

Ryszard CHYBOWSKI¹, Michał BEDNAREK², Janusz RYBIŃSKI²Szkola Główna Służby Pożarniczej, Katedra Rozpoznawania Zagrożeń (1)
Szkola Główna Służby Pożarniczej, Katedra Nauk Ścisłych (2)

Diagnostyka termograficzna w podczerwieni kabla 110 kV

Streszczenie: W referacie przedstawiono propozycję wykorzystania techniki termograficznej do diagnozowania kabli 110 kV. Defekty występujące w izolacji zamodelowano miniaturowymi grzejnikami. Badania termograficzne powierzchni powłoki kabla wykazały możliwość wykrycia defektu we wczesnym etapie rozwoju, uzewnętrznia się on bowiem lokalnym wzrostem temperatury powłoki kabla, co daje się zarejestrować za pomocą kamery termowizyjnej.

Abstract. (Infrared thermographic diagnostics of 110kV cable) The article presents the possibility of use of thermographic techniques in diagnosis of 110 kV voltage cables. Insulation defects were modelled by miniaturized heaters. Thermographic testing of cable surface coat has shown possibility of defect detection in an early phase of development. It can be registered thanks to local temperature rise of cable surface what can in turn be registered by thermal imaging camera.

Słowa kluczowe: termografia, kabel, defekty, modelowanie.

Keywords: thermography, cable, defects, modelling.

Wprowadzenie

Kable wysokonapięciowe są urządzeniami trudnymi w diagnozowaniu ewentualnych wad lub uszkodzeń izolacji. Wynika to z wielu powodów, między innymi ze względnie dużej pojemności kabla. Konwencjonalne próby izolacji linii kablowych przeprowadzane w eksploatacji podane w przepisach [1] są bardzo skromne. W zasadzie dotyczą pomiarów rezystancji izolacji, które są uśrednione, co nie daje możliwości prawidłowej oceny zachowania się jej w przyszłości. Badania pomontażowe [2] są bardziej obszerne, dotyczą badań napięciem probierczym, pomiaru pojemności i sprawdzenia szczelności powłoki kabla. W literaturze [3] można znaleźć metody diagnostyczne kabli oparte na elementach monitoringu i programach eksperckich. Wnioskowanie o stanie izolacji kabla na podstawie badań poszczególnych parametrów izolacji jest często niewiarygodne. Podstawową przyczyną takiego stanu jest zależność parametrów izolacji od temperatury, a temperaturę izolacji kabla można określić tylko w przybliżeniu.

W diagnostyce układów technicznych bardzo ważne są oględziny. Z reguły dotyczą one wizualnego lub słuchowego stwierdzenia jakości pracy urządzenia. W odniesieniu do kabla o izolacji polimerowej można wizualnie stwierdzić puchnięcie izolacji. Ten fakt występuje na skutek defektu izolacji kabla i związanego z tym wydzielania stosunkowo dużej energii cieplnej. Puchnięcie kabla jest końcowym etapem rozwoju defektu. Stwierdzenie tego faktu wymaga natychmiastowej decyzji o wyłączeniu kabla spod napięcia.

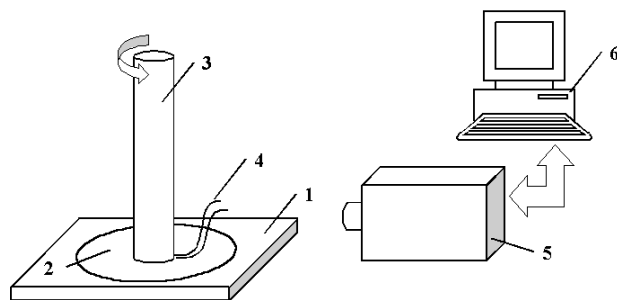
Większość defektów występujących w układach wysokonapięciowych ma charakter uśpiony. Uaktywniają się one na skutek różnych przyczyn, np. przepięć. Czas rozwoju defektu jest zmienny i zawarty w granicach $10^{-6} \div 10^9$ s [4]. W warunkach eksploatacyjnych uważa się [3], że w rozwoju defektu mają udział głównie mechanizmy cieplne i starzeniowe, a jego czas rozwoju jest stosunkowo długi. Energia wydzielona w defekcie izolacji uzależniona jest od kilku czynników, np. rozległości uszkodzenia i stopnia rozwoju. Podawana w literaturze moc wydzielana w defekcie jest zawarta w granicach od 10^{-6} W do 100 W. Dolna granica dotyczy pojedynczych wyładowań niezupełnych i jest nieistotna z punktu widzenia skutków cieplnych dla izolacji kabla. Górna granica jest przyjmowana w przypadku zainicjowania pożaru przez kabel. Stopniowy rozwój defektu uzewnętrznia się

miejscowym podgrzaniem izolacji i powłoki kabla. Jednak w przypadku braku spuchnięcia lub wycieku izolacji wizualne stwierdzenie tego faktu bez dodatkowych urządzeń jest praktycznie niemożliwe.

Idealnym narzędziem do wykrywania anomalii temperaturowych jest kamera termowizyjna. Przegląd techniczny przeprowadzany za pomocą tego urządzenia umożliwia szybkie, dokładne i bezpieczne zlokalizowanie anomalii temperaturowych. Badania termograficzne mogą stać się w przyszłości podstawową metodą identyfikującą defekty w kablach z uwagi na pomiar nie wymagający wyłączenia obciążenia. Obecnie na rynku dostępne są kamery przystosowane do przeprowadzania przeglądów instalacji elektrycznych. Rozwiązania tych kamer oparte są na niechłodzonych detektorach. Wykorzystanie tych detektorów umożliwiło zmniejszenie wymiarów kamer; urządzenia z tymi detektorami mają rozmiary porównywalne z typowymi kamerami wideo. Zastosowanie niechłodzonych detektorów wpłynęło również znacznie na spadek cen kamer termowizyjnych, co skutkuje coraz większą ich dostępnością. Jednocześnie, wraz z upowszechnianiem się technik termowizyjnych, powstają specjalistyczne programy komputerowe, pozwalające na tworzenie baz uzyskanych termogramów oraz odpowiednie ich porównywanie.

Stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe wykorzystane w badaniach termograficznych kabli jest pokazane na rysunku 1.



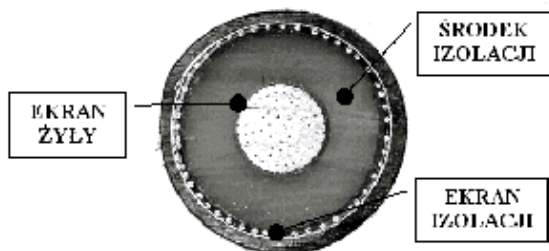
Rys.1. Stanowisko pomiarowe: 1 – blat stolika, 2 – podstawa obrotowa, 3 – kabel, 4 – zaciski grzejnika, 5 – kamera, 6 – komputer

Głównym elementem tego stanowiska jest kamera termowizyjna Radiance HSX firmy Raytheon, rejestrująca promieniowanie podczerwone w zakresie spektralnym 3÷5 μm , współpracująca z modułem termograficznym programu ImageDesk II. Kamerę umieszczono w odległości około 1,5 m od badanego kabła. W jej polu widzenia znajdował się odcinek kabła o długości 30 cm. Badany kabel 110 kV firmy ABB typu N2xS/FL/2Y1x630RM/95 zamocowany był pionowo na podstawie obrotowej, o osi obrotu umieszczonej w osi kabła. Założono występowanie trzech rodzajów defektów w kablu, a mianowicie:

- mikroostrza na ekranie żyły,
- inkluzji gazowej lub wtrąciny przewodzącej w izolacji,
- mikroostrza na ekranie izolacji.

Do zamodelowania wyżej wymienionych defektów wykorzystano miniaturowe grzejniki elektryczne o mocy znamionowej 0,5 W. Grzejniki w postaci walca o długości 5 mm i średnicy 3 mm umieszczono w wywierconym otworze wzdłuż osi kabła. Każdy defekt był modelowany przez jeden grzejnik. Grzejniki były przesunięte wzdłuż promienia kabła (przy żyły, w środku izolacji, przy powłoce), oraz przesunięte względem siebie o kąt 120°. Rozmieszczenie grzejników pokazano na rysunku 2. Spirala grzejna grzejnika po umieszczeniu w otworze była oddalona od płaszczyzny przecięcia kabła o 10 mm.

Podstawa obrotowa wraz z kablem, który był na stałe przytwierdzony do tej podstawy, mogła się obracać, co umożliwiało pomiar temperatury kabła w różnych punktach wzdłuż obwodu bez zmiany kąta widzenia kamery termowizyjnej. W celu ograniczenia wpływu otoczenia na wyniki pomiarów podstawa obrotowa wraz z kablem była osłonięta odpowiednią obudową.



Rys.2. Rozmieszczenie defektów w kablu

Opis wykonywanych badań

Głównym celem diagnostyki jest jak najwcześniejsze wykrycie i zlokalizowanie defektu, dlatego w badaniach założono, że będzie poszukiwany i analizowany obraz termograficzny powierzchni kabła przy względnie małej mocy wydzielanej w defekcie. Każdy defekt był badany trzykrotnie, przy różnych mocach wydzielonych przez grzejnik. Dla defektu w ekranie izolacji wynosiły one: 0,12W, 0,3W i 0,5W, a dla pozostałych defektów: 0,3W, 0,4W i 0,5W. Moc grzejnika była regulowana za pomocą autotransformatora.

Przed przystąpieniem do badań przeprowadzono kalibrację kamery z zachowaniem odpowiedniej procedury. Po włączeniu napięcia na poszczególne grzejniki pomiary były przeprowadzane z opóźnieniem (90÷120 min). Czas ten był potrzebny na ustabilizowanie się temperatury.

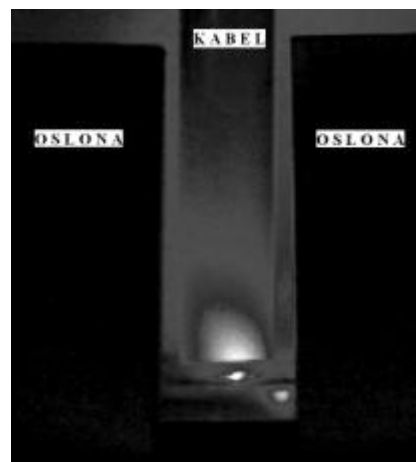
Pomiary polegały na rejestracji obrazów termalnych przy różnych kątach ustawienia kabła w względem kamery. Badania były przeprowadzone przy obrocie kabła co 10° i rejestracji 36 obrazów termalnych. Z pojedynczego obrazu pobierano do analizy linię przechodzącą przez środek powierzchni kabła. Obraz 36 takich linii przedstawia rozkład temperatury na powierzchni kabła przy wystąpieniu danego defektu z założoną mocą.

Analiza wyników badań

Typowy obraz termograficzny uzyskany podczas badań jest przedstawiony na rysunku 3. Należy zaznaczyć, że jest to połowa obrazu, jaki występuje w warunkach rzeczywistych.

Na rysunku 4 podany jest termogram powierzchni kabła, uzyskany na podstawie analizy 36 obrazów termalnych wykonanych przy różnych kątach ustawienia kabła względem do kamery. Z rysunku 4 wynika wyraźnie, że zmiany temperatury w obrazie termalnym przy występowaniu defektu i przy założonych mocach nie obejmują całej powierzchni.

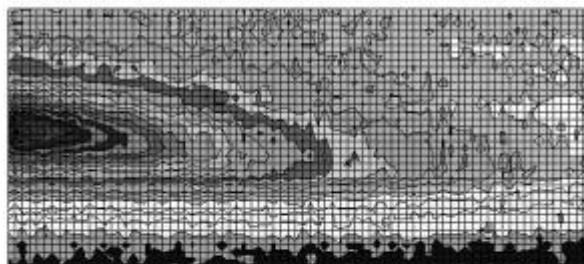
Cechą charakterystyczną obrazów z rysunku 4 jest niesymetryczny rozkład temperatury wokół defektu.



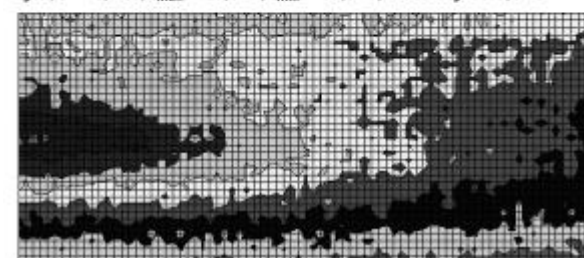
Rys.3. Typowy obraz termograficzny uzyskany podczas badań

Niesymetryczność tych obrazów jest stosunkowo mała w porównaniu z obrazami przedstawionymi w pracy [5]. Badany kabel 110kV ma dodatkową metaliczną warstwę ochronną nałożoną na przewody powrotne, która powoduje mniejszą asymetrię obrazów termalnych.

powłoka; P = 0,5 W; $t_{\text{max}} = 22,0^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{min}} = 19,3^{\circ}\text{C}$; Izotermy co 0,1°C



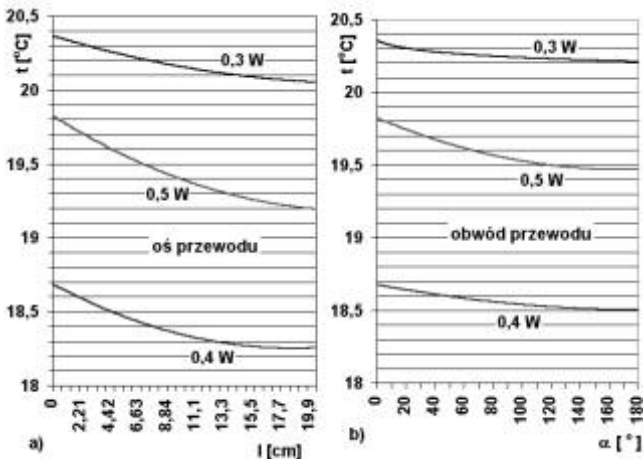
żyła; P = 0,5 W; $t_{\text{max}} = 19,9^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{min}} = 19,0^{\circ}\text{C}$; Izotermy co 0,1°C



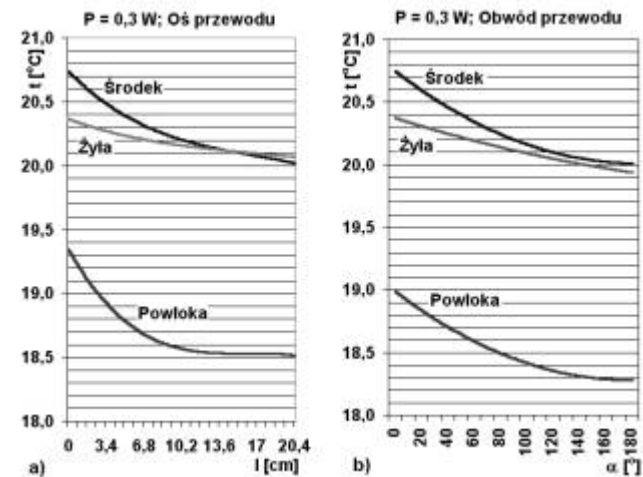
Rys.4. Termogramy powierzchni kabła

Na rysunku 5 przedstawiono rozkład temperatury na powierzchni kabła wzdłuż wybranych linii, przy najbardziej „schowanym” defekcie. Z analizy krzywych rozkładów wynika, że graniczna wartość mocy defektu, który może być wykryty kamerą termowizyjną, wynosi ok. 0,5 W.

Na rysunku 6 przedstawiono rozkład temperatury na powierzchni kabla wzdłuż wybranych linii przy wystąpieniu defektu o identycznych mocach, jednak w różnych miejscach. Z analizy rysunku 6 wynika, że defekt w ekranie izolacji może być wykryty przy mniejszej mocy niż defekt w ekranie żyły. W obrazach termalnych powierzchni kabla w zależności od umiejscowienia defektu występują różne rozkłady temperatury. Defekt bardziej „schowany” daje obraz zmian temperatury obejmujący większą powierzchnię. Defekt w powłoce powoduje większe zmiany temperatury, jednak na mniejszej powierzchni. Na tej podstawie można wnioskować o umiejscowieniu defektu.



Rys.5. Rozkład temperatury na powierzchni kabla przy wystąpieniu defektu w ekranie żyły: a) wzdłuż osi kabla, b) wzdłuż obwodu kabla



Rys.6. Rozkład temperatury na powierzchni kabla przy wystąpieniu defektu o mocy $P = 0,3 \text{ W}$ w różnych miejscach: a) wzdłuż osi kabla, b) wzdłuż obwodu kabla

Podsumowanie

Kamera termowizyjna jest doskonałym narzędziem do diagnozowania defektów w kablach. Oczywiście istnieją uwarunkowania umożliwiające pomiar, przede wszystkim kabel musi być w polu widzenia kamery. Nie bez znaczenia

jest stan powierzchni kabla. Wszelkiego typu zanieczyszczenia powłoki kabla wpływają na pomiar temperatury. W pracy [6] wykazano, że miejscowe braki zanieczyszczeń, powodujące lokalne zmiany współczynnika emisyjności powierzchni, są przyczyną błędnego wyznaczania temperatury za pomocą urządzeń termograficznych. Mogą więc one prowadzić do błędnego zdiagnozowania stanu izolacji kabla.

Badania wykazały, że moc wydzielana w defekcie rzędu dziesiątych części wata pozostawia ślad cieplny na powłoce kabla 110 kV. Mimo stosunkowo małej mocy wydzielonej w defekcie i związanej z tym małej różnicy temperatur na powierzchni powłoki, możliwe jest zlokalizowanie defektu za pomocą kamery inspekcyjnej.

Na obraz termiczny defektu ma wpływ budowa kabla. Kable 110 kV charakteryzują się masywną budową i w związku z tym pomiędzy defektem a powierzchnią powłoki kabla występuje, w porównaniu z kablami o mniejszej grubości poszczególnych warstw, stosunkowo duży opór cieplny. Jest to szczególnie widoczne, gdy porównujemy termogramy powierzchni powłoki kabla 110 kV z termogramami powierzchni kabla średnich napięć, przedstawionymi w pracy [5]. Zakres powierzchni objętej zmianami temperaturowymi przy identycznych mocach wydzielanych w defekcie i przy identycznych defektach jest większy dla kabla 110 kV, jednocześnie zmiany temperaturowe na powierzchni powłoki są mniejsze.

Przy założonych mocach wydzielanych w defektach zmiany termicznych obrazów powierzchni kabla 110 kV mają charakter lokalny. W warunkach rzeczywistych, przy braku dostępu do kabla z różnych stron, defekt może być niezauważony.

LITERATURA

- [1] Zarządzenie Ministra Górnictwa i Energetyki z dnia 17.07.1987r. w sprawie szczegółowych zasad eksploatacji sieci elektroenergetycznych
- [2] PN-E-04700: 1998 Urządzenia i układy elektryczne w obiektach elektroenergetycznych. Wytyczne przeprowadzania pomiarów badań odbiorczych
- [3] Gacek Z., Technika wysokich napięć. Izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce. Wyd. Pol. Śląskiej, 1999
- [4] Wasilenko E. Model degradacji izolacji polimerowej w układach wysokiego napięcia, *Zeszyty Naukowe Pol. Gdańskiej, Elektryka LXVIII*, 1991
- [5] Chybowski R., Bednarek M., Rybiński J., Termograficzna identyfikacja defektów w izolacji elektrycznej kabli, *Materiały Konferencyjne V Krajowej Konferencji „Termografia i Termometria w Podczerwieni”*, Ustroń, 14-16.11.2002
- [6] Chybowski R., Rybiński J., Bednarek M., Badania za pomocą kamery termowizyjnej błędów występujących przy pomiarach temperatury izolowanych przewodów elektrycznych, *Materiały VIII Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia EUI'01*, Zakopane, 18-20 października 2001

Autorzy: dr inż. Ryszard Chybowski, mgr Michał Bednarek, prof. dr hab. Janusz Rybiński, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, ul. Słowackiego 52/54, 00-967 Warszawa, E-mail: mbed@sgsp.edu.pl; j.rybinski@interia.pl