dobrano tak, żeby w układzie nie rozwijały się słyszalne wyładowania ulotowe. Do pomiaru spadków napięcia na elementach łańcucha użyto, zasilanego z baterii, woltomierza elektrostatycznego typu C96. Zmianę właściwości hydrofobowych izolatorów

uzyskiwano w wyniku ich czasowego zanurzenia w kąpeli wodnej. Do zwilżania powierzchni izolatorów w czasie pomiarów użyto ręcznego zraszacza z wodą wodociągową o konduktywności 650 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Hydrofobowość powierzchni izolatorów oceniano metodą STRI [19].

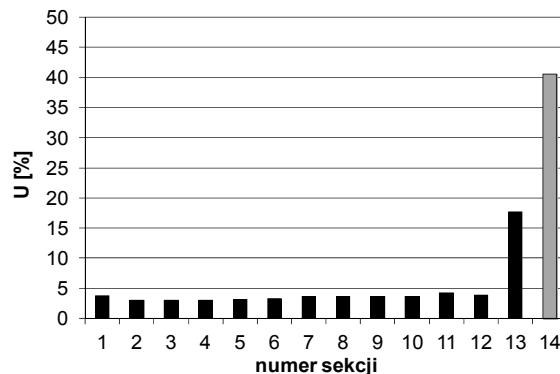
Wyniki

Na rysunku 2 przedstawiono referencyjny rozkład napięcia, który wyznaczono po zwarciu, oznaczonego nr 14, izolatora ceramicznego i połączeniu w ten sposób okucia izolatora kompozytowego z napięciem probierczym. Spadek napięcia zmierzony na sekcji nr 13 czystego i suchego izolatora kompozytowego wynosił około 47% napięcia probierczego.



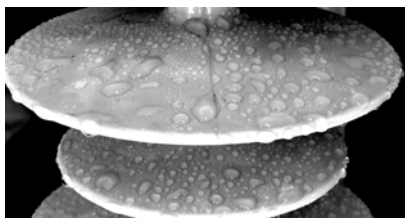
Rys.2. Spadki napięcia wzdłuż izolatora: kompozytowego: powierzchnia izolatora czysta i sucha, sekcja 14 – zwarty izolator ceramiczny

Po usunięciu zwory z izolatora ceramicznego i wyznaczeniu rozkładu napięcia na łańcuchu czystych, suchych izolatorów stwierdzono istotne zmniejszenie wartości spadku napięcia na sekcji nr 13 izolatora kompozytowego. Maksymalny spadek napięcia w najbardziej naprężonym obszarze izolatora kompozytowego zmniejszył się z 47% do około 18% napięcia probierczego. Spadek napięcia zmierzony na izolatorze ceramicznym wynosił około 41% napięcia probierczego (rys. 3).



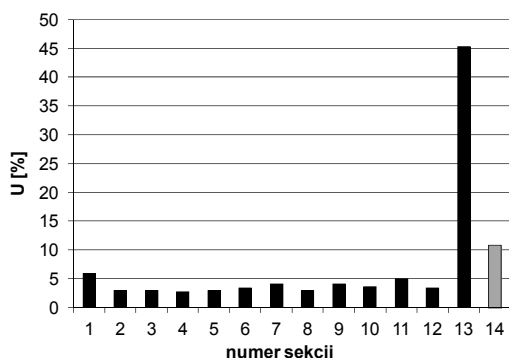
Rys.3. Spadki napięcia wzdłuż łańcucha izolatorów kompozytowego i ceramicznego: powierzchnia izolatorów czysta i sucha, sekcja 14 - izolator ceramiczny

W celu zamodelowania w laboratorium warunków zabrudzeniowych dokonano natrysku wody na powierzchnię izolatorów. Właściwości powierzchniowe izolatora kompozytowego zaklasyfikowano do klasy hydrofobowości HC2 (rys.4). Na powierzchni nie modyfikowanego izolatora ceramicznego utworzył się ciągły film wodny, któremu odpowiada klasa hydrofobowości HC7.



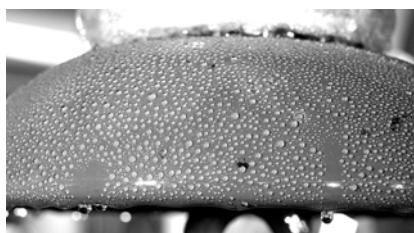
Rys.4. Wygląd kropli wody osadzonych na powierzchni nowego izolatora kompozytowego; klasa hydrofobowości HC2

Opisanej powyżej sytuacji odpowiadają spadki napięcia przedstawione na rysunku 5. Utworzenie się na powierzchni izolatora ceramicznego warstwy filmu wodnego spowodowało przekazanie wysokiego potencjału na izolator kompozytowy. W tym przypadku zastosowanie izolatora ceramicznego praktycznie nie wpłynęło na obniżenie poziomu narażeń na izolatorze kompozytowym.



Rys.5. Spadki napięcia wzdłuż łańcucha zwilżonych izolatorów: sekcje 1÷13 - izolator kompozytowy, klasa hydrofobowości HC2; sekcja 14 - hydrofilny izolator ceramiczny, klasa hydrofobowości HC7

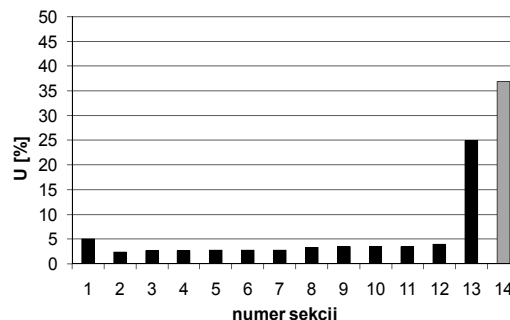
Poprawa zachowania się izolatora ceramicznego w badanym łańcuchu izolatorów wymagała modyfikacji jego właściwości powierzchniowych w celu zapewnienia wysokiej i bardziej niezależnej od warunków środowiskowych rezystancji jego powierzchni. Po odfuszczeniu i pomalowaniu powierzchni izolatora elektroizolacyjnym silikonem RTV klasę hydrofobowości zmodyfikowanej w ten sposób powierzchni oceniono na HC1 (rys.6).



Rys.6. Wygląd kropli wody osadzonych na powierzchni izolatora ceramicznego po naniesieniu powłoki z silikonu RTV; klasa hydrofobowości HC1

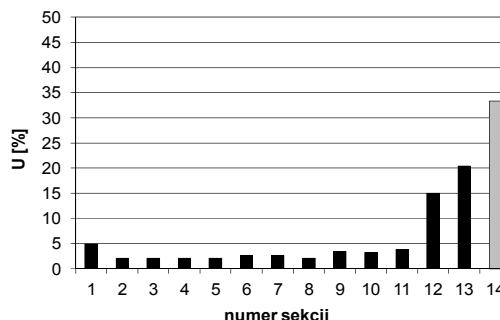
Na rysunku 7 przedstawiono spadki napięcia, które zmierzono na zwilżonych, ale posiadających dobre właściwości hydrofobowe izolatorach badanego łańcucha. Maksymalny spadek napięcia zarejestrowany na sekcji nr 13 izolatora kompozytowego stanowił 25% napięcia probierczego. Przy właściwościach powierzchniowych izolatorów kompozytowego i ceramicznego odpowiadających odpowiednio klasom hydrofobowości

HC2, HC1 dołączenie izolatora ceramicznego spowodowało około dwukrotne zmniejszenie spadku napięcia na najbardziej naprężanej sekcji izolatora kompozytowego.



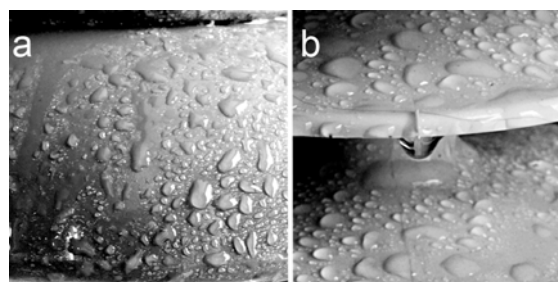
Rys.7. Spadki napięcia wzdłuż łańcucha zwilżonych izolatorów: sekcje 1÷13 - izolator kompozytowy, klasa hydrofobowości HC2; sekcja 14 - izolator ceramiczny powleczony silikonem RTV, klasa hydrofobowości HC1

Zbadanie wpływu hydrofobowości powierzchni izolatorów na rozkład spadku napięcia w łańcuchu wymagało degradacji ich właściwości. Po dobie zanurzenia w wodzie izolator kompozytowy i zmodyfikowany powierzchniowo izolator ceramiczny posiadały klasy hydrofobowości odpowiednio HC3, HC2. Wyniki rozkładu napięcia na złożonym z nich łańcuchu przedstawiono na rysunku 8. Największy spadek napięcia zmierzono na izolatorze ceramicznym (około 33% napięcia probierczego). Stwierdzono zwiększenie się spadku napięcia na sekcji numer 12 izolatora kompozytowego.



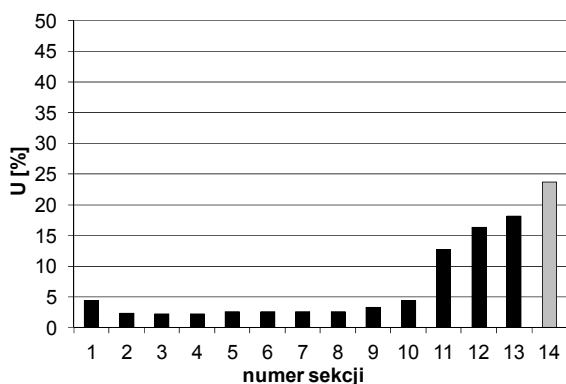
Rys.8. Spadki napięcia wzdłuż badanego łańcucha zwilżonych izolatorów: sekcje 1÷13 - izolator kompozytowy, klasa hydrofobowości HC3; sekcja 14 - izolator ceramiczny powleczony silikonem RTV, klasa hydrofobowości HC2

Druga doba degradacji właściwości powierzchniowych izolatorów spowodowała pojawienie się na nich oprócz odseparowanych kropli również niewielkich obszarów zwilżonych (rys.9). Hydrofobowość powierzchni obydwu izolatorów zaliczono do klasy HC4.



Rys.9. Wygląd kropli wody osadzonych na powierzchni: a) izolatora ceramicznego, klasa hydrofobowości HC4 b) izolatora kompozytowego, klasa hydrofobowości HC4

Oslabienie właściwości hydrofobowych łańcucha izolatorów i pojawienie się na ich powierzchni zwilżonych obszarów spowodowało, że ponad dwukrotnie wzrósł spadek napięcia na kolejnej, oznaczonej numerem 11, sekcji izolatora kompozytowego. Rozkład napięcia na łańcuchu izolatorów zaczął nabierać cech rozkładu pojemnościowo-rezystancyjnego (rys.10).



Rys.10. Spadki napięcia wzdłuż łańcucha zwilżonych izolatorów: sekcje 1-13 - izolator kompozytowy, klasa hydrofobowości HC4; sekcja 14 – izolator ceramiczny powleczony silikonem RTV, klasa hydrofobowości HC4

Podsumowanie

Wykonane badania rozkładu napięcia na hybrydowym łańcuchu izolatorów: kompozytowego i ceramicznego, wykazały, że niewielki izolator ceramiczny, umieszczony w pobliżu przewodu wysokiego napięcia powoduje znaczące obniżenie poziomu napięcia na skrajnej sekcji izolatora kompozytowego i poprawę warunków jego eksploatacji.

Aby izolator ceramiczny mógł pełnić funkcję ochronną względem izolatora kompozytowego w warunkach zabrudzeniowych konieczna jest modyfikacja jego powierzchni, np. przez zastosowanie powłoki z silikonu RTV.

W opisanym, hybrydowym układzie izolatorów główny odstęp izolacyjny w powietrzu, zdeterminowany znamionowym napięciem roboczym, zapewnia odpowiednio długi, ale mimo to lekki izolator kompozytowy. W obszarze silnego pola elektrycznego przy przewodzie wysokiego napięcia umieszczono niewielki, zmodyfikowany powierzchniowo izolator ceramiczny, który posiada większą odporność starzeniową od izolatora kompozytowego, a dzięki silikonowej powłoce, charakteryzuje się dobrymi właściwościami w warunkach zabrudzeniowych.

Wysoka i dosyć stabilna wartość rezystancji powierzchni izolatora kompozytowego wpływa w warunkach eksploatacyjnych na ograniczenie wartości prądu upływu i energii wyładowań niepełnych do poziomu akceptowalnego nawet dla izolacji polimerowej. Jednak długotrwałe działanie narażeń: wysokiego napięcia i wilgoci na powierzchnię izolatora kompozytowego może doprowadzić do starzeniowej, głębokiej erozji osłony pręta nośnego i zerwania się izolatora. W przypadku powleczonego warstwą silikonu RTV izolatora ceramicznego, uszkodzenie tej warstwy na skutek działania powierzchniowych wyładowań niepełnych zerwaniem izolatora nie grozi. Zaletą jest również stosunkowo prosta technologia wykonania lub ewentualnej naprawy powłoki z silikonu RTV.

Autorzy: dr inż. Witold Bretuj, Politechnika Wroclawska, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: witold.bretuj@pwr.edu.pl; dr inż. Krzysztof Wieczorek, Politechnika Wroclawska, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: krzysztof.wieczorek@pwr.edu.pl

LITERATURA

- [1] Carberry R. E., Schneider H. M., Evaluation of RTV coating for station insulators subjected to coastal contamination, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4 (1989), n.1, 577-585
- [2] Gorur R. S., Cherney E., de Tourreil C., Dumora D., Harmon R., Hervig H., Kingsbury B., Kise J., Orbeck T., Tanaka K., Tay R., Toskey G., Wiitanen D., Protective coatings for improving contamination performance of outdoor high voltage ceramic insulators, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10 (1995), n.2, 924-933,
- [3] Kim S.H., Hackam R., Evaluation of RTV coating with stationary fog, *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, (1995), 400 - 403
- [4] Zhidong J., Zhicheng G., Haifeng G., Flashover mechanism of RTV coated insulators, *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, (2002), 566-569
- [5] Wańkiewicz J., Diagnostyka powłok z elastomeru silikonowego RTV na izolatorach zainstalowanych w hucie miedzi Głogów I, *IV Ogólnopolskie Sympozjum Inżynierii Wysokich Napięć IW 98, Poznań-Kiekrz*, (1998), 249-252
- [6] Xidong L., Shaowu W., Ju F., Zhicheng G., Development of composite insulators in China, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 6 (1999), n.5, 586-594,
- [7] Yaozhong L., "Application of composite insulators in seriously contaminated areas", *High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999 Conference Publication No. 467, IEE*, 1999
- [8] Kikuchi T., Nishimura S., Nagao M., Izumi K., Kubota Y., Sakata M., "Survey on the use of non-ceramic composite insulators", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 6 No.5, p. 548-556, 1999
- [9] Kuffel J., Kuffel E., "Present status and applications of non-ceramic insulators (NCIS)", *Przegląd Elektrotechniczny 10's 2002.*, Zeszyt Specjalny Przeglądu Elektrotechnicznego, s. 182-184, 2002
- [10] Zhenyu L., Xidong L., Yuanxiang Z., Yu Y., Xuesong L., "Hydrophobicity changes of SIR composite insulators on multi-stress ageing test", *Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, 2005*
- [11] Cherney E.A., "RTV silicone - a high tech solution for a dirty insulator problem", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, November/December 1995 - Vol. 11, No. 6, p. 8-14, 1995
- [12] Gorur R.S., Cherney E.A., Hackam R., The AC and DC performance of polymeric insulating materials under accelerated aging in a fog chamber, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3 (1988), n.4, 1892- 1899
- [13] Gielniak J., Mościcka Grzesiak H., Rozkład napięcia wzdłuż wybranych izolatorów liniowych wyznaczony metodą symulacji komputerowej i pomiarów laboratoryjnych, *V Ogólnopolskie Sympozjum " Inżynieria Wysokich Napięć - IW 2000, Poznań-Kiekrz*, (2000), 117-124
- [14] Pohl Z., Izolatory elektroenergetyczne, *Oficina Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, (1995)
- [15] Yadong F., Xishan W., Wei D., Xiaoping L., "Research on electric potential distributions of composite insulators and glass insulators by numerical simulation", *Conference record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, IEEE 2006*
- [16] Zhong Y., Rren P. Z., Li C., The influence of water drops on the electric field distribution and electric erosion of high voltage composite insulators, *Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering Tsinghua University, Beijing, China, (2005)*
- [17] Xiong Y., Robertson J., Rowland S. M., Hoffman S., Ageing of composite insulators on HV transmission lines, *10th Insucon International Conference Birmingham 2006*, (2006). 265-269,
- [18] Philips A. J., Childs D. J., Schneider H. M., Water drop corona effects on full-scale 500 kV non-ceramic insulators, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14 (1999), n. 1,258-265
- [19] STRI Guide 92/1: Hydrophobicity Classification Guide