



Barbara FLORKOWSKA¹, Marek FLORKOWSKI², Mieczysław TIMLER¹

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

Narażenia eksploatacyjne kabli światłowodowych ADSS w elektroenergetycznych liniach napowietrznych wysokiego napięcia

Streszczenie. Scharakteryzowano warunki eksploatacyjne kabli światłowodowych ADSS sprzyjające procesom degradacji powłoki kablowej. W badaniach laboratoryjnych modelowano narażenia polowe i środowiskowe dla wyodrębnienia form impulsowych wyładowań łukowych. Rejestrowano obrazy fazowo-rozdzielcze wyładowań.

Abstract. (The exploitation exposure of ADSS cables in overhead HV transmission lines). The exploitation conditions of ADSS cable were described. Paper presents results of laboratory investigations of discharge mechanism on coating of cables, causing erosion processes on a surface subjected to electric field stress and moisture. The phase-resolved patterns of surface discharges were registered.

Słowa kluczowe: linie napowietrzne, kable światłowodowe ADSS, procesy erozyjne, łuki częściowe, wyładowania niepełne
Keywords: transmission lines, fiber-optic cable, erosion processes, dry-band arc, partial-discharges

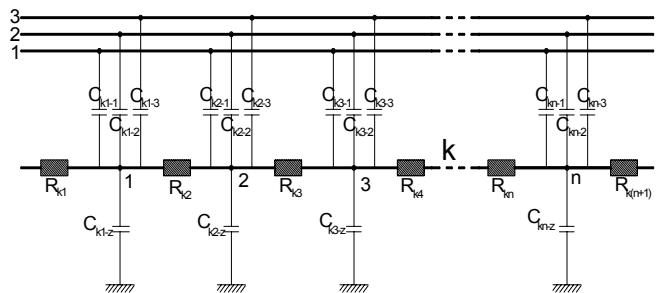
Wstęp

Kable światłowodowe typu ADSS (*All-Dielectric Self Supporting*) przeznaczone są do instalowania na czynnych liniach przesyłowych wysokiego napięcia. Stawiane są im duże wymagania pod względem mechanicznym, konieczne jest stosowanie odpowiednich zawiesi (*fittings*) na konstrukcjach słupów oraz zabezpieczeń ograniczających drgania kabla w niekorzystnych warunkach atmosferycznych. Miejsce lokalizacji kabla w linii przesyłowej powinno być tak dobrane, aby minimalizować lub wyeliminować wpływ pola elektrycznego wywołanego obecnością przewodów fazowych i uziemionych konstrukcji słupa oraz fittingu. Narażeniem eksploatacyjnym kabli światłowodowych ADSS jest pole elektryczne oraz warunki środowiskowe, w tym opady deszczu i zanieczyszczenia zawarte w powietrzu. Ich efektem są prądy upływu, wyładowania powierzchniowe, wyładowania łukowe i powierzchniowe procesy erozyjne. Mechanizmy tych zjawisk posiadają wiele cech wspólnych z zjawiskami powodującymi degradację izolacyjnych materiałów polimerowych w warunkach środowiskowych, w tym z procesami zachodzącymi na silikonowych osłonach izolatorów kompozytowych [1,3]. W przypadku kabli ADSS procesy erozyjne dotyczą przede wszystkim obszarów w otoczeniu zawiesi przelotowych i odciążowych, ze względu na wysokie gradienty w tym obszarze.

Analiza mechanizmów inicjowania procesów degradacji polietylenowych powłok kabli ADSS obejmuje relacje między wartościami potencjałów indukowanych na powierzchni kabli w polu elektrycznym linii napowietrznej, a wartościami prądów upływu powierzchniowego, przy zmieniającej się hydrofobowości powłoki kablowej, z czego wynikają warunki dla inicjowania łuków wędrujących i procesów termicznej degradacji polietylenu. Zainicjowane łuki częściowe wpływają na przebiegi czasowe prądu, w którym pojawiają się składowe wysokiej częstotliwości. Model mechanizmu powstawania wyładowań łukowych obejmuje zespół zjawisk prowadzących do zniszczenia kabli światłowodowych. Jest to możliwe w warunkach uformowania stabilnych łuków wędrujących, co może nastąpić po przekroczeniu określonych wartości potencjału indukowanego na kablu i prądu upływu. Wartości tych wielkości zależą od konfiguracji linii napowietrznej, warunków środowiskowych i rezystancji powierzchniowej powłoki kablowej.

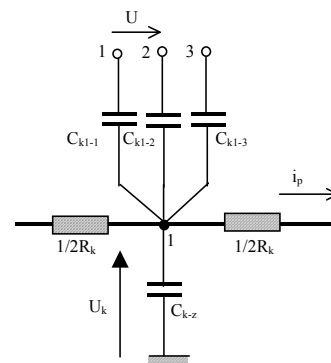
Schemat zastępczy linii napowietrznej z kablem ADSS

Kable światłowodowe instalowane są w liniach napowietrznych w odległości około 2-3 m od przewodów fazowych. Schemat zastępczy (rys.1) [4] zawiera rozłożone pojemności i rezystancje, które w warunkach eksploatacyjnych mogą ulegać zmianie.



Rys.1. Schemat zastępczy linii napowietrznej z kablem ADSS, – 1,2,3-przewody fazowe, k – kabel światłowodowy

Pojemności C_{k1-1} , C_{k1-2} , C_{k1-3} itd. między przewodami fazowymi (1,2,3) linii napowietrznej i kablem światłowodowym K zależą od wielu czynników, w tym od konfiguracji linii napowietrznej (1- lub 2-torowa, konstrukcji słupów, długości przęsła) oraz od lokalizacji kabla w linii. Pojemności C_{k-z} oznaczają pojemności kabla względem ziemi.

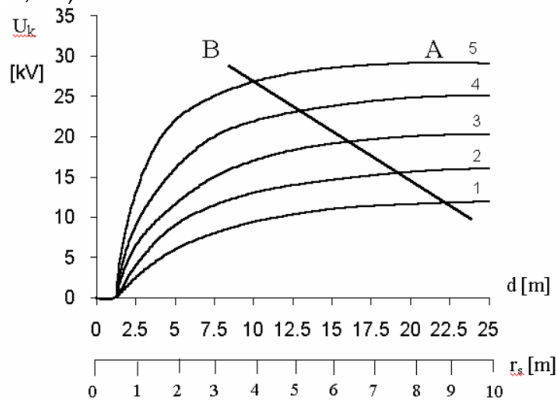


Rys.2. Schemat zastępczy elementu odcinka kabla ADSS

Rezystancje kabla R_k , rozłożone na jego długości w przęśle między uchwytami, będące efektem zawilgocenia i zanieczyszczenia powierzchni kabla, zawierają się w granicach od 1 do kilkudziesięciu $M\Omega/m$, w szczególnych warunkach wartość ta może być obniżona nawet do $0,1M\Omega/m$. Parametry te wpływają na wartości potencjałów indukowanych na kablu U_k oraz na wartości prądu powierzchniowego i_p . W obliczeniach numerycznych rozkładu potencjałów i prądów indukowanych na kablu, przyjmuje się podział linii na skończoną liczbę elementów, np. 250 przy długości przęsła 500 m, przy czym zwiększenie tej liczby nie wpływa już na wyniki obliczeń (rys.2).

Potencjał indukowany

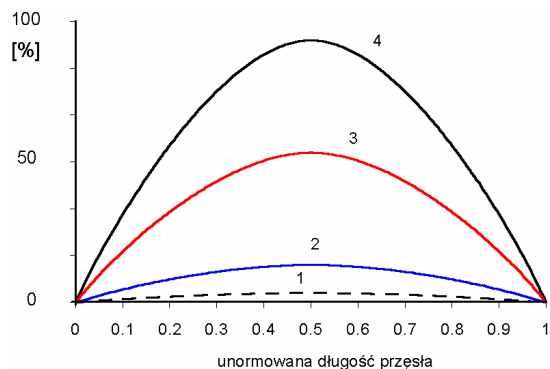
Potencjał indukowany uzyskuje wartość w przybliżeniu ustaloną w odległości kilku do kilkunastu metrów od zakończenia zawiesia kablowego, przy czym wartość ta zależy od wielu czynników, w tym od: napięcia znamionowego linii, długości przęsła, szerokości poprzeczника, liczby torów, zwisu przewodów fazowych i kabla, a także od rezystancji powierzchniowej kabla w różnych warunkach środowiskowych. Dla linii WN o określonym napięciu znamionowym potencjał indukowany U_k (2D) na kablu ADSS może być obliczony na całej jego długości [5,7]. Największa wartość potencjału występuje w środku przęsła. Należy pokreślić, że wartości potencjału na obwodzie kabla zmieniają się tylko w niewielkim stopniu [5]. Producenci kabli określają wartości potencjałów indukowanych, na których mogą znajdować się kable w eksploatacji na liniach napowietrznych o różnych poziomach napięciowych, w zakresie 10 kV do 25 kV. Według [8] potencjał ustalony na kablu ADSS w dwutorowej linii 400 kV, wynosi 23 kV(rms) i wartość tą osiąga w odległości d równej około 20m od konstrukcji uziemionej (rys.3, A4)



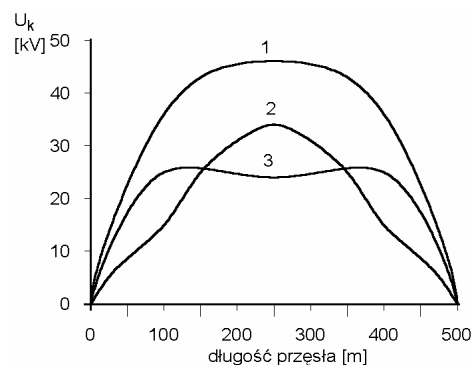
Rys.3. A) Potencjał indukowany w kablu, B) Wpływ szerokości poprzeczника r_s : 1 – 9m, 2 – 7,6m, 3 – 6,1m, 4 – 4,6m, 5 – 3,0m [8]

Długość przęsła ma szczególny wpływ na wartość potencjału indukowanego na kablu. Rozkład potencjału wzdłuż kabla jest nieliniową funkcją długości przęsła. Przykład (rys.4) ilustruje rozkłady potencjału na kablu przy różnych długościach przęsła odniesione do długości najmniejszej (bez uwzględnienia zwisów) Potencjał indukowany o wartości ponad 15 kV występuje w linii 220 kV dopiero przy długości przęsła większej niż 150 m, a poniżej tej długości nie osiąga tej wartości w praktyce [7]. Odrębnym problemem jest wpływ zwisu przewodów fazowych i kabla ADSS, które nie są jednakowe. Zwis przewodów fazowych jest większy niż kabla, co zmienia pojemności $C_k \dots C_{kn}$ i C_{k-z} (rys.1). W szczególnym przypadku [5] lokalizacji kabla światłowodowego nad przewodami fazowymi, potencjał indukowany może zostać zmniejszony (rys.5). Wpływ zwisu przewodów fazowych zilustrowano na przykładzie linii 220 kV o ustalonym potencjale indukowanym równym 10 kV (rys.6). Gdy

w obliczeniach zwis nie zostaje uwzględniony – kabel znajduje się w „kanale potencjałowym” (rys.6a), natomiast – uwzględnienie zwisu oznacza „wysuniecie się” kabla do kanału o większym potencjale (rys. 6b).

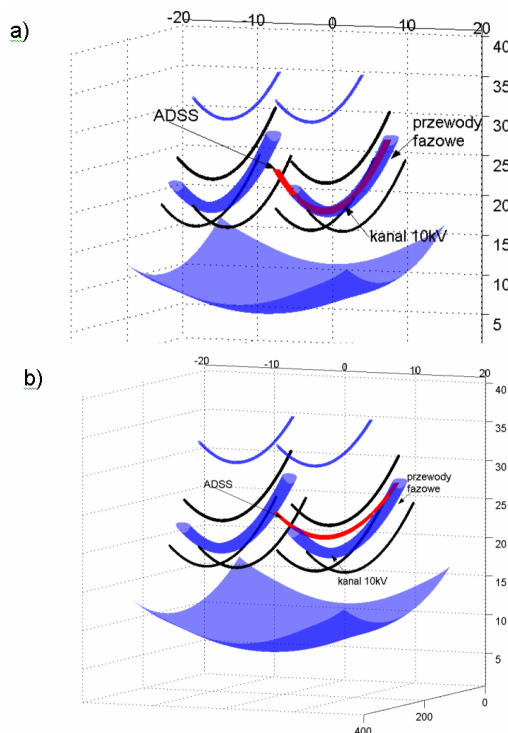


Rys.4. Rozkład potencjału wzdłuż kabla przy różnej długości przęsła d : 1 – d_1 , 2 – $2,5d_1$, 3 – $5d_1$, 4 – $10d_1$



Rys.5. Wpływ zwisu na rozkład potencjału indukowanego wzdłuż przęsła linii 500kV; 1 – zwisu nie uwzględniono – fazy RST, 2 – wpływ zwisu, fazy RST, 3 – wpływ zwisu, fazy RTS [5]

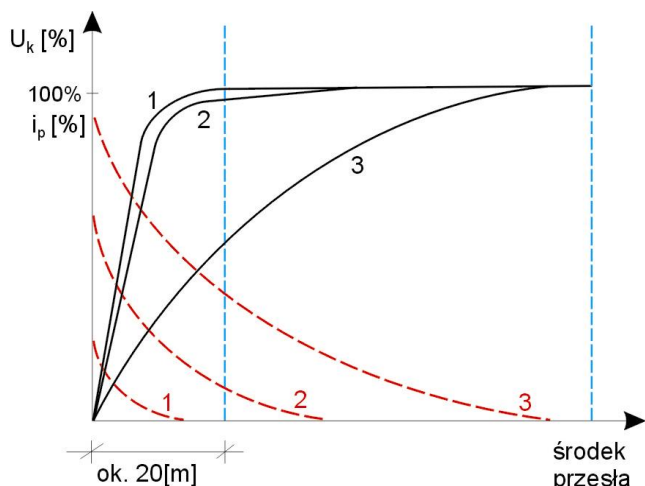
Rezystancja powierzchniowa kabla w zmiennych warunkach środowiskowych (np. $0,1M\Omega/m$, $1,0M\Omega/m$, $10 M\Omega/m$), wpływa na wartość potencjałów indukowanych oraz ich zmianę w otoczeniu zawiesi na konstrukcji słupa (rys.7).



Rys.6. Kanały potencjałowe przewodów fazowych i kabla ADSS w linii 220 kV z uwzględnieniem a) lub nie b) różnicy zwisów.

Prąd powierzchniowy

Sprężenie pojemnościowe pomiędzy przewodami fazowymi a kablem światłowodowym powoduje prąd upływu powierzchniowego w zewnętrznej warstwie na powłoce kabla. Prąd ten zależy od długości przęsła, osiągając wartości rzędu kilku mA, przy czym zasadniczy wpływ na jego wartość ma rezystancja powierzchniowa kabla (rys.7) Wartość prądu równa 1mA uważana za krytyczną może wystąpić już przy najmniejszej długości przęsła. Prąd powierzchniowy, w linii 230 kV nie przekracza 0,5 mA przy rezystancji warstwy powierzchniowej $R_k = 10\text{M}\Omega/\text{m}$, 1,5mA przy $R_k = 1\text{M}\Omega/\text{m}$ i są rzędu kilku mA przy $R_k=0,1\text{M}\Omega/\text{m}$ [6]. Długość odcinka kabla, na którym prąd powierzchniowy przekracza wartość krytyczną, może być uważana jako progowa w mechanizmie inicjowania łuków częściowych.



Rys.7. Wpływ rezystancji powierzchniowej kabla na rozkład potencjału indukowanego U_k i prądu powierzchniowego i_p ; U_k – linia ciągła, i_p – linia przerywana; Rezystancja powierzchniowa: 1 – duża, 2 – średnia, 3 – mała

Łuki częściowe

Łuki częściowe zostają zapoczątkowane na kablu, gdy jego powierzchnia jest zawilgocona i zanieczyszczona, gdy następnie dochodzi do osuszenia jej na krótkich odcinkach, gdy składowa styczna natężenia pola elektrycznego jest wystarczająca dla spowodowania przeskoku na suchym odcinku, oraz gdy prąd powierzchniowy w warstwie zawilgoconej przekracza określoną wartość.

Zależności prądu indukowanego $i_p=f(R_k)$ oraz potencjału indukowanego $U_k=f(R_k)$ wyznaczają warunki zapłonu łuków częściowych dla określonej konstrukcji linii napowietrznej. Zapłon łuku zależy od długości wysuszonego odcinka (*dry band*), wartości prądu przed wyładowaniem łukowym i rezystancji warstwy powierzchniowej.

Na podstawie badań laboratoryjnych stwierdzono, że przy prądzie 0,5 mA do 1 mA mogą powstawać stabilne wyładowania łukowe niszczące powierzchnię kabla. Przy prądzie poniżej 0,5 mA powstają wyładowania iskrowe, nie oddziałujące niszcząco na kabel [1,5].

Zakres $i_p > 1\text{mA}$ oznacza obszar dużego prawdopodobieństwa łuku częściowego. Gdy prąd jest mniejszy od 1 mA oraz rezystancja powierzchniowa większa od $ok.10^6\Omega/\text{m}$ wówczas zapłon łuków jest mało prawdopodobny.

Modelowanie warunków eksploatacyjnych kabli ADSS w liniach napowietrznych wysokiego napięcia

Warunki eksploatacyjne kabli światłowodowych wpływają na ich czas życia ze względu na możliwość rozwoju procesów erozyjnych uszkadzających powłokę kabla.

W kolejnych etapach rozwoju tych procesów należy uwzględnić następujące czynniki:

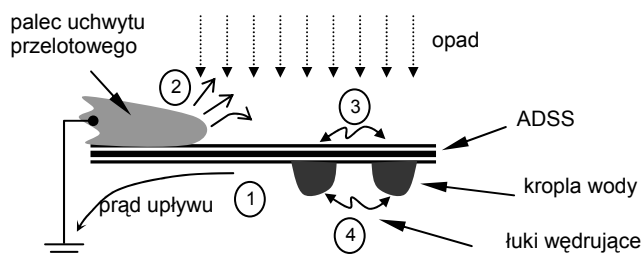
- prąd powierzchniowy na kablu,
- zanieczyszczenie powierzchni kabla,
- zawilgoconie powierzchni kabla,
- zmieniający się stan powierzchni powłoki kabla pod względem hydrofobowości,
- zatrzymywanie kropeł wody na powierzchni kabla.

Wówczas w mechanizmach rozwoju procesów erozyjnych można wyodrębnić następujące zjawiska:

- przepływ prądu ciągłego o wartości zależnej od rezystancji kabla. Im większe jest zawilgoconie i zanieczyszczenie powierzchni kabla, tym prądy indukowane mają większe wartości,
- lokalne osuszanie krótkich odcinków kabla
- ulot elektryczny
- mikro iskry
- łuki częściowe zwierające wysuszone powierzchnie
- gdy odcinki suche posiadają dużą rezystancję, występują na nich znaczne spadki napięcia.

W badaniach laboratoryjnych możliwe jest wyodrębnienie poszczególnych etapów w mechanizmie niszczenia powłoki kablowej. Materiały na powłoki kablowe charakteryzuje wysoka klasa hydrofobowości. Opady deszczu, poprzez tworzenie kropeł wody w dolnej części powłoki stwarzają warunki dla: (rys. 8)

- wyładowań ulotowych od pojedynczych kropeł i zawiesi (2)
- wyładowań między kroplami (3) i (4),
- koalescencji kropeł wody i zwiększenia prądu upływu (1)



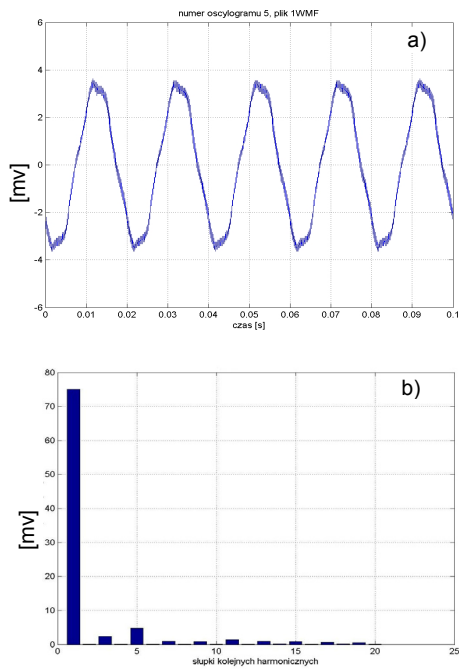
Rys.8. Efekty powierzchniowe występujące pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego.

W schemacie zastępczym na rysunku 1 występują wówczas dodatkowe rezystancje R_{s1} , R_{sn} reprezentujące odcinki przedłukowe. W zespole czynników decydujących o mechanizmie wyładowań powierzchniowych są: natężenie pola elektrycznego, zawilgoconie i zanieczyszczenie powierzchni kabla oraz opady deszczu.

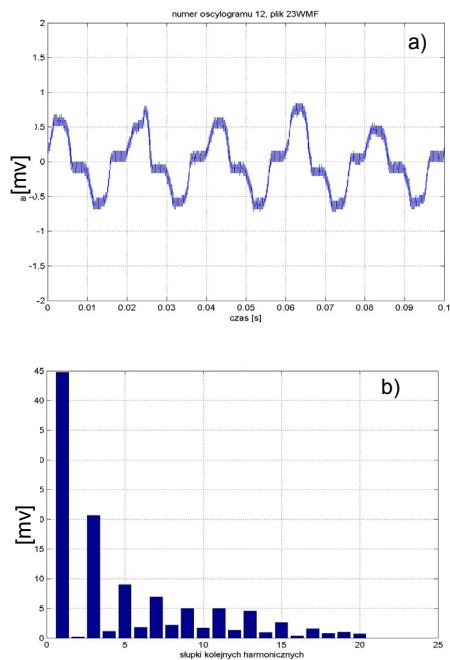
W badaniach laboratoryjnych zastosowano: 1) narażenia dwuczynnikowe (pole elektryczne i opad wodny – stałe w określonym czasie) oraz 2) narażenia jednoczynnikowe (pole elektryczne przy wyłączonym opadzie) z równoczesną rejestracją prądu i obrazów fazowych wyładowań niezupełnych [6].

W etapie nawilgacania kabla impedancja warstwy powierzchniowej maleje, prąd powierzchniowy rośnie i ma przebieg prawie sinusoidalny (rys. 9)

Efektom formowania łuków częściowych, w etapie tworzenia się suchych odcinków, jest wzrost zawartości harmonicznych i wystąpienie formy impulsowej wyładowań łukowych (rys.10 i 11). Obrazy fazowe zawierają zbiory impulsów o dużych ładunkach (charakterystyczne dla wyładowań powierzchniowych) [6], przy czym zanikaniu wyładowań łukowych towarzyszy zmniejszanie się ładunku maksymalnego impulsów i ich liczby.



Rys.9. Kabel zawilgocony; a) oscylogram prądu, b) widmo amplitudowe



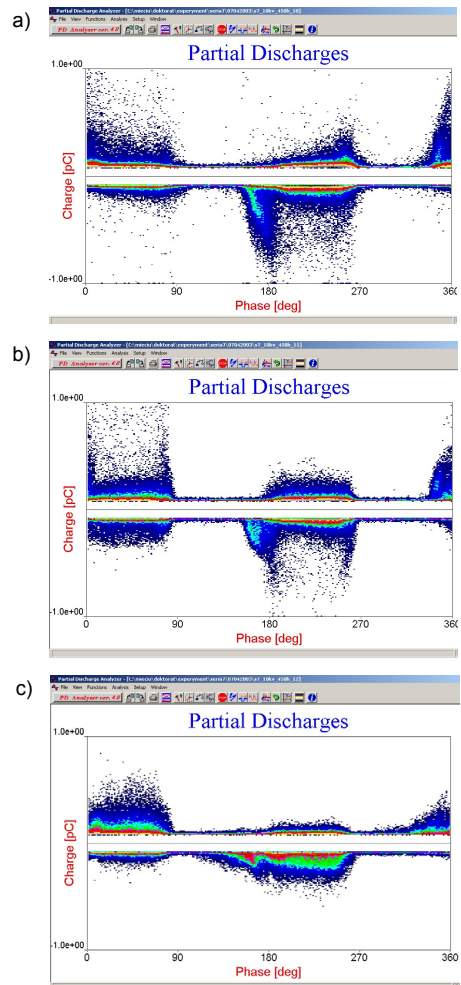
Rys.10. Powierzchnie łuków częściowych; a) oscylogram prądu, b) widmo amplitudowe

Zakończenie

O rozwoju procesów degradacji powłok kabli ADSS decydują narażenia eksploatacyjne. Metodą oceny tych procesów, a więc inicjowania wyładowań łukowych jest rejestracja obrazów fazowych wyładowań oraz składowych harmonicznych prądu upływu powierzchniowego.

LITERATURA

[1] Bretuj W., Fleszyński J., Procesy degradacji silikonowej osłony izolatora Raupozytowego w próbie starzeniowej w komorze deszczowej, *Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje*, V 2, 1/2004, str. 23-26



Rys. 11 Obrazy fazowe wyładowań powierzchniowych a, b) , zanikanie wyładowań podczas osuszania kabla c).

[2] Carter C.N., Dry band electrical activity on optical cables separately strung on overhead power lines, *Proc. of the 37th IWCS, Reno, November 1998*, pp 117-121

[3] Chrzan K.L., Concentrated discharges and dry band on polluted outdoor insulators, *13th Int. Symp. on HV Engineering, Delft, Netherlands, 2003*, p. 227

[4] Florkowska B., Florkowski M., Timler M., Badania wyładowań powierzchniowych na powłokach kabli ADSS w elektroenergetycznych liniach napowietrznych, *VIII Symp. EUI,01 „Problemy ...” Zakopane 2001*

[5] Florkowska B., Jackowicz-Korczyński A., Timler M., Analysis of Electric Field Distribution Around the High Voltage Overhead Transmission Lines with ADSS Fiber Optic Cable, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, No. 3, pp. 1183- 1189, July 2004

[6] Florkowska B., Florkowski M., Zydrón P., Włodek R., Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niepełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, *IPPT PAN, Warszawa 2001*

[7] Karady G.G., Devarajan S., Algorithm to Predict Dry-Band Arcing in Fiber Optic Cable, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol 16, No. 2, pp 286-291, April 2001

[8] Peacock A.J., Wheeler J.C.G., Development of aerial fibre optic cables for operation on 400kV power lines, *IEE Proc. – A*, Vol 139, No. 6, pp 304-313, November 1992

Autorzy: prof. dr hab. inż. Barbara Florkowska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki - beflor@agh.edu.pl dr inż. Marek Florkowski, ABB Centrum Badawcze, marek.florkowski@pl.abb.com, mgr inż. Mieczysław Ryszard Timler, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, mtimler@agh.edu.pl