

Zastosowanie metody FRA do diagnostyki maszyn wirujących

Streszczenie. Metoda FRA (analizy odpowiedzi częstotliwościowej) stosowana jest w diagnostyce stanu mechanicznego uzwojeń transformatorów. W artykule przedstawiono wyniki badań metodą FRA uzwojeń silników o napięciu znamionowym 6 kV. Ich celem było określenie możliwości wdrożenia tej metody do diagnostyki maszyn wirujących. Dokonano porównania odpowiedzi poszczególnych faz danego silnika, porównano także krzywe zarejestrowane dla kilku jednostek takiego samego typu. Następnie zbadano wpływ położenia wirnika na rejestrowane dane.

Abstract. FRA method (Frequency Response Analysis) is used for diagnostics of mechanical condition of transformer windings. The paper presents FRA tests of motors' windings with nominal voltage 6 kV. The aim of the research was determination of FRA method applicability in the diagnostics of rotating machines. A comparison of the response of three phases was performed, as well as comparison of curves recorded for several unit of the same type. In addition the influence of rotor's position on measured data was tested. (**Application of FRA method in a diagnostics of rotating machines**).

Słowa kluczowe: analiza odpowiedzi częstotliwościowej, silnik elektryczny, diagnostyka

Keywords: Frequency Response Analysis, electric motor, diagnostics

Wstęp

Metoda analizy odpowiedzi częstotliwościowej (FRA – Frequency Response Analysis) jest od ponad dekady z powodzeniem stosowana do diagnostyki stanu mechanicznego części aktywnej transformatorów, także w Polsce [1-4]. Umożliwia wykrycie lokalnych deformacji uzwojeń, przesunięć większych fragmentów cewek, zwarc międzyzwojowych czy też niektórych problemów związanych z obwodem magnetycznym transformatora. Technika pomiarowa metody FRA jest już znormalizowana [5], a jej zastosowanie w zaawansowanej diagnostyce przemysłowej powszechne. W literaturze światowej jest bardzo mało prac dotyczących prób wykorzystania tej metody do diagnostyki maszyn wirujących, których budowa jest oparta na uzwojeniach stojana i wirnika oraz obwodzie magnetycznym. Publikowano wyniki pomiarów mających na celu detekcję zwarc w uzwojeniach stojanów [6], lub analizujące wpływ zwarc w różnych punktach konstrukcyjnych maszyny [7, 8]. Badano również wpływ położenia wirnika na możliwości detekcji zwarc w jego uzwojeniach [9]. Badania te dotyczyły małych silników, o mocy zazwyczaj kilkudziesięciu kilowatów. Brak szerszych doniesień literaturowych na temat możliwości zastosowania metody FRA do maszyn wirujących, zwłaszcza o większej mocy, a tym samym droższych, skłonił autora do przeprowadzenia eksperymentalnych badań na silnikach i porównania odpowiedzi poszczególnych faz danego silnika oraz jednostek tego samego typu, z uwzględnieniem wpływu położenia wirnika.

Metoda FRA i badane obiekty

Pomiary odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatorów realizowane są w zakresie częstotliwości od 20 Hz do 2 MHz. Na potrzeby analizy wyników dzieli się go na co najmniej trzy podzakresy: niskiej częstotliwości, na który wpływ ma obwód magnetyczny transformatora oraz pojemności własne uzwojeń; następnie zakres średniej częstotliwości, w którym można wykryć pojawienie się lokalnych deformacji oraz zakres wysokiej częstotliwości, na który wpływ mają wyprowadzenia uzwojeń, przepusty czy też sam układ pomiarowy. Granice poszczególnych zakresów zależą od geometrycznych rozmiarów jednostki – im większy transformator, tym niżej rejestrowana jest jego odpowiedź w każdym przedziale. W prezentowanych badaniach wybrane do testów silniki należą do jednostek dużych, jednak w porównaniu do transformatorów ich

geometria pozwala oczekiwać zmian raczej w wyższej częstotliwości.

Należy dodać, że metoda FRA opiera się na porównaniu rejestrowanych krzywych do wyników referencyjnych. Najlepiej jeśli zostały one zarejestrowane wcześniej, lecz w przypadku braku takich danych, dokonuje się porównania krzywych pomiędzy fazami badanej jednostki lub do wyników badań transformatorów bliźniaczych.

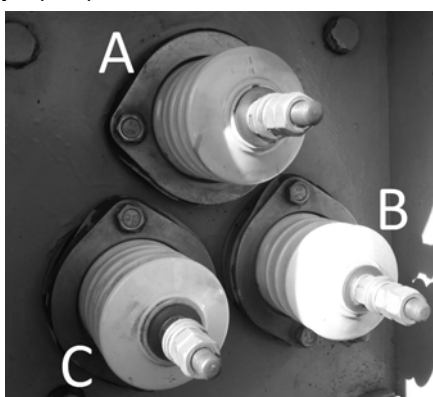


Rys.1. Badane obiekty: a) silniki S1-S4 (typu SZJc194tE) oraz b) S5 (typu SZJr-148/10t/03/E)

Badane były dwa typy silników: cztery silniki indukcyjne typu SZJc194tE, oznaczone dalej jako S1-S4, o napięciu znamionowym 6 kV i mocy 400 kW oraz jeden silnik indukcyjny typu SZJr-148/10t/03/E, również o napięciu

znamionowym 6 kV i dwóch uzwojeniach o mocy 450 kW i 850 kW, który został oznaczony jako S5. Na rys. 1 przedstawiono widok obu typów silników.

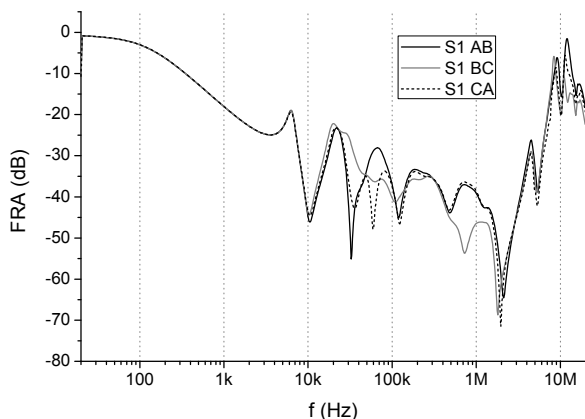
Stosowane w diagnostyce transformatorów układy pomiarowe, zgodne z normą [5], w przypadku silników muszą być ograniczone tylko do pomiaru pomiędzy kolejnymi fazami, gdyż badane obiekty miały wyprowadzone tylko uzwojenia stojana (trzy izolatory przepustowe), co odpowiada pomiarom w układzie end-to-end uzwojenia transformatora połączonego w trójkąt. Widok izolatorów przepustowych, na których wykonywany był pomiar, zawarto na rys. 2. Do pomiarów zastosowano komercyjny zestaw FRAnalyzer firmy Omicron. Wszystkie niuansy pomiarowe wdrożono bezpośrednio z techniki pomiarowej transformatorów, np. uziemianie ekranów przewodów pomiarowych od strony podłączenia do przepustów badanego silnika wykonano najkrótszą drogą z użyciem aluminiowej plecionki. Zastosowano trzy przewody pomiarowe: pierwszym podano sygnał na wejście do obiektu, gdzie drugim przewodem dokonano rejestracji tego sygnału, a trzecim zarejestrowano odpowiedź obiektu na kolejnym przepuście.



Rys.2. Wyprawdzenia uzwojeń stojana z oznaczonymi fazami

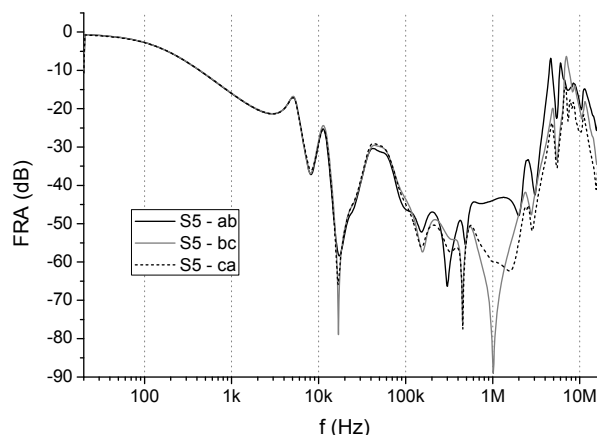
Wyniki badań

Pierwszego porównania zarejestrowanych krzywych dokonano dla trzech faz tego samego silnika, by określić wpływ konstrukcji na powtarzalność odpowiedzi częstotliwościowej. W przypadku transformatorów tak zarejestrowane krzywe charakteryzują się dużą zgodnością, a największe różnice pojawiają się w zakresie niskiej częstotliwości (inny rozpył strumienia magnetycznego w rdzeniu dla poszczególnych kolumn). Wyniki pomiarów silników okazały się odmienne, co można zaobserwować na rys. 3 (silnik S1).



Rys.3. Odpowiedź częstotliwościowa trzech faz silnika S1

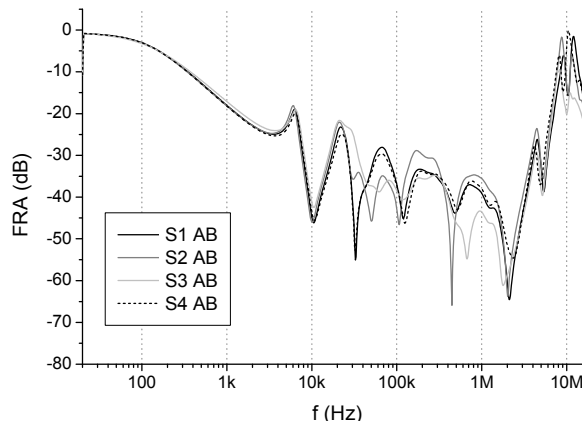
Na wykresie pojawiły się duże różnice w odpowiedziach trzech faz w zakresie średniej częstotliwości, który ze względu na niewielkie gabaryty silnika (w porównaniu do transformatora) przesunięty jest w stronę wyższej częstotliwości (ok. 30 kHz – 1 MHz). Nie występują za to różnice pomiędzy krzywymi w zakresie niskiej częstotliwości, co wynika z budowy klatkowej wirnika, a tym samym rozproszonego obwodu magnetycznego. Podobne różnice zarejestrowano dla pozostałych silników tego samego typu (S2-S4). Odpowiedzi trzech faz silnika S5 (dla strony 450 kW) przedstawiono na rys. 4.



Rys.4. Odpowiedź częstotliwościowa trzech faz silnika S5, uzwojenie 450 kW

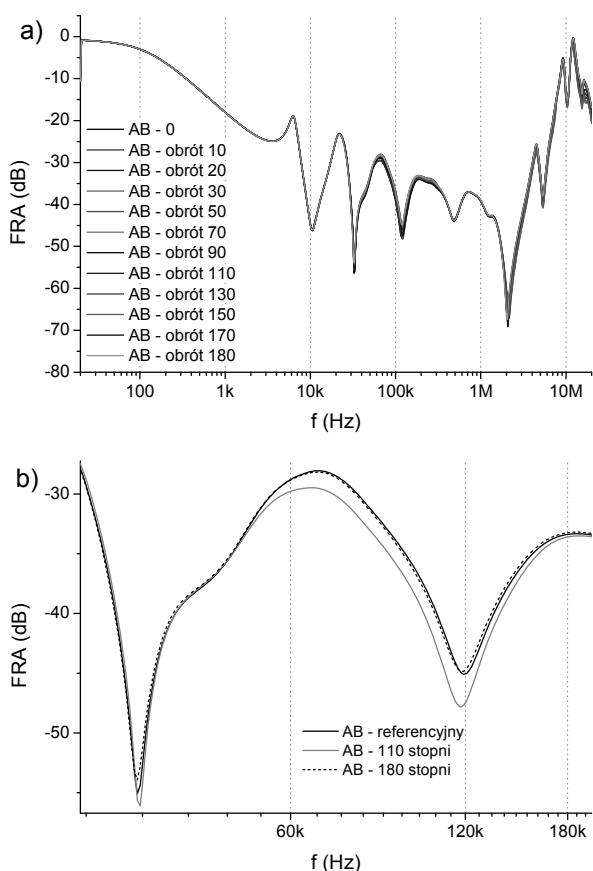
Także w tym przypadku odpowiedź w zakresie niskiej częstotliwości wykazuje pełną zgodność, podczas gdy bardzo duże różnice obserwowane są dla zakresu średniej częstotliwości (ok. 50 kHz – 1 MHz). Podobne rezultaty osiągnięto dla uzwojenia 850 kW. Wynika z tego, że nie jest możliwe wykonywanie porównań pomiędzy fazami danego silnika, gdyż rejestrowane różnice są zbyt duże. Dotyczyło to wszystkich badanych obiektów. W przypadku transformatorów różnice te są znacznie mniejsze, jednak metoda porównania międzyfazowego także dla nich nie jest uważana za w pełni miarodajną i stosowana jest tylko przy braku innych danych odniesienia.

Kolejne porównanie wykonane zostało dla czterech silników tego samego typu (S1-S4), których odpowiedź częstotliwościową zarejestrowano dla takiego samego układu połączeń (AB). Celem takiego porównania było stwierdzenie powtarzalności odpowiedzi dla danej konstrukcji i możliwości zastosowania porównania danych pomiarowych do tzw. obiektów bliźniaczych. Wykres przedstawiono na rys. 5.



Rys.5. Odpowiedź częstotliwościowa czterech silników tego samego typu (S1-S4), zarejestrowana dla tej samej fazy

Jak można zauważyć, w zakresie średniej częstotliwości, w którym spodziewamy się zauważyć wpływ uszkodzenia uzwojenia, widoczne są bardzo duże różnice. Dodać należy, że silniki nie miały stwierdzonych wcześniej uszkodzeń, mimo iż były eksploatowane przez kilkadziesiąt lat. Podobny zakres różnic pomiędzy odpowiedziami obserwowany jest dla pozostałych faz. Różnice te nie wynikają np. z przesunięcia wewnętrznego połączenia o jedną fazę lub błędnego oznaczenia kolejnych fazy, co zostało zweryfikowane porównaniem odpowiedzi wszystkich faz dla wszystkich czterech maszyn. Oznacza to, że nie jest możliwe zastosowanie takiego porównania do oceny stanu danego silnika. W diagnostyce transformatorów takie podejście również nie jest stosowane jako jedyna metoda oceny stanu mechanicznego, lecz jako narzędzie dodatkowe, ukazujące np. charakterystyczne różnice pomiędzy fazami dla danego typu transformatora. Mimo wszystko, różnice te są jednak mniejsze niż dla badanych silników.



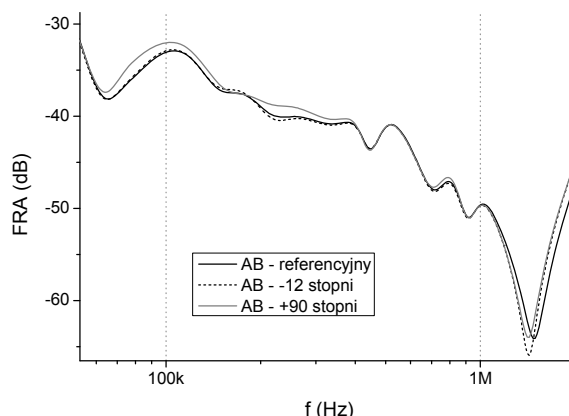
Rys.6. Odpowiedź częstotliwościowa silnika S1 dla różnych położenia wirnika: a) cały zakres częstotliwości, b) powiększony zakres częstotliwości o największych zmianach

Kolejnym badaniem czynnikiem mogącym mieć wpływ na odpowiedź maszyny było położenie wirnika, określane przez jego kąt obrotu. Rejestracji dokonywano dla wybranej fazy obu typów maszyn (S1 oraz S5), w zastanym położeniu wyjściowym (referencyjnym) i dla szeregu wartości kąta obrotu. Dla silnika S1 wykonywano obroty co ok. 10 stopni, aż do 180 (półobrot), zaś dla silnika S5 dla dwóch wybranych położenia. Na rysunku 6 przedstawiona została odpowiedź silnika S1, zarówno pełen zakres częstotliwości, jak i powiększony fragment, w którym obserwowane są zmiany w kształcie odpowiedzi. Na rysunku 6a celowo ukazano wiele krzywych, by zobrazować

niewielki zakres i skalę różnic oraz ich skupienie w ograniczonym obszarze. W powiększeniu na rysunku 6b wybrano już tylko trzy krzywe – referencyjną, po obrocie o 180 stopni i krzywą położoną w skrajnym oddaleniu na wykresie.

Położenie wirnika okazało się mieć niewielki wpływ na odpowiedź częstotliwościową silnika S1. Jak widać na rysunku 6a, wszystkie krzywe pokrywają się w większości zarejestrowanego zakresu częstotliwości, wykazując największe odchylenia od siebie od 30 kHz do ok. 120 kHz. Na powiększeniu wykresu (Rys. 6b) można zauważyć, że wykonanie półobrotu (180 stopni) praktycznie nie jest zauważalne w kształcie charakterystyki. Największą różnicę zaobserwowano dla obrotu o 110 stopni – ok. 3 dB. Wynika to prawdopodobnie z ustawienia prętów wirnika względem stojana.

Na rysunku 7 zaprezentowano odpowiedź silnika S2, w zakresie częstotliwości dla którego wystąpiły największe zmiany po wykonaniu obrotów wirnika.



Rys.7. Odpowiedź częstotliwościowa silnika S5 dla trzech położenia wirnika

W przypadku silnika S5 i odpowiedzi jego uzwojenia większej mocy (850 kW) wnioski są podobne jak dla poprzedniej jednostki. Różnice pomiędzy krzywymi rejestrowanymi dla dwóch obrotów wirnika: 12 stopni w lewo oraz 90 stopni w prawo (w stosunku do położenia referencyjnego) osiągają maksymalnie 3 dB. Z jednej strony wartości takie, w przypadku praktyki przemysłowej mogłyby zostać pominięte, co ma często miejsce dla diagnostyki transformatorów, lecz z drugiej strony mogłyby oznaczać wpływ zmian w geometrii maszyny. Nie można więc pominąć wpływu położenia wirnika i dla poprawnej diagnostyki kolejne pomiary danej maszyny należy wykonywać przy tym samym jego położeniu.

Dyskusja wyników

Diagnostyka silników jest rozwijana od lat i wypracowano jest wiele metod diagnostycznych, stosowanych z powodzeniem w przemyśle. Defekty, które mogą pojawić się w maszynie wirującej podzielić można na natury elektrycznej, mechanicznej i środowiskowej [10]. W przypadku możliwości metody FRA możliwe wydaje się wykrycie w maszynie zwarć w uzwojeniach, uszkodzenia łożysk (związane z przesunięciem osi obrotu), uszkodzenia prętów klatki wirnika, nieprawidłowe ustawienie poosiowe [10].

Przeprowadzone badania wykazały, iż w przypadku badanych maszyn wirujących zastosowanie metody FRA do skutecznej diagnostyki jest ograniczone. Bardzo duże odchyłki w zakresie średniej częstotliwości, pomiędzy krzywymi rejestrowanymi dla trzech faz danej jednostki lub przy porównaniu jednostek tego samego typu, wskazują na

to, że badane silniki charakteryzują się zbyt dużymi różnicami w konstrukcji wewnętrznej, by zapewnić powtarzalne warunki pomiaru. Najprawdopodobniej sposób nawijania uzwojeń, układania wyprowadzeń i wykonywania połączeń charakteryzował się pewną dowolnością, co przy wysokiej czułości metody analizy odpowiedzi częstotliwościowej powoduje „przykrycie” spodziewanego wpływu defektów na rejestrowanej krzywej. Być może dla innych konstrukcji silników problem ten by nie wystąpił.

Położenie wirnika wpływa w niewielkim stopniu na rejestrowane wyniki, jednak obserwowane różnice mogą być porównywalne do wpływu lokalnego defektu. Jednocześnie wpływ ten jest mniejszy niż zarejestrowane różnice pomiędzy różnymi jednostkami tego samego typu, więc początkowe ustawienie wirnika nie wpłynęło w znacznym stopniu na różnice w przebiegu krzywych FRA przy porównywaniu odpowiedzi takich samych silników. Przy stosowaniu metody FRA do oceny stanu maszyn wirujących zasadne wydaje się wykonywanie kolejnych pomiarów dla tego samego ułożenia wirnika względem stojana, co wymaga oznaczenia pozycji pomiaru referencyjnego na maszynie.

W oparciu o przeprowadzone badania można określić możliwość zastosowania metody FRA do diagnostyki maszyn wirujących jako ograniczoną, ze względu na zbyt duży wpływ czynników konstrukcyjnych na rejestrowaną odpowiedź.

W dalszych badaniach proponuje się sprawdzenie metody FRA dla największych maszyn, np. generatorów w elektrowniach, gdzie duże gabaryty ograniczą negatywny wpływ na pomiar wielu czynników, szczególnie w przypadku dokonywania pomiarów na danej maszynie w odstępie czasu. Inną sprawą jest określenie defektów, które za pomocą pomiarów FRA można wykryć. W tym celu konieczne byłoby przeprowadzenie badań deformacyjnych, przy wprowadzanych kontrolowanych defektach w uzwojenia maszyny lub jej układ mechaniczny.

Autor: dr hab. inż. Szymon Banaszak, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, E-mail: szymon.banaszak@zut.edu.pl

LITERATURA

- [1] Banaszak S., Ocena stanu mechanicznego części aktywnej transformatorów metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej, Wydawnictwo Uczelniane ZUT, Szczecin 2016
- [2] Szrot M., Malewski R., Płowucha J., Odształcenia uzwojeń autotransformatorów 160 MVA, 230/115 kV w polskiej sieci przesyłowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 1k/2004, 2004, 135-139
- [3] Gonzales J.C., Mombello E.E., Fault Interpretation Algorithm Using Frequency-Response Analysis of Power Transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 31, No. 3, 2016, 1034-1042
- [4] Banaszak S., Gawrylczyk K.M., Zastosowanie wykresów polarnych w analizie odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10/2016, Konferencja Inżynieria Wysokich Napięć, Będlewo, 23-26.05.2016, 34-37
- [5] IEC Standard IEC 60076-18. Power Transformers—Part 18: Measurement of Frequency Response; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2012
- [6] Blázquez F.R., Platero C.A., Rebollo E., Blázquez F., Evaluation of the applicability of FRA for inter-turn fault detection in stator windings, *9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Valencia, 2013, 177-182
- [7] Retana R., Paweletz A., Herzog H.G., Armature Fault Diagnostics of a Commutator Motor using the Frequency Response Analysis, *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, Cracow, 2007, 277-282
- [8] Vilhekar T.G., Ballal M.S., Umre B.S., Application of Sweep Frequency Response Analysis for the detection of winding faults in induction motor, *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, 2016, 1458-1463
- [9] Platero C.A., Blázquez F., Frías P., Ramírez D., Influence of Rotor Position in FRA Response for Detection of Insulation Failures in Salient-Pole Synchronous Machines, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 26, No. 2, June 2011, 671-676
- [10] Karmakar S., Chattopadhyay S., Mitra M., Sengupta S., Induction motor fault diagnosis, Springer, Vol. XXV, 2016