



طراحی، ساخت و مشخصه‌یابی پیچ‌های ابررسانای دمای بالای D شکل

نیره عبداللهی قهی^{۱*}، ناصر علی نژاد^۱، مهناز عبداللهی درگاه^۱، جعفر محمودی^۲

۱. پژوهشکده‌ی پلاسما و گداحت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۵۱۱۱۳-۱۳۳۹۹، تهران - ایران
۲. گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه قم، صندوق پستی: ۳۷۱۶۱۴۶۶۱۱، قم - ایران

چکیده: امروزه استفاده از ابررساناهای دمای بالا به دلیل دارا بودن چگالی جریان بحرانی بالا در حضور میدان‌های مغناطیسی قوی، در دستگاه‌های توکامک و تصویرگیری تشدید مغناطیسی پیشنهاد می‌شود. در این مطالعه، برای نمونه‌ی خاصی از نوار چندسازه‌ی Bi-2223/AgMg، وابستگی به جریان بحرانی در دما و شعاع‌های انحنای مختلف به دست آمد. هم‌چنین، با استفاده از این نوار ابررسانا، یک پیچ‌ی صفحه‌ای D شکل طراحی، ساخته و مشخصه‌های اصلی آن در دمای نیتروژن مایع گزارش و با نتیجه‌های حاصل از سیم مقایسه شد. رفتار پسماند به صورت تابعی از نرخ جریان در طی بالا رفتن و پایین آمدن آن، روی منحنی ولتاژ-جریان در دمای نیتروژن مایع بررسی شد. سرانجام با در نظر گرفتن یک مدار الکتریکی معادل برای پیچ‌ی ابررسانای دما بالا، تحلیلی از ولتاژ ایجاد شده در شرایط تغییر جریان ارایه شد. سپس بیشینه‌ی میدان تولید شده در این آهن‌ربا و کمینه‌ی انرژی فرونشانی آن برای جریان کاری ۳۷ A در دمای بخارهای نیتروژن به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: Bi-2223/AgMg، مشخصه‌یابی، پیچ‌ی D شکل، رفتار پسماند

Design, Manufacture and Characterization of High Temperature Superconducting D-Shaped Coil

N. Abdollahi Ghahi^{*1}, N. Alinejad¹, M. Abdollahi Dargah¹, J. Mahmoodi²

1. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14399-51113, Tehran-Iran
2. Department of Physics, Faculty of Science, Qom University, P.O.Box: 3716146611, Qom - Iran

Abstract: Nowadays, high temperature superconductors have been proposed for high current density at high magnetic field applications such as tokamak and MRI machines. In this paper, dependency of critical current on magnetic field, temperature and different curvature radius for specific sample of Bi-2223/AgMg composite tape are obtained. By using this superconducting tape, a D-shaped pancake coil is designed and built. The coil characteristics in the liquid nitrogen temperature are reported and compared with the results of the tape. Furthermore, we have obtained the portion effects of the bending and self-field in the critical current drop. Hysteresis behavior as a function of current rate during ramp up and ramp down cases on the voltage current curve at liquid nitrogen temperature has been investigated. Then by considering equivalent circuit for high temperature superconducting magnet, the behavior of the voltage in terms of current is analyzed. Maximum field generated in this magnet is obtained and quench minimum energy is measured for working current of 37 A at nitrogen vapor.

Keywords: Bi-2223/AgMg, Characterization, D-Shaped Coil, Hysteresis Behavior

*Email: nayereh_abdollahi@yahoo.com

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی برای تولید سیم‌های ابررسانای دمای بالا^(۱) (HTS) با طول‌های بلند، که از آن‌ها برای تولید سیستم‌های با کاربردهای مختلف استفاده می‌شود، انجام شده است. این فن‌آوری مزیت‌های عمده و قابل توجهی را برای کاربردهای مهندسی قدرت مانند ترانسفورماتورها، کابل‌های انتقال انرژی، موتورها، مولدها و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مغناطیسی ابررسانایی فراهم می‌کند [۱-۳]. یکی از چشم‌اندازهای مهم در به کارگیری سیم‌های HTS در رآکتور هم‌جوشی هسته‌ای، ایجاد میدان مغناطیسی پایای بالاتر از ۲۰ Tesla است [۴، ۵]. تاکنون در ساخت توکامک‌های بزرگ مانند EAST، KSTAR و TORE SUPRA از ابررسانای دمای پایین^(۲) (LTS) استفاده شده است [۶-۸]. آهن‌رباهای HTS در توکامک‌های بزرگ، مرحله‌های تحقیقاتی را طی می‌کند که فعالیت‌های انجام شده به صورت شبیه‌سازی و در مواردی ساخت آن‌ها در اندازه‌های آزمایشگاهی گزارش شده است [۹، ۱۰].

در طراحی آهن‌رباهای چنبره‌ای در توکامک‌های رایج معمولاً، ساختار D شکل اختیار شده است، چون این ساختار هیچ‌گونه گشتاور خمشی توسط نیروی الکترومغناطیسی ایجاد نمی‌کند، بنابراین در طراحی ساختار نگه‌دارنده و در کاهش اندازه‌ی آن مناسب است [۱۱].

محدوده‌ی حالت ابررسانایی یک ماده با سطح بحرانی سه‌بعدی معلوم می‌شود. این سطح، مرز بین حالت مقاومتی و ابررسانایی را تعیین می‌کند که مرزهای آن با دمای بحرانی (T_c)، چگالی جریان بحرانی (J_c) و میدان بحرانی (H_c) معین می‌شود. این کمیت‌ها مستقل از هم نیستند و با تابعی به صورت $J_c(T, H)$ به‌طور تجربی به دست می‌آیند [۱۲]. تعیین جریان بحرانی ابررساناهای دمای بالا به رغم دارا بودن چگالی جریان بالا تحت میدان مغناطیسی قوی، به دقت زیاد نیاز دارد. زیرا این نوع ابررساناها در میدان‌های مغناطیسی ناهمسانگرد هستند [۱۳] و منحنی مشخصه‌ی میدان الکتریکی - چگالی جریان آن‌ها انحنای کمی دارد [۱۴].

اولین گام برای طراحی پیچه، اندازه‌گیری مشخصه‌های بحرانی سیم تحت شرایط مختلف است. آزمایشگاه‌های متفاوتی در دنیا، مشخصه‌یابی‌های متعددی برای تعیین وابستگی جریان بحرانی به انواع تغییر شکل‌های مکانیکی و دما، روی هر دو نمونه سیم‌های

ابررسانای YBCO^(۳) [۹، ۱۰] و BSCCO^(۴) [۱۵، ۱۶] انجام داده‌اند که نشان می‌دهد جریان بحرانی سیم‌های ابررسانای دما بالا به فشار مکانیکی ناشی از فرایند ساخت، خنک‌سازی و شرایط کاری سیستم‌های ابررسانا مثل کابل‌ها و آهن‌رباها وابسته است [۱۷، ۱۸].

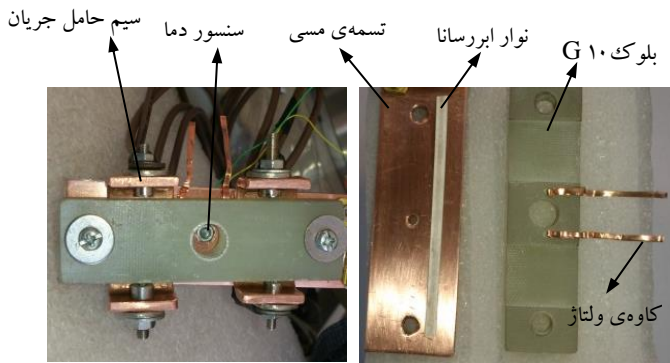
دستگاه‌های کاربردی ابررسانا معمولاً برای کار در نیتروژن مایع با فشار کاهش‌یافته طراحی می‌شوند، بنابراین تعیین مقادیرهای جریان بحرانی، J_c ، در دماهایی بین K ۶۶ تا K ۷۷ نیاز است. به‌علاوه، از آنجایی که ممکن است به دلیل بروز یک حادثه، افزایش دمایی به بالاتر از K ۷۷ در سیستم رخ دهد، لازم است مقادیرهای جریان بحرانی در بالاتر از این دما نیز تعیین شود [۱۹]. علاوه بر این، مطالعه‌ها بر روی مشخصه‌های عملکرد پیچه‌های ابررسانای دمای بالا نشان داده است که قطر خمش و میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط آن، روی جریان بحرانی مؤثر است [۱۶].

در این مطالعه، ابتدا مشخصه‌ی جریان بحرانی چندسازه‌ی ابررسانای دمای بالای Bi-۲۲۲۳/AgMg برحسب میدان مغناطیسی و دما اندازه‌گیری و نیز رفتار تندی گذار (n) برحسب دما بررسی شده است. اثر شعاع خمش بر روی جریان بحرانی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. سپس، با استفاده از این نوار ابررسانا، یک پیچه‌ی صفحه‌ای D شکل در مقیاس آزمایشگاهی و با الگوبرداری از توکامک KSTAR طراحی، ساخته و مشخصه‌های آن در دمای نیتروژن مایع اندازه‌گیری شده است. این مشخصه‌ها شامل جریان بحرانی، بیشینه میدان مغناطیسی موازی، خودالقایی و انرژی ذخیره‌سازی پیچه هستند. هم‌چنین کمینه‌ی انرژی فرونشانی^(۵) در بخار حاصل از نیتروژن مایع اندازه‌گیری شده است. برای پیچه‌ی ابررسانا یک مدار معادل در نظر گرفته شده و در شرایطی که جریان منبع تغذیه با نرخ مشخصی تغییر می‌کند، مؤلفه‌های اصلی آن تعیین و با نتیجه‌های تجربی مقایسه شده است.

۲. بخش تجربی

۲.۱ مشخصه‌یابی سیم ابررسانا

سیم مورد آزمایش ساخت شرکت بروکر آلمان و از نوع ۱۲۱ HTS Bi-۲۲۲۳/AgMg BHTS است. تعداد ۱۲۱ رشته از جنس سرامیک Bi-۲۲۲۳/AgMg در ماتریسی از نقره قرار گرفته‌اند و غلاف این سیم از جنس نقره-منیزیم است. ضخامت متوسط و پهنای سیم بدون روکش به ترتیب ۰/۲۱۵ و ۳/۹۷ mm است.



شکل ۱. ترتیب آزمایشی برای مشخصه‌یابی سیم.

شکل ۲، منحنی مشخصه‌ی $V-I$ را برای نوار ابررسانای دما- بالای BSCCO در دمای 7 K نشان می‌دهد. این منحنی برای تغییرات جریان با نرخ 1 As^{-1} رسم شده است. مشاهده می‌شود که جریان بحرانی نوار BSCCO در دمای 7 K حدود 1.03 A است. به‌طور مشابه، منحنی مشخصه‌ی $V-I$ نوار ابررسانا برای نرخ‌های متفاوت جریان در بازه‌ی 0.5 تا 5 As^{-1} در شکل ۳ رسم شده است. این منحنی نشان می‌دهد که تغییر نرخ جریان اثر قابل توجهی روی جریان بحرانی (I_c) سیم راست ندارد، به طوری که با افزایش نرخ جریان از 0.5 تا 5 As^{-1} ، جریان بحرانی تنها حدود 3 A تغییر می‌کند.

یکی از پارامترهای مهم و مؤثر بر جریان بحرانی سیم‌های HTS، اندازه و جهت میدان مغناطیسی اعمال شده بر آن‌ها است. در شکل ۴ جریان بحرانی به‌صورت تابعی از میدان اعمال شده در جهت موازی و عمود بر روی نوار ابررسانای Bi-2223 در دمای 7 K ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که مؤلفه‌ی عمودی میدان نسبت به مؤلفه‌ی افقی کاهش بیش‌تری را در جریان بحرانی ایجاد می‌کند و این به‌دلیل ناهمسانگردی نوار ابررسانای دمای بالا تحت میدان مغناطیسی است.

نتیجه‌های جریان بحرانی در قطرهای خمش متفاوت در شکل ۵ نشان می‌دهد که افت جریان در بازه‌ی قطرهای خمش ۹ تا 33 cm قابل ملاحظه نیست، اما تأثیر انحنا بر روی I_c ، در قطرهای خمش کم‌تر از 9 cm محسوس است و با کاهش انحنا تا 4.5 cm ، جریان بحرانی 12 A کاهش می‌یابد.

برای دست‌یابی به دماهای فوق‌سرد و گذار به حالت ابررسانایی از کرایوکولر RGD 5,80، استفاده شد که از نوع مبدل حرارتی احیاکننده^(۶) بوده و با چرخه‌ی سرمایشی گیفورد- مک ماهان^(۷) (GM) کار می‌کند. توان خنک‌سازی مرحله‌ی اول این کرایوکولر در دمای 80 K ، 80 W و توان خنک‌سازی مرحله‌ی دوم در دمای 20 K ، 5 W است.

جریان عبوری توسط یک منبع جریان ۱۶-۲۰۰ DESC، با بازه‌ی ولتاژ 0 تا 16 V و بازه‌ی جریان 0 تا 200 A ایجاد شد. اندازه‌گیری ولتاژ با استفاده از مولتی‌متر 8261 GDM با دقت $1\text{ }\mu\text{V}$ و با بسامد نمونه‌برداری 200 ms به ازای هر پردازش انجام شد. برای دست‌یابی به دماهای کاری متفاوت، از دستگاه کنترل دمای لیک‌شور^(۸)، مدل ۳۳۶ استفاده شد. همه‌ی دستگاه‌ها قابلیت اتصال به کامپیوتر در محیط نرم‌افزار لب-ویو^(۹) را دارند.

۸ سانتی‌متر از سیم ابررسانا با دو کاوه‌ی (نمونه‌بردار)^(۱۰) ولتاژ به فاصله‌ی 12 mm از یک‌دیگر و یک حسگر دمایی دیودی روی آن، توسط یک بلوک $G10$ بر روی یک تسمه‌ی مسی نگه‌داشته می‌شد. ترتیب آزمایشی برای مشخصه‌یابی سیم در شکل ۱ نشان داده شده است. دمای گذار 108 K و میانگین جریان بحرانی در دمای نیتروژن مایع حدود 1.03 A اندازه‌گیری شد. در این‌جا روش اندازه‌گیری جریان بحرانی، استفاده از منحنی مشخصه‌ی ولتاژ-جریان $[V-I]$ است. برای توصیف ابررساناهای چندسازه با دقت قابل قبول، از قانون توان^(۱۱) استفاده شد [۱۲].

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c(B, T)} \right)^{n(B, T)} \quad (1)$$

که در آن عدد مشخصه‌ی ابررسانا و توصیف‌کننده‌ی تندی گذار است و به میدان و دما بستگی دارد. به‌طور کلی مقدار n در LTSها بیش‌تر از HTSها است و سیم‌های مرغوب‌تر، مقدار n بزرگ‌تر دارند ($n \geq 30$) که در کاربردهایی مانند حالت سازگار آهن‌ربای ان. ام. آر^(۱۲) اهمیت دارند [۲۰]. در این رابطه $[E_c, J_c]$ یک نقطه از منحنی مشخصه‌ی $E-J$ است. معمولاً $E_c = 0.1-1\text{ }\mu\text{V/cm}$ در نظر گرفته می‌شود [۱۲].

برای اندازه گیری جریان بحرانی در دماهای مختلف، چیدمان به کار رفته در شکل ۱، بر روی مرحله ی دوم سرد سرد^(۱۳) نصب شد (شکل ۶). نمودار تغییرات دمایی جریان بحرانی (شکل ۷) نشان می دهد که با کاهش دما از ۸۲ K تا ۶۳ K جریان بحرانی به بیش از دو برابر مقدار خودش می رسد. بنابراین برای دستیابی به چگالی جریان بالا و به دنبال آن ایجاد میدان مغناطیسی قوی، دمای کاری باید پایین باشد.

کمیت n که برای تعیین تندی گذار منحنی جریان- میدان الکتریکی در ابرساناها به کار می رود از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$n(B, T) = \frac{\ln\left(\frac{E}{E_C}\right)}{\ln\left(\frac{J}{J_C(B, T)}\right)} \quad (2)$$

n برحسب دما در شکل ۸ رسم شده است. مشاهده می شود که با کاهش دما مقدار n افزایش می یابد، به طوری که بیش ترین انحنا در نمودار مربوط به دمای ۶۵K است؛ مقدار n در این دما ۲۳ است. با توجه به شیب تند منحنی در این دما، گذار از حالت ابرسانایی سریع تر صورت می گیرد و جریان بحرانی با دقت بالاتری به دست می آید.

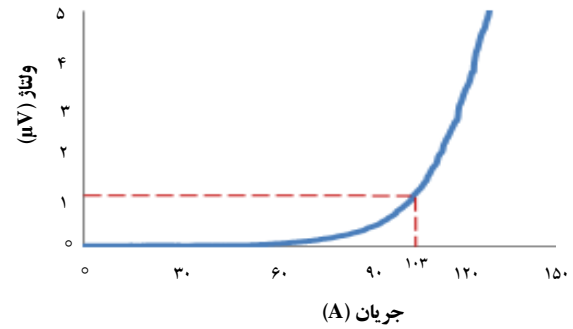
۲.۲ مشخصه یابی پیچه

۱.۲.۲ طراحی پیچه

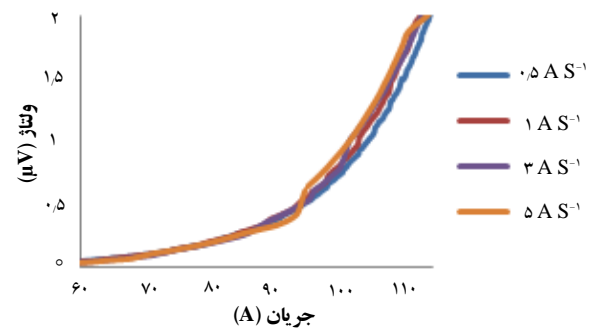
بهترین روش طراحی پیچه، استفاده از معادله ی دیفرانسیلی مربوط به شعاع انحنا با اعمال شرایط تنش ثابت است که توسط فایل^(۱۴)، مایلز^(۱۵) و شفیلد^(۱۶) پیشنهاد شده است [۲۱].

$$r \frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{\pm 1}{k} \left[1 + \left(\frac{dr}{dz} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

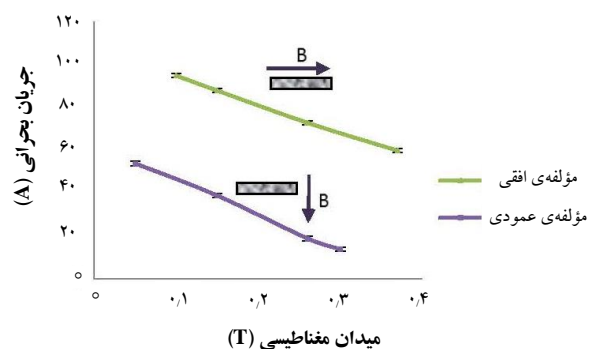
که در آن $k = \frac{1}{\nu} \ln(r_2 / r_1)$ و r_1 و r_2 فاصله ی محور چنبره از بیشینه و کمینه ی پیچه است. حل صریحی برای این معادله وجود ندارد. با حل عددی معادله ی ۳ و انتخاب مناسب $k=0.64$ و $\frac{r_2}{r_1}=3.6$ با استفاده از پارامترهای توکامک KSTAR، ساختار هندسی D شکل برای آهن ربا به دست می آید (شکل ۹) [۸].



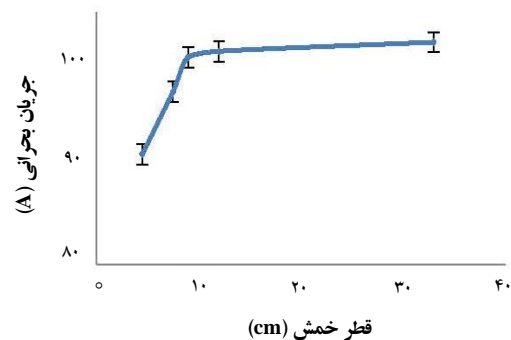
شکل ۲. منحنی مشخصه ی V-I برای نوار ابرسانای BSCCO در دمای نیتروژن مایع.



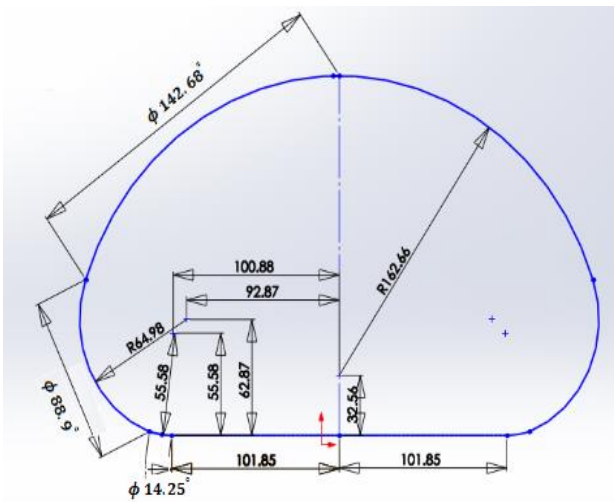
شکل ۳. منحنی مشخصه ی V-I نوار ابرسانا برای نرخ های متفاوت جریان.



شکل ۴. افت جریان بحرانی نوار ابرسانا در حضور میدان مغناطیسی.



شکل ۵. نمودار جریان بحرانی برحسب قطر خمش.

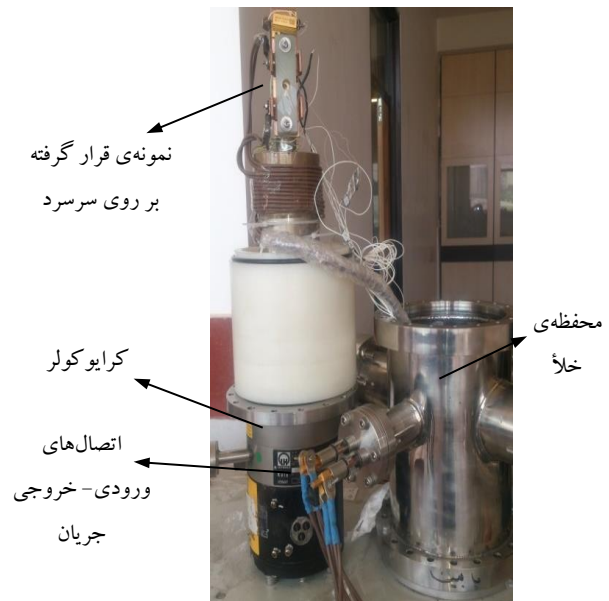


شکل ۹. هندسه‌ی پیچیده D- شکل برحسب mm.

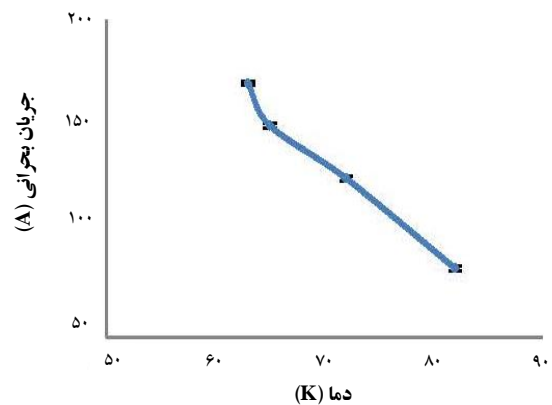
همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، انحناى D شکل به صورت تابعی از پنج بخش کمانی و یک بخش مستقیم و راست که تقارن عمودی دارند ساده می‌شود. مقدارهای چگالی شارهای مغناطیسی آهن‌ریا به روش عناصر محدود و با استفاده از نرم‌افزار کامسول مالتی فیزیک شبیه‌سازی شده است. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که بیشینه چگالی شار ایجاد شده به‌ازای چگالی جریان $Am^{-2} \times 10^6$ ، 41×10^6 ، $0.12 T$ است.

۲.۲.۲ ساخت و ترتیب آزمایشی پیچه

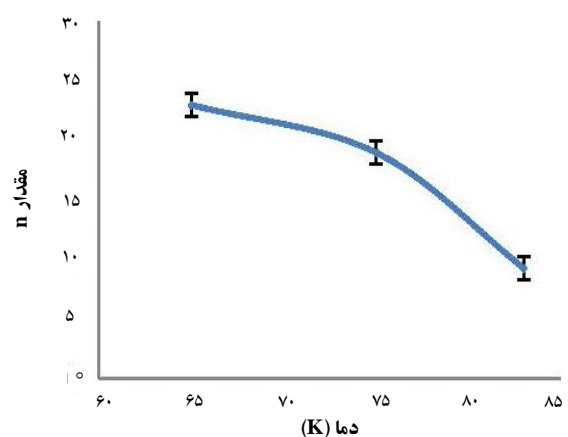
یک تسمه‌ی مسی به‌طول ۸۶ cm، عرض ۲ cm و ضخامت ۳ mm مطابق با شعاع‌های انحناى داده شده در شکل ۹ خم شده و به‌عنوان قالب برای پیچیدن سیم ابرسانا روی آن استفاده شد. از کاپتون به‌عنوان دی‌الکتریک بین تسمه‌ی مسی و اولین لایه‌ی سیم ابرسانا استفاده شد. هر دور از پیچه با چسب دوطرفه به ضخامت ۰.۸ mm و پهنای ۵ mm نسبت به دور بعدی عایق کاری شد. در ساخت این آهن‌ریا ۲۰ دور از سیم Bi-۲۲۲۳/AgMg معادل با طولی حدود ۱۷ m به‌کار رفت؛ برای جلوگیری از لغزش لایه‌های ابرسانا، ۱۸ جفت قطعه از جنس G1۰ (یک لایه‌ی صنعتی فشار- بالا ساخته شده از پشم شیشه‌ی آغشته به رزین‌های اپوکسی) در دو طرف پیچه به قالب مسی متصل شد.



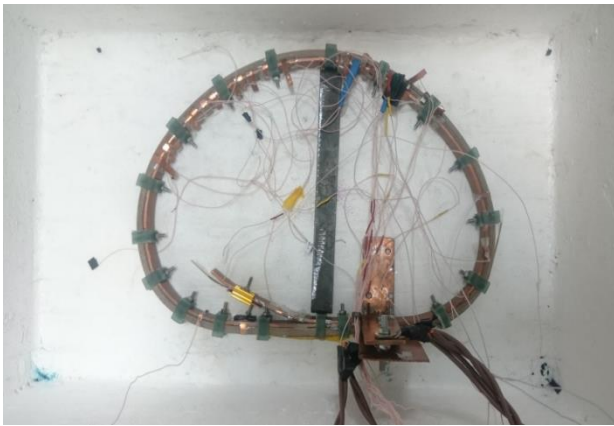
شکل ۶. چیدمان قرار داده شده بر روی کرایوکولر.



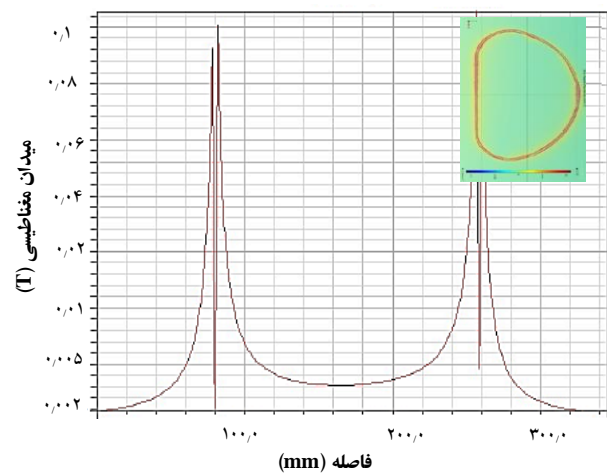
شکل ۷. نمودار تغییرات دمایی جریان بحرانی.



شکل ۸. رابطه‌ی بین n و دما.



شکل ۱۱. نمایی از پیچهی صفحه‌ای D شکل.



شکل ۱۰. توزیع شار مغناطیسی شبیه‌سازی شده‌ی پیچه.

جدول ۱. پارامترهای پیچه‌ی D شکل

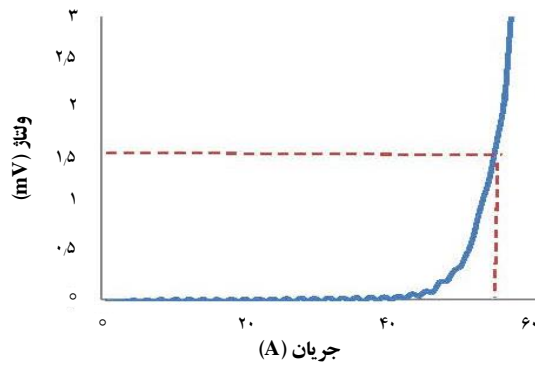
| پارامتر | مقدارهای تجربی |
|----------------------------|---------------------|
| طول سیم [m] | ۱۷ |
| طول پیچه [cm] | ۳۰ |
| شعاع‌های پیچه‌ی D شکل [cm] | ۱۶٫۲ و ۶٫۵، ۵٫۵ |
| ارتفاع [cm] | ۲ |
| میانگین ضخامت [cm] | ۱ |
| جریان بحرانی [A] | ۵۴ |
| خود القایی پیچه [mH] | ۰٫۲۵ |
| نوع دی‌الکتریک | کاپتون و چسب دوطرفه |

برای اطمینان از تعادل پایدار آهن‌ربا، جریان کاری پایین‌تر از جریان بحرانی در نظر گرفته شد. گرمکن برای ایجاد فرونشانی، یک توزیع حرارتی موضعی در آهن‌ربا ایجاد می‌کرد. در آغاز، دامنه‌ی تب حرارتی پایین بود، اما اگر فرونشانی در ابرسانا ایجاد نمی‌شد نمونه دوباره تا دمای شروع کار سرد و آزمایش با دامنه‌ی بالاتری از تب گرمکن تکرار می‌شد. این فرایند تا زمانی که ولتاژ آهن‌ربا بدون بازیابی افزایش یابد، تکرار می‌شد. منبع تغذیه‌ی مورد استفاده برای ایجاد تب گرمکن، به ترتیب دارای بیشینه ولتاژ و جریان ۳۰V و ۲۰A بود.

۳. یافته‌ها و بحث

بررسی مشخصه‌های نمونه پیچه‌ی ساخته شده نشان داد که برای سیم BSCCO، به دلیل میدان مغناطیسی و فشارهای مکانیکی ناشی از پیچیدن، افت قابل توجهی در جریان بحرانی آهن‌ربا ایجاد

دو کاوه‌ی ولتاژ در لایه‌ی اول و بیستم برای مشخصه‌یابی جریان بحرانی پیچه در نظر گرفته شد. هم‌چنین برای به‌دست آوردن انرژی فرونشانی در لایه‌ی یازدهم، چهار کاوه‌ی ولتاژ با فاصله‌های معین و یک مقاومت 59Ω از نوع فیلم نازک فلزی به‌عنوان گرمکن^(۱۷) تعبیه شد. کاوه‌های ولتاژ از جنس مس با ضخامت ۰٫۱ mm و پهنای ۵ mm بودند که برای کاهش مقاومت تماسی، به‌وسیله‌ی چسب نقره روی ابرسانا اتصال داشتند. گرمکن نیز به روش لحیم‌کاری روی یک ورق مسی و عایق گرمایی مناسب، بین دو کاوه‌ی ولتاژ در لایه‌ی یازدهم قرار گرفت. برای اندازه‌گیری دما، یک سنسور دمای PT1000 نزدیک گرمکن تعبیه شد. دو ورق مسی با پهنای ۳ cm و ضخامت ۲ mm که به کابل‌های انعطاف‌پذیر متصل بودند، به عنوان رساناهای جریان در دو سر ابتدایی و انتهایی آهن‌ربا به‌کار گرفته شدند. وجود مقاومت تماسی پایانه‌های مسی پیچه‌ی صفحه‌ای، دلیل افزایش تدریجی ولتاژ در جریان‌های بالا است. برای کاهش گرمایش ژول و تماس بهتر، از لایه‌های نازک ایندیم در بین نوار ابرسانا و پایانه‌های مسی استفاده شد. تصویری از پیچه‌ی ساخته شده در شکل ۱۱ نشان داده شده و پارامترهای مهم آن در جدول ۱ درج شده است.



شکل ۱۲. منحنی مشخصه‌ی ولتاژ-جریان بحرانی پیچیده در دمای نیتروژن مایع.

۱.۳ بررسی تجربی و تحلیلی رفتار پسماند پیچیده

منحنی‌های مشخصه‌ی V-I برای پیچیده ابررسانا با نرخ‌های افزایشی - کاهشی متفاوت در جریان، به‌ازای ۰/۵، ۳ و 5 As^{-1} در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به‌دلیل القاییدگی آهن‌ربا، $L \frac{dI}{dt}$ ، با افزایش نرخ جریان، مقدار جهش اولیه در ولتاژ نیز افزایش می‌یابد و به‌ازای این نرخ‌های اعمال شده در جریان، تغییر قابل ملاحظه‌ای در جریان بحرانی آهن‌ربا ایجاد نمی‌شود. هم‌چنین در این نمودار، منحنی پسماند مغناطیسی به‌ازای یک نرخ افزایشی - کاهشی جریان دیده می‌شود. میزان القای مغناطیسی برابر با ۰/۲۵ mH و انرژی مغناطیسی ذخیره شده به‌ازای 0.7 Ic حدود 0.17 J به‌دست می‌آید.

بر اساس مدار معادل در نظر گرفته شده در شکل ۱۴، که در آن L_{int} و L_{ext} به ترتیب القای مغناطیسی خارجی و داخلی ابررسانا هستند رفتار پسماند ولتاژ-جریان مورد تحلیل قرار گرفت. R_{sc} و G مقاومت ابررسانا و رسانندگی فلز عادی هستند.

تقریب القای مغناطیسی خارجی مربوط به یک پیچیده دایره‌ای را برای آهن‌ربای D شکل به کار می‌بریم [۲۳].

(۵)

$$L_{\text{ext}} = N^2 \mu_0 \mu_r \left(\frac{D}{2} \right) \left\{ \ln \left(\frac{\lambda D}{d} \right) - 2 \right\}$$

که در آن μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد، D ، d و N به ترتیب، قطر، ضخامت و تعداد دورهای پیچیده ابررسانا است.

می‌شود. در شکل ۱۲، منحنی مشخصه‌ی ولتاژ-جریان آهن‌ربا با نرخ جریان 1 AS^{-1} در دمای نیتروژن مایع و در فشار محیط نشان داده شده است. مقدارهای ولتاژ پس از کم کردن ولتاژ پرش ناشی از القاییدگی (حدود 0.23 mV) به‌دست آمد و جریان بحرانی با در نظر گرفتن فاصله‌ی دو کاوه‌ی ولتاژ در پایانه‌های آهن‌ربا و معیار $E_c = 1 \mu\text{V cm}^{-1}$ ، حدود 54 A اندازه‌گیری شد، بنابراین جریان بحرانی در آهن‌ربا نسبت به سیم راست حدود ۴۷٪ کاهش یافته که این افت ناشی از میدان مغناطیسی (شکل ۴) و شعاع انحنا (شکل ۵) است. کم‌ترین قطر خمش در آهن‌ربای ساخته‌شده حدود 11 cm است که با توجه به نتیجه‌های شکل ۵، سبب افت 2 A در جریان بحرانی می‌شود. بنابراین سهم عمده‌ی افت جریان بحرانی در آهن‌ربا ناشی از مؤلفه‌ی عمودی خود میدان است. هم‌چنین با ساخت آهن‌ربای D شکل مقدار n در این نوار ابررسانا با توجه به شکل ۷، از ۱۹ به ۱۵ کاهش یافته است.

جریان بحرانی آهن‌ربا در بخار حاصل از نیتروژن مایع با دمای 82 K حدود 45 A به‌دست آمد، در حالی که با توجه به شکل ۷، جریان بحرانی سیم راست در دمای 82 K ، 82 A اندازه‌گیری شده که معادل با کاهش ۴۵٪ در جریان بحرانی است و می‌توان نتیجه گرفت که میزان این کاهش در مقایسه با دمای 77 K تقریباً برابر است.

مشخصه‌ی دیگری که برای این آهن‌ربا اندازه‌گیری شد، کمینه انرژی لازم برای فرونشانی است که چنین به دست می‌آید.

$$\text{MQE} = V_p I_p t_p \quad (۴)$$

که در آن V_p ، I_p و t_p به ترتیب، ولتاژ، جریان و زمان تب گرمکن هستند.

آزمایش فرونشانی در بخار نیتروژن با اعمال جریان 37 A (0.8 Ic (82 K)) انجام شد. با ایجاد اختلال موضعی توسط گرمکن با اعمال تب ولتاژ با دامنه‌ی 227 و جریان 0.37 A در مدت زمان 38 s ، افزایش دمایی به میزان 101 K در لحظه‌ی قطع تب مشاهده شد و انتشار ناحیه‌ی نرمال (فرونشانی) رخ داد. انرژی تب در شرایط مذکور و طبق رابطه‌ی ۴ حدود 309 J به‌دست آمد که کم‌تر از ۵٪ این انرژی به عنوان انرژی فرونشانی روی ابررسانا انباشت می‌شود [۲۲].

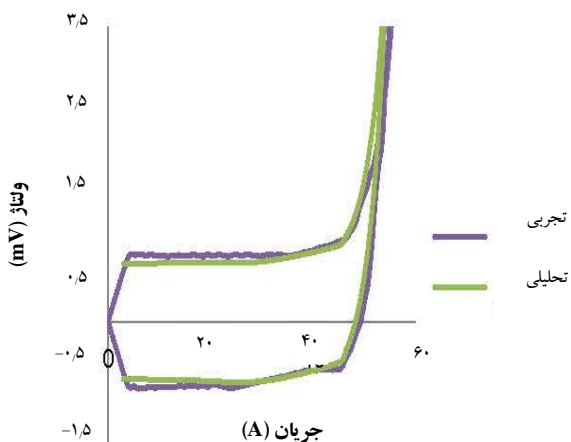
که در آن R_c و $n(0,05 T, 77K)$ برای پیچیهی مورد نظر به ترتیب $10^{-5} \times 3,4$ و ۱۵ است. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که مؤلفه‌ی عمودی میدان در تعیین جریان بحرانی مؤثر است. این شکل نشان می‌دهد که جریان بحرانی سیم در آهن‌ربا در میدان عمودی $0,05 T$ حدود ۵۴A است. بنابراین، جریان بحرانی اندازه‌گیری شده در اثر میدان مغناطیسی و شعاع انحنا $[I_c(0,05 T, 77K)]$ ، ۵۲A به دست می‌آید (شکل ۵). تابع جریان نسبت به زمان را به صورت خطی در نظر می‌گیریم.

$$I = \alpha t \tag{۸}$$

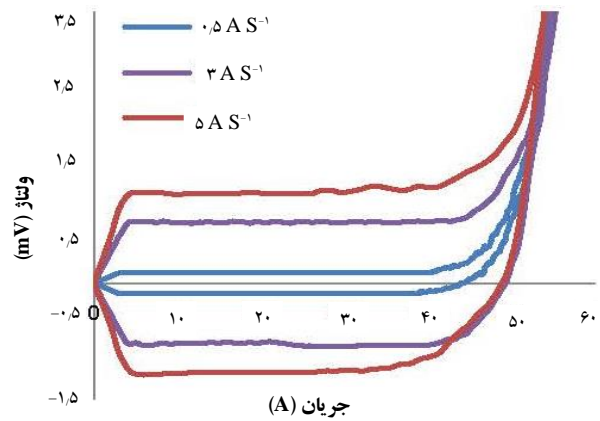
که در آن α نرخ تغییر جریان نسبت به زمان است. با توجه به این که در مقادیر کمی از جریان بحرانی، همه‌ی جریان از مدار ابرسانا عبور می‌کند، بنابراین ولتاژ دو سر ابرسانا چنین به دست می‌آید.

$$V_{SC} = \left[\left(\frac{L}{t} \right) + 3,4 \times 10^{-5} \left(\frac{\alpha t}{52} \right)^{15} \right] \alpha t \tag{۹}$$

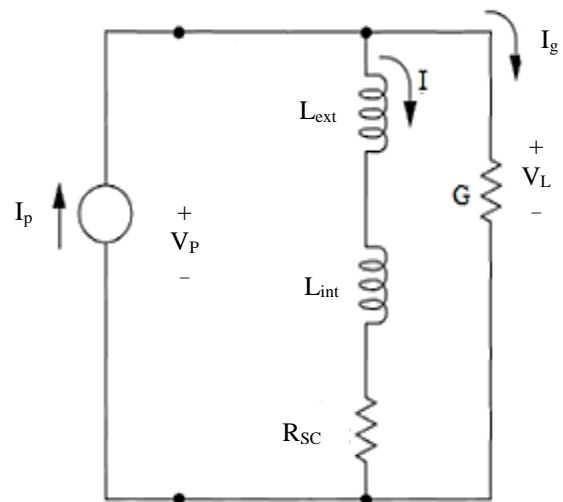
با استفاده از حل تحلیلی، نمودار ولتاژ بر حسب جریان برای نرخ جریان $3 AS^{-1}$ در شکل ۱۵ رسم و با نتیجه‌های تجربی مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که به دلیل القاییدگی پیچیه، $L di/dt$ ، جهش اولیه‌ای در ولتاژ مشاهده می‌شود و با افزایش جریان تا حد بحرانی، عبارت دوم در رابطه ۹ غالب می‌شود.



شکل ۱۵. رابطه‌ی بین ولتاژ و جریان برای نرخ جریان $3 AS^{-1}$.



شکل ۱۳. منحنی‌های مشخصه‌ی V-I برای پیچیهی ابرسانا با نرخ‌های افزایشی - کاهش‌ی متفاوت جریان.



شکل ۱۴. مدار الکتریکی معادل ابرسانا [۲۵].

القای مغناطیسی داخلی برای یک نوار رسانای معمولی با سطح مقطع مستطیلی به پهنای w و ضخامت t و طول l نیز چنین به دست می‌آید [۲۴].

$$L_{int} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left\{ \ln\left(\frac{2l}{w+t}\right) + 0,50049 + \left(\frac{w+t}{l}\right) \right\} \tag{۶}$$

بنابراین، مقدارهای L_{ext} ۰,۲۲ mH و L_{int} ۶,۵ μH به دست می‌آیند و در نتیجه خود القایی کل مدار $L = 0,226$ mH است. دیگر کمیت مدار معادل، R_{sc} است که چنین محاسبه می‌شود.

$$R_{SC} = R_c \left(\frac{1}{I_c(B, T)} \right)^{n(B, T)} \tag{۷}$$

۴. نتیجه‌گیری

مراجع

- [1] K. Sato, S. Kobayashi, T. Nakashima, Present status and future perspective of Bismuth-Based High-Temperature superconducting wires realizing application systems, *J. Appl. Phys.*, 51 (2012) 010006.
- [2] T. Masuda, H. Yumura, M. Watanabe, H. Takigawa, Y. Ashibe, C. Suzawa, H. Ito, M. Hirose, K. Sato, S. Isojima, C. Weber, R. Lee, J. Moscovic, Fabrication and installation results for Albany HTS cable, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 17 (2007) 1648-1651.
- [3] T. Masuda, H. Yumura, M. Ohya, T. Kikuta, M. Hirose, S. Honjo, T. Mimura, Y. Kito, K. Yamamoto, M. Ikeuchi, R. Ohno, A new HTS cable project in Japan, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 19 (2009) 1735-1739.
- [4] H. Kutami, T. Hayashida, S. Hanyu, C. Tashita, M. Igarashi, H. Fuji, T. Saitoh, Progress in research and development on long length coated conductors in Fujikura, *Physica C: Superconductivity*, 469 (2009) 1290-1293.
- [5] J. Schwartz, T. Effio, X. Liu, Q.V. Le, A.L. Mbaruku, H.J. Schneider-Muntau, T. Shen, H. Song, U.P. Trociewitz, X. Wang, H.W. Weijers, High field superconducting solenoids via high temperature superconductors, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 18 (2008) 70-81.
- [6] W. Yuanxi, Overview of steady state operation of HT-7 and present status of the HT-7U project *Nucl. Fusion*, 40 (2000) 1057-68.
- [7] G.S. Lee, J. Kim, S.M. Hwang, C.S. Chang, H.Y. Chang, M.H. Cho, B.H. Choi, K. Kim, S. Jardin, G.H. Neilson, H.K. Park, The design of the KSTAR tokamak, *Fusion Engineering and Design*, 46 (1999) 405-411.
- [8] B. Turck, TORE SUPRA: a tokamak with superconducting toroidal field coils-status report after the first plasmas, *IEEE Trans. Magn.*, 25 (1989) 1473-80.
- [9] T. Ando, S. Nishio, Design of the TF coil for a tokamak fusion power reactor with ybco tape superconductors, In 21st IEEE/NPS Symposium on Fusion Engineering SOFE, 05 (2005) 1-4.

این مقاله اثر میدان مغناطیسی، دما و شعاع انحنا بر روی جریان بحرانی سیم Bi-2223/AgMg را مورد بررسی قرار داد. نتایج به دست آمده برای جریان بحرانی در قطرهای خمش متفاوت نشان داد که کاهش شعاع انحنا باعث کم شدن جریان بحرانی می‌شود، به طوری که افت جریان در بازه‌ی قطرهای خمش $4/5$ تا 9cm حدود 10% است، اما افت عملکرد سیم در قطرهای بیش تر از 9cm قابل ملاحظه نیست. کاهش دمای کاری، افزایش قابل توجهی را در چگالی جریان بحرانی به دنبال دارد، به طوری که به ازای 19K کاهش دما، افزایشی در حدود 106% در جریان بحرانی ایجاد می‌شود. هم چنین نشان داده شد که برای پیچیده‌ی ابررسانا، نمودار تجربی ولتاژ-جریان با نتیجه‌های تحلیلی حاصل از مدار معادل در نظر گرفته شده، منطبق است.

انتخاب شعاع انحنا مناسب و دمای کاری بهینه در طراحی و ساخت هر سیستم ابررسانا نظیر آهن‌رباهای کوچک با حداقل توان خنک‌سازی برای ایجاد میدان‌های مغناطیسی قوی، ضروری است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در طراحی توکامک با قطر خمش بزرگ با استفاده از ابررسانای دما بالا، تقریباً هیچ گونه افت جریان بحرانی ناشی از انحنا ایجاد نمی‌شود اما اثر خود میدان مغناطیسی در افت جریان بسیار قابل ملاحظه است. برای حل این مشکل لازم است که تعداد زیادتری از پیچ‌های صفحه‌ای با تعداد دور کم تر در طراحی توکامک مورد استفاده قرار گیرد. از طرفی بهتر است به جای استفاده از حمام نیتروژن مایع، یک سامانه‌ی سردساز مناسب برای ایجاد دماهای پایین تر و در نتیجه میدان مغناطیسی قوی تر در کاربردهای هم‌جوشی هسته‌ای به کار گرفته شود.

پی‌نوشت‌ها

1. High Temperature Superconductor
2. Low Temperature Superconductor
3. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$
4. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_z$
5. Quench
6. Regenerative
7. Gifford-McMahon
8. LakeShore
9. Labview
10. Probe
11. Power Law
12. Nuclear Magnetic Resonance
13. Cold Head
14. File
15. Mills
16. Sheffield
17. Heater

- [10] D. Maisonnier, I. Cook, P. Sardain, R. Andreani, L. Di Pace, R. Forrest, L. Giancarli, S. Hermesmeyer, P. Norajitra, N. Taylor, D. Ward, A conceptual study of commercial fusion power plants, Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study, (2005).
- [11] K. Kaiho, K. Ohara, K. Agatsuma, T. Ohnishi, Discussion on the discrete D-shaped toroidal magnet, *Electrical engineering in Japan*, 108 (1988) 36-45.
- [12] M. Tinkham, Introduction to superconductivity, 2d ed., McGraw-Hill, (1996).
- [13] T. Sheahen, Introduction to high temperature superconductivity, Kluwer Academic Publishers, (2002).
- [14] A. Korpela, Geometry optimization and coil protection of conduction-cooled LTS and HTS magnets, Tampere University of Technology, Finland, (2003).
- [15] K. Osamura, S. Machiya, S. Ochiai, G. Osabe, K. Yamazaki, J. Fujikami, High strength/high strain tolerance DI-BSCCO tapes by means of pre-tensioned lamination technique, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 23 (2013) 6400504.
- [16] M. Breschi, M. Casali, N. Nayeli, C. Corona, P. Luigi Ribani, F. Trillaud, G. Nishijima, Dependence of critical current and quench energy of BSCCO-2223 tapes on bending diameter, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 26 (2016) 1-5.
- [17] D.T. Ryan, Critical current degradation in HTS wires due to cyclic mechanical strain, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 15 (2005) 3684–3687.
- [18] J.P. Voccio, O.O. Ige, S.J. Young, C.C. Duchaine, The effect of longitudinal compressive strain on critical current in HTS tapes, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 11 (2001) 3070–3073.
- [19] G. Nishijima, H. Kitaguchi, Y. Tshuchiya, T. Nishimura, T. Kato, Transport critical current measurement apparatus using liquid nitrogen cooled high- T_c superconducting magnet with variable temperature insert, *Review of Scientific Instruments*, 84 (2013) 015113.
- [20] D.M. Taylor, P.H. Damian, Relationship between the n-value and critical current in Nb_3Sn superconducting wires exhibiting intrinsic and extrinsic behavior, *Superconductor Science and Technology*, 18 (2005) S297.
- [21] R.W. Moses, W.C. Young, Analytic expressions for magnetic forces on sectored toroidal coils, In sixth symposium on engineering problems of fusion research, (1976).
- [22] F. Trillaud, H. Palanki, U.P. Trociewitz, S.H. Thompson, H.W. Weijers, J. Schwartz, Normal zone propagation experiments on HTS composite conductors, *Cryogenics*, 43, 3 (2003) 271-279.
- [23] F.W. Grover, Tables for the calculation of the inductance of circular coils of rectangular cross-section, *Journal of the Franklin Institute*, 195, 2 (1923) 246-248.
- [24] F.W. Grover, Inductance calculations: working formulas and tables, Courier Corporation, (2004).
- [25] J.D. Larson III, R. Mitchell, J.A. Good, J. Lopez, AC loss in Nb_3Sn superconducting cable-mechanisms and measurement, A/M Lab. Longview USA, HPL-95-119 (1995).