

Rozwój wyładowań elektrycznych w estrze syntetycznym w polu skrajnie nierównomiernym

Abstract. *W artykule przedstawione zostały zagadnienia związane z rozwojem wyładowań elektrycznych w estrze syntetycznym w układzie elektrod ostrze-płyta pod wpływem napięcia udarowego piorunowego biegunowości dodatniej. Na bazie własnych badań eksperymentalnych pokazane zostały zależności zmiany prędkości propagacji wyładowań od wartości szczytowej napięcia udarowego piorunowego doprowadzonego do rozpatrywanego układu elektrod. Dla obu biegunowości udaru zauważalny jest nagły wzrost prędkości propagacji przy znacznie niższym napięciu niż ma to miejsce w przypadku oleju mineralnego. Świadczy to o nieco gorszych właściwościach estru niż oleju mineralnego w zakresie wytrzymałości udarowej.*

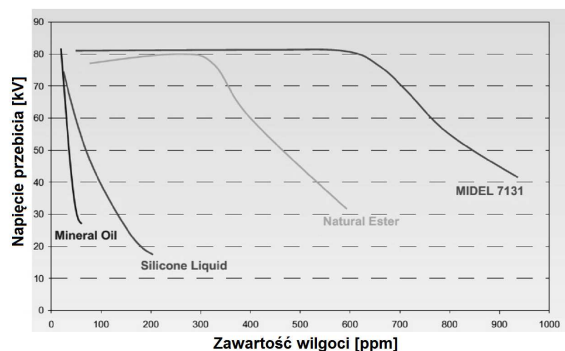
Keywords: wyładowania elektryczne, estry syntetyczne, wytrzymałość udarowa

Wprowadzenie

Tendencje proekologiczne w przemyśle elektroenergetycznym mają swoje odzwierciedlenie także w odniesieniu do płynów izolacyjnych wykorzystywanych w olejowych transformatorach energetycznych. Powszechnie stosowany jako medium izolacyjno-chłodzące olej mineralny charakteryzujący się bowiem niskim stopniem biodegradowalności (około 10%) oraz niezbyt wysoką temperaturą zapłonu (około 150 °C) co powoduje, że nie jest płynem przyjaznym środowisku i w sytuacjach niezamierzonego uwolnienia do środowiska stanowi dla niego potencjalne zagrożenie. Poszukiwane są zatem produkty, które mogłyby stanowić alternatywę dla oleju mineralnego, szczególnie w przypadkach gdy transformator ma być zainstalowany w miejscach o wysoce restrykcyjnych przepisach pożarowych oraz tych związanych z ochroną środowiska. Szczególnie obszary otaczające parki narodowe i krajobrazowe, a także miejsca dużych skupisk ludności (np. centra miast czy centra handlowe) są miejscami gdzie minimalizacja zagrożeń środowiskowych i pożarowych jest wskazana. Jednym z produktów mogącym zastąpić olej mineralny w transformatorach jest specjalnie produkowane w tym celu ester syntetyczny, którego biodegradowalność sięga 90%, a temperatura zapłonu przekracza 300 °C [1-5]. Ester syntetyczny, obok doskonałych właściwości przyjaznych środowisku, posiada także szereg pozytywnych cech związanych z jego właściwościami dielektrycznymi. W zakresie wytrzymałości elektrycznej przy napięciu przemiennym szczególnie istotny jest wyraźnie widoczny brak wpływu zawartości wody (nawet do 600 ppm) na przemienne napięcie przebicia [1, 3-6]. Zależność tę, zaczerpniętą z [5] pokazuje rysunek 1, gdzie porównane zostały cztery różne ciecze dielektryczne: olej mineralny, olej silikonowy, ester naturalny oraz komercyjny ester syntetyczny Midel 7131. Estry doskonale zachowują się także we współpracy z izolacją stałą dzięki zdolnościom absorpcji wilgoci z papieru, a także dzięki wyższej niż olej mineralny przenikalności elektrycznej [2, 7].

Negatywne własności estrów zostały natomiast zaobserwowane podczas badań ich wytrzymałości elektrycznej przy napięciu udarowym piorunowym [8-10]. Wyniki

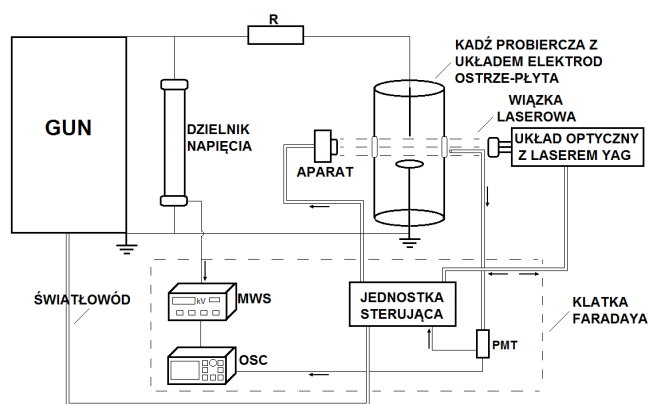
autorskich badań w tym zakresie, odniesione do dodatniej biegunowości udaru, zostały opisane w niniejszym artykule w aspekcie pomierzonych szybkości propagacji wyładowań dla dwóch odległości międzyelektrodowych 15 i 20 mm w układzie ostrze-plate, a więc w polu skrajnie nierównomiernym.



Rys.1. Zależność napięcia przebicia od zawartości wilgoci dla różnych cieczy dielektrycznych [5].

Metodologia badań eksperymentalnych

Badania przeprowadzone zostały w laboratorium składającym się z dwóch niezależnie pracujących układów eksperymentalnych, które wspólnie dają możliwość śledzenia rozwoju czasowo-przestrzennego wyładowań elektrycznych w dowolnej cieczy dielektrycznej [6, 11, 12]. Elementy składowe laboratorium, wraz z zastosowanymi pomiędzy poszczególnymi członami wykonawczymi połączeniami, zaprezentowane zostały schematycznie na rysunku 2.



Rys.2. Układ laboratoryjny wykorzystany w baaniach: GUN - generator udarów napięciowych piorunowych, PMT - zestaw fotopowielaczy, R - rezystor ograniczający.

Źródłem napięcia w układzie był 6-ciostopniowy generator udarów napięciowych Marxa wytwarzający znormalizowany udar 1,2/50 μ s. Pomiar wartości szczytowej udaru realizowany był z użyciem rezystancyjnego dzielnika napięciowego i miernika wartości szczytowej. Każdorazowo sygnał napięciowy był też rejestrowany przez oscyloskop cyfrowy. W skład układów eksperymentalnych wchodziły natomiast:

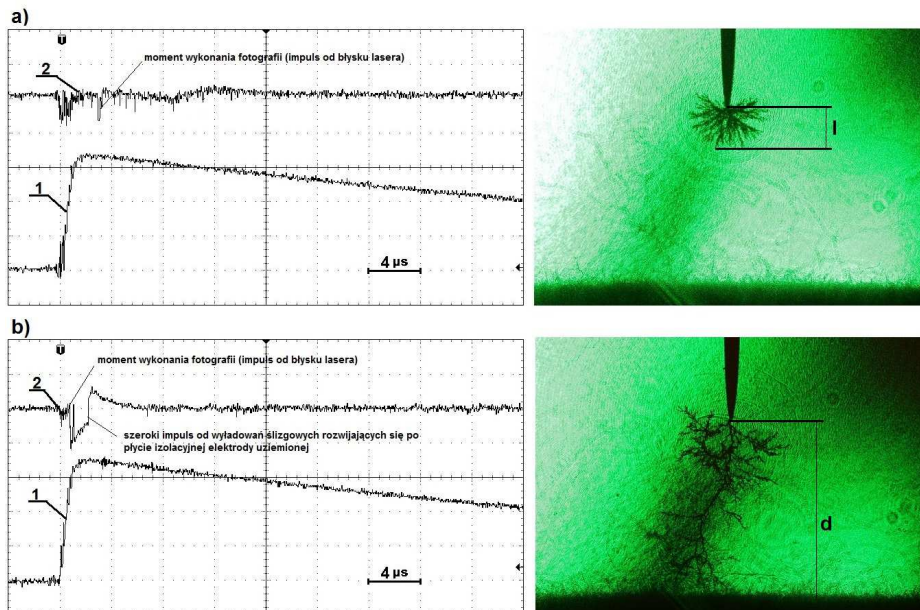
- laserowy układ do rejestracji fotografii cieniowych wyładowań (z laserem impulsowym Nd:YAG jako lampą błyskową), który umożliwiał fotografowanie tworów wyładowczych w dowolnej chwili od momentu inicjacji wyładowania;

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

- układ do pomiaru światła emitowanego przez kanały wyładowcze wykorzystujący fotopowielacz jako detektor tego światła oraz oscyloskop o pamięci cyfrowej rejestrujący otrzymane przebiegi [11].

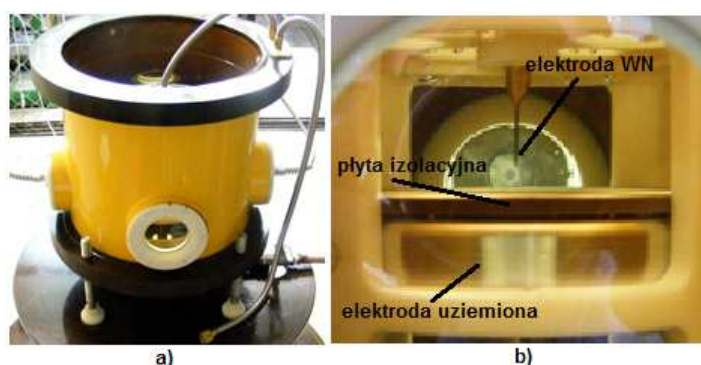
Obok obserwacji rozwoju czasowo-przestrzennego na podstawie wykonanych fotografii i zebranych oscylogramów światła oszacowano na podstawie tych obserwacji prędkości propagacji wyładowań, która w aspekcie niniejszego referatu została poddana szczegółowej analizie. Prędkość ta, jako jeden z najistotniejszych parametrów charakteryzujących wyładowania elektryczne w cieczach szacowana była jako współczynnik kierunkowy prostej regresji w układzie współrzędnych $I=f(t)$ gdzie I to zasięg kanału mierzony na podstawie wykonanej fotografii zaś t moment jej wykonania [6, 11]. W przypadku gdy w układzie rozwijało się wyładowanie sięgające płyty izolacyjnej ułożonej na elektrodzie uziemionej oszacowanie tej prędkości było możliwe dzięki ustaleniu stosunku odległości międzyelektrodowej "d" do czasu "t", po którym wyładowanie osiągnęło wspomnianą płytę izolacyjną. Czas rozwoju wyładowania do momentu osiągnięcia elektrody uziemionej wyraźnie można zaobserwować na oscylogramie emitowanego światła gdzie pojawia się szeroki impuls świetlny powstający w wyniku dojścia do płyty izolacyjnej kanałów pierwotnych. Kanały te rozlewają się po płycie izolacyjnej w postaci wyładowań ślizgowych, a po uzyskaniu sprzężenia pojemnościowego z uziemioną elektrodą następuje wstępująca jonizacja kanału [11].

Przykład szacowania prędkości propagacji na bazie obu wymienionych wyżej sposobów pokazano na rysunku 3. Jednocześnie na rysunku można zaobserwować typowe fotografie powolnych i szybkich wyładowań dodatnich rozwijających się w estrze syntetycznym i odpowiadające im oscylogramy światła emitowanego przez wyładowanie.



Rys. 3. Szacowanie prędkości propagacji pojedynczego wyładowań na podstawie jego fotografii oraz oscylogramu światła emitowanego przez wyładowanie: ester syntetyczny, 1 - sygnał napięciowy (20 kV/dz), 2 - emisja światła (jednostki względne), a) $d_2 = 20$ mm, $t = 1,5$ μ s (moment błysku lasera), b) $d_2 = 205$ mm, $t = 0,5$ μ s (moment dotarcia wyładowania do elektrody uziemionej).

Badania przeprowadzono w komercyjnym estrze syntetycznym Midel 7131 dla przerw elektrodowych $d_1=15\text{mm}$ i $d_2=20\text{ mm}$. Wartość szczytową udaru napięciowego zwiększano od wcześniej określonego napięcia inicjacji U_0 (57,9 kV dla d_1 i 63 kV dla d_2) z krokiem $0,2 U_0$ aż do wartości $2,4 U_0$. Tę samą procedurę zastosowano dla oleju mineralnego celem porównania otrzymanych wyników. U_0 dla oleju mineralnego wynosiło odpowiednio 58,5 kV dla d_1 i 63,9 kV dla d_2 [12]. W obu przypadkach płynami wypełniono każdą probierczą o objętości 26 litrów wyposażoną w cztery, symetrycznie rozłożone, okienka boczne. W kadzi umieszczono zaś rozpatrywany układ elektrod-ostrze płyta. Rzeczywisty wygląd kadzi oraz układu elektrod w niej zanurzonego pokazany został na rysunku 4.



Rys. 4. Rzeczywisty wygląd kadzi probierczej (a) oraz układu elektrod w niej zanurzonego (b).

Przed przystąpieniem do badań określono postawowe parametry obu cieczy, które zestawiono w tabeli 1 [13]. W nawiasie podano normy, zgodnie z którymi parametry te zostały wyznaczone.

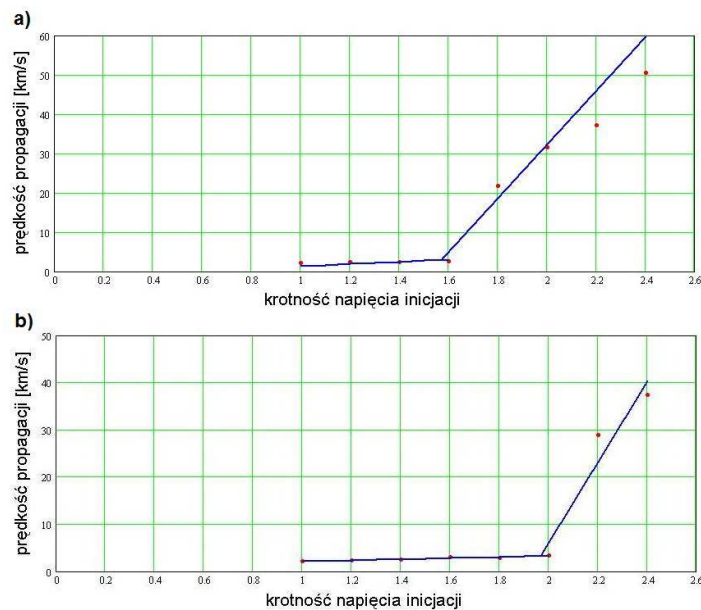
Parametry badanych cieczy	Ester syntetyczny	Olej mineralny
Gęstość w 20°C [kg/dm^3] (ISO 3675)	0,98	0,87
Lepkość kinematyczna 40°C [mm^2/s] (ISO 3104)	28	9
Temperatura zapłonu [$^{\circ}\text{C}$] (ISO 2719)	258	146
Temperatura palenia [$^{\circ}\text{C}$] (ISO 2592)	> 300	168
Napięcie przebicia [kV] (IEC 60156)	68	64
$\text{tg}\delta$ przy 90°C i 50 Hz (IEC 60247)	0,0108	0,0016
Przenikalność elektryczna 20°C (IEC 60247)	3,2	2,2
Ciepło właściwe [J/kgK]	1880	1860

Wyniki

Doskonałym sposobem prezentacji różnic i podobieństw w rozwoju wyładowań elektrycznych w cieczach dielektrycznych jest, jak już wyżej wspomniano, przedstawienie zależności prędkości propagacji wyładowań rozwijających się w danej cieczy od krotności napięcia probierczego w stosunku do napięcia inicjacji wyładowań [8-11, 14]. Jako przykład takiej zależności na rysunku 5 umieszczone zostały wyniki zarówno dla badanego estru syntetycznego jaki i w celach porównawczych dla oleju mineralnego uzyskane dla odległości międzyelektrodowej $d_2 = 20\text{ mm}$. Każdy z punktów reprezentuje grupę wyników, dla której określono współczynnik kierunkowy prostej regresji zgodnie z opisem przedstawionym w rozdziale poprzednim. Niebieska krzywa jest natomiast prostą regresji opisującą otrzymane wartości współczynnika stanowiącego prędkość propagacji przy danej krotności napięcia.

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

Jak wyraźnie widać, zarówno w przypadku estru jak i oleju mineralnego istnieje pewna progowa wartość krotności napięcia inicjacji powyżej której następuje gwałtowny wzrost prędkości propagacji wyładowań dodatnich od wartości kilku km/s do kilkunastu czy kilkudziesięciu km/s. Oznacza to, zgodnie z teorią wyładowań w cieczach [11, 14], że powyżej tej krotności następuje zmiana sposobu rozwoju wyładowań z jonizacji w fazie gazowej na jonizację w fazie ciekłej. Rozwój wyładowań wskutek jonizacji w fazie ciekłej jest niepożądany ze względu na bardziej energetyczny kanał wyładowczy, który tworzy się w wyniku tego procesu i który w sposób znacznie intensywniejszy oddziaływać może na izolację papierową układu izolacyjnego.



Rys. 5. Zależność prędkości propagacji wyładowań elektrycznych od krotności napięcia probierczego w stosunku do napięcia inicjacji U_0 dla odległości $d_2=20$ mm: a) ester syntetyczny, b) olej mineralny.

Porównując więc wyniki pomiędzy rozprywanymi cieczami można wnioskować, że estry syntetyczne zachowują się nieco gorzej przy narażeniach udarowych. Dla widocznego na rysunku 5 przypadku przerwy olejowej równej 20 mm, rozwój silnie energetycznych wyładowań o prędkościach rzędu kilkunastu i kilkudziesięciu km/s następuje w estrze przy niższej wartości krotności napięcia inicjacji (1,8) niż w oleju mineralnym (2,2). Ta sama tendencja została zaobserwowana także dla przerwy równej 15 mm. Niebezpieczeństwo uszkodzenia izolacji stałej w transformatorze, poprzez silne energetycznie wyładowanie elektryczne w przypadku pojawienia się przepięcia, jest więc bardziej prawdopodobne, gdy izolacją ciekłą będzie ester syntetyczny.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych można sformułować następujące wnioski:

- ester syntetyczny może być z powodzeniem wykorzystywany jako alternatywa dla klasycznie stosowanego w transformatorach energetycznych oleju mineralnego,

- pomiary zależności prędkości propagacji wyładowań dodatnich od krotności napięcia inicjacji wskazują jednakże na nieco gorsze właściwości estru w zakresie wytrzymałości udarowej,
- szybkie, silnie zjonizowane wyładowania, pojawiają się w estrze syntetycznym przy niższej krotności napięcia w stosunku do napięcia inicjacji, niż ma to miejsce w oleju mineralnym,
- gorsze właściwości estrów w zakresie wytrzymałości udarowej mogą rzutować na rozmiar kanałów olejowych, które są projektowane ze względu na przepięcia udarowe.

Prace zaprezentowane w niniejszym artykule są finansowane w ramach projektu badawczego NCN na podstawie decyzji 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. Diel. Liquids, pp. 377-380.
2. Hosier I.L., Vaughan A.S., Montjen F.A.: Ageing of biodegradable oils for high voltage insulation systems, 2006 Annual Report Conf. Electr. Insul. Diel. Phenom., pp. 481-484.
3. Puckel G. et al.: Environmental friendly insulating liquids - a challenge for power transformers, 6th Cigre Southern Africa Regional Conf., Paper P510, 2009.
4. Perrier C., Beroual A.: Experimental investigations on insulating liquids for power transformers: mineral, ester and silicone oils, IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 25, pp. 6-13, 2009.
5. Midel 7131 Transformer Fluid - Technical Data Sheets, www.midel.com, 2010.
6. Rózga P.: Wytrzymałość elektryczna transformatorowych płynów izolacyjnych na bazie estrów syntetycznych i naturalnych, Przegląd Elektrotechniczny, nr 1'2014, s. 245-247.
7. Dai J., Wang Z. D.: A comparison of the impregnation of cellulose insulation by ester and mineral oil, IEEE Trans. Diel. Insul., vol. 15, pp. 1582-1594, 2008.
8. Viet-Hung Dang, Beroual A., Perrier C.: Comparative study of streamer phenomena in mineral, synthetic and natural ester oils under lightning impulse voltage, 2010 Intern. Conf. High Voltage Eng. and Appl., Shanghaj, China, pp. 560-563.
9. Liu Q., Wang Z.D.: Streamer characteristic and breakdown in synthetic and natural ester transformer liquids under standard lightning impulse. IEEE Trans. Diel. Electr. Insul., vol. 18, pp. 285-294, 2011.
10. Viet-Hung Dang, Beroual A., Perrier C.: Investigations of streamers in mineral, synthetic and natural ester oils under lightning impulse voltage. IEEE Trans. Diel. Electr. Insul., vol. 19, pp. 1521-1527, 2012.
11. Rózga P.: The influence of paper insulation on the prebreakdown phenomena in mineral oil under lightning impulse. IEEE Trans. Diel. Electr. Insul., vol. 11, pp. 720-727, 2011.
12. Rózga P., Stanek M., Cieślinski D.: Comparison of properties of electrical discharges developing in natural and synthetic ester at inception voltage. 2013 Annual Report Conf. Electr. Insul. Diel. Phenom., Shenzhen, China, pp. 891-894.
13. Rózga P., Skowron A.: Wpływ skoncentrowanego strumienia cieplnego na właściwości estrów syntetycznych. Wiadomości Elektrotechniczne 2'2013, s. 30-34.
14. Lesaint O., Massala G.: Positive streamer propagation in large oil gaps: Experimental characterization of propagation mode. IEEE Trans. Diel. Electr. Insul., vol. 5, pp. 360-370, 1998.

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