

Inżynieria materiałowa w kablach średnich i wysokich napięć – stan obecny, wyzwania i kierunki rozwoju

KABEL
2024

XXIX KONFERENCJA SZKOLENIOWO-TECHNICZNA
ELEKTROENERGETYCZNE SIECI KABLOWE I NAPOWIETRZNE

12-15 marca 2024

Lidzbark Warmiński

Hotel Krasicki****

Iga Korczyńska

¹TELE-FONIKA Kable S.A., Zakład Bydgoszcz,

²Zachodniopomorski Uniwersytet
Technologiczny w Szczecinie

Iga Korczyńska¹ *TELE-FONIKA Kable S.A., Zakład Bydgoszcz,*² *Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie*

Inżynieria materiałowa w kablach średnich i wysokich napięć – stan obecny, wyzwania i kierunki rozwoju

1. Wstęp

Inżynieria materiałowa stanowi interdyscyplinarną dziedzinę nauki, która łączy zagadnienia z obszarów takich jak fizyka, chemia, elektrotechnika oraz metalurgia. Jej głównym celem jest opracowanie nowoczesnych materiałów o zaprojektowanych właściwościach, technologii ich wytwarzania oraz przetwórstwa procesowego. Postęp w dziedzinie inżynierii materiałowej stanowi kluczowy czynnik rozwoju w wielu dziedzinach techniki, w tym również w elektrotechnice. Znajomość podstaw chemicznych i fizycznych budowy materiałów pozwala na dogłębne zrozumienie oraz odkrywanie nowych właściwości, takich jak półprzewodnictwo czy nadprzewodnictwo.

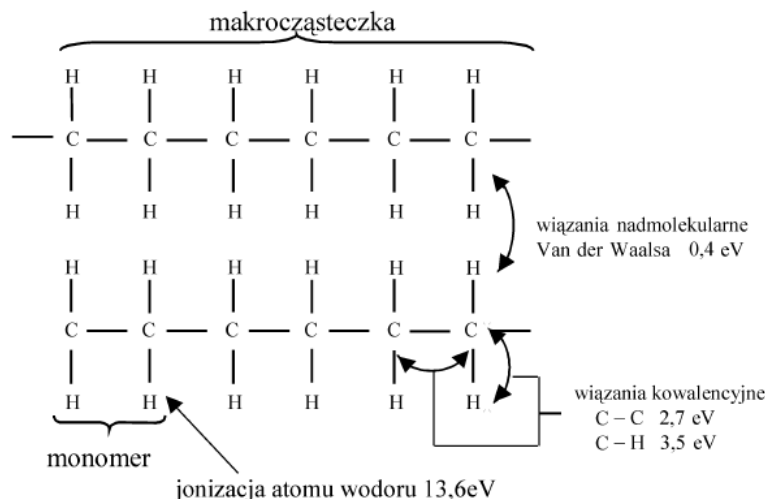
Jednym z kluczowych czynników wymuszających rozwój techniczny w elektroenergetyce jest konieczność zwiększenia produkcji energii elektrycznej z OZE (Dogger Bank do 2026r. 3,6 GW) oraz jej przesył energii na duże odległości. Dotyczy to szczególnie linii HVDC, które determinują konieczność rozwoju materiałów odpornych na działanie bardzo wysokiego natężenie pola elektrycznego oraz podmorskich kabli dynamicznych o specjalnych konstrukcjach projektowane na dużych głębokościach zanurzenia, nawet 500m. Postęp techniczny w dziedzinie materiałoznawstwa przyczynia się do doskonalenia właściwości materiałów przewodzących oraz izolacyjnych stosowanych w kablach elektroenergetycznych. Po okresie stosowania układów izolacyjnych z celulozowych materiałów, obecnie uwagę skupia się na doskonaleniu coraz lepszych polimerów syntetycznych sieciowanych lub termoplastycznych. Wyzwaniem staje się natomiast zaspokojenie wzmożonych wymogów Unii Europejskiej dotyczących redukcji śladu węglowego, przy jednoczesnym zapewnieniu wydłużonej niezawodności kabli, co ma kluczowe znaczenie dla ich żywotności i funkcjonalności w sieciach elektroenergetycznych.

2. Stan obecny technologii układów izolacyjnych

Od lat 60., kable z izolacją polimerową zastąpiły tradycyjne rozwiązania oparte na izolacji papierowo-olejowej. W przypadku kabli średniego i wysokiego napięcia najczęściej używane są polietylen sieciowany (XLPE) oraz guma etylenowo-propylenowa (EPR). Coraz rzadziej spotyka się izolację papierową pokrytą ołowiem (PILC). Wcześniej, była stosowana głównie w obwodach telegraficznych i telefonicznych o niskim napięciu. Aby zabezpieczyć papier przesycony syciwem lub olejem przed wilgocią, konieczne było pokrycie go ołowianą osłoną. Masywnie impregnowane kable SN z izolacją papierową stały się dostępne komercyjnie około 1895 roku. W czasie II wojny światowej do produkcji kabli wykorzystywano różne rodzaje izolacji z gumy syntetycznej i polietylenu. Upadek popularności PILC można datować na lata 80. i 90., gdy miejskie przedsiębiorstwa zaczęły instalować więcej kabli z izolacją EPR i XLPE. Wpływ na zmniejszenie użycia PILC miały różne czynniki, takie jak wysoki poziom specjalistycznej wiedzy wymagany do łączenia ołowiu, dłuższy czas łączenia, ograniczona dostępność produktu na rynku krajowym, a także presja na zaprzestanie stosowania ołowiu ze względów środowiskowych i bezpieczeństwa.

Polimery syntetyczne wykorzystywane są na szeroką skalę w kablach średnich i wysokich napięć pełnią rolę układów izolacyjnych, uszczelnień, wypełnień ośrodków oraz powłok kablowych. Tworzywa syntetyczne można podzielić na termoplasty, duroplasty oraz elastomery, które odpowiednio w procesach polimeryzacji, wulkanizacji i sieciowania uzyskują odmienne właściwości elektryczne i mechaniczne. Termoplasty to substancje o budowie łańcuchowej, które można uplastycznić pod wpływem wzrostu temperatury, a po jej obniżeniu przechodzą w stan stały.

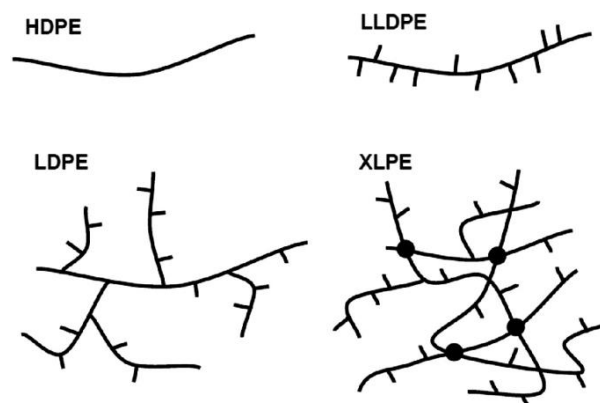
Największe znaczenie w kablownictwie mają polietylen (PE), usieciowany polietylen (XLPE), poli(chlorek winylu) (PVC) oraz polipropylen (PP) [1]. Polietylen jest polimerem niepolarnym, którego właściwości dielektryczne i mechaniczne zależne są m.in. od ciśnienia zastosowanego w procesie polimeryzacji, które może wynosić od 1 do kilkuset MPa. Polietylen wysokociśnieniowy o niskiej gęstości (LDPE) wykorzystuje się w izolacjach kablowych. Natomiast niskociśnieniowy polietylen o wysokiej gęstości (HDPE) zastosowanie znajduje w powłokach kabli. Wadą PE jest słaba odporność na wyładowania niepełne, których tworzenie wiąże się z oddziaływaniem silnego pola elektrycznego i wilgoci w warunkach eksploatacji kabli elektroenergetycznych. Wyładowania niepełne prowadzą do niszczenia struktury PE poprzez uszkodzenia wiązań kowalencyjnych C-C oraz C-H prowadząc do efektu drzewienia [1].



Rys.1. Struktura polietylenu [2]

W celu poprawy właściwości termicznych oraz odporności na starzenie polietylenowego układu izolacyjnego opracowana została technologia sieciowania PE. Usieciowany polietylen (XLPE) w porównaniu do termoplastycznego charakteryzuje się lepszymi właściwościami termicznymi oraz większą odpornością na wyładowania niepełne. Najczęściej stosowaną metodą w przypadku średnich, wysokich i ekstrawysokich napięć jest sieciowanie PE pod wpływem nadtlenków organicznych. Inne mniej popularne metody sieciowania to promieniowanie o dużej energii (ok. 1 MeV na 1 cm grubości ścianki tworzywa) lub sieciowanie pod wpływem silanów. Struktura chemiczna XLPE zawiera poprzeczne wiązania C-C tworzące sieć łączącą łańcuchy PE [2].

Porównanie właściwości LDPE, HDPE oraz XLPE zestawiono w tabeli 1 [2].



Rys.2. Struktury chemiczne różnych polietylenów [3]

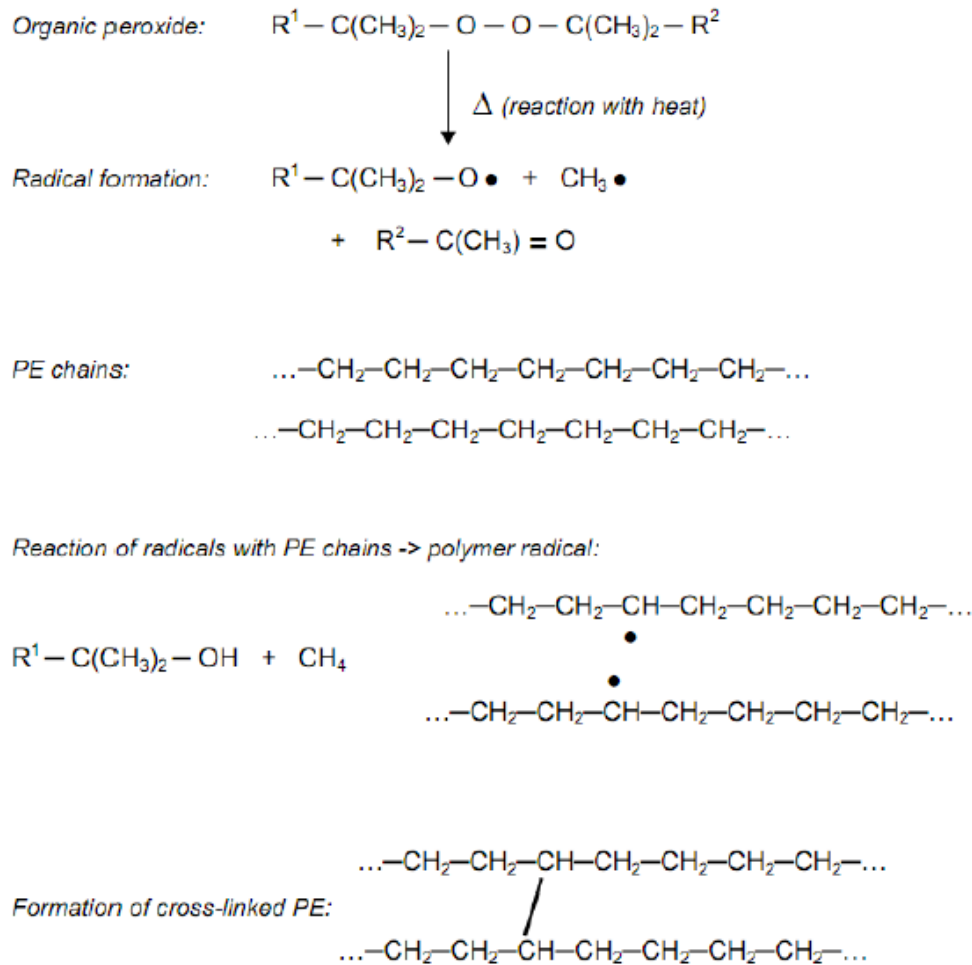
Tabela 1. Właściwości polietylenu o wysoko-, niskociśnieniowego oraz sieciowanego [2]

	LDPE	HDPE	XLPE
Gęstość, g/cm ³	0,91 – 0,92	0,94 – 0,96	0,91 – 0,92
Przenikalność dielektryczna, 1	2,3	2,3	2,3 – 2,5
Rezystywność skrośna w 20°C, Ohm	1013 - 1016	1014 - 1015	1013
Współczynnik strat dielektrycznych tgδ	< 0,0005	< 0,0006	< 0,0005
Wytrzymałość dielektryczna, kV/mm	16 - 20	16 - 24	30 – 40
Temperatura dopuszczalna pracy:			
- długotrwała, °C	70	75 – 80	90
- zwarciowa 5s, °C	130 - 150	130 - 150	250
Temperatura mięknięcia, °C	100	115 - 130	200
Krystaliczność w 20°C, %	60	75	60

Gęstość usieciowania jest istotnym czynnikiem dla określenia właściwości fizycznych różnych materiałów polimerowych. Połączenie właściwości fizycznych, stabilności termicznej, odporności na promieniowanie UV oraz szerokiego zakresu struktur i morfologii sprawiło, że produkty z usieciowanego polietylenu wyróżniają się w porównaniu z innymi materiałami polimerowymi. Wytrzymałość mechaniczna zwiększa się wraz ze stopniem usieciowania, co sprawia, że XLPE to odpowiedni materiał do zastosowań technicznych tj. rury, przewody czy endoprotezy stawów biodrowych. Podczas, gdy doskonałe właściwości dielektryczne, odporność na skurcz termiczny oraz stosunkowo niski wskaźnik rozszerzalności cieplnej sprawiają, że XLPE jest używany jako izolacja kabli wysokich napięć [3].

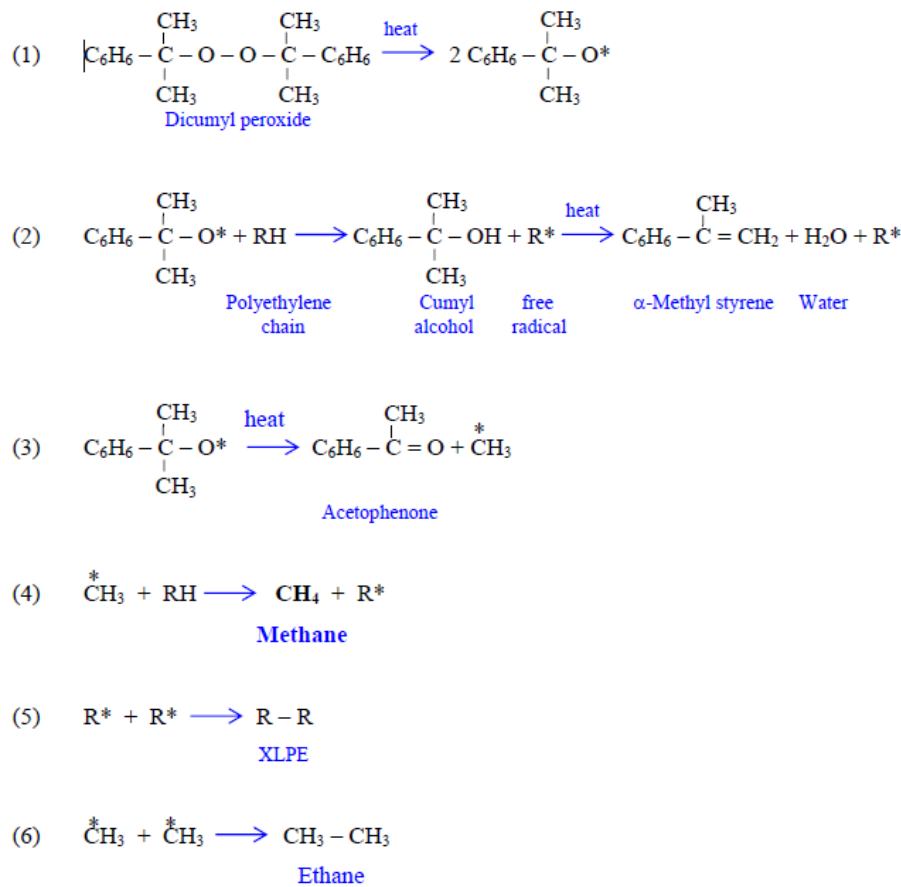
Skutkiem ubocznym sieciowania są gazowe produkty uboczne tzw. by-produkty powstałe podczas rozkładu nadtlenu dikumylu m.in. niepolarny metan oraz polarne tj. alkohol kumylowy i acetofenon. Metan może stanowić potencjalne zagrożenie, generując nadmierne ciśnienie wewnątrz kabla i na jego akcesoriach, ale co ważniejsze, może spowodować pożar lub nawet eksplozję podczas instalacji kabla. Dodatkowo, ciśnienie gazu może zniekształcić powłoki również te metaliczne, co może doprowadzić do pęknięcia lub przerwania ciągłości elektrycznej. Dlatego jednym z towarzyszących procesów sieciowania izolacji polietylenowej jest odgazowanie, dzięki któremu większość produktów ubocznych jest usuwana lub przynajmniej zredukowana do bezpiecznego i akceptowalnego poziomu z punktu widzenia operacyjnego [4].

W obecnej chwili nie istnieje standaryzowany test do oceny pozostałej zawartości metanu w izolacji kabli XLPE. Jednak jest to kwestia bezpieczeństwa i problemów w eksploatacji, aby zweryfikować, czy proces odgazowania został wykonany prawidłowo. Poniższy rysunek (Rys.3) pokazuje przykład reakcji sieciowania PE za pomocą organicznego nadtlenu [4].



Rys.3. Reakcja sieciowania polietylenu za pomocą DCP [4]

Natomiast rys.4 przedstawia różne etapy reakcji sieciowania PE prowadzącej do powstania różnych stabilnych produktów ubocznych, tj. alkohol kumylowy, alfa-metylostyren, octanofenon, woda, metan (CH₄) i etan (C₂H₆). Te produkty uboczne, w zależności od ich charakterystyk lotności i dyfuzji, a także od rozmiaru kabla oraz warunków przechowywania lub eksploatacji, będą bardziej lub mniej pozostawać w izolacji XLPE. Oczywiście jest, że z punktu widzenia bezpieczeństwa najważniejsze jest kontrolowanie poziomu metanu [4]. Warto dodać, że 200 ppm w kablu uważane jest za akceptowalny poziom dla bezpiecznej pracy kabla, ale nadal istnieje ryzyko związane z możliwym gromadzeniem się go w połączeniach w trakcie eksploatacji, co może prowadzić do bardzo wysokiego ciśnienia. Według publikacji CIGRE, chromatografia gazowa jest jedyną powszechnie stosowaną metodą, która daje wiarygodne wyniki przy wystarczająco dużej czułości. Zawartość metanu w kolbie wraz z masą próbki, jest używana do obliczenia zawartości metanu w próbce.

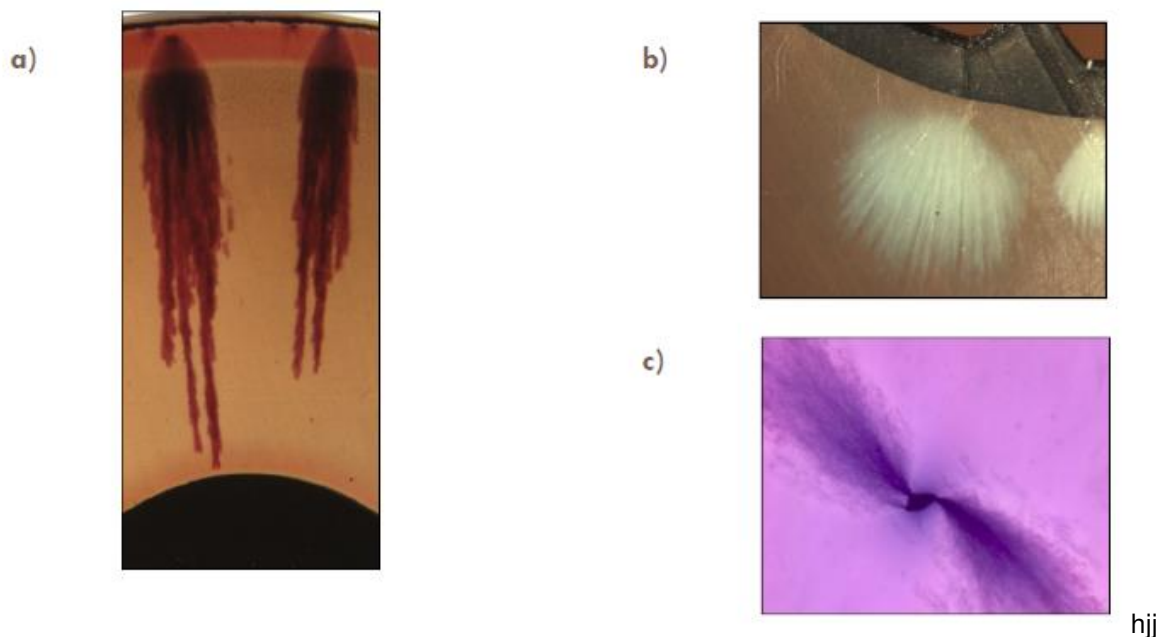


Rys.4. Schematyczne przedstawienie procesu reakcji sieciowania PE za pomocą DCP [4]

Tworzywa wytłaczane tj. PE czy XLPE zostały po raz pierwszy zastosowane jako izolacje kabli średnich napięć w latach 60. Choć izolacje na bazie polietylenu charakteryzują się wysoką wytrzymałością na przebicie elektryczne, niską stałą dielektryczną oraz niskimi stratami dielektrycznymi są jednak podatne na powolny proces starzenia zwanego drzewieniem wodnym. Tworzące się w procesie starzenia struktury przypominające drzewa tworzą się z defektów tj. zanieczyszczenia, wypukłości, nieregularności układu ekran-izolacja, wolnych przestrzeni gdy izolacja jest poddana naprężeniu elektrycznemu oraz wilgoci. Pomimo tego, że proces degradacji materiałów pod wpływem drzewienia wodnego dotyczy głównie kabli średnich napięć (5-46 kV) to zaobserwowano go również sporadycznie w kablach wysokiego napięcia (50-150 kV) [5].

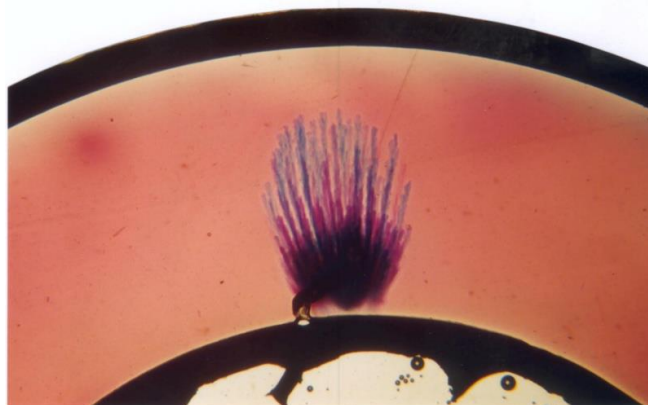
Drzewka obniżają wytrzymałość dielektryczną materiałów izolacyjnych i historycznie przyczyniły się do dużej ilości awarii w trakcie eksploatacji, szczególnie w starszych kablach, które posiadają wyższy poziom defektów i mniejszą ochronę przed wnikaniem wilgoci niż współczesne kable. Obecnie większą uwagę zwraca się na przeciwdziałanie penetracji wilgoci do ekranu kabla lub żyły roboczej podczas instalacji. Współcześnie stosuje się również izolację odporną na działanie drzewienia wodnego (WTR – water tree retardant), konstrukcję kabla suchego (metalowa powłoka), proces sieciowania przebiega bez wilgoci oraz stosuje się większą czystość związków i gładkość interfejsów żyła-ekran-izolacja-ekran [5]. Warto wskazać, że rozróżnia się rodzaje izolacji tj. „supercure” umożliwiające zwiększenie wydajności sieciowania, skracające czas odgazowania oraz „low-sag” niskościekające dedykowane na konstrukcje WN o grubej ściance izolacji. Materiały izolacyjne z uwagi na wspomnianą bardzo istotną czystość materiału dzieli się na klasy: R – standardowa do 72 kV, S – super czysta do 220 kV oraz klasa EHV powyżej 220 kV. Producenci tworzyw XLPE używają w procesach produkcji specjalnych, zautomatyzowanych systemów umożliwiających zapewnienie czystości oraz wysokiego stopnia homogenizacji.

Wykorzystywane systemy mają na celu rozdzielanie potencjalnych zbyleń granulatu, automatyczny system detekcji zanieczyszczeń umożliwia wysoką kontrolę nad czystością materiału oraz układów wylączarek kontrolnych do sprawdzania jakości taśmy w czasie rzeczywistym.



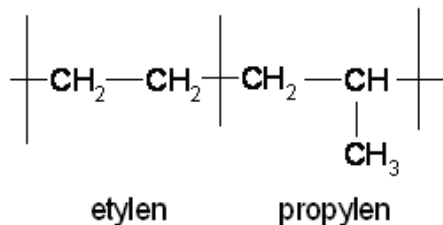
Rys.5. Typowe drzewka wodne powstające z a) ekranu izolacji, b) ekranu żyły roboczej i c) zanieczyszczeń izolacji XLPE [5]

Jak pokazano na rys.5. istnieją dwa rodzaje drzewek wodnych: 'vented' (2.1a i 2.1b) oraz 'bow-tie' (2.1c), które inicjowane są przez zanieczyszczenia i puste przestrzenie w masie materiału izolacji. Drzewka typu 'bow-tie' rosną w dwóch kierunkach, zazwyczaj wzdłuż osi pola elektrycznego. Po szybkim początkowym wzroście drzewka typu 'bow-tie' mają tendencję do osiągnięcia maksymalnej długości, chyba, że są inicjowane przez duże zanieczyszczenie jonowe. Drzewka wodne typu 'vented' inicjowane są na interfejsie ekran półprzewodzący-izolacja i rosną głównie wzdłuż osi przyłożonego pola. Drzewka typu 'vented' zazwyczaj potrzebują dłuższego czasu inicjacji niż te typu 'bow-tie', a doświadczenia pokazały, że drzewka typu 'vented' rosną przez cały okres starzenia aż do przeniknięcia całej grubości izolacji (jak wskazano na rys. 2.1a) tworząc mostek wodny. Dlatego drzewka typu 'vented' uważane są za powodujące poważniejsze starzenie niż drzewka typu 'bow-tie'. Drzewka wodne mogą również inicjować swój wzrost od zanieczyszczeń nieorganicznych (np. z korozji aluminium lub niekompatybilnego materiału z ekranów). Można to zobaczyć na rys. 2.1b. Należy zauważyć, że nie wszystkie drzewka wodne rosną na tyle długo, aby spowodować uszkodzenie izolacji [5].



Rys. 6. Drzewko wodne zainicjowane w ekranie żyły roboczej [5]

Badania prowadzone od wielu lat, w różnych instytutach na całym świecie, wykazują, że gumowa izolacja oparta na kopolimerze etylenowo-propylenowym (EPR) jest skuteczną alternatywą dla tradycyjnej izolacji z polietylenu sieciowanego w zakresie SN, przewyższając ją nawet pod względem niektórych parametrów [6].



Rys.7. Monomery etylenu i propylenu [6]

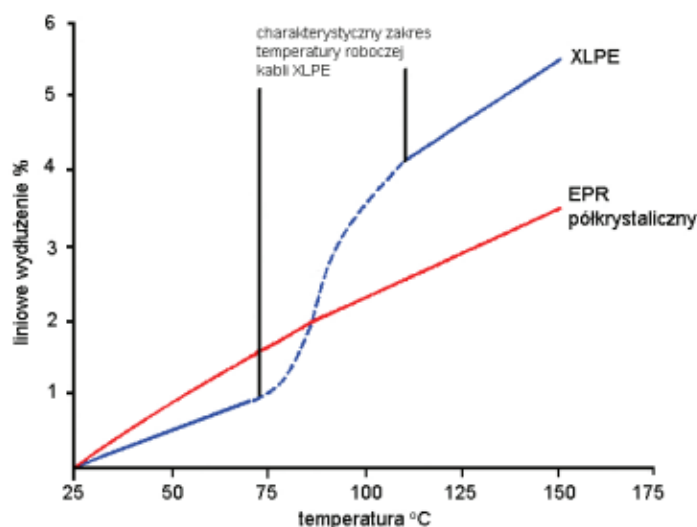
Podczas polimeryzacji monomerów etylenu i propylenu, w zadanych warunkach powstaje kopolimer nazywany etylenowo-propylenowym. Stosunek etylenu do propylenu może zmieniać się w szerokim zakresie. W rezultacie uzyskana struktura EPR nie jest w pełni krystaliczna. W niektórych przypadkach pożądane jest dodawanie trzeciego monomeru przed polimeryzacją. Monomer ten zwany dienem jest stosowany w celu ułatwienia procesu wulkanizacji. Takie materiały mają nazwę EPDM, to jest terpolimer etylenowo-propylenowo-dienowy [6].



Rys. 8. Kabel o izolacji EPR [7]

EPR ma nasyconą strukturę co czyni go odpornym na działanie czynników zewnętrznych, tj. światło, ciepło, tlen, a zwłaszcza ozon czy para wodna (warunki atmosferyczne). Właściwości EPR zależą od zawartości etylenu w kopolimerze oraz od rozkładu monomerów w cząsteczkach. Przekroczenie 60% molowych etylenu w mieszaninie EPR/EPDM prowadzi do zwiększenia twardości i stopnia krystaliczności materiału. EPR musi zostać poddany procesowi sieciowania, który może być przeprowadzony w obecności nadtlenków. Natomiast dzięki obecności wiązań podwójnych w mieszaninie EPDM, możliwe jest zastosowanie siarki lub innych środków sieciujących, takich jak żywice. Dla uzyskania lepszych właściwości mechanicznych, konieczne jest dodanie do mieszanki EPR/EPDM nieorganicznych napełniaczy, takich jak sadza, oraz plastyfikatorów w postaci olejów parafinowych. Właściwości mechaniczne mieszanki EPR zależą od składu elastomerów oraz rodzaju i ilości użytych napełniaczy. EPR charakteryzuje się znakomitą elastycznością oraz wysoką odpornością na trwałe deformacje, zwłaszcza te spowodowane sieciowaniem za pomocą nadtlenków, a także cechują się niską gęstością [6].

W USA i Włoszech kable EPR są często wykorzystywane w sieciach o średnim napięciu od 15 do 35 kV. Ulepszona konstrukcja kabli o średnim napięciu spowodowała zwiększenie roboczego natężenia pola dla EPR z 2,7 kV/mm do 4,2 kV/mm [8]. Do głównych zalet kabli z izolacją EPR należą dobre właściwości dielektryczne, wysoka odporność na wyładowania niezupełne, elastyczność w szerokim zakresie temperatur oraz pozostałe korzystne właściwości w podwyższonej temperaturze tj. niska rozszerzalność cieplna, wysoka odporność na drzewienie wodne i starzenie w powietrzu. Kluczowymi parametrami różniącym te dwa materiały są: współczynnik strat dielektrycznych $\tan\delta$, przenikalność elektryczna oraz wytrzymałość elektryczna [6]. Wyładowania niezupełne, w tym drzewienie wodne i drzewienie elektryczne w izolacji mają znaczący wpływ na jej żywotność. Badania laboratoryjne kabli EPR wykazały, że izolacja EPR posiada znaczną odporność na obydwa rodzaje drzewienia, tj. zjawiska inicjujące procesy degradacji izolacji [8].



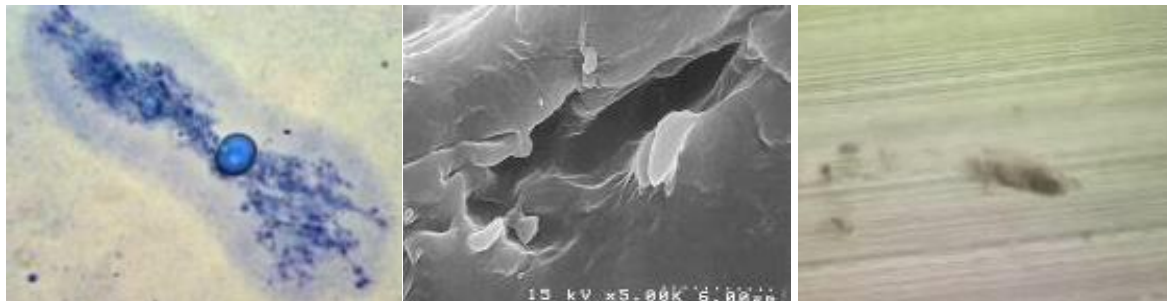
Rys. 8. Rozszerzalność cieplna XLPE oraz EPR [6]

Straty dielektryczne w izolacji EPR są o około 1 rząd wielkości większe niż w kablach o izolacji XLPE, pracujących poniżej temperatury 90°C (temperatura topnienia fazy krystalicznej XLPE). Powyżej tej temperatury straty dielektryczne w izolacji XLPE znacznie wzrastają i maleje ich wytrzymałość elektryczna. Dotyczy to również własności mechanicznych (tab. 3). W wyższych temperaturach wytrzymałość XLPE zależy od fazy krystalicznej w polimerze. W stanach awaryjnych, w temperaturze przeciążenia (130°C) polimer wykazuje znaczną podatność na odkształcenia. W podwyższonych temperaturach izolacja EPR posiada lepsze właściwości elektryczne niż XLPE i zachowuje ich stałość w szerokim zakresie temperatur. Izolacja EPR charakteryzuje się mniejszą wytrzymałością udarową niż izolacja z XLPE, jest jednak większa od wytrzymałości osprzętu i urządzeń zasilających. Zwiększenie odporności cieplnej izolacji EPR umożliwi oszczędność przekroju żyły roboczej kabla [6].

3. Wyzwania i kierunki rozwoju

Alternatywnym rozwiązaniem wydaje się być izolacja na bazie polipropylenu (PP). Główne właściwości nowej technologii wynikają z faktu, że izolacja oparta jest na całkowicie termoplastycznych materiałach przetwarzanych za pomocą innowacyjnej technologii, zdolnej do zapewnienia finalnemu produktowi właściwości elektrycznych i mechanicznych podobnych lub lepszych od tych kabli izolowanych konwencjonalnymi materiałami, takimi jak XLPE czy EPR. Nowa technologia pozwala uzyskać mieszkankę o właściwości nieosiągalnych dla izolacji usieciowanych używanych w przemyśle kablowym, ponieważ właściwości elektryczne są wzmacniane poprzez poprawioną jednorodność izolacji poprzez nieprzerwany przepływ procesu, brak zanieczyszczeń, brak sieciowania i brak gazowych produktów ubocznych.

Nowe układy izolacyjne wykazują wyższą temperaturę topnienia w porównaniu z elastomerami XLPE lub EPR, co pozwala osiągnąć wyższe temperatury robocze bez wpływu na wytrzymałość mechaniczną masy izolacyjnej. Praca w temperaturach do 110°C i awaryjnie do 130°C, zachowując przy tym tę samą temperaturę zwarciovą [9, 10].



Rys. 9. Możliwe defekty sieciowanej izolacji

Brak reakcji chemicznej jaką jest sieciowanie pozwala na wyeliminowanie odgazowania, który jest energo- i czasochłonnym procesem wydłużającym czas produkcji odcinka kabla. Dzięki braku ryzyka podsieciovania w głowicy wylączarki nie zachodzi potrzeba przerywania kampanii produkcyjnych po czasie określonym w technologii, co ma bezpośredni wpływ na ciągłość, stabilność, czas przebiegu procesu produkcyjnego oraz na zapewnienie lepszej jakości i żywotności systemu kablowego. Dzięki możliwości zastosowania wysokiego poziomu filtracji blendy izolacyjne na bazie PP wykazują doskonałe zachowanie podczas badań długotrwałych kabli SN poprzez lepszą morfologię, homogenizację i niski poziom zanieczyszczeń.

Compound no	Unit	EPR	HEPR	XLPE	PP
max operating T of the conductor	degC	90	90/105	90	110
Mechanical properties					
<i>before ageing on sample</i>					
min TS	MPa	4,2	8,5	12,5	12,5
min Elb	%	200	200	200	350
<i>after ageing on sample</i>					
T	degC	135	150	135	135
duration	h	168	168	168	240
min TS	MPa	+/-30 (%)	+/-30 (%)	+/-25 (%)	12,5
min Elb	%	+/-30 (%)	+/-30 (%)	+/-25 (%)	350
Physical and chemical properties					
<i>Water absorption</i>					
T	degC	85/100	100	85	85
duration	h	336/24	24	336	336
max variation of mass with DC: no breakdown	mg/cm ²	5/3	3	1	5/3
		-	-	-	-/no b.d.
<i>Pressure test at high T</i>					
T	degC				130
duration	h	-	-	-	6
Coefficient k	-				0,7
max depth of indentation	%				50
<i>Shrinkage test</i>					
T	degC			1/6	1/6
duration	h			120/130	130
max shrinkage	%			4	4
Elb at low T at -25degC	%	-	-	-	-/>20

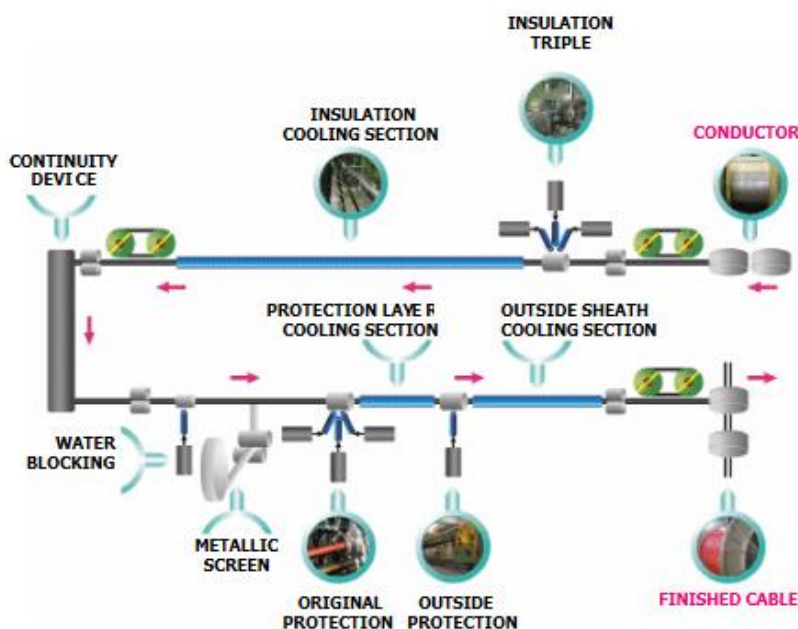
Rys. 10. Właściwości mechaniczne, chemiczne i fizyczne materiałów izolacyjnych wg HD 620 S3:2023.

Według najnowszego wydania normy HD 620 S3:2023, mieszanki izolacyjne na bazie PP charakteryzują się lepszymi parametrami mechanicznymi, które nie ulegają zmianie przed i po starzeniu, pojawieniem się testu nacisku w wysokiej temperaturze (130°C) oraz charakterystyka materiału w temperaturze -25°C, co stanowi największe wyzwanie.

Wreszcie, wpływ środowiskowy nowej klasy termoplastycznego materiału jest znacząco zmniejszony w porównaniu z wersjami usieciowanymi, ze względu na mniejszy wpływ surowcowy; niższe zużycie energii i brak emisji gazów cieplarnianych podczas procesu produkcji oraz możliwość całkowitego recyklingu warstw plastikowych na końcu życia kabla.

Izolacja na bazie PP wykazywać ma właściwości elektryczne doskonale zgodne z wymaganiami głównych specyfikacji technicznych kabli SN (oprócz testów na pomiar stopnia sieciowania, które można skutecznie zastąpić testami termo-mechanicznymi, mającymi na celu wykazanie optymalnych właściwości termoplastycznej izolacji) [9].

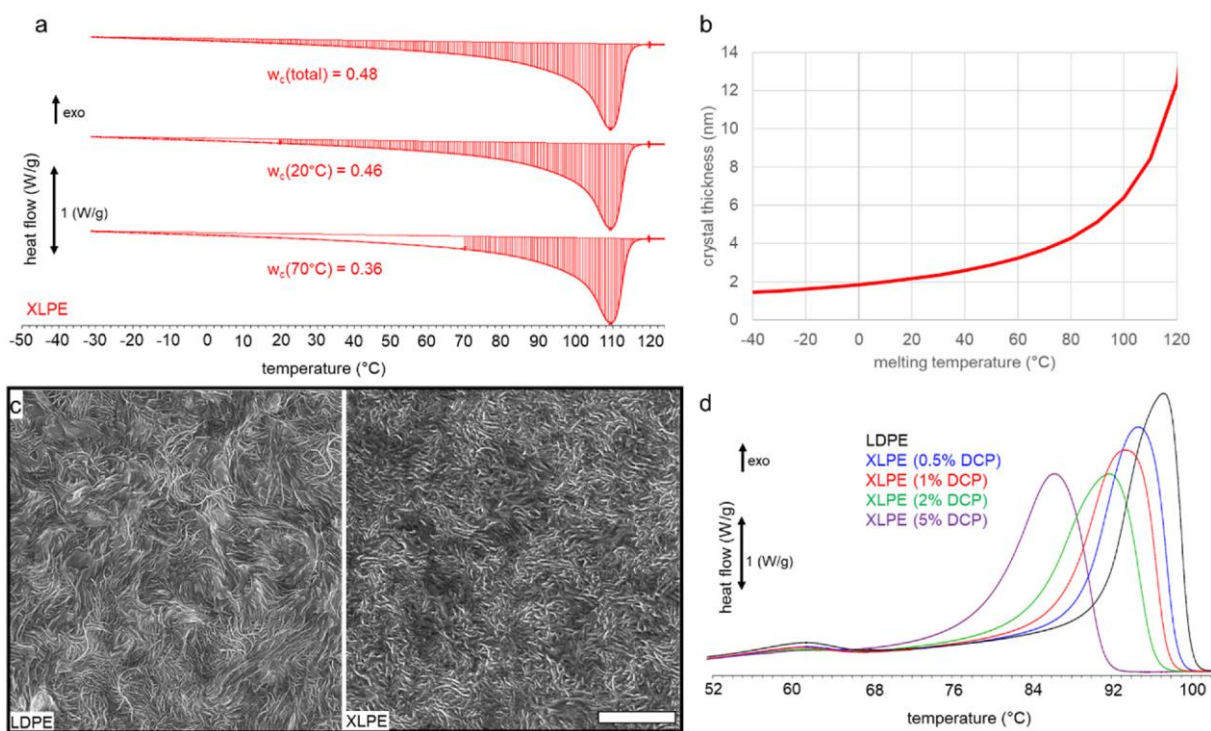
Technologia na bazie termoplastycznego materiału izolacyjnego pozwala na znaczne ograniczenie obszaru produkcji. Linia pokazowa z Pignataro dla kabli SN składa się z 7 stanowisk produkcyjnych pozwalającej na wykonanie gotowego wyrobu w jednym procesie od zasilenia układu żyłą typu RE, wytłaczania układu izolacyjnego wraz z chłodzeniem, nałożeniem ekranu metalicznego w postaci taśm oraz wytłoczenia powłoki [11].



Rys. 10. 7-etapowa linia pozioma do produkcji kabli SN na bazie PP [11]

Doskonalenie materiałów układów izolacyjnych ma szczególne znaczenie, gdyż wynika to z ekonomicznej potrzeby zwiększania roboczego natężenia pola elektrycznego w środowisku pracy systemów energetycznych. W przypadku kabli średnich napięć znamionowe grubości izolacji są znormalizowane zgodnie z VDE 0276-620, bądź IEC 60502-2. Natomiast o grubościach izolacji kabli wysokich napięć najczęściej decyduje klient określając jednoznacznie grubość izolacji lub zakres natężenia pola elektrycznego w izolacji. Ekstremalnym przykładem zwiększonych naprężeń elektrycznych w układzie izolacji są kable HVDC przeznaczone do przesyłu energii elektrycznej na duże odległości. Istotnym czynnikiem przy wyborze odpowiedniego układu izolacji do stosowania w kablach HVDC jest obecność i rozwój/wzrost ładunku przestrzennego zwłaszcza na granicy z wewnętrznymi i zewnętrznymi ekranami izolacji oraz związane z tym lokalne wzmocnienie pola elektrycznego wewnętrznego, potencjalnie wpływające na starzenie się kabla w warunkach elektrotermicznych i nieoczekiwane przerwy elektryczne. W przypadku kabli HVDC występuje konieczność zastosowania specjalistycznych materiałów izolacyjnych nie tylko z uwagi na występowanie ładunku przestrzennego, ale również na spore odległości od których projektowane są linie kablowe.

Technologia HVAC, chociaż stosowana od dłuższego czasu, obecnie ustępuje miejsca technologii HVDC, zwłaszcza w przypadku dużych projektów. Rozwój dynamiczny technologii HVDC wynika głównie z potrzeby przesyłu energii na większe odległości, a także z konieczności efektywnego wyprowadzania energii elektrycznej z morskich farm wiatrowych. Jedną z głównych wad kabli prądu przemiennego jest ich wysoka stratność przy długich trasach przesyłu. Wykorzystanie kabli morskich do przesyłu energii przemiennie jest ekonomiczne dla linii podmorskich o długości poniżej 80 km oraz dla linii naziemnych o długości poniżej 800 km. Dla tras przekraczających te odległości, opłacalne staje się zastosowanie stacji przekształtnikowych AC/DC. Pierwsze kable HVDC z wytłaczaną izolacją XLPE trafiły na rynek w 1998 roku dzięki firmie ABB, przy napięciu transmisyjnym 80 kV, co doprowadziło do zainstalowania pierwszego kabla przesyłowego stałoprądowego wysokiego napięcia (HVDC) w Gotlandii, w Szwecji. W 2017 roku firma NKT osiągnęła kolejny kamień milowy i wprowadziła na rynek pierwszy 640 kV kabla DC o izolacji wytłaczanej, zdolnego do przesyłu mocy o mocy 3 GW.



Rys. 11. Mikrostruktura półkryształiczna oceniana za pomocą DSC a) krystaliczność przy różnych temperaturach, b) dystrybucja grubości kryształów zgodnie z równaniem Thomsona-Gibbsa, c) dystrybucja grubości kryształów przedstawiona przez SEM, skala wynosi 1 μm , d) termogram krystalizacji. [13]

Wysoka czystość materiałów układu izolacyjnego oraz wyjątkowo gładka powierzchnia ekranów półprzewodzących pozwala na kontrolowanie gromadzenia ładunku przestrzennego oraz zapewnia wysoką wytrzymałość na przebicie prądu stałego oraz impulsowego. Określana przez producentów wysoka czystość fizyczna materiału oznacza minimalizację zanieczyszczeń stałych i włókien przyczyniających się do lokalnego wzrostu pola w materiale, co potencjalnie może prowadzić do przebicia elektrycznego. Natomiast czystość chemiczna wpływa na minimalizację potencjalnych nośników ładunku i/lub substancji polarnych obecnych w związkach. Podatność nowych tworzyw termoplastycznych na rozwój ładunków przestrzennych pod napięciami DC jeszcze nie została w pełni oceniona [13].

Zarówno tradycyjne XLPE, jak i nowocześniejsze technologie polimerów termoplastycznych bazujące na PP zostały zakwalifikowane zgodnie z zalecanymi zaleceniami testowymi CIGRE lub innych organizacji przemysłowych do użytku w kablach polimerowych ekstrudowanych na poziomie przesyłu do zakresu 500 do 600 kV. Komercyjne projekty są obecnie oferowane przez głównych producentów kabli w Europie i Japonii [13].

4. Podsumowanie

Rozwój nowoczesnych materiałów oraz technologii ich wytwarzania pozwala na zaspokojenie coraz większych wymagań stawianych przez dynamicznie rozwijające się systemy elektroenergetyczne, w tym związanych z produkcją energii z OZE oraz przesyłem energii na duże odległości. Obecnie obserwujemy zmiany w stosowanych materiałach izolacyjnych, przechodząc od tradycyjnych rozwiązań opartych na polietylenie sieciowanym (XLPE), technologii wykorzystujących kopolimery etylenowo-propylenowe (EPR) do technologii opartych na polipropylenie (PP). Nowe materiały izolacyjne nie tylko poprawiają wytrzymałość dielektryczną i właściwości mechaniczne kabli, ale także redukują emisję gazowych produktów ubocznych oraz czas produkcji.

Warto podkreślić, że dalszy rozwój inżynierii materiałowej w branży kablowej będzie kluczowy dla zapewnienia bezpiecznej, niezawodnej i efektywnej pracy sieci elektroenergetycznych w obliczu rosnących wymagań dotyczących efektywności energetycznej, zrównoważonego rozwoju oraz nieustannej potrzeby poprawy jakości dostarczanej energii elektrycznej.

Literatura:

- [1] Materiałoznawstwo elektrotechniczne, Zdzisław Celiński, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2018
- [2] Materiały elektrotechniczne, Podstawy teoretyczne i zastosowania, Barbara Florkowska, Jakub Furgał, Marek Szczerbiński, Romuald Włodek, Paweł Zydróż, Wydawnictwa AGH, Kraków 2010
- [3] Morphology, Structure, Properties and Applications of XLPE, Khaled Aljoumaa, Abdul Wahab Allaf, Springer 202
- [4] Basic principles to determine methane content in cross-linked solid extruded insulation of MV and HV cables, CIGRE TB 501, Working Group D1.26, June 2012
- [5] Non-destructive water-tree detection in XLPE cable insulation, CIGRE 493, Working Group D1/B1/20, April 2012
- [6] Kable średnich napięć o izolacji etylenowo-propylenowej (EPR), Krzysztof Pędzisz, Józef Roehrich, Akademia Górniczo-Hutnicza
- [7] TFKable catalogue “MV-105 Power Cables, 5kV-15kV”
- [8] Cinquemani P.L., Kuchta F.L., Hades H.L., Chavarria G.E., Lindler C.E., Jr., Long-Term Testing and Applications of High-Stress MV EPR Cables, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, January 2005
- [9] Brown M., EPR-Based URD Insulation: A Question of Confidence, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 4, No. 5, September/October 1988;
- [10] Extruded Cables for HVDC Power Transmission” Prysmian Group; „PP based insulation for MV and HV cables” Cabwire2017 Alberto Bareggi–Prysmian Group;; „P-Laser technological platform: from MV to HV” Alerto Bareggi, Italy, CIGRE
- [11] „Introducing high-performance polypropylene thermoplastic elastomer (HPTE) insulation for MV cables in the Netherlands” Prysmian, Alliander; Frankfurt 6-9 June 2011; HD 620 S3:2022
- [12] “Extruded Cables for HVDC Power Transmission” Prysmian Group; „PP based insulation for MV and HV cables” Cabwire 2017 Alberto Bareggi –Prysmian Group;; „P-Laser technological platform: from MV to HV” Alerto Bareggi, Italy, CIGRE
- [13] “An Assessment of Material Selection for High Voltage DC Extruded Polymer Cables” Clive W. Reed



KABEL

2024

XXIX KONFERENCJA SZKOLENIOWO-TECHNICZNA
ELEKTROENERGETYCZNE SIECI KABLOWE I NAPOWIETRZNE

12-15 marca 2024

Lidzbark Warmiński

Hotel Krasicki****