

**Jarosław GIELNIAK, Wojciech KASPRZAK,
Zbigniew NADOLNY, Marcin OLSZEWSKI**
POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI

Wykorzystanie techniki termowizyjnej do wyznaczania rozkładu natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolatorów wysokiego napięcia

Dr inż. Jarosław GIELNIAK

Adiunkt na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej, Pracownik Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej. Autor ponad 70 publikacji z zakresu badań materiałowych, obliczania rozkładu pola elektrycznego oraz diagnostyki wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych.



e-mail: jaroslaw.gielniak@put.poznan.pl

Dr inż. Zbigniew NADOLNY

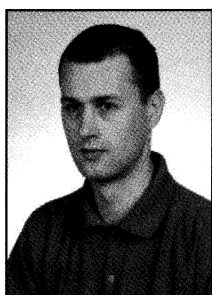
Autor ponad 80 publikacji z zakresu pola elektromagnetycznego, diagnostyki i monitoringu, miernictwa wysokonapięciowego.



e-mail: zbigniew.nadolny@put.poznan.pl

Mgr inż. Wojciech KASPRZAK

Wojciech Kasprzak jest studentem III roku studiów doktoranckich w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej. Jest autorem 11 publikacji z zakresu miernictwa pola elektromagnetycznego.



e-mail: wojciech.kasprzak@doctorate.put.poznan.pl

Mgr inż. Marcin OLSZEWSKI

Marcin Olszewski jest absolwentem Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej na kierunku Elektrotechnika, specjalność Technika Wysokich Napięć. Obecnie jest studentem studium doktoranckiego w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej. Jest autorem i współautorem 11 publikacji, w tym 4 w języku angielskim. Jego zakres badań obejmuje analizę rozkładu natężenia pola elektrycznego wzdłuż kompozytowego izolatora długopniowego na napięcie 220 kV.

e-mail: marcin.olszewski@doctorate.put.poznan.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono weryfikację metody termowizyjnej stosowanej do wyznaczania rozkładu natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolatora wysokiego napięcia (izolator kompozytowy 220 kV). Metoda termowizyjna, zaproponowana przez współautorów, polega na wyznaczeniu rozkładu natężenia pola elektrycznego na podstawie znajomości pola temperaturowego na powierzchni izolatora. Czyni się założenie, że wzrost temperatury w materiale izolacyjnym zależy między innymi od natężenia pola elektrycznego. Metoda ta została zweryfikowana poprzez pomiar rozkładu potencjału wzdłuż izolatora iskiernikiem.

Słowa kluczowe: rozkład natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolatora 220 kV.

Use of thermo-vision method for determining the electric field intensity distribution on high voltage insulator surface

Abstract

The paper presents verification of thermo-vision method used for determining the electric field intensity distribution on high voltage insulator surface (composite 220 kV insulator). This method consist in determining the electric field intensity distribution on the basis of temperature distribution. It is assumed that the temperature increase in insulation material depends, among other on the electric field intensity. The method was verified by measurements of the potential distribution along insulator using spark gap.

Keywords: electric field intensity distribution, 220 kV composite insulator.

1. Wprowadzenie

Znajomość obrazu pola elektrycznego wokół układów izolacyjnych wysokiego napięcia ma zasadnicze znaczenie dla ich niezawodnej pracy. W przypadku izolatorów wysokiego napięcia newralgicznym obszarem, decydującym o warunkach pracy układu izolacyjnego, jest powierzchnia izolatora. Stan powierzchni izolatora wpływa z jednej strony na żywotność izolatorów, z drugiej

zaś decyduje o możliwości generowania się wyładowań niezupełnych, będących źródłem zakłóceń radioelektrycznych. Jednym z czynników, wpływającym na te zjawiska, jest natężenie pola elektrycznego. Z tych właśnie względów czyni się starania aby rozkład natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolatora był stosunkowo równomierny [1, 2, 3, 4].

Istnieje wiele metod wyznaczania natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolatorów wysokiego napięcia. Należą do nich metody oparte na pomiarach spadków napięcia oraz symulacja komputerowa. Metody oparte na pomiarach bazują głównie na wykorzystaniu kilowoltomierza lub iskiernika kulowego. Ich wadą jest niestety ingerencja w obraz pola elektrycznego metalowymi elementami układu pomiarowego. Co więcej, uzyskana tą drogą wartość natężenia odnosi się do stosunkowo dużego obszaru (np. jeden kłoz), a więc jest wartością znacząco uśrednioną. Z kolei symulacja komputerowa nie uwzględnia wszystkich czynników, jakie mogą mieć wpływ na rozkład. Z tego też względu autorzy proponują nową metodę wyznaczania natężenia pola elektrycznego pozbawioną powyższych wad.

U podstaw proponowanej metody stoi fakt, że obecności dielektryku w zmiennym polu elektrycznym towarzyszyć będzie wydzielanie się ciepła. Ilość wydzielonej energii cieplnej Q zależy od natężenia pola elektrycznego E , pulsacji ω , przenikalności elektrycznej ε , współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$, czasu t oraz objętości V , co pokazuje poniższy wzór:

$$Q = E^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \text{tg}\delta \cdot t \cdot V, \quad (1)$$

gdzie: E – natężenie pola elektrycznego w V/m, ω – pulsacja w rad/s, ε – przenikalność elektryczna w F/m, $\text{tg}\delta$ – współczynnik strat dielektrycznych, t – czas w s, V – objętość w m³.

Z drugiej strony, energia cieplna Q dostarczona dielektrykowi, powodująca wzrost jego temperatury o ΔT w stosunku do temperatury otoczenia, wyraża się poniższym wzorem:

$$Q = m \cdot c_{wt} \cdot \Delta T, \quad (2)$$

gdzie m – masa w kg, c_{wt} – ciepło właściwe dielektryka w J/(kg·K), ΔT – przyrost temperatury, rozumiany jako różnica między temperaturą dielektryku, a temperaturą otoczenia w K.

Na podstawie wzorów (1) oraz (2) otrzymano wzór (3) określający przyrost temperatury ΔT , wywołany obecnością dielektryku w zmiennym polu elektrycznym o natężeniu E :

$$\Delta T = (E^2 \cdot \omega \cdot \text{tg} \delta \cdot \varepsilon \cdot t) / (\gamma \cdot c_{wt}), \quad (3)$$

gdzie γ – gęstość dielektryku w kg/m³.

Zakładając, że wszystkie elementy prawej strony wzoru (3), z wyjątkiem natężenia pola elektrycznego E , mają niezmiennicze wartości w przypadku tego samego izolatora, można stwierdzić, że przyrost temperatury ΔT zależy tylko od natężenia pola E . Przekształcając wzór (3) można otrzymać praktyczną zależność, określającą wartość natężenia pola elektrycznego E na podstawie znajomości przyrostu temperatury ΔT , co pokazano poniżej:

$$E = ((\gamma \cdot c_{wt} \cdot \Delta T) / (\omega \cdot \text{tg} \delta \cdot \varepsilon \cdot t))^{1/2}. \quad (4)$$

Jak zatem widać, znajomość przyrostu temperatury ΔT dielektryka może posłużyć do wyznaczania natężenia pola elektrycznego E .

2. Cel i zakres badań

Celem podjętych badań była weryfikacja wyników uzyskanych przy użyciu techniki termowizyjnej wynikami otrzymanymi przy użyciu iskiernika kulowego. Badania obejmowały wyznaczenie rozkładu spadków napięcia iskiernikiem na powierzchni i na tej podstawie wyznaczenie rozkładu natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolatora. W kolejnym etapie wyniki otrzymane z wykorzystaniem metody termowizyjnej porównane zostaną z wynikami uzyskanymi przy pomocy iskiernika kulowego.

3. Obiekt badań

Obiektami badań były trzy długopniowe izolatory kompozytowe na napięcie 220 kV: bez pierścienia sterującego (a), z pierścieniem o średnicy 240 mm zamocowanym 30 mm nad okuciem wysokiego napięcia (b), oraz z pierścieniem o średnicy 320 mm znajdującym się 70 mm nad okuciem. Na podstawie wyników symulacji komputerowej, nie prezentowanych w tym artykule, stwierdzono, że najlepiej dobranymi pierścieniami, z punktu widzenia rozkładu natężenia pola elektrycznego, spośród wielu różnych kombinacji, są pierścienie o średnicy 320 mm zamocowane 70 mm nad okuciem, a najgorzej pierścienie o średnicy 240 mm znajdujące się 30 mm nad okuciem.

4. Układ pomiarowy

Układ pomiarowy do wyznaczenia natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolatora metodą termowizyjną składał się z kamery termowizyjnej i wielokanałowego systemu pomiaru temperatury wraz z sondami.

Pomiar temperatury powierzchni izolatora przeprowadzono za pomocą kamery termowizyjnej krajowej firmy VIGO SYSTEM. Rozdzielczość graficzna kamery równa była 240 × 240 punktów, a najmniejsza powierzchnia analizowanego pola 2 × 2 mm². Zakres analizowanej fali promieniowania podczerwonego wynosił 3–12 μm. Kamera miała dwa zakresy temperaturowe, od –10°C do 50°C (czułość termiczna 0,05°C) oraz od 50°C do 200°C (czułość termiczna 0,5°C).

Temperaturę powietrza otaczającego izolator mierzono z użyciem wielokanałowego systemu pomiaru temperatury z dziesięcioma sondami o czułości termicznej 0,05°C. Sondy rozmieszczone były wzdłuż izolatora w pewnej odległości od niego. W ten sposób otrzymano rozkład temperatury powietrza otaczającego izolator.

Do wyznaczania natężenia pola elektrycznego metodą iskiernikową wykorzystano iskiernik kulowy, który składał się z dwóch alumini-

wych kul o średnicy 20 mm i odległości między elektrodami 1 mm. Napięcie przeskoku między elektrodami iskiernika równe było 4,1 kV (wartość skuteczna). Układ probierczy umożliwiał przyłożenie napięcia na izolatorze o wartości do 110 kV. Pomiary wykonywane były nocą, ponieważ światło dzienne uniemożliwiałoby wskazanie dokładnej wartości napięcia, przy której pojawiał się przeskok między kulami iskiernika.

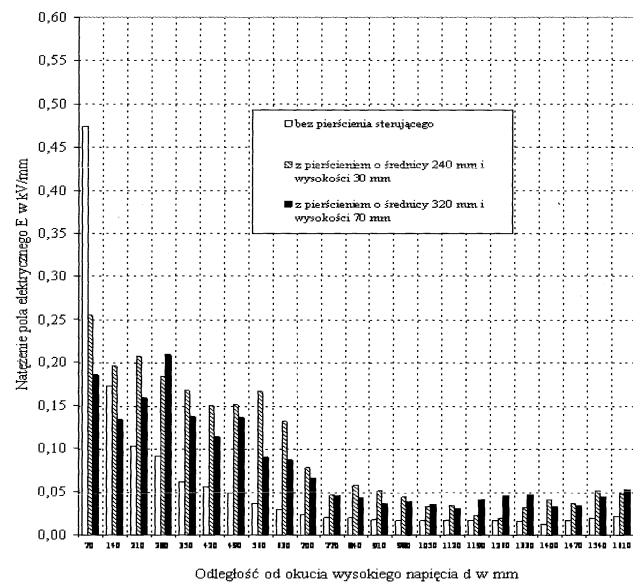
5. Wyniki

Na rysunku 1 przedstawiono uśrednione rozkłady natężenia pola elektrycznego na powierzchni trzech różnych izolatorów kompozytowych, uzyskane przy wykorzystaniu metody termowizyjnej [5, 6, 7].

Opracowanie metody termowizyjnej polegało na znalezieniu związku między natężeniem pola elektrycznego E , a przyrostem temperatury ΔT , który był skutkiem oddziaływania tegoż natężenia na materiał izolacyjny izolatora. Wynikiem opracowanej metody jest poniższa zależność:

$$E = 0,413 (\Delta T)^{2,85} \text{ dla } \Delta T = (0,68 \div 1,48) \text{ K} \quad (5)$$

gdzie: E – natężenie pola elektrycznego na powierzchni izolatora kompozytowego w kV/mm, ΔT – przyrost temperatury powierzchni izolatora kompozytowego w K.



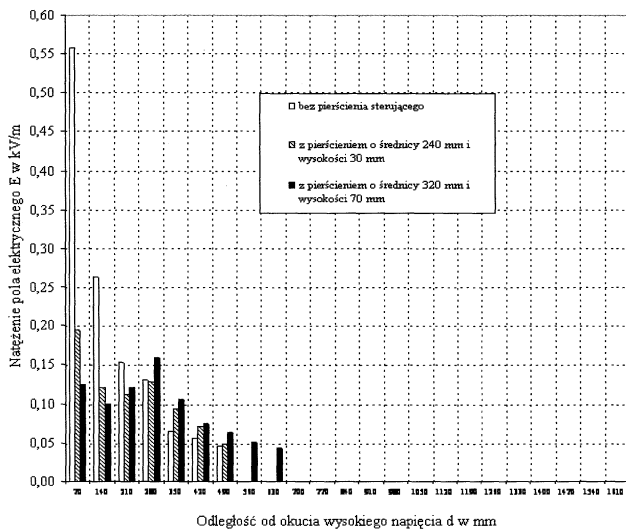
Rys. 1. Rozkłady uśrednionego natężenia pola elektrycznego na powierzchni długopniowego kompozytowego izolatora 220 kV, uzyskane z wykorzystaniem metody termowizyjnej; przyłożone napięcie $U = 100$ kV (wartość skuteczna)

Fig. 1. Averaged electric field intensity distributions on long-rod composite 220 kV insulator surface, obtained with use of thermo-vision method, for voltage $U_{rms} = 100$ kV

Uśrednienie wyników, przedstawionych na rysunku 1, było konieczne by móc je w łatwy sposób porównać z wynikami iskiernika kulowego. Jak widać, w przypadku izolatora bez pierścienia sterującego, największa wartość natężenia pola elektrycznego wystąpiła przy okuciu wysokiego napięcia i równa była około 0,48 kV/mm. W przypadku izolatora z pierścieniem o najgorzej dobranych parametrach geometrycznych, tj. o średnicy 240 mm, znajdującym się 30 mm nad okuciem, największa wartość natężenia również wystąpiła przy okuciu i równa była około 0,25 kV/mm. Natomiast w przypadku izolatora z najlepiej dobranym pierścieniem, tj. o średnicy 320 mm, położonym 70 mm nad okuciem, największa wartość natężenia znajdowała się 280 mm od okucia (7 i 8 klosz) i równa była tylko 0,21 kV/mm. Natężenie pola elektrycznego przy okuciu dla tego izolatora równe było z kolei około 0,19 kV/mm.

Jak zatem widać, wprowadzenie pierścienia, niezależnie od jego parametrów geometrycznych, powoduje znaczący (dwukrotny) spadek natężenia pola elektrycznego przy okuciu wysokiego napięcia.

Na rysunku 2, analogicznie jak na rysunku 1, przedstawiono rozkłady natężenia pola elektrycznego na powierzchni tych samych trzech izolatorów kompozytowych, lecz otrzymane przy wykorzystaniu iskiernika kulowego.



Rys. 2. Rozkłady natężenia pola elektrycznego na powierzchni długopniowego kompozytowego izolatora 220 kV, uzyskane z wykorzystaniem iskiernika kulowego; przyłożone napięcie $U = 100$ kV (wartość skuteczna)

Fig. 2. Electric field intensity distributions on long-rod composite 220 kV insulator surface, obtained with use of spark gap method, for voltage $U_{rms} = 100$ kV

Poniżej rozkłady z rysunku 1 (metoda termowizyjna) będą porównane z rozkładami z rysunku 2 (iskiernik kulowy).

W izolatorze bez pierścienia największą wartość natężenia na jego powierzchni stwierdzono przy okuciu wysokiego napięcia, niezależnie od zastosowanej metody. W przypadku metody termowizyjnej wartość ta była równa 0,48 kV/mm, a w przypadku metody iskiernika kulowego 0,56 kV/mm. Różnica między tymi wartościami nie jest znaczna i wynosi 14% w stosunku do wartości uzyskanej metodą iskiernikową. Wartości natężenia pola elektrycznego malały wraz z oddalaniem się od dolnego okucia (dotyczy to obu analizowanych metod).

W izolatorze z najgorzej dobranymi parametrami pierścienia sterującego największą wartość natężenia pola elektrycznego na jego powierzchni stwierdzono przy dolnym okuciu (jak w izolatorze bez pierścienia), niezależnie od zastosowanej metody. W przypadku metody termowizyjnej wartość ta była równa 0,25 kV/mm, a w przypadku metody iskiernika kulowego 0,20 kV/mm. Różnica między tymi wartościami wynosi zatem 25%. Wraz z oddalaniem się od okucia wartości natężenia pola elektrycznego malały, choć wykazywały pewne ekstrema w przypadku obu metod.

W trzecim izolatorze, z najlepiej dobranymi parametrami geometrycznymi pierścienia sterującego, największą wartość natężenia pola elektrycznego na jego powierzchni stwierdzono nie przy dolnym okuciu, lecz w odległości 280 mm od niego (niezależnie od stosowanej metody pomiarowej). W przypadku metody termowizyjnej wartość ta była równa 0,21 kV/mm, a w przypadku metody iskiernika 0,16 kV/mm (różnica 31%). Natężenie pola elektrycznego wyznaczone metodą termowizyjną przy okuciu izolatora było równe 0,19 kV/mm, a wyznaczone metodą iskiernika kulowego 0,12 kV/mm (58% różnicy).

Na podstawie rozkładów natężenia pola elektrycznego uzyskanych metodą termowizyjną można stwierdzić, że w przypadku wszystkich trzech izolatorów wartości natężenia na odcinku od 700 mm do 1680 mm (górne okucie) były na ogół mniejsze niż w dolnej części izolatora. Dlatego nie można było ich wyznaczyć z użyciem metody iskiernika.

Stosując metodę termowizyjną, największą wartość natężenia pola elektrycznego stwierdzono na powierzchni izolatora bez pierścienia, a najmniejszą na powierzchni izolatora z najlepiej dobranymi parametrami pierścienia. Podobne wyniki uzyskano metodą iskiernikową.

W przypadku dużych wartości natężenia pola elektrycznego (powyżej 0,15 kV/mm) na powierzchni izolatora różnice między wartościami uzyskanymi obu metodami pomiarowymi nie są duże (do kilkunastu procent). W przypadku coraz mniejszych wartości natężenia różnice te sięgały już kilkudziesięciu procent. Na tej podstawie można stwierdzić, że iskiernik kulowy, zakłócający rozkład pola elektrycznego, wpływa znacząco na wyniki pomiarów, szczególnie w przypadku małych wartości natężenia.

6. Wnioski

Podsumowując, można stwierdzić, że wyniki uzyskane metodą termowizyjną – szczególnie jakościowe – zostały pozytywnie zweryfikowane metodą iskiernika kulowego. Największa wartość natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolatora określona metodą termowizyjną wystąpiła dokładnie w tym samym miejscu co w przypadku metody iskiernikowej. Największa wartość natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolatora bez pierścienia była większa od największej wartości natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolatora z najlepiej dobranym pierścieniem – co stwierdzono zarówno z wykorzystaniem metody termowizyjnej, jak i iskiernikowej.

Mimo bardzo podobnych wyników uzyskanych obu metodami należy zwrócić uwagę na to, że metoda termowizyjna ma wiele zalet w porównaniu z metodą iskiernikową. Po pierwsze, daje możliwość wyznaczenia rozkładu natężenia pola elektrycznego na całej powierzchni izolatora, a nie tylko na jej części (jak to jest w przypadku metody iskiernikowej).

Metoda termowizyjna nie wymaga wykonywania pomiarów nocą oraz ustawiania iskiernika między kolejnymi kłosami izolatora. Metoda termowizyjna nie zakłóca rozkładu pola elektrycznego, gdyż nie wymaga stosowania żadnych układów pomiarowych bezpośrednio na izolatorze.

7. Literatura

- [1] Fleszyński J. i in.: Aktualna problematyka badawcza polimerowych izolatorów kompozytowych, Przegląd Elektrotechniczny, 1'2005, PL ISSN 1731-6103, rok 3., Krynica, 2005.
- [2] Fleszyński J., Tymań A.: Elektroenergetyczne izolatory kompozytowe: aktualne problemy badawcze, III konferencja naukowa Postępy w Elektrotechnologii, Szklarska Poręba, 1998.
- [3] Fleszyński J., Wańkiewicz J.: Ocena stanu technicznego izolatorów kompozytowych po wieloletniej eksploatacji, VII Symposium Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia EU1'99, Zakopane, 1999.
- [4] Fleszyński J., Sojda E., Żyłka P.: Laboratoryjne badania zabrudzeniowe silikonowych izolatorów kompozytowych, IV konferencja naukowa Postępy w Elektrotechnologii, Jamrozowa Polana, 2000.
- [5] Olszewski M., Nadolny Z.: Analiza związku pola temperaturowego z polem elektrycznym na przykładzie izolatora kompozytowego, liniowego na napięcie 220kV, VIII Ogólnopolskie Symposium Inżynieria Wysokich Napięć IW-2006, Poznań Będlewo, 2006.
- [6] Olszewski M., Nadolny Z.: Wyznaczanie natężenia pola elektrycznego na powierzchni kompozytowego izolatora liniowego 220kV na podstawie znajomości pola temperaturowego, VIII Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Napowietrzna Izolacja Wysokonapięciowa w Elektroenergetyce NIWE 2007, Szklarska Poręba – Piechowice, 2007.
- [7] Olszewski M., Nadolny Z.: New Method to Determine Electric Field Intensity on High Voltage Insulator, Based on Relationship between Electric Field and Temperature Field, 15th International Symposium on High Voltage Engineering ISH, Ljubljana, Słowenia, 2007.