

Wytrzymałość elektryczna preszpanu izolacyjnego impregnowanego różnymi cieczami dielektrycznymi

Streszczenie: Artykuł przedstawia wyniki badań eksperymentalnych dotyczących wpływu rodzaju cieczy stosowanej do impregnacji preszpanu izolacyjnego na wytrzymałość elektryczną tego preszpanu. Próbki o grubościach 0.5 mm i 1 mm zostały poddane procesowi suszenia i impregnacji, a następnie wyznaczono ich wytrzymałość elektryczną zgodnie z normą IEC 60243. W badaniach użyto do impregnacji trzech komercyjnych cieczy dielektrycznych: typowo stosowanego oleju mineralnego oraz dwóch alternatywnych cieczy biodegradowalnych tj. estru syntetycznego i estru naturalnego. Wyniki, zarówno dla próbek o grubości 0.5 jak i 1 mm pokazały, że każda z cieczy równie efektywnie wpływa na poprawę parametrów elektrycznych izolacji stałej w zakresie jej wytrzymałości elektrycznej. Otrzymane wartości wytrzymałości w kategorii natężenia pola elektrycznego obliczone na podstawie mediany napięć przebicia były bliskie siebie porównując wyniki pomiędzy poszczególnymi cieczami dla danej grubości izolacji.

Słowa kluczowe: ciecze dielektryczne, wytrzymałość elektryczna, preszpan izolacyjny, izolacja transformatorowa

Wprowadzenie

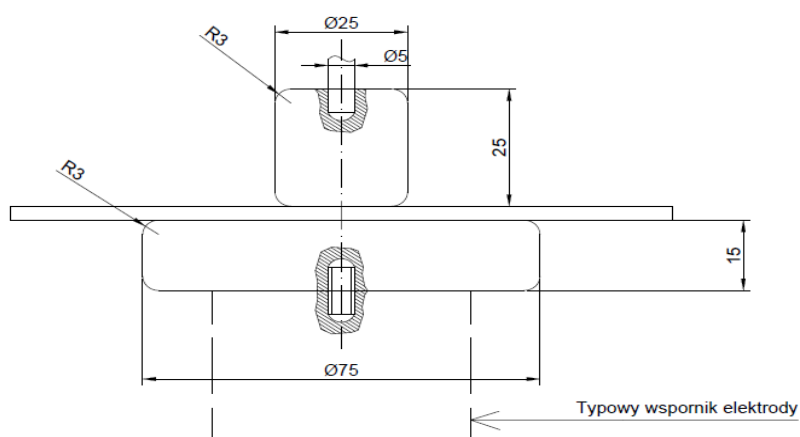
W ostatnich latach coraz częściej można spotkać w eksploatacji transformatory izolowane cieczami alternatywnymi dla oleju mineralnego jak estry syntetyczne i naturalne. Liczba takich jednostek instalowanych w systemie elektroenergetycznym wzrasta z każdym rokiem szczególnie w Europie Zachodniej oraz Azji. W Polsce nadal podchodzi się do wykorzystania estrów w transformatorach z dużym dystansem. Wynika to niewątpliwie z faktu krótkiego czasu istnienia na rynku wzmiankowanych cieczy w porównaniu do oleju mineralnego oraz niedostatecznej ilości informacji dostarczanej czy to producentom transformatorów czy też potencjalnym przyszłym użytkownikom. Tendencje światowe w tym zakresie są jednak widoczne, co można zauważyć także w liczbie prac eksperymentalnych dotyczących weryfikacji właściwości estrów. Prezentacja wyników tych prac z pewnością przyczynia się do wzrostu zainteresowania [1-8].

Wiele podstawowych prac badawczych poświęcono właściwościom samych estrów jako cieczy dielektrycznych do zastosowań elektrycznych. Badano właściwości fizykochemiczne jak i ich wytrzymałość przy napięciu przemiennym oraz impulsowym [1, 2, 4, 7, 8]. Rzeczywistość aplikacyjna wymogła natomiast badania oceniające estry z punktu widzenia ich współpracy z izolacją stałą transformatorów [1, 3, 5, 6]. Każdy z komponentów izolacji stałej (papier nawojowy, preszpan użyty jako przekładki międzycewkowe czy pierścienie kątowe) musi bowiem być kompatybilny z cieczą izolacyjną, którą napełniony zostanie transformator. Wyższa przenikalność elektryczna estrów w stosunku do oleju mineralnego została uznana jako pozytywny czynnik w aspekcie poprawy rozkładu pola elektrycznego w układach papier-ciecz dielektryczna. Z kolei zdolność estrów do wysysania wody z izolacji papierowej została wskazana jako czynnik poprawiający właściwości układów izolacyjnych z punktu widzenia procesów

starzeniowych. W niniejszym artykule postanowiono zweryfikować inny problem w zakresie współpracy cieczy dielektrycznych z izolacją stałą pochodzenia celulozowego, a mianowicie czy impregnacja estrami w takim samym stopniu wpływa na poprawę wytrzymałości elektrycznej tej izolacji jak impregnacja z użyciem oleju mineralnego. W rozważaniach uwzględnione zostało klasyczne podejście normatywne gdzie wytrzymałość elektryczną w kategorii natężenia pola elektrycznego wyznacza się z mediany napięć przebicia określonych dla danego zestawu wcześniej przygotowanych i zaimpregnowanych próbek.

Badania eksperymentalne

Norma IEC 60243 [9] opisuje w szczegółach procedurę, jaką powinno stosować się do pomiaru napięcia przebicia próbek izolacji stałej różnego typu. Zgodnie z zaleceniami tej normy pomiar wykonuje się na próbkach wcześniej zaimpregnowanych przy założeniu, że medium, w którym wykonywany jest pomiar jest tożsame z medium użytym do impregnacji. Norma dokładnie definiuje też układ elektrod do wyznaczania napięcia przebicia w zależności czy mamy do czynienia z płytami lub arkuszami czy też ze specjalnie kształtowanymi elementami jak np. kołnierze czy pierścienie kątowe. Ponieważ w badaniach użyto jako próbek arkuszy preszpanowych to zastosowano klasyczny układ elektrod, który przedstawiony został na rys. 1. Układ składał się z dwóch metalowych elektrod walcowych o krawędziach zaokrąglonych charakteryzujących się promieniem zaokrąglenia 3 mm. Górna elektroda (elektroda wysokiego napięcia - WN) miała wysokość 25 mm i taką samą średnicę. Dolna elektroda, która była uziemiona, posiadała średnicę 75 mm i wysokość 15 mm. Obie elektrody umieszczone były w przezroczystym naczyniu o objętości 5 litrów.



Rys. 1. Układ elektrod użyty w badaniach - wymiary podano w [mm].

Układ elektrod zasilany był z wysokonapięciowego transformatora probierczego o napięciu znamionowym 100 kV przez rezystor ograniczający. Transformator posiadał możliwość kontrolowania szybkości podnoszenia napięcia w dowolnym zakresie między 0.1 a 10 kV/s. Było to konieczne ponieważ zalecenia normy nakazują wykorzystanie automatycznego procesu podnoszenia napięcia przy pomiarach napięcia przebicia tak aby do przebicia doszło w granicach 10-20 sekund od chwili rozpoczęcia procesu pomiarowego. W przypadku zaistnienia przebicia układ był samoczynnie wyłączany, a wartość napięcia przebicia, podawana w wartościach skutecznych napięcia, wyświetlana była na wyświetlaczu układu kontroli pomiaru napięcia. Spośród pięciu

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

proponowanych w normie metod pomiaru napięcia przebicia wybrano zalecaną metodę krótkiego, szybkiego podnoszenia napięcia aż do przebicia.

W badaniach wykorzystano preszpan o grubościach 0.5 oraz 1 mm. Każda z przygotowanych próbek posiadała wymiar 300 x 300 mm. W tabeli 1 zestawiono parametry obu rodzajów preszpanu.

Tabela 1. Podstawowe właściwości badanych próbek preszpanów.

Parametry	Jednostki	Grubość	
		0.5 mm	1 mm
Gęstość pozorna	kg/dm ³	1.16	1.09
Wytrzymałość na rozciąganie - wzdłużne	N/mm ²	96	107
Wytrzymałość na rozciąganie - poprzeczne	N/mm ²	66	77
Przewodność ekstraktu wodnego	mS/m	4.7	3.3
Zawartość wilgoci	%	7.7	4.2
Zawartość popiołów	%	0.4	0.3

Do impregnacji próbek preszpanowych zastosowano natomiast trzy komercyjne ciecze dielektryczne: naftenowy olej mineralny, ester syntetyczny oraz rafinowany z nasion soi ester naturalny. Wszystkie trzy ciecze zostały przed procesem impregnacji poddane pomiarom ich podstawowych parametrów fizyko-chemicznych i dielektrycznych. Wyniki zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Podstawowe właściwości cieczy dielektrycznych użytych do impregnacji.

Parametry	Rodzaj cieczy		
	Olej mineralny	Ester naturalny	Ester syntetyczny
Napięcie przebicia - wartość średnia w [kV]	58.1	55.4	57
Tan δ - w 90 °C i 50 Hz	0.0016	0.044	0.0108
Przenikalność dielektryczna - w 20 °C	2.2	3.1	3.2
Lepkość [mm ² /s]			
- w 20 °C	22	85	70
- w 40 °C	9	33	28
- w 100 °C	2.6	8.4	5.25
Gęstość - w 20 °C [kg/dm ³]	0.87	0.92	0.98

Dla każdego z przypadków tj. danej grubości i danej cieczy impregnującej przygotowano 2 zestawy próbek po 9 sztuk w każdym zestawie. Tak więc dany przypadek reprezentowały wyniki dwóch niezależnych serii pomiarowych, gdyż dla każdego przypadku procedurę impregnacji i pomiaru napięcia przebicia wykonano 2-krotnie. Dla każdej serii odrębnie na podstawie wektora zmiennej losowej składającego się z 9-ciu elementów wyznaczono medianę napięć przebicia, a na jej podstawie wytrzymałość elektryczną.

Impregnacja w każdym przypadku przebiegała natomiast następująco:

- suszenie próbek przez 24 h w komorze próżniowej w temperaturze 105 °C i pod ciśnieniem mniejszym niż 100 Pa;

- dodanie do komory cieczy dielektrycznej spełniającej wymogi klasy II w/g normy IEC 60296 (napięcie przebicia cieczy wyższe niż 50 kV) i impregnacja w próżni w temperaturze 80 °C nie krócej niż 24h;

- ostudzenie próbek do temperatury otoczenia przy kompletnym zanurzeniu w danej cieczy.

Zgodnie z wyżej przedstawionymi założeniami otrzymano wyniki z podziałem na poszczególne serie pomiarowe. W tabelach 3 i 4 zestawiono otrzymane wyniki prezentując zarówno wartości median w poszczególnych seriach jak i obliczone na ich podstawie wytrzymałości elektryczne.

Tabela 3. Mediany napięć przebicia oraz wytrzymałość elektryczna dla 0.5 mm próbek preszpanu.

Ciecz użyta do impregnacji	Mediana [kV]		Wytrzymałość elektryczna [kV/mm]	
	I seria	II seria	I seria	II seria
Olej mineralny	28	28.4	56	56.8
Ester naturalny	26.3	26.9	52.6	53.8
Ester syntetyczny	26.7	26.6	53.4	53.2

Tabela 4. Mediany napięć przebicia oraz wytrzymałość elektryczna dla 1 mm próbek preszpanu.

Ciecz użyta do impregnacji	Mediana [kV]		Wytrzymałość elektryczna [kV/mm]	
	I seria	II seria	I seria	II seria
Olej mineralny	55.7	55.9	55.7	55.9
Ester naturalny	53.4	52.8	53.4	52.8
Ester syntetyczny	57.2	56.6	57.2	56.6

Dyskusja i wnioski

Ciecze dielektryczne wykorzystywane w układach izolacyjnych transformatorów energetycznych powinny spełniać szereg kryteriów związanych z ich parametrami fizykochemicznymi oraz dielektrycznymi. Tak też się dzieje w przypadku wszystkich dostępnych na rynku komercyjnych cieczy dielektrycznych: olejów mineralnych, estrów syntetycznych i estrów naturalnych. Jednakże, dodatkowe właściwości tych cieczy, które nie są określone w wymaganiach zawartych np. w normach przedmiotowych, także muszą być rozważane. Jedną z takich istotnych właściwości jest współpraca z izolacją stałą stosowaną w transformatorach rozumiana jako skuteczna impregnacja tej izolacji poprawiająca ich wytrzymałość elektryczną. W pracy rozważano tę właściwość w odniesieniu do dwóch typów preszpanów o grubościach odpowiednio 0.5 i 1 mm.

Otrzymane wyniki pokazały, że impregnowanie preszpanu estrami utrzymuje wytrzymałość tego materiału na praktycznie tym samym poziomie jak przy impregnacji olejem mineralnym. We wszystkich przypadkach otrzymano wytrzymałość elektryczną odpowiednich próbek wyższą niż 40 kV/mm, co jest minimalnym wymaganiem stawianym impregnowanym preszpanom do celów izolacyjnych [10]. Oczywiście niewielkie różnice w wytrzymałości określonej dla danej grubości izolacji są zauważalne, lecz są to naturalne zjawiska statystyczne. Na pewno podkreślić należy, że próbki impregnowane estrem naturalnym dla obu rozpatrywanych grubości preszpanu charakteryzowały się najniższą wytrzymałością, choć cały czas niewiele tylko odbiegającą od pozostałych dwóch rozpatrywanych cieczy. Z punktu widzenia praktyki inżynierskiej takie niewielkie różnice można uznać za pomijalne. Jakkolwiek wartym na pewno rozpatrzenia jest ocena zależności wytrzymałości elektrycznej od grubości zwiększając tę grubość do 3 czy 4 mm. Biorąc pod uwagę, że gęstość i lepkość cieczy

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

estrowych jest znacząco wyższa niż oleju mineralnego to efektywność impregnacji dla większych grubości przy zachowaniu tych samych parametrów impregnacji może maleć. To zagadnienie będzie z pewnością kolejnym rozpatrywanym przez autorów niniejszej pracy.

Literatura

1. Cigre brochure 436, *Experiences in service with new insulating liquids*, 2011.
2. Gockenbach E., Borsi H., *Natural and synthetic ester liquids as alternative to mineral oil for power transformers*, 2008 IEEE CEIDP, pp. 521-524.
3. Dai J., Wang Z.D., *A comparison of the impregnation of cellulose insulation by ester and mineral oil*, IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul., Vol. 15, pp. 374-381, 2008.
4. Perrier C., Beroual A., *Experimental investigations on insulating liquids for power transformers: mineral, ester and silicone oils*, IEEE Elect. Insul. Mag., Vol. 25, pp. 6-13, 2009.
5. Lijao R. i inni, *A comparative study of physicochemical, dielectric and thermal properties of pressboard insulation impregnated with natural ester and mineral oil*, IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul, Vol. 18, pp. 1626-1637, 2011.
6. Hao J. i inni, *Influence of natural ester on frequency dielectric response of impregnated insulation pressboard*, IET Sci. Measur. Technol., Vol. 6, pp. 403-411, 2012.
7. Fernández I. i inni, *Comparative evaluation of alternative fluids for power transformers*, Electr. Power Syst. Research Vol. 98, pp. 58-69, 2013.
8. Rozga P., *Streamer propagation in small gaps of synthetic ester and mineral oil under lightning impulse*, IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul., Vol. 22, pp. 2754-2762, 2015.
9. IEC-60243-1, *Wytrzymałość elektryczna materiałów elektroizolacyjnych -- Metody badań - Część 1: Badania przy częstotliwości sieciowej*.
10. IEC 60641-1, *Wymagania dotyczące preszpanu i papieru prasowanego do zastosowań elektrycznych - Część 1: Definicje i wymagania ogólne*.

Autorzy: dr inż. Paweł Różga; Instytut Elektroenergetyki Politechnika Łódzka, e-mail: pawel.rozga@p.lodz.pl, mgr inż. Marcin Stanek; Instytut Elektroenergetyki Politechnika Łódzka, e-mail: marcin.tomasz.stanek@gmail.com