

ANALIZA TEORETYCZNA I MODELOWANIE WPŁYWU HARMONICZNYCH NAPIĘCIA NA POWSTAWANIE WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W UKŁADACH IZOLACYJNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Paweł ZYDRON, Józef ROEHRICH, Paweł MIKRUT

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
tel.: 12 6172835 e-mail: pzydron@agh.edu.pl

Streszczenie: Powstawanie wyładowań niepełnych (wnz) w defektach układów izolacyjnych jest uzależnione od rodzaju napięcia działającego na te układy (stałe/przemienne, sinusoidalne/odkształcone/impulsowe) oraz od parametrów określających właściwości samego defektu, takich jak: położenie defektu w układzie izolacyjnych, jego rodzaj (np. ostrze metaliczne w gazie, wewnętrzna inkluzja gazowa), stan powierzchni dielektryka w obszarze defektu itp. W artykule rozważany jest wpływ odkształceń przemiennego napięcia probierczego na powstawanie wnz oraz na ich parametry istotne z punktu widzenia metod fazowo-rozdzielczych rejestracji i analizy wyładowań. Przedstawiono analizy teoretyczne, wyniki rejestracji laboratoryjnych dla źródeł modelowych oraz wybrane symulacje numeryczne.

Słowa kluczowe: układ izolacyjny, wyładowania niepełne, napięcia odkształcone, modelowanie.

1. WPROWADZENIE

Badania i analizy wyładowań niepełnych (wnz) są jedną z szeroko obecnie rozpowszechnionych metod diagnozowania stanu układów izolacyjnych urządzeń elektrycznych wysokiego napięcia, stosowanych w elektroenergetyce na etapach wytwarzaniu, przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. Wyładowania niepełne są wyładowaniami elektrycznymi, występującymi jedynie w części objętości lub na części powierzchni układu izolacyjnego, które nie powodują w sposób bezpośredni utraty jego właściwości izolacyjnych [1, 2]. Warunkami niezbędnymi dla ich powstawania jest lokalne przekroczenie krytycznej wartości natężenia pola elektrycznego oraz równoczesne pojawienie się elektronu inicjującego rozwój wyładowania.

Podstawowymi, najczęściej wyróżnianymi formami wnz, różniącymi się pomiędzy sobą warunkami i mechanizmami powstawania oraz rozwoju są:

- wyładowania ulotowe;
- wyładowania w zamkniętych inkluzjach gazowych;
- wyładowania powierzchniowe.

Wszystkie one mogą być charakteryzowane jako impulsowe, niestacjonarne procesy stochastyczne, które najczęściej są opisywane za pomocą metod i parametrów statystycznych [2]. Czynnikiem powodującym powstawanie wnz i równocześnie w pewien sposób je porządkującym jest napięcie (robocze lub probiercze), oddziałujące na układ izolacyjny. Najczęściej dla układów i urządzeń elektroenergetycznych jest to napięcie przemienne o częstotliwości sieciowej 50 Hz lub 60 Hz.

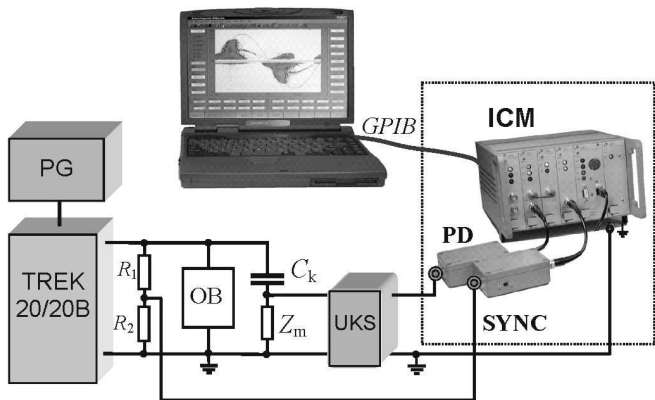
W warunkach przemysłowych, w układach prądu przemiennego AC, ze względu na niezerowe wartości impedancji sieci oraz obecność odbiorników nieliniowych, dochodzi do powstawania odkształceń napięcia. Dla analizy teoretycznej układów z przebiegami odkształconymi stosuje się zwykle analizę harmoniczną opartą na przekształceniu Fouriera [3]. Przebiegi odkształcone zawierające wyższe harmoniczne w negatywny sposób oddziałują na urządzenia i maszyny elektryczne zasilane z sieci elektroenergetycznej. Z tego powodu podejmowane są różnego rodzaju działania techniczne zmierzające do eliminowania lub ograniczania obecności harmonicznnych, a przez to minimalizowania niekorzystnych ich efektów [4, 5].

Jednym ze skutków obecności napięć odkształconych są modyfikacje parametrów narażeń polowych, którym poddawane są układy izolacyjne, a w efekcie również zmiany warunków determinujących powstawanie wnz. Dotyczy to zarówno wartości maksymalnych, jak również pochodnych napięcia. Ze względu na wpływ tych parametrów na przebieg procesów degradacji oraz na czas życia izolacji problematyka ta jest badana od wielu lat, dla różnych rodzajów układów izolacyjnych [6-21].

Artykuł opisuje wyniki laboratoryjnych rejestracji wnz dla dwóch układów modelowych 1) ostrze- płyta oraz 2) zamkniętych inkluzji gazowych w dielektryku stałym. Dla tego drugiego przypadku przedstawiono również wyniki symulacji numerycznych przebiegów czasowych wnz.

2. STANOWISKO POMIAROWE I OBIEKTY BADAŃ

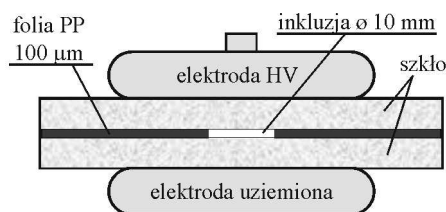
Podczas przeprowadzonych eksperymentów laboratoryjnych wnz były rejestrowane z zastosowaniem detekcji szerokopasmowej. Analizie podlegały formy impulsowe wyładowań, ich podstawowymi rejestrowanymi parametrami były: faza wystąpienia wyładowania i jego ładunek pozorny. Układ pomiarowy (rys. 1) zgodny z wymogami normy IEC 60270 składał się z: programowanego źródła napięcia, układu detekcyjnego z kondensatorem sprzęgającym C_k i impedancją pomiarową Z_m , umieszczonymi w gałęzi równoległej do obiektu badań OB; 3) systemu do pomiaru wnz *ICM System* (Power Diagnostix Systems). Dzielnik R_1 - R_2 pozwalał na uzyskanie sygnału synchronizującego moment rozpoczęcia kolejnego okresu napięcia. System do pomiaru wnz był sterowany przez komputer nadzorczy poprzez interfejs pomiarowy IEEE-488 (GPIB).



Rys. 1. Blokowa struktura systemu pomiarowego: PG – programowany generator przebiegów napięciowych (Analogic 3020), wzmacniacz wysokonapięciowy TREK 20/20B; R_1/R_2 – skompensowany dzielnik wysokiego napięcia, OB – obiekt badany, C_k – kondensator sprzęgający, Z_m – impedancja pomiarowa, UKS – układ kondycjonowania sygnału, PD – przedwzmacniacz toru wnz, SYNC – przedwzmacniacz toru napięcia, ICM – system rejestracji obrazów fazowo-rozdzielczych wnz ICM System

Dane rejestrowane przez system ICM były przetwarzane numerycznie i wizualizowane przy zastosowaniu dedykowanych procedur obliczeniowych zaimplementowanych w środowisku programu Matlab.

Program badań eksperymentalnych obejmował obserwację i analizy wpływu obecności wyższych harmonicznych na dwie formy wyładowań: 1) wyładowania ulotowe, 2) wyładowania w modelowej, zamkniętej inkluzji gazowej o określonej geometrii (rys. 2).



Rys. 2. Konfiguracja badanych próbek modelowego układu izolacyjnego z inkluzją powietrzną o określonej geometrii

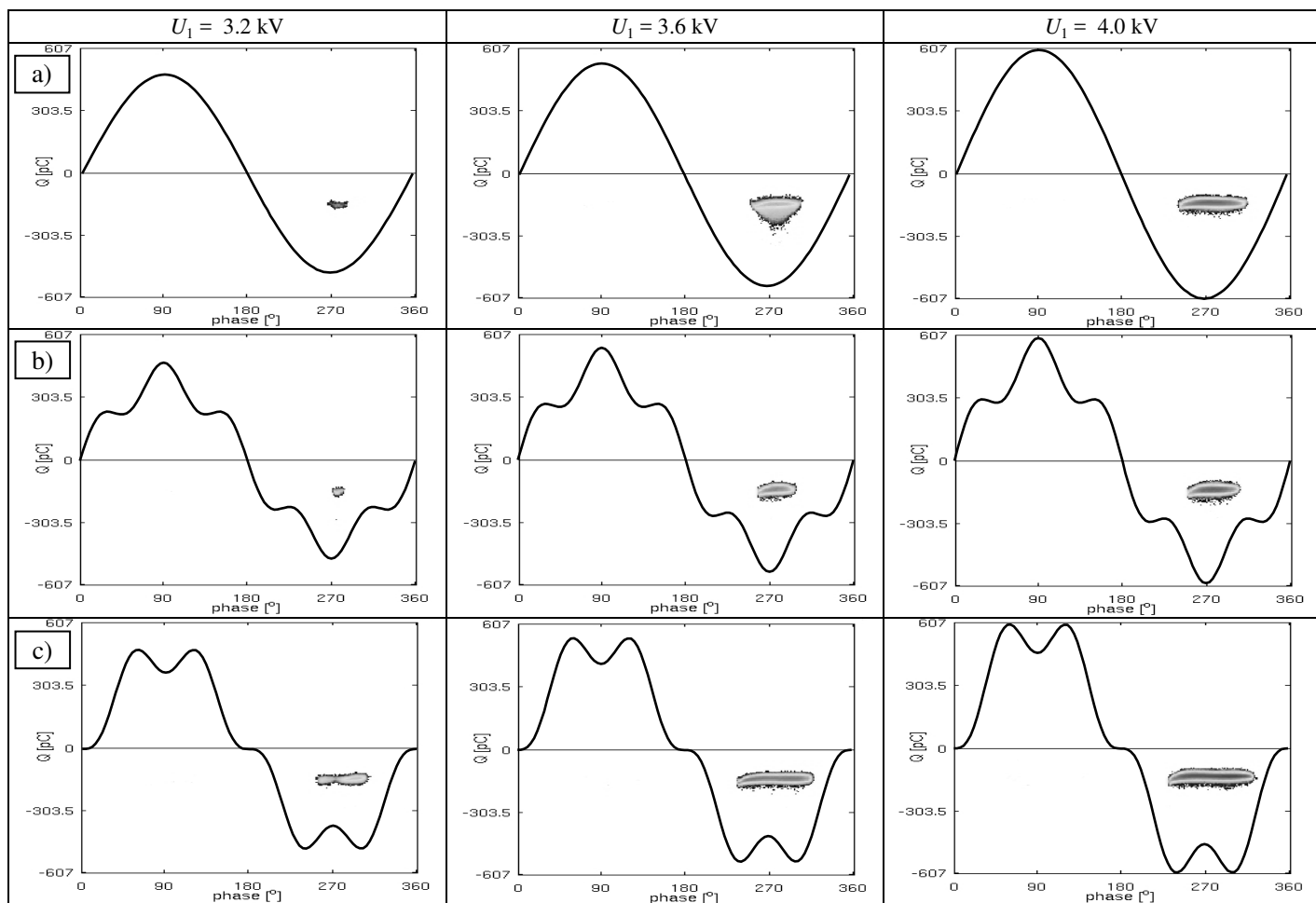
3. WYNIKI BADAŃ

Wszystkie opisane w artykule badania eksperymentalne wykonano w Laboratorium Wysokich Napięć Katedry Elektrotechniki i Elektroenergetyki AGH.

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki rejestracji obrazów fazowo-rozdzielczych ulotu elektrycznego w powietrzu, powstającego w przykładowym układzie elektrod ostrze-płaszczyzna, zasilanego napięciem o kontrolowanej zawartości wyższych harmonicznych:

- a) tylko składowa podstawowa 50 Hz – U_1 ;
- b) U_1 + 5. harmoniczna U_5 o fazie 0° (20% U_1);
- c) U_1 + 5. harmoniczna U_5 o fazie 180° (20% U_1).

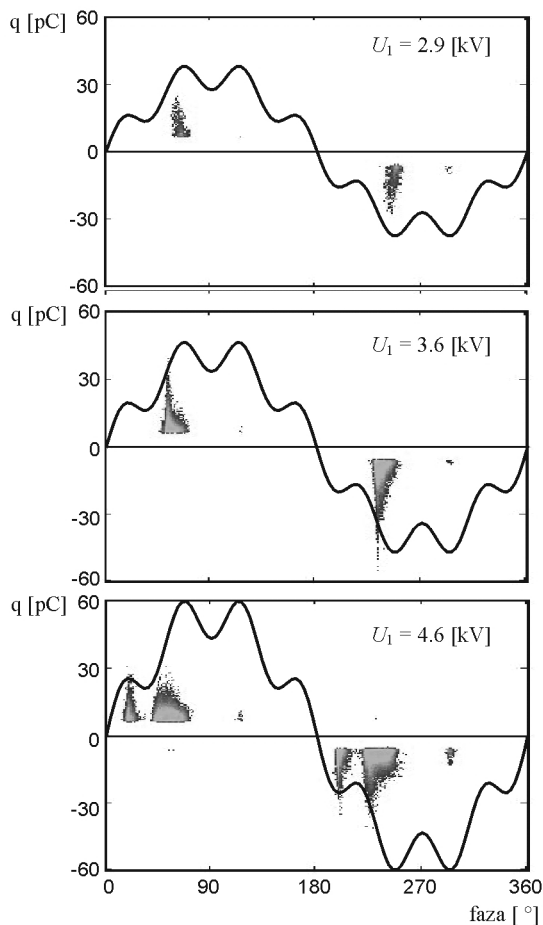
Przy tak znacznym udziale procentowym wyższych harmonicznych w przebiegu czasowym napięcia wyraźnie widoczne są lokalne minima i maksima, których położenie jest zależne od wzajemnych relacji fazowych poszczególnych harmonicznych.



Rys. 3. Wybrane obrazy fazowo-rozdzielcze ulotu elektrycznego w układzie ostrze-płaszczyzna przy wzrastającej wartości napięcia: a) sinusoida bez odkształceń, b) dodana 5. harmoniczna z fazą 0° , c) dodana 5. harmoniczna z fazą 180°

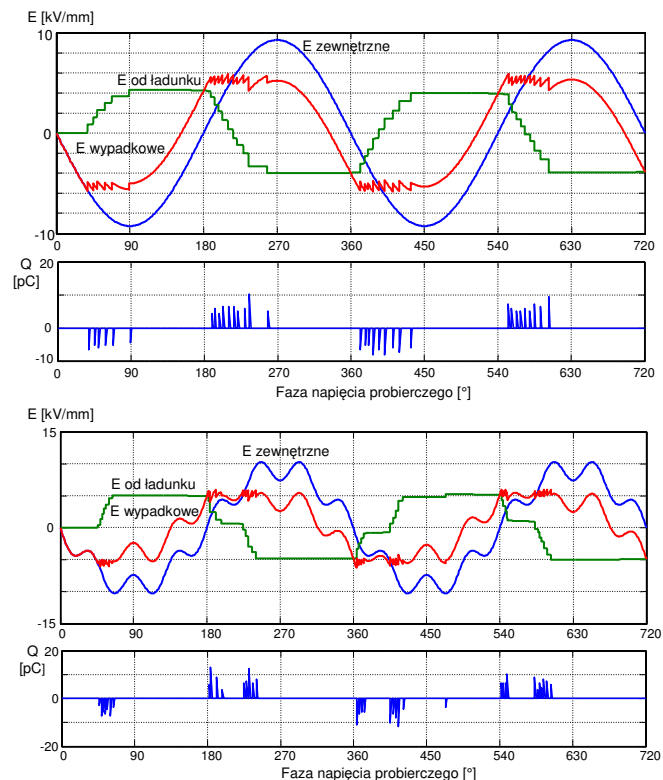
Analiza obrazów fazowo-rozdzielczych wyładowań wskazuje na istotny wpływ kształtu napięcia na zakres fazowy występowania impulsów ulotu ujemnego, generowanego w opisywanym przypadku. Wynika to bezpośrednio z warunków, jakie są konieczne dla jego powstania [1, 22]. Decydujące znaczenie wartości napięcia sprawia, że po przekroczeniu wartości krytycznej, charakterystycznej dla aktualnego stanu gazu, dochodzi do powstawania wyładowań o niemal stałym ładunku pojedynczych impulsów.

Rysunek 4 przedstawia wyniki rejestracji wyładowań powstających w modelowej inkluzji gazowej przy napięciu zawierającym składową podstawową U_1 oraz jej 7. harmoniczną U_7 o fazie 0° (amplituda U_7 wynosi 20% U_1). Analiza kształtu i położenia elementów obrazów związanych z aktywnością wnz pozwala zauważyć, że wraz ze wzrostem wartości napięcia na obrazie zaczynają się pojawiać odseparowane fazowo grupy wyładowań o tej samej biegunowości.



Rys. 4. Obrazy fazowo-rozdzielcze wnz w modelowej inkluzji gazowej przy napięciu będącym sumą składowej podstawowej U_1 o programowanej amplitudzie oraz 7. harmonicznej U_7 o amplitudzie wynoszącej 20% U_1 i fazie 0°

Korzystając z numerycznego modelu płaskiej inkluzji gazowej w dielektryku stałym, opartego na założeniach opisanych w publikacji [23] dokonano symulacji przebiegów czasowych wyładowań niepełnych powstających pod wpływem napięcia przemiennego oraz napięć odkształconych. Przebiegi na rysunku 5 przedstawiają wybrane wyniki symulacji dla napięcia sinusoidalnego U_1 oraz dla napięcia będącego sumą składowej podstawowej U_1 oraz 7. harmonicznej U_7 o amplitudzie wynoszącej 20% U_1 i fazie 0° (jak dla obrazu fazowo-rozdzielczego z rysunku 4).



Rys. 5. Wyniki symulacji szeregów czasowych impulsów wyładowań niepełnych w modelowanej inkluzji gazowej przy napięciu sinusoidalnym U_1 i odkształconym będącym sumą składowej podstawowej U_1 oraz 7. harmonicznej U_7 o amplitudzie wynoszącej 20% U_1 i fazie 0°

Dla napięcia odkształconego z 7. harmoniczną impulsy wyładowań niepełnych, powstające w inkluzji gazowej, tworzą charakterystyczne grupy, których położenie fazowe jest determinowane obecnością lokalnych minimów i maksimów napięcia probierczego.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Powszechność występowania nieliniowych odbiorników energii elektrycznej w sieciach elektrycznych, w tym coraz częstsze stosowanie układów energoelektronicznych sprawia, że kształt napięcia przemiennego w tych sieciach odbiega od sinusoidy. Ze względu na zaburzenia kształtu napięcia zmianie ulegają warunki inicjowania i rozwoju różnych form wnz. Powoduje to zmiany sekwencji szeregów czasowych impulsów wyładowań oraz akumulowanych obrazów fazowo-rozdzielczych. Analiza wyników pomiarów laboratoryjnych dwóch form modelowych tych wyładowań wskazuje, że:

- w przypadku wyładowań ulotowych decydujące znaczenie dla powstawania wnz ma wartość napięcia probierczego, wyładowania powstają bowiem w tych zakresach fazy, w których napięcie przekracza wartość krytyczną;
- dla wyładowań w inkluzjach gazowych, zamkniętych wewnątrz izolacji, ich powstawanie jest determinowane zarówno przez wartość napięcia (zachodzi konieczność przekroczenia wartości początkowej wyładowań), jak również pochodną napięcia, bowiem dla generacji kolejnych wyładowań musi dojść do zmiany wartości pola elektrycznego w inkluzji [18].

Symulacje numeryczne wykonane dla inkluzji gazowej potwierdziły rezultaty badań eksperymentalnych.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Florkowska B.: Wyładowania niezupełne w układach izolacyjnych wysokiego napięcia – analiza mechanizmów, form i obrazów, ISBN 83-906627-6-0, Wyd. IPPT PAN, Warszawa, 1997
2. Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydróż P.: Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, ISBN 83-910387-5-0, Wyd. IPPT PAN, Warszawa, 2001
3. Bollen M.H.J., Gu I.Y.H.: Signal processing of power quality disturbances, ISBN: 978-0-471-73168-9, Wiley-IEEE Press, 2006
4. Wagner V. E. et al.: Effects of harmonics on equipment, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 8, no. 2, 1993, pp. 672-680
5. Hanzelka Z.: Jakość dostawy energii elektrycznej: zaburzenia wartości skutecznej napięcia, ISBN 978-83-7464-566-9, Wyd. AGH, Kraków, 2013
6. Florkowski M.: Influence of high voltage harmonics on partial discharge patterns, Proc. 5th ICPADM, vol. 1, 1997, pp. 303-306
7. Montanari G.C., Fabiani D.: The effect of nonsinusoidal voltage on intrinsic aging of cable and capacitor insulating materials, IEEE Trans. Dielectr. and Electr. Insul., vol. 6, no. 6, 1999, pp. 798-802
8. Fabiani D., Montanari G.C.: The effect of voltage distortion on ageing acceleration of insulation systems under partial discharge activity, IEEE Electr. Insul. Mag. vol. 17, Issue: 3, 2001, 24-33
9. Florkowski M., Wpływ harmoniczných wysokiego napięcia na obrazy wyładowań niezupełnych, Jakość i Użytkowanie Energii Elektr., t.8, z.1/2, 2002, str. 17-28
10. Romano P.: Influence on PD parameters due to voltage conducted disturbances, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 11, no. 1, 2004, pp. 160-165
11. Florkowski M., Florkowska B.: Distortion of partial-discharge images caused by high-voltage harmonics, IEE Proc. Gen. Trans. Distrib., vol. 153, no. 2, 2006, pp. 171-180
12. Florkowska B., Florkowski M., Zydróż P.: The role of harmonic components on partial discharge mechanism and degradation processes in epoxy resin insulation, 2007 IEEE ICSD, 2007, 560-563
13. Bahadoorsingh S., Rowland S.: Modeling of partial discharges in the presence of harmonics, IEEE CEIDP, 2009, pp. 384-387
14. Bahadoorsingh S., Rowland S.: Investigating the impact of harmonics on the breakdown of epoxy resin through electrical tree growth, IEEE Trans. Dielectr. and Electr. Insul., vol. 17, no. 5, 2010, pp. 1576-158
15. Sarathi R., Nandini A., Tanaka T.: Understanding electrical treeing phenomena in XLPE cable insulation under harmonic AC voltages adopting UHF technique, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 19, no. 3, 2012, pp 903-909
16. Sarathi R., Archana M.: Investigation of partial discharge activity by a conducting particle in transformer oil under harmonic AC voltages adopting UHF technique, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 19, no. 5, 2012, pp. 1514-1520
17. Florkowski M., Florkowska B., Furgał J., Zydróż P.: Impact of high voltage harmonics on interpretation of partial discharge patterns, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 20, no. 6, 2013, pp. 2009-2016
18. M. Florkowski, B. Florkowska, P. Zydróż, Influence of high voltage harmonics on partial discharge patterns modulation, 2014 IEEE ICHVE, 2014, pp. 1-4
19. N. H. Aziz, V. M. Catterson, S. M. Rowland, S. Bahadoorsingh, Effect of harmonics on Pulse Sequence Analysis plots from electrical trees, 2014 IEEE CEIDP, 2014, pp. 377 - 380
20. R. Sarathi, I. P. Merin Sheema, J. Sundara Rajan, M. G. Danikas, Influence of harmonic AC voltage on surface discharge formation in transformer insulation, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 21, no. 5, 2014, pp. 2383-2393
21. R. Sarathi, K.H. Oza; C. L. G. Pavan Kumar; T. Tanaka, Electrical treeing in XLPE cable insulation under harmonic AC voltages, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 22, no. 6, 2015, pp. 3177-3185
22. Adamczyk B., Florkowska B., Pietrzak P.: Modelling of electric field distribution for partial discharges in air, ZN Wydziału EiA Polit. Gdańskiej, 46, 2015, str. 9-12
23. Zydróż P., Mikrut P.: Modelowanie numeryczne i analiza warunków powstawania wyładowań niezupełnych w defektach układów izolacyjnych wysokiego napięcia, ZN Wydziału EiA Polit. Gdańskiej, 46, 2015, str. 77-80

THEORETICAL ANALYSIS AND MODELLING OF THE VOLTAGE HARMONICS INFLUENCE ON FORMATION OF PARTIAL DISCHARGES IN HIGH VOLTAGE INSULATION SYSTEMS

The formation of partial discharge in defects of the insulation systems depends on the kind of voltage acting on these systems (DC/AC, sinusoidal/distorted/pulsed) and the parameters defining the properties of the defect, such as the location of the defect in the insulating system, its type (e.g. a needle in a gas, inner gaseous inclusion) surface state of the dielectric in the area of defect, etc. The paper considers the influence of deformation of the AC voltage on the formation of partial discharges and their parameters relevant for the phase-resolved methods used for PD recording and analyzing. The theoretical analyzes, the results of laboratory measurements for the selected source model and numerical simulations are presented in the paper.

Keywords: insulating system, partial discharge, distorted voltages, harmonics, modelling.