

Analiza trendu parametrów wyładowań niezupełnych realizowana przez system monitoringu transformatorów energetycznych PDtracker

Streszczenie. W artykule opisano algorytmy generowania ostrzeżeń i alarmów zastosowane w systemie monitoringu wyładowań niezupełnych transformatora energetycznego PDtracker, który został opracowany i wdrożony przez Instytut Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej. Algorytmy zastosowane w systemie działają w oparciu o analizę trendu wybranych parametrów wyładowań niezupełnych wyznaczanego dla określonych przedziałów czasu ich akwizycji.

Abstract. This paper describes algorithms to generate warnings and alarms utilized in partial discharge monitoring system of power transformer PDtracker, which was developed and implemented by the Institute of Electrical Power Engineering, Poznan University of Technology. The algorithms used in the system are based on trend analysis of selected partial discharge parameters, which is determined for a specific time period of acquisition. (*Trend analysis of partial discharge parameters implemented by monitoring system of power transformers PDtracker*).

Słowa kluczowe: monitoring transformatorów, wyładowania niezupełne.

Keywords: transformer monitoring, partial discharges.

doi:10.12915/pe.2014.10.43

Wstęp

Podstawowym zadaniem, jakie stawia się przed dowolnym systemem monitoringu urządzenia elektroenergetycznego, jest ocena jego stanu i wygenerowanie sygnału alarmowego lub ostrzegawczego w sytuacji stwierdzenia anomalii w jego pracy. W przypadku systemów monitorujących pracę transformatora energetycznego jest to zadanie szczególnie trudne ze względu na stopień złożoności i wielkość tego urządzenia. Trudno jest bowiem dać jednoznaczną, syntetyczną odpowiedź na temat jego stanu (np. w postaci trójstopniowej klasyfikacji: stan normalny, ostrzegawczy lub alarmowy), jeżeli mamy świadomość, że defekty izolacji mogą rozwijać się z różną prędkością, w różnych miejscach i mieć różną wagę dla ryzyka wystąpienia awarii jednostki.

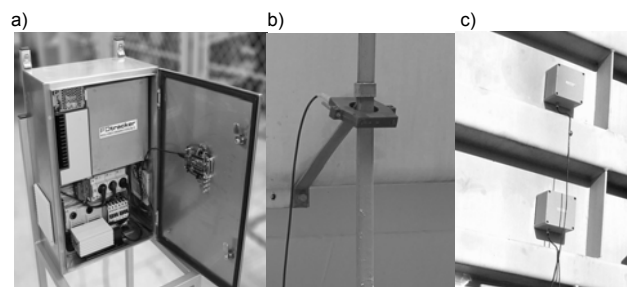
Jednym ze sposobów oceny stanu izolacji transformatora energetycznego jest śledzenie zmian aktywności wyładowań niezupełnych (wnz). Aktualnie stosowane metody on-line pomiaru wnz, czyli metoda pomiaru sygnału emisji akustycznej (AE – *Acoustic Emission*) oraz sygnału ultra wysokiej częstotliwości (UHF – *Ultra High Frequency*), należą do grupy tzw. metod niekonwencjonalnych [1-3]. W metodach tych rejestrowany sygnał pomiarowy, bazujący na różnych zjawiskach fizycznych, jest powiązany z efektem generowania wnz w sposób, który uniemożliwia jego kalibrację, czyli np. skorelowanie z poziomem ładunku pozornego, powszechnie akceptowanego parametru opisującego zjawisko wyładowań niezupełnych. W praktyce oznacza to, że w ocenie stanu transformatora energetycznego nie można posłużyć się ogólnie przyjętymi kryteriami normatywnymi, które wyrażone są w kulombach, a jedynie parametrami opisującymi zmiany w czasie danego parametru, trendy tych zmian itp.

Zaimplementowanie zatem systemu monitoringu, który będzie uwzględniał wszystkie te czynniki, a przy okazji precyzyjnie chronił obiekt, jest niezwykle trudne. Wymaga bowiem stworzenia złożonych algorytmów wnioskowania, które powinny zostać zweryfikowane w oparciu o pracę systemu zainstalowanego na jednostkach będących w eksploatacji. Właśnie to zagadnienie jest przedmiotem niniejszego artykułu.

System monitoringu wnz w transformatorze energetycznym PDtracker

System monitoringu wnz PDtracker działa w oparciu o

metodę pomiaru sygnału emisji akustycznej. W chwili obecnej wyposażony jest w cztery kanały pomiarowe, do których mogą być podłączone przetworniki emisji akustycznej (piezoelektryczne) lub też zamiennie, na jednym z kanałów, przekładnik prądowy wysokiej częstotliwości (rys.1). Szczegółowe dane dotyczące warstwy sprzętowej systemu były wielokrotnie już przedstawiane na różnego rodzaju konferencjach technicznych i opublikowane m.in. w [4-6].



Rys.1. System monitoringu wnz w transformatorze PDtracker (a) wraz z zainstalowanym na przewodzie neutralnym przekładnikiem prądowym w. cz. (HFCT) (b) oraz przymocowanymi do kadzi przetwornikami emisji akustycznej zintegrowanymi z przedwzmacniaczami (c)

System monitoringu wnz PDtracker pracuje pod nadzorem programu stworzonego w środowisku LabView. Jego struktura ma konstrukcję modułową, a poszczególne zadania realizowane są równolegle, przy czym ważniejsze funkcje wykonywane są z wyższym priorytetem (np. akwizycja danych pomiarowych, generowanie ostrzeżeń i alarmów), a mniej ważne (np. obsługa interfejsu użytkownika) uruchamiane są w chwilach, gdy procesor jest mniej obciążony. Do podstawowych zadań programu należy zatem:

- akwizycja danych pomiarowych,
- analiza wyników i ocena trendów,
- obsługa pliku i dziennika zdarzeń,
- obsługa interfejsu użytkownika,
- generowanie raportów dobowych,
- transmisja danych pomiarowych i raportów.

System rejestruje i analizuje przez 60 sekund przebiegi czasowe w każdym z kanałów wyznaczając oddzielnie następujące parametry impulsów EA/HF:

- liczbę zdarzeń (w tym wydajność systemu akwizycji),
- amplitudę maksymalną,
- amplitudę średnią,
- energię maksymalną,
- energię średnią.

Aktualne dane pomiarowe są zapisywane do plików binarnych oraz przetwarzane i porównywane z wynikami wcześniejszych rejestracji w celu określenia dynamiki zmian w czasie oraz trendów. Ocena dokonywana jest dla różnych okien czasowych (ostatnia godzina, doba, tydzień). Z chwilą przekroczenia ustalonych arbitralnie wartości kryterialnych, system generuje komunikaty ostrzeżeń lub alarmów. Dokładny opis algorytmu generowania ostrzeżeń i alarmów zostanie przedstawiony w kolejnym rozdziale.

Oprogramowanie pozwala na bieżącą obserwację pracy czujników (możliwość podglądu na wykresach poszczególnych parametrów z ostatniej godziny lub doby, a także bieżących przebiegów czasowych) oraz wpisów w dzienniku zdarzeń. Operator może także zmienić nastawy parametrów kryterialnych i opcje systemu.

System może pracować autonomicznie lub też jako zintegrowana część systemu nadrzędnego (np. SYNDIS ES). Współpraca ta odbywa się w oparciu o protokół FTP. System nadrzędny monitoringu transformatora ma wówczas dostęp do wpisów w dzienniku zdarzeń oraz plików wynikowych i może przekazać obsłudze stacji odpowiednie komunikaty. Doświadczenia z rocznej współpracy systemu *PDtracker* z systemem nadrzędnym SYNDIS ES zostały opisane w [5].

System generowania ostrzeżeń i alarmów

Ocena stanu transformatora energetycznego w systemie *PDtracker* dokonywana jest na podstawie zarejestrowanej aktywności wyładowań niezupełnych. Odbyna się to na kilka sposobów, m.in. poprzez:

- bieżącą ocenę aktywności przetworników,
- analizę parametrów skumulowanych w danym przedziale czasu (godzina, dzień, tydzień),
- analizę trendów w danym przedziale czasu.

Przez bieżącą ocenę aktywności przetworników EA rozumieć należy sytuację, w której w ciągu minuty obserwuje się gwałtowny przyrost liczby zliczanych impulsów. Pozostałe kryteria wymagają dłuższego czasu rejestracji i mają bardziej złożony algorytm, który zostanie przedstawiony poniżej.

Wartość parametru	Próg minimalny	Kod zakłócenia
Wypełnienie [%]		
P1	0	0
P2	30	4
P3	70	16
Amplituda [V]		
P4	0	0
P5	2	2
P6	4	8

Rys.2. Ekran ustawień kodu zdarzenia i jego wagi w systemie generowania ostrzeżeń i alarmów

Analiza parametrów skumulowanych

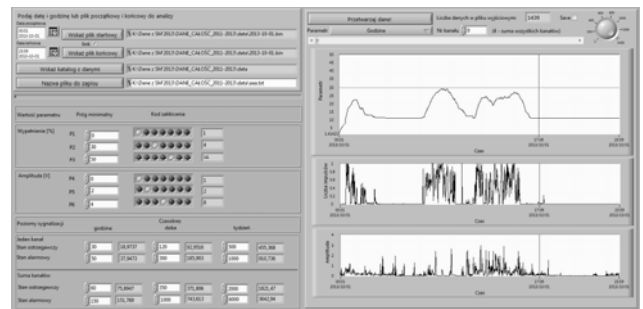
W analizie tej tworzona jest tablica parametru zawierającego w sobie skumulowaną wartość (sprowadzoną do postaci liczbowej) oceny aktywności wnz w określonym przedziale czasu (godzina, dzień, tydzień). Parametr obliczany jest w oparciu o ocenę dwóch wielkości: liczby impulsów odniesionej do wydajności systemu akwizycji (nazywane dalej wypełnieniem) oraz amplitudy maksymalnej sygnału. Algorytm obliczania parametru skumulowanego składa się z kilku sekwencji zdarzeń. W

pierwszej kolejności system porównuje parametry zarejestrowane w danym kanale pomiarowym (CH0-CH3) z nastawami generując stosowny kod binarny, gdy zostanie przekroczona wartość graniczna ustalona dla poziomu ostrzegawczego lub alarmowego. Kod binarny stanowi 8-bitowa liczba, którą można dowolnie kształtować w zakresie wartości od 1 do 255, ustawiając odpowiednie bity (rys. 2).

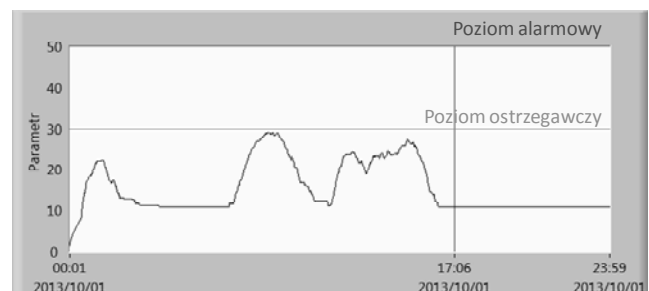
Po zamianie kodów binarnych na liczby są one sumowane pojedynczo dla danego kanału oraz dla sumy wszystkich kanałów, a następnie porównywane z nastawami wartości progowych (przypisanymi dla określonego czasu – godziny, doby, tygodnia) (rys. 3). Jeżeli zostanie przekroczona wartość graniczna ustalona arbitralnie dla tego urządzenia oraz dla danego okna czasowego, wtedy system wygeneruje ostrzeżenie lub alarm (zapali się stosowna dioda na panelu czołowym urządzenia oraz zostanie dokonany odpowiedni wpis w dzienniku zdarzeń).

Poziomy sygnalizacji	Czasokres		
	godzina	doba	tydzień
Jeden kanał			
Stan ostrzegawczy	20	26,8328	120
Stan alarmowy	50	75,8947	300
Suma kanałów			
Stan ostrzegawczy	60	107,331	350
Stan alarmowy	150	303,579	1000

Rys.3. Ekran ustawień wartości progowych parametru skumulowanego w danym czasokresie analizy, ustalonych dla pojedynczego kanału oraz dla sumy wszystkich kanałów



Rys.4. Widok programu do symulowania działania generatora ostrzeżeń i alarmów systemu *PDtracker*



Rys.5. Symulacja parametru skumulowanego oceny aktywności wnz w ujęciu godzinowym; symulacja przeprowadzona na podstawie rzeczywistych rejestracji systemu *PDtracker*, zainstalowanego na transformatorze energetycznym o mocy 330 MVA

W analizie parametrów skumulowanych kluczowe jest ustalenie odpowiednich nastaw progowych, aby system nie generował sygnałów ostrzegawczych i alarmowych zbyt wcześnie lub zbyt późno. Jest to zadanie o tyle nietłatwe, że o sile sygnału pochodzącego z danego przetwornika decyduje miejsce instalacji oraz profil dobowy aktywności

wnz (zakładając stan normalny urządzenia). Na starcie (po zainstalowaniu systemu), nawet po wykonaniu badań rekonesansowych na całej dostępnej powierzchni kadzi, nie zawsze możliwe będzie zatem właściwe ustawienie poszczególnych progów nastaw ostrzeżeń i alarmów. W tym celu zalecane jest dokonanie dłuższej, dobowej lub nawet tygodniowej rejestracji, która pozwoli ustawić parametry w sposób jak najbardziej racjonalny. Dla tych celów został opracowany dodatkowy program (rys. 4), pozwalający na podstawie zarejestrowanych przez system *PDtracker* danych pomiarowych, na przeprowadzenie symulacji działania generatora ostrzeżeń i alarmów w zależności od ustalonych parametrów (kodów binarnych i progów). Przykład wyników symulacji w ujęciu godzinowym wraz z ustalonymi poziomami nastaw generującymi ostrzeżenie lub alarm przedstawiono na rysunku 5.

Funkcja analizy trendu parametrów wyładowań niepełnych

Dodatkowym, ważnym parametrem algorytmu generujące ostrzeżenia i alarmy jest wynik analizy trendu wybranych parametrów wyładowań niepełnych, tj. znormalizowanej liczby impulsów i wartości szczytowej amplitudy. Oprogramowanie systemu *PDtracker* co minutę analizuje zarówno trendy długookresowe (ostatni tydzień i miesiąc), jak również krótkookresowe (ostatnie 24 godziny). Na tej podstawie określa się, osobno dla każdego analizowanego przedziału czasowego, czy zjawisko wyładowań niepełnych ma tendencję wzrostową czy spadkową.

Do wyznaczania (wykrywania) trendów zastosowano algorytm oparty na dyskretnym przekształceniu falkowym. Uogólniając, algorytm ten składa się z następujących kroków:

- I. Wczytanie wartości parametrów EA (*wartości szczytowej amplitud, znormalizowana liczba impulsów*) zarejestrowanych w analizowanych okresach czasowych (ostatnie 24 godziny oraz ostatnie 7 i 30 dni).
- II. Estymacja optymalnej wartości progu *threshold_level*, poniżej którego współczynniki falkowe będą zerowane:

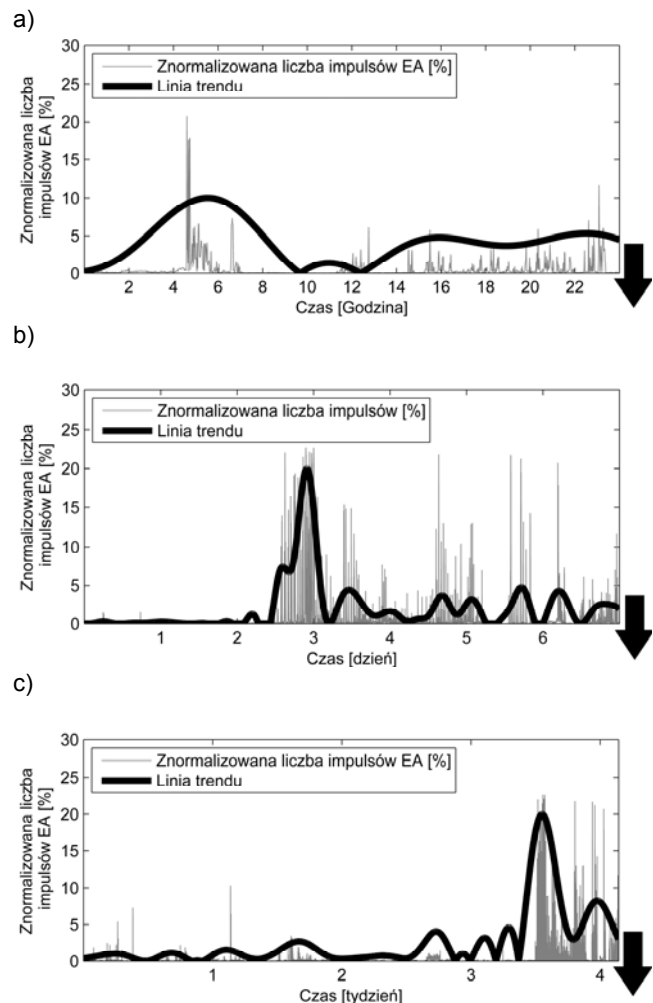
$$(1) \quad threshold_level = 1 - \frac{\log_2 \frac{N}{M} - 1}{\log_2 N}$$

gdzie: N – długość analizowanego okresu liczona w próbkach, M – estymowana liczba cykli w trendzie.

- III. Estymacja liczby poziomów dekompozycji L dyskretnej transformaty falkowej (DWT):
- $$(2) \quad L = (1 - threshold_level) \cdot \log(N).$$
- IV. Wyznaczenie dyskretnej transformaty falkowej na L -poziomach dekompozycji.
 - V. Zerowanie współczynników falkowych reprezentujących detale sygnału.
 - VI. Wyznaczenie odwrotnej dyskretnej transformaty falkowej, której wartości stanowią szukaną linię trendu funkcji.
 - VII. Ocena aktualnej tendencji rozwoju zjawiska wnz (*trend rosnący, malejący, stały*), w każdym z trzech analizowanych okresów czasowych.

Na rysunku 6 przedstawiono przykładowy wynik działania funkcji do analizy trendu parametrów wyładowań niepełnych otrzymany o północy w dniu 30 marca 2013 roku

W tym przypadku algorytm, dla każdego z trzech analizowanych okresów czasowych (ostatnie 24 godziny, ostatnie 7 i 30 dni), tendencję rozwojową zjawiska wyładowań niepełnych ocenił jako spadkową (trend malejący).



Rys. 6. Przykładowy wynik działania funkcji do wykrywania trendu parametrów wyładowań niepełnych otrzymany o północy w dniu 30 marca 2013 roku dla następujących okresów czasowych: a) ostatnie 24 godziny, b) ostatnie 7 dni, c) ostatnie 30 dni

Podsumowanie

Jak pokazano w pracy stworzenie systemu monitoringu wnz, który w sposób wiarygodny będzie ostrzegał lub alarmował obsługę stacji o stanie transformatora energetycznego, jest dużym wyzwaniem.

Na bazie kilkuletnich doświadczeń w zakresie monitorowania transformatora energetycznego dużej mocy jedynie słusznymi kryteriami oceny stanu urządzenia, w ocenie autorów, wydają się być te oparte o analizę zmian w czasie poszczególnych parametrów rejestrowanych wnz (ich skumulowane wartości) oraz o analizę trendów długookresowych.

Ze względu na złożoność procesów powstawania wyładowań niepełnych i uzależnienie rejestrowanego przez przetworniki sygnału od wielu czynników, ustalenie wartości progowych w generatorze ostrzeżeń i alarmów systemu monitoringu wymaga indywidualnego podejścia do każdego transformatora. Wiąże się to z koniecznością każdorazowego zdefiniowania wartości nastaw oraz progów ostrzegania i alarmowania po zainstalowaniu systemu (najlepiej na podstawie kilkudniowej rejestracji).

Algorytm ostrzeżeń i alarmów systemu *PDtracker* został przetestowany (ponad rok testów) na jednostce o stosunkowo dobrych parametrach układu izolacyjnego. System generowania ostrzeżeń i alarmów wymaga zatem jeszcze przeprowadzenia testów na jednostkach będących w gorszym stanie technicznym, sygnalizowanym przez np. badanie DGA.

LITERATURA

- [1] Coenen S., Beltle M., Siegel M., Tenbohlen S., Combined In-Oil Sensor for Vibration Measurement and Partial Discharge Detection using Acoustic and Electromagnetic Emissions, CIGRE SC A2 & C4 JOINT COLLOQUIUM 2013 Zurich, Switzerland
- [2] Judd M.D., Yang L., Hunter I.B.B., Partial Discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensors Part 1: Sensors and Signal Interpretation, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 21, No 2, 2005, 5-14.
- [3] Gulski E., Strehl T., Muhr M., Tenbohlen S., Meijer S., Judd M.D., Bodega R., Lemke E., Jongen R.A., Coenen S., Larzelere B., Hanai M., Agoris P., Guidelines for Unconventional Partial Discharge Measurements, Brochure No 444, CIGRE WG D1.33, 2010.
- [4] Sikorski W., Walczak K., Morańda H., Gil W., Andrzejewski M., System monitoringu wyładowań niezupełnych metodą emisji akustycznej – doświadczenia eksploatacyjne, Przegląd Elektrotechniczny, 2012, Vo.: 88, Nr: 11b, 117-121
- [5] Walczak K., Sikorski W., Andrzejewski M., Gil W., Doświadczenia z rocznej eksploatacji systemu monitoringu wyładowań niezupełnych w transformatorze sieciowym dużej mocy, Międzynarodowa Konferencja Transformatorowa TRANSFORMATOR 2013, Gdańsk, 5-7 czerwca 2013r., 9/1-15
- [6] Sikorski W., Walczak K., Morańda H., Detekcja, lokalizacja i monitoring wyładowań niezupełnych w transformatorze przy użyciu metody emisji akustycznej, Wiadomości Elektrotechniczne, 2013, nr 2, 14-18

Autorzy: dr inż. Wojciech Sikorski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: wojciech.sikorski@put.poznan.pl; dr inż. Krzysztof Walczak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: krzysztof.walczak@put.poznan.pl.