

Rola badań eksploatacyjnych kabli transmisyjnych wysokiego napięcia z zastosowaniem czułych metod diagnostycznych

Edward Gulski, Aleksandra Rakowska, Krzysztof Siodła, Przemysław Chojnowski, Jarosław Parciak

Poza pomiarami powykonawczymi nowo ułożonych kabli wysokiego napięcia szczególnej wagi nabierają pomiary i diagnostyka kabli eksploatowanych, ulegających procesom starzenia, których celem jest określenie bieżącego stanu technicznego sieci kablowej i jej zachowania w przyszłości. W artykule przedstawiono przegląd metod pomiarowych kabli oraz szeroki zakres zagadnień dotyczących diagnostyki wyładowań niepełnych w kablach wysokiego napięcia, z uwzględnieniem zasad stosowania napięć probierczych i pomiarowych oraz możliwości badań nowych i eksploatowanych kabli elektroenergetycznych.

Wielokilometrowy system izolacji, jaki stanowią elektroenergetyczne kable transmisyjne, wymaga znajomości stanu technicznego poszczególnych elementów sieci z milimetrową dokładnością. Wiedza ta ma kluczowe znaczenie dla ustalenia stopnia niezawodności danego obwodu. W szczególności wykrycie i zlokalizowanie defektów związanych z wyładowaniami w izolacji kabli elektroenergetycznych wysokiego napięcia stanowi ważną przesłankę do oceny i kwalifikacji elementów wysokiego ryzyka w sieci kablowej [1-5].

Zważywszy na poważne skutki awarii powodowanych uszkodzeniem izolacji kabli wysokiego napięcia w okresie ich eksploatacji, kable poddawane są wyczerpującym testom jakościowym po procesie produkcyjnym, z uwzględnieniem prób napięciowych połączonych z detekcją wyładowań niepełnych. Ponadto po ułożeniu kabla w terenie badania powykonawcze uwzględniają różnego rodzaju próby napięciowe [6-9], z których część może być zastosowana łącznie z diagnostyką wyładowań niepełnych (wnz) [10].

W praktyce najczęściej diagnostyka wnz jest wykonywana na kablach wyłączonych z eksploatacji na czas pomiaru (off-line). W celu wywołania zapłonu wyładowań niepełnych konieczne jest więc zastosowanie zewnętrznych źródeł zasilania. W tabeli I przedstawiono przegląd napięć stosowanych w procedurach pomiarowych i diagnostycznych kabli elektroenergetycznych.

W artykule zostaną omówione przede wszystkim pomiary off-line, wykonywane na kablach elektroenergetycznych wysokiego i najwyższego napięcia (o napięciach znamionowych od 50 do 380 kV) – zarówno nowych, jak też eksploatowanych. Odnosząc się do obecnie stosowanych metod pomiarowych i zaawansowanych technik diagnostycznych, artykuł przedstawia przegląd doświadczeń w zakresie badań eksploatacyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem pomiarów wyładowań niepełnych.

Dr inż. Edward Gulski – Delft University of Technology, Holandia;

Instytut Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej

dr hab. inż. Aleksandra Rakowska, prof. PP – Instytut Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej

dr hab. inż. Krzysztof Siodła – Instytut Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej

dr inż. Przemysław Chojnowski, mgr inż. Jarosław Parciak – PBW

OLMEX S.A., Wójtowo



Rys. 1. Badania kabli na stacji elektroenergetycznej w jednej ze spółek dystrybucyjnych

Przebiecie izolacji kabla wysokiego napięcia może nastąpić w znamionowych warunkach pracy przy normalnych napięciach eksploatacyjnych, a także wskutek chwilowych przepięć, powodowanych np. zadziałaniem aparatury łączeniowej lub wyładowaniami atmosferycznymi. Przebiecie następuje wtedy, gdy lokalne naprężenia elektryczne są większe niż wytrzymałość elektryczna materiału izolacji w danym miejscu lub jeśli materiał dielektryka uległ całościowej degradacji do takiego stopnia, że izolacja nie wytrzymuje przyłożonych napięć. Stąd też dla zwiększenia niezawodności linii kablowych wysokiego napięcia ważne są nie tylko testy fabryczne i rutynowe, ale również profilaktyczne badania eksploatacyjne i diagnostyka wyładowań niezupełnych.

Zadaniem badań elektrycznych i diagnostyki eksploatowanych linii kablowych jest uzyskanie informacji, oceniających:

• **Jakość i solidność wykonania linii kablowej**

➤ W ramach pomontażowych badań odbiorczych – po testach jakościowych wykonanych w fabryce, celem badań jest sprawdzenie, czy w czasie transportu, magazynowania i montażu nie doszło do uszkodzenia kabla.

➤ Badania mają na celu potwierdzenie, że transport z fabryki na miejsce montażu i sam montaż kabla i osprzętu kablowego nie spowodowały nowych poważnych uszkodzeń izolacji. W istocie nie tylko kabel, ale również główne elementy prefabrykowanego osprzętu

kablowego (tj. stożki sterujące, elementy konstrukcyjne muf) podlegają testom jakościowym przed opuszczeniem fabryki. Jednakże skutki transportu i poprawność montażu można ocenić dopiero po zakończeniu instalacji w terenie.

➤ **Badania poremontowe.** Celem pomiarów wykonywanych w ramach badań poremontowych jest wykrycie błędów montażowych linii kablowej (łącznie z mufami i głowicami kabla) i w konsekwencji wykazanie, że wszystkie poważne defekty izolacji zostały skutecznie wyeliminowane.

• **Gotowość do włączenia i eksploatacji/niezawodność linii kablowej**

➤ **Diagnostyka:** ocena aktualnego stanu technicznego linii kablowej po okresie eksploatacji wynoszącym np. 40 lub 50 lat.

➤ Uzyskanie aktualnego obrazu odniesienia dla przyszłych badań diagnostycznych (próby i testy napięciowe z uwzględnieniem pomiaru parametrów wyładowań niezupełnych i współczynnika strat dielektrycznych). Korzystając z obrazu odniesienia, można ustalić postęp degradacji izolacji i określić przewidywaną żywotność linii kablowej.

Typowe defekty izolacji

Dotychczasowe badania defektów izolacji linii kablowych w mniejszym stopniu dotyczyły elektroenergetycznych kabli transmisyjnych w porównaniu z kablami dystrybucyjnymi.

TABELA I. Rodzaje napięć wykorzystywanych w badaniach elektrycznych eksploatowanych linii kablowych [8]

Napięcie	Opis
Napięcie prądu przemiennego (AC)	Do badań napięciem przemiennym AC wykorzystywane są częstotliwości od 20 do 300 Hz. Metody pomiarowe z zastosowaniem napięcia przemiennego są skuteczną metodą badań wszystkich typów systemów kablowych (sieci rozdzielczych i transmisyjnych). Napięcia przemiennie zalecane są do prób napięciowych, ponieważ odpowiadają one narażeniom występującym podczas normalnej eksploatacji kabla i odzwierciedlają naprężenia stosowane w fabrycznych testach jakościowych. Próba napięciowa kabla napięciem przemiennym (HVAC): badany odcinek linii kablowej uznaje się za sprawny, jeśli w zalecanym czasie przyłożenia napięcia nie nastąpiło przebiecie izolacji. Diagnostyka: przy niektórych poziomach napięcia można mierzyć wyładowania niezupełne i współczynnik strat dielektrycznych w funkcji czasu/napięcia w celach diagnostycznych.
Napięcie prądu przemiennego samogasnące (DAC)	Próby napięciowe z zastosowaniem samogasnącego prądu przemiennego (DAC) wykonuje się z częstotliwością od 20 do 500 Hz (w sieciach rozdzielczych i transmisyjnych). W połączeniu z pomiarem wyładowań niezupełnych jest to skuteczna metoda pomiarów eksploatacyjnych wszystkich typów systemów kablowych. Zważywszy, iż parametry pomiarowe, przy których mierzone są wyładowania niezupełne zbliżone są do znamionowych warunków pracy kabla, a także odpowiadają narażeniom napięciowym stosowanym w fabrycznych testach jakościowych, metody te są zalecane do badań diagnostycznych i pomiarów wzn. Próba napięciowa z zastosowaniem samogasnącego prądu przemiennego (DAC): badany odcinek kabla uznaje się za wadliwy, jeśli nastąpiło przebiecie izolacji podczas próby napięciowej o określonej wartości i czasu trwania napięcia DAC. Diagnostyka: przy określonych poziomach napięcia możliwy jest pomiar wyładowań niezupełnych i współczynnika strat dielektrycznych w funkcji czasu/napięcia dla celów diagnostycznych.
Napięcie probiercze bardzo niskiej częstotliwości (VLF)	Próby napięciowe VLF z zastosowaniem bardzo małej częstotliwości probierczej (0,1 Hz lub nawet 0,01 Hz), wykorzystuje się do pomiarów wszystkich typów izolacji kabli (tylko w sieciach dystrybucyjnych). Z uwagi na fakt, że częstotliwość probiercza jest znacznie niższa niż częstotliwość eksploatacyjna, próba napięciowa VLF opiera się na założeniu, że defekty izolacji muszą ulec przebieciu w czasie testu. Próba napięciowa VLF: badany odcinek linii kablowej uznaje się za wadliwy, jeśli nastąpiło przebiecie izolacji podczas próby napięciowej z zastosowaniem wybranej wartości napięcia VLF w zalecanym okresie czasu. Diagnostyka: przy określonych poziomach napięcia probierczego możliwy jest pomiar wyładowań niezupełnych i współczynnika strat dielektrycznych w funkcji czasu/napięcia dla celów diagnostycznych.
Napięcie probiercze stałe (DC)	Próba napięciowa kabla napięciem stałym (DC) została w przeszłości wprowadzona jako metoda badania eksploatowanych systemów kablowych o izolacji laminowanej papierowo-olejowej (sieci dystrybucyjne i transmisyjne). Generalnie próby napięciowe napięciem stałym są mniej reprezentatywne lub - w przypadku kabli XLPE - w ogóle nie są miarodajne w porównaniu z próbami napięciem przemiennym (AC). Próba napięciem stałym (wyprostowanym) HVDC: badany odcinek linii kablowej uznaje się za sprawny, jeśli w zalecanym czasie przyłożenia napięcia nie nastąpiło przebiecie izolacji. Diagnostyka: przy niektórych wartościach napięcia probierczego można zmierzyć całkowity prąd upływu w funkcji czasu, a zaobserwowane różnice można wykorzystać w celach diagnostycznych.

W publikacji [1] przedstawiono przegląd typowych defektów izolacji poszczególnych elementów sieci kablowej, oparty na oględzinach. Defekty te zakwalifikowano do kilku grup, według kryteriów opartych na narażeniach powodujących uszkodzenia izolacji. Okazało się, że oględziny uszkodzonych elementów linii kablowej mogą być źródłem informacji na temat różnych typów wad izolacji prowadzących do przebicia. W ramach wieloletnich badań [1] sklasyfikowano powtarzające się uszkodzenia. Niektóre opisy wad izolacji mają charakter hipotez formułowanych na podstawie praktycznych wniosków z przeprowadzonych badań.

Biorąc pod uwagę znacznie wyższą znamionową wytrzymałość elektryczną izolacji kabli i osprzętu wysokiego napięcia, systematyka defektów izolacji zamieszczona w [1] może być również zastosowana w rozważaniach dotyczących wad izolacji kabli WN.

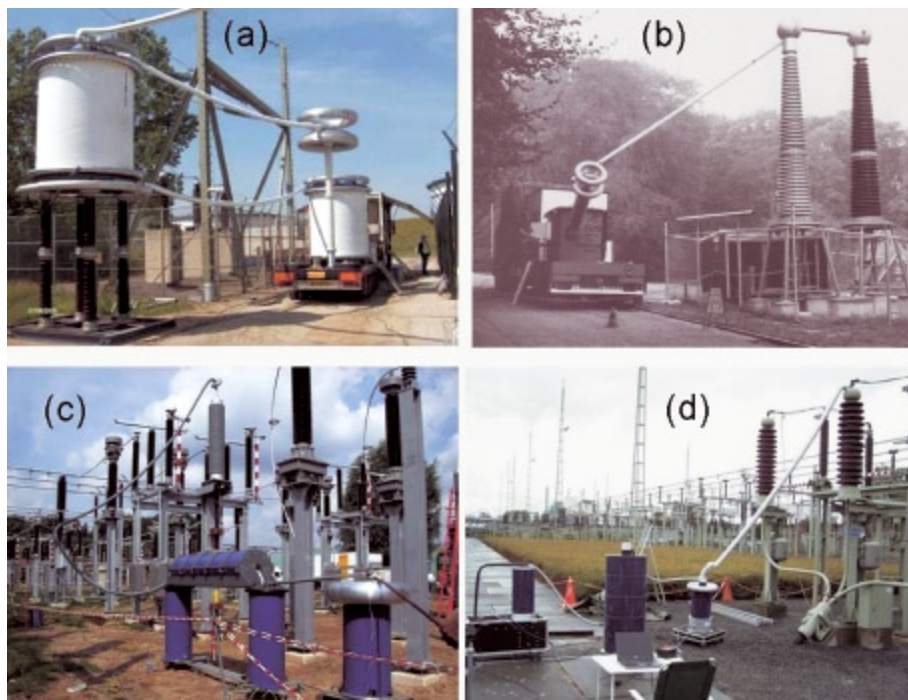
Degradacja defektów izolacji opisanych w pracy [1] może przebiegać w różnych okolicznościach i według różnych mechanizmów. W wielu przypadkach przebicie izolacji jest poprzedzone aktywnością wyładowań niezupełnych. Badania typowych defektów izolacji i czynników wywołujących defekty izolacji potwierdzają rolę wyładowań niezupełnych w procesach degradacji.

W pracy [1] przedstawiono opis procesów degradacji towarzyszących różnym rodzajom defektów izolacji kabla. Z przeglądu tego wynika, że wyładowania niezupełne są odpowiedzialne za pośrednie i końcowe etapy procesów degradacji (np. w formie drzewienia elektrycznego). Stąd też wyładowania niezupełne mogą być ważnym źródłem informacji, sygnalizującym obecność procesów degradacji w izolacji kabla.

Z drugiej strony aktywność wyładowań niezupełnych może być jedynie symptomem zachodzących procesów degradacji, a nie ich przyczyną. Na przykład mikropęknięcia w materiale izolacji spowodowane naprężeniami mechanicznymi w miarę powiększania się mogą być źródłem wzmożonej aktywności wyładowań niezupełnych. Zjawiska wyładowań niezupełnych stanowią więc czuły wskaźnik, umożliwiający rozpoznanie i zlokalizowanie obecności większości defektów izolacji kabla i osprzętu.

Podsumowując kwestię współzależności typowych defektów izolacji linii kablowej i towarzyszących im procesów degradacji, można sformułować kilka ważnych uwag:

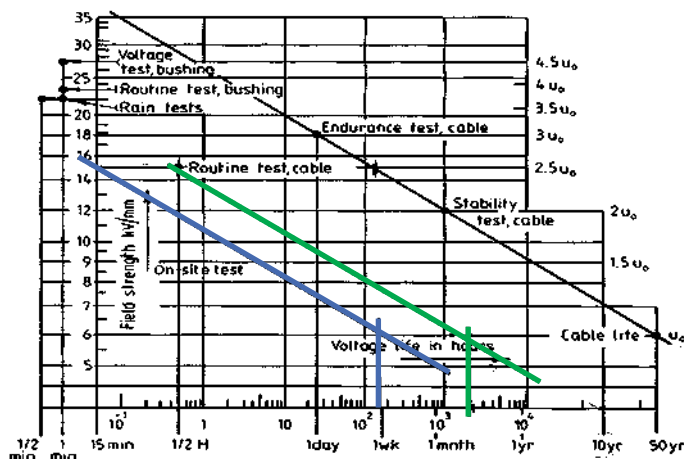
- Czynnikiem odpowiedzialnym za defekty izolacji kabli elektroenergetycznych są naprężenia eksploatacyjne, oddziaływania środowiskowe i działalność człowieka. Wpływ tego ostatniego czynnika ma miejsce głównie na samym początku eksploatacji danego elementu linii kablowej, tj. w momencie jego montażu. Narażenia eksploatacyjne i środowiskowe oddziałują na linię kablową przez cały okres jej użytkowania. Wielu narażeń należących do wymienionych grup po prostu nie da się uniknąć.



Rys. 2. Przykłady badań eksploatacyjnych kabli WN z zastosowaniem prób napięciowych AC i DAC: badania pomontażowe kabla XLPE, 380 kV, z zastosowaniem rezonansowego urządzenia pobierczego (całkowity ciężar urządzenia 20 000 kG) i niekonwencjonalnej metody pomiaru wyładowań niezupełnych w osprzęcie kablowym (metoda niestandardowa – typ 2 w tab. II)

TABELA II. Napięcia AC i DAC wykorzystywane w badaniach eksploatacyjnych i metodach pomiaru wnz

Rodzaj próby napięciowej	Opis
1. Próba napięciem przemiennym	– próba napięciem przemiennym o częstotliwości 20–300 Hz, zasadniczo sinusoidalnym – parametry próby: $1,7U_0/1$ godz. (dopuszczalne są również niższe wartości napięcia i czasu próby) – alternatywą może być próba o parametrach $U_0/24$ godz.
2. Próba napięciem przemiennym i niestandardowa metoda pomiaru wnz (rys. 2)	– pomiar wnz w μV w paśmie częstotliwości radiowych (do 500 MHz) – detekcja wnz w osprzęcie kablowym
3. Próba napięciem przemiennym i pomiar wnz według norm IEC60270/IEC885-3 (rys. 2b, c)	– pomiar wnz w pC (pikokulombach) – lokalizacja wnz w izolacji kabla – lokalizacja wnz w osprzęcie kablowym
Uwaga: norma IEC 60270 (wysokonapięciowe metody pomiarowe i pomiary wyładowań niezupełnych) jest normą ogólną pomiarów wyładowań niezupełnych wyrażonych w pC i nie odnosi się w szczególności do systemów rozłożonych, takich jak zainstalowane systemy kablowe.	



Rys. 3. Przykłady krzywej życia kabla o napięciu znamionowym 220 kV, z uwzględnieniem wpływu na jego żywotność: a) pomiarów rutynowych (linia zielona), $2,5U_0$ przez $\frac{1}{2}$ godziny, b) badań eksploatacyjnych (linia niebieska), $2,5U_0$ przez 15 minut

Voltage test, bushing – próby napięciowe, izolatory przepustowe
 Routine test, bushing – pomiary rutynowe, izolatory przepustowe
 Rain tests – testy na mokro
 Endurance test, cable – test wytrzymałościowy, kabel
 Stability test, cable – test stabilności, kabel
 Routine test, cable – pomiary rutynowe, kabel
 On-site test, cable – pomiary diagnostyczne (terenowe)
 Field strength – natężenie pola elektrycznego
 Voltage life in hours – czas trwania próby, w godzinach

- Ogledziny i badania uszkodzonych elementów linii kablowych prowadzone przez okres wielu lat ujawniły szereg typowych uszkodzeń występujących w kablach sieciach elektroenergetycznych. W [1] przedstawiono przegląd typowych defektów występujących w poszczególnych typach izolacji kablowej i osprzęcie.
- Mechanizmy degradacji izolacji w odniesieniu do poszczególnych typów defektów można sprowadzić do czterech rodzajów: degradacja w mikropęknięciach i wtrącinach gazowych w materiale izolacji, degradacja powierzchniowa izolacji, degradacja izolacji poprzez drzewienie i degradacja spowodowana wyładowaniami w oleju.
- Objawem degradacji izolacji w pośrednim i końcowym etapie jest aktywność wyładowań niezupełnych. Stąd detekcja wyładowań niezupełnych jest środkiem diagnostycznym, służącym do stwierdzenia obecności defektów izolacji.

Z uwagi na znacznie wyższe natężenia pola elektrycznego występujące w izolacji kabli i w osprzęcie wysokiego napięcia, procesy degradacji związane z wyładowaniami niezupełnymi postępują znacznie szybciej w liniach kablowych WN niż w kablach średniego napięcia. Tym niemniej jest możliwe, że w przypadku niektórych typów izolacji, np. w kablach masowych (wypełnionych syciwem nieciekącym) lub w niektórych typach osprzętu kablowego wyładowania niezupełne mogą występować w normalnych warunkach eksploatacji kabla. Generalnie jednak zakłada się, że kable wysokiego napięcia powinny być wolne od wyładowań niezupełnych w czasie eksploatacji w znamionowych warunkach pracy [20]. Zatem, aby wykryć obecność wyładowań niezupełnych w izolacji kabla WN zestarzałej w okresie eksploatacji, w próbach napięciowych

należy stosować napięcia wyższe niż znamionowe U_0 (testy przepięciowe). Jednocześnie z detekcją wyładowań niezupełnych uzyskuje się ważne dane pomiarowe: wartość napięcia zapłonu wnz, napięcie gaszenia wnz i poziom (maksymalny ładunek) wnz.

Napięcia stosowane w badaniach eksploatacyjnych i diagnostycznych

Normy opisane w pozycjach [6-10] literatury definiują napięcia stosowane w pomiarach eksploatacyjnych linii kablowych. Na podstawie doświadczeń praktycznych w pomiarach eksploatacyjnych i diagnostyce stosuje się różne rodzaje i wartości napięć probierczych. Z tabeli I wynika, że poszczególne rodzaje napięć probierczych charakteryzują się różną skutecznością w konkretnych zastosowaniach [19, 21, 22].

Zastosowanie napięć stałych (wyprostowanych) do prób napięciowych ma najdłuższą historię w badaniu izolacji laminowanej papierowo-olejowej. Metody stałonapięciowe znajdują zastosowanie w przypadku uszkodzeń związanych z przewodnością izolacji i/lub problemami termicznymi. Układy probiercze są proste, lekkie, efektywne kosztowo i nie wymagają zasilania dużej mocy. Próby napięciem stałym nie odzwierciedlają jednak naprężeń typowych dla przemiennej napięć eksploatacyjnych i są wrażliwe na warunki temperaturowe. Ponadto próby napięciem stałym nie wykrywają wad izolacji związanych z działaniem prądu przemiennego, takich jak wyładowania niezupełne.

Próba napięciem probierczym bardzo niskiej częstotliwości (VLF) jest od wielu lat uznawana metodą wytrzymałościową dla wszystkich typów kabli rozdzielczych. W odróżnieniu od prób napięciem stałym, w przypadku testów VLF w izolacji polimerowej nie tworzą się ładunki przestrzenne, dzięki ciągłej zmianie polaryzacji napięcia probierczego (z częstotliwością np. 0,1 Hz). W porównaniu do prób napięciowych prądu przemiennego, w pomiarach VLF wymagane są wyższe napięcia probiercze, a także – w przypadku izolacji polimerowej – obserwuje się inny schemat zachowań wyładowań niezupełnych (inne napięcia początkowe i wartości wyładowań niezupełnych).

Zastosowanie napięć przemiennych do pomiarów wszystkich typów izolacji kabli ma szczególnie długą historię w badaniach laboratoryjnych. Prowadzone od ponad dziesięciu lat badania eksploatacyjne wszystkich typów systemów kablowych potwierdziły, że zastosowanie naprężeń elektrycznych podobnych do tych, jakie są stosowane w fabrycznych procedurach jakościowych i które występują podczas normalnej eksploatacji linii kablowej pozwala na rozpoznanie wszystkich typów uszkodzeń izolacji i może również stanowić narzędzie diagnostyczne (np. w pomiarach wnz lub pomiarach współczynnika strat dielektrycznych – rys. 2).

Doświadczenia badań eksploatacyjnych z zastosowaniem napięć przemiennych, w powiązaniu z postępem technologicznym w elektronice wysokich napięć i w dziedzinie przetwarzania sygnałów umożliwiły rozwój uznanej i stosowanej od kilku lat metody pomiarowej, w której zastosowano samogasnący prąd przemienny (DAC) do badań diagnostycznych i pomiarów wyładowań niezupełnych [8-10] (rys. 2b, c). Metoda DAC znajduje szczególne zastosowanie w badaniach diagnostycznych wszystkich typów i długości linii kablowych średniego napięcia, a od kilku lat również stosowana jest do badań wszystkich typów i długości kabli elektroenergetycznych wysokiego napięcia [11-13, 20, 21].

Zastosowanie napięć przemiennych w badaniach eksploatacyjnych opiera się na zasadzie prób przepięciowych. W związku z tym należy rozważyć następujące kwestie:

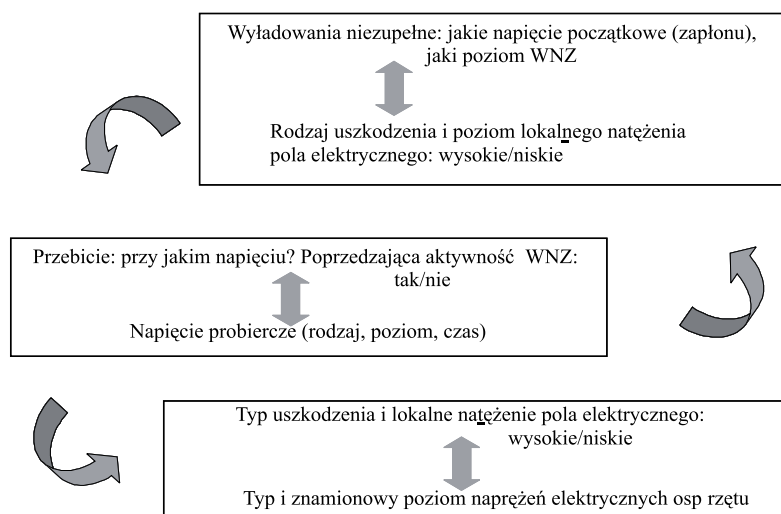
- Okresowe i planowane testy wysokiego napięcia są najbardziej podstawowymi badaniami elektrycznymi izolacji kabla.
- Zważywszy, że napięcie probiercze jest wyższe od napięcia znamionowego kabla, pomiary AC są w istocie próbami przepięciowymi.
- Pomiary te zostały wprowadzone do praktyki wiele lat temu, ponieważ test przepięciowy był wówczas jedyną dostępną metodą pomiarową.
- Przebiecie może nastąpić w miejscu osłabienia izolacji i jest niekiedy poprzedzone zjawiskami nieliniowymi poprzedzającymi przebiecie (związanymi z lokalnym zwiększeniem natężenia pola elektrycznego).
- W przypadku zastosowania do badań elektrycznych metod przepięciowych ważne jest, by zachować umiar i nie dopuścić do sytuacji, w której detekcja poważnych wad izolacji mogłaby pogorszyć własności izolacyjne linii kablowej.

Przydatność diagnostycznych metod pomiarowych

Z punktu widzenia jakości i niezawodności linii kablowej wysokiego napięcia ważne są cztery kwestie związane z próbami napięciowymi z zastosowaniem napięcia przemiennego $U_{test} > U_0$ i oceną wyników pomiarów:

- Zdrowa izolacja, tj. izolacja wolna od wad i efektów starzenia, może wytrzymać wysoki poziom naprężeń elektrycznego, podczas gdy izolacja zestarzała i posiadająca wady ulega przebieciu przy niższym napięciu probierczym (rys. 4).
- Parametry próby napięciowej z wykorzystaniem napięcia wyższego niż znamionowe napięcia badanego kabla powinny być ustalone na poziomie powodującym przebiecie defektów izolacji, ale by jednocześnie jej wpływ na żywotność zdrowej izolacji kabla był pomijalny.
- Ponieważ naprężenia elektryczne wywołane próbą napięciową $U_{test} > U_0$ są wyższe niż naprężenia występujące w znamionowych warunkach pracy, próba może mieć charakter niszczący, nawet jeśli nie doszło do przebiecia izolacji.
- Zważywszy, że czas próby napięciowej ustalany jest arbitralnie, np. 10 minut, nie można wykluczyć, że po 11 minutach nastąpiłoby przebiecie.

Generalnie można stwierdzić, że pomiar przemiennym napięciem probierczym przekraczającym znamionowe napięcie kabla np. dwuipółkrotnie ($2,5U_0$), w przypadku wolnych od wad nowo ułożonych kabli i osprzętu nie powinien mieć istotnie negatywnego wpływu na oczekiwany czas życia linii kablowej. Z rysunku 4 wynika, że taka próba może skrócić żywotność kabla o ok. jeden tydzień, jednak w przypadku izolacji kablowej posiadającej defekty, skutki próby przepięciowej są bardziej złożone. W tym wypadku należy wziąć pod uwagę dodatkowe, ważne aspekty wykonywanej próby. Możliwe są też interakcje pomiędzy typem defektu, jego lokalizacją, zjawiskami poprzedzającymi przebiecie i wielkością przyłożonego napięcia.



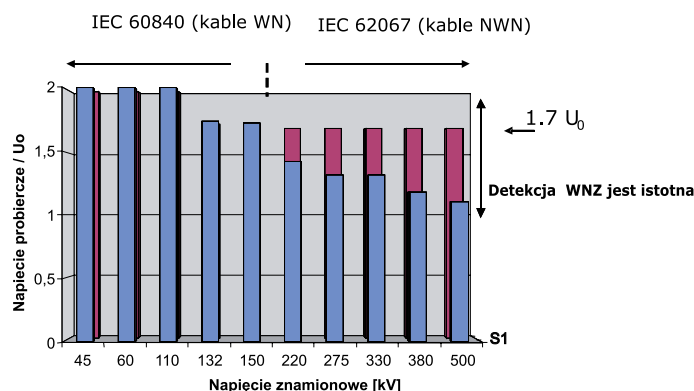
Istnieje bezpośredni związek między typem osprzętu kablowego i jego znamionową wytrzymałością napięciową oraz rodzajami defektów i lokalnym wzrostem natężenia pola elektrycznego. Na przykład wtrąciny (pęcherzyki) gazowe w materiale izolacji lub mikropęknięcia w pobliżu zewnętrznego przewodu kabla średniego napięcia są mniej podatne na przebiecie niż takie same defekty znajdujące się w pobliżu wewnętrznego przewodu. W obu przypadkach nie ma gwarancji, że wada izolacji ulegnie przebieciu w trakcie próby przepięciowej AC, co ma związek z niższym znamionowym natężeniem pola elektrycznego kabli elektroenergetycznych średniego napięcia. Jednakże takie same defekty w izolacji kabla wysokiego napięcia prawdopodobnie doprowadzą do przebiecia. Ponadto w tym wypadku przebiecie izolacji poprzedzone będzie wzmożoną aktywnością wyładowań niezupełnych.

Występowanie przebieć przy danym napięciu w czasie próby napięciowej z wykorzystaniem napięcia przemiennego $U_{test} > U_0$ zależy również od charakteru wad izolacji. Rodzaj defektu izolacji wpływa także na zjawiska poprzedzające przebiecie, np. aktywność wyładowań niezupełnych. Wiadomo też, że niejednorodności materiału izolacji w postaci zanieczyszczeń, mikropęknięć, wtrącin gazowych czy mikroostrzy na powierzchni żył lub ekranu odgrywają znaczną rolę w inicjowaniu wyładowań niezupełnych. Należy też pamiętać, że w przypadku obecności wyładowań niezupełnych napięcie probiercze i czas próby mają zasadniczy wpływ na występowanie przebiec.

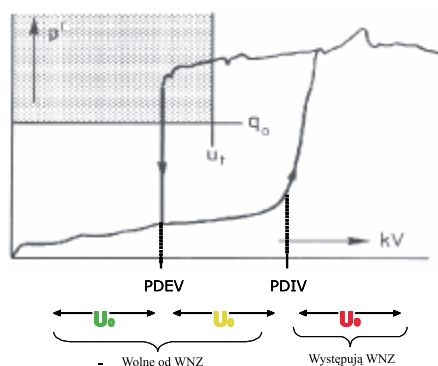
W przypadku wad jednorodnych (takich jak miejscowa degradacja izolacji spowodowana wilgocią) lub nietypowych defektów (takich jak brak elementów konstrukcyjnych sterujących polem w osprzęcie kablowym) przebiecie może mieć miejsce bez wystąpienia zjawiska wyładowań niezupełnych. Wykres na rysunku 5 ilustruje znaczenie optymalnego wyboru napięć probierczych do badań kabli wysokiego i najwyższego napięcia. W przypadku kabli najwyższego napięcia należy zachować niższy stosunek U_{test}/U_0 , ze względu na:

- ograniczenie napięć pomiarowych i mocy układów probierczych dostępnych w terenie,
- w przypadku natychmiastowego przebiecia defektu izolacji, zjawiska poprzedzające przebiecie (wnz) są widoczne przy niższym napięciu probierczym,
- ograniczoną wytrzymałość elektryczną osprzętu kablowego najwyższego napięcia.

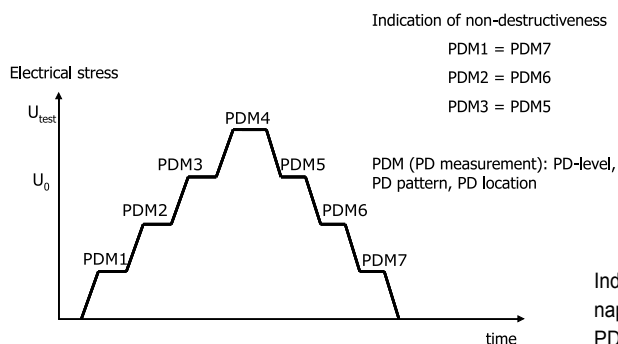
Rys. 4. Wpływ napięcia AC do badania kabli energetycznych w terenie na obecność defektów w izolacji



Rys. 5. Zastosowanie napięć probierczych w próbach napięciowych kabli wysokiego i najwyższego napięcia według norm IEC 60840/62067



Rys. 6. Analiza pomiarów wnz w oparciu o parametry próby napięciowej AC, w zależności od wartości q_0 i U_t charakterystycznych dla danego kabla: wyładowania o wartościach wyższych niż q_0 mierzone przy napięciach niższych niż wybrane napięcie probiercze U_t stanowią kryterium dla odrzucenia badanego obiektu jako wadliwego (obszar zacieniony). Ważnymi wskaźnikami obecności wyładowań niezupełnych w znamionowych warunkach pracy są parametry PDIV (napięcie zapłonu wnz) oraz PDEV (napięcie gaszenia wnz) odniesione do wartości U_0 . Na podstawie tych dwóch parametrów można ocenić, czy linia kablowa jest wolna od wyładowań niezupełnych w czasie normalnej pracy w warunkach znamionowych



Jak widać na wykresie (rys. 5), zmniejszenie stosunku U_{test}/U_0 w przypadku kabli najwyższego napięcia zwiększa możliwość uzyskania dodatkowych informacji diagnostycznych w formie detekcji i pomiarów wyładowań niezupełnych.

Izolacja kabli najwyższego napięcia ma znacznie większą wytrzymałość elektryczną niż izolacja kabli wysokiego napięcia. Z tego względu w przypadku kabli najwyższego napięcia wysokie naprężenia elektryczne uzyskuje się nawet przy zredukowanym napięciu probierczym. Kable wysokiego napięcia ($V \leq 150$ kV) mają mniejszą wytrzymałość napięciową, co oznacza, że mimo iż współczynnik U_{test}/U_0 przyjmowany w próbach napięciowych jest stosunkowo wysoki, naprężenia elektryczne występujące podczas próby są takie same lub nawet mniejsze niż naprężenia występujące w próbach napięciowych kabli najwyższego napięcia.

Podsumowując powyższe rozważania można stwierdzić, że łącząc czułe metody detekcji wyładowań niezupełnych z próbami napięciowymi z wykorzystaniem napięcia przemiennego, np. o maksymalnej wartości $1,7U_0$ w przypadku nowo ułożonych linii kablowych i do 80% tej wartości ($0,8 \times 1,7U_0$) w przypadku zestarzałych kabli eksploatowanych można wykazać, że badany system kablowy jest wolny od wyładowań niezupełnych. W przypadku wykrycia defektów związanych z wyładowaniami niezupełnymi, można zmierzyć ich parametry (napięcie zapłonu i gaszenia, rozkład wartości) i zlokalizować (głównie w osprzęcie kablowym), w celu oceny stopnia degradacji izolacji.

Wyładowania niezupełne

Analiza wyładowań niezupełnych ma na celu stwierdzenie, czy w linii kablowej znajdują się wady lub miejsca osłabienia izolacji. Aby wykonać pomiar, należy spowodować zapłon wyładowań niezupełnych w izolacji kabla lub izolacji złączy poprzez przyłożenie określonego napięcia probierczego [8-10]. Wyładowania niezupełne są zjawiskiem fizycznym opisanym parametrami takimi jak napięcie zapłonu (inicjacji) wnz, napięcie wygasania wnz, poziom (wartość ładunku) impulsu wnz, rozkład wartości wnz i rozkład ilości wnz na długości kabla.

Pomiar diagnostyczny wyładowań niezupełnych z zastosowaniem napięć probierczych wyższych niż znamionowe napięcie sieci, tj. od wartości $1,0U_0$ do maksymalnie $1,7U_0$ (równoważnej z najwyższymi napięciami występującymi w znamionowych warunkach pracy) jest istotny z następujących powodów (rys. 5 i 6):

➤ Aby stwierdzić, czy w izolacji badanej linii kablowej istnieją defekty ujawniające się w postaci wyładowań niezupełnych z napięciem zapłonu (PDIV) wyższym niż U_0 . Takie defekty w przypadku chwilowych przebiegów w sieci mogą zapoczątkować przebiegi izolacji.

Rys. 7. Zastosowanie pomiarów wnz w celu potwierdzenia nieniszczącego charakteru próby napięciowej. Pomiar wnz podczas próby napięciowej i analiza zmierzonych parametrów wnz mogą stanowić cenne źródło informacji na temat wpływu naprężeń przebiegowych na defekty izolacji wywołujące wyładowania niezupełne

Indication of non-destructiveness – relacje wskazujące na nieniszczący charakter próby napięciowej
PDM – (PD-mapping) rozkład wnz na długości kabla

➤ Aby stwierdzić (podobnie jak w przypadku badań pomontażowych nowej linii kablowej), że w izolacji kabla i osprzętu nie występują zjawiska wyładowań niezupełnych poniżej napięcia probierczego równego $1,7U_0$, co oznacza, że w znamionowych warunkach pracy w izolacji nie powstają defekty izolacji związane z wnz.

➤ Aby ocenić, czy sam pomiar diagnostyczny nie zapoczątkował procesów wnz w izolacji linii kablowej, co jest ważne dla potwierdzenia, że zastosowana metoda badań jest nieniszcząca.

Dla koncernów energetycznych zainteresowanych oceną stanu technicznego własnych sieci kablowych na podstawie badań diagnostycznych wyładowań niezupełnych wszystkie te informacje mają istotne znaczenie. Analiza parametrów wyładowań niezupełnych w różnych typach izolacji może służyć budowie standardów praktycznych [14]. Standardy takie mogą być niezwykle przydatne w zarządzaniu majątkiem sieci kablowych przedsiębiorstw energetycznych i przemysłowych.

Współczynnik strat dielektrycznych (tangens delta)

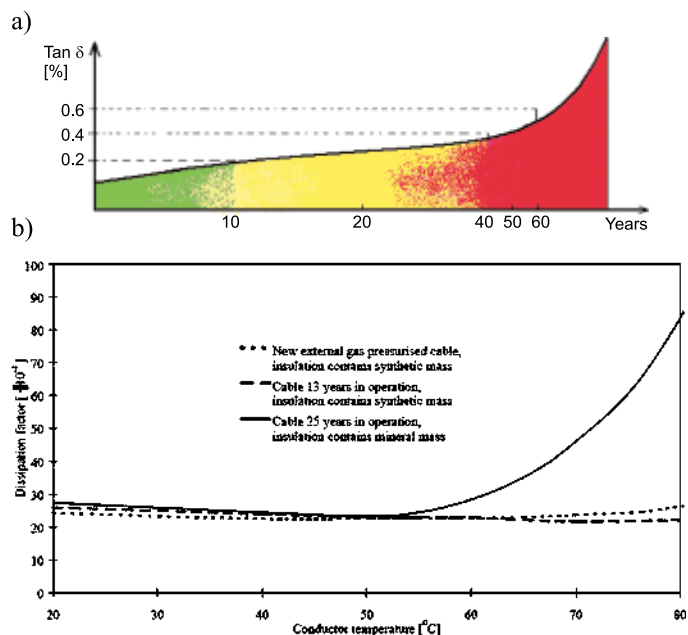
Pomiar współczynnika strat dielektrycznych ($\tan\delta$) wykorzystywany jest do oceny stanu materiału izolacyjnego [24, 34, 35]. Biorąc pod uwagę fakt, że wartość tego współczynnika rośnie wraz z postępującymi procesami starzenia izolacji, pomiar $\tan\delta$ powinno się traktować jako narzędzie diagnostyczne i/lub pomiar uzupełniający. Z praktyki wynika, że poza bezwzględną wartością współczynnika stratności do oceny stanu izolacji kabli wysokiego napięcia, ważny jest również przyrost wartości $\tan\delta$ mierzony dla dwóch różnych wartości napięcia probierczego, tzw. $\Delta\tan\delta$. W celu oceny jakości impregnatu tworzy się wykres $\tan\delta$ w funkcji napięcia.

Wartość $\tan\delta$ jest silnie uzależniona od struktury i jakości złącza kablowego a sam pomiar ma wartość diagnostyczną tylko wtedy, gdy kolejne pomiary wykonywane są w niemal identycznych warunkach. W przypadku kabli papierowo-olejowych wysokiego napięcia pomiar $\tan\delta$ może być ważnym wskaźnikiem możliwych przebiegów termicznych (rys. 8). Dla tego typu kabli istotne jest też określenie stopnia degradacji izolacji papierowej. Biorąc pod uwagę właściwości izolacji, szczególnie jej polaryzację, reakcja dielektryka na interakcje między polaryzacją makroskopową a polem elektrycznym jest dobrym wskaźnikiem zależności czasowych procesów polaryzacji zachodzących w izolacji.

Wnioski

Na podstawie rozważań zaprezentowanych w artykule można wyciągnąć następujące wnioski:

- Eksploatacyjne i diagnostyczne badania elektryczne są ważnym elementem zapewnienia jakości zarówno nowych/wyremontowanych, jak też eksploatowanych linii kablowych. Bieżąca znajomość stanu technicznego sieci kablowych wysokiego napięcia jest ważnym elementem wspierającym proces zarządzania majątkiem z następujących względów:
 - 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 do planowania harmonogramu konserwacji i wymiany elementów sieci kablowej.



..... nowy kabel gazowy, izolacja zawiera syciwo syntetyczne
 --- 13-letni kabel, izolacja zawiera syciwo syntetyczne
 — 25-letni kabel, izolacja zawiera syciwo mineralne
 Conductor temperature – temperatura żyły roboczej
 Dissipation factor – współczynnik tłumienności

Rys. 8. Zastosowanie pomiaru współczynnika strat dielektrycznych ($\tan\delta$) do oceny izolacji papierowo-olejowej kabli wysokiego napięcia: a) schemat zależności między wzrostem strat dielektrycznych, starzeniem się izolacji i stabilnością termiczną kabla, b) przykład stabilności termicznej, strat dielektrycznych i starzenia się izolacji kabla gazowego o znamionowym napięciu 150 kV

- Do badań eksploatacyjnych i diagnostycznych w terenie wykorzystuje się generowane napięcia przemienne i stałe, które można zastosować do prób napięciowych w połączeniu z pomiarem wyładowań niezupełnych.
- Próby napięciowe z wykorzystaniem prądu przemiennego AC lub samogasnącego prądu przemiennego DAC do wartości $1,7U_0$ lub nawet $2,5U_0$, w przypadku wolnej od wad i nie zestarzałej izolacji, nie wpływają istotnie na czas życia badanych elementów linii kablowej.
- Z uwagi na mniejszą wytrzymałość elektryczną dłużej eksploatowanych linii kablowych, badania diagnostyczne lub poremontowe na tych liniach powinno się wykonywać z zastosowaniem odpowiednio niższych napięć probierczych, np. 80% wartości napięcia stosowanego w przypadku nowych kabli [6, 7].
- Próby napięciowe z wykorzystaniem napięć przemiennych wyższych niż napięcie znamionowe U_0 wykonywane na kablach posiadających wady izolacji lub zestarzałych w okresie eksploatacji mogą negatywnie wpływać na żywotność elementów badanej linii kablowej, nawet jeśli podczas próby nie nastąpiło przebicie izolacji.
- Połączenie prób napięciowych AC i DAC z detekcją wnz jest cennym źródłem informacji o wadach izolacji powodujących wyładowania niezupełne. Przy okazji można też ocenić, czy zastosowany pomiar miał niekorzystny wpływ na izolację badanej linii kablowej.

• Na podstawie doświadczeń z badań terenowych i uzyskanych danych diagnostycznych (wyładowania niezupełne, straty dielektryczne) można zbudować normy doświadczalne dla izolacji kabli i osprzętu kablowego. Normy takie mogą stać się instrumentem wspierającym proces zarządzania majątkiem przedsiębiorstw eksploatujących sieci kablowe wysokiego napięcia.

LITERATURA

- [1] Wester F.J.: Condition Assessment of Power Cables Using PD Diagnosis at Damped AC Voltages. PhD theses TU Delft, 2004
- [2] Ahmed N., Srinivas N.: On-line Partial Discharge Detection in Cables. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, April 1998
- [3] Hamerling B.R. et al.: Fundamental aspects of on-line PD measurements on distribution power cables. *IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics*, 2001
- [4] Wester F.J. et al.: Sensitivity of on-line PD detection for distribution power cables. *13th International Symposium on High Voltage Engineering*, Delft 2003
- [5] Wester F.J. et al.: Sensitivity Aspects of on-line PD Diagnosis of MV Power Cables. Cired 2003, 17th International Conference on Electricity Distribution, Barcelona, Spain 2003
- [6] IEC 60840 Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV) – Test methods and requirements
- [7] IEC 62067 Standard Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ($U_m = 170$ kV) up to 500 kV ($U_m = 550$ kV) – Test methods and requirements
- [8] IEC 60060-3 High Voltage test techniques – Part 3: Definitions and requirements for on-site testing
- [9] IEEE 400 Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems
- [10] IEEE 400.3 Guide for PD Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment
- [11] Seitz P.P. et al.: Novel Method for on-site Testing and Diagnosis of Transmission Cables up to 250 kV. *Jicable'07. 7th International Conference on Insulated Power Cables*, France, Versailles, June 2007
- [12] Wester F.J., Gulski E., Smit J.J.: Detection of PD at Different AC Voltage Stresses in Power Cables. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, July/August 2007
- [13] Gulski E. et al.: Condition Assessment of Service Aged HV Power Cables. *Cigre 2008 Conference*, Paris, paper D1-206
- [14] Gulski E. et al.: Insulation Diagnosis of HV Power Cables. *Jicable'07. 7th International Conference on Insulated Power Cables*, France, Versailles, June 2007, paper 51
- [15] Koreman C.G.A. et al.: Development of a new 380 kV double circuit XLPE insulated cable system in The Netherlands. *Cigre 2006*, B1-107
- [16] Gulski E. et al.: Experiences in partial discharge detection of distribution power cable systems. *Cigre Electra*, 2003
- [17] Meijer S. et al.: Advanced Partial Discharge Measuring System for Simultaneous Testing of Cable Accessories. *CMD Conference*, Changwon, Korea, 2006
- [18] Meijer S. et al.: Simultaneous Condition Assessment of Accessories of Power Cables using a Wireless VHF/UHF PD Detection System. *CMD Conference*, Changwon, Korea, 2006
- [19] Bartnikas R., Srivastava K.D.: *Power and Communication Cables*. J. Wiley and Sons IEEE Press, New York 2003
- [20] Gulski E. et al.: Condition Assessment of Service Aged HV Power Cables. *Cigre 2008 session*, paper D1-206
- [21] Thue W.A.: *Electrical Power Cable Engineering*. Book Marcel Dekker, Inc, 1999
- [22] Site Testing and Diagnosis of Transmission Cables up to 250 kV. *Jicable'07. 7th International Conference on Insulated Power Cables*, France, Versailles, June 2007, paper 16
- [23] Wester F.J., Gulski E., Smit J.J.: Detection of PD at Different AC Voltage Stresses in Power Cables. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, July/August 2007
- [24] Gulski E. et al.: Condition Assessment of Service Aged HV Power Cables. *Cigre 2008 Conference*, Paris, paper D1-206
- [25] Gulski E. et al.: Insulation Diagnosis of HV Power Cables. *Jicable'07. 7th International Conference on Insulated Power Cables*, France, Versailles, June 2007, paper 51
- [26] Koreman C.G.A. et al.: Development of a new 380 kV double circuit XLPE insulated cable system in The Netherlands. *Cigre 2006*, B1-107
- [27] Gulski E. et al.: Experiences in partial discharge detection of distribution power cable systems. *Cigre Electra*, 2003
- [28] Meijer S. et al.: Advanced Partial Discharge Measuring System for Simultaneous Testing of Cable Accessories. *CMD Conference*, Changwon, Korea, 2006
- [29] Meijer S. et al.: Simultaneous Condition Assessment of Accessories of Power Cables using a Wireless VHF/UHF PD Detection System. *CMD Conference*, Changwon, Korea, 2006
- [30] Bartnikas R., Srivastava K.D.: *Power and Communication Cables*. J. Wiley and Sons IEEE Press, New York, 2003
- [31] Gulski E. et al.: Condition Assessment of Service Aged HV Power Cables. *Cigre 2008 session*, paper D1-206
- [32] Thue W.A.: *Electrical Power Cable Engineering*. Book Marcel Dekker, Inc, 1999
- [33] Peschke E., von Olhausen R.: *Cable Systems for High Voltage and Extra-High Voltage*. Book, Publics MCD Verlag, 1999
- [34] Popma J., Pellis J.: Diagnostics for high voltage cable systems, proceedings ERA conference on HV plant life extension. Belgium, 2000
- [35] Gulski E. et al.: Insulation Diagnosis of HV Power Cables. *Jicable'07. 7th International Conference on Insulated Power Cables*, France, Versailles, June 2007, paper 51

targi ENERGETICS 2009

18-20 listopada

Dlaczego warto:

- Jedyna tego typu impreza po wschodniej stronie Wisły
- Najnowsze produkty i technologie
- Współpraca z instytucjami i mediami branżowymi z Białorusi i Ukrainy
- Zorganizowane grupy zwiedzających z branży
- Konferencje i szkolenia tematyczna
- Rosnące inwestycje na Lubelszczyźnie

II Lubelskie Targi Energetyczne
Centrum Targowe w Parku Ludowym

 **Międzynarodowe Targi Lubelskie S.A.**

Koordynator targów: Anna Błażejewska, tel. 081 532 36 90, fax 081 534 92 95
 mail to: a.blazejewska@targi.lublin.pl

www.targi.lublin.pl

