

Niektóre czynniki mające wpływ na napięcie przebicia biodegradowalnego oleju transformatorowego

Streszczenie. W niniejszej pracy badana jest zmienność napięcia przebicia biodegradowalnego oleju transformatorowego stosowanego w urządzeniach wysokonapięciowych w określonych warunkach eksperymentu. Napięcia przebicia oleju transformatorowego mierzone były dla różnej liczby przebiegów w serii pomiarowej, różnej geometrii elektrod i różnego poziomu zawilgocenia. Wyniki badań wykazały, że napięcie przebicia oleju estrowego w polu jednorodnym jest zależne od geometrii elektrod, zarówno dla oleju suchego jak i zawilgoconego.

Abstract. This work investigates the variability of the breakdown voltage of biodegradable transformer oil used in high-voltage devices under specific conditions of the experiment. The breakdown voltages of transformer oil were measured for different numbers of breakdowns in the measurement series, different electrode geometries and different levels of moisture. The test results showed that the breakdown voltage of ester oil in a homogeneous field depends on the geometry of the electrodes, both for dry and moist oil. (Some factors that influence the breakdown voltage of biodegradable transformer oil).

Słowa kluczowe: olej transformatorowy, ester, napięcie przebicia, wilgoć

Keywords: transformer oil, ester, breakdown voltage, moisture

Wstęp

Powszechnie do niedawna stosowany w transformatorach olej mineralny ma doskonale właściwości elektryczne i fizykochemiczne. Ma on jednak również kilka istotnych wad: łatwopalność, duży wpływ na środowisko w przypadku awarii oraz jest surowcem nieodnawialnym. Estry naturalne są obiecującymi kandydatami na alternatywne ciecze izolacyjne ze względu na ich dobre właściwości fizyko-chemiczne i elektryczne połączone z biodegradowalnością [1-3].

W izolacji olejowej transformatorów w eksploatacji zawsze znajdują się różnego typu zanieczyszczenia, wynikające zarówno z procesów technologicznych wytwarzania transformatorów jak i z ich eksploatacji. Zanieczyszczeniami tymi są zarówno cząstki stałe (przewodzące i dielektryczne) jak i zanieczyszczenia typu ciekłego w postaci wody. Woda w izolacji olejowej transformatora może pojawić się na skutek procesów sorpcji wilgoci z otoczenia w przypadku niehermetyzowanej konstrukcji transformatora. Głównym źródłem wody w olejach transformatorowych jest rozkład polimerów izolacji celulozowej. Należy tu zwrócić uwagę na fakt, że stopień depolimeryzacji izolacji celulozowej pracującej w oleju estrowym jest mniejszy niż w przypadku pracy tej izolacji w oleju mineralnym [4]. Dynamika zmian zawilgocenia zależna jest od wieku transformatora [5], a duży stopień zawilgocenia oleju może prowadzić do niebezpiecznego zjawiska „bubble effect” [6]. Stąd też wiele prac koncentruje się nad sposobami suszenia izolacji transformatorów [7].

Biorąc pod uwagę względną zawartość wody, napięcie przebicia jest największe dla oleju mineralnego. Przy pełnym nasyceniu wodą napięcie przebicia dla oleju mineralnego ma dwukrotnie większą wartość niż w przypadku oleju estrowego. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że chociaż nasycone wodą oleje biodegradowalne mają mniejsze napięcie przebicia od olejów mineralnych to jednak ilość wody jaka jest potrzebna do ich nasycenia jest większa około 20 razy od ilości nasycającej oleje mineralne [8].

Przedstawiona analiza zawartości wody i napięcia przebicia dotyczy olejów o dużym stopniu czystości, to znaczy przefiltrowanych wielokrotnie przez filtr, tak aby zawartość cząstek obcych nie przekraczała 200 cząstek na

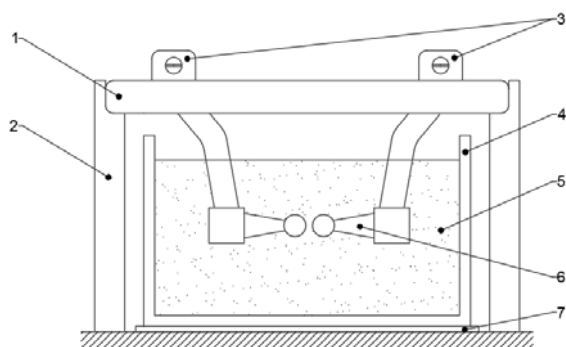
100 ml. W obecności znaczącej ilości zanieczyszczeń celulozą (około 25 000 cząstek na 100 ml) olej mineralny obniża swoją wytrzymałość w porównaniu do wytrzymałości czystego oleju. Domieszka zanieczyszczeń powoduje obniżenie jego wytrzymałości elektrycznej poniżej wytrzymałości zanieczyszczonych estrów. Estry biodegradowalne zmniejszają swoją wytrzymałość elektryczną mniej niż olej mineralny. Natomiast wartość napięcia przebicia poszczególnych rodzajów estrów jest porównywalna. Lepszą odporność na zanieczyszczenia olejów estrowych można wiązać z ich większą lepkością, która hamuje przemieszczanie się zanieczyszczeń w polu elektrycznym, a co za tym idzie zwiększa napięcie przebicia [9].

Oleje mineralne są bardziej wrażliwe na zanieczyszczenia od olejów estrowych. Porównując jednak wpływ obydwu typów zanieczyszczeń, czyli zanieczyszczenia ciekłego (wody) i zanieczyszczeń stałych, na wytrzymałość oleju można zauważyć że napięcie przebicia oleju zanieczyszczonego cząstkami stałymi znacząco zmniejsza się po zwiększeniu zawartości wody [6]. Średnie napięcie przebicia znacząco spada po przekroczeniu zawartości wody od 3% do 10%. Czysty olej mineralny jest mniej podatny na zawartość wody. Zachowuje swoje właściwości do 40% wilgotności. Dopiero po jej przekroczeniu napięcie przebicia spada znacząco. Zawartość zanieczyszczeń można więc uznać za czynnik mający największy udział w obniżeniu wytrzymałości elektrycznej a wilgoć jako czynnik zwiększający tempo utraty wytrzymałości. Oleje estrowe biodegradowalne zmniejszają wytrzymałość ze wzrostem zanieczyszczeń, ale w mniejszym stopniu niż oleje mineralne. Zjawisko tłumaczone jest tak, że w oleju mineralnym, który jest mniej higroskopijny, część wody pochłaniana jest przez zanieczyszczenia powodując powstawanie nośników obniżających napięcie przebicia. Estry natomiast pochłaniają wodę uniemożliwiając łączenie się jej z zanieczyszczeniami. Ma to wpływ na nieznaczne zmiany napięcia przebicia estrów, a znaczne zmniejszenie się napięcia przebicia olejów mineralnych [9, 10].

Układ pomiarowy oraz procedura badawcza

Badanie wpływu liczby przebiegów na wytrzymałość oleju biodegradowalnego wykonano w układzie elektrod

kulowych. Badania przeprowadzono dla oleju ENVIROTEMP FR3. Układ probierczy składał się z transformatora probierczego model 6TCD100–10X firmy PHENIX Technologies, Inc. i dedykowanego dla transformatora układu sterująco-pomiarowego (tej samej firmy). Na rysunku 1 przedstawiono schemat celki pomiarowej.



Rys.1. Schemat układu elektrod kulowych zanurzonych w oleju. 1 – izolatorowe mocowanie elektrod, 2 – statyw, 3 – zaczepty, 4 – naczynie ceramiczne, 5 – olej biodegradowalny, 6 – elektroda kulowa, 7 – aluminiowa płyta

Średnica każdej z elektrod wynosi 12,5 mm, a odległość między nimi jest równa 2,5 mm. Wielkości elektrod oraz odległość między nimi wynikają z normy PN-EN 60156:2008 [11], która to norma mówi o określeniu napięcia przebicia olejów/cieczy izolacyjnych przy częstotliwości sieciowej. Układ elektrod, znajduje się na specjalnym statywie, który zapewnia utrzymanie właściwego zanurzenia oraz pozycji elektrod w naczyniu ceramicznym. Na rysunku 2 przedstawiony jest użyty w trakcie badania układ elektrod kulowych wraz z systemem mocującym.

Przed rozpoczęciem badań naczynie ceramiczne oraz elektrody zostało dokładnie umyte oraz wysuszone. Następnie całość (naczynie wypełnione już olejem wraz z elektrodami) umieszczono na statywie oraz podłączono do transformatora. Wykonano siedem serii pomiarowych dla prędkości narastania napięcia 1000 V/s. Każda seria zawierała trzydzieści wyników pomiarów. Pomiedzy kolejnymi pomiarami w serii została zachowana 2 min. przerwa w celu zapewnienia stabilnych warunków badania. Po każdej serii pomiarów naczynie oraz elektrody były ponownie myte oraz suszone w celu zapewnienia czystości badanej cieczy.



Rys.2. Widok układu elektrod kulowych wraz z systemem mocującym

Z kolei w celu stwierdzenia, czy na wartość wytrzymałości elektrycznej oleju ma wpływ geometria elektrod, jednak przy zachowaniu jednorodności rozkładu pola elektrycznego, zrealizowane zostały pomiary z zastosowaniem elektrod płaskich o średnicy 25 mm przy zachowaniu odstępów międzyelektrodowych równego 2,5 mm. Powtórzona została identyczna procedura badawcza jak w przypadku elektrod z rysunku 2.

Trzecia seria pomiarowa miała na celu porównanie wpływu geometrii elektrod, przy zachowaniu jednorodności rozkładu pola elektrycznego, na wytrzymałość oleju estrowego o różnym poziomie zawilgocenia. Procedurę pomiarową zrealizowano dla próbek o zawartości wilgoci 60 ppm oraz 415 ppm. Nawilgacanie oleju odbywało się w otoczeniu powietrza o podwyższonej wilgotności. Zawartość wilgoci mierzono metodą Karla-Fishera na stanowisku wyposażonym w aparat firmy Metrohm typu 852 Titrandu.

Wyniki

Badania wytrzymałości elektrycznej we wszystkich przypadkach prowadzono sugerując się wytycznymi normy [11]. W badaniach uwzględniono prędkość narastania napięcia na elektrodach (nie większa od 2 kV/s), odstęp między elektrodami 2,5 mm, czas przerwy między pomiarami 2 minuty oraz pojemność naczynia z olejem równą 1 l. W tym ostatnim przypadku należy pamiętać, że wielokrotne pomiary zanieczyszczają zawartość naczynia i mogą mieć wpływ na napięcie przebicia oleju.

Ponieważ wytrzymałość elektryczna oleju ma charakter losowy dlatego podlega ocenie statystycznej [11]. Uzyskane wyniki zostały aproksymowane rozkładem normalnym (Gausa) który charakteryzują następujące parametry:

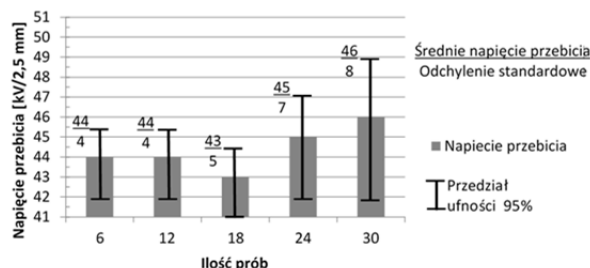
$$(1) \quad U_{50} = \sum \frac{U_i}{n}$$

$$(2) \quad S_U = \sqrt{\frac{\sum(U_i - U_{50})^2}{n-1}}$$

U_{50} - wartość średnia oczekiwana odpowiada 50% prawdopodobieństwu przebicia, U_i - napięcie przebicia, n – ilość pomiarów, S_u – odchylenie standardowe.

Granice ufności na poziomie 95% wynoszą: $(U_{50} - 0,47S_u) \leq U_{50} \leq (U_{50} + (U_{50} - 0,47S_u))$, oraz $0,76S_u \leq S_u \leq 1,46 S_u$.

Wielokrotne przebicie oleju powoduje wzrost odchylenia standardowego od 4 kV/2,5 mm dla 6 prób do 8 kV/2,5 mm dla 30 prób (rysunek 3). Ogólnie można stwierdzić, że zależność wartości napięć przebicia ma wyraźny charakter probabilistyczny.



Rys.3. Rozkład napięcia przebicia i odchylenia standardowego oleju w zależności od ilości próbek próbki oleju

W tabeli 1 zawarte zostały wyniki porównawcze dla dwóch rodzajów elektrod użytych w eksperymencie. W wyniku zastosowania innego układu elektrod, także o równomiernym rozkładzie pola elektrycznego, pomierzona

wytrzymałość elektryczna oleju estrowego uległa obniżeniu. Zanotowano także mniejsze wartości zarówno minimalnego jak i maksymalnego napięcia przebicia dla poziomu ufności 95%.

Tabela 1. Wytrzymałość estru w różnych układach elektrod

		U_{min} dla poziomu ufności 95% [kV/2,5 mm]	U_{sr} [kV/2,5 mm]	U_{max} dla poziomu ufności 95% [kV/2,5 mm]
Elektrody kuliste o średnicy 12,5 mm	6 pomiarów	42	44	46
	20 pomiarów	40	43	46
Elektrody płaskie o średnicy 2,5 cm	6 pomiarów	37	41	45
	20 pomiarów	39	42	45

W tabeli 2 zawarte zostały natomiast wyniki dotyczące wpływu zawilgocenia na wytrzymałość elektryczną badanego estru naturalnego. Jak należało się spodziewać, wzrost zawartości wilgoci w estrze naturalnym prowadzi do zmniejszenia jego wytrzymałości elektrycznej. Istotne jest tu jednak to, że pomimo zachowania jednorodności rozkładu pola elektrycznego, spadek wytrzymałości elektrycznej jest mniejszy w przypadku zastosowania elektrod płaskich.

Tabela 2. Wytrzymałość estru w różnych układach elektrod i różnych zawilgoceniach

Rodzaj elektrod	Zawartość wilgoci [ppm]	U_{min} dla poziomu ufności 95% [kV/2,5 mm]	U_{sr} [kV/2,5 mm]	U_{max} dla poziomu ufności 95% [kV/2,5 mm]
Elektrody kuliste o średnicy 12,5 mm	60	42	44	46
	415	17,5	18	18,5
Elektrody płaskie o średnicy 2,5 cm	60	37	41	45
	415	19	21	23

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wpływ wybranych czynników, takich jak liczba przebiegów tej samej próbki oleju, geometria elektrod przy zachowaniu jednorodności rozkładu pola elektrycznego, zawartość wilgoci w powiązaniu z geometrią elektrod – na napięcie przebicia (wytrzymałość elektryczną) biodegradowalnego oleju transformatorowego. Przedstawione wyniki badań pokazują, że wytrzymałość

elektryczna biodegradowalnego oleju transformatorowego nie jest wyłącznie jego cechą materiałową, ale zależy od warunków, w których została wyznaczona. Przede wszystkim należy zwrócić uwagę, że wartości napięcia przebicia mają charakter losowy i pomimo zanieczyszczenia się próbki oleju podczas kolejnych przebiegów nie są, w badanym zakresie, zależne od ich ilości. Ponadto wykazano, że napięcie przebicia oleju estrowego w polu jednorodnym jest zależne od geometrii elektrod, zarówno dla oleju „suchego” jak i zawilgoczonego.

Autorzy: dr hab. inż. Maciej Jaroszewski, Politechnika Wrocławska, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: maciej.jaroszewski@pwr.edu.pl; dr hab. inż. Paweł Różga, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, Stefanowskiego 20, 90-537 Łódź E-mail: pawel.rozga@p.lodz.pl; prof. dr hab. Abderrahmane Beroual, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, Ampère UMR5005, University of Lyon, 36 avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully, Francja, E-mail: Abderrahmane.Beroual@ec-lyon.

LITERATURA

- [1] Hernandez-Herrera, H. i in., Natural Ester Fluids Applications in Transformers as a Sustainable Dielectric and Coolant, *AIP Conference Proceedings* 2123 (2019), 020049
- [2] Silva-Ortega J.I. i in., Power Distribution Transformers using Natural Ester Fluids as Dielectric and Coolant, *INGE CUC*, 12 (2016), No. 2, pp 79-85
- [3] Rozga P. i in., A Review on Synthetic Ester Liquids for Transformer Applications, *Energies*, 13 (2020), 6429
- [4] Yuliasuti E., Analysis of dielectric properties comparison between mineral oil and synthetic ester oil, repository.tudelft.nl
- [5] Gielniak J., Morańda H., Dynamika zawilgocenia izolacji transformatorów energetycznych w zależności od konstrukcji, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), No. 10, s. 27-30
- [6] Przybyłek P., Morańda H., Mościcka-Grzesiak H., Zjawisko „bubble effect” w izolacji papierowo-olejowej o różnym stopniu zawilgocenia i zesterzenia, *PAK*, 55 (2009), No. 1, s. 44-46
- [7] Przybyłek P. i in., Suszenie izolacji transformatorów rozdzielczych z wykorzystaniem medium ciekłego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), No. 10, s. 18-21
- [8] Przybyłek P., Rozpuszczalność wody w estrze syntetycznym oraz mieszanie estru z olejem mineralnym w aspekcie suszenia izolacji celulozowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), No. 4., s. 92-95
- [9] CIGRE, Effect of Particles on Transformer Dielectric Strength, in Working Group 17 of Study Committee 12, 2000
- [10] Wang X., Wang Z.D., Study of dielectric behavior of ester transformer liquids under AC voltage, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19 (2012), No. 6., pp. 1916-1924
- [11] PN-EN 60156:2008 – Ciecze elektroizolacyjne – Określanie napięcia przebicia przy częstotliwości sieciowej – metoda badania