



Andrzej Graczkowski\*, Zbigniew Nadolny\*

## **ROZKŁAD NATĘŻENIA POLA ELEKTRYCZNEGO W IZOLACJI POLIETYLENOWEJ ORAZ PAPIEROWEJ IMPREGNOWANEJ SYCIWEM NIEŚCIEKAJĄCYM W KABLU NAPIĘCIA STAŁEGO**

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono rozkłady natężenia pola elektrycznego w izolacji kabli wysokiego napięcia stałego wykonanej z polietylenu i papieru syconego. Rozkłady wyznaczono w oparciu o zaprezentowane w artykule wyniki pomiarów rezystywności wybranych materiałów izolacyjnych w zależności od temperatury i natężenia pola elektrycznego.

**Słowa kluczowe:** kable napięcia stałego, rozkład natężenia pola elektrycznego, rezystywność

### **1. Wstęp**

W ostatnich latach, zarówno ze względów ekonomicznych jak i ekologicznych, obserwuje się wzrost zainteresowania przesyłem energii elektrycznej kablami napięcia stałego (DC). Zjawiska zachodzące w izolacji kabla przy napięciu stałym i przemienicznym mają odmienny charakter. Wynika stąd potrzeba wszechstronnego badania właściwości materiałów izolacyjnych w kontekście zastosowania ich przy napięciu stałym.

W kablach DC izolację główną stanowi najczęściej: papier kablowy nasycany syciwem nieściekającym (tzw. kable masowe), papier kablowy nasycany olejem o niskiej lepkości lub też polietylen modyfikowany specjalnymi wypełniaczami [1, 2, 3].

Celem niniejszej pracy było wyznaczenie rozkładu natężenia pola elektrycznego w izolacji kabla wysokonapięciowego przy napięciu stałym, w różnych warunkach termicznych, będących konsekwencją zmian obciążenia prądowego. Przeanalizowano

---

\* Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Poznańska

rozkłady natężenia pola elektrycznego dla izolacji polietylenowej oraz papierowej impregnowanej syciwem nieściekającym.

W układach izolacyjnych pracujących przy napięciu stałym na rozkład natężenia pola elektrycznego wpływa geometria układu i rezystywność materiału izolacyjnego. Jeśli materiał izolacyjny wykazuje tendencje do generowania ładunku przestrzennego, wówczas na rezystancyjny rozkład natężenia pola nakłada się rozkład pochodzący od ładunku przestrzennego i sytuacja radykalnie się zmienia, przeważnie pogarsza [1, 4]. Na obecnym etapie pracy nie uwzględniano wpływu ładunku przestrzennego. Przedmiotem analizy był rezystancyjny rozkład natężenia pola. Rozkład ten wyznaczono na drodze symulacji za pomocą programu komputerowego, dokonując wcześniej pomiarów rezystywności wybranych materiałów izolacyjnych w szerokim zakresie temperatury i natężenia pola.

## 2. Specyfika rozkładu natężenia pola elektrycznego przy napięciu stałym

Przy napięciu przemiennym o rozkładzie natężenia pola elektrycznego w izolacji decyduje przede wszystkim przenikalność elektryczna materiału izolacyjnego, której wartość nie zależy znacząco ani od temperatury ani od natężenia pola elektrycznego. W przypadku napięcia stałego rozkład pola zależy od rezystywności materiału izolacyjnego — której wartość zależy silnie od temperatury i natężenia pola elektrycznego. Sytuacja komplikuje się dodatkowo ze względu na ciągłe zmiany temperatury w izolacji kabla, powodowane zarówno zmiennym obciążeniem prądowym jak i zmiennymi warunkami oddawania ciepła do otoczenia.

W pracy analizowano rozkład natężenia pola dla kabla o budowie koncentrycznej (pole promieniowe). Uwzględniając założenia teoretyczne, rozkład natężenia pola elektrycznego  $E(r)$  dla układu walcowego opisać można następującą zależnością [5]:

$$E(r) = \frac{U \cdot \rho(t, E)}{r \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho(t, E)}{r} dr} \quad (1)$$

gdzie:  $U$  — przyłożone napięcie,  $r_1$ ,  $r_2$  — wymiary geometryczne warstwy izolacji,  $\rho(t, E)$  — funkcja opisująca zależność rezystywności materiału izolacyjnego od temperatury i natężenia pola elektrycznego.

Dla wyznaczenia rozkładu  $E(r)$  niezbędna jest znajomość funkcji  $\rho(t, E)$  a także konieczna jest znajomość rozkładu temperatury w izolacji. Znając opory cieplne poszczególnych warstw izolacji oraz geometrię kabla można wyznaczyć rozkład temperatury  $t(r)$  w warstwie izolacyjnej z następującej zależności analitycznej [5]:

$$t(r) = \frac{\Delta t \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r}\right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} + t_0, \quad (2)$$

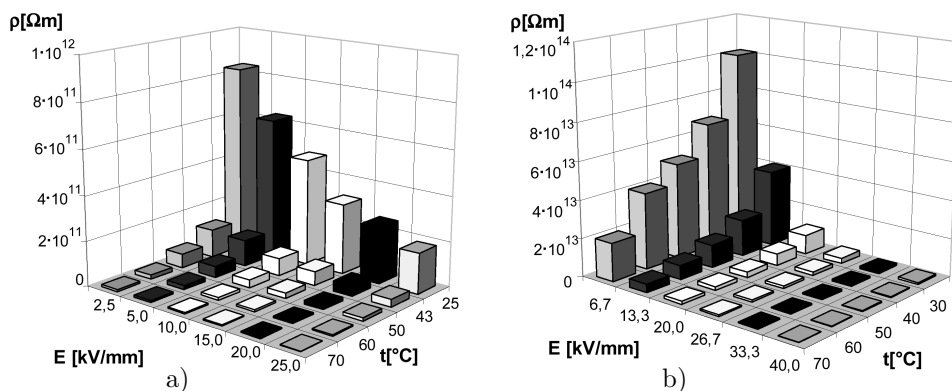
gdzie:  $\Delta t$  — spadek temperatury w warstwie,  $r_1$ ,  $r_2$  — wymiary geometryczne warstwy,  $t_0$  — temperatura warstwy zewnętrznej.

W celu wyznaczenia funkcji  $\rho(t, E)$ , opisującej zmienność rezystywności materiału izolacyjnego, konieczne było przeprowadzenie pomiarów rezystywności w zależności od natężenia pola elektrycznego i temperatury.

### 3. Zmienność rezystywności materiału izolacyjnego pod wpływem natężenia pola elektrycznego i temperatury

Objektami badań były próbki dwóch wybranych materiałów izolacyjnych: papieru impregnowanego syciwem nieściekającym oraz polietylenu termoplastycznego.

Rezystywność papieru impregnowanego zmierzona została dla zakresu temperatury od 25°C do 70°C oraz dla natężenia pola elektrycznego od 2,5 kV/mm do 25 kV/mm. Rezystywność polietylenu zmierzono dla zakresu temperatury od 30°C do 70°C oraz dla natężenia pola elektrycznego od 6,7 kV/mm do 40 kV/mm. Wartości natężenia pola oraz temperatury odpowiadały w przybliżeniu warunkom, jakie mogą zaistnieć w rzeczywistych układach izolacyjnych kabli energetycznych. Różne zakresy natężenia pola w trakcie pomiarów wynikały z różnej wytrzymałości elektrycznej badanych materiałów oraz zakresu pomiarowego miernika rezystancji. Wyniki pomiarów przedstawiono graficznie na rysunku 1.



**Rys. 1.** Rezystywność papieru impregnowanego (a) oraz polietylenu termoplastycznego (b) dla różnych wartości temperatury i natężenia pola elektrycznego

Przyjęto, w oparciu o literaturę, że zależność rezystywności od natężenia pola elektrycznego i temperatury najlepiej opisuje ciągła funkcja postaci [1, 6, 7]:

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{[\alpha(t-t_0)+\beta(E-E_0)]}, \quad (3)$$

gdzie:  $\rho_0$  — rezystywność odniesienia, wyznaczona przy natężeniu pola elektrycznego  $E_0$  i temperaturze  $t_0$ ;  $\alpha$  — współczynnik określający podatność rezystywności na zmiany pod wpływem temperatury;  $\beta$  — współczynnik określający podatność rezystywności na zmiany pod wpływem pola elektrycznego.

Wartości współczynników materiałowych  $\alpha$  i  $\beta$  zależą od właściwości materiału izolacyjnego. Współczynniki odpowiadające badanym materiałom wyznaczono

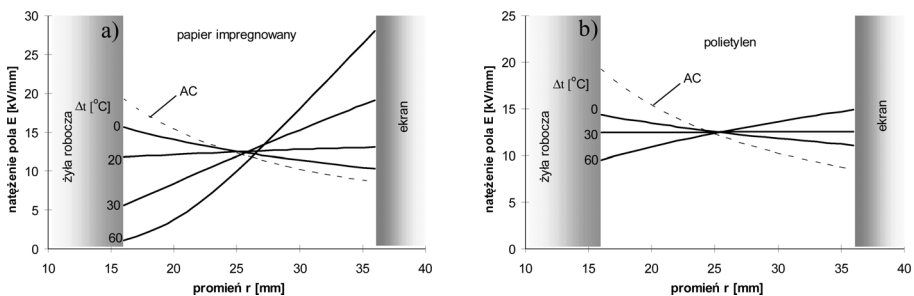
w oparciu o aproksymację wyników pomiarów rezystywności funkcją opisaną równaniem (3). Wartości współczynników wynoszą odpowiednio  $\alpha = 0,101$ ,  $\beta = 0,074$  dla papieru impregnowanego i  $\alpha = 0,036$ ,  $\beta = 0,169$  dla polietylenu termoplastycznego.

#### 4. Wyznaczenie rozkładu natężenia pola elektrycznego

Wyznaczenie rozkładu natężenia pola elektrycznego wewnątrz kabla napięcia stałego wymaga uwzględnienia zarówno wymiarów geometrycznych układu izolacyjnego jak i zjawiska zmiany rezystywności materiału w funkcji temperatury i natężenia pola elektrycznego. Zatem rozkład natężenia pola elektrycznego w izolacji kabla jest funkcją spełniającą układ wspomnianych wcześniej równań (1) i (3).

Równanie (1) wynika z analizowanego układu geometrycznego, natomiast równanie (3) jest równaniem materiałowym, a jego współczynniki zależą od zastosowanego materiału izolacyjnego. Rozwiązanie powyższego układu równań wymaga także znajomości promieniowego rozkładu temperatury wewnątrz izolacji, który określony jest zależnością (2). Tego rodzaju układ nie podlega rozwiązaniu analitycznemu. Jedynym sposobem rozwiązania staje się metoda iteracyjna. Polega ona na wykonaniu ciągu kolejnych przybliżeń, z których każde następne jest bliższe ostatecznego rozwiązania [8, 5]. Algorytm iteracyjny został zaimplementowany w programie komputerowym, który posłużył do obliczania rozkładu natężenia pola.

Do obliczeń symulacyjnych przyjęto geometrię fizycznie istniejącego kabla napięcia stałego 250 kV, o promieniu żyły roboczej 16 mm i promieniu zewnętrznym izolacji 36 mm [2, 3]. Założono, że kabel jest kablem morskim ułożonym na dnie — gdzie temperatura otoczenia jest stała i wynosi około 4°C. Przyjęto dla potrzeb symulacji stałą temperaturę zewnętrznej warstwy izolacji jako 10°C. Temperatura wewnętrznej warstwy izolacji zależy od obciążenia prądowego kabla i może zmieniać się w szerokich granicach.



**Rys. 2.** Rozkład natężenia pola elektrycznego w izolacji papierowej (a) i polietylenowej (b) dla różnych wartości spadku temperatury w izolacji  $\Delta t$

Na rysunku 2 przedstawiono rozkłady natężenia pola elektrycznego dla obu materiałów izolacyjnych, dla różnych obciążeń prądowych kabla, którym odpowiadały różne temperatury żyły roboczej od 10°C do 70°C. Dla porównania wykreślono też

rozkłady natężenia pola dla napięcia przemiennego. W obu przypadkach dla niewielkich różnic temperatury między zewnętrzną i wewnętrzną powierzchnią izolacji  $\Delta t$  maksymalne natężenie pola występuje przy żyłce roboczej. Zwiększenie gradientu temperatury sprawia, że maksymalne natężenie przenosi się do zewnętrznego obszaru izolacji — w pobliże ekranu.

Dla dużych obciążeń prądowych maksymalne natężenie pola elektrycznego (występujące przy ekranie) może przyjąć wartość większą niż maksymalne natężenie pola elektrycznego, jakie wystąpiłoby przy napięciu przemiennym.

Zarówno dla papieru impregnowanego jak i dla polietylenu występuje zjawisko inwersji rozkładu natężenia pola elektrycznego. Efekt ten jest bardziej widoczny w przypadku izolacji papierowej. Posiada ona bowiem większy współczynnik temperaturowy rezystywności  $\alpha$ , który decyduje o podatności na inwersję. Wartość współczynnika poleowego rezystywności  $\beta$  ma również istotne znaczenie. Rezystywność materiału o większej wartości tego współczynnika będzie zmieniać się bardziej pod wpływem natężenia pola. Duża lokalna wartość natężenia pola spowoduje obniżenie rezystywności, co z kolei obniży wartość natężenia pola w danym obszarze. Występuje więc tutaj ujemne sprzężenie zwrotne. Stąd materiał o większym współczynniku  $\beta$  (polietylen) posiada bardziej równomierny rozkład pola elektrycznego.

## 5. Wnioski

1. W kablach napięcia stałego występuje rezystancyjny rozkład natężenia pola elektrycznego w izolacji, który okazuje się poważnym problemem, jeśli materiał izolacyjny wykazuje silną zależność rezystywności od temperatury i natężenia pola.
2. Wzrost obciążenia prądowego kabla DC, czyli wzrost temperatury żyłki roboczej, powoduje inwersję rozkładu natężenia pola elektrycznego w izolacji. Zjawisko to może zachodzić do tego stopnia, że natężenie maksymalne występujące przy ekranie dla kabla obciążonego, może być większe niż natężenie pola przy żyłce kabla nieobciążonego.
3. Stopień inwersji rozkładu pola elektrycznego zależy od parametrów materiałowych  $\alpha$  i  $\beta$ . Korzystniejszy rozkład występuje w materiale charakteryzującym się niskim temperaturowym współczynnikiem rezystywności. Natomiast pewna podatność rezystywności dielektryka na zmiany pod wpływem natężenia pola elektrycznego jest korzystna ze względu na obniżanie maksimum natężenia pola i linearyzację rozkładu.
4. Rezystywność skrośną zarówno polietylenu jak i papieru impregnowanego można z powodzeniem aproksymować funkcją wykładniczą z parametrami materiałowymi  $\alpha$  i  $\beta$ , opisującymi zmienność rezystywności pod wpływem temperatury i natężenia pola elektrycznego. Dla badanych materiałów parametry te wynoszą odpowiednio  $\alpha = 0,101 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ,  $\beta = 0,074 \text{ mm/kV}$  dla papieru impregnowanego oraz  $\alpha = 0,036 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ,  $\beta = 0,169 \text{ mm/kV}$  dla polietylenu termoplastycznego.
5. Badając rozkłady pola w izolacji polietylenowej i z papieru syconego stwierdzono, że polietylen wykazuje mniejszą tendencję do inwersji. Można by to uznać za jego

przewagę nad papierem syconym, gdyby nie fakt generowania się w nim dużego ładunku przestrzennego utrzymującego się przez wiele godzin, co stwierdzono w wyniku rekonesansowej oceny ładunku przestrzennego. Minimalna tendencja papieru syconego do gromadzenia ładunku przestrzennego przesądza o powszechności stosowania tej izolacji w kablach wysokiego napięcia stałego.

## Literatura

- [1] **Salah Khalil M.:** *International Research and Development Trends and Problems of HVDC Cables with Polymeric Insulation.* IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 6, 1997, s. 35–47
- [2] **Rakowska A.:** *Kable podmorskie.* IV Ogólnopolskie Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć, Poznań – Kiekrz, 25–27 czerwca 1998, s. 203–208
- [3] **Terashima K.:** *Operational Experience of  $\pm 250$  kV Hokkaido-Honshu HVDC Submarine Cable.* Workshop on Underground Cables, Toronto, Canada, June 13–16 1994
- [4] **Suzuoki Y., Furuta T., Mizutani T., Ieda M., Yoshifuji N.:** *Study of effect of space charge in polyethylene by its direct probing.* IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, 3–6 June 1990, s. 401–404
- [5] **Graczkowski A., Nadolny Z., Palicki T., Mościcka H.:** *Badanie rozkładu natężenia pola elektrycznego w układzie izolacyjnym kabla napięcia stałego.* Projekt KBN nr 101/T10/97/13, Poznań 1999
- [6] **Boggs S., Kuang J.:** *High Field Effects in Solid Dielectrics.* IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 14, No. 6, 1998, s. 5–12
- [7] **Boggs S., Grace Ge Jiang:** *High Field Conductivity of Polyethylene.* 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, 25–29 August 1997, s. 31–34
- [8] *Komputerowe metody analizy pola elektromagnetycznego* — praca zbiorowa, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 1993

### ELECTRIC FIELD INTENSITY DISTRIBUTION IN POLYETHYLENE AND PAPER-IMPREGNATED INSULATION OF HIGH VOLTAGE DC CABLES

This paper describes electric field intensity distribution in polyethylene and paper-impregnated insulation of high voltage DC cables. The distribution was calculated on the basis of insulation resistivity measurements. The result of measurements presented in the article demonstrates complicated dependence of insulation resistivity on temperature and electric field intensity.

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