



Antoni CIEŚLA, Wojciech KRASZEWSKI, Mikołaj SKOWRON

Akademia Górniczo Hutnicza, Katedra Elektrotechniki

Wybrane zagadnienia związane z zastosowaniem nadprzewodników wysokotemperaturowych w elektroenergetyce

Streszczenie. W artykule przedstawiono tendencje rozwojowe urządzeń, których elementy przewodzące prąd elektryczny wytwarzane są z materiałów nadprzewodnikowych pracujących w temperaturze ciekłego azotu (77 K). Wskazano potencjalne możliwości zastosowania takich urządzeń w elektroenergetyce. Wykorzystanie nowoczesnych wysokotemperaturowych materiałów nadprzewodnikowych pozwala na zmniejszenie gabarytów urządzeń oraz zmniejszenie strat związanych z przepływem prądu elektrycznego.

Abstract. (Selected problems of using the high temperature superconductors in electrical power engineering). The developmental tendencies of devices in which conductible electric current elements are produced from superconducting materials working in temperature of liquid nitrogen (77K) are described in this paper. The potential possibilities of use of such devices in electrical power engineering are showed. Using the modern high-temperature superconducting materials allows to decrease the dimensions of devices as well as the decrease the losses connected with the flow of electric current.

Słowa kluczowe: nadprzewodniki wysokotemperaturowe, kable nadprzewodnikowe, transformatory nadprzewodnikowe.

Keywords: high-temperature superconductors, superconducting cables, superconducting transformers.

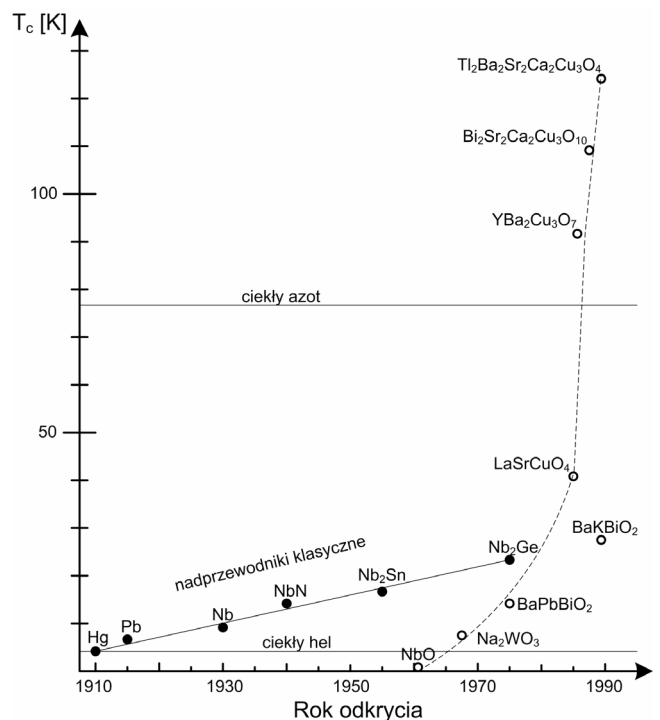
Wprowadzenie

Badania właściwości metali w niskich temperaturach doprowadziły do odkrycia w 1911 roku zjawiska nadprzewodnictwa. Było to konsekwencją postępu w technice niskich temperatur – skroplenia helu (4,2K). Mimo intensywnych badań nadprzewodnictwa pierwsze zastosowania nadprzewodników w elektrotechnice zrealizowano dopiero w latach sześćdziesiątych. Z odkryciem nadprzewodnictwa i wytworzeniem materiałów nadprzewodnikowych wiązano wielkie nadzieje na bezstratny przesył energii, nadprzewodnikowe generatory i transformatory o zmniejszonych wymiarach, pociągi poruszające się na poduszce magnetycznej i wiele innych zastosowań. Rozwiązania techniczne z lat siedemdziesiątych nie zostały jednak zrealizowane w skali przemysłowej i komercyjnej ze względów ekonomicznych, głównie z powodu ceny układów chłodzenia wykorzystujących jako chłodziwo ciekły hel.

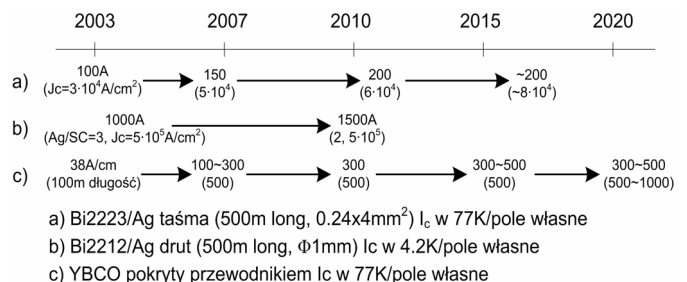
W ostatnim dwudziestoleciu dokonał się istotny postęp zarówno w technologii wytwarzania drutów i taśm nadprzewodnikowych jak i układów chłodzenia. Odkrycie nadprzewodnictwa w ceramikach tlenków miedzi w 1986r. przez K. A. Müllera i G. Bednorza w temperaturach wyższych niż dopuszczała teoria BCS wywołało wzrost zainteresowania nadprzewodnictwem i swoisty wyścig w odkrywaniu materiałów o coraz wyższej temperaturze krytycznej, przekraczającej 100K (rys.1). Odkrycia te umożliwiły użycie stosunkowo taniego ciekłego azotu o temperaturze wrzenia 77K do układów chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych [1]. Rysunek 2 przedstawia aktualne i przewidywane przyszłe możliwości obciążenia nadprzewodników wysokotemperaturowych w aspekcie ich praktycznego wykorzystania w elektroenergetyce [2].

Materiały nadprzewodnikowe wykorzystywane do uzwojeń urządzeń elektroenergetycznych

Temperatura krytyczna to tylko jeden z trzech parametrów krytycznych, natomiast w urządzeniach nadprzewodnikowych, szczególnie silnoprądowych, bardzo istotnymi parametrami są: krytyczna gęstość prądu I_c oraz krytyczna indukcja magnetyczna B_c .



Rys.1. Zmiany temperatury krytycznej od czasu odkrycia zjawiska nadprzewodnictwa



Rys.2. Perspektywy rozwoju aktualnie produkowanych nadprzewodników wysokotemperaturowych (HTS)

Krytyczne gęstości prądów nadprzewodnikowych wysokotemperaturowych (HTS) są o dwa rzędy mniejsze od gęstości krytycznej nadprzewodników niskotemperaturowych (LTS). Jest to podstawowe ograniczenie aplikacji energetycznych z wykorzystaniem nadprzewodników wysokotemperaturowych. Krytyczna gęstość prądu I_c nadprzewodników HTS jest funkcją temperatury i rośnie z jej obniżaniem. Podstawowe parametry techniczne nadprzewodników podano w tabeli 1, a w tabelach 2 i 3 wybrane dane techniczne produkowanych drutów i taśm nadprzewodnikowych ogólnie dostępnych.

Tabela 1. Parametry krytyczne podstawowych nadprzewodników technicznych

Parametr	NbTi	Nb ₃ Su	HTS
Temp. kryt. T_c (K)	10	18	90
Ind. kryt. B_c (T)	13	27	>100
Krytyczna gęstość prądu I_c (A·mm ⁻²)	1 000	5 000	1 000

Tabela 2. Parametry wybranych przewodów LTS

Materiały	Matryca M : Sc	Średnica przewodu [mm] Liczba włókien	Prąd krytyczny [A] w polu o indukcji (T= 4,2K)				
			4 T	5 T	6 T	8 T	12 T
NbTi drut	Cu 2 : 1	0,5 160	150		100		
NbTi drut	Cu 2 : 1	0,5 160	230		170		
Nb ₃ Sn drut	Cu-Sn	0,76 3553		450		230	75
Nb ₃ Sn drut	Cu-Sn	3,2 67500		5000		2250 0	9900
NbTi taśma	Cu/Cu Ni	0,91x 15,2		4900			

Tabela 3. Parametry wybranych przewodów HTS przy T=77K i B=0

Rodzaj przewodnika	Liczba włókien	Krytyczna gęstość prądu w [A·mm ⁻²]	Producent
Drut walcowany Bi-2223	wielowłokowy	440	ASC
Krótki drut tłoczony Bi-2223	wielowłokowy	740	IGC
Taśma tłoczona Ag/Bi-2223	64	220	VACUUM SCHMELTZE
Taśma walcowa na Ag/Bi-2223	64	280	VACUUM SCHMELTZE
Taśma BSCCO-2223	wielowłokowy	240	NST

W tabelach nie podano właściwości mechanicznych takich jak odporność na zginanie, stabilność cieplna, długość wytwarzanych odcinków. Są to bardzo istotne informacje podawane przez wytwórców w formie opisowej, dodatkowych tablic i wykresów, umożliwiające poprawne projektowanie konstrukcji i technologii wytwarzania konkretnych urządzeń nadprzewodnikowych [1].

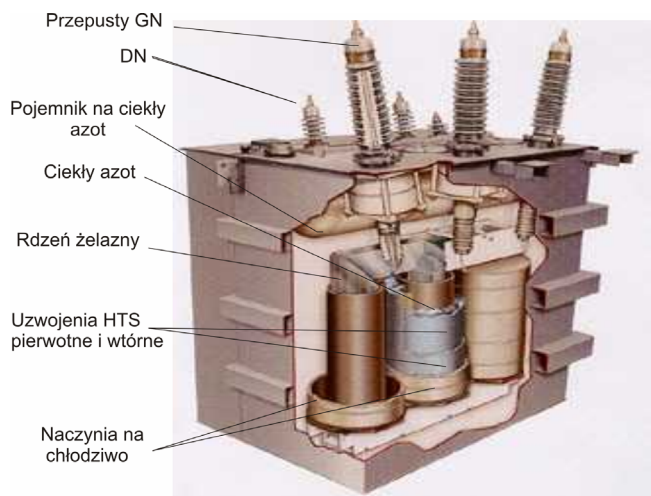
Wybrane zastosowania nadprzewodników

Istnieje szereg potencjalnych możliwości aplikacji opisanych w punkcie 2 materiałów nadprzewodnikowych. Pokróćce zostaną scharakteryzowane niektóre z nich.

Transformatory nadprzewodnikowe

W modelach transformatorów z uzwojeniami wykonywanymi z nadprzewodników niskotemperaturowych (LTS) stosowano konstrukcje bezrdzeniowe, bowiem wysokie gęstości prądów krytycznych tych przewodników umożliwiały pracę przy wysokich indukcjach, powyżej indukcji nasycenia rdzenia ferromagnetycznego. Konstrukcja kriostatu, skomplikowana dla temperatury ciekłego helu (4,2K), może być w takim przypadku prostsza, ponieważ nie wymaga wydzielenia z kriostatu rdzenia i jego termicznej izolacji.

W obecnie budowanych transformatorach, stosuje się w zasadzie nadprzewodniki wysokotemperaturowe, dla których krytyczna gęstość prądu jest tylko około 5 razy wyższa od gęstości prądu w uzwojeniach miedzianych. Stosuje się tu konstrukcje rdzeniowe jednofazowe lub trójfazowe. Przy chłodzeniu ciekłym azotem tylko uzwojenia umieszczone są w kriostacie, w kąpeli azotowej natomiast rdzeń pracuje w temperaturze otoczenia (rys. 3) [1].



Rys.3. Transformatory o uzwojeniach z nadprzewodnikowych drutów nawojowych

Dla ciekłego azotu kriostaty uzwojeń mają podwójne ścianki, pomiędzy którymi jest warstwowa izolacja cieplna. W latach 90-tych XX w. zbudowano wiele modeli i prototypów transformatorów nadprzewodnikowych. Najwięcej informacji opublikowano o transformatorach zbudowanych w Szwajcarii, Stanach Zjednoczonych, Japonii [1], [5].

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu

Zwarcia awaryjne w sieciach elektroenergetycznych stanowią duże zagrożenie dla transformatorów, generatorów, szyn zbiorczych i linii przesyłowych oraz zmniejszają pewność dostarczania energii odbiorcom. Ograniczanie skutków zwarć znacznie wpływa na wzrost kosztów budowy i eksploatacji elementów systemu energetycznego, a więc i cenę energii elektrycznej.

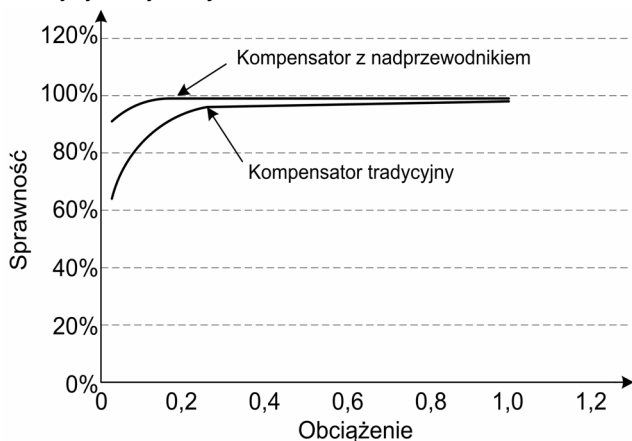
Idea budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądowych powstała ponad 25 lat temu, jednak warunki do jej realizacji powstały przed kilku laty, kiedy to wytworzono wysokotemperaturowe elementy nadprzewodnikowe oraz kontaktowe układy chłodzenia (crycoolery). W kilku laboratoriach na świecie prowadzone są intensywne badania i powstają pierwsze oferty dostawy takich urządzeń.

Istnieją dwa zasadnicze rodzaje rozwiązań nadprzewodnikowych ograniczników prądu: rezystancyjne i indukcyjne. Ograniczniki rezystancyjne są proste w swej konstrukcji, jednak wymagają doprowadzenia prądu roboczego do elementu nadprzewodnikowego za pomocą przepustów prądowych. W ogranicznikach indukcyjnych elementem nadprzewodnikowym jest pierścień stanowiący

zwarte uzwojenie wtórne transformatora o konwencjonalnym uzwojeniu pierwotnym na prąd znamionowy sieci. W uzwojeniu generują się pewne straty mocy, ale układ taki nie wymaga przepustów prądowych i koszty chłodzenia są niewielkie [1], [5].

Synchroniczne kompensatory mocy biernej

Kompensator synchroniczny jest dynamicznym kompensatorem mocy biernej zbudowanym jako wirująca maszyna, pracująca synchronicznie z siecią, o architekturze podobnej do synchronicznego silnika lub generatora. Jej wzbudzenie jest sterowane przez regulator napięcia w celu dostarczenia lub odbierania mocy biernej z sieci. Może reagować dostatecznie szybko, aby zabezpieczyć przed chwilowymi przepięciami lub obniżeniami napięcia, które mogą być wywołane przez chwilowa odciążenia, przemijające zwarcia wywołane przez gałęzie drzew, zwierzęta itd. Przez zastosowanie wysokotemperaturowych, nadprzewodnikowych drutów nawojowych, maszyna staje się urządzeniem sprawniejszym (rys. 4). Ponadto cechują ją: mniejsze straty stałe, większa moc wyjściowa, mniejsze koszty i większa niezawodność niż konwencjonalnych urządzeń. Straty w uzwojeniach stanowią tylko połowę strat maszyny klasycznej.



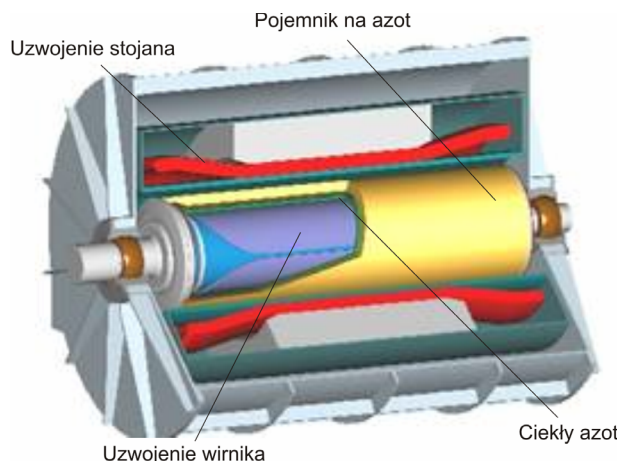
Rys.4. Porównanie sprawności maszyny nadprzewodzącej z tradycyjną maszyną przy różnych obciążeniach

Maszyna nie doświadcza naprężeń cieplnych w uzwojeniach przy zmianach obciążeń od zera do maksymalnego, co pozwala zarówno na jej „impulsową” pracę, jak i pracę ciągłą – bez zmniejszenia czasu żywotności maszyny. Kolejną zaletą jest to, że maszyny nie wprowadzają wyższych harmonicznych do sieci, zachowując jednocześnie wysoką sprawność (straty w uzwojeniach są o około 20 proc. mniejsze niż w tradycyjnych maszynach). W tradycyjnej maszynie prąd uzwojenia może osiągnąć 3-krotną wartość nominalną, co znacznie zmienia temperaturę przewodnika. W rezultacie zwoje przesuwają się, powodując mechaniczne zmęczenie izolacji. Jest to główną przyczyną awarii w tradycyjnych maszynach.

Kompensatory o uzwojeniach z nadprzewodnikowych drutów nawojowych powinny umożliwić pracę linii przesyłowych z większym obciążeniem, zredukować potrzeby instalacji nowych mocy wytwórczych i dodatkowych linii przesyłowych w rejonach o rosnącym zapotrzebowaniu na energię elektryczną [5]. Można zastąpić stare, nieekologiczne generatory, które muszą pracować ze względu na bezpieczeństwo systemu i regulacje napięcia.

Pierwszy kompensator z nadprzewodnikowym uzwojeniem wirnika „SuperVAR” zainstalowano w grudniu 2003r w Gallatin w stanie Tennessee. Kompensator ten ma

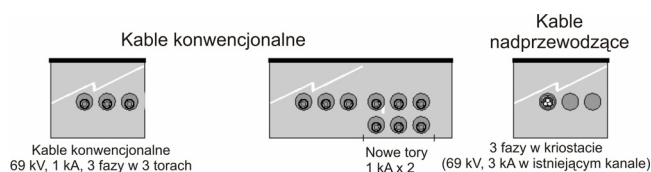
pomagać w stabilizacji napięcia w sieci, przez dostarczanie mocy biernej w celu kompensacji nagłych dużych zmian mocy biernej pobieranej przez walcownie podczas pracy pieca łukowego (rys. 5) [3].



Rys.5. Kompensator „SuperVAR” z nadprzewodnikowym uzwojeniem wirnika i tradycyjnym statorem

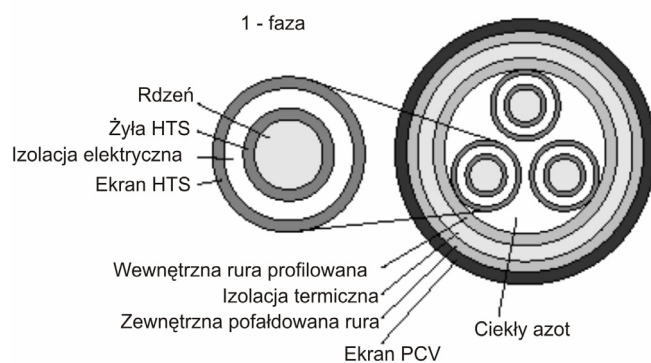
Kable elektroenergetyczne

Wydaje się, że kable, w których zastosowanie znajdują materiały nadprzewodnikowe mogą stanowić jedno z najważniejszych potencjalnych rozwiązań problemu przesyłu wielkich mocy przy pomocy klasycznych kabli elektroenergetycznych pracujących w aglomeracjach wielkomiejskich. Podstawową cechą takich rozwiązań jest ich zwartość budowy, oraz możliwość ułożenia kabli w istniejących już podziemnych kanałach (rys. 6).



Rys.6. Kompaktowość kabli z żyłami wykonaną z nadprzewodnika

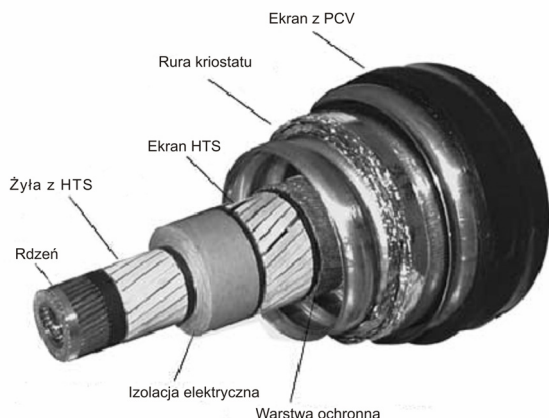
Konstrukcję kabla z żyłami wykonanymi z nadprzewodnika przedstawia rysunek 7 [6]. Żyła kabla wykonana jest z nadprzewodnika, który ułożony jest na rdzeniu (matrycy). Jako izolacji elektrycznej używa się propylenowego papieru wielowarstwowego (PPLP), ponieważ w temperaturze azotowej charakteryzuje się on bardzo dobrymi właściwościami izolacyjnymi i niskim współczynnikiem strat dielektrycznych.



Rys.7. Konstrukcja kabla trójrdzeniowego o żyłach z nadprzewodzącego

Na zewnątrz warstwy izolacyjnej są druty z nadprzewodnika również ukształtowane w spirale, tworzące ekran ochronny. Ekran każdej z faz są zwarte na obu końcach kabla, co kompensuje prądy w nich wydukuwane oraz zmniejsza przenikanie pola elektromagnetycznego na zewnątrz kabla. Trzy fazy linii kablowej są ułożone razem i umieszczone w podwójnych pofalowanych kanalikach. Izolacja termiczna jest między wewnętrzną a zewnętrzną warstwą kanalików, gdzie jest utrzymywany stan próżni w celu poprawienia właściwości termicznych całego układu [8].

Inne rozwiązanie konstrukcyjne kabla nadprzewodnikowego pokazano na rysunku 8 [7].



Rys.8. Struktura kabla jednorodzeniowego o żyłach z materiału nadprzewodzącego

Efektywna gęstość prądu, którym można obciążyć żyłę kabla nadprzewodnikowego wynosi ok. 100 A/mm^2 . Jest to blisko 100 razy więcej niż dla kabli konwencjonalnych z żyłą miedzianą. Zastosowanie w procesie technologicznym produkcji nadprzewodników spiekania przy podwyższonym ciśnieniu umożliwiło wytwarzanie przewodów o znacznej długości i bardzo dobrych parametrach, w tym także mechanicznych (np. prąd krytyczny taśmy z nadprzewodnika o wymiarach $4\text{mm} \times 0,2\text{mm}$ przewyższa 130 A, a dodatkowo ma dużą wytrzymałość naciągu 140 MPa).

Jedną z cech charakteryzujących kable z materiału nadprzewodzącego jest zerowy opór poniżej temperatury krytycznej, tak więc współczynnik tłumienia transmisji jest bardzo mały.

Kable elektroenergetyczne posiadają ekran z nadprzewodnika skutecznie izolujący pole elektromagnetyczne, eliminuje on też prądy wirowe wywołane tym polem.

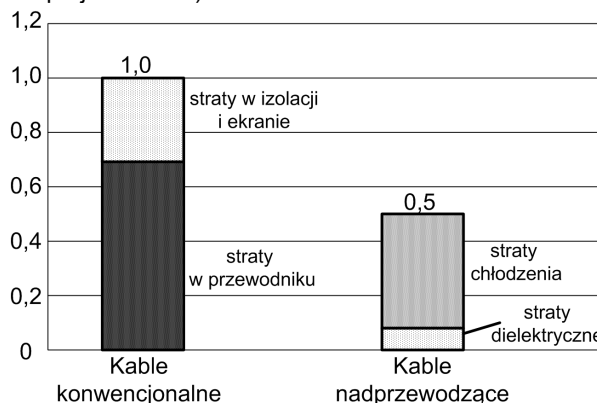
Na rysunku 9 dokonano porównania strat energii w kablach konwencjonalnych i kablach o żyłach z materiału nadprzewodzącego [4].

Istnieją już praktyczne rozwiązania zastosowania kabli elektroenergetycznych, które pracują i wkrótce zasilą odbiorców. Stanowią też przedmiot dalszych badań. Istnieją również projekty kabli, które w niedalekiej przyszłości rozpoczną pracę.

Poniżej przedstawiono lokalizacje i specyfikacje niektórych kabli [5]:

- Carrollton, Georgia: kabel o długości 30 m, prąd pracy 1250 A, napięcie pracy 12,4 kV, pierwszy kabel demonstracyjny, który pracował >26 000 h;
- Kopenhaga: kabel o długości 30 m, prąd pracy 2000 A, napięcie pracy 30 kV, pierwszy kabel, który służy do zasilania 50 000 klientów;
- Tokio: kabel o długości 100 m, prąd pracy 1000 A, napięcie pracy 66 kV, pierwszy kabel o trzech rdzeniach w jednym kriostacie;

- Long Island, New York: kabel o długości 600 m, prąd pracy 2400 A, napięcie pracy 138 kV (w fazie projektowania).



Rys.9. Porównanie strat między kablami konwencjonalnymi a kablami o żyłach z materiału nadprzewodzącego

Wnioski

Postęp w technologiach wytwarzania drutów i taśm z nadprzewodników wysokotemperaturowych (HTS) oraz w produkcji chłodziarek kontaktowych (*cryocoolers*) stworzył warunki do budowy urządzeń elektrycznych dla elektroenergetyki takich jak: transformatory, ograniczniki prądu (SFCL), kompensatory mocy biernej, zasobniki energii (SMES), kable elektroenergetyczne.

Obecnie najbardziej perspektywiczne wydaje się zastosowanie nadprzewodników HTS w kablach elektroenergetycznych. Właściwości, które o tym decydują to:

- możliwość przesyłania bardzo dużych mocy przy małych gabarytach kabli,
- mały współczynnik tłumienia transmisji,
- brak zakłóceń zewnętrznych powodowanych przez pole magnetyczne,
- mała impedancja.

LITERATURA

- [1] Janowski T., Postęp w zastosowaniach nadprzewodników, *XXIV-IC-SPE TO - 2004*, (2001), 47-50
- [2] Tsukamoto O., Ways for power applications of high temperature superconductors to go into the real world, *Superconductor Science and Technology*, 17 (2004), nr.17, S185-S190
- [3] American Superconductor Corporation, Raport Nadprzewodnikowe wsparcie dla sieci energetycznych, *Elektroenergetyka*, 2 (2004), 33-36
- [4] Tsukamoto O., Roads for HTS power applications to go into the real world Cost issues and technical issues, *Cryogenics*, 45 (2005), 3-10
- [5] Ekin J. W., Superconductors an emerging power technology, <http://www.boulder.nist.gov>, (2004)
- [6] Masuda T., Yumura H. i inni, High-temperature Superconducting Cable Technology and Development Trends, *Sei Technical Review*, 59 (2005), 8-13
- [7] Mukoyama S., LMaruyama S. i inni, Development of 500m HTS power cable in super-ACE project, *Cryogenics*, 45 (2005), 11-15
- [8] Demko J. A., Lue J. W. i inni, Practical AC Loss and Thermal Considerations for HTS Power Transmission Cable Systems, *Applied Superconductivity Conference 2000*, (2000)

Autorzy: dr hab. inż. Antoni Cieśla prof. n. AGH, Katedra Elektrotechniki, al. Mickiewicza 30, 30 – 059 Kraków, E-mail: aciesla@agh.edu.pl; mgr inż. Wojciech Kraszewski, AGH, Katedra Elektrotechniki, al. Mickiewicza 30, 30 – 059 Kraków, E-mail: wkraszew@agh.edu.pl; mgr inż. Mikołaj Skowron, AGH, Katedra Elektrotechniki, al. Mickiewicza 30, 30 – 059 Kraków, E-mail: miskowron@agh.edu.pl