



مطالعه‌ی تجربی انتشار فرونشانی روی نوار ابررسانای دما بالای Bi-2223/AgMg

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

۱. پژوهشکده‌ی فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران - ایران

۲. گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه قم، صندوق پستی: ۳۷۱۶۱۴۶۶۱۱، قم - ایران

چکیده: از آن‌جا که فرونشانی موضعی، عامل ناپایداری حرارتی-الکتریکی در مگنت‌های ابررساناست، اگر انرژی موضعی از حد معینی که به آن حداقل انرژی فرونشانی (MQE) گفته می‌شود بیش‌تر شود، ناحیه‌ی عادی در ابررسانا منتشر خواهد شد. بنابراین، نرخ رشد ناحیه‌ی عادی به عنوان سرعت انتشار فرونشانی (v_q) عامل مهمی در آشکارسازی فرونشانی و حفاظت محسوب می‌شود. در این مقاله، با اعمال تپ‌های حرارتی موضعی، MQE به عنوان معیاری از پایداری، و v_q به عنوان کمیت خود-محافظی ابررسانا در برابر فرونشانی بر روی طول کوتاهی از نوار ابررسانای دما بالای Bi-2223/AgMg اندازه‌گیری شده است. علاوه بر این، وابستگی MQE و v_q به جریان کاری بررسی شد به طوری که با افزایش جریان، نرخ کاهش MQE و نرخ افزایش v_q به دست آمده است. این آزمایش‌ها تحت بخار نیتروژن و بدون اعمال میدان مغناطیسی انجام شده است.

کلیدواژه‌ها: نوار ابررسانای Bi-2223/AgMg، اختلال حرارتی موضعی، حداقل انرژی فرونشانی، سرعت انتشار ناحیه‌ی عادی، بخار نیتروژن

Experimental Study of Quench Properties on Bi-2223/AgMg High Temperature Superconducting Tape

M. Abdollahi Dargah*¹, N. Abdollahi Ghahi¹, J. Mahmoodi², N. Alinezhad¹

1. Plasma Physics 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: Since the local quench which induces electro-thermal instability if a local energy input exceeds a certain threshold called minimum quench energy (MQE), the normal zone propagates along the superconductor. Therefore, the rate of the normal zone spreading as a quench propagation velocity (v_q) is an important factor in the quench detection and protection. This paper focuses on the measurement of v_q as a self-protection parameter in a short sample of a high temperature superconducting Bi-2223/AgMg tape by applying the localized heat pulses, and MQE as a superconducting stability criterion. In addition, the current dependences of MQE and v_q were verified in which by increasing the transport current, the rate of decreasing of MQE and the rate of increasing of v_q were measured. These experiments have been done in nitrogen vapor without applying any magnetic field.

Keywords: Bi-2223/Ag Superconducting Tape, Local Heat Disturbance, Minimum Quench Energy, Quench Propagation Velocity, Nitrogen Vapor



۱. مقدمه

آمده است. انتخاب این شرایط با چشم‌انداز الگوسازی لایه‌های میانی یک مگنت پنکیکی طراحی شده است. در حالت سرمایشی شار واداشته و حتی حمام سرد، توان سرمایشی در لایه‌های میانی مگنت نسبت به لایه‌های بیرونی آن کم‌تر است، گویی تحت سرمایش بخار نیتروژن هستند و رفتار فرونشانی متفاوتی نسبت به لایه‌های بیرونی دارند. گستره‌ی جریان مورد بررسی از ۵۵ تا ۷۰A در نظر گرفته شده است که این بازه بیش از ۶۵٪ جریان بحرانی در دمای ۸۱K خواهد بود تا ضمن استفاده از ویژگی ابرسانی در ظرفیت بالای عبور جریان، مشخصه‌های فرونشانی و حد ایمنی ابرسانا برآورد شود.

۲. روش آزمایش

۱.۲ معرفی سیم ابرسانی مورد آزمایش

سیم مورد آزمایش از شرکت Bruker در آلمان خریداری شده است. این سیم، نواری از ابرسانی دما بالای پایه- بیسموت، با سطح مقطع $۳,۹۷\text{mm} \times ۰,۲۱۵\text{mm}$ است که با روش PIT^(۳) ساخته شده است. تعداد ۱۲۱ فیلامان ابرسانا از جنس سرامیک $(\text{Bi}_x\text{Sr}_y\text{Ca}_z\text{Cu}_w\text{O}_x)$ در ماتریسی از نقره قرار گرفته‌اند و غلاف این سیم از جنس نقره- منیزیم است، به طوری که ۳۰٪ از حجم سیم را ابرسانا تشکیل داده است (جدول ۱).

در آزمایش‌های اولیه، دمای بحرانی سیم ابرسانا به ازای جریان ۰,۴ A، حدود $T_c=۱۰۸\text{K}$ و جریان بحرانی در بازه‌ی دمایی ۶۳ تا ۸۲K اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود جریان بحرانی در دمای ۸۱ K حدود ۸۲ A است.

جدول ۱. اطلاعات کارخانه‌ی سازنده در مورد سیم ابرسانا Bi-۲۲۲۳/AgMg

نوع سیم	BHTS AgMg Bi-۲۲۲۳ HTS ۱۲۱
شرکت سازنده‌ی آلمانی	Brucker
هسته‌ی سرامیکی	Bi-۲۲۲۳
ماتریس هر فیلامان	Ag
ماتریس چند فیلامان	AgMg
تعداد فیلامان	۱۲۱
میانگین جریان بحرانی، در دمای ۷۷K	۱۰۳A
میانگین ضخامت	۰,۲۱۵ mm
میانگین پهنا	۳,۹۷ mm
سهم حجمی ابرسانا به کل	۳۰٪

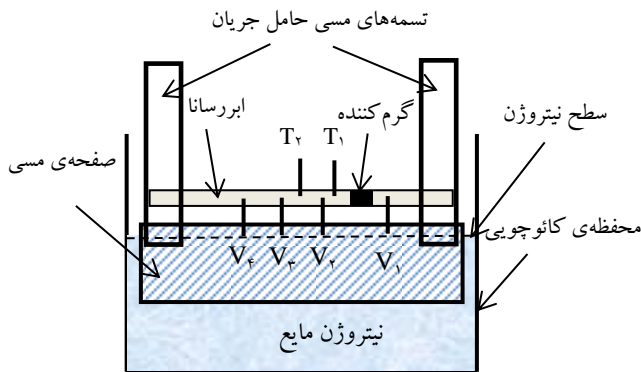
معیار برای تحقیق ایمنی در عملکرد آهن‌ربای ابرسانا، پایداری آن در برابر اختلال است [۱، ۲]. وقتی در آهن‌ربای ابرسانا اختلالاتی مانند پرش شار، حرکت سیم و شکست اپوکسی سبب افزایش دما به‌طور موضعی شوند [۳]، چنان‌چه افزایش دما تا حد بحرانی (T_c) ادامه یابد، آن ناحیه از حالت ابرسانی به حالت عادی (مقاومتی) گذار می‌کند و با رشد این ناحیه، پدیده‌ی فرونشانی رخ می‌دهد [۴]. کم‌ترین انرژی مولد ناحیه‌ی عادی انتشار، حداقل انرژی فرونشانی و نرخ رشد حجم ناحیه‌ی عادی، سرعت انتشار فرونشانی (v_q) نامیده می‌شوند که مشخصه‌های اصلی فرونشانی‌اند. کمیت MQE به عنوان معیاری از پایداری ابرسانی است، و v_q توانایی ذاتی ابرسانا در توزیع سریع گرما در ناحیه‌ی بزرگ‌تر است که به عنوان کمیت سنجش خود- محافظتی ابرسانا شناخته می‌شود [۵، ۶]. هرچه سرعت انتشار بیش‌تر باشد، امکان تخلیه‌ی انرژی ذخیره شده‌ی مغناطیسی در حجم بزرگ‌تری از سیم پیچ ابرسانا فراهم می‌شود و آثار مخرب ناشی از فرونشانی کاهش می‌یابد.

در سال‌های اخیر پژوهش‌های گوناگونی بر روی پدیده‌ی فرونشانی انجام شده است [۷-۱۴]. نتایج آنها نشان می‌دهند که با افزایش دمای کاری، ظرفیت گرمایی افزایش قابل توجهی خواهد داشت، بنابراین انتظار می‌رود آهن‌ربای ابرسانی دما بالا $\text{HTS}^{(۱)}$ ، پایداری حرارتی بالاتری نسبت به ابرسانی دما پایین $\text{LTS}^{(۲)}$ داشته باشد. بنابراین، MQE در آنها بیش‌تر، ولی در مقابل سرعت انتشار ناحیه‌ی عادی بسیار کوچک‌تر است [۱۵-۱۸] که تاکنون یکی از چالش‌های بزرگ در کاربرد ابرسانی دما بالا بوده است [۱۹، ۲۰]. به‌نظر می‌رسد با توجه به ویژگی‌های خاص HTS (مثلاً میدان مغناطیسی بحرانی بالاتر در مقایسه با LTS)، استفاده از آن برای مگنت راکتور گداخت هسته‌ای مناسب‌تر باشد [۲۱]. این‌رو مطالعات فرونشانی با توجه به آثار مخرب ناشی از وقوع آن، اهمیت ویژه‌ای خواهد داشت [۱].

در این مقاله، مشخصه‌های فرونشانی، MQE و v_q روی نمونه‌ی خاص ابرسانی دما بالای Bi-۲۲۲۳/AgMg، در شرایط پایداری تبریدی تحت بخار نیتروژن در دمای ۸۱K اندازه‌گیری شده، و وابستگی مشخصه‌ها به جریان کاری به‌دست



استفاده شده است که با نرم افزار Labview قابل کنترل‌اند. هم- چنین یک منبع تغذیه‌ی D.C. با توان ۶۰۰W (۲۰A-۳۰V) برای ایجاد تپ ولتاژ به کار گرفته شده است.



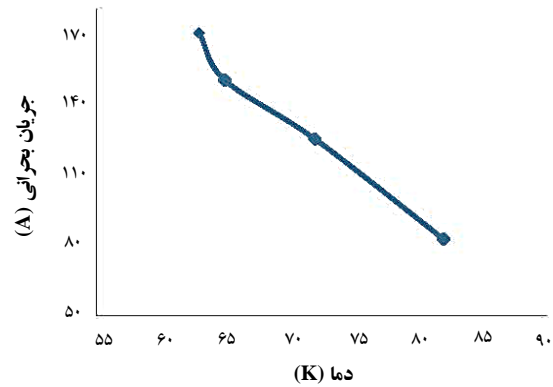
شکل ۲. محل قرارگیری گرم کننده، پروب‌های ولتاژ V_1 تا V_4 ، دو حسگر دما T_1 و T_2 و تسمه‌های مسی حامل جریان بر روی نوار ابرسانا.

۳.۲ فرایند اندازه‌گیری حداقل انرژی فرونشانی و سرعت انتشار فرونشانی

معادله‌ی اساسی یک‌بُعدی در بررسی رفتار فرونشانی در سیم حامل جریان عبارت است از [۲۲]:

$$\rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k(T) \frac{\partial T}{\partial t}) + q_J + q_{ext} + q_c \quad (1)$$

که در آن T دما، t زمان، ρ چگالی جرمی، C_p گرمای ویژه در فشار ثابت، k ضریب هدایت حرارتی، q_J چگالی توان گرمایش ژول و q_c چگالی توان سرمایش است. q_{ext} چگالی توان ناشی از اختلال است که فقط در موضع اختلال، غیر صفر است. مجموع عوامل گرمایش ($Q_g = q_J + q_{ext}$) گرمای تولیدی در ناحیه‌ی عادی، و مابقی جمله‌های معادله‌ی (۱) گرمای حذفی (Q) از آن ناحیه نامیده می‌شوند. معادله‌ی تعادل حرارتی و رابطه‌ی گرمای ایجاد شده و گرمای حذف شده از ناحیه‌ی عادی مبنای سنجش پایداری است. چنانچه عوامل حذف گرما به گرمای تولیدی غلبه کند ($Q_g < Q$)، ناحیه‌ی عادی به حالت ابرسانایی برمی‌گردد که به آن پدیده‌ی بازایی^(۵) گفته می‌شود. در غیر این- صورت ($Q_g > Q$)، دما بالا می‌رود و پدیده‌ی فرونشانی رخ می‌



شکل ۱. نمودار جریان بحرانی بر حسب دما (خطای اندازه‌گیری $\pm 1 A$).

۲.۲ چیدمان آزمایش

طول نمونه‌ی مورد آزمایش ۱۲cm است. برای مشاهده‌ی پدیده‌ی فرونشانی و اندازه‌گیری سرعت انتشار آن از چهار پروب ولتاژ، V_1 تا V_4 ، در فواصل ۱۷ mm از یکدیگر و دو حسگر دما، T_1 و T_2 استفاده شد. در شکل ۲ محل پروب‌ها، گرم کننده^(۴) و

حسگرهای دما نشان داده شده‌اند. برای ایجاد اختلال گرمایی موضعی، مقاومت 50Ω به طول ۸ mm به عنوان گرم کننده روی سیم قرار داده شد. حسگرهای دما از نوع مقاومتی Pt₁₀₀ و با دقت اندازه‌گیری $\pm 0.1 K$ است. برای هدایت جریان، ۱/۵ cm از دو انتهای نمونه‌ی ابرسانا به دو تسمه‌ی مسی متصل شده است که این تسمه‌ها نقش نگه‌دارنده را نیز دارند. برای بهبود در اتصالات الکتریکی و حرارتی، از لایه‌های نازک ایندیم استفاده شد. به منظور تنظیم فاصله‌ی نمونه از سطح نیتروژن مایع، مجموعه روی پایه‌ی متحرکی نصب شد تا نمونه‌ی ابرسانا تحت بخار- نیتروژن سرد شود و به دمای ثابتی برسد. برای صلب بودن مجموعه، یک صفحه‌ی مسی که با روکش کاپتون عایق الکتریکی شده بود، به دو انتهای تسمه‌های مسی حامل جریان متصل شد. طرح‌واره‌ی از چیدمان آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای اعمال جریان به نمونه، از منبع جریان ۱۶-۲۰۰ DESC، با بازه‌ی ولتاژ و جریان به ترتیب، ۰ تا ۱۶V و ۰ تا ۲۰۰A، و برای اندازه‌گیری ولتاژ از مولتی‌متر ۸۲۶۱ GDM با دقت $1 \mu V$ ،



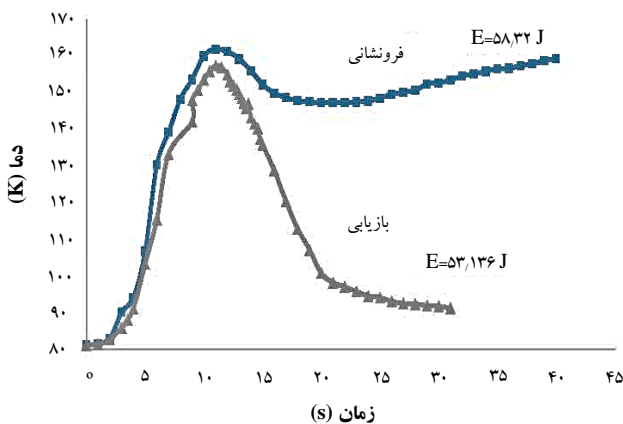
مرجع (V_{ref}) در نمودار تغییرات زمانی ولتاژ در مکان‌های مختلف تعیین می‌شود. ولتاژ مرجع در ناحیه‌ای از این نمودار که تقریباً با هم موازی‌اند، انتخاب می‌شود. سپس اختلاف زمانی (Δt) به ازای ولتاژ مرجع اندازه‌گیری می‌شود و از تقسیم فاصله‌ی پروب‌ها (L) به بازه‌ی زمانی مربوطه، سرعت انتشار فرونشانی به دست می‌آید [۲۲].

۳. نتایج و بحث

۱.۳ اندازه‌گیری حداقل انرژی فرونشانی

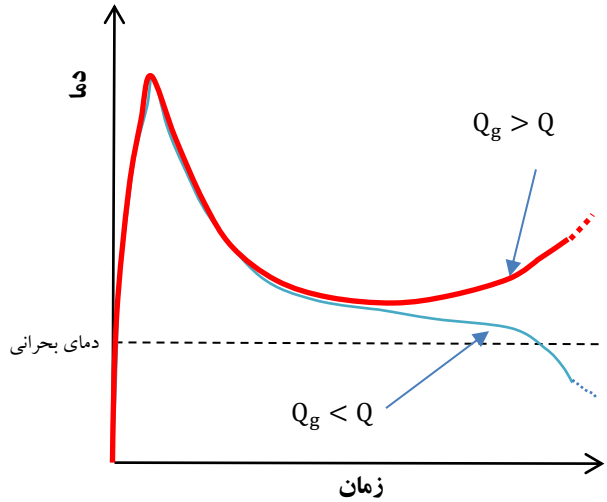
شکل ۴ تغییرات زمانی دما را به ازای $I_{op}=55\text{ A}$ ، $T_{op}=81\text{ K}$ نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱، جریان کاری حدود ۶۷٪ جریان بحرانی در این دما است. زمان تپ ولتاژ $t_{pulse}=9\text{ s}$ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که نمودار شکل ۴ نشان می‌دهد، به ازای انرژی اختلال $E=53,136\text{ J}$ ، بعد از قطع گرم‌کننده، توان سرمایشی به گرمایش حاصل از گرم‌کننده و گرمایش ژول (Q_g) در ناحیه‌ی مقاومتی غلبه، و ناحیه‌ی عادی شکل گرفته به حالت ابرسانایی بازیابی می‌کند. زمانی که انرژی پالس به $E=58,32\text{ J}$ می‌رسد، با غلبه‌ی گرمایش حاصل، افزایش دما بعد از قطع گرم‌کننده بر روی سیم ادامه می‌یابد. بنابراین، ناحیه‌ی عادی به وجود آمده منتشر، و نواحی دیگر سیم هم مقاومتی می‌شوند (شکل ۵). در این صورت فرونشانی رخ می‌دهد و حداقل انرژی فرونشانی در بازه‌ی

$$53,136\text{ J} < MQE < 58,32\text{ J} \text{ به دست می‌آید.}$$



شکل ۴. تغییرات زمانی دما در شرایط فرونشانی $V_{pulse}=18\text{ V}$ و بازیابی ($V_{pulse}=17,2\text{ V}$) (شرایط کاری: $T_{op}=81\text{ K}$ ، $I_{op}=55\text{ A}$).

دهد. در سامانه‌ای که ابرسانا به‌طور مستقیم با ماده‌ی سرماساز در ارتباط است، حتی بعد از آن که فرونشانی رخ می‌دهد، این سامانه می‌تواند به حالت ابرسانایی برگردد. این ویژگی به توانایی سامانه (ابرسانا و سردکننده) برای حذف گرما از هر نقطه‌ی داغ اولیه بستگی دارد. نمایی از گذار دمایی در دو حالت فرونشانی و بازیابی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. مقایسه‌ی گذار دمایی در حالت فرونشانی ($Q_g > Q$) و بازیابی ($Q_g < Q$).

برای اندازه‌گیری MQE، به ازای یک دمای کاری مشخص ($T_{op} < T_c$)، جریانی کم‌تر از جریان بحرانی در آن دما ($I_{op} < I_c(T_{op})$) در نظر گرفته می‌شود، سپس تپ ولتاژی (V_{pulse} ، t_{pulse}) برای ایجاد اختلال حرارتی موضعی تنظیم می‌شود. ابتدا دامنه‌ی تپ پایین در نظر گرفته می‌شود. چنان‌چه بعد از قطع تپ ولتاژ، مقادیر ولتاژ و دما روی نمونه‌ی ابرسانا تا مقادیر

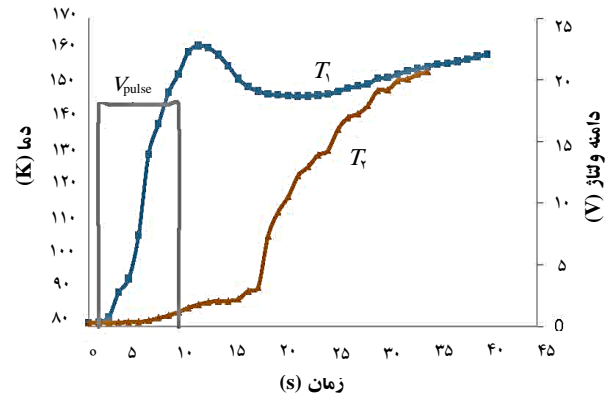
اولیه اُفت کرد، آن‌گاه برای فراهم شدن شرایط فرونشانی، با افزایش ولتاژ گرم‌کننده، این روند تکرار می‌شود. این فرایند تا زمانی ادامه می‌یابد که افزایش دما و ولتاژ روی نمونه‌ی ابرسانا بدون بازیابی ادامه پیدا کنند. انرژی اختلال در مرز بازیابی و فرونشانی، معادل MQE به ازای دما و جریان کاری معین است [۷-۱۴].

روش استاندارد برای اندازه‌گیری سرعت فرونشانی براساس ردیابی مکانی و زمانی ولتاژ این‌گونه است که ابتدا یک ولتاژ



۹۰ A تخمین زده می‌شود که تقریباً ۱۰٪ بیش‌تر از جریان بحرانی است.

در شکل ۸، وابستگی سرعت انتشار فرونشانی به جریان نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ۲۷ درصدی جریان، سرعت انتشار فرونشانی حدود ۹۴٪ افزایش می‌یابد. به طور خاص سرعت انتشار فرونشانی در یک نمونه مقاله‌ی حاضر است، به ازای ۶۷٪ جریان بحرانی خود، حدود ۴ mm/s، و به ازای ۱۳٪ افزایش جریان، حدود ۲ برابر گزارش شده است [۱۰].

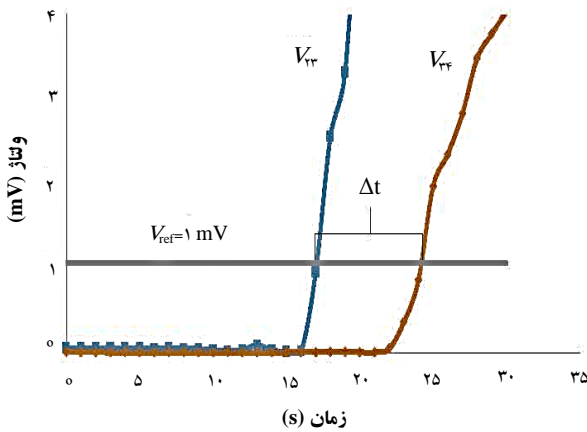


شکل ۵. تغییرات زمانی دمای T_1 و T_2 به ازای انرژی اختلال $E=58,32 \text{ J}$.

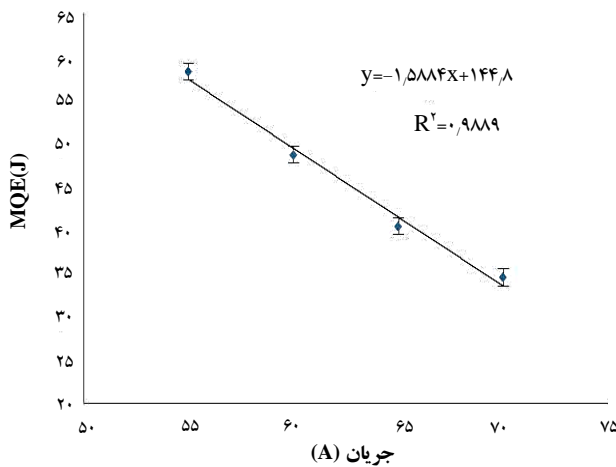
۲.۳ اندازه‌گیری سرعت انتشار فرونشانی

شکل ۶، نمودار اختلاف پتانسیل $V_{pp}=V_p-V_r$ و $V_{rr}=V_r-V_r$ را روی سیم ابرسانا نشان می‌دهد. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، برای محاسبه‌ی سرعت انتشار بر روی نمودار ولتاژ در شکل ۶، ولتاژ مرجع $V_{ref}=1 \text{ mV}$ در نظر گرفته می‌شود که در آن $\Delta t=6/8$ است. با توجه به این که فاصله‌ی پروب‌ها از یکدیگر $L=17 \text{ mm}$ است، سرعت انتشار به ازای شرایط کاری مذکور، حدود

$v_q \approx 2/5 \text{ mm/s}$ به دست می‌آید. سرعت انتشار فرونشانی در نمونه‌های HTS به طور نوعی حدود ۱ تا 10 mm/s اندازه‌گیری شده است [۱۰، ۱۳، ۱۴] و در نمونه‌های LTS حدود ده تا هزار برابر، بزرگ‌تر است [۶].



شکل ۶. تغییرات زمانی ولتاژ در مکان‌های مختلف برای اندازه‌گیری v_q به ازای ولتاژ مرجع ۱ mV (شرایط اولیه: $T_{op}=81 \text{ K}$ ، $E_{pulse}=58,32 \text{ J}$ ، A ، $I_{op}=55$).



شکل ۷. انرژی فرونشانی برحسب جریان در بازه‌ی ۵۵ تا 70 A در دمای $T_{op}=81 \text{ K}$.

۳.۲ وابستگی انرژی فرونشانی و سرعت انتشار فرونشانی به جریان مشخصه‌های فرونشانی به شرایط کاری از جمله جریان، بستگی دارند. شکل ۷، وابستگی انرژی فرونشانی به جریان را در دمای ثابت 81 K نشان می‌دهد به طوری که جریان بحرانی حدود 82 A است. نتایج نمودار شکل ۷ نشان می‌دهد که در بازه‌ی ۶۷٪ تا ۸۵٪ جریان بحرانی، حداقل انرژی فرونشانی بیش از ۴۰٪ کاهش یافته است، بنابراین پایداری ابرسانایی در جریان‌های نزدیک به جریان بحرانی اُفت قابل توجهی به همراه دارد. خط برازش با ضریب تعیین $0,9945$ تطابق خیلی خوب با نتایج دارد. با استفاده از معادله‌ی این خط، $(y=-1,5884x+144,8)$ اندازه‌ی جریان فرونشانی (جریانی که ممکن است منجر به فرونشانی برگشت-ناپذیر شود [۱۰]) حدود



نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که با افزایش جریان، MQE کاهش می‌یابد. یعنی با افزایش جریان، حد پایداری ابررسانا در برابر اختلالات موضعی اُفت می‌کند و امکان وقوع فرونشانی افزایش می‌یابد. اندازه‌گیری سرعت انتشار ناحیه‌ی عادی نشان می‌دهد که در صورت وقوع فرونشانی، توانایی ذاتی این ابررسانا برای حفاظت و بازدهی آشکارسازی کم می‌شود، ولی با افزایش جریان، افزایش می‌یابد. با توجه به عدم هم‌سویی تغییرات MQE و V_q نسبت به جریان، لازم است جریان بهینه‌ای انتخاب شود.

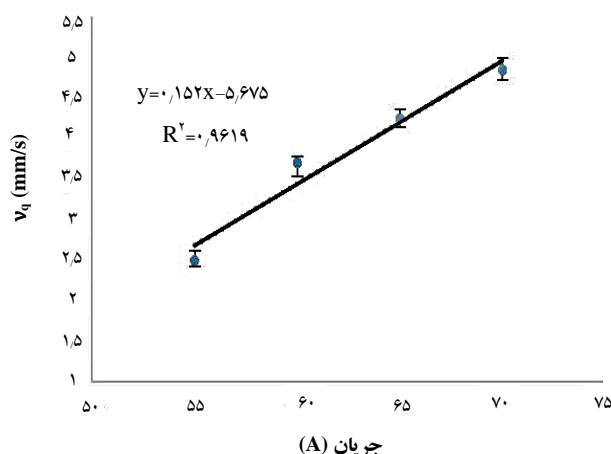
نتایج نشان می‌دهند که به ازای جریان‌های کم‌تر از ۵۰٪ جریان بحرانی، انتشار فرونشانی مشاهده نمی‌شود. در این شرایط، بروز اختلالات ایستا منجر به انباشت انرژی و در نتیجه افزایش بیش از حد دما در موضع اختلال می‌شود و نمونه‌ی ابررسانا آسیب می‌بیند. با توجه به پایداری قابل قبول HTS، با فراهم نمودن سامانه‌ی سرمایشی بهینه و طراحی ابزار تشخیصی مناسب فرونشانی، می‌توان جریان‌های بالا (بیش از ۷۰٪ جریان بحرانی) را به عنوان جریان کاری برای این نمونه‌ی ابررسانا انتخاب کرد.

پی‌نوشت‌ها

1. High Temperature Superconducting
2. Low Temperature Superconducting
3. Powder in Tube
4. Heater
5. Recovery

مراجع

- [1] Y. Iwasa, Stability and protection of superconducting magnets: A discussion, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15**(2) (2005) 1615-1620.
- [2] Z.M. Bai, C.L. Wu, J.X. Wang, Thermal Stability Analysis of High Temperature Superconducting Magnet Coils under Overcurrent Pulses, *physica C: Superconductivity* **443**(1) (2006), 33-37.
- [3] M. Wilson, Superconducting Magnets, Oxford University Press (1983) 68-71.
- [4] A. Devred, Quench origins, *AIP Conference Proceedings* **249**(2) (1992) 1262-1308.
- [5] Y. Iwasa, HTS magnets: stability; protection; cryogenics; economics; current



شکل ۸. سرعت انتشار فرونشانی، برحسب جریان در بازه‌ی ۵۵ تا ۷۰A در دمای ثابت $T_{op}=81$ K.

از معادله‌ی خط برازش به دست آمده با ضریب تعیین ۰٫۹۶۱۹ در شکل ۸ می‌توان حداقل جریان انتشار را تخمین زد. اگر جریان کاری کم‌تر از حداقل جریان انتشار باشد، حتی اگر انرژی اختلال بالا هم باشد، ناحیه‌ی عادی منتشر نمی‌شود [۱۰]. بنابراین در جریان‌های کم‌تر از حداقل جریان انتشار، ممکن است دما در حجم کوچکی از سیم تا نقطه‌ی ذوب بالا رود. از معادله‌ی خط برازش، حداقل جریان انتشار فرونشانی ۳۷A به دست می‌آید. بنابراین جریان‌های پایین با وجود پایداری ابررسانا (مطابق شکل ۷)، ممکن است در اثر اختلال به دلیل عدم انتشار فرونشانی ابررسانا بسوزد.

۴. نتیجه‌گیری

مطلوب است در طراحی آهن‌ربای ابررسانا، برای دستیابی به میدان مغناطیسی قوی، از بیش‌ترین ظرفیت چگالی جریان ابررسانا استفاده شود. در عین حال برای حفظ عملکرد ایمن و پایدار آهن‌ربای ابررسانا، شناخت رفتار فرونشانی و مشخصه‌های آن در چگالی جریان‌های نزدیک به جریان بحرانی بسیار اهمیت دارد.

در این مقاله، با استفاده از تپ موضعی ولتاژ، حداقل انرژی فرونشانی بر روی نمونه ابررسانای دما بالای Bi-۲۲۲۳/AgMg در دمای ۸۱ K و در بازه جریان ۵۵ تا ۷۰A اندازه‌گیری شد.



- [8] W. Pi, X. Shi, J. Dong, and Y. Wang, Experimental Investigation on Quench Characteristics of NbTi/Bi2223 Hybrid Superconductor (2015).
- [9] H. Bajas, M. Bajko, B. Bordini, L. Bottura, S. Izquierdo Bermudez, J. Feuvrier, A. Chiuchiolo, J. C. Perez, and G. Willering, Quench Analysis of High-Current-Density Nb₃Sn Conductors in Racetrack Coil Configuration, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25(3)** (2015) 1-5.
- [10] C.L. Wu, Z.M. Bai, J.H. Li, J.X. Wang, Normal-zone propagation velocities in Bi-2223/Ag superconducting multifilament tape, *Physica C: Superconductivity* **386** (2003) 166-169.
- [11] E. Martinez, F. Lera, M. Martinez-Lopez, Y. Yang, S.I. Schlachter, P. Lezza, P. Kovac, Quench development and propagation in metal/MgB₂ conductors, *Supercond. Sci. Technol.* **19(1)** (2006) 143.
- [12] T. Huang, E. Martínez, C. Friend, and Y. Yang, Quench characteristics of HTS conductors at low temperatures, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **18(2)** (2008) 1317-1320.
- [13] Z. Zhong, H.S. Ruiz, L. Lai, Z. Huang, W. Wang, T. Coombs, Experimental study of the normal zone propagation velocity in double-layer 2G-HTS wires by thermal and electrical methods, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25(3)** (2015) 1-5.
- [14] M. Lebioda, J. Rymaszewski, Analysis of normal zone propagation in superconducting tapes initiated by thermal disturbances, *Journal of Physics: Conference Series.* **709** (2016) 012011.
- [15] M. Abdollahi, N. Alinejad, J. Mahmoodi, N. Abdollahi, Study of Quench and Its Characterization on High Temperature Superconducting Bi-2223/Ag Tape, *J. of Nucl. Sci. and Tech.* **79** (2017) 12-19 (In Persian).
- stability/protection activities at FBML, *Cryogenics* **43(3)** (2003) 303-316.
- [6] Y. Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets, 2th edition, Springer Science (2009).
- [7] M. Breschi, L. Trevisani, M. Boselli, L. Bottura, A. Devred, P.L. Ribani, and F. Trillaud, Minimum quench energy and early quench development in NbTi superconducting strands, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17(2)** (2007) 2702-2705.
- [16] S.B. Kim, A. Ishiyama, H. Okada, S. Nomura, Introduction to High Temperature Superconductivity, Kluwer Academic Publishers (2002) 360-363.
- [17] J.H. Joo, H. Sano, T. Kadota, S.B. Kim, S. Murase, Y. K. Kwon, Y.S. Jo, Study on quench protection method with regards to normal transition behavior for HTS coil. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **20(3)** (2010) 2027-2030.
- [18] A. Devred, Practical Low-Temperature Superconductors for Electromagnets, CERN–2004–006 12 July 2004 Accelerator Technology Department.
- [19] J.H. Joo, H. Sano, T. Kadota, S.B. Kim, S. Murase, Y. K. Kwon, Y.S. Jo, Study on quench protection method with regards to normal transition behavior for HTS coil. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **20(3)** (2010) 2027-2030.
- [20] D. Colangelo, B. Dutoit, Impact of the Normal Zone Propagation Velocity of High-Temperature Superconducting Coated Conductors on Resistive Fault Current Limiters, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25(2)** (2015) 1-8.
- [21] Zi. Melhem, High temperature superconductors (HTS) for energy applications. Elsevier (2011).
- [22] R. Bellis and Y. Iwasa, Quench Propagation in High T_c Superconductors, *Cryogenics* **34(2)** (1994) 129-144.

