



Barbara FLORKOWSKA, Jakub FURGAŁ, Łukasz JASIŃSKI, Paweł ZYDRÓN

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki

Badania układów izolacyjnych transformatorów metodą napięcia stopniowanego

Streszczenie: Badania układów izolacyjnych transformatorów obejmują zespół metod w diagnostyce off-line i on-line, który jest rozszerzany o nowe metody dla oceny zjawisk i procesów przemian zachodzących w izolacji transformatorów. W artykule opisano badania transformatorów metodą napięcia stopniowanego zastosowaną dla grupy transformatorów po różnych okresach eksploatacji. Nieliniowość charakterystyki prądowo-napięciowej jest podstawą interpretacji wyników pomiarów.

Abstract: (Investigations of transformers insulating systems using of the step voltage method). Investigations of transformers insulating systems include off-line and on-line methods still extended by new methods for assessment of phenomena and aging processes in transformer insulation. Paper describes investigations of set of transformers after different exploitation period using the step voltage method. Non-linearity of current-voltage characteristics is the basis for results interpretation.

Słowa kluczowe: transformatory, układy izolacyjne, badania diagnostyczne.

Keywords: transformers, insulation systems, diagnostic investigations.

Wprowadzenie

W diagnostyce transformatorów energetycznych stosowane są badania metodami fizykochemicznymi, elektrycznymi i akustycznymi, przy czym zasadniczy ich rozwój w ostatnich latach dotyczy drugiej grupy. Badania te obejmują pomiary, których celem jest przede wszystkim sprawdzenie stanu układu izolacyjnego transformatora. W ramach podstawowych badań elektrycznych izolacji transformatorów wykonywane są pomiary rezystancji izolacji R_i , współczynnika strat dielektrycznych $\tan\delta$, wyładowań niezupełnych [7], rozwijane są metody bazujące na wyznaczeniu szerokopasmowej odpowiedzi dielektrycznej układu izolacyjnego [3]. Podstawowy ich podział dotyczy dwóch grup pomiarów: wykonywanych w dziedzinie czasu lub w dziedzinie częstotliwości [1-3]. Pierwsza grupa pomiarów dotyczy badań przy pobudzeniu układu izolacyjnego skokiem napięcia i obserwacji napięcia powrotnego lub prądu polaryzacji/depolaryzacji. Do pomiaru tych wielkości stosowane są przyrządy o szczególnych własnościach metrologicznych poddające obiekt działaniu określonych sekwencji napięcia pobudzającego. W metodach PDC (ang. Polarisation-Depolarisation Current) skutkuje to zmianą przebiegów czasowych prądów rejestrowanych przez odpowiednie układy pomiarowe. Do metod realizowanych przy napięciu stałym należy metoda napięcia stopniowanego (ang. Step-Voltage Method) [4], umożliwiającą zbadanie zakresu liniowości charakterystyki prądowo-napięciowej układu izolacyjnego.

W artykule przedstawiono wyniki badań transformatorów rozdzielczych metodą napięcia stopniowanego, których okresy pracy w sieci elektrycznej zawierały się w przedziale od kilku do kilkudziesięciu lat.

Metoda badań

W schemacie zastępczym układu izolacyjnego transformatora (rys. 1) występują gałęzie reprezentujące straty przewodnościowe i polaryzacyjne, a więc procesy reagowania struktury układu izolacyjnego na działanie czynników zewnętrznych np. zawilgocenie, oraz narażeń wewnętrznych w tym temperatury i pola elektrycznego [6].

Przy napięciu stałym prąd w układzie izolacyjnym zawiera składowe przewodnościową i absorpcyjną, charakteryzującą dynamikę zjawisk polaryzacyjnych.

Najczęściej przebiegi czasowe prądu są aproksymowane następującymi funkcjami:

- funkcją multi-Debye'a :

$$(1) \quad \Phi(t) = \sum_{i=1}^N \Phi_i \cdot \exp(-t / \tau_i)$$

gdzie: τ_i - stała czasowa i-tego procesu relaksacji, N - liczba niezależnych procesów relaksacyjnych;

- funkcją Curie-von Schweidlera (CvS)

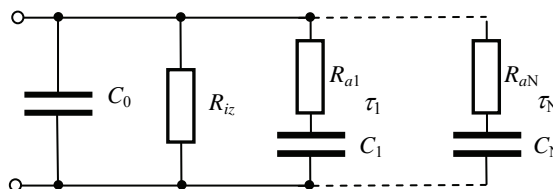
$$(2) \quad \Phi(t) = \Phi_0 \cdot t^{-n}$$

gdzie: n - wykładnik,

- funkcją Kohlrauscha-Williamsa-Wattsa (KWW)

$$(3) \quad \Phi(t) = \Phi_0 \cdot \exp\left[-(t/\tau_i)^\beta\right]$$

gdzie: β, τ - parametry funkcji.



Rys. 1. Schemat zastępczy układu izolacyjnego transformatorów: R_{iz} - reprezentuje straty przewodnościowe, C_0 - pojemność geometryczna układu, $C_1-R_{a1}, \dots, C_N-R_{aN}$ - gałęzie reprezentujące zjawiska polaryzacji o różnych czasach relaksacji (τ_1, \dots, τ_N)

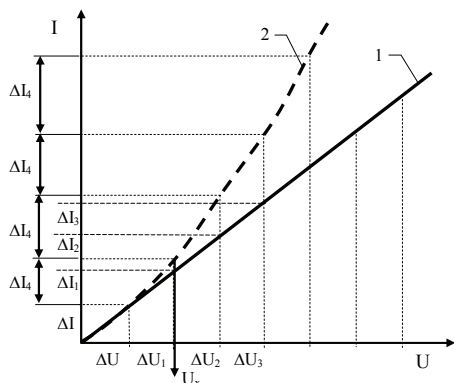
Miarą dynamiki zjawisk polaryzacyjnych są w przypadku modelu opisanego funkcją Debye'a (1) wartości stałych czasowych τ_i , w modelu CvS (2) - wartości wykładnika n , w modelu KWW (3) - wartości wykładnika β i stałej czasowej τ_i . Wartość rezystancji układu izolacyjnego w dobrym stanie nie zależy od napięcia. Gdy składowe prądu absorpcji wykazują liniową zależność od napięcia, wówczas prąd w układzie izolacyjnym jest proporcjonalny do napięcia. Pomiar prądu w izolacji przy napięciu stałym, którego wartość jest stopniowo podwyższana, umożliwia na podstawie charakterystyki $I=f(U)$ stwierdzenie czy jej przebieg jest liniowy do określonej wartości napięcia (rys.2). W przypadku zależności liniowej - stałym przyrostom napięcia odpowiadają stałe przyrosty prądu:

$$(4) \quad \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} = const$$

Nieliniowy - od pewnej wartości napięcia - przebieg zależności $I=f(U)$ oznacza wystąpienie zjawisk, które powiększają składową czynną prądu:

$$(5) \quad I = A U^a$$

gdzie: A - stała, a - wykładnik ($a > 1$)



Rys. 2. Charakterystyka $I=f(U)$: 1 - przebieg teoretyczny, 2 - zależność nieliniowa

Prąd absorpcyjny występuje przy dowolnych zmianach napięcia w układzie izolacyjnym. Przy skokowych zmianach o wartość U_i w różnych momentach czasu t_1, t_2, t_3 (rys. 3a) poszczególne wartości prądu dodają się, a prąd wypadkowy ma przebieg przedstawiony na rysunku 3b. Uwzględniając obecność składowych prądu: przewodnościowej i absorpcyjnej, wartość prądu w dowolnej chwili opisuje wyrażenie:

$$(6) \quad i(t) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{U_i}{R_{iz}} + \frac{U_i}{R_a} \exp\left(-\frac{t_i - t}{\tau_a}\right) \right]$$

gdzie: t_i - czas, w którym następuje zmiana napięcia; t - czas, odpowiadający dowolnej wartości prądu absorpcyjnego; R_{iz} - rezystancja izolacji; R_a - rezystancja absorpcyjna, τ_a - stała czasowa gałęzi relaksacyjnej.

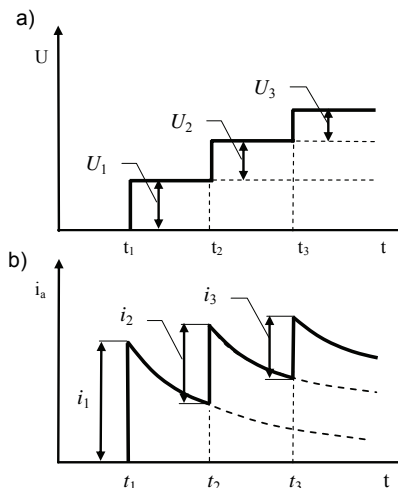
Przy skokowej zmianie napięcia prąd na dowolnym stopniu jest sumą prądu poprzedniego stopnia napięcia oraz prądu występującego podczas działania napięcia na stopniu następnym.

Celem badania układu izolacyjnego transformatora metodą napięcia stopniowanego jest określenie rozbieżności pomiędzy modelem liniowym, dla którego punktem wyjścia jest wartość prądu na najniższym poziomie napięcia – w chwili zakończenia jego działania, a rzeczywistymi wartościami prądu wyznaczonymi w pomiarach na wyższych poziomach napięcia. Model liniowy jest konstruowany w oparciu o ekstrapolację przebiegu prądu na wyższych poziomach działania napięcia. Stopień rozbieżności określany jest na podstawie współczynnika nieliniowości K_i , będącego ilorazem prądu I_m otrzymanego z pomiarów oraz prądu I_l , obliczonego dla modelu liniowego na podstawie odpowiedniego dopasowania funkcjami od (1) do (3).

$$(7) \quad K_i = \frac{I_m}{I_l}$$

Automatyczne mierniki izolacji umożliwiają wykonywanie pomiarów rezystancji izolacji i wyznaczanie np. wskaźnika absorpcji R_{60}/R_{15} i innych. Automatyczny tester izolacji Megger S1-5010, zastosowany w badaniach, umożliwia także pomiary prądu metodą napięcia stopniowanego przy skokowej zmianie napięcia, co 500V do 5 kV. Komputerowy odczyt wyników pomiarów poprzez interfejs

szeregowy RS-232C oraz ich dalsze programowe przetwarzanie, pozwalają na poszerzoną analizę danych [6].

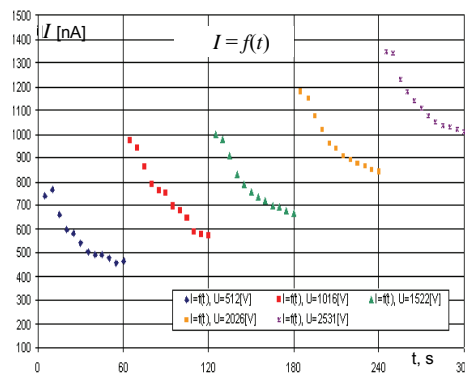


Rys. 3. Metoda napięcia stopniowanego: a) - skokowe zmiany napięcia w chwili t_1, t_2, t_3 ; b) - zmiany prądu absorpcyjnego w czasie

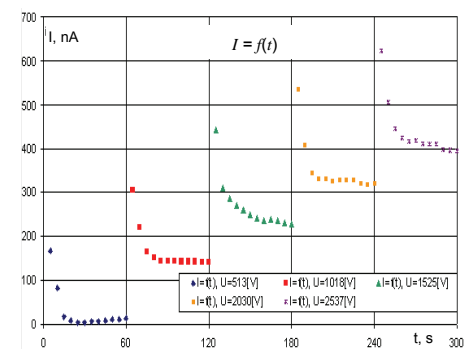
Wyniki badań

Badaniami objęto kilkadziesiąt transformatorów 15/0,4 kV o mocach znamionowych w przedziale od 31 kVA do 630 kVA wyprodukowanych w latach 1968-1995. Rejestrowano wartości prądu w układach izolacji głównej między uzwojeniami. Wyniki rejestracji dla wybranych transformatorów przedstawiono na rysunkach od 4 do 6, przy czym rysunki 4 i 5 dotyczą transformatorów o różnej mocy i w przybliżeniu tym samym czasie eksploatacji, a rysunek 6 – transformatorów o jednakowej mocy i różnych czasach eksploatacji.

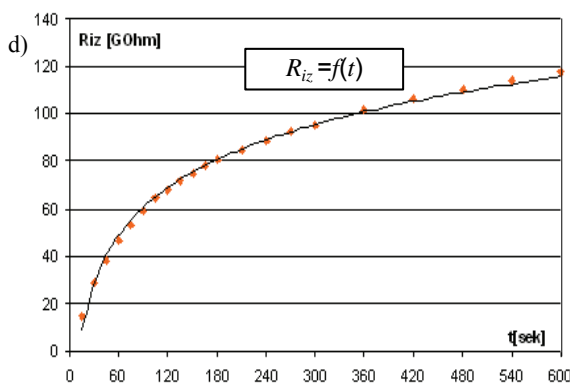
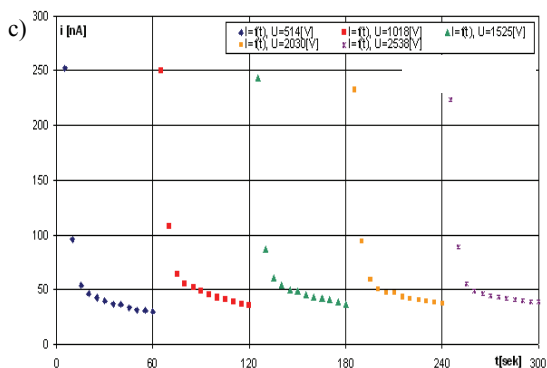
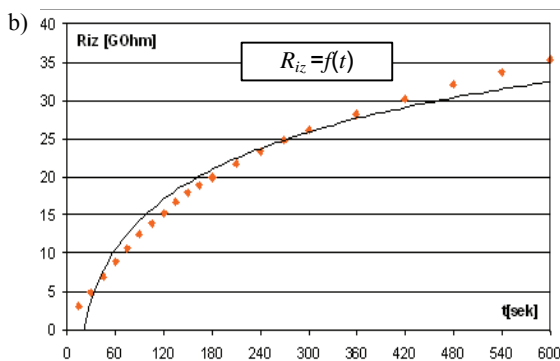
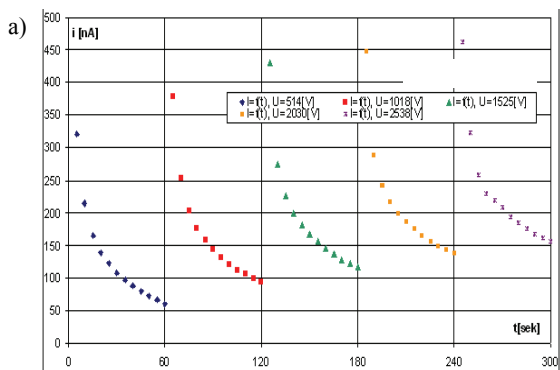
Jako funkcję aproksymującą zastosowano funkcję CvS (2) obliczając odpowiednie parametry w programie Origin 5.0 firmy Microcal Software Inc.



Rys. 4. Przebiegi prądu w układzie izolacyjnym transformatora 400 kVA (1983)



Rys. 5. Przebiegi prądu w układzie izolacyjnym transformatora 63 kVA (1980)



Rys. 6. Wyniki pomiarów dla transformatorów 630 kVA po różnych okresach eksploatacji: a), b) 25 lat; c), d) 6 lat

Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki badań układów izolacyjnych transformatorów metodą napięcia stopniowanego. Badania wykonano dla kilkudziesięciu transformatorów. Zamieszczono przykładowe odpowiedzi prądowe na wymuszenie napięciem stałym stopniowanym, wynikające z przebiegu zjawisk w układach izolacyjnych zależnych od procesów zachodzących w okresie eksploatacji.

Wpływ prądu absorpcji na przebieg wypadkowego prądu w izolacji jest wyraźny w przypadku transformatorów większej mocy, w których efektem narażeń eksploatacyjnych są przemiany strukturalne w oleju i papierze oraz efekty polaryzacyjne o dłuższych stałych czasowych. W badaniach wskaźnika absorpcji prowadzi to do pomiarów wartości R_{300}/R_{15} .

Wartości współczynnika nieliniowości K_i uzyskane w przedziale 1÷2 potwierdzają założenie liniowego wzrostu prądu upływu ze wzrostem napięcia, charakteryzujące stan izolacji jako dobry. Potwierdzeniem są pomiary rezystancji izolacji i wskaźników polaryzacji.

Badania stopniowanym napięciem stałym mogą dać możliwość rozpoznania mechanizmów zjawisk decydujących o procesach degradacji izolacji transformatorów olejowych w oparciu o pomiary prądu (rezystancji) w różnych konfiguracjach pomiarowych [6] wraz z analizą pełnych schematów zastępczych układów izolacyjnych transformatorów.

LITERATURA

- [1] Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów. Energopomiar - Elektryka, Gliwice, 2006
- [2] Florkowska B., Zydrón P., Wysokonapięciowa spektroskopia impedancyjna w badaniach układów izolacyjnych wysokiego napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje*, Rok 2, nr 1'2004, str. 65-68, Warszawa, 2004
- [3] Subocz L., Eksploatacyjne pomiary PDC w izolacji transformatorów. *Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje*, Nr 1, 2005, str. 261 – 264
- [4] Florkowska B., Diagnostyka wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych, UWND AGH, Kraków, 2007 (w druku)
- [5] Jonscher A. K., Dielectric relaxation in solids. *Journal Physics. D: Applications Physics*, No. 32, 1999, pp. 57-70
- [6] Florkowska B., Jackowicz-Korczyński A., Oleksa J., Tarko R., Badania układów izolacyjnych transformatorów napięciem stałym. *Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje*, Nr 1, 2003, str. 70 – 73
- [7] Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P., Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niepełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Wyd. IPPT PAN, Warszawa, 2001

Autorzy:

prof. dr hab. inż. Barbara Florkowska, e-mail: beflor@agh.edu.pl; dr hab. inż. Jakub Furgał, e-mail: furgal@agh.edu.pl; dr inż. Paweł Zydrón, e-mail: pawel.zydron@agh.edu.pl; mgr inż. Łukasz Jasiński; e-mail: lukasz_jasinski@wp.pl Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica, Katedra Elektroenergetyki, 30 -059 Kraków, al. Mickiewicza 30