

Wykrywanie zwarcí zwojowych w transformatorze energetycznym przy użyciu metody SFRA

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań odpowiedzi częstotliwościowej transformatora bez zwarcia oraz ze zwartymi wybranymi cewkami uzwojenia górnego napięcia. Do pomiarów zwierano od jednej do pięciu pierwszych cewek uzwojenia fazy L3. Pomiarów wykonywano jednym z czterech sposobów: pomiar odpowiedzi danego uzwojenia przy rozwartych i zwartych zaciskach pozostałych uzwojeń oraz pomiar międzyuzwojeniowy indukcyjny i pojemnościowy. Z przeprowadzonych badań wynika, że najskuteczniejszym układem pomiarowym do wykrywania zwarcia zwojowego w transformatorach jest pomiar odpowiedzi częstotliwościowej przy pozostawieniu pozostałych zacisków na potencjale swobodnym.

Abstract. The article presents the results of the transformer frequency response investigations without and with shorting the selected upper voltage winding coils. For measurements first coils, from one to five, of the L3 phase winding, were shorted. The measurements were carried out in one of four ways: measurement of the frequency response of a selected winding with open and closed terminals of the remaining windings, measurement in an induction inter-winding system and measurement in a capacitive inter-winding system. The conducted tests show that the most effective measurement method for detecting of a winding short-circuit in transformers is to measure the frequency response with the remaining terminals on the floating potential. (**Detection of windings short-circuits in a power transformer using the SFRA method.**)

Słowa kluczowe: SFRA, funkcja przenoszenia, transformator energetyczny, zwarcia zwojowe.

Keywords: SFRA, transfer function, power transformer, short circuit windings faults.

Wstęp

Transformatory energetyczne są integralną częścią sieci elektroenergetycznej, bez których przesył i dystrybucja energii elektrycznej byłyby niemożliwe. Pomimo ciągłych udoskonaleń w dziedzinie zabezpieczeń transformatorów, nadal dochodzi do ich awarii [1]. Awaria transformatora energetycznego skutkuje nie tylko stratami finansowymi, ale stanowi również zagrożenie dla życia ludzkiego, powoduje przerwę w dostawie energii elektrycznej oraz może być przyczyną problemów w innej części sieci elektroenergetycznej. Z tych powodów skuteczna diagnostyka transformatorów, mogąca wykryć defekt jeszcze przed zniszczeniem transformatora, jest niezwykle ważna.

Metoda SFRA (ang. *Sweep Frequency Response Analysis*) jest wykorzystywana do diagnostyki transformatorów energetycznych. Jej idea zasadza się na traktowaniu transformatora jako czwórnik, składający się z układu pewnej liczby elementów pasywnych: rezystorów, cewek i kondensatorów. Wartości impedancji tych elementów zależą od konstrukcji transformatora. Na wejście takiego układu podaje się i mierzy zmienny sygnał, o napięciu kilkunastu-kilkudziesięciu woltów i częstotliwości z zakresu od 20 Hz do 2 MHz [2], a następnie dokonuje się pomiaru napięcia na wejściu i wyjściu układu. Iloraz obu wartości napięcia (po zlogarytmowaniu) zwany jest funkcją przenoszenia:

$$(1) \quad FRA = 20 \cdot \log \frac{U_2}{U_1}$$

gdzie: FRA – amplituda funkcji przenoszenia [dB], U_1 – napięcie na wejściu układu [V], U_2 – napięcie na wyjściu układu [V].

SFRA należy do grupy metod porównawczych, a więc wyniki aktualnych pomiarów należy interpretować w odniesieniu do charakterystyk:

- tego samego transformatora, uzyskanych podczas pomiarów fabrycznych lub pomontażowych (charakterystyka wzorcowa, „odcisk palca”),
- uzyskanych podczas poprzednich pomiarów.

W przypadku braku charakterystyk wzorcowych i poprzednich analiza porównawcza może bazować na:

- posiadanych odpowiedziach częstotliwościowych pochodzących z transformatora bliźniaczego,
- porównaniu odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń położonych na obu skrajnych kolumnach rdzenia badanej jednostki.

Analiza porównawcza odpowiedzi częstotliwościowej transformatora umożliwia wykrywanie następujących defektów [3, 4]:

- zwarcie wewnątrz uzwojeń,
- deformacja uzwojeń (np. wyboczenie) lub ich przemieszczenie,
- zmniejszenie siły ściskającej uzwojenia,
- przerwy w uzwojeniu,
- uszkodzenie rdzenia.

Różne defekty objawiają się w charakterystycznych dla nich zakresach częstotliwości:

- problemy w rdzeniu – do ok. 2 kHz,
- przemieszczenie uzwojeń – od ok. 2 kHz do ok. 20 kHz,
- odkształcenie uzwojeń – od ok. 20 kHz do ok. 200 kHz,
- odkształcenie uzwojeń i przewodów łączących uzwojenia z przełącznikiem zaczeń oraz zmiany impedancji uziemiającej – od ok. 200 kHz.

Podane zakresy częstotliwości mogą się zmieniać w zależności od konstrukcji transformatora.

Najtrudniejszą i wciąż nierozwiązaną kwestią związaną z użyciem metody SFRA jest trudność interpretacji wyników przy analizie porównawczej. Zazwyczaj dokonuje tego człowiek, co wymaga ogromnego doświadczenia. Pojawiają się próby wykorzystywania do tego komputerów, jednak dotychczas nie wymyślono jeszcze skutecznego algorytmu, który umożliwiłby interpretowanie wyników pomiarów bez udziału człowieka [5, 6].

Pomiary odpowiedzi częstotliwościowej transformatora można wykonywać na cztery sposoby (konfiguracje pomiarowe) [7], pokazane na rysunku 2:

- Sposób A:** pomiar odpowiedzi danego uzwojenia przy rozwartych zaciskach pozostałych uzwojeń,
- Sposób B:** pomiar odpowiedzi danego uzwojenia przy zwartych zaciskach pozostałych uzwojeń,
- Sposób C:** pomiar pomiędzy początkami uzwojeń strony GN i DN tej samej fazy transformatora, przy rozwartych końcach badanych uzwojeń (pomiar międzyuzwojeniowy pojemnościowy),
- Sposób D:** pomiar pomiędzy początkami uzwojeń strony górnego napięcia (GN) i dolnego napięcia (DN) tej samej

fazy transformatora, przy uziemionych końcach badanych uzwojeń (pomiar międzyuzwojeniowy indukcyjny).

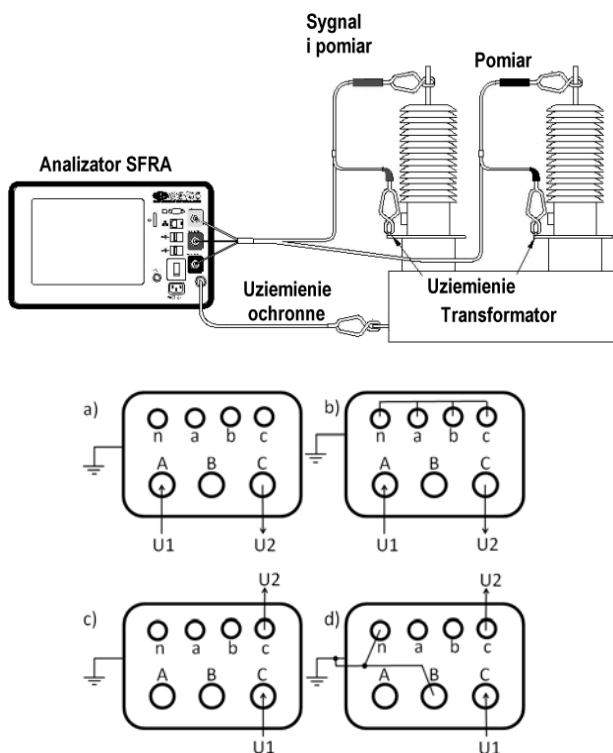
W praktyce, ze względu na narzucane przez właścicieli transformatorów ograniczenia co do czasu pomiarów, realizuje się je tylko dwoma pierwszymi sposobami.

Obiekt badań i sposób ich przeprowadzania

Obiektem badań była część aktywna transformatora energetycznego o mocy 630 kVA i grupie połączeń Dyn5 (rys.1). Zwieranie wybranych cewek transformatora uzyskiwano w wyniku przylutowania do nich krótkich linii miedzianych. Defekty były wykonywane na fazie L3 uzwojenia GN. Uzwojenie to składało się z 64 cewek, natomiast do badań zwierano, licząc od góry transformatora, od jednej do pięciu cewek, oznaczonych liczbowo: 1, 2, 3, 4 i 5.



Rys.1. Fotografia części aktywnej badanego transformatora



Rys.2. Sposób podłączenia przewodów pomiarowych i konfiguracje pomiarowe możliwe do zrealizowania podczas badań metodą SFRA; a – sposób A, b – sposób B, c – sposób C, d – sposób D

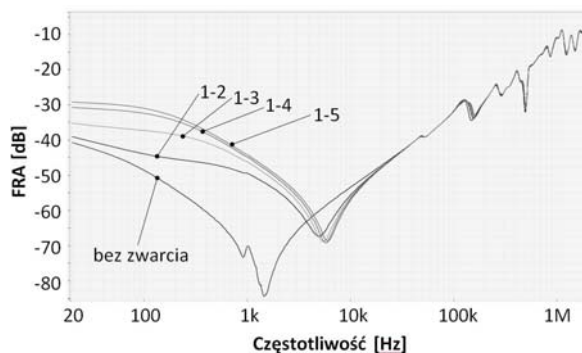
Celem eksperymentu było wyznaczenie najlepszej konfiguracji służącej do wykrywania zwarc zwojowych w transformatorach.

Realizowana procedura pomiarowa niezależna od ułożenia przewodów pomiarowych. W pierwszej kolejności wykonywany był pomiar odniesienia (bez zwarcia zwojowego) dla każdego z czterech sposobów

pomiaru. Następnie, bez poruszenia przewodów pomiarowych, zwierano kolejne cewki i powtarzano pomiar.

Wyniki pomiarów i ich analiza

Rysunek 3 przedstawia wyniki pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej fazy L3 GN, dokonanych zgodnie ze sposobem A. Przewód sygnałowy analizatora był podłączony do przepustu fazy L1 GN, natomiast pomiarowy do przepustu fazy L3 GN. Pokazane charakterystyki dotyczą sytuacji bez zwarcia (charakterystyka odniesienia) oraz dla zwartych cewek 1-2, 1-3, 1-4 i 1-5.



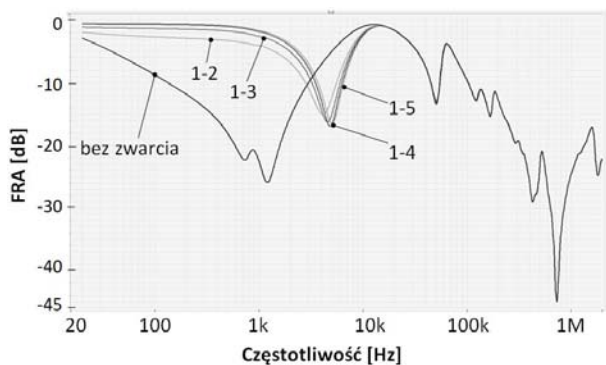
Rys.3. Odpowiedzi częstotliwościowe uzwojenia GN fazy L3 badanego transformatora przy rozwartych zaciskach uzwojenia DN dla różnej liczby zwartych cewek; sposób pomiaru A

Charakterystyka odniesienia cechuje się obecnością dwóch rezonansów: dla częstotliwości około 0,9 kHz oraz około 1,5 kHz. Na rysunku można zauważyć, że odpowiedź częstotliwościowa transformatora ze zwartą nawet małą liczbą cewek wyraźnie odbiega od charakterystyki odniesienia. Wszystkie charakterystyki ze zwartymi cewkami cechują się zmniejszeniem liczby rezonansów z dwóch do jednego, oraz przesunięciem tego rezonansu z częstotliwości około 1,5 kHz do około 6 kHz. Największa różnica między odpowiedzią częstotliwościową dla wszystkich przypadków zwarcia cewek osiąga 11 dB dla najniższej częstotliwości pomiarowej. Dla wyższych wartości częstotliwości różnice między odpowiedziami częstotliwościowymi są również zauważalne, choć dużo mniejsze.

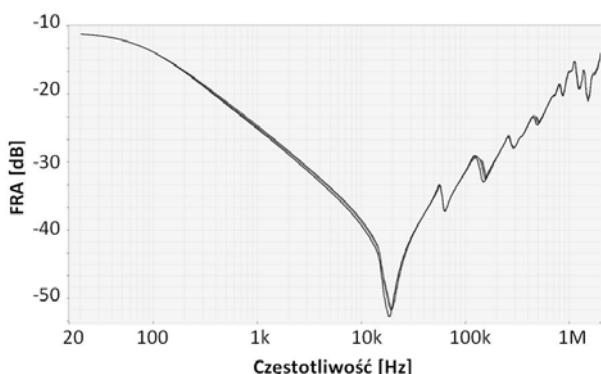
Zarejestrowane charakterystyki pozwalają nie tylko stwierdzić obecność zwarcia między cewkami ale wydaje się, że nawet ocenić jego zakres.

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki takich samych pomiarów (Sposób A) jak opisano wcześniej ale dla uzwojenia DN. W tym przypadku przewód sygnałowy analizatora był podłączony do przepustu fazy L3 DN, natomiast pomiarowy do punktu gwiazdowego DN. Wnioski płynące z ich analizy są podobne do wyciągniętych na podstawie badań uzwojenia GN. Obecność zwarcia zwojowego spowodowała duże zmiany charakterystyk, szczególnie w zakresie niskiej częstotliwości. Ponadto, największa różnica tłumienności między wszystkimi charakterystykami zdjętymi dla zwartych cewek osiągnęła ponad dwukrotnie większą wartość, niż dla uzwojeń GN, bo -24 dB.

Sposób B pomiaru odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia GN, realizowany przy zwartych zaciskach uzwojenia DN (rys.5), nie nadaje się do wykrywania zwarc zwojowych w transformatorze. Różnice między odpowiedzią częstotliwościową transformatora bez zwarcia i ze zwartymi cewkami (od 1-2 do 1-5) są na tyle małe, że powiązanie ich z obecnością analizowanego defektu izolacji byłoby obarczone wysokim ryzykiem pomyłki.



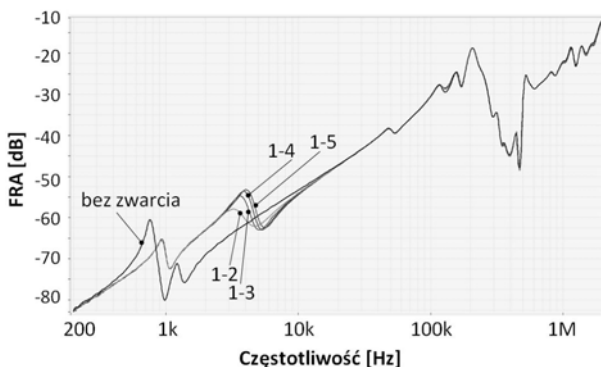
Rys.4. Odpowiedzi częstotliwościowe uzwojenia DN fazy L3 badanego transformatora przy rozwartych zaciskach uzwojenia GN dla różnej liczby zwartych cewek; sposób pomiaru A



Rys.5. Odpowiedzi częstotliwościowe uzwojenia GN fazy L3 badanego transformatora przy zwartych zaciskach uzwojenia DN dla różnej liczby zwartych cewek; sposób pomiaru B

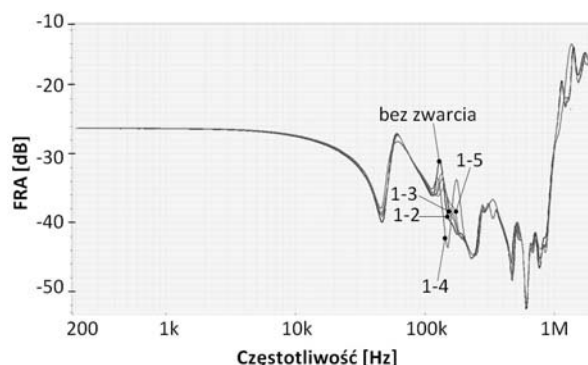
W dalszej kolejności zbadano również rzadziej wykorzystywane w praktyce pomiarowej sposoby pomiarów, to jest pomiar międzyuzwojeniowy pojemnościowy (sposób C) oraz międzyuzwojeniowy indukcyjny (sposób D).

Zwarcie zwojowe w układzie międzyuzwojeniowym pojemnościowym (rys.6) objawiło się znaczną zmianą odpowiedzi częstotliwościowej w zakresie niskiej częstotliwości oraz pojawieniem dodatkowego rezonansu przy częstotliwości około 3 kHz, przesuwanego się wraz ze wzrostem liczby zwartych cewek w kierunku wysokiej częstotliwości. Natomiast od częstotliwości 20 kHz odpowiedź częstotliwościowa zwartych cewek transformatora jest taka sama – niezależnie od zakresu tego zwarcia.



Rys.6. Odpowiedzi częstotliwościowe fazy L3 badanego transformatora mierzonego w układzie pojemnościowym dla różnej liczby zwartych cewek; sposób pomiaru C

Wyniki pomiarów w układzie międzyuzwojeniowym indukcyjnym (rys.7) wskazują na stosunkowo niewielkie zmiany odpowiedzi częstotliwościowej w zależności od liczby zwartych cewek, głównie w zakresie średniej i wysokiej częstotliwości. Ponadto, nie da się zauważyć jednoznacznej tendencji zmian w charakterystykach, która pozwalałaby szacować liczbę zwartych cewek.



Rys.7. Odpowiedzi częstotliwościowe fazy L3 badanego transformatora mierzonego w układzie indukcyjnym dla różnej liczby zwartych cewek; sposób pomiaru D

Do celów interpretacji wyników pomiarów, dla każdej zrealizowanej konfiguracji pomiarowej obliczono, dla sytuacji bez zwarcia oraz ze zwartymi cewkami 1-2, największą różnicę między odpowiedziami częstotliwościowymi transformatora oraz współczynnik korelacji CC:

$$(2) \quad CC = \frac{\sum_i X(i) \cdot Y(i)}{\sqrt{\sum_i [X(i)]^2 \cdot \sum_i [Y(i)]^2}}$$

gdzie: X – wartość funkcji przenoszenia charakterystyki wzorcowej, Y – wartość funkcji przenoszenia charakterystyki z defektem, i – częstotliwość.

Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1. Z danych w tabeli wynika, że największe różnice między odpowiedziami częstotliwościowymi transformatora bez zwarcia zwojowego i ze zwartymi cewkami 1-2 uzwojenia GN fazy L3, wystąpiły dla sposobu A przeprowadzania pomiarów.

Tabela 1. Wartości współczynnika korelacji i największej różnicy między odpowiedzią częstotliwościową transformatora bez zwarcia oraz ze zwartymi cewkami 1-2

	Oznaczenia zacisków, do których podłączono przewody pomiarowe				
	A-C	c-n	A-C (zwarcie)	C-c (poj.)	C-c (ind.)
Sposób pomiaru	A	A	B	C	D
Maksymalna różnica między FRA bez zwarcia i ze zwartymi cewkami 1-2 [dB]	33,1	21,5	3,1	13,6	2,8
Współczynnik korelacji między FRA bez zwarcia i ze zwartymi cewkami 1-2 CC [-]	0,9864	0,8732	0,9999	0,9985	0,9999

A – faza L1 GN, C – faza L3 GN, a – faza L1 DN, c – faza L3 DN, n – punkt gwiazdowy DN

Podsumowanie

W artykule porównano wyniki badań odpowiedzi częstotliwościowej transformatora bez zwarcia oraz ze zwartymi wybranymi cewkami uzwojenia GN. Zwierano od jednej do pięciu pierwszych cewek uzwojenia fazy L3. Celem badań było wybranie jednego z czterech sposobów wykonywania pomiarów, najlepszego do wykrywania zwarc zwojowych.

Pojawienie się zwarcia zwojowego w transformatorze objawia się istotnymi zmianami w kształcie jego odpowiedzi częstotliwościowej. Największe zmiany pojawiają się w zakresie niskiej częstotliwości. W zakresie wyższej częstotliwości również można zaobserwować zmiany w kształcie charakterystyk, ale są one na tyle małe, że trudno je interpretować jednoznacznie jako dowód na obecność analizowanego defektu.

Z wykonanych badań wynika, że najskuteczniejszą konfiguracją pomiarową jest pomiar badanego uzwojenia przy rozwartych zaciskach liniowych pozostałych uzwojeń (sposób A). Zakres diagnostyczny częstotliwości, w którym szczególnie wyraźnie manifestuje się obecność zwarcia zwojowego w transformatorze, to od 20 Hz do 3 kHz. W tym zakresie analizowany defekt objawia się znacznym przesunięciem odpowiedzi częstotliwościowej w kierunku niższej tłumienności – nawet o kilkadziesiąt dB. Ponadto, z analizy zarejestrowanych charakterystyk wynika, że dodatkowo możliwa jest ocena rozległości zwarcia.

W praktyce pomiarowej może się zdarzyć, że badania SFRA transformatora mogą być wykonane bez wcześniejszej demagnetyzacji rdzenia. Na problem ten należy zwrócić szczególną uwagę, gdyż namagnesowanie rdzenia przesunęło pierwsze rezonanse odpowiedzi częstotliwościowej w zakresie niskiej częstotliwości [8], przez co zaproponowane tutaj kryterium różnicowe może być nieskuteczne albo nawet podawać fałszywą diagnozę co do stanu jednostki. Co prawda wpływ namagnesowania rdzenia transformatora na jego odpowiedź częstotliwościową jest dość dobrze poznany i może być stosunkowo łatwo wykryty ale w tej sytuacji może być nieodzowne duże doświadczenie pomiarowców w interpretowaniu takich wyników badań.

Autorzy: mgr inż. Kamil Lewandowski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: kamil.wo.lewandowski@doctorate.put.poznan.pl; dr hab. inż. Hubert Morańda, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: hubert.moranda@put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] Wang M., Vandermaar A. J., Srivastava K. D., Review of condition assessment of power transformers in service, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 18, Issue 6, November-December 2002, 12-25
- [2] Norma PN-EN 60076-18:2013-05. Pomiar odpowiedzi częstotliwościowej
- [3] Banaszak S., Ocena stanu mechanicznego części aktywnej transformatorów metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej, Rozprawa habilitacyjna, Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, Szczecin, 2016
- [4] Pumomoadi A. P., Fransisco D., Modeling and diagnostic transformer condition using sweep frequency response analysis, *Materials of IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, 19-23 July 2009, Harbin, China
- [5] Bagheri M., Naderi M. S., Blackburn T., Phung T., Frequency response analysis and short-circuit impedance measurement in detection of winding deformation within power transformers, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 29, Issue 3, May-June 2013, 33-40
- [6] Kennedy G. M., McGrail A. J., Lapworth J. A., Using cross-correlation coefficients to analyze transformer sweep frequency response analysis (SFRA) traces, *Materials of 2007 IEEE Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa – PowerAfrica*, Johannesburg, South Africa
- [7] Lewandowski K., Zasady poprawnego wykonywania pomiarów transformatorów energetycznych przy użyciu metody SFRA, *Poznań University of Technology Academic Journals*, 2018
- [8] Abeywickrama N., Serdyuk Y. V., Gubanski S. M., Effect of core magnetization on frequency response analysis (FRA) of power transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 23, Issue 3, July 2008, 1432-1438