

مطالعهی پدیدهی فرونشانی و مشخصه یابی آن بر روی نوار ابررسانای دمابالای Bi-2223/Ag

مهناز عبدالهی در گاه^{*۱}، ناصر علینژاد^۱، جعفر محمودی^۲، نیره عبداللهی قهی^۱ ۱. پژوهشکدهی فیزیک پلاسما و گداخت هستهای، پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۱۳۱۹–۱۴۳۹۹، تهران ـ ایران ۲. گروه فیزیک، دانشکدهی علوم پایه، دانشگاه قم، صندوق پستی: ۳۷۱۶۱۴۶۶۱۱، قم ـ ایران

چکیدی: امروزه، کاربرد مگنتهای ابررسانای دمابالا به دلیل بهبود کیفیت سیم ابررسانا، به واقعیت تبدیل شده است. برای طراحی مگنت ابررسانای ایمن، آگاهی دقیق از فرایند گذار ابررسانایی به مقاومتی (فرونشانی) بسیار مهم است و معمولاً این گذار با قانون توان توصیف می شود. در این مقاله، پدیده ی فرونشانی و انتشار آن بر روی طول کوتاهی از نوار ابررسانای Bi-2223/Ag با به کارگیری پالس حرارتی موضعی و استفاده از شبیه ازی یک بعده ی برنامه ی و انتشار آن بر روی طول کوتاهی از نوار ابررسانای Bi-2223/Ag با به کارگیری پالس حرارتی موضعی و استفاده از شبیه سازی یک بعدی با برنامه ی فرونشانی و انتشار آن بر روی طول کوتاهی از نوار ابررسانای Bi-2223/Ag با به کارگیری پالس حرارتی موضعی و استفاده از شبیه سازی یک بعدی با برنامه ی 4.4 MQE و مول کوتاهی از نوار ابررسانای قرن است. حداقل انرژی لازم برای فرونشانی (MQE) و سرعت انتشار آن (VMPz)، دو مشخصه ی فرونشانی و دما، نرخ کاهش MQE به عنوان عامل دو مشخصه ی فرونشانی و دما، نرخ کاه ش MQE به عنوان عامل یا یا یا در این از این مرون و دما، نرخ کاه شیک ای می به عنوان عامل با یا یا در این مرونشانی و دما، نرخ کاه شی MQE به عنوان عامل دو مشخصه ی فرونشانی و دما، نرخ کاه شی MQE به عنوان عامل دو مشخصه ی فرونشانی و دما، نرخ کاه شی MQE به عنوان ای ای یا یا در این جا، با افزایش جریان و دما، نرخ کاه شی MQE به عنوان عامل پایداری و نونشانی و دما، نرخ کاه ش

کلیدواژه ها: نوار ابررسانای Bi-2223/Ag اختلال حرارتی موضعی، حداقل انرژی فرونشانی، سرعت انتشار ناحیهی نرمال، شبیه سازی

Study of Quench and Its Characterization on High Temperature Superconducting Bi-2223/Ag Tape

M. Abdollahi Dargah^{*1}, N. Alinezhad¹, J. Mahmoodi², N. Abdollahi Ghahi¹ 1. Plasma Physics and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, 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 superconductor magnet applications have become a reality due to increases in conductor performance. Detailed knowledge of the superconducting to resistivity transition (quench) process is essential and usually this transition is described by power law. In this paper, the quench and the process of quench propagation are studied in a short sample of Bi-2223/Ag superconducting tape by applying localized heat pulses and using 1D simulation with the Comsol multiphysics 4.4 program. The minimum quench energy (MQE) and quench propagation velocity (v_{MPZ}) are two important parameters for the stability and protection of a superconducting magnet. Hear, by increasing the current and temperature, the MQE decreasing rate is investigated as a superconducting stability factor. Moreover, the changing rate of the normal zone propagation velocity is studied as a self-protection parameter against the quenching.

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

*email: mnabdollahi@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۲/۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۹/۶



۱. مقدمه

در سال های اخیر سیم های ابررسانای دما بالا به ویژه $HBa_2Cu_3Ox (YBCO)$ و $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3Ox (Bi-2223)$ پیشرفت و توسعه همراه بودهاند [۱، ۲]. این پیشرفت شامل بهبود کیفیت سیم در برابر اختلالات غیرقابل اجتناب در حین کار است. هنگامی که عوامل مختلفی مانند پرش شار، حرکت سیم و شکست اپوکسی، دمای ابررسانا را به طور موضعی افزایش میدهند، نقطهی داغ(۱) تشکیل می شود [۳]. با ادامهی افزایش دما تا حد بحرانی (T_C)، در آن ناحیه از حالت ابررسانایی به حالت نرمال (مقاومتی) گذار رخ میدهد و با رشد این ناحیه، پدیدهی فرونشانی اتفاق میافتد. کم ترین انرژی که بتواند تحريك كنندهي فرونشاني شود، حداقل انرژي فرونشاني ناميده می شود [۳، ۴]. با به کار گیری ابررسانای دما بالا در صنعت و فناوری، به خصوص ساخت مگنت های ابررسانا، مطالعات فرونشانی با توجه به آثار مخرب ناشی از وقوع آن، اهمیت ويژهاي مييابد [۵]. در سالهاي اخير، پژوهش هاي گوناگوني بر روی پدیده یفرونشانی انجام شده است [۶-۱۳]. نتایج نشان میدهند که رفتار فرونشانی در ابررسانای دمابالا، متفاوت از ابررسانای دما پایین ^(۲)(LTS) است. در واقع، HTSها در برابر اختلال موضعي، نسبت به LTSها بسيار پايدار ترند ولي در مقابل، سرعت انتشار ناحیهی نرمال در آنها یک تا سه مرتبه کوچک تر است. از نظر تجربی، اندازه گیری این مشخصه ها بر روی نمونههایی که در آزمایشگاه با ابعاد کوچک ساخته می شوند، مشکل است. از اینرو، روش عددی و شبیهسازی، امکان مشخصهیابی فرونشانی را به منظور دستیابی به نمونهی بهتر، بـه شكل ساده ترى فراهم ميكند [۱۴–۱۷].

نوع مواد تشکیلدهندهی کامپوزیت ابررسانا، درصد مواد غیرابررسانا و نوع آنها، تندی گذار و شرایط کاری مربوط به کاربرد موردنظر، بر مشخصههای فرونشانی مؤثرند و سبب میشوند تا مقادیر مشخصه، منحصر به همان ماده و شرایط باشد [۱۹–۱۹].

در سالهای اخیر، مشخصه های حداقل انرژی فرونشانی و سرعت ناحیهی نرمال بر روی نمونه هایی از نوع کامپوزیت ابررسانای پایه بیسموت که در ماتریسی از نقره قرار دارد با استفاده از شبیه سازی در مدهای سرمایشی متفاوت تخمین زده شده است. در برخی از آن ها، تندی گذار ماده در نظر گرفته

نشده است و یا هنگام بررسی سرعت انتشار در دماهای مختلف، تغییر جریان بحرانی برحسب دما وارد نشده است [۱۳، ۱۹، ۲۰]. در این مقاله، مشخصهیابی فرونشانی بر روی کامپوزیت Bi-2223/Ag انجام می شود که در آن از قانون توان برای اندازه گیری انرژی فرونشانی استفاده شده است. بنابراین اثر تندی گذار در رفتار فرونشانی در نظر گرفته می شود. هم چنین وابستگی MQE و VMPZ به دما و جریان در شرایطی که فقط دو سر نمونه به منبع سرد متصل اند، بررسی می شود.

۲. تئوری و روش محاسباتی

معادلهی اساسی یکیعدی در بررسی رفتار فرونشانی در سیم حامل جریان عبارت است از [۲۱]:

$$\rho C_{p}(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k (T) \frac{\partial T}{\partial x}) + q_{J} + q_{ext} + q_{c} \quad (1)$$

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 p_c چگالی توان سرمایش است. q_{ext} چگالی توان ناشی از اختلال است که فقط در حجم V از نمونهی ابررسانا، غیر صفر است. فقط زمانی که انرژی اختلال به اندازهای بزرگ باشد تا حداقل ناجیهی انتشار (MPZ) را فراهم کند، فرونشانی آغاز میشود. اگر ناجیهی نرمال تشکیل شده از اختلال، کم تر از MPZ باشد، رشد اتفاق نمی افتد و به حالت ابررسانا بازیابی^(۳) می شود. در غیر این صورت، افزایش فزایندهی دما و رشد ناجیهی نرمال (فرونشانی) ادامه می یابد [۴]. دو کمیت حداقل انرژی لازم برای آغاز فرونشانی (MQE) و حداقل ناحیه انتشار انرژی لازم برای آغاز فرونشانی (MQE) و حداقل ناحیه انتشار انرژی لازم برای آغاز فرونشانی (MQE) او مراقل ناحیه انتشار انرژی لازم برای آغاز فرونشانی (MQE) او مراقل ناحیه انتشار انرژی لازم برای آغاز فرونشانی (MQE) و مراقل ناحیه انتشار

یکی از مشخصه های فرونشانی، سرعت انتشار آن است و به لحاظ کمک در آشکارسازی و جلو گیری از انباشت انرژی موضعی اهمیت زیادی دارد. به طور کلی، سرعت بالا منجر به رشد سریع ناحیهی نرمال، آزادسازی انرژی مغناطیسی ذخیره شدهی مگنت در حجم بزرگتر، و کاهش خطر فرونشانی مخرب می شود. رابطهی کلی سرعت انتشار ناحیهی نرمال، VMPZ به صورت زیر است [۲۲]:

$$V_{MPZ}(T) \propto \frac{1}{C_{p}(T)} \sqrt{q_{J}(T)}$$
(Y)

ظرفیت گرمایی مواد در دمای بین ۴/۲ و ۷۷ %، به طور نوعی، سه برابر می شود [۲۳]. بنابراین، برای بالا بردن دمای مقدار مشخصی از ابررسانا در دمای کاری ۲۷ % انرژی بیش تری نسبت به دمای کاری ۲۸ ۴/۲ لازم است. در نتیجه، ابررسانای دما بالا در مقایسه با ابررسانای دما پایین، پایدارتر است ولی در صورت بروز فرونشانی، احتمال مخرب بودن آن بیش تر می شود. زیرا سرعت انتشار ناحیهی نرمال در HTS کند است و ممکن است دمای حجم کوچکی از سیم قبل از آن که آشکار شود، تا نقطهی ذوب بالا رود.

با توجه به وابستگی دمایی کمیتها، حل معادلهی (۱) پیچیده است. به همین دلیل، به استفاده از روش های شبیه سازی در کنار مطالعات تحلیلی و تجربی توجه شده است. در این مقاله براساس روش عنصر محدود^(۴) و با استفاده از کد مقاله براساس روش عنصر محدود^(۴) و با استفاده از کد مقاله میشود.

۱.۲ تقسیم جریان

در فرایند فرونشانی، یک پدیدهی مهم بـه دلیـل ذات کـامپوزیتی سيم ابررسانا رخ ميدهد كه وقوع تقسيم جريان بين حالتهاي ابررسانایی و نرمال است. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود، تا زمانی که دمای سیم، زیر دمای تقسیم جریان (T_{cs}) باشد، سیم کاملاً ابررسانا خواهد بود و گرمایشی وجود نخواهـد داشت، زیرا هیچ جریانی از ماتریس عبور نمی کند. در *T*_{cs}، جريان كارى دقيقاً برابر با جريان بحراني سيم، وابسته به T_{cs}، از $I_{\rm c}(T)$ میشود و در دمای بالاتر از $T_{\rm cs}$ ، جریان $I_{\rm op}(T_{\rm cs})$ ابررسانا می گذرد که کمتر از Iop است. این جریان با دما کاهش می یابد و جریان اضافی از ماتریس می گذرد. در دمای بحرانی T_c و فراتر از آن، در مواردی کـه A_m (سطح مقطع مـاتریس) در مقايسه با A (سطح مقطع سيم) صرفنظر نشود، واقعاً همهي جريان از ماتريس مي گذرد، زيرا مقاومت ماتريس (pm) بسیار کیم تر از مقاومیت ابررسیانا (psc) میں شرود: بنابراین، به ازای دماهای بالاتر از $\rho_{\rm m}(T \ge T_{\rm c}) \ll \rho_{\rm sc}(T \ge T_{\rm c})$ است ($I_{\rm sc} \approx I_{\rm op}$ ، $T_{\rm c}$ است). $I_{\rm sc} \approx I_{\rm op}$ ، $T_{\rm c}$



شکل 1. نمودار تغییرات جریان بحرانی برحسب دما در کامپوزیت ابررسانا.

با توجه به اختلاف دمای بیش تر، T_c-T_{cs}، به ازای جریان کاری مشخص در HTSها، ناحیهی تقسیم جریان آن در مقایسه با LTSها قابل توجه است به طوری که در LTSها این ناحیه قابل چشمپوشی است [۲۲].

هنگام فرایند تقسیم جریان در سیم، گرمایش ژول، q₁، از مجموع گرمایش ناحیهی ابررسانا و ناحیهی ماتریس به صورت زیر به دست می آید [۱۶]:

$$q_{J} = \frac{\rho_{m}(T)I_{op}}{A^{r}(1-f)} \max\{I_{op} - I_{c}(T), \circ\}$$
(r)

$$I_{c}(T) = I_{op} \max\left\{\frac{T - T_{c}}{T_{cs} - T_{c}}, \circ\right\}$$
(*)

که در آن I_{op}، جریان کاری و fنسبت سطح مقطع ابررسانا به کل سیم است. گرمایش ژول به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{cases} q_{J} = \circ & T \langle T_{cs} \rangle \\ q_{J} = \frac{\rho_{m}(T)I_{op}}{A^{\prime}(\gamma - f)} \left\{ I_{op} - I_{op} \frac{T - T_{c}}{T_{cs} - T_{c}} \right\} & T_{cs} \langle T \langle T_{c} \rangle \\ q_{J} = \frac{\rho_{m}(T)I_{op}^{\prime}}{A^{\prime}(\gamma - f)} & T \rangle T_{c} \end{cases}$$

(۵)

تندی گذار از حالت ابررسانایی به مقاومتی را می توان از مقدار مشخصهی n تعیین کرد که از برازش منحنی میدان – جریان به دست می آید. بر این اساس، به جای تقریب خطی برای توصیف ابررساناهای کامپوزیتی، از قانون توان^(۵) با دقت قابل قبولی استفاده می شود [۲۱]:

$$E = E_{c} \left(\frac{I}{I_{c}(T)}\right)^{n} \tag{9}$$

که در آن *E* ولتاژ بر واحد طول (میدان الکتریکی) و *E*_c میدان الکتریکی معیار است که معمولاً V/cm⁹ برای HTS، و یک یا دو مرتبه کوچک تر برای LTS در نظر گرفته می شود [۲۱]. بنابراین براساس قانون توان، گرمایش ژول به شکل زیر به دست می آید:

$$q_{J} = \min\left\{\frac{E I_{op}}{A}, \rho_{norm}(T)(\frac{I_{op}}{A})^{*}\right\} = \min\left\{\frac{E_{c} I_{op}^{n+1}}{A I_{c}^{n}}, \rho_{norm}(T)(\frac{I_{op}}{A})^{*}\right\} (\forall)$$

$$I_{c}(T) = I_{c}(\circ)(1 - \frac{T}{Tc})^{\sqrt{\tau}}$$
(A)

که در آن (۰) *F*ریان بحرانی در صفر کلوین است.

در این مقاله، دو مشخصهی حداقل انرژی فرونشانی و سرعت انتشار آن براساس قانون توان بررسی می شوند. فرایند اندازه گیری MQE به این ترتیب است که ابتدا در دمای اولیهی موردنظر، جریان بحرانی محاسبه، و سپس جریانی کم تر از آن برای عبور از نمونهی ابررسانای موردنظر تعیین می شود. ولتاژ و زمان تپ گرم کننده برای ایجاد اختلال حرارتی موضعی تنظیم می شوند. ابتدا، دامنهی تپ گرمایی پایین تعیین می شود. اگر بعد از قطع تپ ولتاژ، تغییرات زمانی دما نزولی باشد، فرونشانی رخ نمی دهد و برای فراهم شدن شرایط فرونشانی، با افزایش ولتاژ گرم کننده، روند را تکرار می کنیم. این فرایند را تا زمانی ادامه

میدهیم که افزایش دما و یا ولتاژ اندازه گیری شده از پروبها، بدون بازیابی ادامه پیدا کند. انرژی اختلال از حاصل ضرب اندازهی توان گرم کننده در زمان تپ به دست می آید به طوری که این انرژی بین مرز بازیابی و فرونشانی، MQE به ازای شرایط اولیه خواهد بود.

۳. مدلسازی نمونهی ابررسانا

نمونیه ی ابررسانای Bi-2223/Ag بیا سطح مقطع نمونیه ی ابررسانای Bi-2223/Ag و طول Mi مقطع مقطع مقطر می گیریم. دمای بحرانی آن f = 0.5 و طول Mi مرانی در نظر می گیریم. دمای بحرانی آن N K و جریان بحرانی در دمای NV K و تحت خود میدان حدود A است. بنابراین طبق معادله ی (۸)، جریان بحرانی در صفر کلوین حدود $I_c(0)$ به دست می آید.

ظرفیت گرمایی و ضریب هدایت حرارتی کامپوزیت ابررسانا از روابط زیر به دست میآیند [۲۱]:

$$C_{\rm avg}(T) = f C_{\rm m}(T) + (1 - f) C_{\rm sc}(T)$$
 (9)

$$k_{avg}(T) = f k_m(T) + (1 - f) k_{sc}(T)$$
 (1.)

منظ ور از زیرنویس های avg میانگین، m ماتریس و sc ابررسانا است. توابع C_p(T) و k(T) مادهی Bi-2223 و نقره بر گرفته از مرجع [۲۴] هستند.

در شکل ۲، چیدمانی از محل پروبها، حسگرهای دما و \mathcal{Z}_{q} کننده نشان داده شده است. نمونه درون محفظهی خلأ، و دو انتهای آن ابررسانای ثابت در دمای T_{op} ، فرض می شود. بنابراین، سرمایش از طریق هدایت حرارتی به دو سرسیم، صورت می گیرد به این ترتیب، شرایط بی دررو^(*) صدق می کند. برای اندازه گیری سرعت انتشار فرونشانی، چهار پروب ولتاژ، V_1 تا V_1 ، در فواصل سرعت انتشار فرونشانی، چهار پروب ولتاژ، V_1 تا V_1 ، در فواصل T_1 ، در وسط پروبها تعبیه شدهاند. فاصلهی پروب اول از تا T_7 ، در وسط پروبها تعبیه شدهاند. فاصلهی پروب اول از انتهای گرم کننده نیز ۲۲ است. برای ایجاد اختلال حرارتی موضعی، \mathcal{Z}_{q} کننده اید مول ۲۵ و و امقاومت Ω ۲۰ و طول پالس ۲۵ در مرکز سیم در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. نحوهی قرارگیری گرمکننده، ۴ پروب ولتاژ، V، تـا ۷_۶ و ۳ حسگر دمای T₁ تا T_۲ بر روی نوار ابررسانا.

۴. نتايج و بحث

نمودار گرمایش ژول برحسب دما با در نظر گرفتن تقریب خطی به ازای جریان های مختلف در شکل ۳ نمایش داده شده است. دمای کاری K ۷۷ و طبق شکل ۱ به ازای جریان های کاری مختلف دمای تقسیم جریان، متفاوت به دست می آید به طوری که با افزایش جریان کاری، دمای تقسیم جریان کاهش می یابد. در دمای بالاتر از دمای بحرانی T_c=۱۰۸ K که همه ی جریان از ماتریس عبور می کند، رفتاری کاملاً آهمی مشاهده می شود.

شکل ۴، رفتار گرمایش ژول برحسب دما را براساس قانون توان، به ازای جریان کاری معادل ۵۰٪ جریان بحرانی در WK و به ازای *nه*ای متفاوت نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، گذر از دمای تقسیم جریان در این نمودار در مقایسه با تقریب خطی در شکل ۳ سریع تر است و با افزایش مقدار *n* شیب تغییرات تندتر می شود و گذار از ابررسانایی به حالت نرمال تیز تر خواهد بود. این تغییر فاز ناگهانی نشان دهنده ی مرغوبیت ابررسانا است.

در شکل ۵، نمودار تغییرات زمانی دما به ازای به کار بستن اختلال حرارتی نشان داده شده است. برای نمونه، ابررسانای با مقدار ۱۰ = *n* در شرایط کاری I_{op}=۰,۵*I* و در دمای ۷۲ با به کار بستن انرژی اختلالی ۲ ۲٬۶۷۱ بعد از قطع پالس (۲ = ۱۵) دما کاهش مییابد و بازیابی ناحیهی نرمال تشکیل شده به حالت ابررسانایی رخ میدهد. در همان شرایط کاری، به ازای انرژی اختلال ۲ ۲٬۶۷۲ افزایش فزایندهی دما بعد از قطع پالس ادامه مییابد و فرونشانی اتفاق میافتد. بنابراین حداقل انرژی لازم برای فرونشانی (MQE) در این شرایط کاری برابر می شود با:

$$r_{J}$$
 for $J < MQE < r_{J}$ for J (11)



شکل ۳. نمودار گرمایش ژول برحسب دما براساس تقریب خطی در فرایند تقسیم جریان به ازای جریانهای متفاوت. a نسبت جریان کاری به جریان بحرانی در دمای کاری WK است. T_c دمای بحرانی در صفر کلوین و c_s دمای تقسیم جریان است.



شکل ۵. تغییرات زمانی دما به ازای انرژی اختلال E=۲٫۶۷۱ J که بـه بازیـابی، و E=۲٫۶۷۲ J به فرونشانی میانجامد.

به ازای همین شرایط کاری، در شکل ۶. الف و ۶. ب، تحول زمانی در نمودار دما برحسب مکان، بعد از قطع پالس (۱۵۶=*t*)، نشان داده شده است. نمودار ۶. الف نشان میدهد که به ازای انرژی اختلال، دما به بیش از T_{cs} میرسد و ناحیهی نرمال تشکیل میشود. ولی این اختلال، انرژی لازم برای ایجاد MPZ را فراهم نمی کند و بعد از قطع تپ ولتاژ، به حالت ابررسانا بازیابی می شود.

نمودار ۶. ب نشان میدهد چنانچه انرژی اختلال به اندازهای بزرگ باشد که حداقل ناحیهی انتشار (MPZ) را فراهم کند، فرونشانی آغاز میشود. در این شرایط افزایش فزایندهی دما و رشد ناحیهی نرمال مشاهده میشود.

در شکل ۷، تحول زمانی ولتاژ و دما به ازای شرایط کاری Iop=۰,۵ Ic ،Top=۷۷ K ،E=۲,۶۷۲ J نشان داده شده است. پس از محاسبهی MQE، سرعت انتشار ناحیهی نرمال که مشخصه دیگر فرونشانی است، محاسبه می شود.



شکل ۶. تحول زمانی دما برحسب مکان بعد از قطع پالس. الف) بازیابی به ازای انرژی اختلال E=۲٬۶۷۱ J و ب) فرونشانی به ازای E=۲٬۶۷۲ J.



برای اندازه گیری ۷۰۸۶ روی نمودار ۷. الف، ولتاژ مرجع ۳٫۴۵ mV که از تقسیم توان اختلال بر جریان کاری به دست می آید را درنظر بگیرید. از تقسیم فاصله ی پروب های ولتاژ به بازه ی زمانی که طول می کشد تا ولتاژ مرجع را نشان دهند، میانگین سرعت انتشار فرونشانی به ازای شرایط کاری مذکور، برابر با ۱٫۵۶ دmpz به دست می آید. این سرعت به طور نوعی در TTSها، بیش از ۵۰ cm/s است [۲۲]، بنابراین سرعت انتشار فرونشانی در نمونه ابررسانای دمای بالا کندتر است.

نمودار ۷. ب نشان می دهد که اختلال موضعی به فرونشانی می انجامد. با گذشت زمان، توان گرمایشی بر توان سرمایشی غلبه می کند، و ناحیهی نرمال گسترش می یابد که رشد دما در این نمودار مؤید آن است.

مشخصه های فرونشانی به شرایط کاری وابسته است. وابستگی MQE به جریان و دما در شکل ۸ نشان داده شده است. همان طور که انتظار میرود، هر چه جریان و دمای کاری بالاتر باشند، در انرژی پایین تری شرایط فرونشانی فراهم می شود.

در شکل ۹، اثر دما بر سرعت انتشار فرونشانی نشان داده شده است. با توجه به رابطهی (۲)، وابستگی ضمنی سرعت با دما در این نمودار مشاهده می شود که در دمای کاری بالاتر، سرعت انتشار کم تر است و ناحیهی نرمال کند منتشر می شود و می تواند به بروز نقطهی داغ در حد دمای ذوب در آن ناحیه منجر شود. در واقع با کاهش دما، جریان بحرانی افزایش می یابد و به ازای کسر مشخصی از جریان بحرانی، جریان کاری افزایش می یابد که افزایش قابل توجه گرمایش ژول را به همراه دارد و به همین دلیل انتشار ناحیهی نرمال سریع تر می شود.



شکل ۸ حداقل انرژی لازم برای فرونشانی الف) به ازای (I_{op}=۰,۵ I_c(T) برحسب دما و ب) T_{op}=۷۷K برحسب جریان.



شــکل ۹. سـرعت انتشـار فرونشـانی در بـازهی دمـایی ۴۰ تـا ۷۷K بـه ازای I_{op}=۰,۵ I_c(T).

۵. نتیجه گیری

در این مقاله نشان داده شد که با افزایش مقدار ۳، تغییر فاز ابررسانایی به مقاومتی سریعتر، و تندی گذار بر رفتار فرونشانی مؤثر است. همچنین اثر جریان و دمای کاری بر روی مشخصههای فرونشانی نشان داده شد. با افزایش ۱۲۵٪ دما در جریان ثابت، MQE حدود ۷۲٪ کاهش مییابد و با افزایش ۱۲۵٪ جریان، حدود ۵۴٪ کاهش در مقدار آن رخ میدهد. بنابراین MQE وابستگی بیش تری به دما دارد. همچنین با افزایش ۱۰۰٪ دما که با کاهش ۷۲٪ جریان کاری همراه است، سرعت انتشار فرونشانی ۶۰٪ کاهش مییابد.

نتایج نشان می دهند با توجه به این نکته که دمای بحرانی در HTSها بالا است، مطلوب آن است که در دماهایی که فاصلهی قابل توجه نسبت به مرز بحرانی داشته باشند، شرایط کاری مشخص فراهم شود تا احتمال فرونشانی مخرب کاهش یابد. از سوی دیگر برای استفاده از ظرفیت HTSها در کاهش هزینه (برودتی)، دمای کاری بالاتر مناسب است. MQE و VMPZ بالاتر برای دست یابی به مگنت پایدار و خود محافظ مناسب است. به طور کلی شناخت این تابعیتها و رفتارها در یافتن نقطهی کاری بهینه در طراحی مگنت ابررسانا کمک می کند.

یےنوشتھا

- 1. Hot Spot
- 2. Low Temperature Superconductor
- 3. Recovery
- 4. Finite Element Method
- 5. Power Law
- 6. Adiabatic



[1] M. Maeda, R. Yokohama, Y. Yanagisawa, Recent developments in high-temperature superconducting magnet technology (review), *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **24** (2014) 4602412.

[2] K. Sato, Research, Fabrication and Applications of Bi-2223 HTS Wires, World Scientific (2016).

[3] A. Devred, Quench origins, *AIP Conference Proceedings* **249** (1992) 1262-1308.

[4] M. Wilson, Superconducting Magnets, Oxford University Press (1983).

[5] Y. Iwasa, Stability and protection of superconducting magnets: A discussion, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15(2)** (2005) 1615-1620.

[6] M. Breschi, L. Trevisani, M. Boselli, L. Bottura, A. Devred, P.L. Ribani, F. Trillaud, Minimum quench energy and early quench development in NbTi superconducting strands, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17(2)** (2007) 2702-2705.

[7] W. Pi, X. Shi, J. Dong, Y. Wang, Experimental Investigation on Quench Characteristics of NbTi/Bi2223 Hybrid Superconductor, International conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering, (2015).

[8] H. Bajas, M. Bajko, B. Bordini, L. Bottura, S. Izquierdo Bermudez, J. Feuvrier, A. Chiuchiolo, J. C. Perez, G. Willering, Quench Analysis of High-Current-Density Nb₃Sn Conductors in Racetrack Coil Configuration, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25(3)** (2015) 1-5.

[9] 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.

[10] 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** (2006) 143.

[11] T. Huang, E. Martínez, C. Friend, Y. Yang, Quench characteristics of HTS conductors at low temperatures *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **18(2)** (2008) 1317-1320.

[12] 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** (2015) 1-5.

[13] M. Lebioda, J. Rymaszewski, Analysis of normal zone propagation in superconducting tapes initiated by thermal disturbances, *Journal of Physics: Conference Series.* **709** (2016) 012011.

[14] T. Huang, A. Johnstone, Y. Yang, C. Beduz, and C. Friend, Finite element modelling of thermal stability and quench propagation in a pancake coil of PbBi2223 tapes, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15(2)** (2005) 1647–1650.

[15] B. Zhi-ming, X. Wu, C. Wu, J. Wang, Quench Propagation Properties Analysis of High-Temperature Superconductors using Finite Element Method, *Physica C: Superconductivity and its applications* **436(2)** (2006) 99-102.

[16] A. Stenvall, A. Korpela, J. Lehtonen, R. Mikkonen, Formulation for solving 1D minimum propagation zones in superconductors, *Physica C: Superconductivity and its applications* **468(13)** (2008) 968-973.

[17] N. Glowa, R. Wesche, P. Bruzzone, P. Bruzzone, Quench Studies of YBCO Insulated and Noninsulated Pancake Coils, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **24(3)** (2014) 1-5.

[18] S. Sanz, G. Sarmiento, A. Pujana, J.M. Merino, M. Tropeano, D. Nardelli, G. Grasso, J. Sun, F. Tora, I. Marino, Experimental Study and Simulation of Quench in MgB₂ Coils for Wind Generators, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26**(3) (2016) 1-5.

[19] M.K. Al-Mosawi, S. Avgeros, C. Beduz, Y. Yang, A. Ballarino, Quench characteristics of Ag/AuBi2223 HTS-stainless steel stack used for the hybrid current leads of the Large Hadron Collider, *J. Phys. Conf. Ser.* **97**(1) (2008) 012304.

[20] C.L. Wu, H.L. Yang, Finite element analysis of quench propagation velocity in Bi-2223/Ag superconducting multifilamentary tape, *Materials Science Forum* **546** (2007) 1931-1934.

[21] Y. Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets, 2th edition, Springer Science (2009).

[22] R. Bellis, Y. Iwasa, Quench Propagation in High T_c Superconductors, *Cryogenics* **34(2)** (1994) 129-144.

[23] Cryocomp Eckels Engineering 3.06 Cryodata Inc. Florence SC, USA 29501.

[24] C. Uher, Thermal Conductivity of High-Tc Superconductors, *J. Supercond.* **3**(4) (1990) 337-389.