

# Kable energetyczne z perspektywy zakładu energetycznego

Dr inż. Bogusław Bocheński

Maintenance Engineer

Hydro One Networks Inc.

[boguslaw.bochenski@hydroone.com](mailto:boguslaw.bochenski@hydroone.com)

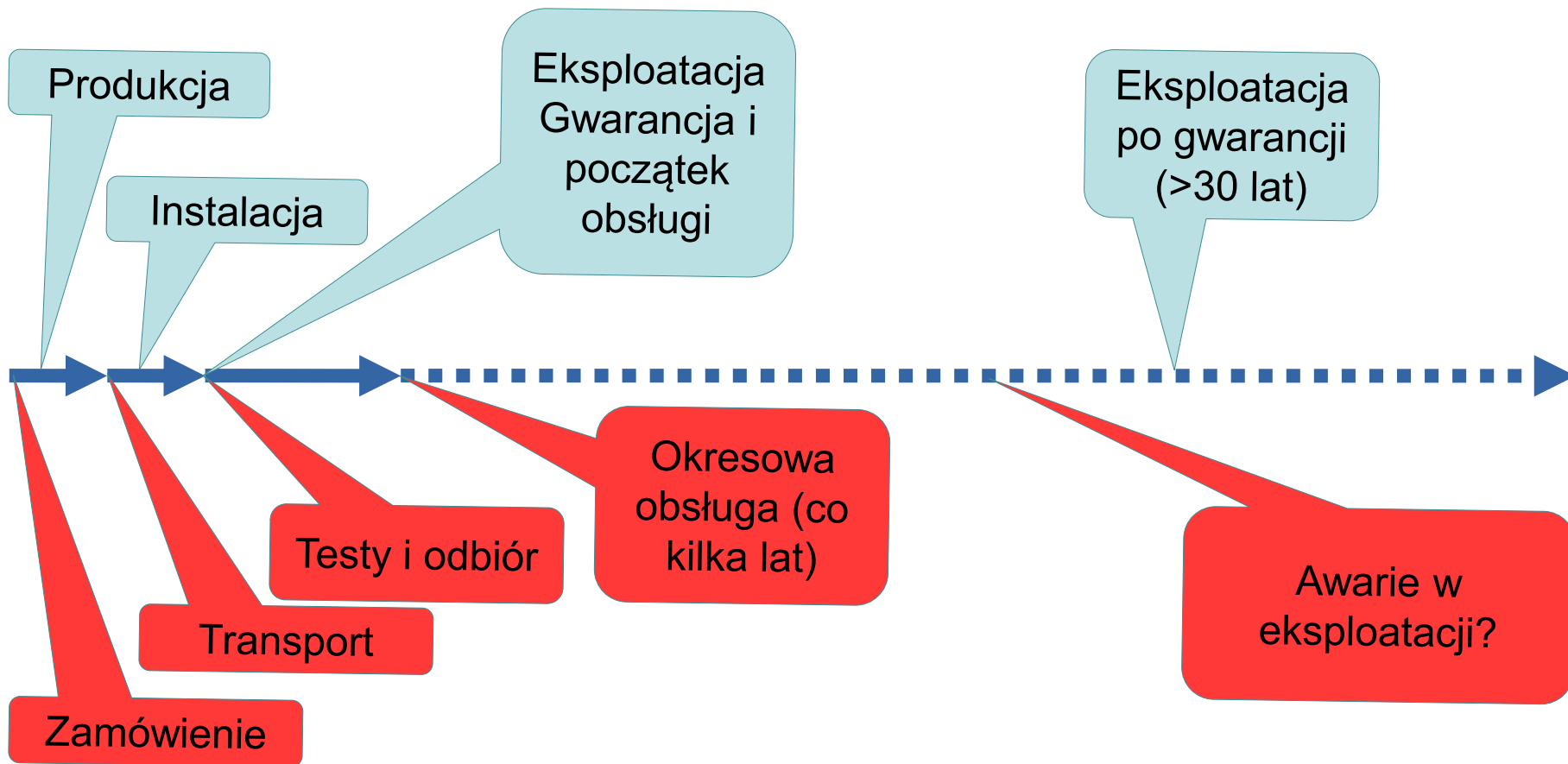
[boguslaw.bochenski@gmail.com](mailto:boguslaw.bochenski@gmail.com)

# Agenda

- Cykl życia kabli WN
- Niezawodność kabli WN
- Zestawienie kabli WN i SN
- Wady produkcyjne kabli WN z izolacją XLPE
- Błędy montażowe kabli WN z izolacją XLPE
- Testy odbiorcze kabli WN
- Obsługa kabli WN

# CYKL ŻYCIA KABLI WN

# Cykl życia kabli WN



# Cykl życia kabli WN

Etap	Ryzyko	Eliminacja
Produkcja	<p><u>Wady produkcyjne izolacji i ekranu:</u> pęcherzyki, uszkodzenia, rozwarstwienie, mikroostrza, zabrudzenia/ciała obce, niecentryczność, owalność, etc.</p> <p><u>Wady powłoki zewnętrznej:</u> uszkodzenia, brak powłoki grafitowej, etc.</p>	<p>Kontrola jakości, Testy fabryczne (IEC 60840, 62067, 60270)</p> <p><b>Nadzór inwestora</b></p>
Transport	Uszkodzenia podczas przeładunku lub w transporcie	Inspekcja przy odbiorze, Testy powłoki przed i po ułożeniu kabla
Instalacja	Uszkodzenia powłoki zewnętrznej, błędy w instalacji akcesoriów	Testy odbiorcze wg norm IEC 60840 i IEC 62067 (1h AC + PD), Nadzór inwestora, Doświadczenie
Eksploatacja	Czynniki zewnętrzne, Penetracja wody, Przemieszczenie, Starzenie	Obowiązek lokalizacji kabli przed robotami budowlanymi, Obsługa okresowa

# Materiały izolacyjne kabli WN

- Izolacja z polietylenu usieciowanego (XLPE)
  - ZALETY: niskie straty, lekkie, niski koszt, łatwe łączenie, brak oleju (wyjątki), wysokie napięcie przebicia, niska przenikalność, prosta instalacja i obsługa
  - WADY: mała odporność na wyładowania niezupełne (WNZ)
- Izolacja papierowo-olejowa – starsze instalacje
  - Zalety: wysoka odporność na WNZ, wysokie napięcie przebicia
  - WADY: wysokie straty, ciężkie, trudne i czasochłonne w instalacji i obsłudze, ryzyko wycieku oleju, coraz mniej doświadczonych monterów

# Materiały izolacyjne kabli WN

- Izolacja z gumy etylenowo-propylenowej (EPR)
  - ZALETY: duża odporność na wyładowania niezupełne (WNZ), łatwe łączenie, brak oleju (poza głowicami), wysokie napięcie przebicia, prosta instalacja i obsługa, odporne na promieniowanie
  - WADY: duże straty, cięższa niż XLPE, wysoki koszt, przenikalność elektryczna większa niż XLPE, ze względu na straty nie stosowane powyżej 145 kV

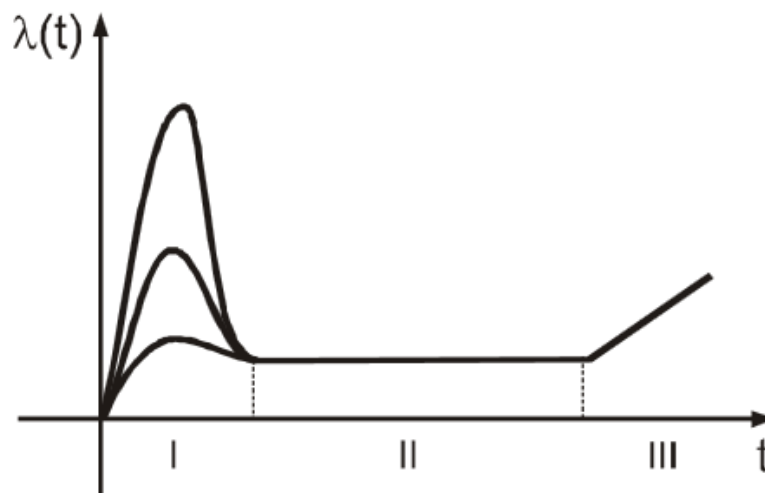
## Niezawodność kabli

- Im wyższe napięcie tym wyższa wymagana niezawodność
- Krzywa niezawodności linii kablowych jest typową krzywą grzbietową (wannową/siodłową)



# Niezawodność kabli

- Implementacja testów odbiorczych wpływa na kształt tej krzywej



# Niezawodność kabli

- Konsekwencje awarii w eksploatacji
  - Bezpieczeństwo publiczne (głowice porcelanowe w pobliżu siedlisk ludzkich)
  - Niedostępność linii - odwoływanie i opóźnianie zaplanowanej obsługi i napraw bieżących w innych liniach i urządzeniach w celu zachowania stabilności systemu
  - Dostępność i koszt ekip monterskich w celu lokalizacji i naprawy uszkodzenia
  - Dostępność i koszt ekip testujących kabel po naprawie
  - W kablach olejowych dochodzą problemy związane z wyciekami oleju do ziemi i/lub wody
- Zatem, przyjrzyjmy się przyczynom awarii

# **WADY PRODUKCYJNE KABLI WN Z IZOLACJĄ XLPE**

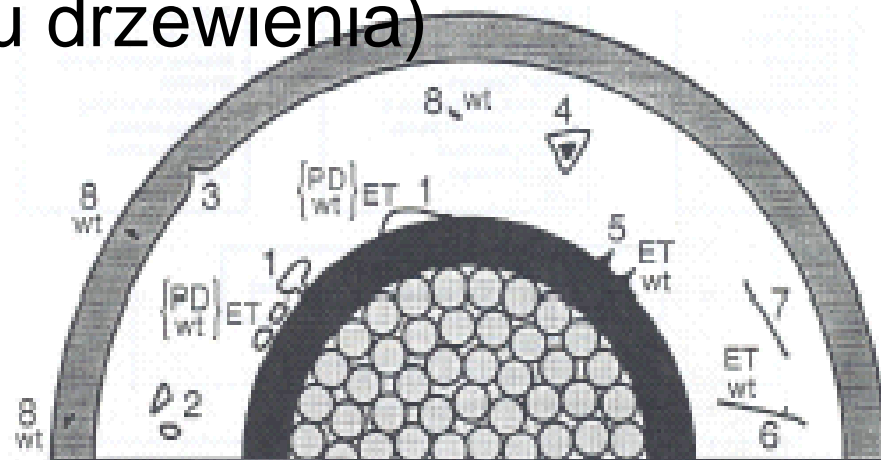
# Wady produkcyjne w izolacji

## 1. Powodujące WNZ

- Pęcherzyki przy ekranie żyły/rozwarstwienie
- Pęcherzyki w izolacji
- Defekty ekranu izolacji/rozwarstwienie

## 2. Brak WNZ (do momentu drzewienia)

- Ciała obce w izolacji
- Mikroostrza
- Zadry
- Włókna...



# **BŁĘDY MONTAŻOWE KABLI Z IZOLACJĄ XLPE**

## **Błędy montażowe kabli**

1. Niestaranne obcięcie ekranu izolacji
2. Nacięcia izolacji
3. Zabrudzenia stałe powodujące tworzenie pęcherzyków lub odkształcające pole (GIS)
4. Dopuszczenie do nadmiernego zgięcia kabla (szczególnie giętkie głowice z izolacją stałą)
5. Niewłaściwy rozmiar akcesoriów
6. Uszkodzenia powłoki
7. Niedogrzanie lub przegrzanie kabla (np. układanie w zimie)...

# Błędy montażowe a testy odbiorcze

- Jak zapobiegać awariom spowodowanym złym montażem?
  - Doświadczenie – tanio czy dobrze?
  - Nadzór
  - Odpowiednio dobrane testy odbiorcze – dopóki kabel nie jest odebrany, wszystkie naprawy są na koszt instalatora, a nie inwestora. Włączając kary za opóźnienia.

# **PRÓBY ODBIORCZE KABLI WN**



# Próby odbiorcze

- Proces decyzyjny:
  - Jakie są oczekiwania?
  - Czy wymagana jest tylko próba napięciowa czy również testy diagnostyczne?
  - Jaki rodzaj napięcia probierczego?
  - Kryteria dla testów diagnostycznych
  - Jakie jest ryzyko awarii w czasie testu?
  - Jakie jest dopuszczalne ryzyko awarii w eksploatacji?

## Próby odbiorcze

- Nowe kable WN – praktycznie wyłącznie izolacja XLPE (czasem EPR do 145 kV)
- Kable powinny być testowane w fabryce
- Akcesoria (mufy i głowice) też powinny być testowane w fabryce
- Testy odbiorcze skierowane są na jakość instalacji całego systemu – bardzo rzadko zdarza się, że to kabel nie wytrzyma próby napięciowej

# Próby odbiorcze wg norm

- IEC 60840 i 62067 zalecają:
  - Próbę napięciem probierczym  $1.7 U_0$  lub wg tabeli
  - Pomiar WNZ podczas próby napięciowej
  - Testy powłoki
- AEIC CS9 dodatkowo zaleca:
  - Pomiar prądów indukowanych w ekranie w systemach “cross-bonded”

# Próby odbiorcze

- Normy wewnętrzne różnych zakładów energetycznych zalecają:
  - Pomiar impedancji składowej zgodnej i zerowej
  - Pomiar napięć/prądów indukowanych w ekranie i weryfikacja koordynacji izolacji powłoki
  - Testy ograniczników przepięć ekranu (SN) oraz linii (WN)
  - Pomiar rezystancji izolacji

# Próby odbiorcze

- Pomiar rezystancji żyły i/lub ekranu
- Pomiar rezystancji połączeń
- TDR (Time Domain Reflectometry) – rejestracja przebiegu dla późniejszej lokalizacji uszkodzeń
- Pomiar temperatury kabla przed uruchomieniem i po roku eksploatacji (DTS Distributed Temperature Sensing) oraz weryfikacja obciążalności kabla

# Proces decyzyjny

- Testy muszą być dobrane do instalacji:
  - Izolacja
    - Rodzaj (XLPE, EPR, TR-XLPE, papierowo-olejowa, papierowo-gazowa, etc.)
    - Wiek
    - Najczęstsze mechanizmy uszkodzeń
  - System uziemień ekranu
    - Projekt
    - Stan
  - Linia
    - Długość
    - Lokalizacja (dostęp do muf)

## Próby odbiorcze

- Próba napięciem stałym lub wyprostowanym
- Próba napięciem przemiennym o częstotliwości sieciowej lub bliskiej
- Próba napięciem o bardzo niskiej częstotliwości (VLF)
- Próba napięciem przemiennym o zanikającej amplitudzie (OWTS)
- Pomiar WNZ

# Próba napięciem stałym

- Kable z izolacją papierową (SCFF, HPFF, SCGF, PILC)
- Nie stosowana do kabli z izolacją XLPE, gdyż znacznie podnosi ryzyko uszkodzenia w eksploatacji
- Metoda stosowana do testów powłoki (10 kV<sub>DC</sub>)



# Próba napięciem stałym

- Zalety

- Niski koszt
- Względnie łatwa
- Nie wymaga wiedzy eksperckiej
- Tylko kable z izolacją papierową (lub EPR)

- Wady

- Mała wartość diagnostyczna
- Naprężenia w izolacji inne niż przy napięciu AC
- Duży współczynnik awarii w eksploatacji w kablach z izolacją XLPE

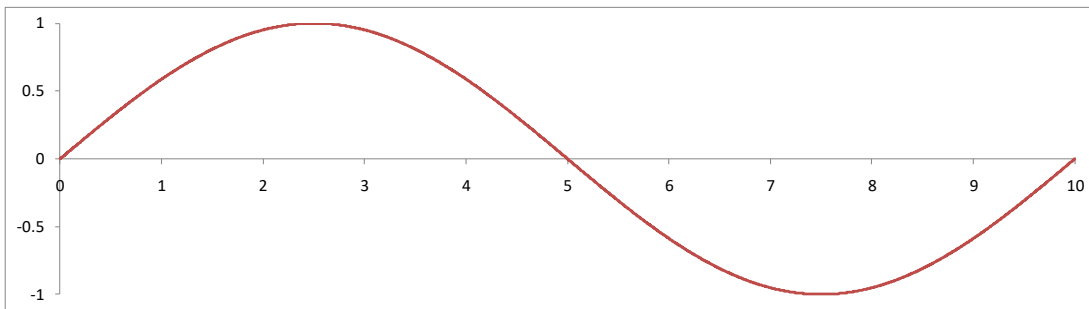
# Próba napięciem o bardzo niskiej częstotliwości (VLF)

- Używana głównie do kabli SN jak próba napięciowa często w połączeniu z pomiarem współczynnika stratności (Tan Delta).
- Napięcie zazwyczaj ma częstotliwość 0,1 Hz lub niższą
- Próba napięciowa trwa od 15 minut do 1 godziny.
- Wymiary źródła napięciowego znacznie mniejsze niż odpowiednika 60 Hz, dlatego jest postrzegane jako tańsze.
- Pomiar WNZ ma wyższe wymagania od zasilacza niż próba napięciowa. Wiele z dostępnych urządzeń generuje dużo szumów.
- Obecnie stosowane do kabli SN. Normy dla kabli WN nie dopuszczają VLF.

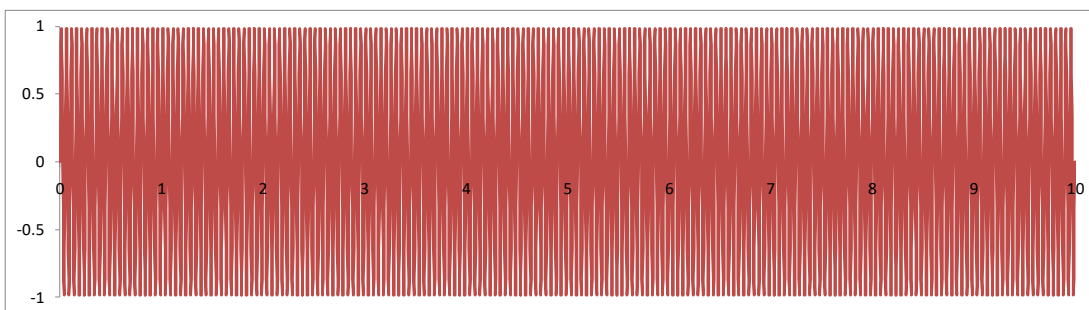
# Próba napięciem o bardzo niskiej częstotliwości (VLF)

- Zalety
- Może być mniej kosztowna niż próba napięciem o częstotliwości sieciowej
- Ma dużą wartość diagnostyczną w połączeniu z pomiarem Tan Delta
- Relatywnie prosta w aplikacji
- Próba napięciowa i Tan Delta nie wymaga wiedzy eksperckiej (ale nie WNZ)
- Wady
- Nadal trwają dyskusje na temat napięcia probierczego i czasu trwania
- Potencjalnie mniejsza efektywność w wykrywaniu defektów niż próba napięciem o częstotliwości sieci
- Kształt krzywej napięcia może nie być sinusoidalny (cosine-rectangular)
- Interpretacja WNZ wymaga doświadczenia

# VLF vs. Próba napięciem 50/60 Hz



0,1HZ



20HZ



60HZ

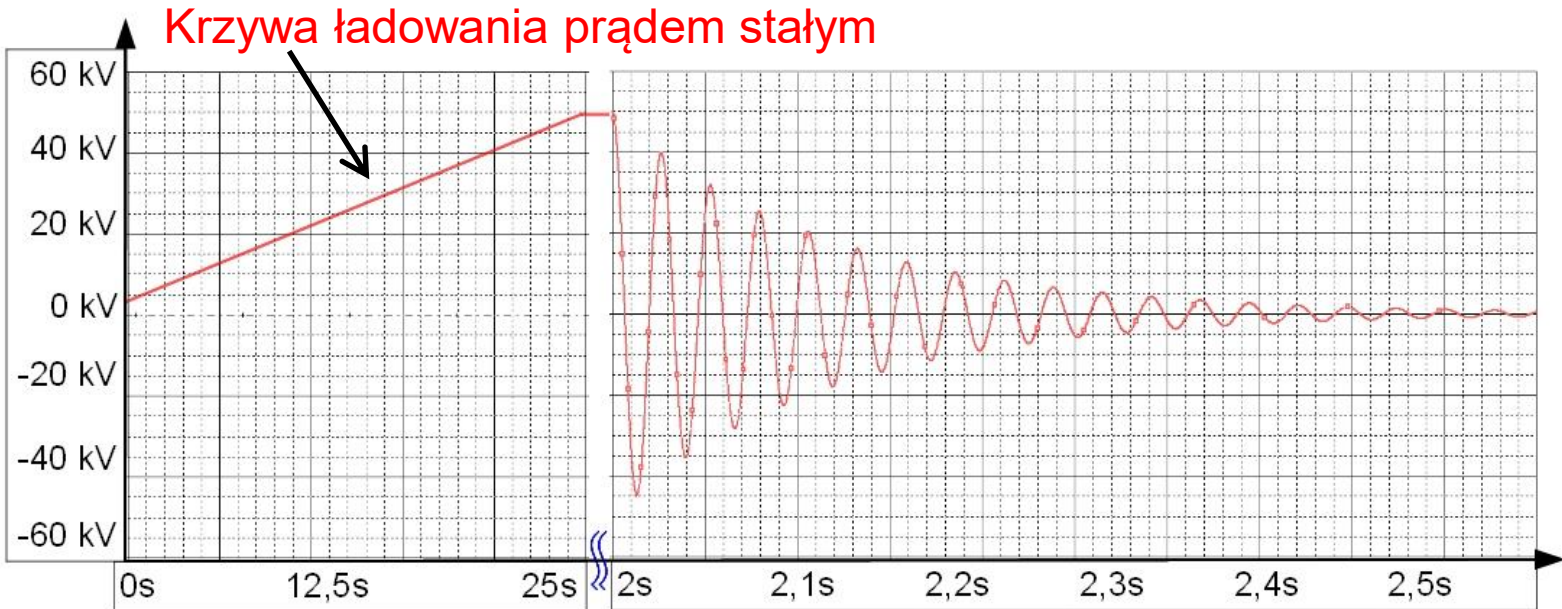
## VLF vs. Próba napięciem 50/60 Hz

- 60 minut przy częstotliwości 20 Hz to 72.000 okresów a przy 50 Hz to 180.000 okresów
- 60 minut przy częstotliwości 0,1 Hz to 360 okresów
- 72.000 okresów przy 0,1 Hz wymagałoby 200 godzin

# Próba napięciem tłumionym OWTS/DAC

- **To nie jest próba rezonansowa wg. IEC 60840 and 62067**
- Pojemność kabla jest ładowana prądem stałym/wyprostowanym (dokładnie jak w próbie napięciem stałym), a następnie rozładowywana przez indukcyjność co owocuje oscylacjami tłumionymi
- Głównym celem jest detekcja WNZ w pierwszym okresie (później napięcie spada) więc nie wykrywa defektów, które nie generują WNZ
- Izolacja jest poddawana wysokiemu napięciu tylko przez kilka okresów w czasie całej próby
- Niektórzy, liczący się na świecie producenci kabli, unieważniają gwarancję po testach OWTS/DAC

# Próba napięciem tłumionym OWTS/DAC



Rozrzut parametrów napięcia probierczego:

Czas ładowania:	0,25 do 60 s
Częstotliwość oscylacji:	38 do 368 Hz
Współczynnik tłumienia:	3,7 do 20,4%

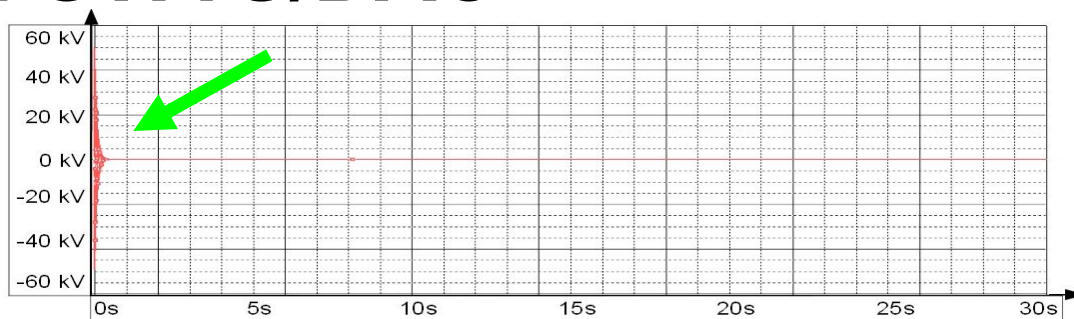
Różne skale ładowania i rozładowania mogą wprowadzać w błąd!

# Próba OWTS/DAC

100m

$T_{ch} = 0,25 \text{ s}$

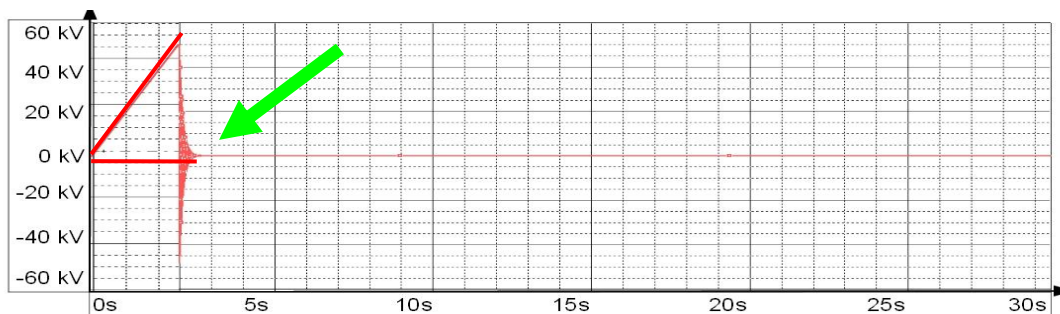
$f = 368 \text{ Hz}$



1 km

$T_{ch} = 2,5 \text{ s}$

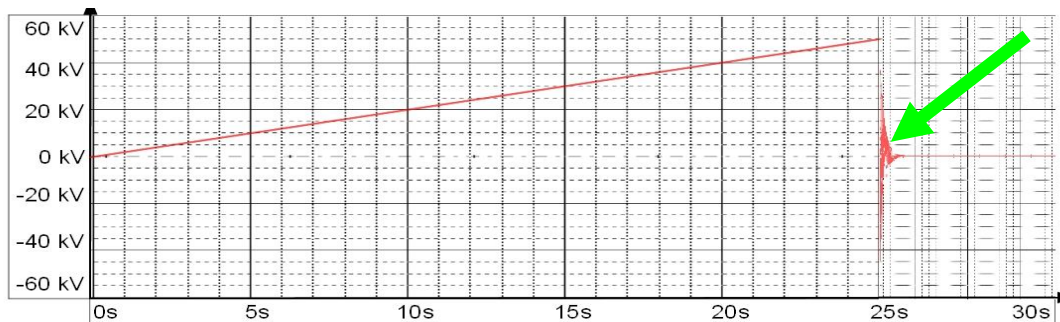
$f = 119 \text{ Hz}$



10 km

$t_{ch} = 25 \text{ s}$

$f = 38 \text{ Hz}$



50 kV  
OWTS/DAC

Prąd ładowania  
5 mA



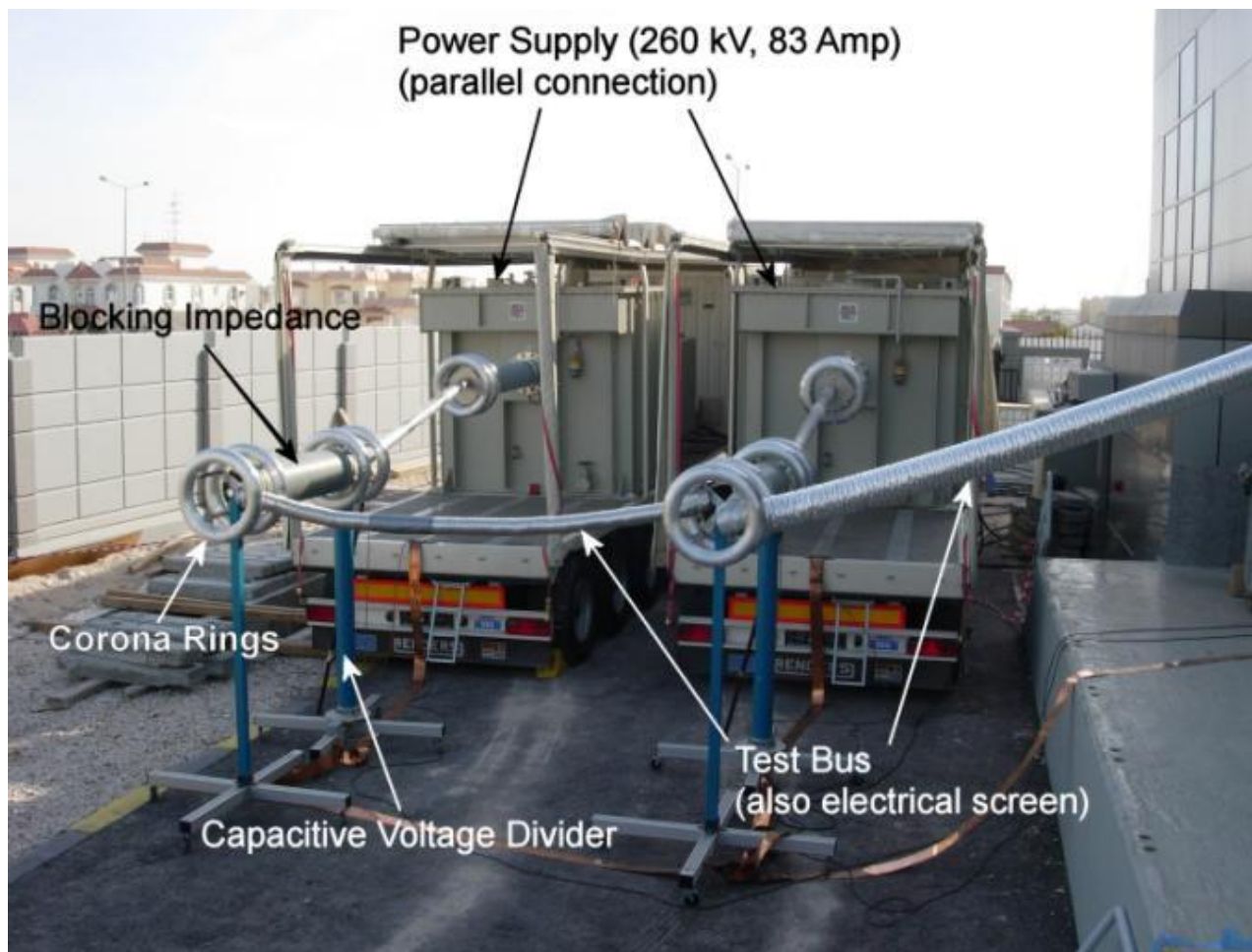
## Próba OWTS/DAC

- Gdzie zatem stosować OWTS?
- Diagnostyka kabli z izolacją papierową
  - Napięcie probiercze bardziej zbliżone do sieciowego, niż napięcie stałe
  - Pomiar WNZ (na ograniczonych długościach)
  - Pomiar Tan Delta

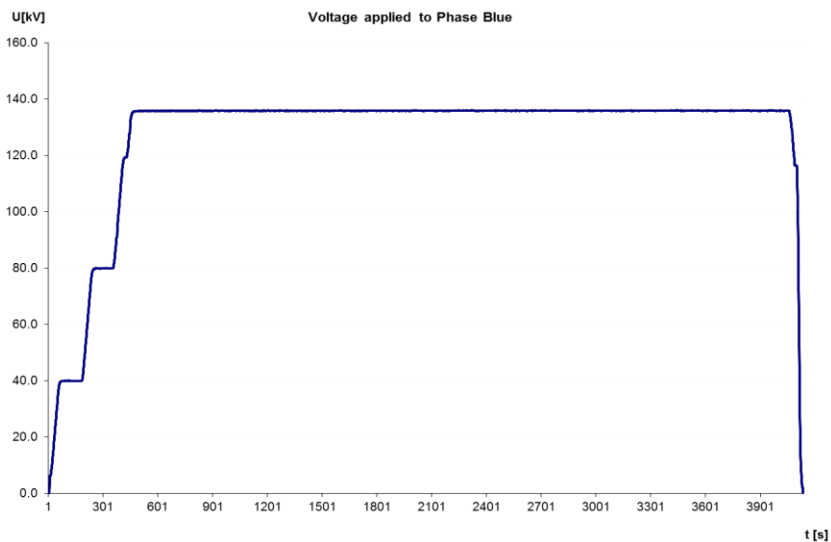
# Próba napięciem przemiennym (rezonansowa)

- Zalecana przez normy kablowe
- Częstotliwość napięcia od 20 Hz do 300 Hz
- Zalecane napięcie probiercze zazwyczaj  $1,7U_0$
- Czas próby napięciowej: 60 minut
- Normy wewnętrzne niektórych zakładów energetycznych wymagają czas próby od 30 minut do 2,5 godzin i napięcie aż do  $2,5 U_0$ .

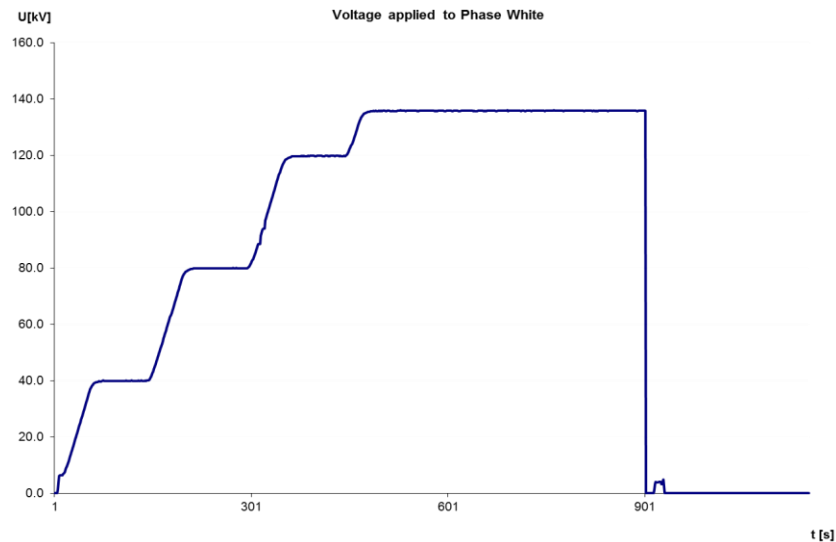
# Zestaw rezonansowy



# Rejestrator napięcia probierczego



Napięcie próby zakończonej sukcesem



Przebicie izolacji po 7 minutach próby

# **OBSŁUGA KABLI WN**

# Obsługa

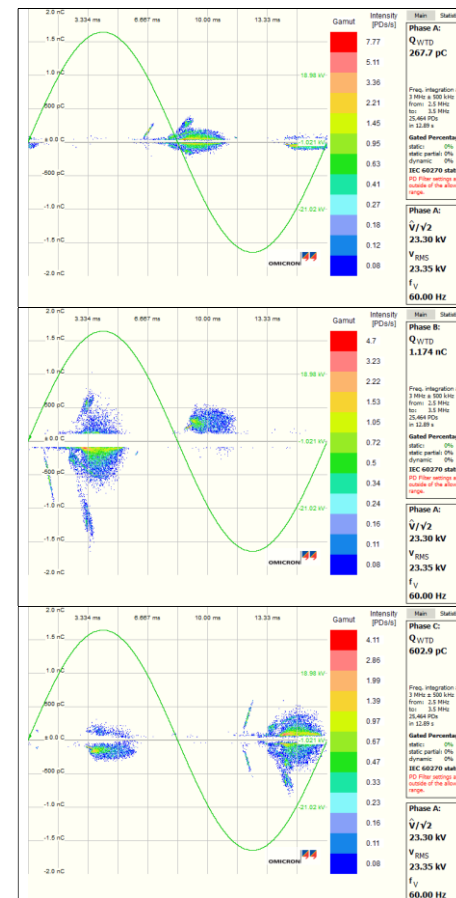
- Diagnostyka kabli XLPE
  - Pomiar rezystancji izolacji
  - Pomiar WNZ
  - Pomiar współczynnika strat (Tan Delta)

# Pomiar Rezystancji Izolacji

- Pomiar ten opiera się na wykorzystaniu napięcia stałego o wartości między 500 V i 5 kV
- Wyniki pomiaru silnie zależą od upływności powierzchni głowic i temperatury izolacji
- Mała wartość diagnostyczna dla XLPE, trochę większa dla kabli z izolacją papierową

# Pomiar WNZ

- Wykonywany w próbach odbiorczych i ponaprawczych
- Jako test diagnostyczny podczas próby odbiorczej, WNZ powinny być monitorowane przy wszystkich akcesoriach (głowice i mufy)
- Na rynku dostępne są różne rodzaje komercyjnych detektorów WNZ
- Wiedza ekspercka jest nadal potrzebna do poprawnej rejestracji i interpretacji wyników pomiarów





# Pomiar Tan Delta

- Głównie w kablach SN przy VLF
- Pomiar ten miał wartość diagnostyczną dla kabli z izolacją papierową
- Nie stosowany do kabli WN z izolacją XLPE

# WYBRANE PUBLIKACJE

# Publikacje dotyczące obsługi kabli WN

- CIGRE TB 279 Maintenance for HV Cables and Accessories
- CIGRE TB 358 Remaining life Management of existing AC underground lines
- CIGRE TB 560 Guideline to Maintaining the Integrity of XLPE Cable Accessories
- CIGRE TB 652 Guide for the operation of self contained fluid filled cable systems

# Publikacje dotyczące obsługi kabli WN


- CIGRE TB 610 Offshore generation cable connections
- CIGRE TB 403 Cable system in multipurpose or shared structures
- CIGRE TB 152 International survey of maintenance policies and trends
- CIGRE TB 201 Maintenance outsourcing guidelines

# Publikacje dotyczące obsługi kabli WN

- CIGRE B1-207 2014 REE experience in predictive maintenance based on monitoring
- CIGRE B1-209 2016 Sheath currents monitoring in high voltage isolated cables
- CIGRE B1-208 Development of a Robot for Maintenance Work in the Spanish-French Electrical Interconnection Tunnel



# Publikacje dotyczące obsługi kabli WN

- EPRI 1000458 – Guide for Operation & Maintenance of Paper-Insulated Transmission Cables
  - CIGRE TB825 Maintenance of HV Cable Systems
- 

# Obsługa

1. Diagnostyka prewencyjna
  1. WNZ przy głowicach (On-line lub off-line)
  2. Tan Delta
  3. Monitoring temperatury
  4. Test powłoki
  5. Test oleju
  6. Inspekcja połączeń kamerą termowizyjną



# Obsługa

1. Obsługa okresowa
  1. Inspekcja głowic
  2. Testy oleju
  3. Monitoring trasy linii
  4. Inspekcja studzienek
  5. Inspekcja erozji wybrzeża
  6. Inspekcja na platformach



## Obsługa kabli XLPE

- Kable z izolacją XLPE są w eksploatacji od ponad 40 lat i mają opinię bezobsługowych. WG Cigre TB 279, tylko 24% właścicieli przeprowadza diagnostykę prewencyjną a 45% przeprowadza naprawy, co jest największym odsetkiem wśród wszystkich urządzeń przesyłowych.

# Obsługa kabli XLPE

- Najczęściej przeprowadzana diagnostyka to:
  - Test powłoki
  - Bezinwazyjna inspekcja głowic (wycieki, pęknięcia i uszkodzenia mechaniczne)
  - Inspekcja dodatkowego osprzętu i alarmów w tunelach
  - Czyszczenie/mycie głowic (regiony nadmorskie, duże zanieczyszczenie lub blisko ruchliwych dróg)

# Obsługa kabli XLPE

- Mniej popularna diagnostyka:
  - Monitoring temperatury przy użyciu termopar lub światłowodów (DTS)
  - Test ograniczników przepięć ekranu
  - Sprawdzenie korozji i penetracji wody w skrzynkach z ogranicznikami przepięć
  - Monitoring prądów ekranu w celu wykrycia kradzieży miedzi
  - Monitoring WNZ (on-line lub okresowy)
  - Pomiar rezystancji uziemień

**PRZYKŁADY**

## Przypadek 1 – Kable 380 kV XLPE

- Linia 380 kV, 4-torowa z zainstalowanym monitoringiem WNZ (on-line)
- Zaleta – wg producenta pozwoli to wykryć potencjanie rozwijający się defekt
- Wada – ilość danych znieczuli każdego fanatyka WNZ. Każde błędne wskazanie wymaga kosztownego dochodzenia.
- W praktyce, system ten może wykazać defekty rozwijające się w głowicach gdzie jest olej a nie w mufach z izolacją stałą

## Przypadek 2 – Kable 400 kV XLPE

- Linia 400 kV, 4-torowa z 8 mufami na fazę i sensorami do pomiaru WNZ zainstalowanymi przy głowicach
- Kable zainstalowane w 2017 roku
- Producent kabla zarekomendował 24-godzinny „test” napięciem sieci i pomiar WNZ przy głowicach

## Przypadek 2 – Kable 400 kV XLPE

- Awaria jednej mufy po kilku miesiącach eksploatacji
- Po naprawie linia przywrócona do eksploatacji i niedługo później awaria następnej mufy
- Po naprawie, awaria kolejnej mufy przy załączeniu linii
- Właściciel podejmuje decyzję o przeprowadzeniu testów przed następnym załączeniem

## Przypadek 2 – Kable 400 kV XLPE

- Testy:
  - próba napięciowa napięciem probierczym  $1.7 U_0$  (393 kV)
  - Pomiar WNZ przy każdej mufie i głowicy



## Przypadek 2 – Kable 400 kV XLPE

- Wyniki testów:
  - Awaria następnej mufy przy 260 kV
  - Awaria kolejnej mufy przy 340 kV
  - Awaria kabla przy głowicy po 10 minutach przy napięciu probierczym

## Przypadek 2 – Kable 400 kV XLPE

- Podsumowanie:
  - 6 defektów z 72 muf i 18 głowic, co oznacza ponad 6% uszkodzeń
  - Całkowity koszt wielokrotnie przewyższył koszt prób odbiorczych (gdyby były wykonane)

## Przypadek 3 – Kable 230 kV XLPE

- Kable zainstalowane w 2007 i przetestowane wg norm
- 3 awarie od tego czasu, ostatnia w 2016
- Analiza przyczyn awarii wykazała ruchy gruntu (wyburzanie starej elektrowni węglowej obok stacji). Rejestracja WNZ podczas wyburzania przeciężyła wejścia monitorów WNZ
- Okresowy pomiar WNZ pozwolił na wykrycie wyładowań w głowicy przed uszkodzeniem