

شبیه سازی روشی برای کنترل حد مجاز جریان خروجی سیستم تزریق جریان بالا مبتنی بر شار مغناطیسی نامتعادل

حسین حیدری^۱؛ فرامرز فقیهی^۲؛ امیرحسین پورسلطان محمدی^۳؛ رضا شریفی^۴

چکیده

سیستم تزریق جریان در رده‌های اصلی تجهیزات آزمون استاندارد جریان‌های بالا در صنایع قرار دارد. با توجه وابستگی کامل جریان ایجاد شده در خروجی دستگاه به امپدانس تجهیز تحت آزمون، بالا رفتن حد مجاز جریان خروجی از مقادیر نامی امکان‌پذیر است. در این مقاله استفاده از ویژه‌گی‌های ابررسانایی برای کنترل جریان مجاز خروجی سیستم تزریق جریان به عنوان نوآوری مطرح شده و برای حفاظت اضافه جریان و امکان ادامه آزمون، یک مجموعه هسته و سیم‌پیچ متصل به ابررسانا به شکل سری با بار در خروجی سیستم قرار گرفته است. برای دستیابی به پاسخ سریع نیز از خاصیت نامتعادلی شار و اثر میدان مغناطیسی بر خاصیت ابررسانایی استفاده شده است. به علاوه با استفاده از تپ چنجر در سیم‌پیچ متصل به ابررسانا، سطح اولیه حفاظت جریان برای آزمون گوناگون قابل تنظیم است. با توجه به مقدار زیاد شار پراکندگی، تحلیل سازگاری الکترومغناطیسی برای بررسی تغییرات میدان مغناطیسی موثر، کارایی روش را تضمین می‌کند.

کلمات کلیدی

ترانسفورماتور تزریق جریان، شار مغناطیسی، ابررسانایی، سازگاری الکترومغناطیسی

A New Approach for Maximum Allowable Output Current Control in a High Current Injection Transformer Based on Unbalanced Magnetic Flux

H. Heydari; F. Faghihi; A. H. Poursoltan Mohamadi; R. Sharifi

ABSTRACT

Current Injection transformer (CIT) systems are within the major group of the standard high current type test equipments in electrical industry, therefore their performances are very important. However, as the output of the CIT is wholly dependent on the impedance of the equipment under test, then current flow beyond the allowable limit can ever occur. When designing high current devices, there are many required factors to be considered from which, the overcurrent protection of these devices must be ensured. This paper explains in details the overcurrent protection of the CIT while the test is being carried out using a novel method of output current control by superconductivity concept. The output of the CIT is connected to the Equipment Under Test (EUT) via a set of another core and windings from which secondary winding is connected to the HTS current control circuit. The fast response (detection) of overcurrent of the system is achievable by means of an unbalanced magnetic flux at different voltage

^۱ استادیار دانشکده مهندسی برق، قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ Email: heydari@iust.ac.ir

^۲ کارشناس ارشد مهندسی برق، دانش آموخته دانشکده مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت ایران؛ Email: Faghihi@ee.iust.ac.ir

^۳ کارشناس ارشد مهندسی برق، دانش آموخته دانشکده مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت ایران؛ Email: Poursoltan@ee.iust.ac.ir

^۴ کارشناس ارشد مهندسی برق، دانش آموخته دانشکده مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت ایران؛ Email: Sharifi@ee.iust.ac.ir

(current) tapings, and its effects on superconductivity properties. The EMI due to flux dispersions of the EUT and the wiring connections with the HTS element, based on EMC considerations are analyzed.

KEYWORDS:

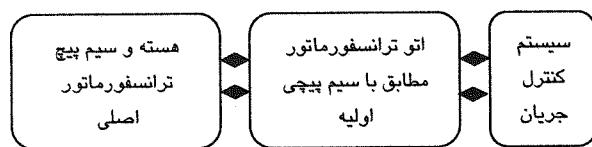
Current Injection Transformer, Magnetic Flux, Superconductivity, Electromagnetic Compatibility

۱- مقدمه

آزمون و حفاظت جریان پیشنهاد شده است. افزایش جریان خروجی و در نتیجه نامتعادلی شار مغناطیسی، ضمن ایجاد مقاومت در ابررسانا سبب پدیدار شدن جریان در سیم پیچ سوم و ایجاد میدان مغناطیسی برای ابررسانا می شود. میدان خارجی سبب افزایش سرعت در بالا رفتن مقاومت ابررسانا شده، سرعت محدودسازی جریان را افزایش می دهد که با توجه به زمان کم آزمون نوعی توسط دستگاه بسیار مهم است. با توجه به حضور میدانهای مغناطیسی مخرب ناشی از جریان بالای شینه های خروجی و شارهای پراکندگی درون تانک، امکان اعمال میدان مغناطیسی غیر دلخواه به ابررسانا و قرار گرفتن ناخواسته آن در شرایط غیر عادی دور از انتظار نمی باشد. برای رفع این مشکل سپر مغناطیسی موثر جهت مجموعه سلف سیم پیچ سوم (تشعشع گر میدان مغناطیسی) و ابررسانای درون مخزن نیتروژن مایع، با استفاده از شبیه سازی المان محدود تبیین شده است. از سویی دیگر چگونگی تنظیمات ارائه شده با توجه به انجام آزمونهای مختلف ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ کیلوآمپری با قرار دادن تپ چنجر در سیم پیچ متصل به ابررسانا شبیه سازی شده است.

۲- سیستم تزریق جریان

سیستم تزریق جریان برای آزمون نوعی جریان تجهیزات برق صنعتی از جمله کلیدهای مینیاتوری، کلیدهای اتوماتیک، ترانسفورماتور جریان مورد استفاده قرار می گیرد. سیستم تزریق جریان شامل یک ترانسفورماتور با توان متوسط چندصد کیلوولت آمپر است که می تواند در ولتاژ ۲ تا ۵ ولت، جریان چندین کیلوآمپری لازم را برای آزمون تجهیزات فراهم سازد. برای آزمون با جریانهای کمتر نیز یک اتوترانسفورماتور در سمت اولیه نصب می شود. چنین سیستمی از لحاظ کلی به صورت شکل (۱) قابل مدل سازی می باشد:



شکل (۱): بلوک دیاگرام اجزای اساسی دستگاه تزریق جریان سیستم تزریق جریان از سه بخش ترانسفورماتور اصلی (ترانسفورماتور تزریق جریان)، اتوترانسفورماتور و سیستم

از ترانسفورماتور تزریق جریان به عنوان ابزاری جهت انجام آزمایشهای جریان بالا استفاده می شود [۱]. به دلیل وابستگی جریان خروجی به امپدانس تجهیز تحت آزمون و در صورت ناچیز بودن این امپدانس، گاهی جریان آزمون ناخواسته تا مقدار بسیار زیادی افزایش می یابد و در صورتی که به سرعت مهار نشود، تنشهای حرارتی و مکانیکی ایجاد شده زیان بار خواهد بود. [۲]، [۳]، [۱]. اولین و ساده ترین راهکار برای مقابله با این اضافه جریان ناخواسته، استفاده از انواع فیوزها اعم از تندکار و کندکار می باشد. از آنجا که پس از حفاظت سیستم، هدف مطلوب دیگر ادامه آزمون است؛ استفاده از فیوزها به دلیل قطع کامل و همچنین اتلاف زمان برای جایگزین کردن فیوز پیشنهاد نمی شود. راهکار دیگر مقابله با صدمات و خطرات احتمالی این اضافه جریان، استفاده از رله های اضافه جریان است. این سیستم حفاظتی با سنجش جریان توسط CT در محل خطا، تشخیص بالا بودن جریان و ارسال دستور قطع توسط رله به کلید عمل می کند. اما این عملیات زمان بر بوده و ممکن است قبل از دستور قطع، صدمات زیادی به سیستم تزریق جریان وارد شده باشد. به علاوه قطعی مدار، هدف ادامه آزمون را برآورده نمی سازد. بنابراین استفاده از این سیستم حفاظتی نیز نمی تواند به تنهایی مطلوب باشد [۴]. انتظار می رفت که این مشکل با ظهور مدارهای تشدید سری و موازی متشکل از کلیدهای تریستوری با سرعت عمل بیشتر نسبت به کلیدهای مکانیکی بر طرف شود، اما بروز مشکلات هارمونیک، افزایش تلفات و نیاز به سیستم کشف خطا [۵]، [۶]، راه حل را به سمت استفاده از ابررساناها جهت داد. استفاده از مفهوم ابررسانایی روشی برای کاهش جریان تا مقدار نامی است که به علت ایجاد شرایط نرمال برای ادامه آزمون و همچنین کارکرد خودکار و سرعت بالای آن قابل قبول می باشد. استفاده از ابررسانا به منزله ورود مقاومتی بزرگ و افزایش آن در زمانی است که جریانی بیش از مقدار جریان بحرانی از ابررسانا عبور کند. بر این اساس ابررسانا با تغییر وضعیت و گذار از حالت ابررسانایی به حالت نرمال، شرایط را برای محدودیت و کنترل جریان مهیا می سازد [۷]، [۸]. در این مقاله مداری متشکل از هسته و سیم پیچ که یکی از آنها متصل به ابررسانایی است به طور سری با بار برای امکان توام ادامه

کنترلی تشکیل شده است. در این راستا مسایل مهم طراحی بهینه به ترانسفورماتور تزریق جریان به علت وجود جریانهای بالا برمیگردد که شامل تدوین الگوریتم طراحی بهینه براساس ملاحظات حرارتی و مکانیکی می باشد [۱]، [۲].

۳- ابرسانایی و کنترل اضافه جریان آزمون

در هنگام آزمون اتصال کوتاه تجهیزات در مدارهای متداول تزریق جریان، تجهیز تحت آزمون (Equipment Under Test) که به اختصار EUT نامیده می شود باید به دو سر شینه های خروجی دستگاه متصل شود. تنظیم سیستم تزریق جریان و اعمال جریان بالا به EUT با توجه به مقادیر اظهار شده از سوی سازنده EUT صورت می گیرد. تغییرات امپدانس EUT نسبت به مقادیر یاد شده، منجر به خطای اضافه جریان شده و نه تنها آزمون به درستی صورت نمی گیرد، بلکه در صورت افزایش جریان از حدود نامی باعث ایجاد آسیب جدی در ترانسفورماتور اصلی شده و در کاهش طول عمر آن تاثیر بسزایی خواهد داشت. تکرار شرایط اخیر در حین آزمون، مشاهده گردیده است، طراحی سیستمی حفاظتی برای ثانویه سیستم که بتواند در مدت زمان کوتاهی خطای اضافه جریان را تشخیص و بدون وقفه و ایجاد اختلال در آزمون، آن را تا حد مجاز محدود سازد، ضروری به نظر می رسد. در این مقاله به عنوان ایده ای جدید برای کنترل و حفاظت جریان در سیستم تزریق جریان، استفاده از ابرسانایی سری شده با EUT و پدیده گذار از حالت ابرسانایی به حالت عادی پیشنهاد شده است. براساس این پدیده، در شرایط عادی افت ولتاژ روی ابرسانا صفر بوده و آزمون روال عادی خود را طی کرده بدون آنکه حضور ابرسانا تاثیری در روند اجرایی آزمون داشته باشد. اما در صورت بروز افزایش غیرمنتظره در جریان، ابرسانا به گونه ای عمل می کند که یک مقاومت به صورت سری با EUT قرار گرفته و با افزایش جریان مخالفت نماید. معادلات تغییر فاز ابرسانا برای سه وضعیت اساسی آن "ابرسانایی"، "مقاومتی عبور شار" و "مقاومتی نرمال" مانند رابطه (۱) می باشد [۹].

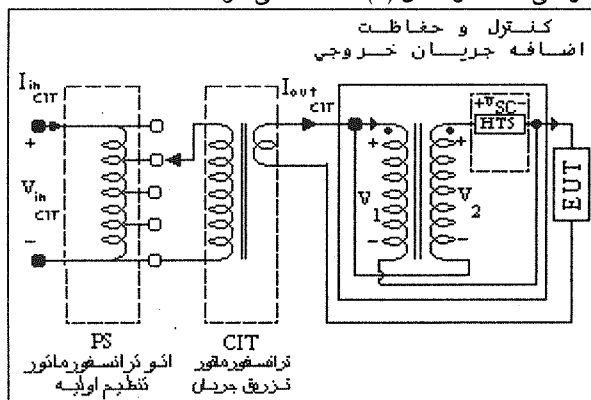
$$v_{sc} = \begin{cases} 0 & \text{if } |i_s| \leq i_c(T) \text{ and } T < T_c \\ R_p [i_s - \text{sign}(i_s) i_c(T)] & \text{if } |i_s| > i_c(T) \text{ and } T < T_c \\ R_n i_s & \text{if } T \geq T_c \end{cases} \quad (1)$$

که i_s و i_c به ترتیب جریان تزریقی، جریان بحرانی و T_c دمای بحرانی ابرسانا است و R_p و R_n به ترتیب مقاومت های عبور شار و نرمال ابرسانا هستند. بر اساس رابطه ارائه شده، اگر جریان از حد مجاز بحرانی فراتر رود اما

دما کمتر از مقدار بحرانی باشد، جسم در وضعیت عبور شار قرار گرفته و مقاومت R_p خواهد داشت. در صورتی که دما از مقدار بحرانی بیشتر شود صرفنظر از اینکه جریان عبوری چقدر باشد، مقاومت نرمال R_n ایجاد می شود که حدود صد برابر R_p است اما برای بازگشت به وضعیت ابرسانایی نیازمند خنک سازی بوده و لذا زمان بازبایی بیشتری را خواهد داشت. با توجه به اینکه مقاومت R_p خیلی کم است، حجم قابل توجهی از مواد ابرسانا نیاز است که توجه اقتصادی برای سیستم تزریق جریان ندارد. از سوی دیگر با توجه به محدودیت زمان آزمون، گرمای زیادی در مدت کوتاه ایجاد نشده و در صورتیکه ایجاد شود نیز زمان بازبایی زیادی برای خنک سازی نیاز خواهد داشت ازاینرو استفاده از فاز مقاومت نرمال نیز چندان کاربردی به نظر نمی رسد. در نتیجه لازم است برای کنترل جریان ثانویه، از ویژگی دیگر گذار ابرسانایی که تأثیر قابل توجهی بر سرعت افزایش مقاومت دارد و به راحتی نیز قابل کنترل است استفاده شود. این خاصیت اثر میدان مغناطیسی خارجی می باشد. از اینرو با توجه به ویژگیهای سیستم تزریق جریان، مداری جدیدی که بتواند بطور همزمان از خاصیت تغییر فاز ابرسانایی و افزایش مقاومت توسط میدان مغناطیسی خارجی استفاده کند طراحی شده است.

۴- طراحی سیستم همزمان کنترل و حفاظت جریان

در سیستم تزریق جریان، خروجی قبل از اتصال به بار به ابرسانا متصل می گردد. برای استفاده از اثر میدان مغناطیسی بر ابرسانا از ویژگی نامتعادلی شار مغناطیسی به ازای بروز جریان خطا استفاده می کنیم. برای این منظور از دو سیم پیچ پیچیده شده بر روی هسته آهنی استفاده می شود که به واسطه ابرسانا با یکدیگر موازی شده اند. طرح واره این مدار کنترل طراحی شده در شکل (۲) ملاحظه می شود.



شکل (۲): دیاگرام طرح واره سیستم کنترل و حفاظت جریان در حالت عادی مقاومت ابرسانا صفر است و ولتاژ دو سر

سیم‌پیچ‌های اول و دوم برابرند؛ لذا

$$v_1 = v_2 \quad (2)$$

$$n_1 \frac{d\phi}{dt} = -n_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

$$(n_1 + n_2) \frac{d\phi}{dt} = 0 \quad (4)$$

از آنجا که هدف استفاده از خاصیت نامتعادلی شار مغناطیسی است، سرهای غیر همنام سیم‌پیچها به هم وصل می‌شوند. در رابطه (۴) با توجه به اینکه همواره $n_1 + n_2 \neq 0$ لذا باید رابطه $d\phi/dt = 0$ برقرار باشد یا به عبارتی شار مغناطیسی در حالت عادی آزمون مقدار ثابتی باشد. اما در حالتی که جریان از مقدار مجاز افزایش یابد، قطعه ابررسانا از حالت ابررسانایی به حالت مقاومتی گذر می‌کند. در این صورت شار متغیر با زمان شده $(d\phi/dt \neq 0)$ و ولتاژ دو سر سیم‌پیچها با توجه به تعداد دور نابرابر ($n_1 \neq n_2$) مساوی نخواهد ماند ($V_1 \neq V_2$). این موضوع کنترل جریان نهایی و کاهش آن را در پی خواهد داشت.

۱-۴- اثر میدان خارجی

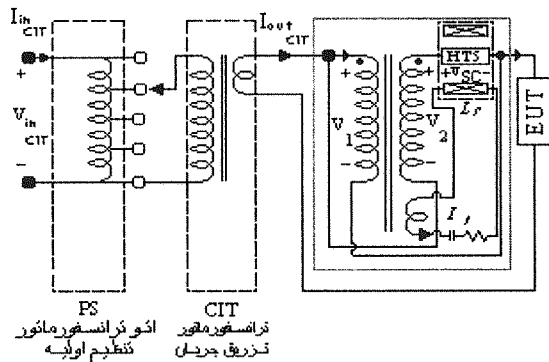
با توجه به کوتاه بودن زمان آزمون و برای فراهم شدن امکان کنترل بر روی ابررسانا، لازم است تغییراتی در سیستم ایجاد شود تا امکان استفاده از اثر میدان مغناطیسی خارجی میسر باشد. بر این اساس قرار دادن سیم‌پیچ سوم شامل سلف و خازن (C, L_f) بر روی هسته امکان استفاده از میدان مغناطیسی تشعشعی از سلف را حین بروز خطای اضافه جریان فراهم می‌کند. برای این منظور سلف و خازن در حالت عادی تشدید داشته و اثر آنها خنثی می‌شود ($\omega L_f - 1/\omega C = 0$). در حین بروز خطا به سبب القای ولتاژ در دو سر سیم‌پیچ سوم، جریانی در حلقه سیم‌پیچ سوم جاری می‌شود؛ لذا توسط سلف، میدان مغناطیسی خارجی به ابررسانا اعمال می‌شود و سبب افزایش سرعت رشد مقاومت ابررسانا خواهد شد. در این مدار از منبع انرژی خارجی جداگانه استفاده نشده است. بر این اساس دیاگرام ارائه شده در شکل (۲) به صورت شکل (۳) اصلاح خواهد شد.

۲-۴- هماهنگی سیستم کنترل برای آزمونهای مختلف

بر مبنای بحث مطرح شده در قسمت دوم، سیستم تزریق جریان علاوه بر جریان نامی خروجی باید امکان آزمون در جریانهای کمتر را دارا باشد که تنظیمات آن توسط سیستم اتوترانسفورماتوری اولیه انجام می‌پذیرد. بر این اساس باید بتوان سیستم کنترل و حفاظت طراحی شده را با انواع مختلف

آزمون کمتر از جریان نامی خروجی سیستم وفق داد. از اینرو برای سیم‌پیچ ثانویه تعدادی تپ در نظر گرفته شده که با تغییر آنها قابلیت تغییر فاز ابررسانایی در جریانهای مختلف پدید خواهد آمد. محاسبات دقیق اندوکتانس (L_2) تپها با توجه به جریانهای معمول آزمون اتصال کوتاه (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ کیلو آمپر) قابل انجام است. بر این اساس مدار توسعه یافته به صورت شکل (۴) خواهد بود.

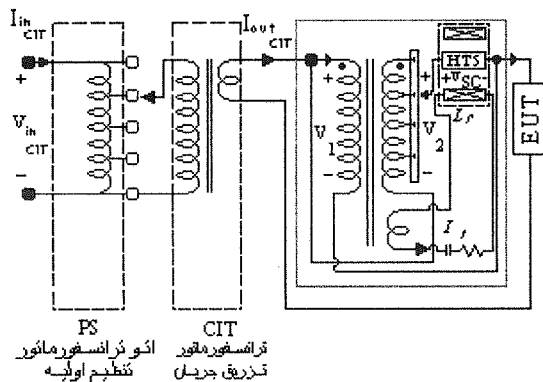
کنترل و حفاظت
اضافه جریان خروجی
با وجود اثر میدان



شکل (۳): دیاگرام شماتیک سیستم کنترل و حفاظت جریان جریان

با استفاده از اثر میدان خارجی

کنترل و حفاظت
اضافه جریان خروجی
با وجود میدان وتپ چنجر



شکل (۴): دیاگرام شماتیک سیستم کنترل و حفاظت جریان جریان

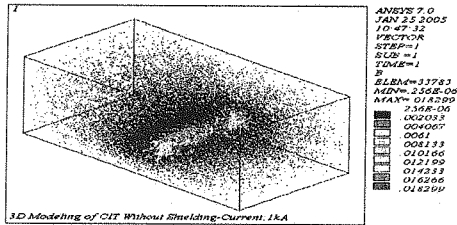
با امکان آزمونهای مختلف

۳-۴- تنظیمات سیستم کنترل و حفاظت

در این قسمت، با توجه به مقادیر نامی سیستم تزریق جریان پارامترهای سیستم کنترل و حفاظت ارائه شده محاسبه می‌گردد. براساس شکل (۴) می‌توان روابط (۵) تا (۸) را ارائه نمود:

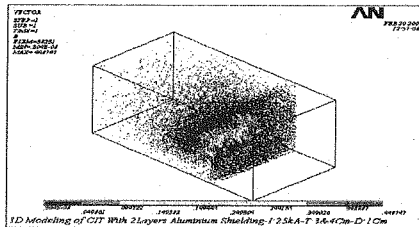
$$Z = \frac{j\omega L_1 R_{SC}(B)}{R_{SC}(B) + j\{\omega(\sqrt{L_1} + \sqrt{L_2})^2 + \frac{\omega L_3}{R} R_{SC}(B)\}} \quad (5)$$

امکان اعمال ناخواسته آن به ابررسانا وجود دارد. بنابراین مهمترین راهکار استفاده از لایه حفاظتی محفظه نیتروژن مایع است که مجموعه سلف L_f و ابررسانا در آن واقع است.

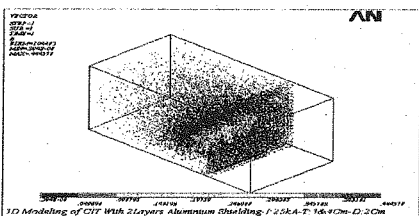


شکل (۵): توزیع میدان مغناطیسی حوالی شینه‌های خروجی سیستم تزریق جریان

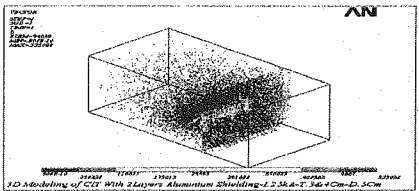
شبه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد استفاده از محفظه فلزی دوجداره آهنی با کمترین ضخامت 2mm به صورت دولایه با فاصله 1cm الی 5cm ضریب موثرسازی مناسبی را برای جلوگیری از تداخل این میدان مهیا می‌سازد. در صورت امکان رعایت فاصله بیشتر سپر سازی مناسب‌تری را ایجاد می‌کند که فاصله 5cm منظور را بطور کامل برآورده می‌سازد شکل (۶) در سه قسمت الف، ب و ج این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۶): نحوه گسترش خطوط شدت میدان‌های الکترومغناطیسی در فضای سه بعدی با حضور سپر دو لایه آهنی به ضخامت دو میلی‌متر (سپر اول و دوم) و با فاصله الف، یک سانتیمتر، ب، دو سانتیمتر و ج، پنج سانتیمتر از یکدیگر.

$$I_2 = \frac{J\omega(L_1 + \sqrt{L_1 L_2}) I_{out\ CIT}}{R_{SC}(B) + J\{\omega(\sqrt{L_1} + \sqrt{L_2})^2 + \frac{\omega L_3}{R} R_{SC}(B)\}} \quad (۶)$$

$$I_f = \frac{J\omega\sqrt{L_1 L_3} R_{SC}(B) I_{out\ CIT}}{R_{SC}(B) + J\{\omega(\sqrt{L_1} + \sqrt{L_2})^2 + \frac{\omega L_3}{R} R_{SC}(B)\}} \quad (۷)$$

$$R_{SC} = \frac{j\omega\{(L_1 + \sqrt{L_1 L_2}) I_{out\ CIT} - j\omega\sqrt{L_1} + \sqrt{L_2}\}^2 I_{SC}}{I_{SC}(1 + \frac{\omega L_3}{R})} \quad (۸)$$

که i_1, L_1, V_1 به ترتیب ولتاژ، اندوکتانس و جریان سیم‌پیچ اولیه، i_2, L_2, V_2 به ترتیب ولتاژ، اندوکتانس و جریان سیم‌پیچ ثانویه، $I_{out\ CIT}, I_{SC}, R_{SC}$ و L_3 به ترتیب جریان خروجی سیستم تزریق جریان، جریان گذرنده از ابررسانا، مقاومت ابررسانا و اندوکتانس سیم‌پیچ سوم بوده و R, C و L_f به ترتیب مقاومت، خازن و سیم‌پیچ میدان مغناطیسی می‌باشد. وقتی که I_2 به جریان بحرانی (I_c) ابررسانا می‌رسد. سطح جریان اولیه شروع به کار سیستم کنترلی (I_{ini}) با $I_{out\ CIT}$ برابر می‌شود. در نتیجه با درج $R_{SC} = 0$ و $I_2 = I_c$ در فرمول (۶)، I_{ini} به دست می‌آید:

$$I_{ini} = (1 + \sqrt{L_2 / L_1}) I_c \quad (۹)$$

از معادلات (۵) تا (۹) چگونگی انتخاب تپ پیشنهادی (مقدار L_2) قابل حصول است.

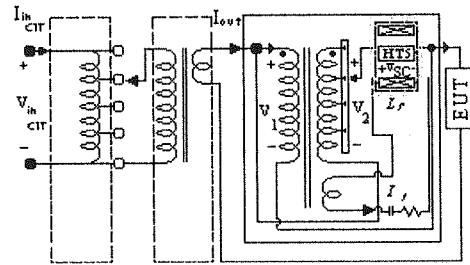
۴-۴-۶- ملاحظات سازگاری سیستم کنترل و حفاظت

با توجه به استفاده از اثر میدان مغناطیسی خارجی بر ابررسانا نباید میدان مغناطیسی ناشی از L_f توسط منبعی دیگر خنثی و یا حتی بیشتر از مقدار مورد نیاز افزایش یابد. با توجه به اینکه سیستم تزریق جریان مولد جریان زیاد بوده، میدان مغناطیسی منتج از جریان درون تانک را احاطه می‌کند. میدان مغناطیسی ایجاد شده از یکسو دارای قابلیت سپر سازی موثر (فعال) میدان تولید شده ناشی از L_f موثر بر ابررسانا می‌باشد. مهمتر آنکه میدان پراکنندگی بی جهت به ابررسانا اعمال و کنترل کننده سریعتر از زمان مطلوب شروع به کاهش جریان سیستم نموده و این عمل مانع از انجام آزمون می‌شود. شکل (۵) توزیع میدان مغناطیسی برای جریان 25000A ناشی از شینه‌های خروجی را نشان می‌دهد که در نرم‌افزار ANSYS بر اساس مدل دوقطبی جریان با مش‌بندی مثلثی به دست آمده است.

حدود میدان مغناطیسی از $0.1\ \mu T$ تا $0.2\ T$ حکایت از قابل توجه بودن میدان مغناطیسی دارد. با توجه به توزیع نامشخص میدان که وابسته به پارامترهای گوناگونی است،

بر این اساس طراحی نهایی سیستم کنترل و حفاظت اضافه جریان سیستم تزریق جریان براساس شکل (۷) می باشد.

کنترل و حفاظت
اضافه جریان خروجی
با وجود میدان و تپ چنجر



PS فرانسفورماتور
CIT تزریق جریان
تنظیم اولیه

شکل (۷) دیگرام شماتیک نهایی شده سیستم کنترل و حفاظت اضافه جریان برای سیستم تزریق جریان

۵- شبیه سازی سیستم کنترل و حفاظت جریان

به منظور آزمایش این سیستم حفاظتی، سیستم تزریق جریان برای آزمون های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ کیلوآمپر در نرم افزار *MATLAB* شبیه سازی شده است.

مقادیر فرض شده برای پارامترهای L_f, L_3, C, R, I_C در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): پارامترهای مفروض کنترل و حفاظت

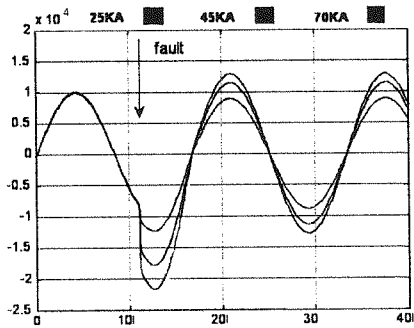
R	۳Ω
C	$۲۲\mu F$
L_f	$۱۶۳mH$
L_3	$۹/۵mH$
I_C	$۶۸۰۰A$

بر اساس روابط (۵) تا (۹) محاسبه مقادیر L_2 (عمل تنظیم تپ) برای آزمون های مختلف در جدول (۲) آورده شده است.

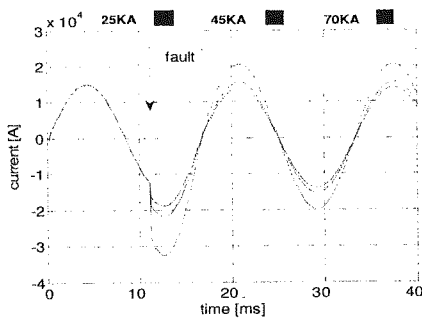
جدول (۲) تپ محاسبه شده سیستم کنترل و حفاظت اضافه جریان

$I_{ini} (A)$	$L_2 (mH)$	آزمون (kA)
۲۷۵۰۰	۱۸	۲۵
۲۲۰۰۰	۶/۳	۲۰
۱۶۵۰۰	۴/۸	۱۵
۱۱۰۰۰	۲/۱۳	۱۰

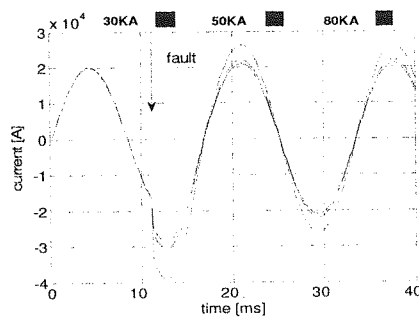
پس از اعمال خطا، شکل موجهای جریان در حضور کنترل کننده جریان و برای جریان های مختلف به دست آمده است. شکل (۸) نتایج شبیه سازی ها را نشان می دهد.



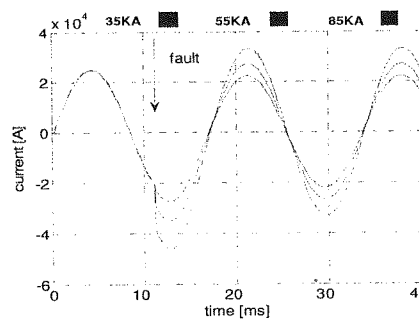
(الف)



(ب)



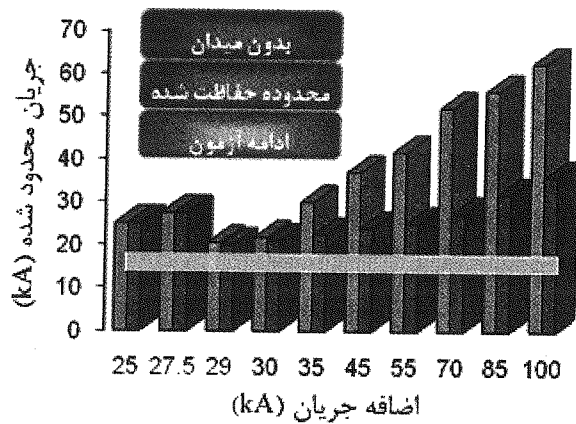
(ج)



(د)

شکل (۸) - کارایی سیستم کنترل و حفاظت اضافه جریان طراحی شده به ازای اضافه جریان های ممکن در آزمون (الف) ۱۰، (ب) ۱۵، (ج) ۲۰ و (د) ۲۵ کیلوآمپر

شکل موجهای جریان به دست آمده نشان می دهد که اضافه جریان ناخواسته مهار و اندازه جریان تا حد ممکن به مقدار متعارف بازگردانده شده است. به این صورت که در آزمونهای



(د)

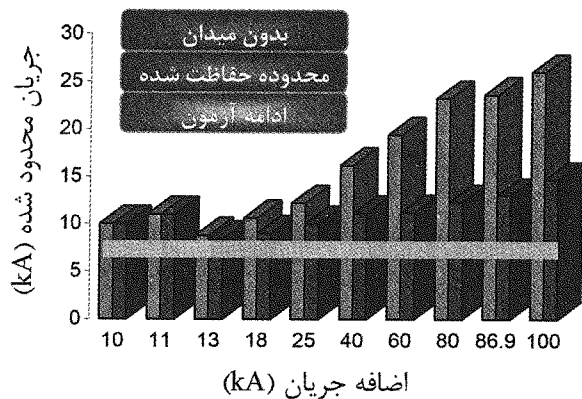
شکل ۹- محدوده نرمال و حفاظت شده برای آزمون (الف) ۱۰، (ب) ۱۵، (ج) ۲۰ و (د) ۲۵ کیلوآمپر

در مورد آزمون ۲۵ کیلوآمپر قابل ذکر است که برای جریان های آزمون بالاتر از ۵۵ کیلوآمپر استفاده از رله اضافه جریان می‌تواند احتمالات حداقل موجود را به صفر برساند. در این حالت به سبب کاهش بسیار زیاد جریان، زمان صرف شده توسط رله برای قطع کامل مدار قابل قبول است و به تجهیزات ترانسفورماتور سیستم تزریق جریان خسارتی وارد نمی‌شود. عملکرد ابررسانا در این کنترل کننده بسیار مطلوب است؛ تا جایی که زمان لازم برای بازگشت به شرایط نرمال (ادامه آزمون) در حدود یک چهارم سیکل است. از این رو ادامه آزمون بدون قطعی امکان پذیر می‌باشد.

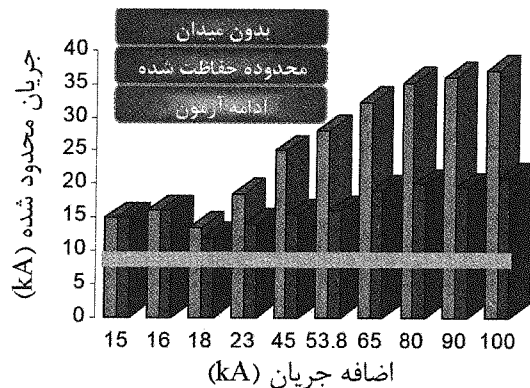
۶- ملاحظات عملی و اقتصادی

از نظر فنی امکان تداوم آزمایش بعد از ایجاد اضافه جریان نکته مهمی در آزمونهای نوعی و نمونه‌ای تجهیزات برقی است. با توجه به ساخت صنعتی سیمهای نسل دوم ابررسانا موسوم به Coated Conductors در سال ۲۰۰۷، هزینه های استفاده از ابررسانا برای کاربردهای صنعتی رو به کاهش است. گرچه هنوز استفاده از محصولات ابررسانا در مقایسه با تجهیزات معمولی در اموری مانند انتقال انرژی و ساخت ترانسفورماتور، اقتصادی به نظر نمی‌رسد، اما استفاده از آنها در تجهیزات حساس اندازه‌گیری مانند دستگاههای MRI سالهاست که کاربردی شده و از اینرو کاربرد ابررسانا برای دستگاههای گران قیمت اندازه‌گیری با توجه به دقت و اهمیت موضوع توجیه پذیر است. به علاوه با توجه به اینکه سیستم پیشنهادی حداکثر ۲۰ درصد به هزینه کل دستگاه تزریق می‌افزاید، بهبود عملکرد سیستم و استفاده از مدار کنترلی معرفی شده به لحاظ اقتصادی قابل قبول است. شایان ذکر است براساس شبیه‌سازی‌های انجام شده و مقایسه با روابط تئوری، استفاده

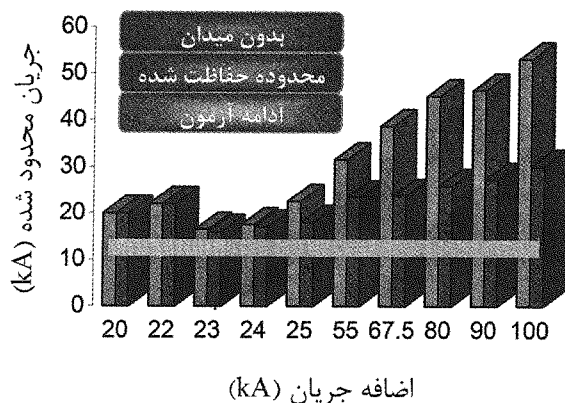
۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوآمپر کنترل اضافه جریان تا ۱۰۰ کیلوآمپر به راحتی میسر بوده، ترانسفورماتور تزریق جریان بطور کامل حفاظت شده و حتی در بازه‌های بزرگی به غیر از حفاظت که هدف اصلی است، ادامه آزمون نیز محقق گردیده است. بازه حفاظت شده به همراه بازه بزرگ ادامه آزمون در دو حالت حضور میدان و عدم حضور میدان در شکل (۹) قابل ملاحظه می‌باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

تزریق جریان نیز پیچیده شوند که در صورت ساخت گامهای آینده پژوهشی این تحقیق خواهد بود.

۸- تقدیر و تشکر

شایسته است نویسندگان مقاله از نقطه نظرات ارزشمند علمی و کاربردی جناب آقای دکتر حسین محسنی و حمایت‌های مالی شرکت برق منطقه‌ای تهران از این طرح تشکر و قدردانی نمایند.

۹- مراجع

Heydari, H.; Ariannejad, M.; Faghihi, F.; "Simulation and Analysis of 25kA Current Injection Transformer (CIT) with Finite Element Method", IEEE Conference, MELECON, Pages 909-915, 2004

Heydari, H.; Pedramrazi, S. M.; Faghihi, F.; "Mechanical Forces Simulation of 25kA Current Injection Transformer with Finite Element Method", IEEE Conference, IPEC, 2005

Heydari, H.; Pedramrazi S. M.; Faghihi, F.; "The Effects of Windings Current Density Values on Leakage Reactance in a 25 kA Current Injection Transformer", IEEE Conference, IPEC, 2005

Dawes, W. H.; "The Design of a Family of High-Current Switches with Over-Current and Over-Temperature Protection", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Volume 47, Issue 6, Dec. 1998, Page(s):1492 – 1502

Buckel, W.; Kleiner, R.; "Superconductivity, Fundamentals and Applications", 2nd edition, WILEY-VCH, 2004

Mourachkine, A.; "Room Temperature Superconductivity", University of Cambridge, 2004

Dull, R. W.; "A Guide to Superconductivity", Largo High School, Largo Florida, U.S.A. 1997.

Satio, E.; Taknenobu, T.; Ito, T.; Iwasa, Y.; Prassides, K.; Arima, T.; "Pressure Dependence of TC in the MgB₂ Superconductor as Probed by Resistivity Measurement," Journal of Physics, Condensed Matter 13, No. 12, March 2001

Sokolovsky, V.; Meerovich, V.; Vajda, I.; Beilin, V.; "Superconducting FCL: Design and Application," IEEE Transaction on Applied Superconductivity, vol. 14, pp. 1990-2000, September 2004

از مدار کنترلی بهبود زیادی در نتایج آزمایش‌های اتصال کوتاه داشته است. با این وجود به دلیل اینکه بحث درباره روش پیشنهادی برای نخستین بار در این مقاله انجام شده است، تداوم مباحثات و ساخت و آزمایش نمونه‌های واقعی تا حدود زیادی صحت نتایج شبیه‌سازی‌ها را اثبات خواهد کرد.

۷- نتیجه گیری:

وابستگی جریان خروجی سیستم تزریق جریان به امپدانس تجهیز تحت آزمون همواره آن را در معرض خطر اضافه جریان قرار می‌دهد. در این مقاله برای دستیابی همزمان به کنترل و حفاظت جریان خروجی، مداری مبتنی بر خاصیت ابررسانایی و ویژگی نامتعادلی شار مغناطیسی با استفاده از دو سیم‌پیچ و یک هسته ارائه گردیده و بهبود کارایی مدار ارائه شده از جهت افزایش سرعت نرخ رشد مقاومت در صورت اعمال میدان خارجی صورت گرفت. برای ایجاد میدان خارجی سیم‌پیچ سوم مشتمل بر خازن و سلف در حالت تشدید در نظر گرفته شد. تنظیمات سیستم پیشنهادی برای آزمون‌های مختلف با لحاظ تپ در سیم‌پیچ متصل به ابررسانا امکان‌پذیر گردید. تکمیل طراحی سیستم شامل جلوگیری از اثر ناخواسته میدان مغناطیسی پراکندگی موجود در مخزن ابررسانا بود که با طراحی سپر دو لایه آهنی برای کپسول نیتروژن مایع انجام شد. شبیه‌سازی‌های انجام شده برای سیستم تزریق جریان $25000 A$ محدوده‌های مناسبی در حدود دو برابر جریان آزمون را برای ادامه آزمون با این سیستم و از ۳ الی ۵ برابر جریان آزمون بدون صدمه به سیستم را نشان می‌دهد. با توجه به ساخت سیم‌های نسل دوم ابررسانا و اینکه سیستم پیشنهادی حداکثر ۲۰ درصد به هزینه کل دستگاه تزریق می‌افزاید، بهبود عملکرد سیستم و استفاده از مدار کنترلی معرفی شده به لحاظ اقتصادی قابل توجیه می‌باشد. از آنجا که نتایج شبیه‌سازی اصول اساسی تحلیلی مبتنی بر قوانین مدار و الکترومغناطیس را برآورده می‌کند درستی نتایج احراز می‌گردد.

اگرچه مدارهای کنترل عملی می‌تواند بر مبنای مدار مغناطیسی هسته باز یا هسته هوایی ساخته شده، حتی سیم‌پیچ‌های کنترلی می‌توانند روی هسته اصلی ترانسفورماتور