

Marek LEPICH*

ANALIZA CHARAKTERYSTYK CZASOWYCH PRĄDU DEPOLARYZACJI PRÓBEK IZOLACJI ARAMIDOWO- OLEJOWEJ POD KĄTEM OCENY WPLYWU STOPNIA ICH ZESTARZENIA

W artykule przedstawiono laboratoryjne wyniki badań próbek izolacji aramidowo-olejowej z wykorzystaniem metody PDC (Polarization and Depolarization Current). Ponadto przedstawiona została metodologia sporządzania próbek o zróżnicowanym stopniu ich degradacji zawierająca proces przyśpieszonego starzenia oraz analiza uzyskanych wyników pomiarów na podstawie rodzin charakterystyk wyznaczonych w oparciu o pomiary prądu depolaryzacji. Przedstawiona została także funkcja umożliwiająca aproksymację uzyskanych na podstawie pomiarów charakterystyk o wysokim współczynniku ich odwzorowania.

SŁOWA KLUCZOWE: transformatory dużych mocy, izolacja, aramid

1. WSTĘP

Obecna sytuacja ekonomiczno-gospodarcza na świecie wymusza na użytkownikach sieci energetycznych podejmowanie kroków umożliwiających obniżenie kosztów ich eksploatacji. Jednym ze sposobów umożliwiających osiągnięcie powyższego celu jest konstruowanie urządzeń z trwalszych materiałów jak i prawidłowe ich eksploatowanie poprzez stałą kontrolę ich kondycji. Dlatego coraz częściej izolacja stała wykonywana dotychczas z celulozy zastępowana jest komponentami aramidowymi. Główną przyczyną awarii transformatorów dużych mocy jest uszkodzenie izolacji spowodowane jej zesterzeniem. Dlatego kluczową sprawą wydaje się być opracowanie metody umożliwiającej szacowanie stopnia degradacji izolacji stałej. Jednym ze sposobów bezinwazyjnego szacowania stanu izolacji jest metoda oparta na analizie prądów depolaryzacji [1, 2, 7].

2. SPOSÓB WYKONANIA POMIARÓW

Po umieszczeniu rozładowanej izolacji w polu napięcia stałego możemy zaobserwować powstanie prądu związanego ze zjawiskiem polaryzacji

* Politechnika Opolska.

dielektryka. Jego wartość będzie zależna od stałej czasowej wynikającej z przewodności warstwy izolacyjnej oraz jest związana z aktywacją różnych procesów polaryzacji/depolaryzacji w danym materiale izolacyjnym. Powstający w ten sposób prąd nazywa się prądem polaryzacji, którego wartość zanika wraz z procesem porządkowania dipoli występujących w materiale izolacyjnym, aż do momentu osiągnięcia stanu równowagi. Po usunięciu wymuszenia następuje proces depolaryzacji polegający na zjawisku relaksacji, który wymusza przepływ prądu w przeciwnym kierunku. Przebiegi prądów i napięć w metodzie PDC pokazano na rysunku 1. Wartość prądu ściśle powiązana jest z przewodnością izolacji, większa przewodność charakteryzuje się wyższymi wartościami płynącego prądu [2, 3]. Przy założeniu że badana izolacja jest całkowicie rozładowana, a wartość przyłożonego napięcia jest zgodna jak poniżej:

$$U(t) \begin{cases} 0 & t > 0 \\ U_0 & 0 \leq x \leq t_c \\ 0 & t > t_c \end{cases} \quad (1)$$

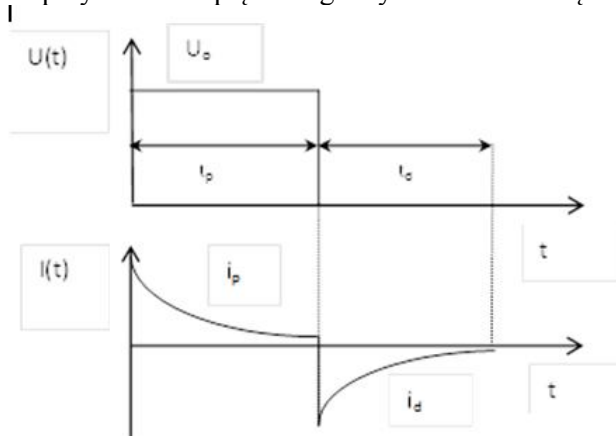
prąd polaryzacji można zatem wyrazić jako [4]:

$$i_p(t) = c_0 u_0 \left[\frac{\sigma}{\epsilon r} + f(t) \right] \quad (2)$$

Dla izolacji złożonej z więcej niż jednego rodzaju materiału σ , ϵr oraz $f(t)$ reprezentują odpowiednio: przewodność kompozytu, przenikalność i funkcję odpowiedzi dielektrycznej tego niejednorodnego materiału. Podczas odłączenia napięcia i zwarcia obwodu uzyskujemy prąd depolaryzacji o wartości [4]:

$$i_d(t) = c_0 u_0 [f(t) - f(t + t_c)] \quad (3)$$

gdzie t_c jest czasem przyłożenia napięciowego wymuszenia zewnętrznego.

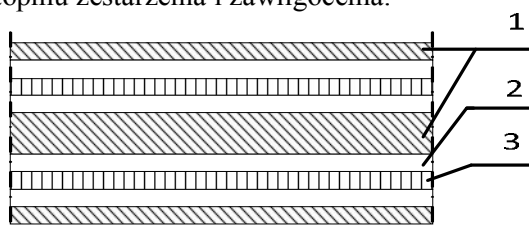


Rys. 1. Przebieg prądów i napięć występujące podczas cyklu pomiarowego PDC

Z pomiarów prądu polaryzacji i depolaryzacji możliwe jest wyznaczenie stałoprądowej przewodności σ , badanego obiektu. Jeżeli badany obiekt jest pod wpływem pola stałoprądowego odpowiednio długo, równanie (2) i równanie (3) mogą być połączone i przewodność stałoprądowa może być wyrażona jako:

$$\sigma \approx \frac{\varepsilon_0}{c_0 u_0} [i_p(t) - i_d(t)] \quad (4)$$

Próbki wykorzystane do badań wykonano z papieru aramidowego Nomex[®] typu 410 o grubości 50 μm . Do nasycenia próbek wykorzystano świeży mineralny olej izolacyjny firmy Nynas typu Nytro 10GBN. Papier aramidowy przed impregnacją został poddany suszeniu oraz przyspieszonemu starzeniu termicznemu i kontrolowanemu wagowo zawilgacaniu. Przyspieszony proces starzenia uzyskano poprzez degradację termiczną próbek przed impregnacją olejem w wyniku wygrzewania ich w komorze w temperaturze 250°C przez odpowiedni, wcześniej zdefiniowany czas (tabela 1). Uzyskano w ten sposób sześć szeregów termicznie zdegradowanych próbek począwszy od zerowej degradacji (papier nowy niezestarzony) po próbki starzone kolejno co pięćdziesiąt godzin, aż do próbek o najwyższym stopniu zesterzenia (papier starzony przez 250 h). Zróżnicowane zawilgocenie próbek uzyskano poprzez umieszczenie próbek w próżni z temperaturze 100°C, a następnie zawilgacaniu ich na skutek pochłaniania wody z atmosfery. Szacowanie zawilgocenia było prowadzone poprzez kontrolę zmieniającej się wagi próbek, które magazynując wodę zwiększały swoją wagę. Przyjęto, że na każdy 1% zwiększonej wagi w badanym materiale występował jedno procentowy wzrost zawilgocenia. Uzyskano w ten sposób 24 próbki o zróżnicowanym stopniu zesterzenia i zawilgocenia.



Rys. 2. Poglądowy sposób przygotowania próbki. 1- elektroda wysokiego potencjału, 2- izolacja aramidowo-olejowa, 3- elektroda niskiego potencjału

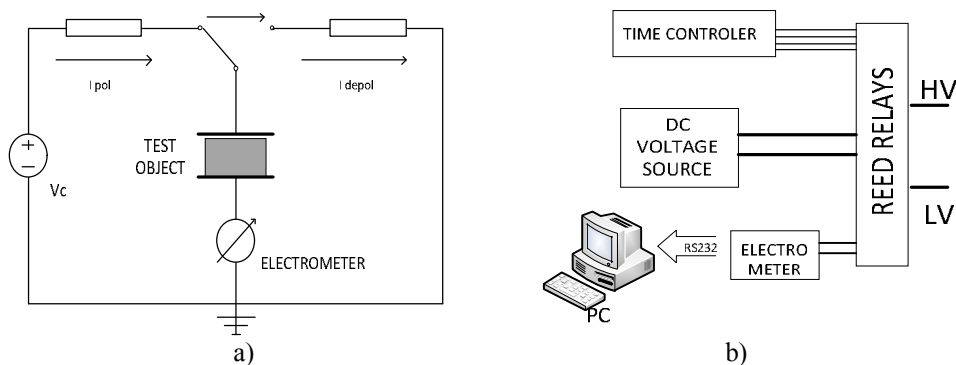
Próbki izolacji aramidowej wykonano w formie pasów o wymiarach 135 mm x 700 mm, nawiniętych w formie zwijki na elektrodę niskiego potencjału, oddzielonych elektrodą wysokiego potencjału (rys. 2). Oznaczenie kolejnych próbek przyjęto zgodne z Tabelą 1.

Układ pomiarowy oraz zasadę jego działania przedstawiono na rysunku 3. Jako źródło napięcia stałego wykorzystano miernik dużych rezystancji Megger BM25.

Tabela 1. Sposób oznaczania próbek izolacji aramidowo-olejowej

IA	IB	IC	ID
IIA	IIB	IIC	IID
IIIA	IIIB	IIIC	IIID
IVA	IVB	IVC	IVD
VA	VB	VC	VD
VIA	VIB	VIC	VID

A- zawilgocenie początkowe (bezpośrednio po osuszeniu papieru, ok. 0,5%)
 B- zawilgocenie A plus wzrost wagi o 1%
 C- zawilgocenie A plus wzrost wagi o 2%
 D- zawilgocenie A plus wzrost wagi o 3%
 I – papier niezestarzony (suszenie 100°C pod próżnią)
 II - papier zestarzony w temp. 250°C przez 50 h
 III- papier zestarzony w temp. 250°C przez 100 h
 IV- papier zestarzony w temp. 250°C przez 150 h
 V - papier zestarzony w temp. 250°C przez 200 h
 VI- papier zestarzony w temp. 250°C przez 250 h

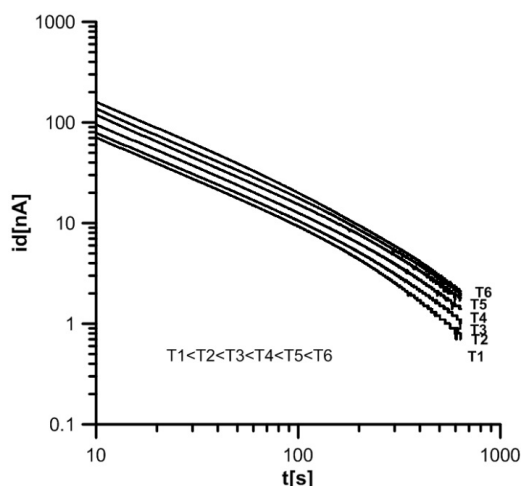


Rys. 3. Układ pomiarowy, a) zasada działania, b) schemat blokowy

Procedurę pomiaru realizował dedykowany układ mikroprocesora, sterujący czasem załączenia i wyłączenia układu poprzez wysokonapięciowe przekaźniki kontaktronowe. Tor niskoprądowy składał się z elektrometru Keithley 6517A połączonego z komputerem dla celów rejestracji i archiwizacji wyników badań. Na podstawie badań wstępnych, całkowity czas pomiaru ustalono odpowiednio: 600 s polaryzacja oraz 600 s depolaryzacja. Wyniki pomiarów były archiwizowane z częstotliwością 5 Hz, natomiast napięcie ładowania U_c wynosiło 50 V.

3. WYNIKI BADAŃ

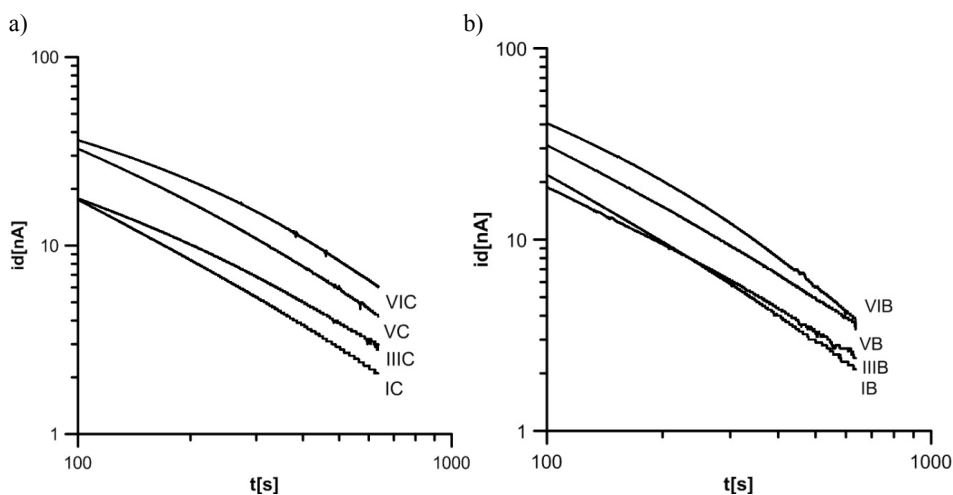
Pomiary prądów depolaryzacji wykonano dla próbek o zróżnicowanym stopniu zesterzenia i zawilgocenia zgodnie z tabelą 1. Aby zniwelować błędy mogące powstać w związku ze zmienną temperaturą badanej izolacji, wszystkie testy dla poszczególnych próbek były realizowane w celce wypełnionej olejem o stabilizowanej temperaturze. Badania wykonywano w przedziale temperatur od 20°C do 70°C, ze zmianą o 10°C (typowy zakres temperatur występujących w eksploatowanych transformatorach energetycznych). Zarejestrowane zmiany wartości prądu depolaryzacji w funkcji temperatury dla wybranej próbki przedstawiono na rysunku 4. Wzrost temperatury izolacji aramidowo-olejowej pociąga za sobą wzrost wartości prądu depolaryzacji. Wskazuje to jednocześnie na silną zależność przewodności oraz czasów relaksacji dipolowych badanej izolacji aramidowo-olejowej od temperatury, tzn. proporcjonalny spadek rezystywności oraz czasów relaksacji wraz z rosnącą temperaturą izolacji. Jest to zjawisko typowe dla dielektryków polarnych.



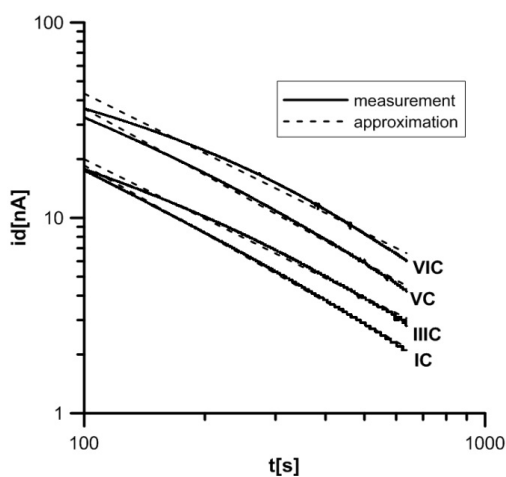
Rys. 4. Charakterystyki prądów depolaryzacji w funkcji czasu w zależności od temperatury badanej izolacji dla wybranej próbki CI (Tabela 1.) T1 = 20°C, T2 = 30°C, T3 = 40°C, T4 = 50°C, T5 = 60°C, T6 = 70°C

Rysunek 5 przedstawia wybrane przebiegi prądów depolaryzacji wyznaczone dla próbek aramidowo-olejowych różniących się stopniem zesterzenia. Analizując wpływ zesterzenia próbek zauważyć należy, że dla czasów powyżej 100 s obserwuje się wydłużanie zaniku prądu depolaryzacji wraz z rosnącym zesterzeniem, niezależnie od temperatury oraz stopnia zawilgocenia próbek. Zjawisko to zachodzi odwrotnie niż w przypadku starzonej izolacji celulozowej [5]. Do analizy wykorzystane zostało okno czasowe w przedziale od 100 s do 600 s ze

względem na zbyt dynamiczne zmiany wartości prądu depolaryzacji w początkowym czasie pomiaru, a także aby wyeliminować wpływ właściwości samego oleju izolacyjnego w tym okresie czasu [6].



Rys. 5. Charakterystyki prądów depolaryzacji w funkcji czasu dla zróżnicowanego zesterzenia i stałego zawilgocenia papieru aramidowego w temperaturze 50 °C; a) izolacja aramidowa o zawilgoceniu 2%, b) izolacja aramidowa o zawilgoceniu 1%



Wartość współczynnika regresji R^2 dla poszczególnych charakterystyk: IC – ($R^2 = 0,998$), IIIC – ($R^2 = 0,995$), VC – ($R^2 = 0,997$), VIC – ($R^2 = 0,988$)

Rys. 6. Charakterystyki prądów depolaryzacji w funkcji czasu dla zróżnicowanego zesterzenia i stałego zawilgocenia papieru aramidowego w temperaturze 50 °C; izolacja aramidowa o zawilgoceniu 2% wraz z naniesionymi funkcjami aproksymacyjnymi

W oparciu o dane literaturowe [5, 7], charakterystyki czasowe prądów depolaryzacji można aproksymować między innymi przy pomocy funkcji: Deby'a, Curie-Schweindlera oraz Jonschera. Jednak dla badanego rodzaju izolacji najlepsze wyniki w odwzorowaniu prądu depolaryzacji uzyskano wykorzystując funkcję aproksymującą Curie-Schweindlera (wzór (5)), co zostało przedstawione na rysunku 6.

$$f_c(t) = B \cdot t^{-N} \quad (5)$$

gdzie: B, N – współczynniki.

Otrzymane wartości współczynnika regresji R^2 dla charakterystyk przykładowo przedstawionych próbek na rysunku 6 wskazują na dobre odwzorowanie charakterystyk uzyskane na podstawie funkcji Curie-Schweindlera. Zbliżone wartości R^2 uzyskano dla wszystkich próbek izolacji aramidowo-olejowej.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wykazały przydatność stosowania metody PDC do oceny stanu izolacji aramidowo-olejowej. Widoczna tendencja wzrostu wartości prądu depolaryzacji wraz z postępującym procesem degradacji izolacji aramidowo-olejowej, zdaje się pomyślnie rokować w adaptacji metody do celów szacowania zaawansowania procesów starzeniowych występujących w transformatorach energetycznych. Po uwzględnieniu wpływu temperatury oraz zawilgocenia badanej izolacji, możliwym wydaje się zastosowanie tej metody do diagnostyki transformatorów energetycznych wykorzystujących izolację aramidową, na podobnej zasadzie jak w przypadku klasycznej izolacji celulozowo-olejowej. Na podstawie przeprowadzonych dotychczas badań, autor proponuje zastosować w analizie aproksymacyjnej prądu depolaryzacji funkcję odpowiedzi dielektrycznej Curie-Schweindlera. Oczywiście wymaga to jeszcze przeprowadzenia szeregu badań eksperymentalnych, których ostatecznym celem będzie wypracowanie procedury właściwej adaptacji metody PDC do diagnostyki izolacji aramidowo-olejowej w transformatorach energetycznych.

LITERATURA

- [1] Saha T. K., Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers, IEEE Trans. on Dielectr. and Electrical Insul., Vol. 10. October 2003, pp. 903-917.
- [2] Saha T. K., Optimal Time Selection for the Polarisation and Depolarisation Current Measurement for Power Transformer Insulation Diagnosis, 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, Florida, USA, 24-28 June 2007, pp. 1-7.
- [3] Fofana I., Hemmatjou H, Farzaneh M., Gockenbach E., Borsi H., Polarization and Depolarization Current measurements of oil impregnated paper insulation system under thermal runaway, 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, 4-9 July 2010, pp. 1-4.

- [4] Muhamad N., Phung B., Blackburn T., Lai K. ,Polarization and Depolarization Current (PDC) tests on biodegradable and mineral transformer oils at different moisture levels, Power Engineering Conference, AUPEC 2009, Australia, 2009, pp. 1-6.
- [5] Wolny S., Kędzia J., The assessment of the influence of temperature of selected parameters of the approximation method of depolarization current analysis of paper–oil insulation, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 356, April 2010, pp. 809–814.
- [6] Silva H., Bassi W., Diogo A., Noninvasive ageing assessment by means of polarization and depolarization currents analysis and its correlation with moisture content for power transformer life management, Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004 IEEE/PES, 2004, pp. 611-616.
- [7] Wolny S., Diagnostyka stanu izolacji papierowo-olejowej z wykorzystaniem metod polaryzacyjnych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, *Studia i Monografie*, z. 222, Opole, 2008.

A TIME-DOMINE ANALYSIS OF THE AGENING PROCESS IN ARAMID-OIL INSULATION USING THE PDC METHOD

This article presents results of laboratory tests on samples of aramid-oil insulation using the method of PDC (Polarization and Depolarization Current). A methodology is described for preparing the samples with various degrees of degradation, comprising an accelerated aging process and an analysis of measurements of the depolarization current. Also, an approximation function is presented that provides an excellent fit to the measured current characteristics.