



Andrzej GLISTAK, Andrzej JAGIEŁŁO

Tele-Fonika Kable S.A.

Rozwój technologii produkcji kabli o izolacji XLPE niskiego i średniego napięcia

Streszczenie. W referacie podano szeroką charakterystykę porównawczą XLPE w relacji do PVC, PE, EPR i przesyconego papieru elektroizolacyjnego. Przedstawiono również stosowane w przemyśle kablowym podstawowe technologie uzyskiwania izolacji dla kabli średniego napięcia (linie do ciągłej wulkanizacji – sieciowanie nadtlenkami) oraz niskiego napięcia (metody: Sioplas, Monosil, Visico, Visico-Ambicat). Dokonano przeglądu różnych typów kabli i przewodów elektroenergetycznych o izolacji XLPE oraz przedstawiono metodykę badań.

Abstract. (Development of XLPE insulation cables technology for low and medium voltage). In a report a wide comparative characteristics of XLPE, with relation to PVC, PE and EPR; and impregnated electro-insulated paper were presented. The basic technologies of getting insulation for MV cables (lines for continuous curing - cross-linking by peroxides) and LV (methods: Sioplas, Monosil, Visico, Visico-Ambicat), used in cable industry, were also presented. The inspection of different types of power cables and wires form XLPE insulation and the methodology of tests were made.

Słowa kluczowe: kable, polietylen sieciowany XLPE, sieciowanie.

Keywords: cables, cross-linked polyethylene XLPE, cross-linking.

Wstęp

Kable o izolacji XLPE w coraz większym stopniu zastępują tradycyjne kable o izolacji papierowej, polwinitowej lub gumowej. W chwili obecnej stanowią już ok. 15% całości produkcji w przemyśle kablowym. Polietylen usieciowany jako izolacja stosowany jest od kilkadziesiąt lat, początkowo w kablach średnich i wysokich napięć, a następnie w kablach i przewodach niskiego napięcia. Chemicznie materiał ten w postaci wyjściowego granulatu należy do grupy polimerów (związków wielkocząsteczkowych), zwanych plastomerami tzn. tworzywami posiadającymi właściwości przechodzenia w podwyższonej temperaturze w stan plastyczny. Cechy te wykorzystywane są w procesie produkcyjnym. W dalszych operacjach zasadniczym elementem jest proces termochemicznego sieciowania, czyli powstawania odpowiedniej struktury wewnętrznej, co prowadzi do uzyskania pożądanych parametrów elektrycznych, odpowiedniej ciepłoodporności oraz odporności chemicznej i mechanicznej.

Charakterystyka kabli XLPE

Doskonałą charakterystykę kabli o izolacji XLPE można przypisać bardzo dobrym własnościom fizycznym i elektrycznym tej izolacji. Główne zalety polietylenu usieciowanego to:

- wysoka ciepłoodporność umożliwiająca ustalenie jego trwałej temperatury eksploatacji w wyrobach kablowych na 90°C, co dopuszcza dla nich wyższą obciążalność prądową;
- dobra odporność na krótkotrwałe działanie wysokiej temperatury spowodowanej przeciążeniem lub zwarciami;
- zwiększona odporność na działanie rozpuszczalników nawet w wysokich temperaturach;
- zwiększona odporność na działanie agresywnych środowisk chemicznych;
- bardzo wysoka odporność na działanie korozji naprężeniowej;
- duża odporność na uderzenia, uszkodzenia mechaniczne, ścieranie i pękanie

- praktycznie stała rezystancja izolacji w funkcji temperatury;
- stabilność właściwości dielektrycznych w czasie .

Parametry omawianego materiału izolacyjnego w relacji do innych stosowanych materiałów przedstawione są w tabeli 1 (* PN – papier nasycony syciwem nieściekającym).

Technologia wykonania

Szeroki obecnie asortyment kabli i przewodów XLPE jest efektem stosowania w przemyśle kablowym różnych technologii uzyskiwania izolacji z polietylenu usieciowanego. Kable średniego napięcia produkowane są na liniach łańcuchowych do ciągłego sieciowania, gdzie w jednej operacji wytłaczana jest w głowicy potrójnej izolacja i ekrany półprzewodzące. Jest to tzw. metoda „sieciowania suchego”. Zaizolowana żyła jest sieciowana w atmosferze gazu obojętnego (azotu) pod ciśnieniem przez ogrzewanie kabla do temperatury sieciowania. Maksymalną szybkość utwardzania uzyskuje się na podstawie obliczenia rozkładu temperatury w rurze wulkanizacyjnej tak, aby powierzchnia kabla utrzymywana była w stabilnej maksymalnej temperaturze przez cały czas przebywania w strefie grzania. Jest to proces sieciowania polietylenu nadtlenkami. W materiale tym tworzą się bezpośrednio wiązania C-C, pomiędzy dwoma odosobnionymi łańcuchami polietylenu. Nadtlutki znajdujące się w tworzywie (granulkach polietylenu) pod wpływem wysokiej temperatury, odpowiedniego ciśnienia i bez dostępu powietrza (atmosfera azotu) ulegają rozkładowi do wolnych rodników, które ze względu na ich dużą reaktywność chemiczną łączą się z atomami wodoru łańcuchów polietylenowych. W ten sposób w łańcuchach polietylenowych powstają wolne pary elektronów przy atomie węgla, dzięki którym może utworzyć się wiązanie chemiczne pomiędzy atomami węgla dwóch różnych łańcuchów polietylenowych, co daje strukturę usieciowaną.

Tabela 1. Porównanie parametrów wybranych materiałów izolacyjnych

L. p.	Parametr	Materiał izolacyjny			
		XLPE	PE	PVC	PN *
1	Dopuszczalna temp. pracy ciągłej [°C]	90	70	70	65
2	Dopuszczalna temp. przy zwarciu krótkotrwałym [°C]	250	150	150	150
3	Temperatura topliwości [°C]	nietopliwy	120-130	130	-
4	Temperatura starzenia cieplnego [°C]	130	100	100	-
5	Względna przenikalność dielektryczna	2,3-2,5	2,3-2,6	4,0-6,5	3,5
6	Rezystywność właściwa [$\Omega \cdot \text{cm}$] w 20°C	$\approx 10^{16}$	$\approx 10^{16}$	$\approx 10^{13}$	$\approx 10^{13}$
7	Współczynnik strat dielektrycznych w 20°C	$\leq 0,004$	$\leq 0,004$	$\leq 0,1$	$\leq 0,003$
8	Wytrzymałość na rozciąganie [N/mm^2]	12,5	10,0	12,5	-
9	Wydłużenie przy zerwaniu [%]	200	300	175	-
10	Gęstość [g/cm^3]	0,9	0,9	1,5	1,2

W kablach i przewodach niskich napięć stosuje się aktualnie cztery metody oparte na sieciowaniu silanami: Visico, Sioplas, Monosil oraz Visico/Ambicat.

Sieciowanie silanami z punktu widzenia chemicznego polega na przeprowadzeniu reakcji chemicznej w dwóch etapach. W pierwszym etapie po tzw. szczepieniu polietylenu metoksysilanami i powstaniu w łańcuchu polimerowym grupy trimetoksysilanowej, zachodzi reakcja chemiczna szczepionego polietylenu z wodą przy udziale katalizatora i temperatury, dając w efekcie alkohol i silanol zawierający grupę $-\text{Si}-\text{OH}$. W kolejnym etapie dwa łańcuchy polimerowe zawierające grupę $-\text{Si}-\text{OH}$ reagują przy udziale katalizatora tworząc cząsteczkę wody i łącząc się ze sobą wiązaniem $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ (tzw. mostkiem silanowym). Szereg takich mostków pomiędzy łańcuchami polimeru tworzy stabilną, usieciowaną strukturę.

W procesie produkcyjnym w pierwszym etapie tworzywo jest wytłaczane na typowych liniach do termoplastów. Główna różnica polega na konieczności dozowania dodatków w postaci np. katalizatora. Kolejnym etapem jest sieciowanie realizowane w parze wodnej w specjalnych komorach (saunach), w odpowiedniej temperaturze lub bez użycia komór.

Najnowsza metoda Visico/Ambicat, poprzez zastosowanie specjalnych aktywnych katalizatorów o nazwie Ambicat pozwala prowadzić proces sieciowania w normalnej temperaturze otoczenia w stosunkowo krótkim czasie. W praktyce produkcyjnej proces sieciowania w komorach parowych uległ drastycznemu skróceniu do kilku godzin.

Za stosowaniem kabli o izolacji z polietylenu usieciowanego, poza wymienionymi wcześniej zaletami tego materiału przemawiają względy ekonomiczne. Korzyści te wynikają głównie z mniejszego kosztu samych kabli wskutek zmniejszenia grubości izolacji, a przez to mniejszego zużycia pozostałych materiałów konstrukcyjnych. W konsekwencji koszt produkcji kabli niskiego napięcia o izolacji PVC oraz kabli o izolacji XLPE jest porównywalny. W wyniku mniejszej masy i dzięki mniejszym grubościom redukuje się również koszty instalacyjne.

Obciążalność długotrwała i zwarciowa jest wyższa niż odpowiednich kabli o izolacji polwinitowej. Dodatkowo kable te mogą być układane przy ujemnych temperaturach otoczenia.

Charakterystyka typów produkowanych kabli

Poniżej przedstawiamy przegląd i ogólną charakterystykę kabli i przewodów elektroenergetycznych niskiego i średniego napięcia XLPE produkowanych przez Zakłady Tele-Fonika. Cały ten asortyment można ująć w następujących głównych grupach:

1. Kable elektroenergetyczne jednożyłowe z żyłami aluminiowymi lub miedzianymi o powłoce polwinitowej, polietylenowej, polietylenowej o zmniejszonej palności; oraz o powłoce z tworzywa o ograniczonej emisji chlorowodoru na napięcia 3,6/6kV; 6/10kV; 8,7/15kV; 12/20kV; 18/30kV 50-1000mm². Wykonywane są również w wersjach z uszczelnieniem przeciwwilgociowym wzdłużnym lub wzdłużnym i promieniowym.
2. Kable elektroenergetyczne trzyżyłowe z żyłami aluminiowymi lub miedzianymi z żyłą powrotną wspólną lub z żyłami powrotnymi indywidualnymi, gołe lub zbrojone o osłonach lub powłokach polwinitowych lub polietylenowych na napięcia: 3,6/6kV, 6/10kV; 8,7/15kV; 12/20kV; 18/30kV 25-400mm². Wykonywane są również w wersjach uszczelnionych przeciwwilgociowo.
3. Kable elektroenergetyczne Cu i Al jedno lub wielożyłowe gołe lub zbrojone w powłokach lub osłonach polwinitowych lub polietylenowych na napięcie 0,6/1kV 1-1000mm².
4. Kable elektroenergetyczne górnicze ekranowane trójżyłowe gołe lub zbrojone, o powłoce lub osłonie polwinitowej na napięcia: 0,6/1kV; 3,6/6kV 25-240mm².
5. Kable elektroenergetyczne okrętowe ekranowane lub nieekranowane, gołe lub zbrojone, jedno lub wielożyłowe o powłoce lub osłonie polwinitowej na napięcia 0,6/1kV 1-300mm².
6. Przewody elektroenergetyczne jednożyłowe do napowietrznych linii elektroenergetycznych z żyłą ze stopu Al o osłonie izolacyjnej XLPE na napięcie 12/20kV 25-185mm².
7. Przewody elektroenergetyczne samonośne z żyłami aluminiowymi lub ze stopu Al na napięcie 0,6/1kV 16-120mm².
8. Przewody elektroenergetyczne z żyłami fazowymi aluminiowymi i zerową (neutralną) żyłą nośną ze stopu Al na napięcie 0,6/1kV 16-120mm².

Równocześnie z rozwojem produkcji kabli o izolacji XLPE nastąpił proces wdrażania nowej metodyki badań, specyficznej dla tego rodzaju kabli. Badaniom niepełnym wykonywanym podczas bieżącej kontroli produkcji poddawane są wszystkie odcinki fabrykacyjne. Badania niepełne stanowiące odbiór przedstawiciela zamawiającego wykonywane są w naszym przypadku z udziałem odbiorcy Energopomiaru-Elektryka. Oprócz podstawowych rutynowych badań na odcinkach fabrykacyjnych wykonujemy szereg testów pozwalających sprawdzić poprawność wykonywanych kabli. Sprawdzenie poprawności konstrukcji wykonywane jest przy użyciu mikroskopów i urządzeń komputerowych KSM pozwalających na pomiar bez subiektywnego wpływu pracownika KJ. Pomiar grubości wszystkich warstw izolacji, ekranów oraz średnic i pól powierzchni wykonywany jest jednocześnie na tej samej próbce. Podstawowe własności elektryczne tj. odporność na napięcie probiercze i intensywność wyładowań niezupełnych przy napięciu $2U_0$ wykonywane są w komorze ekranowej (Faradaya) produkcji firmy Heafely Test AG i mierzone detektorem wyładowań niezupełnych TE 571-4 TETEX Instruments (Szwajcaria).

Okresowo sprawdzane są również:

- współczynnik strat dielektrycznych $tg\delta$ w temp. 95-100°C mostkiem TETEX Instruments (wyniki

pomiarów mieszczą się w granicy 0.00015 ± 0.0040 max. wartość 0.008),

- odporność na długotrwałe napięcie probiercze (4 h),
- wnikanie wody (wodoszczelność),
- badania stabilności cieplnej ekranów niemetalicznych,
- oporność na napięcia udarowe,
- długotrwałe (2-letnie) badanie drzewienia wodnego.

Ostatnie dwa badania wykonywane są jedynie w laboratorium TF Kable w Bydgoszczy. Materiały tj. elementy izolacji, ekranów oraz powłok badane są za pomocą urządzeń takich jak termostaty firmy Heraeus, Binder, komory klimatyczne, zrywarki ZWICK i ALPHA Technologies, oraz przy użyciu pozostałego oprzyrządowania. Na urządzeniach tych podczas badania izolacji wykonywane są testy wydłużenia i wytrzymałości na rozciąganie przed i po starzeniu cieplnym (135°C/7dni) - zmiany, wydłużenia trwałe w podwyższonej temperaturze (*hot-test* temp. 200 °C/15 minut), nasiąkliwość wodą oraz bardzo ważny skurcz izolacji mierzony w temp. 130 °C/1h. Poniżej w tabeli 2 przedstawiono średnie wyniki badań izolacji z trzech losowo wybranych kabli w Zakładzie Tele-Fonika Kraków.

Tabela 2. Średnie wyniki badań izolacji z trzech losowo wybranych kabli

Wyszczególnienie	Jedn.	XRUHAKXS 15kV	XnHAKXS 20kV	YHKXS 30 kV	Przepis:
Wytrzymałość na rozciąganie przed starzeniem	MPa	19.84	19.85	19.55	min: 12.5
Wytrzymałość na rozciąganie po starzeniu	MPa	21.72	22.34	21.41	---
Zmiany wytrzymałości	%	9.48	12.5	9.51	max: ±25
Wydłużenie przy zerwaniu przed starzeniem	%	445.4	594.1	605.5	min: 200
Wydłużenie przy zerwaniu po starzeniu	%	514.9	720.1	698.1	---
Zmiany wydłużenia	%	15.6	21.22	15.3	max:± 25
Wydłużenie trwałe w temp. 200°C±3/15 min	%	52	67.0	65.5	max: 175
Wydłużenie trwałe w temp. otoczenia	%	2.5	1.0	1.5	max: 15
Nasiąkliwość wodą w temp. 85°C±2/336h	mg/cm ²	0.2795	0.471	0.0757	max: 1.0
Skurcz izolacji 130°C±3/1h	%	1.94	0.4	2.94	max: 4

Ponadto, powłoki oprócz testów wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenie przed i po starzeniu (powłoka PE 110 °C/14 dni, powłoka PCV 100 °C/7dni) sprawdzane są na nacisk i nawijanie w podwyższonej temperaturze, wydłużenia i uderzenia w niskiej temperaturze (powłoka PE temp. -20 °C, powłoka PCV temp. -15 °C), odporność na ścieranie, ubytek masy. Dodatkowo na powłokach polietylenowych wykonywane są badania: twardość powłoki, odporność na korozję naprężeniową, skurcz wzdłużny, zawartość sadzy w powłoce.

Na ekranach żyły roboczej i izolacji sprawdzana jest rezystywność skrośna przed i po starzeniu cieplnym (100 °C / 7 dni), mierzona w temp. 90°C. Wyniki przed starzeniem: $0.004\pm 6.0 \Omega m$ (przepis – max: 1000 Ωm). Wyniki po starzeniu: $0.1\pm 8.0 \Omega m$ (przepis – max: 500 Ωm).

Na kablach z wzdłużną zaporą przeciwwilgociową, wykonywane są badania rezystywności taśm po starzeniu

cieplnym (100 °C/7 dni), mierzone w temperaturze 90°C. Wyniki: $0.085\pm 0.11 \Omega m$ (przepis – max: 500 Ωm).

Na kablach z promieniową zaporą przeciwwilgociową (taśma Al), sprawdzane są własności mechaniczne taśmy tj. siła rozdzielania taśmy od powłoki i siła rozdzielania taśmy w obszarze zakładki. Wyniki: 35-45 N/mm (przepis - min: 0.5 N/mm).

W kompletnym kablu sprawdzany jest wzajemny wpływ elementów kabla po starzeniu cieplnym w podwyższonej temperaturze (100 °C/7 dni), podatność na nawijanie, odporność na długotrwałe napięcie probiercze (4 godz.), a na kablach o powłoce polwinitowej sprawdzane jest rozprzestrzenianie się płomienia.

Autorzy: mgr inż. Andrzej Glistak, Tele-Fonika Kable S.A., E-mail: kontrjak@tfkable.pl; mgr inż. Andrzej Jagiello, Tele-Fonika Kable S.A., E-mail: andrzej.jagiello@tfkable.pl