

**Krzysztof WALCZAK, Jarosław GIELNIAK,
Andrzej GRACZKOWSKI, Hubert MORAŃDA**
POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI

Analiza FDS w ocenie zawilgocenia izolacji transformatorów

Dr inż. Krzysztof WALCZAK

Adiunkt na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej, Pracownik Instytutu Elektroenergetyki. Autor ponad 70 publikacji z zakresu diagnostyki urządzeń wysokonapięciowych oraz ochrony przeciwprzebiegowej.



e-mail: krzysztof.walczak@put.poznan.pl

Dr inż. Jarosław GIELNIAK

Adiunkt na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej, Pracownik Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej. Autor ponad 70 publikacji z zakresu badań materiałowych, obliczania rozkładu pola elektrycznego oraz diagnostyki wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych.



e-mail: jaroslaw.gielniak@put.poznan.pl

Dr inż. Andrzej GRACZKOWSKI

Adiunkt na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej, Pracownik Instytutu Elektroenergetyki. Autor ponad 60 publikacji z zakresu materiałoznawstwa elektrotechnicznego, diagnostyki wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych, spektroskopii dielektrycznej, rozkładu pola elektrycznego przy napięciu stałym w kablu.



e-mail: andrzej.graczkowski@put.poznan.pl

Dr inż. Hubert MORAŃDA

Adiunkt na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej, Pracownik Instytutu Elektroenergetyki. Autor ponad 50 publikacji z zakresu badań materiałowych oraz diagnostyki wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych.



e-mail: hubert.moranda@put.poznan.pl

Streszczenie

W artykule omówiono istotę modelowania i analizy w metodzie FDS w aspekcie oceny stopnia zawilgocenia izolacji papierowo-olejowej transformatora energetycznego. Przedstawiono czynniki mające wpływ na odpowiedź dielektryczną izolacji transformatora.

Słowa kluczowe: metoda FDS, zawilgocenie izolacji transformatora.

FDS Analysis in Evaluation of Transformer Insulation Moistening

Abstract

In the paper an idea of modeling and analysis in FDS method in aspect of moistening degree evaluation of paper-oil insulation of power transformer was discussed. Parameters having the influence on the dielectric response of the transformer insulation were presented.

Keywords: FDS method, transformer insulation moistening.

1. Wstęp

Transformator energetyczny jest jednym z ważniejszych elementów systemu elektroenergetycznego, który ma zapewnić niezawodność i stabilność pracy tego systemu. O tym, czy funkcje te będzie spełniał w sposób prawidłowy, decydują jego własności, sposób eksploatacji oraz zużycie wynikające z wieku i przebytej historii. Zakłada się, że prawidłowo wykonana jednostka powinna pracować przez co najmniej 30 lat. Doświadczenie pokazuje, że ze względu na obciążenia, mniejsze od znamionowych, większość transformatorów pracuje w systemie dłużej, co daje wymierny zysk ekonomiczny, jednakże równocześnie zwiększa prawdopodobieństwo awarii. Przyczyn awarii może być wiele, ale wraz z wiekiem coraz większe niebezpieczeństwo stwarza wzrastający poziom zawilgocenia izolacji celulozowej. Problem dotyczy głównie jednostek długo eksploatowanych (przy średnim obciążeniu, 25 lat i więcej), bo procesy starzeniowe wymagają czasu. Dodatkowo im starsza jednostka, tym szybciej następuje wzrost zawilgocenia, bo woda jest akceleratorem procesu rozpadu celulozy. Do podstawowych zagrożeń wynikających ze wzrostu

zawilgocenia należą: znaczne zmniejszenie wytrzymałości elektrycznej papieru, zmniejszenie napięcia przebicia oleju oraz obniżenie temperatury, przy której może wystąpić, groźne dla transformatora zjawisko wydzielania pęcherzyków pary wodnej [1]. W skali Polski problem zaczyna być coraz bardziej poważny, jeżeli weźmiemy pod uwagę wiek i stopień zawilgocenia ogólnej populacji transformatorów [2]. Chcąc zatem uniknąć zagrożeń, wynikających z możliwych awarii, należy kontrolować stan transformatorów po kątem stopnia ich zawilgocenia.

W chwili obecnej najbardziej rozwijane metody wyznaczania zawilgocenia oparte są na zjawiskach polaryzacyjnych. Ich skuteczność i wiarygodność potwierdziły raporty CIGRE, w tym raport z projektu międzynarodowego *REDIATOOOL*, którego koordynatorem była Politechnika Poznańska [3, 4]. Do metod polaryzacyjnych należą: pomiar napięcia powrotnego (RVM), pomiar prądu polaryzacji i depolaryzacji (PDC) oraz spektroskopia dielektryczna w dziedzinie częstotliwości (FDS).

Niniejsza praca ma przede wszystkim na celu przybliżenie idei pomiaru odpowiedzi dielektrycznej w dziedzinie częstotliwości (FDS) oraz interpretacji wyników. Badania oraz wnioski przedstawione w artykule są rezultatem wieloletnich doświadczeń zdobytych na tym polu.

2. Spektroskopia dielektryczna w dziedzinie częstotliwości

2.1. Wprowadzenie

W dielektryku, poddanym działaniu przemiennego pola elektrycznego, oprócz typowych strat związanych z przewodnictwem, występują również straty wywołane przez zjawisko polaryzacji. Rozpraszanie energii jest w tym wypadku spowodowane przez oscylacje dipoli. W izolacji papierowo-olejowej, czyli typowej dla transformatorów energetycznych, sumaryczne straty energii będą wynikały z szeregu czynników. Do podstawowych należą: temperatura, zawartość wody w papierze i oleju oraz obecność produktów starzenia. Czynniki te znajdują swoje odzwierciedlenie w tzw. odpowiedzi dielektrycznej układu izolacyjnego, którą w przypadku spektroskopii w dziedzinie częstotliwości będzie np. zależność

$tg\delta=f(f)$ lub $\varepsilon=f(f)$. Odpowiedź dielektryczna niesie zatem w sobie szereg ukrytych informacji o stanie izolacji badanego urządzenia. Umiejętna analiza otrzymanych wyników i właściwa ich interpretacja jest w tym wypadku sprawą kluczową dla postawienia właściwej diagnozy.

2.2. Pomiar

W badaniach dotyczących pomiarów odpowiedzi dielektrycznej transformatorów w dziedzinie częstotliwości nasz zespół posługuje się sprzętem komercyjnym, szwedzkiej firmy PAX Diagnostics. W skład zestawu wchodzi: System Diagnostyki Izolacji IDA-200, jej nowszy odpowiednik IDAX-300 oraz wzmacniacz wysokonapięciowy VAX-230. Jest to zintegrowany system, w pełni skomputeryzowany i przystosowany do wykonywania pomiarów w terenie. System składa się ze źródła napięcia sinusoidalnego, elektrometru oraz układu sterowania. Pomiar może być wykonywany przy napięciu o wartości szczytowej 0-200 V, w zakresie częstotliwości 0,0001-1000 Hz. Dodatkowy wzmacniacz wysokonapięciowy rozszerza możliwości napięciowe systemu do 30 kV. Pomiar wykonywany jest w układzie trójprzewodowym, co pozwala na odseparowanie pojemności pasożytniczych i prądu upływnościowego. Układ pomiarowy jest ekranowany, a dodatkowa filtracja sygnału, za pomocą dyskretnej transformaty Fouriera, pozwala eliminować zakłócenia zewnętrzne, a tym samym zapewnia prawidłową pracę w warunkach polowych (np. na stacji el-en). Pomiar odpowiedzi izolacji głównej transformatora zazwyczaj wykonywany jest w układzie UST, czyli pomiędzy uzwojeniem górnego i dolnego napięcia, przy separowaniu prądu płynącego do kadzi transformatora.

2.3. Modelowanie

W przypadku transformatorów, do interpretacji odpowiedzi dielektrycznej można posłużyć się specjalnym modelem matematycznym. Zasadniczą ideą modelowania jest, aby dopasować krzywą wyznaczoną w oparciu o uproszczony model układu dielektrycznego papier-olej, o zadanych parametrach, do charakterystyki otrzymanej z pomiarów. Tak zwany model X-Y, wykorzystany w modelowaniu, odzwierciedla procentowy udział poszczególnych elementów (tulei, klinów, oleju) w całej przestrzeni izolacji głównej transformatora.

Odpowiedź dielektryczną modelu wyznacza się na podstawie wzorów [5], w których najistotniejszym parametrem jest przenikalność elektryczna uzyskana z pomiarów na wzorcowych próbkach preszpanowych o znanym zawilgoceniu. Wiarygodna ocena ilościowa stanu izolacji papierowo-olejowej transformatora zależy zatem w dużej mierze od właściwego przygotowania wzorców.

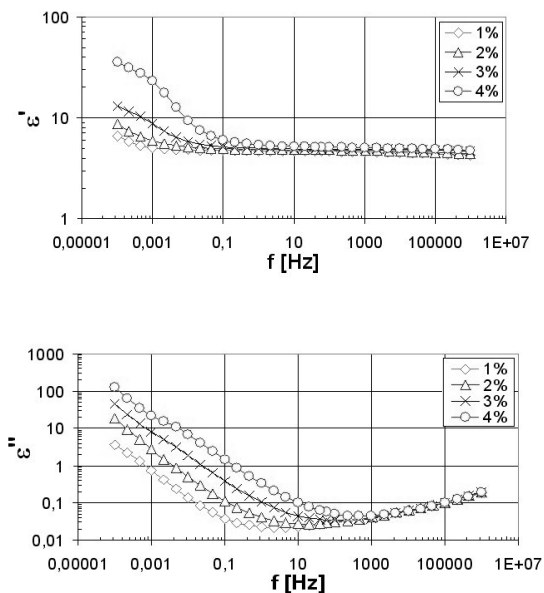
2.4. Interpretacja

Interpretacja wyników w metodzie FDS jest problemem złożonym, gdyż wymaga uwzględnienia szeregu czynników. Poniżej przedstawiono istotne elementy, które mają wpływ na odpowiedź dielektryczną izolacji papierowo-olejowej transformatora, a tym samym wpływają na wiarygodność jej oceny.

Zawilgocenie

Zawilgocenie izolacji celulozowej ma znaczący wpływ na jej odpowiedź dielektryczną. Wraz ze wzrostem zawilgocenia straty polaryzacyjne rosną, jak pokazano to na przykładzie próbek preszpanowych o znanym zawilgoceniu (rys. 1). Z punktu widzenia pomiaru odpowiedzi dielektrycznej bardziej złożonego układu izolacyjnego, jakim jest transformator, należy zdawać sobie sprawę z faktu istnienia nierównomiernego rozkładu zawilgocenia. W tym przypadku pomiar metodą FDS będzie dawał informację o pewnej uśrednionej wartości zawilgocenia i trzeba się liczyć

z tym, że lokalnie zawilgocenie może mieć poziom wyższy. Problem ten omówiono w [6].

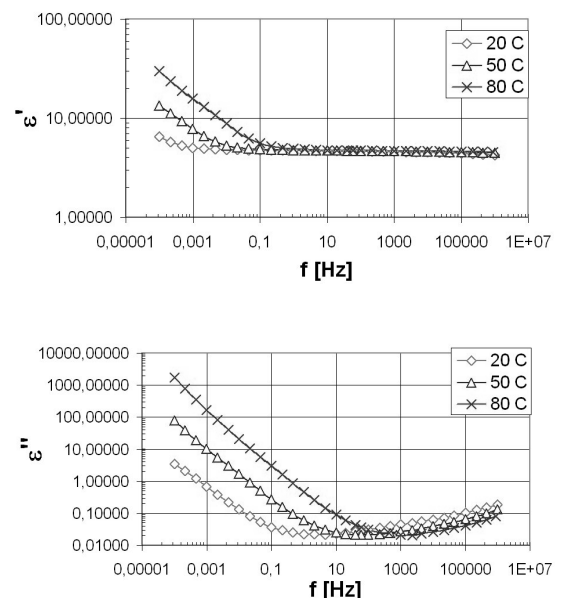


Rys. 1. Zależność przenikalności zespolonej od częstotliwości dla próbek preszpanowych nowych o różnym zawilgoceniu: część rzeczywista ε' i urojona ε'' ; pomiary wykonane w temperaturze 20°C

Fig. 1. Dependence of complex permittivity on frequency for new pressboard samples of different moisture content: real ε' and imaginary part ε'' ; measurements done at temperature 20°C

Temperatura

Równie wyraźny wpływ na odpowiedź dielektryczną, jak zawilgocenie, ma temperatura. Na rysunku 2 pokazano zależność odpowiedzi dielektrycznej próbki preszpanowej od temperatury.



Rys. 2. Zależność przenikalności zespolonej od częstotliwości nowych próbek preszpanowych o zawilgoceniu 1%: część rzeczywista ε' i urojona ε'' ; pomiary wykonane w różnej temperaturze

Fig. 2. Dependence of complex permittivity on frequency for new pressboard samples of 1% moisture content: real ε' and imaginary part ε'' ; measurements done at different temperature

Jak widać, wzrost temperatury powoduje przesunięcie się charakterystyk w stronę wyższych częstotliwości. Zakres tego przesunięcia uwarunkowany jest wartością energii aktywacji (zgodnie z zależnością Arrheniusa). Typowa wartość energii aktywacji przyjmowana dla preszpanu wynosi 0,9 eV.

Prawidłowe wyznaczenie poziomu zawilgocenia wiąże się z wprowadzeniem do programu interpretacyjnego właściwej temperatury, która panowała w trakcie pomiaru. W przypadku dużych jednostek nie jest to łatwe, ponieważ niezwykle trudno jest określić temperaturę, która panuje głęboko, wewnątrz izolacji. Dlatego z praktycznego punktu widzenia najlepiej przyjąć temperaturę zmierzoną w próbce oleju zaraz po pobraniu jej z badanego transformatora (lub pewną uśrednioną wartość temperatury, jeżeli pobrano próbki z kilku miejsc).

Zestarzenie

Jak pokazują wyniki badań, sam rozpad celulozy, czyli zmiana długości łańcuchów (DP), nie znajduje bezpośrednio odzwierciedlenia w zmianach odpowiedzi dielektrycznej. Należy tu raczej mówić o pewnym oddziaływaniu efektów starzenia układu papier-olej. Bezpośrednim czynnikiem mającym wpływ na odpowiedź dielektryczną jest oczywiście wzrost zawilgocenia. Innym ważnym efektem jest starzenie się oleju, które objawia się m.in. wzrostem jego konduktywności. Należy przy tym pamiętać, że oprócz kanałów olejowych w izolacji głównej, olej znajduje się również w papierze i preszpanie, a zatem zmiany jego własności wpłyną również na zmianę odpowiedzi dielektrycznej izolacji stałej [7].

Parametry oleju

Jak wspomniano wyżej zmiana konduktywności oleju ma wpływ na zmianę wypadkowej odpowiedzi dielektrycznej układu papier-olej. Innym parametrem, który ma znacznie w modelowaniu jest przenikalność elektryczna względna. Dla oleju mineralnego najczęściej wynosi ona 2,2.

W przypadku badań izolacji transformatora wartość konduktywności powinno się określić na podstawie pomiarów na próbce oleju pobranego z jednostki, dla założonej przy modelowaniu temperatury. W tym celu należy wykonać pomiar po uprzednim podgrzaniu próbki do właściwej temperatury, lub też przeliczyć otrzymany wynik wg wzoru Arrheniusa (standardowa energia aktywacji dla oleju mineralnego wynosi 0,4 eV).

Parametry papieru

W transformatorze znajdują się różnego rodzaju produkty celulozowe, ale podstawowe znaczenie dla odpowiedzi dielektrycznej izolacji głównej, widzianej przez urządzenie pomiarowe, ma preszpan (znajdujący się w tulejach i klinach), który objętościowo stanowi zdecydowaną większość. Dlatego materiał ten i jego własności będą decydowały o kształcie mierzonej odpowiedzi dielektrycznej.

W przypadku parametrów preszpanu pewne różnice występują między produktami poszczególnych producentów. Na szczęście nie są one na tyle znaczące, aby zmieniać w sposób drastyczny odpowiedź dielektryczną układu. Z pewnością natomiast trzeba wziąć pod uwagę gęstość zastosowanego preszpanu (HD lub LD), bo będzie to miało wpływ na przenikalność elektryczną względną wypadkowej odpowiedzi dielektrycznej [8].

Geometria

Jak opisano wyżej, jednym z parametrów modelu jest procentowa zawartość preszpanu w przestrzeni olejowej (parametry X i Y). Informacja ta jest na ogół utajniona przez producenta, dlatego najczęściej parametry te znajduje się w procesie dopasowywa-

nia krzywych. Pewnym ułatwieniem jest fakt, że wartości te nie występują w pełnym zakresie od 0 do 100%, ale zmieniają się, w zależności od konstrukcji transformatora, w pewnych ograniczonych przedziałach (X: 15-60%, Y: 15-50%).

Drugim parametrem, który bierze się pod uwagę podczas modelowania, to pojemność geometryczna układu, wyznaczana przy częstotliwości 50 Hz. Pojemność ta pozwala przeskalować krzywą modelową do krzywej otrzymanej z badanej jednostki. Ze względu na to, że parametr ten otrzymuje się automatycznie z pomiaru, wyznaczenie go nie stanowi problemu podczas analizy.

3. Podsumowanie

W artykule przedstawiono ideę pomiaru i modelowania w metodzie FDS, która jest jedną z metod polaryzacyjnych pozwalających na wyznaczanie, w sposób pośredni, poziomu zawilgocenia izolacji celulozowej transformatora.

W pracy zwrócono uwagę na praktyczne aspekty interpretacji otrzymanych z pomiaru wyników i złożoność tego procesu. Podkreślono kluczową rolę zastosowania w modelowaniu krzywych wzorcowych, otrzymanych z kompleksowych badań na próbkach, jako podstawy dla wiarygodnej oceny zawilgocenia.

Na podstawie własnych długoletnich doświadczeń stwierdzono, że pomimo istnienia wielu programów do interpretacji uzyskanych wyników, końcowa ocena wciąż wymaga weryfikacji przez eksperta, z dużą wiedzą w tym zakresie.

4. Literatura

- [1] Gielniak J., Moraña H., Neumann S., Ossowski M., Przybyłek P., Walczak K., Mościcka-Grzesiak H.: Warunki wystąpienia „bubble effect” w transformatorze o izolacji papierowo-olejowej, *Energetyka VI/2005*
- [2] Gielniak J., Graczkowski A., Walczak K., Moraña H., Szymański J., Bródka B., Przybyłek P., Nadolny Z., Mościcka-Grzesiak H., Tatarski L., Bandosz N., Ossowski M., Fesser K., Gubański S.: Statystyka zawilgocenia transformatorów, *Biuletyn Branżowy „Energia Elektryczna” – miesięcznik Polskiego Towarzystwa Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej nr 7/2007*
- [3] Gubanski S. M., Boss P., Cseples G., Houhannessian V. D., Filippini J., Guinic P., Gafvert U., Karius V., Lapworth J., Urbani G., Werelius P., Zaengl W. S.: Dielectric response methods for diagnostics of power transformers, Report of the TF 15.01.09, CIGRE, 2001
- [4] Gubanski S.M., Blennow J., Karlsson K., Fesser K., Tenbohlen S., Neumann C., Mościcka-Grzesiak H., Filipowski A., Tatarski L.: Reliable Diagnostics of HV Transformer Insulation for Safety Assurance of Power Transmission System. REDIALTOOL - a European Research Project, Sesja CIGRE, Paryż, 2006
- [5] Gafvert U., Frimpong G., and Fuhr J.: Modelling of dielectric measurements on power transformers, *Proceedings of 37th Sessions (Large High Voltage Electric Systems)*, 1998
- [6] Szymański J., Graczkowski A., Walczak K.: Analiza wpływu niejednorodności zawilgocenia izolacji papierowo-olejowej na spektrum napięcia powrotnego w oparciu o model matematyczny zjawisk polaryzacyjnych, VIII Ogólnopolskie Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć IW'2006, 2006, Poznań-Będlewo
- [7] Gielniak J., Walczak K.: Influence of Oil Parameters and Pressboard Mass Density on Dielectric Response of Oil-Paper Insulating System, *Int. Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials*, Wrocław, 26-28 September 2007