

**INSTITUTE OF LOW TEMPERATURE AND STRUCTURE RESEARCH
POLISH ACADEMY OF SCIENCES**



Summary of PhD Dissertation
(English & Polish versions)

**Comparative studies of energy dissipation minimum in
BSCCO-2223 and YBCO-123 HTS tapes**

Eduard MAIEVSKYI

Supervisor:
Dr hab. Marian Cizek

Wroclaw 2017

Summary

Application of superconducting materials brings a lot of possibilities for improvement and development of numerous scientific, medical and power devices, replacement of conventional technologies and power grids by much more efficient and compact equivalents.

Zero electrical resistance is the most applicable feature of superconducting materials. Superconductors demonstrate zero electrical resistance only when a DC current below its critical value is applied. For today the most part of electric and power applications are based on using of AC electric currents and AC magnetic fields. Energy dissipation in superconducting materials due to AC electromagnetic fields is much more lower than in copper or aluminum conductors cooled to low temperatures. The AC losses in superconductors are predominant in a heat load for the cryogenic systems, so it should be taken into account.

Modern production methods allow on manufacturing of long-length high temperature superconducting composite tapes for large scale applications. Utilization of such materials instead of conventional superconductors can significantly increase demand for superconducting technologies caused by substitution of helium by cheap liquid nitrogen as a coolant, what results in reduction of cryocoolers and cryo-liquefiers power consumption. Moreover, such replacement leads to simplification of cryostats construction, their size, and simplification of cryogenic liquids handling operations. From the technological point of view magnets based on HTS tapes should be constructed from stacks of pancake or double pancake coils. Such configuration causes that tapes located near the axial ends of solenoidal configuration are exposed to the magnetic field which is oriented perpendicularly or almost perpendicularly to the tape's plane. Such geometrical tape-magnetic field configuration results in the high values of AC magnetization energy losses.

Presented work is focused on detailed investigation of energy dissipation mechanisms and magnetization loss minimum effect due to coaxial AC and DC magnetic fields subjected perpendicular to the plane of a superconducting tape.

The BSCCO-2223/Ag multifilamentary tape (Type H, produced by Sumitomo Electric Industries) and REBCO-123 "coated conductor" tape (SF4050, manufactured by SuperPower) were chosen for our research purposes. Initial characterization of the sample tapes was performed with the help of SEM and specially designed experimental setup for measurements of angular dependencies of critical currents in low magnetic fields (up to 100 mT). Results obtained during initial characterization of the sample tapes were used to select appropriate

geometrical models, critical state models and their parameters for further simulation of energy dissipation processes.

Unique experimental facilities for magnetization loss measurements in uniform AC and DC coaxial magnetic fields designed by our research group was used for explicit experimental studying of energy dissipation processes in given configurations of the magnetic fields. Up to our present knowledge described effect of magnetization loss minimum has not been studied for HTS composite tapes and in applied configurations of the magnetic fields. It was found that visible AC loss minima appear on the loss curves for some certain values of the AC and DC magnetic fields. The values of the DC-bias magnetic field corresponding to energy dissipation minimum position are monotonically increasing function of the AC magnetic field amplitude. Studied phenomenon strongly depends on magnetic history of the sample. As it was shown, AC loss characteristics differ for ascending and descending DC-bias magnetic fields. Such fact implies that the effect of trapped magnetic flux on shielding current density distribution plays an important role.

Numerically simulated loss curves based on modified Kim's critical state model give a good quantitative and perfect qualitative description of observed AC loss minimum phenomenon. According to the obtained numerical simulations the occurrence of magnetization loss minima is closely connected to the magnetic field distribution and its impact on the critical current density and distributions of the shielding current density. It was shown that some configurations of AC and DC-bias magnetic fields in combination with magnetic history effects can lead to sufficient reducing of the hysteresis loop square and result in occurring of observed energy dissipation minima characteristics. Thus it can be stated that the changes in energy dissipation due to applying of DC-bias magnetic field were contributed mainly by the bulk pinning losses and can be successfully simulated by the proposed modelling methods.

Streszczenie

Zastosowania materiałów nadprzewodnikowych niesie ze sobą wiele możliwości polepszenia i dalszego rozwoju wielu naukowych, medycznych i energetycznych urządzeń oraz zastąpienia konwencjonalnych technologii, sieci energetycznych bardziej wydajnymi ekwiwalentami.

Zerowy opór elektryczny jest podstawową cechą nadprzewodników jeśli chodzi o ich zastosowania praktyczne. Nadprzewodniki wykazują zerowy opór tylko wtedy gdy prąd elektryczny jest stały i o wartości poniżej krytycznej. Obecnie zdecydowana większość zastosowań elektrotechnicznych opiera się na zastosowaniach prądu przemiennego oraz przemiennych pól magnetycznych. Straty energetyczne pojawiające się w materiałach nadprzewodnikowych przy zastosowaniach przemiennych pól elektromagnetycznych są znacznie niższe niż te w miedzi czy aluminium schłodzonych do niskich temperatur. Są one jednym z ważniejszych czynników obciążenia cieplnego systemów kriogenicznych i należy je brać pod uwagę.

Obecne technologie pozwalają na produkcje kompozytowych taśm opartych na nadprzewodnikach wysokotemperaturowych w długich odcinkach pozwalających na ich zastosowania na szeroką skalę. Zastąpienie nadprzewodników konwencjonalnych, nadprzewodnikami wysokotemperaturowymi pozwala na zastąpienie ciekłego helu znacznie tańszym ciekłym azotem. Prowadzi to do redukcji energii używanej przez mechaniczne kriołodziarki i inne systemy skraplania gazów. Ponadto takie zastępstwa prowadzą do uproszczeń konstrukcji kriostatów, zmniejszenia ich wymiarów a także czynią techniki obchodzenia się z cieczami kriogenicznymi bardziej prostymi. Z punktu widzenia technik wykonania magnesy budowane na bazie taśm wysokotemperaturowych są w postaci stosu płaskich cewek typu „*pancake*”. Taka konfiguracja powoduje, że cewki znajdujących się przy końcach magnesu są poddawane działaniu zmiennego pola magnetycznego o składowej bliskiej kierunkowi prostopadłemu do płaszczyzny taśmy. Taka geometryczna konfiguracja pole magnetyczne- płaszczyzna taśmy prowadzi do stosunkowo wysokich zmiennoprądowych strat energetycznych.

Prezentowana praca związana jest ze szczegółowymi badaniami mechanizmów rozpraszania energii oraz efektowi pojawiania się minimum start energii gdy do nadprzewodzącej taśmy przyłożone jest jednocześnie pole magnetyczne przemienne oraz stałe.

Do badań wybrano wielofilamentową taśmę BSCCO-2223/Ag (typ H, produkcja Sumitomo Electric Industries) oraz REBCO-123 taśmę cienkowarstwową (typ SF4050, produkcja SuperPower). Wstępna charakteryzacja wybranych próbek taśm przeprowadzona została techniką SEM oraz poprzez pomiary kątowej zależności prądu krytycznego od pola magnetycznego (do 100 mT). Te wyniki zostały użyte do wyboru odpowiedniego modelu geometrycznego, modelu stanu krytycznego i jego parametrów do dalszych symulacji numerycznych mechanizmów rozpraszania energii.

Do badań procesów rozpraszania energii magnetycznej w przypadku zastosowań współosiowego pola zmiennego i pola stałego zastosowano unikatową aparaturę pomiarową opracowaną i zbudowaną przez naszą grupę badawczą. Zgodnie z naszą obecną wiedzą zjawisko występowania minimum strat w kompozytowych taśmach wysokotemperaturowych nie było dotąd szczegółowo badane. Znaleziono, że widoczne minima strat zmiennoprądowych występują przy pewnych wartościach pola magnetycznego zmiennego i pola magnetycznego stałego. Wartości pola stałego podmagnesowującego przy których pojawiają się minima strat są monotonicznie rosnącą funkcją amplitudy pola zmiennego. Zjawisko to silnie zależy od historii magnetycznej próbki. Jak pokazano, charakterystyki strat energetycznych różnią się znacznie dla pola stałego rosnącego i opadającego. Taki fakt implikuje znaczenie wpływu zamrożonego strumienia magnetycznego na rozkład gęstości prądów ekranujących nadprzewodnik

Numerycznie symulowane charakterystyki strat energetycznych oparte na zmodyfikowanym modelu stanu krytycznego Kima dały dobre zgodności ilościowe i doskonałe zgodności jakościowe z charakterystykami strat obserwowanymi. Zgodnie z otrzymanymi wynikami numerycznymi występowanie minimum strat energetycznych jest ściśle związane z rozkładami pola magnetycznego i jego wpływem na wartość prądu krytycznego oraz gęstością prądów ekranujących. Pokazano, że pewne konfiguracje pola zmiennego i pola stałego, wraz z uwzględnieniem efektów pola zamrożonego, prowadzi do redukcji powierzchni pętli histerezy momentu magnetycznego, co z kolei objawia się redukcją strat energetycznych. Można więc powiedzieć, że zmiany w rozpraszaniu energii spowodowane stałym polem magnetycznym są powodowane głównie zmianami sił pinningu i mogą one być modelowane numerycznie proponowanymi tu metodami.