



Roman Masztak*, Henryk Staworko**

KONSTRUKCJA, PARAMETRY TECHNICZNO-EKSPLOATACYJNE KABLI, OSPRZĘTU PRODUKCJI BYDGOSKIEJ FABRYKI KABLI S.A. DO LINII KABLOWYCH WYSOKICH NAPIĘĆ

Streszczenie: Przedstawiony referat umożliwia zapoznanie się z nowoczesnymi konstrukcjami kabli wysokich napięć i ekstra wysokich napięć o izolacji z polietylenu usieciowanego XLPE w zakresie napięć ≤ 400 kV ($U_m = 420$ kV), z nowoczesną technologią produkcji, stosowanymi materiałami oraz wybranymi parametrami technicznymi. Pozwala ocenić osiągnięcia czołowych firm zagranicznych z szybkim postępowaniem w rozwoju kabli WN i EWN w kraju w zakresie projektowania, technologii produkcji kabli i osprzętu.

Część I KONSTRUKCJA KABLI WN I EWN

1. Wstęp

Linie kablowe, podobnie jak i linie napowietrzne, służą do połączenia poszczególnych elementów systemu energetycznego i przesyłu energii elektrycznej od źródeł wytwarzania do odbiorców. W zależności od poziomu napięć, spełniają one rolę systemów przesyłowych, rozdzielczych, czy dystrybutorów energii. Projektowanie i budowa

* inż. Roman Masztak jest autorem pierwszej części referatu pt. „Konstrukcja kabli WN i EWN”; Bydgoska Fabryka Kabli S.A., ul. Fordońska 125, 85-957 Bydgoszcz

** mgr inż. Henryk Staworko jest autorem drugiej części referatu pt. „Osprzęt kabli na napięcie 64/110 kV”; Bydgoska Fabryka Kabli S.A., ul. Fordońska 125, 85-957 Bydgoszcz

linii kablowych o izolacji z polietylenu usieciowanego najwyższych napięć jest ograniczona jedynie względami ekonomicznymi. Budowę ich uzasadnia nowoczesność produkcji, stosunkowo prosta technologia układania i montażu osprzętu w stosunku do kabli z izolacją papierowo-olejową, niskimi kosztami eksploatacyjnymi, oraz możliwością ochrony środowiska. Konstrukcje tych kabli dopuszczają stosowanie ich zarówno w warunkach tropikalnych, w wysokich temperaturach i wilgotności, jak również w niskich temperaturach, w ciężkim terenie skalistym, czy bagiennym. W przypadku zastosowania specjalnych powłok ochronnych mogą być używane w pomieszczeniach o podwyższonym zagrożeniu pożarowym, z pełną odpornością na smary, oleje i są przyjazne dla ludzi i środowiska.

2. Ogólne założenia dla kabli WN i EWN

Bydgoska Fabryka Kabli S.A. wykorzystując długoletnie doświadczenie przy produkcji kabli o izolacji PCV, PE, XLPE oraz wzorując się na najnowszych standardach zagranicznych, znając potrzeby, wymagania klientów krajowych i zagranicznych, zmodernizowała i uruchomiła produkcję kabli wysokich i ekstra wysokich napięć o izolacji z polietylenu usieciowanego (XLPE). Park maszynowy i zastosowane technologie umożliwiają produkcję kabli różnych wersji w zależności od określonych warunków w jakich mają one pracować. W tabeli 1 zestawiono znormalizowane wartości napięć dla kabli WN i EWN objętych publikacją IEC 183, które mają zastosowanie w systemach energetycznych prądu przemiennego w Polsce i świecie.

Jakość i niezawodność kabli związana jest z rozmiarem zanieczyszczeń w izolacji i z występnymi na warstwach półprzewodzących. Bazując na obecnych doświadczeniach z LDPE i HDPE są wskazania, że wtrąciny o rozmiarze około $80 \mu\text{m}$., które mogą pojawić się przy obecnej technologii produkcji, mogą być szkodliwe dla kabli, jeśli napięcie elektryczne przyłożone do żyły kabla jest wyższe niż około 27 kV/mm . W przypadku izolacji XLPE ograniczone doświadczenia pokazują, że wyższe wartości napiężeń mogą być używane, ale z uwagi pełnego bezpieczeństwa, zaleca się stosowanie tego napięcia również dla XLPE. Powyższe wartości mogą być zwiększane wraz z poprawą jakości surowców, procesu produkcyjnego lub metodyki badań.

Dla kabli 220 kV maksymalne napięcie projektowe określa się na ok. 10 kV/mm , tak że maksymalne napięcie probiercze wynosi ok. $2,7 U_0$.

Dla kabli 275 kV maksymalne napięcie projektowe określa się na ok. 12 kV/mm , tak że maksymalne napięcie probiercze wynosi ok. $2,3 U_0$.

Dla kabli 345 kV maksymalne napięcie projektowe określa się na ok. 12 kV/mm , tak że maksymalne napięcie probiercze wynosi ok. $2,3 U_0$.

Dla kabli 400 kV maksymalne napięcie projektowe określa się na ok. 14 kV/mm , tak że maksymalne napięcie probiercze wynosi ok. $1,9 U_0$.

Jeśli napięcie projektowe jest różne od zakładanego powyżej, napięcie probiercze powinno być odpowiednio zmienione. W konstrukcjach, w których napięcie probiercze wynosi $2,5 U_0$ powinno być przyłożone napięcie w czasie 0,5 h zgodnie z publikacją IEC 840. Natomiast w konstrukcjach gdzie napięcie jest mniejsze od $2,5 U_0$ i z powodu zwiększonej grubości ścianki izolacji czas trwania próby rutynowej

Tabela 1. Zestawienie wartości napięć kabli WN i EWN produkowanych w BFK S.A.

U_0 [kV]	U [kV]	U_m [kV]	U, B [kV]
26	45	52	250
27	47	52	250
38	66	72,5	325
40	69	72,5	325
64	110	123	550
66	115	123	550
76	132	145	650
80	138	145	650
87	150	170	750
93	161	170	750
127	220	245	1250
133	230	245	1250
159	275	300	1300
166	287	300	1300
190	330	362	1360
200	345	362	1360
220	380	420	1425
230	400	420	1425

U_0 — skuteczna wartość napięcia przemiennego o częstotliwości przemysłowej między dowolną żyłą boczną a ekranem lub powłoką metalową, dla której kable oraz osprzęt zostały zaprojektowane

U — skuteczna wartość napięcia przemiennego o częstotliwości przemysłowej między dowolnymi dwoma żyłami, dla której kable oraz osprzęt zostały zaprojektowane

U_m — największa skuteczna wartość napięcia przemiennego o częstotliwości przemysłowej między dowolnymi żyłami, dla której kable i osprzęt zostały zaprojektowane

U, B — znamionowe napięcie udarowe (wartość szczytowa)

napięciem przemiennym AC powinien być zwiększony z 0,5 do 1 h. Ważnym jest, aby podczas badania rutynowego graniczny próg 2,7 kV/mm nie został przekroczony dla uniknięcia jakiegokolwiek osłabienia izolacji, które może w późniejszym czasie doprowadzić do jej przebicia. Tak więc powyższe napięcia probiercze nie powinny być przekraczane. Dla badań typu lub specjalnych może być możliwe zastosowanie wyższego naprężenia niż stosowane dla badań rutynowych, ponieważ próba wyrwykowa jest krótsza i jej wynik powinien mieć mniejsze prawdopodobieństwo błędu.

Biorąc pod uwagę opinie przedstawicieli CIGRE oraz inne, stwierdza się, że największe dopuszczalne wartości naprężeń na ekranie żyły roboczej kabla, powinny wynosić:

dla napięć	60 ÷ 110 kV	—	4 ÷ 6 kV/mm
	115 ÷ 245 kV	—	8 ÷ 10 kV/mm
powyżej	300 kV		12 ÷ 15 kV/mm

Badania napięciowe kabli wykonywane są zgodnie z tabelą 2.

Z uwagi na to, że nie ma norm precyzujących zakres grubości izolacji w kablach WN i EWN w zależności od dopuszczalnego naprężenia w izolacji, oraz poziomu napięcia, BFK S.A. ustaliła optymalne grubości izolacji tych kabli (tabela 3).

Tabela 2. Wartość napięć kabli WN i EWN w czasie prób napięciowych

Nominalne napięcie między żyłami	Najwyższe napięcie dla aparatury	Nominalne napięcie między żyłą a ekranem	Napięcie próby 0,5–1,0 godz.	Napięcie wyładowań niezupelnionych	Napięcie dla pomiaru tg δ	Napięcie przy okres. nagrzewaniu	Próba napięcia impulsowego	Próba napięcia po próbie impulsowej
U	U_m	U_0	1,9– 2,5 U_0	1,5 U_0	U_0	2 U_0		2,5 U_0
[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
45 ÷ 47	52	26	65	39	26	52	250	65
60 ÷ 69	72,5	36	90	54	36	72	325	90
110 ÷ 115	123	64	160	96	64	128	550	160
132 ÷ 138	145	76	190	114	76	152	650	190
150 ÷ 161	170	87	218	131	87	174	750	218
220 ÷ 230	245	127	318	191	127	254	1250	318
275 ÷ 287	300	159	366	239	159	318	1300	366
330 ÷ 345	362	190	437	285	190	380	1360	437
380 ÷ 400	420	220	418	330	220	440	1425	418

3. Właściwości materiałów dla kabli WN i EWN

3.1. Materiały izolacyjne i półprzewodzące

Materiały półprzewodzące, izolacyjne, powłokowe stosowane w procesie ciągłego wytłaczania na ekrany, izolacje główne, osłony kabli posiadają certyfikaty jakości czołowych firm światowych, takich jak Borealis — Szwecja, Belgia oraz Union Carbide — USA, są przeznaczone, tylko do produkcji kabli WN i EWN. Zastosowanie polietylenów drugiej generacji o podwyższonych parametrach zmierza do przedłużenia żywotności eksploatacyjnej magistralnych linii kablowych układanych w ziemi. W celu zminimalizowania maksymalnych naprężeń w krytycznych połączeniach układu izolacyjnego, wprowadzono super czyste polietyleny izolacyjne w połączeniu z super gładkimi polietylenami półprzewodzącymi, na ekrany żył i izolację kabla o całkowicie nowych metodach ich produkcji. Zawierają one znacznie zredukowane zanieczyszczenia jonowe, zapewniając tym samym czystą izolację. Przyspieszone testy kablowe wykonywane przez producentów materiałów, wykazują maksymalną żywotność eksploatacyjną, jaka może być uzyskana poprzez stosowanie systemów całkowitego zbliżenia się do połączenia polietylenu XLPE z opóźnionym narastaniem kryształów na powierzchni izolacji, ekstra czystości, braku możliwości penetracji wilgoci do izolacji, z super gładkimi ekranami półprzewodzącymi bez występow. Wprowadzenie nowej technologii produkcji polietylenów półprzewodzących, pozwoliło zredukować poziom

Tabela 3. Grubości izolacji XLPE kabli WN i EWN

Napięcie znamionowe [kV]	Przekrój żyły roboczej [mm ²]	Znamionowa grubość izolacji [mm]
45 ÷ 47	120 ÷ 2000	9,0
60 ÷ 69	120 ÷ 500	12,0
	630 ÷ 1000	11,0
	1000 ÷ 2000	9,5
110 ÷ 115	120 ÷ 150	19,0
	185	18,5
	240	17,0
	300 ÷ 1000	16,5
132 ÷ 138	240 ÷ 500	18,5
	630 ÷ 2000	17,0
150 ÷ 161	240 ÷ 400	24,5
	500 ÷ 630	21,5
	800 ÷ 2000	20,0
220 ÷ 230	500 ÷ 1000	26,0
	1000 ÷ 2000	25,0
380 ÷ 400	630	32,0
	800	30,0
	1000 ÷ 1400	29,0
	1600 ÷ 2000	28,0

zanieczyszczeń tj. sadzy, siarki i popiołu o 40%. Tradycyjna gładkość powierzchni oceniana szacunkowo poprzez wizualne wzorcowanie wytłaczanych powierzchni, została udoskonalona, wprowadzono laserową technikę obróbki kształtu, która odlicza i sortuje liczbę defektów powierzchniowych do rozmiaru rzędu $<20\mu$ na paskach wykonanych z materiałów półprzewodzących. Podobną selekcję zastosowano przy materiałach izolacyjnych, która pozwala na pełną eliminację partii materiałów z zanieczyszczeniami powstałymi w fazie produkcji. Selekcja materiałów na ten rodzaj kabli, powinna być prowadzona systematycznie do osiągnięcia układów izolacyjnych zbliżonych ideałowi. Polietyleny izolacyjne powinny posiadać dużą gęstość, mały współczynnik pływnięcia przy dużej jednorodności, taki aby izolacja w czasie pracy kabla utrzymywała tę samą niezmienną pozycję, bez przemieszczania, ściekania lub oddzielania od ekranów w wysokiej temperaturze przy pełnym obciążeniu kabla oraz zwarciach.

3.2. Ogólne parametry polietylenów XLPE

Maksymalna temperatura żyły przy pracy ciągłej	90°C
Maksymalna temperatura żyły w czasie trwania zwarcia max. 5 s	250°C
Przewodność cieplna w temperaturze 20°C	3,5 K·m/W
Tangens δ przy napięciu U_0 i temperaturze 90°C	$\leq 10 \times 10^{-4}$

Przenikalność elektryczna w temperaturze 20°C i częstotliwości 50 Hz	śr. 2,4
Oporność właściwa izolacji	$> 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$
Rezystywność skrośna ekranu żyły w temperaturze 90°C	max. 1000 $\Omega \cdot \text{m}$
Rezystywność skrośna ekranu na izolacji w temperaturze 90°C	max. 500 $\Omega \cdot \text{m}$
Wydłużenie trwałe w podwyższonej temperaturze 200°C pod obciążeniem 0,2 N/mm ² :	
wartość wydłużenia	max. 175%
wydłużenie po usunięciu obciążenia	max. 15%
Wielkość skurczu: skurcz w temperaturze 130°C w czasie 6 h	max. 4%
Wytrzymałość na rozciąganie przed starzeniem:	12,5 N/mm ²
Wydłużenie przy zerwaniu przed starzeniem:	min. 200%
Wydłużenie przy zerwaniu po starzeniu cieplnym w powietrzu w temperaturze 135°C w czasie 168 h:	min. 200%
Zmiana wytrzymałości przy zerwaniu po starzeniu cieplnym w powietrzu w temperaturze 135°C w czasie 168 h:	$\pm 25\%$

4. Konstrukcja i technologia produkcji kabli wysokich i ekstra wysokich napięć

4.1. Żyły robocze kabli

Żyły robocze kabli wykonywane są zgodnie ze światowymi standardami IEC 228-78, AEIC SC7-82 w zakresie przekrojów 120÷1000 mm² jako wielodrutowe, kompaktowane, okrągłe, a w zakresie przekrojów 1200÷2000 mm² o konstrukcji segmentowej Millikena. Materiałem żyły jest miedź lub aluminium. Przekrój żyły dobiera się z przekrojów znormalizowanych dla danego rodzaju kabli z uwzględnieniem czynników:

- najwyższej dopuszczalnej temperatury żyły kabla przy obciążeniu długotrwałym, okresowo zmiennym, w warunkach zakłóceń oraz przy zwarciach,
- naprężeń mechanicznych kabla podczas układania i eksploatacji,
- naprężeń elektrycznych w izolacji.

W zależności od potrzeb w kablach uszczelnianych wzdłużnie i promieniowo, pomiędzy druty żył roboczych wprowadzony jest specjalny materiał uszczelniający w postaci proszków, sznurków lub taśm pęczniejących pod wpływem wilgoci, blokując wolne przestrzenie pomiędzy drutami, uniemożliwiając penetrację wody wzdłuż żyły roboczej. Sposób sprawdzenia wodoszczelności wzdłużnej żyły roboczej kabli przedstawiony jest w Publikacji IEC 840 Popr. 2 — 1993 punkt 5.6.16.1 b).

4.2. Izolacja i ekrany kabli

Dla uzyskania wysokiej jakości kabli z izolacją XLPE, stosowane są najnowocześniejsze maszyny i urządzenia produkcyjne oraz aparatura kontrolno-pomiarowa. Technologia wytłaczania i sieciowania izolacji polietylenowej prowadzona na linii łańcuchowej do ciągłego wytłaczania polietylenów, oparta jest na procesie całkowite „suchego” sieciowania i chłodzenia w gazowym azocie, eliminując tym samym możliwość powstawania mikrowtrącin wilgoci w izolacji i powierzchniach granicznych

z ekranami. Wytłaczanie ekranu na żyłę i izolacji odbywa się w potrójnej głowicy krzyżowej, łącznie z wytłaczaną izolacją. Głowica wyposażona jest w grzanie elektryczne i wodne, dając możliwość utrzymania stabilnych temperatur w czasie trwania procesu. Materiały izolacyjne i półprzewodzące na linię pobierane są ze specjalnych pomieszczeń o kontrolowanej czystości filtrowanego powietrza, temperatury i wilgoci. Eliminuje to możliwość wnikania zanieczyszczeń do izolacji z otoczenia. Materiały półprzewodzące suszone są w ciągłym procesie produkcyjnym usuwającym ewentualną wilgoć w nich zawartą. Wprowadzenie nowoczesnego systemu chłodzenia kabla tzw. strefy relaksacji, umożliwia uzyskanie izolacji kabla bez naprężeń wzdłużnych i promieniowych powstałych w procesie wytłaczania i chłodzenia.

4.3. Ekran metalowy i uszczelnienia

Żyły powrotne kabli wykonywane są z miedzi jako wielodrutowe w połączeniu z taśmą przeciwskrętną o przekroju zależnym od projektowanych warunków zwarciowych. Z uwagi na dużą rozszerzalność termiczną układów izolacyjnych w warunkach normalnej eksploatacji, pod żyłą powrotną zastosowano warstwę kompensacyjną — „poduszkę” dystansową z taśmy półprzewodzącej, która zabezpiecza ekran zewnętrzny przed wgniataniem się drutów żyły, jednocześnie stanowi barierę pęczniącą pod wpływem wilgoci chroniąc żyłę przed wzdłużną penetracją wody, w przypadku uszkodzenia powłoki zewnętrznej kabla. Uszczelnienie wzdłużne pod powłoką kabla to obwoje z taśm pęczniących:

- a) nieprzewodzącej — w kablach bez uszczelnienia promieniowego,
- b) półprzewodzącej — w kablach z uszczelnieniem promieniowym.

Zastosowanie uszczelnienia w obrębie żyły powrotnej wprowadziło podział w konstrukcjach kabli. Przyjęto oznaczenia:

U — kable uszczelnione wzdłużnie,

R — kable uszczelnione promieniowo.

Uszczelnienie wzdłużne [U] — polega na uszczelnieniu żyły powrotnej kabla poprzez podwójny obwój taśmami półprzewodzącymi pęczniącymi pod wpływem wilgoci ekranu zewnętrznego, oraz obwój taśmami nieprzewodzącymi drutów żyły powrotnej.

Uszczelnienie promieniowe [R] — polega na wzdłużnym ułożeniu pod powłoką zewnętrzną kabla taśmy aluminiowej spojonej z nią kopolimerem.

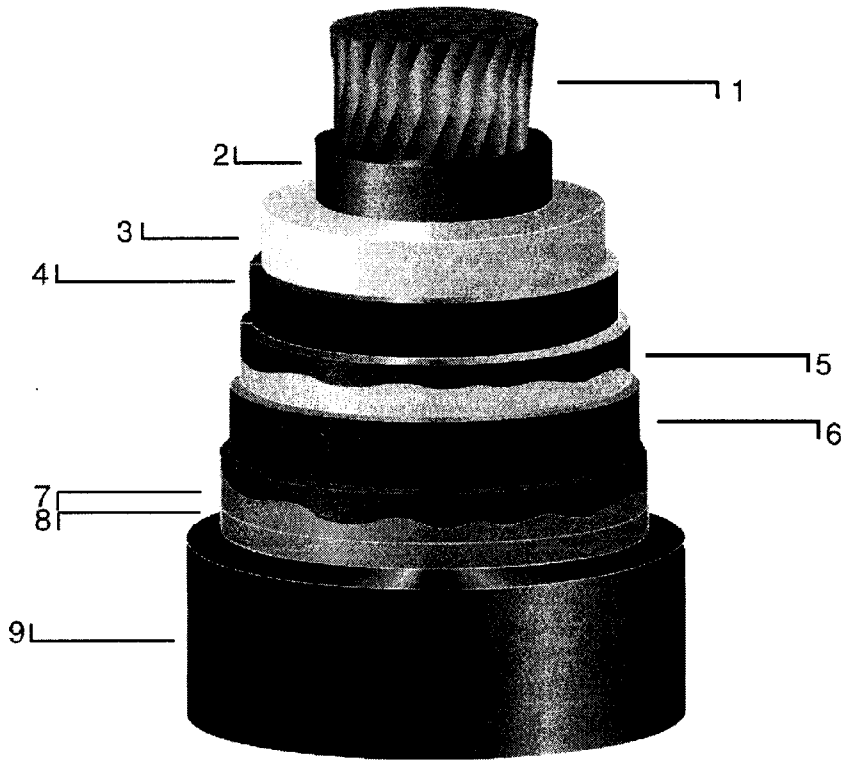
Uszczelnienie promieniowe i wzdłużne [RU] — polega na jednoczesnym zastosowaniu wszystkich typów uszczelnień — [R] i [U].

Dla przykładu: wysokość pęcznienia taśmy zależy od ilości i czasu penetracji wody i wynosi:

dla taśmy nieprzewodzącej — w czasie $20 \div 600$ sekund wysokość pęcznienia zmienia się z $1,0 \div 18,0$ mm,

dla taśmy półprzewodzącej — w czasie $20 \div 100$ sekund wysokość pęcznienia zmienia się z $1,0 \div 21,0$ mm.

Sposób sprawdzenia wodoszczelności wzdłużnej obszaru pod powłoką oraz sprawdzenia siły spojenia zakładki i taśmy z powłoką kabla określa Publikacja IEC 840 Popr. 2 — 1993 punkt 5.6.16.1.



Rys. 1. Budowa kabla typu XRUHKXS $1 \times 240 \text{ mm}^2$ 64/110/123 kV. 1 – żyła robocza miedziana, okrągła, wielodrutowa, dogniatana; 2 – ekran półprzewodzący na żyłę roboczej XLPE; 3 – izolacja XLPE; 4 – ekran półprzewodzący na izolacji XLPE; 5 – obwój z taśmy półprzewodzącej pęczniającej, będący uszczelnieniem wzdłużnym (U); 6 – żyła powrotna z drutów i taśmy miedzianej; 7 – obwój taśmą półprzewodzącą pęcznącą, będący uszczelnieniem wzdłużnym (U); 8 – taśma aluminiowa laminowana, będąca uszczelnieniem promieniowym (R); 9 – powłoka zewnętrzna z PE

Specjalne konstrukcje kabli dla określonych warunków, mogą zawierać ekran metalowy wytłaczany z ołowiu (stopu ołowiu) o odpowiednim przekroju zwarciovym lub posiadać wzmocnienie w postaci pancerza z drutów aluminiowych.

4.4. Powłoki zewnętrzne

Powłoki zewnętrzne wysokonapięciowych kabli w zależności od warunków eksploatacyjnych wykonane są z polwinitu PVC, polietylenu termoplastycznego PE, polietylenu nierozprzestrzeniającego płomienia lub bezhalogenowego PEn.

Materiały powłoki dostosowane są do długotrwałej temperatury pracy kabla i warunków zwarciovych. Odporne są na działanie warunków atmosferycznych i promieniowanie słoneczne, mogą być wykonywane jako niepalne zgodnie z normą IEC Publikacja 332-1 lub 332-3. Powłoka składa się z dwóch warstw: taśmy aluminiowej

z kopolimerem w połączeniu z zasadniczą powłoką, która stanowi jednocześnie warstwę antykorozyjną oraz zasadniczej ochrony z polietylenu, polwinitu o własnościach fizyko-chemicznych zależnych od sposobu ułożenia kabla.

4.5. Nazewnictwo kabli i odpowiedniki zagraniczne

Opis oznaczeń literowych w symbolice kabli zawarto w tabeli 4.

Tabela 4. Symbolika literowa kabli wg. PN i odpowiedniki VDE, BS

Oznaczenia	PN*	VDE**	BS***
Kabel elektroenergetyczny	K	—	—
Żyłą roboczą — miedziana	—	—	CU
— aluminiowa	A	A	AL.
Izolacja z polietylenu usieciowanego XPLE	XS	XS	XLPE
Uszczelnienie wzdłużne	U	L	—
Zapora promieniowa	R	F	—
Uszczelnienie wzdłużne i promieniowe	UR	FL	LT
Powłoki poliwinylowe	Y	Y	PVC
Powłoki polietylenowe	X	2Y	PE
Powłoki nierozprzestrzeniające płomienia	Xn	—	—
Promieniowy rozkład pola elektrycznego w izolacji	H	—	—
Typ ekranu metalowego (żyły powrotnej)			
— z drutów miedzianych	—	S	CUW
— z ołowiu	PB	K	PB
Pancerz z drutów aluminiowych	AO	—	AWA

Przykłady oznaczeń kabli:

* - XRUH(A)KXS

** - NA2XS(F)2Y

*** - CU/XLPE/CUW/LT/P

Literatura

- [1] IEC Publication 840: *Test for power cables with extruded insulation for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV)* (First edition — 1988) Amendment 2 to Publication 840
- [2] prHD 632 SI:1995: *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 36 kV ($U_m = 42$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV)*
- [3] Working Group 21.03: *Recommendations for electrical tests prequalification and development on extruded cables and accessories at voltages >150 (170) kV and ≤400 (420) kV.* ELEKTRA No. 151 December 1993
- [4] ZN-96/MP-13-K2-115: Norma Zakładowa BFK SA. *Kable elektroenergetyczne o izolacji z polietylenu usieciowanego na napięcie znamionowe $U_0/U/U_m = 64/110/123$ kV*
- [5] NEK 395 (1990). *Power cables tests for cables for 36 to 420 kV A.C.*, Norwegian electrotechnical standard

- [6] Katalogi: *XLPE insulated extra high voltage cables 245 kV to 420 kV*
- [7] Katalogi i własne opracowania Bydgoskiej Fabryki Kabli S.A.
- [8] **Mościcka-Grzesiak H.**: *Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce*, Tom I, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1996

Część II

OSPRZĘT DO KABLI NA NAPIĘCIU 64/110 kV

Pierwotnym założeniem fabryki w zakresie osprzętu do kabli 64/110 kV miała być współpraca z firmą Kabeldon Szwecja. Z zastosowaniem osprzętu tej firmy w 1992 r. została wykonana próba typu na kablu YHKXS 1×400/95/64/110 kV, oraz wybudowana linia kablowa dwutorowa na terenie Zakładu Energetycznego W-wa Teren. Przejście firmy Kabeldon pod zarząd ABB i wydana decyzja o zakazie dostawy osprzętu do kabli produkcji BFK SA uniemożliwia wejście na rynek krajowy i zagraniczny jako producent i dostawca kabli.

Z tego też powodu w fabryce przystąpiono do opracowania konstrukcji i uruchomienia produkcji elementów składowych osprzętu. Przedsięwzięcie to zostało zakwalifikowane przez Komitet Badań Naukowych jako projekt celowy. Zgodnie z zawartą umową z KBN na współfinansowanie i realizację tematu wykonawcą i realizatorem była BFK SA. Przyjęte założenia do opracowanej konstrukcji to: wykorzystanie parametrów techniczno-eksploatacyjnych kabli w liniach kablowych w zakresie:

- obciążalności prądowej — technologia łączenia żył roboczych i powrotnych i sworzni z żyłą roboczą,
- konstrukcji układów izolacyjnych zapewniających odporność osprzętu na działanie napięcia roboczego, napięć indukowanych z tytułu przepięć łączeniowych i indukowanych napięć od udarów piorunowych nie mniejszą od łączonych i zakończanych kabli. Powyższe założenia zostały spełnione przy poziomie izolacji dla głowic 145 kV i muf przelotowych 132 kV,
- poziomu intensywności wyładowań niezupełnych w obiektach kabel, mufa, głowica przy napięciu probierczym $2U_0$, nie większym od 10 pC,
- dopuszczalnej obciążalności prądowej i zwarciowej, w tym dla elementów metalowych kabli (żyła robocza, powrotna, taśma Al) nie mniejsza jak dla samych kabli,
- maksymalnego elektrycznego naprężenia promieniowego na powierzchni ekranowanych żył przy napięciu 64 kV, nie przekraczało wartości 4,5 kV/mm,
- uniwersalności i łatwości montażu,
- zapewnienia warunków środowiskowych zgodnych z wykonaniem kabli.

5. Głowice typu GNXS-145

Elementy składowe głowicy przedstawiono na rysunku 2 (w załączeniu) Dane głowic:

- droga upływu 4400 mm,
- siła łamiąca izolator ponad 15 kN,
- ciężar głowicy około 240 kg,
- posadowienie głowic na konstrukcjach wsporczych przy pomocy czterech izolatorów wsporczych typu ID-45,
- sterowanie pola stożkiem sterującym — wykonanym z gumy półprzewodzącej i izolacyjnej EPR,

- połączenie elementów głowicy z izolatorem przy zastosowaniu specjalnych uchwytów łapkowych,
- wnętrze izolatora głowicy wypełnione zalewą.

Element sterujący natężeniem pola elektrycznego w głowicy wykonany jest z materiału gumy o wysokich własnościach elastycznych w przedziale temperatur do 120°C.

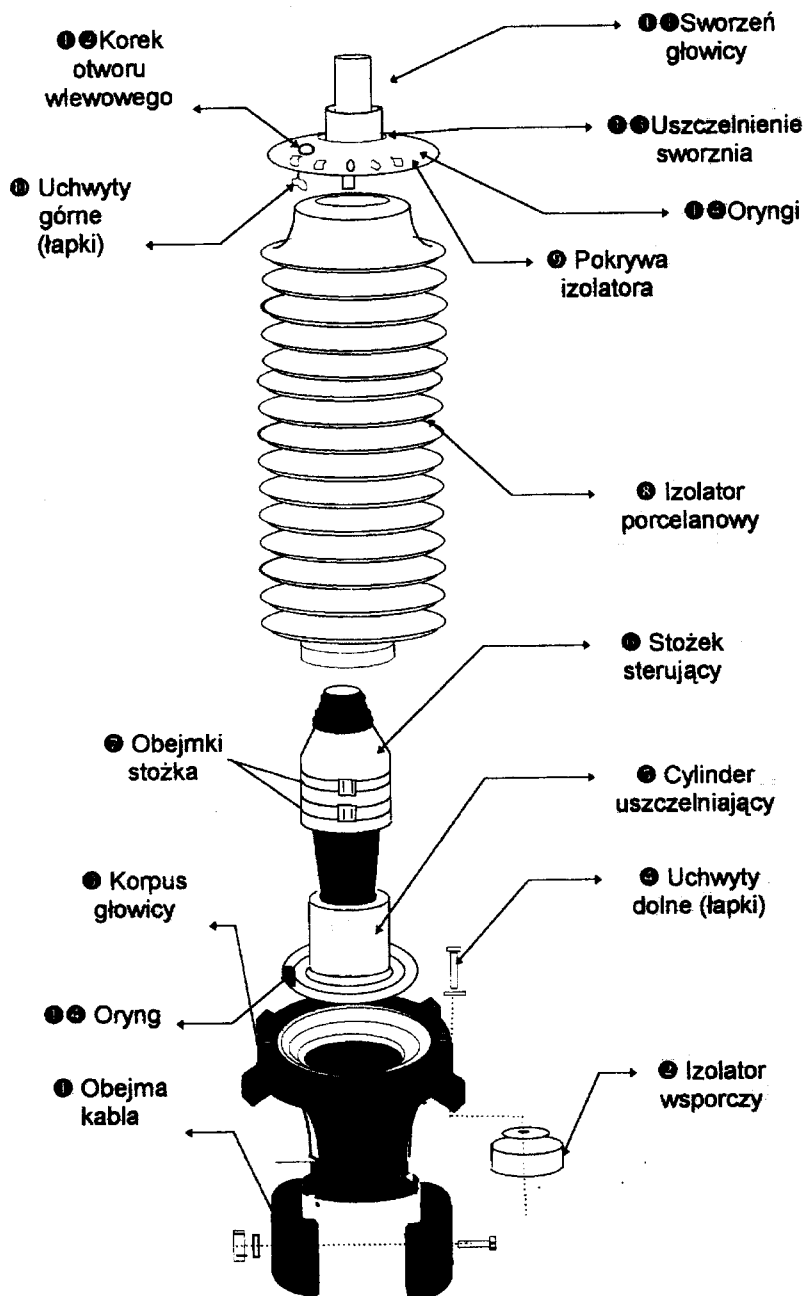
Podstawowym problemem dla tego rozwiązania sterowaniem pola jest zapewnienie wytrzymałości elektrycznej na powierzchni styku między izolacją, ekranem żył kabli a wewnętrzną powierzchnią stożka. Przy opracowywaniu konstrukcji stożków sterujących dla poszczególnych typowymiarów kabli założono, że siła dociska na całej powierzchni styku płaszczyzn nie mniejsza od 0,2 i większa 0,3 MPa. Dla sprawdzenia tej zależności została opracowana metodyka badań dla oceny parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych stożków sterujących. Metodyka ta pozwala na określenie jakości wykonywanych stożków oraz ocenę sił docisku w funkcji temperatur jak i określenie zmian jej w funkcji czasu. Omówienie tej metodyki oraz wyniki z badań zostaną przedstawione na konferencji.

6. Mufa przelotowa typu MPTXS-132KV

Poziom izolacji mufy dobrany jest na napięcie 132 kV przy max elektrycznym natężeniu promieniowym na powierzchni ekranowanych żył nie przekraczającym przy napięciu 64 kV 4,5 kV/mm, co uzyskano przy grubości dowieńtej izolacji nad izolację kabla nie mniejszą od 15mm.

Etapy wykonania muf przelotowych i podstawowe założenia konstrukcyjne:

- przygotowanie i obróbka końcówek łączonych kabli,
- połączenie żył metodą spawania wybuchowego,
- odtworzenie ekranu na odsłoniętych żyłach kabla taśmą półprzewodzącą,
- odtworzenie usuniętej izolacji i dowieńcie stożka przy spełnieniu zależności:
 - średnica zewnętrzna izolacji mufy o wartości takiej aby maksymalne elektryczne naprężenie promieniowe na powierzchni ekranowanej żyły nie przekraczało przy napięciu 64 kV wartości 4,5 kV/mm,
 - długości stożka wykonanego na izolacji kabla takiej, aby największa wartość średniego elektrycznego naprężenia stycznego do jego powierzchni na długości $x_1 = 25\text{mm}$ od jego wierzchołka przy napięciu 64 kV nie przekraczała wartości 0,6 kV/mm,
 - długości stożka dowieńtej izolacji mufy taka, aby największa wartość średniego elektrycznego naprężenia stycznego od powierzchni fabrycznej izolacji kabla do wierzchołka stożka, nie przekraczała przy napięciu $U_0 = 64$ wartości 0,33 kV,
 - izolacja dowijana z taśmy wysokonapięciowej o przenikalności dielektrycznej względnej $\epsilon = 2,6$ w zakresie temperatur od 20 do 70°C,
 - sterowanie natężeniem pola elektrycznego wykonane płatem sterującym FSD,
 - ekran na izolacji wykonany poprzez nawinięcie taśmy półprzewodzącej wzmocnionej przed działaniem cieplnym prądów zwarciovych plecionką miedzianą; dla zapewnienia równomiernego docisku płata sterującego zastosowano obwód dociskowy wykonany z taśmy samospajalnej izolacyjnej wysokonapięciowej,



Rys. 2. Konstrukcja głowicy kablowej typu GNXS-145

- uszczelnienie wzdłużne w obrębie muf jest wykonane tymi samymi taśmami co uszczelnienie w kablu,
- żyła powrotna połączona jest przy zastosowaniu złączek rurowych (Cu) poprzez zaprasowanie,
- w obrębie muf wykonane jest uszczelnienie promieniowe taśmą Al połączoną elektrycznie z taśmami Al kabla,

powłoka zewnętrzna odtworzona jest poprzez zastosowanie rur termokurczliwych grubościennych a końcówki ich uszczelnione taśmami samospajalnymi uszczelniającymi.

7. Wymagania i wyniki badań osprzętu

Dla sprawdzenia prawidłowości założeń konstrukcyjnych, zastosowanych i wykonanych elementów oraz technologii montażu zmontowano w Instytucie Energetyki W-wa na kablu XRUHKXS dwie głowice i mufę przelotową.

Obiekt ten poddano badaniom o zakresie zgodnym z IEC-840, poszerzonym o zakres badań konstruktorskich.

Program badań obiektu – głowice – kabel – mufa przelotowa:

- Dorazna wytrzymałość elektryczna 230 kV — 1 min;
 - Pomiar intensywności wyładowań niezupełnych U_0 ; $1,5 U_0$, $2 U_0$ i $2,5 U_0$ 50 Hz $q \leq 10$ pC (na ciepło i zimno);
 - Pomiar $\text{tg } \delta$ (na ciepło i zimno) przy U_0 ; $1,5 U_0$, $2 U_0$ i $2,5 U_0$;
 - Sprawdzanie długotrwałej wytrzymałości elektrycznej napięciem 128 kV – 50 Hz nieprzerwanie w ciągu 20 cykli (1 cykl 8 godz. grzanie do temp $90 \pm 5^\circ\text{C}$ i 16 godz stygnięcie);
 - Pomiar intensywności wyładowań niezupełnych;
 - Sprawdzenie szczelności osłony mufy — 15 kV napięcie stałe — w ciągu 15 min;
 - Sprawdzenie wytrzymałości udarowej — 10 dodatnich i 10 ujemnych udarów o amplitudzie 550 kV i kształcie (1-5)(40-60) μs — żyła kabla o temp (85-100 $^\circ\text{C}$);
 - Sprawdzenie krótkotrwałej wytrzymałości elektrycznej — 160 kV, 50 Hz, 15 min (na ciepło i zimno);
 - Pomiar intensywności wyładowań niezupełnych (na ciepło i zimno) przy U_0 ; $1,5 U_0$, $2 U_0$ i $2,5 U_0$;
 - Sprawdzenie wytrzymałości elektrycznej przy napięciu stałym $U = 256$ kV przez 15 min;
 - Sprawdzenie trwałości izolacji obiektu — próba długotrwała 3000 h, przy $U = 128$ kV i cyklach grzewczych — mufa zanurzona w wodzie, ciśnienie słupa wody — 1 m;
- Po każdym 500 godzinach cykli grzewczych sprawdzenia w zakresie:
- próba napięciowa 160 kV,
 - pomiar intensywności wyładowań niezupełnych na ciepło i zimno przy U_0 ; $1,5 U_0$, $2 U_0$ i $2,5 U_0$,
 - pomiar $\text{tg } \delta$ (na ciepło i zimno) przy U_0 ; $1,5 U_0$, $2 U_0$ i $2,5 U_0$;
- Sprawdzenie wytrzymałości udarowej o zakresie jak wyżej,

Tabela 5. Wyniki pomiarów intensywności wyładowań niezupełnych i tg δ

Czas pomiaru	Temperatura kabla z osprzętem	Poziom wnz	
Po montażu głowic i muf	1÷4°C	U = U ₀	< 3 pC
		U = 1,5 U ₀	< 3 pC
		U = 2 U ₀	< 5 pC
		U = 2,5 U ₀	< 7 pC
	95°C	U = U ₀	< 3 pC
		U = 1,5 U ₀	< 4 pC
		U = 2 U ₀	< 5 pC
		U = 2,5 U ₀	< 9 pC
Po próbie U = 2,5 U ₀ , 15 min. i 20 cyklach grzewczych (500 h)	10°C	U = U ₀	< 3 pC
		U = 1,5 U ₀	-3 pC
		U = 2 U ₀	-5 pC
		U = 2,5 U ₀	-8 pC
	95°C	U = U ₀	< 3 pC
		U = 1,5 U ₀	-4 pC
		U = 2 U ₀	-5 pC
		U = 2,5 U ₀	< 8 pC
Po próbie napięciem udarowym i stałym U = 256 kV, 15 min	12°C	U = U ₀	< 3 pC
		U = 1,5 U ₀	-4 pC
		U = 2 U ₀	-6 pC
		U = 2,5 U ₀	-8 pC
	95°C	U = U ₀	< 3 pC
		U = 1,5 U ₀	-3 pC
		U = 2 U ₀	< 6 pC
		U = 2,5 U ₀	< 8 pC
Po 46 cyklach grzewczych i próbach sprawdzających (dodatkowych) tj. 1100 h	12°C	U = U ₀	< 3 pC
		U = 1,5 U ₀	-3 pC
		U = 2 U ₀	< 10 pC
		U = 2,5 U ₀	< 10 pC
	95°C	U = U ₀	< 3 pC
		U = 1,5 U ₀	< 4 pC
		U = 2 U ₀	< 10 pC
		U = 2,5 U ₀	< 10 pC
Po 68 cyklach grzewczych (ok. 1600 godz) po dodatkowych próbach sprawdzeń napięciem udarowym i próbach napięciem 2,5 U ₀ 15 min	16°C	U = U ₀	< 3 pC
		U = 1,5 U ₀	< 4 pC
		U = 2 U ₀	< 7 pC
		U = 2,5 U ₀	< 10 pC
	95°C	U = U ₀	< 3 pC
		U = 1,5 U ₀	< 5 pC
		U = 2 U ₀	< 8 pC
		U = 2,5 U ₀	< 10 pC

- Po zakończeniu próby długotrwałej — sprawdzenie odporności połączeń żyły powrotnej na działanie ciepłe prądu.

Obiekt badań przeszedł powyższy zakres badań z wynikiem pozytywnym. Zmiany tj. starzenie układu izolacyjnego w czasie prób nie nastąpiły znaczne, o czym świadczą zestawione wyniki intensywności wyładowań i $\text{tg } \delta$, w tabeli 5.

Wyniki ze sprawdzeń po 2000 h, 2500 h i 3000 h zostaną przedstawione na konferencji.

Tabela 6. Zmiana współczynnika strat dielektrycznych w funkcji napięcia, temperatur i czasu

Czas pomiaru	Temperatura kabla z osprzętem	$\text{tg } \delta$
	95°C	U = U ₀ - 0,00299 U = 1,5 U ₀ - 0,0032 U = 2 U ₀ - 0,00336
Po próbie U = 2,5 U ₀ , 15 min. Po montażu głowic i mufy	10°C	U = U ₀ - 0,0027 U = 2 U ₀ - 0,0028
	95°C	U = U ₀ - 0,0024 U = 2 U ₀ - 0,0027
Po cyklach grzewczych (ok. 500 h) po próbie napięciem udarowym i po próbie napięciem stałym U = 256 kV — 15 min	11°C	U = U ₀ - 0,0023 U = 2 U ₀ - 0,0025
	95°C	U = U ₀ - 0,0024 U = 2 U ₀ - 0,0025
Po 46 cyklach grzewczych (ok. 1100 h) i próbach napięciem U = 2,5 U ₀	95°C	U = U ₀ - 0,00133 U = 2 U ₀ - 0,00136
Po 68 cyklach grzewczych (ok. 1600 godz) i próbach udarowych napięciem 2,5 U ₀ 15 min.	16°C	U = U ₀ - 0,00142 U = 2 U ₀ - 0,00144
	95°C	U = U ₀ - 0,00139 U = 2 U ₀ - 0,00143

Wyniki z badań kabla i osprzętu potwierdzają dobrą jakość kabla i osprzętu co gwarantuje ich bezawaryjną eksploatację.

8. Oferta fabryki

Fabryka do wykonawstwa linii kablowych 64/110 kV oferuje:

- kable o przekrojach znamionowych 120 ÷ 1000 mm² w różnych wersjach wykonania,
- osprzęt tj. mufy przelotowe i głowice,
- montaż osprzętu,
- nadzór nad budową i układaniem kabli łącznie z instrukcjami do rozciągania kabli.

Wykaz norm i przepisów

- [1] BEWAG — Vorschriften für Aufbau und Prüfung von 110 kV. *Kabeln mit Isolierung aus vernetztem Polyethylen und deren Garnituren*. Berlin 1988
- [2] Technische Lieferbedingungen für 110 kV — VPE. *Kabeln und Garnituren der Bayernwerk* — Konzerngesellschaften 1994
- [3] International Standard — Publ. 840 IEC. *Test for power cables with extruded insulation for rated voltages above 30 kV (U_m 170 kV)*, 1988
- [4] Supplement to IEC 840. Doc. 20A (Sec.) 204, 1991.
- [5] Draft prHD 632 S1. *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 36 kV (U_m 42 kV) up to 150 kV (U_m 170 kV)*. Part 1 — General test requirements, CENELEC, 1995
- [6] Draft prHD 632 S1. *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 36 kV (U_m 42 kV) up to 150 kV (U_m 170 kV)*. Part 2 — Additional test methods, CENELEC, 1995
- [7] ZN-96/MP-13-KZ 115.

DESIGN, TECHNICAL PARAMETERS AND PERFORMANCE OF CABLES AND CABLE ACCESSORIES MADE BY BYDGOSZCZ CABLE FACTORY, TO BE USED ON HIGH VOLTAGE CABLE LINES

This paper describes the production technology of XLPE insulated HV and EHV cables at Bydgoszcz Cable Factory at the design stage. It classifies the cables according to their voltage ratings [2], following the IEC 183 Publication; it also shows the insulation thickness levels according to maximum electrical stress distribution across the insulation (Table 2). The quality of the insulation and semiconductive materials results from the super clean insulation polyethylenes and super smooth semiconductive polyethylenes, accompanied by scrupulous material selection for the HV and EHV cables [3]. The cable constructions base on the latest international concepts governed by the following Standards: IEC Publications 228, 183, 840, AEIC CS7-82, IEC 949.

The paper describes cable sealing methods using copper screens wrapped, or lead (lead alloy) screens extruded over the cable, accompanied by various types of outer jackets applied according to the intended use and operational conditions of the product.

It compares different versions of cable identification with reference to the Polish, German and British standards.