

ANALIZA WARUNKÓW STEROWANIA POŁA ELEKTRYCZNEGO W WYSOKONAPIĘCIOWYCH IZOLATORACH PRZEPUSTOWYCH

Bartłomiej ADAMCZYK¹, Barbara FLORKOWSKA²

1. Korporacyjne Centrum Badawcze ABB, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków
e-mail: bartlomiej.adamczyk@pl.abb.com tel:+48 12 433 44 16
2. Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział EAIiE – prof. dr hab. inż.
e-mail: beflor@agh.edu.pl tel:+48 12 617 37 61

Streszczenie: Uszkodzenia izolatorów przepustowych są jedną z głównych przyczyn awarii transformatorów wysokiego napięcia. O ich parametrach eksploatacyjnych decyduje zarówno proces technologiczny, jak i konstrukcja zastosowana dla danego poziomu napięcia. Elementami tej konstrukcji są ekrany przewodzące zastosowane w układzie izolacyjnym izolatora dla sterowania pola elektrycznego. Występujący wówczas pojemnościowy rozkład pola elektrycznego zależy od liczby ekranów, ich długości, a także od grubości i rodzaju materiałów izolacyjnych. W artykule przedstawiono symulacje komputerowe dla analizy warunków sterowania rozkładu pola elektrycznego w konstrukcji wysokonapięciowego izolatora przepustowego z uwzględnieniem w/w czynników.

Słowa kluczowe: izolator przepustowy, sterowanie rozkładu pola elektrycznego, modelowanie

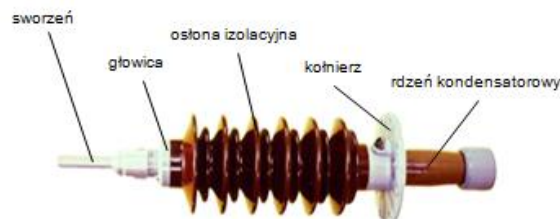
1. WSTĘP

Wysokonapięciowe izolatory przepustowe są jednymi z najbardziej istotnych elementów konstrukcyjnych urządzeń oraz stacji elektroenergetycznych. Ich głównym zadaniem jest przeprowadzanie torów prądowych przez przegrody i ściany w stacjach elektroenergetycznych oraz przez uziemione elementy konstrukcyjne urządzeń takich jak transformatory czy przekładniki. Tego typu izolatory najpowszechniej znajdują zastosowanie w transformatorach energetycznych i ze względu na niewielką odległość wysokonapięciowych elektrod od uziemionych części konstrukcyjnych, są one jednymi z najbardziej narażonych elektrycznie elementów transformatorów. Uszkodzenia izolatorów przepustowych stanowią przyczynę około 25-30% wszystkich awarii transformatorów energetycznych, przez co przepusty muszą cechować się bardzo wysoką niezawodnością [1,2]. Konieczne jest więc odpowiednie zaprojektowanie oraz wykonanie ich układu izolacyjnego, co pozwoli zapewnić większą niezawodność oraz dłuższy czas życia transformatora. Obecnie do projektowania izolatorów przepustowych oraz ich układów izolacyjnych wykorzystywane są specjalistyczne programy komputerowe.

W artykule przedstawiono wyniki symulacji komputerowych rozkładu potencjału oraz natężenia pola elektrycznego w konstrukcji wysokonapięciowego izolatora przepustowego.

2. PRZEPUSTY TRANSFORMATOROWE

Wysokonapięciowe izolatory przepustowe stosowane w transformatorach energetycznych to konstrukcje niesymetryczne, charakteryzujące się znacznie dłuższą częścią górną (poza kadzią transformatora) w stosunku do części dolnej (wewnątrz kadzi). Najważniejszymi elementami izolatorów przepustowych są: metalowy sworzeń, kondensatorowy rdzeń izolacyjny, osłony izolacyjne oraz głowica i kołnierz (rys.1) [3].



Rys.1. Konstrukcja typowego izolatora przepustowego [4]

Konstrukcja przepustów transformatorowych wydaje się bardzo prosta ale w rzeczywistości zaprojektowanie dobrego izolatora sprawia wiele trudności. Wynika to głównie z faktu, że w procesie projektowania należy uwzględnić nie tylko wymagania elektryczne ale również mechaniczne i cieplne. Wymiary głównego toru prądowego, izolacji wewnętrznej i zewnętrznej określa się na podstawie obliczeń elektrycznych, wyniki nie mogą być sprzeczne z wynikami obliczeń właściwości cieplnych i mechanicznych przepustu. Wiele problemów sprawia również wykonanie izolacji wewnętrznej zawierającej rdzeń kondensatorowy z ekranami sterującymi pole elektryczne.

Obecnie rdzenie kondensatorowe przepustów zawierają izolację miękką (papier izolacyjny nasycony olejem) lub twardą (papier lub włókno utwardzone żywicą). Rdzenie z izolacją twardą i miękką są pod względem konstrukcyjnym bardzo podobne, ale różnią się technologią wykonania oraz parametrami zastosowanych materiałów.

Osłony przepustów wykonywane są przeważnie z porcelany elektrotechnicznej, chociaż ostatnio istnieje tendencja do zastępowania porcelany izolacją kompozytową wykonaną z gumy silikonowej. Osłony mają zapewnić

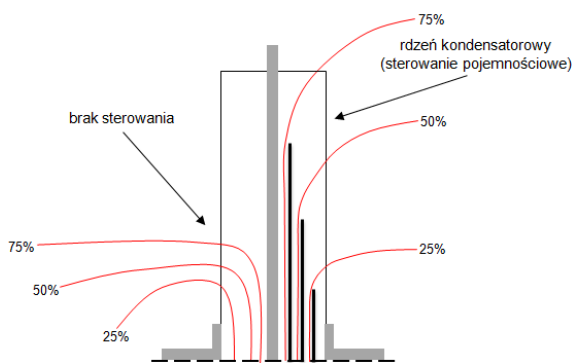
odpowiednią ochronę przepustu od wpływu warunków otoczenia oraz muszą wykazywać odpowiednio wysokie napięcie przeskoku i przebicia [2,3].

Prawidłowo zaprojektowany i wykonany przepust powinien pracować bezawaryjnie przez kilkadziesiąt lat.

3. STEROWANIE ROZKŁADEM POLA ELEKTRYCZNEGO

Wysokonapięciowe izolatory przepustowe mogą posiadać izolację o niesterowanym (izolatory stacyjne) lub sterowanym (izolatory aparatowe) polu elektrycznym.

Sterowanie pola elektrycznego w przepustach transformatorowych odbywa się metodą pojemnościową, która polega na zwiększeniu pojemności układu w części, w której występują największe gradienty potencjału (rys.2). Sterowanie uzyskuje się dzięki zastosowaniu wewnętrznych ekranów wykonanych z folii aluminiowej lub papieru półprzewodzącego. Poszczególne ekrany są od siebie oddzielone warstwami materiału izolacyjnego. Taki układ izolacyjny zawiera od kilku do kilkadziesiątu współosiowych warstw sterujących o okładzinach, których długość zmniejsza się wraz z oddalaniem się od elektrody wysokonapięciowej [2,3,5,6].

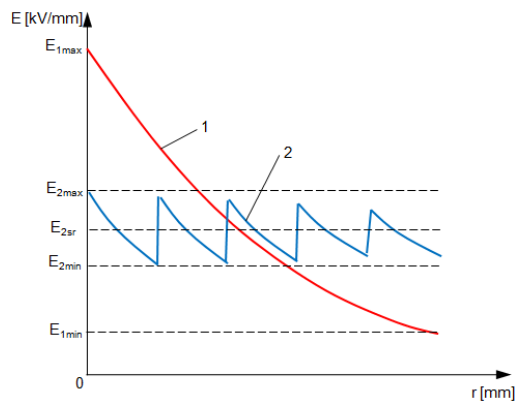


Rys.2. Wpływ zastosowania ekranów przewodzących na rozkład potencjału elektrycznego w izolatorze przepustowym

Najważniejszym zadaniem sterowania pola elektrycznego jest zmniejszenie nierównomierności rozkładu pola elektrycznego wewnątrz materiału izolacyjnego. Na rozkłady potencjału oraz natężenia pola elektrycznego można wpływać przez odpowiedni dobór liczby, długości i materiału ekranów. Dobór powinien być przeprowadzony w taki sposób aby uzyskać jak najbardziej równomierne rozkłady składowej promieniowej E_r i osiowej E_z natężenia pola elektrycznego. Należy zatem dążyć do równomiernego podziału napięcia pomiędzy kolejnymi ekranami oraz do odpowiedniego doboru długości okładzin sterujących w kierunku osiowym [2,5].

Istnieją trzy warianty sterowania rozkładu pola elektrycznego w izolatorach przepustowych: zachowanie stałości składowej promieniowej E_r natężenia pola elektrycznego, zachowanie stałości składowej osiowej E_z natężenia pola elektrycznego oraz zachowanie stałości stosunku obu składowych natężenia pola elektrycznego [3].

W zależności od wybranego wariantu sterowania pola elektrycznego uzyskuje się rdzenie kondensatorowe różniące się długościami ekranów oraz odległościami między nimi. Przykładowy rozkład składowej promieniowej natężenia pola elektrycznego w rdzeniu izolatora przepustowego przedstawiono na rysunku 3. Pojemnościowe sterowanie pola elektrycznego znajduje zastosowanie nie tylko w przepustach ale również w głowicach kablowych.



Rys.3. Przykładowy rozkład składowej promieniowej E_r natężenia pola elektrycznego w rdzeniu izolacyjnym: 1 – bez sterowania, 2 – sterowanie pojemnościowe (5 ekranów)

4. ŚRODOWISKO SYMULACYJNE

Symulacje komputerowe zostały wykonane w programie COMSOL Multiphysics. Jest to środowisko symulacyjne bazujące na metodzie elementów skończonych (MES). W typowym procesie symulacyjnym można wyróżnić kilka charakterystycznych etapów: wybór odpowiedniego modułu obliczeniowego, budowa geometrii modelowanego obiektu, zdefiniowanie parametrów materiałowych i warunków brzegowych, dyskretyzacja modelu oraz prezentacja wyników symulacji.

W analizowanym przypadku do obliczeń zostały wykorzystane wbudowane moduły obliczeniowe „Quasi-Static, Electric” z analizą „time-harmonic”. Potencjał elektryczny w każdym punkcie przestrzeni jest otrzymywany przez rozwiązanie równania [7]:

$$-\nabla \cdot ((\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\nabla V - J^e) = 0 \quad (1)$$

gdzie: σ – przewodność elektryczna, ω – pulsacja, ϵ_r – względna przenikalność elektryczna, ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni, V – potencjał elektryczny, J^e – gęstość prądu.

Następnie, potencjał elektryczny V wykorzystywany jest do obliczenia wartości natężenia pola elektrycznego E z zależności:

$$E = -\nabla V \quad (2)$$

5. MODELOWANIE

Symulacje zostały wykonane w osiowosymetrycznej przestrzeni 2D. Dodatkowo, analizie została poddana tylko górna część przepustu – znajdująca się poza kadzią transformatora.

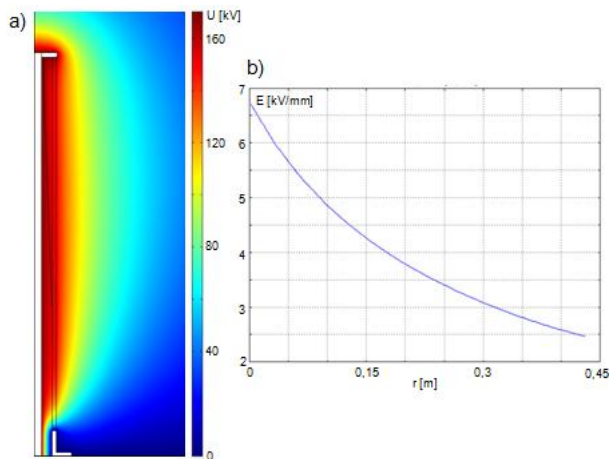
Model symulacyjny przepustu zawierał następujące elementy: sworzeń oraz kołnierz wykonane z aluminium – o konduktywności σ_{al} , izolację papierowo-olejową o przenikalności ϵ_{po} i konduktywności σ_{po} , izolację olejową o przenikalności ϵ_o i konduktywności σ_o , osłonę porcelanową o przenikalności ϵ_p i konduktywności σ_p , ekrany z folii aluminiowej lub papieru półprzewodzącego o konduktywnościach odpowiednio: σ_{al} i σ_{pp} i grubości 20 μm .

W pracy analizowano następujące przypadki:

- przepust bez ekranów sterujących,
- przepust z ekranami z folii aluminiowej – wpływ liczby ekranów,
- przepust z ekranami z papieru półprzewodzącego – wpływ przewodności ekranów.

6. WYNIKI SYMULACJI KOMPUTEROWYCH

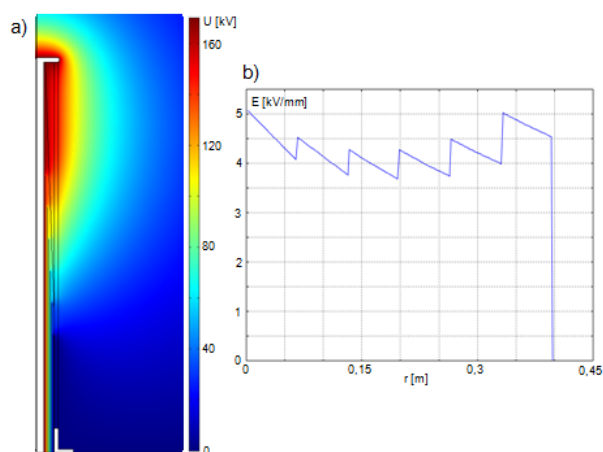
Symulacje zostały wykonane dla izolatora przepustowego w izolacji papierowo-olejowej na napięcie znamionowe 170 kV i prąd 1,6 kA. Na rysunkach 4 - 9 przedstawiono obrazy potencjału V oraz wykresy rozkładu składowej promieniowej E_r natężenia pola elektrycznego w izolatorze przepustowym dla różnych konstrukcji układu izolacyjnego.



Rys.4. Obraz potencjału elektrycznego V w izolatorze przepustowym (a) oraz rozkład składowej promieniowej E_r natężenia pola elektrycznego w obrębie uziemionego kołnierza (b) (brak sterowania pola elektrycznego)

W izolatorze przepustowym bez ekranów sterujących (rys.4) występuje bardzo nierównomierny rozkład składowej E_r natężenia pola elektrycznego. Jest to spowodowane bardzo dużym gradientem potencjału w obrębie kołnierza.

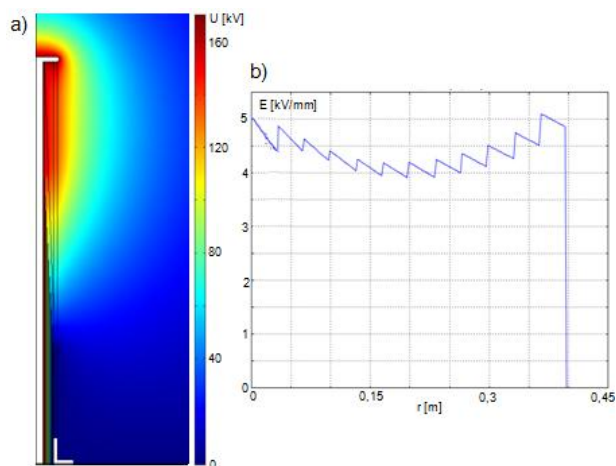
Wprowadzenie okładzin sterujących do układu izolacyjnego spowodowało równomierny podział napięcia pomiędzy poszczególnymi ekranami przez co zmniejszyła się wartość maksymalna oraz nierównomierność pola elektrycznego w okolicy kołnierza (rys.5).



Rys.5. Obraz potencjału elektrycznego V w izolatorze przepustowym (a) oraz rozkład składowej promieniowej E_r natężenia pola elektrycznego w obrębie uziemionego kołnierza (b) (6 aluminiowych ekranów sterujących)

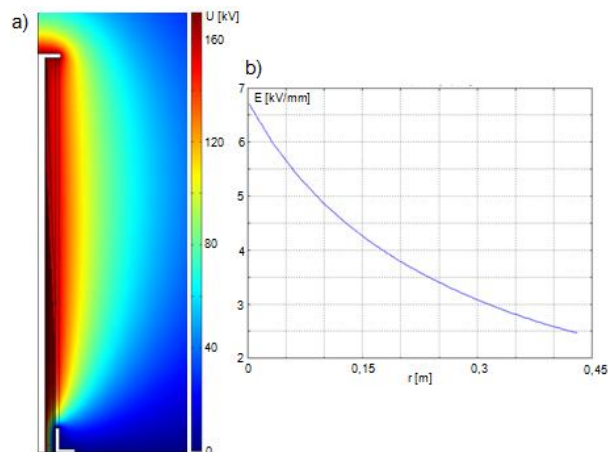
Zastosowanie większej liczby ekranów sterujących, praktycznie nie zmieniło wartości natężenia pola elektrycznego w obrębie kołnierza ale jeszcze bardziej zmniejszyło jego nierównomierność (rys.6). Należy jednak pamiętać, że osiągnięcie równomierności pola elektrycznego w kierunku promieniowym odbywa się kosztem bardziej nierównomiernego rozkładu pola elektrycznego w kierunku osiowym.

Wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego w analizowanej konstrukcji izolatora przepustowego mogą różnić się od wartości przedstawianych na wykresach, ponieważ po wprowadzeniu ekranów sterujących największe natężenia elektryczne występują na ich krańcach. Są to miejsca bardzo narażone na oddziaływanie wyładowań niezupełnych.



Rys.6. Obraz potencjału elektrycznego V w izolatorze przepustowym (a) oraz rozkład składowej promieniowej E_r natężenia pola elektrycznego w obrębie uziemionego kołnierza (b) (12 aluminiowych ekranów sterujących)

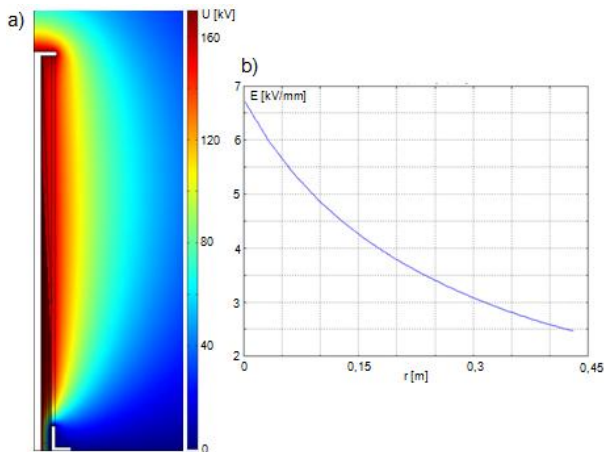
Równomierny rozkład pola elektrycznego można osiągnąć również dzięki zastosowaniu ekranów wykonanych z papieru półprzewodzącego. W tym przypadku konieczne jest zastosowanie papieru o odpowiednio wysokiej przewodności. Na rysunkach 7 - 9 znajdują się obrazy potencjału oraz rozkłady pola elektrycznego w przepustach z ekranami wykonanymi z papieru półprzewodzącego o różnych przewodnościach. Do analizy wpływu materiału ekranów na narażenia elektryczne przepustów wybrano przypadek z 12 warstwami sterującymi.



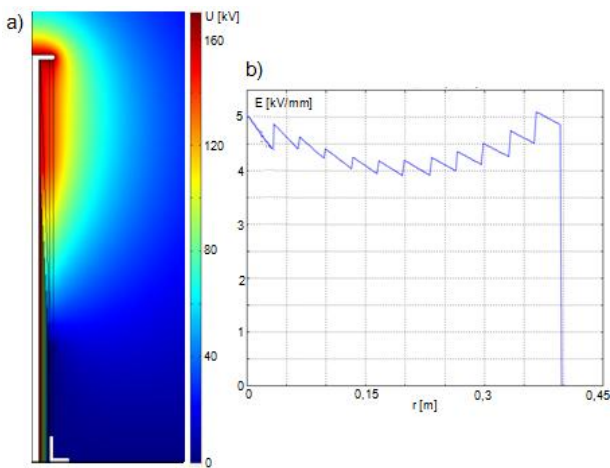
Rys.7. Obraz potencjału elektrycznego V w izolatorze przepustowym (a) oraz rozkład składowej promieniowej E_r natężenia pola elektrycznego w obrębie uziemionego kołnierza (b) (12 ekranów sterujących-papier o przewodności $\sigma=10^{-9}$ S/m)

Ekranu sterujące wykonane z papieru o przewodności 10^{-9} S/m (rys.7) nie spowodowały żadnej zmiany w porównaniu do przykładu bez sterowania pola elektrycznego. Podobnie jest w przypadku ekranów z papieru o przewodności 10^{-6} S/m (rys.8). Widoczne różnice pojawiają się dopiero od przewodności papieru wynoszącej około 10^{-4} S/m. Na rysunku 9 zamieszczone są wyniki symulacji dla przepustu z ekranami o przewodności 1 S/m. Przewodność elektryczna tego rzędu powoduje uzyskanie

takiego rozkładu potencjału oraz pola elektrycznego jak w przypadku zastosowania ekranów aluminiowych.



Rys.8. Obraz potencjału elektrycznego V w izolatorze przepustowym (a) oraz rozkład składowej promieniowej E_r natężenia pola elektrycznego w obrębie uziemionego kołnierza (b) (12 ekranów sterujących-papier o przewodności $\sigma=10^{-6}$ S/m)



Rys.9. Obraz potencjału elektrycznego V w izolatorze przepustowym (a) oraz rozkład składowej promieniowej E_r natężenia pola elektrycznego w obrębie uziemionego kołnierza (b) (12 ekranów sterujących-papier o przewodności $\sigma=1$ S/m)

7. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki symulacji komputerowych rozkładu potencjału oraz natężenia pola elektrycznego w wysokonapięciowym izolatorze przepustowym oraz analizę wpływu różnych czynników na wartości natężenia pola elektrycznego. Symulacje wykazały, że zmniejszenie nierówności pola elektrycznego w obszarze, w którym występują bardzo duże gradienty potencjału, można uzyskać zarówno przez zmianę geometrii

układu izolacyjnego (liczby i długości ekranów), jak i przez zmianę parametrów materiałowych. W tabeli 2 zostały przedstawione wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego obliczone podczas symulacji.

Tabela 2. Wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego w analizowanych konstrukcjach izolatora przepustowego

Przypadek	Brak ekranów	Liczba ekranów		Przewodność ekranów [S/m]		
		6	12	10^{-9}	10^{-6}	1
E_{max} [kV/mm]	6,6	5,5	5,2	6,6	6,6	5,2

Sterowanie pola elektrycznego w izolatorach przepustowych jest konieczne z praktycznego punktu widzenia ponieważ pozwala uzyskać korzystniejsze warunki pracy układu izolacyjnego. Wiąże się to niestety z bardziej kłopotliwym procesem technologicznym.

Symulacyjne programy komputerowe są bardzo przydatne w projektowaniu i optymalizacji urządzeń elektroenergetycznych oraz dają wiele możliwości analizy wpływu różnych czynników na narażenia jakim poddane są układy izolacyjne urządzeń.

8. LITERATURA

- Smith D., McMeekin S., Stewart B., Wallace P.: Transformer Bushings – Modelling of Electric Field and Potential Distributions within Oil Impregnated Paper with Single and Multiple Spherical Cavities, 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010
- Gacek Z.: Technika wysokich napięć. Izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce. Przepięcia i ochrona przed przepięciami, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999
- Gacek Z.: Kształtowanie wysokonapięciowych układów izolacyjnych stosowanych w elektroenergetyce, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002
- www.abb.com
- Florkowska B.: Wytrzymałość elektryczna gazowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Wydawnictwa AGH, Kraków 2003
- Hesamzadeh M.R., Hosseinzadeh N., Wolfs P.: An advanced optimal approach for high voltage AC bushing design, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, no. 2, pp. 461-466, April 2008
- Comsol Multiphysics 3.5: AC/DC Module User's Guide

ANALYSIS OF ELECTRIC FIELD GRADING CONDITIONS IN HIGH VOLTAGE TRANSFORMER BUSHING

Keywords: bushing, electric field grading, modelling

Abstract: Failure of bushing is one of the major reasons for power transformer failures. Condenser bushings contain conductive foils (screens) for electric field grading purposes. The capacitive electric field distribution in bushing depends on screens number, length and thickness and types of insulation materials. In this article the simulation results of electric potential and electric field distribution in high voltage bushing are presented.