

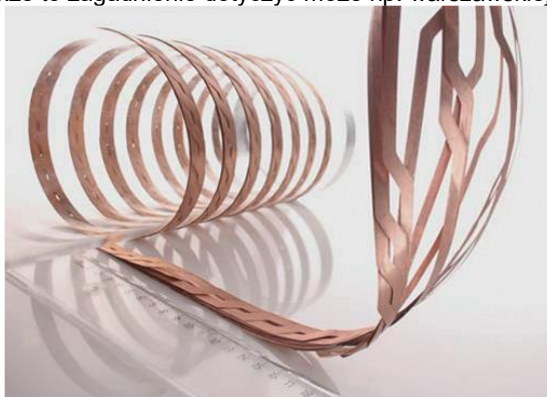
Nadprzewodnikowe kriokable – bliskie rozwiązanie problemów transportu energii?

Streszczenie: W pracy przeprowadzono analizę wykorzystania wysokotemperaturowych kriokabli nadprzewodnikowych przy przesyłce energii elektrycznej i przedstawiono związane zagadnienia elektromagnetyczne. Zaprezentowano konstrukcję i wyniki badań krótkiego modelu kriokabla o zmierzonym prądzie krytycznym 50 A. Przedyskutowano zagadnienie transportu prądu w warstwowych nadprzewodnikach wysokotemperaturowych. Obliczono wysokość bariery potencjału dla sił zakotwiczenia i na tej podstawie zostały wyznaczone teoretycznie charakterystyki prądowo-napięciowe (I-V). Wyznaczono parametry materiałowe z procedury dopasowania modelu teoretycznego do pomiarów I-V przeprowadzonych na nadprzewodniku BiPbSrCaCuO w funkcji przyłożonego pola magnetycznego.

Słowa kluczowe: kriokable, przesył energii, nadprzewodniki wysokotemperaturowe

Wstęp

Wzrost zużycia energii elektrycznej i obecny kryzys energetyczny stwarzają zapotrzebowanie na poprawę ekonomiczną jej przesyłu. Bardzo perspektywicznym rozwiązaniem jest użycie wysokotemperaturowych kriokabli nadprzewodnikowych [1]. Umożliwiają one przesył prądu stałego niemal bez strat mocy oraz zmiennego prądu przy obniżonych stratach. Dodatkowo uzyskuje się wówczas obniżenie strat mocy stosując transpozycję żył nadprzewodnikowych. Ze względu na delikatną strukturę wysokotemperaturowych taśm nadprzewodnikowych technika ta jest trudna do bezpośredniego zastosowania. W tym celu stosuje się natomiast tzw. kable Roebela [2], pokazane na rys 1, dla których efekt transpozycji jest uzyskiwany przez mechaniczne wycinanie taśm i splatanie do postaci kabla. Drugą istotną zaletą zastosowania wysokotemperaturowych kriokabli nadprzewodnikowych jest redukcja rozmiarów rzędu nawet dziewięciu w stosunku do szynoprzewodów miedzianych o analogicznej mocy przesyłowej, co ma szczególne znaczenie w takich aglomeracjach miejskich jak Nowy Jork, Tokio, ale także to zagadnienie dotyczyć może np. warszawskiej Starówki.



Rys. 1. Widok transponowanego kabla nadprzewodnikowego typu Roebela [2].

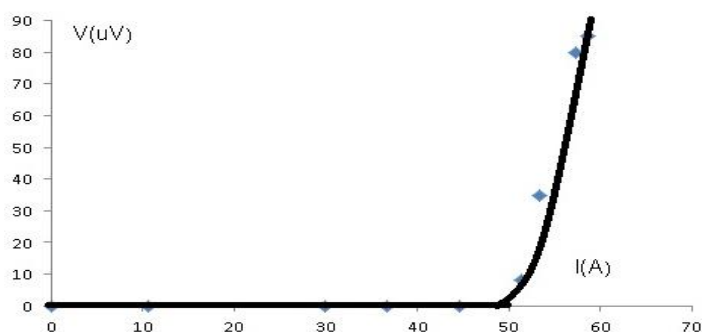
O rozwoju problematyki kablok nadprzewodnikowych świadczą ostatnie konstrukcje kablok głównie w USA, Korei, Niemczech, Rosji. W Stanach Zjednoczonych w 2011 r. skonstruowany został 600 m wysokotemperaturowy, jednofazowy kabl nadprzewodnikowy pracujący pod napięciem 138 kV, transportujący prąd 2.4 kA.



Rys. 2. Widok skonstruowanego modelu trójfazowego kablok wysokotemperaturowego z wysokonapięciowymi doprowadzeniami prądowymi.

Kabl ten wykonany został z taśm nadprzewodnikowych drugiej generacji typu YBaCuO i używany jest w podstacji LIPA (Long Island Power Authority) w Nowym Jorku. Taśmy drugiej generacji są obecnie najbardziej perspektywicznymi przewodami nadprzewodnikowymi, gdyż umożliwiają przesył ponad 200 A prądu przez jedną taśmę o szerokości kilku milimetrów, w temperaturze azotowej. Nie bez znaczenia są także samoograniczające właściwości takiej taśmy w warunkach niekontrolowanego przejścia do stanu rezystywnego, tzw. quenchu, co wynika z dużej rezystancji stanu normalnego. Kolejnym rozszerzeniem tego projektu było uruchomienie w Nowym Jorku, w 2013 r. 240 metrowego trójfazowego kablok nadprzewodnikowego transportującego prąd 4 kA, przy napięciu 13.8 kV. Rekordzistami są Niemcy, którzy w Essen zainstalowali kilometrowy, trójfazowy kabl nadprzewodnikowy o prądzie 2,4 kA i napięciu 10 kV. Kabl ten wykonany został z wykorzystaniem przewodów nadprzewodnikowych z BiSrCaCuO, drugiego materiału stosowanego do wytwarzania przewodów nadprzewodnikowych techniką bardziej tradycyjną typu PIT – Powder in Tube. Należy wspomnieć także Japończyków, którzy w 2012 r. oddali do eksploatacji w Jokohamie trójfazowy, 200 metrowy kabl z BiSrCaCuO o mocy 200 MVA i napięciu 66 kV. Kabl o zbliżonych parametrach skonstruowany został także we Wszechrosyjskim Instytucie Przemysłu Kablowego w Podolsku pod Moskwą.

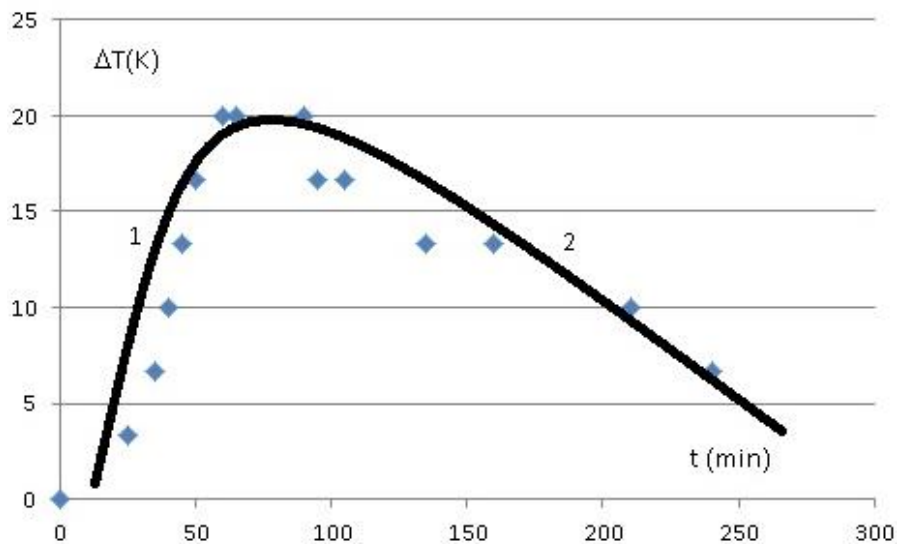
Model zbudowanego wysokotemperaturowego kablok nadprzewodnikowego



Rys. 3. Zmierzona charakterystyka I-V modelu kablok w temperaturze $T = 77$ K.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

Na rysunku 2 pokazany jest krótki model skonstruowanego przez autora krikabla nadprzewodnikowego z wysokonapięciowymi doprowadzeniami prądowymi, gdyż jak wiadomo krikable nadprzewodnikowe używane mogą być w warunkach wysokich napięć. Związane to jest głównie z warunkiem przenoszenia przez krikable dużej mocy, opisanego warunkiem $L = V \cdot I$. Jak widać na rysunku 2 izolatory doprowadzeń prądowych skonstruowane zostały w postaci zbioru pięciu talerzy wykonanych z plastiku i taka konstrukcja poprawia warunki izolacyjne doprowadzeń, zabezpieczając je przed zwarciami powierzchniowymi. Badania zwarciove doprowadzenia prądowego potwierdziły odporność na wysokie napięcia. Zmierzona odporność na przebicie udarowe wynosiła 30 kV i miało ono charakter przebicia powierzchniowego, napięcie 28 kV doprowadzenie wytrzymało przez całą próbę trwającą ponad minutę. Kształt udaru opisany jest czasem narastania 1,2 μ s i następnie spadkiem o długości czasowej 50 μ s. Zmierzona odporność na napięcie przemienne 50 Hz wynosiła 18 kV, dla próby trwającej ponad minutę, a przy napięciu sinusoidalnym 20 kV następowało przebicie powierzchniowe. Rysunek 3 przedstawia zmierzona charakterystykę prądowo-napięciową krikabla skonstruowanego z użyciem taśm nadprzewodnikowych I generacji typu BiSrCaCuO. Jak widać z tego wykresu stałoprądowy prąd krytyczny wynosi 50 A w temperaturze ciekłego azotu. Przeprowadzone zostały także badania termiczne kriosztatu krikabla, poprzez badanie z pomocą przyłożonej termopary zmian temperatury na powierzchni kriosztatu. Rezultaty zaprezentowane na wykresie 4 pokazują zmiany temperatury w procesie chłodzenia kriosztatu i następnie podczas jego odgrzewania. Dla poprawy warunków izolacji termicznej zastosowano dodatkową izolację termiczną z pomocą nawiniętej na kriosztat krikabla folii poliestrowej.



Rys. 4. Zależność zmian temperatury ΔT na powierzchni kriosztatu krikabla w funkcji czasu t : (1) dla chłodzenia i (2) podczas odgrzewania krikabla.

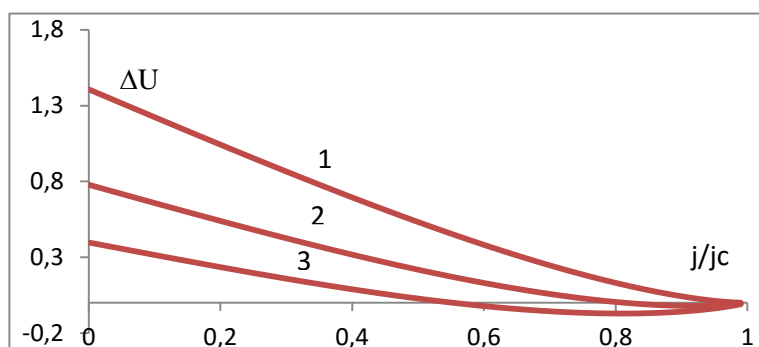
Wielokrotne wymrażanie i następnie wygrzewanie kriosztatu nie wpływało na jego parametry wytrzymałościowe i izolacyjne.

Analiza charakterystyk I-V nadprzewodników wysokotemperaturowych

Prawidłowa praca kriokabla uzależniona jest od jego charakterystyk prądowo-napięciowych pokazanych na rys. 3. W ramach pracy zanalizowano charakterystyki prądowo-napięciowe nadprzewodników wysokotemperaturowych w opracowanym modelu teoretycznym opartym na analizie oddziaływania zakotwiczającego pomiędzy płaskim wirem magnetycznym a nano-rozmiarowym centrum zakotwiczenia, prowadzącym do powstania bariery potencjału $\Delta U(i)_t$ opisanej wzorem:

$$\Delta U(i)_t = \frac{\mu_0 H_c^2}{2} l \xi^2 \left(-\arcsin(i) + \arcsin\left(\frac{d}{2\xi}\right) + \frac{d}{2\xi} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2\xi}\right)^2} - i \left(\sqrt{1 - i^2} + \arcsin\left(\frac{d}{2\xi}\right) + \frac{d}{2\xi} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2\xi}\right)^2} - \frac{\pi}{2} \right) \right) + \alpha_e \xi^2 (\sqrt{1 - i^2} - 2)\sqrt{1 - i^2}$$

H_c jest termodynamicznym polem krytycznym, d i l szerokością i grubością nanodefektu, i zredukowanym prądem transportu, ξ długością koherencji, α_e modulem sprężystości. Na rys. 5 pokazana jest zależność bariery potencjału ΔU od zredukowanego prądu i .



Rys. 5. Wpływ zredukowanego prądu $i=j/j_c$ na wysokość bariery potencjału ΔU w funkcji rozmiarów defektu: (1) $d/2\xi = 0,8$, (2) $0,4$, (3) $0,2$.

Wyniki porównania przeprowadzonych w modelu obliczeń teoretycznych z pomiarami charakterystyk I-V w funkcji pola magnetycznego nadprzewodnika wysokotemperaturowego BiPbSrCaCuO wykazały dobrą zgodność i umożliwiły wyznaczenie koncentracji defektów $n = 3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ oraz ich średni rozmiar $d = 12 \text{ nm}$.

Literatura

1. J. Sosnowski, Kriokable nadprzewodnikowe, Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, str. 1-100 (2012)
2. N.J. Long, HTS Roebel cables, General Cable Superconductors Ltd. (2011)

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