



Janusz SZCZECHOWSKI, Hosein BORSI, Ernst GOCKENBACH

Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik, Fachgebiet Hochspannungstechnik, Schering-Institut, Universität Hannover

Powtarzalność pomiarów analizy odpowiedzi częstotliwościowej transformatorów

Streszczenie. Transformatory spełniają ważną rolę w systemie przesyłu i dystrybucji energii. Podczas transportu lub awarii może dojść do deformacji, przesunięć lub zwarcia uzwojenia. Analiza odpowiedzi częstotliwościowej (FRA) jest jedną z popularnych metod diagnostycznych pozwalających uzyskać informacje o tego typu uszkodzeniach. Istnieje wiele możliwości przeprowadzenia pomiarów FRA. Dokładność i czułość uzależniona jest od zastosowanego systemu, połączeń kabli pomiarowych, rodzaju uziemienia, urządzenia pomiarowego oraz wybranej metody.

Abstract. (Repeatability of frequency response analysis measurements of transformers). Transformers have an exposed importance in the power transmission and distribution system. During transportation or short circuit a deformation or displacement of the coil can occur. The frequency response analysis (FRA) technique is one of the most popular measurement methods which can give information about failure. There are many methods commonly used to carry out the FRA measurements. The accuracy depends on the used connection technique, earthing system and measuring devices.

Słowa kluczowe: transformator, FRA

Keywords: transformer, FRA

Wstęp

Deformacje uzwojenia powstają na skutek uszkodzeń mechanicznych jak i elektrycznych. Jedną z głównych przyczyn są wibracje podczas transportu, utrata mechanicznego sprężenia oraz siły powstające podczas zwarcia [1]. Deformacje prowadzą do uszkodzenia transformatora, co pociąga za sobą koszty ekonomiczne i może grozić skażeniem środowiska. Odształcenia geometryczne wzmocniają zmianę indukcyjności i pojemności uzwojenia. Te zmiany mogą być natomiast wykrywane za pośrednictwem analizy odpowiedzi częstotliwościowej (FRA).

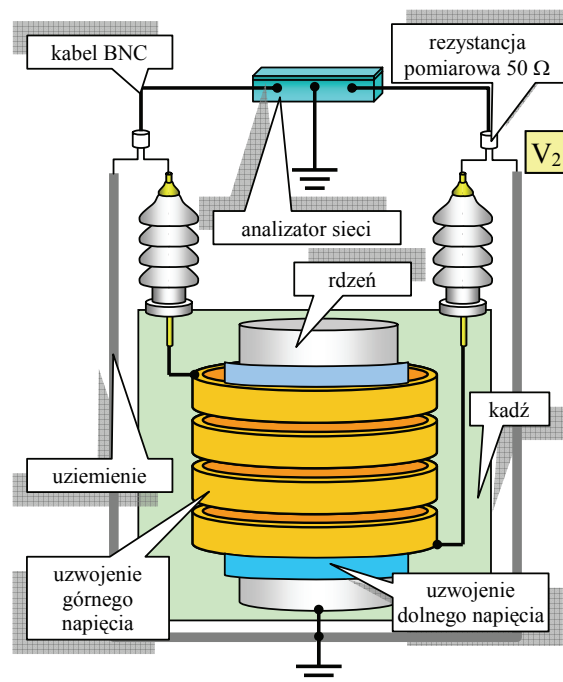
W poniższym artykule opisano pewne pomiary doświadczalne przeprowadzone w laboratorium oraz przedstawiono propozycje nowego sposobu połączenia układu pomiarowego.

Metody pomiarowe FRA

Uzwojenie transformatora odpowiada pasywnemu, liniowemu czwórnikowi, w którym układ tworzą indukcyjności oraz szeregowo i równoległe pojemności uzwojenia. Charakter układu można opisać za pomocą jego funkcji przejścia. Deformacje uzwojenia zmieniają jego pojemności i indukcyjności a co za tym idzie jego funkcję przejścia. Wyróżniamy trzy podstawowe sposoby realizacji FRA powszechnie stosowane w przemyśle [2]: pomiar stosunków napięć wyjścia do wejścia dla jednego uzwojenia i całego transformatora oraz pomiar admitancji wejściowej. W celu wyznaczenia charakterystyki częstotliwościowej stosować można analizę odpowiedzi układu na sygnał impulsowy (IFRA) w dziedzinie czasu lub sinusoidalny modulowany częstotliwościowo (SFRA) w dziedzinie częstotliwościowej.

Badane obiekty i urządzenia pomiarowe

Jako obiektu badanego użyto trójfazowego transformatora rozdzielczego (10 kV/380 V, 100 kVA) połączonego w trójkąt. W skład urządzeń pomiarowych wchodzi komputer z interfejsem USB, analizator sieci, koncentryczne kable pomiarowe 50 Ω oraz uziemienie w postaci taśm miedzianych o małej indukcyjności. Układ pomiarowy przedstawiony jest na rysunku 1.



Rys.1. Układ pomiarowy

Jako zakres pomiarowy wybrano przedział częstotliwości od 10 Hz do 5 MHz z rozdzielczością 1601 punktów. Pomiarów dokonano w skali liniowej i logarytmicznej. Charakter transformatora można opisać za pośrednictwem poniższej zależności.

$$(1) \quad FRA_{ete} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_2(f)}{V_1(f)} \right) \text{ dB}$$

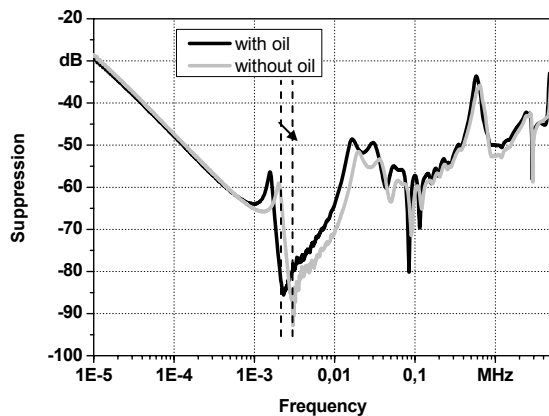
gdzie $V_2(f)$ i $V_1(f)$ są sygnałami napięciowymi zmierzonymi na wyjściu i wejściu uzwojenia w dziedzinie częstotliwości.

Pierwszego pomiaru FRA dokonano w punkcie zainstalowania badanego transformatora, oznaczonego jako 1, i w dalszej części traktowano jako pomiar

referencyjny. Następnie transformator został przemieszczony w inne miejsce, oznaczone 2. Po pewnym okrasie czasu dokonano powtórnego pomiaru tym razem bez oleju w kadzi transformatora. Trzeci pomiar nastąpił po powtórny wypełnieniu olejem. Wyniki przedstawione są w postaci wykresów tłumienia w dziedzinie częstotliwości oraz obliczeń współczynnika korelacji (CC). Użycie współczynników statystycznych uzupełnia ocenę wyników badań i wpływa na ich obiektywizm. Współczynnik korelacji określa podobieństwo dwóch przebiegów bez względu na ich amplitudę dając w wyniku 1, gdy są one identyczne i 0 gdy nie. Dlatego zastosowano również porównanie amplitudy sygnałów (AC).

Wyniki pomiarów – powtarzalność FRA

Dla niskich częstotliwości wpływ pojemności jest pomijalny. W rejonie powyżej 1 kHz tłumienie sygnałów, przechodzących przez uzwojenie, zdeterminowane jest przez pojemnościowy i indukcyjny charakter sieci. Powyżej 100 kHz sygnały przenoszone są głównie poza uzwojeniem z odbiciami na innych elementach transformatora. [3]. Na rysunku 2 przedstawiono porównanie pomiarów FRA dla uzwojenia UV transformatora wypełnionego olejem i bez oleju.



Rys.2. Porównanie FRA dla fazy UV (skala logarytmiczna)

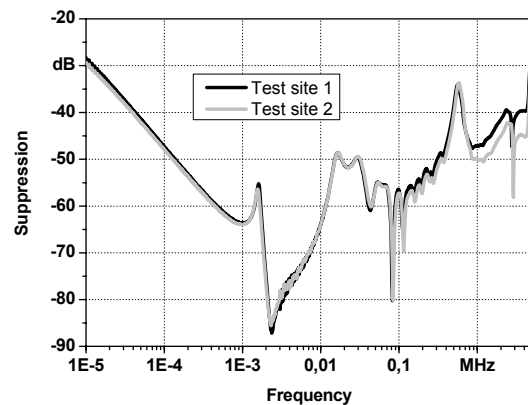
W transformatorze bez oleju ulega zmianie większość pojemności. Zaobserwowana różnica polega na przesunięciu punktów maksymalnych i minimalnych częstotliwości (1 kHz -100 kHz) bez znaczącej różnicy w amplitudzie (5,49 dB), brak też generacji nowych częstotliwości rezonansowych. Kalkulację współczynników statystycznych dla powyższego pomiaru przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Współczynniki statystyczne (dla pomiarów z i bez oleju)

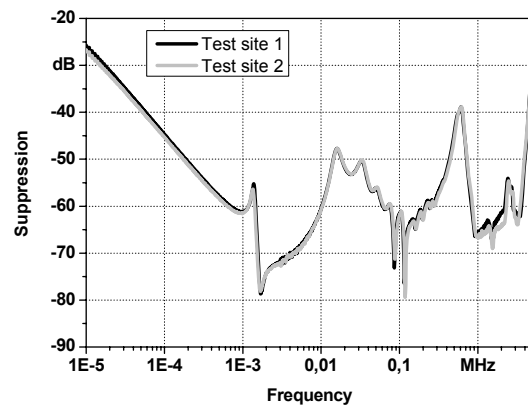
zakres częstotliwości	skala logarytmiczna		skala liniowa	
	CC	AC / dB	CC	AC / dB
10 Hz – 1 kHz	1,0000	0,53		
1 kHz – 100 kHz	0,9971	5,49	0,9957	4,96
100 kHz – 1 MHz	0,9992	1,96	0,9989	2,23
1 MHz – 5 MHz	0,9993	1,66	0,9990	1,92

Powtarzalność pomiarów FRA dla dwóch faz UV i WU przedstawiono na rysunku 3 – 5. Wyniki nie różnią się od siebie w znaczący sposób w zakresie do 2 MHz, natomiast dla fazy UV różnice występują już przy 1 MHz. Ten rodzaj rozbieżności może być spowodowana zarówno przez obecność osoby dokonującej pomiaru lub zewnętrzne zakłócenia, które wpływają na pojemności przestrzenne obiektu badanego [4]. W trakcie eksperymentów wystąpiło podejrzenie, że mogła zajść zmiana w stopniu zawilgocenia izolacji, co uniemożliwiałoby dokonanie obiektywnego

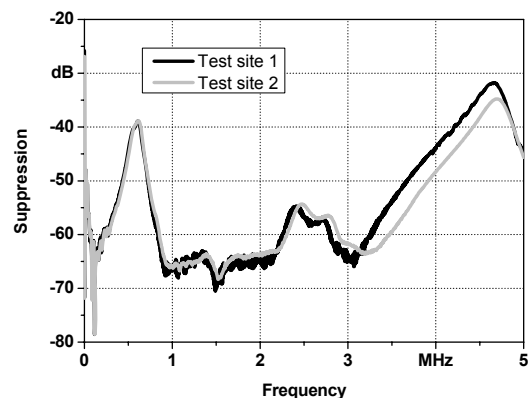
porównania nowych pomiarów z wcześniej dokonanym pomiarem referencyjnym [5].



Rys.3. Porównanie FRA w dwóch miejscach zainstalowania obiektu badanego dla fazy UV (skala logarytmiczna)



Rys.4. Porównanie FRA w dwóch miejscach zainstalowania obiektu badanego dla fazy WU (skala logarytmiczna)



Rys.5. Porównanie FRA w dwóch miejscach zainstalowania obiektu badanego dla fazy WU (skala liniowa)

Stopień zawilgocenia oleju zbadany został za pomocą testu Karl Fischer. Na początku eksperymentu zawartość wody w oleju wynosiła 50 ppm, podczas kolejnych pomiarów (z nowym olejem) 40 ppm. Jednakże różnica ta jest mało znacząca i nie odzwierciedliła się w pomiarach FRA. Obliczone parametry statystyczne dla poszczególnych zakresów częstotliwości przedstawiono w tabeli 2.

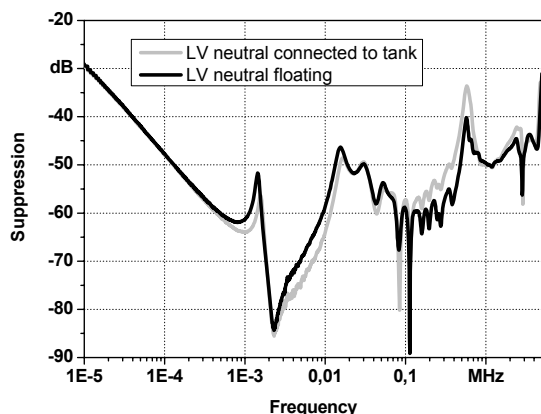
Dla wyższych częstotliwości wzrasta znaczenie negatywnego oddziaływania pozostałych czynników takich jak okablowanie, uziemienie układu pomiarowego i obiektu

badanego. Dla małych jednostek górną granicą powtarzalności pomiarów FRA wydaje się być częstotliwość 1 MHz.

Tabela 2. Współczynniki statystyczne (skala liniowa)

zakres częstotliwości	olej przed-po suszeniu	
	CC	AC / dB
1 kHz – 100 kHz	0,9990	1,17
100 kHz – 1 MHz	0,9997	1,43
1 MHz – 5 MHz	0,9991	3,73

Sposób, w jaki połączono uziemienie układu pomiarowego i obiektu badany ma wpływ na wyniki pomiarów. Rysunek 6 przedstawia porównanie FRA dla uzwojenia UV dla dwóch przypadków, w pierwszym uzwojenie dolnego napięcia uziemiono wraz z kadzią, w drugim pozostawiono rozwarte.



Rys.6. Wpływ sposobu uziemienia uzwojenia dolnego napięcia (skala logarytmiczna)

Podczas pomiarów nie zaobserwowano przesunięcia minimów i maksimów częstotliwości rezonansowych, jednakże różnice w tłumieniu. Obliczone parametry statystyczne dla poszczególnych zakresów częstotliwości przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Współczynniki statystyczne (skala logarytmiczna)

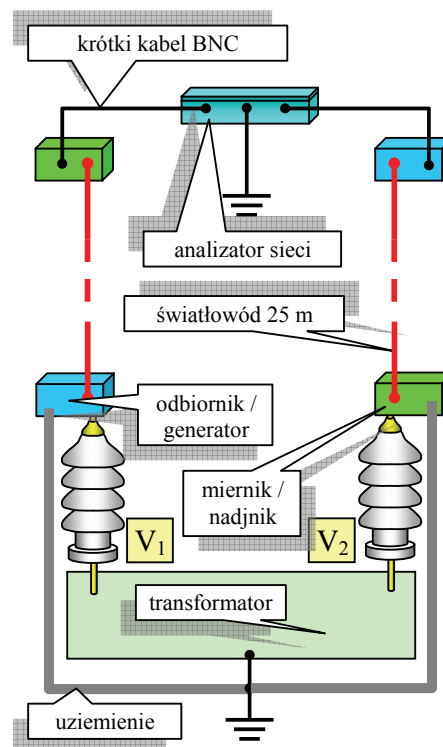
zakres częstotliwości	NN - uziemione – nie uziemione	
	CC	AC / dB
10 Hz – 1 kHz	1,0000	0,43
1 kHz – 100 kHz	0,9992	2,86
100 kHz – 1 MHz	0,9984	4,71
1 MHz – 5 MHz	0,9990	1,57

Wyniki pomiarów – nowa technika połączenia

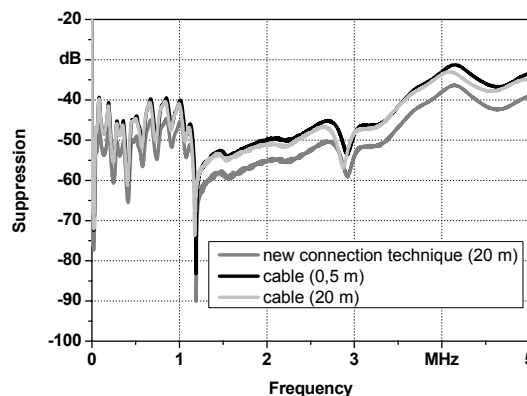
Eksperyment przeprowadzono na transformatorze rozdzielczym (10 kV/380 V, 200 kVA) bez kadzi. Impedancja obiektu badanego wraz z impedancją kabli pomiarowych wpływa na wyniki FRA. Eksperymenty wykazały znaczący wpływ długości kabli pomiarowych w przedziałach o wyższych częstotliwościach. Różnice te stają się większe im dłuższe są zastosowane kable pomiarowe. Dlatego zastosowanie krótkich przewodów wpływa na dokładność FRA i czułość detekcji zmian w transformatorze [6]. W większości przypadków standardowe kable są niewystarczające do podłączenia na dużych jednostkach. Dlatego zaproponowano nowy system połączeń wykorzystujący technikę świetlną. Schemat połączenia pokazano na rysunku 7.

Działanie układu polega na zastosowaniu dla każdego odcinka pomiarowego generatora i odbiornika połączonych ze sobą za pośrednictwem światłowodu o długości 20 m. Wykorzystano zasilane bateryjnie, co eliminuje dodatkowe źródła zakłóceń. Jako urządzenia pomiarowe i rejestrujące

zastosowano standardowy analizator sieci. Ten rodzaj połączenia pozwala na zachowanie krótkich kabli pomiarowych BNC oraz ułatwia pomiar na dużych jednostkach, zapewniając równocześnie utrzymanie stałej techniki podłączenia niezależnie od obiektu i ekipy dokonującej pomiarów.



Rys.7. Schemat połączeń nowego układu pomiarowego



Rys.8. Porównanie FRA w zależności od zastosowanego sposobu połączenia

Rysunek 8 przedstawia porównanie wyników FRA dla jednej fazy przeprowadzonych z użyciem 20 m światłowodu i 0,5 m kabla koncentrycznego. Obliczone parametry statystyczne dla poszczególnych zakresów częstotliwości przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Współczynniki statystyczne (skala liniowa)

zakres częstotliwości	0,5 m BNC – nowa technika połączeń		0,5 m - 20 m BNC	
	CC	AC / dB	CC	AC / dB
1 kHz – 100 kHz	0,9997	5,18	0,9997	5,33
100 kHz – 1 MHz	0,9999	5,18	0,9997	4,69
1 MHz – 5 MHz	0,9998	5,27	0,9994	4,26

Różnice w tłumieniu częstotliwości dla kabla koncentrycznego 0,5 m i 20 m światłowodu są mniejsze niż w przypadku zastosowania 20 m kabla koncentrycznego.

Posumowanie

W powyższym referacie przedstawiono część wyników z eksperymentów nad powtarzalnością FRA dla transformatorów. Podczas badań należy zwrócić uwagę na następujące czynniki wpływające na dokładność pomiarów:

- metoda FRA,
- urządzenia pomiarowe,
- kable łączące (w szczególności ich długość i sposób kalibracji,
- sposób uziemienia układu,
- zakres częstotliwości, skala i oraz ilość punktów pomiarowych.

W celu porównania wyników FRA konieczne jest zastosowanie parametrów statystycznych zapewniających przejrzystość analizy wyników.

Górną granicą powtarzalności FRA w przypadku małych transformatorów wydaje się być częstotliwość 1 MHz.

Zawilgocenie izolacji w badanym obiekcie może mieć wpływ na wyniki FRA. Jednakże w powyższym dochodzeniu różnica zawilgocenia oleju była mało znacząca, aby mogła w tak krótkim czasie wpłynąć na całość izolacji a tym samym na FRA.

Nowa metoda połączenia pozwala na przeprowadzenie pomiarów na dużych jednostkach z zachowaniem powtarzalności zastosowanego układu pomiarowego, co wpływa na analizę wyników.

Podziękowania dla Pana F.G. Sebastian za fachową pomoc przy realizacji układów elektronicznych.

LITERATURA

- [1] M.J. Heathcote, J&P Transformer Book, Elsevier Books, Oxford; Edition: 12th (January 2004)
- [2] J.A.S.B. Jayasinghe, Z.D. Wang, P.N. Jarman, A.W. Darwin, Winding Movement in Power Transformers: a Comparison of FRA Measurement Connection Methods, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume 13, Issue 6, December 2006, Page(s):1342-1349
- [3] P.M. Nirgude, B. Gunasekaran, Channakeshava, A.D. Rajkumar, B.P. Singh, Frequency response analysis approach for condition monitoring of transformer, *2004 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2004. CEIDP '04*, Page(s):186 – 189
- [4] L. Xiaowei, S. Qiang, Test Research on Power Transformer Winding Deformation by FRA Method, *International Symposium on Electrical Insulating Materials, (ISEIM 2001)*, Page(s): 837 – 840
- [5] K.G.N.B. Abeywickrama, Y.V. Serdyuk, S.M. Gubanski, Exploring possibilities for characterization of power transformer insulation by frequency response analysis (FRA)", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume: 21, Issue: 3, IEEE, July 2006, Page(s): 1375 - 1382
- [6] M. Wang, A.J. Vandermaar, K.D. Srivastava, Transformer winding movement monitoring in service - key factors affecting FRA, *Electrical Insulation Magazine*, Volume: 20, Issue: 5, IEEE, Sept.-Oct. 2004, Page(s): 5 – 12

Autorzy: Janusz Szczechowski Scherig-Institut, Universität Hannover, Callinstr. 25 A, 30167 Hannover, E-mail: Szczechowski@si.uni-hannover.de