

Marek ZENKER

POLITECHNIKA SZCZECIŃSKA, INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI

Pomiary relaksacji w izolacji papierowo-olejowej skojarzoną metodą FDS+PDC

Mgr inż. Marek Łukasz ZENKER

Doktorant Wydziału Elektrycznego, pracę doktorską realizuje w Zakładzie Wysokich Napięć i Elektrotechnologii. Autor około 10 publikacji z zakresu fizyki materiałów oraz wykorzystania metod nieniszczących w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych.



e-mail: zenekm@wp.pl

Streszczenie

W artykule zaprezentowano pomiary zjawisk relaksacyjnych zachodzących w modelu kanału olejowego transformatora. Pomiary metodą PDC wykonano dla zawilgocenia oleju równego 21 ppm przy różnej temperaturze, wyniki przeliczono za pomocą transformaty Fouriera na dziedzinę częstotliwości. Następnie wykonano pomiary systemem skojarzonym FDS+PDC i porównano je z przebiegami uzyskanymi z metody FDS. Pomiary wykazały, że w modelu kanału olejowego transformatora zachodzą nieliniowe zjawiska relaksacyjne. Badania FDS+PDC izolacji papierowo-olejowej przepustów transformatorowych potwierdziły występowanie efektu nieliniowości.

Słowa kluczowe: metoda skojarzona, FDS+PDC, relaksacja dielektryczna.

Measurements of relaxation in paper-oil insulation with joint method FDS+PDC

Abstract

Joint diagnostic methods are the new approach in the field of estimating the moisture content in paper-oil insulation. Improvement in the accuracy of such measurements and their verification by using at least two out of three time-consuming polarization methods (PDC, RVM, FDS) need application of joint measurements (Fig. 1). The paper presents measurements of the relaxation phenomena in the transformer oil gap model. The measurements were taken with the PDC method at the moisture content of 21 ppm for different temperatures (Fig. 2). The results were transformed to the frequency domain (1). The imaginary and real parts of the PDC measurements are shown in Fig. 3. The next step was measurements with the joint system FDS+PDC and comparison of the obtained results with those from the FDS method (Fig. 4). The PDC curve obtained by means of the DFT function is additionally shown in Fig. 4 to compare the results. The measurements show that there are non-linear phenomena in the oil gap model. The FDS+PDC measurements of the paper-oil insulation of transformer bushings confirm the presence of the non-linear effect (Fig. 5). The obtained results of the measurements suggest that although the transformer insulation geometry differs from the oil gap and insulating bushing model construction, the similar effect can take place when the joint measurement FDS+PDC is applied to the transformer insulation moisture content estimation. However, this problem needs further investigations on real objects.

Keywords: joint method, FDS+PDC, dielectric relaxation.

1. Wstęp

W Polsce, podobnie jak w innych krajach europejskich ponad 50% populacji transformatorów energetycznych stanowią wysłużone jednostki, które są eksploatowane ponad 25 lat. Z danych literaturowych wynika, że czas eksploatacji niektórych jednostek przekracza nawet 50 lat [1]. Przekroczyły one nawet dwukrotnie zakładany przez konstruktora okres technicznego życia. Wycofanie takich jednostek z eksploatacji warunkowane jest nie tyle ich wiekiem, co przede wszystkim stanem technicznym, określonym na podstawie stopnia zatarcia układów izolacyjnych transfor-

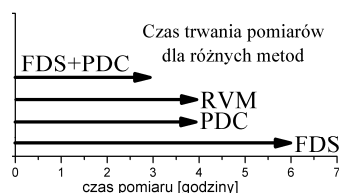
matorów i ich zawilgocenia. Są to czynniki decydujące o niezawodności pracy transformatorów energetycznych [2]. Stosowane obecnie metody wyznaczania stopnia zawilgocenia izolacji papierowo-olejowej (RVM - *Recovery Voltage Measurements*, FDS - *Frequency Domain Spectroscopy* oraz PDC - *Polarization Depolarization Current*) opierają się głównie o badanie wolnozmennych procesów relaksacyjnych i z samej istoty są procedurami czasochłonnymi. Z drugiej strony różnorodny wpływ wewnętrznych i zewnętrznych czynników na szacowanie stopnia zawilgocenia sprzyja stosowaniu co najmniej dwóch metod pomiarowych w celu poprawy dokładności wyznaczenia zawartości wody w izolacji papierowo-olejowej [1, 2]. W rezultacie obserwuje się ostatnio próby łączenia tych metod, co ma zmniejszyć zarówno czasochłonność jak i błąd pomiaru.

Ilustracją dużych problemów ze stosowaniem pełnego zakresu pomiarowego w warunkach eksploatacyjnych jest analiza czasu wykonywania pomiarów poszczególnymi metodami. Standardowy czas trwania pomiarów z zastosowaniem metody FDS przy założeniu zakresu częstotliwości $2 \cdot 10^{-4} \div 10^3$ Hz trwa około 6 godzin (tabela 1). W metodzie PDC stosuje się przeważnie cykl dwóch godzin: polaryzacji i depolaryzacji. Natomiast pomiary RVM przy niskim zawilgoceniu transformatora trwają również około 4 godzin. Z powyższego faktu wynika, że sumaryczny czas pomiarów przy postulowanym zastosowaniu dwóch metod (np. FDS i RVM, lub FDS i PDC) wynosić będzie około 10-11 godzin (rys. 1).

Tab. 1. Czas trwania pomiarów przy metodzie FDS

Tab. 1. The measurement time for the FDS method

pomiar	częstotliwość f [Hz]	okres T [s]	czas pomiaru t_{pom} [s]
1	0,0002	5000	7500
2	0,0003	3333	5000
3	0,0005	2000	3000
4	0,0007	1400	2100
5...10	0,001...0,07	2173	3260
11...36	0,01...1000		~ 800
razem czas pomiarów t_{pom}			~ 6 godzin



Rys. 1. Czas trwania pomiarów dla metody FDS, PDC, FDS+PDC

Fig. 1. The measurement time for FDS, PDC and FDS+PDC methods

Przykładem próby skrócenia czasochłonności pomiarów jest wykorzystanie w zakresie wysokich częstotliwości pomiarów FDS, zaś w zakresie niskich częstotliwości pomiarów PDC, które potem przeliczane są na dziedzinę częstotliwości za pomocą transformaty Fouriera. Wykorzystanie skojarzonej procedury FDS+PDC powoduje, że wykonanie pomiarów w dziedzinie częstotliwości dla zakresu $10^{-2} \div 10^3$ Hz trwa około 800 sekund. Następnie przeprowadza się rejestrację prądu depolaryzacji trwającą ok. 10000 s. Po przejściu z dziedziny czasu na częstotliwość za pomocą transformaty Fouriera oraz skojarzeniu obu pomiarów

można otrzymać klasyczne wyniki FDS. W ten sposób całkowity czas pomiaru przy metodzie FDS+PDC może być skrócony z 10 nawet do około 3 godzin (rys. 1).

Pewnym problemem, który może towarzyszyć skojarzonemu systemowi pomiarowemu FDS+PDC jest pojawienie się nieliniowej relaksacji w układzie papierowo-olejowym. Powoduje ona zniekształcenie końcowych charakterystyk ($\text{tg}\delta$, $C = f(f)$), wprowadzając błąd w szacowaniu zawilgocenia izolacji. Możliwość taką sygnalizowano w pracy [2], gdzie analizowano funkcje relaksacji w dziedzinie czasu transformatorów energetycznych, które otrzymano bezpośrednio z pomiarów PDC oraz przekształconych za pomocą odwrotnej transformaty Fouriera pomiarów FDS.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki pomiarów metodami PDC i FDS oraz skojarzoną metodą FDS+PDC procesów relaksacyjnych w modelu kanału olejowego. Miały one za zadanie zbadać wpływ ewentualnych zjawisk nieliniowych na procesy relaksacyjne oraz ocenę możliwości stosowania procedury skojarzonego pomiaru FDS+PDC dla izolacji papierowo-olejowej.

2. Obiekt i metodyka badań

Pomiary wykonano dla laboratoryjnego modelu kanału olejowego. Zawierał on dziesięć płyt epoksydowych z naniesioną warstwą miedzi spełniających rolę elektrod o łącznym polu pomiarowym równym $0,5 \text{ m}^2$. Płyty zostały rozsunięte na odległość 2 cm, a w środku umieszczono barierę preszpanową o grubości 0,5 mm. W celu zminimalizowania zjawisk krawędziowych oraz prądów pasożytniczych wokół elektrod utworzono ekran. Całość została skrócona za pomocą izolacyjnych jarzm. Po wysuszeniu papieru transformatorowego model zanurzono w oleju NYTRO TAURUS. Stałą temperaturę zapewniała komora klimatyczna [3].

Badania FDS przeprowadzono w zakresie 10^{-4} – 10^3 Hz. W pomiarach PDC zastosowano procedurę 2h polaryzacji i 2h depolaryzacji. W pomiarach skojarzonych PDC+FDS zastosowano następującą procedurę: pomiary FDS w zakresie 10^{-2} – 10^3 Hz, rejestracja prądu polaryzacji w czasie 10000 sekund oraz przeliczenie wartości $i_{pol}(t)$ za pomocą transformaty Fouriera na dziedzinę częstotliwości w zakresie $6 \cdot 10^{-4}$ – 10^{-2} Hz. Temperaturę układu zmieniano w zakresie 23 – 48 °C, przy zawilgoceniu oleju 21 ppm, które wyznaczono metodą KARLA-FISCHERA. Pomiary wykonano przy napięciu 200 V, co odpowiada średniemu natężeniu pola elektrycznego rzędu 100 V/cm. Do wykonania pomiarów zostały użyte: elektrometr KEITHLEY 6517A oraz DIRANA firmyOMICRON. Do przejścia z dziedziny czasu (PDC) na częstotliwość (FDS) wykorzystano dyskretną transformatę Fouriera (DFT - *Discrete Fourier Transformation*) zaimplementowaną w programie Origin v.7.5 (1) [4, 5].

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi}{N} nk} \quad (1)$$

gdzie:

$X(k)$ – dyskretna transformata Fouriera w k -tym punkcie, $k \in [0, N-1]$

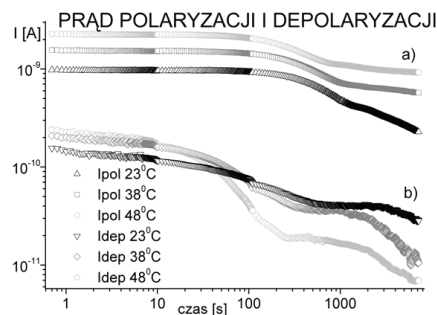
N – liczba punktów wziętych do obliczania dyskretny transformaty

$x(n)$ – n -ta próbka zdyskretyzowanego przebiegu w czasie, $n \in [0, N-1]$

3. Wyniki

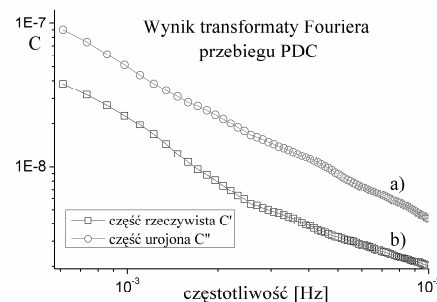
Z pomiarów PDC otrzymano szereg charakterystyk $i_{pol}(t)$, $i_{dep}(t)$ dla różnej temperatury układu (rys. 2) przy zawilgoceniu oleju równym 21 ppm. Wartości prądu polaryzacji przeliczono za pomocą funkcji DFT (1) na dziedzinę częstotliwości. Przykładowe wyniki przedstawia rysunek 3 zawierający część urojoną C'' (rys. 3a) i rzeczywistą C' (rys. 3b) dla temperatury 42 °C. Czas polaryzacji wynoszący 7200 sekund oraz częstotliwość próbkowania wynosząca 0,1 Hz pozwoliły na wyznaczenie częstotli-

ściowych charakterystyk urojonej i rzeczywistej części zespolonej przenikalności elektrycznej w zakresie $6 \cdot 10^{-4}$ – 10^{-2} Hz.



Rys. 2. Prąd polaryzacji (a) i depolaryzacji (b) modelu kanału olejowego dla różnych temperatur oleju

Fig. 2. Polarization (a) and depolarization (b) currents of the oil gap model for different oil temperatures

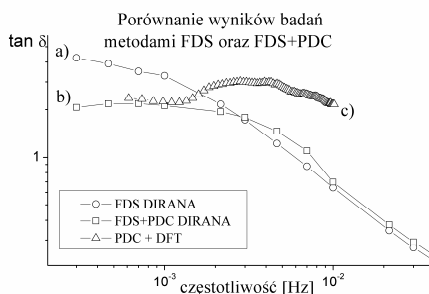


Rys. 3. Część urojona C'' (a) i rzeczywista C' (b) przebiegu PDC w dziedzinie częstotliwości dla temperatury 42 °C

Fig. 3. Imaginary C'' (a) and real C' (b) part of the PDC characteristic in the frequency domain for temperature $T=42$ °C

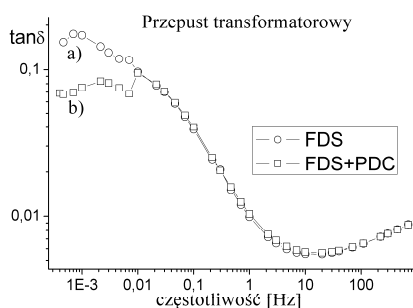
Rysunek 4 przedstawia porównanie zależności $\text{tg}\delta=f(f)$ wyznaczonych za pomocą różnych metod pomiarowych, przy czym charakterystyką odniesienia były wartości $\text{tg}\delta$ uzyskane za pomocą metody FDS (rys. 4a). Wyniki pomiarów przy zastosowaniu zaimplementowanej w mierniku DIRANA skojarzonej metody PDC+FDS (rys. 4b) wykazują znaczące różnice w zakresie niskiej częstotliwości. Różnice te są prawdopodobnie rezultatem odrębnej natury polaryzacji w obecności pola przemiennego i pola stałego. Wskazują one na nieliniowy charakter procesów relaksacyjnych w użytym do badań modelu kanałów olejowych transformatora. Przypuszczenie efekt ten wzmacnia wartości charakterystyki $\text{tg}\delta=f(f)$, którą obliczono jako iloraz urojonych C'' (rys. 3a) i rzeczywistych C' (rys. 3b) wartości przenikalności elektrycznej otrzymanej po przeliczeniu na dziedzinę częstotliwości wyników PDC (rys. 4c). Inną możliwą przyczyną istniejących rozbieżności jest tzw. efekt Garthona, którego wpływ na procesy relaksacyjne obserwuje się przy wysokich wartościach pola elektrycznego. Jednak zastosowane w eksperymencie stosunkowo niskie natężenie elektrycznego pola pomiarowego rzędu 100V/cm pozwala raczej wykluczyć to zjawisko.

Na rysunku 5 przedstawiono zależności $\text{tg}\delta=f(f)$ wyznaczone dla papierowo-olejowej izolacji przepustu transformatorowego 110 kV. Zmierzono je dla temperatury 23 °C za pomocą metody FDS (rys. 5a) oraz skojarzonej metody FDS+PDC (rys. 5b) przy czym wartości $\text{tg}\delta$ dla częstotliwości niższych od 10mHz otrzymano z przeliczenia na dziedzinę częstotliwości pomiarów prądu depolaryzacji zgodnie z zaimplementowanymi w mierniku DIRANA algorytmami. Wydaje się, że zaobserwowane różnice w wartościach $\text{tg}\delta$ w zakresie niskich częstotliwości również spowodowane są przez nieliniowe zachowanie się układu izolacyjnego przepustu, co potwierdza rezultaty otrzymane dla modelu kanału olejowego.



Rys. 4. Porównanie charakterystyk $\text{tg}\delta=f(f)$ modelu kanału olejowego uzyskanych z metody FDS (a), FDS+PDC (b), PDC po przeliczeniu DFT (c) dla temperatury 42 °C

Fig. 4. Comparison of $\text{tg}\delta=f(f)$ curves of the transformer oil gap model obtained from: FDS (a), FDS+PDC (b), PDC after calculating DFT (c) method for temperature $T=42^\circ\text{C}$



Rys. 5. Porównanie charakterystyk $\text{tg}\delta=f(f)$ izolacji papierowo-olejowej przepustu transformatorowego uzyskanych z metody FDS (a) i FDS+PDC (b) dla temperatury 23 °C

Fig. 5. Comparison of $\text{tg}\delta=f(f)$ curves of the transformer bushing paper-oil insulation obtained from FDS (a) and FDS+PDC method (b) for temperature $T=23^\circ\text{C}$

Otrzymane wyniki pomiarów nasuwają przypuszczenie, że mimo różnicy między geometrią izolacji transformatora a budową modelu kanału olejowego oraz przepustu izolacyjnego, podobny efekt może również mieć miejsce przy zastosowaniu skojarzonych pomiarów FDS+PDC do oceny zawilgocenia izolacji transformatorów. Jednak problem ten wymaga dalszych badań na obiektach rzeczywistych.

4. Wnioski

Poprawa stopnia dokładności oraz weryfikowalności wyników badań poprzez stosowanie co najmniej dwóch z trzech czasochłonnych metod polaryzacyjnych (PDC, FDS, RVM) wymaga wprowadzenia stosowania systemów skojarzonych np.: FDS+PDC. Idea takich pomiarów pozwala nawet trzykrotnie skrócić czas pomiaru diagnostycznego.

DFT (1) jest miarodajnym narzędziem pozwalającym na przejście z dziedziny czasu (PDC), na dziedzinę częstotliwości w zakresie LF dając w szczególnych przypadkach porównywalne wyniki z metodą FDS.

Otrzymane wyniki badań skojarzoną metodą FDS+PDC układów papierowo-olejowych nasuwają przypuszczenie, że zachodzące efekty nieliniowości mogą mieć znaczący wpływ na szacowanie zawilgocenia izolacji transformatorów. Jednak problem ten wymaga przeprowadzenia pomiarów skojarzonych na obiektach rzeczywistych oraz określenia czynnika nieliniowości układów, co będzie wyznaczać kierunki dalszych badań.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2010 jako projekt badawczy promotorski Nr N N510 382935

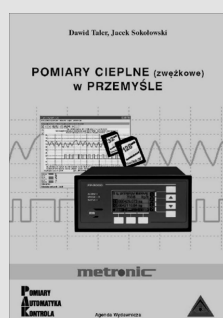
5. Literatura

- [1] Transformatory w eksploatacji, Wydawnictwo Energo-Complex, kwiecień 2007
- [2] J. Subocz: Badanie funkcji rozproszenia izolacji transformatorów WN. Konferencja naukowo-techniczna „Transformatory w eksploatacji”, Sieniawa 2003, s.177-186
- [3] M. Zenker: Procesy relaksacyjne w modelu granicy faz „olej-prespan”, Symposium Inżynieria Wysokich Napięć IW-2008, Będlewo, 9-11 czerwca 2008, Przegląd Elektrotechniczny, materiały w druku
- [4] Origin Reference V7.5 SR1, indeks DFT
- [5] http://www.ue.eti.pg.gda.pl/~wrona/lab_dsp/wyklady/Wyk%C5%82ad%206.ppt#262,7,

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Książka Wydawnictwa PAK



Książka „Pomiary cieplne (zwężkowe) w przemyśle” stanowi nową pozycję literatury poświęconą pomiarom strumienia masy i ciepła płynów przepływających w przewodach przy użyciu zwężek pomiarowych. Książka przeznaczona jest dla inżynierów i techników zajmujących się zagadnieniami cieplno-przepływowymi w przemyśle, energetyce i ogrzewnictwie. W książce omówiono przyrządy i układy do pomiarów zwężkowych strumienia ciepła, produkowane przez firmę Metronic.

Zamówienia prosimy składać na adresy PAK:

Wydawnictwo PAK
00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14A,
tel./fax: 022 827 25 40

Redakcja PAK
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, p. 30b,
tel./fax: 032 237 19 45
e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl