



Jarosław Gielniak*, Zbigniew Nadolny*

PORÓWNANIE ROZKŁADU NATĘŻENIA POLA ELEKTRYCZNEGO W OBSZARZE IZOLATORA KOMPOZYTOWEGO LINIOWEGO PRZY NAPIĘCIU PRZEMIENNYM I STAŁYM

Streszczenie: Celem niniejszej pracy jest porównanie warunków polowych w obszarze izolatora kompozytowego przy napięciu przemiennym i stałym. Wyznaczono rozkłady natężenia pola elektrycznego dla izolatora nowego i czystego oraz pokrytego warstwą o wartościach grubości przenikalności elektrycznej i konduktywności zmieniających w szerokich granicach.

Słowa kluczowe: izolator kompozytowy, pole elektryczne, symulacja komputerowa pola elektrycznego

1. Wstęp

Izolatory kompozytowe cieszą się coraz większą popularnością zarówno w Polsce jak i na świecie. Stosuje się je w energetycznych liniach przesyłowych średniego i wysokiego napięcia w zakresie 15–400 kV oraz jako izolatory trakcyjne. Nadają się szczególnie do zastosowań na terenach o dużym zapyleniu, podwyższonej wilgotności i zasoleniu oraz w klimacie o zmiennych dobowych skokach temperatury.

W porównaniu do tradycyjnych izolatorów porcelanowych i szklanych cechują się:

- kilkakrotnie mniejszą masą,
- wyższą wytrzymałością mechaniczną, a szczególnie na udary mechaniczne,
- zwiększoną odpornością na zabrudzenia przemysłowe.

* Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań

W ostatnich latach dużym zainteresowaniem w branży energetycznej cieszy się przesył energii elektrycznej na duże odległości przy napięciu stałym. Wiąże się to z coraz bardziej rosnącym zapotrzebowaniem Europy Zachodniej na nośniki energii i z olbrzymimi zasobami energetycznymi azjatyckiej części Rosji. W tym kontekście poznanie wszystkich zjawisk występujących w czasie eksploatacji urządzeń energetycznych przy napięciu stałym staje się zadaniem w pełni uzasadnionym. Znajomość takich zjawisk może stać się podstawą łatwej modyfikacji tradycyjnie stosowanych urządzeń energetycznych dla potrzeb przesyłu energii przy napięciu stałym [1].

2. Założenia wstępne

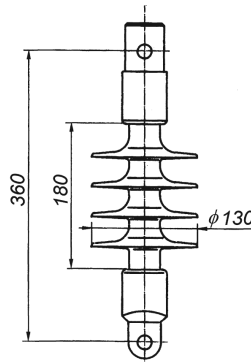
Dla potrzeb symulacji komputerowej obrazu pola elektrycznego zadano geometrię układu izolacyjnego izolatora kompozytowego (produkowanego przez Zakład Doświadczalny III Instytutu Elektrotechniki we Wrocławiu) o następujących parametrach:

- wysokość części izolacyjnej $h = 180$ mm,
- droga upływu $l = 475$ mm,

taka sytuacja odpowiada geometrii izolatora zbudowanego na 15 kV napięcia przemiennego (rys. 1).

Materiałem izolacyjnym tworzącym klosze oraz powłokę rdzenia szkło-epoksydowego jest elastomer silikonowy o parametrach:

- przenikalność elektryczna $\varepsilon = 3,8$,
- konduktywność $\gamma = 10^{-12}$ [S/m].



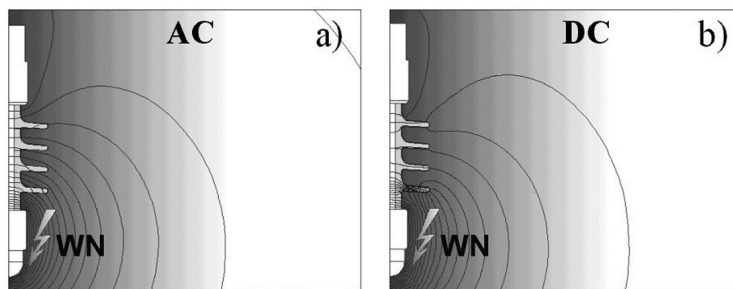
Rys. 1. Izolator kompozytowy liniowy na napięcie 15 kV

W ramach badań zasymulowano warstwę na powierzchni izolatora, której parametry geometryczne oraz elektryczne zmieniano w granicach: grubość 0,5–1,5 mm, przenikalność elektryczna 3,8–50, konduktywność 10^{-12} – 10^{-1} S/m.

Do symulacji użyto programu komputerowego, którego algorytm obliczeniowy oparty został na metodzie elementów skończonych [3, 4].

3. Eksperyment

W pierwszej części eksperymentu przeanalizowano i porównano obrazy pola elektrycznego wokół izolatora kompozytowego przy napięciu przemiennym i stałym. Obraz pola elektrycznego zależy w głównej mierze od geometrii układu oraz przenikalności elektrycznej i konduktywności poszczególnych obszarów. Przy czym, przy napięciu przemiennym dominującą rolę w kształtowaniu obrazu pola odgrywa przenikalność elektryczna, a przy stałym konduktywność [2]. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe obrazy pola elektrycznego w obszarze izolatora kompozytowego uzyskane na drodze symulacji komputerowej, przy napięciu przemiennym (rys. 2a) oraz przy napięciu stałym (rys. 2b). Aby umożliwić porównanie wyników w obu sytuacjach zadano tę samą wartość napięcia zasilającego. W przypadku napięcia przemiennego była to wartość znamionowa $U_n = 15 \text{ kV}$, odpowiednio dla napięcia stałego przyjęto $U = 8,6 \text{ kV}$. Widzimy tu wyraźne różnice w obrazach pól. Przy napięciu stałym występuje większa niejednorodność pola, więcej linii ekwipotencjalnych, niż przy napięciu przemiennym, lokalizuje się w obszarze pierwszego klosza. Jednakże w obu przypadkach najbardziej obciążony elektrycznie jest pierwszy klosz licząc od strony wysokiego potencjału, dlatego w dalszej części pracy rozpatrywany będzie jedynie obszar pierwszego klosza.

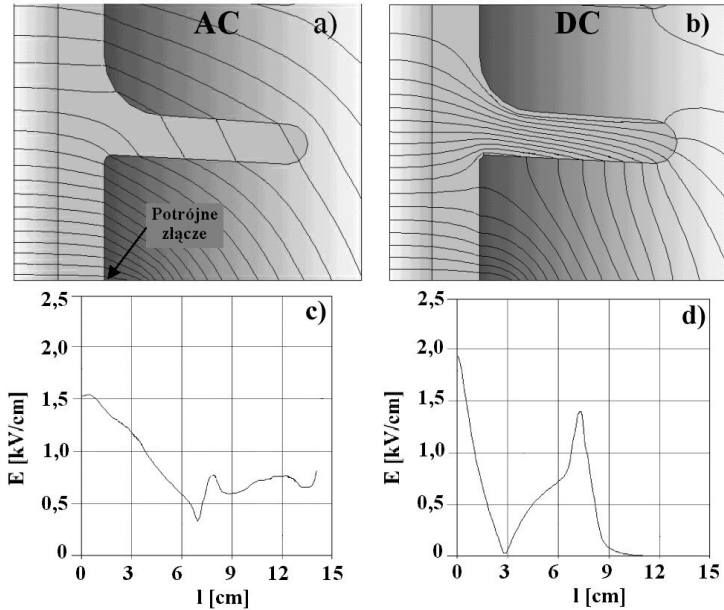


Rys. 2. Obrazy pola elektrycznego w obszarze izolatora kompozytowego liniowego: a) układ zasilany napięciem przemiennym $U = 15/\sqrt{3} \text{ kV}$, b) układ zasilany napięciem stałym $U = 8,6 \text{ kV}$

Rysunek 3a przedstawia obraz pola elektrycznego w obszarze pierwszego klosza przy napięciu przemiennym, rysunek 3b przy napięciu stałym. Na rysunkach 3c i 3d przedstawiono rozkład natężenia pola elektrycznego po powierzchni pierwszego klosza poczynając od potrójnego złącza elektroda-izolator-powietrze i kończąc u nasady drugiego klosza. Porównując rozkłady przy napięciu stałym i przemiennym widzimy różnicę w charakterach tych rozkładów, jednakże w obu przypadkach wartość maksymalna wystąpiła w potrójnym złączu i wynosiła $1,5 \text{ kV/cm}$ przy napięciu przemiennym oraz 2 kV/cm przy napięciu stałym.

W dalszej części eksperymentu wyznaczono obraz pola elektrycznego oraz obliczono rozkłady natężenia pola na powierzchni izolatora dla przypadku, w którym izolator został pokryty warstwą wierzchnią. Przeprowadzono szereg symulacji zmieniając

w każdym kroku parametry warstwy (grubość, przenikalność elektryczną w przypadku AC oraz konduktywność w przypadku DC).



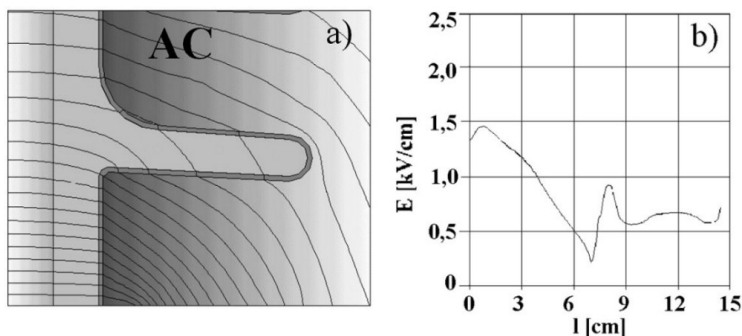
Rys. 3. Obraz pola elektrycznego w obszarze pierwszego klosza dla AC (a) i DC (b); rozkład natężenia pola elektrycznego E na bocznej powierzchni pierwszego klosza dla AC (c) i DC (d); odpowiednio: $U_n = 15/\sqrt{3}$ i 8,6 kV

Rysunek 4a przedstawia obraz pola elektrycznego przy napięciu przemiennym w obszarze pierwszego klosza z przykładowo wybraną warstwą wierzchnią o grubości $g = 1$ mm i przenikalności elektrycznej $\varepsilon = 10$. Rysunek 4b przedstawia rozkład natężenia pola na powierzchni pierwszego klosza. Charakter rozkładu jest podobny jak w przypadku izolatora bez warstwy wierzchniej, jednakże zmniejszyły się wartości natężenia pola w potrójnym złączu (o kilka procent) oraz na pozostałej powierzchni izolatora (do kilkudziesięciu procent).

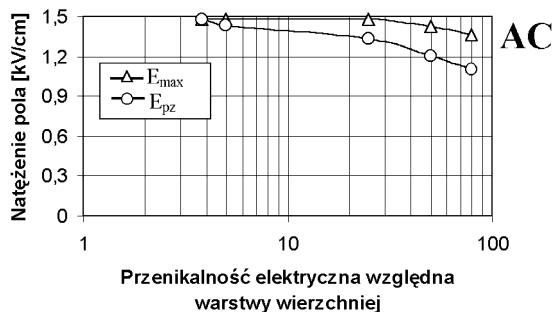
Potrójne złącze jest tradycyjnie pojmowane jako newralgiczny punkt układu izolacyjnego. Dlatego przeanalizowano wartości natężenia pola w potrójnym złączu oraz w maksimum jego występowania na powierzchni izolatora. Rysunek 5 przedstawia maksymalne natężenie pola elektrycznego (E_{\max}) na powierzchni izolatora oraz natężenie w potrójnym złączu (E_{pz}) w zależności od przenikalności elektrycznej warstwy. Można zauważyć, że wartości E_{\max} i E_{pz} maleją wraz ze wzrostem przenikalności.

Następnie przeanalizowano wpływ grubości warstwy wierzchniej na maksymalne natężenie pola, jakie wystąpiło na powierzchni izolatora. Obliczono maksymalne natężenie pola, jakie wystąpiło na powierzchni izolatora w zależności od przenikalności elektrycznej dla grubości warstw 0,5, 1,0 i 1,5 mm. Po przeanalizowaniu otrzymanych wyników dochodzi się do wniosku, że grubość warstwy wydaje się nie mieć znaczącego

wpływu na wartość E_{\max} , dopiero przy dużych wartościach przenikalności elektrycznej odnotowujemy spadek wartości E_{\max} .



Rys. 4. Obraz pola elektrycznego w obszarze pierwszego klosza z warstwą wierzchnią o grubości $g = 1$ mm i przenikalności $\varepsilon = 10$ (a); rozkład natężenia pola elektrycznego E na powierzchni klosza (b); $U_n = 15/\sqrt{3}$ i $8,6$ kV



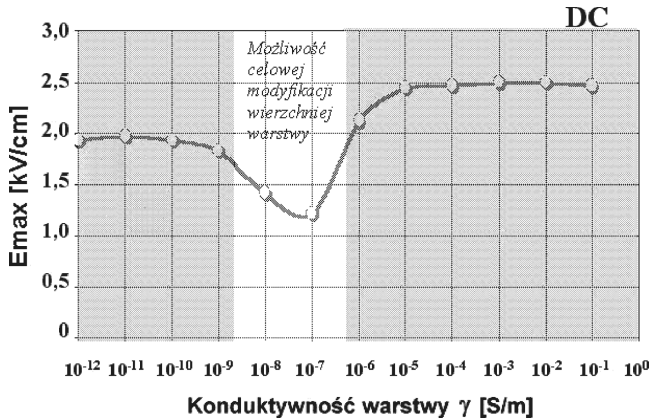
Rys. 5. Natężenie pola w potrójnym złączu (E_{pz}) oraz maksymalne natężenie pola elektrycznego (E_{\max}) na powierzchni izolatora w zależności od przenikalności elektrycznej wierzchniej warstwy; grubość warstwy $g = 1$ mm, $U_n = 15/\sqrt{3}$ i $8,6$ kV

Sytuacja wygląda odmiennie, gdy mamy do czynienia z warstwą wierzchnią przy napięciu stałym. W tym przypadku przeanalizowano w jaki sposób na wartość maksymalną natężenia pola, która wystąpi na powierzchni izolatora, wpłynie zmiana konduktywności warstwy wierzchniej. Do obliczeń przyjęto szeroki zakres zmian konduktywności warstwy od 10^{-12} S/m do 10^{-1} S/m z krokiem jeden rząd. Rysunek 6 przedstawia maksymalne natężenie pola elektrycznego, jakie wystąpiło na powierzchni izolatora w zależności od konduktywności warstwy wierzchniej dla grubości warstwy 1 mm. Na omawianym wykresie można wydzielić trzy charakterystyczne obszary:

- obszar, w którym warstwa wierzchnia ma konduktywność zbliżoną do konduktywności materiału izolacyjnego — w tym obszarze nie odnotowuje się zmian

wartości maksymalnego natężenia pola na powierzchni a maksymalne natężenie pola lokuje się w potrójnym złączu i posiada wartość 2 kV/cm,

- obszar, w którym istnieje możliwość kontrolowanej przez projektanta zmiany konduktywności warstwy wierzchniej w celu poprawy polowych warunków pracy układu — w tym obszarze maksymalne natężenie pola, jakie występuje na powierzchni izolatora w zależności od konduktywności warstwy wierzchniej osiąga minimum dla konduktywności warstwy $\gamma = 10^{-7}$ S/m, i wynosi 1,2 kV/cm,
- obszar, w którym konduktywność warstwy ma dużą wartość ($\gamma = 10^{-5} \div 10^{-1}$ S/m) — obserwujemy tutaj nasycenie krzywej E_{\max} na poziomie 2,5 kV/cm, natomiast maksimum natężenia pola jest zlokalizowane na wierzchołku klosza.



Rys. 6. Maksymalne natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolatora kompozytowego w zależności od konduktywności warstwy wierzchniej γ , grubość warstwy $g = 1$ mm, $U = 8,6$ kV

4. Podsumowanie

- Istnieją zasadnicze różnice w obrazach pola oraz w rozkładach natężenia pola elektrycznego pomiędzy układami pracującymi przy napięciu stałym i przemiennym.
- Izolator nie pokryty warstwą wierzchnią pracuje w korzystniejszych warunkach polowych przy napięciu przemiennym, gdyż maksymalne natężenie pola występujące na jego powierzchni jest niższe niż w przypadku napięcia stałego.
- Przy napięciu przemiennym warstwa wierzchnia o zwiększonej przenikalności elektrycznej (np. wilgotne zanieczyszczenia) nie powoduje pogorszenia polowych warunków pracy układu, a nawet nieznacznie poprawia te warunki.
- W przypadku izolatora pracującego przy napięciu stałym ewentualne pokrycie warstwą o wysokiej konduktywności ($10^{-4} \div 10^{-1}$ S/m) powoduje wzrost maksymalnego natężenia pola na powierzchni izolatora oraz powoduje, że punkt w którym ono występuje przemieszcza się z potrójnego złącza na okap pierwszego klosza.

- Przy napięciu stałym istnieje możliwość celowego naniesienia warstwy o wyższej konduktywności w zakresie $10^{-9} \div 10^{-6}$ S/m, dzięki czemu można uzyskać poprawę polowych warunków pracy układu, tzn. zmniejszenie wartości maksymalnego natężenia pola na powierzchni izolatora o kilkadziesiąt %.
- Zarówno przy napięciu przemiennym jak i stałym grubość warstwy wierzchniej zmieniająca się w zakresie $0,5 \div 1,5$ mm nie powoduje zasadniczych zmian w obrazie pola i rozkładzie natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolatora.

Literatura

- [1] **Wańkowicz J.:** *Przeskok zabrudzeniowy. Wybrane zagadnienia eksploatacyjne i materiałowo — konstrukcyjne izolatorów energetycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995
- [2] **Subocz L.:** *Analiza rozkładu pola elektrycznego na izolatorach kompozytowych*, II Ogólnopolskie Sympozjum INŻYNIERIA WYSOKICH NAPIĘĆ IW-94, Poznań — Kiekrz 1994
- [3] **Kuffel W., Zaengel S.:** *High Voltage Engineering*, Pergamon Press 1984
- [4] **Bolkowski S.:** *Komputerowe Metody Analizy pola elektrycznego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993

COMPARISON OF ELECTRIC FIELD INTENSITY DISTRIBUTION FOR AC AND DC VOLTAGE FOR COMPOSITE INSULATOR

The aim of this paper is the comparison of electric field conditions in the composite insulator area under AC and DC voltage. The electric field intensity distribution was evaluated for a new and clean insulator as well as for insulator coated with the layer of the thickness, permittivity and conductivity changed in wide range.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego KBN 101/T10/97/13