



Janusz SZCZECHOWSKI, Nassir ABEDI, Hossein BORSI, Ernst GOCKENBACH

University of Hanover, Institute of Electric Power Systems, High Voltage Engineering Section (Schering – Institut)

Lokalizacja wyładowań niezupełnych oraz filtracja zakłóceń za pomocą funkcji przejścia

Streszczenie. Tekst opisuje lokalizację wyładowań niezupełnych za pomocą częściowej funkcji przejścia. Dzięki systemowi pomiarowemu składającemu się z sensora, wzmocniacza i układu optycznej transmisji sygnału możliwa jest adaptacja układu pomiarowego dla różnego typu transformatorów. Opisywana metoda wykorzystuje system wielu sensorów dla równoczesnego pomiaru i filtracji sygnałów wyładowań niezupełnych, dzięki temu możliwa jest lokalizacja źródła wyładowania niezupełnego. W artykule przedstawiono również pewne wyniki badań laboratoryjnych.

Abstract. (Localization of the partial discharges and filtering out the noise with transfer function). This paper presents the procedure of partial discharge localization method with the help of sectional winding transfer function. Due to the use of a measuring system, which consist of sensor, amplifier and optical signal transmission an adoption to various kind of transformers is possible. The described method uses a multi sensor system for a simultaneous electrical decoupling and filtering of PD-signals, thus a comparison of the measured signals enables a localization of the PD-origin. Some investigations in the laboratory are introduced.

Słowa kluczowe: transformatory, lokalizacja wyładowań niezupełnych, częściowa funkcja przejścia.

Keywords: transformers, partial discharge localization, sectional winding transfer function.

Wstęp

W transformatorach energetycznych stosuje się w głównej mierze izolację papierowo-olejową ze względu na wymagania techniczne stawiane tej izolacji a także właściwości chłodzenia. Transformatory są jednym z głównych urządzeń pośród komponentów sieci energetycznej. Zwiększenie obciążenia jak i wydłużenie czasu eksploatacji wymaga dostarczenia aktualnej informacji zawierającej w miarę możliwości dokładne dane dotyczące stanu izolacji w transformatorze. Starzenie się izolacji powoduje jednocześnie zwiększenie ryzyka wystąpienia awarii, dlatego możliwie stały monitoring i diagnostyka są tak ważne. Jednym z wielu parametrów określających aktualny stan izolacji jest poziom aktywności wyładowań niezupełnych (WZN), nie tylko wielkość, ale także umiejscowienie źródła jest ważną informacją. W przyszłości ocena poziomu wyładowań niezupełnych odbywać się będzie *on-line* bez konieczności wyłączenia transformatora, natomiast dokładna analiza i lokalizacja źródła może być przeprowadzona *off-line*.

Analiza teoretyczna

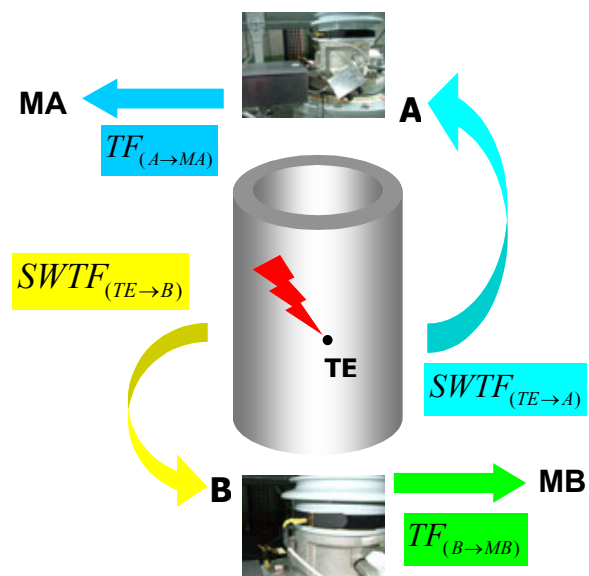
Prezentowany system pomiaru bazuje na założeniu, że sygnał wyładowania niezupełnego przemieszcza się od źródła poprzez uzwojenie transformatora i może być zmierzony w dwóch charakterystycznych punktach, na przykład w punkcie neutralnym i odpowiednim przepięści wysokiego napięcia. Dla poprawnego działania systemu pomiarowego wymagana jest wcześniejsza wiedza dotycząca tak zwanej częściowej funkcji przejścia, która może być wyrażona w postaci czasowej lub częstotliwościowej:

$$(1) \quad \begin{aligned} x(t) &= h(t) \cdot y(t) \\ x(f) &= h(f) \cdot y(f) \end{aligned}$$

gdzie: $x(t)$ i $x(f)$ – są sygnałami wejściowymi w postaci czasowej i częstotliwościowej, $h(t)$ i $h(f)$ – są funkcjami przejścia, $y(t)$ i $y(f)$ – są sygnałami wyjściowymi [1].

Częściowe i całkowite funkcje przejścia są wielkościami charakterystycznymi dla każdego transformatora. Są zatem mierzone i obliczane dla każdego obiektu indywidualnie.

Jest to jeden z głównych problemów tej metody, gdyż dla niektórych transformatorów określona może być tylko całkowita i kompletna funkcja przejścia pomiędzy dwoma punktami pomiarowymi nie zaś częściowa funkcja poszczególnych sekcji uzwojeń. Tak zwana *Sectional Winding Transfer Function* (SWTF) jest konieczna do poprawnego obliczenia przypuszczalnego ładunku w źródle oraz lokalizacji sygnału wyładowania niezupełnego przenieszonego przez uzwojenia. Powyższy przypadek dotyczy starszych obiektów, dla których nie dostępna jest dokumentacja techniczna. Jeśli SWTF są znane źródło wyładowania niezupełnego może być zlokalizowane na podstawie serii obliczeń sygnału dla poszczególnych sekcji rozmieszczonych na uzwojeniu, wykorzystując w tym celu tylko pomiary z dwóch punktów. Podsumowując, dwa obliczone sygnały powinny mieć jednakowy kształt i amplitudę w miejscu wystąpienia wyładowania niezupełnego. Rysunek 1 przybliża podstawę teoretyczną tej metody lokalizacji.



Rys.1. Schemat metody lokalizacji

Źródło wyładowania niepełnego oznaczone jest w tym przypadku jako TE. Punkty, w których sygnał może być rozpoznany poza transformatorem to punkty A i B, miejsca gdzie dokonujemy pomiaru i przetworzenia w postaci cyfrową MA i MB. Funkcja przejścia systemu pomiarowego z A do MA i z B do MB powinna być znana. Iloraz wyniku pomiaru i iloczyn kolejnych SWTF z funkcją przejścia układu pomiarowego daje serię obliczonych sygnałów dla poszczególnych sekcji uzwojenia. Porównanie ich pozwala na określenie źródła WNZ. Umieszczona poniżej uproszczona zależność pokazuje tą procedurę.

$$(2) \frac{MB}{SWTF_{(TE \rightarrow B)} \cdot TF_{(B \rightarrow MB)}} = TE = \frac{MA}{SWTF_{(TE \rightarrow A)} \cdot TF_{(A \rightarrow MA)}}$$

gdzie: $MB = FFT\{MB(t)\}$, $MA = FFT\{MA(t)\}$, $TE = FFT\{TE(t)\}$ – są sygnałami w postaci częstotliwościowej otrzymanymi dzięki przekształceniu sygnałów z postaci czasowej za pomocą szybkiej transformaty Fouriera.

Dla poprawnej analizy sygnałów należy w powyższych obliczeniach uwzględnić oprócz SWTF również funkcję przejścia układu pomiarowego przedstawioną na rysunku 1 jako $TF(A \rightarrow MA)$ i $TF(B \rightarrow MB)$ gdyż są one uzależnione od konstrukcji przepustów izolatorowych transformatora, dopasowania sensorów, czwórników, parametrów wzmacniacza, transmisji optycznej sygnału oraz urządzenia rejestrującego.

System pomiaru i lokalizacji wyładowań niepełnych

System pomiarowy składa się z sensorów, czwórników pomiarowych, wzmacniaczy, systemu transmisji danych drogą optyczną oraz urządzenia rejestrującego. Sensory po dopasowaniu mogą być z łatwością zamontowane na każdym izolatorze przepustowym transformatora. Wszystkie pozostałe komponenty są niezależne od typu transformatora. Wzmacniacz może być zasilany bateryjnie lub ogniwami słonecznymi, transmisja danych odbywa się w technice optycznej, światłowodem [2]. Wszystkie parametry wzmacniacza mogą być zdalnie nastawiane ze stacji kontrolnej. Dostępna jest zmiana poziomu wzmocnienia oraz przejście w stan oczekiwania dla uzyskania lepszej dokładności i oszczędności energii podczas przerw w pomiarach. Możliwe jest wygenerowanie sygnału sprawdzającego poprawność działania systemu.

W zależności od przeznaczenia system może być używany jako stały system monitoringu aktywności WNZ lub jako doraźny system diagnostyczny.

Rezultaty badań

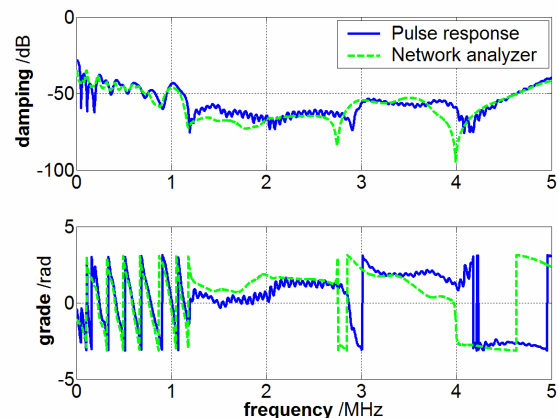
Zostały przeprowadzone serie badań w warunkach laboratoryjnych instytutu oraz w laboratorium jednego z producentów transformatorów na rzeczywistym obiekcie będącym w fazie prób wysokonapięciowych.

Warunki laboratoryjne

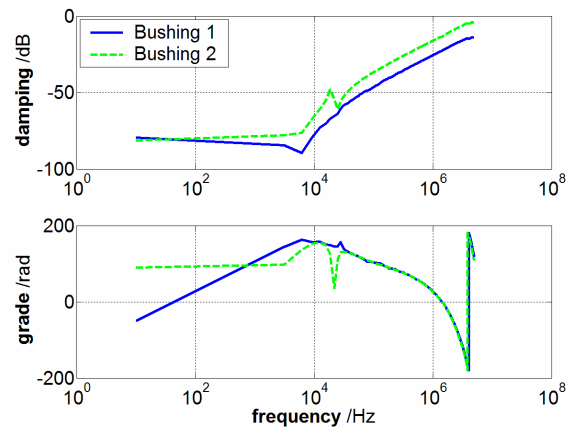
Na specjalnie do tego celu spreparowanym transformatorze rozdzielczym bez kadzi (10kV/380V, 200kVA) określono SWTF poszczególnych sekcji uzwojenia dwoma metodami, metodą odpowiedzi impulsowej oraz za pomocą analizatora sieci. Porównanie tych dwóch metod zawierających amplitudę oraz przesunięcie fazowe przedstawia rysunek 2. Funkcje te w postaci częstotliwościowej uzyskane z pomiarów wyżej wymienionymi metodami odpowiadają sobie. Dla wyższych częstotliwości tłumienie i przesunięcie fazowe wykazują rozbieżności.

Funkcja przejścia układu pomiarowego dla tego transformatora $TF(A \rightarrow MA)$ i $TF(B \rightarrow MB)$ pokazana na

rysunku 1 została również określona, a rezultaty przedstawia rysunek 3. Funkcja ta zawiera przejście sygnału przez sensor, wzmacniacz, system transmisji i urządzenie rejestrujące.



Rys.2. Porównanie dwóch metod, odpowiedzi impulsowej oraz analizatora sieci



Rys.3. Porównanie funkcji przejścia dla dwóch punktów pomiarowych

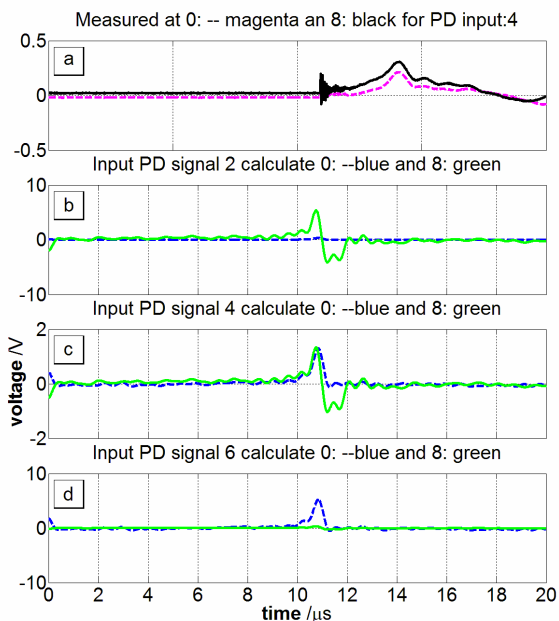
Można wyraźnie zaobserwować, że drogi pomiarowe dla dwóch sygnałów nie są identyczne, co potwierdza wcześniejsze założenie, że nie tylko częściowe funkcje przejścia uzwojenia transformatora, ale również parametry drogi pomiarowej należy uwzględnić podczas obliczeń i lokalizacji WNZ.

Wcześniejsze badania wykazały, że porównywanie SWTF dla poszczególnych sekcji uzwojenia w granicach do 1 MHz nie jest możliwe [3]. Jednakże dla wyższych częstotliwości powyżej 1 MHz występują stałe różnice. Ta zależność może zostać wykorzystana przy obliczeniu częściowych funkcji przejścia dysponując jedynie funkcją określającą kompletne uzwojenie.

W celu weryfikacji powyższych założeń przeprowadzona została procedura lokalizacji WNZ. Został wygenerowany sygnał w układzie ostrze-płyta znajdującym się w oleju a następnie wprowadzony do transformatora w punkcie oznaczonym jako 4. Rysunek 4a pokazuje pomierzony sygnał wygenerowanego WNZ na końcu i początku uzwojenia. Na podstawie powyższych założeń dla poszczególnych części uzwojenia oznaczonych odpowiednio od 0 do 8 obliczono w sumie 14 SWTF. Rysunek 4b, c i d pokazuje odpowiednio kalkulacje sygnału dla punktów 2, 4 i 6.

Porównanie obliczonych przebiegów wykazuje, że jedynie dla punktu 4 występuje wystarczająca zbieżność obu sygnałów w amplitudzie. Różnice w kształcie wynikają

z niedokładności obliczonej SWTF. Podczas badań zauważono, że błąd w kalkulacji SWTF dla niskich częstotliwości ma większy wpływ na amplitudę obliczanego sygnału niż błędy powstałe dla wyższych częstotliwości.



Rys.4. Lokalizacja wyładowania niepełnego

W celu zautomatyzowania procesu lokalizacji wprowadzono pewne procedury obliczeniowe. Lokalizacja źródła WNZ opiera się na szeregu parametrów określających amplitudę i kształt sygnału. Wyniki zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki kalkulacji

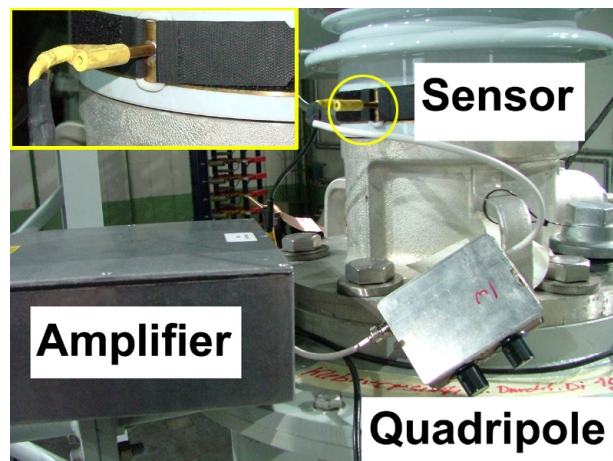
Kalku- lacja	Punkt wprowadzenia WNZ do uzwojenia						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0,009	0,073	0,191	0,404	0,820	1,645	3,292
2	0,005	0,038	0,090	0,187	0,377	0,756	1,513
3	0,023	0,006	0,039	0,090	0,187	0,376	0,754
4	0,300	0,142	0,054	0,007	0,071	0,170	0,354
5	0,502	0,246	0,113	0,036	0,024	0,095	0,214
6	1,531	0,766	0,385	0,195	0,103	0,063	0,054
7	3,098	1,547	0,768	0,374	0,167	0,044	0,058

Mniejsza wartość obliczonego parametru w poszczególnych częściach uzwojenia oznacza większe podobieństwo uzyskanych z obliczeń sygnałów a zatem potencjalne źródło wyładowania niepełnego. Ciemniejsze pola oznaczają najmniejszą wartość, jednakże zaobserwować można, że nie we wszystkich wypadkach jednoznaczna lokalizacja jest możliwa. Jaśniejsze pola oznaczają miejsca sąsiednie, które też mogą zostać sklasyfikowane jako źródła WNZ. Przyczyną tych różnic jest niedostatecznie dokładne odwzorowanie SWTF. Jednakże metoda ta może znaleźć zastosowanie w systemie monitoringu *on-line*, gdzie wymagana jest tylko szybka i prosta identyfikacja.

Warunki rzeczywiste

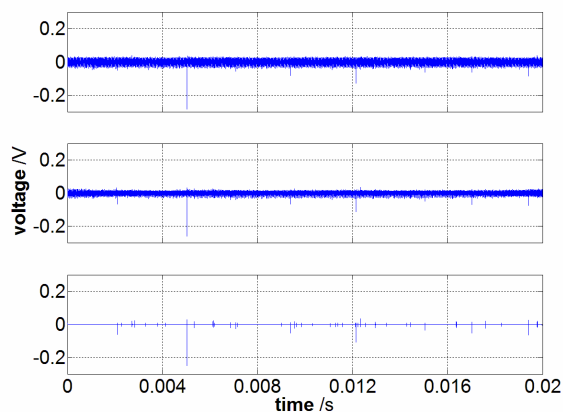
W celu określenia zachowania się systemu w warunkach rzeczywistych przy obecności wysokiego napięcia, przeprowadzono badania na jednofazowym autotransformatorze 230 kV/115 kV/13,2 kV o mocy 133,3 MVA. Sensor, czwórnik oraz wzmacniacz jako układ pomiarowy zainstalowany na jednym z przepustów przedstawia rysunek 5. Konstrukcja czwórника pozwala na zmianę konfiguracji zawartych w nim elementów w celu polepszenia czułości, a tym samym lepszego dopasowania sensora do

wzmacniacza. Została przeprowadzona standardowa procedura kalibracji mająca również na celu kontrolę samego systemu pomiarowego. Określona została również całkowita funkcja przejścia.



Rys.5. Układ pomiarowy, wzmacniacz, czwórnik, sensor

Dokonano serii pomiarów dla różnych poziomów napięcia i różnej konfiguracji systemu pomiarowego. Na mierzony sygnał wpływ mają zawsze zakłócenia zewnętrzne, dlatego też konieczna jest filtracja otrzymanych sygnałów. Na rysunku 7 przedstawiono oryginalny sygnał oraz dwa kolejne etapy filtracji.



Rys.6. Filtracja sygnałów

Najniższy z wykresów na rysunku 6 przedstawia odfiltrowany sygnał pomiarowy, widoczne są pojedyncze impulsy. Następnym krokiem jest identyfikacja czy pochodzą one z transformatora i są wyładowaniami niepełnymi czy są to sygnały zakłóceń pochodzące z otoczenia. Zgodnie z teorią, sygnał pochodzący z otoczenia transformatora musi przejść przez kompletne uzwojenie. Porównanie ze sobą dwóch pomierzonych na końcach uzwojenia impulsów niesie ze sobą informacje o funkcji przejścia, która jest identyczna ze znaną całkowitą funkcją przejścia uzwojenia. Impuls wygenerowany wewnątrz transformatora niesie ze sobą inną informację. Ta prosta metoda porównania spektrum sygnału pozwala dokonać rozdziału pomiędzy sygnały WNZ a sygnały zakłóceń [4]. Jednakże również w tym przypadku istotne jest uwzględnienie funkcji przejścia wszystkich komponentów systemu pomiarowego.

W tym przypadku wszystkie sygnały z rysunku 6 zostały zidentyfikowane jako wyładowania niepełne pochodzące z transformatora. Największy z pomierzonych sygnałów

odpowiadał w przybliżeniu ładunkowi 1900 pC, najmniejszy 100 pC. Pomiar innym niezależnym systemem potwierdził te wyniki. Czulość systemu podniesiona może zostać przez zmianę poziomu wzmacnienia. Ze względu na niski poziom szumów w tym przypadku nawet małe impulsy mogą być rozpoznane.

Wnioski

System monitoringu *on-line* otwiera możliwość wydłużenia żywotności transformatorów i zmniejszenie ryzyka kosztownych awarii. Dzięki zastosowaniu funkcji przejścia możliwa jest lepsza ocena mierzonych sygnałów, a tym samym ocena stanu izolacji.

Prezentowana metoda wykazała dobre rezultaty podczas lokalizacji wyładowań niezupełnych, w przyszłości zastosowanie lepszego modelu pozwoli na zwiększenie dokładności całego systemu.

Ładunek mierzony przy pomocy tej metody wykazuje zgodność z wynikami uzyskanymi innymi niezależnymi metodami. Dzięki znajomości oryginalnego kształtu sygnału w źródle wyładowania niezupełnego możliwa będzie kalkulacja wielkości prawdziwego ładunku.

LITERATURA

- [1] Strobel H., Experimentelle Systemanalyse, *Akademie – Verlag, Berlin* (1975), 26-27
- [2] Werle P., Akbari A., Gockenbach E., Borsi H., An Enhanced System for Partial Discharge Diagnosis on Power Transformers, *Proceedings of the 13th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Delft 2003, pp.328
- [3] Werle P., Akbari A., Borsi H., Gockenbach E., Localization and Evaluation of Partial Discharges on Power Transformers using Sectional Winding Transfer Functions, *12th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Bangalore, India, 2001.
- [4] Werle P., Gockenbach E., Borsi H., Partial Discharge Measurements on Power Transformers using Transfer Function for Detection and Localization. *Intern. Conference on Properties and Application of Dielectric Materials (ICPADM)*, Nagoya/Japan, 2003, Paper 21-1, P. 1154 – 1157

Autor: mgr inż. Janusz Szczechowski, University of Hannover, Institute of Electric Power Systems, High Voltage Engineering Section, (Schering-Institut), Callinstr. 25 A, 30167 Hannover, Germany, E-mail: szczechowski@mbox.si.uni-hannover.de