



Marek OLESZ

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

Oddziaływanie przepięć łączeniowych na izolację kabli polietylenowych

Streszczenie. Drzewienie elektryczne jest jedną z form degradacji izolacji polietylenowej, szczególnie w końcowej fazie rozwoju, jako następstwo drzewienia wodnego. W skutecznej diagnostyce linii kablowych istotną jest znajomość mechanizmu powstawania i rozwoju w czasie wyładowań niezupełnych (wnz), która może wyznaczyć stan i tempo pogarszania izolacji. W pracy analizowano wnz poprzez śledzenie ciągu impulsów w czasie kolejnych narażeń układu modelowego izolacji igła – polietylen sieciowany – elektroda płaska udarami łączeniowymi nałożonymi na napięcie przemienne.

Abstract. (Influence of the switching overvoltages on insulation of polyethylene cables). Electrical treeing cause the degradation of polyethylene insulation, sometime as the final stage after water treeing. Based on the understanding the partial discharge (PD) behaviors in the aging process of insulating materials is possible to evaluate the cable condition in power networks. The paper discusses the analysis of PD in treeing channel connected with the charge trapping during switching impulses superimposed on AC voltage.

Słowa kluczowe: izolacja polietylenowa, pułpowanie ładunku, drzewienie elektryczne, przepięcia

Keywords: polyethylene insulation, charge trapping, electrical treeing, overvoltages

Wstęp

W technice eksploatacyjnej obok stosowanych od wielu lat metod pomiaru prądu polaryzacji i depolaryzacji dielektryka, napięcia powrotnego, pomiaru stratności dielektrycznej również przy niskich częstotliwościach wykorzystuje się także do analizy stanu izolacji pomiar wyładowań niezupełnych (wnz) w czasie napięcia przemiennego lub przy szybkozmiennych przebiegach napięciowych zanikających w czasie (np. metoda OWTS). Stosuje się tu podstawową metodę diagnostyczną polegającą na porównywaniu wyników badań z wcześniej zarejestrowanymi wzorcami dla próbek niestarzonych. Metoda ta skutecznie służy do wykrywania drzewienia elektrycznego w izolacji polimerowej przy napięciach wyższych od znamionowego [1]. Przy znamionowych poziomach napięć skuteczność wymienionych metod nie jest zbyt duża ponieważ rozpoznają one dopiero zaawansowane uszkodzenia izolacji. Metody te często, głównie z powodu niewielkich napięć probierczych nie są w stanie mimo istniejącego lokalnie uszkodzenia wygenerować jednoznacznych sygnałów diagnostycznych.

W związku z powyższym wydaje się, że pewną szansą znalezienia „lepszej” metody diagnostycznej byłoby rozważenie analizy odpowiedzi dielektryka na periodyczne impulsy napięciowe nakładane na napięcie przemienne o częstotliwości sieciowej tj. 50 Hz. Podobne w działaniu są znane pod fabrycznymi nazwami CDA i OWTS sposoby analizy wnz przy zanikającym w czasie napięciu sinusoidalnym stosowane do oceny izolacji kablowej [2]. W metodzie tej kable nowe poddaje się badaniu napięciem 1,5, 2, 3 U_0 , a starzone 1,5, 2, U_0 , w co najmniej 5 próbach, w których akceptowany poziom wnz to 50 pC, a granica dopuszczalna to 250 pC [3].

Dodatkowe wprowadzenie analizy sekwencji impulsów wnz może dostarczyć pewnych informacji na temat przebiegu starzenia izolacji, również z uwzględnieniem zachowania ładunków pułpowanych. Ciekawych informacji dostarcza analiza sekwencji impulsów wnz w sztucznym kanale w polietylenie przy napięciu przemienym. Autorzy pracy [4] uważają, że przed i po inicjacji drzewka z ostrza gazowego lokalizacja przestrzenna źródła wnz występuje na przejściu elektroda igłowa - kanał powietrzny, natomiast zmiana intensywności wnz po inicjacji

wynika ze zmiany warunków panujących w kanale – składu gazu, ciśnienia, przewodności itd. W czasie półfali dodatniej obserwowano stałą różnicę napięcia pomiędzy wnz rzędu 2 kV. Natomiast w półfali ujemnej poziom ładunku prognozował proporcjonalnie przyrost napięcia w następnym wyładowaniu.

Ładunek pozostający w obszarach przyelektrodowych zostaje najprawdopodobniej wprowadzany wskutek wnz, których poziom jest związany z szybkością narastania napięcia. Badania porównawcze charakterystyk wnz przy napięciu trójkątym i sinusoidalnym przedstawiono w pracy [5]. Przy przejściu sinusoidy napięcia przez zero następuje krótkotrwała intensyfikacja wnz. Ładunek pułpowany we wtrącinie w czasie wnz ogranicza pole elektryczne i prowadzi do wygaszania kolejnych wyładowań, których wystąpienie jest możliwe dopiero po przejściu ładunku dalej od elektrody. Odległość tę wyznaczają obszary wyładowań elektroluminescencyjnych lub długości drzewek zwarcio-nych powstałych po uprzednim naładowaniu próbki napięciem stałym. Przykładowo przy 40 kV/mm w układzie modelowym igła – polietylen - płyta, nie obserwuje się impulsów elektroluminescencji, a tym bardziej wyładowań niezupełnych. Jednak podany poziom krytyczny degradacji polietylenu jest w literaturze światowej sprawą dyskusyjną. Poziome krytyczne elektroluminescencji, zapoczątkowujące drzewienie elektryczne w polietylenie podaje się w zakresie od 15 kV/mm do 300 kV/mm. Przykładowo, Bamji podaje 300 kV/mm dla promienia igły 10 μm , Lebey 250 kV/mm dla promienia z zakresu 3÷10 μm , Bamji w układzie kula-płaszczyzna – 44 kV/mm, Jonsson – 55 kV/mm [6]. Wydaje się, że najbardziej wyważoną wartością jest 40 kV/mm, przyjęte do projektowania konstrukcji kabli XLPE na napięcie 500 kV [7]. Z kolei postępowanie dokładności metod badawczych na przestrzeni ostatnich lat przyniosło znacznie mniejsze wartości progowe. Autorzy [8, 9] podają dla polietylenu sieciowanego (XLPE) przy napięciu przemienym 50 Hz poziom 11 kV/mm wyliczony na podstawie pomiaru ładunku przestrzennego oraz potwierdzony badaniami elektroluminescencji. Fakt wykonywania wielu prób laboratoryjnych w tej dziedzinie świadczy o ważności wyników badań w celu zrozumięcia zjawisk związanych z ładowaniem próbek na problem starzenia polimerów kablowych.

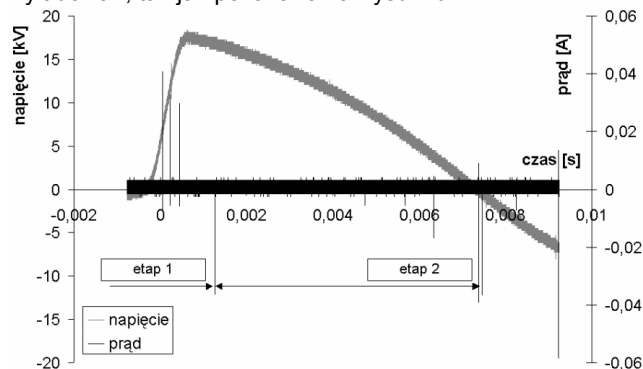
Pewne informacje o rodzaju ładunków pułapkowanych są dostarczane z badań metodą prądów termicznie stymulowanych (TSC). Fukuzawa i Ikamoto poprzez zastosowanie szeregu igieł połączonych równolegle w układzie ostrze – płyta uziemiona w polietylenie LDPE, określili z badań TSC głębokość wnikania ładunku na odległość $20\pm 70 \mu\text{m}$. Przy pewnym krytycznym napięciu uzyskano tę samą głębokość wnikania niezależnie od biegunowości napięcia stałego. Dla napięć niższych występuje głębsza penetracja przy biegunowości ujemnej i taką sytuację ze względu na niewielkie poziomy pola elektrycznego w polietylenie należy przyjąć dla dielektryków kablowych [10].

Przy utrzymywaniu się ładunku przestrzennego następuje przy przepięciach uaktywnienie degradacji izolacji, która może odbywać się w dłuższym czasie niż samo narażenie łączeniowe. Występujące wnz na czole udaru łączeniowego i w mniejszej liczbie przed przejściem napięcia w stanie przejściowym przez zero są związane z wyładowaniami wstecznymi generowanymi wskutek ładunku przestrzennego w obszarze przyelektrodowym.

Metodyka badań

W celu umożliwienia ciągłej rejestracji impulsów prądowych wnz w dłuższym okresie czasu zaproponowano metodę pomiaru sekwencyjnego. Metoda polega na wykorzystaniu napięcia skojarzonego, w którym udar łączeniowy jest nakładany na napięcie przemienne 50 Hz w określonych, np. kilku sekundowych odstępach czasowych. Przyłożenie udaru intensyfikuje zjawiska wnz, a ich charakterystyczne wielkości szczególnie w czasie napięcia przemiennego bezpośrednio po udarze są detektorem zjawisk starzeniowych w izolacji. Można bowiem postawić tezę, że wzrost wnz w czasie składowych przejściowych po udarze wynika z pułkowania ładunku w polimerze, co wiąże się z rozmiarem i kształtem jego defektów [11, 12].

Dla dokładniejszej analizy przebieg udaru łączeniowego podzielono wstępnie na dwa etapy występowania wyładowań, tak jak pokazano na rysunku 1.



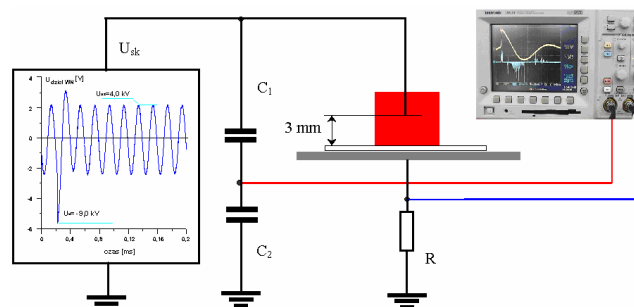
Rys. 1. Charakterystyczne etapy występowania wyładowań niepełnych na tle napięcia probierczego

Do oceny intensywności wnz przyjęto następujące wielkości obliczane na podstawie przebiegu prądu wnz dla kolejnych udarów łączeniowych

- liczba impulsów prądowych wnz,
- suma wartości prądu wnz,
- średnia wartość prądu wnz,
- maksymalna wartość prądu wnz,
- histogram czasu wystąpienia wnz wraz z jego parametrami statystycznymi,
- histogram prądu wnz wraz z jego parametrami statystycznymi,
- trajektoria na płaszczyźnie napięcie zapłonu wnz – prąd wyładowania.

W celu przyspieszenia procesu analizy zebranych danych pomiarowych i generowania odpowiednich charakterystyk napisano program wspomagający w środowisku Matlab. Otrzymane na podstawie programu przykładowe wyniki prądów i czasów wystąpienia wnz po 100 udarach łączeniowych przyłożonych do drzewka w początkowej fazie rozwoju i przed przebiciem pokazano w tabelach 1 i 2.

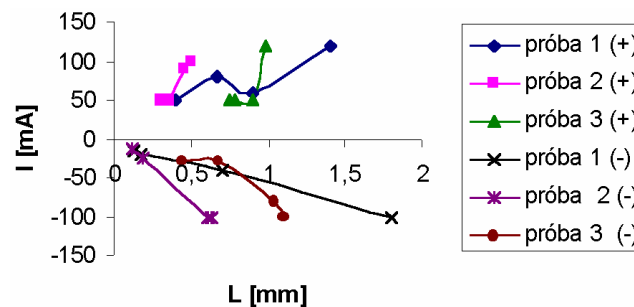
Pomiary impulsów wnz wykonano w układzie na rysunku 2 poprzez rejestrację napięcia przyłożonego do próbki oraz spadku napięcia na rezystancji 50Ω włączonej szeregowo pomiędzy elektrodę płaską, a uziemienie. Po przekroczeniu wartości progowej zapłonu wyładowań niepełnych pojawiają się impulsy prądowe na tle składowych: rezystancyjnej i pojemnościowej prądu próbki. Oscyloskop cyfrowy zapisuje w czasie około 1 s dane z obu kanałów do pamięci komputera i pozwala na archiwizację kolejnych udarów łączeniowych przykładanych co 2 s. Ilość rejestracji jest ograniczona rozmiarami arkusza kalkulacyjnego Excel.



Rys. 2. Układ pomiarowy do badań impulsów prądowych wnz w układzie elektroda igłowa – płyta uziemiona w polietylenie sieciowanym; U_{sk} – źródło napięcia skojarzonego, C_1 , C_2 – dzielnik pojemnościowy, R – rezystor bezindukcyjny o wartości 50Ω

Wyniki badań

Przykładowe wyniki badań wnz dla biegunowości dodatniej i ujemnej udaru łączeniowego pokazano na rysunkach 3 i 4. Ponieważ histogramy prądu wnz nie mają cech rozkładu normalnego do wstępnej oceny dynamiki wnz posłużono się rozstępem prądów wnz z szeregu - maksymalnych wartości wnz i sumy wnz dla kolejnych udarów.



Rys. 3. Wartości maksymalne prądu wnz dla etapu pierwszego w funkcji długości drzewka (w nawiasach - biegunowość udaru)

Po naniesieniu wyników na wykres prezentujący prąd wnz w funkcji długości drzewka dla kolejnych 3 serii pomiarów można zaobserwować następujące zależności.

Udar ujemny daje mniejsze wartości prądów maksymalnych wnz w stosunku do dodatniego (rys. 3). Podobna zależność dotyczy wyładowań wstecznych w stanie przejściowym (etap 2) na grzbiecie udaru, przed przejściem napięcia przez zero.

Tabela 1. Histogramy prądów wnz i czasu ich wystąpienia w początkowej fazie degradacji izolacji polietylenowej

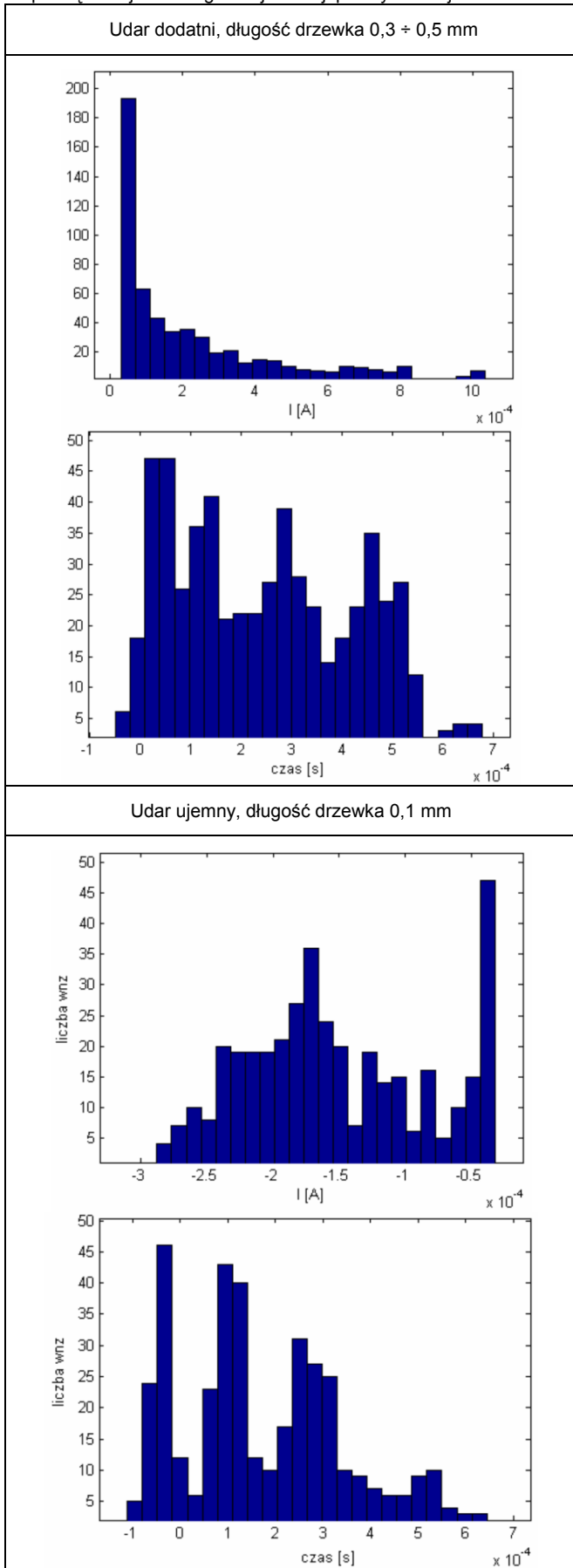
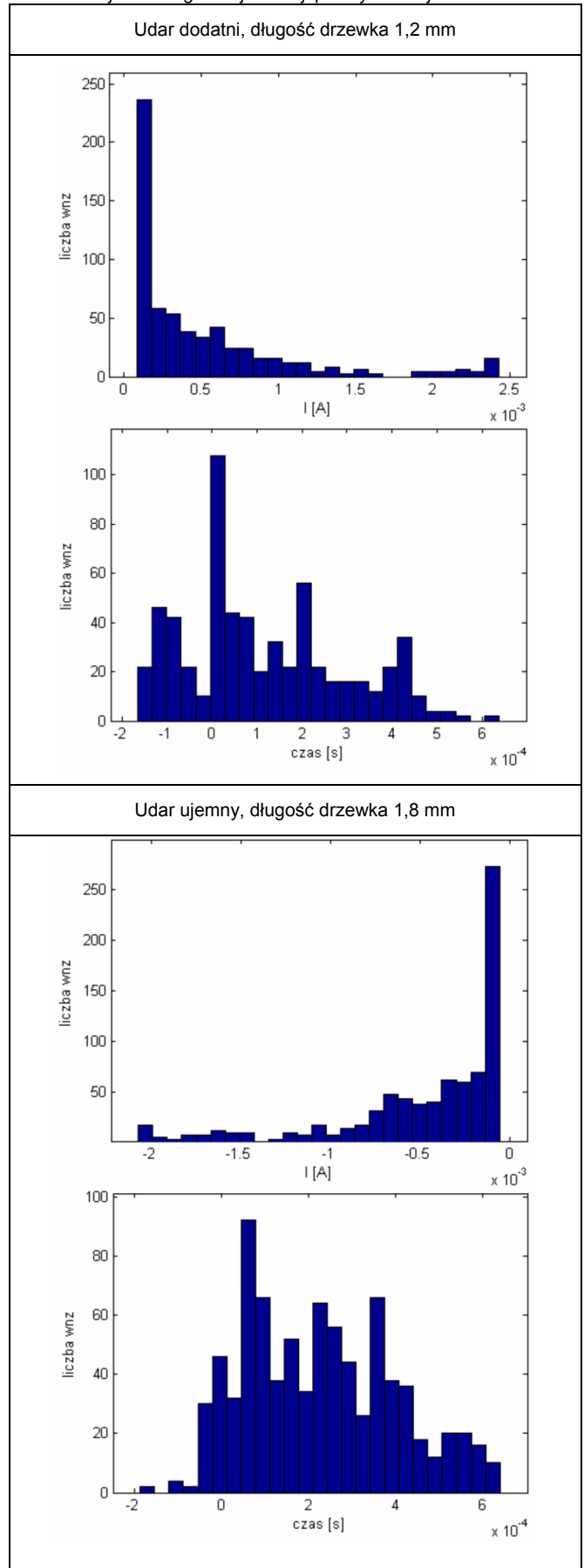
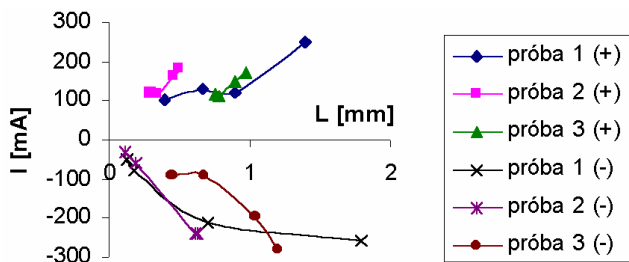


Tabela 2. Histogramy prądów wnz i czasu ich wystąpienia w końcowej fazie degradacji izolacji polietylenowej



Analizując sumy prądów wnz (rys. 4) otrzymuje się odmienne wnioski. W tym przypadku występują większe wartości dla udarów ujemnych, co wynika z wzrostu liczebności wnz widocznej na histogramach zawartych w tabelach 1 i 2.



Rys. 4. Suma prądów wnz dla etapu pierwszego w funkcji długości drzewka (w nawiasach podano biegunowość udaru)

Z przebiegu powyższych charakterystyk wynika, że ładunki dodatnie utrzymują się dłużej w stanach pułpkowych, co sprzyja występowaniu większej liczby wnz w czasie napięcia o biegunowości ujemnej szczególnie w fazie zaawansowanego drzewienia, kiedy możliwości utrzymywania ładunku w kanale drzewka są większe, niż na granicy elektroda igłowa – polietylen w czasie inkubacji.

Podobne charakterystyki podaje praca [13] dla układu z sztuczną wtrąciną gazową, gdzie różnica ładunku wnz w początkowej fazie degradacji izolacji jest aż dwukrotna, a następnie z rozwojem drzewka ulega zmniejszeniu.

Czas trwania wyładowań wstecznych w etapie 2 jest w zasadzie stały przy udarach ujemnych i wynosi ok. 2 ms. Przy udarach dodatnich rozrzut jest większy i czas ten ulega zmianie od 1,5 do 3 ms. Zależność ta może być wynikiem statystycznych opóźnień w inicjacji kolejnych wnz w kanale drzewka.

Rozkłady prądów przy udarach ujemnych (na czole udaru) mają charakter rozkładu normalnego w początkowej fazie rozwoju drzewka, natomiast dla udarów dodatnich i ujemnych przy większych długościach pojawia się rozkład niesymetryczny, w którym największe liczebności wnz występują przy małych prądach.

Wzrost drzewka powoduje wyraźne, bo aż dwukrotne zwiększenie liczebności wnz oraz prądu w stanie zaawansowanego drzewienia przy biegunowości ujemnej udaru. Przy udarach dodatnich występuje mniejszy przyrost, aczkolwiek obserwuje się wzrost największych wartości wnz (rys. 3, 4). Zależności takich nie obserwuje się przy napięciach przemiennych, gdzie występuje w dielektrykach kablowych zanik wnz, a następnie w fazie przed przebiciem wzrost. Niewykluczone, że podobne obserwacje jak przy napięciach przemiennych byłyby możliwe dla kształtów drzewka typu krzacastego. Ciągły wzrost wnz, aż do stanu na granicy przebicia próbki świadczy o łatwiejszym inicjowaniu wnz przy napięciach udarowych, kiedy można do próbki przyłożyć znacznie wyższe napięcie w krótkim czasie umożliwiające przemieszczanie i aktywowanie ładunków również w stanach pułpkowanych.

Wnioski

- Przebiegi wnz w czasie czoła udaru są podobne dla obu biegunowości i wskazują na niewielki wpływ ładunku przestrzennego pozostającego po czasie działania składowej przemiennnej. Wyższe poziomy maksymalnych prądów wnz przy biegunowości dodatniej, natomiast sumy wnz przy ujemnej świadczą o istnieniu nieznacznie

większego ładunku ujemnego w stosunku do dodatniego po okresie działania składowej przemiennnej.

- Wprowadzenie ładunków do pułpek w polimerze w czasie działania składowej udarowej jest jednak odmienne i powoduje zmianę czasu trwania wyładowań wstecznych jeszcze przed przejściem przez zero udarowej.
- Duża zmienność czasu trwania wyładowań wstecznych przy udarach dodatnich świadczy o tym, że ważnym czynnikiem w czasie starzenia polimeru jest rozkład ładunków dodatnich w warstwie przyelektrodowej, który jest trudniej usuwalny niż analogiczny ładunek ujemny, co sprzyja częstszym wnz przy udarach ujemnych.
- W czasie udarów o biegunowości ujemnej obserwowano przynajmniej dwukrotnie większą liczbę wnz, co potwierdza dłuższe czasy relaksacji ładunków dodatnich z kanału drzewka.
- Postęp degradacji izolacji powoduje wzrost poziomu prądu wnz zarówno w czasie składowej udarowej jak i przejściowej, natomiast nie ma istotnego wpływu na okres występowania wyładowań wstecznych w etapie 2. Przy napięciu przemiennym obserwuje się inne zależności wnz, co świadczy o odmiennym mechanizmie rozwoju wnz przy przepięciach łączeniowych.

LITERATURA

- Oyegoke B. et al., Selectivity of damped ac (DAC) and VLF voltages in after-laying tests of extruded MV cable systems, *IEEE Trans. on DEI*, vol. 10, no. 5, 2003, pp. 874 – 882
- Gulski E., Diagnozowanie wyładowań niezupełnych w urządzeniach wysokiego napięcia w eksploatacji, *Oficina Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, 2003
- Brettschneider S. et al., Recent field experience in PD assessment of power cables using oscillating voltage waveforms, *Conf. Record of the 2002 IEEE ISEI*, Boston, MA USA, April 7-10, 2002, 546 – 552
- Kaneiwa H. et al., Characteristics of partial discharges in artificial simulated tree channels during tree propagation, *IEEE Trans. on DEI*, vol. 8, no. 1, 2001, 72–77
- Suwarno et. al., Effects of frequency and applied voltage on electrical treeing induced discharges, *Electr. Eng. in Japan*, vol. 118, no 3, 1997, 1-12
- Laurent C. et al., Optical emission due to space charge effects in electrically stressed polymers, *IEEE Trans. on DEI*, vol. 4, no 5. 1997, 585 – 603
- Ishibashi A. et al., A study of treeing phenomena in the development of insulation for 500 kV XLPE cables, *IEEE Trans. on DEI*, vol. 5, no 5. 1998, 695 – 706
- Montanari G. C., The electrical degradation threshold of polyethylene investigated by space charge and conduction current measurement, *IEEE trans. on DEI*, vol. 7, no. 3, 2000, 309 – 315
- Laurent C. et al., Time-resolved space charge and electroluminescence measurements in polyethylene under ac stress, *IEEE Trans. on DEI*, vol. 11, no. 4, 2004, 554 – 559
- Fukuzawa M., Iwamoto M., TSC measurement of space charge in low-density PE under a needle – plane electrode system, *IEEE Trans. on DEI*, vol. 6, No. 6, 1999, 858-863
- Olesz M., Wpływ przepięć na pułpkowanie i relaksację ładunku w folii polietylenowej, *Przegląd Elektrotechniczny Konferencje*, Symp. EU1'2003, 164 –167
- Olesz M., Analiza impulsów prądowych towarzyszących rozwojowi drzewienia elektrycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.80, nr 10, 2004, 1029 –1032
- Yoichi et al., PD Patterns for LDPE with the needle – plane electrode, *Annual Report 2001 IEEE CEIDP*, pp. 344-347

Autor: dr inż. Marek Olesz, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych, ul. Własna Strzecha 18A, 80-952 Gdańsk, E-mail: molesz@elv.pg.gda.pl