

Lokalizacja wylądowań niezupełnych – pomiar funkcji przejścia na części aktywnej transformatora

Streszczenie. Urządzenia wysokonapięciowe, takie jak np. transformatory, stanowią jeden z ważniejszych elementów systemu przesyłu energii elektrycznej. W związku ze wzrastającymi wymaganiami dotyczącymi optymalizacji konstrukcji transformatorów, zmniejszaniem wymiarów oraz ilości użytej izolacji rośnie zagrożenie pojawienia się wylądowań niezupełnych (wnz) w przypadku drobnych uszkodzeń lub źle wykonanego systemu izolacji części aktywnej. Diagnoza i dokładna lokalizacja tak powstałych na etapie produkcyjnym źródeł wylądowań niezupełnych jest przedmiotem tego artykułu. Opisaną w artykule metodą dotyczy lokalizacji wnz z wykorzystaniem częściowej funkcji przejścia uzwojenia uzyskanej z pomiarów wykonanych na części aktywnej transformatora.

Abstract. High Voltage components such as power transformers are one of the most important device of electrical distribution power system. As a consequence of increasing requirements for constructions improvement, reducing of dimensions of used insulation leads to increasing of partial discharge (PD) risk in case of small failures in insulation system. Diagnosis and localization of such generated PD in production process is a main topic of this paper. Method described in the paper is based on localization of PD using partial transfer function measured on an active parts of transformer. (**Localization of Partial Discharge – Transfer Function Measurement on Active Part of Transformers**).

Słowa kluczowe: wylądowania niezupełne, część aktywna, transformatory, funkcja przejścia.

Keywords: partial discharges, active parts, transformers, transfer function.

doi:10.12915/pe.2014.10.40

Wstęp

Transformatory, jako główne elementy systemu dystrybucji energii elektrycznej i ich prawidłowe funkcjonowanie, jest jednym z ważnych aspektów prawidłowego funkcjonowania sieci elektroenergetycznej. Zmieniające się przepisy ochrony środowiska, jak i rozwój technologiczny a także wymagania użytkowników, wymuszają na producentach transformatorów optymalizowanie konstrukcji mechanicznej jak i zmniejszanie wymiarów i ilości użytych materiałów. Efektem tego jest racjonalizacja układów izolacyjnych części aktywnej, a co za tym idzie ilości i typu użytej izolacji. To uwarunkowanie sprawia, że najmniejsze błędy lub uszkodzenia mogące występować w procesie produkcyjnym, jak i w samych materiałach izolacyjnych powodują powstawanie wylądowań niezupełnych (wnz). W następstwie rozwoju wnz czującą aktywna transformatora może ulec zniszczeniu pociągając za sobą znaczące koszty wywołane koniecznością naprawy urządzenia lub/oraz braku dostawy energii elektrycznej dla odbiorców końcowych. Wczesne i poprawne wykrycie potencjalnego źródła wnz, jak i jego lokalizacja, jest zatem jednym z ważniejszych zadań diagnostyki transformatorów. Artykuł ten prezentuje jedną z możliwych metod dokładnej lokalizacji źródła wnz w przypadku gdy dostępna jest część aktywna transformatora znajdującego się w procesie produkcyjnym lub podczas rewizji. Rozwiązanie to bazuje na bezinwazyjnym pomiarze częściowej funkcji przejścia wykorzystywanej do lokalizacji sygnałów wnz uzyskanych podczas prób wysokonapięciowych lub w czasie pracy transformatora.

Podstawy teoretyczne

Źródło wylądowań niezupełnych może zostać zlokalizowane tą metodą pod warunkiem, że informacja o częściowej funkcji przejścia jest dostępna. Transformatory można, zatem podzielić na dwie główne grupy:

- stare jednostki bez danych konstrukcyjnych. Określenie częściowej funkcji przejścia jest w tym przypadku utrudnione. Jedną z metod jest wykorzystanie całkowitej funkcji przejścia, na przykład standardowe pomiary i analiza odpowiedzi częstotliwościowej FRA (ang. *Frequency Response Analysis*). Lokalizacja w tym przypadku nie będzie jednak dokładna,

- nowe jednostki, dla których częściowa funkcja przejścia może zostać obliczona dla poszczególnych uzwojeń bazując na danych konstrukcyjnych. Doświadczenie pokazuje jednak, że takie obliczenia nie odzwierciedlają dokładnie skomplikowanej struktury części aktywnej transformatora po jej kompletnym montażu. Trzeba pamiętać bowiem o wpływie zakłóceń na rejestrowane sygnały wywołane przez przebiegające równoległe wyprowadzenia napięciowe czy pracę przełącznika zaczepów.

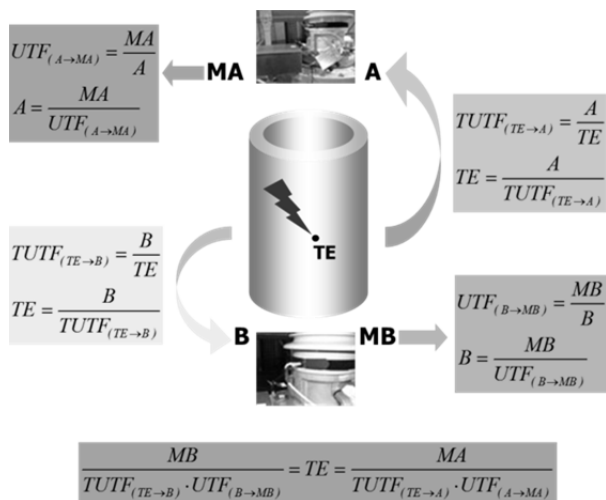
W wielu przypadkach w procesie produkcyjnym lub naprawczym możliwe jest natomiast dokonanie pomiaru funkcji przejścia bezpośrednio na części aktywnej. Takie dane mogą być wykorzystane w przyszłej potencjalnej diagnostyce, jako tak zwany „odcisk palca”.

Pomiary funkcji przejścia na części aktywnej transformatora i jego uzwojeniach bazują na wykorzystaniu sensorów pojemnościowych, a więc nie są metodą inwazyjną powodującą uszkodzenia lub konieczność ponownego izolowania miejsc połączeń z układem pomiarowym. Sygnały otrzymane w ten sposób są rejestrowane i zapisywane cyfrowo za pomocą oscyloskopu a następnie przetwarzane za pomocą programów kalkulacyjnych [1].

Sztucznie wygenerowany sygnał wnz może zostać podany w różnych dostępnych miejscach części aktywnej transformatora, a następnie jego odpowiedź pomierzona na wyprowadzeniach napięciowych (terminalach). Pomiar może być dokonany bezpośrednio lub z użyciem dzielników pojemnościowych, których wpływ przy przeliczaniu sygnału jest pomijalny. Wymiary geometryczne i konstrukcja części aktywnej mają wpływ na kształt i modyfikują odpowiednio oryginalny sygnał [2]. Tak uzyskane informacje o częściowej funkcji przejścia mogą posłużyć do kalkulacji sygnałów pomierzonych podczas prób napięciem indukowanym. Obliczenia odbywają się w dziedzinie czasu i częstotliwości.

Zostało udowodnione, że wystarczy jedynie wybrany zakres lub grupa zakresów częstotliwości dla poprawnej lokalizacji. Jako górną granicę pomiaru stosowano częstotliwość 5 MHz. Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie metodę lokalizacji na przykładzie prostego uzwojenia transformatora. Sygnał źródłowy wnz oznaczony tutaj, jako TE po przejściu przez sekcję uzwojenia transformatora zostaje pomierzony (odcpey pomiarowe

przepustów) w punktach MA i MB. Następnie dzięki informacji o częściowej funkcji przejścia jak i odcinka pomiarowego zostaje on przeliczony dla poszczególnych sekcji uzwojenia. Lokalizacja odbywa się za pomocą porównania przeliczonych sygnałów.

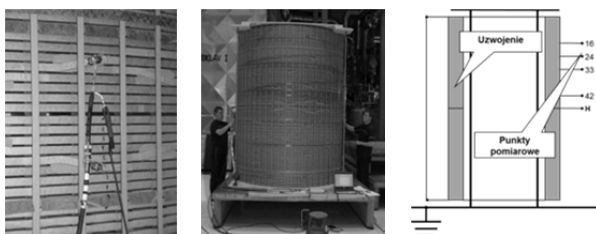


Rys.1. Częściowa funkcja przejścia uzwojeń transformatora

Badania laboratoryjne

Pomiary laboratoryjne funkcji przejścia na części aktywnej transformatora zostały wykonane na specjalnie do tego celu spreparowanym wysokonapięciowym uzwojeniu transformatora 400 kV.

Sygnal wnz został odpowiednio wygenerowany a następnie podany w różnych miejscach uzwojenia. W trakcie badań porównano wpływ i różnice w przypadku bezpośredniego połączenia elektrycznego oraz bezinwazyjnej metody z wykorzystaniem sensora pojemnościowego [3], co ma zastosowanie podczas pomiarów na części aktywnej realnych transformatorów. W tym przypadku funkcje przejścia zostały bezpośrednio pomierzone za pomocą analizatora sieciowego w dziedzinie częstotliwości do 5 MHz w skali liniowej, co ułatwia dalszą ich obróbkę cyfrową. Rysunek 2 przedstawia uzwojenie testowe jak i miejsce pomiarowe w punkcie wyjściowym połączone elektrycznie, które w tym przypadku znajdowało się w środku uzwojenia i zostało oznaczone literą H. Pozostałe wyprowadzenia były ze sobą połączone w jednym punkcie.

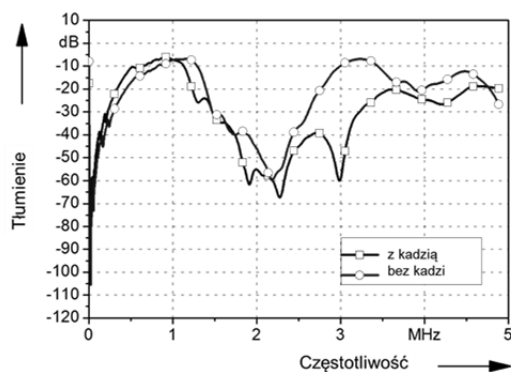


Rys.2. Pomiary laboratoryjne na uzwojeniu wysokonapięciowym

W dalszym etapie badań ustalono wpływ obecności rdzenia oraz kadzi na otrzymane funkcje przejścia. Z obserwacji wynika, że wpływ ten nabiera znaczenia wraz ze wzrostem częstotliwości. Na rysunku 3 przedstawiono wykres tłumienia sygnału w dziedzinie częstotliwości dla uzwojenia umieszczonego wraz z rdzeniem w kadzi oraz dla samego uzwojenia.

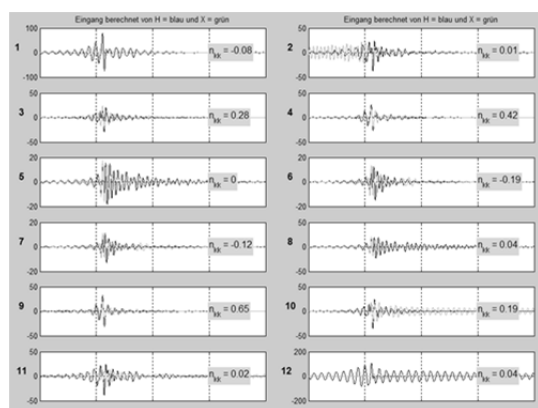
Doświadczalnie stwierdzono, że lokalizowanie za pomocą tej metody w przedziale częstotliwości powyżej

1 MHz, mimo różnic w kształcie sygnału, przynosi również oczekiwane rezultaty.



Rys.3. Wpływ rdzenia oraz kadzi na funkcję przejścia

Całość uzwojenia testowego została podzielona na 12 jednakowych sekcji. Dla każdej sekcji wyznaczono częściowe funkcje przejścia metoda pomiarową. Następnie w sekcji dziewiątej wygenerowano sygnał wnz, który został pomierzony na terminalach wyjściowych uzwojenia. Tak otrzymane sygnały po przemnożeniu przez częściowe funkcje przejścia, dla każdego z punktów, zostały ze sobą porównane [4].



Rys.4. Lokalizacja sztucznie wygenerowanego sygnału wnz (Punkt 9 – najwyższa wartość współczynnika n_{kk})

Matematycznym wynikiem tego porównania jest współczynnik n_{kk} zawierający się w przedziale $-1 \div +1$, przy czym wartości ujemne oznaczają odwrotną fazę sygnału porównywanego. Współczynnik n_{kk} oblicza się ze wzoru:

$$(1) \quad n_{kk} = A \cdot F \cdot C$$

gdzie: A – amplituda sygnału przeliczonego w dziedzinie czasu, F – faza sygnału, C – porównane wartości częstotliwości sygnału.

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki obliczeń dla punktu o numerze 9. W punkcie tym wyliczono największą wartość współczynnika n_{kk} , a tym samym miejsce potencjalnego źródła wnz. Ze względu na symetryczną budowę uzwojenia zaobserwować można również wzrost współczynnika n_{kk} dla punktu 4. Stwierdzono, że w przypadku uzwojeń z symetryczną budową możliwa jest lokalizacja wnz, której wynikiem są dwa obszary umiejscowione w równych odstępach od osi symetrii uzwojenia, co w pewnych przypadkach może utrudniać dokładne umiejscowienie źródła wylądowań niezupełnych.

Przykład lokalizacja wnz na realnym obiekcie

Podczas wykonywania prób końcowych napięciem indukowanym na transformatorze o napięciu roboczym 400 kV zaobserwowano zwiększoną aktywność wyładowań niepełnych. Bazując na sygnałach pomierzonych na wyprowadzeniach dolnego i górnego napięcia i amplitudzie tych sygnałów oraz tablicy kalibracji stwierdzono, że potencjalne źródło wyładowań znajduje się po stronie dolnego napięcia. Dalsze badania i lokalizacja z wykorzystaniem sensorów akustycznych nie potwierdziły jednak tej diagnozy. W celu weryfikacji uzyskanych wyników zastosowano metodę częściowych funkcji przejścia.

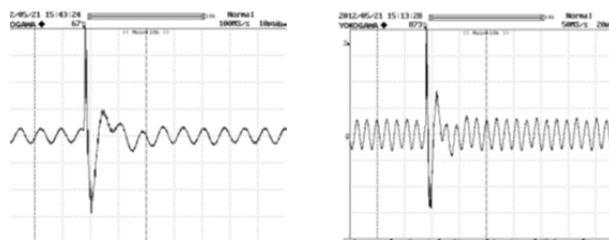
Do części aktywnej transformatora zostały podane bezinwazyjnie, sztucznie wygenerowane sygnały wnz w różnych dostępnych grupach uzwojenia (część izolacji cylindrycznej została usunięta na czas pomiarów) a następnie pomierzone na wyprowadzeniach dolnego i górnego napięcia z wykorzystaniem dzielników napięciowych. Dzielniki napięciowe użyto w celu odwzorowania punktów pomiarowych przepustów (rys. 5). Rejestracji sygnałów wykonano dla różnych pozycji przełącznika zaczepek, tak jak miało to miejsce podczas prób napięciem indukowanym. Tak otrzymane funkcje przejścia zostały przetworzone cyfrowo a następnie porównane z zarejestrowanymi sygnałami wnz.



Rys.5. Pomiary na części aktywnej

Dzięki analizie w dziedzinie czasu i częstotliwości udało się ustalić potencjalne miejsce generacji sygnałów wnz, które zostało następnie potwierdzone podczas dokładnej inspekcji wizualnej. Na rysunku 6 przedstawiono sygnał pomierzony oraz wygenerowany dla zlokalizowanego źródła wyładowań niepełnych.

Po wymianie wadliwych części izolacji nie stwierdzono dalszej obecności wyładowań.



Rys.6. Sygnał pomierzony (z lewej) i wygenerowany sztucznie (z prawej) dla miejsca występowania wnz

Wnioski

Przedstawiona metoda pozwala na lokalizowanie wyładowań niepełnych w przypadku, gdy inne metody nie przynoszą rezultatu lub są niejednoznaczne. Podkreślić jednak należy, że wymaga ona dodatkowej informacji o częściowej funkcji przejścia, którą można uzyskać drogą pomiarową.

LITERATURA

- [1] Szczechowski J., Abedi N., Borsi H., Gockenbach E., System for measuring partial discharges in oil-paper insulated transformers and for localization of the sources, *Proceedings of XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, Tsinghua University, Beijing, China, 25-29.08.2005, Conference CD
- [2] Werle P., Erfassung und Evaluierung von Teilentladungen in Transformatoren mit innovativen Sensoren und adaptierten Verfahren der digitalen Signalverarbeitung, Ph.D. dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, (2006), 89-90
- [3] Werle P., Gockenbach E., Borsi H., Partial Discharge Measurements on Power Transformers Using Transfer Function for Detection and Localization, *International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials (ICPADM)*, Nagoya/Japan, (2003), Paper 21-1, 1154-1157
- [4] Werle P., Erfassung und Evaluierung von Teilentladungen in Transformatoren mit innovativen Sensoren und adaptierten Verfahren der digitalen Signalverarbeitung, Ph.D. dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, (2006), 99-100

Autorzy: Janusz Szczechowski, ABB AG, Trafoweg 4, 06112 Halle, Niemcy, E-mail: janusz.szczechowski@de.abb.com; dr hab. inż. Krzysztof Siodła, prof. PP, Politechnika Poznańska, Zakład Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: krzysztof.siodlai@put.poznan.pl