

Doświadczenia z badań odbiorczych i eksploatacyjnych linii kablowych wysokiego napięcia

Streszczenie. W artykule przedstawiono zastosowanie napięcia przemiennego tłumionego (DAC) do badań odbiorczych i diagnostyki w miejscu zainstalowania elektroenergetycznych kabli wysokiego napięcia (do 230 kV).

Abstract. The article presents the application of damped alternating voltage (DAC) for acceptance tests and diagnostics in the place of installing high voltage power cables (up to 230 kV). (**Experiences from acceptance and exploitation tests of high voltage cable lines**).

Słowa kluczowe: kable elektroenergetyczne przesyłowe, badania odbiorcze, diagnostyka, napięcie przemiennie tłumione, wyładowania niezupełne, lokalizacja defektów, ocena stanu, nowoczesne metody badawcze i diagnostyczne.

Key words: transmission power cables, after-laying testing, diagnostic testing, damped AC voltage, partial discharges, defect localization, condition assessment, modern testing and diagnosis.

Wstęp

Wydaje się, że bezdyskusyjnym faktem jest konieczność rozbudowy sieci elektroenergetycznych – zarówno w technologii linii napowietrznych, jak i linii kablowych. Jednakże uzyskanie akceptacji społecznej dla budowy nowych linii napowietrznych jest bardzo trudne. W coraz większej liczbie rozwiązań nowych linii elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć jedyne akceptowalne rozwiązanie to linia kablowa. Wszelkie problemy związane z budową linii napowietrznych oraz zdecydowanie wyższe wskaźniki SAIDI dla państw, w których jest bardzo niski stopień skablowania sieci elektroenergetycznej – coraz częściej będą wpływały na decyzje inwestorów aby, w miarę możliwości technicznych oraz ekonomicznych, budować linie kablowe. Po problemach z zapewnieniem ciągłości zasilania odbiorców w energię elektryczną po wystąpieniu różnego rodzaju klęsk żywiołowych, różne gremia decyzyjne również wskazują na konieczność silniejszego rozwoju sieci kablowych. Operatorzy sieci w naszym kraju w strategii działania także wskazują na konieczność rozwoju linii kablowych. Dlatego nie tylko elektroenergetyków cieszy wiadomość o oddawanej do eksploatacji kolejnej wysokonapięciowej linii napowietrznej lub kablowej.

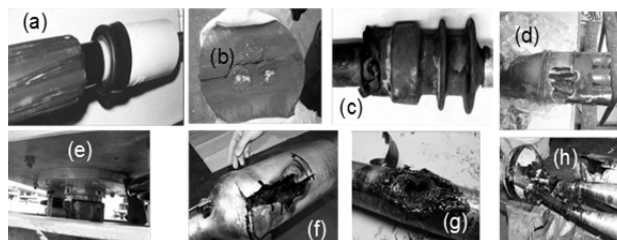
W ciągu ostatnich kilkunastu lat [1-18] oprócz napięcia zmiennego AC, światową uwagę przyciąga coraz bardziej zastosowanie napięć o niskiej częstotliwości VLF (dla kabli średniego napięcia) oraz napięć przemiennych tłumionych (DAC – *Damped Alternating Current voltage*). Ponieważ większość norm IEC dotyczy zagadnień produkcyjnych, postępy w tej dziedzinie są technicznie dobrze opisane w kilku wytycznych organizacji IEEE.

Zalecenia dla badań linii kablowych wykonywanych w miejscu zainstalowania

Awarie izolacji w energetycznych kablach i osprzęcie kablowym mogą wystąpić zarówno w warunkach normalnej ich eksploatacji, jak i podczas działania napięć przemijających, powstałych na skutek wyładowań atmosferycznych lub przepięć łączeniowych. Przykłady awarii w rozdzielczych przesyłowych kablach elektroenergetycznych średnich i wysokich napięć pokazano na rysunku 1.

Większość awarii następuje w rezultacie powstania wzrostu lokalnego natężenia pola elektrycznego, które jest wyższe niż wytrzymałość dielektryczna materiałów dielektrycznych w tym obszarze układu izolacyjnego lub,

jeśli materiał dielektryka ulega degradacji do stanu, w którym wytrzymałość elektryczna jest niewystarczająca [18]. W celu zlokalizowania miejsc o osłabionej wytrzymałości elektrycznej jeszcze przed wystąpieniem awarii, czyli aby ocenić stan izolacji systemu kablowego, stosuje się procedurę badania linii kablowych w miejscu ich zainstalowania, jak to pokazano na rysunku 2.



Rys.1. Przykłady uszkodzenia izolacji w kablach i osprzęcie; kable rozdzielcze SN: (a) złe umiejscowienie elementu sterowania polem elektrycznym, (b) duże pęknięcie w środku mufy z żywicy epoksydowej, (c) uszkodzenie powierzchni granicznej w głowicy, (d) ostre krawędzie konektora wewnątrz głowicy kabla o izolacji papier+syciu; kable przesyłowe WN: (e) zanieczyszczenie i wilgoć w głowicy kabla 132 kV XLPE z nieuszczelnioną pokrywą dolną, (f, h) przebicie w wyniku przesuwania się kabla na skutek rozszerzania termicznego oleju – bezpośrednio skutkującym powstawaniem pęknięć i pustych przestrzeni w mufie, (g) drzewienie elektryczne powodujące długotrwałą degradację izolacji i w końcu przebicie kabla 150 kV z ciśnieniową izolacją gazową [21]

W stosunku do stosowanych procedur probierczych tłumionym napięciem przemiennym, norma IEEE 400.4 [3] zawiera praktyczne rozważania oparte na doświadczeniach użytkowników zebrane podczas ostatnich 15 lat w odniesieniu do wymagań kilku norm IEC [15, 16, 17]. Przykłady takich rozważań obejmują liczbę wzbudzeń napięciem tłumionym DAC, zastosowanych podczas badania oraz zalecany minimalny poziom napięcia probierczego.

Opinie użytkowników potwierdzają następujące parametry probiercze zawarte w [3], takie jak, maksymalne poziomy napięcie probierczych tłumionych DAC: dla kabli na napięcie 36-150 kV – do 1,73-2,0 U₀, dla kabli na napięcie 150-230 kV – do 1,4-1,7 U₀, oraz liczbę 50 wzbudzeń tłumionym napięciem DAC przy maksymalnym przyłożonym poziomie tłumionego napięcia wytrzymałanego DAC.

Badanie elektroenergetycznych kabli przesyłowych po ich ułożeniu za pomocą napięcia tłumionego DAC

Badanie tłumionym napięciem DAC może być stosowane jako sama próba napięciowa lub może być też połączone z pomiarami parametrów wyładowań niezupełnych oraz współczynnika strat dielektrycznych dla nowo zainstalowanych kabli oraz kabli zestarzonych w trakcie ich eksploatacji. Zastosowanie tłumionych napięć DAC do badania kabli energetycznych jest zgodne z odpowiednimi normami i wytycznymi międzynarodowymi IEC, IEEE oraz CIGRE [1, 3, 15, 16, 17, 24].



Rys.2. Przykład badania linii kablowej w miejscu jej zainstalowania z wykorzystaniem sinusoidalnego tłumionego napięcia przemiennego. Linia kablowa 161 kV, o długości 6,0 km z izolacją XLPE, system probierczy napięcia tłumionego DAC HV300 jest podłączony do jednej z faz badanej linii

Badanie linii kablowej po jej ułożeniu ma na celu weryfikację stanu kompletnego system kablowego. Jest to test terenowy wykonywany po instalacji linii, obejmujący badanie kabla, głowic i muf, zanim system kablowy zostanie oddany do eksploatacji. Badanie po ułożeniu powinno być wykonywane jako próba napięciowa monitorowana DAC. Składa się ona z próby wysokonapięciowej o określonej wartości napięcia probierczego i monitorowania wyładowań niezupełnych (wnz) dla określenia ogólnego stanu linii. Dodatkowa informacja dostarczana przez wykrywanie oraz monitorowanie wnz w połączeniu z próbą napięciową znacząco wzbogaca ocenę ogólnego stanu izolacji ponieważ dostarcza informacji o słabych miejscach w układzie izolacyjnym linii [19, 20-27].

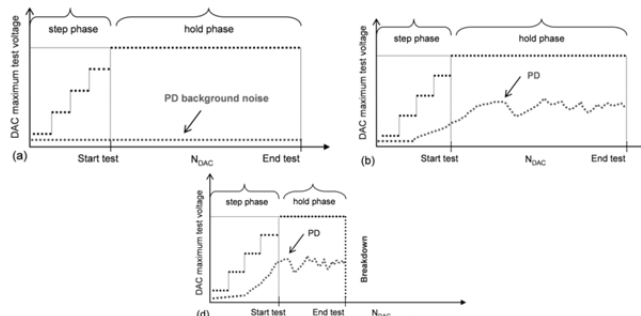
Typowa charakterystyka elektroenergetycznych kablowych linii przesyłowych jest następująca:

- wysoka pojemność własna linii, wymagająca dużej mocy konwencjonalnych systemów probierczych napięcia przemiennego AC,
- w zależności od długości linii istnieje w niej określona liczba muf,
- po instalacji trzeba zbadać całą linię kablową w miejscu jej zainstalowania,
- w odniesieniu do całej długości linii wszelkie możliwe defekty powstałe podczas transportu oraz instalacji mogą być wykryte i zlokalizowane tylko za pomocą badania tłumionym napięciem DAC, obejmującym wykrywanie wyładowań niezupełnych. Stosuje się jedno- lub dwustronne zasilanie linii napięciem probierczym.

Oddziaływanie tłumionego napięcia AC, przykładanego do badanego obiektu, może być uważane za podobne (pod względem stwarzanych warunków) do próby fabrycznej. Podczas pewnej liczby cykli przykładanego napięcia DAC, wnz inicjowane są w sposób podobny do warunków inicjacji wyładowań przy napięciu 50(60) Hz. Ta procedura może być powtórzona dla wielokrotnych wzbudzeń, jedno po drugim, aby wykonać pełną próbę napięciową.

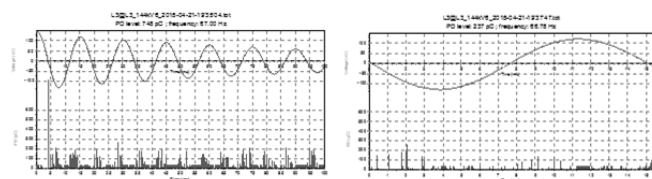
Pierwszy sposób opiera się na założeniu, że wolna od usterek i/lub niezestarzona izolacja może wytrzymać wyższe natężenie pola elektrycznego niż występujące w warunkach pracy znamionowej oraz, że w razie obecności defektów w układzie izolacyjnym lub pogorszenia stanu izolacji w wyniku postępującego procesu jej starzenia – wytrzymałość elektryczna będzie niższa niż wymagana i pod wpływem działania napięcia probierczego o podwyższonej wartości może nastąpić przebicie w trakcie wykonywania próby napięciowej o określonym czasie jej trwania. Wynik testu jest prosty: pozytywny lub negatywny.

W próbie napięciowej linii kablowej przykładana jest określona liczba wzbudzeń (rys.3). Dzięki krótszemu czasowi trwania wzbudzenia oraz zmniejszającej się amplitudzie napięcia (tłumienie), uzyskane wyniki testu DAC mogą się różnić od uzyskanych przy badaniu napięciem przemiennym ciągłym AC. Aby wygenerować kilkadziesiąt cykli tłumionych napięć DAC przy częstotliwościach do kilkuset Hz, w latach dziewięćdziesiątych opracowano do tego celu specjalny system probierczy [4]. Takie systemy probiercze mogą także być łatwo wykorzystywane do wykrywania i lokalizacji wyładowań niezupełnych w kablach energetycznych oraz w osprzęcie kablowym w miejscu zainstalowania, zgodnie z zaleceniami normy IEC 60270.



Rys.3. Przykładowy wynik uzyskany podczas napięciowej próby monitorowanej dla trzech różnych linii kablowych badanych napięciem AC (DAC): (a) nie wystąpiło przebicie badanego układu izolacyjnego oraz nie zaobserwowano wyładowań niezupełnych o intensywności przekraczającej poziom zakłóceń tła, (b) nie wystąpiło przebicie badanego układu izolacyjnego, lecz zaobserwowano pojawienie się wyładowań niezupełnych (PD), (d) przebicie nastąpiło w czasie trwania próby napięciowej o pełnej wartości napięcia probierczego oraz zaobserwowano pojawienie się wyładowań niezupełnych [3]

Próby napięciowe mogą być wykonywane także jako próby monitorowane z jednoczesnym pomiarem parametrów wnz. Przykładana jest pewna liczba wzbudzeń napięciem DAC i mierzy się jedną lub więcej dodatkowych wielkości wykorzystywanych do określenia, czy linia kablowa spełnia założone kryteria oceny stanu układu izolacyjnego. Na rysunku 4 zilustrowano przebieg przyłożonego napięcia DAC oraz wykryte wyładowania niezupełne. Dzięki dodatkowej informacji o istnieniu wyładowań można rozszerzyć wiedzę o stanie izolacji.



Rys.4. Tłumione napięcia DAC oraz przebiegi fazowe wyładowań niezupełnych obserwowane podczas monitorowanej próby napięciowej dla fazy L3 linii kablowej 161 kV XLPE, obraz wnz przy napięciu probierczym 1,1U0

Zalecane napięcia probiercze oraz czasy trwania podane w normie IEEE 400.4 opierają się na doniesieniach literaturowych, zaleceniach międzynarodowych oraz wynikach uzyskanych w ciągu wielu lat gromadzenia doświadczeń terenowych przez użytkowników technologii DAC. Arbitralne zwiększanie napięcia lub wydłużanie czasu trwania próby ponad zalecane wartości może zwiększyć prawdopodobieństwo ewentualnego wczesnego wystąpienia awarii podczas eksploatacji. Zastosowane maksymalne poziomy napięcia probierczego do wykonania próby napięciowej nowo zainstalowanych kabli zestawiono w tabelicy 1. Wykazano, że połączenie próby napięciowej DAC wraz z wykrywaniem wnz daje kompletną informację o istnieniu ewentualnych słabych miejsc w układzie izolacyjnym linii kablowej, w których może nastąpić przebicie. Z danych statystycznych wynika, że w przypadku wystąpienia przebicia izolacji linii podczas monitorowanej próby napięciowej, w ponad 70% przypadkach, w badanych liniach stwierdzono pojawienie się intensywnych wyładowań niepełnych przed samym przebiciem.

Tablica 1. Poziomy tłumionego napięcia DAC (20-500 Hz, 50 tłumionych wzbudzeń DAC) stosowane do badania nowo-zainstalowanych kabli energetycznych [16, 17]

Znamionowe napięcie międzyfazowe linii kablowej U [kV]	Napięcie fazowe U ₀ [kV]	Poziom fazowego napięcia probierczego DAC [kV]
45 - 47	26	74
60 - 69	35	99
110 - 115	64	181
132 - 138	77	187
150 - 161	87	212
220 - 230	127	254

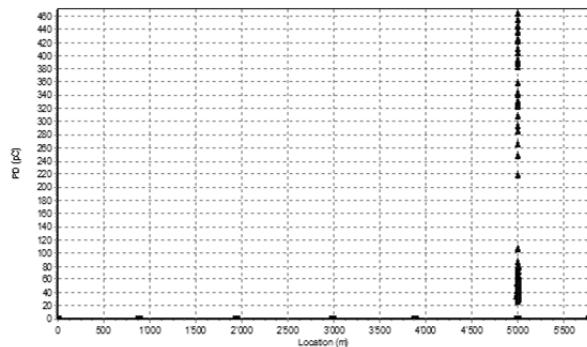
Przykłady terenowego badania przesyłowych kabli energetycznych

Nowo zainstalowana dwutorowa linia kablowa o długości 5,8 km, na napięciu 161 kV z izolacją XLPE była badana przy użyciu napięcia tłumionego DAC o częstotliwości 66 Hz i wartości 1,7U₀, jak to pokazano na rysunku 5. Wykonywano monitorowaną próbę napięciową. W miarę zwiększania tłumionego napięcia probierczego DAC poczynając od wartości 0,2U₀, zaobserwowano podwyższoną intensywność wyładowań niepełnych w fazie L3 jednego z dwóch torów. Zwiększenie napięcia probierczego skutkowało zwiększeniem aktywności wnz. Mapping wyładowań ujawnił ich koncentrację na piątym kilometrze linii i na tej podstawie zalecono dokonanie naprawy w tym miejscu. Jednakże z powodu faktu, że intensywność wyładowań nie przekraczała 500 pC, przedsiębiorstwo energetyczne zdecydowało się nie wymieniać natychmiast mufy, w której występowały wnz. Niestety po 6 miesiącach od badania linii nastąpiła awaria kabla dokładnie w tym miejscu.

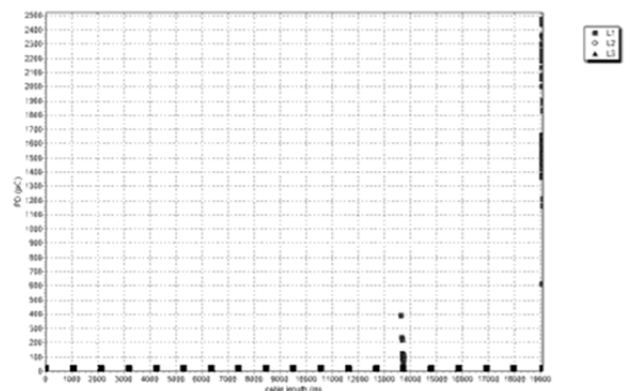
Lokalizacja defektu generującego wyładowania niepełne w fazie L3 może być wyznaczona także za pomocą analizy TDR (ang. *Time-Domain Reflectometry*). Pozostałe pięć odcinków kablowych spełniało warunki badań po ułożeniu i pomyślnie przeszło test. Nie wykryto żadnej wewnętrznej aktywności wnz w izolacji kabli i w osprzęcie kablowym.

W kolejnym przykładzie opisano badanie nowo ułożonej linii 110 kV o długości 19,1 km z układami do pomiaru wnz zamontowanymi na obu końcach kabla. Uzyskane wyniki zilustrowano na rysunku 5. Czujnik wnz A podłączony jest do bliskiego końca kabla razem z systemem probierczym DAC. Czujnik B umieszczono na drugim (odległym) końcu kabla. Czujniki wyładowań pozwalają na wykonanie pomiaru z dokładnością do 10 ns. Pozwala to zlokalizować

źródło wyładowań z dokładnością do około 3 m. Podczas testu operator systemu pomiarowego znajdujący się przy bliskim końcu kabla może kontrolować wskazania czujnika wnz znajdującego się na drugim (dalekim) końcu linii i odczytywać aktualne poziomy wyładowań, zgodnie z zaleceniami IEC 60270. Następnie zapisane dane pomiarowe dla odległego końca zostały zestawione z danymi pomiarowymi uzyskanymi dla bliskiego końca w celu lokalizacji miejsc występowania wnz tak, aby można było stworzyć obraz widoczny na rysunku 6. Jak widać, impulsy wyładowań niepełnych pojawiły się w jednej z muf w odległości 13,7 km i głowicy na końcu kabla w fazie L1. Napięcie zapłonu wyładowań niepełnych (PDIV) wyniosło 1,1xU₀, a przedstawiony obraz występowania wnz wykonano dla danych otrzymanych przy napięciu probierczym 1,7xU₀.



Rys.5. Mapowanie miejsca występowania wyładowań niepełnych w linii kablowej 161 kV, napięcie probiercze DAC 1,7U₀, stwierdzono koncentrację wnz na 5,0 km w mufie kablowej lub jej pobliżu



Rys.6. Mapowanie miejsca występowania wyładowań niepełnych w linii kablowej 110 kV o długości 19,1 km. Napięcie probiercze DAC 1,7U₀, lokalizacja WNZ otrzymana z dwustronnego pomiaru wskazująca występowanie wnz w fazie L1 w mufie w odległości 13,7 km i w głowicy na oddalonym końcu linii

Wnioski

Z dotychczasowych ogólnoswiatowych doświadczeń można wyciągnąć następujące wnioski:

1. W porównaniu z konwencjonalnym badaniem przy użyciu układu rezonansowego napięcia przemiennego AC, zastosowanie tłumionych napięć przemiennych DAC z monitorowaniem wyładowań niepełnych wnz podczas próby napięciowej staje się coraz bardziej atrakcyjną i powszechną praktyką na całym świecie.
2. Czułe pomiary wyładowań, dające informacje o ich przebiegu oraz reflektometrię w dziedzinie czasu (TDR), pomagają we wczesnym wykrywaniu obecności wnz i lokalizację miejsca ich występowania w izolacji kabla oraz w osprzęcie.

3. Wykrywanie i lokalizacja defektów powodujących wyładowania w osprzęcie kablowym oraz monitorowanie stanu izolacji kablowej z zastosowaniem tłumionych napięć DAC jest metodą dużo bardziej czułą niż konwencjonalne badanie przy użyciu układu rezonansowego napięciem AC. Badanie DAC jest mniej destrukcyjne i bardziej czułe niż próba niemonitorowana napięciem probierczym przemiennym AC.
4. Przy badaniu bardzo długich kabli (do 40 km) zastosowanie dwustronnego pomiaru wzn przy badaniu tłumionym napięciem DAC, wraz z wykrywaniem miejsca występowania wyładowań jest bardzo użyteczne i może być stosowane do badania linii kablowych po ich zainstalowaniu, do badań po usunięciu awarii, badań eksploatacyjnych i diagnostycznych oraz oceny stanu kabli zestarzonych w czasie eksploatacji.

Autorzy: mgr inż. Jarosław Parciak, on-site hv solutions Central Europe Sp. z o.o., ul. Bagatela 11 lok. 14, 00-585 Warszawa, E-mail: jaroslaw.parciak@onsitehv.com; dr hab. inż. Edward Gulski, prof. nadzw., Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, E-mail: edward.gulski@put.poznan.pl; prof. dr hab. inż. Aleksandra Rakowska, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, E-mail: aleksandra.rakowska@put.poznan.pl; dr hab. inż. Krzysztof Siodła, prof. nadzw., Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, E-mail: krzysztof.siodla@put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] IEEE 400-2012: Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above, (2012)
- [2] IEEE 400.2-2013: IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency, (2013)
- [3] IEEE 400.4-2015: Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with Damped Alternating Current Voltage (DAC), (2015)
- [4] Gulski E, Wester F.J., Smit J.J., Seitz P.P., Turner M., Advanced PD diagnostic of MV power cable system using oscillating wave test system, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 16, 2, (2000), 17-25
- [5] Gulski E., Smit J.J., Petzold F., Seitz P.P., Quak B., de Vries F., Advanced Solution for On-Site Diagnosis of Distribution Power Cables, *Jicable 2007*, Versailles, France, (2007), paper C.7.2.4
- [6] Houtepen R., Chmura L., Smit J.J., Quak B., Seitz P.P., Gulski E., Estimation of Dielectric Loss Using Damped AC Voltages, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 27, No. 3, (2011)
- [7] Bodega R., Morshuis P.H., Lazzaroni M., Wester F.J., PD Recurrence in Cavities at Different Energizing Methods, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 53, No. 2, (2004)
- [8] Wester F.J., Gulski E., Smit J.J., Detection of Partial Discharges at Different AC Voltage Stresses in Power Cables, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, July/August (2007), 28-43.
- [9] Wester F.J., Condition Assessment of Power Cables Using PD Diagnosis at Damped AC Voltages, ISBN 90-8559-019-1, Delft, the Netherlands, (2004)
- [10] Gulski E., Lemke E., Gamlin M., Gockenbach E., Hauschild W., Pultrum E., Experiences in PD detection of distribution power cable systems, *Electra*, (ISSN 1286-1146), 34-43
- [11] Gulski E., Wester F.J., Schikarski P., Seitz P.P., PD diagnoses and condition assessment of distribution power cables using damped AC voltages. *Proceedings XIIIth International Symposium on HV*, Delft, (2003), paper 776
- [12] Gulski E., Smit J.J., Wester F.J., PD knowledge rules for insulation condition assessment of distribution power cables. *IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation*, 12(2), 223-239.
- [13] Aucourt C., Boone W., Kalkner W., Naybour R.D., Ombello F., Recommendations for a New After Laying Test Method for High Voltage Extruded Cable Systems, *CIGRE*, August (1990), Paper 21-105
- [14] Seitz P.P., Quak B., Gulski E., Smit J.J., Cichecki P., de Vries P., Petzold F., Novel Method for On-site Testing and Diagnosis of Transmission Cables up to 250kV, *Proceedings 7th International Conference Jicable*, (2007)
- [15] IEC 60502-2:2014, Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (Um = 1,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV) – Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV (Um = 7,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV)
- [16] IEC 60840: Power cables with extruded insulation and the accessories for rated voltages above 30 kV up to 150 kV – Test methods and requirements
- [17] IEC 62067: Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV (Um = 170 kV) up to 500 kV (Um = 550 kV) – Test methods and requirements
- [18] Kreuger F.H., Industrial High DC Voltage, ISBN 9-407-1110-0, (1995)
- [19] Jongen R., Seitz P.P., Quak B., de Vries F., Cichecki P., New Generation of On-site Testing Technology for Transmission Power Cables, *Jicable*, Versailles, France (2011), paper A.8.3
- [20] Jongen R., Quak B., Gulski E., Tenbohlen S., New developments in on-site testing of long lengths of (E)HV power cable, *Condition Monitoring and Diagnosis, Conference CMD*, (2012), 149-152.
- [21] Gulski E., Jongen R., Patterson R., Modern Testing and Diagnosis of Power Cables Using Damped AC Voltages, *NETA World*, Spring (2015)
- [22] CIGRE Technical Brochure 502, High-voltage on-site testing with partial discharge measurement, (2012)
- [23] CIGRE Technical Brochure 496, Recommendations for Testing DC Extruded Cable Systems for Power Transmission at a Rated Voltage up to 500 kV, (2012)
- [24] CIGRE Technical Brochure 680, Implementation of Long AC HV and EHV Cable Systems, (2017)
- [25] CIGRE Technical Brochure 444, Guidelines for Unconventional Partial Discharge Measurements, (2010)
- [26] CIGRE Technical Brochure 662, Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC 60270) and unconventional methods, (2016)
- [27] Gulski E., Rakowska A., Siodła K., Jongen R., Minassian R., Cichecki P., Parciak J., Smit J., On-Site Testing and Diagnosis of Transmission Power Cables up to 230 kV Using Damped AC Voltages, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 30, No. 3, May/June 2014, 27-38