

Wytrzymałość elektryczna transformatorowych płynów izolacyjnych na bazie estrów syntetycznych i naturalnych

Streszczenie. W artykule przedstawione zostały właściwości biodegradowalnych, przyjaznych środowisku płynów izolacyjnych jakimi są estry syntetyczne i naturalne w odniesieniu do ich wytrzymałości elektrycznej. Scharakteryzowane zostały w sposób porównawczy wytrzymałość elektryczna przy napięciu przemiennym oraz wytrzymałość przy napięciu udarowym piorunowym. Przedstawione wyniki bazują w większości na autorskich badaniach eksperymentalnych.

Abstract. Article presents the properties of biodegradable, environmentally friendly insulating liquids like synthetic and natural esters in relation to their electrical strength. Comparative characteristics of AC electrical strength and lightning electrical strength are presented. Presented results are mainly based on authors' experimental studies. (**Electrical strength of transformer insulating liquids based on synthetic and natural esters**).

Słowa kluczowe: estry naturalne, estry syntetyczne, izolacja ciepla, wytrzymałość elektryczna.

Keywords: natural esters, synthetic esters, liquid insulation, electrical strength.

doi:10.12915/pe.2014.01.63

Wstęp

Transformatory energetyczne stanowią jeden z najważniejszych elementów systemu przesyłu i dystrybucji energii elektrycznej. Mimo że nie stwarzają one szczególnie dokuczliwych problemów natury ekologicznej to jednak uwzględniając współczesne przemiany świadomości społecznej, która wymusza proekologiczne spojrzenie na każde urządzenie techniczne, należy także dla transformatorów poszukiwać pewnych nowych rozwiązań, które poprawią jego ekologiczne właściwości [1, 2].

Znaczącą większość ogólnej liczby produkowanych transformatorów we wszystkich zakresach napięć i mocy stanowią transformatory olejowe. Transformatory suche to niewielki tylko odsetek ogółu eksploatowanych jednostek. Dlatego też, przy ocenie zagrożeń środowiskowych związanych z transformatorem w eksploatacji, izolacja olejowa jest najistotniejszym elementem, który należy brać pod uwagę [2, 3]. W ostatnich latach, w światowej i polskiej elektroenergetyce, wzrosło więc zainteresowanie płynami izolacyjnymi, które w sytuacjach, gdzie decydujące znaczenie ma ochrona środowiska i profilaktyka przeciwpożarowa, mogłyby zastąpić charakteryzujący się niezbyt korzystnymi właściwościami proekologicznymi olej mineralny [1, 4-9]. Takimi płynami są produkowane specjalnie do celów elektrycznych estry syntetyczne i naturalne. Parametrami świadczącymi o ich korzystnych właściwościach dla środowiska jest ich wysoka biodegradowalność oraz znacząco wyższa niż dla oleju mineralnego temperatura zapłonu. W tabeli 1 zestawiono typowe wartości tych parametrów dla estrów oraz oleju mineralnego [6, 8].

Tabela 1. Biodegradowalność i temperatura zapłonu omawianych cieczy dielektrycznych

Rodzaj cieczy	Parametry	
	Biodegradowalność [%]	Temperatura zapłonu [°C]
Ester syntetyczny	89	260
Ester naturalny	97	316
Olej mineralny	10	150

Pierwszymi transformatorami, w których jako izolację cieplą zastosowano estry, były transformatory rozdzielcze oraz transformatory specjalne, do zastosowań trakcyjnych. Charakteryzowały się one względnie niewielkimi napięciami znamionowymi (do kilkudziesięciu kV) oraz niewielkimi mocami (do kilkuset kVA). Od lat 90-tych ubiegłego wieku, wraz ze wzrostem liczby publikowanych w tym zakresie wyników prac badawczych na rynku zaczęły pojawiać się

transformatory o znacznie wyższych napięciach i mocach znamionowych. Obecnie, także w Polsce, produkowanych jest i pracuje coraz więcej transformatorów napełnianych przyjaznymi środowisku cieczami, a ich moce przekraczają już 100 MVA przy napięciach powyżej 200 kV. Jako przykłady można tu wymienić chociażby transformator blokowy napełniony estrem naturalnym o mocy 22 MVA i napięciu 242 kV zainstalowany w Brazylii w okolicy rzeki Amazonki czy napełniony estrem syntetycznym transformator o mocy 135 MVA na napięciu 238/35 kV pracujący w Szwecji, w podziemnej stacji elektroenergetycznej w pobliżu jeziora Malmogaj.

Unormowania w zakresie stosowania estrów

Na rynku cieczy dielektrycznych istnieje kilka komercyjnych biodegradowalnych płynów izolacyjnych do zastosowań elektrycznych. Są to m.in. ester syntetyczny Midel 7131 czy estry naturalne jak Midel eN, Biotemp czy Envirotemp FR3. Dodatkowo, w fazie testów jest też duża część płynów pochodzenia naturalnego, do których nazewnictwa używa się potocznie sformułowania "oleje roślinne", choć w dalszym ciągu są to typowe estry tychże olejów. Wymagania jakie powinny spełniać poszczególne ciecze określone są w stosownych normach. Co ważne podkreślenia, wymagania te są dla oleju mineralnego oraz obu estrów znacząco różne na co wpływ ma głównie specyfika omawianych cieczy w obszarze ich właściwości fizyko-chemicznych. Poza tym normy amerykańskie i europejskie nie są tożsame w zakresie sposobu wyznaczania pewnych parametrów dielektrycznych opisujących właściwości cieczy. Aktualnie obowiązujące standardy dla poszczególnych płynów izolacyjnych są następujące:

- oleje mineralne: norma IEC 60296:2012 "Ciecze stosowane w elektrotechnice - Świeże mineralne oleje izolacyjne do transformatorów i aparatury łączeniowej";
- estry syntetyczne: norma IEC 61099:2011 "Ciecze elektroizolacyjne - Wymagania techniczne dla świeżych syntetycznych estrów organicznych do zastosowań elektrycznych";
- estry naturalne: norma ASTM D6871-03:2008 "Standard specification for natural (Vegetable Oil) ester fluids used in electrical apparatus" oraz przewodnik IEEE C57.147-2008 "Guide for acceptance and maintenance of natural ester fluids in transformers".

Obecnie trwają prace w zakresie zmian niektórych zapisów normy europejskiej dotyczącej estrów syntetycznych wynikające z dotychczasowych doświadczeń

eksploatacyjnych (głównie dotyczy to współczynnika strat dielektrycznych tgδ) [7, 8]. Dla estrów naturalnych zaś, jak widać powyżej norma europejska jeszcze nie istnieje. Jest ona jednak w trakcie przygotowywania, a jej pierwsza wersja powinna ukazać się już w 2014 roku.

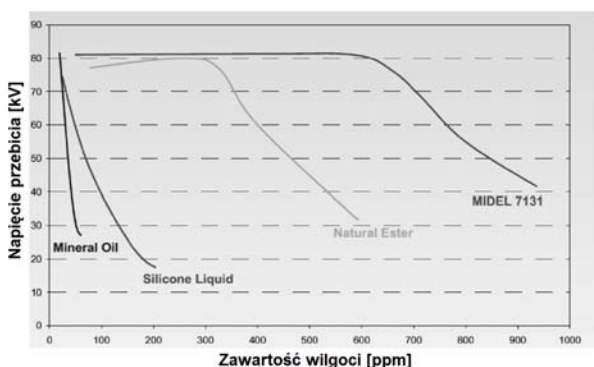
Wytrzymałość elektryczna przy napięciu przemiennym

Wytrzymałość elektryczna cieczy dielektrycznych przy napięciu przemiennym określana jest na podstawie normy IEC 60156 "Ciecze elektroizolacyjne - Określanie napięcia przebicia przy częstotliwości sieciowej - Metoda badania". Zgodnie z normą, dla odpowiednio pobranej próbki cieczy wykonuje się pomiar napięcia przebicia dla 2,5 mm przerwy olejowej w układzie elektrod kulistych lub półkulistych o quasi-równomiernym rozkładzie pola elektrycznego. Dla otrzymanych wartości sześciu pomiarów wyznacza się wartość średnią, która stanowi napięcie przebicia danej próbki. W tabeli 2 przedstawione zostały wyniki pomiarów wykonane zgodnie z w/w normą dla trzech komercyjnych płynów izolacyjnych: ester syntetyczny MIDEL 7131, ester naturalny FR3 oraz olej mineralny Shell Diala. W związku z tym, że przemienne napięcie przebicia cieczy jest silnie zależne od zawartości wilgoci, w trakcie pomiarów uwzględniono poziom zawilgocenia cieczy, który również przytoczono w tabeli [3, 6, 8]. Procedurę pomiaru napięcia przebicia powtórzono dla każdej cieczy pięciokrotnie.

Tabela 2. Przemienne napięcie przebicia badanych cieczy izolacyjnych

Rodzaj cieczy	Zawartość wilgoci [ppm]	Napięcie przebicia [kV]					
		77	71	72	76	70	
Ester syntetyczny	33	77	71	72	76	70	
Ester syntetyczny	24	78	81	69	72	73	
Ester naturalny	37	76	70	77	79	76	
Ester naturalny	26	74	77	77	71	73	
Olej mineralny	8	72	69	74	77	74	

Dla wszystkich cieczy, przy różnym stopniu ich zawilgocenia, jednak mieszczącym się w tym samym zakresie, otrzymane wyniki wskazują na bardzo zbliżone właściwości obu estrów i oleju mineralnego w zakresie wytrzymałości elektrycznej przy napięciu przemiennym. Jednakże, gdy spojrzymy na problem wpływu zawilgocenia cieczy na jej napięcie przebicia, zaobserwujemy zdecydowanie korzystniejsze zachowanie się estrów, przy czym estry syntetyczne wydają się mieć w tym zakresie właściwości zdecydowanie najlepsze. Na rysunku 1 pokazany został zaczerpnięty z literatury [6] wykres zależności napięcia przebicia, mierzonego zgodnie z normą IEC 60156, od zawartości wilgoci dla różnego rodzaju cieczy dielektrycznych.



Rys.1. Zależność napięcia przebicia od zawartości wilgoci dla różnych cieczy dielektrycznych [6]

Dla estru syntetycznego obserwuje się brak wpływu zawilgocenia na przemienne napięcie przebicia nawet do 500-600 ppm. Estry naturalne z kolei, wykazują ten brak wpływu do ok. 300 ppm. Wytrzymałość oleju mineralnego natomiast, co jest faktem powszechnie znanym, spada diametralnie nawet przy niewielkiej zawartości wilgoci w jego objętości. Kilkanaście do 20 ppm zmniejsza tę wytrzymałość nawet do 40 kV [3, 6, 8].

Zdolności absorpcji wilgoci przez estry stanowi dodatkowo istotną zaletę przy rozpatrywaniu współpracy tych płynów z izolacją stałą. Pochłanianie wilgoci z papieru spowolnić może bowiem procesy starzeniowe izolacji papierowej transformatora i wydłużyć znacząco jego czas życia. Stąd pojawiają się już próby zastępowania oleju mineralnego w transformatorach długo eksploatowanych estrami [3-5].

Również przenikalność elektryczna jako parametr charakteryzujący właściwości materiałów izolacyjnych wskazuje na korzystniejsze właściwości estrów. Układ izolacyjny uzwojeń jest najczęściej kombinacją płynu elektroizolacyjnego z materiałami izolacyjnymi stałymi, głównie papierem i preszpanem. Są to układy szeregowe, szeregowo-równoległe i równoległe. W układach szeregowych rozkład naprężeń jest odwrotnie proporcjonalny do przenikalności dielektrycznej materiałów izolacyjnych go tworzących. Układ ten jest tym bardziej wytrzymały, im bardziej rozkład naprężeń jest równomierny. Wyższa wartość przenikalności elektrycznej estrów (ok. 3,1-3,2) niż oleju mineralnego (ok. 2,2), wpływa więc korzystnie na rozkład naprężeń w układzie płyn elektroizolacyjny – celuloza [3-8].

Wytrzymałość przy napięciu udarowym piorunowym

Wytrzymałość estrów na udary napięciowe o stromym czole (1,2 μs) i długim grzbiecie (50 μs) jest możliwa do oceny poprzez realizację szerokiego programu badań w specjalistycznym laboratorium wyposażonym w aparaturę do czasowo-przestrzennego śledzenia rozwoju wyładowań wraz z możliwością pomiaru parametrów wyładowań jak napięcie inicjacji, szybkość propagacji itp. [7, 9-11].

Badania mechanizmów inicjacji i propagacji wyładowań elektrycznych rozwijających się pod wpływem wspomnianych impulsów napięciowych wykazały, że jedynie przy napięciu inicjacji lub przy napięciu równym 50%-emu napięciu przebicia, wyładowania rozwijają się w podobny sposób tj. zgodnie z teorią jonizacji w fazie gazowej [10, 11]. Świadczy o tym równość oszacowanych eksperymentalnie napięć inicjacji wyładowań. Zestawienie tych napięć, otrzymanych podczas autorskich badań laboratoryjnych wykonanych dla estru syntetycznego MIDEL 7131, estru naturalnego Envirotemp FR3 i oleju mineralnego Shell Diala [9], dla przerw olejowych od 10 do 20 mm w układzie ostrze-płyta przy napięciu udarowym piorunowym 1,2/50 obu biegunowości, przedstawiono odpowiednio w tabelach 3 i 4.

Tabela 3. Parametry rozkładu Weibulla dla dodatnich napięć inicjacji

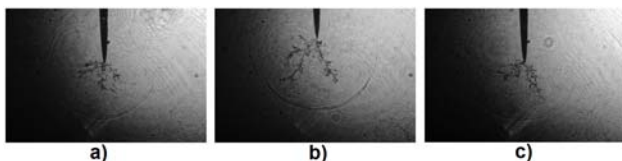
Rodzaj cieczy	Przerwa olejowa [mm]	Parametry			
		V_0 [kV]	V_m [kV]	k	V_{Med} [kV]
Ester naturalny	10	49.3	54.4	1.6	53.4
	15	52.1	58.1	2.6	57.3
	20	57.6	63.9	2.0	62.8
Ester syntetyczny	10	49.9	55.8	0.9	53.7
	15	52.7	59.9	2.6	59.0
	20	59.8	65.4	2.3	64.6
Olej mineralny	10	43.2	55.3	4.2	54.3
	15	52.5	61.2	3.8	60.4
	20	53.7	64.7	3.4	63.5

Tabela 4. Parametry rozkładu Weibulla dla ujemnych napięć inicjacji

Rodzaj cieczy	Przerwa olejowa [mm]	Parametry			
		V_0 [kV]	V_m [kV]	k	V_{Med} [kV]
Ester naturalny	10	46.0	54.1	4.0	53.4
	15	52.7	57.7	2.2	57.3
	20	56.7	64.1	2.6	63.1
Ester syntetyczny	10	43.2	54.0	5.2	53.3
	15	52.0	58.6	3.1	57.9
	20	58.1	64.0	1.9	63.0
Olej mineralny	10	44.1	54.9	4.8	54.1
	15	51.2	59.4	3.1	58.5
	20	54.2	65.0	3.4	63.9

W tabelach zawarto oszacowane statystycznie wartości napięć inicjacji przedstawione za pomocą parametrów rozkładu Weibulla [10, 11]. Kolejno uwzględniono parametr przesunięcia (V_0), parametr skali (V_m) oraz parametr kształtu (k). Dodatkowo zawarto w tabeli także medianę napięć inicjacji (V_{Med}). Parametry wyznaczone zostały na podstawie 15-tych pomiarów wykonanych dla każdej przerwy międzyelektrodowej, odpowiednio dla każdego rodzaju cieczy i danej biegunowości.

Dodatkowym potwierdzeniem identycznego zachowania się wyładowań rozwijających się przy napięciu inicjacji pod wpływem napięcia udarowego piorunowego są otrzymane podczas badań laboratoryjnych fotografie cieniowe wyładowań. Na rysunku 2 pokazano przykładowe fotografie wyładowań ujemnych rozwijających się odpowiednio w estrze syntetycznym, naturalnym i oleju mineralnym. Kształt tych wyładowań jest typowy dla ujemnych wyładowań rozwijających się przy napięciu inicjacji [7, 9-11].



Rys.2. Przykład ujemnych wyładowań rozwijających się przy napięciu inicjacji: a) ester syntetyczny, d=15 mm, b) ester naturalny, d=20 mm, c) olej mineralny, d=15mm

Kiedy jednak, przy zachowaniu stałej odległości międzyelektrodowej, napięcie probiercze zostanie zwiększone powyżej napięcia inicjacji i 50%-go napięcia przebicia danej przerwy olejowej, to dla estrów mechanizm jonizacji w fazie ciekłej stanie się mechanizmem dominującym przy znacznie niższej krotności napięcia przebicia. Wartość to 1,2-1,4 50%-go napięcia przebicia, podczas gdy dla oleju mineralnego ta wartość osiąga 2 lub nawet 2,2 [7, 10]. Biorąc pod uwagę, że jonizacja w fazie ciekłej to bardziej energetyczne wyładowania, groźniejsze dla izolacji stałej transformatora (papier czy preszpan), to rozpatrywane na tej bazie właściwości izolacyjne układu papier-ciecz dielektryczna, gdy cieczą będzie któryś z estrów, stają się gorsze. Dodatkowo ten negatywny efekt jest potęgowany przy dłuższych (8-10 cm) przerwach elektrodowych, typowych dla transformatorów o napięciach znamionowych przekraczających 100 kV. Wtedy to pojawienie się wyładowań silnie energetycznych w estrach następuje przy jeszcze niższych krotnościach 50%-go napięcia przebicia danej przerwy międzyelektrodowej [7].

Wnioski

Estry syntetyczne i naturalne stanowią istotną alternatywę dla oleju mineralnego gdy transformator ma być zainstalowany w miejscach o restrykcyjnych przepisach

środowiskowych i pożarowych. Wysoka temperatura zapłonu przekraczająca znacznie 250°C oraz wysoki poziom biodegradowalności są tego dowodem.

W zakresie wytrzymałości elektrycznej przy napięciu przemiennym szczególnie istotny jest wyraźnie widoczny brak wpływu zawilgocenia estrów na ich przemienne napięcie przebicia. Dodatkowo estry doskonale zachowują się we współpracy z izolacją stałą dzięki zdolnościom absorpcji wilgoci z papieru, a także wyższej niż olej mineralny przenikalności elektrycznej.

Rozpatrując natomiast wytrzymałość estrów przy napięciu udarowym piorunowym nie można jednoznacznie stwierdzić, że jest ona identyczna jak dla oleju mineralnego. Jakkolwiek napięcia inicjacji wyładowań są zbliżone, to jednak w przypadku estrów, przy większych odstępach międzyelektrodowych (8-10 cm), pojawienie się mocno energetycznych wyładowań następuje przy znacznie niższej krotności napięcia w stosunku do 50%-go napięcia przebicia.

Inne nieopisane w niniejszym artykule negatywne cechy estrów jak podatność na oddziaływanie skoncentrowanego strumienia ciepłego czy gorsze właściwości chłodzące, ze względu na wyższą niż olej mineralny lepkość i gęstość, także powinny być brane pod uwagę przy projektowaniu transformatorów z estrami.

Prace zaprezentowane w niniejszym artykule są finansowane w ramach projektu badawczego NCN na podstawie decyzji DEC-2011/01/D/ST8/03549.

Podziękowania dla M&I Materials oraz ZREW Transformatory Sp. z o.o. za pomoc w badaniach.

LITERATURA

- [1] Badent R., Kist K., Schwab A. J., Rapee-seed oil - a substitute for mineral oil, *11th Intern. Symp. on High Voltage Eng.*, (1999), 140-143
- [2] Mosiński F., Ekologiczne aspekty eksploatacji transformatorów energetycznych, *VII Konferencja Naukowo-Techniczna Transformatory Energetyczne i Specjalne*, (2008), 227-236
- [3] Hasterman Z., Mosiński F., Maliszewski A., Wytrzymałość elektryczna transformatorów energetycznych, *WNT, Warszawa*, (1983)
- [4] Li J., Grzybowski S., Sun Y., Chen X., Dielectric properties of rapeseed oil paper insulation, *IEEE Annual Report Conf. on Electr. Insul. and Diel. Phenom.*, (2007), 500-503
- [5] Dai J., Wang Z. D., A comparison of the impregnation of cellulose insulation by ester and mineral oil, *IEEE Trans. Dielctr. Insul.*, 15 (2008), n.2, 1582-1594
- [6] Midel 7131 Transformer Fluid - Technical Data Sheets, www.midel.com, (2010)
- [7] Viet-Hung D., Beroual A., Perrier C., Investigations on streamers phenomena in mineral, synthetic and natural ester oils under lightning impulse voltage, *IEEE Trans. Dielctr. Insul.*, 19 (2012), n.5, 1521-1527
- [8] Różga P., Skowron A., Wpływ skoncentrowanego strumienia ciepłego na właściwości estrów syntetycznych, *Wiadomości Elektrotechniczne*, (2013), nr.2, 30-34
- [9] Rozga P., Stanek M., Cieslinski D., Comparison of properties of electrical discharges developing in natural and synthetic ester at inception voltage, *IEEE Annual Report Conf. on Electr. Insul. and Diel. Phenom.*, (2013), (w druku)
- [10] Galczak J., Wyładowanie elektryczne w oleju transformatorowym przy udarach piorunowych w układach izolowanych elektrod, *Politechnika Łódzka, Zeszyty Naukowe nr.930*, (2003)
- [11] Rozga P., The influence of paper insulation on the prebreakdown phenomena in mineral oil under lightning impulse, *IEEE Trans. Dielctr. Insul.*, 11 (2011), n.3, 720-727

Autorzy: dr inż. Paweł Różga, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: pawel.rozga@p.lodz.pl