

Szymon BANASZAK

ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE, KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGII I DIAGNOSTYKI
ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin

Analiza odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatorów w świetle zaleceń projektu normy IEC 60076-18

Dr inż. Szymon BANASZAK

Adiunkt w Katedrze Elektrotechnologii i Diagnostyki na Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie. Autor ponad 40 publikacji z dziedziny izolacji wysokonapięciowej i diagnostyki transformatorów. Zajmuje się tematyką analizy odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń w celu oceny ich stanu mechanicznego. Członek grupy roboczej przy IEC przygotowującej normę międzynarodową nt. pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatorów (FRA).

e-mail: szymon.banaszak@zut.edu.pl



Streszczenie

Analiza odpowiedzi częstotliwościowej (FRA – *Frequency Response Analysis*) jest jedną z metod diagnostycznych transformatorów energetycznych. Obecnie pomiary wykonywane są w oparciu o doświadczenie diagnosty i instrukcje przyrządów pomiarowych. W ciągu kilkunastu miesięcy opracowana zostanie norma IEC 60076-18, która usystematyzuje technikę wykonywania pomiarów i właściwości przyrządów pomiarowych. Autor, biorąc udział w pracach grupy przygotowującej tę normę, omawia w artykule podstawowe wytyczne do wykonywania takich pomiarów, ze szczególnym uwzględnieniem czynników zależnych od przyzwyczajenia diagnostów, które łatwo można dostosować do znormalizowanych zasad.

Słowa kluczowe: analiza odpowiedzi częstotliwościowej, transformator, diagnostyka, norma.

Frequency Response Analysis in the Scope of Standard Regulations

Abstract

Frequency Response Analysis (FRA) is one of diagnostic methods for power transformer state. At present measurements are taken on the base of diagnostic personnel experience and manuals of commercial devices. There are some important measuring issues, given in the paper, which are interpreted in different ways by various diagnostic companies. This leads to difficult or even impossible analysis of measured data, as the FRA method is based on comparison, very often visual, of recorded curves. In over one year there will be published IEC 60076-18 standard, which describes techniques of taking the measurements and properties of measuring devices. The author is a member of working group preparing this standard. This paper describes basic principles of FRA measurements, with focus on issues which have significant impact on measurements, but often depend on personnel habits and can be easily adopted to IEC standard.

Keywords: frequency response analysis, transformer, diagnostics, standard.

1. Wstęp

Do grupy podstawowych metod diagnostycznych uzwojeń transformatorów energetycznych, w celu oceny ich stanu mechanicznego i uszkodzeń elektrycznych, weszła w ostatnich latach metoda analizy odpowiedzi częstotliwościowej (FRA – *Frequency Response Analysis*). Na rynku dostępnych jest do tego celu kilka gotowych zestawów pomiarowych, oferowanych przez różnych producentów. Niestety do tej pory metoda ta, od strony metodologii wykonywania pomiarów i wymaganych parametrów urządzeń pomiarowych, oparta jest na doświadczeniach producentów urządzeń, które podane zostały w broszurze podsumowującej prace grupy roboczej WG A2.26 przy CIGRE [1]. Zawiera ona zbiór dobrych praktyk i wyniki badań porównawczych różnych zestawów pomiarowych wykonanych w ograniczonym zakresie na przykładowym transformatorze. Broszura ta nie jest dokumentem

normatywnym i nie omawia wielu szczegółów związanych z wykonywaniem pomiarów, a mogących mieć wpływ na ich powtarzalność i poprawność. Jediną normą, jaka do tej pory powstała jest norma chińska [2], która jednak nie ujmuje większości ważnych zagadnień. W Europie i USA norma ta nie ma dobrej opinii. Same pomiary odpowiedzi częstotliwościowej wciąż wykonywane są dwiema fundamentalnie różnymi metodami, w dziedzinie częstotliwości (SFRA) lub w dziedzinie czasu (IFRA). Dlatego pojawiła się potrzeba unormowania procedur pomiarowych i parametrów rejestratorów, skutkiem czego było powstanie odpowiedniej grupy roboczej przy Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej IEC PT-60076-18, której członkiem jest m.in. autor. W chwili obecnej norma jest na etapie oceny przez komitety narodowe i w przeciągu kilkunastu miesięcy powinna zostać opublikowana. Równoległe trwają prace nad przewodnikiem IEEE dotyczącym stosowania metody FRA do transformatorów olejowych i interpretacji wyników (IEEE PC57.149TM/D8).

W artykule autor przedstawia najważniejsze zagadnienia związane z wykonywaniem pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej, z uwzględnieniem powstającej normy. Zaznaczyć należy, że będzie ona dotyczyła tylko metod wykonywania pomiarów, zaś interpretacja wyników wciąż będzie zależała od doświadczenia diagnosty i rozmiaru zgromadzonej przez niego bazy danych dla podobnych jednostek. Przygotowanie normy dotyczącej analizy i interpretacji planowane jest po zakończeniu prac nad normą dotyczącą technik pomiarowych.

Dostosowanie się do treści powstającej normy jest o tyle istotne, iż w praktyce przemysłowej bardzo trudne jest porównanie wyników wykonanych przez różne firmy na przestrzeni ubiegłych lat. Inne podejście do wykonywania pomiarów, inne układy pomiarowe, różnice sposobu wykonywania pomiarów, czy stosowanie mierników różnych producentów, ma istotny wpływ na powtarzalność rejestracji, często na poziomie większym niż spodziewane zmiany w krzywych w przypadku powstania deformacji uzwojenia transformatora [3, 4].

2. Układy połączeń przy pomiarach odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatorów

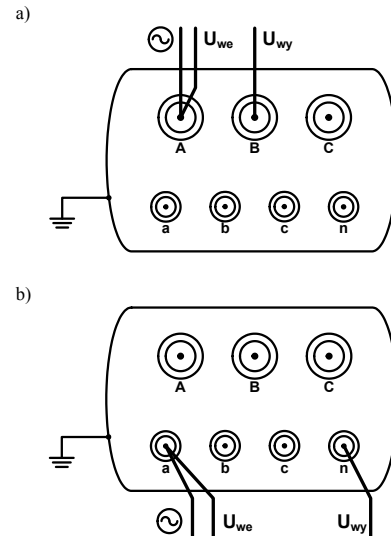
Podstawowym problemem przy wykonywaniu pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatorów jest wybór odpowiednich układów połączeń aparatury pomiarowej z badaną jednostką. Testu można dokonać dla każdego uzwojenia danej fazy przy przeciwnym uzwojeniu (lub uzwojeniach) tej samej fazy zwartym lub otwartym (np. pomiar dla uzwojenia GN, a końce uzwojenia DN otwarte bądź zwarte). Dodatkowo wykonywane są dla danej fazy pomiary międzyuzwojeniowe (np. pomiędzy początkami uzwojeń DN i GN). Wyróżnić tu można pomiar międzyuzwojeniowy indukcyjny (przeciwnie końce uzwojeń uziemione) bądź pojemnościowy (przeciwnie końce uzwojeń otwarte). Ponadto można je wykonywać dla różnych zaczepów, by zbadać także uzwojenie regulacyjne. W takim przypadku konieczna jest rejestracja danych FRA w skrajnych położeniach przełącznika, co pozwoli na wykrycie defektu właśnie w tym uzwojeniu. Optymalnym rozwiązaniem byłaby rejestracja SFRA przy wszystkich możliwych kombinacjach połączeń, jednak wiązałoby się to z bardzo długim czasem wykonywania pomiarów. W praktyce eksploatacyjnej jest to bardzo trudne do realizacji gdyż FRA jest tylko jedną z metod stosowanych w diagnostyce transformatorów. Poza tym duża liczba charakterystyk niekoniecznie ułatwiłaby interpretację, szczególnie w przypadkach, gdy przy każdym pomiarze wykonywane są rejestracje w innych układach, a sytuacje

takie mają miejsce gdy ten sam transformator badają różne firmy diagnostyczne.

Dlatego norma definiować będzie zestaw podstawowych układów połączeń, które należy każdorazowo zrealizować. W przypadkach widocznych różnic między fazami można wykonać dodatkowe pomiary jako uzupełnienie do interpretacji wyników. Zalecany w przygotowywanej normie jest podstawowy układ połączeń pomiędzy końcami uzwojenia, przy otwartym uzwojeniu przeciwnej strony napięciowej. Należy wykonać go dla najwyższego położenia podobciążeniowego przełącznika zacsepów (PPZ) oraz w jego położeniu eliminującym uzwojenie regulacyjne z obwodu. Pomiary przy uzwojeniu przeciwnym zwartym traktowane będą, podobnie jak pomiary międzyuzwojeniowe, jako pomiary dodatkowe. Wynika to z faktu, że w układzie ze zwartym uzwojeniem przeciwnym eliminuje się wpływ strumienia magnesywania rdzenia, co nie wpływa na ujawnienie żadnych dodatkowych defektów w uzwojeniu, a wręcz przeciwnie. Tym samym dla typowego transformatora dwuuzwojeniowego z PPZ przewiduje się wykonanie zestawu 9 serii pomiarów (dla każdej fazy uzwojenie górne, górne + regulacyjne, dolne) lub 6 (dla każdej fazy górne i dolne), gdy transformator nie ma PPZ. W przypadku autotransformatora zalecane będą pomiary dla każdej fazy na uzwojeniu szeregowym, na uzwojeniu wspólnym oraz na uzwojeniu wspólnym połączonym z regulacyjnym. Razem będzie 9 serii pomiarów dla autotransformatora z przełącznikiem zacsepów. Dodatkowo jeśli wyprowadzone jest uzwojenie wyrównawcze należy dokonać pomiarów tego uzwojenia dla każdej fazy (dodatkowe 3 serie pomiarów). Pamiętać należy, że w każdym przypadku układy połączeń należy odnieść do pomiarów wykonywanych poprzednio, tak aby umożliwić porównanie wyników w czasie. W przypadku, gdy poprzednie rejestracje wykonane były niezgodnie z zaleceniami normy, należy nowe pomiary wykonywać w takim samym układzie jak poprzednie (aby stwierdzić ewentualne różnice w przebiegach charakterystyk) oraz dodatkowo w układzie zgodnym z normą (aby uzyskać bazę do porównań w przyszłości).

Kolejnym problemem podlegającym normalizacji jest odpowiedni wybór wyprowadzeń uzwojeń do podłączenia poszczególnych zacisków pomiarowych, czyli tzw. kierunku wykonywania pomiaru. Dotychczas panowała tutaj spora dowolność zależna często od przyzwyczajenia diagnosty. W przypadku uzwojenia połączonego w gwiazdę, można wykonać pomiar podając sygnał na środek gwiazdy (przepust N) i dokonywać rejestracji na każdej fazie (przepusty A, B, C) lub odwrotnie, czyli podawać sygnał na przepusty fazowe i dokonywać jego rejestracji na przepuszczeniu neutralnym. W pierwszym przypadku sygnał rozejdzie się na wszystkie fazy, co może wpłynąć na kształt charakterystyki odpowiedzi częstotliwościowej. Dlatego norma przewiduje, że będzie się wykonywać pomiary przy podawaniu sygnału na przepust fazowy i jego rejestracji na izolatorze przepustowym punktu środkowego gwiazdy. Dodatkowy pomiar w przeciwną stronę zalecany jest w przypadku, gdy wykonywane tak były poprzednie rejestracje, aby umożliwić ich porównanie. Dla uzwojenia połączonego w trójkąt należy dokonać pomiarów zawsze w tym samym kierunku uzwojenia, tj. podając sygnał na przepust pierwszej fazy, a rejestrując na kolejnej itd. (czyli A-B, B-C, C-A). Jeśli możliwe jest rozpięcie uzwojenia, to pomiary należy wykonać na każdym uzwojeniu z osobna. Uzyska się wtedy odpowiedź tylko danego uzwojenia, bez udziału innych faz. Schematy podstawowych połączeń przedstawiono na rysunku 1. Przykładowy transformator ma uzwojenie górnego napięcia połączone w trójkąt, zaś dolnego w gwiazdę z wyprowadzonym punktem środkowym.

Pomiar realizowany powinien być w zakresie częstotliwości od co najmniej 20 Hz do 2 MHz (dla większości mierników FRA). W zakresie do 100 Hz kolejne punkty pomiarowe powinny znajdować się w odstępach co 10 Hz, zaś powyżej 100 Hz na każdą dekadę częstotliwości powinno być 200 punktów pomiarowych, rozłożonych równomiernie w skali liniowej lub logarytmicznej, w zależności od tego, którą stosuje się w prezentacji wyników (w praktyce – zazwyczaj logarytmiczną).



Rys. 1. Podstawowe zalecane połączenia rejestratora FRA do transformatora: a) uzwojenie połączone w trójkąt, b) uzwojenie połączone w gwiazdę

Fig. 1. Basic recommended connection setups of the FRA device to a transformer: a) delta connected windings, b) star connected windings

3. Podstawowe wymagania stawiane urządzeniom pomiarowym

Aby pomiar był miarodajny i powtarzalny urządzenie pomiarowe powinno spełniać minimalne wymagania postawione w normie. Zalicza się do nich następujące wartości:

- zakres pomiarowy dla maksymalnego napięcia źródła: od +10 dB do -90 dB,
- dokładność pomiaru amplitudy: w zakresie od +10 dB do -40 dB co najmniej $\pm 0,3$ dB, w zakresie poniżej -40 dB co najmniej ± 1 dB,
- dokładność pomiaru kąta fazowego: $\pm 1^\circ$,
- zakres częstotliwości pomiarowych: co najmniej od 20 Hz do 2 MHz,
- dokładność częstotliwości: $\pm 1\%$,
- napięcie źródła: nie jest określone, jednak dla wartości powyżej 50 V należy zachować odpowiednie środki ostrożności.

Obecnie większość urządzeń pomiarowych dostępnych na rynku spełnia powyższe wymagania, a diagnosta ma ograniczoną możliwość zmiany tych parametrów. Jednak jak wskazują badania porównawcze rejestratorów różnych producentów [1, 5] wyniki uzyskane z pomiarów na tym samym obiekcie i w tym samym warunkach, mogą się jednak różnić, co trzeba uwzględnić przy interpretacji wyników. Przy wyborze rejestratora istotną jest decyzja czy pomiar ma być wykonywany w dziedzinie czasu (IFRA) czy też częstotliwości (SFRA). Przygotowywana norma pozostawia tę sprawę otwartą, o ile spełnione są odpowiednie wymagania, jednak w praktyce większość urządzeń pomiarowych pracuje w dziedzinie częstotliwości. W zasadzie tylko jeden producent oferuje mierniki IFRA, dlatego bezpieczniejsze wydaje się inwestowanie w sprzęt oparty o pomiary SFRA.

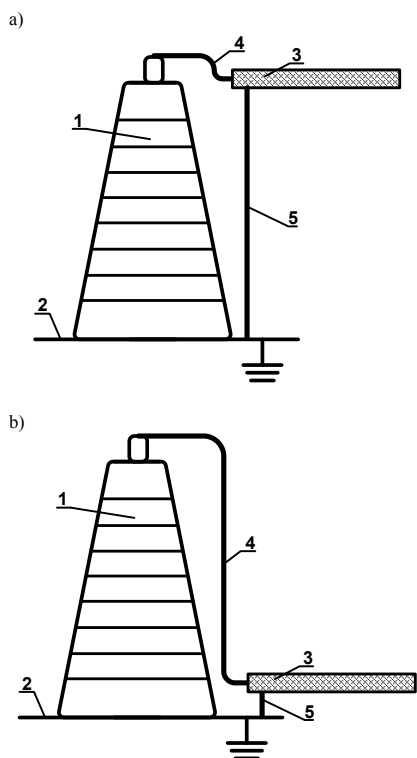
4. Przewody pomiarowe

Przewody pomiarowe mają bardzo duży wpływ na jakość pomiaru. Powinny one mieć impedancję falową równą 50 Ω . Na początku rozwoju metody pojawiały się urządzenia o innych wartościach, jednak jest to zagadnienie zasadnicze dla powtarzalności pomiarów, stąd istnieje konieczność jednoznacznego określenia wartości impedancji. Stosowane są dwa podejścia do przesłania sygnału z transformatora do rejestratora. Pierwsze polega na bezpośrednim przesłaniu sygnału, co wymaga stosowania wysokiej jakości przewodów koncentrycznych. Ich zalecana długość nie powinna jednak przekraczać 30 m, a zazwyczaj wynosi 15-20 m. Aby wyeliminować wpływ ułożenia przewodów na rejestrowane wartości sygnału (widoczny w wysokich częstotliwościach)

stosuje się system trójprzewodowy, w którym pomiary sygnału na wejściu realizowane są bezpośrednio na izolatorze przepustowym transformatora, a nie w urządzeniu pomiarowym. Drugi z przewodów podaje sygnał na przepust (połączony na wejściu do transformatora razem z przewodem pierwszym wspólnym zaciskiem pomiarowym), zaś trzeci ma za zadanie rejestrować dane po stronie przeciwnej. Ważne jest w tym przypadku ułożenie przewodów w jednym torze, gdyż w przeciwnym przypadku pomiar sygnału wejściowego na transformatorze traci sens i pojawią się rozbieżności, zależne od ich ułożenia. Drugim rozwiązaniem jest zastosowanie aktywnych sond pomiarowych na izolatorach przepustowych i przesyłu danych w formie cyfrowej. Jest to rozwiązanie dopuszczalne o ile urządzenie spełnia wymogi postawione w punkcie 3. W takim przypadku nie ma wpływu ułożenia przewodów na pomiar przy wysokich częstotliwościach.

5. Sposób podłączenia przewodów pomiarowych do izolatorów przepustowych

Kolejnym diskutowanym problemem w pracach grupy roboczej jest sposób podłączenia przewodów pomiarowych do wyprowadzeń izolatorów przepustowych, a uściślając podłączenie uzziemienia ich ekranów. Można je zrealizować na dwa sposoby. Pierwszy z nich zakłada jak najkrótszy odcinek żyły pomiarowej, podłączonej bezpośrednio do wyprowadzenia przepustu, z uzziemieniem doprowadzonym do podstawy przepustu. Drugi z kolei zakłada bezpośrednie uzziemienie ekranu u podstawy izolatora przepustowego i podłączenie z tego miejsca żyły pomiarowej nieosłoniętej do wyprowadzenia przepustu. Obie metody przedstawiono schematycznie na rysunku 2.



Rys. 2. Podłączenie przewodów pomiarowych do izolatorów przepustowych i uzziemienie ekranów: a) metoda z krótkim odcinkiem żyły pomiarowej, b) metoda z krótkim odcinkiem uzziemienia ekranu, 1 – izolator przepustowy, 2 – uzziemiona kadź, 3 – ekran kabla pomiarowego, 4 – żyła pomiarowa, 5 – uzziemienie ekranu

Fig. 2. The connection of measuring leads to bushings and screens grounding: a) method with short measuring lead, b) method with short screen grounding, 1 – bushing, 2 – grounded tank, 3 – screen of measuring lead, 4 – measuring lead, 5 – screen grounding

W przypadku pierwszej metody żyła sygnałowa ekranowana jest na całej długości, nie będzie więc takiego wpływu zewnętrznych zakłóceń elektromagnetycznych jak w przypadku żyły odsłoniętej na całej długości izolatora przepustowego (metoda druga). Z kolei w przypadku uzziemienia ekranu dodatkowym przewodem (przypadek pierwszy) na skutek różnicy w potencjale zakończenia ekranu przewodu (od strony połączenia z przepustem) i uzziemionej podstawy przepustu wystąpi podział prądu powrotnego do ziemi. Część popłynie ekranem przewodu, ale pozostała część może się zamknąć poprzez kadź i połączenie ziemi do rejestratora FRA. Efekt ten zależny będzie od częstotliwości – wraz z jej wzrostem będzie intensywniejszy – oraz od ułożenia przewodów koncentrycznych i linek uzemiających. Może to mieć wpływ na kształt odpowiedzi FRA. Problem ten nie wystąpi w przypadku metody drugiej, gdyż nie pojawi się dodatkowa impedancja pomiędzy ekranem przewodu koncentrycznego a uzziemioną kadzią [6].

Tak więc żaden z przedstawionych sposobów nie jest doskonały. Przygotowywana norma dopuści oba warianty, jednak zdaniem autora mniejsze błędy i większą powtarzalność pomiarów wykaże metoda pierwsza, czyli bezpośrednie połączenie żyły pomiarowej z wyprowadzeniem przepustu. Takie też połączenie przewodów zaleca większość producentów sprzętu.

Kolejnym ważnym zagadnieniem jest odpowiednie wykonanie uzziemienia ekranu przewodu koncentrycznego do podstawy izolatora przepustowego. Optymalnym rozwiązaniem, umożliwiającym uzyskanie dobrej powtarzalności do 2 MHz jest zastosowanie taśmy i specjalnego zacisku, dzięki któremu jest ona naciągnięta, czyli poprowadzona najkrótszą możliwą drogą od zacisku pomiarowego do podstawy izolatora przepustowego. Drugim wariantem jest wykorzystanie przewodów uzemiających o z góry określonej długości. W takim przypadku połączenie uzemiające ekran jest luźne, i w zależności od jego ułożenia powstaną różnice w wynikach rejestracji w wysokich częstotliwościach. Przyjęto, że metoda uzziemienia ekranu przewodu z zastosowaniem gotowych przewodów jest powtarzalna do 500 kHz. Dla wyższych częstotliwości pojawić się mogą fałszywe wyniki pomiarów amplitudy, a ponad 1 MHz także przesunięcia częstotliwości rezonansowych. Potwierdzają to pomiary eksploatacyjne wykonane na tym samym obiekcie miernikami opartymi na obu rozwiązaniach. Wpływ metody uzziemienia ekranu na wyniki pomiarów omówiony został szerzej w publikacji [3].

6. Pozostałe czynniki wpływające na wyniki pomiarów FRA

Przy porównawczej analizie zarejestrowanych przebiegów nawet najmniejsze ich zmiany mogą oznaczać deformacje w uzwojeniach. Doświadczenia autora wskazują, że im większy geometrycznie transformator – a co za tym idzie także o większej mocy – tym mniej widoczne są deformacje o podobnym rozmiarze. Wynika to z mniejszej procentowej zmiany w stosunku do całej geometrii uzwojenia. Tym samym bardzo ważne jest prawidłowe i staranne wykonanie pomiarów, a niestosowanie się do omówionych powyżej zaleceń może zakłócić poprawność interpretacji wyników.

Na kształt charakterystyk ma także wpływ szereg innych czynników. Należy do nich m.in. rodzaj medium izolacyjnego. O ile przesunięcie krzywych w całym zakresie częstotliwości przy pomiarze bez oleju jest powszechnie znane, o tyle nie zawsze zwraca się uwagę, że wymiana oleju lub jego odświeżenie może powodować podobne efekty (w mniejszej skali, mniejsza zmiana ϵ medium izolacyjnego). Dlatego celowe jest wykonanie nowych rejestracji charakterystyk po każdej czynności remontowej, także związanej z wymianą oleju izolacyjnego.

Częstym błędem spotykanym przy badaniach FRA jest rejestracja krzywych po pomiarach stałoprądowych, które wpływają na zmianę namagnesowania rdzenia. Prowadzi to zazwyczaj do znaczących zmian w niskich zakresach częstotliwości, odpowiedzialnych właśnie za obwód magnetyczny transformatora. Dlatego

też ważne jest odpowiednie zaplanowanie metodologii diagnostyki transformatora, aby wykonywane badania nie wpływały na wyniki innych metod.

Kolejnym czynnikiem mającym wpływ na powtarzalność pomiarów jest odpowiednie ustawienie podobciążeniowego przełącznika zaczepów (PPZ). Oczywiście porównywanie krzywych FRA ma sens tylko dla pomiarów wykonanych na tych samych zaczepach, jednak pamiętać należy, że w dla wielu konstrukcji PPZ ważny jest także kierunek, z jakiego dany zaczep jest załączany. Generalnie zaleca się wykonywanie pomiarów dla kierunku zmiany zaczepów w dół (np. ustawiając zaczep nr 6 z zaczepu nr 7, a nie z zaczepu nr 5). Informację o kierunku zmiany zaczepu powinno się umieścić w opisie pomiaru, aby w przypadku porównywania z przyszłymi wynikami jasno było co może być powodem różnic między krzywymi. W przypadku transformatorów z bezobciążeniowym przełącznikiem zaczepów zaleca się wykonanie pomiarów bazowych dla każdego położenia przełącznika. Daje to możliwość łatwego porównania wyników przy późniejszych pomiarach bez względu na ułożenie przełącznika zaczepów i bez konieczności dokonywania przełączeń.

W ograniczonym stopniu wpływ na wyniki FRA ma również temperatura. Przyjmuje się, że wpływ ten jest widoczny przy wykonywaniu kolejnych pomiarów przy różnicy temperatur co najmniej 50°C. Związane jest to ze zmianą rezystancji uzwojeń, a także zmianą parametrów cieczy izolacyjnej. Dlatego należy unikać wykonywania pomiarów na transformatorach tuż po ich odstawieniu spod napięcia.

7. Podsumowanie

Metoda FRA od kilku lat weszła do podstawowej diagnostyki transformatorów. Jednak wciąż opiera się ona na doświadczeniu diagnosty podłączającego urządzenie pomiarowe i na instrukcjach producentów sprzętu. Może to prowadzić do niekompatybilności układów pomiarowych przy kolejnych okresowych rejestracjach – a co za tym idzie – do błędnej interpretacji wyników. W ciągu kilkunastu miesięcy opublikowana zostanie norma IEC 60076-18, która uściśli metodykę wykonywania pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej. Będzie ona zawierać wytyczne do układów w jakich należy mierzyć, minimalne parametry urządzeń rejestru-

jących, wskazówki do poprawnego wykonywania pomiarów i szereg innych zaleceń, np. wykaz informacji koniecznych do zapisania wraz z danymi pomiarowymi.

Przedstawione wskazówki mogą ułatwić przygotowanie się do wprowadzenia normy i wykonywanie pomiarów w zalecanych układach. Dotyczy to szczególnie tak fundamentalnych, a jednocześnie dość dowolnie traktowanych aspektów jak sposób podłączenia zacisków pomiarowych do izolatorów przepustowych badanego transformatora, wybór układów połączeń czy też ustawień podobciążeniowego przełącznika zaczepów.

8. Literatura

- [1] Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA). Report of CIGRE Working Group A2.26, 2008.
- [2] Norma Chińskiej Republiki Ludowej DL/T911-2004 Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers.
- [3] Banaszak Sz.: Detekcja deformacji uzwojeń transformatorów metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej FRA. X Symp.: Inżynieria Wysokich Napięć IW-2010, Będlewo, czerwiec 2010. Przegląd Elektrotechniczny 11b'2010, ISSN 0033-2097, s. 174-177.
- [4] Banaszak Sz., Szrot M.: Pomiary odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora w warunkach kontrolowanej deformacji. IX Symp. Inżynieria Wysokich Napięć IW-2008, Będlewo, czerwiec 2008. Przegląd Elektrotechniczny 10/2008, s. 128-131.
- [5] Banaszak Sz.: Praktyczne aspekty diagnostyki odkształceń uzwojeń transformatorów metodą analizy ich odpowiedzi częstotliwościowej (FRA). Pomiary Automatyka Kontrola nr 10/2008, vol. 54, str. 720-722. Konferencja PIDWE – Pomiary i Diagnostyka w Elektroenergetyce, Karlova Studanka, 2008.
- [6] Tenbohlen S., Wimmer R., Feser K., Kraetge A., Krüger, Christian J.: The influence of connection and grounding technique on the repeatability of FRA-results. XVth Int. Symp. on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia, August 2007. Paper T7-522.

otrzymano / received: 23.01.2011

przyjęto do druku / accepted: 01.03.2011

artykuł recenzowany

INFORMACJE

Wydawnictwo PAK

specjalizuje się w wydawaniu czasopisma Pomiary Automatyka Kontrola i książek popularno-naukowych w dziedzinie automatyki i pomiarów

Osoby i firmy przemysłowe zainteresowane współpracą z Wydawnictwem proszone są o kontakt bezpośredni dla uściślenia szczegółów współpracy

Wydawnictwo PAK
00-050 Warszawa
ul. Świętokrzyska 14A
tel./fax 22 827 25 40

Redakcja PAK
44-100 Gliwice
ul. Akademicka 10, p. 30b
tel./fax 32 237 19 45
e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl