



Marek Florkowski*

ODKSZTAŁCENIA HARMONICZNE WYSOKIEGO NAPIĘCIA A OBRAZY WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Streszczenie: Przedstawiono wpływ harmonicznych wysokiego napięcia na fazowo-rozdzielcze obrazy wylądowań niezupełnych (wnz). Jako parametr charakteryzujący ewolucję obrazów wnz wybrano współczynnik zawartości harmonicznych obliczany za pomocą algorytmu szybkiej transformaty Fouriera (FFT). Zaprezentowano również wyniki symulacji numerycznych wylądowań niezupełnych w pojedynczej inkluzji z uwzględnieniem wpływu wyższych harmonicznych. Opisano układ pomiarowy i podstawy analizy harmonicznych.

Słowa kluczowe: harmoniczne napięcia, obrazy wylądowań niezupełnych, współczynnik zawartości harmonicznych

1. Wstęp

Problem wpływu harmonicznych jest wspólny dla wszystkich pomiarów bazujących na akwizycji fazowo-rozdzielczych obrazów wylądowań niezupełnych. Zjawisko to jest kluczowe dla poprawnej identyfikacji i klasyfikacji obrazów wnz. Obecnie tak w laboratoryjnych jak i rzeczywistych pomiarach zakłada się zwykle czysto sinusoidalne napięcie, nie biorąc pod uwagę odkształceń harmonicznych. Celem tego referatu jest pokazanie wpływu harmonicznych wysokiego napięcia na obrazy wylądowań niezupełnych i możliwe wyniki stąd błędy interpretacyjne. Termin „napięcie probiercze” określa w tym artykule wysokie napięcie panujące na obiekcie badanym, powodujące występowanie wylądowań niezupełnych. Konwencjonalnie parametrami określającymi napięcie probiercze są zwykle:

- wartość skuteczna lub szczytowa,

* ABB Corporate Research, Kraków, e-mail: marek.florkowski@plerc.mail.abb.com

- częstotliwość napięcia.

Parametrem ilustrującym „czystość” widmową napięcia probierczego, który powinien być uwzględniany w pomiarach, jest współczynnik zawartości harmonicznych (*THD* ang. Total Harmonic Distortion) obliczany w następujący sposób:

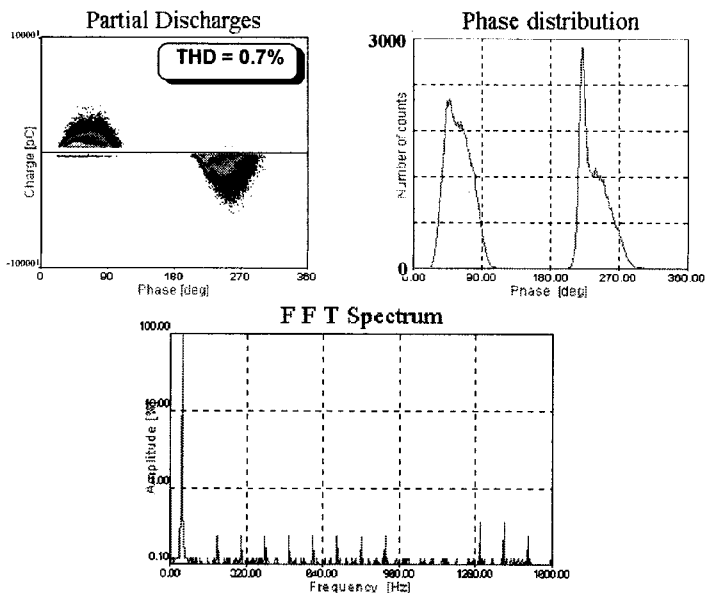
$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\alpha} U_n^2}}{U_s} \quad (1)$$

gdzie: U_s – amplituda sygnału, U_n – amplituda n -tej harmonicznej (licząc od drugiej).

Odształcenia harmoniczne wysokonapięciowego sygnału probierczego nie powinny być mylone ze zniekształceniami sygnału synchronizacji, wykorzystywanego w fazowo rozdzielczych systemach akwizycji wyładowań czasu rzeczywistego.

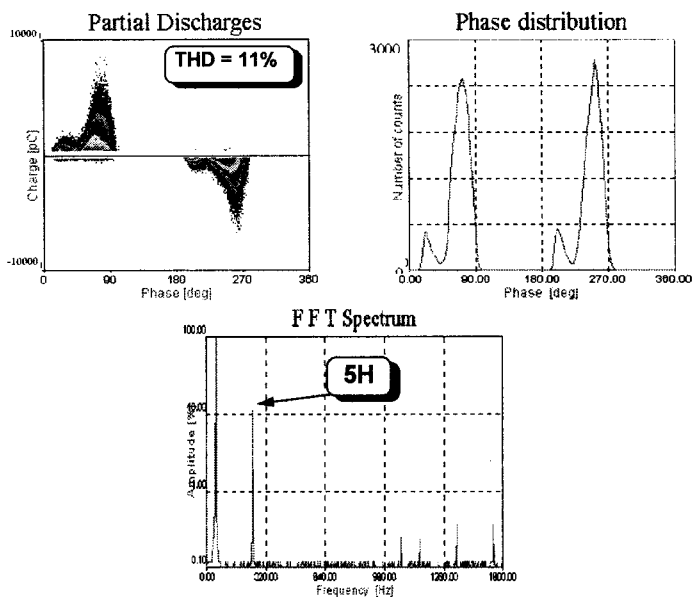
Zawartość harmonicznych może zostać oszacowana poprzez obserwację w widmie sygnału wartości drugiej, trzeciej, czwartej... etc. harmonicznej w odniesieniu do podstawowej amplitudy sygnału. Wartość ta jest zwykle wyrażana jako stosunek w %, ppm lub dB.

2. Wyniki pomiarów



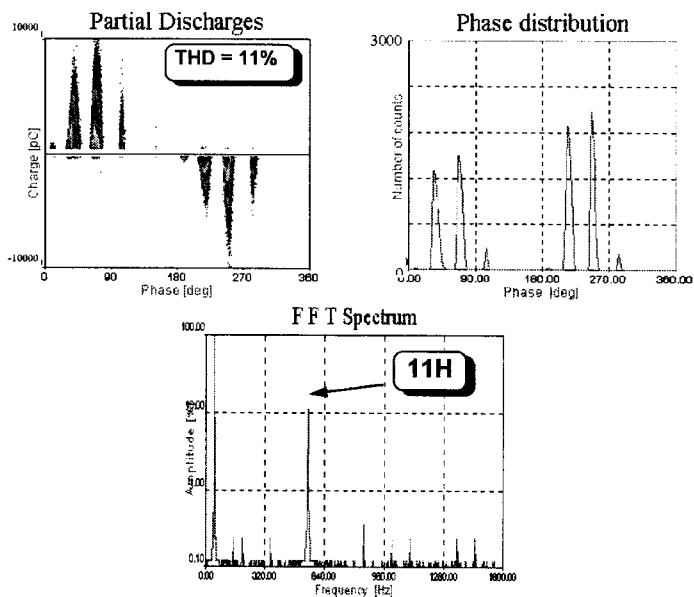
Rys. 1. Wyładowania niepełne rejestrowane przy „czystym” napięciu probierczym ($THD = 0,7\%$) a) obraz wnz, b) rozkład fazowy, c) widmo napięcia probierczego

Zaprezentowane wyniki pomiarów zostały otrzymane za pomocą analizatora harmonicznych, model HA3217 z dedykowanym pakietem oprogramowania stosowanym



Rys. 2. Wyładowania niepełne rejestrowane przy napięciu probierczym zawierającym 5-tą harmoniczną na poziomie $THD = 11\%$: a) obraz wnz, b) rozkład fazowy, c) widmo napięcia probierczego (składnik 250 Hz)

do analizy widmowej, oraz analizatora wyładowań niepełnych (PDA) sterowanego z notebooka poprzez interfejs GPIB←PCMCIA [1]. Wyładowania niepełne są wizualizowane jako obrazy w przestrzeni fazowo-rozdzielczej i rejestrowane przy tej samej skali ładunku, przy czym intensywność została zakodowana stopniami szarości. Analiza widmowa napięcia probierczego była wykonywana w zakresie do 1600 Hz czyli do 32-giej harmonicznnej, natomiast liczba harmonicznnych brano pod uwagę przy obliczaniu THD może być zmienna, i zwykle uwzględnienie pierwszych piętnastu składników jest wystarczające. THD było obliczane za pomocą algorytmu szybkiej transformaty Fouriera (FFT — Fast Fourier Transform) sumując parzyste i nieparzyste składniki analizy widmowej. Długość rekordu dla obliczenia FFT wynosiła 2048 punktów. Na wszystkich prezentowanych wykresach widmowych oś odciętych odpowiada częstotliwości, a rzędnych zlogarytmowanej amplitudzie w procentach. Wszystkie wyniki zostały otrzymane w badaniach tego samego obiektu jakim był pręt generatora i zostały wykonane przy napięciu probierczym 10 kV, częstotliwości 50 Hz i przy parametrycznie zmiennym współczynniku zawartości harmonicznnych. Podczas pomiarów obserwowano wpływ pojedynczych harmonicznnych — parzystych i nieparzystych aż do 15-tej — jak i ich superpozycji. Dla ilustracji tego zjawiska w referacie wybrano do prezentacji efekt występowania piątej i jedenastej harmonicznnej. Wyładowania niepełne przedstawione na rysunku 1a zostały zarejestrowane przy „prawie czystym widmowo” napięciu probierczym, $THD = 0,7\%$. Obraz ten będzie traktowany jako referencyjny. Wprowadzając 5-tą harmoniczną na poziomie



Rys. 3. Wyładowania niepełne rejestrowane przy napięciu probierczym zawierającym 11-tą harmoniczną na poziomie $THD = 11\%$: a) obraz wnz, b) rozkład fazowy, c) widmo napięcia probierczego (składnik 550 Hz)

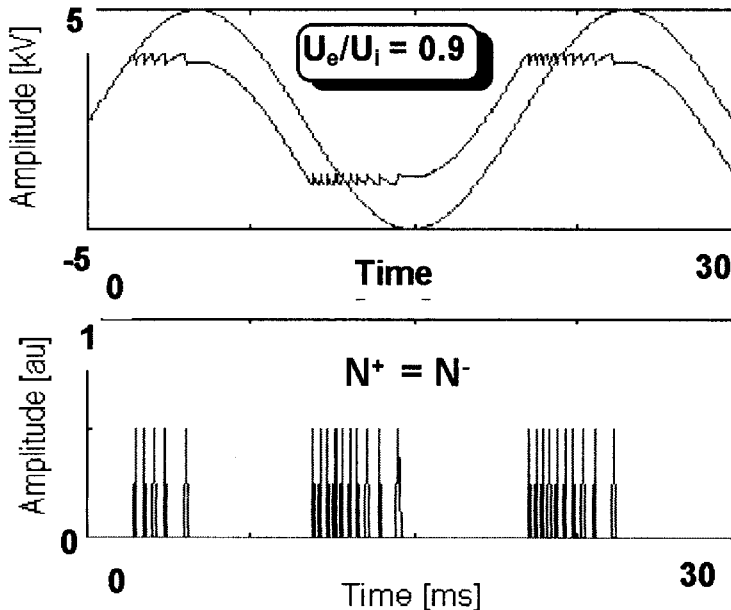
$THD = 11\%$ otrzymano rozszczepienie obrazu wnz (rys. 2) z widoczną przeciwną symetrią na rozkładach fazowych (rys. 1b i 2b). Dodanie z kolei 11-tej harmonicznej ($THD = 11\%$, rys. 3) przejawia się wyładowaniami o dużo większym ładunku maksymalnym (wzrost około 3-krotny w porównaniu z wyładowaniami zarejestrowanymi dla obrazu referencyjnego — rys. 1a i 3a), jak również regularnymi fazowo „martwymi” obszarami. Te dwa przykłady uwiadcniają, że THD może być traktowany jedynie jako globalny i bardzo ogólny parametr oceny wpływu harmonicznych (np. $THD = 11\%$ w obydwu przypadkach jest wynikiem wpływu różnych frakcji harmonicznych) i dla zaawansowanej analizy winno być brane pod uwagę widmo sygnału probierczego. Zawartość harmonicznych w sygnale probierczym jest dodatkowym zewnętrznym czynnikiem, który determinuje warunki fizyczne występowania wyładowań niepełnych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia. Zniekształcenia kształtu przyłożonego napięcia probierczego wpływają w efekcie na liczbę wyładowań [2], ładunek pojedynczego wyładowania i położenie fazowe. Mechanizm fluktuacji obrazów wnz jest wywołany lokalnym zmniejszeniem/zwiększeniem szybkości narastania napięcia. Trend określa kombinacja harmonicznych (parzyste i nieparzyste składniki) jak również ich amplituda. Wystąpienie lokalnego minimum w napięciu probierczym może nawet doprowadzić do zatrzymania występowania wyładowań. Dodatkowym efektem jest wystąpienie „przesunięcia fazowego” impulsów wyładowań. Należy przy tym zauważyć iż podczas pomiaru, którego czas typowo wynosi kilkaset sekund lub minut, pojedyncze harmoniczne mogą zanikać lub pojawiać się powodu-

jąc akumulowaną modulację obrazu. Uwzględnienie tego zjawiska jest tym bardziej ważne w rzeczywistych pomiarach diagnostycznych i monitoringowych wyładowań niezupełnych, gdyż wydaje się niemożliwym dokonanie po pomiarze dekompozycji obrazu i wsteczne odtworzenie wpływu harmonicznych.

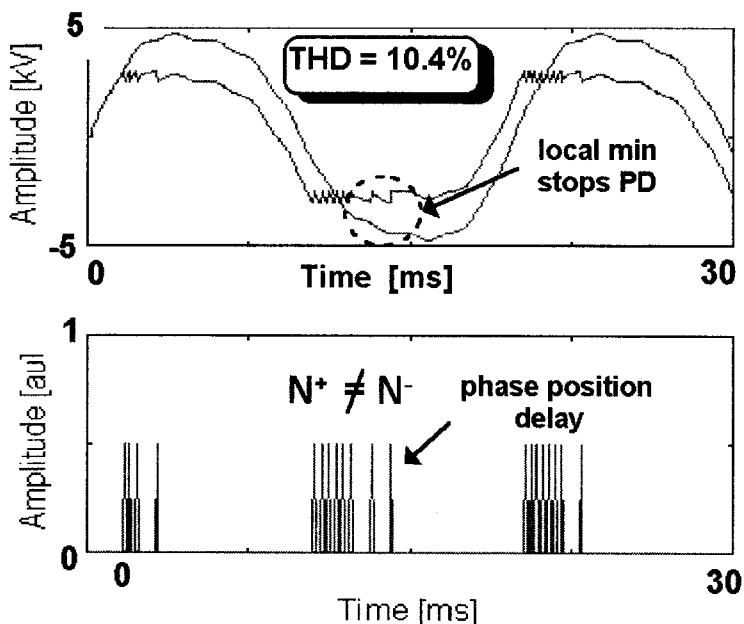
3. Wyniki symulacji

Dla zilustrowania mechanizmu wpływu harmonicznych zostały przeprowadzone symulacje numeryczne na modelu pojedynczej wtrąciny gazowej. W symulacji uwzględniono efekt odształceń harmonicznych napięcia probierczego nie biorąc pod uwagę efektów fizycznych rozwoju wyładowań (przedstawione np. przez Niemeyera w [3]). Wyładowania dla tego przypadku są wyzwalane zgodnie z warunkiem napięciowo-połowym (napięcie zapłonu/gaśnięcia). Warunkiem koniecznym wystąpienia wyładowań jest przekroczenie wartości progowej napięcia natomiast do jego zaistnienia wymagana jest dostępność elektronów. Podczas symulacji założono stosunek napięcia gaśnięcia do zapłonu 0,9. Dla celów porównawczych napięcie probiercze i lokalne napięcie na wtrącinie zostały pokazane w tej samej skali (rys. 4a i 5a) pomijając dzielnik pojemnościowy jaki tworzy obiekt/wtrącina.

„Czyste” napięcie probiercze i odpowiadające mu napięcie na wtrącinie zostały przedstawione na rysunku 4a, natomiast impulsy wyładowań na rysunku 4b. Wyniki symulacji z uwzględnieniem udziału harmonicznych przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 4. a) Napięcie probiercze bez udziału harmonicznych dla $U_e/U_i = 0,9$ b) Położenie fazowe impulsów wyładowań niezupełnych



Rys. 5. a) Napięcie probiercze zawierające 5-tą (10%) i 11-tą (3%) harmoniczną oraz odpowiadające napięcie na wtrącinie b) Położenie fazowe impulsów wyładowań niepełnych

Napięcie probiercze zawiera w tym przypadku 5-tą harmoniczną na poziomie 10% oraz 11-tą harmoniczną na poziomie 3%, co odpowiada współczynnikowi zawartości harmonicznych $THD = 10,4\%$. Można zaobserwować, że zmniejszenie nachylenia napięcia (dU/dt) (rys. 5a) przejawia się w przesunięciu fazowym impulsów wyładowań (rys. 5b). Lokalne minimum w przebiegu napięcia może nawet zatrzymać występowanie wyładowań (w porównaniu z wyładowaniami dla napięcia nieodkształconego) co potwierdzają również wyniki pomiarów (rys. 3). Jako konsekwencja asymetrii kształtu napięcia probierczego widoczna jest nierówna liczba wyładowań dla dodatniego i ujemnego półokresu (rys. 5b).

4. Podsumowanie

Wpływ odkształceń harmonicznych występujących w napięciu probierczym przejawia się w obrazach wyładowań niepełnych. Zjawisko to jest szczególnie ważne w pomiarach fazowo-rozdzielczych, gdzie poszczególne impulsy wyładowań są akumulowane i nakładane dla każdego okresu do tej samej matrycy pamięci. Jeżeli w czasie pomiaru wnz pojawi się zawartość harmonicznych w napięciu probierczym to efektywny obraz wnz będzie zniekształcony. Ponadto w diagnostycznych pomiarach porównawczych (wzorcowe/parametryczne bazy danych) identyfikacja wnz powinna przebiegać ze szczególną ostrożnością. Reasumując zalecanym wydaje się włączenie analizy harmonicznych napięcia probierczego do systemów akwizycji wyłado-

wań niezupelnych i pomiar nie tylko wartosci szczytowej lub sredniej napięcia oraz częstotliwości jako parametrów charakterystycznych, ale również śledzenie kształtu napięcia. Częstotliwość próbkowania winna być dobrana z uwzględnieniem liczby analizowanych harmoniczných. Jako prosty parametr oceny został zaproponowany współczynnik zawartości harmoniczných (*THD*).

Literatura

- [1] **Florkowski M.**: *Partial Discharge Image Recognition Using Neural Network for High Voltage Insulation Systems*, Monographies No 45, ISSN 0867-6631, Kraków 1996
- [2] **Bennett A. I.**: *Endurance of electrical insulation under non-sinusoidal voltage stress*, Annual Report of the CEIDP, 1987
- [3] **Niemeyer L., Fruth B., Gutfleisch F.**: *Simulation of Partial Discharges in Insulation Systems*, 7th Int. Symp. on High Voltage Eng., Dresden 1991

HARMONIC DISTORTION OF HIGH VOLTAGE AND PARTIAL DISCHARGE PATTERNS

This paper describes the influence of high voltage harmonics on partial discharge (PD) phase resolved images. The evolutions of these images as a dependency of total harmonic distortion (*THD*) parameter being an assessment factor; calculated by means of Fast Fourier Transform (FFT), are shown. The numerical simulation which presents the harmonic influence on PD is also reported. The basic principles of harmonic analysis along with measurement setup are illustrated.

Część wyników badań przedstawionych w niniejszym referacie pochodzi z prac wykonanych w AGH w Zakładzie Elektroenergetyki w ramach Projektu Badawczego Nr: 8 T10A 065 10 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.