

Badanie właściwości dielektrycznych estrów syntetycznych w warunkach skoncentrowanego strumienia ciepłego

Abstract: *The fundamental information, in the field of dielectric properties of insulating liquid based on synthetic ester, is presented in this paper. The main attention is directed on the dielectric loss factor, which shows the susceptibility to the action of the concentrated heat flux, what was confirmed by the experiences resulting from the practical use of the synthetic esters as an insulating liquid in power transformers. The experimental setup for the investigation of the influence of concentrated heat flux on the dielectric parameters of synthetic ester and the scope of the experimental works is also described.*

Keywords: dielectric liquids, dielectric properties, biodegradability, heat flux

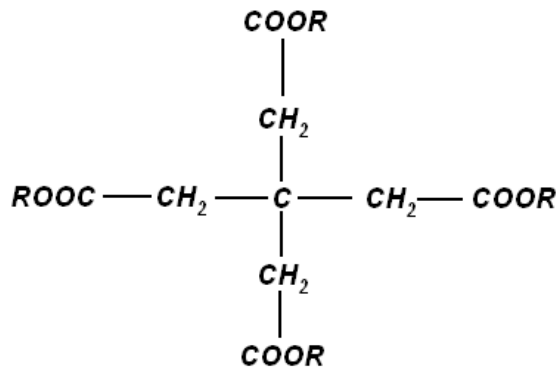
Wprowadzenie

W ostatnim czasie, zarówno w światowej jak i polskiej elektroenergetyce, wzrasta zainteresowanie płynami izolacyjnymi, które w sytuacjach, gdzie decydujące znaczenie ma ochrona środowiska i profilaktyka przeciwpożarowa, mogłyby zastępować olej mineralny w transformatorach energetycznych [1-7]. Takimi cieczami są specjalnie produkowane estry syntetyczne i naturalne, o których pierwsze wzmianki pojawiły się w literaturze na przełomie lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Od tego czasu z każdym rokiem wzrasta liczba transformatorów, w których jako medium izolacyjno-chłodzące zastosowany został jeden z wymienionych wyżej płynów, przy czym w większym zakresie wykorzystuje się płyny bazujące na estrach syntetycznych. Z punktu widzenia ochrony środowiska, estry syntetyczne, w odniesieniu do konwencjonalnych olejów mineralnych, charakteryzują się wysokim stopniem biodegradowalności, sięgającym blisko 90%, oraz znacznie wyższą temperaturą zapłonu (ponad 300°C do około 160°C charakterystycznej dla oleju mineralnego) [1, 4, 9]. Krótki czas istnienia na rynku wspomnianych wyżej cieczy powoduje jednak, że wiedza w zakresie ich właściwości dielektrycznych jest niepełna. Stosowanie estrów jako izolacji transformatorów przynosi z każdą nową wyprodukowaną jednostką informacje, które dają impuls do dodatkowych badań przyczyniających się do poszerzenia tej wiedzy, a przez to wpływają pozytywnie na proces produkcji oraz eksploatacji.

Charakterystyka estrów syntetycznych

Estry syntetyczne są organicznymi związkami chemicznymi – estrami pentaerytrytowymi, które składają się z czterech grup estrowych –COOR znajdujących się na końcu struktury krzyżowej związku, w których grupy organiczne R mogą być zarówno takie same jak i różne (Rys. 1).

Wymagania jakie powinny spełniać świeże estry syntetyczne przed napełnieniem nimi transformatora w odniesieniu do ich parametrów fizykochemicznych oraz dielektrycznych zostały określone w normie przedmiotowej: PN-EN 61099:2011 – Ciecze elektroizolacyjne – Wymagania techniczne dla świeżych syntetycznych estrów organicznych do zastosowań elektrycznych [8].



Rys. 1. Struktura chemiczna estru syntetycznego

Właściwości estru syntetycznego (wraz z normą, z użyciem której zostały określone) na przykładzie płynu izolacyjnego Midel 7131 [10] w odniesieniu do określonych w normie [8] wymagań zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości estru syntetycznego w odniesieniu do wymagań norm

Parametry	Właściwości estru Midel 7131	Wymagania normy PN-EN 61099:2011
Gęstość w 20°C [kg / dm ³] (PN-EN ISO 3675:2004)	0.98	Max. 1
Lepkość w -20°C [mm ² /s] (PN-EN ISO 3104:2004)	2400	Max. 3000
Lepkość w 40°C [mm ² /s] (PN-EN ISO 3104:2004)	28	Max. 35
Temp. zapłonu - Flash Point [°C] (PN-EN ISO 2719:2007)	260	250
Temp. palenia - Fire Point [°C] (PN-EN ISO 2592:2008)	316	300
Napięcie przebicia [kV] (PN-EN 60156)	> 75	Min. 45
Współczynnik strat dielektrycznych tg δ przy 90°C i 50 Hz (PN-EN 60247)	< 0.008	Max. 0.03
Rezystywność przy 90°C [GΩm] (PN-EN 60247)	> 30	Min. 2
Przenikalność dielektryczna ε przy 20°C (PN-EN 60247)	3,2	-
Ciepło właściwe [J/kgK]	1880	-

Dodatkowo należy zaznaczyć, że płyn Midel 7131 jako przedstawiciel estrów syntetycznych spełnia kryteria biodegradowalności opisane w normie OECD 301, zgodnie z którą ciecz uznaje się za biodegradowalną gdy 10% jej rozkładu w określonych warunkach nastąpi w ciągu pierwszych 10 dni, a co najmniej 60% w ciągu 28 dni. Biodegradowalność podawana w karcie charakterystyki przez producenta płynu Midel 7131 wynosi 89% po 28 dniach zaś analogicznie określona biodegradowalność oleju mineralnego wynosi tylko 10 % [10].

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

W Tabeli 2 natomiast dokonano porównania niektórych właściwości estru syntetycznego ze świeżym olejem mineralnym, który spełnia wymagania normy PN-EN 60296:2007 – Ciecze stosowane w elektrotechnice – Świeże mineralne oleje izolacyjne do transformatorów i aparatury łączeniowej [11].

Tabela 2. Porównanie właściwości estru syntetycznego i oleju mineralnego

Parametry	Ester syntetyczny	Olej mineralny
Gęstość w 20°C [kg / dm ³] (PN-EN ISO 3675:2004)	0.98	0.88
Lepkość w 40°C [mm ² /s] (PN-EN ISO 3104:2004)	28	8
Temp. zapłonu - Flash Point [°C] (PN-EN ISO 2719:2007)	260	150
Temp. palenia - Fire Point [°C] (PN-EN ISO 2592:2008)	316	170
Napięcie przebicia [kV] (PN-EN 60156)	> 75	> 70
Współczynnik strat dielektrycznych tg δ przy 90°C i 50 Hz (PN-EN 60247)	< 0.008	< 0.002
Przenikalność dielektryczna ε przy 20°C (PN-EN 60247)	3.2	2.2
Ciepło właściwe [J/kgK]	1880	1860

Problem badawczy

Praca z estrem syntetycznym Midel 7131 wykazała, że jest on podatny na działanie skoncentrowanego strumienia ciepłego. Oznacza to, że stosowanie dużej jednostkowej obciążalności powierzchniowej (wyrażanej w W/cm²) grzałek służących do podgrzewania cieczy izolacyjnej, powoduje zmiany współczynnika strat dielektrycznych tgδ estru do poziomu dyskwalifikującego go z użycia jako płynu izolacyjnego w transformatorze. Problem został zidentyfikowany podczas przygotowywania płynu Midel 7131 do zalania transformatora, gdy do podgrzania użyto układu wykorzystywanego do obróbki cieplnej oleju mineralnego. W układzie tym, jednostkowa obciążalność powierzchniowa grzałek wynosi 2 W/cm². Zmierzony po podgrzaniu współczynnik strat dielektrycznych przekroczył wymaganą wartość 0.03. Tak gwałtowny wzrost tgδ po podgrzaniu płynu w warunkach identycznych jak w przypadku oleju mineralnym oznacza, że zastosowanie takich samych parametrów obróbki termicznej obu płynów nie jest możliwe. Należy więc określić wartość optymalną jednostkowej obciążalności powierzchniowej grzałek stosowanych do podgrzewania estru syntetycznego Midel 7131, by skoncentrowany strumień ciepły działał z mniejszym natężeniem niepowodującym zmian tgδ lub zmieniającym go, ale do akceptowalnej z punktu widzenia norm wartości (<0.03 mierzonej w temperaturze 90°C) [7, 8].

Problem badawczy określający wpływ skoncentrowanego strumienia ciepłego na parametry dielektryczne estru syntetycznego, który w efekcie da możliwość określenia optymalnej wartości jednostkowej mocy obciążeniowej grzałek użytych do podgrzewania estru, wydaje się więc być słuszny z technicznego ale i naukowego punktu widzenia. Prowadzone w tym obszarze prace eksperymentalne mogłyby pomóc w ewentualnej ocenie zjawisk, jakie mogą zachodzić w czasie podgrzewania cieczy na bazie estrów jak np. miejscowego przegrzewania powodującego degradację cieczy.

Być może zaobserwowane zjawiska będą mogły zostać skorelowane ze znanymi już w literaturze, choć również planowanymi do zbadania, zjawiskami związanymi z wytrzymałością udarową estrów w układzie ostrze-płyta [3, 5, 7].

Układ eksperymentalny

Zdefiniowany i przedstawiony wyżej problem nie może zostać rozwiązany poprzez wykonanie badań eksperymentalnych w rzeczywistym układzie do podgrzewania cieczy izolacyjnych gdyż niósłby za sobą zużycie wielu setek/tysięcy litrów płynu izolacyjnego i jednocześnie na długi czas zablokowałby linię produkcyjną. Dlatego też zaprojektowany i wykonany został układ eksperymentalny, którego zadaniem jest w jak największym przybliżeniu zasymulowanie rzeczywistego układu do podgrzewania cieczy izolacyjnych.

Taki układ eksperymentalny, przy współpracy z jednym z polskich producentów transformatorów, został stworzony w Zakładzie Wysokich Napięć Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej (Rys. 2).



Rys. 2. Układ eksperymentalny do badania wpływu skoncentrowanego strumienia ciepłego na parametry dielektryczne estru syntetycznego: 1 - zbiornik pomiarowy, 2 - pompa elektryczna wymuszająca obieg cieczy w układzie, 3 - grzałka, 4 - rejestrator temperatury, 5 - zestaw czujników temperatury typu Pt-100, 6 - szafa sterowniczo-pomiarowa

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

W pełni zautomatyzowany układ umożliwi zbadanie wpływu skoncentrowanego strumienia ciepłego na parametry dielektryczne dowolnej cieczy dielektrycznej. Układ jest wyposażony w grzałkę o sterowanej jednostkowej mocy cieplnej w granicach od około 0.4 do 2.4 W/cm² i pozwala na przeprowadzenie procesu podgrzania cieczy dielektrycznej w układzie zamkniętym z wymuszonym obiegiem oleju, przy jednoczesnej kontroli temperatury procesu w kilku punktach zbiornika pomiarowego.

Najważniejszymi elementami układu są:

- zbiornik o pojemności 26 litrów z przezroczystymi ścianami bocznymi dającymi możliwość obserwacji zjawisk na powierzchni grzałki i w jej obrębie,
- trójfazowa pompa elektryczna wymuszająca obieg cieczy w układzie zamkniętym,
- grzałka w kształcie walca o sterowanej mocy cieplnej,
- rejestrator temperatury wraz z zestawem czujników Pt100, który współpracuje z oprogramowaniem rejestrującym zmiany temperatury w maksymalnie 9 punktach zbiornika,
- regulator temperatury wyłączający grzałkę po osiągnięciu zadanej temperatury,
- elementy układu zasilania, układu pomiaru wielkości elektrycznych i układu zabezpieczeń.

Rozwiązanie problemu badawczego zostanie osiągnięte po zrealizowaniu następującego programu badań w opisanym układzie eksperymentalnym:

- dla zakresu jednostkowego obciążenia powierzchniowego w granicach od 0.4 do 2.4 W/cm² wykonane zostaną badania polegające na podgrzaniu cieczy od temperatury otoczenia do temperatury 70°C według dwóch procedur:
 - wykonanie pomiaru przy maksymalnej i minimalnej wartości jednostkowej mocy obciążeniowej, aby sprawdzić czy zjawisko jest możliwe do zaobserwowania w wykonanym układzie eksperymentalnym,
 - wykonanie pomiarów z krokiem 0,1 W/cm² od wartości minimalnej do maksymalnej,
- dostarczenie, po każdym cyklu pomiarowym, próbek cieczy do laboratorium chemicznego celem ich analizy (pomiaru tgδ i rezystywności) – oba parametry będą mierzone w temperaturach 50 i 90°C,
- analiza otrzymanych wyników badań,
- przedstawienie wyników prezentujących zbiorczo zagadnienie wpływu skoncentrowanego strumienia ciepłego na współczynnik strat dielektrycznych i rezystywność cieczy izolacyjnej na bazie estru syntetycznego.

Podsumowanie

W wyniku współpracy sfery nauki i przemysłu stworzony został program badań eksperymentalnych, który zrealizowany zostanie z wykorzystaniem specjalnie przygotowanego do tego celu układu przy jednoczesnym zaangażowaniu w badania zakładu produkującego transformatory. Istotnym aspektem programu badań jest fakt, że próbki badanego estru, pobrane ze zbiornika pomiarowego po przeprowadzeniu procesu podgrzania z określoną jednostkową mocą cieplną, będą każdorazowo przekazywane do laboratorium chemicznego zakładu, gdzie zostaną określone ich parametry dielektryczne. Wielkością, na którą zwrócona zostanie szczególna uwaga będzie wspomniany wyżej współczynnik strat dielektrycznych tgδ. Efektem końcowym prac badawczych będzie charakterystyka zmian tgδ od jednostkowej mocy cieplnej zastosowanego urządzenia grzewczego.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/D/ST8/03549.

Literatura

1. Borsi H., Gockenbach E., Properties of Ester Liquid Midel 7131 as an Alternative Liquid to Mineral Oil for Transformers, 2005 IEEE Intern. Conf. on Dielect. Liquids, pp. 377-380.
2. Li J., Grzybowski S., Sun Y., Chen X., Dielectric Properties of Rapeseed Oil Paper Insulation, 2007 Annual Report Conf. on Electr. Insul. and Dielect. Phenom., pp. 500-503.
3. Liu Q., Wang Z. D., Streamer Characteristic and Breakdown in Synthetic and Natural Ester Transformer Liquids under Standard Lightning Impulse, IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul., Vol. 18, No. 1, 2011, pp. 285-294.
4. Martins M. A. G., Vegetable Oils, an Alternative to Mineral Oil for Power Transformers – Experimental Study of Paper Aging in Vegetable Oil Versus Mineral Oil, IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 26, No. 6, 2010, pp. 7-13.
5. Nguyen Ngoc M., Lesaint O., Bonifaci N., Denat A., Hassanzadeh M., A comparison of breakdown properties of natural and synthetic esters at high voltage, 2010 Annual Report Conf. on Electr. Insul. and Dielect. Phenom., pp. 1-4.
6. Perrier C., Beroual A., Experimental Investigations on Mineral and Esters Oils for Power Transformers, 2007 Annual Report Conf. on Electr. Insul. and Dielect. Phenom., pp 178-181.
7. Różga P., Właściwości wyładowań elektrycznych rozwijających się w naturalnych i syntetycznych estrach przy wysokim napięciu, XVII Konferencja Energetyki „Innowacje przyszłością energetyki”, Jachranka, 7-9.09.2011, s. 322-330.
8. PN-EN 61099:2011 – Ciecze elektroizolacyjne – Wymagania techniczne dla świeżych syntetycznych estrów organicznych do zastosowań elektrycznych.
9. PN-EN 60296:2007 – Ciecze stosowane w elektrotechnice – Świeże mineralne oleje izolacyjne do transformatorów i aparatury łączeniowej.
10. Midel 7131 Transformer Fluid” – Technical Data Sheets, www.midel.com, 2010.
11. PN-EN 60247:2008 – Ciecze elektroizolacyjne – pomiar przenikalności elektrycznej względnej, współczynnika strat dielektrycznych (tg delta) i rezystywności przy prądzie stałym.

Autorzy: dr inż. Paweł Różga, Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, e-mail: pawel.rozga@p.lodz.pl;