

Szanse i problemy wykorzystania nadprzewodników wysokotemperaturowych do przesyłu energii elektrycznej

Abstrakt. W pracy przedstawiono uwarunkowania wykorzystania nadprzewodników wysokotemperaturowych do przesyłu energii elektrycznej. Omówione zostały zalety wykorzystania tych materiałów w kablokach i istniejące już konstrukcje kablokablów nadprzewodnikowych. Rozpatrzono elektromagnetyczne zjawiska determinujące przepływ prądu transportu przez wysokotemperaturowe materiały nadprzewodnikowe przy uwzględnieniu ich warstwowej struktury. Zanalizowano występujące wówczas straty mocy. Przedstawiono wyniki badań doświadczalnych charakterystyk prądowo-napięciowych nadprzewodników wysokotemperaturowych.

Słowa kluczowe: nadprzewodniki wysokotemperaturowe, przepływ prądu, zakotwiczenie strumienia, straty mocy

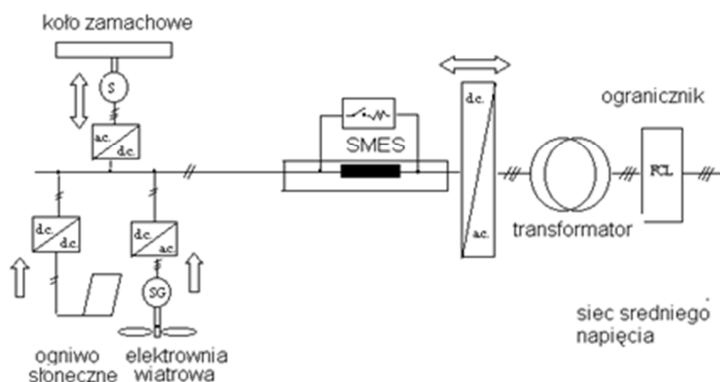
Wstęp

Nadprzewodniki wysokotemperaturowe odkryte już ponad ćwierć wieku temu wchodzą obecnie w obszar zastosowań przemysłowych. Jest tutaj więc nowa szansa dla elektrotechników wykorzystania tych materiałów, z których produkuje się już w sposób półkomercyjny taśmy nadprzewodnikowe o możliwościach przepustowości prądu przekraczających 200 A w temperaturze azotowej. Z tego też względu taśmy te nazywa się nawet „amperium wires” dla podkreślenia ich ogromnej przepustowości prądowej. Opracowanie przemysłowej technologii otrzymywania wysokotemperaturowych taśm nadprzewodnikowych powoduje znaczny wzrost komercyjnego rynku zastosowania materiałów nadprzewodnikowych, który już poprzednio przekraczał miliard euro rocznie. O gwałtownym rozwoju w ostatnich latach przemysłu nadprzewodnikowego świadczyć może fakt, że o ile w 1997 r. światowy rynek urządzeń nadprzewodnikowych sięgał 1,81 mld euro, to w 2010 r. wynosił on już 5,25 mld Euro, a w perspektywie roku 2020 osiągnie już zawrotną wysokość 45 mld Euro. W roku 1997 1,805 mld Euro było związanych z aplikacjami nadprzewodników niskotemperaturowych, a jedynie 5 mln Euro z urządzeniami wykorzystującymi nadprzewodniki wysokotemperaturowe, natomiast obecnie te proporcje są w skali 3,650 mld Euro do 1,600 mld Euro, a w roku 2020 przewiduje się już prawie zrównanie tych proporcji. Budżet 25 mld Euro dotyczyć będzie wówczas urządzeń z nadprzewodnikami klasycznymi, natomiast 20 mld Euro urządzeń z nadprzewodnikami wysokotemperaturowymi jak pokazują to prognozy międzynarodowej organizacji CONECTUS, zrzeszającej przedstawicieli organizacji będących liderami w aplikacjach nadprzewodnictwa.. Największym obecnym odbiorcą urządzeń nadprzewodnikowych są badania, szczególnie jądrowe, w których konstruuje się akceleratory cząstek elementarnych, z wykorzystaniem elektromagnesów nadprzewodnikowych, np. CERN, Dubna i ITER. Przemysłowym wręcz zastosowaniem energetycznym elektromagnesów nadprzewodnikowych jest wykorzystanie ich w magnetycznym rezonansie jądrowym (NMR) w szpitalnictwie do diagnostyki w tomografii komputerowej i do przetwarzania obrazów. Równie ważnym obszarem zastosowań

energetycznym nadprzewodników wysokotemperaturowych, któremu poświęcony jest niniejszy artykuł jest wykorzystanie materiałów nadprzewodnikowych przy przesyłaniu energii elektrycznej. Prawidłowe działanie urządzeń nadprzewodnikowych, w tym kriokabli wymaga znajomości zachodzących w tych materiałach zjawisk elektromagnetycznych - fizycznych, gdyż ze względu na delikatną ich warstwową strukturę, jak też czułość na zmiany temperatury i pola magnetyczne są one mało odporne na zakłócenia zewnętrzne. Zakłócenia te mogą prowadzić do uszkodzenia nadprzewodników wysokotemperaturowych i następnie całych kosztownych urządzeń w procesie niekontrolowanego przejścia do stanu normalnego, tzw. quenchu [1.2].

Kriokable nadprzewodnikowe

Kriokable nadprzewodnikowe budowane były jeszcze przed odkryciem nadprzewodników wysokotemperaturowych. Użycie konwencjonalnych nadprzewodników jak niob-tytan i Nb_3Sn wymagało stosowania chłodzenia ciekłym helum, którego obecny koszt jest rzędu 100 zł za litr. Powodowało to nieekonomiczność tych rozwiązań, pomimo znacznej redukcji strat mocy. Wykorzystanie nadprzewodników wysokotemperaturowych, o temperaturze krytycznej przekraczającej 77 K, czyli temperaturę wrzenia ciekłego azotu prowadzi już do konkurencyjności takich rozwiązań, względem klasycznych miedzianych szyno-przewodów. Nie bez znaczenia są tutaj też względy gabarytowe i zużycia materiałów, gdyż przewody nadprzewodnikowe umożliwiają dziesięciokrotnie większy przesył prądu niż w przewodach miedzianych o tych samych kształtach. Obecnie skonstruowanych jest cały szereg kriokabli nadprzewodnikowych, będących jeszcze w fazie badań i zastosowań prototypowych. Wymienić należy pierwszy zbudowany w Europie w 2001 r. trójfazowy, 30 m kabel o mocy 104 MVA i prądzie 2 kA, który po kilku latach pracy w Kopenhadze, Dania został zdemontowany i przechodzi obecnie fazę badań post-eksploatacyjnych. W obecnych rozwiązaniach takich jak kriokabel na Long Island w USA, kriokabel budowany przez KEPCO w Korei Południowej lub przez Sumitomo w Japonii, wartości prądu rzędu 2-3 kA są zachowane, jednak długości kriokabli sięgają już ponad 500 m. Największy postęp w dziedzinie kriokabli nadprzewodnikowych obserwuje się w Korei Południowej, gdzie w 2007 r. zainstalowano 100 m kabel w miejscowości Gochang, a obecnie buduje się 500 m kabel w Seulu przez konsorcjum koreańskie KEPCO i amerykańskie AMSC – American Superconductor Corporation.



Rys 1. Schemat wykorzystania kriokabli nadprzewodnikowych w energetyce rozproszonej

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

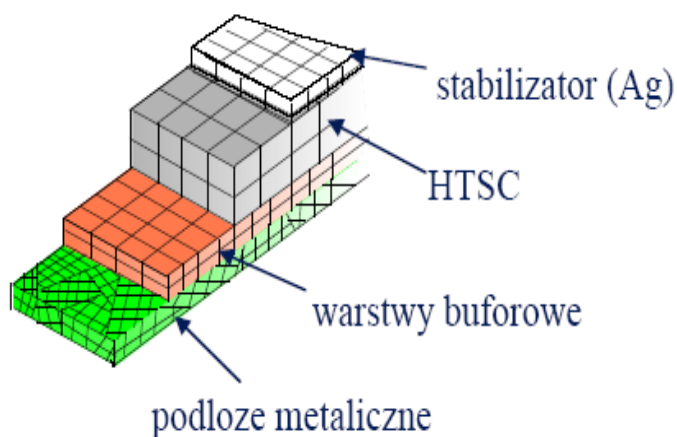
Z kolei w USA AMSC zainstalowała na Long Island 660 m krikabel wysokonapięciowy 138 kV i o prądzie 2,4 kA. Wysokotemperaturowe krikable nadprzewodnikowe budowane są także w Rosji głównie we wszechrosyjskim instytucie przemysłu kablowego w Podolsku VNIKP, gdzie zbudowano 200 m kabel wysokonapięciowy o mocy 104 kVA.

Na rys. 1 pokazane jest wykorzystanie krikabla przy przesyłaniu prądu elektrycznego z odnawialnych źródeł energii w rejonach nadmorskich, jakimi są elektrownie słoneczne oraz farmy wiatrowe. Ponieważ elektrownie wiatrowe i słoneczne nie gwarantują ciągłego zaopatrzenia w energię elektryczną, więc konieczne jest zastosowanie w tym układzie magazynów energii. Pokazane są na rys. 1 magazyny energii typu FES (Flywheel Energy Storage) – wirujące koła zamachowe przekształcające energię elektryczną w mechaniczną wirującego koła zamachowego oraz skonstruowane z pomocą elektromagnesów nadprzewodnikowych magazyny typu SMES. – czyli Superconducting Magnet Energy Storage. Zasobnik energii typu SMES zasilany jest prądem stałym, stąd też celowe jest dostarczenie do niego energii właśnie wysokotemperaturowym kablem nadprzewodnikowym. Zaletami wykorzystania w tych rozwiązaniach krikabla są przede wszystkim znacznie mniejsze straty mocy przy przesyłaniu energii niż w przypadku szynoprzewodów oraz względy materiałowe i gabarytowe, które wskazują na wielokrotne, rzędu dziewięciu zmniejszenie zajmowanej przez krikabel przestrzeni w porównaniu z konwencjonalnymi szynoprzewodami i odpowiednie oszczędności w zużyciu materiałów. Do wykonania tych urządzeń wykorzystać można samoograniczające taśmy nadprzewodnikowe 2G, a więc częściowo zabezpieczające uzwojenie nadprzewodnikowe przed uszkodzeniem w procesie zwarcia, które są scharakteryzowane olbrzymimi możliwościami prądowymi, już obecnie przekraczającymi psychologiczną barierę 200 A. Pokazane jest także na rys. 1, który przedstawia schematycznie koncepcję wykorzystania wysokotemperaturowego kabla nadprzewodnikowego, w ramach projektu złożonego do programu ramowego UE, dodatkowe wyposażenie elektroniczne.

Elektromagnetyczne zagadnienia transportu prądu przez nadprzewodniki wysokotemperaturowe

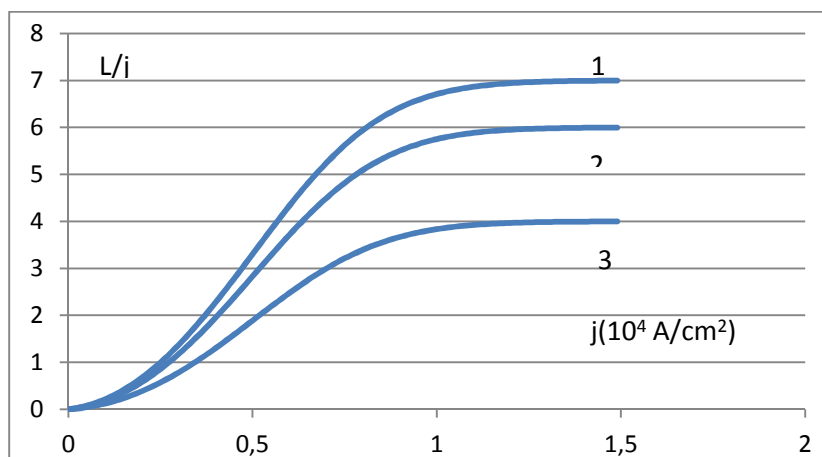
Konstrukcja wysokotemperaturowych krikabli nadprzewodnikowych oparta jest na taśmach nadprzewodnikowych, które w miarę postępu technologicznego zakwalifikowane zostały do dwóch generacji. O ile pierwsza generacja oparta była na taśmach wykonanych z wielowłóknowych nadprzewodników z ceramicznego materiału BiSrCaCuO, to druga generacja dotyczy taśm o wielowarstwowej strukturze, w której sam nadprzewodnik typu YBaCuO tworzy mikronową warstwę rosnącą epitaksjalnie na podłożu, często magnetycznym będącym stopem niklu. Struktura takiej taśmy nadprzewodnikowej drugiej generacji pokazana jest na rys. 2. Taśma ta składa się z podłoża z hastelloy lub stopu niklowo-wolframowego, na której położone są epitaksjalnie warstwy buforowe i finalnie warstwa nadprzewodnika wysokotemperaturowego. Stabilizację termiczną takiej taśmy nadprzewodnikowej zapewnia nałożona na zewnątrz warstwa srebra lub miedzi równomiernie rozprowadzająca ciepło i wyrównująca temperaturę taśmy w przypadku niekontrolowanego przejścia do stanu normalnego -

quenchu. Delikatna struktura tej taśmy mogłaby w przeciwnym przypadku ulec uszkodzeniu. Z kolei występowanie niklowego podłoża prowadzi do zwiększenia magnetycznych oddziaływań, w tym wartości indukcji magnetycznej w obszarze warstwy nadprzewodzącej i zwiększenia strat mocy związanych z histerezą magnetyczną.



Rys. 2. Struktura wysokotemperaturowej taśmy nadprzewodnikowej drugiej generacji 2G

O ile opisać charakterystykę magnetyczną niklu funkcją tangensa hiperbolicznego $B = \alpha \operatorname{th}(0,6 H)$, to możemy wyliczyć wartości strat mocy w danej taśmie nadprzewodnikowej tworzącej uzwojenie nadprzewodnikowe, co pokazuje rys. 3 w funkcji przemiennego prądu płynącego przez taśmę nadprzewodnikową i oddziaływań z innymi taśmami.



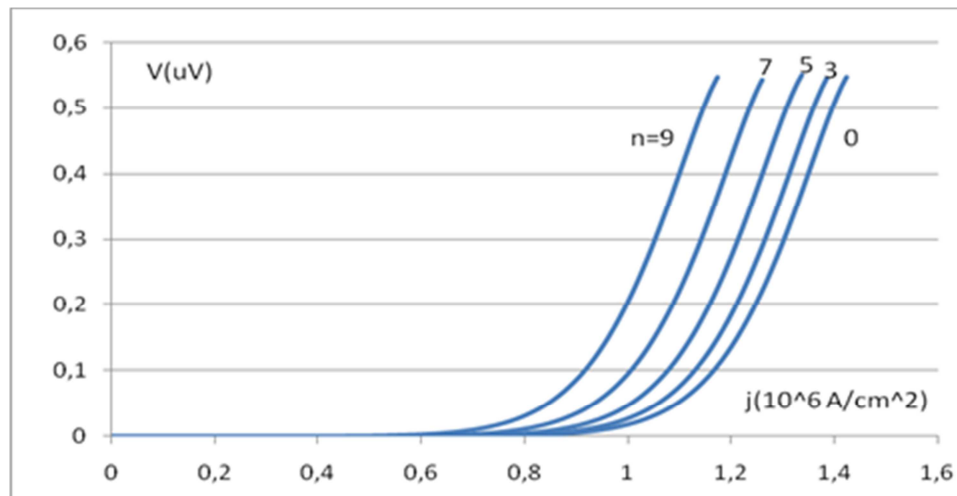
Rys. 3. Zależność zredukowanych strat mocy w kompozytowym przewodzie 2G od parametrów charakterystyki magnetycznej podłoża opisanych funkcją $B = \alpha \operatorname{th}(0,6 H)$.
1- $\alpha = 0,7$, 2- $0,6$, 3 - $0,4$, w funkcji przemiennego prądu transportu

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

Subtelna struktura nadprzewodników wysokotemperaturowych stanowiących podstawę działania urządzeń nadprzewodnikowych powoduje, że prawidłowa praca tych urządzeń uwarunkowana jest zjawiskami elektro-magnetycznymi, z których podstawowym jest zakotwiczenie wirów na niedoskonałościach struktury. Zakotwiczenie prowadzi do powstania bariery potencjału ΔU :

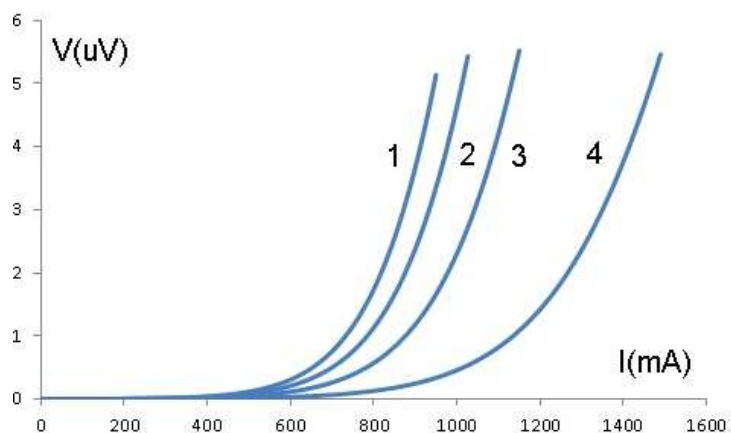
$$(1) \quad \Delta U = \frac{\mu_0 H_c^2 l \xi^2}{2} \left[-\arcsin\left(\frac{j}{j_c}\right) - \frac{j}{j_c} \sqrt{1 - \left(\frac{j}{j_c}\right)^2} + \frac{\pi}{2} \right]$$

Równanie (1) opisuje zależność bariery potencjału ΔU oddziaływania zakotwiczonego od zredukowanej gęstości prądu transportu j/j_c , gdzie j_c jest gęstością prądu krytycznego, dla centrum o rozmiarach większych od podwójnej długości koherencji nadprzewodnika ξ . H_c jest termodynamicznym polem krytycznym, l grubością warstwy nadprzewodzącej w strukturze nadprzewodnika wysokotemperaturowego. Zależność 1 wyznacza między innymi charakterystyki prądowo-napięciowe nadprzewodników wysokotemperaturowych i ich zależność od parametrów materiałowych. Na rys. 4 pokazany jest wpływ oddziaływań międzywarstwowych na charakterystyki prądowo-napięciowe. Indukowane prądy ekranujące w poszczególnych warstwach prowadzą do zmniejszenia dopuszczalnego prądu transportu w badanej warstwie, co jest właśnie widoczne na krzywych z rys. 4.

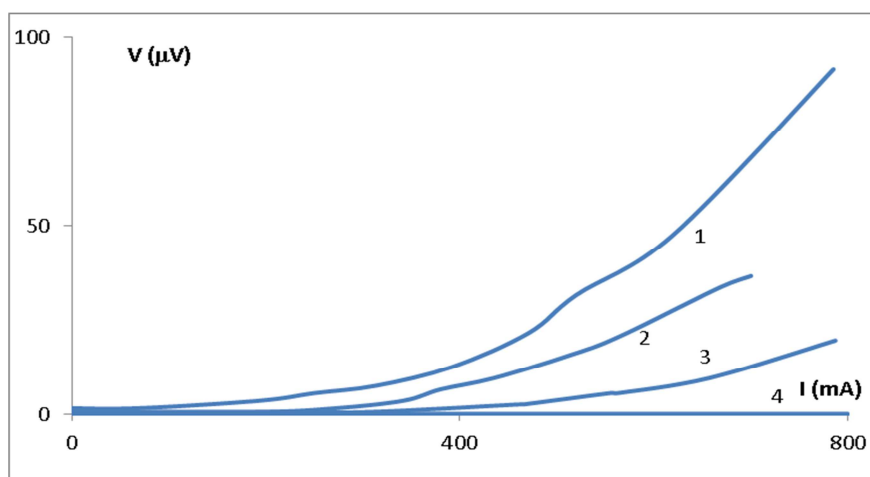


Rys. 4. Teoretycznie obliczony wpływ na charakterystyki prądowo-napięciowe oddziaływania międzywarstwowego w wielowarstwowym nadprzewodniku wysokotemperaturowym. Parametr n oznacza liczbę oddziałujących warstw nadprzewodzących.

Na bazie równania (1) charakterystyki prądowo-napięciowe zostały policzone także w funkcji pola magnetycznego, a wyniki obliczeń przedstawione są na rys. 5 i dobrze korespondują z doświadczalnymi zależnościami pokazanymi na rysunku 6 dla ceramicznego nadprzewodnika wysokotemperaturowego o składzie $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$.



Rys. 5. Obliczone charakterystyki prądowo-napięciowe dla nadprzewodnika wysokotemperaturowego w polu magnetycznym: (1) $B=35$ mT, (2) 33 mT, (3) 30 mT, (4) 24 mT



Rys. 6. Doświadczalne krzywe charakterystyk prądowo-napięciowych dla nadprzewodnika wysokotemperaturowego $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ w temperaturze ciekłego azotu i stałym polu magnetycznym: (1) $B= 21,5$ mT, (2) 16,3 mT, (3) 8,5 mT, (4) 0 mT.

Literatura

1. Sosnowski J. Kriokable nadprzewodnikowe, Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, str. 1-100, 2012.
2. Sosnowski J. Materiały nadprzewodnikowe: modelowanie własności i zastosowania Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, str. 1-209, 2008.

Autor: prof. dr hab. Jacek Sosnowski, Zakład Wielkich Mocy, Instytut Elektrotechniki, 04-703 Warszawa, ul. Pożaryskiego 28, e-mail: sosnowski.jacek@wp.pl