

Program do analizy odpowiedzi częstotliwościowej (FDS) dielektryków

Streszczenie. Artykuł prezentuje program Mora, służący do interpretacji odpowiedzi częstotliwościowej dielektryków, ze szczególnym uwzględnieniem układu izolacyjnego transformatorów energetycznych. Program ten jest alternatywą do programu MODS, dodawanego do urządzenia IDA 200. Mora wykorzystuje bazę danych stworzoną podczas pomiarów na próbkach izolacji celulozowo-olejowej a jego działanie zostało sprawdzone przy zastosowaniu transformatora modelowego „Pancake” oraz transformatora energetycznego o mocy 31,5 MVA i napięciu 110/6,6 kV.

Abstract. Paper presents Mora programme for interpretation of dielectrics frequency response, especially for power transformers insulating systems. The program is an alternative for MODS programme – included on IDA 200. Mora uses database created during measurements on cellulose-oil insulation samples. Its work was checked on model transformer called “Pancake”, and a power transformers 31,5 MVA and 110/6,6 kV. (A programme for analysis of dielectrics frequency response (FDS))

Słowa kluczowe: transformator energetyczny, spektroskopia dielektryczna, ocena zawilgocenia izolacji, model X-Y

Keywords: Power transformer, frequency domain spectroscopy, moisture content evaluation, X-Y model

Wstęp

Wraz ze wzrostem zawartości wody w izolacji stalej wzrasta niebezpieczeństwo uszkodzenia transformatora. Duża zawartość wody w izolacji może być przyczyną zainicjowania zjawiska bąbelkowania (ang. *bubble effect*), a także obniżenia napięcia zapłonu wyładowań nieuzupełnych. Obecność wody dodatkowo przyspiesza proces starzenia izolacji celulozowej. Z tego względu informacja na temat stopnia zawilgocenia transformatora może być pomocna przy podejmowaniu decyzji o jego remoncie i zapobiec poważnej awarii systemu [1, 5].

Pomiar zawilgocenia oleju nie jest trudny, natomiast wyznaczenie zawilgocenia izolacji papierowej następcza bardzo dużo problemów. Bezpośredni pomiar metodą Karla-Fischera nie może być w tym przypadku stosowany, gdyż wymaga pobrania próbek papieru, czego nie da się wykonać bez uszkodzenia transformatora. Dlatego opracowane zostały różne pośrednie metody oceny stopnia zawilgocenia papieru [2-6, 8, 9]. Jedną z nich jest spektroskopia dielektryczna w dziedzinie częstotliwości. Polega ona na pomiarze wielkości charakteryzujących dielektryk, takich jak współczynnik strat dielektrycznych ($\tan \delta$) i zespolona przenikalność elektryczna (ϵ' , ϵ'') w szerokim zakresie częstotliwości napięcia.

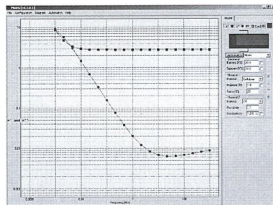


Rys. 1. System diagnostyki izolacji IDA 200

Odpowiednie zinterpretowanie uzyskanych wyników pomiaru daje informację o zawartości wody w izolacji papierowej. W pracy posłużono się urządzeniem IDA 200 (rys. 1) szwedzkiej firmy Komagma. Do urządzenia tego standardowo dołączany jest komercyjny program MODS (rys. 2), służący do interpretacji wyników pomiarów. Pewnym problemem podczas używania MODS-a jest fakt, że baza danych wykorzystywana w tym programie, nie

powstała na podstawie własnych wyników badań autorów programu, lecz jest jedynie rezultatem kompilacji danych literaturowych. Program MODS ma dodatkowo kilka istotnych ograniczeń:

- zaimplementowana w MODS wartość względnej przenikalności elektrycznej oleju transformatorowego jest niezmienna ($\epsilon=2,2$), co uniemożliwia użycie programu do analizy wyników pomiaru na transformatorach izolowanych innym olejem niż mineralny, oraz na transformatorach pozbawionych oleju,
- MODS nie podaje stopnia dopasowania krzywych odpowiedzi dielektrycznej modelu matematycznego transformatora do wyników pomiaru uzyskanych na badanym transformatorze, co nie pozwala ocenić pewności wyznaczonego zawilgocenia izolacji,
- MODS nadaje taką samą wagę wynikiem pomiaru dla każdej częstotliwości pomiarowej, choć wiadomo, że woda w papierze najbardziej wpływa na odpowiedź dielektryczną przy częstotliwości niskiej i wysokiej.



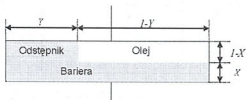
Rys. 2. Okno programu MODS

Program Mora, prezentowany w tej publikacji, nie posiada powyższych ograniczeń, a ponadto korzysta z bazy danych powstałej w trakcie realizacji przez autorów międzynarodowego programu badawczego REDIATool – „Niezwadna diagnostyka wysokonapięciowej izolacji transformatorów dla zapewnienia bezpieczeństwa systemu energetycznego” [7]. Baza danych programu zawiera wzorce odpowiedzi dielektrycznej dla próbek preszpanu

transformatorowego syconego olejem o wilgotności 1 %, 2 %, 3 % i 4 % w temperaturze 20°C, 50°C i 80°C.

Model transformatora

Do analizy odpowiedzi częstotliwościowej powszechnie stosowany jest uproszczony model geometryczny transformatora, tzw. model X-Y, pokazany na rysunku 3. Zakłada się w nim istnienie barier, odstępników i kanałów olejowych, których wymiary odzwierciedlają procentowy udział poszczególnych materiałów (przeszpanu i oleju) w konstrukcji transformatora.



Rys. 3. Model geometryczny izolacji transformatora

Odpowiedź dielektryczna takiego modelu zależy od następujących parametrów:

- częstotliwość napięcia,
- geometria układu,
- zawilgocenie izolacji,
- jakość oleju,
- temperatura.

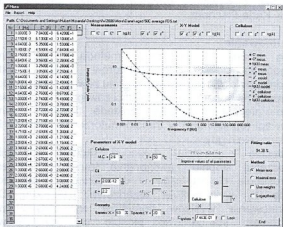
Odpowiedź ta opisana jest wzorem:

$$\hat{\epsilon}(\omega, t) = \frac{Y}{\frac{1-X}{\epsilon_{odstepnik}} + \frac{X}{\epsilon_{bariera}}} + \frac{1-Y}{\frac{1-X}{\epsilon_{olej}} + \frac{X}{\epsilon_{bariera}}}$$

Głównym powodem przeprowadzania analizy odpowiedzi częstotliwościowej układu izolacyjnego jest ustalenie stopnia jego zawilgocenia. Wyznaczanie zawartości wody w izolacji papierowej transformatora polega na znalezieniu takich wartości poszczególnych parametrów modelu X-Y, które najbardziej upodobią obliczoną odpowiedź dielektryczną modelu do odpowiedzi dielektrycznej badanego transformatora.

Program Mora

Program Mora został napisany przy zastosowaniu kompilatora języka Delphi i pracuje pod systemem operacyjnym MS Windows. Przykładowe okno programu przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Okno programu Mora

- tablicy, zawierającej dane pomiarowe badanego transformatora, w której wprowadzane są wartości częstotliwości pomiarowej i odpowiadające jej wartości pojemności zespolonej,
- wykresów odpowiedzi dielektrycznej modelu transformatora oraz odpowiedzi dielektrycznej izolacji transformatora badanego,
- zestawu parametrów modelu X-Y transformatora (M.C. – zawilgocenie celulozy, T – temperatura pomiaru, σ – przewodność oleju, ϵ – przenikalność elektryczna względna oleju, X, Y – parametry geometryczne izolacji, C_{system} – pojemność geometryczna układu izolacyjnego całego transformatora dla największej częstotliwości napięcia pomiarowego).

Użytkownik ma możliwość skorygowania wartości wyników pomiaru oraz wartości parametrów modelu transformatora. Rezultaty wprowadzonych zmian można natychmiast obserwować na wykresie.

Dodatkowo użytkownik programu może wybrać jedną z metod dopasowywania krzywych według odpowiedzi dielektrycznej:

- Mean error – polega na minimalizowaniu średniej względnej różnicy pomiędzy wartościami przenikalności elektrycznej badanego transformatora a modelu X-Y,
- Maximal error – polega na minimalizowaniu największej różnicy pomiędzy wartościami przenikalności elektrycznej badanego transformatora a modelu X-Y,
- Use weights – wybranie tej opcji, między innymi, nadaje większą wagę wartościom przenikalności elektrycznej przy małej częstotliwości, co wynika z faktu, że zawilgocenie izolacji papierowej manifestuje swoją obecność najsilniej właśnie przy niskich wartościach częstotliwości pomiarowej,
- Logarithmic – włącza użycie skali logarytmicznej podczas konieczności interpolowania/ekstrapolowania wartości przenikalności elektrycznej modelu dla częstotliwości, przy której wykonywano pomiary na transformatorze.

| Measurement | Calculation | Measurement | Calculation | Measurement | Calculation |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 4.500E-08 | 4.500E-08 | 6.270E-08 | 2.746E-08 | 5.040E-08 | 3.398E-08 |
| 9.000E-08 | 8.000E-08 | 2.700E-07 | 5.490E-08 | 1.890E-07 | 5.300E-08 |
| 2.250E-07 | 2.000E-07 | 1.800E-07 | 4.200E-08 | 1.600E-07 | 4.427E-08 |
| 4.500E-07 | 4.000E-07 | 2.000E-07 | 4.300E-08 | 1.370E-07 | 4.077E-08 |
| 9.000E-07 | 7.000E-07 | 1.000E-07 | 4.90E-08 | 1.000E-07 | 4.627E-08 |
| 1.800E-06 | 5.000E-06 | 1.700E-06 | 4.90E-08 | 8.200E-07 | 4.050E-08 |
| 3.600E-06 | 5.000E-06 | 8.700E-06 | 3.700E-08 | 5.90E-07 | 3.790E-08 |
| 7.200E-06 | 5.000E-06 | 8.300E-06 | 3.800E-08 | 3.80E-07 | 3.550E-08 |
| 1.440E-05 | 6.000E-05 | 2.300E-05 | 2.20E-08 | 2.20E-07 | 2.400E-08 |
| 2.880E-05 | 4.000E-05 | 1.200E-05 | 1.300E-08 | 1.300E-07 | 1.300E-08 |
| 5.760E-05 | 4.000E-05 | 1.000E-05 | 3.20E-08 | 6.80E-07 | 3.20E-08 |

Rys. 5. Okno programu Mora z przykładowymi wynikami obliczeń

Obsługa programu polega na wczytaniu wyników pomiaru, wpisaniu parametrów modelu X-Y (jeśli są znane) i wybraniu metody dopasowywania krzywych odpowiedzi dielektrycznej. Użytkownik ma do wyboru dwa sposoby obliczeń:

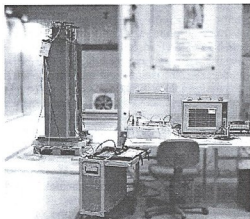
- Fill empty fields only – polegający na cyklicznym losowaniu nieznanymi wartości parametrów modelu X-Y transformatora i zapisywaniu w pamięci komputera wartości dla najlepszego dopasowania krzywych – aż do przerwania tego procesu przez użytkownika programu,

- Check whole range(s) – polegający na sprawdzeniu całego realnego zakresu wartości (z ustalonym krokiem) dla nieznanych wartości parametrów modelu X-Y. Stopień dopasowania do siebie odpowiedzi dielektrycznej badanego transformatora i modelu X-Y podaje parametr „Total fitting”.

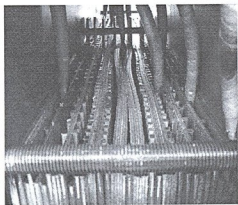
Uzyskane wyniki obliczeń mogą być przedstawione w formie tablicy lub wydrukowane (rys. 5).

Weryfikacja programu

Weryfikacja działania programu Mora była przeprowadzona dwuetapowo. Najpierw zostały wykonane badania na transformatorze modelowym „Pancake”, którego parametry geometryczne, temperatura i zawartość wody w izolacji były ustalone i dokładnie znane (rys. 6 i 7). Transformator ten posłużył do wyznaczenia odpowiedzi dielektrycznej układu izolacyjnego dla 15 różnych ustawień: temperatury, procentowej zawartości barier i procentowej zawartości odstępników. Transformator modelowy był zalany olejem mineralnym o przewodności $\sigma=1,6$ pS/m. Ustawienia transformatora oraz uzyskane wyniki obliczeń przedstawia Tabela 1.



Rys. 6. Stanowisko badawcze z transformatorem modelowym „Pancake”



Rys. 7. Widok wnętrza transformatora modelowego „Pancake”

Dla każdej konfiguracji transformatora modelowego została wykonana spektroskopia dielektryczna w dziedzinie częstotliwości. Uzyskane wyniki pomiarów zostały wprowadzone do obu programów do oceny odpowiedzi dielektrycznej.

Rezultaty analizy potwierdzają poprawność działania programu Mora dla modelu transformatora energetycznego „Pancake”. Te same dane wprowadzone do komercyjnego programu MODS wskazywały zaniżoną zawartość wody w izolacji papierowej – zawilgocenie między 0,4 % a 0,9 %.

Tabela 1

| Nr | T [°C] | X [%] | Y [%] | W (wg K-F) [%] | W (wg Mora) [%] |
|----|--------|-------|-------|----------------|-----------------|
| 1 | 21 | 17 | 15 | 1,1 | 1,0 |
| 2 | 21 | 17 | 15 | | 1,0 |
| 3 | 21 | 17 | 15 | | 1,0 |
| 4 | 55 | 17 | 15 | | 1,1 |
| 5 | 80 | 17 | 15 | | 1,0 |
| 6 | 21 | 28 | 28 | | 1,1 |
| 7 | 21 | 28 | 28 | | 1,0 |
| 8 | 55 | 28 | 28 | | 1,1 |
| 9 | 80 | 28 | 28 | | 1,0 |
| 10 | 21 | 50 | 55 | | 1,1 |
| 11 | 55 | 50 | 55 | | 1,1 |
| 12 | 80 | 50 | 55 | | 1,0 |
| 13 | 21 | 100 | 100 | | 1,0 |
| 14 | 55 | 100 | 100 | | 1,1 |
| 15 | 80 | 100 | 100 | | 1,0 |

Na drugim etapie weryfikacji działania programu Mora użyto go do oceny zawartości wody w transformatorze energetycznym o mocy 31,5 MVA i napięciu 110/6,6 kV. Transformator ten pracował przez 35 lat jako źródło zasilania w kopalni miedzi. W tym okresie nie przechodził on żadnych poważnych remontów oraz nie był przeciążany – typowa temperatura pracy nie przekraczała 70°C. Ponieważ transformator przechodził remont generalny zaistniała możliwość pobrania próbek jego izolacji w celu wyznaczenia w nich zawartości wody metodą fizykochemiczną Karla-Fischera. Transformator po wyłączeniu z ruchu został pozabawiony oleju i przez kilka dni do jego izolacji miało dostęp powietrze atmosferyczne. Jako że cienki papier jest dużo bardziej podatny na absorpcję wody z powietrza niż gruby prespan dlatego uznano, że najbardziej wiarygodna ocena zawilgocenia izolacji celulozowej będzie uzyskana na podstawie badania próbek prespanowych.

Z analizy stopnia zawilgocenia prespanu, metodą Karla-Fischera, wynikały wartości od 1,0 % do 1,8 % (zawilgocenie malało z wysokością miejsca pobrania próbek). Obliczona wartość średnia zawilgocenia wynosiła 1,3 %.

W dalszej kolejności dokonano spektroskopii dielektrycznej w dziedzinie częstotliwości a wyniki pomiarów wprowadzono do programów interpretujących dane pomiarowe.

Program MODS wskazywał na średnie zawilgocenie izolacji transformatora równe 1,2 %, natomiast program Mora, korzystający z tych samych danych pomiarowych, wskazał na zawilgocenie równe 1,0 % – a więc wartości wskazywane przez oba programy są do siebie zbliżone i zbieżne z wynikiem otrzymanym przy zastosowaniu metody Karla-Fischera.

Podsumowanie

Nie istnieje bezpośrednia metoda oceny stanu zawilgocenia izolacji transformatorów. Prosta metoda pośrednia, polegająca na wyznaczeniu zawilgocenia izolacji papierowej na podstawie znajomości zawilgocenia oleju jest bardzo niedokładna, gdyż zakłada istnienie stanu równowagi (*equilibrium*) w transformatorze, co praktycznie nie zdarza się nigdy.

Obecnie najbardziej dokładną metodą pośrednią wyznaczenia stopnia zawilgocenia transformatora jest spektroskopia dielektryczna w dziedzinie częstotliwości. Metodę tą wykorzystuje urządzenie IDA 200. Do interpretowania wyników pomiarów wykonanych tym urządzeniem standardowo stosuje się komputerowy program MODS. W pewnych sytuacjach wyniki analizy danych pomiarowych, przeprowadzanej przy zastosowaniu

tego programu, wydają się znacznie odbiegać od stanu rzeczywistego. Zdarzają się także sytuacje w których programu MODS wręcz nie można zastosować – stąd zaistniała potrzeba stworzenia nowego oprogramowania.

Program Mora zawiera bazę danych uzyskaną w wyniku badań na próbkach preszpanu o różnej zawartości wody w szerokim zakresie temperatury. Uzyskiwane wyniki oceny zawartości wody w izolacji papierowej modelu transformatora „Pancake”, jak i zbadanego transformatora energetycznego, zostały potwierdzone przy zastosowaniu fizyko-chemicznej metody Karla-Fischera.

Program Mora poprawnie ocenia zawilgoconie izolacji celulozowej transformatora.

Praca wykonana w ramach międzynarodowego projektu RADIATOOL NNE5-200-472 współfinansowanego przez Komisję Europejską w ramach 5 Programu Ramowego.

LITERATURA

- [1] Gjaerde A. C., Lundgaard L., Ildstad E., Effect of temperature and moisture on the dielectric properties of oil-impregnated cellulose, 9th International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, 1995
- [2] Gubanski S. M., Boss P., Csepes G., Houhanessian V. D., Filippini J., Guinic P., Gafvert U., Karius V., Lapworth J., Urbani G., Werelius P., and Zaengl W. S., Dielectric response methods for diagnostics of power transformers: Report of the TF 15.01.09, CIGRE, 2001.08.27
- [3] Gubanski S.M., Boss P., Csepes G., Houhanessian V.D., Filippini J., Guinic P., Gafvert U., Karius V., Lapworth J., Urbani G., Werelius P. and Zaengl W.S., Dielectric response

- methods for diagnostics of power transformers, *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, Vol. 19, Issue 3, May-June 2003
- [4] Gafvert U., Adeen L., Tapper M., Ghasemi P. and Jonsson B., Dielectric spectroscopy in time and frequency domain applied to diagnostics of power transformers, *Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Xi'an, China, 21-26.06.2000
 - [5] Zaengl W.S., Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 19, No. 5 (2003)
 - [6] Zaengl W.S., Applications of Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 19, No. 6 (2003)
 - [7] www.radiatool.pl, strona domowa projektu Radiatool
 - [8] Ekanayake C., Graczkowski A., Walczak K, Gubanski S.M., Dielectric Spectroscopy Measurements on Oil Impregnated Paper/Pressboard Samples, *APTADM'2004, 2nd International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials*, Wrocław, 15-17.09.2004
 - [9] Koch M, Tenbohlen S., Stirf T., Advanced online moisture measurements in Power transformers, *CMD 2006 International Conference on condition monitoring and diagnosis*, Changwon, Korea, 02-05.04.2006

Autorzy:

dr inż. Hubert Morańda, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, e-mail: hubert.moranda@put.poznan.pl; Dipl.-Ing. Maik Koch, Universität Stuttgart, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Pfaffenwaldring 47, D-70569 Stuttgart, e-mail: maik.koch@ieh.uni-stuttgart.de