

Zastosowanie metody UHF do pomiaru WNZ w WN rozdzielnicach gazowych oraz kablach i transformatorach energetycznych

Streszczenie. W artykule zostały przedstawione przykłady pomiaru wylądowań niepełnych (WNZ) metodą bardzo wysokiej częstotliwości (UHF) w rozdzielnicach gazowych wysokich napięć, kablach i transformatorach energetycznych. Wyniki uzyskane metodą UHF porównano z wynikami uzyskanymi innymi metodami pomiarowymi WNZ w tym metodą konwencjonalną opartą na pomiarach ładunku pozornego, metodą elektryczną w zakresie częstotliwości do 40 MHz oraz metodą akustyczną.

Abstract. This article presents the examples of the measurement of partial discharges (PD) using ultra-high frequency (UHF) method in high voltage gas insulated switchgear, cables, and power transformers. The results obtained with the UHF method are compared with those obtained with other PD measurement methods including the conventional method based on apparent charge measurements, the electrical method in the frequency range up to 40 MHz and the acoustic method. **Application of the UHF method for PD measurements in HV gas insulated switchgears, cables and power transformers.**

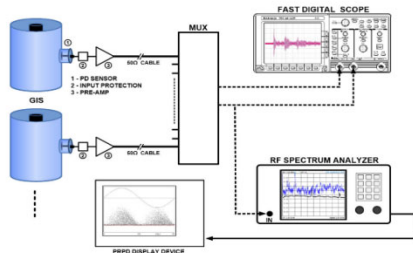
Słowa kluczowe: aparatura wysokonapięciowa, diagnostyka, pomiar wylądowań niepełnych, metoda bardzo wysokiej częstotliwości.

Keywords: high voltage apparatus, diagnostics, partial discharge measurement, ultra-high frequency method.

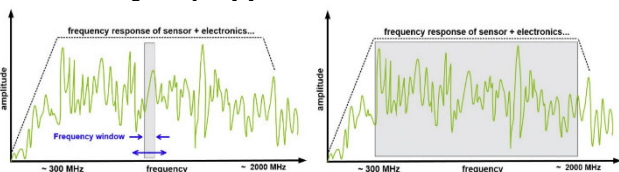
Wstęp

Pomiar wylądowań niepełnych (WNZ) jest ogólnie stosowaną metodą oceny stanu jakości izolacji urządzeń energetycznych wysokiego napięcia (WN). Stosuje się różne metody pomiarowe: elektryczne, metodę konwencjonalną opartą o pomiar ładunku pozornego, bardzo kłopotliwą ze względu na duże oddziaływanie zakłóceń na układ pomiarowy oraz metodę bardzo wysokiej częstotliwości (ang. ultra high frequency - UHF) jak również metody niekonwencjonalne – nieelektryczne - oparte o pomiar zjawisk fizycznych towarzyszących WNZ: metodę akustyczną służącą głównie do lokalizacji miejsca emisji WNZ, metodę optyczną opartą o pomiar intensywności światła towarzyszącego WNZ lub metodę chemiczną DGA (ang. dissolved gas analysis) opartą o pomiar chromatograficzny gazowych produktów rozkładu oleju.

Wśród wymienionych metod coraz większego znaczenia nabiera metoda UHF. Polega ona na pomiarze pola elektrycznego wytworzonego przez WNZ w zakresie bardzo wysokich częstotliwości. Jest ona ogólnie uznana metodą pomiaru WNZ w WN rozdzielnicach z SF₆ (GIS) i staje się coraz bardziej popularna do oceny stanu izolacji w transformatorach mocy i kablach energetycznych [1,2,3].



Rys.1. Schemat typowego układu pomiarowego używanego do pomiarów WNZ metodą UHF w wysokonapięciowych rozdzielnicach gazowych [2]



Rys.2. Pomiary metodą UHF w wąskim i szerokim zakresie częstotliwości [2]

Zasada pomiaru WNZ metodą UHF

Pierwsze prace wnoszące zdecydowany postęp do rozwoju metody UHF i opisujące jej możliwości aplikacyjne pochodzą z końca lat osiemdziesiątych ubiegłego stulecia [4]. W początkowym okresie stosowania metody UHF, sygnały WNZ obserwowano za pomocą dostępnych najszybszych oscyloskopów lub analizatorów widma (rys. 1) Praktyka ta jest kontynuowana do dziś, zarówno w laboratorium jak i w miejscu zainstalowania urządzeń energetycznych ponieważ analizator widma umożliwi obserwację sygnałów w całym interesującym paśmie częstotliwości. Doświadczony operator rozróżnia sygnały zakłócenia i rzeczywiste WNZ, a nawet potrafi określić typ defektu [2, 5].

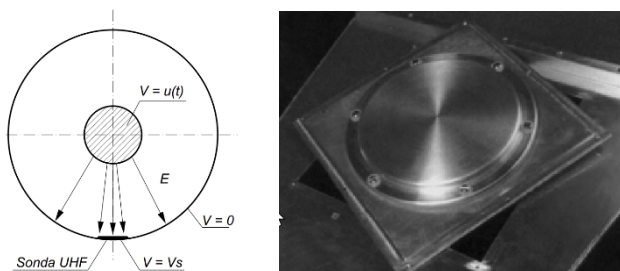
Na rysunku 2 przedstawiono dwa sposoby pomiaru metodą UHF: w wąskim zakresie częstotliwości od 3 do 5 MHz (ang. narrow-band) oraz w szerokim zakresie częstotliwości najczęściej od 200 do 2000 MHz (ang. wide-band). Pomiary szerokopasmowe są typowe dla systemów monitorowania ciągłego.

Wykorzystanie metody UHF do monitoringu WNZ w rozdzielnicach GIS

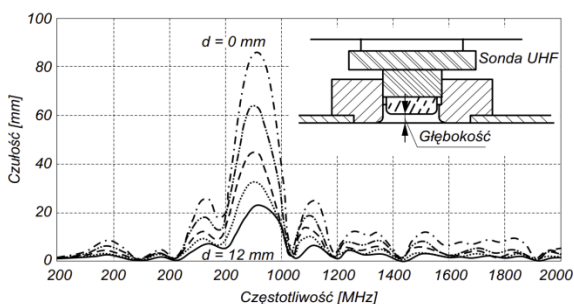
Pomiaru pola elektrycznego w zakresie UHF dokonuje się za pomocą sond rozmieszczonych wewnątrz lub na zewnątrz obudowy rozdzielnic, w różnych jej miejscach. W większości przypadków, w celu uzyskania jak najlepszej czułości, sondy umieszcza się we wnętrzu rozdzielnic. Ze względów praktycznych nie istnieje jednak możliwość budowy sondy w postaci koncentrycznej, otaczającej elektrodę WN, a jedynie jako płytki metalowej o danym promieniu, umieszczonej w polu elektrycznym rozdzielnic i odizolowanej od jej uziemionej obudowy (rys. 3). Sondy mogą być również usytuowane na szklanych wizjerach przeznaczonych do kontroli stanu styków w odłącznikach lub na dielektrycznej krawędzi izolatora odstępnikowego.

Sprawdzenie czułości samej sondy sprawdza się do pomiaru jej odpowiedzi w przedziale częstotliwości od 200 do 2000 MHz. W tym celu sonda jest umieszczana w komorze TEM (ang. transverse electromagnetic), w takiej samej konfiguracji przestrzennej jak w rzeczywistym układzie rozdzielnic [1]. Następnie poddawana jest ona działaniu jednorodnego pola elektrycznego o określonej wartości. Czułość sondy jest mierzona jako stosunek napięcia wytwarzanego na jej zaciskach w stosunku do wartości pola elektrycznego w jej otoczeniu i jest określona w V/(Vmm⁻¹). Na rysunku 4 została przedstawiona

przykładowa odpowiedź częstotliwościowa sondy w funkcji odległości od wewnętrznej ściany obudowy rozdzielnic.



Rys.3. Usytuowanie sondy UHF we wnętrzu rozdzielnic; V potencjał elektryczny, Vs potencjał elektryczny na sondzie pomiarowej oraz jej przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne

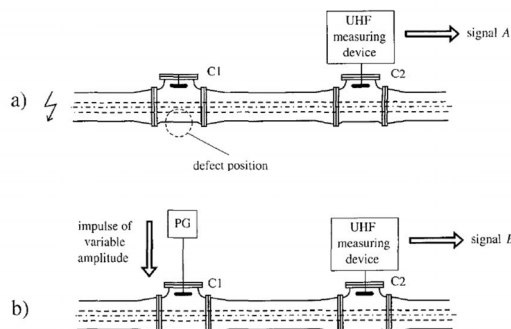


Rys.4. Odpowiedź częstotliwościowa sondy UHF

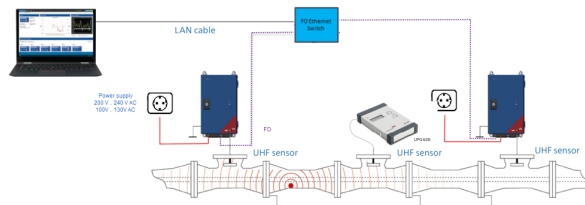
W ciągu ostatnich 10 lat zainstalowano w rozdzielnicach gazowych wysokich napięć ponad 700 systemów monitorowania ciągłego WNZ. Procedura weryfikacji czułości systemu UHF została po raz pierwszy przedstawiona przez CIGRE Task Force 15/33.03.05 w 1999 roku [7]. Od tego czasu producenci i użytkownicy GIS zdobyli duże doświadczenie w stosowaniu proponowanej metody weryfikacji czułości, a w 2016 r. CIGRE WG D1.25 opublikowała broszurę TB 654, w której podano szczegółowy opis dwuetapowej procedury poparty przykładami [8]. Zaproponowana procedura zapewnia, że defekty wytwarzające ładunek pozorny 5 pC lub większy mogą być wykryte przez system UHF.

W Etapie 1 należy wyznaczyć amplitudę udaru skalującego, który doprowadzony do sondy wytworzy w jej otoczeniu sygnał UHF o amplitudzie i częstotliwości odpowiadającym sygnałowi emitowanemu przez ładunek pozorny o wartości 5 pC rzeczywistego defektu. W tym celu należy umieścić w przedziale rozdzielnic, w niewielkiej odległości, dwie sondy pola C1 i C2 (rys. 5) i jeden z typowych defektów (ruchomą cząstkę przewodzącą lub ostrze na elektrodzie WN), po czym do układu należy doprowadzić napięcie probiercze i zmierzyć poziom WNZ. W chwili gdy ładunek pozorny osiąga wartość 5 pC, należy dokonać pomiaru sygnału na czujniku C2. Po usunięciu defektu, do sondy C1 należy doprowadzić niskonapięciowy udar o czasie trwania czoła ok. 0.5 ns i zwiększać amplitudę udaru do wartości, przy której sygnał na sondzie C2 będzie w przybliżeniu równy sygnałowi obserwowanemu uprzednio, dającemu ładunek pozorny o wartości 5 pC.

Weryfikacja czułości układu UHF powinna być kontynuowana w miejscu zainstalowania rozdzielnic (Etap 2). Skalujący udar, o wcześniej wyznaczonej amplitudzie, jest doprowadzany kolejno do każdej sondy. Jednocześnie mierzona jest odpowiedź na ten sygnał na sąsiedniej sondzie (rys. 6). Jej brak wskazywałby na niewłaściwe, zbyt odległe rozmieszczenie sond.

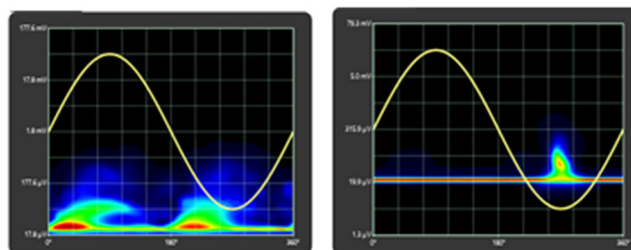


Rys.5. Układ do kontroli czułości systemu monitorowania w laboratorium według zaleceń CIGRE [7]

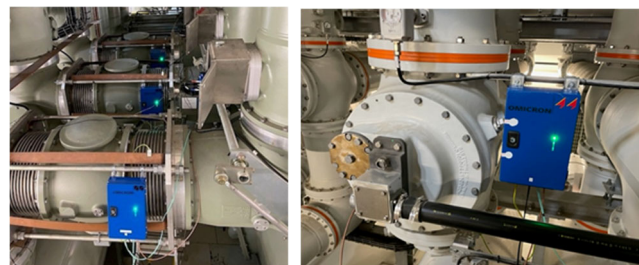


Rys.6. Przykładowy układ do kontroli czułości metody UHF w miejscu zainstalowania GIS, Etap 2

W czasie eksploatacji rozdzielnic każde pojawienie się sygnału WNZ powinno być natychmiast automatycznie analizowane. Aby ułatwić identyfikację typu defektu, została zaproponowana cyfrowa technika akumulacji sygnałów WNZ w czasie i w korelacji z fazą napięcia probierczego - obrazy PRPD (ang. phase resolved PD diagrams). Przykłady obrazów PRPD gdzie amplituda impulsu WNZ jest odniesiona do wartości kąta fazowego napięcia dla wtrąciny gazowej we wnętrzu izolatora odstępnikowego oraz ostrza - nierówności na elektrodzie wysokiego napięcia we wnętrzu rozdzielnic gazowej - przedstawione są na rysunku 7.



Rys.7 Przykładowe obrazy PRPD dla wtrąciny gazowej we wnętrzu izolatora odstępnikowego (po lewej) oraz ostrza na elektrodzie wysokiego napięcia (po prawej)



Rys.8 Przykład instalacji systemu monitorowania WNZ metodą UHF

Na rysunku 8 przedstawiona jest jednokanałowa, modułowa jednostka zbierania i gromadzenia danych z monitoringu spełniająca aktualne wymagania CIGRE [8]. Tak zaprojektowana, może być instalowana w

bezpośrednim sąsiedztwie sondy UHF co pozwala na skrócenie długości kabli pomiarowych, a więc zwiększenie czułości pomiarowej bez konieczności stosowania dodatkowych wzmacniaczy sygnału. Poszczególne jednostki pomiarowe są zsynchronizowane między sobą poprzez łącza internetowe, nie ma więc potrzeby instalacji dodatkowego serwera. Urządzenie pracuje jednocześnie w szerokim, od 100 MHz do 2 GHz zakresie częstotliwości oraz w trzech 80 MHz przedziałach częstotliwości, wybranych w obszarach o niskim poziomie zakłóceń.

Pomiary WNZ w transformatorach energetycznych

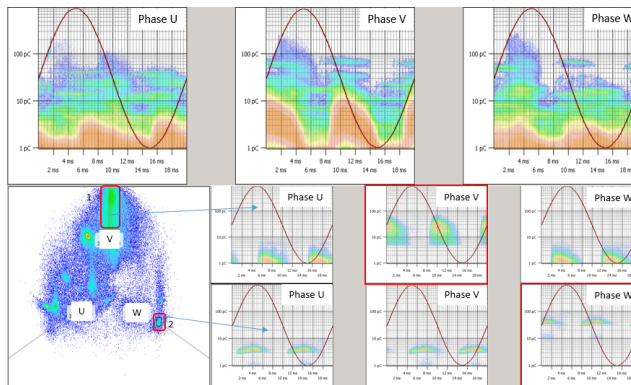
Sygnaly WNZ wewnątrz kadzi transformatora generują fale elektromagnetyczne w otaczającym oleju. Uziemienie kadzi zapewnia wysoki poziom ekranowania przed zakłóceniami zewnętrznymi w zakresie UHF, a sygnały doświadczają jedynie umiarkowanego tłumienia, dlatego też pomiary metodą UHF osiągają wysoką czułość również w przypadku prób polowych [9,10]. Dodatkowo doświadczalnie potwierdzono, że sygnał UHF może być wykorzystywany jako wyzwalacz do akustycznej lokalizacji wyladowań niezupełnych a także nadaje się do monitorowania WNZ w systemie on-line.

System monitorowania ciągłego WNZ metodą standardową i UHF został zainstalowany na 230 kV przepustach RBP transformatora 130/130/100 MVA – 230/115/48 kV będącego w użytkowaniu od czterdziestu lat. Na zacisku pomiarowym każdego przepustu została zainstalowana sonda WNZ dla metody konwencjonalnej a do zaworu spustowego oleju znajdującego się w górnej części kadzi została wprowadzona sonda UHF (rys. 9). Wszystkie cztery sondy zostały połączone kablem pomiarowym do tej samej jednostki rejestracji danych, a następnie światłowodem do centralnego komputera umieszczonego w kabinie kontrolnej stacji. W przypadku sondy UHF, połączenia wykonano kablem o niskim tłumieniu w zakresie wysokich częstotliwości.



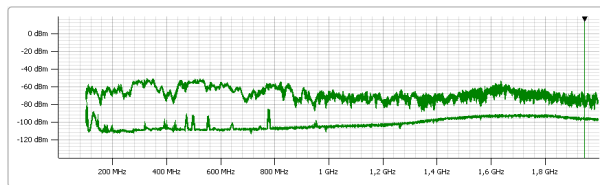
Rys.9 Sonda metody standardowej (po lewej) i sonda UHF (po prawej)

Na rysunku 10 przedstawiono zarejestrowane wartości WNZ w poszczególnych fazach. Dla każdego punktu z przebiegu rejestrowane są w pamięci systemu dwa obrazy: PRPD, mierzony w każdej z faz oraz 3PARD (ang. 3-Phase Amplitude Relation Diagram), dający sumaryczny obraz WNZ w trzech fazach [11]. Obraz PRPD jest złożony, gdyż sygnały zakłóceniami nakładają się na siebie oraz na sygnały od WNZ we wnętrzu transformatora. W celu rozdzielenia obrazów od poszczególnych źródeł wykorzystano technikę 3PARD. Na rysunku 10 można zaobserwować dwa Klaster. Obraz PRPD dla Klastera nr 1 wskazuje na obecność wtrącin gazowych w izolacji uzwojenia [5]. Najwyższa wartość sygnału została zarejestrowana przy pomiarze w fazie V, ale oddziaływanie WNZ jest również widoczne przy pomiarze w fazie U i W. Klaster nr 2 jest typowy dla wyladowań powierzchniowych, w tym przypadku w sąsiedztwie fazy W. Pozostałe Klaster widoczne w 3PARD są generowane przez zakłócenia.

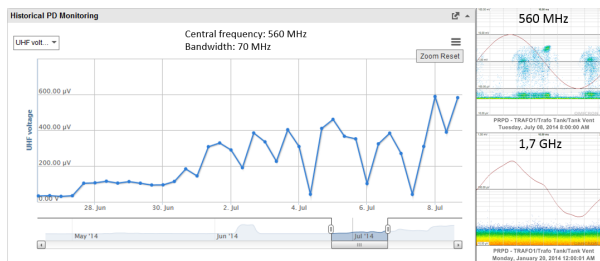


Rys.10 Rozdzielenie źródeł WNZ i ich obrazów PRPD przy użyciu techniki 3PARD

Widmo UHF po założeniu transformatora do sieci (ang. on-line) jest przedstawione na rysunku 11. Obecność WNZ jest widoczna w zakresie częstotliwości od 450 do 650 MHz. Przy pomiarach w zakresie częstotliwości powyżej 1 GHz nie wykryto obecności WNZ. Na rysunku 12 przedstawiony jest trend rosnących wartości amplitudy sygnału WNZ w zakresie UHF oraz przykładowe obrazy PRPD dla pomiarów wykonanych dla częstotliwości 560 MHz i 1,7 GHz i skorelowanych z fazą napięcia U.



Rys.11 Widmo sygnału UHF dla transformatora w pozycji „on-line”



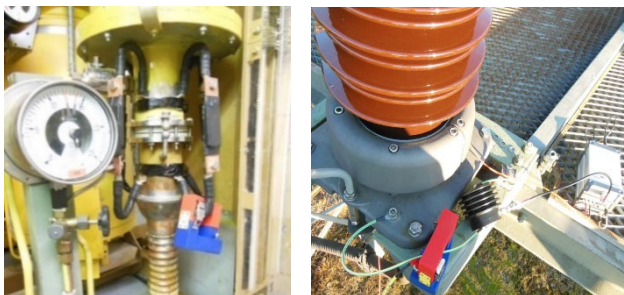
Rys.12 Przebieg czasowy sygnału UHF oraz obrazy PRPD dla dwóch różnych częstotliwości pomiarowych

WNZ zostały wykryte i zlokalizowane w fazach V i W, zarówno w czasie pomiarów metodą standardową jak również UHF. Pomiary akustyczne oraz wizja lokalna potwierdziły te przypuszczenia. Technika pomiaru 3PARD okazała się bardzo pomocna do identyfikacji źródła WNZ. Wyniki pomiarów skonfrontowano z rezultatami pomiarów rozpuszczonych gazów w oleju transformatora (ang. Dissolved Gas Analysis – DGA). Wzrost koncentracji wodoru (H_2) i metanu (CH_4) potwierdza obecność WNZ. Wzrost ilości tlenku węgla (CO) wskazuje na degradację papieru, prawdopodobnie jako efekt uboczny oddziaływania WNZ.

Pomiary WNZ w głowicach kablowych

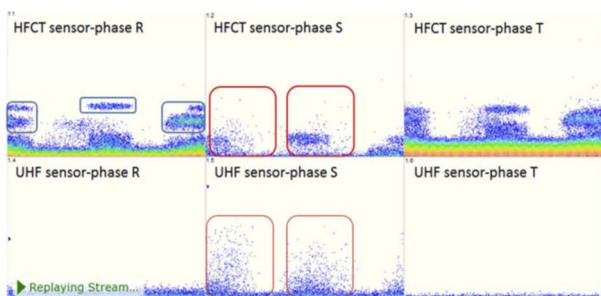
Pomiar wyladowań niezupełnych w głowicach kablowych można wykonać używając kondensatora sprzęgającego lub za pomocą przekładnika prądowego wysokiej częstotliwości (HFCT) lub sondy UHF zainstalowanej w zaworze olejowym (rys. 13). Pomiar za pomocą kondensatora sprzęgającego odbywa się głównie podczas próby odbiorczej w fabryce (ang. factory acceptance test - FAT) lub w czasie próby w miejscu zainstalowania kabla (ang. site acceptance test - SAT).

W przypadku pomiarów on-line najczęściej stosuje się czujniki indukcyjne HFCT mierząc prąd WNZ w ekranie kabla lub pojemnościowe sondy UHF. Pomiary tego typu przeprowadzono na 110 kV kablu gazowym ciśnieniowym o długości 1,9 km po 43 latach jego bezawaryjnej pracy. Kabel łączy rozdzielnicę GIS z linią napowietrzną. Pomiary czujnikami indukcyjnymi HFCT wykonano po obu stronach linii kablowej natomiast na przepustach od strony linii napowietrznej, dodatkowo i synchronicznie z pomiarami HFCT, wykonano pomiary za pomocą sond UHF (rys. 13). Po stronie linii napowietrznej poziom zakłóceń jest zdecydowanie wyższy i pomiar metodą UHF pozwala uzyskać lepszą czułość pomiarową i wiarygodną interpretację wyników pomiarowych. Nie wykryto źródła WNZ w głowicach kablowych od strony GIS.



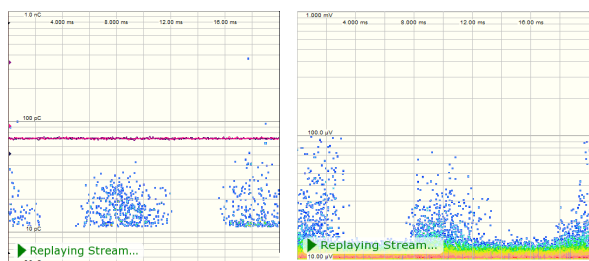
Rys.13. Rozmieszczenie czujników WNZ (HFCT i UHF) na głowicach kabla gazowego 110 kV

W celu sprawdzenia czułości i selektywności pomiaru oboma metodami, umieszczono na szynie WN w fazie R ostrze wytwarzające przy napięciu pracy wyładowanie ulotowe. Wyniki pomiarów przedstawione są na rysunku 14.



Rys.14. Obrazy PRPD uzyskane czujnikami HFCT i UHF zamocowanymi na głowicy kablowej od strony linii napowietrznej

Zgodnie z oczekiwaniem, wyładowanie ulotowe zostało zarejestrowane we wszystkich trzech fazach czujnikami HFCT pracującymi w zakresie częstotliwości do 14 MHz. Pomiarami w zakresie od 100 MHz do 1 GHz wykonanymi za pomocą sond UHF nie wykryto wyładowania ulotowego. W fazie S został zarejestrowany sygnał WNZ zarówno sondą HFCT jak również UHF (rys. 15).



Rys.15. Obrazy PRPD rejestrowane w fazie S dwoma typami czujników: HFCT (po lewej) i UHF (po prawej)

Jednoczesne wykrycie sygnału WNZ oboma metodami potwierdza obecność źródła wyładowań we wnętrzu głowicy. Wzorce PRPD rejestrowane w fazie S za pomocą obu typów czujników mają podobny obraz, ale amplituda sygnałów generowanych i propagowanych w oparciu o różne zjawiska fizyczne nie może być porównywana. Silne tłumienie sygnału UHF uniemożliwia wykrycie defektów w oddalonych od miejsca pomiaru mufach kablowych.

Wnioski

Na podstawie przedstawionych wyników pomiarowych potwierdziła się możliwość stosowania metody UHF do pomiaru WNZ w WN rozdzielnicach gazowych, transformatorach mocy i głowicach kabli energetycznych. Metoda ma szereg zalet i daje możliwość:

- wykonania czułego pomiaru WNZ w warunkach polowych,
- identyfikacji typu źródła WNZ, jak również pozwala odróżnić sygnał WNZ od zewnętrznych zakłóceń,
- lokalizacji miejsca źródła wyładowania,
- jej stosowania razem z innymi metodami pomiaru WNZ takimi jak metoda konwencjonalna oparta o pomiar ładunku pozornego czy metoda akustyczna,
- zastosowania do monitoringu ciągłego WNZ.

Wadą metody jest brak możliwości kalibracji mierzonego sygnału w odniesieniu do wartości ładunku pozornego mierzonego metodą konwencjonalną. Sygnał UHF jest silnie tłumiony i dlatego też jego amplituda silnie zależy od miejsca lokalizacji zarówno źródła WNZ jak i sondy UHF.

Autor: dr hab. inż. Wojciech Kołtunowicz, OMICRON Energy Solutions GmbH, Lorenzweg 5, 12099 Berlin, Niemcy, Email: wojciech.koltunowicz@omicronenergy.com

LITERATURA

- [1] Kołtunowicz W., Badania diagnostyczne izolacji rozdzielnic gazowych wysokiego napięcia. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej* (2003), Zeszyt 124
- [2] CIGRE Technical Brochure 662, Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC 60270) and unconventional methods, August 2016, www.e-cigre.org
- [3] Weissenberg W, Wunderlin T., Sekula O., Strehl T., Elze H., Markalou S., UHF-PD-Monitoring and On-site Commissioning Test of 400 kV XLPE Insulated Cable Circuits at Jebel Ali / Dubai, *JiCable Conference*, 2007
- [4] Hampton B. and Meats R.J, Diagnostic Measurements at UHF in Gas Insulated Substations, *IEEE Proceedings C: Generation, Transmission and Distribution*, 1988. Vol. 135, Issue 2
- [5] Kołtunowicz W., Badicu L-V, Broniecki U. and Belkov A., Increased Operation Reliability of HV Apparatus through PD Monitoring, *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, Vol. 23, No. 3
- [6] CIGRE Joint Task Force 15/33.03.05: Partial Discharge Detection System for GIS: Sensitivity Verification for the UHF Method and the Acoustic Method, *ELECTRA*, No. 183, 1999, pp. 75 - 87, www.e-cigre.org
- [7] CIGRE Technical Brochure 654: UHF partial discharge detection for GIS: Application guide for sensitivity verification, April 2016, www.e-cigre.org
- [8] CIGRE Technical Brochure 933: Requirements and application of UHF PDM systems for gas insulated systems, May 2024, www.e-cigre.org
- [9] Judd M., PD Monitoring for Power Transformers using UHF Sensors Part 2: Field Experience, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2005, Vol. 21, No. 3
- [10] CIGRE Technical Brochure 887: Life extension of oil filled transformers and shunt reactors, December 2022, www.e-cigre.org
- [11] Kołtunowicz W. and Plath R., Synchronous Multi-Channel PD Measurements, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, Vol.15, No. 6