

Marek Garbarski, Maciej Romański
Tyco Electronics Polska Sp. z o.o.
Warszawa

Badania diagnostyczne linii kablowych SN – ograniczenia we wnioskowaniu o ich stanie technicznym

Wdrożenie nieniszczących metod diagnostycznych, prowadzonych przy napięciach innych niż wyprostowane, jest z wszechmiar słuszne. Ograniczenia praktyczne badań napięciem o częstotliwości 50 Hz zmuszają do stosowania narażeń probierczych o innych kształtach (OWTS, VLF). Ich poziomy oraz procedury ich aplikacji są różne od stosowanych przez producentów kabli i osprzętu kablowego w ramach badań typu, wyrobu lub konstruktorskich. Technologia sterowania pola elektrycznego w osprzęcie kablowym może mieć wpływ na rezultaty badań diagnostycznych. Nie można tego ignorować, szczególnie przy pomiarach współczynnika strat dielektrycznych w krótkich odcinkach kabli. Trudnym elementem do diagnostyki są mufy przejściowe pomiędzy kablami o izolacji z tworzyw sztucznych i kablami o izolacji papierowej przesyconej. Mamy tu do czynienia co najmniej z granicą techniczną i historyczną oraz w wielu przypadkach z granicą prawnej odpowiedzialności właścicielskiej. Jedno jest pewne – w każdym pomiarze diagnostycznym badaniu poddawany jest co najmniej kabel i głowice kablówce na jego końcach.

Prawidłowe połączenia układu probierczego, szczególnie w celkach małogabarytowych, jest podstawą eliminacji zakłóceń zewnętrznych (ulot, wyładowania powierzchniowe, wyładowania stykowe ...). Jest to o wiele trudniejsze do wykonania w warunkach innych od laboratoryjnych. Poprawność ta powinna być każdorazowo potwierdzana pomiarem szumów układu lub dodatkową lokalizacją miejsca ich powstawania.

Powyższe zagadnienia wymagają od zespołu diagnostycznego olbrzymiej wiedzy z zakresu techniki pomiarowej wysokich napięć, techniki kablowej i osprzętu kablowego oraz miernictwa elektrycznego. Jej brak może prowadzić do wyciągania fałszywych wniosków z uzyskanych pomiarów. Tym samym dążenie do celu jakim jest podwyższenie niezawodności linii kablowych może zostać utrudnione.

Wstęp

Wszelkie poniższe rozważania dotyczą metod diagnostycznych „off-line” i ograniczają się do nieniszczących prób przy napięciu 0,1 Hz sinus (VLF) i oscylacyjnych (OWTS), najbardziej rozpowszechnionych w Polsce. Z rozważań wykluczona jest również próba napięciowa, gdyż przy prawidłowym doborze jej poziomu w stosunku do napięcia U_0 sieci (faza-ziemia) i czasu trwania wnioski diagnostyczne z badania są jednoznaczne.

Autorzy nie zamierzają również rozstrzygać o przewodze jakiegokolwiek ze stosowanych metod. Przypomina jedynie, że jednym z założeń diagnostyki jest śledzenie parametrów ocenianego obiektu od chwili jego wyprodukowania (i przeprowadzenia badań pełnych) do momentu podjęcia decyzji o wycofaniu z eksploatacji. Najpowszechniej stosowanymi wskaźnikami diagnostycznymi są parametry związane z pomiarem wyładowań niezupełnych (WNZ) i współczynnika strat dielektrycznych w izolacji ($tg\delta$). Najlepiej stosować je jednocześnie podczas tego samego cyklu badań diagnostycznych. Te dwa parametry są pośrednio związane z badaniami produkcyjnymi kabli i/lub osprzętu kablowego. Autorzy zakładają również, że wszelkie układy zasilania napięciem probierczym, układy pomiarowe i obróbki cyfrowej są poprawne i zgodne z wymaganiami. Z założenia tego wyklucza jednak połączenia elektryczne badanego obiektu z układem probierczym.

Ograniczenie – kryteria oceny w aspekcie badań fabrycznych kabli i osprzętu

Aktualne lub wycofane normy obligują producentów do prowadzenia badań WNZ w zakresie częstotliwości od napięcia stałego do 400 Hz. W praktyce Europejskiej (Polskiej),

badanie WNZ i tg δ prowadzone są przy częstotliwości sieciowej – 50 Hz. Napięcie probiercze nie powinno w żadnym przypadku przekraczać wartości znamionowego krótkotrwałego napięcia wytrzymywanego o częstotliwości sieciowej stosowanego dla urządzenia.

Według rozeznania autorów kable o izolacji papierowej przesyconej (kable papierowe) nie były i nie są badane w zakresie WNZ.

W przypadku kabli o ekranowanej izolacji z tworzyw (XLPE, EPR, PE) WNZ sprawdzane są w ramach prób typu i prób wyrobu. Najczęściej stosowanym kryterium jest wartość maksymalna ładunku pozornego 5 pC przy napięciu 2U_o lub napięcie gaśnięcia WNZ co najmniej 2U_o przy amplitudzie WNZ równej 5 pC.

Oczywiście spotykane są wartości napięć gaśnięcia 3U_o i 4U_o. Autorom nie są znane krajowe badania przy napięciu 3U_o i częstotliwości 0,1 Hz sugerowane w normie dla celów diagnostycznych.

Badania WNZ osprzętu do kabli o ekranowanej izolacji z tworzyw prowadzone są tylko w ramach prób pełnych i konstruktorskich przy częstotliwości sieciowej. Napięcia gaśnięcia WNZ to 1,73U_o lub 2U_o. Maksymalny ładunek pozorny – 10 pC. Badanie przeprowadza się przy temperaturze otoczenia i temperaturze dopuszczalnej długotrwałe kabla powiększonej o 5°C.

Główce do kabli papierowych, mufy przelotowe do nich oraz mufy przejściowe nie są standardowo badane w zakresie WNZ. Konstruktorskie badania WNZ w osprzęcie kabli papierowych nie będą dalej omawiane.

Autorzy nie znaleźli dotychczas informacji na temat badań producentów osprzętu kablowego w zakresie tg δ zarówno w przypadku kabli papierowych jak i o izolacji z tworzyw. Nie są one i nigdy nie były wymagane przez jakiegokolwiek normy ze względu na ich małą przydatność.

Współczynnik tg δ jest natomiast ważnym parametrem sprawdzanym w przypadku wszystkich typów kabli o izolacji ekranowanej zarówno w ramach prób typu jak i prób wyrobu. W ramach prób wyrobu sprawdzana jest jego wartość i przyrost wartości od napięcia 0,5U_o do napięcia 2U_o. W przypadku kabli papierowych wymagane wartości różnią się dla izolacji przesyconej syciwem nieściekającym i zwykłym (ściekającym).

W przypadku kabli o izolacji z tworzyw można znaleźć różnice kryteriów zależne od rodzaju materiału. W ramach prób pełnych kabli sprawdzana jest również charakterystyka tg δ w zależności od temperatury.

Otrzymywane przy napięciowych wymuszeniach diagnostycznych amplitudy WNZ powinny być dobrze skorelowane z tymi otrzymywanymi w laboratoriach prowadzących próby typu i próby wyrobu. Oczywiście różnice powinny jedynie wynikać z faktu podstawowej różnicy pomiędzy kablem opuszczającym fabrykę i linią kablową z niego wykonanego oraz wszelkich zachodzących procesów degradujących izolację. Inaczej jest w przypadku tg δ . O ile jego zależność od temperatury można w praktyce pominąć. Teoretyczna, odwrotna proporcjonalność od częstotliwości może w praktyce uniemożliwić ustalenie wiarygodnych kryteriów diagnostycznych. Współpraca z producentami kabli ułożonych/układanych staje się więc sprawą kluczową.

Ograniczenie – różnice w warunkach pomiaru diagnostycznego i laboratoryjnego

Podczas badań laboratoryjnych i fabrycznych kable lub kable z zainstalowanym osprzętem, wszystkie wysokonapięciowe elementy układów pomiarowych i ich połączenia umieszczone są w klatce Faradaya. Dotyczy to również połączeń pomiarowych i uziemiających. Końce kabli o izolacji z tworzyw (podczas badań WNZ w ramach próby wyrobu) umieszczone są w probierczych główkach z wodą dejonizowaną. Wszelkie połączenia elektrycznie przewodzące na zewnątrz klatki zaopatrzone są w filtry selektywne. Możliwość zastąpienia badanego obiektu kondensatorem bez WNZ lub o znanych stratach pozwala nabrać pewności, że mierzone wielkości są związane z obiektem badań po eliminacji szumów i zakłóceń.

Powyższe warunki są trudne lub niemożliwe do spełnienia i w części pozbawione sensu w przypadku prowadzenia badań diagnostycznych.

Ograniczenie – WNZ głowic kablowych w celkach małogabarytowych

Należy pamiętać, że wewnętrzne głowice kablowe mogą mieć długość poniżej 200 mm. Nie wszystkie układy pomiarowe mogą zapewnić taką rozdzielczość „mapowania” wzdłuż trasy linii kablowej. Źródłem WNZ mierzonych i analizowanych w zakresie amplitudy może być w tym przypadku nie tylko obszar głowicy wraz z kablem „przerobionym” do jej montażu lecz również odcinek kabla pod głowicą, część połączeń uziemiających i przewód wysokiego napięcia pomiędzy kondensatorem sprzęgającym i końcówką kablową. Położenie tego przewodu jest zmieniane przed każdym pomiarem podstawowym i po każdej kalibracji generatorem wzorcowym WNZ. W przypadku nowych kabli o izolacji z tworzyw można jedynie założyć, że ich WNZ są na poziomie tych puszczających fabrykę. Pomiar po zarobieniu kabla do montażu głowicy przed jej zainstalowaniem przy wykorzystaniu głowic probierczych (z wodą dejonizowaną) mógłby potwierdzić prawidłowość wykonania kabla, jego transportu, magazynowania i układania. Wykonanie takich pomiarów jest trudne w warunkach polowych i bywa stosowane w szczególnych przypadkach (reklamacje). Podwyższenie wiarygodności diagnozy lokalizacji WNZ w takich sytuacjach wymaga zastosowania lokalizatorów ultradźwiękowych lub optycznych. Inną metodą jest analiza fazowa („mapowanie lokalne”). Wykorzystuje ona różne właściwości WNZ występujących we wtrącinach gazowych otoczonych przez dielektryk jednorodny (zależność napięć zapłonu od biegunowości napięcia), WNZ wywołane wyładowaniami ulotowymi (inny kształt i czas trwania pojedynczego impulsu), powierzchniowymi i kontaktowymi (faza i ilość impulsów). Można nawet spotkać próby zastosowania obróbki statystycznej przy użyciu rozkładu Weibulla, uzależniającej jego współczynnik kształtu od źródła WNZ.

Ograniczenie – czas pomontażowy

Gotowość linii kablowej do diagnostyki zależy od technologii zastosowanego osprzętu. W przypadku osprzętu zawierającego wyłącznie elementy termokurczliwe, termo topliwe i nasuwane pomiary można rozpocząć praktycznie tuż po montażu osprzętu. W przypadku osprzętu z elementami zimnokurczliwymi i taśmami samospajalnymi pomiar można rozpocząć po czasie osiągnięcia spójności tych elementów. Czas ten zależy od temperatury. Podobnie jest z osprzętem, w którym stosuje się żywicę.

Ograniczenie – przyłącza urządzeń o izolacji gazowej (SF₆)

W przypadku głowic konektorowych 250 A (pola transformatorowe) złącze, zwane mostem kablowym, dostarczane jest bardzo często jako prefabrykat. Powinno ono być zbadane przez dostawcę. Według rozeznania autorów badania te ograniczają się do prób napięciowych przy częstotliwości 50 Hz. Badanie takiego złącza w ramach pomiarów diagnostycznych bez odłączania od urządzenia wymaga uzgodnień z jego dostawcą. Odłączenie od urządzenia przed pomiarem wymaga zastosowania znormalizowanych izolatorów probierczych i stwarza odstępstwo od instrukcji montażu producenta głowicy, który generalnie takiego etapu nie przewiduje. W przypadku głowic konektorowych do izolatorów 400 A, 630 A, 800 A i 1250 A (pola liniowe) wykonanie prób diagnostycznych z wykorzystaniem znormalizowanych izolatorów probierczych bez odłączania głowic od urządzenia również wymaga uzgodnień z producentem urządzenia. Odłączenie od urządzenia przed pomiarem wymaga spełnienia podobnych warunków jak w przypadku głowic konektorowych 250 A.

Ograniczenie – tgδ w przypadku kabli papierowych

Stopień zawilgocenia warstwowego układu izolacyjnego (papier izolacyjny + papier przewodzący + syciwo) ma jednoznaczny wpływ na otrzymywane wyniki pomiarów. Dokładna zależność stopnia zawilgocenia izolacji od poziomu WNZ jest nieznana autorom. Ze względu na przewodzenie elektryczne wody może wręcz obniżyć ich poziom. Trudno jest więc zlokalizować obszary zawilgocone. Diagnostą, który może przyczynić się do poprawy sytuacji jest monter kablowy. Zdaniem autorów praktyka sprawdzania poziomu zawilgocenia przez monterów jest w Polsce daleka od ideału. Trudno jest też znaleźć w kraju lokalne wytyczne nakazujące usunięcie odcinków zawilgoconych przed montażem osprzętu.

Innym problemem jest rezystancja ekranu izolacji, która może dodawać się do rezystancji mostka pomiarowego i fałszować otrzymywane wyniki. Od lat 70-tych ubiegłego wieku Polskie Normy akceptowały wykonanie ekranu izolacji w postaci pojedynczego obwoju z małą zakładką. Może to nie wpływać negatywnie na układ izolacyjny kabla w trasie. Ma jednak znaczenie w przypadku muf i głowic. Prądy sterujące, jeśli nie są zbocznikowane przez przewodzące elektrycznie elementy osprzętu doprowadzają do cieplnego przebicia izolacji na skutek zesterzenia ekranu. W tym przypadku można mówić o nieprawidłowym doborze technologii osprzętu wywołującego zjawiska starzeniowe.

Jeżeli mamy do czynienia z mufą kablową (przelotową lub przejściową) to lokalizacja takiego zjawiska jest w praktyce niemożliwa.

Ograniczenie – lokalizacja WNZ wewnątrz mufy

Okład izolacyjny mufy jest zawsze ekranowany „uziemionymi” warstwami metalicznymi. Utrudnia to lub uniemożliwia lokalizację WNZ (metody ultradźwiękowe lub optyczne) nawet w przypadku pełnego dostępu z zewnątrz. Za pomocą „mapowania fazowego” można wykryć pochodzenie WNZ, szczególnie od źle wykonanych połączeń neutralnych. Jednakże lokalizacja strony lub elementu konstrukcyjnego mufy wydaje się w praktyce niemożliwa. Potwierdzą to również wyniki niektórych badań laboratoryjnych, gdy celowo modelowane są uszkodzenia elementów konstrukcyjnych (nacięcia, sztuczne wtrącinę ...).

Jest to istotne zagadnienie prawne i techniczne, szczególnie w przypadku muf przejściowych, gdy właściciel starego (być może o złej jakości) kabla papierowego ocenia poprzez diagnostykę jakość prac montażowych podmiotu zewnętrznego.

Podsumowanie

Prawidłowe wnioski z przeprowadzanych badań diagnostycznych muszą uwzględniać fizykę zjawisk, które podlegają badaniom. Wielokrotnie powtarzane badania tych samych obiektów w prawidłowych i powtarzalnych układach pomiarowych wzbogacą wiedzę diagnostów o znajomość takich zagadnień jak brak pełnej korelacji pomiędzy WNZ i stopniem drzewienia elektrycznego, zależność WNZ od stopnia przesylenia izolacji papierowej, prawidłowość doboru osprzętu kablowego Uzyskanie tej wiedzy będzie o wiele trudniejsze bez dysponowania wyspecjalizowanym laboratorium badawczym, dysponującym aparaturą umożliwiającą wykonywanie badań wybiegających poza normy stosowane przez producentów urządzeń, z których zbudowana jest linia kablowa.