



Barbara FLORKOWSKA¹, Marek FLORKOWSKI², Mieczysław TIMLER¹

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki (1); ABB Centrum Badawcze - Kraków (2)

Badania mechanizmów procesów erozyjnych powłok kabli ADSS w elektroenergetycznych liniach napowietrznych wysokiego napięcia

Streszczenie: Kable światłowodowe ADSS instalowane są na liniach WN, co prowadzi do zwiększenia pojemności transmisyjnej systemu telekomunikacyjnego. Problem z kablami ADSS w liniach WN odnośnie uszkodzeń zewnętrznej powłoki sygnalizowany jest w literaturze. W artykule przedstawiono badania laboratoryjne mechanizmów wyładowań na powierzchni powłoki kabla ADSS, inicjujących na niej procesy erozyjne. W warunkach narażeń elektrycznych i zawilgoceń powierzchni kabla rejestrowano obrazy fazowo-rozdzielcze impulsowych form wyładowań.

Abstract: (Investigation of erosion processes mechanisms of ADSS cables sheaths in HV overhead lines). Application of all dielectric self supporting fiber optic cables (ADSS) in overhead transmission lines (OHTL) leads to an improvement in communication network's transmitting capabilities. The problem with ADSS cables results from reported damages of outer sheath of that cables. Paper presents results of laboratory investigations of discharge mechanism on coating of ADSS cables, causing erosion processes on a surface subjected to stress of electric field and moisture.

Słowa kluczowe: kable światłowodowe ADSS, degradacja powierzchni izolacji, wyładowania powierzchniowe.

Keywords: ADSS cables, surface insulation degradation, surface discharges.

Wstęp

Elektroenergetyczne linie napowietrzne wysokiego napięcia wykorzystywane są aktualnie również do celów telekomunikacyjnych. W liniach tych lokalizowane są trakty światłowodowe z wykorzystaniem różnych rozwiązań konstrukcyjnych takich jak: włókna światłowodowe w przewodach odgromowych typu OPGW (*Optical Ground Wire*), włókna światłowodowe w przewodach fazowych typu OPT-PC (*Optical Phase-Conductor*), samonośne kable światłowodowe typu ADSS (*All Dielectric Self-Supporting*). To ostatnie rozwiązanie stosowane jest w świecie na różnych poziomach wysokich napięć w liniach napowietrznych; w naszym kraju na liniach 110 kV [1,2]. Jego podstawowe zalety to: niski koszt, mały ciężar, możliwość instalowania on-line, a także możliwość wykonywania połączeń między różnymi liniami. Kable typu ADSS lokalizowane są w linii napowietrznej w odległości 1-6m od przewodów fazowych oraz mocowane do konstrukcji słupa za pomocą specjalnych metalowych uchwytów składających się z drutów oplotowych i części nośnej.

Do zespołu narażeń eksploatacyjnych kabli typu ADSS należą: narażenia elektryczne wynikające z lokalizacji kabli w polu elektrycznym linii napowietrznej, narażenia środowiskowe określone przez warunki klimatyczne i zanieczyszczenia atmosfery [3,4,5,6] oraz naprężenia mechaniczne. Wymagania odnośnie do ich niezawodności i pracy w założonym czasie wynikają z oceny wpływu tych czynników na elementy konstrukcyjne kabla.

W szczególności jest to problem inicjowania wyładowań powierzchniowych w naturalnej warstwie wilgoci i zabrudzeń na polimerowej powłoce kabla.

Procesy fizyczne towarzyszące wyładowaniom, mogą zmieniać strukturę i właściwości materiału powłoki oraz powodować ubytki masy w wyniku erozji powierzchniowej [6,9]. Ta z kolei, zmniejszając hydrofobowość polietylenowej powłoki kabla, sprzyja rozwojowi tych zjawisk. Intensywność procesów erozyjnych wywołanych przez wyładowania powierzchniowe zależy od natężenia pola elektrycznego na powierzchni kabla zlokalizowanego w przęśle linii napowietrznej oraz właściwości materiału

powłoki. Sygnalizowane są przypadki uszkodzeń zewnętrznej powłoki kabla ADSS jako efekt wyładowań powierzchniowych. Prace badawcze w dziedzinie kabli ADSS koncentrują się na dwóch zagadnieniach.

Pierwsze z nich dotyczy analizy rozkładu potencjału i natężenia pola elektrycznego na powierzchni kabla w określonych warunkach eksploatacyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem uchwytu kablowego oraz końcówek oplotu ze względu na występujące w ich otoczeniu zniekształcenie rozkładu pola elektrycznego i wartości natężenia rzędu kilku do kilkunastu kV/cm [3,5].

Drugą grupę prac stanowią badania mechanizmów degradacji powłok kablowych w warunkach rzeczywistych narażeń eksploatacyjnych, jakimi są pole elektryczne oraz naturalne zawilgoenie i zanieczyszczenie. Badania powyższe należą do obszernej grupy problemów dotyczących polimerowych materiałów stosowanych np. w izolatorach kompozytowych, a właściwości tych materiałów mają szczególne znaczenie ze względu na zastosowanie w warunkach napowietrznych. Ich cechą charakterystyczną jest odpowiednia hydrofobowość powierzchni.

W badaniach laboratoryjnych ocenia się wpływ różnych czynników na pogorszenie się właściwości powierzchniowych materiałów polimerowych, w tym na zmniejszenie ich hydrofobowości i w konsekwencji na napięcie przeskoiku oraz możliwość powstawania zerodowanych ścieżek na powierzchni materiału w warunkach starzeniowych [7].

W pracach dotyczących kabli ADSS modelowane są rzeczywiste warunki eksploatacyjne. W testach badań odporności na erozję powłok kabli ADSS w polu elektrycznym, opartych na standardach IEEE [11], w tym również w opracowanych przez PSE S.A. [12], zaleca się oddziaływanie modelowych narażeń eksploatacyjnych w określonym czasie, po którym powinna być zachowana integralność powłoki kabla. Wymaganie to nie jest jednak jednoznacznie sprecyzowane, jak również nie są wskazane metody oceny stanu powierzchni po próbach. W literaturze przedstawiane są na podstawie badań własnych propozycje zmiany normy IEEE.

Celem prac badawczych w omawianej dziedzinie jest - poprzez analizę mechanizmów fizycznych zjawisk w ośrodkach dielektrycznych o różnych zmiennych w czasie parametrach – opracowanie kryteriów oceny skutków narażeń eksploatacyjnych kabli światłowodowych dla zapewnienia ich niezawodności w założonym czasie pracy.

Jest to dziedzina rozwijanych badań empirycznych ze względu na korzyści wynikające z zastosowania tego typu kabli.

Artykuł prezentuje badania laboratoryjne mechanizmów inicjowania wyładowań powierzchniowych na kablach ADSS, a następnie etapów procesów erozyjnych, dla opracowania modelu przemian energetycznych w elektrolitycznej warstwie wilgoci na powierzchni kabla, w których zasadniczą rolę odgrywają łuki wędrujące.

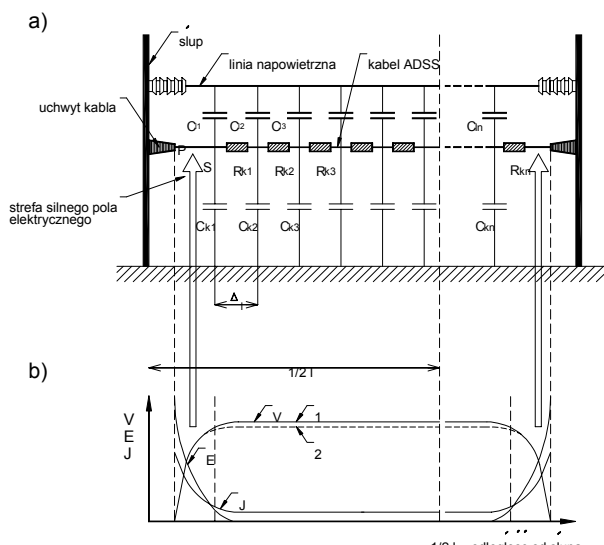
Dla oceny tych zjawisk zastosowano rejestrację prądu oraz impulsowych form wyładowań a następnie wizualizację ich zależności amplitudowo – fazowych w postaci obrazów fazowo – rozdzielczych [10].

Schemat zastępczy linii napowietrznej z kablem ADSS

Analizując mechanizm wyładowań elektrycznych na powierzchni kabla ADSS można wyodrębnić dwie współzależne przyczyny, jakimi są:

- 1) przepływ prądu w zewnętrznej, elektrolitycznej warstwie na powierzchni powłoki kablowej, oraz
- 2) lokalnie silne pole elektryczne.

Obydwe przyczyny znajdują swoje uzasadnienie w schemacie zastępczym przesyłnej linii przesyłowej WN (rys. 1a) na którym zaznaczono obszary ich występowania.



Rys. 1. a) Schemat zastępczy linii napowietrznej z kablem ADSS
b) Rozkład potencjału indukowanego V na powierzchni kabla, natężenia pola elektrycznego E i prądu powierzchniowego I , 1- przy stałej odległości przewodów fazowych i kabla, 2- z uwzględnieniem różnych ich zwisów, l - długość przesyła, S -strefa silnego pola elektrycznego, P - punkt potrójny, $C_{11}...C_{1n}$ – pojemności między przewodami fazowymi i kablem, $C_{k1}...C_{kn}$ – pojemność między kablem a ziemią, $R_{k1}...R_{kn}$ – rezystancja powierzchniowa powłoki kabla

Z pojemnościowego rozkładu napięć w linii WN z kablem ADSS wynikają wartości potencjałów indukowanych na powierzchni kabla (rys. 1b). Potencjał ten uzyskuje wartość w przybliżeniu ustaloną w odległości kilku do kilkunastu metrów od zakończenia uchwytu kablowego, przy czym wartość ta zależy od napięcia znamionowego linii, jej konfiguracji (1- lub 2 torowa) i lokalizacji kabla ADSS. W odległości tej występuje równocześnie strefa silnego pola elektrycznego w otoczeniu punktu potrójnego, jaki stanowi:

zakończenie uchwytu kablowego, polimerowa powłoka i powietrze. Duże krzywizny prętów uchwytu kablowego są dodatkową przyczyną lokalnego wzmocnienia pola elektrycznego. Szczegółowa analiza rozkładu przestrzennego potencjału i pola elektrycznego w tej strefie wykazuje występowanie gradientów rzędu kilkudziesięciu kV/cm . [5] Różnica potencjałów, wynikająca z uziemienia uchwytu kablowego na konstrukcji słupa, wywołuje przepływ prądu na powierzchni powłoki kabla. Rozłożone rezystancje powierzchniowe kabla R_k , reprezentujące stan powierzchni powłoki, w tym obecność na niej wilgoci warstwy zabrudzeniowej, zmieniają się w bardzo szerokim zakresie od około $10^{14} \Omega/m$ do około $10^5 \Omega/m$, gdy procesy erozyjne i utrata hydrofobowości zostały zapoczątkowane.

Zakres badań i metoda

Kabel światłowodowy typu ADSS umieszczony został w komorze klimatycznej, w polu elektrycznym w której poddany został bezpośrednio działaniu narażeń środowiskowych przez zastosowanie mgły solnej. [11,12] Do pomiarów wyładowań powierzchniowych zastosowano analizator wyładowań niepełnych ADA (*Advanced Discharge Analyzer*) [9,10], który umożliwiał wizualizację przebiegów impulsowych w postaci obrazów fazowo-rozdzielczych. Sygnały pomiarowe pobierano z rezystora R , natomiast sygnał synchronizacji z dzielnika układu zasilającego. Równocześnie mierzono prąd upływu oraz intensywność wyładowań za pomocą oscyloskopu Tektronix TDA3054. Dane pomiarowe z analizatora ADA oraz oscyloskopu przesyłane były do komputera za pomocą interfejsu GPIB. Rejestracji prądów ciągłych i impulsowych dokonywano na bieżąco przy użyciu oscyloskopu połączonego z komputerem i aparaturą pomiarową wyładowań niepełnych ADA.

Efekty powierzchniowe i elektryczne

Skutki oddziaływania mgły solnej na powłokę kablową w polu elektrycznym, w kolejnych etapach badań, można scharakteryzować następująco:

- a) początkowo polimerowa powłoka kabla zachowuje wstępną hydrofobowość powierzchni a rejestrowane parametry elektryczne są stabilne,
- b) w wyniku opadu następuje tworzenie się kropeł w dolnej części powłoki kablowej,
- c) lokalny wzrost gęstości prądu i jego działanie termiczne powodują powstawanie wysuszonych krótkich odcinków na powierzchni powłoki,
- d) między sąsiednimi kroplami wody powstają wyładowania, przybierając formę łuków wędrujących.

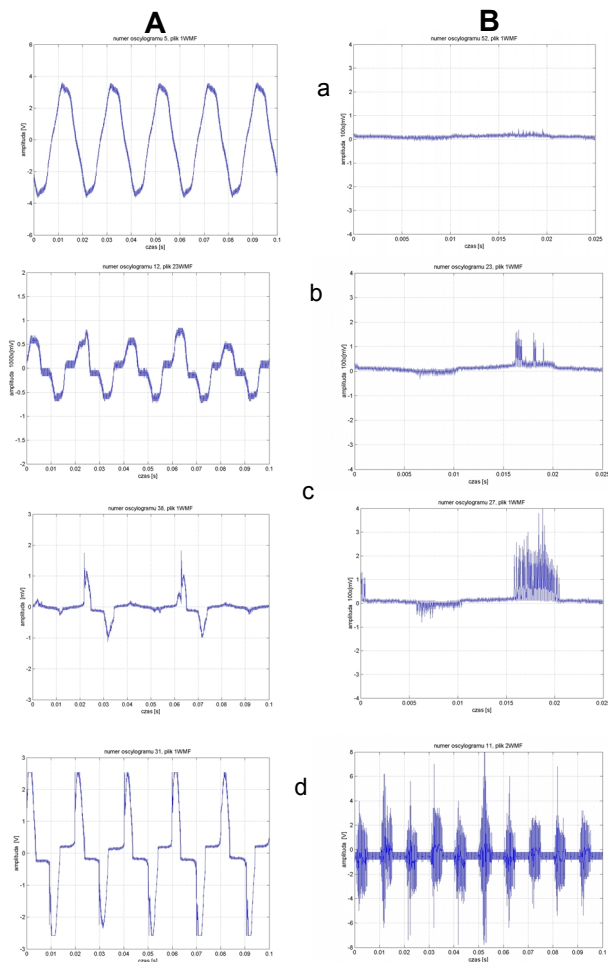
Przemiany energetyczne w powłoce kablowej rozpatrywano w odniesieniu do:

- 1) zmian przebiegu czasowego prądu powierzchniowego, gdy łuki nie występują i prąd jest ciągły – aż do momentu, gdy jego przebieg zostaje zniekształcony
- 2) stanu łukowego, dla którego charakterystyczna jest forma impulsowa wyładowań.

Rejestracja prądu upływu powierzchniowego.

Rejestrowano prąd w etapach oddziaływania mgły solnej: przed pojawieniem się łuków częściowych (rys. 2a), w okresach przejściowych po wyłączeniu opadu, w momentach zapłonu łuków wędrujących (rys. 2b) oraz w etapach ich rozwoju (rys.2c,d). Charakterystyczne zmiany przebiegu czasowego prądu oznaczają odkształcenie jego przebiegu sinusoidalnego (prąd pojemnościowy i prąd upływu) po zainicjowaniu i rozwoju łuków częściowych (rys.3). W etapach :

- wstępnym (powierzchnia w pełni hydrofobowa) prąd pojemnościowy jest bardzo mały, rzędu mikroamperów,
- po nawilżeniu w mgle solnej jego przebieg pozostaje sinusoidalny, lecz ma cechy prądu rezystancyjnego o większej amplitudzie,
- gdy tworzą się lokalne odcinki osuszone, zainicjowane zostają wyładowania łukowe, prąd pozostaje rezystancyjny,
- intensywne wyładowania łukowe czynią prąd silnie nieliniowym, o znacznie większej niż w poprzednich przypadkach wartości szczytowej, zniekształcony, niesymetryczny.



Rys. 2 Oscylogramy prądu w etapach próby:
 a) powierzchnia równomiernie zawilgocona
 b) zapłonu łuków częściowych
 c) dalszy ich rozwój
 d) intensywne wyładowania łukowe
 (lewa kolumna A: przebiegi czasowe, prawa kolumna B: impulsy wyładowań po filtracji składowej 50 Hz)

Zawartość harmoniczných

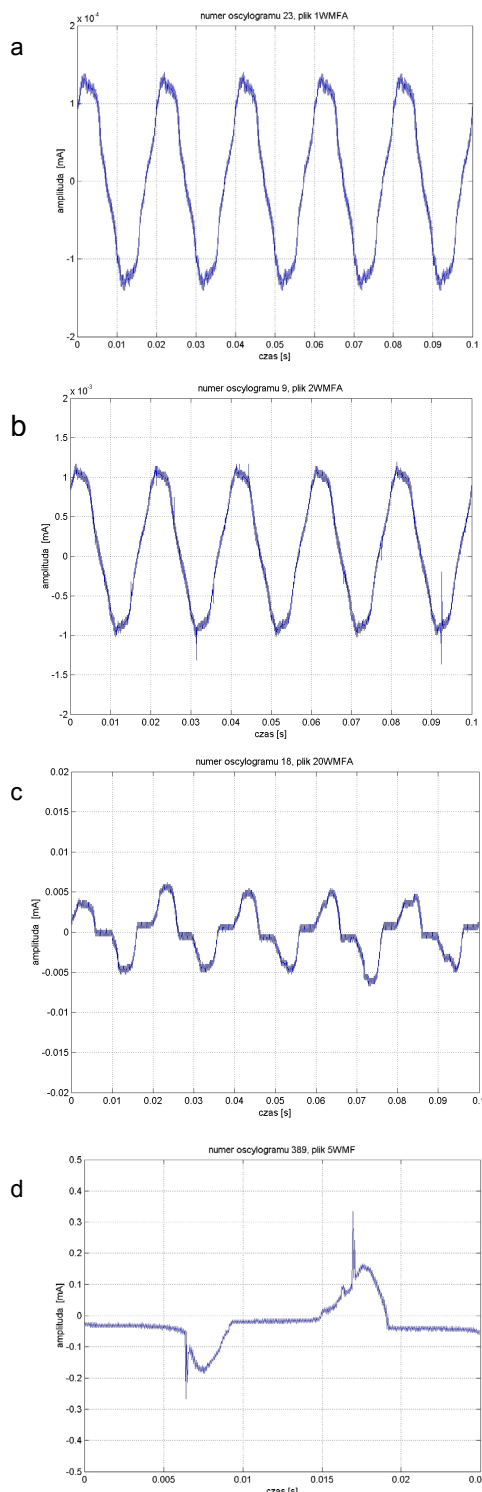
Analiza w dziedzinie częstotliwości ujawniła występowanie m.in. 3-ciej i 5-tej harmoniczných oraz zmiany widma amplitudowego przedstawione na rysunku 4.

Rysunek 5 przedstawia przebiegi zmian amplitudy harmoniczných w czasie próby w etapie inicjowania wyładowań powierzchniowych.

Wpływ łuków częściowych na przebieg czasowy prądu upływu

Korelacja: łuk – przebieg czasowy prądu dotyczy obserwowanych (i rejestrowanych kamerą cyfrową) cech łuków częściowych, takich jak: ich kolor, czas trwania formy widocznej, oraz rejestrowanych odkształceń prądu. Gdy łuki

zostają zainicjowane, obserwuje się różne poziomy zniekształcenia prądu. W przypadkach przedstawionych na rysunku 4 poziomy zawartości harmoniczných wzrasta. Wartość szczytowa prądu upływu i jego zniekształcenia silnie zależą od warunków próby. Dominujący kolor łuku od żółtego do białego zależy od wartości prądu, podobnie jak w badaniach polimerów silikonowych dla izolatorów kompozytowych.



Rys. 3 Przebiegi czasowe prądu oraz orientacyjne wartości szczytowe [mA]

- a) prąd pojemnościowy, powierzchnia sucha
- b) prąd upływu, powierzchnia zawilgocona
- c) zapłon łuków, zniekształcenia prądu, wyładowania łukowe
- d) wyładowania łukowe

Obrazy fazowe wyładowań

Dla opisu impulsowej formy wyładowań towarzyszących powstaniu łuków częściowych zastosowano rejestrację obrazów fazowo-rozdzielczych [10]. Obrazy te, odnoszone do dowolnej liczby okresów napięcia, reprezentują zbiory impulsów oraz ich powtarzalność w zakresie fazy i amplitudy, obserwowane w etapach próby. Przykład wybranych etapów dotyczy następujących przypadków (rys. 6):

A - opad ciągły, wyładowania impulsowe małointensywne
 B - wyłączenie opadu, lokalne osuszenie powierzchni, wzrost odległości między kroplami wody, wzrost amplitudy impulsów

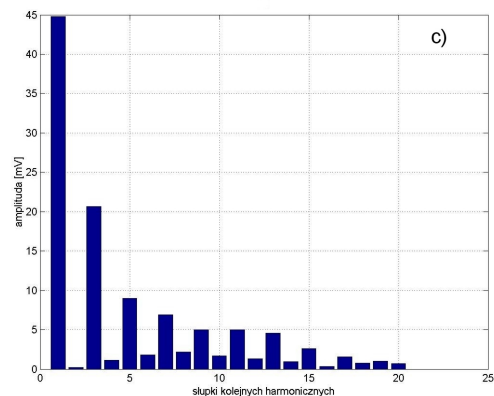
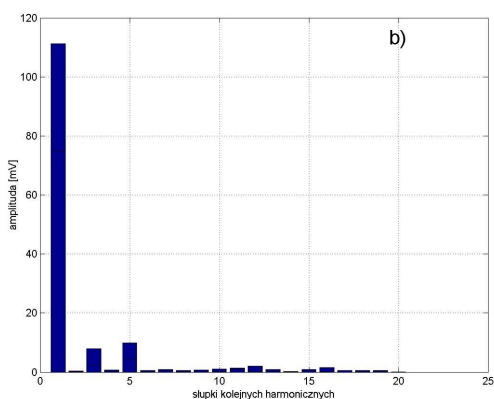
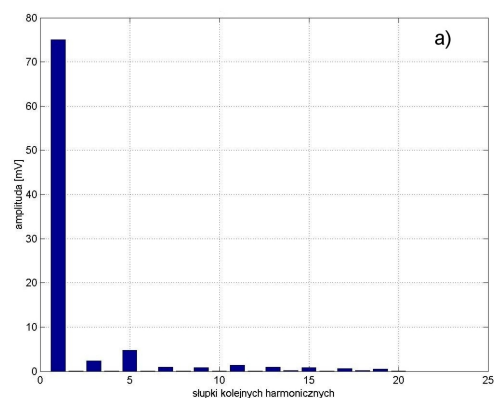
C - dalszy etap po wyłączeniu opadu

D - zanik formy impulsowej wyładowań

E - włączenie opadu

F - opad intensywny

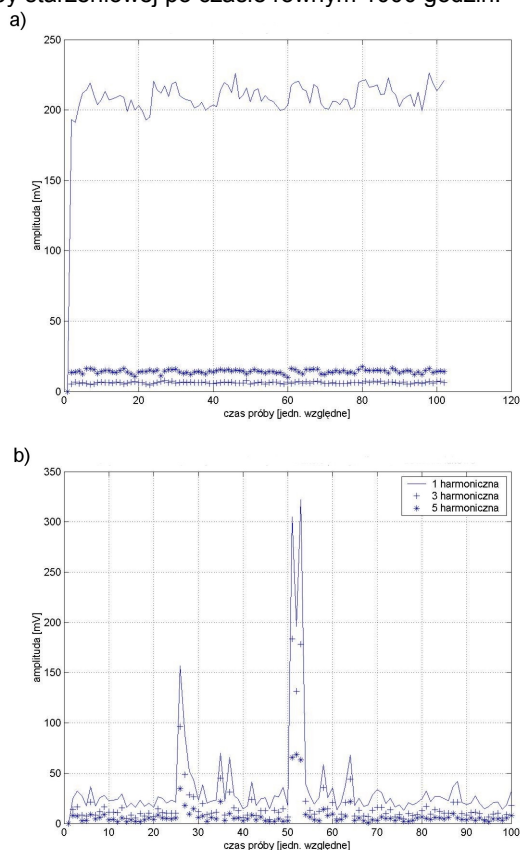
Zarejestrowane obrazy fazowo-rozdzielcze (rys. 7) ilustrują formy impulsowe wyładowań łukowych.



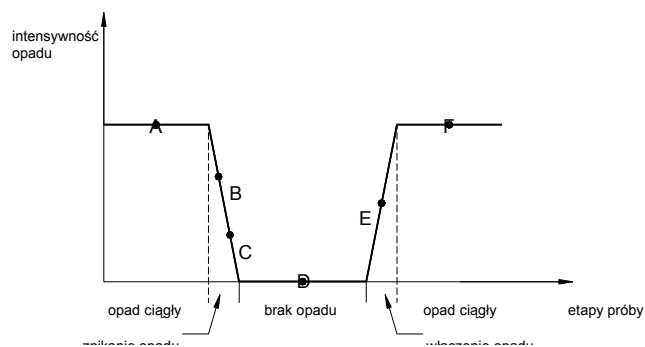
Rys. 4 Widma amplitudowe prądu odkształconego. Prąd a) słabo odkształcony, zapłon łuków częściowych, b) dalszy ich rozwój, c) intensywne wyładowania łukowe.

Erozja powierzchniowa

Fotografie łuków częściowych i śladów erozji powierzchniowej przedstawione na rysunkach 8 i 9 pochodzą z próby starzeniowej po czasie równym 1000 godzin.



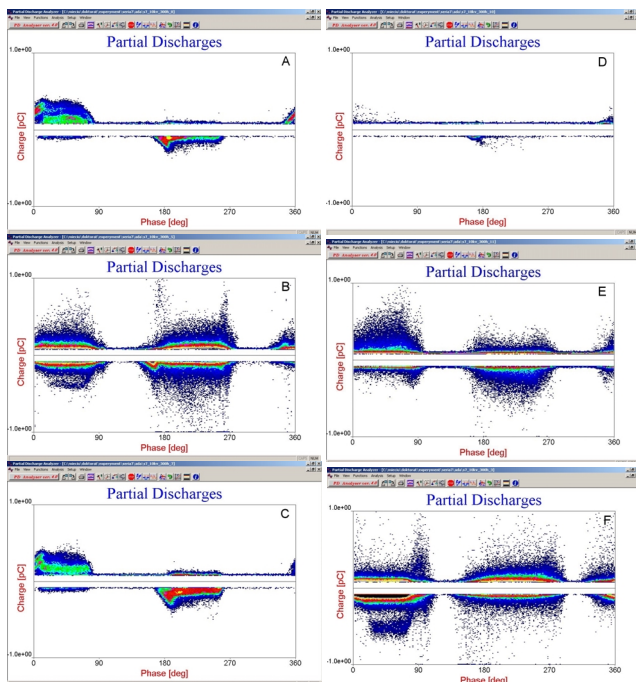
Rys. 5. Przykład zmian amplitud 3-ciej i 5-tej harmonicznej podczas próby, a) prąd mało odkształcony b) rozwój wyładowań



Rys. 6. Wybrane etapy próby

Zakończenie

Wyładowania powierzchniowe w postaci łuków częściowych powodują erozję powierzchniową powłoki kabli ADSS. Wyładowania łukowe są przyczyną zniekształcenia przebiegu czasowego prądu. Problem korelacji efektów starzenia z parametrami prądu upływu można scharakteryzować następująco: właściwe jest formułowanie interpretacji wyników badań na podstawie zmian składowych niskiej częstotliwości (3-ciej i 5-tej harmonicznej) niż odnoszenie ich do wartości szczytowej prądu. Uzyskanie odpowiedniej korelacji jest możliwe w badaniach eksperymentalnych. W wstępnych etapach starzenia składowa prądu 50 Hz maleje przy równoczesnym wzroście zawartości harmonicznych niskoczęstotliwościowych.



Rys. 7. Obrazy fazowo-rozdzielcze impulsów wyładowań w poszczególnych etapach przedstawionych na rysunku 6



Rys. 8. Ślady erozyjne na powierzchni kabla ADSS



Rys. 9. Ślady erozyjne na powierzchni kabla ADSS

Lokalny wzrost natężenia pola elektrycznego potęguje rozwój łuków częściowych co powoduje wzrost składowych harmonicznych prądu. Równoczesne osuszanie powierzchni przez wyładowania łukowe powoduje zmniejszanie się składowej podstawowej 50 Hz. Zaawansowanym procesom degradacji powierzchniowej towarzyszy wzrost składowej 50 Hz i obniżenie tendencji wzrostu zawartości 3-ciej i 5-tej harmonicznej. Informacje zawarte w obrazach fazowych wyładowań rejestrowane w etapach próby starzeniowej, mogą dostarczyć kryterium oceny procesów erozyjnych w oparciu o interpretację impulsowych form wyładowań powierzchniowych.

Praca była częściowo finansowana przez Komitet Badań Naukowych w ramach umowy o badania własne nr 10.10.120.430

LITERATURA

- [1] Anuszewska H., Optotelekomunikacyjne kable samonośne ADSS dla linii elektroenergetycznych, *VII Sympozjum EUI'99* Zakopane 1999, str. 15-21
 - [2] Kapołka P., Instalacje kabli światłowodowych ADSS na liniach elektroenergetycznych – aspekty projektowania, *VIII Sympozjum EUI'01*, Zakopane 2001, str. 251-256,
 - [3] Tuominen M.W., Olesn R.G., Electrical design parameters of all dielectric self supporting fiber optic cable, *IEEE Trans. PD*, vol. 15, no. 3, July 2000
 - [4] Florkowska B., Jackowicz-Korczyński A., Timler M., Narazenia elektryczne kabli światłowodowych typu ADSS w elektroenergetycznych liniach napowietrznych wysokiego napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10s/2002, str.76-79
 - [5] Florkowska B., Jackowicz-Korczyński A., Timler M., Analysis of electrical field distribution around the HV overhead transmission lines with an ADSS fiber optic cable, *International Symposium on High Voltage Engineering ISH2003*, Delft 2003
 - [6] Karady G.G., Besztercey G., Tuominen M.W., Corona caused deterioration of ADSS fiber optic cables on high voltage lines, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 14, No 4, 1999, pp. 1438-1445
 - [7] Fleszyński J., Tymań A.: Badania wyładowań elektrycznych inicjowanych przez krople wody na hydrofobowej powierzchni izolacyjnej. *III Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć IW'96*, Poznań – Kiekrz 1996, s. 113-118
 - [8] Tymań A. : Prądy upływu na materiałach silikonowych Florkowska warunkach mgły solnej. *V Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć IW'2000*, Poznań – Kiekrz, 2000, s. 399-404.
 - [9] Florkowska B., Florkowski M., Timler M.: Badania wyładowań powierzchniowych na powłokach kabli ADSS w elektroenergetycznych liniach napowietrznych, *VIII Sympozjum EUI'01*, Zakopane 2001, str. 147-154
 - [10] Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P., Mechanizmy pomiaru i analiza wyładowań niepełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, ISBN83-910387-5-0, Wyd.PAN, Warszawa, 2001
 - [11] IEEE Standard for ADSS for use on overhead utility lines, pr P1222, Anex A
 - [12] Warunki techniczne PSE S.A. dla kabli światłowodowych ADSS i OPAC, Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A., Instytut Energetyki, Warszawa 1999
- Autorzy:** dr hab. inż. Barbara Florkowska prof. AGH, mgr inż. Mieczysław Timler, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: beflor@agh.edu.pl; mieciu@timler.pl; dr inż. Marek Florkowski, ABB Corporate Research, ul. Starowiślna 13A, Kraków, E-mail: marek.florkowski@pl.abb.com