

Kable i linie kablowe WN . Doradztwo , projektowanie , badania, obliczenia, ekspertyzy.
Technika wysokich napięć: konsultacje , ekspertyzy, pomiary , badania.

Dr inż. Adam Rynkowski

Gdańsk 80-277, Aleja Wojska Polskiego 16/4 , tel.604196887,

adamrynkowski.bmc@gmail.com

„Eksploatacja elektroenergetycznych linii kablowych na tle awarii z uwzględnieniem przyczyn tych awarii” , KPIIB-SEP, Bydgoszcz 2019

Materiały szkoleniowe;

USZKODZENIE I PRÓBA OCENY PRZYCZYŃ ORAZ MOŻLIWOŚCI WYSTĄPIENIA PRZEBIĆ W LINII KABLOWEJ 110 kV

Adam Rynkowski

1. Wprowadzenie

Kable elektroenergetyczne wysokiego napięcia o izolacji XLPE są eksploatowane z powodzeniem od ponad 30 lat. Zainstalowanie w 2000 roku linii kablowej na napięcie znamionowe 500 kV [1] potwierdziło osiągnięcie wysokiego poziomu technicznego w zakresie badań, projektowania, technologii produkcji i eksploatacji kabli wysokich napięć.

Podstawą tych osiągnięć były badania wytrzymałości elektrycznej kabli prowadzone i analizowane w oparciu o prawo rozkładu zmiennej losowej wg Weibulla [15]. Analiza wyników badań w tym rozkładzie pozwala na powiązanie między statystycznym rozkładem prawdopodobieństwa przebicia a równaniem tzw. krzywej życia. Zależność ta pozwala również na określenie przewidywanej liczby uszkodzeń w zależności od rodzaju wad i czasu do przebicia.

Ogólnie można stwierdzić , że wytrzymałość elektryczna układu izolacyjnego jest warunkowana obecnością wad . Przebicie linii kablowej podczas eksploatacji może być więc rozpatrywane z punktu widzenia obecności wady statystycznie możliwej do wystąpienia lub wywołanej przyczynami instalacyjnymi czy eksploatacyjnymi (w tym losowymi).

Wady mogą mieć różny charakter . Mogą to być wady geometryczne (projektowe), wady technologiczne, wady materiałowe, strukturalne czy też mechaniczne lub starzeniowe. Mogą one powstać na każdym etapie produkcji, instalacji lub eksploatacji i zagrażać przedwczesnym przebicciem linii kablowej. Efektem przebicia w liniach jest przepływ dużego prądu zwarciovego, który z reguły niszczy miejsce inicjacji procesów rozwoju wyładowania w izolacji stałej i ustalenie przyczyn jest bardzo utrudnione, chociaż bardzo ważne.

Wyznaczenie rodzaju wady i/lub wyjaśnienie przyczyn przebić kabli eksploatacji jest ostatnim etapem weryfikacji osiągniętego poziomu technicznego w zakresie budowy, technologii produkcji i eksploatacji linii kablowych.

Celem niniejszego szkolenia jest wskazanie kilku przykładów przebić z jednoczesną próbą wyjaśnienia przyczyn uszkodzenia linii kablowych 110 kV występujących sporadycznie w Polsce.

2. Przedmiot i metodyka analizy przyczyn uszkodzenia linii kablowej

Przedmiotem szkolenia jest próba wyjaśnienia przyczyn uszkodzenia linii kablowej na podstawie oględzin oraz oceny budowy i technologii wykonania zarówno kabla jak i linii kablowej.

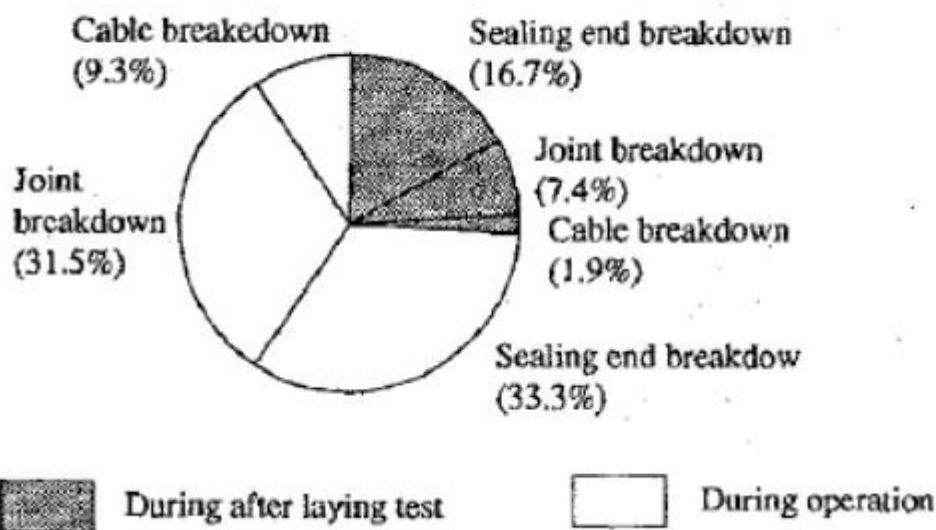
Analiza i próba wyjaśnienia przyczyn uszkodzenia kabla lub składa się zasadniczo z dwóch etapów.

Pierwszy etap polega na oględzinach i badaniach cech fizycznych próbki kabla obejmującej miejsce przebicia kabla oraz próbki referencyjnej pobranej z innego miejsca kabla. Metoda polega na porównaniu cech próbek między sobą oraz z wymaganiami wyszczególnionymi w normie, wg której kabel został wyprodukowany.

Oględziny prowadzi się na poszczególnych elementach budowy kabla starając się znaleźć ślady, które mogłyby świadczyć o zmianach spowodowanych mechaniczną ingerencją różnych czynników w obrębie przekroju kabla lub zauważyć efekty starzeniowe uwidaczniające się na lub w elementach konstrukcyjnych kabla. Niektóre elementy można poddać dodatkowym badaniom dla stwierdzenia obecności zmian wewnątrz izolacji poszukując np. kierunku rozwoju kanału drzewienia elektrycznego czy wodnego. Wprowadzenie kolejnych badań fizyko-chemicznych (np. TGA) powinno wynikać z konieczności poparcia tezy o możliwych zjawiskach starzeniowych.

Drugi etap obejmuje wieloaspektową analizę warunków, które mogłyby doprowadzić do powstania ewentualnie wykrytej lub nie wykrytej wady oraz warunków, które mogłyby zapoczątkować proces rozwoju przebicia.

W etapie tym możemy wyróżnić część pierwszą dotyczącą analizy ponad normatywnych narażeń jakie mogłyby wystąpić w czasie instalowania i podczas eksploatacji linii kablowej, ze wskazaniem ewentualnych ich skutków na wytrzymałość elektryczną kabla, który uległ uszkodzeniu. Druga część stanowi analizę prowadzoną w odniesieniu do wytrzymałości elektrycznej kabli i linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia ($U_n \geq 60$ kV) o izolacji XLPE produkowanych i wdrażanych do eksploatacji w świecie od 1980 roku.



Rys. 1 Rozkład udziałów kabli, muf i głowic w statystyce liczby uszkodzeń w odniesieniu do uszkodzeń podczas prób odbiorczych i podczas eksploatacji.

Statystyki uszkodzalności linii kablowych na świecie wskazują jednoznacznie na problemy związane z wytrzymałością elektryczną muf i głowic. Powyżej wskazano jeden z typowych procentowych podziałów liczby uszkodzeń w odniesieniu do uszkodzeń podczas prób odbiorczych i podczas eksploatacji. Celem tej analizy jest próba sklasyfikowania uszkodzenia linii kablowej w SE A, a więc uzyskania odpowiedzi na pytanie czy jest ono efektem ujętym w statystykach uszkodzalności kabli czy też może być efektem istnienia ewidentnej wady lub zdarzenia losowego.

Podstawą takiej analizy może być kilka założeń:

1. Obecnie produkowane na świecie kable wysokiego napięcia o izolacji XLPE osiągnęły bardzo wysoki poziom rozwoju i znalazły szerokie zastosowanie do budowy linii kablowych o napięciu znamionowym do 500 kV włącznie.
2. Podstawą tych osiągnięć są badania wytrzymałości elektrycznej kabli prowadzone i analizowane w oparciu o statystyki z rozkładu Weibulla.
3. Parametry eksploatacyjne linii kablowych XLPE ($U_n > 60$ kV, 19000 km) charakteryzują się bardzo małą liczbą uszkodzeń t.j. ok. 0,027 uszkodzeń na 100 km linii na rok i mogą świadczyć o właściwym procesie projektowym, produkcyjnym, kontrolnym oraz eksploatacyjnym kabli produkowanych w różnych fabrykach na świecie.
4. Istniejące lub powstałe wady w układzie izolacyjnym kabli i ponadnormatywne warunki eksploatacji mogą prowadzić do znacznego

skrócenia czasu życia linii kablowych. Nie wszystkie wady mogą być wyeliminowane podczas prób napięciowych wyprodukowanych kabli (w badaniach rutynowych).

5. *Parametry projektowe kabli i krzywych życia linii kablowych wyrażone są liczbami na przyjętym poziomie prawdopodobieństwa nie przebicia. Istnieje statystyczne prawdopodobieństwo przebicia na niższym poziomie parametrów .*
6. *Statystycznie przewidywane liczby uszkodzeń w funkcji czasu są zgodne z danymi charakterystycznymi dla linii kablowych w świecie. (Początkowy okres eksploatacji charakteryzuje się wzmożoną liczbą uszkodzeń tzw. błędów dzieciństwa).*

2.1 Program analizy i postępowania.

Typowy podział zagadnień do analizy i przedstawienia w protokole badań przyczyn uszkodzenia może wyglądać jak poniżej;

1. *Wprowadzenie*
2. *Linia kablowa 110 kV*
 - 2.1 *Trasa i ułożenie linii*
 - 2.2 *Uziemienie linii i posadowienie głowic*
 - 2.3 *Obciążalność prądowa dopuszczalna i obciążenie linii*
 - 2.4 *Linia kablowa w schemacie elektrycznym sieci lub stacji*
3. *Uszkodzenie linii kablowej , przebicie kabla*
4. *Przedmiot i metodyka analizy przyczyn uszkodzenia linii kablowej*
5. *Kabel, linia kablowa , zagrożenia ponadnormatywne*
 - 5.1 *Oględziny*
 - 5.2 *Linia kablowa*
 - 5.2.1 *Obciążenie prądowe*
 - 5.2.2 *Narażenia napięciowe*
 - 5.2.2.1 *Symulacja przebiegów napięciowych*
 - 5.3 *Inne zagrożenia instalacyjne*
6. *Wytrzymałość elektryczna kabli i linii kablowych*
 - 6.1 *Wytrzymałość krótkotrwała i krzywa życia nowoczesnych kabli WN XLPE*
 - 6.2 *Uszkodzalność linii kablowych WN XLPE*
 - 6.3 *Badania rutynowe kabli WN XLPE*
 - 6.4 *Wady w kablach o izolacji wytłaczanej*
 - 6.5 *Efekty statystyczne*
7. *Podsumowanie*
8. *Literatura*
9. *Załączniki*

Na tym szkoleniu ograniczymy się do kilku przykładów z opisem w skróconej formie.

3. Linia kablowa 110 kV , przebicie kabla

3.1 Krótka charakterystyka , trasa i ułożenie linii kablowej

Linia kablowa 110 kV jest zainstalowana w stacji elektroenergetycznej 220/110 kV w miejscowości M. Linia jest zasilana z autotransformatora nr 2 o mocy 160 MVA. Średnie obciążenie w okresie dotychczasowej eksploatacji utrzymywało się na poziomie 60 MW , ok. 330 A. Długość linii ok.140 m.

Do budowy linii wykorzystano jednożyłowe kable elektroenergetyczne typu XRUHKXS 1x1000/153 mm² RMC , 64/100 kV. Kable zostały zakończone głowicami. Linia kablowa jest ułożona w ziemi lub w powietrzu na konstrukcjach, na których posadowione są głowice. Kable w rowach i kanałach kablowych ułożone są w układzie płaskim. Odległość między osiami kabli wynosi nominalnie 300 mm. Linia kablowa do czasu awarii była eksploatowana w układzie obustronnego uziemienia żył powrotnych. Poszczególne fazy linii kablowej oznakowane są jako L1 , L2 i L3. Teren wokół trasy linii mało zabudowany, otwarty , silnie nasłoneczniony w miesiącach letnich. W okresie stycznia i lutego pokryty grubą warstwą śniegu. Temperatura otoczenia w okresie stycznia ok. 2-5⁰C.

3.2 Uziemienie linii i posadowienie głowic

Linia kablowa 110 kV do czasu uszkodzenia pracowała jako linia uziemiona dwustronnie typu P2 (układ płaski (P), dwustronne uziemienie żył powrotnych (P2)). Żyły powrotne kabli w polach przyłączenia A i E połączone są z uziemioną konstrukcją wsporczą. Na konstrukcjach wsporczych posadowione są głowice kablowe. Okucia dolne (podstawy) głowic kablowych ustawione są na izolatorach wsporczych.

3.3 Obciążalność prądowa i obciążenie linii

Na podstawie otrzymanych danych przedstawionych w charakterystyce linii i przyjmując kilka, wynikających z praktyki budowy linii kablowych, założeń oraz znane wymiary rowów, kanałów kablowych oraz wypełnień , wykonano obliczenia obciążalności prądowej linii kablowej . W wyniku obliczeń ustalono , że w przyjętych warunkach ułożenia kabli (układ płaski, s=300 mm) i dwustronne uziemienie żył powrotnych linii, obciążalność prądowa dopuszczalna długotrwale linii kablowej 110 kV wynosi 679 A [2]. Dotychczasowe obciążenie linii utrzymywało się na poziomie 330-360 A, a w

styczniu 400-440 A. Przed samą awarią największe obciążenie linii kablowej wynosiło 83 MW.

3.4 Linia kablowa w schemacie elektrycznym stacji.

Linia kablowa 110 kV w stacji jest elementem połączenia rozdzielni 220 kV z rozdzielnią 110 kV. Linia kablowa z każdej strony jest chroniona przed przepięciami za pomocą ograniczników przepięć typu PEXLIM Q096-XH123. Linia kablowa w stanie normalnym zasilala 4-6 linii napowietrznych o długości ok. 14-19 km każda.

W liniach napowietrznych połączonych z linią kablową 12-krotnie wystąpiły przepięcia wywołane wyładowaniami atmosferycznymi. W tym samym okresie eksploatacji (ok. 5 lat) nie zanotowano ani jednego przypadku zadziałania ograniczników przepięć chroniących każdą fazę linii kablowej zarówno od strony pola A jak i pola E.

4. Uszkodzenie linii kablowej , przebicie kabla

Po 5 latach pracy linia kablowa została uszkodzona i wyłączona z eksploatacji. Wyłączenie nastąpiło na skutek zwarcia w fazie L1. Trwałe uszkodzenie linii kablowej nastąpiło podczas normalnej eksploatacji ok. godz. 13 i nie było uprzednio sygnalizowane żadnymi zjawiskami ani zakłóceniami.

Uszkodzenie wystąpiło w fazie L1, w polu E rozdzielni 110 kV, na części odcinka kabla prowadzonej w powietrzu i znajdującej między głowicą a 1-ym uchwytem mocującym kabel do konstrukcji wsporczej .

Opis warunków wystąpienia zakłócenia przedstawiono w protokole badania zakłócenia.

W wyniku wstępnych oględzin stwierdzono , że przebicie kabla wystąpiło na pionowym odcinku kabla ,w odległości ok. 60 cm poniżej podstawy głowicy a ok. 20 cm powyżej uchwyty mocującego kabel do konstrukcji wsporczej .

Efektom przebicia i palącego się łuku, do czasu wyłączenia zwarcia, jest zniszczenie kabla na długości 16 cm uwidocznione wyrwaniem części powłoki, rozerwaniem drutów żyły powrotnej, wypaleniem w izolacji krateru o średnicy ok. 18 mm i śladami zniszczenia żyły roboczej kabla (rys.1). Widoczne są ślady zniszczenia konstrukcji wsporczej i przewodu uziemiającego żyłę powrotną kabla.



Rys. 2 Widok miejsca przebicia kabla

Wykonane oględziny miejsca uszkodzenia kabla nie pozwoliły na określenie przyczyny wystąpienia zwarcia w linii kablowej 110 kV i zawnioskowano o przedsięwzięcie rozszerzonych oraz bardziej szczegółowych oględzin i badań uszkodzonego kabla w laboratorium.

W tym celu postanowiono zabezpieczyć miejsce przebicia a kabel przeciąć w odległości ok. 1.5 m poniżej miejsca uszkodzenia. W dalszej kolejności zdecydowano zdjąć głowicę (wraz z kawałkiem odciętego kabla) z konstrukcji wsporczej i utrzymując ją w pozycji pionowej przewieźć do laboratorium. Taką procedurę przewidziano z uwagi na konieczność bardziej dokładnego sprawdzenia czy nie nastąpił przeciek syciwa izolacyjnego z głowicy do wnętrza kabla, co mogło być też ewentualną przyczyną jego przebicia. Należy zauważyć, że podczas oględzin na miejscu zainstalowania kabla nie stwierdzono śladów obecności syciwa izolacyjnego z głowicy w obrębie uszkodzenia kabla. Zauważono natomiast ślad przesunięcia kabla (powłoki) względem uchwytu o około 10 mm poniżej dolnej krawędzi uchwytu. Przesunięcia w pozostałych fazach linii kablowej były mniej widoczne. Mogło to być spowodowane działaniem sił podczas zwarcia.

4.1 Oględziny kabla

Oględziny próbek kabli prowadzono w odniesieniu do czynników które mogą być brane pod uwagę gdy analizuje się przyczyny elektrycznych przebiegów linii kablowych w eksploatacji. Grupa robocza CIGRE 21.09 wyodrębniła 25 czynników. W obecnym przypadku oględziny zostały skupione na makro fizycznych efektach, które pozwalały również na stwierdzenie czy np. zachodziło cieplne starzenie (zmiana barwy materiału izolacyjnego kabla, odkształcenia powłoki, przebarwienia drutów, ..).

Program oględzin obejmował kolejno odsłanianie elementów budowy kabla począwszy od powłoki. Mierzono parametry geometryczne oraz oceniano stan

powierzchni poszczególnych elementów. Izolację kabla wraz z ekranami (po usunięciu żyły roboczej) pocięto prostopadle do osi żyły na cienkie ok. 200 um warstwy, co umożliwiło ocenę izolacji w świetle przechodzącym pod mikroskopem lub bezpośrednio. Dla oceny izolacji o większej objętości, okorowaną próbkę kabla o długości ok. 12 cm oglądano w oleju silikonowym podgrzany do temperatury ok. 170 °C. Izolacja kabla w tej temperaturze robi się przezroczysta co umożliwia wizualną ocenę izolacji w objętości, a przede wszystkim stan warstwy granicznej między izolacją a zewnętrzną powierzchnią ekranu przewodzącego na żyłę roboczej.

Oględzinom poddano najpierw próbkę referencyjną kabla pobrana z miejsca odległego od miejsca przebicia o ok. 60 cm, a następnie próbkę kabla z widocznym kanałem przebicia. Na stronach poniżej przedstawiono szereg kopii fotografii z badań i oględzin przedmiotowego kabla i dla kilku innych uszkodzeń występujących w innych miejscach i warunkach. Ilościowe wyniki badań i ich porównanie z wymaganiami normy IEC.

4.1.1 Próbką referencyjna

Powierzchnia zewnętrzna powłoki lekko porysowana, ale nie widać śladów nakłuc ani nacięć. Nie ma też śladów świadczących o przegrzaniu powłoki tzn. deformacji spowodowanych podwyższoną temperaturą. Powłoka w przekroju nie zawiera wtrącin gazowych, grubość równomierna, od strony wewnętrznej podklejona folia Al. Na stronie wewnętrznej folii nie widać odcisnięcia drutów żyły powrotnej. Obwód z taśm przewodzących nawinięty równomiernie, zakładka nie odkształcona, brak śladów spuchnięcia i obecności wody, sucho. Druty żyły powrotnej rozłożone dość równomiernie, bez śladów utleniania oraz obecności części taśmy przewodzącej między drutami jako efektu przesunięcia lub obecności wody. Obwód z taśm przewodzących pod drutami z lekkimi śladami odcisnięcia drutów żyły powrotnej. Powierzchnia zewnętrzna ekranu na izolacji gładka, błyszcząca. Grubość ekranu równomierna. Izolacja kabla równomiernie jednobarwna, bez śladów utleniania oraz widocznych wtrącin wewnętrznych. Grubość ekranu na żyłę roboczej w miarę równomierna z widocznymi śladami wpływów w przestrzenie między poszczególnymi drutami żyły roboczej. Żyła robocza okrągła wielodrutowa, dogniatana.

4.1.2 Próbką z kanałem przebicia

Powierzchnia zewnętrzna powłoki nad kanałem przebicia bez wyraźnych śladów zarysowań. Brak nakłuc, lekko odkształcona, widoczne ślady zabrudzeń. Powłoka w tym miejscu „wyrwana” w postaci owalnego płata o wymiarach 16x12 cm. Wyrwany płatek, w dalszej swojej części, jest połączony na długości ok. 3 cm z powłoką kabla. Widoczne miejsce początkowego wypływu strumienia gazów towarzyszących przebiciu. Miejsce to nie pokrywa się z osią kanału przebicia, która znajduje się w odległości ok. 7 cm od osi

kanalu, mniej więcej pod środkową częścią wyrwanego płata . Płat powłoki został wyrwany, a podklejona folia Al stanowiąca przeciwwilgociowa barierę promieniową została zniszczona (brak). Krawędzie płata są równoległe do krawędzi powłoki pozostałej na kablu („ pasują do siebie „) i mogą świadczyć o dużej sile rozrywającej oraz dużej wytrzymałości mechanicznej (sztywności) powłoki z podklejoną folią Al. związanej po części z niską temperaturą otoczenia kabla (ok. 2⁰C) umocowanego w powietrzu. Druty żyły powrotnej nad kanałem przebicia rozsunięte, 6 drutów przerwanych. Po stronie przeciwnej kanału druty lekko odkształcone (miejscowe ugięcia), lekko pofałdowane, dość równomierne. Powierzchnia wewnętrzna folii Al poza obszarem wyrwanego płata i jego krawędzi nie zniszczona, bez śladów uszkodzeń i wyraźnych odcisków drutów żyły powrotnej. Dotyczy to również powierzchni folii po przeciwnej stronie kanału przebicia. Poza obszarem zniszczeń spowodowanych palącym się łukiem, powierzchnia taśmy przewodzącej na drutach żyły powrotnej bez śladów odkształceń. Taśma pod drutami żyły powrotnej równomiernie nawinięta i poza obszarem kanału nie zniszczona. Wyraźne ślady odcisnięcia drutów żyły powrotnej. Rozłożenie w miarę równomierne. Powierzchnia zewnętrzna ekranu przewodzącego na izolacji ogólnie gładka bez wyraźnych odkształceń i zniszczeń (poza obszarem nad i wokół kanału, krateru przebicia) . Ślady lekkich wgłębień . Ekran przewodzący na izolacji odklejony i zniszczony wokół osi kanału przebicia. W pozostałej części, przyklejony o równomiernej grubości. Izolacja w pobliżu kanału przebicia zabrudzona , troszkę przebarwiona zabrudzona , bez śladów starzenia cieplnego i elektrycznego wokół. Kanał przebicia o średnicy ok. 7-12 mm. Na obrzeżach kanału nie widać drzewienia elektrycznego mogącego informować o kierunku jego rozwoju, miejscu zapoczątkowania. Brak jest śladów wtrącin i zanieczyszczeń wewnątrz izolacji widocznych pod mikroskopem w świetle przechodzącym. Oglądanie próbki kabla w rozgrzanym oleju też nie pozwala na stwierdzenie obecności zanieczyszczeń i odkształceń ekranu przewodzącego na żyły roboczej kabla.

Ekran przewodzący (po przeciwnej stronie kanału przebicia) nie odklejony, równomiernie przylegający do izolacji. Wewnętrzna powierzchnia wytłoczonego ekranu przewodzącego na żyły roboczej ze śladami równomiernych wpływów między drutami żyły roboczej. Bez wyraźnych tendencji co do strony względem osi kanału przebicia. Żyła robocza okrągła z drutami równomiernie rozłożonymi. Powierzchnia zewnętrzna żyły dogniatana bez śladów łuskowin i odkształceń.

4.2 Podsumowanie oględzin

Oględziny obu próbek oraz wyniki pomiarów podane w raporcie z badań [wskazują, że analizowane elementy kabla spełniają wymagania normy IEC w

miejscach poza obszarem zniszczenia próbki wywołanej przebicciem i palącym się łukiem.

Nie można ocenić przyczyny przebiccia z uwagi na powstanie kanału przebiccia, krateru o średnicy około 12-18 mm i zniszczenie zarówno izolacji, powierzchni żyły roboczej jak i ekranów na żyły roboczej i na izolacji. Powierzchnia zewnętrzna powłoki bezpośrednio nad kanałem przebiccia też nie wykazuje przekłucia czy nacięcia, które mogłyby sugerować powstanie przyczyny przebiccia. W przekroju kabla nie widać tak ważnych wad jak nieregularności, ostrza wnikające w głąb izolacji, przerwania ekranów czy wtrąciny w objętości izolacji. Drobne wygięcia drutów po stronie przeciwnej do kanału mogą sugerować przegięcie kabla podczas instalacji, ale to za mało na wyrokowanie.

W efekcie można stwierdzić, że przebiccie wyeliminowało pojedynczą wadę i zniszczyło strukturę kabla wokół miejsca tej wady. Kabel w pozostałej części nie wykazuje widocznych wad które mogłyby doprowadzić do przebiccia w stosunkowo krótkim czasie eksploatacji linii kablowej. Należy sprawdzić czy warunki eksploatacji mogły wywołać przedwczesne przebiccie przy założeniu istnienia pojedynczej wady powstałej na etapie od produkcji do instalacji kabla w linii.

5. Narażenia eksploatacyjne linii

Brak jednoznacznego wskazania przyczyny przebiccia na podstawie oględzin kabla w obszarze miejsca przebiccia, oraz w miejscu odniesienia wskazuje na to, że przyczyny należy poszukiwać w odniesieniu do istnienia wady nie wykrywalnej w badaniach rutynowych, po wyprodukowaniu kabla lub powstałej w okresie do czasu oddania linii do eksploatacji. Przyczyny przebiccia można poszukiwać również analizując warunki eksploatacji prowadzące do powstania wady (np. nadmierne obciążenie prądem) lub do przedwczesnego przebiccia wywołanego przepięciami w linii kablowej.

5.1 Obciążenie prądowe

Analiza obciążenia prądowego linii kablowej w okresie eksploatacji t.j. ok. 5 lat wskazuje, że obciążenie nie przekraczało 450 A i zawierało się w granicach 50-83 MW i 16-34 Mvar. W okresie przed samą awarią największe obciążenie wynosiło 83 MW i nie odbiegało znacznie od obciążeń w dniach poprzednich. Temperatura otoczenia w okresie przed awarią wahała się w granicach $-5+5^{\circ}\text{C}$.

Obciążenie prądowe było znacznie mniejsze od obliczonej obciążalności dopuszczalnej długotrwale (1304 A) dla warunków otoczenia odcinka kabla gdzie nastąpiło przebiccie (w powietrzu). Obciążenie linii było też mniejsze od nominalnej obciążalności prądowej linii kablowej tj. od 679 A (lato).

Wobec powyższego nie można przypuszczać, że przyczyną przebicia mogło być nadmierne prądowe obciążenie kabla, a które jak wiadomo, należy do jednych z najbardziej częstych przyczyn przebić kabli w eksploatacji. Takie stwierdzenie potwierdzają też przeprowadzone oględziny kabla poza miejscem przebicia, które nie wykazały wyraźnego odkształcenia powierzchni ekranów przewodzących na żył roboczej i na izolacji. Druty obu żył nie wykazały śladów przegrzania, a polietylenowa powłoka nie była odkształcona pod uchwytami ani w miejscach swobodnego prowadzenia kabla.

5.2 Narazenia napięciowe

Linia kablowa 110 kV w stacji energetycznej pracuje w tzw. układzie hybrydowym („mix”). Linia ta łączy linie napowietrzne ze stacją elektroenergetyczną. Wpięta jest między transformator o dużej impedancji falowej a węzeł czyli rozdzielnię 110 kV, do którego z kolei przyłączonych jest kilka linii napowietrznych.

Uderzenie pioruna w którąkolwiek z linii napowietrznych wywołuje powstanie przepięcia w linii kablowej. Linia kablowa w rozumieniu falowym jest linią krótką, a czas potrzebny do przejścia fali przepięciowej od jej początku do końca jest krótszy od 1 us. Takie usytuowanie linii kablowej oraz jej długość tworzą warunki do powstania odbić wielokrotnych lub przepięć oscylacyjnych po załączeniu linii na biegu jałowym.

Linia kablowa 110 kV została uszkodzona podczas normalnej eksploatacji. W dniu w którym nastąpiło przebicie nie zarejestrowano żadnego zakłócenia w liniach napowietrznych połączonych z tą linią kablową. W całym pięcioletnim okresie eksploatacji zanotowano 12 przypadków pojawienia się przepięć w przyłączonych liniach napowietrznych. Najczęściej występowały one w 2 liniach.

Trzeba zaznaczyć, że pomimo występowania ww przepięć, zainstalowane na wejściu i na wyjściu z linii kablowej 110 kV ograniczniki przepięć typu Pexlim Q096-XH123 ani razu nie zasygnalizowały zadziałania. Można założyć, że generowane przepięcia były mniejsze od poziomów ochrony ograniczników.

5.3 Inne zagrożenia instalacyjne

Instalowanie kabli w trasie linii kablowej jest ważnym elementem w zapewnieniu wysokiej niezawodności linii w eksploatacji.

Kabel w linii kablowej 110 kV został przebit w fazie L1 w odcinku prowadzonym w pionowo i ułożonym w powietrzu na konstrukcji wsporczej w odległości 60 cm od głowicy. Miejsce przebicia znajdowało się pomiędzy końcem kabla wchodzącego do głowicy napowietrznej a pierwszym uchwytem mocującym ten kabel do konstrukcji wsporczej. Ogólnie można stwierdzić, że przebicie nastąpiło w obszarze zakończenia linii kablowej.

Zakres zakończenia linii kablowej jest zawsze miejscem gdzie występuje kilka niekorzystnych czynników mogących mieć wpływ na niezawodność linii kablowej lub prowadzić do przedwczesnego uszkodzenia.

Miejsce to jest narażone na działanie podwyższonego napięcia powstałego w wyniku np. załączania napięcia na biegu jałowym, lub w wyniku pojawiających się przebiegów oscylacyjnych czy nakładających się przepięć o charakterze falowym. Inicjacja mechanizmu przebicia z wad może nastąpić wcześniej aniżeli w pozostałym zakresie długości linii.

Obszar zakończenia kabli jest narażony na działanie naprężeń mechanicznych związanych z rozszerzalnością cieplną materiałów kabla oraz sposobem mocowania kabli po wyprowadzeniu kabli z ułożenia w ziemi do zainstalowania w powietrzu.

Podczas rozwijania kabla zakończenia odcinka są bardziej narażone na przypadkowe uszkodzenia czy działanie sił związanych z mechanicznym lub ręcznym instalowaniem kabli (zgięcia , gwałtowne szarpnięcia lub przegięcia, zarysowania, ciągnięcie,..). Ważnym zagadnieniem jest sposób i miejsce instalacji głowicy na kablu , a także warunki w jakich zakończenie kabla z głowicą zostało posadowione na konstrukcji wsporczej. To ostatnie stwierdzenie było podstawą do wysunięcia wniosku o wystąpieniu wady podczas prac instalacyjnych głowicy na konstrukcji wsporczej.

6.Wniosek

Najprawdopodobniej wada w kablu powstała na skutek mechanicznego uszkodzenia żyły roboczej kabla (pęknięcie lub wysunięcie jednego z drutów ponad jej powierzchnię) podczas gwałtownego zgięcia kabla do promienia mniejszego od dopuszczalnego ($25 \cdot D$). Taka sytuacja może wystąpić, gdy wyprowadzany na konstrukcję wsporczą koniec kabla (z głowicą lub bez), uwolni się przypadkowo i gwałtownie ulegnie przegięciu. Przegięcie może nastąpić na odcinku kabla przed uchwytem mocującym kabel do konstrukcji wsporczej. Efektem takiego zgięcia może być „wyłuskanie” czy przemieszczenie się jednego drutu żyły roboczej w głąb ekranu przewodzącego na żyłę. Uszkodzenie ekranu i warstwy granicznej może być trwałe lub przemijające, ale zawsze skutkuje powstaniem mniej lub bardziej groźnej wady. W przypadku żyły dogniatanej lub kompaktowanej wysunięty drut nie wraca na swoje miejsce i stanowi ewidentną wadę.

Taka sytuacja mogła hipotetycznie mieć miejsce w przypadku omawianej linii kablowej 110 kV. Miejsce przebicia kabla występuje w kierunku równoległym do płaszczyzny mocowania uchwyty, a więc powierzchni żyły gdzie może wystąpić „wyskoczenie” drutu żyły roboczej. Przemieszczenie drutu może nastąpić gdy kabel przegnie się gwałtownie w kierunku „od konstrukcji”, tzn. prostopadłym do powierzchni mocowania uchwyty do konstrukcji.

Na podstawie oględzin nie można było stwierdzić sytuacji „wyskoczenia” drutu żyły roboczej i uszkodzenia ekranu przewodzącego z powodu całkowitego zniszczenia miejsca przebicia podczas zwarcia i sytuacja pozostaje hipotezą.

Oględziny i badania nie pozwoliły na zauważenie skutków innych ewentualnych narażeń związanych z końcowym miejscem zainstalowania i wystąpienia przebicia w kablu.

Na rysunkach poniżej pokazano kilka przypadków omawianych podczas szkolenia i związanych z przebiciem kabli w obszarze zainstalowania głowic . Przypadki przebicić w głowicach były najczęściej występującymi i analizowanymi przez autora.



3. Widok miejsca przebicia kabla



4. Widok miejsca i rozległości uszkodzenia kabla



5. Widok głowicy po przebiciu



6. Widok zewnętrznych skutków uszkodzenia głowicy



7. Widok powierzchni kabla po zdjęciu korpusu głowicy



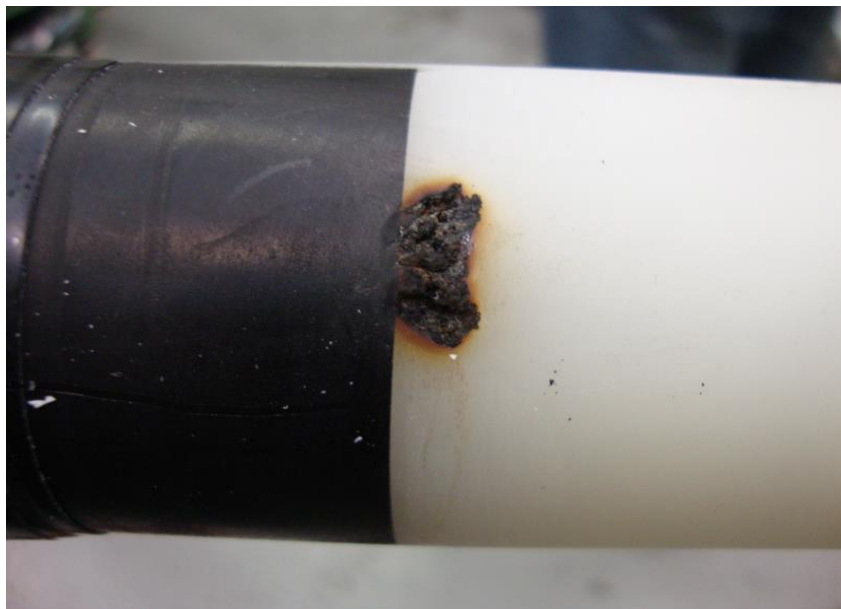
8. Widok miejsca przebicia kabla na wysokości zakończenia stożka sterującego korpusu głowicy



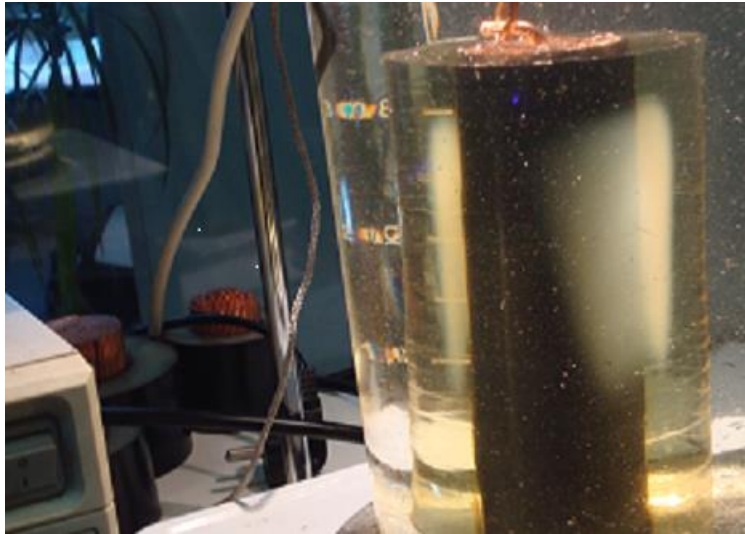
9. Widok powierzchni kabla pod stożkiem sterującym głowicy po przeciwnej stronie miejsca przebicia (rys.6)



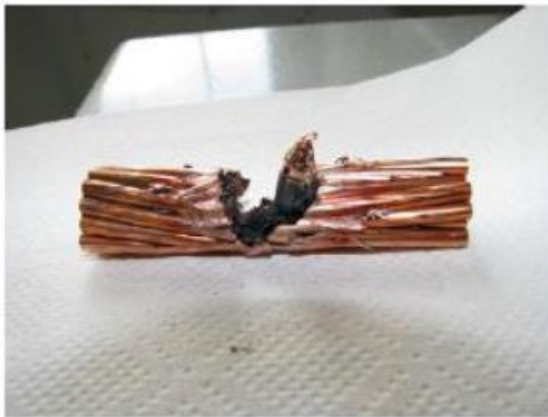
10. Miejsce przebicia kabla na tle korpusu i stożka sterującego głowicy.
Miejsce przebicia usytuowane w zachodzących na siebie krawędzi stożka sterującego i części ekranu przewodzącego kabla.



11. Widok rozwijającej się degradacji na powierzchni kabla pod stożkiem sterującym głowicy na skutek niwłaściwego usytuowania krawędzi stożka i krawędzi ekranu przewodzącego na kablu



12. Widok wycinka kabla podczas podgrzewania w celu uwidocznienia wad w materiałach izolacyjnych



13. Widok uszkodzonej żyły roboczej kabla na skutek przepływu prądu zwarciovego w okolicy wystąpienia przebicia izolacji.



14. Widok uszkodzonych kloszy izolacyjnych głowicy kablowej na skutek palącego się łuku .