

## BADANIA PODSTAWOWE ORAZ DIAGNOSTYKA KABLOWYCH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH SN

### Streszczenie

Artykuł stanowi zestawienie informacji na temat budowy, rodzajów kabli SN stosowanych w elektroenergetyce. Opisano typowe uszkodzenia linii kablowych SN, które są spowodowane różnego rodzaju czynnikami. Poruszono również temat badań: podstawowych i diagnostycznych wykonywanych na liniach kablowych SN.

### WSTĘP

Stabilność dostaw energii elektrycznej jest uzależniona między innymi od stanu linii elektroenergetycznych łączących źródło z odbiorem. Wielokilometry system izolacji zastosowanej w kablach elektroenergetycznych SN stanowi ważne ogniwo w tym systemie. Eksploatacja linii wymaga wiedzy na temat warunków technicznych każdej z poszczególnych części. Ma to przede wszystkim znaczenie w ustalaniu poziomu niezawodności obwodu, głównie lokalizacji defektów związanych z wylądowaniami niezapełnionymi i poziomu zawilgocenia kabla. Wykonywane badania podstawowe oraz diagnostyczne mają właśnie na celu ocenę oraz kwalifikację ryzyka awarii przy dalszej eksploatacji poszczególnych odcinków sieci kablowej.

### 1. CHARAKTERYSTYKA KABLI ELEKTROENERGETYCZNYCH SN

Sposób wykonania izolacji w kablach elektroenergetycznych jest różny i zależy od wielu czynników. Dla uproszczenia poniżej przedstawiono podział kabli elektroenergetycznych ze względu na stosowaną izolację:

- kable PE o izolacji z polietylenu termoplastycznego,
- kable PILC o izolacji papierowej przesyconej syciwem lub olejem, w powłoce ołowianej,
- kable XLPE o izolacji z polietylenu usieciowanego.

Kable PILC o izolacji papierowo-olejowej należą do starszego typu, używanego od dawna w energetyce. Obecnie odchodzi się od ich stosowania ze względu na złożoną technologię układania, większe koszty związane z eksploatacją, starzenie izolacji oraz drzewinie wodne. Wielu inżynierów określa je mianem niezawodnych, ze względu na bardzo dobrą i ciągłą przewodność prądową. Obecnie stosowanymi izolacjami w produkcji kabli wytłaczanych są: polwinil i polietylen (PE, XLPE). Ich konstrukcja nie jest zmieniona od lat, gdyż polwinil wykorzystany do produkcji tych kabli jest materiałem wystarczającym do zagwarantowania wymaganych właściwości eksploatacyjnych i montażowych.

#### 1.1. Przykłady kabli elektroenergetycznych SN

Poniżej przedstawiono przykładowe typy kabli elektroenergetycznych stosowanych w liniach SN.

A. Kabel elektroenergetyczny jednożyłowy z żyłą roboczą aluminiową, o izolacji z polietylenu sieciowanego (XLPE) z żyłą powrotną miedzianą koncentryczną uszczelnioną wzdłużnie i promieniowo, z powłoką z polietylenu (PE) na napięcie znamionowe  $U_0/U = 12/20$  kV, typu XRUHAKXS o przekrojach określonych w tabeli 1.

Tab. 1. Przekrój znamionowy żył kabla XRUHAKXS [8]

| Lp. | Przekrój znamionowy żyły (mm <sup>2</sup> ) |           |
|-----|---|-----------|
|     | roboczej                                    | powrotnej |
| 1   | 70  | 25        |
| 2   | 120   | 50        |
| 3   | 240   | 50        |

B. Kabel elektroenergetyczny jednożyłowy z żyłą roboczą aluminiową, o izolacji z polietylenu sieciowanego (XLPE) z żyłą powrotną miedzianą koncentryczną uszczelnioną wzdłużnie i promieniowo, z powłoką z polietylenu nierozprzestrzeniającego płomienia, na napięcie znamionowe  $U_0/U = 12/20$  kV, typu XnRUHAKXS o przekrojach określonych w tabeli 2.

Tab. 2. Przekrój znamionowy żył kabla XnRUHAKXS [8]

| Lp. | Przekrój znamionowy żyły (mm <sup>2</sup> ) |           |
|-----|---|-----------|
|     | roboczej                                    | powrotnej |
| 1   | 70  | 25        |
| 2   | 120   | 50        |
| 3   | 240   | 50        |

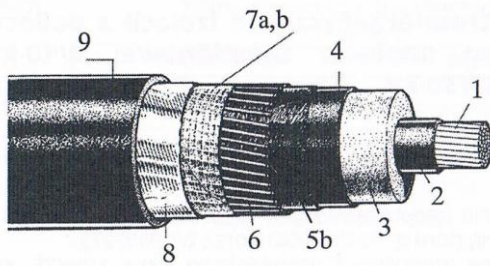
C. Kabel elektroenergetyczny jednożyłowy z żyłą roboczą miedzianą, o izolacji z polietylenu sieciowanego (XLPE) z żyłą powrotną miedzianą koncentryczną uszczelnioną wzdłużnie i promieniowo, z powłoką z polietylenu nierozprzestrzeniającego płomienia, na napięcie znamionowe  $U_0/U = 12/20$  kV, typu XnRUHKXS o przekrojach określonych w tabeli 3.

Tab. 3. Przekrój znamionowy żył kabla XnRUHKXS [8]

| Lp. | Przekrój znamionowy żyły (mm <sup>2</sup> ) |           |
|-----|---|-----------|
|     | roboczej                                    | powrotnej |
| 1   | 240   | 50        |
| 2   | 300   | 50        |

#### Charakterystyka kabla XRUHAKXS

Kable elektroenergetyczne typu XRUHAKXS wykorzystuje się do przesyłu energii elektrycznej w liniach o napięciu znamionowym nie przekraczającym  $U_0/U (U_m) = 3,6/6 (7,2)$  kV;  $6/10 (12)$  kV;  $8,7/15 (17,5)$  kV;  $12/20 (24)$  kV;  $18/30 (36)$  kV.



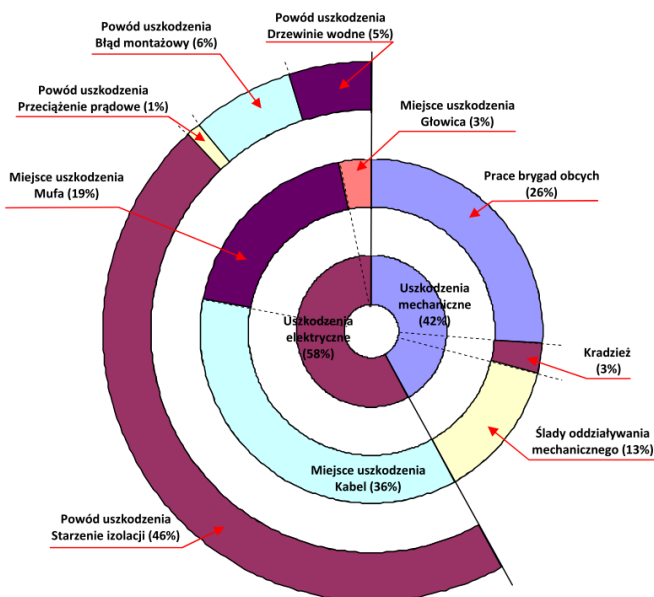
**Rys.1.** Kabel elektroenergetyczny typu XRUHAKXS jednożyłowy na napięcie znamionowe 12/20 kV:

1 – żyła robocza okrągła, wielodrutowa, dogniatana – aluminiowa, 2 – ekran półprzewodzący wytłaczany z polietylenu półprzewodzącego, 3 – izolacja wytłaczana z usieciowanego polietylenu izolacyjnego XLPE, 4 – ekran izolacji wytłaczany z polietylenu półprzewodzącego, 5 – obój z taśmy półprzewodzącej: (a. bez bariery przeciwwilgociowej, b. z barierą przeciwwilgociową), 6 – żyła powrotna z drutów miedzianych i miedzianej taśmy przeciw skrętnej, 7 – obwód na żyłę powrotną: (a. z taśmy izolacyjnej z barierą przeciwwodną, b. z taśmy półprzewodzącej z barierą przeciwwodną), 8 – taśma aluminiowa z kopolimerem ułożona wzdłużnie, 9 – powłoka zewnętrzna wykonana z polwinitu lub polietylenu: (Y - polwinitowa, X - z polietylenu termoplastycznego, Xn - z polietylenu termoplastycznego nierozprzestrzeniająca płomienia) [3].

Objaśnienie symboliki literowej kabla XRUHAKXS: Kabel (K) elektroenergetyczny z żyłą aluminiową (A), o polu promieniowym (H), o izolacji z polietylenu usieciowanego (XS) uszczelniony wzdłużnie (U) i promieniowo (R) i powłoce z polietylenu termoplastycznego (X) [6].

## 2. USZKODZENIA KABLOWYCH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH SN

Według [4] uszkodzenia kabli są to zakłócenia bądź utrudnienia w przenoszeniu sygnałów energii elektrycznej i mają przyczynę w miejscu ograniczonej niejednorodności zakłócanego odcinka kabla. Poniżej przedstawiono przyczyny uszkodzeń linii elektroenergetycznych SN. Dane procentowe zaczerpnięto z [1].



**Rys.2.** Uszkodzenia kablowych linii elektroenergetycznych SN



**Rys.3.** Uszkodzenia kablowych linii elektroenergetycznych spowodowane innymi pracami montażowymi [1]



**Rys.4.** Uszkodzenie kilku linii kablowych 15 kV spowodowane zwarciem [4]

## 3. BADANIA KABLOWYCH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH SN

Badania kablowych linii elektroenergetycznych SN dzielimy na dwa rodzaje:

- **Badania podstawowe** – wykonywane są przez wykonawcę robót kablowych (jako element całego zlecenia dotyczącego budowy nowej, przebudowy lub remontu istniejącej linii kablowej SN).
- **Badania diagnostyczne** – mają za zadanie dostarczyć informacji pozwalających zdiagnozować stan techniczny izolacji kabli i osprzętu kablowego, a tym samym stworzyć efektywny system działań prewencyjnych ograniczając prawdopodobieństwo wystąpienia awarii oraz planowania modernizacji kabli, które wpłyną na poprawę wskaźników niezawodności SAIDI, SAIFI oraz na ograniczenie kosztów eksploatacji i nakładów inwestycyjnych. Badania diagnostyczne należy wykonywać dla

wszystkich nowo wybudowanych, przebudowanych i naprawionych po awarii linii kablowych [5].

## 3.1. Badania podstawowe

### Pomiar rezystancji izolacji

Przed pomiarem kabel wraz z osprzętem należy każdorazowo rozładować i pozostawić uziemiony do czasu pomiaru (na czas > 1 min.). Pomiar rezystancji izolacji należy wykonać dla każdej żyły kabla względem ekranu i żyły powrotnej. Pomiary należy wykonać za pomocą miernika rezystancji izolacji o napięciu 2,5 kV. Zmierzona wartość rezystancji w stanie ustalonym w linii o długości 1 km nie powinna być mniejsza niż :

- 100 MΩ dla kabla o izolacji polietylenowej (XLPE, PE),
- 50 MΩ dla kabla o izolacji papierowej nasyconej syciwem (PILC)

Przy innych długościach kabla zmierzoną rezystancję izolacji  $R_{zm}$  należy przeliczyć na 1 km długości kabla  $R_{1km}$  według [5] poniższego wzoru:

$$R_{1km} = R_{zm} \cdot l, \quad (1)$$

gdzie:

$l$  – długość kabla w km.

### Sprawdzenie zgodności faz

W związku faktem, że sprawdzenie zgodności faz następuje po załączeniu napięcia, realizacja tego zadania jest możliwa dopiero po dokonaniu odbioru.

Na etapie przygotowywania przez wykonawcę obiektu do odbioru należy wykonać uzgodnienie faz w stanie beznapięciowym (przy wstawianiu odcinków kabli w istniejące kable) lub (w pozostałych przypadkach) należy dokonać weryfikacji kolejności faz [5].

### Pomiar rezystancji żył głównych i powrotnych

Celem pomiaru jest sprawdzenie poprawności wykonania połączeń żył. Pomiar wykonuje się dla linii nowych i po wykonaniu naprawy. Pomiar rezystancji żył roboczych przeprowadzać należy metodą mostkową lub techniczną, używając do pomiaru źródła prądu stałego o napięciu nie wyższym niż 24 V [5].

### Próba napięciowa izolacji głównej (wykonywane napięciem stałym lub VLF 0,1 Hz),

Wartość napięcia, jego przebieg i częstotliwość oraz czas przyłożenia mają istotny wpływ na wytrzymałość elektryczną całego układu izolacyjnego linii. Wybór układu probierczego i procedury próby napięciowej ma zasadnicze znaczenie dla oceny jakości linii kablowej.

Wśród aktualnie dostępnych układów probierczych można wyróżnić układy:

- napięcia sinusoidalnego o częstotliwości sieciowej lub do niej zbliżonej (AC 20-300 Hz),
- napięcia stałego (wyprostowanego) (DC),
- napięcia sinusoidalnego o bardzo niskiej częstotliwości (AC VLF 0,1 Hz),
- napięcia cosinusoidalno-prostokątnego o bardzo niskiej częstotliwości (CP VLF 0,1 Hz),
- napięcia oscylacyjnego tłumionego DAC [5].

## 3.2. Badania diagnostyczne

### Próba napięciowa powłoki zewnętrznej kabli z tworzyw sztucznych

Należy wykonać napięciem stałym (DC) o wartości 5 kV w czasie 1 minuty od momentu ustabilizowania się napięcia. Nie normali-

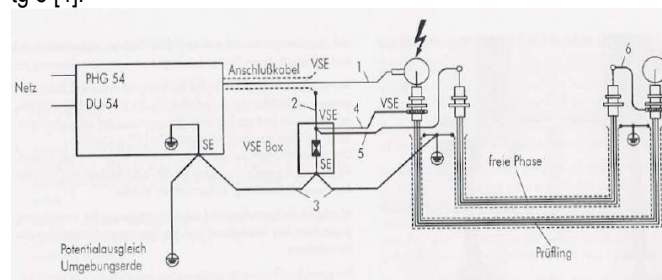
zuje się i nie wykonuje pomiaru prądu upływu. Podczas trwania próby nie może wystąpić zwarcie pomiędzy żyłą powrotną, a ziemią. W przypadku wykrycia uszkodzenia powłoki uszkodzenie powinno zostać naprawione lub wymieniony odcinek wadliwego kabla. Po wykonaniu naprawy należy powtórzyć badania powłoki zewnętrznej [5].

### Pomiar tg δ linii kablowej

Pomiar tg δ należy wykonać po ułożeniu wszystkich odcinków kabla i zakończeniu montażu elementów osprzętu (mufy i głowice). Wynik tg δ przedstawia ogólną ocenę całej relacji linii kablowej mówiącą o stopniu zawilgocenia i stanie zaawansowania procesu starzeniowego izolacji [4].

Biorąc pod uwagę fakt, że wartość tego współczynnika rośnie wraz z postępującymi procesami starzenia izolacji, pomiar tg δ powinno się traktować jako narzędzie diagnostyczne i/lub pomiar uzupełniający. Wartość tg δ jest silnie uzależniona od struktury i jakości złącza kablowego a sam pomiar posiada wartość diagnostyczną tylko wtedy, gdy kolejne pomiary wykonywane są w niemal identycznych warunkach.

Pomiar tg δ odbywa się poprzez pomiar przesunięcia krzywej napięcia w stosunku do krzywej prądu. Mierzone wartości to napięcie (V) i prąd (A). Zmierzone wartości w postaci 40 000 punktów pomiarowych dla jednego okresu 0,1 Hz, są przetwarzane i po zastosowaniu transformacji Fouriera otrzymujemy wynik w postaci tg δ [4].



**Rys.5.** Schemat połączeń urządzeń i badanej linii podczas pomiaru tg δ przy 0,1 Hz [1]:

- 1 – Przewód przyłączeniowy WN;
- 2 – Przewód łączący ekran z VSE-BOX;
- 3 – Przewód uziemiający wyrównujący potencjały;
- 4 – Przewód zbierający prądy powierzchniowe z głowicy;
- 5 – Przewód przekazujący prądy powierzchniowe z drugiego końca badanej linii;
- 6 – Przewód zbierający prądy powierzchniowe z głowicy;
- 7 – Kule rozkładające pole elektryczne ograniczające zjawisko ulotu.

### Pomiar wyładowań niepełnych na długości linii kablowej

Pomiar poziomu wyładowań niepełnych wykonuje się po ułożeniu wszystkich odcinków kabla i zakończeniu montażu elementów osprzętu (mufy i głowice). Pomiar poziomu i miejsc występowania wyładowań niepełnych umożliwia wskazanie miejsc o osłabionych parametrach izolacji w relacji linii kablowej SN [5]. Aby wykonać pomiar należy spowodować zapłon wyładowań niepełnych w izolacji kabla lub izolacji złącza poprzez przyłożenie określonego napięcia probierczego.



**Rys.6.** Aparatura do badań diagnostycznych firmy Baur [7]

Pomiar wyładowań niepełnych odbywa się w specjalnych wozach pomiarowych, którego wnętrzu przedstawiono powyżej na rys.6. Ich działanie oparte jest na współpracy reflektometru z generatorem 0,1 Hz sinus, które wysyłają sygnały w mierzony obiekt, a w wyniku występujących w drzewieniach wyładowań do reflektometru wracają fale odbite o amplitudzie proporcjonalnej do poziomu występującego wyładowania, mierzone wartości mV. Efektem przeprowadzonego badania jest wskazanie miejsc, w których występują wyładowania, określenie ładunku tych wyładowań i częstości ich zapłonu oraz rozdzielczość pomiaru w miejscach występowania wyładowań 0,1 m, rozdzielczość pomiaru ładunku 1 pC, zakres rejestrowanych wyładowań od 1 pC do wartości przekraczającej 150 000 pC [4].

### 3.3. Ocena badań diagnostycznych

Protokół badania diagnostycznego musi zawierać ostateczną ocenę:

- wynik pozytywny – wartości mieszczące się w rekomendowanych granicach
- wynik warunkowo pozytywny – (tg  $\delta$  przekracza rekomendowane kryteria, lecz brak zarejestrowanych wyładowań niepełnych, co uniemożliwia punktowe wskazanie osłabionych miejsc, wynik ten powinien być uzupełniony o rekomendację wykonania kontrolnego pomiaru do roku w czasie trwania gwarancji, wynik powtórnego pomiaru będzie skutkował wyznaczeniem kolejnego terminu badania lub w przypadku pogarszających się wyników i zarejestrowaniu miejsc wyładowań niepełnych uruchomieniem procesu reklamacji gwarancyjnej,
- wynik negatywny – poziom wyładowań niepełnych przekracza rekomendowane kryteria wskazując osłabione miejsca bez względu na wartość tg  $\delta$  [9].

### PODSUMOWANIE

Podstawowe i diagnostyczne badania są istotnym elementem gwarantującym jakość zarówno nowych lub wyremontowanych jak również eksploatowanych kabli elektroenergetycznych.

Aktualna znajomość stanu technicznego kablowych linii elektroenergetycznych jest zasadniczą częścią składową podtrzymującą proces zarządzania majątkiem sieciowym ponieważ:

- zarządzający uzyskują obraz odniesienia nowych linii kablowych,
- możliwa jest ocena całościowa stanu technicznego zarządzanej sieci,
- możliwa jest ocena niezawodności sieci elektroenergetycznej,
- dane uzyskane w badaniach diagnostycznych są ważnym źródłem informacji dla planowania harmonogramu konserwacji i wymiany elementów sieci kablowej [2].

### BIBLIOGRAFIA

1. Baszczok P., Wdrożenie diagnostyki linii kablowych SN w BUD. Materiały szkoleniowe firmy VATTENFALL, Gliwice 2010
2. Gulski E., Rakowska A. Siodła K., Chojnowski P., Nowak J., Rola badań eksploatacyjnych i diagnostyki elektroenergetycznych kabli przesyłowych wysokiego napięcia z zastosowaniem czułych metod pomiarowych.
3. Laskowski L., Masztak R., Stokłosa J., Zasady Budowy Linii Kablowych. Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej, Poznań 1999
4. Mitura M., Badania odbiorcze linii kablowych SN. Szczecin 2012
5. Instrukcja wykonywania badań linii kablowych SN i WN, ENERGA-OPERATOR S.A., 2014
6. Katalog TELEFONIKA-KABLE S.A., Kable i przewody elektroenergetyczne., edycja 2004
7. Materiały szkoleniowe firmy BAUR
8. Specyfikacja techniczna, Kable i przewody elektroenergetyczne, ENERGA-OPERATOR S.A., 2011
9. Zasady postępowania i oceny badań diagnostycznych linii kablowych SN oraz ich wpływ na końcowy odbiór techniczny. Wytyczne dla pracowników wykonujących pomiary diagnostyczne w firmie ENERGA-OPERATOR S.A.
10. Zajkowski K., Zieliński P., Budowa i właściwości przewodów wysokotemperaturowych w liniach elektroenergetycznych. LOGISTYKA 6/2014, s.11508-11515

## BASIC RESEARCH AND DIAGNOSTICS CABLE POWER LINES MV

### Abstract

*The article is a summary of information on the construction, types of medium voltage cables used in the power industry. The typical MV cable line failure which are caused by various kinds of factors. Also addressed the topic of research: basic and diagnostic performed on the MV cable lines.*

Autorzy:

dr inż. **Konrad Zajkowski** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, 75-620 Koszalin, ul. Raławicka 15-17, tel. + 48 94 3478 426, konrad.zajkowski@tu.koszalin.pl

**Sylwia Kucharska** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, 75-620 Koszalin, ul. Raławicka 15-17, studentka IV roku Energetyki, tel. + 48 607 214 034, sylwiakucharska23@gmail.com