

Jakub Bernatt, Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka, Artur Polak
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

DIAGNOSTYKA TRANSFORMATORÓW OLEJOWYCH HERMETYCZNYCH I SUCHYCH

DIAGNOSTICS OF HERMETIC AND DRY OIL TRANSFORMERS

Streszczenie: Diagnostyka transformatorów suchych i transformatorów olejowych hermetycznych obejmuje pomiar rezystancji uzwojeń, diagnostykę izolacji głównej i izolacji międzyzwojowej. Diagnostykę izolacji głównej przeprowadza się napięciem zmiennym i napięciem stałym. Napięciem zmiennym wykonuje się pomiar współczynnika stratności $\text{tg}\delta$. Napięciem stałym przeprowadza się pomiar rezystancji R_{60} , oraz w rozszerzonym zakresie badania polaryzacyjne. Badanie izolacji międzyzwojowej polega na rejestracji przebiegu napięcia na uzwojeniu po skokowym wyłączeniu prądu stałego.

Abstract: Oil testing is not performed in hermetic oil transformers. Diagnostics of dry transformers and hermetic oil transformers include winding resistance measurement, diagnostics of main insulation and turn-to-turn insulation. Main insulation diagnostics are performed with alternating voltage and direct voltage. The loss factor $\text{tg}\delta$ is measured with the alternating voltage. The resistance R_{60} is measured with direct voltage, and in the extended range of polarization tests. The test of interturn insulation is based on the registration of the voltage waveform on the winding after a DC switching off.

Słowa kluczowe: transformatory, izolacja główna, izolacja międzyzwojowa, badania diagnostyczne
Keywords: transformers, main insulation, interturn insulation, diagnostic tests

1. Wstęp

Energia elektryczna od elektrowni do odbiorcy jest kilka razy transformowana. W transmisji energii w systemie elektroenergetycznym najlichnieszą grupę stanowią transformatory olejowe hermetyczne i transformatory suche. Transformatory suche są droższe i w energetyce są mniej popularne, są stosowane tylko tam, gdzie przepisy (głównie p. poź) zabraniają stosowania transformatorów olejowych. Założony czas pracy transformatorów wynosi około 30 lat. Cykliczne oględziny i badania diagnostyczne umożliwiają rozpoznanie pojawiających się nieprawidłowości bądź uszkodzeń i umożliwiają ocenę dalszej niezawodnej pracy, planowanie remontu lub wymiany transformatora na nowy. Badania diagnostyczne transformatorów olejowych bazują na analizie gazów rozpuszczonych w oleju, tzw. badania DGA (*Dissolved Gas Analysis*), lecz kadzie są zamknięte i nie są przystosowane do pobierania próbek oleju.

Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów [6] zaleca „transformatory w wykonaniu hermetycznym nie podlegają w wykonaniu pomiarom okresowym (str. 67). Badania okresowe transformatorów suchych Ramowa Instrukcja [6] ogranicza do pomiaru rezystancji izolacji, raz na 5 lat (str. 77). Instrukcje stanowiskowe eks-

ploatacji stacji transformatorowych, np. 630 kVA, 15/0,4 kV w badaniach okresowych, wymieniają pomiary rezystancji uzwojeń i rezystancji izolacji R_{60} nie rzadziej niż co 5 lat. Kryterium oceny transformatora jest wartość rezystancji uzwojeń $\pm 3\%$ w stosunku do wartości średniej trzech faz i rezystancji izolacji $R_{60} > 35 \text{ M}\Omega$ przeliczona na temp. 30°C .

a)



b)



Rys. 1. Transformatory: a) olejowy hermetyczny i b) suchy

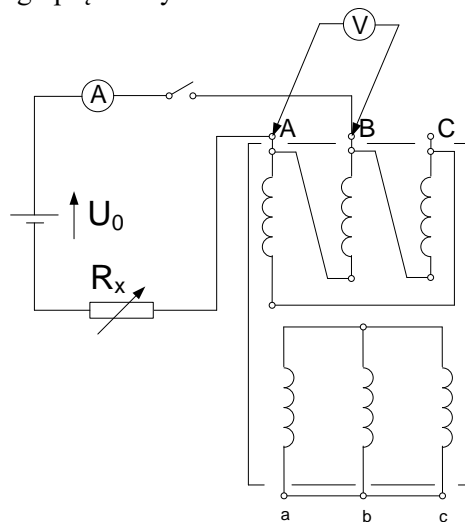
Doświadczenie wskazuje, że transformatory współpracujące z układami energoelektronicznymi: na farmach fotowoltaicznych, zasilające przetwornice częstotliwości nagrzewnic i pieców indukcyjnych „starzeją” się szybciej w stosunku do założonego czasu eksploatacji [2]. Przynajmniej dla tych transformatorów celowe jest rozszerzenie programu badań diagnostycznych.

2. Badanie rezystancji uzwojeń

Pomiar rezystancji uzwojenia jest jednym z podstawowych pomiarów diagnostycznych w transformatorach, pozwala stwierdzić, że połączenia wewnętrzne uzwojenia są dobre. Uzwojenie transformatorów ma rezystancję i indukcyjność. Obydwa te parametry są rozłożone na długości przewodów i nie da się ich fizycznie rozdzielić. Indukcyjność determinuje stany nieustalone w czasie załączania napięcia i wyłączenia prądu stałego. Napięcia indukowane w uzwojeniach przy wyłączaniu prądu stałego mogą być niebezpieczne: dla ludzi, przyrządów pomiarowych i dla układu izolacyjnego uzwojenia. Najbardziej narażona na porażenie elektryczne jest osoba mierząca napięcie bezpośrednio na wyprowadzeniach uzwojenia. Przy pomiarze rezystancji uzwojeń dolnego napięcia DN transformatora należy zewrzeć uzwojenia górnego napięcia GN i odwrotnie. Zwarcie zmniejsza indukcyjność uzwojenia, co wydatnie skraca czas ustalania się prądu po załączeniu napięcia stałego i zmniejsza przepięcia w czasie wyłączenia prądu stałego.

Pomiar rezystancji uzwojenia przeprowadza się mostkiem pomiarowym, na przykład Thomsona-Kelvina, bądź metodą techniczną prądem sta-

łym. Przy pomiarze metodą techniczną należy zwrócić uwagę na dobrze dobrane zakresy pomiarowe przyrządów i układ poprawnie mierzonego prądu – rys. 2.



Rys. 2. Pomiar rezystancji uzwojeń metodą techniczną

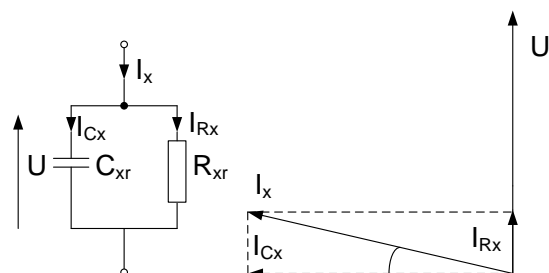
Wyniki pomiarów porównujemy z wynikami podanymi w dokumentacji producenta i z wynikami z poprzednich badań. Na przykład Norma Branżowa [10] podaje, że rezystancja poszczególnych faz nie może różnić się więcej niż 5%.

3. Badanie izolacji głównej

Badanie izolacji głównej przeprowadza się napięciem przemiennym i napięciem stałym. Napięciem przemiennym mierzy się współczynnik stratności $\text{tg}\delta$. Napięciem stałym przeprowadza się pomiary polaryzacyjnej izolacji.

3.1. Badanie układu izolacyjnego napięciem przemiennym

W diagnostyce transformatora napięciem przemiennym bada się współczynnik stratności $\text{tg}\delta$. Schemat zastępczy układu izolacyjnego upraszcza się do dwójnika o parametrach skupionych C_x , R_x , połączonych równolegle, rys. 3.



Rys. 3. Definicja kąta stratności δ na równoległym schemacie zastępczym układu izolacyjnego

W układzie równoległym współczynnik stratności $\text{tg}\delta$:

$$\text{tg}\delta_{\%} = \frac{I_{Rx}}{I_{Cx}} 100\% = \frac{1}{\omega R_x C_x} 100\% \quad (1)$$

W tabeli 1 zestawiono przykładowe wyniki badań diagnostycznych współczynnika stratności $\text{tg}\delta$ transformatora o parametrach znamionowych 160 MVA, GN-220 kV, DN-15,75 kV, nowego i w kolejnych latach eksploatacji [3].

Tabela 1. Zestawienie współczynnika stratności $\text{tg}\delta$ transformatora [3]

| Czas eksploatacji | $\text{tg}\delta_{\%}$ | | Pojemność pF |
|-------------------|------------------------|-------------|---|
| | GN – (DN+Z) | DN – (GN+Z) | |
| Lata | | | |
| 0 | 0,58 | 0,40 | $C_{\text{GN-DN}} = 8390$ $C_{\text{GN-(DN+Z)}} = 16120$ $C_{\text{DN-(GN+Z)}} = 31890$ |
| 1 | 0,80 | 0,49 | |
| 5,5 | 1,24 | 0,76 | |
| 11,2 | 1,99 | 1,46 | |
| 16 | 2,60 | 1,94 | |
| 22,5 | 4,89 | 3,85 | |

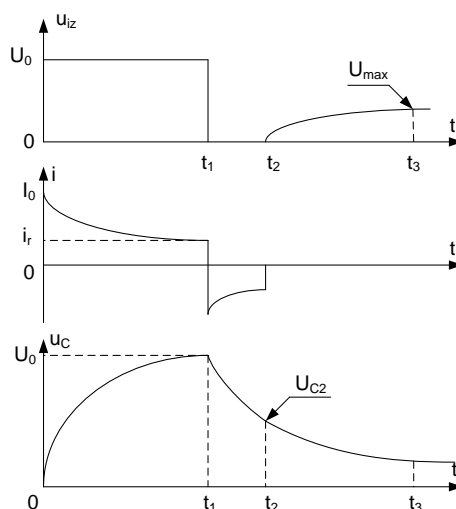
Wyniki zamieszczone w tabeli 1 są dobrą ilustracją postępującej degradacji izolacji papierowo – olejowej transformatora. Prowadzone równoległe pomiary gazów rozpuszczonych w oleju wykazały, że wskaźniki te, po 16 latach eksploatacji, osiągnęły już wartości uznawane w diagnostyce za graniczne.

3.2. Badanie układu izolacyjnego napięciem stałym

Badania układów izolacyjnych napięciem stałym nazywane są badaniami polaryzacyjnymi i obejmują trzy próby:

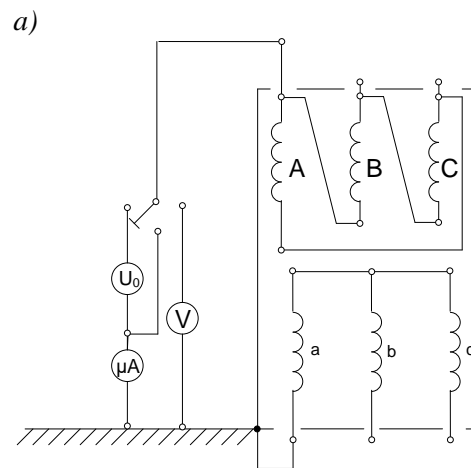
1. załączenie napięcia stałego U_0 na rozładowany układ izolacyjny i rejestrację prądu $I_p(t)$ do wartości ustalonej,
2. w chwili t_1 odłączenie napięcia U_0 , zwarcie układu izolacyjnego i rejestrację prądu zwarcia $I_z(t)$,
3. w czasie ($t_2=t_1+\Delta t$) rozwarcie układu izolacyjnego i rejestracja odbudowy napięcia $U_{od}(t)$ na układzie izolacyjnym, nazywanego w literaturze napięciem powrotnym.

Podczas prób izolacji jednego z uzwojeń pozostałe uzwojenia należy dołączyć do masy. Przebiegi napięcia i prądu ilustruje rys. 4, a pomiary przeprowadza się w układzie jak na rys. 5a.

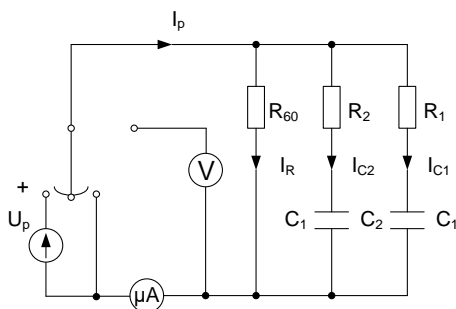


Rys. 4. Przebiegi: napięcia na układzie izolacyjnym $u_{iz}(t)$, prądu ładowania $i(t)$ i napięcia na pojemności układu izolacyjnego $u_c(t)$

Układ izolacyjny jest rozłożony i zinterpretowanie jego polaryzacji schematem zastępczym o parametrach skupionych jest dyskusyjne, np. w publikacji [11] przedstawiono kilkanaście różnych schematów zastępczych. W tym artykule wykorzystamy schemat zastępczy układu izolacyjnego zawierający trzy gałęzie równoległe, jak na rys.5b. Rezystancja R_{60} reprezentuje prąd czynny I_R płynący przez układ izolacyjny (prąd upływu) w stanie ustalonym. Rezystancja R_1 i pojemność C_1 determinują prąd nieustalony płynący skrośnie przez układ izolacyjny. Rezystancja R_2 i pojemność C_2 determinują prąd płynący po powierzchni układu izolacyjnego. Rezystancja R_2 ogranicza skok prądu do nieskończoności w chwili załączenia napięcia stałego U_0 . Według tego podziału $R_1 \gg R_2$ i $C_1 \gg C_2$.



b)



Rys. 5. Badania polaryzacyjne układu izolacyjnego: a) układ pomiarowy, b) schemat zastępczy

Schemat zastępczy z rys. 5 wykorzystamy do wyjaśnienia badania polaryzacyjnego układu izolacyjnego w pełnym zakresie.

Ad. 1. Skokowe załączenie napięcia stałego

$$u_p = U_0 \mathbf{1}(t) \quad (2)$$

Przebieg prądu opisuje równanie

$$i_p = I_R + i_{c1} + i_{c2} \quad (3)$$

$$i_p = I_R + (I_{c1(t=0)} - I_R) e^{-\frac{t}{\tau_1}} + (I_{c2(t=0)}) e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4)$$

$$I_R = \frac{U_0}{R_{60}} = I_{60} \quad (5)$$

$$I_{c1(t=0)} = \frac{U_0}{R_1} \quad (6)$$

$$I_{c2(t=0)} = \frac{U_0}{R_2} \quad (7)$$

$$\tau_1 = R_1 C_1 \quad (8)$$

$$\tau_2 = R_2 C_2 \quad (9)$$

Indeks „60” jest symbolem, oznacza stan ustalony ($t=\infty$), w praktyce może to być czas ($t=60 \div 600$)s.

Elektryczna stała czasowa τ_2 jest bardzo krótka ($\tau_2 \ll \tau_1$) i odwzorowuje czasowo krótki impuls prądu $i_{p(t=+0)}$ po załączeniu napięcia ($t=+0$).

Do dalszej analizy przebiegów prądu i napięcia istotny jest przebieg napięcia na pojemności C_1 , przebieg nie mierzalny, gdyż parametry schematu zastępczego są rozłożone

$$u_{c1} = U_0 (1 - e^{-t/\tau_1})$$

W stanie ustalonym ($t=\infty$) napięcie na pojemności $U_{c1}=U_0$

Ad. 2. Zwarcie układu izolacyjnego

Założenia: $R_2=0$ i $C_2=0$, czas t liczymy od zera. Po odłączeniu napięcia U_0 i zwarcia układu izolacyjnego, przebieg prądu zwarcia

$$i_z = \frac{U_0}{R_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (10)$$

i napięcie na pojemności C_1

$$u_{c1} = U_0 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (11)$$

Zwarcie wyłączamy w czasie ($t=t_z$). W chwili wyłączenia zwarcia napięcie na pojemności C_1 wynosi

$$U_{c1(t=t_z)} = U_0 e^{-\frac{t_z}{\tau_1}} \quad (12)$$

Ad. 3. Odbudowa napięcia

Założenia: $R_{60}=\infty$ i $R_2=0$, ponownie czas t liczymy od zera.

Po wyłączeniu zwarcia, przebieg prądu w układzie izolacyjnym

$$i_{c2} \approx -i_{c1} = \frac{U_{c1(t=t_z)}}{R_1} e^{-\frac{t}{\tau_3}} \quad (13)$$

$$\tau_3 = R_1 (C_1 + C_2) \quad (14)$$

Przy podanych założeniach przebieg napięcia, rejestrowany przez woltomierz elektrostatyczny o rezystancji $R_v=\infty$, opisuje równanie napięcia na pojemności C_2

$$u_{c2} = U_{c2(t=t_{od})} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_3}} \right) \quad (15)$$

t_{od} jest to czas po którym prąd

$$i_{c1(t>t_{od})} = 0 \quad (16)$$

a napięcie na pojemności C_1 i C_2 będzie równe napięciu maksymalnemu. Jest to napięcia na układzie izolacyjnym

$$U_{c1(t=t_{od})} = U_{c2(t=t_{od})} = U_{od \max} \quad (17)$$

Napięcie $U_{od\ max}$ można ocenić z bilansu energii dla czasu $t=t_z$ i dla $t=t_{od}$

$$W_{c1(t=t_z)} = W_{c1(t=t_{od})} + W_{c2(t=t_{od})} + R_1 \int_t^{t_{od}} (i_{c1})^2 dt \quad (18)$$

Jeśli pominiemy energię rozpraszaną w rezystancji R_1 przyjmując

$$R_1 \int_t^{t_{od}} (i_{c1})^2 dt = 0 \quad (19)$$

to

$$0,5C_1(U_{c1(t=t_z)})^2 = 0,5C_1(U_{c1(t=t_{od})})^2 + 0,5C_1(U_{c2(t=t_{od})})^2 \quad (20)$$

$$U_{od\ max} = \sqrt{\frac{C_1}{C_1 + C_2}} U_{c1(t=t_z)} \quad (21)$$

Rozproszenie energii na rezystancji R_1 obniża nieco wartość napięcia $U_{od\ max}$.

Ponieważ $R_{60} \neq \infty$ z upływem czasu układ izolacyjny będzie się rozładowywał i napięcie będzie się zmniejszać do zera. Elektryczna stała czasowa samorozładowania jest jednak duża

$$\tau_3 = (R_{60} + R_1)C_1 \quad (22)$$

Przykład

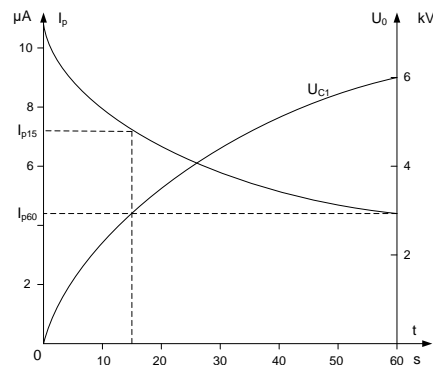
Przebieg badań zilustrujemy na transformatorze o danych znamionowych: 400 kVA, 6300V/400V, 36,7A/577 A, układ połączenia uzwojeń Dy – rys. 5a.

Pierwszy pomiar obejmuje rejestrację przebiegu prądu upływu i_p po skokowym załączeniu, na rozładowany układ izolacyjny uzwojenia GN, napięcia $U_0=6000$ V. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 2 i na rys. 6a. Po czasie 60s przebieg prądu upływu ustabilizował się.

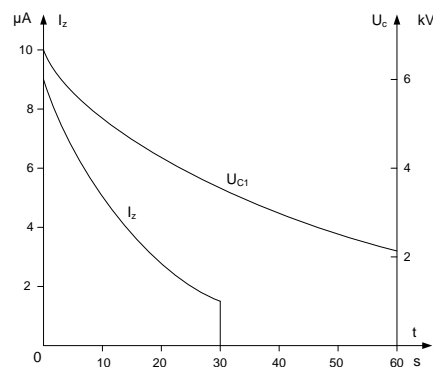
Tabela 2. Charakterystyka prądu upływu izolacji uzwojenia pierwotnego ($U=6000V$)

| | | | | | | | | | |
|-------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| t | s | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| i_p | μA | 8,95 | 7,42 | 6,70 | 6,21 | 5,81 | 5,45 | 5,29 | 5,11 |

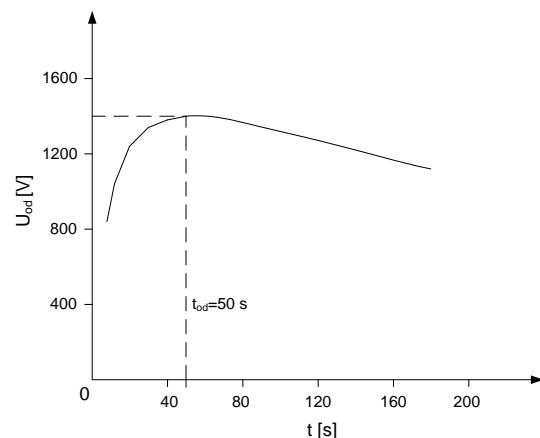
a)



b)



c)



Rys. 6. Pomiar polaryzacyjny układu izolacyjnego GN transformatora: a) po załączeniu napięcia stałego $U_0=6\ 000$ V, b) po zwarciu $t_z=30$ s, c) odbudowa napięcia $U_{odmax}=1\ 400$ V, $t_{od}=50$ s

Z zarejestrowanych przebiegów obliczamy: Rezystancje

$$R_{60} = \frac{U_0}{I_{p60}} = \frac{6\ 000}{5,11} \cdot 10^6 = 1,17\ G\Omega \quad (23)$$

$$\frac{I_{p15}}{I_{p60}} = \frac{6,7}{5,11} = 1,3 \quad (24)$$

$$\frac{R_{60}}{U_N} = \frac{1,17}{6\,000} \cdot 10^9 = 195 \text{ k}\Omega/\text{V} \quad (25)$$

Przebieg zwarcia przedstawiono na rys. 6b. Czas zwarcia

$$t_z = 30 \quad (26)$$

Odbudowę napięcia, po wyłączeniu zwarcia przedstawia rys. 6c

$$U_{od\ max} = 1380 \text{ V} \quad (27)$$

$$t_{od} = 50 \text{ s} \quad (28)$$

Wielkości wyróżnione (pogrubione) są parametrami kryterialnymi układu izolacyjnego. One determinują stan techniczny układu izolacyjnego uzwojeń transformatora. Można je porównywać z wynikami badań wzorcowych transformatora nowego (*fingerprint*) i z wynikami z badań w latach poprzednich.

Identyczne badania wykonuje się dla izolacji uzwojenia DN.

4. Badanie izolacji zwojowej

Na tym samym transformatorze przeprowadzono badania izolacji zwojowej. Badania przeprowadzono metodą fali rozmytej. Metoda polega na zasilaniu danego uzwojenia prądem stałym i w stanie ustalonym, skokowym wyłączeniu prądu I_0

$$i = I_0(1 - \mathbf{1}(t)) \quad (29)$$

i rejestrację przebiegu napięcia na uzwojeniu zasilanym.

Prąd I_0 wzbudził w rdzeniu stały strumień magnetyczny Φ_0 , który po wyłączeniu prądu zanika do zera. Strumień indukuje w uzwojeniu napięcie transformacji

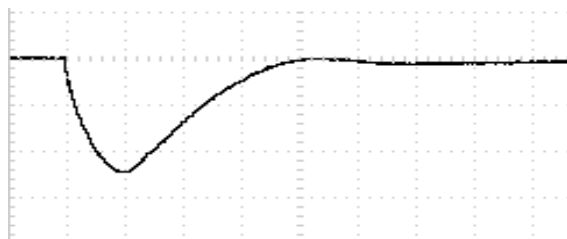
$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (30)$$

N jest liczbą zwojów uzwojenia badanego.

Indukowane napięcie jest rozłożone równomiernie na wszystkie zwoje. Szybkość zanikania strumienia zależy od obwodów w których mogą płynąć prądy. Są to prądy wirowe w blachach rdzenia i prądy płynące przez izolację zwojową. Przykładowe badania przeprowadzono na uzwojeniu DN transformatora suchego Y_{n0}

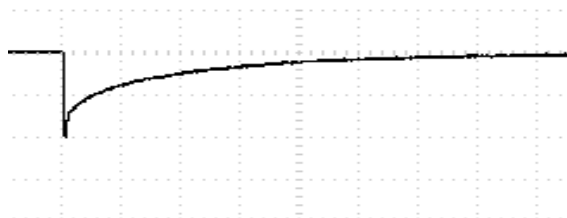
630 kVA, 6000 +/- 5% V, 60,6A, 525V, 692,8A, $u_{z\%}=6,15\%$. Na rysunku 7 Przedstawiono zarejestrowany przebieg napięcia, po wyłączeniu prądu $I_0=50 \text{ mA}$, transformatora nowego (rys. 7a) i z założonym na uzwojeniu zwoju zwartego (rys. 7b)

a)



Skala napięcia 500V/dz, skala czasu 0,25 ms/dz

b)



Skala napięcia 200 V/dz, skala czasu 2,5 ms/dz

Rys. 7. Przebieg napięcia U_a po wyłączeniu prądu 50mA, zasilana faza „a”: a) uzwojenie nowe, b) zwarty zwoj na kolumnie „A”

Przez osłabioną izolację międzyzwojową płyną większe prądy upływu. Metoda fali rozmytej umożliwia ocenę stanu technicznego izolacji międzyzwojowej.

5. Wnioski

Po latach eksploatacji transformatora może wzrosnąć rezystancja połączeń wewnętrznych w uzwojeniach i może ulec degradacji izolacja uzwojeń. Prosty pomiar rezystancji uzwojeń umożliwia wykrycie pogorszonego stanu wszelkich połączeń wewnętrznych w uzwojeniu. Diagnostyka układu izolacyjnego jest bardziej złożona. Ramowa Instrukcja [6] podaje, że oleju w transformatorach olejowych hermetycznych nie bada się. Diagnostykę izolacji głównej uzwojeń w transformatorach suchych i olejowych hermetycznych przeprowadza się napięciem zmiennym i napięciem stałym. Natomiast diagnostykę izolacji zwojowej przeprowadza się prądem stałym.

Napięciem zmiennym wykonuje się pomiar współczynnika stratności $\text{tg}\delta$. Standardowym pomiarem napięciem stałym jest pomiar rezy-

stancję izolacji R_{60} . Natomiast rozszerzony zakres obejmuje badania polaryzacyjne, a najważniejszym parametrem jest odbudowa napięcia na układzie izolacyjnym U_{odmax} . Badanie izolacji międzyzwojowej polega na rejestracji przebiegu napięcia na uzwojeniu po skokowym wyłączeniu prądu stałego.

6. Literatura

- [1]. Baran S.: Diagnostyka rdzenia transformatorów rozdzielczych 15/0,4 kV, rozprawa doktorska, *Politechnika Gdańska*, 2009.
- [2]. Glinka T., Olech W., Kulesz B., Sikora A.: Identification of operating conditions of transformer working in power electronics circuit. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, Nr 1/2014 str. 190-192
- [3]. Kazimierski M., Olech W.: Diagnostyka techniczna i monitoring transformatorów. ISBN: 978-83-916040-5-2. Wydawnictwo: *ZPBE Energopomiar-Elektryka Sp. z o. o.*, Gliwice 2013r.
- [4]. Kuczyński K.: Diagnostyka transformatorów rozdzielczych SN/nn – wprowadzenie. *Elektro.info*. Nr 4/2019
- [5]. Matulewicz W.: Diagnostyka transformatorów energetycznych, *Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej*, 1998.
- [6]. Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów. ISBN 978-83-916040-4-5. *ZPBE Energopomiar-Elektryka*. Gliwice 2012.
- [7]. Skrzynecki E.: Pomiary rezystancji izolacji, www.sonel.pl
- [8]. *PN-IEC 76-1/Ak:1998*. Transformatory. Wymagania ogólne.
- [9]. *PN E-04700:1998*. Urządzenia i układy elektryczne. Wytyczne przeprowadzania pomontażowych badań odbiorczych.
- [10]. *BN-90. 9395-01/09* Stacje prostownikowe dla elektrycznej trakcji komunikacji miejskiej. Badania po montażowe podstawowych urządzeń elektroenergetycznych trakcji tramwajowej i trolejbusowej.
- [11]. Вайда Г.: Исследования изоляции. *Энергия*. Москва. 1968г.