



Aleksandra RAKOWSKA

Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki

## Rozwój wysokotemperaturowych kabli nadprzewodnikowych

**Streszczenie.** Kable nadprzewodzące mogą stanowić nowy sposób pozwalający przesyłać energię elektryczną o znacznych mocach. Artykuł poświęcono przeglądowi kabli nadprzewodzących oraz omówieniu najnowszych, realizowanych na świecie projektów z kablami HTS.

**Abstract. (Development of high temperature superconducting power cables).** Superconducting cables provide a new way to solve power transmission with very high ampacity. This paper provides an overview of superconducting cables and reviewing the main projects in the world.

**Słowa kluczowe:** kable elektroenergetyczne nadprzewodnikowe, nadprzewodnictwo nisko i wysokotemperaturowe.

**Keywords:** superconducting power cables, HTS-High Temperature Superconducting.

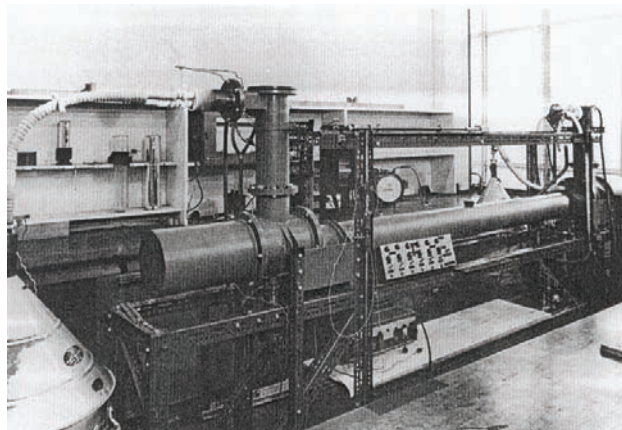
### Wstęp

Na konferencjach kablowych coraz większa liczba referatów poświęcana jest wysokotemperaturowym kablom nadprzewodnikowym, skrótowo nazywanym HTS (*High Temperature Superconducting*). Wielu badaczy uważa, że komercyjne rozpowszechnienie kabli z żyłami z wysokotemperaturowych nadprzewodników może doprowadzić w energetyce do takiej samej rewolucji, jaką w telekomunikacji spowodowały światłowody.

Wykorzystanie zjawiska nadprzewodnictwa uważane jest za nowoczesną myśl technologiczną. A przecież historia odkrycia tego zjawiska, będącego dziełem wielu ludzi, rozpoczyna się od roku 1855. Niektóre źródła podają, że byli to Francuzi Cailletet i Bouty oraz, niezależnie od nich, polski fizyk Zygmunt Wróblewski z Uniwersytetu Jagiellońskiego, którzy po raz pierwszy skroplili większe ilości tlenu i azotu. Inne źródła za odkrywcę tego zjawiska uważają holenderskiego profesora Kamerlinga-Onnesa, który w 1911 roku skroplił hel. Skroplenie gazów pozwoliło na zbadanie zdolności przewodzenia elektryczności przez różne metale w niskich temperaturach, a ówczesni badacze tłumaczyli je jako możliwość przenoszenia bez strat nawet bardzo dużych prądów cienkimi przewodami. Jednakże ówczesna myśl techniczna nie pozwoliła na wdrożenie odkrycia, ale samo uzyskanie niskich temperatur było już ogromnym osiągnięciem. Po ochłodzeniu metali płynnym helem (temperatura 4,2 K, czyli  $-268,95^{\circ}\text{C}$ ) stwierdzono, że ich rezystancja jest praktycznie zerowa. Badania prowadzono nadal, co zaowocowało między innymi opracowywaniem nowych stopów (np.  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Nb-Ti}$ ) o właściwościach szczególnie korzystnych dla nadprzewodnictwa. Ten typ nadprzewodnictwa nazwano niskotemperaturowym – LTS (*Low Temperature Superconducting*), a najwięcej prac nad nim prowadzono w latach 1965–1985, głównie w Stanach Zjednoczonych i Japonii. Wykonano i przetestowano bardzo wiele modeli kabli o długościach przekraczających nawet 100 metrów [1].

Pierwsze kable nadprzewodzące były konstruowane z użyciem ciekłego helu jako chłodziwa. Kable te jednak były prototypami służącymi do badań naukowych i nigdy nie weszły do powszechnego użycia. Badania nad efektem nadprzewodnictwa prowadzili głównie Brytyjczycy oraz Francuzi. Pierwszy historycznie kabel, oparty o nadprzewodnictwo niskotemperaturowe zbudowany w Londynie w 1968 roku, w laboratoriach BICC (rys. 1). Był to eksperymentalny kabel na napięcie 138 kV, zaprojektowany do przesyłania mocy 1000 MVA. Składał się z pary współosiowych przewodników z naniesioną warstwą niobu, mających około 3 metrów długości i grubych na około 100

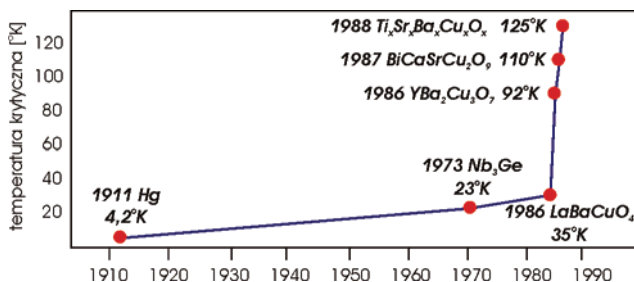
mikrometrów. Na każdym z zakończeń kabla znajdował się transformator nadprzewodzący, schowany w cylindrycznym zbiorniku. Kabel został tak zaprojektowany, aby pole magnetyczne generowane przez wewnętrzną warstwę nadprzewodzącą indukowało równoważny prąd płynący w przeciwnym kierunku w zewnętrznej warstwie nadprzewodnika [2]. To ograniczyło generowane pole magnetyczne do rdzenia kabla i wyeliminowało wirowe prądy błądzące w systemie kablowym. Przewodniki były umieszczone w wewnętrznej rurze, która spełniała rolę powłoki kriogenicznej. Wewnętrzna rura została umieszczona w zewnętrznej rurze za pomocą wsporników, a powietrze z przestrzeni między rurami zostało wypompowane, aby zapewnić izolację termiczną. Dodatkową izolację zapewniono poprzez owinięcie wewnętrznej rury izolacją nadprzewodzącą, którą stanowił wielowarstwowy plastik pokryty warstwą aluminium. Ciekły hel został wprowadzony do otoczenia wokół dwóch przewodników, aby całość mogła być schłodzona do temperatury poniżej 10 stopni Kelwina tak, aby mogła przewodzić prąd o wartości skutecznej 2080 A przy napięciu poniżej 1 V.



Rys. 1. Kabel brytyjski [2]

Ważnym przełomem w rozwoju wykorzystywania nadprzewodnictwa było odkrycie w 1986 r. materiału ceramicznego, który już w temperaturze ciekłego azotu 77,3 K ( $-195,85^{\circ}\text{C}$ ) wykazuje nadprzewodnictwo. Od tego momentu datuje się wykorzystanie tzw. nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego – m.in. powstanie kabli HTS. Uznano to za ogromnie ważne dokonanie, a jego autorzy, niemiecki fizyk Georg Bednorz i szwajcarski badacz Alexander Müller, otrzymali w roku 1987 nagrodę Nobla

w dziedzinie fizyki. Na rysunku 2 pokazano historyczny rozwój materiałów nadprzewodzących.



Rys.2. Rozwój materiałów stosowanych jako nadprzewodniki [wg 3]

Odkrycie nadprzewodników ceramicznych pozwoliło na to, by realne było urzeczywistnienie marzeń dotyczących wykorzystania zjawiska nadprzewodnictwa w bardzo niskich temperaturach do przesyłu energii elektrycznej. I to do przesyłu prawie idealnego ekologicznie, ekonomicznie (praktycznie bez strat) oraz przede wszystkim energetycznie (duże moce przesyłane jedną linią).

Wśród wysokotemperaturowych nadprzewodników stosowane są obecnie dwie grupy materiałów ceramicznych: YBCO (wytwarzane z itru, baru, miedzi i tlenu) i BSCCO (z bizmutu, strontu, wapnia, miedzi i tlenu).

Pierwsza generacja materiału przewodzącego miała strukturę wielowłókienkową. Najczęściej włókna z Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub> (nazywanego Bi-2223) umieszczano na matrycy ze srebra. W drugiej generacji materiału nadprzewodzącego wykorzystywana jest taśma metalowa pokryta warstwą ceramicznego nadprzewodnika wysokotemperaturowego YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (Y-123) [4].

### Rozwój kabli nadprzewodnikowych

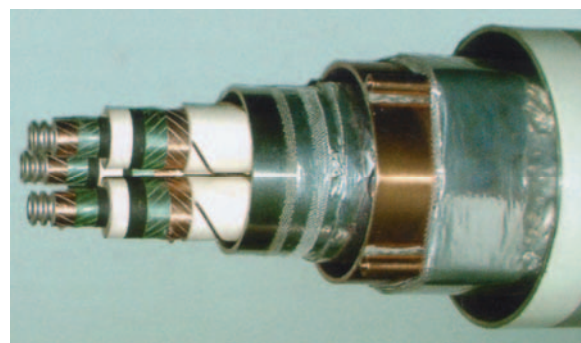
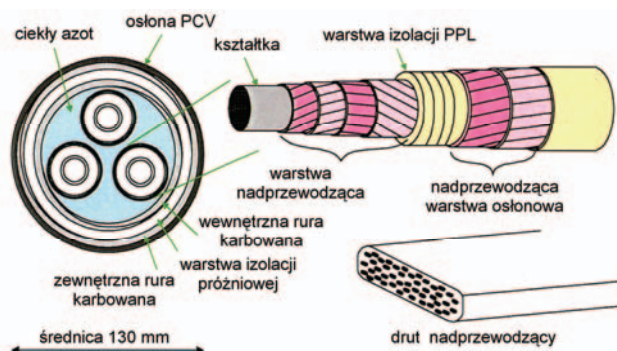
Wiele międzynarodowych firm, między innymi: ABB, American Superconductor, Alcatel, Prysmian (dawnej Pirelli), Nexans, NKT, Instytut EPRI (USA), Siemens oraz firmy japońskie, takie jak Chubu Electric, Southwire Company, Sumitomo oraz Furukawa prowadzą bardzo intensywne badania prototypów i modeli kabli wykorzystujących zjawisko nadprzewodnictwa [4, 5]. Kable te umożliwiają przesył wielokrotnie większej ilości energii niż kable konwencjonalne. Dzieje się tak, ponieważ w kablu nadprzewodzącym, którego rdzeń znajduje się w stanie nadprzewodzenia, transport energii odbywa się w zupełnie inny sposób, niż w kablu konwencjonalnym – nie ma tu prądu w postaci strumienia elektronów, lecz przekazywanie energii pomiędzy sparowanymi elektronami drgającymi w sieci utworzonej na skutek efektu nadprzewodzenia.

Przesyłaną moc można zwiększać na dwa sposoby – albo podwyższając przesyłany prąd, albo podnosząc napięcie. Obydwa sposoby mają swoje naturalne ograniczenia. Podwyższanie napięcia doprowadzi do „magicznej” granicy w pobliżu 1 MV, gdzie nierównomierność rozkładu napięcia na uzwojeniach transformatora oraz intensywność wyładowań niepełnych przesądzą o nieopłacalności dalszego podwyższania napięcia. Z kolei podwyższanie wartości prądu napotyka na barierę w postaci minimalnego pola przekroju poprzecznego kabla, jaki musi on mieć, aby osiągnąć odpowiednią zdolność przesyłową. Można zatem powiedzieć, że zwykły kabel posiada ograniczenia ze względu na pole powierzchni przekroju żyły przewodzącej. Z tego powodu kable konwencjonalne buduje się tylko do pewnej wartości prądu, jaki przezeń może płynąć – maksymalnie może to być 2000 A. Grubszych kabli nie buduje się ze względów praktycznych – kabel o większym prądzie znamionowym musiałby być kilkakrotnie grubszy i cięższy, co sprawiłoby

ogromne trudności w jego transporcie i montażu, a w konsekwencji ogromne problemy przy wszelkich naprawach.

Wspomniane wcześniej koncerty osiągnęły poziom wiedzy technicznej, który pozwala na skonstruowanie funkcjonującego modelu kabla nadprzewodzącego o zdolności przesyłowej co najmniej 10 razy większej, przy zachowaniu tych samych wymiarów geometrycznych. Przy obecnym stanie technologicznym kable wykorzystujące HTS są około 2–3 razy droższe niż kable konwencjonalne. Realizacja bardzo wielu projektów badawczych na całym świecie może doprowadzić do obniżenia tych kosztów. Ale i badania są drogie – przykładowo zaplanowano, że opracowanie i uruchomienie 400-metrowego kabla HTS w sieci Niagara Mohawk Power Corporation pochłonie 20 milionów dolarów [6].

Kable nadprzewodzące to głównie konstrukcje jednofazowe. Jednak projektowane są również konstrukcje trójfazowe. Między innymi japońska firma Tokyo Electric Power Company (TEPCO) prowadziła prace nad trójfazowym kablem nadprzewodzącym – rysunek 3. Kabel ten ma długość 100 metrów i średnicę zewnętrzną 130 mm, a został zaprojektowany na napięcie 66 kV, mając zdolność do przesyłania mocy do 1000 MVA przy prądzie 1 kA.



Rys. 3. Przekrój i widok kabla nadprzewodzącego 66 kV [5]

Firma Siemens opracowała kabel trójfazowy, który jest zdolny do przesyłania mocy 400 MVA przy napięciu 110 kV. Z kolei firma Chubu Electric wyprodukowała kabel jednofazowy, o długości 500 metrów i zdolności przesyłowej dochodzącej do 1 GVA, przy napięciu 77 kV.

Innym ciekawym rozwiązaniem, są kable powstałe w wyniku współpracy firmy Pirelli z firmami American Superconductor Corporation oraz Detroit Edison. Uruchomiono linię nadprzewodzącą na napięciu 24 kV, łączącą stronę wtórną transformatora z magistralą energetyczną odległą o 120 metrów. Prąd znamionowy dla tego kabla to aż 2400 A. W ramach tej realizacji zastosowano po raz pierwszy na świecie zagięcie kabla nadprzewodzącego o 90°. Trzy kable nadprzewodzące wysokotemperaturowe zastąpiły dziewięć istniejących linii kablowych.

Jako pierwszą instalacją komercyjną wykorzystującą zjawisko nadprzewodnictwa w kablach, uważany jest trzydziestometrowy kabel z firmy NKT, zainstalowany pod koniec 2000 r., w jednej z rozdzielni przy elektrowni w Kopenhadze. Parametry jego są następujące: napięcie pracy 36 kV, prąd roboczy 2 kA, zdolność przesyłowa 20 MVA. Na rysunku 4 pokazano konstrukcję tego kabla.



Rys. 4. Kabel nadprzewodzący firmy NKT Dania [5]

Kable HTS można podzielić na dwie grupy: kable, w których izolacja elektryczna znajduje się w sąsiedztwie ciekłego azotu oraz kable, w których izolacja elektryczna jest oddalona od warstwy ciekłego azotu, a izolacja termiczna stanowi warstwę zewnętrzną w postaci tzw osłony kriogenicznej (ang. *warm-dielectric / cold-dielectric*) – rysunki 5, 6 i 7. Izolację w kablach typu *warm-dielectric* stanowi przede wszystkim polietylen usieciowany, natomiast w przypadku kabli z *cold-dielectric* izolacją są głównie taśmy papier + folia polipropylenowa (PPL).



Rys.5. Kable trójfazowe z układem izolacyjnym *cold-dielectric*



Rys.6. Osłona termiczna kabla z *cold-dielektrykiem*; 1- karbowana rura wewnętrzna, 2- odstępnik, 3- odstęp próżniowy, 4- izolacja wielowarstwowa, 5- karbowana rura zewnętrzna, 6-osłona PE [4]



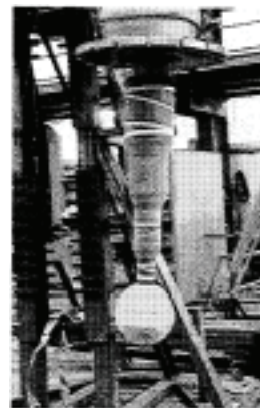
Rys.7. Kable z układem izolacyjnym *warm-dielectric*

### Aktualnie realizowane projekty

W październiku 1997 r. Energetyka Francuska we współpracy z firmą Pirelli (obecna nazwa firmy Prysmian) ogłosiła rozpoczęcie wspólnych prac nad kablem zdolnym do przesyłania mocy 3 GVA przy napięciu 225 kV. Obecny stan realizacji projektu był przedstawiony w artykule [7], w którym omówiono prace prowadzone nad prototypem kabla o parametrach zestawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Oczekiwane parametry kabla HTS na napięcie 225 kV

Parametr	Wartość
Zdolność przesyłowa [MVA]	3 000
Napięcie znamionowe [kV]	225
Długość obwodu [km]	10
Wytrzymałość udarowa [kV]	1 000
Prąd zwarciaowy [kA]	31,5
Czas zwarcia [s]	0,5



Rys.8. Zakończenie prototypowego kabla [7]

Aktualnie realizowany jest także projekt europejski (z udziałem wielu państw) mający na celu wykonanie kabli nadprzewodzących średniego napięcia o mocy przesyłowej 1 GVA. Prowadzone są prace nad wykorzystaniem w kablach 20 kV obu rodzajów (YBCO i BSCCO) wysokotemperaturowych nadprzewodników ceramicznych [4, 8]. Najwięcej uwagi poświęca się jednak projektowi realizowanemu wspólnie w ośrodkach badawczych Holandii, Danii i Stanów Zjednoczonych [9]. Trójfazowy kabel HTS na napięcie 50 kV zastąpi dotychczas eksploatowany w centrum Amsterdamu kabel 150 kV o izolacji gazowej. Zdolność przesyłowa to 250 MVA. Ciekawostką jest fakt, że kabel ma być wprowadzony do stalowej rury, a długość tej linii kablowej będzie przekraczała 6 km. Średnica zewnętrzna kabla to 139 mm i jest to wymiar pozwalający wprowadzić kabel do istniejącego systemu rur stalowych o średnicy wewnętrznej równej 150 mm.



Rys. 9. Trójfazowe zakończenie kabla [9]

Obecnie prowadzone są badania na odcinku testowym o długości 200 m. W oparciu o wyniki badań laboratoryjnych zdecydowano się na wykonanie całej linii w 16 odcinkach o oddzielnych systemach chłodzenia. Na zakończeniu linii zamontowane będą trójfazowe głowice (rys. 9), a poszczególne sekcje kabla łączą mufy (rys. 10) [9].

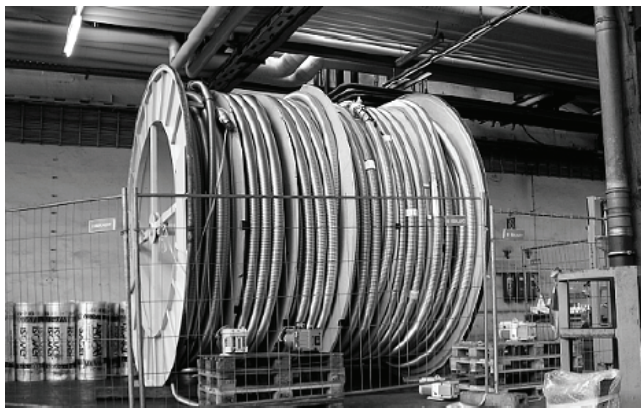


Rys. 10. Montaż mufy kabla HTS [9]

Inny zrealizowany projekt to kabel HTS (rys. 11, 12) na napięcie 138 kV o prądzie roboczym 2400 A, prądzie zwarciovym 51 kA, mocy przesyłowej równej 574 MVA i długości 600 m, który został zainstalowany w tym roku w sieci Long Island Power Authority w stacji Holbrook [10].



Rys. 11. Kabel HTS z linii w Long Island [10]



Rys. 12. Kabel HTS gotowy do transportu [10]

## Podsumowanie

Trzy główne zrealizowane instalacje z wykorzystaniem kabli HTS znajdują się w Stanach Zjednoczonych, i bazują one na wykorzystaniu konstrukcji z tzw. *cold-dielektrykiem*. Są to kable:

- 200 m, 3 kA, 13 kV oddane do eksploatacji w sierpniu 2006 w Columbus (stan Ohio);
- 350 m, 0.8 kA, 34.5 kV oddane do eksploatacji w lipcu 2006 w Albany (stan Nowy Jork);
- 600 m, 2,4 kA, 138 kV oddane do eksploatacji w 2007 w Long Island.

Dynamiczny rozwój nadprzewodnictwa z jednej strony dostarcza wiele satysfakcji z ogromnych dokonań projektowo-technologicznych. Jednak z drugiej strony - należy pamiętać, że przed realizatorami kolejnych projektów stoi jeszcze wiele problemów do rozwiązania. Okazuje się bowiem, że wysoki koszt kabli to przede wszystkim znaczący koszt systemu chłodzenia oraz rozwiązań technicznych zakończeń kabli i nietypowych muf kablowych. Dlatego prowadzone są także prace nad nadprzewodnikami działającymi w temperaturze pokojowej – *RTS (Room Temperature Superconducting)*. A jeżeli nie uda się tego opracować – to należy rozwiązać problem, jak wytworzyć i utrzymać temperaturę ciekłego azotu w kablu, który w przyszłości będzie miał nawet i kilkadziesiąt kilometrów długości.

Na zakończenie można zwrócić uwagę, że sformułowanie „*wysokotemperaturowy*” dla energetyka może oznaczać temperaturę .... minus 195,85°C.

## LITERATURA

- Ochmański R., Rakowska A., Kable nadprzewodzące – historia i stan obecny, *Biuletyn PTPiREE* nr 9/2002, 23-27
- Electric Cables Handbook, BICC, Cables, Blackwell Science, 1999
- www.amsuper.com, Briskman A., Perlman M., Superconductors
- Saugrain J.-M., Schmidt F., Mirebeau P., Superconducting cables – status and applications, *JICABLE 2003*, paper A.3.1, 72-75
- Superconducting cables, Impact on network structure and control, Task Report, *CIGRE Electra*, No 200, February 2002
- Miller S., High-temp superconducting cable terns in a corner, *IEEE Spectrum*, December 2001
- Coevoet M., Ladie P., Development project on HTS Cables, *JICABLE 2003*, paper A.3.4, 95-98
- Verhaege T., Paasi I., i inni, European superconducting power link project, *JICABLE 1999*, 115-120
- Geschiere A., Willén D., Piga E., Arendregt P., Albaugh K., Installing a long-distance HTS cable, *Jicable 2007*, paper 3.3, s.81-84
- Schmidt F., Maguire J., Bratt S., Welsh T., Lallouet N., Development and demonstration of long length transmission voltage cold dielectric superconducting cable operate in the Long Island Power Authority Grid, *JICABLE 2007*, paper A.3.4, 85-90

**Autor:** dr hab. inż. Aleksandra Rakowska, prof. PP, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: [aleksandra.rakowska@put.poznan.pl](mailto:aleksandra.rakowska@put.poznan.pl)