

doi:10.15199/48.2022.10.47

Detekcja wyładowań niezupełnych w transformatorach suchych średniego napięcia

Streszczenie. Artykuł przedstawia zagadnienia problematyki diagnostyki transformatorów suchych średniego napięcia. Opracowanie przedstawia wyniki diagnostyki transformatorów z cewkami typu cast coil opartych na pomiarach wyładowań niezupełnych z użyciem metody elektrycznej jakiej UHF.

Abstract. The article presents the problems of diagnostics of medium voltage dry transformers. The study presents the results of diagnostics of transformers with cast coils based on partial discharges measurements using the electrical method such as UHF. (**Partial discharge detection in dry medium voltage transformers**)

Słowa kluczowe: wyładowania niezupełne, transformator, izolacja
Keywords: partial discharge, transformer, insulation

Wstęp

Transformatory rozdzielcze typu suchego znajdują coraz szersze zastosowanie ze względu na mniejsze zagrożenie pożarowe, możliwość instalowania bez konieczności wykonywania miski olejowej. Do obiektów w których często są instalowane transformatory suche możemy zaliczyć te o zagrożeniu wybuchowym, pożarowym, turbiny wiatrowe itp. [1, 2]. Można zaobserwować tendencję do wzrostu mocy jednostkowej instalowanych transformatorów do wartości nawet 40 MVA. Z tych powodów transformatory te znajdują coraz szersze grono zwolenników. Należy zaznaczyć, że każde uszkodzenie cewki kończy się w złomowaniu danej jednostki, co stanowi podstawową różnicę w stosunku do transformatorów olejowych.

Transformatory suche możemy podzielić na dwa zasadnicze typy: wytwarzane w technologii rowingowej tj. poprzez nawijanie przędzy szklanej nasączonej żywicą epoksydową tzw. resibloc oraz w technologii odlewanej typu cast coil [3, 4, 5].

Mimo tak dużych mocy nie opracowano jednoznacznych wtycznych diagnostycznych poza podstawowym testem opartym na pomiarze rezystancji izolacji przy napięciu 2,5kV, co powoduje ograniczone możliwości diagnozowania stanu technicznego jednostek transformatorowych do stanów krytycznych. Z tego powodu wydaje się konieczne opracowanie nowych metod diagnostycznych, które znacząco poprawiłyby by predykcję możliwych awarii.

W literaturze można doszukać się opracowań, w których jako podstawowe źródła defektów wymienia się nieprawidłowości podczas impregnacji cewek, oddziaływania elektromechaniczne w stanach dynamicznych oraz brak lub niewystarczające ich tłumienie, gorące punkty w izolacji na skutek utrudnionego odprowadzania ciepła jak również wadliwych połączeń zgrzewanych [6, 7]. Wszystkie te przyczyny powodują powstanie defektów, w których zapoczątkowywane są WNZ doprowadzające w późniejszym czasie do awarii.

Obecnie wiele ośrodków naukowych pracuje nad opracowaniem skutecznej metody diagnostycznej transformatorów suchych średniego napięcia [1, 2, 4]. Pomiar głównie są ukierunkowane na rejestrację generacji wyładowań niezupełnych (WNZ) z wykorzystaniem dostępnych metod tj. elektrycznej, UHF itp. ponieważ wydaje się że to właśnie WNZ są główną przyczyną awarii transformatorów [4, 8, 9]. Wydaje się że jedną ze skutecznych metod do stwierdzenia nieprawidłowości izolacji w postaci WNZ może być metoda pomiaru fal

elektromagnetycznych w zakresie UHF, która nie wymaga wyłączenia urządzenia z ruchu podczas przeprowadzania okresowych sprawdzeń. I to właśnie ta zaleta pozwala na bezinwazyjną doraźną kontrolę, która może być znacznie częściej przeprowadzana, a co za tym idzie da możliwości szybszej reakcji eksploatacyjnej. W ten sposób ograniczy ilość nieplanowanych przestojów instalacji, które mogą mieć znaczne skutki ekonomiczne, bardzo często o wiele wyższe niż koszt zakupu i wymiany nowego transformatora.

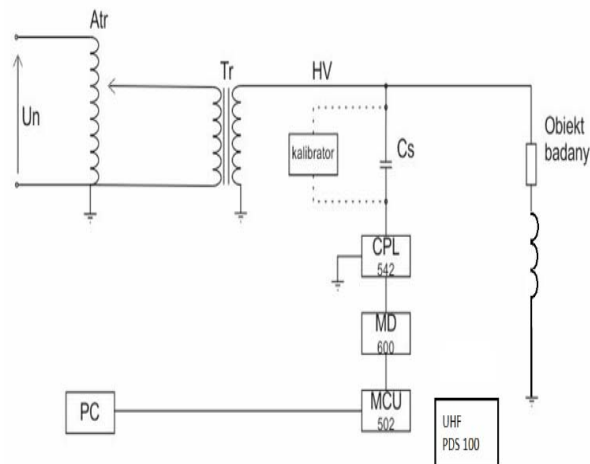
Obiekt i metodyka badań

Obiektem badań był transformator suchy typu cast-coil 6/0,4 kV o mocy 1600kVA, który został wycofany z eksploatacji z widocznymi defektami zewnętrznymi w postaci odprysków i przebarwień. Zaznaczyć należy, że z wyników pomiarów rezystancji izolacji nadal spełnia kryteria dopuszczenia do dalszej pracy (rys. 1).

W pracach pomiarowych wyładowań niezupełnych użyto dwóch metod tj. metody elektrycznej opartej o system pomiarowy MPD 600 firmy Omicron oraz rejestratora fal elektromagnetycznych w zakresie UHF typu PDS 100 firmy Double. Schemat pomiarowy został przedstawiony na rysunku nr 2. W pierwszym etapie wykonano pomiary wstępne transformatora w miejscu zainstalowania a w kolejnych przeprowadzono prace demontażowe poszczególnych cewek WN, na których następnie przeprowadzono szereg pomiarów używając dodatkowych zewnętrznych elektrod pomiarowych w postaci blach miedzianych. Elektrody były w dwóch rozmiarach mniejsza o wymiarach 8x8 cm, druga w postaci cylindra o średnicy 58 cm i wysokości 30 cm co zapewniało pokrycie 1/3 wysokości całej cewki WN. Elektrody miały za zadanie ułatwienie lokalizacji potencjalnych miejsc występowania defektów, w których następowała generacja WNZ (rys. 3). Napięcie na zaciskach poszczególnych cewek było zwiększane do zapłonu WNZ, a następnie podnoszone były wartości $1,2 U_n$ z krokiem zależnym od bieżącego poziomu wyładowań. Równoległe do pomiarów metodą elektryczną prowadzona była rejestracja widma elektromagnetycznego z użyciem miernika PDS 100, która odbywała się w zakresie częstotliwości między 50 MHz a 1 GHz z użyciem funkcji rejestracji tła tj. nakładania jednego sygnału na drugi, a następnie kolejnych sygnałów dla poszczególnych poziomów napięć. Zarejestrowane tło służyło jako wzorzec układu bez wyładowań niezupełnych a rozbieżności w kolejnych pomiarach przy poszczególnych poziomach napięć były interpretowane jako WNZ.



Rys.1. Przykładowy defekt struktury izolacji na powierzchni zewnętrznej cewki WN.



Rys.2. Schemat układu pomiarowego.

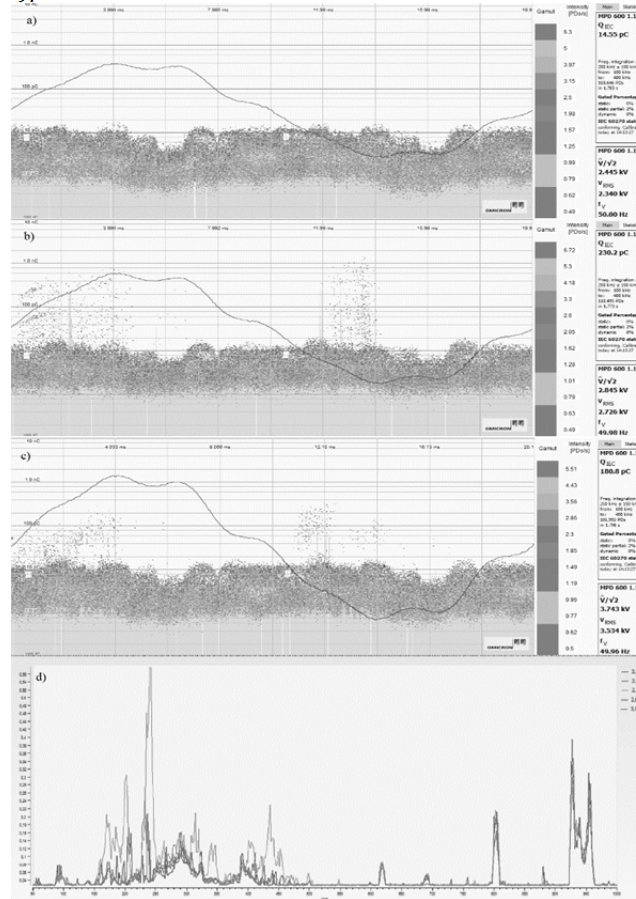


Rys.3. Wygląd elektrod pomiarowych a) płaska, b) cylindryczna.

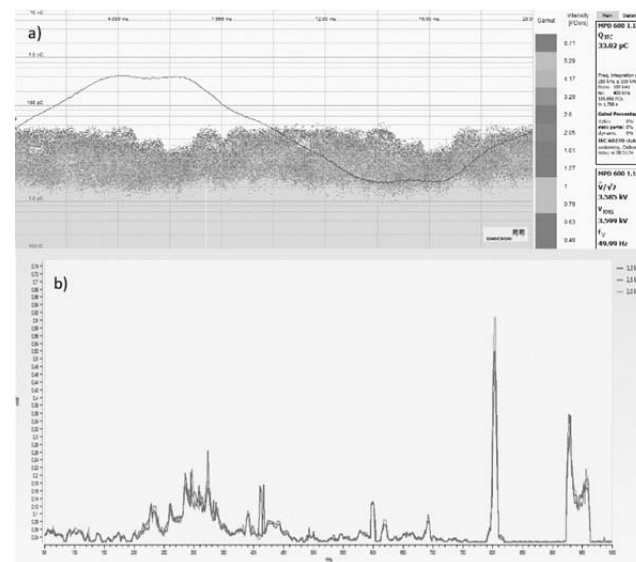
Wyniki badań

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki pomiarów wyładowań niepełnych przeprowadzonych dla cewki A transformatora z wykorzystaniem elektrody cylindrycznej na 2/3 wysokości cewki przy użyciu skojarzonych metod odpowiednio elektrycznej (rys. 4 a-c) i UHF (rys. 4d) dla napięć z zakresu od 2,3kV do 3,5kV. Napięcie zapłonu WNZ wynosiło 2,7 kV a ładunek osiągał wartość do 1nC. Wzrost napięcia spowodował obniżenie się poziomu maksymalnego ładunku do 280pC, co prawdopodobnie było efektem mostkowania części izolacji i generacji wyładowań w innych defektach. Z charakterystyk UHF można zaobserwować korelację między amplitudą sygnału z wartością maksymalną ładunku mierzonego. Największe zmiany amplitudy sygnału zaobserwowano w zakresach częstotliwości 150 – 200 MHz, 230-310 MHz oraz 380-500 MHz i pasma te powtarzały się dla innych przeprowadzonych pomiarów zatem na tej podstawie można wnioskować, że będą to pasma charakterystyczne

dla rejestracji WNZ w transformatorach suchych z tego typu defektami.



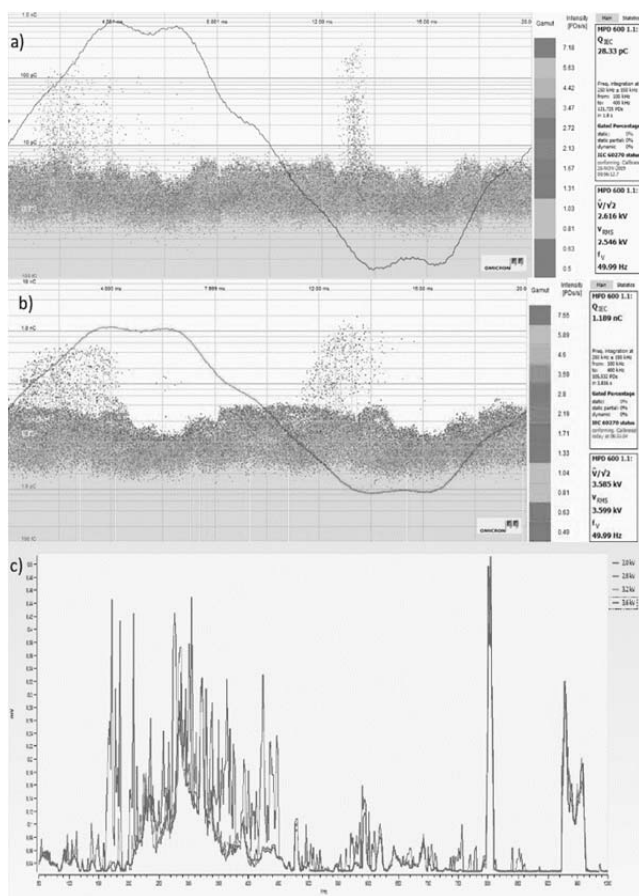
Rys.4. Wyniki pomiarów WNZ dla przypadku mieszczania elektrody uziemionej wewnątrz na 2/3 wysokości cewki A dla (a,b,c) metody elektrycznej oraz (d) metody UHF



Rys.5. Wyniki pomiarów WNZ dla przypadku mieszczania elektrody uziemionej na zewnętrznej części cewki na 2/3 wysokości dla (a) metody elektrycznej oraz (b) metody UHF.

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiarów dla elektrody płaskiej umieszczonej na zewnętrznej części cewki dla 2/3 wysokości cewki przy użyciu skojarzonych metod UHF. Zaobserwowano, że przy tych samych poziomach napięć jak dla przypadku elektrody wewnątrz nie

występują zmiany sygnału UHF, a metoda elektryczna nie wskazuje występowania wyładowań niezupełnych, co świadczyło o braku defektów w części zewnętrznej.



Rys.6. Wyniki pomiarów WNZ dla przypadku umieszczenia elektrody uziomionej o 8x8cm dla metody elektrycznej (a, b) oraz metody UHF (c).

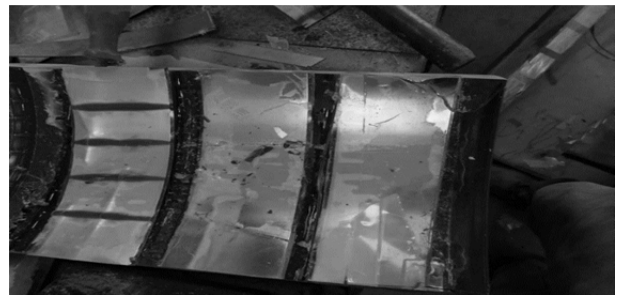
Kolejno wykonywane pomiary wskazywały, że wszystkie cewki miały defekty, które głównie znajdowały się od wewnętrznej części cewek.

W celu precyzyjnego zlokalizowania defektów użyto mniejszej elektrody i punkt po punkcie wykonywano pomiary. Przykładowe wyniki pomiarów dla cewki B przedstawia rysunek 6. Podobnie jak w przypadku elektrody pierwszego typu wraz ze wzrostem napięcia wartość ładunku maksymalnego wrasta wraz z napięciem natomiast metodzie UHF także obserwowany jest wzrost amplitud sygnału w tych samych pasmach. Z przewagi poziomu ładunku w ujemnej połowie sinusoidy można stwierdzić, że dane defekty znajdują się przede wszystkim na wysokim potencjale [7].

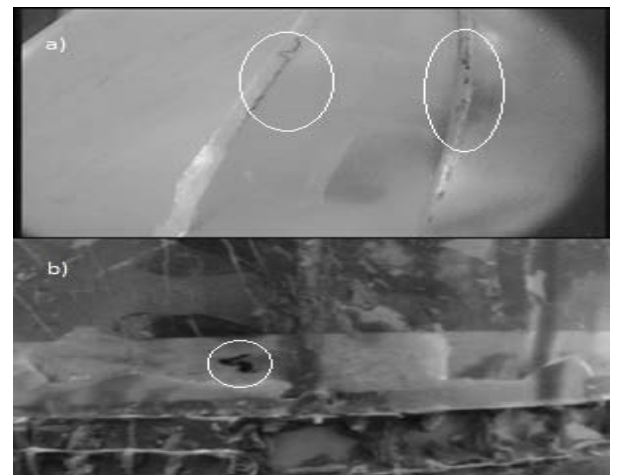
Zauważono, że w miejscach potencjalnych defektów napięcie zapłonu WNZ znajdowało się przedziale między 2,2kV a 2,5kV a w pozostałych miejscach poziom zapłonu WNZ jest w przedziale 3,3 kV a 3,8kV.

Miejsca, dla których stwierdzono prawdopodobieństwo wystąpienia defektów zostały oznaczone dokonano inspekcji wewnętrznej poprzez cięcie poszczególnych obszarów a następnie mechaniczne oddzielenie poszczególnych warstw cewek (rys. 7). Zdjęcia z inspekcji wewnętrznej przedstawia rysunek 8. Na podstawie tych zdjęć można stwierdzić że defekty izolacji w których następowała generacja WNZ to przede wszystkim krawędzie zezwoju na granicy punktu potrójnego tj. żywica-zezwój-folia poliestrowa (rys. 8a) oraz miejsca

prefabrykowania zbrojenia przed impregnacją za pomocą taśmy (rys 8b). Zaobserwowane węglowe ślady wzdłuż krawędzi zwoju potwierdzają generację WNZ bezpośrednio na potencjale. Zdaniem autora właśnie to miejsce jest uważane jako newralgiczne z punktu widzenia zapoczątkowywania przyspieszonych procesów starzeniowych związanych prawdopodobnym pękaniem wiązań żywica-zezwój na skutek oddziaływań elektrodynamicznych występujących zwłaszcza w stanach dynamicznych tj. zmiany obciążenia, zwarcia, czynności łączeniowe lub związanych z naprężeniami mechanicznymi powstającymi na skutek zmian temperaturowych (zmiany obciążenia). Na skutek wyładowań dochodzi do mechanizmu, który mostkuje poszczególne zezwoje w ten sposób prowadząc do wysokooporowego ich zwarcia, które doprowadza do uszkodzenia danej cewki. Efekt takiego działania można zaobserwować na rysunku 9 gdzie można zauważyć efekt w postaci wypalonych zezwojów wzdłuż jednej krawędzi.



Rys.7. Prace inspekcyjne cewki A



Rys.8. Obrazy stwierdzonych defektów na krawędzi zwoju (a) na taśmie b).



Rys.9. Uszkodzenie transformatora na skutek zwarcia między zwojowego

Wnioski

Diagnostyka transformatorów suchych średniego napięcia narażona na wiele problemów. Wydaje się, że pomiar WNZ jest obecnie najlepszą metodą, pozwalającą na określenie występowania defektów w izolacji.

Pomiary z wykorzystaniem metody elektrycznej wymagają włączenia jednostek spod napięcia i z tego powodu przeprowadzane zwykle tylko podczas standardowych przeglądów, co daje czasookres około 5lat. Z doświadczeń autora wynika że w wielu przypadkach jest to okres zbyt rzadki. Z tego powodu wydaje się że metoda UHF może być bardzo korzystna z powodu braku konieczności wyłączenia spod napięcia co stwarza możliwości pomiarów w dowolnych czasookresach. Ważnym elementem pomiarów UHF jest rejestracja tła pomiarowego oraz powtarzalności warunków pomiarowych.

Na podstawie inspekcji wewnętrznej badanych cewek można stwierdzić że defekty w izolacji pojawiały się głównie na potencjale tj. na krawędzi zwoju w miejscu połączenia z żywicą i folią izolacyjną. Po kształcie otrzymanych defektów można stwierdzić że prawdopodobną przyczyną rozwoju WNZ są mikropęknięcia i to właśnie z nich zapoczątkowywane jest drzewinie elektryczne. Drzewinie elektryczne doprowadza do mostkowania poszczególnych zezwojów, a w końcowym etapie doprowadza do zwarcia wysokooporowego, które powoduje wzrost ciśnienia w konsekwencji do całkowitego uszkodzenia danej cewki poprzez pęknięcie połączone ze zwarcie niskoporowym.

Autorzy: dr inż. Andrzej Mrozik, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Wysokich Napięć i Elektroenergetyki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, E-mail: amrozik@zut.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Su C., Tang T., Tai C., Chen J. Detection and location of partial discharge in cast-resin dry-type transformers using a waveguide and a new acoustic emission sensor pair design, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE C: Computers & Electronics* ISSN 1869-1951 (Print); ISSN 1869-196X
- [2] Gockenbach E., Werle P., Borsi H., Monitoring and diagnostic systems for dry type transformers, *2001 IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics, June 25-29, 2001, Eindhoven, the Netherlands* 291
- [3] Yang F., Ran W., Chen T., Luo X., Investigation on the factors affecting the temperature in urban distribution substations and an energy-saving cooling strategy, *Energies* 2011, 4, 314-323; doi:10.3390/en4020314
- [4] Duan X., Zhao T., Liu J., Zhang L., Zou L., Investigation on the factors affecting the temperature in urban distribution substations and an energy-saving cooling strategy, *Energies* 2011, 4, 314-323; doi:10.3390/en4020314
- [5] Mafra R., Magalhães E., Anselmo B., Belchior F., Marcondes S., Winding hottest-spot temperature analysis in dry-type transformer using numerical simulation, *Energies* 2019, 12, 68; doi:10.3390/en12010068
- [6] Forester D., ReseFailures in dry-type transformers for offshore applications, *Special Edition - Dry-type Transformers* vol.November 2021
- [6] Szymaciec S., Analiza wyników pomiarów wyładowań niezupełnych w silnikach elektrycznych, *Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne* nr 76/2007 (95)
- [8] Zheng D., Zhao D., Zhang L., Chen X., Research on PD Locating Method of Dry-type Transformer with Subsection and Layer Windings Based on Transfer Functions, *Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials* July 19-23, 2009, Harbin, China
- [9] Szymaciec S., Aparaturowe aspekty diagnostyki maszyn elektrycznych w oparciu o sygnał WNZ, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* nr 2/2014 (102)