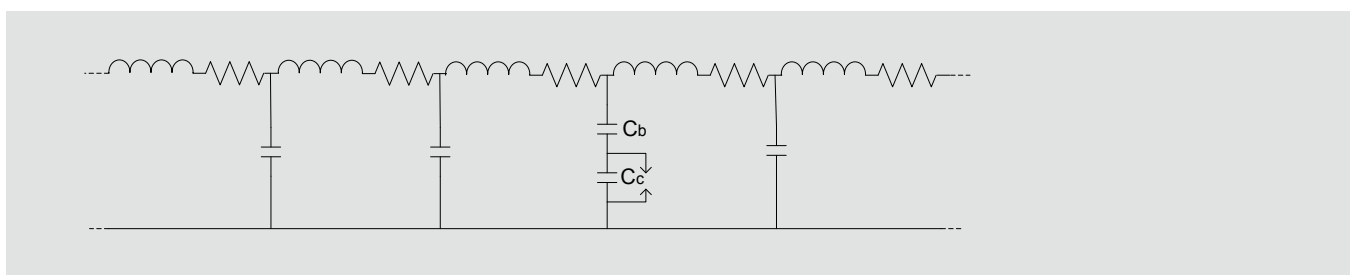


POMIAR WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W LINIACH KABLOWYCH ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

mgr inż. Sławomir Noske / ENERGA-OPERATOR S.A. Oddział w Elblągu

WYŁADOWANIA NIEZUPEŁNE

Wyładowanie niezupełne jest przestrzennie ograniczonym wyładowaniem elektrycznym częściowo mostkującym izolację. Spowodowane jest miejscową koncentracją naprężeń w izolacji lub na jej powierzchni. Gdy lokalnie pole przekroczy wartość napięcia inicjującego wyładowanie, w obecności elektronu startowego formuje się w lawinę elektronów. Schemat zastępczy kabla z wtrąciną, w której występuje wyładowanie niezupełne, przedstawia rys. 1. Przebieg wyładowania niezupełnego jest zróżnicowany, zależny między innymi od typu materiału izolacyjnego, geometrii wtrącin i ich lokalizacji.



Rys. 1. Schemat zastępczy linii kablowej z wtrąciną w izolacji, odwzorowaną przez pojemność C_c , C_b jest pojemnością odwzorowującą część izolacji, usytuowaną szeregowo z wtrąciną

Stopień zagrożenia wynikający z powstawania wyładowań zależy między innymi od rodzaju zastosowanej izolacji. Występowanie wyładowań niezupełnych może świadczyć o pogarszającym się stanie izolacji. Pogłębianie degradacji następuje także w wyniku samych wyładowań niezupełnych, tzn. poprzez wzajemne oddziaływanie produktów rozkładu od wyładowań niezupełnych oraz materiału izolacyjnego. Ponieważ wyładowania niezupełne, powstałe na skutek pogorszenia się stanu izolacji, są zjawiskiem szkodliwym i mogą występować w sposób ciągły, stają się one często przyczyną awarii. Wyładowania niezupełne stanowią zagrożenia dla izolacji, zarówno poprzez działanie elektronów o wysokiej energii, np. mogą przerywać wiązania chemiczne w polimerach, jak i oddziaływanie agresywnych produktów rozkładu chemicznego powstałych w wyniku rozerwania molekuł.

Streszczenie

Linie kablowe SN stanowią istotny składnik majątku sieciowego przedsiębiorstw dystrybucyjnych. Za pomocą tych linii zasilane są obszary najbardziej zurbanizowane, tereny gdzie odbiorcy są szczególnie wrażliwi na przerwy w dostawie energii elektrycznej, a skutki usuwania awarii wiążą się ze znacznymi kosztami. Dotychczasowe zarządzanie tą siecią oparte było głównie na analizie awaryjności. Wzrastająca liczba awarii była czynnikiem decydującym w ocenie stanu technicznego linii kablowych.

Rozwój aparatury pomiarowej pozwala na dokonywanie nowych badań w eksploatowanych sieciach kablowych, poszerzając wiedzę o ich stanie technicznym. Dzięki uzyskanym informacjom można zmienić dotychczasowy sposób działania i zarządzania siecią kablową. Można go oprzeć na procesie badania stanu technicznego izolacji poszczególnych

elementów linii kablowej. Do takich nowoczesnych metod pomiarowych można zaliczyć pomiar wyładowań niezupełnych.

POMIAR WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Wyładowania niezpełne były postrzegane jako szkodliwe dla izolacji już na początku XX wieku, w czasie gdy rozpoczynano stosować urządzenia wysokiego napięcia. Pierwsze przemysłowe testy wyładowań niezpełnych wykonano już w 1940 roku.

Rozwój informatyczny i technologiczny w ostatnich dekadach XX wieku pozwolił na budowę przewoźnych urządzeń dających możliwość pomiaru wyładowań niezpełnych w eksploatowanych sieciach energetycznych.

Jednym z rozwiązań pozwalających mierzyć wyładowania niezpełne (wnz) w liniach kablowych średniego napięcia jest system pomiarowy OWTS-25 firmy SEBA KMT. OWTS jest obecnie wykorzystywany przez ENERGA-OPERATOR S.A. Oddział w Elblągu.

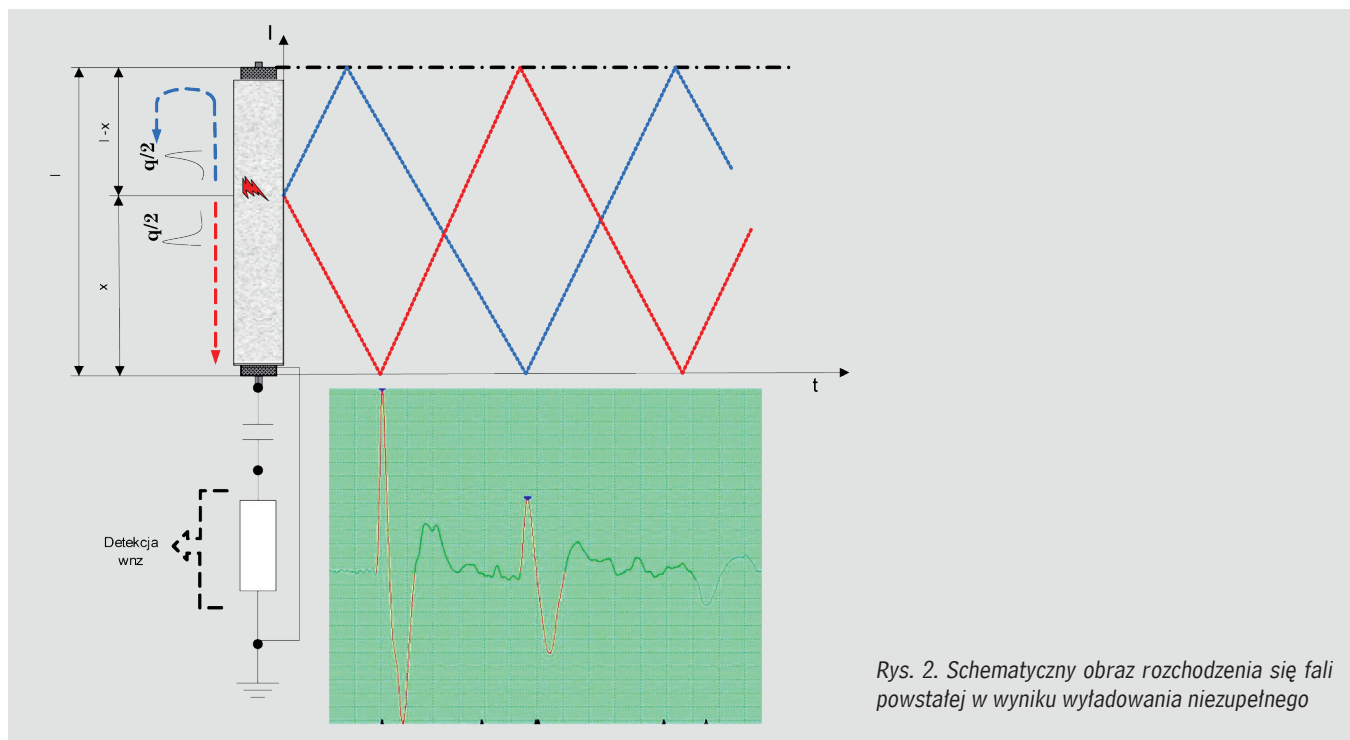


Fot. 1. Wóz pomiarowy z zainstalowanym systemem OWTS-25

System ten wykorzystuje jako napięcie probiercze samogasnącą falę napięciową. Wytwarzana jest ona poprzez ładowanie badanego kabla do pożądanego napięcia, a następnie rozładowanie go przez specjalnie zaprojektowaną cewkę bezrdzeniową. Częstotliwość napięcia zależna jest od pojemności kabla i indukcyjności cewki. W praktyce, dla badanych linii kablowych mieści się ona w granicach 200–800 Hz. Tłumienie zanikającej amplitudy napięcia związane jest ze stratami dielektrycznymi w badanym kablu.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

OWTS mierzy falę napięciową powstałą od ładunku indukowanego podczas wyładowania niezpełnego. Fala napięciowa rozchodzi się w dwóch kierunkach. Aparatura mierzy falę biegnącą w kierunku końca z podłączoną aparaturą (fala napięciowa proporcjonalna do wartości ładunku powstałego podczas wnz), a następnie falę odbitą od drugiego końca kabla. Pomiar różnicy czasu między pomierzonymi falami pozwala określić miejsce wystąpienia wyładowania niezpełnego (rys. 2). Dokonana przed pomiarem kalibracja pozwala na wyskalowanie aparatury i pomiar intensywności wyładowania wnz w pikokulombach (pC). Kalibracja dokonywana jest zgodnie z PN-EN 60270 (tłumaczenie międzynarodowej normy IEC 60270).

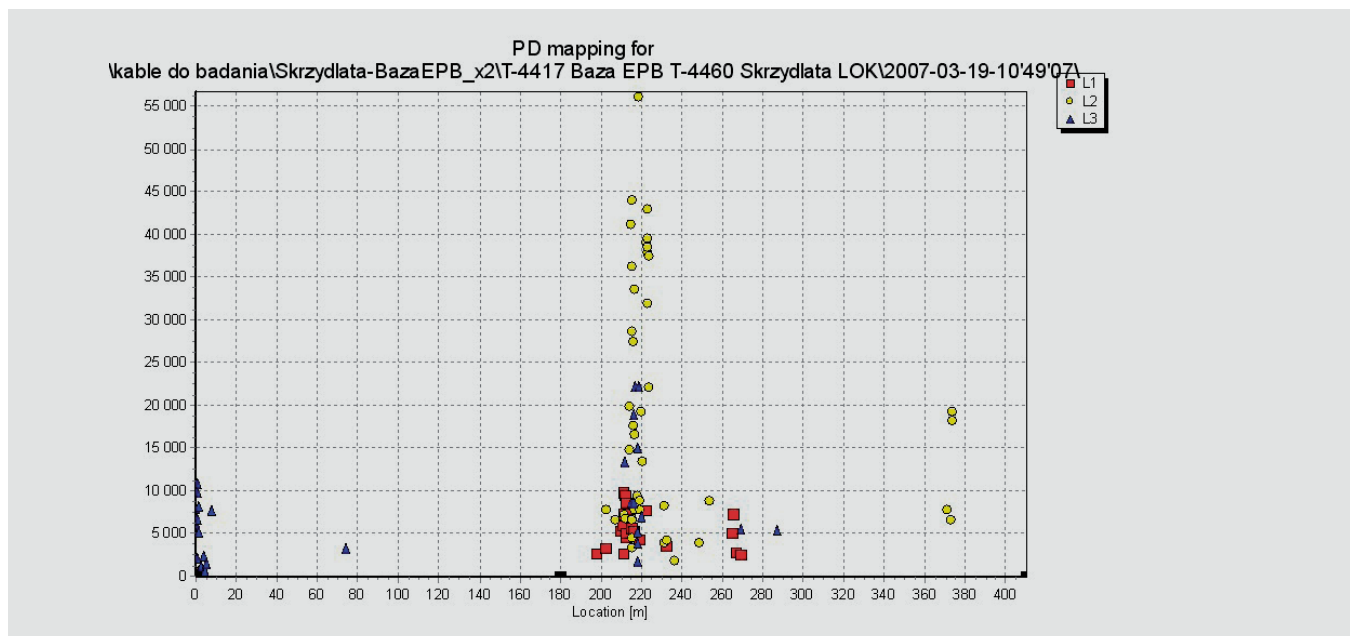


$$\begin{aligned}
 t_1 &= \frac{x}{v} \\
 t_2 &= \frac{l-x}{v} \\
 \Delta t &= t_2 - t_1 \\
 x &= \frac{l - v \times \Delta t}{2}
 \end{aligned}$$

ANALIZA I DIAGNOZA WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Analiza wyników pomiaru dokonanych systemem OWTS dostarcza informacji o rozkładzie wyładowań w funkcji długości kabla. Do podstawowych informacji uzyskanych z analizy należą:

- Napięcie początkowe wyładowań niezupełnych
- Wartość średnia i maksymalna ładunku pozornego przy napięciu początkowym wyładowań niezupełnych. „Ładunek pozorny impulsu wnz odpowiada ładunkowi, który wstrzyknięty w bardzo krótkim czasie między zaciski obiektu badanego spowodowałby takie samo wskazanie przyrządu pomiarowego jak impuls wnz. Ładunek pozorny jest wyrażany w pikokulombach (pC) [3]”
- Wartość średnia i maksymalna ładunku pozornego przy napięciu probierczym o wartości U_0
- Częstotliwość występowania wnz przy napięciu probierczym o wartości U_0
- Wartość średnia i maksymalna ładunku pozornego przy napięciu probierczym zawierającym się między U_0 a $2U_0$
- Częstotliwość występowania wnz przy napięciu probierczym zawierającym się między U_0 a $2U_0$
- Wykresy z rozkładem wyładowań w funkcji długości kabla (rys. 3)
- Anomalia na odcinkach kablowych w poziomie i ilości wnz przy napięciu probierczym do wartości U_0 oraz zawierającym się między U_0 a $2U_0$. Parametr ten nie jest automatycznie określany w procesie analizy pomiarów. Określa go osoba analizująca wyniki pomiarów na podstawie otrzymanych wykresów rozkładu wyładowań w funkcji długości kabla. Jako anomalie przyjmuje się zwiększony poziom wyładowań niezupełnych w danym fragmencie odcinka kablowego, wyraźnie odbiegający od poziomu wyładowań w pozostałej części odcinka. W tym przypadku podawana jest maksymalna wartość wyładowań niezupełnych oraz miejsce jego występowania.



Rys. 3. Przykładowe wyniki pomiarów. Widoczne wyładowania niepełne na ok. 210 m do 230 m linii (rozkład wyładowań w funkcji długości kabla z podziałem na każdą z faz – każdy punkt to pojedyncze wnz, wartość wyładowań w pC)

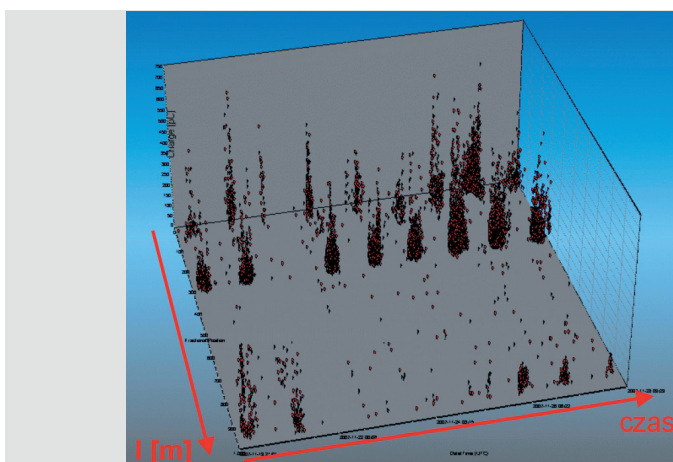
Wyniki analizy otrzymane w funkcji długości kabla pozwalają zobaczyć linię kablową taką, jaka jest, tzn. jako obiekt liniowy. Jest to nowa jakość w pomiarach linii kablowych.

Analiza wyników pomiaru wnz dostarcza unikatowego zbioru danych. Na podstawie interpretacji danych można przedstawić diagnozę dotyczącą stanu technicznego poszczególnych elementów linii.

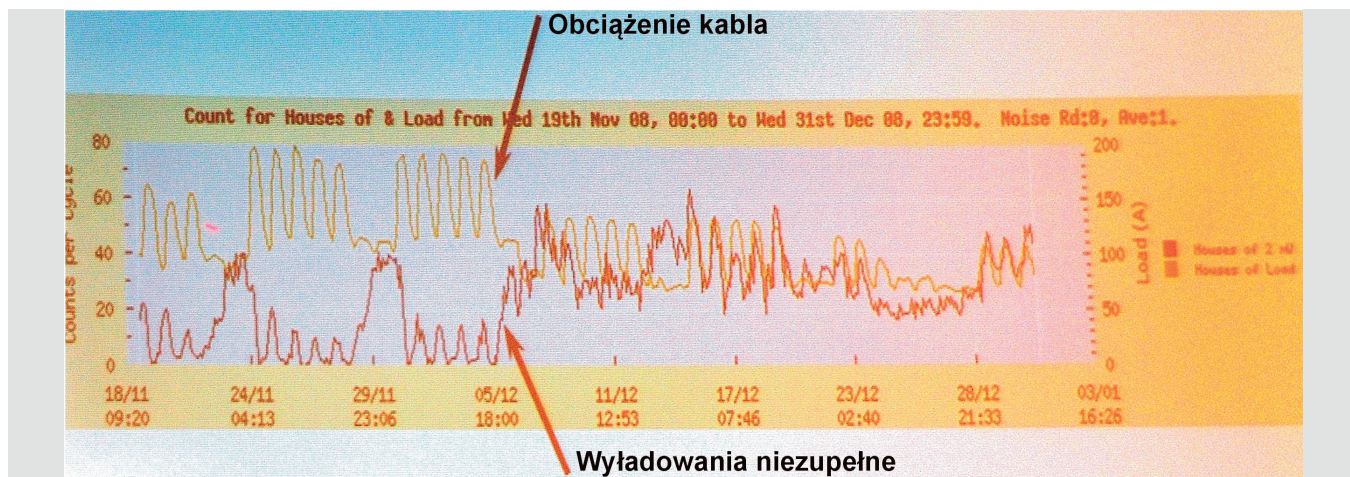
WYŁADOWANIA NIEZUPEŁNE W KABŁACH PILC

W firmie ENERGA-OPERATOR SA Oddział w Elblągu kable tego typu stanowią ok. 65% obecnie eksploatowanych kabli średniego napięcia. Obecnie nie buduje się już nowych linii kablowych PILC, stosuje się wyłącznie kable XLPE. Tak więc dla kabli PILC celem diagnostyki wyładowań niepełnych jest ocena stanu technicznego izolacji istniejących linii i śledzenie procesów starzeniowych.

W kablach tego typu mogą występować wyładowania niepełne, a ich ilość i wartość jest zmienna w czasie. Zjawisko to można zaobserwować dzięki dokonywanym on-line pomiarom wyładowań niepełnych w sieci średniego napięcia. Rys. 4 przedstawia przykładowy graf 3D rozkładu wyładowań w funkcji długości kabla i czasu, otrzymany z pomiaru wnz w Holandii.



Rys. 4. Diagram 3D przedstawiający rozkład wyładowań niepełnych w funkcji długości w pomiarze on-line, dokonywanym w czasie 8 dni (wyraźne zmiany poziomu wyładowań w funkcji czasu)

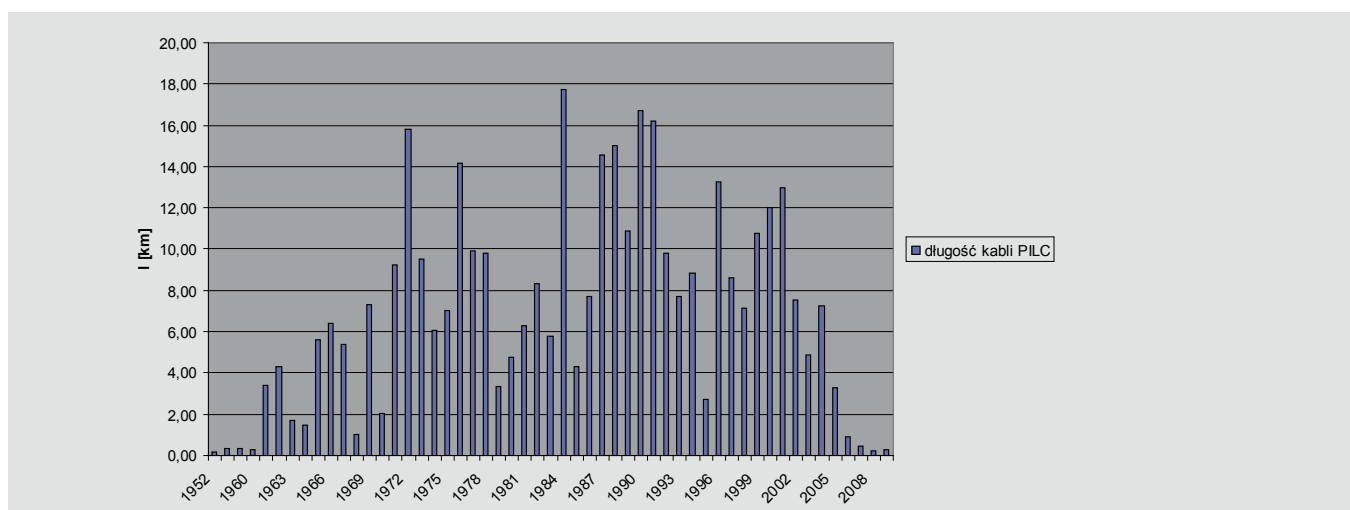


Rys. 5. Zmiana poziomu wyładowań niezupełnych w zależności od poziomu obciążenia kabla

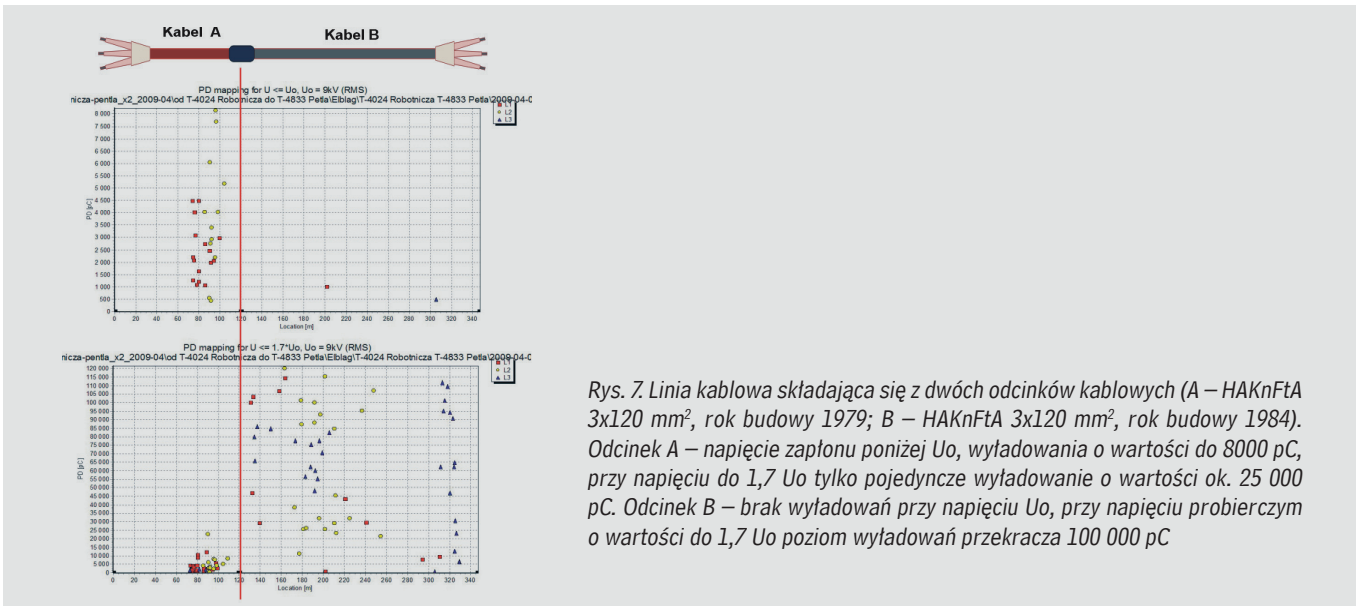
Na rys. 5 można zaobserwować zależność między obciążeniem kabla a wartością wyładowań niezupełnych. Poziom wnz rośnie w momencie, gdy obciążenie (temperatura i ciśnienie wewnątrz kabla) spada.

Starając się zdiagnozować stan techniczny linii kablowych PILC na podstawie pomiaru wyładowań niezupełnych, należy wiedzieć, że:

- Dopuszczalne jest występowanie wyładowań niezupełnych w izolacji linii kablowej, najczęściej mają one charakter rozproszony
- Poziom wyładowań i ich intensywność są zmienne w czasie i zależne od poziomu obciążenia kabla. Utrudnia to w znaczny sposób śledzenie zmian wynikających z pogarszania się stanu izolacji
- Z praktycznych doświadczeń widać, że poziom wyładowań jest uzależniony od jakości kabla. Z pewnością czynnikiem wpływającym na jakość kabli była w przeszłości sytuacja ekonomiczna w kraju. W konsekwencji nie zawsze starsze kable charakteryzują się wyższym poziomem wnz (strukturę wiekową linii kablowych PILC pokazano na rys. 6). Przykład linii składającej się z dwóch odcinków kabla z różnych lat (o różnych poziomach i intensywności wnz) przedstawia rys. 7.



Rys. 6. Długość kabli PILC zabudowanych w sieci kablowej SN w poszczególnych latach w ENERGA-OPERATOR S.A. Oddział w Elblągu

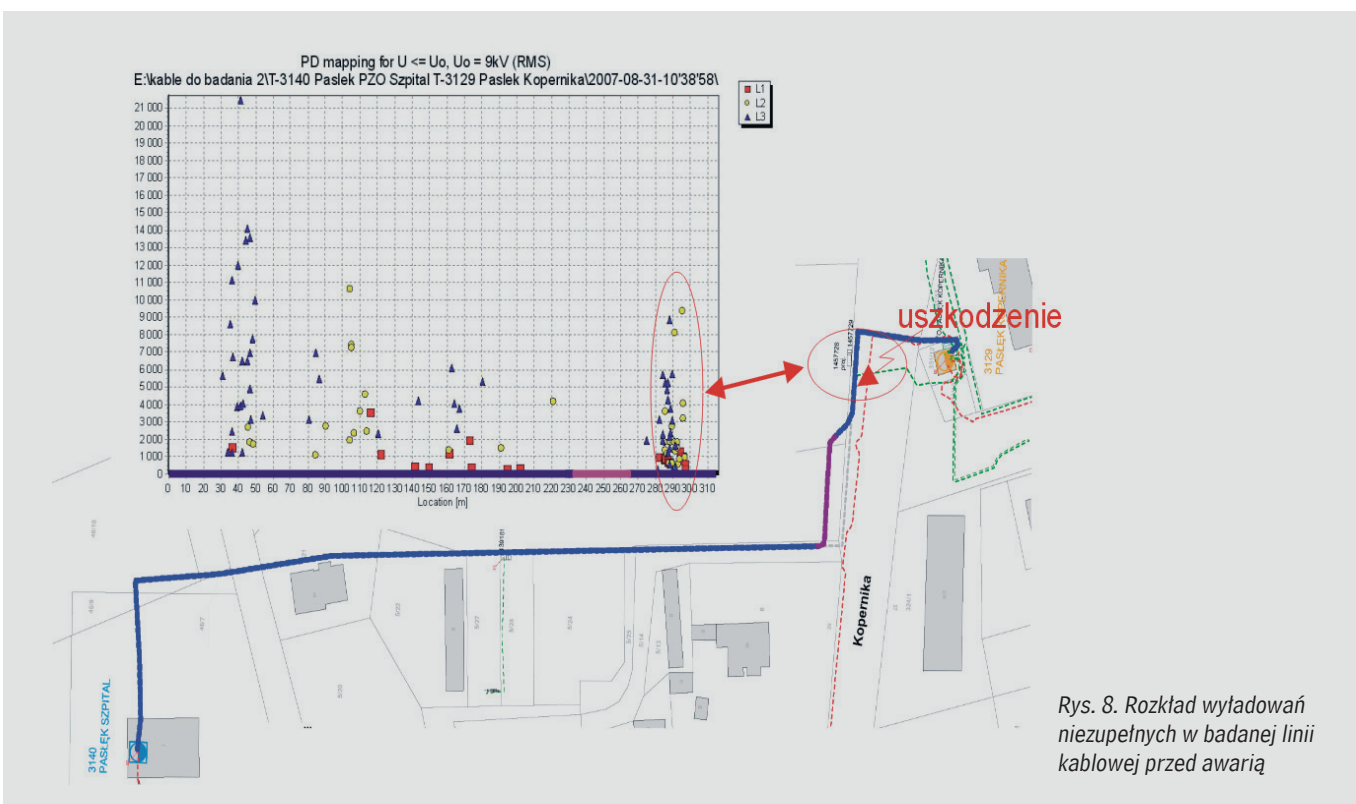


Powyższe przedstawione zjawiska powodują, że diagnozowanie stanu izolacji tych kabli jest bardzo trudne i wymaga dużego doświadczenia. Trudno, na obecnym etapie badań, przyjąć standardowe wartości wnz, których przekroczenie mogłoby być podstawą decyzji eksploatacyjnych (wymiany wadliwego odcinka, elementu linii). W ocenie stanu technicznego tych kabli należy w sposób szczególny zwrócić uwagę na anomalie. Jako anomalie traktowane są miejsca o podwyższonym poziomie wnz.

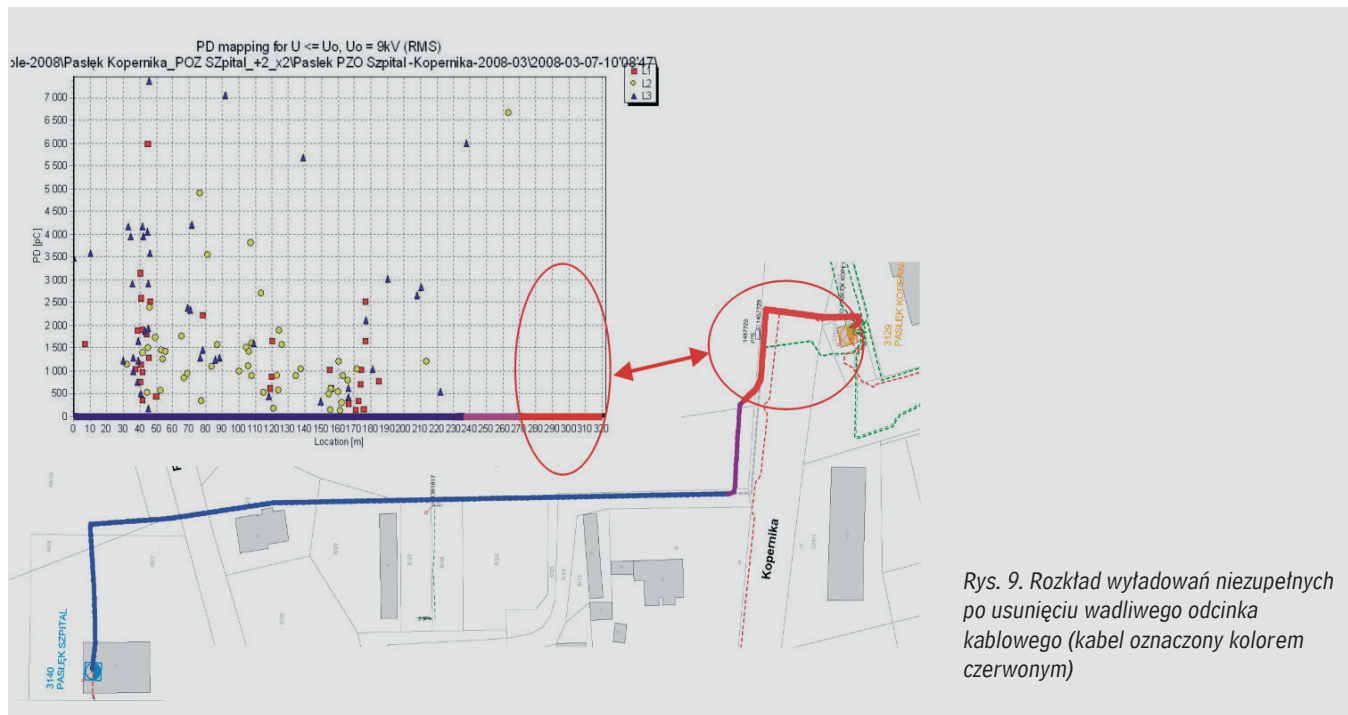
Mimo braku opracowanych jednoznacznych zasad oceny stanu izolacji PILC, można już dzisiaj wspomagać decyzje eksploatacyjne. Poniżej przykład linii kablowej, gdzie po awarii, na podstawie pomiaru wnz, zdecydowano się na wymianę odcinka kabla. Nie ograniczono się do wykonania mufy naprawczej. Celem tego działania prewencyjnego było zapobieżenie dalszym awariom.

Przykład 1

Linia kablowa HAKnFta 3x120 mm², plan trasy linii oraz wyniki dokonanej analizy wnz przedstawia rys. 8. Na kablu, przy napięciu U_0 , występują dwa miejsca ze wzmożonym poziomem wnz (30–50 m i 280–300 m).



Linia uległa uszkodzeniu na ok. 290 metrze. Na podstawie danych została podjęta decyzja o wymianie całego odcinka kabla, od mufy na 260 metrze do głowicy w stacji. W ramach naprawy nie ograniczono się wyłącznie do wykonania mufy naprawczej. Wyniki dokonanego pomiaru wnz po naprawie przedstawione zostały na rys. 9. Brak jest wyładowań na wymienionym odcinku kablowym – usunięto potencjalne miejsce kolejnej awarii.



Rys. 9. Rozkład wyładowań niezupełnych po usunięciu wadliwego odcinka kablowego (kabel oznaczony kolorem czerwonym)

WYŁADOWANIA NIEZUPEŁNE W KABLACH XLPE

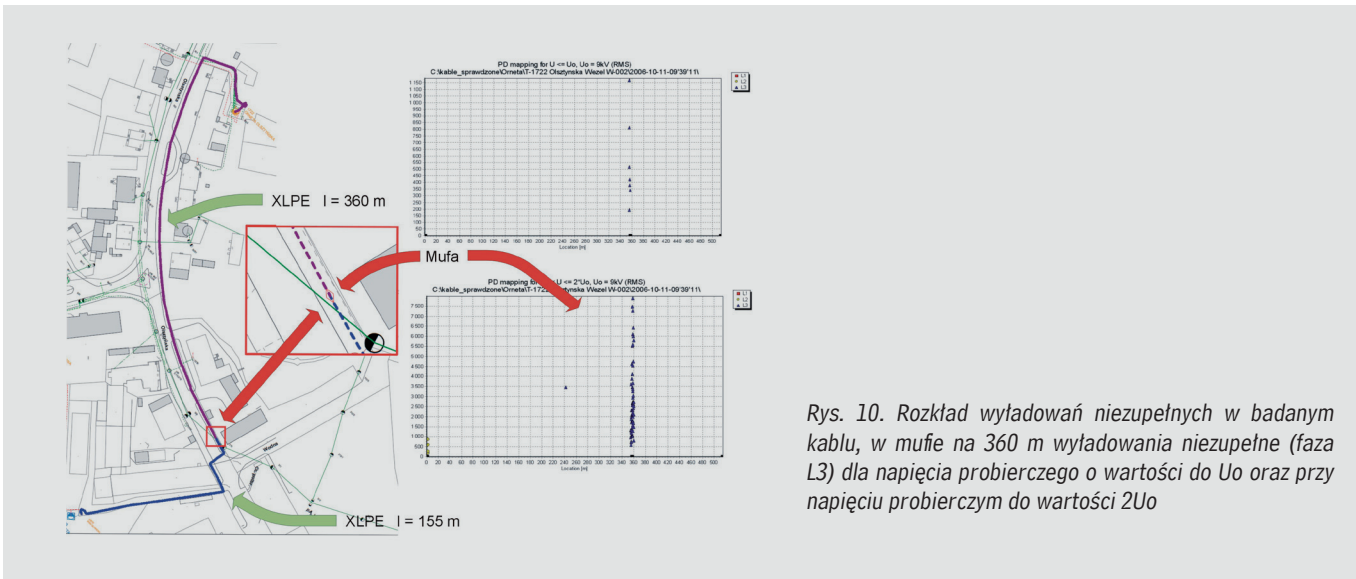
Izolacja tych kabli powinna być wolna od wyładowań niezupełnych. Pojawiające się wyładowania wskazują na wadę w kablu lub osprzęcie. Ze względu na krzywą histerezy przy zapłonie i gaśnięciu wnz dla tych kabli, groźne mogą okazać się także wyładowania pojawiające się przy napięciu powyżej napięcia pracy. W przypadku zapłonu wyładowań niezupełnych przy wyższym napięciu niż napięcie znamionowe (np. przepięcie w sieci) wnz mogą nie zgasnąć przy powrocie do napięcia pracy (napięcie gaśnięcia mniejsze od napięcia zapłonu). Należy być świadomym, że nie we wszystkich przypadkach pomiar wnz pozwoli wykryć wady izolacji, trudności mogą się pojawić w przypadku drzewienia wodnego. Zjawisko to w sposób szczególny ujawnia się w eksploatowanych liniach kablowych z polietylenu niesieciowanego. Obecność wilgoci przyspiesza proces degradacji izolacji, powodując uszkodzenia kabla.

Mimo tych trudności pomiar wnz daje nowe możliwości uzyskania pełniejszej wiedzy o stanie tych linii kablowych. Odnosi się to szczególnie do kontroli jakości budowanych nowych linii kablowych. Poniżej przedstawiony został jeden z przykładów odkrycia wadliwego wykonania mufy w linii kablowej. Wada taka nie mogłaby być wykryta inną metodą pomiarową.

Przykład 2

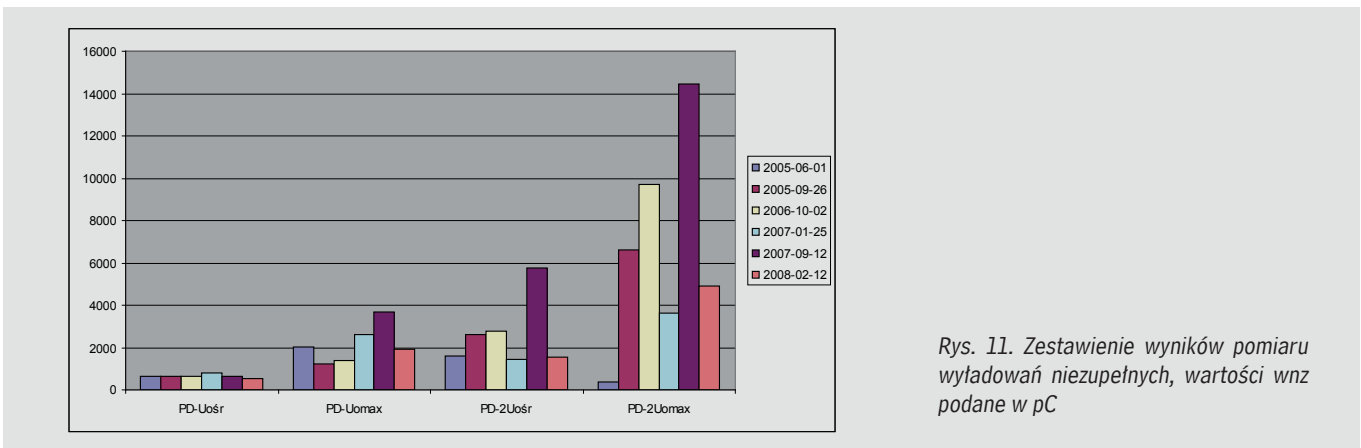
Linia wykonana kablem XRUHAKXS 120 mm² o łącznej długości 515 m, składająca się z dwóch odcinków (360 m + 155 m) połączonych mufami firmy RAYCHEM typ POLJ-24, zakończona głowicami firmy RAYCHEM typ POLT-24. Przed wprowadzeniem kabla do ruchu wykonano próbę napięciową i pomiar szczelności powłoki. Wyniki tych pomiarów były pozytywne. Biorąc pod uwagę, że cały proces układania kabla był w pełni nadzorowany przez służby eksploatacyjne rejonu energetycznego oraz że montażu osprzętu dokonały osoby przeszkolone i z dużym doświadczeniem, można było uznać, że linia wolna jest od wad.

Pomiar wyładowań niezupełnych wykazał jednak wadę – wysoki poziom wyładowań na 360 metrze linii na fazie L3 (rys. 10).



Rys. 10. Rozkład wyładowań niepełnych w badanym kablu, w mufie na 360 m wyładowania niepełne (faza L3) dla napięcia probierczego o wartości do U_o oraz przy napięciu probierczym do wartości $2U_o$

Wyładowania niepełne wystąpiły w miejscu mufowania dwóch odcinków kablowych. Wskazuje to na wadę mufy na fazie L3. Wyładowania niepełne powstają już przy napięciu U_o , co stwarza zagrożenie wystąpienia awarii. Na podstawie wyjaśnień wykonawców muf ustalono prawdopodobną przyczynę wady: w trakcie montażu popełniono błąd, nie założono płyta sterującego na złączkę. Linia została wybudowana w 2005 roku i przez 3 lata dokonywano na niej cyklicznych pomiarów. W tym okresie nie stwierdzono jednak zmian (wzrostu) wyładowań, linia nie uległa uszkodzeniu. Należy przyjąć, że ewentualny proces degradacji izolacji w tym przypadku następował bardzo wolno. W celu kontroli poprawności uzyskanych wyników przeprowadzono dodatkowe badania w laboratorium wysokich napięć Politechniki Poznańskiej (odcinek z wadliwą mufą został wycięty). Badania zostały wykonane z wykorzystaniem aparatury firmy James G. Biddle Co. Badania potwierdziły wyniki otrzymane za pomocą aparatury OWTS.

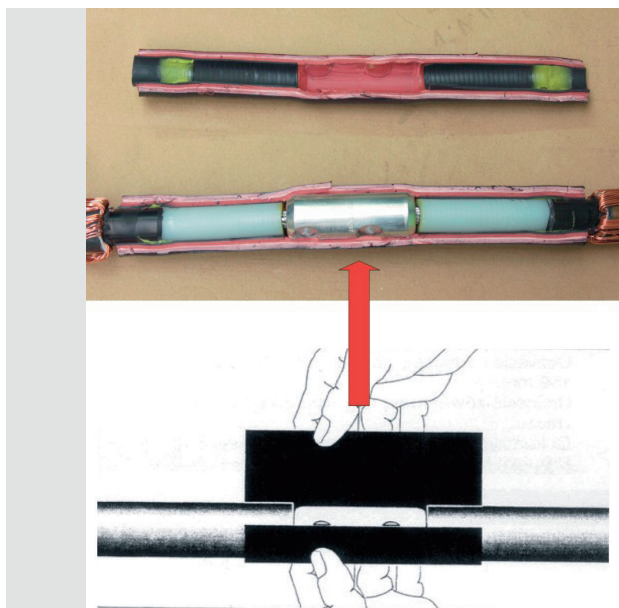


Rys. 11. Zestawienie wyników pomiaru wyładowań niepełnych, wartości wnz podane w pC

W laboratorium udało się zarejestrować wyładowania o wartości kilkudziesięciu pC (przy badaniach w terenie udaje się odczytać wyładowania o wartości kilkuset pC). Przy tych wartościach napięcie początkowe wyładowań okazało się znacznie niższe niż U_o (4 kV).



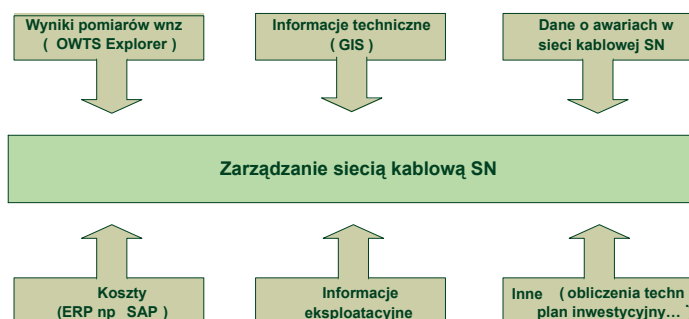
Fot. 2. Obraz wyładowań niepełnych w trakcie badania wadliwej mufy aparaturą firmy James G. Biddle Co.



Rys. 12. Wykryta wada w mufie – nie został zamontowany płat sterujący

SPODZIEWANE EFEKTY Z UDOSKONALENIA PROCESU ZARZĄDZANIA LINIAMI KABLOWYMI SN

Wdrożenie diagnostyki wyładowań niezupełnych do oceny stanu technicznego linii kablowych SN powinno być związane ze zmianą obecnego sposobu zarządzania. Ważne jest, aby przy ocenie stanu technicznego brać pod uwagę także inne informacje otrzymane w czasie eksploatacji sieci (rys. 13).



Rys. 13. Model integracji danych (systemów informatycznych) w celu zgromadzenia pełnej wiedzy o sieciach kablowych

Nowy system zarządzania siecią kablową pozwoli doprowadzić do ograniczenia kosztów zarządzania tym istotnym składnikiem majątku poprzez:

- Ograniczenie kosztów eksploatacyjnych wskutek zmniejszenia liczby awarii. Dzięki obserwacji procesu starzenia się poszczególnych elementów linii kablowych podejmowanie decyzji o działaniach prewencyjnych (wymiana odcinków z osłabioną izolacją przed wystąpieniem awarii)
- Podniesienie jakości wykonywania nowych linii kablowych. Metoda pomiarowa pozwala odkryć błędy montażowe i nieprawidłowości w wykonaniu linii, które dotychczas były niewykrywalne, a w rezultacie pozwala eliminować te błędy (usunięcie niewłaściwie wykonanych elementów przed odbiorem). Świadomość możliwości kontrolnych podnosi jakość wykonywanych prac
- Ograniczenie kosztów inwestycyjnych oraz remontowych poprzez prawidłowe ustalenie priorytetów i zakresu prac (nie zawsze potrzebna jest wymiana całego kabla, można ograniczyć się tylko do wadliwych elementów) oraz przesunięcie części inwestycji i remontów w czasie, dzięki rzetelnej wiedzy o stanie izolacji każdego z elementów sieci (obserwowanie procesu życia linii kablowej).

Podejmowane działania pozwalają zapewnić wysoki poziom niezawodności sieci kablowej średnich napięć i w ten sposób zwiększają zadowolenie oraz zaufanie odbiorców energii. Dzięki ograniczeniu liczby awarii możliwe będzie zapewnienie odpowiedniego standardu obsługi klientów, wymaganego zarówno przez prawo zewnętrzne, jak i normy i standardy zakładowe.



BIBLIOGRAFIA

1. Gulski E., Diagnostowanie wyladowań niezupetnych w urzadzeniach wysokiego napiecia w eksploatacji, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003.
2. Guide for partial discharge measurements in compliance to IEC 60270, CIGRE Working Group D1.33, 2008.
3. Noske S., Efektywne zarzadzanie siecia kablowa SN, *Elektro-info*, 2009, nr 1-2.
4. Noske S., Wykorzystanie diagnostyki opartej o pomiar wyladowań niezupetnych do zarzadzania siecia kablowa sredniego napiecia, Konferencyjne Infotech 2008.
5. PN-EN 60270, Wysokonapieciowa technika probiercza. Pomiar wyladowań niezupetnych, PKN, Warszawa 2003.
6. Rakowska A., Kryteria oceny weryfikujace jakość polietylenu usieciowanego stosowanego jako izolacja kabli elektroenergetycznych, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2000.
7. Rakowska A., Siodła K., Noske S., Wyniki badań wyladowań niezupetnych jako źródło informacji wspomagajacych zarzadzanie siecia kablowa srednich napieci, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2008, nr 10.
8. Van der Wielen P, Steennis F: First Field Experience of On-line Partial Discharge Monitoring of MV Cable Systems with Location, 20th International Conference on Electricity Distribution, Prague 2009.
9. Wester F, Condition Assessment of Power Cables using Partial Discharge Diagnosis at Damped AC Voltages, Optima Grafische Communicatie, Rotterdam 2004.