



Wojciech KOLTUNOWICZ, Ronald PLATH

IPH Institut „Prüffeld für elektrische Hochleistungstechnik”, Berlin (CESI Group)

Próby pomontażowe izolacji WN linii kablowych z tworzyw sztucznych

Streszczenie. W artykule przedstawiono procedury optymalnych prób pomontażowych wytrzymałości elektrycznej izolacji wn linii kablowych z tworzyw sztucznych oparte na metodzie pomiaru wyładowań niezupełnych sondami bezpośrednio instalowanymi w elementach osprzętu kabla.

Abstract. (After-installation testing of HV polymeric cable lines). In the paper, the optimal procedures of dielectric after-installation testing of HV polymeric cable lines based on PD measurements with sensors located directly on cable accessories are presented.

Słowa kluczowe: linie kablowe wn z tworzyw sztucznych, próby pomontażowe, diagnostyka, pomiar wyładowań niezupełnych.

Keywords: high voltage polymeric cable lines, after-installation testing, diagnostics, partial discharge measurement.

Cel prób pomontażowych

Polietylen usieciowany (XLPE) posiadający doskonałe własności izolacyjne jest obecnie powszechnie stosowany jako izolacja kabli wysokich napięć. Każdy odcinek kabla oraz każdy element osprzętu kablowego jest poddawany przez konstruktora próbom elektrycznym, mechanicznym i cieplnym zgodnie z wymaganiami norm międzynarodowych dla kabli z tworzyw sztucznych [1-4]. Ze względu na ograniczenia w transporcie, długość odcinków kabli opuszczających fabrykę nie przekracza z reguły 800-1000 m. Istnieje więc konieczność łączenia kabli w miejscu ich przyszłej pracy za pomocą muf. W celu wykrycia ewentualnych defektów wynikających z transportu oraz polowych warunków montażu osprzętu (drobnych cząstek, kurzu i wilgoci) i zagwarantowania w ten sposób wysokiej niezawodności pracy linii kablowej, konieczne jest sprawdzenie wytrzymałości elektrycznej izolacji linii kablowej bezpośrednio po jej montażu. Próby pomontażowe są więc uzupełnieniem prób wyrobu i są jednocześnie ostatnim sprawdzianem wytrzymałości elektrycznej izolacji przed wprowadzeniem linii kablowej do eksploatacji. Pozwalają one zmniejszyć prawdopodobieństwo wystąpienia awarii w systemie do ekonomicznie i technicznie akceptowanego poziomu.

Procedura próby pomontażowej

Dobór skutecznej procedury pomiarowej do kontroli izolacji linii kablowej jest przedmiotem ciągłej dyskusji [5,6], zmierzającej do osiągnięcia kompromisu między kosztem próby i jej prostotą wykonania, a skutecznością wykrywania defektów krytycznych.

Optymalna procedura pomontażowej próby wn linii kablowej z polietylenu usieciowanego polega na doprowadzeniu do linii kablowej napięcia probierczego przemiennego oraz jednoczesnym pomiarze wyładowań niezupełnych (wnz) w osprzęcie kablowym: głowicach i mufach kablowych. Pozwala to na wykrycie i lokalizację zarówno typowych błędów montażowych jak również tych defektów krytycznych, które mogą doprowadzić do awarii w linii i nieplanowanych wyłączeń w czasie eksploatacji kabla. Pomiar wnz w czasie próby napięciowej zmniejsza do minimum prawdopodobieństwo wystąpienia przeskoku w izolacji w czasie próby.

Napięciem preferowanym do prób izolacji linii kablowej AC jest napięcie przemiennie o częstotliwości przemysłowej, które odzwierciedla rzeczywiste, ciągłe warunki pracy linii kablowej jak również narażenia związane z przepięciami

łączeniowymi. Konieczność badania długich odcinków kabli wn o pojemności dochodzącej do kilku μF wymagałaby jednak stosowania układów probierczych napięcia przemiennego 50 Hz o mocy dochodzącej do kilkunastu MVA, a więc bardzo kosztownych. Jedynym sposobem uniknięcia takiego rozwiązania jest zastosowanie układów rezonansowych, powszechnie akceptowanych jako źródła napięcia przez organizacje międzynarodowe [7,8]. Napięcie przemiennie uzyskuje się w układach rezonansowych, kompensując pojemność linii kablowej w dwojaki sposób:

- za pomocą włączonej szeregowo z obiektem regulowanej indukcyjności, utrzymując stałą częstotliwość napięcia 50 lub 60 Hz (typ ACRL)
- zmieniając częstotliwość pracy układu przy włączonej szeregowo z obiektem stałej indukcyjności (typ ACRF).

Drugie rozwiązanie jest częściej stosowane, gdyż układ jest tańszy, indukcyjności są mniejsze gabarytowo i pozbawione ruchomych elementów (rys. 1). Częstotliwość napięcia próby zależy od pojemności linii kablowej i zawiera się w przedziale od 20 do 300 Hz, akceptowanym w normach [1,2,8]. Zmiana częstotliwości w podanym zakresie ma niewielki wpływ na wartość napięcia przeskoku oraz na charakterystykę i poziom wnz [9].



Rys.1. Cztery układy rezonansowe typu ACRF połączone razem (trzy równolegle i jeden szeregowo) w celu uzyskania napięcia probierczego o wartości 280 kV i prądu o natężeniu 240 A, projekt IPH - Londyn 2005 [10]

Pomiar wnz metodą standardową, opisaną w normie IEC 60270 i opartą na pomiarach ładunku pozornego, wyrażonego w pC, dopływającego do linii kablowej z układu probierczego z dołączoną pojemnością sprzęgającą jest

niezwykle trudny do wykonania w warunkach polowych. Podstawowymi mankamentami wykorzystania metody standardowej, które utrudniają lub najczęściej uniemożliwiają jej stosowanie są:

- silne tłumienie sygnału wnz w czasie propagacji wzdłuż linii kablowej,
- wpływ zakłóceń wewnętrznych powstających w obwodzie probierczym oraz zakłóceń zewnętrznych powstających poza tym obwodem, na czułość pomiarową.

Znaczne zwiększenie czułości pomiaru wnz w warunkach polowych jest możliwe wtedy, gdy sondy są umieszczone w osprzęcie kabla, czyli w najczęstszych miejscach występowania wnz. Istnieje kilka typów takich sond:

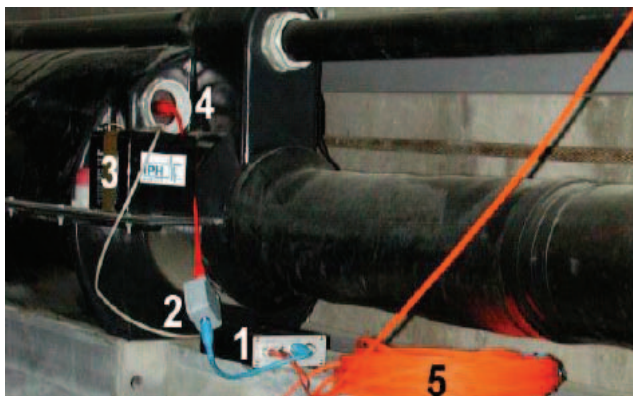
- sondy pojemnościowe; umieszczane przez wytwórców we wnętrzu muf i głowic i stanowiące ich integralną całość,
- sondy indukcyjne; umieszczane na zewnętrznych elementach osprzętu kabla: połączeniach typu „cross-bonding” (rys. 2) oraz na ekranach kabla.



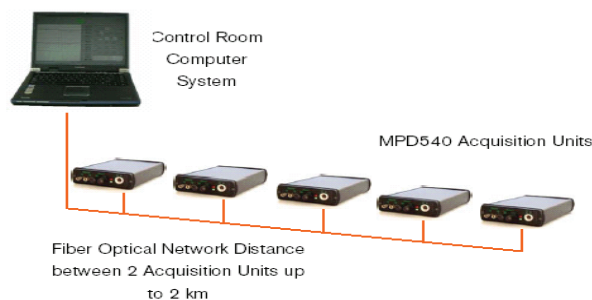
Rys.2. Sondy indukcyjne wnz umieszczone na połączeniach typu „cross-bonding”

Na rysunku 3 przedstawiony został układ do pomiaru wnz składający się z sondy pojemnościowej, umieszczonej we wnętrzu mufy kablowej, przyłączonej kablami do jednostki pomiarowej wnz będącej przetwornikiem cyfrowym oraz światłowodu do przesyłu sygnału do centralnego komputera, gdzie następuje rejestracja, analiza i magazynowanie sygnału pomiarowego.

W czasie próby pomontażowej pomiar wnz jest wykonywany jednocześnie na wszystkich sondach jednej fazy. Jednostki pomiarowe wnz połączone są wzajemnie światłowodem, a pomiar jest korelowany z fazą napięcia probierczego (rys. 4).



Rys.3. Układ pomiarowy wnz: 1 – jednostka pomiarowa wnz, 2 – impedancja pomiarowa, 3 – zasilanie/bateria, 4 – wyprowadzenie z sondy pojemnościowej, 5 – światłowód



Rys.4. Synchroniczny układ pomiarowy wnz

Obowiązujące normy międzynarodowe

Wysokonapięciowe linie kablowe z izolacją z tworzyw sztucznych poddawane są dielektrycznym próbom pomontażowym, których procedury są wstępnie uzgadniane pomiędzy wytwórcą i przyszłym użytkownikiem kabla. Podstawą do uzgodnień są wytyczne zamieszczone w normach krajowych lub międzynarodowych, jak również zalecenia komitetów międzynarodowych takich jak CIGRE czy IEEE [5,6]. Istnieją dwie normy IEC, które określają procedury próby pomontażowej kabli WN z tworzyw sztucznych: IEC 60840:2004 (trzecia edycja), norma obowiązująca od kwietnia 2004 roku dla kabli o napięciu znamionowym od 30 kV ($U_m=36$ kV) do 150 kV ($U_m=170$ kV) oraz norma IEC 62067:2001 (pierwsza edycja), obowiązująca od października 2001, dla pozostałych kabli wn o napięciach znamionowych do 500 kV ($U_m=550$ kV) [1,2]. Po raz pierwszy w obu normach zdefiniowano w identyczny sposób zarówno kształt, częstotliwość jak i czas przyłożenia napięcia probierczego, a mianowicie:

- napięcie powinno mieć kształt sinusoidalny,
- częstotliwość napięcia powinna zawierać się w przedziale od 20 do 300 Hz,
- czas przyłożenia napięcia powinien wynosić 1 h (lub 24 h przy napięciu próby równym znamionowemu napięciu fazowemu U_0).

Poziom napięcia próby pomontażowej zależy od napięcia znamionowego kabla i zawiera się w granicach od $1,7 U_0$ do $2,0 U_0$ dla napięć znamionowych od 30 kV do 150 kV, tabela 1. Dla wyższych napięć znamionowych poziom napięcia próby jest niższy względem U_0 i wynosi od $1,4 U_0$ dla kabli o napięciu znamionowym 220 - 230 kV do $1,1 U_0$ dla kabli o napięciu znamionowym 500 kV, tabela 2.

Norma IEC 62067 przewiduje też możliwość wykonania 1h próby przy napięciu wynoszącym $1,7 U_0$. Wymagania te zostały również wprowadzone do niemieckiej normy DIN VDE 0276-62067 jako wariant preferowany i tak określona próba jest przeprowadzana od 1998 roku przez IPH dla linii kablowych 400 kV BEWAGu [3].

Obydwie normy IEC jako alternatywną procedurę podają 24 h próbę przy napięciu U_0 . Nie ma w tym przypadku konieczności użycia zewnętrznego probierczego układu napięciowego, ale istnieją następujące niebezpieczeństwa i utrudnienia:

- w przypadku zwarcia doziemnego moc zwarciova jest bardzo duża,
- nie wszystkie krytyczne defekty mogą być wykryte, a brak możliwości regulacji wartości napięcia próby uniemożliwia wyznaczenie napięcia początkowego wnz,
- utrudniona jest eliminacja zakłóceń na podstawie korelacji fazy, gdyż brak jest różnicy w fazie pomiędzy napięciem pracy a napięciem probierczym.

Z wymienionych powodów 24 h próba pomontażowa przy znamionowym napięciu fazowym nie jest zalecana przez IPH.

Tabela 1. Napięcia próby pomontażowej wg normy IEC 60840

Napięcie znamionowe		Napięcie probiercze		Stosunek U_T / U_0
U [kV]	U_0 [kV]	U_T [kV]		
45 to 47	26	52		2.00
60 to 69	36	72		2.00
110 to 115	64	128		2.00
132 to 138	76	132		1.74
150 to 161	87	150		1.72

Tabela 2. Napięcia próby pomontażowej wg normy IEC 62067

Napięcie znamionowe		Napięcie probiercze		Stosunek U_T / U_0
U [kV]	U_0 [kV]	U_T [kV]		
220 to 230	127	180		1.42
275 to 287	160	210		1.31
330 to 345	190	250		1.32
380 to 500	220	260		1.18
500	290	320		1.10

Poziom przyjętego napięcia próby jak również wymagana maksymalna moc układu probierczego uwarunkowana długością kabla i jego pojemnością są ważnym kryterium wyboru optymalnego układu probierczego i powinny być wstępnie ustalone między użytkownikiem i wytwórcą kabla. W przeszłości napięcia próby często przekraczały wartości napięć zalecanych w normach IEC (tab. 3). W tej smej tabeli podano również obecnie najczęściej stosowane wartości napięć próby [7].

Tabela 3 Wartości napięć próby według IEC oraz obecnie zalecane

Napięcie znamionowe linii kablowej		Maks. Napięcia stosowane dotychczas [8] ¹⁾		Napięcie próby wg. IEC ¹ [1,2]		Zalecane obecnie napięcie próby kV
U kV	U_0 kV	U_{max} kV	U_{max}/U_0	U_T kV	U_T/U_0	
110 to 115	64	160	≤ 2.5	128	2.0	160
132 to 138	76	190	≤ 2.5	132	1.74	
150 to 161	87	218	≤ 2.5	150	1.72	230
220 to 230	127	254	≤ 2.0	180	1.42	
275 to 287	160	320	≤ 2.0	210	1.31	300
330 to 345	190	-	-	250	1.31	
380 to 500	220	450	2.05	260	1.18	400
500	290	-	-	320	1.10	
Czas próby		10 do 120 min.			60 min.	

¹⁾ Napięcia próby zostały zdefiniowane zgodnie z normą IEC 60060-1 jako wartość szczytowa podzielona przez $\sqrt{2}$

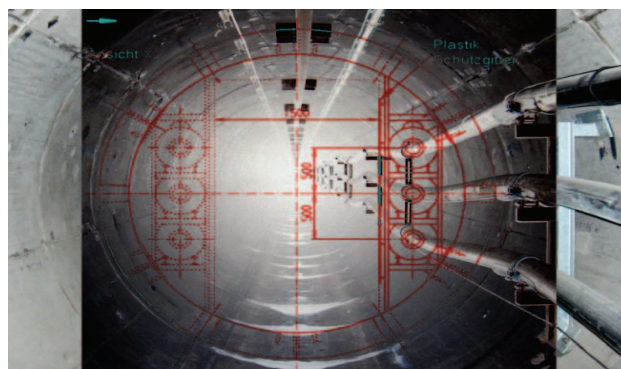
Wpływ rzeczywistych warunków pracy linii kablowej na jej niezawodność działania takich jak np. naprężenia mechaniczne towarzyszące zmianom temperatury w czasie eksploatacji może być, zgodnie z normą IEC 62067, sprawdzony w czasie rocznej próby przekwalifikującej. Kabel o długości co najmniej 100 m wraz z osprzętem poddawany jest ściśle określonym cyklom termicznym przy napięciu o wartości $1,7U_0$, a po ich zakończeniu wykonuje się próbę wytrzymałości udarowej izolacji kabla. Istnieje ogólne przekonanie, iż dielektryczna próba linii kablowej przy napięciu stałym stanowi zagrożenie dla izolacji kabla oraz jego osprzętu.

Praktyczna realizacja próby pomontażowej linii kablowej 420 kV z polietylenu usieciowanego

Układ probierczo-pomiarowy

W 2005 roku w Londynie została wykonana przez IPH pomontażowa próba 20 km linii kablowej XLPE na napięcie 420 kV [10]. Trójfazowy kabel o przekroju miedzianej żyły

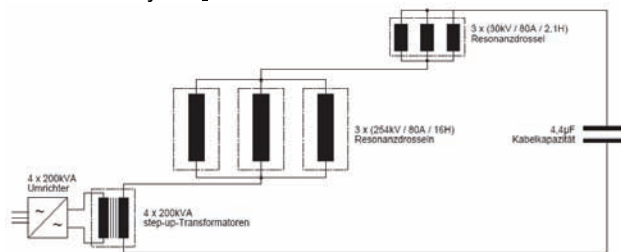
równym 2500 mm^2 i zewnętrznej średnicy wynoszącej 150 mm został umieszczony w podziemnym tunelu o średnicy 3 m (rys. 5).



Rys. 5. Profil tunelu

Po raz pierwszy, na tak długim odcinku linii, przeprowadzono próbę wytrzymałości elektrycznej przy napięciu przemiennym i jednocześnie pomiary wnz sondami pojemnościowymi umieszczonymi w 20 mufach kablowych i dwóch głowicach z SF₆ w każdej z faz.

Próbę wytrzymałości wykonano przy napięciu o wartości 280 kV, a do jego wytworzenia zostały wykorzystane cztery układy rezonansowe połączone jak na rysunku 6. Przy pojemności kabla jednej fazy równej 4,4 μF, częstotliwość rezonansowa wynosiła 31 Hz, prąd miał natężenie 240 A a moc układu wynosiła 67 MVA.

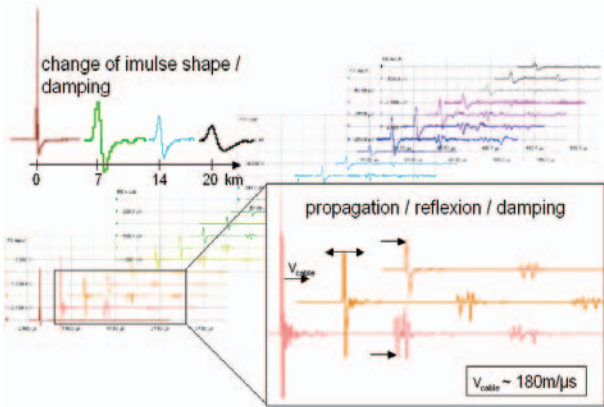


Rys.6. Schemat układu probierczego

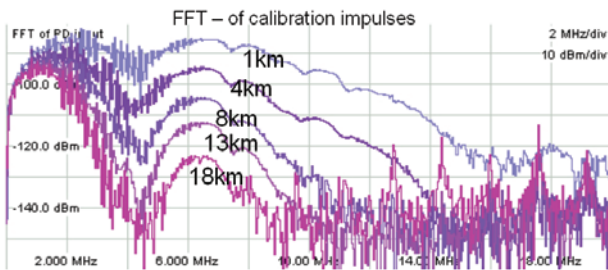
Kalibracja układu pomiarowego wnz

W warunkach polowych niezbędna jest weryfikacja poprawnego funkcjonowania układu pomiarowego wnz oraz jego czułości. Tłumienie i dyspersja sygnału kalibrującego wzdłuż linii kablowej uniemożliwiają przeprowadzenie standardowej procedury kalibracji opisanej w normie IEC 60270. Z tego powodu została zastosowana zmodyfikowana procedura kalibracji. Na wstępie sprawdzono właściwe wzajemne połączenia jednostek pomiarowych wnz za pomocą ich wewnętrznych generatorów sygnału. Następnie przy użyciu zewnętrznego kalibratora wprowadzono do linii kablowej od strony napowietrznego przepustu sygnał o wartości 500 pC. Był on bez trudu identyfikowany na wszystkich połączonych światłowodem jednostkach pomiarowych wnz. Amplituda sygnału przekraczała co najmniej dwukrotnie poziom szumu na całej 20 km długości linii kablowej (rys. 7), a dokładność synchronizacji całego systemu pomiarowego wynosiła +/-20ns.

Czasowe sygnały rejestrowane na poszczególnych sondach pomiarowych zostały przekształcone za pomocą transformacji Fouriera na dziedzinę częstotliwości. Niektóre z nich przedstawione są na rysunku 8. Widoczne jest wyraźne tłumienie wyższych częstotliwości w widmie sygnału wraz z odległością od miejsca jego emisji.

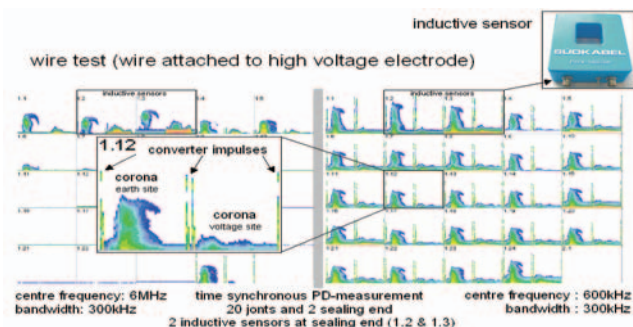


Rys.7. Odbicia i tłumienie sygnału kalibrującego w czasie jego propagacji wzdłuż linii kablowej



Rys.8. Charakterystyka częstotliwościowa rejestrowanych sygnałów kalibratora

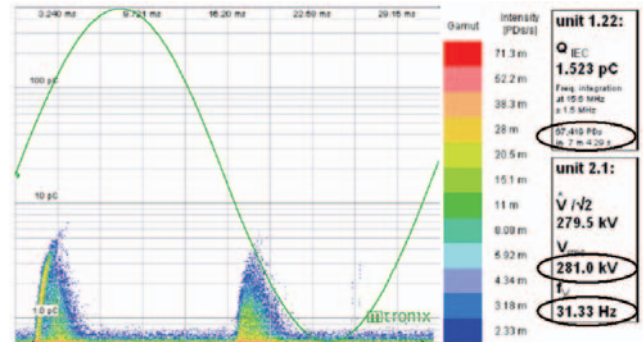
Przed próbą napięciową został wykonany tak zwany "wire test", który miał za zadanie kontrolę poprawnego funkcjonowania układu pomiarowego dla typowego sygnału wnz. Na zewnętrznym przewodzie wysokonapięciowym zamocowano odcinek miedzianego drutu, który przy napięciu 50 kV wytwarzał wyładowanie ulotowe. Rejestrację propagacji ulotu wzdłuż linii kablowej przeprowadzono dla dwóch różnych centralnych częstotliwości pomiarowych: 6 MHz i 600 kHz, tak dobranych, aby zakłócenia zewnętrzne nie utrudniały pomiaru (rys.9). W przypadku rejestracji przy 6 MHz sygnał był widoczny jedynie na czterech sondach znajdujących się najbliżej miejsca emisji ulotu. Tłumienie było zdecydowanie mniejsze przy częstotliwości 600 kHz. W tym przypadku pomiar ulotu był możliwy na wszystkich 22 sondach.



Rys.9. Obraz sygnału wyładowania ulotowego na poszczególnych sondach

Zasadnicza próba napięciowa z jednoczesnym pomiarem wnz rozpoczęła się na poziomie 50 kV, po czym napięcie było stopniowo zwiększane i utrzymywane na coraz wyższych poziomach przez czas potrzebny na wykonanie pomiarów wnz na wszystkich sondach jednej fazy. Próbę zakończono po 1 h od chwili osiągnięcia napięcia o wartości 280 kV.

Na rysunku 10 przedstawiono obraz wnz zarejestrowany przy napięciu 280 kV na sondzie umieszczonej na przepięciu z SF₆. Po upływie 30 min. sygnał wnz zanikł, co zostało uznane za znak zakończenia procesu formowania.



Rys.10. Rejestracja sygnału wnz na sondzie umieszczonej na głowicy z SF₆

Podsumowanie i wnioski

- Zastosowanie procedury próby pomontażowej łączącej próbę napięciem przemiennym z jednoczesnym pomiarem wnz sondami umieszczonymi na każdym elemencie osprzętu linii kablowej pozwala na wykrycie i dokładną lokalizację defektów związanych z transportem i montażem linii kablowej oraz ogranicza do minimum prawdopodobieństwo wystąpienia przeskoku w czasie próby.
- Układy rezonansowe typu ACRF umożliwiają ekonomiczne przeprowadzenie próby pomontażowej linii kablowych najwyższych napięć o długościach dochodzących do 20 km, zgodnie z aktualnymi wymaganiami norm IEC.
- Czułość pomiaru wnz sondami umieszczonymi we wnętrzu osprzętu kablowego jest zbliżona do czułości pomiarowej uzyskanej metodą standardową w laboratorium.

LITERATURA

- [1] IEC 62067 Ed.1 2001-10: 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
- [2] IEC 60840 Ed3. 2004-4: 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
- [3] DIN VDE 0276-62067(1996): Starkstromkabel – Energieverteilungskabel mit extrudierter Isolierung für Nennspannungen 150 bis 500 kV
- [4] HD 632 S1: 1998/prA2: (IEC 60840 Ed.3)
- [5] CIGRE WG21.09: After Laying Tests, *Electra*, (1996), nr. 166
- [6] Chan, Duffy, Hiivala, Wasik, PD Testing of Solid Dielectric Cable", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 7 (1991), nr. 5
- [7] Hauschild W., Schufft W., Plath R., Herrmann U., Polster K., The technique of AC on-side testing of HV cables by frequency-tuned resonant test systems, *CIGRE Report* (2002)
- [8] IEC 60060: High-voltage test techniques
- [9] Glockenbach E, Hauschild W., The selection of the frequency range for HV in-side testing of extruded cable systems, *IEEE Insulation Magazine* 16 (2000), nr. 6, 11-16
- [10] Plath R., Schröder G., Sutton S., PD Measurements on Extra High Voltage Cable Accessories During Commissioning of Exceptionally Long 400 kV XLPE-Insulated Cable System, artykuł został zaprezentowany na konferencji ISH w Ljubljanie, Slovenia (2007).

Autorzy: dr hab. inż. Wojciech Kołtonowicz, dr-ing Ronald Plath, IPH Institut „Prüffeld für elektrische Hochleistungstechnik” GmbH (CESI Group), Landsberger Allee 378, 12681 Berlin, E-mail: koltonowicz@iph.de plath@iph.de