

doi:10.15199/48.2024.11.55

Problematyka badań odbiorczych i eksploatacyjnych transformatorów suchych średniego napięcia

Streszczenie. Artykuł przedstawia zagadnienia problematyki badań odbiorczych i eksploatacyjnych transformatorów suchych średniego napięcia. Opracowanie zawiera opis problematyki, oceny stanu technicznego nowo instalowanych jak również eksploatowanych transformatorów suchych średniego napięcia oraz proponowane sposoby na poprawę oceny stanu technicznego.

Abstract. The article presents problematic issues related to acceptance and operational testing of medium voltage dry transformers. The study contains a description of the problematic issues of assessing the technical condition of newly installed and used medium voltage dry transformers, as well as proposed ways to improve the assessment of the technical condition. (Issues of acceptance and operational tests of medium voltage dry transformers)

Słowa kluczowe: wyładowania niezupełne, transformator, izolacja, normy, eksploatacja

Keywords: partial discharge, transformer, insulation, standards, exploitation

Wstęp

Transformatory rozdzielcze o izolacji suchej to coraz popularniejsze jednostki szeroko stosowane ze względu na swoją cenę, nawet kilkadziesiąt procent tańsze od swoich odpowiedników olejowych. Mają wiele zalet, do których należy zaliczyć łatwość montażu, prostotę obsługi jak również to, że nie wymagają misy olejowej, są stosowane w obiektach o zagrożeniu pożarowym ze względu na swoją ograniczoną palność, itp. [1, 2].

Wśród transformatorów suchych obecnie możemy spotkać dwie technologie wykonania. Pierwsza w technologii nawijanej tzw. „rowingowej” poprzez nasączenie włókien szklanych żywicą epoksydową a następnie nawijanie na poszczególne cewki transformatora. Druga technologia o nazwie „cast-coil” polega na impregnacji żywicą epoksydową przy obniżonym ciśnieniu (próżni) a następnie utwardzaniu termicznym [3, 4, 5].

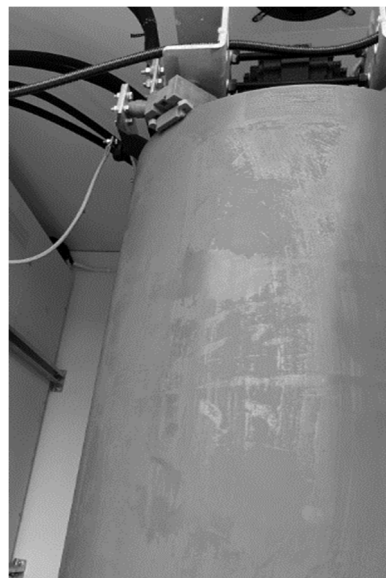
Obserwowana jest tendencja do wzrostu mocy wytwarzanych jednostek. W standardowych typoszeregach można spotkać transformatory o mocy do 3150 kVA ale dostępne są jednostki znacznie większe o mocy sięgającej nawet 40 MVA. Według podziału jest to grupa IV tj. transformatory suche.

Z doświadczeń autora można twierdzić, że jednostki takie nie są pozbawione wad. Jednymi z nich są defekty powstałe na etapie wytwarzania, które nie zawsze dają się wychwycić na etapie prób fabrycznych, można do nich zaliczyć wtrąciny w izolacji, kawerny gazowe itp. Kolejnym problemem jest nieprawidłowo przeprowadzony transport i składowanie w nieodpowiednich warunkach przed zainstalowaniem. Podczas prac montażowych zdarza się, że jednostki są obcierane i uderzane do takiego stopnia, że czasami powoduje to nawet widoczne pęknięcia. Innym problemem jest środowisko w jakim się znajduje jednostka, co prawda producenci określają w jakich warunkach ma dana jednostka pracować ale nierzadko zdarza się, że po zainstalowaniu w stacji typu kontenerowego jednostka zostaje na kilka tygodni bez ogrzewania i następuje kondensacja wody zarówno na cewkach jak i na rdzeniu (rys.1). Te i inne problemy sprawiają, że prace instalacyjno-odbiorcze należy przeprowadzić ze szczególną uwagą.

Wydaje się, że akty normatywne, wytyczne oraz zalecenia producentów dotyczące przeprowadzania prób w miejscu zainstalowania, jak również prowadzenie prac eksploatacyjnych przy transformatorach suchych są

niewystarczające, ponieważ obserwowane są przypadki awarii w niedługim czasie po zainstalowaniu.

Obecnie wiele ośrodków naukowych, przedsiębiorstw produkcyjnych oraz eksploatujących transformatory suche pracuje nad opracowaniem skuteczniejszych metod diagnostycznych [1, 2, 4]. Główne kierunki rozwoju metod badawczych zdają się bazować na pomiarze wyładowań niezupełnych (WZN), jako jednego z głównych czynników determinujących jakość i niezawodność pracy transformatorów suchych [4, 8, 9]. W pracy zostaną przedstawione częściowe wyniki prac badawczych wykonywanych 4 metodami z podaniem problematyki takich pomiarów.



Rys.1. Widok nieprawidłowego przechowywania transformatora przed załączeniem (kondensacja wody)

Dokumentacja dotycząca prób i pomiarów odbiorczych oraz eksploatacyjnych

Obecnie można się spotkać z szeregiem aktów normatywnych, wytycznych grup prowadzących eksploatację oraz dokumentację techniczno-ruchową producentów dotyczących prac związanych z próbami fabrycznymi jak i odbiorami w miejscu zainstalowania, jak

również wymagań dotyczących bieżących jak i okresowych badań i oględzin. Do takich dokumentów należy zaliczyć:

1. PN-E-04700:1998 - Urządzenia i układy elektryczne w obiektach elektroenergetycznych -- Wytyczne przeprowadzania pomontażowych badań odbiorczych;
2. PN-EN 60076-1:2011 Transformatory -- Część 1: Wymagania ogólne;
3. PN-EN IEC 60076-11:2019-01 Transformatory -- Część 11: Transformatory suche;
4. Ramowa Instrukcja eksploatacji Transformatorów. Energopomiar Elektryka –Gliwice 2022;
5. Dokumentacja Techniczono-Ruchowa Producenta;
6. IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers IEEE Std C57.12.91™-2020

Jako podstawowe wytyczne w miejscu zainstalowania należy traktować przede wszystkim normę PN-E-04700 oraz DTR producenta. Z normy wynika, że z prac pomiarowych wymagany jest pomiar rezystancji izolacji oraz rezystancji czynnej uzwojeń, jak również dla jednostek większych niż 1,6 MVA pomiar prądów magnesujących. W DTR znajdziemy szereg prac związanych ze sprawdzeniem osprzętu poczynając na zabezpieczeniu termicznym a skończywszy na montażu zalecanych podkładek antywibracyjnych oraz ochrony przeciwprzepięciowej instalowanej bezpośrednio na transformatorze lub w jego pobliżu. Ważnym opracowaniem wydaje się być Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów, w której znajdziemy zalecenia dotyczące prób odbiorczych i okresowych.

Jednak praktyka eksploatacyjna pokazuje, że zalecane pomiary normatywne są daleko niewystarczające, aby stwierdzić zły stan danej jednostki. Istnieje znaczna ilość awarii tego typu jednostek w krótkim czasie po zainstalowaniu, mimo pozytywnych wyników zarówno pomiarów jak i oględzin (rys. 2). Przyczyn takiego stanu rzeczy należy upatrywać przede wszystkim w defektach powstałych na etapie transportu, montażu oraz nieprawidłowej eksploatacji. Nieprawidłowa eksploatacja to głównie zapylenie pomieszczeń transformatorów i osadzanie się pyłu na powierzchni cewek SN co prowadzi do WNZ powierzchniowych, brak dostatecznie dobrej wentylacji, brak lub niewłaściwie prowadzone prace konserwacyjne głównie polegające na zbyt rzadkim okresowym czyszczeniu powierzchni cewek i przestrzeni międzycewkowych.



Rys.2. Widok transformatora po awarii po pięciu dniach od zainstalowania

Zdaniem autora defekty powstałe w transporcie i montażu w dużej mierze można zdiagnozować poprzez pomiar WNZ metodą: konwencjonalną metodą elektryczną, emisji akustycznej, optyczną (UV) oraz przy pomiarze metodą UHF. Przydatna wydaje się też metoda pomiaru prądów

magnesowania zwłaszcza przy braku znajomości geometrii uzwojeń, natomiast do wykrawania zwarć międzyzwojowych autora pozwala ona na wykrycie defektów o dużym stopniu zaawansowania tj. przypadków częściowego zwęglenia izolacji międzyzwojowej. Jedną z alternatywnych metod wydaje się stosowanie skanowania izolacji cewek WN z użyciem detektorów dalekiej podczerwieni.

Przykłady i problemy pomiarowe

Objektami pomiarowymi były transformatory SN typu suchego o mocach z zakresu od 400 kVA do 6500 kVA instalowane w obiektach przemysłowych.

Problematyczne stają się oględziny nawet na nowo instalowanych jednostkach z tego względu, że nie ma określonych wytycznych od producentów co można uznać za nieprawidłowość a co za normalny stan rzeczy. Na rysunku 3 zaprezentowane są różnego typu problematyczne miejsca na powierzchni cewek transformatorów suchych niektóre powstały zarówno na etapie wytwarzania a inne podczas transportu oraz instalacji. Takie defekty są różnego rozmiaru i trudno jest ocenić czy będą one wpływać na długość życia danej jednostki. Jak pokazuje praktyka eksploatacyjna to właśnie w miejscach takich defektów zapoczątkowywana jest przyspieszona degradacja izolacji (rys. 3, 4). Widoczne przebarwienia zawierają produkty węglowe rozkładu żywicy epoksydowej, które są efektem działania wyładowań niezupełnych o znacznej intensywności. Według informacji udzielanych przez serwisy producentkie jeżeli zmiany fizykochemiczne są powierzchniowe to są one niegroźne, jednak jeżeli dochodzi do penetracji na większe głębokości może ona zagrażać dalszej eksploatacji (rys. 4). Producenci udzielają informacji czy zaobserwowany stan rzeczy jest dopuszczalny czy nie, ale nie ma dokładnych wytycznych na co zwracać uwagę.



Rys.3. Widok przykładowych problemów w ocenie cewek SN transformatorów

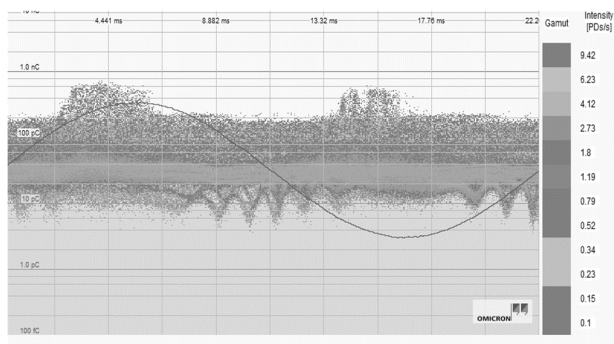


Rys.4. Widok przykładowych problemów w ocenie stanu rdzenia transformatora



Rys.5. Widok transformatora po awarii między zaciskiem fazowym a jednym z odczepów

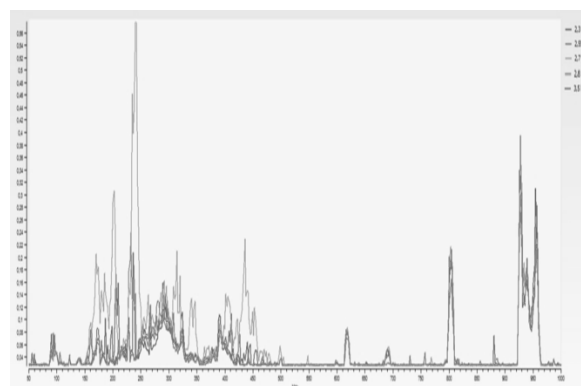
Jedną ze skutecznych metod może się okazać pomiar poziomu wyładowań niepełnych w miejscu zainstalowania. Istnieją wytyczne co do oceny stanu układu izolacyjnego w testach fabrycznych [10], które mówią, że dla nowych jednostek poziom ładunku pozornego WNZ nie może przekraczać 10 pC. Co do jednostek eksploatowanych takich wytycznych nie ma, można próbować przenieść dopuszczalny poziom WNZ na próby pomontażowe, jednak pomiar w warunkach terenowych może nastęrczać wielu problemów. Często spotykana jest sytuacja, że tło pomiarowe (zakłócenia) znacznie przekraczają poziom 10 pC i ocena do takiego kryterium staje się bezzasadna. Przykład wyników pomiarowych został przedstawiony na rysunku poniżej (rys. 6), widoczne są zakłócenia na poziomie około 100 pC. W takim przypadku wydaje się niemożliwa ocena jakościowa ponieważ sygnał użyteczny może być ukryty w szumie tła. Problematyczna staje się także ocena kryterium poziomu WNZ w trakcie eksploatacji. Z wstępnych badań autora wynika, że wyładowania niepełne w obrębie zewojów w cewkach SN na poziomie kilkudziesięciu pC mogą negatywnie pływać na czas życia izolacji. Pomimo problematyczności zakłóceń pomiar WNZ wydaje się być dobrą metodą oceny stanu układu izolacyjnego, jednak wymaga on doświadczenia diagnosty, ponieważ w wielu przypadkach poprzez zmianę częstotliwości pomiarowej wraz z szerokością pasma można stwierdzić obecność oraz poziom WNZ.



Rys.6. Pomiar poziomu WNZ transformatora 15.75/0,4 kV

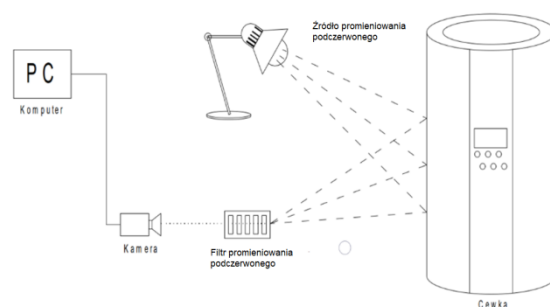
Innym rozwiązaniem jest rejestracja WNZ z użyciem metody UHF jako metody porównawczej tj. przeprowadzenie pomiarów wstępnych po zainstalowaniu jako swoisty odcisk palca, a następnie okresowo aby określić czy nie nastąpiły zmiany w rejestrowanym sygnale. Można tu wykorzystać funkcję nakładania sygnału jeden na drugi (rys.7). Jednak doświadczenie pomiarowe autora

pokazuje, że zmiany w otaczającym środowisku mogą być również widoczne w spektrogramie UHF co należy przy każdym pomiarze sprawdzić tzn. jest konieczność weryfikacji czy nie zaszły zmiany w rejestrowanym tle i ewentualne je uwzględnić w analizie. Na rysunku poniżej widoczne jest spektrum od 50 MHz do 1000MHz, z doświadczenia najbardziej interesującymi wydają się pasmo między 50-500 MHz.

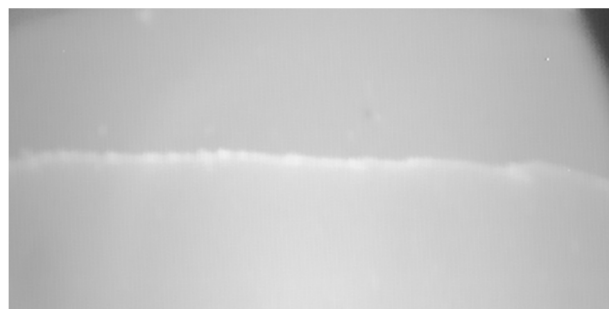


Rys.7. Pomiar poziomu WNZ transformatora 15.75/0,4 kV metodą UHF

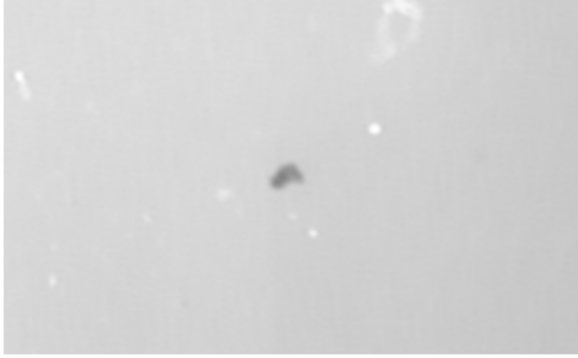
Inną metodą wstępnej oceny jakości transformatora po transporcie i pracach instalacyjnych wydaje się rejestracja obrazów izolacji w podczerwieni (rys. 8). Metoda ta co prawda jest dopiero rozwijana ale wstępne wyniki wydają się obiecujące. Za jej pomocą można rozpoznać czy nie wystąpiły drobne pęknięcia i inne defekty mogące wystąpić w miejscu zainstalowania. Metoda polega na rejestracji obrazu podczerwonego jednolitej izolacji, na której każde odstępstwo w strukturze widoczne jest jako przebarwienie. Na rysunku 9 widzimy niewielkie pęknięcie w cewce SN po transporcie, którego nie było widać gołym okiem. Inne defekty takie jak produkty węglowe degradacji izolacji można rozpoznać jako ciemniejsze miejsca co wynika z innej absorpcyjności promieniowania IR przez węgiel w stosunku do otaczającej izolacji laminarnej (rys. 10).



Rys.8. Schemat pomiarowy metody rejestracji podczerwieni



Rys.9. Subtelne pęknięcia izolacji SN wzdłuż cewki



Rys.10. Defekt węglowy widoczny w podczerwieni (ciemna plamka)

Ostatnią proponowaną metodą która może poprawić ocenę stanu izolacji WN jest rejestracja wyładowań niepełnych z użyciem kamery UV. Jest to metoda wygodna do stosowania ponieważ pozwala na nieinwazyjną diagnostykę, którą można użyć do wstępnego stwierdzenia czy występują WNZ, gdzie są zlokalizowane i jaka jest ich intensywność (rejestracja ilości fotonów UV docierających do obiektywu kamery). Są również kamery rejestrujące fale akustyczne i one także pozwalają na określenie intensywności oraz miejsc występowania WNZ. Wadą tej metody jest to, że nie zawsze wszystkie miejsca są widoczne z miejsca pomiaru.

Wnioski

Pomiary i diagnostyka transformatorów suchych w świetle obecnie sformułowanych norm i przepisów wydaje się daleko niewystarczająca. Z tego powodu wydaje się uzasadnione sformułowanie nowych zaleceń dotyczących prac odbiorczych i eksploatacyjnych, które ułatwią ocenę stanu technicznego danej jednostki.

Zasadnym wydaje się rozwijanie metod bazujących na rejestracji WNZ w związku z tym, że to właśnie wyładowania niepełne upatrywane są jako główna przyczyna awarii transformatorów suchych SN.

Pomiary WNZ zarówno metodą elektryczną jak i UHF nastroczą wiele problemów pomiarowych, jednak wydają się dobrym rozwiązaniem na uzupełnienie podstawowej diagnostyki w miejscu zainstalowania zwłaszcza jednostek, do których diagnosta ma zastrzeżenia.

Pomiary bezkontaktowe tj. rejestracja obrazów cewek SN w podczerwieni, jak również pomiary promieniowania

UV towarzyszącego WNZ wydają się ciekawymi metodami na rozszerzenie badań odbiorczych a zwłaszcza eksploatacyjnych, ponieważ pozwalają na pomiary w trakcie pracy jednostki. Te zalety mogą umożliwić stosunkowo wczesne wykrywanie jednostek zagrożonych awarią nawet w trakcie pracy. W przypadku emisji powierzchniowych WNZ związanych z osadzaniem się pyłów na powierzchni cewek mogą być wygodnym narzędziem do podjęcia decyzji o czyszczeniu jednostki.

Autor: 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] Forester D., ReseFailures in dry-type transformers for offshore applications, Special Edition - Dry-type Transformers vol. November 2021
- [2] Gockenbach E., Werle P., Borsi H., Monitoring and diagnostic systems for dry type transformes, 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] Mrozik A. Detekcja defektów izolacji transformatorów suchych typu cast-coil Wiadomości Elektrotechniczne 2023-11
- [6] Forester D., ReseFailures in dry-type transformers for offshore applications, Special Edition - Dry-type Transformers vol.November 2021
- [7] Szymaciec S., Analiza wyników pomiarów wyładowań niepełnych 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)
- [10] PN-EN 60270:2003 Wysokonapięciowa technika probiercza. Pomiary wyładowań niepełnych