

## PROJEKT BADAWCZO-ROZWOJOWY SORAL – SYSTEM OCENY STANU TECHNICZNEGO I RYZYKA AWARII LINII KABLOWYCH SN OPARTY O BADANIA DIAGNOSTYCZNE WYKONYWANE W TRYBIE OFFLINE

Sławomir NOSKE<sup>1</sup>, Katarzyna ZASADA-CHRUŚCIŃSKA<sup>2</sup>

1. Energa-Operator SA  
tel.: +48 609 460 108 e-mail: slawomir.noske@energa.pl
2. Energa-Operator SA  
tel.: +48 781 850 371 e-mail: katarzyna.zasada-chruscinska@energa.pl

**Streszczenie:** Sieć kablowa średniego napięcia (SN) stanowi istotny element sieci dystrybucyjnej. Dotychczasowe zarządzanie tą częścią sieci jest głównie oparte na analizach awaryjności, tzn. wzrost liczby awarii na danej linii świadczy o pogarszającym się stanie technicznym. Jest to system mało efektywny, wiąże się z dodatkowymi kosztami usuwania awarii, przerwami w dostawie energii, utrudnionym planowaniem inwestycji i prac eksploatacyjnych. Planowane, w ramach projektu SORAL, prace badawczo-rozwojowe mają doprowadzić do wdrożenia zarządzania siecią kablową SN opartego na wymiernej ocenie stanu technicznego poszczególnych elementów linii. Podstawą prac jest wykorzystanie pomiarów diagnostycznych. Analizy rynku i doświadczenia Energa Operator SA z pracy w międzynarodowych stowarzyszeniach wskazują, że projekt ma charakter innowacyjny na poziomie światowym.

**Słowa kluczowe:** Pomiary diagnostyczne kabli. Pomiary wyładowań niepełnych (PD). Pomiary tangensa delta (TD). Health Index.

### 1. WSTĘP

Dążenie do wzrostu efektywności zarządzania siecią jest wyzwaniem dla każdego operatora sieci. Szczególnym i bardzo ważnym elementem sieci są linie kablowe SN. Za pomocą tych linii zasilane są obszary zurbanizowane, gdzie pewność i jakość dostaw energii elektrycznej jest bardzo istotna. W tych obszarach koszty modernizacji i rozwoju sieci są szczególnie wysokie.

Najstarszą część linii kablowych SN Energa Operator SA stanowią linie wybudowane kablami o izolacji papierowej nasyconej syciwem (PILC). To te linie kablowe będą w najbliższym czasie stwarzały największe ryzyko awarii. Procesy starzenia się poszczególnych odcinków kablowych

i osprzętu (mufy, głowice) mogą być na różnych etapach. Stwarza to kolejną trudność w efektywnym zarządzaniu tą siecią.

W ostatnich kilku dekadach wprowadzone zostały nowe metody diagnostycznych dla systemów kablowych SN. Obecnie stosowane są dwie podstawowe techniki

diagnostyczne: pomiary wyładowań niepełnych (wnz) oraz pomiaru tangensa delta (TD). Dostępne systemy diagnostyczne umożliwiają wykonywanie pomiarów offline, czyli przy odłączeniu linii kablowej spod napięcia roboczego. W tych rozwiązaniach stosuje się zewnętrzne źródła napięcia. Umożliwia to regulację napięcia probierczego, a tym samym pomiar wyładowań niepełnych i TD przy różnych wartościach napięcia. Pozwala to określić, między innymi, wartość napięcia zapłonu i gaśnięcia wnz. W pomiarach diagnostycznych najczęściej stosuje się jako napięcia probiercze: napięcie wolnozmiennne (VLF) 0,1 Hz oraz napięcie przemiennie tłumione (DAC). Dzięki zastosowaniu takich napięć mogły powstać niewielkie systemy pomiarowe umożliwiające dokonywanie pomiarów linii kablowych w terenie.

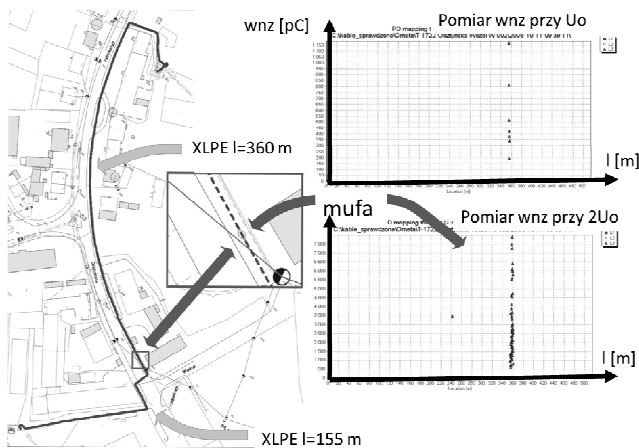
Informacje uzyskane z pomiarów wnz i TD mogą dostarczyć wiedzy wspierającej ocenę stanu technicznego kabli i osprzętu. Obecnie problem nie polega na poprawnym wykonaniu pomiarów, ale na interpretacji ich wyników i diagnozie stanu technicznego linii kablowych na podstawie uzyskanego zestawu informacji. Szczególne możliwości analizy procesów starzeniowych w poszczególnych liniach kablowych dają pomiar wyładowań niepełnych. Te pomiary umożliwiają lokalizację miejsc występowania wyładowań niepełnych (wnz) z dokładnością nawet do 1 m. To jedyne takie badanie, które pozwala analizować dane w funkcji długości kabla.

### 2. DOTYCHCZASOWE DOŚWIADCZENIA

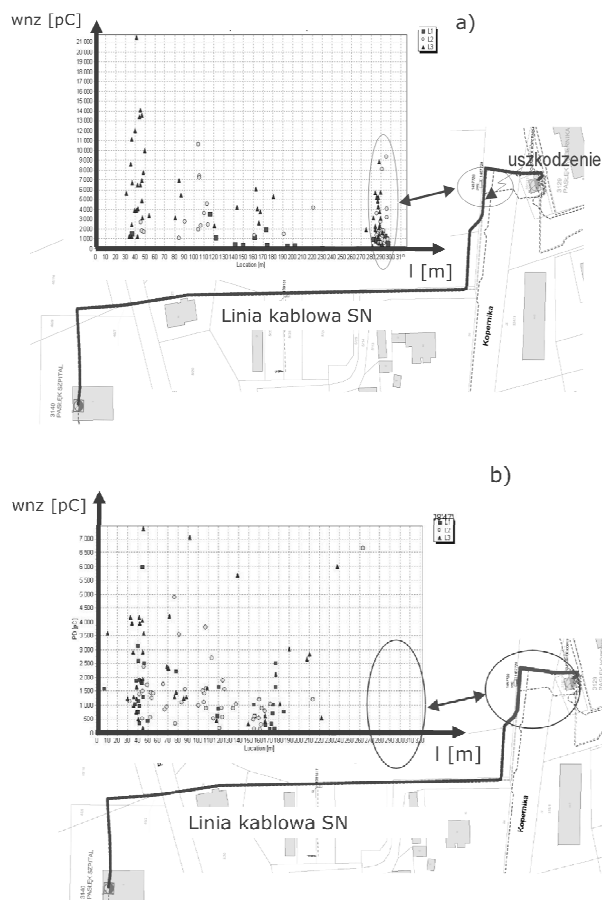
Dotychczasowe prace badawcze skupiały się na zdefiniowaniu kluczowych parametrów świadczących o zaawansowanym procesie starzeniowym izolacji. Badania obejmowały pomiar wyładowań niepełnych przy użyciu napięcia DAC. Badania prowadzone były w obszarze pilotażowym obejmującym ok. 1000 linii kablowych SN o łącznej długości 500 km. W obszarze tym ponad 50% sieci wykonana jest przy użyciu kabli PILC. W zakresie kabli PILC stwierdzono, że podstawowe parametry wskazujące na wzrost ryzyka awarii kabla to: niski poziom napięcie zapłonu wnz i występowanie miejsc z zwiększoną intensywnością wnz w kablu. Z badania wynika, że im niższe napięcie zapłonu wnz, tym wyższy ryzyko awarii

kabla. Ryzyko to wzrastało jeżeli na kablu pojawiały się miejsca z wyraźnie skupionymi wnz. W czasie badań nie stwierdzono korelacji między wzrostem wartości wnz, a wzrostem prawdopodobieństwa wystąpienia awarii.

Zdobyta dotychczas wiedza i doświadczenie pozwalają w sposób ekspercki wykorzystywać wyniki pomiarów diagnostycznych do wspierania zarządzania siecią. W zakresie przyłączania do sieci nowych linii kablowych pomiar wnz pozwala wykrywać błędy montażu i wady izolacji, które dotychczas były niemożliwe do wykrycia. Na rys. 1 pokazano przykład badania wnz nowej linii kablowej po pozytywnej próbie napięciowej. Na jednej fazie pojawiły się wnz w miejscu montażu mufy. Wadliwie wykonana mufa została wymieniona przed załączeniem linii.



Rys. 1. Wykryta wadliwa mufa na nowej linii kablowej



Rys. 2. Wsparcie decyzji eksploatacyjnej, zamiast mufy naprawczej podjęta wymiana odcinka kabla:

a) pomiar dokonany na kablu w okresie przed awarią,

b) pomiar wykonany po naprawie kabla (wymiana odcinka kabla). Na rysunku 2 przedstawiono przykład wsparcia decyzji eksploatacyjnej w zakresie naprawy kabla po awarii. W okresie przed awarią dokonano pomiaru diagnostycznego na wskazanym kablu. Rysunek 2 a) przedstawia wyniki pomiaru wnz i wskazane miejsce awarii. W związku z występowaniem, na odcinku kabla z awarią, skupionych wnz podjęto decyzje o jego wymianie (zamiast wykonania mufy naprawczej). Rysunek 2 b) przedstawia stan po naprawie (brak wnz na wymienionym odcinku).

Dokonane dotychczas pomiary i analizy badań nie umożliwiły jednak stworzenia wymiernych kryteriów oceny ryzyka awarii, które efektywniej mogłyby wspierać zarządzanie siecią kablowa SN.

## 2.1. Projekt SORAL

Systemy diagnostyczne, pozwalające na dokonanie pomiarów wnz i tangensa delta w liniach kablowych SN, wykorzystywane są w Energa Operator SA od początku XXI w. Zasady dokonywania pomiarów zostały zdefiniowane w instrukcjach eksploatacji linii kablowych SN. Pomiary wykonywane są w trzech sytuacjach:

- Pomiary po wybudowaniu nowej linii kablowej, przed załączeniem. Obecnie budowane są wyłącznie linie kablowe z izolacją z polietylenu sieciowanego (XLPE). Wymaga się, aby w nowych liniach poziom wyładowań przy napięciu  $U_0$  nie przekroczył 100 pC. Praktycznie wyładowania niepełne nie powinny występować poza poziomem szumów. Dodatkowo dla nowych linii kablowych dokonywane są pomiary tangensa delta. W tym wypadku wartość przy  $U_0$  nie powinna być większa niż  $1,2 \cdot 10^{-3}$  a przyrost przy wzroście napięcia do  $2U_0$  nie powinien być większy niż  $0,6 \cdot 10^{-3}$ .
- Pomiary po naprawie kabli. Pomiary te mają zweryfikować jakość prac montażowych. Dla kabli z izolacją XLPE stosuje się podobne zakresy oceny jak dla nowych kabli. Analiza wyników pomiaru i ocena kabli PILC jest – mimo że wstępnie zdefiniowano podstawowe kryteria oceny stanu kabla – przeprowadzana indywidualnie dla każdego kabla.
- Pomiary eksploatacyjne wykonywane na wybranych liniach kablowych prowadzone są w sieci od 2003 roku. Szczególnie dużo pomiarów wykonano w latach 2003–2010. Wyniki pomiarów diagnostycznych są indywidualnie oceniane. Brak jest jednak wymiernych standardów, które mogłyby wspierać proces zarządzania siecią kablową SN. Brak jest także systemu informatycznego, który umożliwiłby gromadzenie i analizę danych pomiarowych.

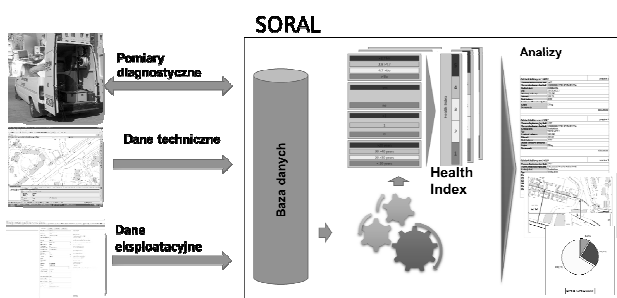
Kolejnym krokiem we wdrażaniu i wykorzystywaniu pomiarów wnz diagnostycznych, w szczególności liniach kablowych w eksploatacji, jest projekt SORAL. Projekt ten otrzymał dofinansowanie z Centrum Badań i Rozwoju (umowy o dofinansowanie projektu „SORAL – System oceny stanu technicznego i ryzyka awarii linii kablowych SN oparty o badania diagnostyczne wykonywane w trybie offline”, wniosek o dofinansowanie nr POIR.01.02.00-00-0250/17).

Realizacja projektu została zaplanowana na lata 2018–2021. Projekt jest realizowany przez konsorcjum firm Energa Operator SA i Globema sp. z o.o. Projekt SORAL obejmuje badania przemysłowe i prace rozwojowe. Dwa kluczowe rezultaty prac zostaną dostarczone odpowiednio na zakończenie badań przemysłowych i zakończenie prac rozwojowych. Rezultatem badań przemysłowych będą kryteria oceny stanu technicznego elementów linii kablowych SN oparte na danych technicznych

i eksploatacyjnych oraz danych diagnostycznych, otrzymanych z pomiaru wyładowań niezupełnych i tangensa delta. Na podstawie wieloletnich doświadczeń z badań diagnostycznych oraz zgromadzonych w systemie informatycznym GIS (ang. *Geographic Information System*) informacji technicznych i eksploatacyjnych zostanie zdefiniowana klasyfikacja (ang. *Health Index*) dla poszczególnych elementów linii kablowych, pozwalająca określić ryzyko wystąpienia awarii związanej z pogarszającym się stanem izolacji. Istotne jest wykorzystanie pomiarów wyładowań niezupełnych. Tylko te pomiary dostarczają informacji o zjawiskach zachodzących wzdłuż długości kabla, umożliwi to ocenę poszczególnych fragmentów linii kablowej. Health Index zostanie wyznaczony w oparciu o badania statystyczne. Weryfikacja i ewentualna kalibracja systemu zostanie przeprowadzona z wykorzystaniem badań laboratoryjnych wybranych próbek kabli.

W ramach prac rozwojowych będzie opracowany system informatyczny oceny ryzyka awarii sieci kablowej SN, oparty na ocenie stanu technicznego poszczególnych elementów linii kablowych. Opracowane w części badań przemysłowych modele oceny ryzyka awarii poszczególnych elementów linii kablowych SN zostaną zaimplementowane w systemie SORAL. System zapewni:

- integrację danych technicznych, eksploatacyjnych i diagnostycznych pozyskiwanych z wielu źródeł,
- możliwość wprowadzania zmian w zaimplementowanych w systemie modelach oceny ryzyka awarii poszczególnych elementów linii, tak, aby umożliwić ich ulepszanie wraz ze zdobywaniem dodatkowej wiedzy w procesie eksploatacji,
- archiwizację danych historycznych, nawet o liniach zlikwidowanych,
- wspieranie wymiany danych z systemami diagnostycznymi, ograniczając pracochłonność gromadzenia danych,
- możliwość dokonywania analiz wielokryterialnych, służących do wsparcia zarządzania siecią kablową SN.



Rys. 3. Schemat blokowy systemu SORAL

## 2.2. Obszar demonstracyjny

Obszar pilotażowy został wybrany w taki sposób, aby nowe rozwiązanie można było zastosować w końcowym etapie dla całej sieci kablowej SN. Obszar pilotażowy obejmuje blisko 300 km linii kablowych SN (Rejon Dystrybucyjny Elbląg). Rejon ten zapewnia dostęp do linii kablowych wszystkich typów używanych obecnie w sieci Energa Operator SA (PILC, XLPE, PE), w różnym wieku i pracujących w różnych warunkach technicznych. Pomiar wnz przeprowadzany był na tym obszarze od 2003 roku.

W tym obszarze przeprowadzono pierwsze pomiary diagnostyczne w sieci kablowej w Polsce.

Ważnym elementem badawczym projektu jest wykonanie dodatkowych pomiarów diagnostycznych. Pomiary te zostały zaplanowane na 12 miesięcy. Pomiary rozpoczęto już w styczniu 2019 roku wg przygotowanego wcześniej planu. Minimalna liczba linii kablowych poddanych pomiarom wynosi 250. Plan obejmuje pomiary różnych rodzajów kabli. Po wstępnej analizie historycznych danych pomiarowych, informacji o awariach i informacjach technicznych wybrano linie o wysokim prawdopodobieństwie pogorszenia stanu izolacji w wyniku procesu starzenia. Pod koniec 2018 roku zakupiono nowy system diagnostyczny do pomiaru wyładowań niezupełnych i tangens delta. Wykorzystuje się aparaturę korzystającą z obu napięć probierczych tj. VLF i DAC.



Rys. 4. Wóz pomiarowy do prób napięciowych DAC i VLF

Prowadzone badania diagnostyczne są uzupełnieniem doświadczenia zdobytego podczas wcześniejszych pomiarów diagnostycznych, przeprowadzanych od 2003 roku. Wraz z danymi historycznymi dostarczą one zbiorów danych obejmujących bardzo długi okres eksploatacji linii, tj. lata 2003–2019.

Obecne pomiary dostarczają danych, które przy kolejnym zadaniu pozwalają m.in. na obserwację zmian parametrów wyładowań niezupełnych (wynikających ze starzenia procesów izolacji linii kablowych), weryfikację kryteriów oceny stanu izolacji za pomocą pomiaru tangens delta, weryfikację możliwości porównania wyników pomiaru wyładowań niezupełnych, otrzymanych przy użyciu dwóch różnych napięć testowych (VLF, DAC).

Pozyskiwane dane przygotowywane są do analizy, w tym celu gromadzone są w specjalnej bazie danych a system informatyczny automatyzuje ich pozyskiwanie. Zebrane w ten sposób dane umożliwią prowadzenie analizy i badań statystycznych.

W kolejnym etapie zostaną przeprowadzone analizy matematyczne i dodatkowe badania laboratoryjne próbek izolacji kabli w celu oceny skali procesów starzenia oraz kryteria oceny stanu technicznego poszczególnych linii kablowych SN. Modele zostaną opracowane dla ważniejszych elementów linii kablowych. Kluczowe znaczenie będzie miało określenie takich modeli dla sekcji kablowych izolowanych PILC i XLPE. W tych dwóch typach kabli procesy starzenia odbywają się inaczej i mają różne wartości zmierzonych parametrów podczas testów diagnostycznych.

### 2.3. System IT

Głównym produktem projektu będzie system informatyczny SORAL, który ma być odpowiedzialny za:

- przygotowanie danych wejściowych,
- przechowywanie pomiarów i modelu sieci,
- obsługę modelu obliczeniowego,
- analizę danych,
- geograficzną wizualizację wyników.

Dzięki systemom GIS i SCADA dane będą wymieniane w standardzie CIM, natomiast dedykowany interfejs będzie przygotowany do automatycznej wymiany danych między systemem SORAL a sprzętem diagnostycznym (rysunek 3).

Oprócz przechowywania i prezentacji aktualnych danych SORAL umożliwi mapowanie zmian wprowadzonych w sieci. Wizualizowane będą zarówno zmiany lokalizacji przebiegu sieci, jak i miejsca wymiany odcinków kablowych. Dzięki temu możliwe będzie przechowywanie danych historycznych o sieci, a także danych pomiarowych i obliczeń dokonanych w różnych punktach czasowych skorelowanych z odpowiednim stanem sieci.

Docelowo system będzie gromadził dane pomiarowe i informacje o zmianach w sieci. Umożliwi to utworzenie historii pomiarów skorelowanych z odpowiednim układem sieci. Dane te będą podstawą do analizy i systematycznej poprawy modeli oceny stanu elementów sieci kablowej.

Kolejną zaletą systemu będzie możliwość zapamiętania zmian zachodzących w sieci, zarówno tych związanych z parametrami technicznymi, jak i przebiegiem lub rekonfiguracją. Dzięki temu będzie możliwe zaprezentowanie sieci, poza obecnym stanem, w dowolnym momencie w przeszłości. Daje to możliwość szczegółowej analizy nie tylko danych historycznych i bieżących, ale także prognozowania i przewidywania przyszłych zdarzeń.

Ważnym elementem systemu SORAL będzie model obliczeniowy, który na podstawie pomiarów (częściowe wyładowania i tangens delta) będzie rejestrował zdarzenia w sieci. Przewiduje się, że w przyszłości, oprócz danych wspomnianych powyżej, uwzględnione zostaną również warunki środowiskowe, reprezentowane przez takie parametry, jak na przykład rodzaj gleby lub pH gleby.

Zbiór tych danych pozwoli na wdrożenie mechanizmu znormalizowanego Health Index dla poszczególnych elementów linii kablowych, pozwalając określić ryzyko awarii ze względu na stan izolacji.

### 3. PODSUMOWANIE

Projekt SOLAR obejmuje badania przemysłowe i prace rozwojowe i jego realizacja została zaplanowana na lata 2018-2021. Projekt uzyskał dofinansowanie w środków NCBR w ramach programu sektorowego.

Informatyczny system SORAL będzie eksperckim narzędziem, które ma umożliwić zmianę strategii zarządzania siecią kablowa SN. Obecna strategia Corrective Maintenance zostanie zastąpiona przez strategię Condition Based Maintenance, opartą na prewencyjnych działaniach zależnych od stanu technicznego linii kablowych SN. System umożliwi podejmowanie działań prewencyjnych ograniczających liczbę awarii. Działania te będą polegały na wymianie elementów o największym ryzyku awarii. Linie kablowe SN będą mogły być planowane do wymiany na podstawie analizy ryzyka awarii (przed wystąpieniem awarii). Prace będą mogły być ograniczone do fragmentów o złym stanie, a nie całej linii kablowej. Mając wiedzę o stanie kabla, będzie można prognozować dalszy czas życia kabla. W obszarach zurbanizowanych będzie możliwe skorelowanie prac modernizacyjnych z innymi pracami budowlanymi w celu ograniczenia kosztów, jeśli wymiana kabla będzie potrzebna w przewidywalnym czasie.

### 4. BIBLIOGRAFIA

1. S. Noske, A. Rakowska, K. Siodla, "Investigation of MV Power Cable Lines Using DAC Method for Assessment of the Technical Conditions of the Lines", ICHVE 2018, September, 2018, Athena.
2. S. Noske, A. Rakowska, "Off-line partial discharge measurements as a new data source about the technical condition of MV cables", ICHVE September 2014, Poznan, Poland.
3. S. Noske, A. Rakowska, "Partial discharge measurements as a source of information about the technical condition of PILC insulated MV cables, CIGRE, June 2013, Stockholm
4. S. Noske, A. Rakowska, "Application of diagnostics based on partial discharge measurements to assess the technical condition of PILC insulated MV cables", CIGRE International Conference on Electricity Distribution, Paris, 2012.

## **SORAL - SYSTEM FOR CONDITION MONITORING AND FAILURE RISK ASSESSMENT OF MV CABLE LINES BASED OF OFF LINE DIAGNOSTIC METHODS**

The article describes the current experience in applying the diagnostics of MV cable lines in the DSO and the ongoing SORAL project. Diagnostic systems which measure partial discharges and tan delta in MV lines have been used in Poland since the turn of the century. Research work so far has focused on MV cables and on attempts to define key parameters which would indicate advanced ageing processes. The measurements and analyses conducted so far have not enabled the formulation of assessment criteria for failure risk. However, key parameters indicating the increase in the failure risk have been identified. The research up to now is a valuable contribution to the process of creating assessment criteria for failure risk, using the IT system which automates this process. This task is carried out now in the SORAL project. The project is implemented by DSO (ENERGA-OPERATOR) and IT Company (Globema) consortium and is financed from EU funds.

**Keywords:** Diagnostic measurements of cables, partial discharges, tangent delta measurements, health Index.