

Szymon BANASZAK

POLITECHNIKA SZCZECIŃSKA, INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI

Praktyczne aspekty diagnostyki odkształceń uzwojeń transformatorów metodą analizy ich odpowiedzi częstotliwościowej (FRA)

Dr inż. Szymon BANASZAK

Adiunkt na Wydziale Elektrycznym w Instytucie Elektrotechniki, pracownik Zakładu Wysokich Napięć i Elektrotechnologii. Autor ponad 30 publikacji z tematyki izolacji elektrycznej oraz diagnostyki transformatorów.



e-mail: szymon.banaszak@ps.pl

Streszczenie

Średni wiek transformatorów eksploatowanych w Polsce ustawicznie się wydłuża. Obecnie ponad połowa ich populacji pracuje jest ponad 25 lat. Dlatego ważnym zagadnieniem jest znajomość ich stanu technicznego. Wśród wielu metod diagnozowania stanu technicznego transformatorów coraz większą popularność zdobywa analiza odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora (Frequency Response Analysis – FRA). Służy ona do diagnozowania stanu mechanicznego uzwojeń – ich odkształceń osiowych i promieniowych, jak i zwarć między zwojami. W artykule przedstawiono podstawowe informacje na temat tej metody i omówiono wpływ różnych czynników na rejestrowane przebiegi, takich jak konfiguracja przewodów pomiarowych, sposobów ich podłączenia i rodzaj wybranego systemu diagnostycznego. Zaproponowano poprawkę unifikującą rejestrację systemów o różnych impedancjach kabli. Omówiono także wpływ innych czynników na rejestrację FRA i ich poprawną interpretację.

Słowa kluczowe: transformator, odkształcenie uzwojenia, odpowiedź częstotliwościowa, FRA.

Practical issues of transformer windings mechanical condition diagnostics by means of frequency response analysis (FRA)

Abstract

The average age of transformers operated in Poland is constantly increasing. At present over half of them is operated over 25 years. Therefore it is very important to recognize their technical condition. One of transformers' diagnostic methods is Frequency Response Analysis – FRA. It is used for diagnostics of windings' mechanical condition – their axial and radial deformations and local short-circuits. The paper presents basic information on this method and influence of various factors on measured curves, such as: configuration and arrangement of measuring cables or type of measuring device. The correction coefficient has been suggested to unify results measured by devices with different impedances of measuring cables. The influence of other factors on FRA measurements and their correct interpretation has also been given.

Keywords: transformer, winding deformation, frequency response, FRA.

1. Wprowadzenie

Jednym z zagrożeń dla bezawaryjnej pracy transformatorów jest odkształcenie mechaniczne ich uzwojeń. Uszkodzenia te powstają w wyniku sił elektrodynamicznych występujących przy zwarciach, przepięciach, a także w czasie transportu jednostek. Odkształcone uzwojenie transformatora nie musi od razu powodować awarii katastrofalnej; transformator może pracować jeszcze przez dłuższy okres, np. do kolejnego przepięcia, które przebijie nadwyróżoną izolację i doprowadzi do awarii jednostki. Odpowiednio wczesne wykrycie usterek mechanicznych uzwojeń umożliwia zaplanowanie i przeprowadzenie remontu, którego koszt jest wielokrotnie mniejszy od kosztów związanych z wystąpieniem awarii i usuwaniem jej skutków. Problem ten dotyczy przede

wszystkim jednostek eksploatowanych powyżej 20 lat, w których podczas rewizji wewnętrznej często obserwuje się wypadnięcie wstawek dystansowych, klinów i śrub mocujących. Obecnie ponad 50% populacji eksploatowanych w Polsce transformatorów pracuje ponad 25 lat. Zarządzanie majątkiem sieciowym w warunkach wolnorynkowych dąży do minimalizacji nakładów inwestycyjnych, a co za tym idzie m.in. do dalszego przedłużenia czasu eksploatacji transformatorów. Wiele z tych jednostek mogłoby, po wykonaniu odpowiednich remontów, pracować przez kolejne lata nie stanowiąc słabego ognia w systemie. Dlatego ważnym zagadnieniem jest znajomość ich stanu technicznego, m.in. stanu mechanicznego części aktywnej. Problem deformacji konstrukcji uzwojeń występuje także podczas transportu na miejsce zainstalowania nawet nowych jednostek. Ich duża masa powoduje, że podczas przewożenia mogą powstać siły dynamiczne, które przekraczają wytrzymałość konstrukcji.

Do wykrywania odkształceń uzwojeń transformatorów stosuje się metodę FRA (Frequency Response Analysis). Metoda ta oparta jest na związku pomiędzy funkcją przenoszenia a konstrukcją uzwojenia. Jeśli geometria uzwojenia ulegnie zmianie, np. na skutek przemieszczenia pojedynczego zwoju, cewki bądź większego fragmentu uzwojenia, to zmieniają się wartości pojemności i indukcyjności cewek, tym samym zmienia się charakterystyka FRA. Na obecnym etapie zaawansowania metody (prace grupy roboczej A2 WG26, CIGRE) dokonano jedynie jej standaryzacji i zidentyfikowano warunki procedury pomiarowej, które pozwalają na zadowalającą powtarzalność. Opracowano również zasady kompatybilności pomiarów wykonywanych miernikami różnego typu. Zunifikowanie zasad wykonywania pomiarów i poznanie specyfiki poszczególnych przyrządów i układów pomiarowych umożliwi poprawną interpretację wyników [1]. Jest to o tyle istotne, że często różnice w przebiegach dla uzwojenia sprawnego i uszkodzonego są niewielkie, tak więc poznanie poszczególnych charakterystycznych zakresów częstotliwości odpowiedzialnych za odkształcenia oraz określenie rodzaju zmian przy poprawnych pomiarach umożliwi wdrożenie metody FRA jako precyzyjnego narzędzia diagnostycznego.

2. Porównanie systemów pomiarowych

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów wykonane trzema systemami pomiarowymi FRA, wszystkimi jakie produkowane są w Europie. Są to następujące urządzenia: Traftek (prod. B&C Diagnostics, Węgry), FRAnalyzer (prod. Omicron, Austria), FRA 5310 (prod. Tettex, Szwajcaria). Do liczących się na świecie mierników zaliczyć można jeszcze miernik amerykańskiej firmy Doble.

Ponieważ mierniki różnych producentów charakteryzują różnymi parametrami, w tabeli poniżej zestawiono ich najważniejsze cechy, a testowane systemy przedstawiono na rysunku 1.

Tab. 1. Zestawienie najważniejszych parametrów rejestratorów FRA testowanych w artykule

Tab. 1. Basic parameters of FRA devices tested in this paper

Rejestrator	Napięcie pomiarowe	Impedancja kabla pomiarowego	Kable pomiarowe
Traftek (B&C Diagnostics)	2,83 V	75 Ω	standardowe (pomiar w mierniku)
FRAnalyzer (Omicron)	5 V	50 Ω	standardowe (pomiar w mierniku)
FRA 5310 (Tettex)	1-12 V	50 Ω/ 1 MΩ	z sondami pomiarowymi (pomiar w sondach)

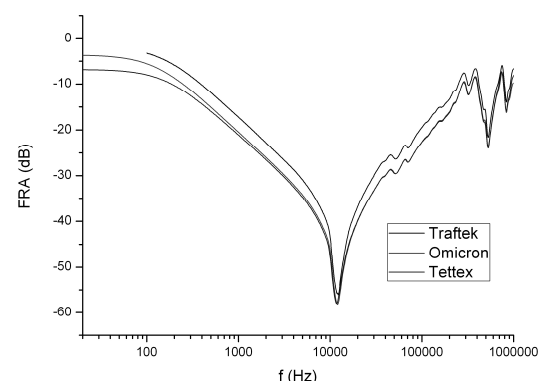
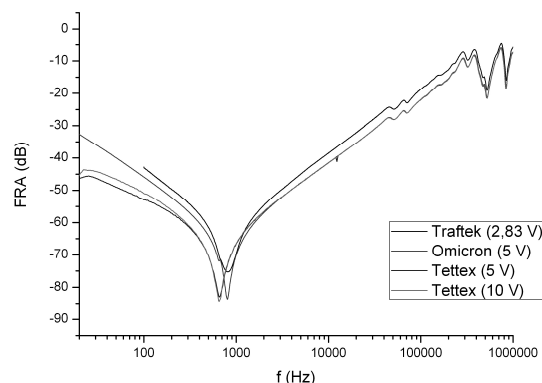


Rys. 1. Rejestratory FRA: a) Traftek, b) FRAnalyzer, c) FRA 5310
Fig. 1. FRA devices: a) Traftek, b) FRAnalyzer, c) FRA 5310

Porównanie przedstawionych powyżej systemów pomiarowych wykonano poprzez zarejestrowanie przebiegów FRA na tym samym obiekcie, w tych samych konfiguracjach pomiarowych. Był nim transformator 1000 kVA, 15/0,4 kV. Dodatkowo rejestratory Traftek i FRAnalyzer przetestowano na transformatorze blokowym 250kV/ 15,75kV, 270 MVA, dla którego otrzymano wnioski zgodne z pomiarami na mniejszej jednostce, dlatego też w artykule nie przedstawiono pomiarów z transformatora blokowego.

Na rysunku 2 przedstawiono zarejestrowane przebiegi FRA dla uzwojenia napięcia górnego, przy uzwojeniu napięcia dolnego rozwartym oraz zwartym i uziemionym.

Na obecnym etapie rozwoju metody FRA ocena przebiegów polega głównie na ich wizualnym porównywaniu, na wykresach możemy więc zaobserwować pewne różnice dla rejestracji wykonanych różnymi przyrządami. Pierwszą z nich jest przesunięcie przebiegów zmierzonych miernikiem Traftek w górę (kolor czarny). Przesunięcie to, czyli zmiana tłumienia, wynika z zastosowania w tym rejestratorze kabla o impedancji 75 Ω, podczas gdy w pozostałych urządzeniach impedancja ta wynosiła 50 Ω.



Rys. 2. Rejestracje FRA wykonane trzema miernikami dla uzwojenia napięcia górnego przy uzwojeniu napięcia dolnego rozwartym (po lewej) oraz zwartym i uziemionym (po prawej)

Fig. 2. FRA curves measured with three devices for HV winding with LV winding open (on the left) and short-circuited and grounded (on the right)

Tłumienie w pomiarach FRA definiuje się jako:

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

Po przekształceniu iloraz napięć na końcu i początku uzwojenia można zapisać w postaci:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{J \cdot Z_{kabela}}{U_1} = \frac{U_1}{Z_{kabela} + Z_{obiekty}} \cdot Z_{kabela} = \frac{Z_{kabela}}{Z_{kabela} + Z_{obiekty}}. \quad (2)$$

Wprowadzając poprawkę na wartość tłumienia spowodowaną różną impedancją kabla pomiarowego:

$$\Delta FRA = 20 \log X, \quad (3)$$

można zapisać, że dla systemów pomiarowych o różnych impedancjach kabli:

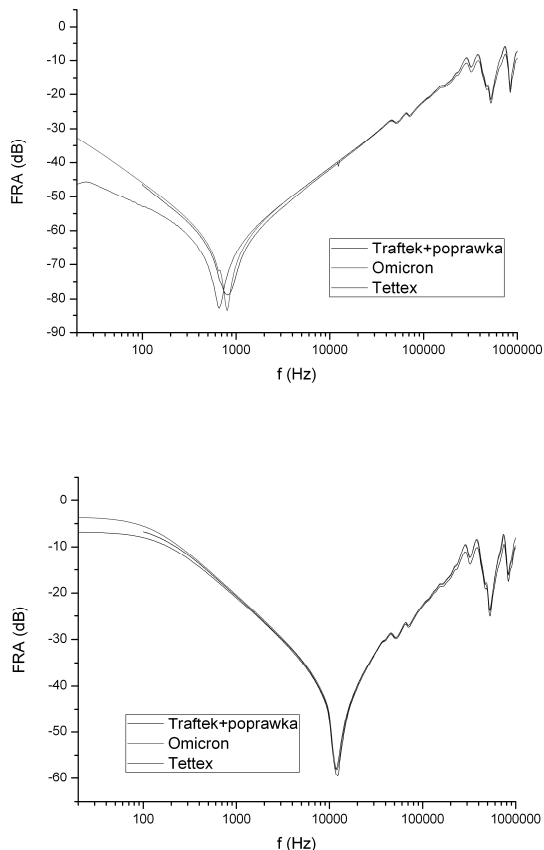
$$20 \log \frac{Z_{kabela1}}{Z_{kabela1} + Z_{obiekty}} = 20 \log \frac{Z_{kabela2}}{Z_{kabela2} + Z_{obiekty}} + 20 \log X, \quad (4)$$

$$X = \frac{Z_{kabela1}}{Z_{kabela1} + Z_{obiekty}} \cdot \frac{Z_{kabela2} + Z_{obiekty}}{Z_{kabela2}} = \frac{Z_{kabela1}}{Z_{kabela2}} \cdot \frac{Z_{kabela2} + Z_{obiekty}}{Z_{kabela1} + Z_{obiekty}}. \quad (5)$$

Uwzględniając, że impedancja kabli pomiarowych jest wielokrotnie mniejsza niż impedancja obiektu, otrzymujemy wartość poprawki:

$$\Delta FRA = 20 \log \frac{Z_{kabela1}}{Z_{kabela2}} \approx 3,52 \text{ dB} . \quad (6)$$

Po uwzględnieniu poprawki korelacja przebiegów ulega poprawie (rys. 3).



Rys. 3. Rejestracje FRA z Rys.2 po uwzględnieniu poprawki dla miernika Traftek
Fig. 3. FRA curves from Fig. 2 with correction coefficient for Traftek

Różnice dla miernika Traftek występują tylko wokół wierzchołków krzywej odpowiedzi częstotliwościowej, gdzie niektóre rezonanse odpowiedzi częstotliwościowej mają większe tłumienie jeśli impedancja kabla jest większa, a wtedy wierzchołki rejestrowanej charakterystyki ulegają spłaszczeniu. Pamiętając o tym można stosować powyższą poprawkę do porównywania krzywych mierzonych różnymi miernikami.

Drugą widoczną różnicą w przebiegach rejestrowanych trzema testowanymi przyrządami jest przesunięcie rezonansów w zakresie małych częstotliwości dla miernika Tettex. Różnica ta jest widoczna tylko dla pomiarów przy otwartym uzwojeniu wtórnym, gdy pojawiają się rezonanse dla części charakterystyki FRA odpowiadającej za obwód magnetyczny (do 1 kHz). Najprawdopodobniej przesunięcie to wynika ze specyfiki pomiaru miernikiem Tettex. W przeciwieństwie do pozostałych systemów, gdzie pomiar wykonywany jest w przyrządach poprzez długie kable pomiarowe, w aparacie Tettex pomiar następuje w sondach na końcu kabli pomiarowych i dalej przesyłany jest do urządzenia w postaci cyfrowej. Tym samym pojawia się różnica we wpływie pojemności kabla pomiarowego na rejestrację FRA.

Uwzględnienie powyższych różnic w działaniu rejestratorów w interpretacji wyników umożliwi jej poprawne przeprowadzenie. Rejestracje FRA transformatorów wykonywane są okresowo. Wykonanie ich różnymi miernikami i nie uwzględnienie tego

faktu w analizie wyników może prowadzić do błędów. Dlatego przy każdej rejestracji FRA powinno zaznaczać się nie tylko układ pomiarowy lecz także model i typ miernika oraz jego cechy. Umożliwi to w przyszłości prawidłowe wykorzystanie danych pomiarowych.

3. Inne czynniki wpływające na pomiary FRA

Korzystając z możliwości regulacji napięcia pomiarowego w mierniku FRA 5310 sprawdzono wpływ jego wartości na rejestrowane przebiegi. Okazało się, że wpływ ten jest znikomy i przejawia się w nielicznych przypadkach minimalną zmianą tłumienia rezonansów. Po uwzględnieniu faktu, że różnice dla pomiarów przy różnych napięciach są zdecydowanie mniejsze niż różnice wynikające z przeprowadzania rejestracji różnymi przyrządami, wpływ napięcia pomiarowego można pominąć.

Na rejestracje FRA ma także wpływ poprawne podłączenie mierników. Przykładowo odwrócenie zacisków przyrządu pomiarowego (napięciowego i pomiarowego) podłączonych do badanego obiektu może prowadzić do błędów w pomiarach, zwłaszcza przypadku występowania niesymetrycznych uszkodzeń. Kolejnym problemem jest fakt uziemiania zwartego uzwojenia. W niektórych przypadkach uziemienie lub nie np. zwieranego uzwojenia wtórnego może mieć wpływ na rejestrację FRA dla uzwojenia pierwotnego. Bardzo ważny jest również sposób uziemienia ekranów przewodów i ich połączenie z kadzią transformatora. Na poprawność tego uziemienia wpływać może sposób zamocowania przewodów uziemiających, ich odpowiednie naciągnięcie, czyli długość, lecz także kształt przekroju i materiał z jakiego są wykonane [2, 3]. Pamiętać należy także o wpływie pozycji przełącznika zaczerpów i dokonywać porównań dla tych samych ustawień.

4. Podsumowanie

Metoda diagnostyki odkształceń uzwojeń transformatorów oparta na analizie ich odpowiedzi częstotliwościowej odgrywa znaczącą rolę w kompleksowej ocenie stanu technicznego jednostek, zwłaszcza dużych mocy. Oparta jest na analizie porównawczej przebiegów, najczęściej wykonywanych w odstępie czasu lub pomiędzy fazami tej samej jednostki. Przedstawione w artykule wyniki pomiarów dla trzech systemów diagnostycznych, Traftek, FRAnalyzer oraz FRA 5310, wskazują na możliwość ich równoległego stosowania, po uwzględnieniu odpowiednich poprawek i różnic wynikających ze specyfiki urządzeń. Pamiętać należy także o odpowiedniej unifikacji wykonywania pomiarów na transformatorach, by ich późniejsza interpretacja była jednoznaczna.

5. Literatura

- [1] Jayasinghe J.A.S.B, Wang Z.D., Darwin A.W., Jarman P.N.: Practical Issues in Making FRA Measurements on Power Transformers, XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, China, August 2005, G-013
- [2] Akbari A., Firoozi H., Karezi M.: Investigations on Sensitivity of Frequency Response Analysis Technique to Measuring Setup, Proceedings of XVth International Symposium on High Voltage Engineering, ISH-2007, Slovenia, 21-31.08.2007.
- [3] Tenbohlen S., Wimmer R., Feser K., Kraetge A, Krueger M., Christian J.: The influence of Connection and Grounding Technique on the Repeability of FRA-results, Proceedings of XVth International Symposium on High Voltage Engineering, ISH-2007, Slovenia, 21-31.08.2007.