

doi:10.15199/48.2024.04.10

Wpływ pola magnetycznego na dynamikę wyładowań niezupełnych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia

Streszczenie. Niezawodność i czas pracy urządzeń elektrycznych mogą ograniczać zjawiska występujące w ich układach izolacyjnych pod wpływem pola elektrycznego. Jedną z metod, mającą szczególne znaczenie dla oceny stanu układów izolacyjnych średniego i wysokiego napięcia jest pomiar wyładowań niezupełnych (wnz). W artykule przedstawiono wpływ pola magnetycznego na dynamikę wyładowań niezupełnych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia. Problem ten dotyczy zarówno układów izolacyjnych w obszarze przesyłu i dystrybucji energii elektrycznej, urządzeń przemysłowych, jak i transportu m.in. samochodów elektrycznych, trakcji. We wszystkich urządzeniach elektroenergetycznych przewodzących prąd elektryczny, pole magnetyczne nakłada się na pole elektryczne, wpływając w ten sposób na mechanizm wyładowań niezupełnych. Zaobserwowano, że wzajemne oddziaływanie pól elektrycznego i magnetycznego wpływa na dynamikę wyładowań niezupełnych – w artykule przedstawiono przykłady równoległej i prostopadłej wzajemnej orientacji tych pól. Zastosowana fazowo-rozdzielcza technika pomiarowa wnz pozwala na określenie wpływu pola magnetycznego w modelowym układzie elektrod oraz wizualizację ilościową w postaci diagramów sekwencji czasowych impulsów wyładowań. Symulacja trajektorii elektronów w warunkach działania równoczesnego pola elektrycznego i magnetycznego uwiarygodniła zmiany ich trajektorii w stosunku do obecności tylko pola elektrycznego. Przedstawione wyniki eksperymentów mogą przyczynić się do rozwoju metodyki pomiaru wyładowań niezupełnych przy superpozycji pól elektrycznego i magnetycznego, a także lepszemu poznaniu podstawowych cech ich mechanizmów fizycznych. Zaobserwowany efekt modulacji dynamiki wyładowań niezupełnych dodatkowo przez pole magnetyczne, może mieć znaczenie w diagnostyce układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych.

Abstract. The reliability and operating time of electrical devices may be limited by phenomena that occur in their insulation systems under the influence of an electric field. One of the methods of particular importance for the assessment of the condition of medium- and high-voltage insulation systems is the measurement of partial discharges (PD). The article presents the influence of the magnetic field on the dynamics of partial discharges in high-voltage insulation systems. This problem applies to both insulation systems in the area of power transmission and distribution, industrial equipment, as well as transportation, e.g. electric vehicles, traction. In all electrically conductive power devices, the magnetic field is superimposed on the electric field, affecting the partial discharge mechanism. It was observed that the mutual interaction of electric and magnetic fields affects the dynamics of partial discharges - the article presents examples of parallel and perpendicular mutual orientation of these fields. The applied phase-resolved PD measurement technique allows for determining the influence of the magnetic field in the model electrode system and for quantitative visualization in the form of diagrams of time sequences of discharge pulses. Simulation of the electron trajectories under conditions of simultaneous electric and magnetic fields revealed changes in their trajectories in relation to the presence of only the electric field. The presented results of the experiments may contribute to the development of a methodology for measuring partial discharges with the superposition of electric and magnetic fields, as well as to a better understanding of the basic characteristics of their physical mechanisms. The observed effect of partial discharge dynamics modulation, additionally by the magnetic field, may be important in the diagnostics of insulation systems of power equipment. **(The influence of a magnetic field on the dynamics of partial discharges in high-voltage insulation systems)**

Słowa kluczowe: wyładowania niezupełne, pole magnetyczne, wysokie napięcie, diagnostyka.

Keywords: partial discharges; magnetic field; electrical insulation, diagnostics.

Wstęp

Badania diagnostyczne wysokonapięciowych urządzeń elektrycznych (np. transformatorów energetycznych, kabli elektroenergetycznych, obiektów w segmencie transportowym) obejmują zespół metod i pomiarów, których celem jest głównie ocena stanu ich układów izolacyjnych [1-5]. Niezawodność i czas pracy tych urządzeń mogą ograniczać zjawiska i zapoczątkowane przez nie procesy fizykochemiczne w materiałach izolacyjnych, rozwijające się w polu elektrycznym. Dopuszczalna wartość natężenia pola elektrycznego ustalana na etapie projektowania tych urządzeń jest odniesiona do wartości wytrzymałości elektrycznej zastosowanych materiałów izolacyjnych. Jedną z metod, mającą szczególne znaczenie w badaniach diagnostycznych urządzeń elektroenergetycznych średniego i wysokiego napięcia jest pomiar wyładowań niezupełnych (wnz), których destrukcyjne działanie w izolacji stanowi istotne zagrożenie trwałości układów izolacyjnych. Mechanizmy inicjowania wyładowań niezupełnych w różnych rodzajach materiałów izolacyjnych, takich jak: dielektryki stałe naturalne i syntetyczne, o strukturze jednorodnej lub warstwowej, dielektryki ciekłe, są przedmiotem badań eksperymentalnych w licznych ośrodkach naukowych i przemysłowych. Badania te dotyczą różnych form wyładowań elektrycznych w tym: wyładowań w wewnętrznych strukturach dielektryków stałych, wyładowań powierzchniowych, wyładowań typu koronowego [6-10]. Trajektoriami ruchu ładunków elektrycznych w wyładowaniu są linie pola elektrycznego,

których gęstość wyznacza wartość natężenia pola elektrycznego w różnych jego obszarach. Powstające silnie zjonizowane kanały – strimery, których formowanie się jest szczegółowo opisane w teoriach wyładowań elektrycznych w gazach znanych jako teoria lawin elektronowych Townsenda, teoria kanałowa Raethera-Meeka i innych [11-12] – są efektem zjawisk w polu elektrycznym: jonizacji przestrzennej, tworzenia się lawin elektronowych, fotojonizacji, emisji powierzchniowej elektronów. W wymienionych teoriach oraz publikowanych badaniach wyładowań elektrycznych, jako podstawę opisu warunków ich inicjowania i rozwoju przyjmuje się działanie pola elektrycznego. W przypadku urządzeń elektrycznych, których parametrem znamionowym oprócz napięcia jest natężenie prądu (obiekty elektroenergetyki, urządzenia przemysłowe, energoelektronika, trakcja, pojazdy elektryczne), izolacja elektryczna jest równocześnie eksponowana na działanie pola elektrycznego i pola magnetycznego [13-18]. Oznacza to oddziaływanie pola magnetycznego na zjawiska inicjowane w dielektrykach w polu elektrycznym. Trajektoriami kanałów wyładowań elektrycznych są wówczas linie pola elektrycznego, modyfikowane obecnością pola magnetycznego, wzdłuż których poruszają się w gazie pod wpływem siły Lorentza naładowane cząstki (elektrony, jony).

W literaturze prezentowane są opisy form wyładowań elektrycznych modyfikowanych przez pole magnetyczne, na przykład ulotu elektrycznego przy napięciu stałym w niskiej próżni [19], wyładowań rejestrowanych w paśmie ultra

wysokich częstotliwości (UHF) [20, 21], drzewienia elektrycznego [22-24]. Szczególne znaczenie w ocenie wpływu pola magnetycznego ma wartość indukcji magnetycznej, która na przykład w transformatorach może wynosić do 700 mT [25], natomiast w kablach elektroenergetycznych badanych przy indukcji równej 550 mT obserwowano wpływ pola magnetycznego na drzewienie elektryczne w izolacji z polietylenu usieciowanego (XLPE) [26]. W przypadku silników przemysłowych indukcja magnetyczna w szczelinach powietrznych może osiągnąć wartości rzędu Tesli [2]. Z kolei indukcja magnetyczna w izolacji magnesów nadprzewodzących może przekraczać nawet kilka Tesli [27]. Problem wpływu pola magnetycznego na mechanizm wyładowań niezupełnych dotyczy – oprócz obiektów elektroenergetyki – również urządzeń energoelektronicznych np. w obszarze elektromobilności pracujących na niskim i średnim napięciu, zasilanych zwykle z przekształtników.

Analiza teoretyczna i wyniki badań laboratoryjnych wpływu pola magnetycznego na mechanizm wyładowań niezupełnych wykonanych w układzie modelowym reprezentującym niejednostajny rozkład pola elektrycznego, przedstawione są w artykule. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych oraz symulacje wpływu pola magnetycznego na wartości podstawowych wielkości charakteryzujących wyładowania, co może stanowić uzupełnienie teorii opisujących mechanizm fizyczny tych zjawisk.

Podstawy teoretyczne ruchu ładunków elektrycznych w wyładowaniu w polu elektrycznym i magnetycznym

Pomiary wyładowań niezupełnych, wchodzące w zakres badań diagnostycznych wysokonapięciowych układów izolacyjnych, mają na celu – w większości przypadków – ocenę stopnia niejednorodności struktury materiałów w tych układach ze względu na występowanie w nich defektów potehnologicznych lub powstałych pod wpływem narażeń eksploatacyjnych i stanowiących źródła wyładowań.

Podstawowe założenia przyjmowane w analizach teoretycznych mechanizmów wyładowań niezupełnych dotyczą: wartości i rozkładu natężenia pola elektrycznego w ich źródłach (rozkład jednostajny lub niejednostajny), rodzaju ośrodka oraz temperatury i ciśnienia. Dodatkowym czynnikiem, ważnym dla prawidłowej oceny warunków inicjowania i rozwoju wyładowań niezupełnych jest pole magnetyczne.

Skutki oddziaływania pola magnetycznego zależą od wartości jego natężenia, co w przypadku urządzeń elektroenergetycznych ma bezpośredni związek z wartością ich prądu obciążenia [17, 18, 21, 25-28].

Wyładowanie elektryczne jest ruchem naładowanych cząstek (elektrony, jony), tworzących w przypadku wyładowań w gazie, zjonizowane kanały tzw. strimery, ukierunkowane przez linie natężenia pola elektrycznego. Tory ruchu ładunków elektrycznych w wyładowaniu określone są jako ich trajektorie. Zasadę ruchu naładowanych cząstek w kanale wyładowania pod wpływem siły Lorentza w warunkach współdziałania pól elektrycznego E i magnetycznego B , ujętą w drugim prawie Newtona, opisuje równanie:

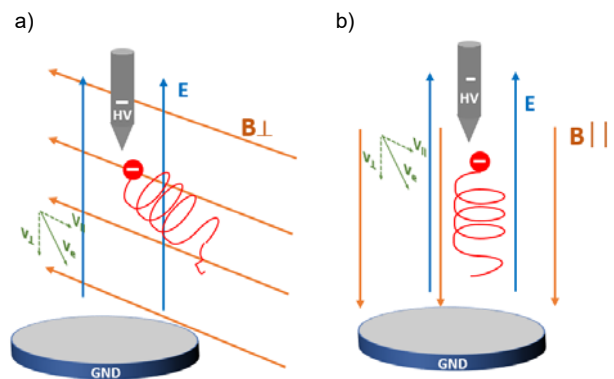
$$(1) \quad m \frac{d^2x}{dt^2} = q \left(E + \frac{dx}{dt} \times B \right)$$

w którym x – położenie cząstki naładowanej w kanale, t – czas, m – masa naładowanej cząstki, q – ładunek elektryczny, E – natężenie pola elektrycznego, B – indukcja magnetyczna.

Oprócz rodzaju wzajemnej orientacji pól elektrycznego E i magnetycznego B , również kierunek wektora prędkości cząstek naładowanych w kanale ma wpływ na kształt trajektorii wyładowania, na przykład spiralny lub cykloidalny [28, 29]. Częstotliwość f_B ruchu kołowego cząstek o ładunku q wokół wektora indukcji magnetycznej B wyraża wzór:

$$(2) \quad f_B = \frac{q}{2\pi m} B$$

Wizualizacje trajektorii ruchu cząstek o ujemnym ładunku q , przy dwóch rodzajach orientacji pól elektrycznego i magnetycznego – prostopadłej i równoległej, w układzie elektrod typu „ostrze-płyta” – przedstawia Rysunek 1.



Rys. 1. Przykład trajektorii ruchu cząstek o ujemnym ładunku elektrycznym, w układzie modelowym elektrod „ostrze-płyta”. Orientacja wektorów E i B : a) prostopadła (\perp), b) równoległa (\parallel).

Natężenie pola elektrycznego $E(x)$ wzdłuż osi wysokonapięciowej elektrody ostrzowej w konfiguracji elektrod „ostrze-płyta” opisuje równanie [30]:

$$(3) \quad E(x) = \frac{2U}{\ln\left(\frac{4d}{r}\right)} \cdot \frac{1}{2x+r-\frac{x^2}{d}}$$

gdzie: x – odległość od elektrody ostrzowej, d – odstęp elektrod, r – promień krzywizny elektrody ostrzowej.

Wnioski wynikające z analizy teoretycznej mogą zostać wykorzystane w symulacjach wpływu pola magnetycznego na mechanizm wyładowań niezupełnych oraz w interpretacji wyników badań eksperymentalnych.

Symulacje trajektorii wyładowań niezupełnych w polu elektrycznym i magnetycznym

Symulacje torów ruchu ładunków elektrycznych w wyładowaniu w polu elektrycznym niejednostajnym miały na celu wizualizację hipotetycznych trajektorii wyładowań w warunkach współdziałania pól elektrycznego i magnetycznego, przy orientacji prostopadłej i równoległej wektorów natężenia pola elektrycznego E i indukcji magnetycznej B . Torami ruchu ładunków w polu elektrycznym (bez pola magnetycznego, $B = 0$) są linie pola elektrycznego. W opisie warunków rozwoju wyładowań niezupełnych przyjęte zostały następujące założenia:

- modelowy układ elektrod typu „ostrze-płyta” jako przykład niejednostajnego rozkładu natężenia pola elektrycznego,
- elektrony i jony w kanałach wyładowań są efektem procesów jonizacji w polu elektrycznym,
- czas wyładowania jest rzędu nanosekund,
- nie występują interakcje między naładowanymi cząstkami w kanałach wyładowań.

Symulacje numeryczne przeprowadzone zostały w środowisku COMSOL Multiphysics [31]. Wykorzystano w nich równanie ruchu naładowanej cząstki (1) zapisane w

geometrii 3D. Sekwencja symulacji składa się z dwóch następujących po sobie etapów: w pierwszym obliczane są rozkłady natężenia pola elektrycznego i indukcji magnetycznej, drugi etap dotyczy ruchu naładowanych cząstek we współdziałających polach, z uwzględnieniem działających sił. Przyjęte założenia symulacyjne:

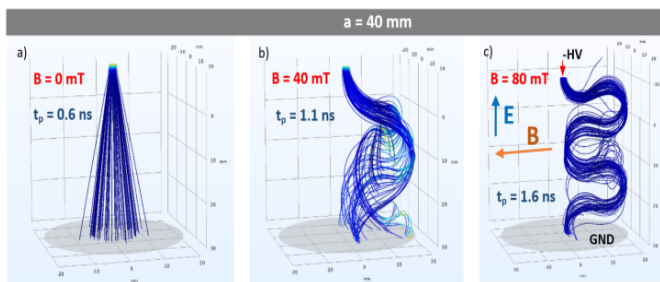
- źródło elektronów znajduje się przy wierzchołku wysokonapięciowej elektrody ostrzowej,
- w sekwencji uwalnianych jest 1000 naładowanych cząstek,
- w warunkach początkowych średnia energia kinetyczna cząstek wynosi 5 keV,
- odstęp między elektrodą i uziomioną płytą wynosi $d=40$ mm,
- czas propagacji pojedynczego wyładowania mieści się w nanosekundach, zatem w symulacjach przyjęto napięcie odzwierciedlające chwilową jego wartość na przebiegu sinusoidalnym, wartości napięcia: -10 kV i -16 kV.

Symulacje numeryczne pokazały zmiany trajektorii ruchu ładunków elektrycznych w wyładowaniach w polu elektrycznym pod wpływem równocześnie działającego pola magnetycznego o różnych wartościach indukcji magnetycznej B i przy dwóch rodzajach orientacji wektorów E i B : prostopadłej i równoległej.

Przypadek 1: indukcja B wynosi 0, 40 i 80 mT; orientacja prostopadła.

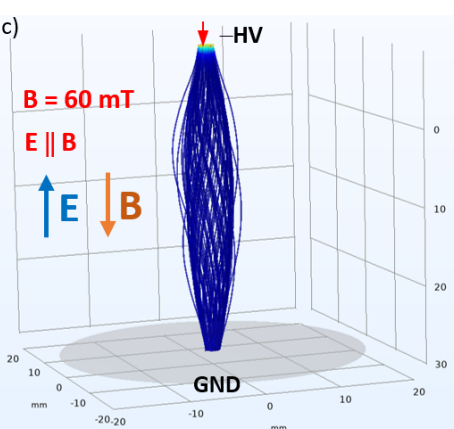
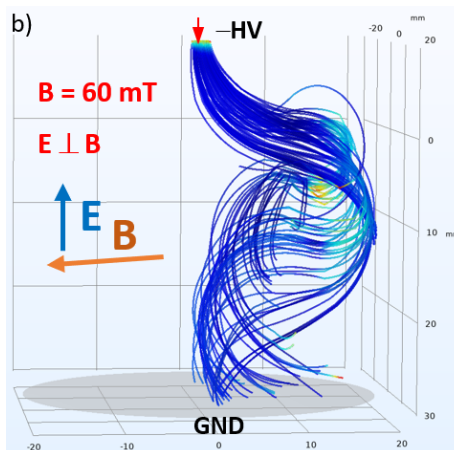
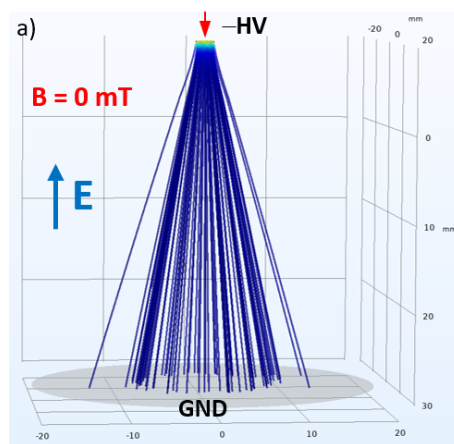
Przypadek 2: indukcja B wynosi 0 i 60 mT; orientacja prostopadła i równoległa.

W warunkach wyładowań w polu elektrycznym, gdy indukcja magnetyczna $B = 0$ (Rysunki 2a i 3a) torami ruchu ładunków elektrycznych są linie proste, reprezentujące linie pola elektrycznego. Pole magnetyczne o indukcji $B = 40$ mT powoduje skręcenie i odchylenie kanału wyładowania zgodnie z siłą Lorentza (Rysunek 2b). Zwiększenie wartości indukcji magnetycznej powoduje dalsze skręcenie kanału wokół osi pola magnetycznego z równoczesnym dryfem wzdłuż osi linii pola elektrycznego (Rysunek 2c).



Rys. 2. Porównanie trajektorii propagacji elektronów w układzie elektrod „ostrze-płyta” przy napięciu -10 kV i orientacji prostopadłej wektorów E i B ; indukcja magnetyczna: a) $B = 0$ mT; b) $B = 40$ mT; c) $B = 80$ mT [28].

Porównanie trajektorii ruchu ładunków elektrycznych w wyładowaniach w przypadku orientacji prostopadłej i równoległej wektorów E i B przedstawia Rysunek 3. Orientacja prostopadła sprzyja skręceniu i odchyleniu trajektorii (Rysunek 3b), natomiast w przypadku orientacji równoległej następuje wyraźne zwiększenie koncentracji ładunków w kanałach (Rysunek 3c). Znamienne jest wpływ pola magnetycznego na czas ruchu elektronów w odstępnie międzyelektrodowym, który w przypadku indukcji $B = 0$ wynosi 0,3 ns, a po zwiększeniu jej wartości do 40 mT i 60 mT wydłuża się odpowiednio do 0,5 ns i 0,8 ns. Charakterystyczne jest również zmniejszenie rozproszenia wiązki elektronów w kanale wyładowania pod wpływem pola magnetycznego i większe jej skupienie.



Rys. 3. Porównanie trajektorii propagacji elektronów w układzie elektrod „ostrze-płyta” przy napięciu -16 kV: a) $B = 0$; b) $B = 60$ mT orientacja prostopadła; c) $B = 60$ mT orientacja równoległa [29].

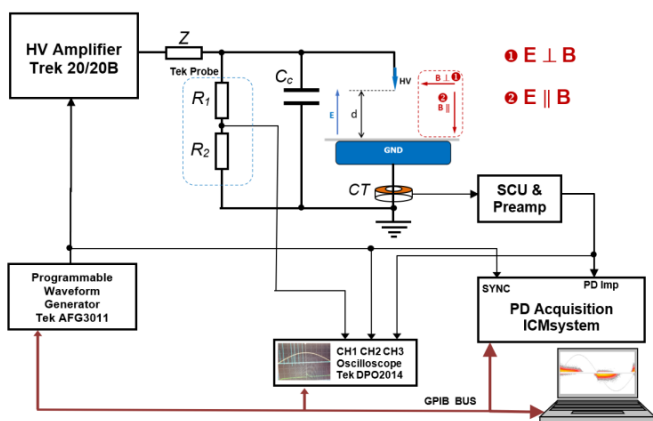
Obydwa rodzaje orientacji wektorów natężenia pola elektrycznego E i indukcji magnetycznej B mają wpływ na tory ruchu naładowanych cząstek w wyładowaniu, prowadząc do ich turbulencji i zmian trajektorii. W przypadku orientacji prostopadłej siły pól elektrycznego i magnetycznego mogą spowodować „owinięcie” pierwotnej trajektorii wokół osi pola magnetycznego i osłabienie a nawet zatrzymanie rozwoju wyładowania. W warunkach współdziałania pól następuje wydłużenie torów ruchu ładunków elektrycznych i zwiększenie energii przyspieszonych cząstek. Oznacza to większe prawdopodobieństwo jonizacji w kanale i większą liczbę wyładowań. Efekt ten zaobserwowano również w badaniach laboratoryjnych.

Rejestracja wyładowań niezupełnych w polu elektrycznym i magnetycznym

W badaniach laboratoryjnych wykonane zostały pomiary wyładowań niezupełnych w niejednostajnym polu elektrycznym i współdziałającym polu magnetycznym, przy orientacji prostopadłej (\perp) i równoległej (\parallel) wektorów natężenia pola elektrycznego E i indukcji magnetycznej B , z odniesieniem do stanu gdy indukcja magnetyczna B jest równa zero. Modelowy układ elektrod typu „ostrze- płyta” (Rysunek 1), charakteryzujący się silnie niejednostajnym rozkładem pola elektrycznego, był źródłem wyładowań w wyniku jonizacji przestrzennej powietrza w otoczeniu wysokonapięciowej elektrody ostrzowej. Statyczne pole magnetyczne stanowiły dwa magnesy neodymowe odpowiednio usytuowane względem osi układu elektrod dla uzyskania wymaganych orientacji wektorów E i B (w pozycji góra-dół względem elektrod przy ich orientacji równoległej oraz po obu stronach elektrody wysokonapięciowej w przypadku orientacji prostopadłej).

Układ pomiarowy

Układ pomiarowy wyładowań niezupełnych w polu elektrycznym i magnetycznym przedstawia Rysunek 4. Źródłem wysokiego napięcia sinusoidalnego był wzmacniacz (Trek 20/20B) sterowany z programowalnego generatora (Tektronix AFG 3011). W celach ochronnych i filtrujących na wyjściu wzmacniacza wysokonapięciowego zastosowano rezystor $Z = 450 \text{ k}\Omega$. Przebiegi impulsowe wyładowań niezupełnych rejestrowane za pomocą szerokopasmowego przekładnika prądowego (CT) umieszczonego w gałęzi układu elektrod, podlegały akwizycji z rozdzielczością fazową w trybie szerokopasmowym przy użyciu systemu ICM firmy Power Diagnostix, współpracującego z komputerem za pośrednictwem interfejsu GPIB [15]. Kondensator sprzęgający o pojemności $C_c = 1100 \text{ pF}$ w gałęzi równoległej do układu elektrod, zamykał pętlę wysokiej częstotliwości dla impulsów wyładowań niezupełnych. Sygnał synchronizacji podawany był z dzielnika rezystancyjnego R_1, R_2 , o impedancji wejściowej równej $100 \text{ M}\Omega$ i współczynniku tłumienia 1:1000 (TekProbe P6015A).



Rys. 4. Układ pomiarowy wyładowań niezupełnych w polu elektrycznym i magnetycznym (orientacja prostopadła wektorów E i B oznaczona jest ① i równoległa ②); CT — szerokopasmowy przekładnik prądowy, C_c — kondensator sprzęgający, R_1, R_2 — dzielnik rezystancyjny, SCU — filtr i przedwzmacniacz, d — odstęp elektrod $d = 40 \text{ mm}$.

Wysokonapięciowa, miedziana elektroda ostrzowa (promień krzywizny $r = 700 \mu\text{m}$) znajdowała się w odległości 40 mm nad uziemioną aluminiową elektrodą płaską o średnicy 40 mm . Eliminowanie wyładowania zupełnego w układzie (przeskok między elektrodami) zapewniała bariera dielektryczna jaką stanowi polietylenowa płytka (grubość 1 mm , powierzchnia $50 \times 50 \text{ mm}$) umieszczona na powierzchni elektrody uziemionej. Przyjęto rejestrację impulsów wyładowań przy napięciu 9 kV , która to wartość była o 20% większa od napięcia początkowego wyładowań w układzie w przypadku indukcji magnetycznej $B = 0$. Pomiary rejestrowano w czasie 60 sekund (3000 okresów). Indukcja magnetyczna w środku odległości między elektrodami wynosiła 60 mT .

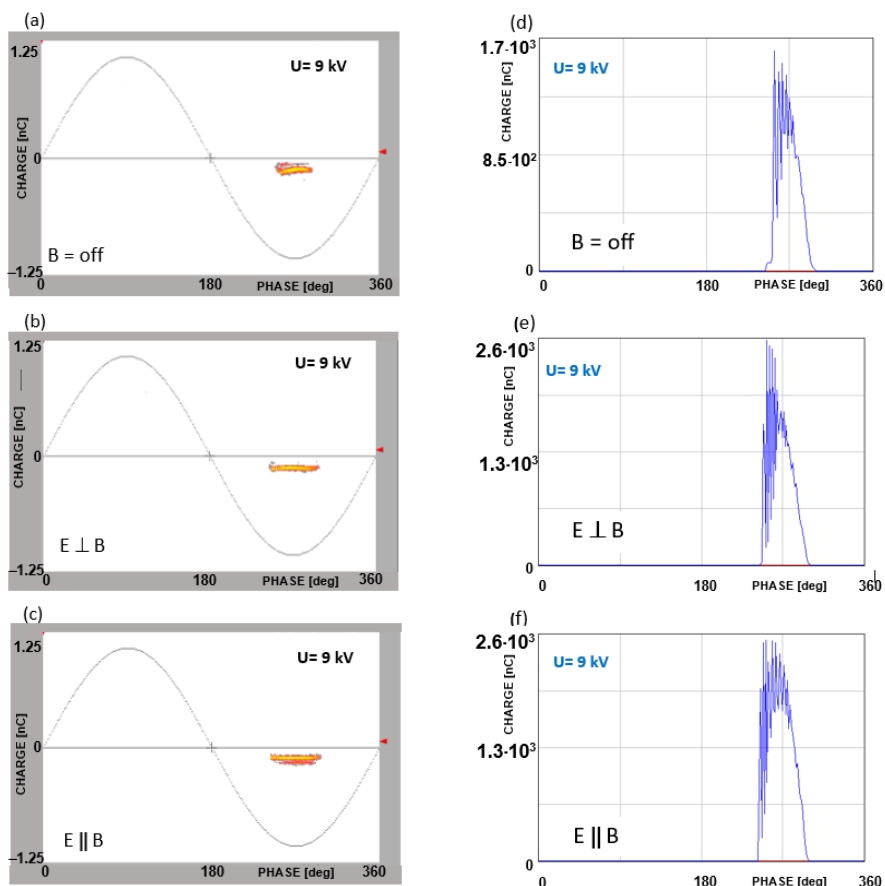
W przypadku braku magnesów pole magnetyczne Ziemi (Kraków) wynosiło ok. $50 \mu\text{T}$. Pomiar indukcji magnetycznej wykonany został miernikiem SMS102 z sondą Halla. Prezentowane doświadczenia przeprowadzono w temperaturze pokojowej (21°C) przy ciśnieniu atmosferycznym $0,1 \text{ MPa}$ i wilgotności 19% .

Wyniki pomiarów

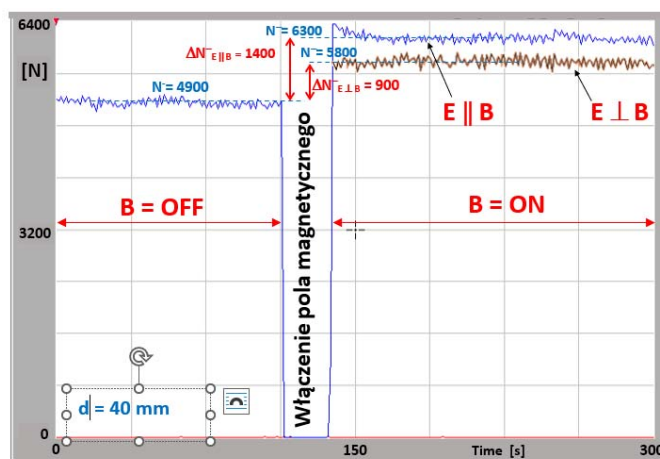
Rejestrowane zbiory impulsów wyładowań przedstawione zostały w postaci:

- obrazów fazowo-rozdzielczych $n(\varphi, q)$, to jest zależności liczby impulsów n o danym ładunku q i fazie φ ich występowania w okresie napięcia, przy czym liczba impulsów n jest zakodowana w palecie kolorów (Rysunek 5a,b,c),
- rozkładów amplitudowo-fazowych ładunków wyładowań (Rysunek 5d,e,f).

Wyniki pomiarów gdy indukcja magnetyczna równa była zero ($B = 0$) traktowane są jako referencyjne. Pole magnetyczne ma wpływ na mechanizm wyładowań niezupełnych, w tym na wartość napięcia początkowego wyładowań U_0 i na struktury zbiorów impulsów w obrazach fazowych i ich rozkładach amplitudowych. Napięcie początkowe w przypadku współdziałania pól miało wartość mniejszą o około 10% i 8% odpowiednio przy orientacji równoległej i prostopadłej wektorów E i B w stosunku do pomiaru przy indukcji $B = 0$. Obraz fazowy i rozkład amplitudowy ładunków wyładowań (Rysunek 5a,d; $B = 0$) są charakterystyczne dla wyładowań w polu elektrycznym niejednostajnym w układzie elektrod typu „ostrze- płyta”, których ilustracją są zbiory impulsów w ujemnej połowie okresu napięcia. Porównując klastry impulsów wyładowań w polu magnetycznym (Rysunek 5b,c; $B = 60 \text{ mT}$) z obrazem referencyjnym (Rysunek 5a) można zauważyć ich wydłużenie w kierunku osi fazowej. Z kolei porównanie rozkładów amplitudowych ładunków wyładowań w powyższych warunkach (Rysunek 5d,e,f) pozwala na stwierdzenie zwiększenia się amplitudy impulsów, widoczne szczególnie przy orientacji równoległej wektorów E i B . Liczbę impulsów wyładowań N rejestrowanych w czasie t_N przyjęto jako miarę intensywności wyładowań. Do bardziej precyzyjnego pomiaru tego efektu zastosowano diagramy sekwencji czasowych, przedstawione na Rysunku 6, będące wynikiem rejestracji impulsów wyładowań w okresach napięcia w czasie $t_N = 300 \text{ sekund}$. Obserwuje się zwiększenie intensywności wyładowań w warunkach działania pola magnetycznego. Efekt ten jest szczególnie wyraźny w przypadku orientacji równoległej wektorów E i B . Wskaźnik tych zmian – wielkość ΔN , będąca różnicą liczby impulsów gdy indukcja magnetyczna $B > 0$ i gdy $B = 0$ (poziom referencyjny), wynosi przy orientacji prostopadłej $\Delta N = 900$ i przy równoległej $\Delta N = 1400$.



Rys. 5. Obrazy fazowo-rozdzielcze (a, b, c) i rozkłady amplitudowo-fazowe (d, e, f) ładunków wyładowań rejestrowane przy napięciu 9 kV; a,d) obraz i rozkład amplitudowy - referencyjne ($B = 0$); b, e) orientacja E i B prostopadła; c, f) orientacja E i B równoległa [29].



Rys. 6. Diagram sekwencji czasowej impulsów wyładowań niepełnych rejestrowanej przy włączeniu pola magnetycznego w konfiguracji elektrod „ostrze-plate” ($d=40$ mm) oraz orientacji prostopadłej i równoległej pól E i B ; N – liczba impulsów wyładowań niepełnych, ΔN – różnicę między liczbą impulsów zarejestrowanych, gdy pole magnetyczne było włączane i wyłączane; (\perp) orientacja prostopadła; (\parallel) orientacja równoległa.

Dzięki akwizycji impulsów wyładowań w trybie fazowo-rozdzielczym zaobserwowano spójną pozycję fazową obserwowanych wyładowań. Oprócz zmian wartości wielkości charakteryzujących wyładowania: amplitudy impulsów i ich liczby, efektem wpływu pola magnetycznego jest stwierdzone w symulacjach odchylenie trajektorii ruchu ładunków elektrycznych. Próbą wyjaśnienia tego faktu jest uznanie polaryzacji jonów dodatnich i elektronów jako

przyczyny odchylenia kanałów wyładowań w przeciwnych kierunkach. Skutkiem odchylenia trajektorii wyładowań jest wydłużenie drogi swobodnej elektronów co prowadzi do zwiększenia prawdopodobieństwa jonizacji zderzeniowej i większej intensywności wyładowań. Ponadto odchylenie toru ruchu jonów dodatnich może zmniejszać możliwość rekombinacji. Skutkiem będzie większa liczba wyładowań niepełnych. Wymienione, możliwe zjawiska w polu elektrycznym, można przyjąć jako podstawę wyjaśnienia zmniejszenia się napięcia początkowego wyładowań w obydwu rodzajach orientacji wektorów E i B w porównaniu z przypadkiem referencyjnym. Składowa pola magnetycznego powoduje powstanie dodatkowej siły Lorentza działającej na naładowane cząstki, co powoduje większe przyspieszenie elektronów w porównaniu z ruchem tylko w polu elektrycznym. Większa energia swobodnych elektronów zwiększy jonizację cząsteczek gazu, obniżając napięcie początkowe wyładowań niepełnych i powodując zwiększoną liczbę wyładowań.

Charakterystyczną cechą przeprowadzonego eksperymentu dotyczy nieinwazyjnego włączenia pola magnetycznego, dlatego obserwowane efekty przypisuje się temu zjawisku.

Podsumowanie

Oddziaływanie pola magnetycznego na naładowane cząstki i ich ruch w polu elektrycznym, między innymi w warunkach wyładowań elektrycznych jest elementem teorii ruchu ładunków elektrycznych. Bezpośrednie rozpoznanie skutków wpływu pola magnetycznego na mechanizm wyładowań elektrycznych umożliwiają badania eksperymentalne, w których wpływ pola magnetycznego jest identyfikowany na podstawie informacji o zmianach

ilościowych wartości wielkości charakteryzujących wyładowania. W wyniku badań laboratoryjnych i symulacji, których opis jest treścią artykułu, stwierdzono wpływ pola magnetycznego na jakościowe i ilościowe efekty zjawisk wyładowań w polu elektrycznym. Dotyczy to wizualizacji torów ruchu ładunków elektrycznych oraz bezpośrednio zmian wartości napięcia początkowego i intensywności wyładowań. Kształty trajektorii ruchu ładunków elektrycznych w wyładowaniu zależą od wzajemnej orientacji pól elektrycznego i magnetycznego i od kierunku ruchu ładunków w kanale. Dodatkowa siła Lorentza działając na naładowane cząstki zwiększa ich przyspieszenie w porównaniu z ruchem w polu elektrycznym, co powoduje wydłużenie toru ruchu ładunków i zwiększa prawdopodobieństwo jonizacji zderzeniowej. W pomiarach wyładowań niepełnych oznacza to obniżenie wartości napięcia początkowego i zwiększenie intensywności wyładowań.

Wyjaśnienie mechanizmu fizycznego oddziaływania pola magnetycznego na inicjowanie i rozwój wyładowań niepełnych jest skomplikowanym problemem teoretycznym i aktualnym tematem badawczym. Problem ten nabrął obecnie szczególnego znaczenia ze względu na wzrastające zastosowanie urządzeń elektrycznych, w których natężenie pola magnetycznego osiąga znaczne wartości przy bardzo dużych gęstościach mocy i wpływa na mechanizmy zjawisk inicjowanych w polu elektrycznym.

Indukcja magnetyczna w izolacji urządzeń elektroenergetycznych w urządzeniach wysokoprądowych może osiągać wartości nawet rzędu Tesli. W rzeczywistych układach izolacyjnych np. silników, kabli elektroenergetycznych, transformatorów, pole magnetyczne może być znacznie większe ze względu na wartości prądu na poziomie kA (lub strukturę magnetyczną urządzeń).

W prezentowanych badaniach laboratoryjnych zastosowano pole magnetyczne o indukcji rzędu mT, zatem skoro przy tak małej jej wartości wpływ pola magnetycznego był możliwy do stwierdzenia, można sądzić, iż w innych warunkach ten efekt będzie silniejszy. Wnioski z badań wpływu pola magnetycznego na mechanizm wyładowań niepełnych mają znaczenie dla prawidłowej oceny wyników pomiarów wyładowań w badaniach diagnostycznych wysokonapięciowych układów izolacyjnych.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Marek Florkowski, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail:marek.florkowski@agh.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Li C., Yang Y., Xu G., et. al., Insulating materials for realising carbon neutrality: Opportunities, remaining issues and challenges, *High Voltage*, 2022, 7, 610-632
- [2] Lebey T., Rumi A., Cavallini A., Challenges for Electrical Insulation Systems in High Voltage Aviation Applications, *IEEE Electrical Insul. Magazine*, 2022, 38, 5-11
- [3] Mazzanti G., Issues and Challenges for HVDC Extruded Cable Systems, *Energies*, 2021, 14, 4504
- [4] Stone G.C., Culbert I., Boulter E.A., Dhirani H., *Electrical Insulation for Rotating Machines*, JohnWiley & Sons, NJ, USA, 2014.
- [5] Cheng P., Kong H., Ma J., Jia L., Overview of Resilient Traction Power Supply Systems in Railways with Interconnected Microgrid, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2021, 7, 1122-1132
- [6] Kojima H., Hotta K., Iwata T., Hayakawa N., Yanagita N., Kato T., Rokuho T., Okubo H., Influence of gap length on discharge channel propagation and breakdown mechanism in air, *Proc. XVII Int. Symp. on High Voltage Eng.*, 2011
- [7] Raether H., *Electron Avalanches and Breakdown of Gases*, Butterworths, London, UK, 1964

- [8] Van Brunt R.J., Kulkarni S.V., Method for measuring the stochastic properties of corona and partial—discharge pulses, *Rev. Sci. Instrum.*, 1989, 60, 3012–3023
- [9] Różga P., Wytrzymałość elektryczna transformatorowych płynów izolacyjnych na bazie estrów syntetycznych i naturalnych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014, ISSN 0033-2097, 90, 245-247.
- [10] Florkowski M., *Partial discharges in high-voltage insulating systems – mechanisms, processing, and analytics*, ISBN 978-83-66364-75-2, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2020
- [11] Raether H., *Electron avalanches and breakdown of gases*, Butterworths, London, (1964).
- [12] Meek J.M., Craggs J.D., *Electrical Breakdown of Gases*, John Wiley and Sons, 1978.
- [13] Jaroszewski M., Różga P., Beroual A., Skowroński K., Wójciak M., Niektóre czynniki mające wpływ na napięcie przebiecia biodegradowalnego oleju transformatorowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2022, ISSN 0033-2097, 98, 293-295
- [14] Barzkar A., Ghassemi M., Components of Electrical Power Systems in More and All-Electric Aircraft: A Review, *IEEE Trans. Transp. Electrification*, 2022, 8, 4037–4053
- [15] Rumi A., Marinelli J.G., Seri P., Kohler M., Cavallini A., Performance of corona resistant insulation for aerospace, *Electr. Insul. Conf. (EIC)*, 2021, 22–25
- [16] Xu H., Lowndes R., Cotton I., Power Capacity of High Voltage Cables for Future Electrical Aircraft, *Proc. of the Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2021.
- [17] Wais S.I., Mohammed P.A., Influence of Magnetic Field on Characteristics of Corona Discharge in Wire-Cylinder Electrodes Configuration, *Plasma*, 2021, 4, 764–779
- [18] Florkowski M., Effect of Magnetic Field on Partial Discharge Dynamics in Insulation Systems of Transportation Power Devices, *IEEE Trans. Transportation Electrification*, 2022, 8, 4678–4686
- [19] Elabbas K., Experimental study of magnetic field effect on dc corona discharge in low vacuum, *J. Inst. Eng. India. Ser. B*, 2014, 95, 189–195
- [20] Bhangaonkar, A.S., Kulkarni, S.V., Shevgaonkar, R.K. Study of the effects of alternating magnetic field on point-plane corona. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2011, 18, 1813
- [21] Amizhtan S.K., Amalanathan A.J., Sarathi R., Edin H., Taylor N., Impact of Magnetic Field on Corona Discharge Behavior of Mineral Oil Under AC Voltage, *IEEE Trans. on Dielectr. Electr. Insul.*, 2022, 29, 1417-1424
- [22] Du B.X., Su J.G., Han T, Effects of magnetic field on electrical tree growth in silicone rubber under repetitive pulse voltage, *IEEE Trans. Diel. Electr. Insul*, 2015, 22, 1785-1792
- [23] Reid A.J., Hepburn D.M., Stewart B.G., The influence of external magnetic fields on the partial discharge characteristics of voids, *Electr. Insul. Conf.* 2013, 147–150
- [24] Wang M.Y., Du B.X., Kong X.X., Li Z.L., Xiao M., Ma Y.W., Effects of Gradient Magnetic Field on Charge Behavior and Electrical Tree Growth in Epoxy Resin, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2021, 28, 1686–1693
- [25] Martinez-Tarifa J.M., Rivas-Conde J., Robles G., Sanz-Feito J., Influence of leakage magnetic fields on partial discharge activity in power transformers, *IEEE Trans. Diel. Electr. Insul.*, 2010, 17, 1724–1730
- [26] Gao Y., Du B.X., Ma Z.L., Effect of Magnetic Field on Electrical Treeing Behavior in XLPE Cable Insulation, *Proc. of Int. Symp. on Electrical Insulating Materials*, Kyoto, Japan, 2011, 457–461
- [27] Du B.X., Li Y.M., Wang M.Y., Liu Z.X., Han X.T., Zhang Y., Li J., Li Z.L., Sun H.L., Effects of magnetic field on surface flashover of polyimide film for superconducting magnet insulation, *Proc. IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD)*, 2020, 97–100
- [28] Florkowski M., Magnetic field modulated dynamics of partial discharges in defects of high voltage insulating materials, *Nature Scientific Reports*, 2022, 12, 22048
- [29] Florkowski M., Effect of Interplay between Parallel and Perpendicular Magnetic and Electric Fields on Partial Discharges, *Energies*, 2023, 16, 4847
- [30] Florkowska B., Włodek R., Florkowski M., Kuniewski M., *Wysokie napięcie w elektroenergetyce – wybrane zagadnienia i obliczenia*, ISBN 978-83-66364-35-6, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2020
- [31] COMSOL Multiphysics Users Guide 6.0, 2021