

Analiza sygnałów WNZ rejestrowanych metodami alternatywnymi w rozdzielnicach SN w izolacji powietrznej

Analysis of PD signals recorded using alternative methods in air-insulated MV switchboard

Streszczenie. W artykule opisano metody TEV, HFCT i VHF/UHF służące do detekcji wyładowań niepełnych w rozdzielnicach średniego napięcia w izolacji powietrznej. Zestawiono podstawowe zasady działania poszczególnych czujników oraz ich wady i zalety. Przedstawiono porównanie wyników pomiarów uzyskanych przy użyciu każdej z metod i omówiono kluczowe aspekty przetwarzania sygnału. Na końcu wskazano obszary zastosowań metod detekcji w zależności od warunków eksploatacyjnych rozdzielnic SN.

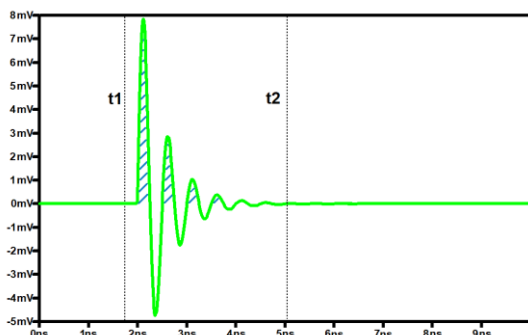
Abstract. This paper presents the TEV, HFCT, and VHF/UHF methods used to detect partial discharges in air-insulated medium-voltage switchgear. It compares the fundamental principles of operation of each sensor, as well as their advantages and disadvantages. The paper presents a comparison of measurement results obtained with each method and discusses key aspects of signal processing. Finally, it highlights areas where detection methods can be applied depending on the operating conditions of MV switchgear.

Słowa kluczowe: wyładowania niepełne, rozdzielnice średniego napięcia, TEV, HFCT, VHF/UHF

Keywords: partial discharges, medium-voltage switchgears, TEV (transient earth voltage), HFCT (high-frequency current transformer), VHF/UHF (very/ultra high frequency)

Wstęp

Zgodnie z definicją normy [1] wyładowania niepełne to lokalne, niepełne przebicia elektryczne w układach izolacyjnych, które mogą prowadzić do degradacji materiałów izolacyjnych i w konsekwencji do awarii urządzeń elektroenergetycznych. Wyładowania niepełne emitują sygnały, które charakteryzują się czasami narastania zbocza rzędu 1 ns w materiałach dielektrycznych. Najczęściej do określania ich wartości używa się liczby elektronów mierzonej w pC (piko Kulomb) gdzie 1 pC odpowiada ładunkowi 6 241 509 elektronów.



Rys. 1. Symulowany impuls wyładowania niepełnego

Energia wyładowania obliczana jest na podstawie wzoru [2]:

$$(1) \quad q = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt = \frac{1}{R} \int_{t_1}^{t_2} u(t) dt$$

Wczesne wykrywanie WNZ jest niezwykle ważne dla zapewnienia niezawodności i bezpieczeństwa systemów elektroenergetycznych, ponieważ umożliwia podjęcie działań zapobiegawczych przed wystąpieniem poważnych uszkodzeń.

W literaturze naukowej [3] przyjmuje się podział pomiarów WNZ na metody konwencjonalne (zgodny z normą IEC/PN-EN 60270 i alternatywne, tzw. metody on-line.

W artykule zostały przeanalizowane i porównane wyniki uzyskane za pomocą różnych metod alternatywnych detekcji WNZ. W literaturze naukowej oraz naukowo-technicznej spotyka się metody takie jak:

- antena UHF (Ultra High Frequency): Metoda ta polega na detekcji fal elektromagnetycznych emitowanych przez wyładowania w zakresie wysokich lub ultra wysokich częstotliwości. Jest szczególnie skuteczna w wykrywaniu WNZ w izolacji olejowej oraz gazowej [4, 5, 6];

- sensor TEV (Transient Earth Voltage): Czujniki TEV mierzą przejściowe napięcia doziemne generowane przez wyładowania niepełne, co pozwala na identyfikację źródeł WNZ w rozdzielnicach. Szczegółowy opis działania czujnika zawarto w artykułach [7, 8];

- sensor HFCT (High-Frequency Current Transformer): HFCT to wysokoczęstotliwościowe przekładniki prądowe, które wykrywają impulsy prądowe związane z wyładowaniami niepełnymi, umożliwiając monitorowanie stanu izolacji kabli i innych komponentów systemu [4, 9].

Antena VHF/UHF

Metoda pomiaru wyładowań niepełnych za pomocą anten VHF i UHF opiera się na detekcji fal elektromagnetycznych powstających na skutek przepływu ładunku elektrycznego. Wyładowania niepełne są związane z lokalnymi jonizacjami w dielektrykach, które emitują impulsy elektromagnetyczne. Do ich detekcji w układach wykorzystujących izolację powietrzną jak i wykonanych z materiałów stałych stosowany jest zakres częstotliwości HF/VHF (3 MHz – 300 MHz) [5, 7, 10]. Natomiast w przypadku izolacji zawierającej inne gazy skuteczniejszy okazuje się zakres częstotliwości UHF (300 MHz – 3000 MHz) [6].

Antena VHF jest w stanie odbierać sygnały wysokiej częstotliwości, które następnie wymagają przetwarzania i analizowania w celu identyfikacji i oceny charakterystyki wyładowań. Warunkiem koniecznym wykorzystania tej metody jest umiejscowienie anteny w pobliżu badanego obiektu (na przykład we wnętrzu rozdzielnic) oraz zastosowanie filtracji i wzmacniania sygnału, aby wyeliminować zakłócenia i skoncentrować się na emisji związanej z wyładowaniami [1]. Analiza sygnałów pozwala na określenie lokalizacji i intensywności wyładowań, co umożliwia diagnostykę stanu izolacji urządzeń elektroenergetycznych. Na podstawie analizy literaturowej przygotowano rzeczywisty model takiej anteny, (przedstawiony na rys. 2), który poddano badaniom.



Rys. 2. Przykład anteny VHF

Wadą tej metody jest ograniczony zasięg detekcji, który wymaga umiejscowienia anteny w stosunkowo niewielkiej odległości od źródła wylądowań. Istnieje także ryzyko wpływu zakłóceń zewnętrznych, zwłaszcza w środowiskach o dużej liczbie urządzeń emitujących fale elektromagnetyczne w paśmie VHF, co może prowadzić do błędnej interpretacji sygnałów. Koszt zakupu i instalacji systemu detekcji opartego na antenach VHF jest wyższy w porównaniu z innymi metodami pomiaru wylądowań niepełnych, głównie ze względu na wysoki koszt urządzeń przetwarzających sygnały w paśmie VHF.

Zaletą anteny VHF do detekcji wylądowań niepełnych jest jej wysoka czułość na impulsy elektromagnetyczne generowane przez te wylądowania, co pozwala na wykrywanie ich w bardzo wczesnej fazie, zanim dojdzie do poważniejszych uszkodzeń izolacji [6, 7]. Niewątpliwym atutem jest bezkontaktowy charakter pomiaru, który nie wymaga modyfikacji badanego urządzenia i umożliwia instalację anteny bez ingerencji w jego strukturę zapewniając izolację galwaniczną.

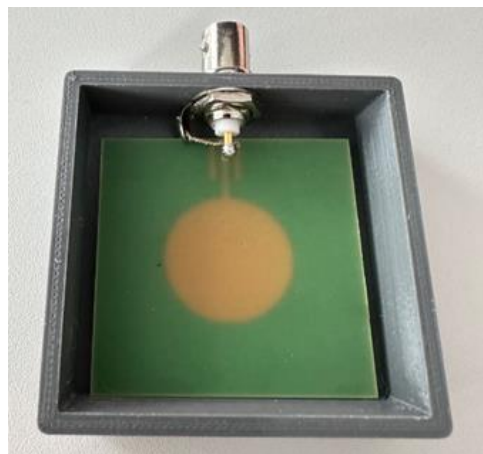
Sensor TEV

Sensor TEV działa na zasadzie sprzężenia pojemnościowego, czujnik jest przymocowany do metalowej obudowy urządzenia lub przewodnika związanego z systemem uziemiającym. Rejestruje on napięcie przejściowe między obudową urządzenia, a potencjałem odniesienia (PE). Charakterystyka sygnału wyjściowego sensora, w tym jego amplituda i częstotliwość, zawiera informacje o intensywności i miejscu występowania wylądowań niepełnych.

Istotne w działaniu sensorów TEV jest ich zdolność do wykrywania bardzo szybkich zmian napięcia bez kontaktu z przewodami pod napięciem, co czyni tę metodę bezinwazyjną. Koniecznym dla zwiększenia dokładności detekcji jest przetwarzanie sygnału z czujnika TEV za pomocą technik filtracji oraz analizy w domenach czasu i częstotliwości, co umożliwia separację sygnału użytecznego od zakłóceń powstałych w środowisku rozdzielnic elektrycznej.

Skuteczność działania sensorów TEV jest silnie uzależniona od geometrii monitorowanego układu oraz jakości połączenia wyrównawczego, co wprowadza ograniczenia w uniwersalności ich zastosowania. Sensory te są także bardziej podatne na zakłócenia elektromagnetyczne generowane przez inne urządzenia w otoczeniu, co może obniżać dokładność detekcji w środowiskach o wysokim poziomie szumów. W porównaniu z HFCT, podobnie jak anteny UHF, sensory TEV charakteryzują się niższą odpornością na zakłócenia wysokich częstotliwości z otoczenia [7]. W zestawieniu z technologią UHF, sensory TEV ustępują jej w zakresie możliwości analizy wylądowań o krótkich czasach trwania, co ogranicza ich zastosowanie w

bardziej zaawansowanych systemach diagnostycznych, takich jak instalacje wysokiego napięcia. Przykład wykonania sensora TEV przedstawia rys. 3



Rys. 3. Przykład sensora TEV wykonanego w technologii druku PCB

Największą zaletą sensorów TEV jest bezstykowy charakter detekcji, dzięki czemu mogą być stosowane w miejscach trudno dostępnych, takich jak wnętrza rozdzielnic elektrycznych, bez konieczności bezpośredniego kontaktu z przewodnikami prądowymi. Proces instalacji jest stosunkowo prosty i mniej inwazyjny w porównaniu z technologią HFCT, która wymaga fizycznego nałożenia cewki na przewód. Dodatkowo, sensory TEV są szczególnie przydatne w aplikacjach niskonapięciowych, gdzie sygnały wylądowań o niskiej amplitudzie są łatwo wykrywalne, dzięki propagacji po powierzchni przewodników. W porównaniu z technologią UHF, sensory TEV wyróżniają się niższymi kosztami, co sprawia, że są atrakcyjnym rozwiązaniem w zastosowaniach budżetowych, zwłaszcza w systemach średniego i niskiego napięcia.

Sensor HFCT

Sensor HFCT (ang. *high frequency current transformer*) to przekładnik prądowy wysokich częstotliwości wykonany z materiału ferromagnetycznego, np. ze stopów magnezowo-cynkowych lub niklowo-cynkowych z nawiniętym uzwojeniem z licy składającej się z wielu odizolowanych od siebie cienkich przewodów lub taśmy [9]. Przykład wykonania sensora HFCT przedstawiono na rys. 4. Układ ten przetwarza prąd impulsu WNZ na sygnał napięciowy zgodnie z prawem indukcji elektromagnetycznej:

$$(2) \quad e = M \frac{di}{dt}$$

gdzie: M - współczynnik indukcji wzajemnej pomiędzy przewodem wyrównawczym, a uzwojeniem cewki.

Skuteczność detekcji wylądowań niepełnych zależy przede wszystkim od doboru odpowiedniego materiału rdzenia oraz liczby nawiniętych zwojów [9]. W literaturze przyjmuje się, że w zależności od geometrii i specyfiki układu wylądowanie o energii 20 pC indukuje w sensorze napięcie około 40 mV [11]. Najczęściej stosowaną metodą instalacji jest umiejscowienie ich na przewodzie wyrównawczym (PE). W takiej konfiguracji impuls wylądowania niepełnego indukuje sygnał napięciowy w uzwojeniu cewki. Wadą sensorów HFCT jest konieczność dostosowania ich rozmiarów i geometrii do specyficznego rozwiązania, aby zapewnić skuteczne sprzężenie i minimalne straty sygnału. W praktyce wymusza to stosowanie różnych przekroji rdzeni dostosowanych do średnicy przewodu lub szyny PE używanej w rozdzielnic SN. Kolejnym problemem może być

fizyczny dostęp do uziemienia rozdzielnicy szczególnie w przypadku urządzeń hermetycznych lub niedostępnych podczas pracy.

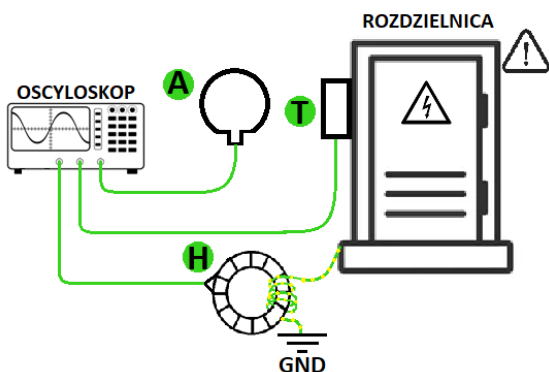


Rys. 4. Przykład sensora HFCT wykonanego w oparciu o elastyczny rdzeń z materiału nanokrystalicznego

Dostępność rdzeni ferrytowych, różnorodność ich rozmiarów oraz właściwości materiałowych częściowo rozwiązuje problem dostosowania sensora do specyfiki układu. W przeciwieństwie do wielu innych metod detekcji, sensory HFCT wykazują wyższą odporność na zakłócenia występujące w otoczeniu obiektu elektroenergetycznego.

Pomiary laboratoryjne

Pomiary wykonano w Hali Wysokich Napięć Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej. Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Schemat stanowiska laboratoryjnego.

Jako obiekt badany użyto rozdzielnicy elektrycznej SN w izolacji powietrznej w metalowej obudowie, wewnątrz której umieszczono miedziane ostrze (druć) na szynie wysokiego napięcia. Umocowany drut skierowano w stronę obudowy, aby sztucznie wygenerować wyładowanie ulotowe co jest widoczne na rys. 7. Do analizy sygnałów wykorzystano referencyjny przyrząd pomiarowy WNZ oraz oscyloskop cyfrowy. Badaniu podlegały 4 typy sensorów:

A - antena VHF w odległości 50 cm od źródła sygnału WNZ, rys. 7

T - dwa sensory TEV (firmy HVPD i zaprojektowany do badań) umieszczone na ścianie bocznej rozdzielnicy, rys. 8,

H - przekładnik HFCT zamontowany na przewodzie wyrównawczym PE, rys. 9.



Rys. 6. Stanowisko pomiarowe



Rys. 7. Widok anteny UHF zamontowanej w pobliżu źródła WNZ

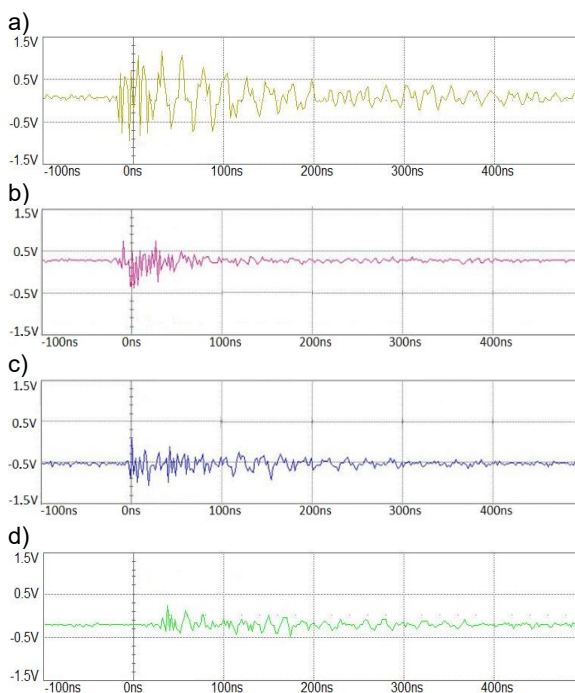


Rys. 8. Widok sensorów TEV (czerwony HVPD, szary ITR) na ścianie rozdzielnicy



Rys. 9. Umieszczenie sensora HFCT na przewodzie wyrównawczym PE rozdzielnicy

Eksperyment przeprowadzono dla poziomu ładunku pozornego ok. 500 pC. Wyniki pomiarów przedstawia rysunek 10:



Rys. 10. Sygnał napięciowy wylądowań niepełnych z sensorów: a) TEV HVPD, b) TEV, c) HFCT, d) anteny UHF.

Próby badawczą przeprowadzono dla wylądowań niepełnych o energii ok. 500 pC. Antena VHF pozwoliła na zarejestrowanie sygnału napięciowego o amplitudzie 500 mV, rysunek 10d. W porównaniu z pozostałymi sensorami, mniejsza wartość sygnału wynikała z geometrii układu i oddalenia sensora od bezpośredniego źródła wylądowań. Sensory HFCT (rys. 10c) i TEV ITR (rys. 10b) wykazały zbliżoną do siebie odpowiedź napięciową o wartości 1 V. Otrzymanie większej amplitudy w porównaniu z anteną UHF spowodowane jest bliskim umiejscowieniem sensorów względem źródła wylądowań. W przypadku przekładnika wysokich częstotliwości HFCT montażem bezpośrednim na przewodzie wyrównawczym PE, a czujników TEV na ścianie rozdzielniczy w pobliżu szyny zasilającej. Sygnał o największej amplitudzie, wynoszącej 1,5V zarejestrowano w sensorze TEV HVPD (rys. 10a), co potwierdza słuszność stosowania go w komercyjnych układach on-line do

monitorowania wylądowań niepełnych. Niezależnie jednak od umiejscowienia na stanowisku laboratoryjnym, we wszystkich badanych czujnikach indukował się sygnał napięciowy proporcjonalny do energii zarejestrowanego wylądowania napięciowego zgodnie z równaniem 1. Taki sygnał może być z powodzeniem dalej przetworzony przy wykorzystaniu układu filtrów i wzmacniaczy analogowych w celu konstrukcji modelu kompletnego systemu monitorowania wylądowań niepełnych.

Podsumowanie

W artykule dokonano przeglądu wybranych sensorów czujników wylądowań niepełnych stosowanych w rozdzielnicach SN w izolacji powietrznej. Skonstruowano modele czujników TEV, HFCT oraz anteny VHF, które następnie sprawdzono w warunkach laboratoryjnych. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że ze względu na najwyższe wartości indukowanego sygnału napięciowego sensory produkcji ITR - TEV i HFCT mogą być z powodzeniem zaimplementowane w modelu systemu on-line do monitorowania wylądowań niepełnych. Antena VHF charakteryzowała się niską czułością badanego zjawiska, a jej dalsze wykorzystanie wymusza stosowanie zaawansowanego toru przetwarzania sygnału, który podważa słuszność ekonomiczną budowy systemu.

W kolejnym etapie prac wybrane konstrukcje zostaną przystosowane do integracji w modelu systemu monitorowania wylądowań niepełnych. Zostanie skonstruowane urządzenie, które będzie w stanie przetworzyć indukowany sygnał napięciowy na postać cyfrową, co ułatwi jego dalsze przetworzenie.

Autorzy rozważają także sprawdzenie dokładności pomiarów czujnika HFCT dla innych urządzeń elektroenergetycznych (np. w osprzęcie kablowym).

Autorzy: mgr inż. Mariusz Kucharek, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul Ratuszowa 11, 03-450, E-mail: mariusz.kucharek@itr.lukasiewicz.gov.pl;
mgr inż. Paweł Kluge, Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych, ul. Koszykowa 75, 00-661 Warszawa, E-mail: pawel.kluge@pw.edu.pl;
mgr inż. Bartosz Owczarczuk, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul Ratuszowa 11, 03-450, E-mail: bartosz.owczarczuk@itr.lukasiewicz.gov.pl;
mgr inż. Jerzy Chudorliński, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul Ratuszowa 11, 03-450, E-mail: jerzy.chudorliński@itr.lukasiewicz.gov.pl;

LITERATURA

- [1] PN-EN 60270: 2003 Wysokonapięciowa technika probiercza. Pomiary wylądowań niepełnych.
- [2] Garnacho F., „Metrological Qualification of PD Analysers for Insulation Diagnosis of HVDC and HVAC Grids”, *Sensors*, t. 23, nr 14, s. 6317, lip. 2023, doi: 10.3390/s23146317.
- [3] Szczechowski J., Siodła K., Alternatywne metody pomiaru wylądowań niepełnych w transformatorach mocy – próby odbioru i diagnostyka, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2018, nr 10, 89 -94
- [4] Cui, Z., Park, S., Choo, H., & Jung, K.-Y. (2020). Wideband UHF Antenna for Partial Discharge Detection. *Applied Sciences*, 10(5), 1698. doi: 10.3390/app10051698
- [5] Rozi F. i Khayam U., „Design of circle shaped loop antenna as partial discharge sensor”, w *2014 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS)*, Kuta, Bali, Indonesia: IEEE, lis. 2014, s. 349–352. doi: 10.1109/ICEECS.2014.7045276.
- [6] Kaziz S. i in., „Radiometric Partial Discharge Detection: A Review”, *Energies*, t. 16, nr 4, s. 1978, luty 2023, doi: 10.3390/en16041978.
- [7] Subramaniam A., Raman S.J., I Panda S.K., „Comparison of Partial Discharge signal in a Three phase Transformer by UHF, TEV and HFCT sensors”, w *2021 1st International Conference on Power Electronics and Energy (ICPEE)*, Bhubaneswar, India: IEEE, sty. 2021, s. 1–4. doi: 10.1109/ICPEE50452.2021.9358502.
- [8] Kluge P., Kucharek M., Łasica A. i Starzyński J., The concept of a cheap universal capacitive partial discharge sensor. 2023 24th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Grybów, Polska, 2023, str. 1-3, doi: 10.1109/CPEE59623.2023.10285323.
- [9] Walczak K., „Wielomodułowy system monitoringu wylądowań niepełnych oparty na metodach EA, HF i UHF”, *Przegląd Elektrotechniczny*, t. 1, nr 10, s. 7–11, paź. 2016, doi: 10.15199/48.2016.10.02.
- [10] Rodrigo Mor A., Castro Heredia L. C. i Muñoz F. A., A Novel Approach for Partial Discharge Measurements on GIS Using HFCT Sensors, *Sensors*, t. 18, nr 12, s. 4482, grudz. 2018, doi: 10.3390/s18124482.
- [11] Jiang J., Zhao M., Zhang C., Chen M., Liu H., i Albarracín R., „Partial Discharge Analysis in High-Frequency Transformer Based on High-Frequency Current Transducer”, *Energies*, t. 11, nr 8, s. 1997, sie. 2018, doi: 10.3390/en11081997.