

Rozwój wyładowań elektrycznych w estrze syntetycznym przy napięciu udarowym piorunowym

Streszczenie. W artykule przedstawione zostały wyniki badań eksperymentalnych dotyczących rozwoju wyładowań elektrycznych w estrze syntetycznym przy standardowym udarze napięciowym piorunowym obu biegunowości. Na podstawie zarejestrowanych fotograficznie kształtów tworów wyładowczych oraz oscylogramów światła emitowanego przez wyładowania oszacowano szybkość propagacji dla różnych wartości napięcia probierczego odniesionego do pomierzonego uprzednio napięcia inicjacji. Wyniki porównano z wynikami uzyskanymi dla oleju mineralnego w tych samych warunkach probierczych. Ester syntetyczny wykazał mniejszą zdolność do ochrony przed przepięciami natury udarowej.

Abstract. Article presents the results of research concerning the development of electrical discharges in synthetic ester under standard lightning impulse voltage. On the basis of photographically recorded shapes of discharge forms and oscillograms of light emitted by discharges propagation velocity was estimated for the different values of testing voltage related to the previously measured inception voltage. The results were compared with the results obtained for mineral oil in the same field conditions. Synthetic ester showed a lower ability to protect against the lightning impulse overvoltages. (Development of electrical discharges in synthetic ester under lightning impulse voltage).

Słowa kluczowe: ester syntetyczny, napięcie udarowe piorunowe, wyładowania elektryczne, szybkość propagacji.

Keywords: synthetic ester, lightning impulse, electrical discharges, propagation velocity.

Wstęp

Tendencje proekologiczne w przemyśle elektroenergetycznym mają swoje odzwierciedlenie także w odniesieniu do płynów izolacyjnych stosowanych w olejowych transformatorach energetycznych. Powszechnie używany jako medium izolacyjno-chłodzące olej mineralny charakteryzuje się bowiem niską biodegradowalnością (10%) oraz niezbyt wysoką temperaturą zapłonu (ok. 150 °C) co powoduje, że nie jest płynem przyjaznym środowisku i w sytuacjach niezamierzonego uwolnienia może stanowić dla niego potencjalne zagrożenie. W przypadkach kiedy transformator ma być zainstalowany w miejscach o restrykcyjnych przepisach pożarowych i środowiskowych poszukiwane są więc produkty, które mogłyby stanowić alternatywę dla oleju mineralnego od strony właściwości proekologicznych, ale z jednoczesnym spełnieniem wymagań w zakresie wytrzymałości elektrycznej oraz wymagań związanych z chłodzeniem transformatora [1, 2]. Cieczą izolacyjną mogącą stanowić alternatywę dla oleju mineralnego jest ester syntetyczny. Charakteryzuje się on 90%-ową biodegradowalnością oraz temperaturą zapłonu przekraczającą 250 °C. Bardzo dobrymi właściwościami przyjaznym środowisku towarzyszą także stosunkowo dobre właściwości dielektryczne. Szczególnie ważne z praktycznego punktu widzenia jest niezależność przemennego napięcia przebicia estrów od zawartości wilgoci. Aż do około 600 ppm zawartości wilgoci w estrze syntetycznym jego napięcie przebicia nadal utrzymuje się na poziomie ok. 70 kV. Dla przypomnienia olej mineralny już przy kilkudziesięciu ppm zawilgocenia traci swoje izolacyjne właściwości diametralnie [2, 3]. Zdolność do absorpcji wilgoci przez ester syntetyczny jest też korzystna przy rozpatrywaniu współpracy z izolacją papierową transformatora. Swoiste "wyciąganie" wilgoci z papieru może wydłużyć czas jego życia [4]. Wyższa przenikalność elektryczna estru w stosunku do oleju mineralnego jest z kolei korzystna dla rozkładu pola elektrycznego w układach papier-ciecz dielektryczna. Im mniejsza różnica w przenikalnościach cieczy izolacyjnej i papieru tym bardziej równomierny rozkład pola elektrycznego można uzyskać.

Określenie "ester" pochodzi od wiązania chemicznego, utworzonego w wyniku reakcji alkoholu i kwasu tłuszczowego. Syntetyczne estry są zwykle produktem poliolu (cząsteczka o więcej niż jednej grupie hydroksylowej) z syntetycznymi lub naturalnymi kwasami

karboksylowymi. W cząsteczce różne grupy kwasów (zwykle 2, 3 lub 4) są przyłączone do centralnej struktury poliolu. Aby zapewnić estru bardzo stabilną strukturę chemiczną w łańcuchu stosowane są zazwyczaj kwasy nasycone (bez podwójnego wiązania C=C).

Estry na rynku transformatorowym są obecne od ponad 20 lat, a największym obecnie pracującym transformatorem napełnionym takiego typu płynem jest jednostka o napięciu 238/13,5 kV pracująca w Szwecji. Ta jednostka, jak i kilka mniejszych o napięciu znamionowym na poziomie 115 kV świadczą o zainteresowaniu rozszerzeniem zakresu napięć znamionowych transformatorów napełnianych przyjaznymi środowisku płynami z napięć typowych dla transformatorów rozdzielczych na napięcia charakterystyczne dla transformatorów mocy [1, 2, 5].

Badania właściwości estrów są więc nadal aktualne, zarówno jeśli chodzi o zagadnienia wytrzymałości elektrycznej przy różnych narażeniach napięciowych jak i zagadnienia zmian właściwości estrów w czasie eksploatacji lub na skutek czynników mogących się w czasie eksploatacji pojawić (wyładowania niezupełne, oddziaływanie skoncentrowanego strumienia cieplnego itp.) [1-6].

Podejście do badania rozwoju wyładowań elektrycznych w cieczach

Wyładowania elektryczne w dielektrykach ciekłych oceniane są na podstawie obserwacji ich rozwoju czasowo-przestrzennego przy wykorzystaniu szeregu dostępnych metod elektroniczno-optycznych, a także na podstawie pomiaru szybkości propagacji wyładowań [7-10]. Najlepszy efekt uzyskuje się przy zaaplikowaniu kilku metod eksperymentalnych jednocześnie. Najczęściej stosowanym układem elektrod jest układ ostrze-płyta, o silnie nierównomiernym rozkładzie pola elektrycznego. Zastosowanie takiego układu wynika z kilku powodów. Po pierwsze uzyskuje się pewność miejsca inicjacji wyładowań, które każdorazowo rozwija się od ostrzowej elektrody WN, co zawęża obszar obserwowany i ułatwia zastosowanie metod optycznych do oceny wyładowania. Z drugiej strony układy ostrzowe nie wymagają tak wysokich napięć inicjujących jak mogłoby to mieć miejsce w przypadku układów o równomiernym rozkładzie pola. W układach ostrzowych możliwe jest obserwowanie wyładowań, które nie doprowadzają do przebicia, a więc nie powodują powstawania kanału plazmowego mogącego swoją

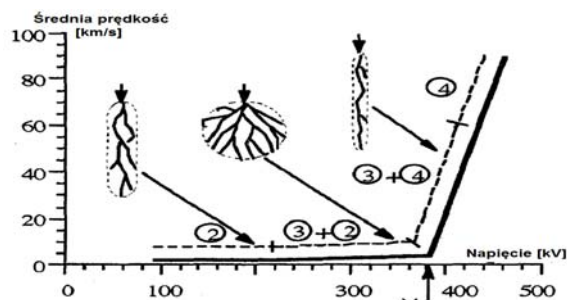
intensywnością uszkodzić czułe elementy stosowane w metodach fotooptycznych. I finalnie, układy ostrze-płyty w pewnym zakresie imitować mogą defekty układów izolacyjnych, w których niejednorodności stanowią miejsca o lokalnie zwiększonym natężeniu pola elektrycznego, i w ich okolicy może dojść do zainicjowania wyładowania podczas przepięcia. Obserwacja rozwoju czasowo-przestrzennego wyładowań i analiza zmian szybkości propagacji, dla różnych wartości napięć probierczych daje szerokie spektrum wyników do analizy. Gdy rozpatruje się różne ciecze izolacyjne poddane tym samym procedurom pomiarowym można dokonać swobodnego ich porównania oceniając ich jakość i przydatność do zastosowań izolacyjnych [9, 11, 12].

Rozwój wyładowań w cieczy przy napięciu udarowym piorunowym nadal jest niejasny, a trudności w potwierdzeniu jednej teorii doprowadziły do ukształtowania się dwóch, w zasadzie równoważnych tez. Pierwsza głosi, że jonizacja zachodzi bezpośrednio w cieczy, a więc kanał wyładowania wypełniony jest zjonizowaną cieczą (tzw. jonizacja w fazie ciekłej). Druga zaś mówi o inicjacji wyładowania w pęcherzykach gazowych, które mogą być efektem zanieczyszczeń lub parowania cieczy pod wpływem temperatury i które to pęcherzyki mogą następnie rozwinąć się w kanał wyładowania na skutek procesów jonizacji w fazie gazowej. Coraz większa wiedza i doświadczenia z badań eksperymentalnych pozwalają stwierdzić, że obie teorie mają swój udział w tworzeniu wyładowań, rzeczą sporną natomiast staje się, która teoria jest dominująca w poszczególnych fazach wyładowania. Fazy te zostały podzielone i nazwane zgodnie z pojawianiem się ich wraz ze wzrostem napięcia probierczego. Wyładowania dzieli się więc na wyładowania 1-ego i 2-ego rzędu w przypadku wyładowań powolnych nieprzewodzących do przebicia i najczęściej zanikających w przestrzeni międzyelektrodowej oraz 3-ego i 4-ego rzędu dla wyładowań szybkich zwierających dwie elektrody i często kończących się przebicciem. Pierwsze dwa rzędy (charakteryzowane prędkościami do kilku km/s) uznano za typowe dla jonizacji w fazie gazowej, dwa kolejne zaś (prędkości sięgają kilkunastu i kilkudziesięciu km/s) odpowiadają jonizacji w fazie ciekłej i są bardziej energetyczne, co powoduje większe zagrożenie dla izolacji papierowej. Nie tylko szybkość propagacji wyładowań jest charakterystyczną cechą poszczególnych stadiów rozwoju. Istnieje ścisła korelacja pomiędzy rzędem, kształtem wyładowań, szybkością propagacji oraz intensywnością światła emitowanego przez wyładowanie i jego prądem. Kolejne rzędy to inny wygląd rejestrowanego tworów wyładowczych, inna charakterystyka światła i prądu wyładowań i wyżej wspomniana szybkość [7, 8]. Te właściwości zmieniają się wraz ze wzrostem napięcia i dla przykładu pokazano na rys. 1 zbiorczo taką zależność dla oleju mineralnego.

Istotnym w ocenie rozwoju wyładowań jest oszacowanie punktu granicznego, w którym zmienia się gwałtownie szybkość propagacji wyładowań, a więc następuje zmiana sposobu jonizacji odpowiedzialnej za rozwój wyładowania. Ten punkt zwany w literaturze napięciem przyspieszania (V_a na rys. 1), określa nam, powyżej jakiej wartości napięcia probierczego pojawiają się silnie energetycznie wyładowania 3-go rzędu, groźne dla izolacji stałej. Dla każdej cieczy dielektrycznej możliwe jest wyznaczenie takiego punktu granicznego. Jak widoczne jest to na cytowanym rysunku punktem takim jest punkt łączący dwie proste o różnym nachyleniu.

Porównanie takich wartości granicznych dla różnych typów cieczy daje możliwość oceny ich zdolności do ochrony układu izolacyjnego przy pojawieniu się danego

rodzaju przepięcia. Autorskie badania eksperymentalne przedstawione w niniejszym artykule miały na celu wyznaczenie napięcia przyspieszenia dla płynu Midel 7131 i oleju mineralnego, co umożliwi porównanie obu cieczy w zakresie ich zachowania przy narażeniach udarowych piorunowych obu biegunowości.



Rys. 1. Przykładowa zależność między kształtem, rzędem, szybkością propagacji wyładowań i przyłożonym napięciem probierczym przy dodatnim udarze napięciowym, V_a - napięcie przyspieszania (acceleration voltage) [10]

Techniki pomiarowe

Przeprowadzenie autorskich badań eksperymentalnych możliwe było dzięki wykorzystaniu technik pomiarowych zaaplikowanych w laboratorium do badania wyładowań elektrycznych w dielektrykach ciekłych. Elementy składowe laboratorium, wraz z zastosowanymi pomiędzy poszczególnymi członami wykonawczymi połączeniami, zostały szczegółowo opisane w [11]. Źródłem napięcia w układzie był 6-ciostopniowy generator udarów napięciowych Marxa wytwarzający znormalizowany udar napięciowy piorunowy 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:

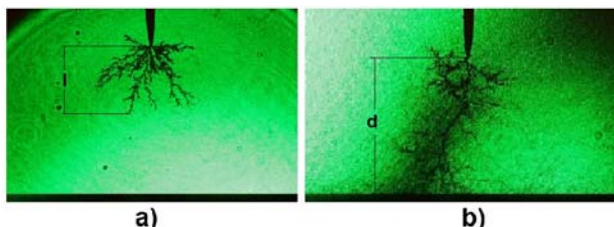
- laserowy układ do rejestracji fotografii cieniowych wyładowań (z laserm impulsowym Nd:YAG jako lampą błyskową), który umożliwiał fotografowanie tworów wyładowczych w dowolnej chwili od określonego momentu inicjacji wyładowania;
- układ do pomiaru światła emitowanego przez kanały wyładowcze wykorzystujący fotonowielacz jako detektor tego światła oraz oscyloskop o pamięci cyfrowej rejestrujący otrzymane przebiegi.

Badania przeprowadzone zostały w estrze syntetycznym Midel 7131 oraz naftowym oleju mineralnym Shell Diala. Wykorzystano układ elektrod ostrze-płyta i wykonano pomiary dla dwóch odległości międzyelektrodowych 15 i 20 mm. Układ elektrod zanurzono w kadzi probierczej o objętości 26 litrów wyposażonej w cztery symetrycznie rozłożone okienka boczne. Dwa z nich służyły jako droga dla promieni lasera impulsowego służącego do wykonywania fotografii tworów wyładowczych, zaś dwa kolejne do umieszczenia w nich końcówek recepcyjnych światłowodów transmitujących światło do komory Faradaya, w której zainstalowane były fotonowielacze.

Obserwacja rozwoju czasowo-przestrzennego na podstawie wykonanych fotografii i zebranych oscylogramów światła stanowiła podstawę do oszacowania szybkości propagacji wyładowań. Prędkość ta szacowana była statystycznie jako współczynnik kierunkowy prostej regresji w układzie współrzędnych $I=f(t)$. Zmienna "I" to zasięg kanału pomierzony fotograficznie zaś "t" to moment wykonania zdjęcia. 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 płytę. Czas rozwoju wyładowania do momentu osiągnięcia elektrody uziemionej był wyznaczany na podstawie oscylogramu emitowanego światła, gdzie wśród impulsów pochodzących od kanałów wyładowania pierwotnego wyraźnie rozróżnić można było impuls światła od wyładowań powierzchniowych rozwijających się po płycie izolacyjnej ułożonej na elektrodzie uziemionej. Wyładowania te powstają w wyniku dojścia do płyty izolacyjnej kanałów pierwotnych, które rozlewają się po płycie izolacyjnej, a po uzyskaniu sprężenia pojemnościowego z uziemioną elektrodą następuje wstępująca jonizacja kanału [8].

Na rys. 2 pokazane zostały dwa przypadki wyładowań pozwalające określić na ich podstawie szybkość propagacji. W pierwszym przypadku (rys. 2a) jest to wyładowanie przy udarze biegunowości ujemnej w estrze syntetycznym wykonane w czasie $t = 13,4 \mu s$ od chwili inicjacji wyładowania natomiast w drugim przypadku (rys. 2b) to szybkie wyładowanie dodatnie w estrze syntetycznym, które dotarło do płyty izolacyjnej elektrody uziemionej już po czasie $t = 0,8 \mu s$.



Rys. 2. Fotografie wyładowań rozwijających się w estrze syntetycznym: a) wyładowanie powolne ujemne, $d = 20 \text{ mm}$, $t = 13,4 \mu s$; b) wyładowanie szybkie dodatnie, $d = 20 \text{ mm}$, $t = 0,8 \mu s$

Tabela 2. Parametry rozkładu Weibulla dla dodatnich napięć inicjacji

Rodzaj cieczy	Przerwa olejowa [mm]	Parametry			
		V_0 [kV]	V_m [kV]	k	V_{Med} [kV]
Ester syntetyczny	15	52.7	59.9	2.6	59.0
	20	59.8	65.4	2.3	64.6
Olej mineralny	15	52.5	61.2	3.8	60.4
	20	53.7	64.7	3.4	63.5

Tabela 3. Parametry rozkładu Weibulla dla ujemnych napięć inicjacji

Rodzaj cieczy	Przerwa olejowa [mm]	Parametry			
		V_0 [kV]	V_m [kV]	k	V_{Med} [kV]
Ester syntetyczny	15	52.0	58.6	3.1	57.9
	20	58.1	64.0	1.9	63.0
Olej mineralny	15	51.2	59.4	3.1	58.5
	20	54.2	65.0	3.4	63.9

Wyniki

W pierwszej kolejności dla rozpatrywanych przerw międzyelektrodowych, obu biegunowości udaru oraz obu cieczy wykonano serię pomiarową mającą na celu określenie napięcia inicjacji wyładowań. Napięcie to określono z wykorzystaniem metody schodkowej. Napięcie podnoszono z krokiem 2,5 kV, przy czym na każdym stopniu do układu elektrod doprowadzano jeden udar. Jako napięcie inicjacji notowano wartość, przy której po raz pierwszy nastąpił rozwój wyładowania. Fakt inicjacji wyładowania określić można było zarówno na podstawie fotografii (zarejestrowanie tworu wyładowczego), a także na podstawie oscylogramu (pojawienie się impulsów

światlnych emitowanych przez wyładowanie). Identyczną procedurę powtórzono dla każdej przerwy elektrodowej, obu cieczy oraz obu biegunowości udaru. Wyznaczenia napięcia inicjacji dokonano piętnastokrotnie. Otrzymane w taki sposób wyniki pomiarów przeanalizowano statystycznie z wykorzystaniem trójparymetrycznego rozkładu Weibulla [12]. Wyniki zestawiono odpowiednio w tabelach 2 i 3.

W kolejnym kroku założono dla każdej przerwy elektrodowej oraz biegunowości napięcia wartość napięcia odniesienia (napięcie inicjacji), do której ustalano kolejne napięcia probiercze (jako krotności napięcia inicjacji). Ponieważ otrzymane wartości median dla poszczególnych porównywanych przypadków były zbliżone, je przyjęto właśnie jako wartości wyjściowe zaokrąglając je dla ułatwienia prowadzenia pomiarów odpowiednio do wartości 65 kV dla przerwy 20 mm i obu biegunowości udaru i wartości 60 kV dla przerwy 15 mm i obu biegunowości udaru. Przyjęto oznaczenie wartości początkowej jako U_i . W tabeli 4 zestawiono wartości probiercze napięć dla poszczególnych przypadków krotności napięcia inicjacji.

Tabela 4. Wartości rzeczywiste napięcia probierczego będącego krotnością napięcia inicjacji

Krotność napięcia	Wartości szczytowe napięcia probierczego [kV]	
	15 mm	20 mm
U_i	60	65
1,2 U_i	72	78
1,4 U_i	84	91
1,6 U_i	96	104
1,8 U_i	108	117
2,0 U_i	120	130
2,2 U_i	132	143
2,4 U_i	144	156

Dla każdego ustalonego poziomu napięcia, poczynając od wartości napięcia inicjacji U_i , a kończąc na krotności równej 2,4 U_i , doprowadzono do badanego układu elektrod 20 udarów rejestrując fotografie wyładowań oraz oscylogramy. Na ich podstawie określone zostały szybkości propagacji wyładowań na danym poziomie napięcia. Otrzymano w ten sposób dla obu badanych cieczy zależności szybkości propagacji od krotności napięcia inicjacji wyładowań przy określonej biegunowości udaru. Zestawienie tabelaryczne otrzymanych wyników dla obu badanych przerw elektrodowych 15 i 20 cm zamieszczono odpowiednio w tabelach 5 i 6. Szybkości propagacji są wartościami oszacowanymi zgodnie z procedurą opisaną w wyżej, przy czym sposób oszacowania uwzględniał czy rozwijające się wyładowania były powolne czy szybkie.

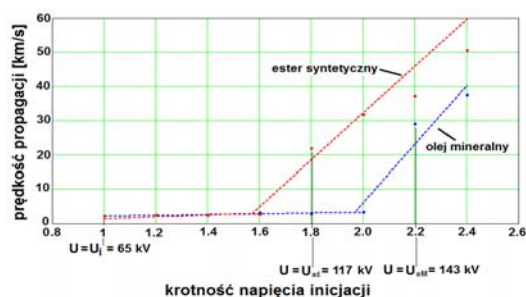
Na rys. 3 natomiast pokazane zostały te wyniki w formie wykresów dla wybranego przypadku 20 cm przerwy elektrodowej i obu biegunowości udaru.

Tabela 5. Szybkości propagacji wyładowań dodatnich dla danej krotności napięcia inicjacji

Krotności napięcia inicjacji	Szybkość propagacji [km/s]			
	15 mm		20 mm	
	Olej mineralny	Ester	Olej mineralny	Ester
U_i	1,99	2,04	2,08	2,16
1,2 U_i	2,05	2,21	2,41	2,41
1,4 U_i	2,33	2,36	2,50	2,32
1,6 U_i	2,98	2,33	3,12	2,67
1,8 U_i	3,31	17,8	2,78	21,8
2,0 U_i	3,27	24,9	3,26	31,6
2,2 U_i	26,6	36,8	28,9	37,1
2,4 U_i	42,3	48,5	37,5	50,5

Tabela 6. Szybkości propagacji wyładowań ujemnych dla danej krotności napięcia inicjacji

Krotności napięcia inicjacji	Szybkość propagacji [km/s]			
	15 mm		20 mm	
	Olej mineralny	Ester	Olej mineralny	Ester
U_i	0,77	0,82	0,71	0,78
1,2 U_i	0,83	0,86	0,80	0,92
1,4 U_i	0,85	1,01	0,85	1,04
1,6 U_i	1,03	1,17	0,96	1,21
1,8 U_i	1,10	1,37	1,08	1,22
2,0 U_i	1,24	1,32	1,23	1,34
2,2 U_i	1,29	14,3	1,26	12,7
2,4 U_i	1,44	26,1	1,41	24,8



Rys. 3. Zależność szybkości propagacji wyładowań od krotności napięcia inicjacji U_i dla odległości $d = 20$ mm: a) biegunowość dodatnia uderu, b) biegunowość ujemna uderu

U_{aE} - napięcie progowe przyspieszenia dla estru syntetycznego,
 U_{aM} - napięcie progowe przyspieszenia dla oleju mineralnego

Dyskusja i wnioski

Estry syntetyczne, ze względu na swoje właściwości proekologiczne, mogą stanowić doskonałą alternatywę dla oleju mineralnego, jednakże ze względu na ich stosunkowo krótki czas eksploatacji należy w dalszym ciągu intensywnie badać właściwości estrów przy różnych narażeniach napięciowych oraz oddziaływaniu czynników mogących wpływać na nie w procesie produkcji i podczas eksploatacji.

W niniejszym artykule przedstawiono badania nad rozwojem wyładowań elektrycznych w komercyjnym estrze syntetycznym przy uderze napięciowym piorunowym 1,2/50 μ s w układzie elektrod ostrze-płyta o przerwie elektrodowej odpowiednio 15 i 20 mm. Zgodnie z powszechnie stosowanym podejściem do tego typu badań, analogiczne pomiary przeprowadzono także dla oleju mineralnego.

Otrzymane wyniki wskazały, że oba użyte płyny izolacyjne zachowują się inaczej przy wzroście uderowego napięcia probierczego, mimo że napięcia inicjacji wyładowań są niemal identyczne. W estrze syntetycznym dla obu testowanych przerw elektrodowych i dodatniej biegunowości uderu zaobserwowano pojawienie się wyładowań szybkich (3-go rzędu) przy napięciu probierczym znacznie niższym niż ma to miejsce w oleju mineralnym. Napięcie odpowiadające krotności 1,8 U_i stanowiło napięcie przyspieszenia wyładowań w estrze, podczas gdy w oleju mineralnym ta krotność wyniosła 2,2

U_i . W przypadku biegunowości ujemnej uderu zmiana sposobu rozwoju wyładowań miała miejsce tylko w przypadku estru przy krotności równej 2,0 U_i . W oleju mineralnym przy ujemnym uderze szybkie wyładowania nie pojawiły się w ogóle w zakresie zastosowanego napięcia probierczego.

Można więc stwierdzić na podstawie przeprowadzonych badań, że ester syntetyczny wykazuje mniejszą zdolność do ochrony przed pojawieniem się szybkich wyładowań elektrycznych rozwijających się na skutek jonizacji w fazie ciekłej. Ponieważ szybkie wyładowania są bardziej energetyczne i niebezpieczne dla izolacji stałej transformatora, wydaje się, że ograniczanie przepięć mogących spowodować pojawienie się tego typu wyładowań, w przypadku transformatora z izolacją ciekłą w postaci estru syntetycznego staje się szczególnie istotnym aspektem przy projektowaniu takich transformatorów. Eliminacja potencjalnego powodu pojawienia się wyładowań 3-go lub 4-go rzędu powodującego zniszczenie izolacji papierowej można postawić za główny cel w ochronie przeciwprzepięciowej transformatorów z estrami.

Prezentowana praca była finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki na podstawie decyzji ST8/03549

Prezentowany artykuł został opracowany po prezentacji na Konferencji Transformatory Energetyczne i Specjalne w Kazimierzu Dolnym w październiku 2014 roku z uwzględnieniem sugestii uczestników wynikających z dyskusji na sesji plenarnej.

LITERATURA

- [1] G.J. Pukel i inni: Environmental friendly insulating liquids - a challenge for power transformers, 2009 Cigre Southern Africa Regional Conf., Paper P510.
- [2] Experiences in Service with New Insulating Liquids, Cigre Brochure 436, Working group A2-35, 2010.
- [3] Perrier C., Beroual A., Experimental investigations on insulating liquids for power transformers: mineral, ester and silicone oils, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 25 (2009), nr 6, 6-13.
- [4] M.A.G. Martins, A.R. Gomes, Comparative study of the thermal degradation of synthetic and natural esters and mineral oil: Effect of oil type in the thermal degradation of insulating Kraft paper, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 28 (2012), nr. 2, 22-28.
- [5] P. Różga, A. Skowron, Wpływ skoncentrowanego strumienia cieplnego na właściwości estrów syntetycznych, *Wiadomości Elektrotechniczne*, (2013), nr 2, 30-34.
- [6] J. Dai, Z.D. Wang, A comparison of the impregnation of cellulose insulation by ester and mineral oil, *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, 15 (2008), nr 2, 1582-1594.
- [7] O. Lesaint, G. Massala, Positive streamer propagation in large oil gaps: Experimental characterization of propagation mode, *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, 5 (1998), nr 3, 360-370.
- [8] P. Rozga: The influence of paper insulation on the prebreakdown phenomena in mineral oil under lightning impulse, *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, 11 (2011), 720-727.
- [9] V.-H. Dang, A. Beroual, C. Perrier, Investigations on streamers phenomena in mineral, synthetic and natural ester oils, *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, 19 (2012), nr 5, 1521-1527.
- [10] R. Hebner, Measurement of electrical breakdown in liquids, *NATO ASI Series*, 193 (1988), 519-537.
- [11] P. Rozga i inni, Measurement techniques used for study the electrical discharge mechanisms in insulating ester fluids under lightning impulse, *Adv. Electr. Comp. Eng.*, 14 (2014), 95-100.
- [12] P. Rozga, M. Stanek, D. Cieslinski, Comparison of properties of electrical discharges developing in natural and synthetic ester at inception voltage, 2013 IEEE Annual Report Conf. Electr. Insul. Dielect. Phenom., Shenzhen, China, 20-23.10.2013, 891-894.

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