

## اندازه گیری و بررسی روشی نوین در مدلسازی رفتار الکتریکی یک کنترل کننده جریان خطای ابررسانایی

<sup>۱</sup> محمد هادی ورهرام، <sup>۱</sup> عظیم لطفجو چوبری، <sup>۲</sup> علیرضا آذری، <sup>۲</sup> رضا شفیعی ثابت  
varahram@sharif.edu, a\_lotfjouc@yahoo.com, rahgozar\_1358@yahoo.com,  
reza\_shafiy\_sabet@yahoo.com

<sup>۱</sup> دانشگاه صنعتی شریف، <sup>۲</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات  
کلمات کلیدی: ابررسانایی، راکتور کنترل کننده جریان، مشخصه ولتاژ-جریان، مدلسازی رفتار الکتریکی

### چکیده

امروزه ابررساناها دارای کاربردهای زیادی در مهندسی قدرت می باشند. از آنها می توان بصورت سیم یا کابل در ترانسها، موتورها، شتاب دهنده ها، حسگرها، کننده های جریان، انباره های ذخیره کننده انرژی مغناطیسی، سونچه های سرعت بالا و قطارهای سریع السیر ابررسانایی استفاده نمود [1-2]. از طرفی هنگامی که سیمها، کابلها، محدودکننده های جریان خطا و سیم پیچهای ابررسانایی در معرض میدانهای مغناطیسی خارجی قرار می گیرند این میدانها می توانند بنوعی باعث کاهش چگالی جریان بحرانی آنها گردند [3-6]. بعنوان مثال خم کردن سیم و کابل ابررسانایی روی چگالی جریان آنها اثر منفی دارد و موجب کاهش آن می گردد. آنچه که باید در ابتدا راجع به ابررساناها دانست رفتار الکتریکی آنها و یا به عبارت دیگر مشخصه ولتاژ - جریان آنهاست. در این مقاله سعی گردیده است رفتار الکتریکی یک راکتور کنترل کننده جریان خطای ابررسانایی جهت کنترل جریان خطا بصورت مداری شبیه سازی و با نتایج عملی مقایسه گردد [7,8]. تمام این تحلیلها بر اساس اطلاعات تجربی بوده و درستی آنها با کمک نتایج تحلیلی خوبی اثبات گردیده است.

### مقدمه

شبیه سازی رفتار ابررساناها با استفاده از نرم افزارهای موجود ما را قادر می سازد تا آنها را مثل المانهای مداری تحلیل کنیم. با توجه به نتایج شبیه سازی می توان رفتار ابررسانا را در حضور میدان مغناطیسی پیش بینی و اثرات افزایش شار جهت کارایی هر چه بیشتر ادوات قدرتی ابررسانایی بهبود بخشید [2-4]. با استفاده از نرم افزارهای موجود بصورت یک مدار الکتریکی می توان کاهش چگالی جریان بحرانی این سیمها را نیز بهنگام تبدیل به

سیم پیچ پیش بینی و رفتار آنها را با پدیده های فیزیکی توجیح نمود.

شبیه سازی رفتار الکتریکی یک راکتور کنترل کننده جریان خطای ابررسانایی با استفاده از نرم افزار Simulink

مشخصه های ولتاژ - جریان راکتور کنترل کننده های جریان خطای ابررسانایی را می توان با استفاده از قانون توان بررسی کرد [7-8].

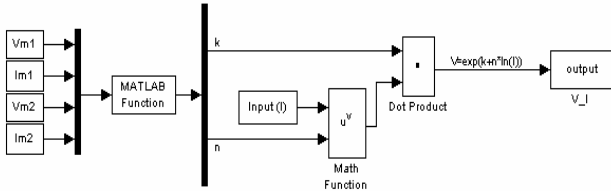
$$V = KI^n \quad (1)$$

که در آن  $V$  ولتاژ دو سر ابررسانا،  $I$  جریان عبوری از آن،  $n$  یک عدد مثبت ( $n > 0$ ) که بیانگر اندیس انتقال و  $k$  یک ثابت تناسبی است. در ناحیه ای که  $I < I_c$  است ولتاژ دارای مقدار صفر (خاصیت اول ابررساناها) می باشد. و در ناحیه ای که  $I > I_c$  است مقدار ولتاژ بصورت غیر خطی افزایش می یابد. این تغییر ناشی از خزش شار در ابررسانا است. بعد از آن، ولتاژ  $V$  بصورت خطی افزایش می یابد و علت آن خاصیت همگنی شار عبوری از سیم و تغییر فاز سیم از حالت ابررسانا به رسانا است [3,7]. شکل ۱ مشخصه ولتاژ - جریان، راکتور کنترل کننده های جریان خطای ابررسانایی را نشان می دهد.

و در نتیجه با مشخص شدن مقدار  $n$  از رابطه ۴ می توان مقدار  $k$  را بصورت زیر محاسبه نمود.

$$k = \frac{V_{m1}}{I_{m1}^n} \quad (5)$$

در شکل ۳ بلوک دیاگرام بکار رفته برای مشخصه رفتار الکتریکی یک راکتورکننده جریان خطای ابررسانایی نشان داده شده است.



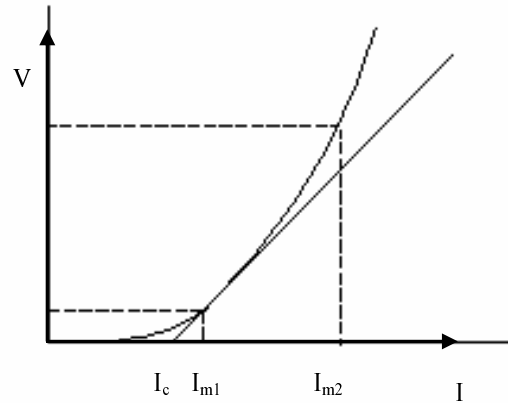
شکل ۲: بلوک دیاگرام بکار رفته برای مشخصه یک راکتور کنترل کننده جریان خطای ابررسانایی

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، برای بیان رفتار مواد ابررسانا به چهار داده ورودی نیاز است که مشخصات دو نقطه از منحنی مشخصه الکتریکی مواد ابررسانا می باشند.

برای یک نمونه راکتور کنترل کننده جریان خطای ابررسانایی با مشخصات زیر داریم.

$$I_c = 264A, J_c = 1347A/cm^2 (T = 77^{\circ}K),$$

با استفاده از آزمایشات تجربی شکل ۲ با استفاده از مدل ارائه شده شکل ۳ و مقایسه ی نتایج عملی با مدلسازی رفتار الکتریکی یک راکتور کنترل کننده جریان خطای ابررسانایی در شکل ۴ بدست آمده است.



شکل ۱: منحنی I-V بکار رفته در مدلسازی

اگر دو نقطه از منحنی مشخصه الکتریکی ماده ابررسانا موجود باشد آنگاه می توان با استفاده از روابط ریاضی موجود مقدار  $n$  و  $k$  را محاسبه نمود.

بعنوان مثال  $(V_{m1}, I_{m1})$  و  $(V_{m2}, I_{m2})$  دو نقطه از مشخصه الکتریکی راکتور کنترل کننده جریان خطای ابررسانایی

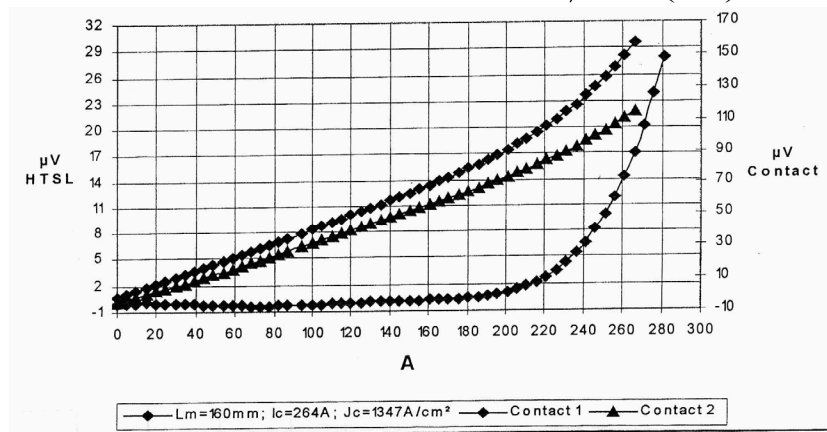
می باشند. پس می توان نوشت:

$$V_{m1} = k I_{m1}^n \quad (2)$$

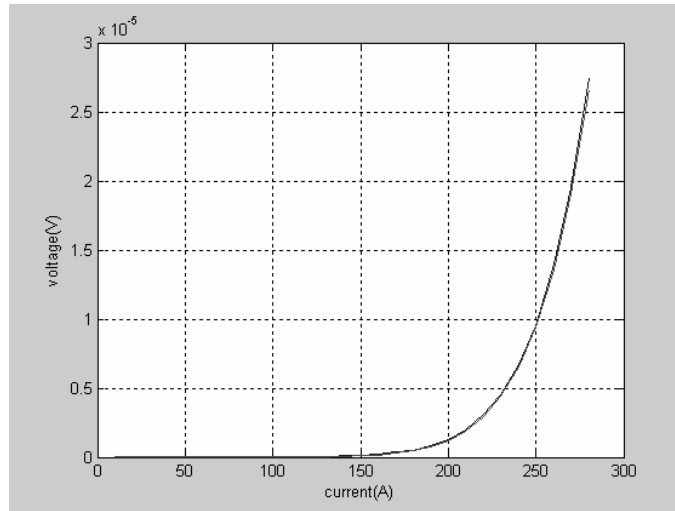
$$V_{m2} = k I_{m2}^n \quad (3)$$

از دو رابطه بالا می توان مقادیر  $n$  و  $k$  را بصورت زیر محاسبه نمود.

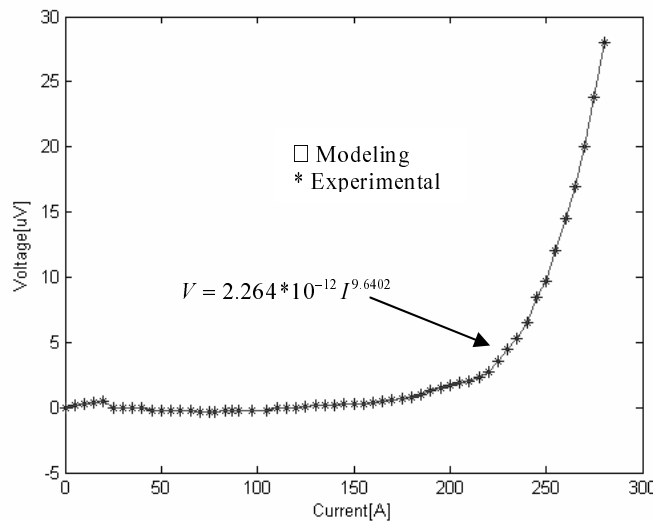
$$n = \frac{\ln\left(\frac{V_{m1}}{V_{m2}}\right)}{\ln\left(\frac{I_{m1}}{I_{m2}}\right)} \quad (4)$$



شکل ۲: اندازه گیری تجربی منحنی V-I



شکل ۳: محاسبه منحنی  $V-I$  با استفاده از مدل ارایه شده



شکل ۴: مقایسه ی نتایج عملی با مدلسازی رفتار الکتریکی یک راکتور کنترل کننده جریان خطای ابرسانایی

شبهه سازی می توان رفتار ابرسانا را در حضور میدان مغناطیسی پیش بینی و اثرات افزایش شار جهت کارایی هر چه بیشتر ادوات قدرتی ابرسانایی بهبود بخشید [6-1]. با استفاده از مدلسازی رفتار الکتریکی یک راکتور کنترل کننده جریان خطای ابرسانایی [11, 7] می توان به بررسی روشهای مختلف کنترل و محدودسازی جریان اتصال کوتاه و مقایسه این راکتور کنترل کننده با سایر محدود کننده ها در شبکه پرداخت که نتیجه این مقایسه برتری این نوع راکتور کنترل کننده نسبت به انواع دیگر در بسیاری از زمینه ها بوده است [12, 11, 2-1].

با توجه به اینکه خروجی بلوک مشخصه ولتاژ - جریان راکتور کنترل کننده های جریان خطای ابرسانا  $k$  و  $n$  می باشد که در شکل ۲ نتایج تجربی ( بصورت ستاره ) و نتایج شبهه سازی بصورت ( خط ) برای یک نمونه از ابرسانایی بوضوح دیده می شود.  $n$  و  $k$  ( در اینجا بترتیب ۱۲-۱۰ و  $2/264 \times 10^{-12}$  و  $9/640$  ) برای این نمونه خاص،  $I_c$  جریان بحرانی ( ماکزیمم جریانی که نمونه ابرسانا بدون افت ولتاژ می تواند از خود عبور دهد برای این نمونه خاص  $262 A$  ) و  $I$  جریان عبوری می باشد که با توجه به شکل ۴ مشخصه شبهه سازی شده با مشخه تجربی کاملاً مطابقت دارد.

### نتیجه گیری

نتایج عملی با مدلسازی رفتار الکتریکی یک راکتور کنترل کننده جریان خطای ابرسانایی جهت استفاده در سیستم های قدرت کاملاً مطابقت دارد. با توجه به نتایج

- [9] Ciszek, M., Glowaki, B.A., Ashworth, S.P., Campell, A.M. and evetts, J.E., " AC losses of Ag-(Bi,Pb)SrCaCuO-2223 Taps in Combination of Transvers External Magnetic Field and Transport Current," IEEE Transaction on Applied Superconductivity, vol. 5, no. 2, pp. 709-712, June 1995.
- [10] C. Lee, H. M. Kim, H. Kang, T. J. Kim, T. K. Ko, E. R. Lee, S. Lee, K. Y. Yoon, "A variation of impedance of a high  $-T_c$  superconducting fault current limiter with an open core," IEEE Transaction on Applied Superconductivity., vol. 12, pp. 846-489, Mar. 2002.
- [11] H. Varahram, R. Hajiha, A. Lotfjoo choobari " Superconducting Fault Current Limiter in Power System", ISCEE 2004,
- [12] S. Behzadi, H. Varahram, " Protection of Induction Generators by means of Superconductive Shielded Core Reactor (SSCR)", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2006 (submitted)
- [1] M. H. Varahram, Sh. Behzadi Rafi "A Novel Approach to Modeling the Superconductive Shielded Core Reactor (SSCR)" IFAC Symposium on Power Plants & Power Systems Control (2003), Vol. III, pp. 1261-1264
- [2] M. Borhani, M. H. Varahram, Sh. Behzadi Rafi "Application of Superconductivite Equipment in Power Industry "18th International Power System Conference PSC 2003, Vol. III, pp. 59-64
- [3] H. Varahram: "Untersuchung des Pinningverhaltens von Hochtemperatur-supraleitern mittels eines Hallmagnetometers"; Elektrotechnik und Informationstechnik (e&i), 4 (2000), pp. 284-285.
- [4] M. Trcka, M. Reissner, H. Varahram, W. Steiner, H. Hauser: "Determination of inter-grain critical current densities in YBCO ceramics by magnetic measurements"; Physica C, 341-348 (2000), 1487 – 1488
- [5] H. Varahram, M. Reissner, W. Steiner, H. Hauser: "Determination of Inter- and Intra-grain Critical Current Densities of YBCO Ceramics in High Fields by Hall Magnetometry"; IOP, Ser. No 167 (1999), 171 - 174.
- [6] H. Varahram, M. Reissner, W. Steiner, H. Hauser, "Hallmagnetometer for External Static Fields up to 17 T" Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics"; A.J. Moses, A. Basak (ed.); IOS Press, Amsterdam, Nonlinear Electromagnetic Systems 10 (1996); pp. 796-799
- [7] M. Borhani, M. H. Varahram. "Simulation of Nonlinear Dynamics Effects for Josephson Junctions", Transactions Word Scientific and Engineering Academy and Society (2004) Issue7, Vol.3, pp 2501-2505
- [8] Shi, D. (editor) " High Temperature Superconducting Materials Science and Engineering: NewYork Concepts and Technology," NewYork: Pergamon, 1994.