

Streszczenie

Wysokonapięciowe układy izolacyjne urządzeń elektrycznych mają kluczowe znaczenie dla zapewnienia wysokiej niezawodności działania sieci i systemów elektroenergetycznych. Czas życia izolacji jest limitowany przez procesy starzeniowe typu *intrinsic* i *extrinsic*, zachodzące w dielektrykach. Druga grupa procesów jest związana z występowaniem defektów strukturalnych wewnątrz materiału izolacyjnego. W dielektrykach stałych mogą one mieć np. postać inkluzji lub mikroinkluzji gazowych oraz pęknięć i delaminacji struktury materiałów. W pewnych warunkach defekty takie mogą być źródłami wyładowań niezupełnych (*wnz*). Ich destrukcyjne oddziaływanie na dielektryk prowadzi zwykle do niekorzystnych przemian strukturalnych, co w dłuższym okresie czasu skutkuje obniżeniem lub całkowitą utratą wytrzymałości elektrycznej.

Zakres prac prowadzonych w licznych ośrodkach badawczych w obszarze tematycznym wyładowań niezupełnych dotyczy w szczególności rozpoznania i badania czynników oraz warunków wpływających na powstawanie i rozwój *wnz*, w tym również metodami modelowania numerycznego. Niniejsza praca należy do tego nurtu badań, bowiem skupia się nad analizą warunków powstawania wyładowań niezupełnych w zamkniętych inkluzjach gazowych zlokalizowanych w układach izolacyjnych wykonanych z dielektryków stałych. W rozprawie przedstawiono opracowany w tym celu numeryczny model polowy, pozwalający na analizę powstawania *wnz* w układach izolacyjnych napięcia przemiennego *AC* i stałego *DC*, w warunkach istniejącego w izolacji gradientowego pola temperatury. Pola takie są charakterystyczne dla izolacji obciążonych kabli *WN*, w których żyła kablowa jest wewnętrznym źródłem ciepła. Dzięki połączeniu możliwości programu COMSOL 6.0 z procedurami programu Matlab uzyskano możliwość analizy sekwencji fazowych (dla napięć *AC*) lub czasowych (dla napięć *DC*) impulsów *wnz*. Dla napięcia przemiennego modelowane sekwencje impulsów *wnz* gromadzono w formie obrazów fazowo-rozdzielczych φ - q - n . W ten sposób uzyskano możliwość odniesienia wyników symulacji na modelach numerycznych do wyników pomiarów laboratoryjnych, przeprowadzonych na modelach fizycznych układów izolacyjnych z inkluzjami gazowymi, o określonej geometrii i parametrach materiałów dielektrycznych.

W badaniach analizowano wpływ różnych czynników fizycznych na powstawanie wyładowań niezupełnych w inkluzjach gazowych: napięcia probierczego i jego częstotliwości, kształtu i rozmiaru inkluzji gazowej oraz jej położenia i orientacji w układzie izolacyjnym, wartości przenikalności elektrycznej i rezystywności skrośnej dielektryka stałego otaczającego inkluzję oraz temperatury. Wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów, obrazów fazowo-rozdzielczych i tabel. Sformułowano oryginalne wnioski dotyczące wpływu rozmiaru płaskiej inkluzji gazowej na pojawienie się efektu rozładowania jej ładunku w więcej niż pojedynczym impulsie *wnz*. Korzystając z numerycznego modelu elektro-termicznego kabli *HVDC* z izolacją *XLPE* oszacowano wielkość krytycznego rozmiaru inkluzji sferycznej, w funkcji jej położenia, w izolacji kabla obciążonego i nieobciążonego.

24.06.2024 r.

Robert Milewski

Abstract

High-voltage insulation systems of electrical devices are of key importance to ensure high operational reliability of power networks and systems. The lifetime of insulation is limited by *intrinsic* and *extrinsic* aging processes occurring in dielectrics. The second group of processes is related to the occurrence of structural defects inside the insulating material. In solid dielectrics, they may take the form of, for example, gaseous inclusions or micro-inclusions, as well as protrusions, cracks and delamination of the material structure. Under certain conditions, such defects may be sources of *partial discharges (PD)*. Their destructive effect on the dielectric usually leads to unfavorable structural changes, which in the long run may lead to a loss of electrical strength.

The scope of work carried out in numerous research centers in the field of partial discharges concerns in particular the identification and study of factors and conditions influencing the formation and development of *PD*, including using numerical modeling methods. This work belongs to this line of research, as it focuses on the analysis of the conditions for the formation of partial discharges in closed gas inclusions located in insulating systems made of solid dielectrics. The dissertation presents a numerical field model developed for this purpose, which allows for the analysis of *PD* formation in *AC* and *DC* voltage insulation systems, under the conditions of the gradient temperature field existing in the insulation. Such fields are characteristic of the insulation of loaded *HV* cables, in which the cable core is an internal heat source. By combining the capabilities of the COMSOL 6.0 program with the procedures of the Matlab program, it was possible to analyze phase sequences (for *AC* voltages) or time sequences (for *DC* voltages) of *PD* pulses. For *AC* voltage, the modeled *PD* pulse sequences were collected in the form of phase-resolved φ - q - n patterns. In this way, it was possible to relate the simulation results on numerical models to the results of laboratory measurements carried out on physical models of insulating systems with gas inclusions, with specific geometry and parameters of dielectric materials.

The research analyzed the influence of various physical factors on the formation of partial discharges in gas inclusions: testing voltage and its frequency, shape and size of the gas inclusion and its position and orientation in the insulating system, the value of electrical permittivity and volume resistivity of the solid dielectric surrounding the inclusion, and temperature. The research results are presented in the form of graphs, phase-resolved images and tables. Original conclusions were formulated regarding the influence of the size of a flat gas inclusion on the appearance of the effect of discharging its electric charge in more than a single *PD* pulse. Using a numerical electro-thermal model of *HVDC* cables with *XLPE* insulation, the critical size of the spherical inclusion, as a function of its position, was estimated in the loaded and unloaded cable insulation.

24.06.2024r.

Renata M. M. M.