ResearchGate

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/280094776

Measurement of High Currents in a High Power Laboratory Using Rogowski Coil (In Persian)

Conference Paper · November 2013

CITATIONS
0

3 authors, including:

Mohammad Hamed Samimi
University of Tehran
29 PUBLICATIONS **150** CITATIONS

SEE PROFILE

H. Mohseni
University of Tehran
104 PUBLICATIONS **1,027** CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:

Project Frequency Response Analysis View project

Project Power system diagnosis View project

All content following this page was uploaded by Mohammad Hamed Samimi on 25 July 2015.

The user has requested enhancement of the downloaded file.

اندازه‌گیری جریان‌های بزرگ در آزمایشگاه جریان قوی با استفاده از کویل روگوفسکی

محمد حامد صمیمی، سلمان محسنی، حسین محسنی

موسسهٔ پژوهشی فشارقوی الکتریکی

دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران

تهران، ایران

m.h.samimi@ut.ac.ir

چکیده — لزوم انجام آزمایش‌های جریان بالا بر روی تجهیزات شبکهٔ قدرت به منظور احراز صحت عملکرد آن‌ها در شرایط اتصال کوتاه بر کسی پوشیده نیست. اندازه‌گیری جریان ثانویه که دارای مقدار بزرگی است باید با روش‌های خاص انجام شود. این مقاله پس از مطرح کردن روش‌های متفاوت برای این کار، به مراحل طراحی کویل روگوفسکی و انتگرال‌گیر مربوط به آن می‌پردازد. عوامل مهمی که باید در طراحی مد نظر قرار بگیرد مشخص شده است و یک نمونه بر اساس پارامترهای مناسب ساخته شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مجموعهٔ ساخته‌شده برای اندازه‌گیری جریان فرکانس قدرت مناسب است و دقت بهتر از ٪۱ را برآورده می‌کند.

واژه‌های کلیدی — اندازه‌گیری جریان‌های بزرگ؛ مجموعهٔ آزمایشگاهی؛ کویل روگوفسکی؛ آزمایش جریان قوی؛

۱. مقدمه

یکی از حوادث شبکه قدرت اتصال کوتاه می‌باشد. در هنگام اتصال کوتاه جریان بسیار زیادی در سیستم به وجود می‌آید و این جریان از تجهیزات نیز عبور می‌کند و می‌تواند باعث آسیب به تجهیزات شود. تا زمان قطع شدن جریان اتصال کوتاه توسط کلید قدرت این جریان از سایر تجهیزات در حال عبور است و این تجهیزات باید بدون آسیب بتوانند این جریان را تحمل کنند. مدت زمان تحمل اتصال کوتاه و همچنین حد تحمل جریان برای هر تجهیز در استاندارد مربوط به آن مشخص شده است.

به طور کلی استرس‌های اصلی ناشی از جریان زیاد را می‌توان به دو دسته استرس حرارتی و استرس مکانیکی تقسیم کرد [۱]. استرس مکانیکی به دلیل نیروهای ناشی از جریان و میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود و فقط وابسته به پیک جریان اتصال کوتاه می‌باشد. اتصال کوتاه‌های شبکه قدرت معمولاً با مؤلفهٔ DC میرا شونده همراه است [۲] و در نتیجه بیش‌ترین پیک ناشی از اتصال کوتاه معمولاً در اولین پریود جریان به وجود می‌آید. تحمل مکانیکی تجهیز بر اساس همین مقدار پیک تعیین می‌شود. از سوی دیگر استرس حرارتی مربوط به گرمای ناشی از جریان می‌باشد که با توان دوم جریان و زمان عبور جریان از تجهیز رابطه دارد. در این مورد مدت زمان عبور جریان از تجهیز و مقدار موثر جریان مهم خواهد بود

به دلیل اهمیت و قیمت بالای تجهیزات در شبکه قدرت لازم است تا تجهیزات پیش از نصب، آزمایش‌های گوناگونی را پشت سر بگذارند و از قابلیت آن‌ها اطمینان حاصل شود. از جمله این آزمایش‌ها، آزمایش مربوط به اتصال کوتاه می‌باشد. تست‌های مربوط به اتصال کوتاه در آزمایشگاه‌های جریان قوی یا توان بالا انجام می‌شود. برای تولید جریان بزرگ لازم برای تست اتصال کوتاه روش‌هایی وجود دارد که از رایج‌ترین آن‌ها استفاده از ترانسفورماتور جریان بالاست. این ترانسفورماتور تعداد دور ثانویه کمتری نسبت به تعداد دور اولیه دارد و جریان خروجی را افزایش می‌دهد. برای معتبرسازی تست لازم است تا جریانی که به تجهیز تزریق می‌شود به دقت ثبت شود و پارامترهایی نظیر پیک آن، مدت زمان اعمال و مقدار موثر جریان مشخص باشد. یکی از روش‌ها برای اندازه‌گیری جریان، انجام این کار در سمت اولیه ترانسفورماتور جریان بالاست. در اولیه حداکثر جریان به چند هزار آمپر محدود می‌شود و می‌توان با تجهیزات معمول آن را اندازه‌گیری

این پژوهش با حمایت دفتر امور تحقیقات برق شرکت توانیر انجام شده است.

کرد؛ اما جریان باید در ثانویه و با دقت بالا نیز اندازه‌گیری شود، زیرا به دلیل مواردی مثل جریان هجومی، جریان اولیه و ثانویه بر هم منطبق نیستند.

برای اندازه‌گیری جریان ثانویه که مقدار آن در حدود چند ده هزار آمپر است از روش‌های خاصی استفاده می‌شود که بتواند جریان‌های بزرگ را با دقت مناسب و هزینه معقولِ ساخت اندازه‌گیری کند. در ادامه پاره‌ای از این روش‌ها به طور خلاصه معرفی شده است.

۲.روش‌های اندازه‌گیری جریان‌های بزرگ

در اندازه‌گیری جریان‌های بزرگ به علت میدان مغناطیسی قوی معمولاً از هسته استفاده نمی‌شود، زیرا هسته به اشباع می‌رود و اندازه‌گیری دقت خود را از دست می‌دهد. برای جلوگیری از اشباع هسته می‌توان اندازه هسته را بزرگ‌تر کرد ولی با توجه به مقدار بالای جریان که در حدود ۱۰۰ kA است، این موضوع سبب هزینهٔ بسیار بالای تجهیز خواهد شد. یکی دیگر از روش‌های جلوگیری از اشباع هسته استفاده از هسته با فاصلهٔ هوایی است. در این صورت فاصله هوایی باید در طول هسته توزیع شده باشد، چرا که در غیر این صورت میدان مغناطیسی موضعی سبب اشباع هسته خواهد شد. بدین معنی که هسته در بخشی که فاصله هوایی قرار دارد در معرض شار مغناطیسی کمتری خواهد بود و اشباع نمی‌شود ولی در جایی که دورتر از فاصله هوایی است هسته به اشباع می‌رود. بنابراین هسته وضعیت یکسانی را از لحاظ شار نخواهد داشت. ایجاد فواصل هوایی متعدد نیز هزینه قابل‌ملاحظه‌ای در بر دارد، لذا معمولاً برای اندازه‌گیری جریان‌های بزرگ از هسته استفاده نمی‌شود.

یکی از روش‌های اندازه‌گیری جریان‌های بزرگ استفاده از کویل روگوفسکی[1] است. کویل روگوفسکی یک سیم‌پیچ بدون هستهٔ آهنی است. این سیم‌پیچ به گونه‌ای طراحی می‌شود که شارهای پراکندگی اثر بسیار کمی بر روی اندازه‌گیری داشته باشند. کاربرد اصلی کویل روگوفسکی در اندازه‌گیری جریان‌های زیاد با فرکانس‌های بالاست [۳]. به دلیل عدم وجود هسته، تزویج مغناطیسی بین اولیه و ثانویه اندک است و اندازه‌گیری در جریان‌های کم نیاز به لوازم جانبی با دقت بالایی دارد. خروجی کویل روگوفسکی به صورت معمول، ولتاژ است که این ولتاژ مشتق جریان مورد اندازه‌گیری است و در صورتی که بتوان این ولتاژ را بدون نویز به اتاق کنترل منتقل کرد می‌توان اندازه‌گیری را با دقت بالایی را انجام داد. همچنین در مواردی انتگرال‌گیری به همراه تقویت‌کننده در مسیر ولتاژ قرار می‌دهند که در این صورت تقویت‌کننده باید در بازه مورد نیاز به صورت خطی عمل کند تا بتوان اندازه‌گیری با دقت بالا را انجام داد ولی در جریان‌های بزرگ به علت میدان مغناطیسی بالا کویل روگوفسکی به خوبی عمل می‌کند و خروجی قابل‌توجهی خواهد داشت. در این حالت دقت اندازه‌گیری معمولاً بالاست. از نظر فرکانسی نیز غیر از فرکانس صفر یعنی DC، کویل روگوفسکی عملکرد مناسبی دارد. این کویل می‌تواند مؤلفه DC میرا شونده را با دقت خوبی منتقل کند، چرا که مؤلفه DC میرا شونده فرکانس صفر ندارد بلکه شامل فرکانس‌های غیر صفر می‌باشد. این روش معمولاً هزینه زیادی ندارد و دارای دقت اندازه‌گیری بالایی است.

یکی دیگر از روش‌های اندازه‌گیری جریان‌های بزرگ استفاده از مبدل‌های نوری جریان است [٤]. در این تجهیزات یک اشعه تک‌فام لیزری از طریق فیبر نوری به محل اندازه‌گیری ارسال می‌شود. این نور از یک ماده اپتیکی که از خود اثر فارادی نشان می‌دهد عبور می‌کند. چرخش زاویه میدان الکتریکی یک موج الکترومغناطیسی در یک ماده، در حضور میدان مغناطیسی را اثر فارادی می‌گویند. پس از عبور نور از ماده اپتیکی و چرخش زاویه میدان الکتریکی، پرتو نور از طریق فیبر نوری به تجهیز کنترل و اندازه‌گیری بازگردانده می‌شود. میزان چرخش اثر فارادی متناسب با میدان مغناطیسی است و در نتیجه با اندازه‌گیری میزان چرخش می‌توان به شدت میدان مغناطیسی در محل اندازه‌گیری پی برد. از نقطه‌نظر فرکانسی در صورتی که بر روی نور لیزر مدولاسیون انجام شود، این روش می‌تواند فرکانس صفر را نیز اندازه‌گیری کند، ولی معمولاً در فرکانس‌های بالاتر از چند کیلوهرتز دقت اندازه‌گیری به تدریج از دست خواهد رفت. در کاربرد آزمایشگاه جریان قوی ولتاژ خروجی سمت ثانویه ترانسفورماتور اندک و در حد ۵۰ V می‌باشد. در نتیجه نیاز به عایق‌کاری در مورد کویل روگوفسکی نخواهد بود.

یکی دیگر از روش‌های اندازه‌گیری جریان‌های بزرگ استفاده از مقاومت شنت است. مقاومت شنت جریان عبوری را تبدیل به سیگنال ولتاژی می‌کند و می‌تواند این سیگنال را به اتاق کنترل انتقال داد و آن را اندازه‌گیری کرد. در زمانی که اندازه‌گیری قرار است در ولتاژ بالا انجام شود معمولاً سیگنال ولتاژ را تبدیل به سیگنال نوری می‌کنند و آن را از طریق فیبر نوری انتقال می‌دهند [۵]. مقاومت شنت طراحی خاص خود را دارد در اندازه‌گیری فرکانس‌های بالا، طراحی مقاومت شنت باید به گونه‌ای باشد که سلف مسیر آن بسیار اندک باشد تا بتواند فرکانس‌های بالا را نیز با دقت اندازه‌گیری کند. ولی در اندازه‌گیری فرکانس قدرت، مهم‌ترین عامل آلیاژ

[1] Rogowski coil

مقاومت شنت می‌باشد. این آلیاژ باید به گونه‌ای باشد که با عبور جریان زیاد مقاومت آن تغییر قابل‌توجهی نکند، در نتیجه آلیاژ مقاومت شنت باید دارای ضریب تغییر مقاومت کوچکی در اثر حرارت باشد. از سوی دیگر مقاومت آن باید به اندازه‌ای کم باشد که هم ولتاژ زیادی تولید نکند و هم در اثر عبور جریان، مقدار زیادی گرم نشود چون اندازه‌گیری در آزمایشگاه در ولتاژ پایین انجام می‌شود سیگنال ولتاژ می‌تواند به صورت الکتریکی منتقل شود. مقاومت‌های شنت به علت طراحی خاصشان دارای قیمت بالایی می‌باشند و ساخت آن‌ها به دلیل آلیاژ خاص آن‌ها دشوار می‌باشد.

برای اندازه‌گیری جریان‌های بزرگ روش‌های دیگری نظیر استفاده از ابررسانایی[٦، ٧]، استفاده از اشباع هسته مغناطیسی و اندازه‌گیری هارمونیک دوم [٨] نیز در مراجع مطرح شده است. از بین راه‌کارهای موجود کویل روگوفسکی ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش است. همچنین برای ساخت آن به ادوات با تکنولوژی بالا احتیاج نیست و مواد آن به راحتی در دسترس است. استفاده از کویل روگوفسکی برای فرکانس‌های بالا و همچنین در حالت کار با ولتاژ بالا مشکلاتی را به همراه دارد ولی در طرح حاضر که ولتاژ ثانویه اندک است و همچنین اندازه‌گیری فرکانس ۵۰ Hz اهمیت دارد، استفاده از کویل روگوفسکی بهترین گزینه است.

۳. تاریخچهٔ کویل روگوفسکی

کویل روگوفسکی که به نام مخترع آن نام‌گذاری شده است به صورت چنبره‌ای و با هستهٔ هوایی ساخته می‌شود و می‌تواند برای اندازه‌گیری جریان متناوب مطابق قانون فارادی به کار رود. این نوع از مبدل برای اولین بار در سال ۱۸۸۷ پیشنهاد شد، زمانی که A. P. Chattock از دانشگاه بریستول از یک کویل بلند پیچیده شده بر روی یک میلهٔ لاستیکی برای اندازه‌گیری رلوکتانس مغناطیسی در مدارهای آهنی استفاده کرد [٩]. در سال ۱۹۱۲، W. Rogowski و W. Steinhaus از تکنیک Chattock برای اندازه‌گیری پتانسیل مغناطیسی استفاده کردند [١٠]. در آن زمان این کویل به واسطهٔ خروجی کوچک آن فقط می‌توانست برای اندازه‌گیری جریان‌های بزرگ با تغییرات سریع به کار رود، چون خروجی این کویل در اندازه‌گیری جریان‌های کوچک برای کارکرد صحیح تجهیزات در آن زمان مناسب نبود اما با تجهیزات میکروپروسسوری امروزی این کار قابل انجام است [١١]. این کویل برخلاف ترانسفورماتورهای جریان با هستهٔ آهنی، رفتاری بسیار خطی دارد که باعث می‌شود بتوان آن را در بازه‌های وسیع دامنهٔ جریان و فرکانس به کار برد. این موضوع اجازهٔ اندازه‌گیری در کاربردهای با حالت گذرای سریع و جریان بالا را می‌دهد، نظیر اندازه‌گیری جریان ترانسفورماتور کوره و جریان صاعقه.

در مواردی که دامنهٔ جریان مورد اندازه‌گیری بزرگ است خروجی کویل روگوفسکی دارای مقدار سیگنال به نویز بالایی است که سبب می‌شود با روش‌های ساده بتوان آن را فیلتر و تقویت کرد. خروجی کویل روگوفسکی غالباً مقدار اندکی است و احتیاج به مدار تقویت‌کنندهٔ دقیقی دارد. این موضوع به همراه اینکه خروجی کویل روگوفسکی متناسب با مشتق جریان ورودی است و نه خود جریان، دو مورد منفی در مورد کویل روگوفسکی است. ولی در سایر موارد نظیر هزینه و خطی بودن بر ترانسفورماتورهای سنتی ترجیح دارد [١٢].

فواید کویل روگوفسکی را می‌توان به طور خلاصه به صورت زیر لیست کرد:

- توانایی اندازه‌گیری جریان در یک بازهٔ بزرگ را بدون اشباع دارا هستند که این موضوع به خاطر طبیعت غیر مغناطیسی هستهٔ آن است، این بازه شامل چند میلی‌آمپر تا یک مگاآمپر می‌شود،
- به خاطر انعطاف‌پذیری و وزن کم به راحتی قابل‌استفاده هستند،
- هزینهٔ اندکی را به همراه دارند،
- طبیعت غیر مداخله‌گرانه‌ای دارند، زیرا توانی را از مدار اصلی مورد اندازه‌گیری نمی‌کشند و امپدانسی که به واسطهٔ ورود این تجهیز به سیستم اعمال می‌شود در حد چند میکروهانری است،
- پهنای باند بسیار گسترده‌ای دارند، به طوری که به صورت معمول می‌توانند از ۰/۱ Hz تا ۱ GHz را پوشش دهند. این موضوع سبب می‌شود تا این کویل بتواند جریان‌های با پیشانی بسیار تیز را نیز اندازه‌گیری کند، در حد تغییرات ٤٠ kA/μs،
- بسیار ایمن هستند، زیرا هیچ ارتباط الکتریکی مستقیمی با مدار اصلی وجود ندارد [١٣].

٤. مبنای عملکرد کویل روگوفسکی

در یک حلقه در میدان مغناطیسی متغیر B، ولتاژی القا می‌شود که طبق قانون فارادی برابر:

$$u(t) = \int \vec{B}(t) \cdot d\vec{A} = \frac{d\varphi}{dt} \qquad (۱)$$

است. برای به دست آوردن میدان مغناطیسی، یا به عبارت دیگر جریانی که این میدان را ایجاد کرده است، یک شبکهٔ انتگرال‌گیر باید به این حلقه اضافه

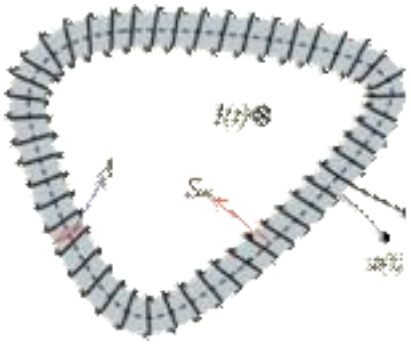
شود. کویل روگوفسکی در حقیقت تعداد زیادی از این حلقه‌ها است که با یکدیگر سری شده‌اند.

در حالتی که کویل روگوفسکی به صورت بسته باشد، یعنی کاملاً جریان را در بر بگیرد، حلقهٔ کویل روگوفسکی می‌تواند هر شکلی را به خود بگیرد؛ زیرا میدان مغناطیسی که حلقه‌ها را در بر می‌گیرد توسط قانون آمپر تعیین می‌شود و انتگرال میدان مغناطیسی روی هر مسیر بسته‌ای اطراف جریان برابر همان جریان می‌شود. این موضوع همچنین مکان قرار گرفتن هادی اولیه را نسبت به کویل بی‌اثر می‌کند. این موضوع سبب می‌شود تا کویل روگوفسکی یک گزینه اندازه‌گیری قابل‌انعطاف باشد. در کویل روگوفسکی برای کاهش تأثیرپذیری کویل از شارهای پراکندگی انتهای کویل را از بین سیم‌پیچی‌ها عبور می‌دهند و دو سر کویل از یک نقطه خارج می‌کنند [۱٤]. در این حالت می‌توان کویل روگوفسکی را از انتهای آن جدا کرد. این موضوع سبب می‌شود تا بتوان در مواردی که امکان جداسازی مدار جریان اولیه فراهم نیست به راحتی بتوان کویل روگوفسکی را بر روی مسیر جریان قرار داده و اندازه‌گیری را انجام داد.

مستقل از نحوهٔ قرارگیری کویل نسبت به جریان اولیه، می‌توان برای ولتاژ القا شده در پایانهٔ یک کویل روگوفسکی نوشت:

$$u(t) = \mu_0 \frac{NA}{S_m} \frac{dI(t)}{dt}, \qquad (۲)$$

که در آن N تعداد کل دورهای سیم‌پیچی در کویل، A سطح مقطع هر حلقه و S_m مسیر متوسط کل کویل روگوفسکی است. این پارامترها در شکل ۱ برای یک آرایش نامتقارن کویل روگوفسکی نشان داده شده است. این موارد مهم‌ترین پارامترهای کویل روگوفسکی هستند که با تنظیم آن‌ها می‌توان مقدار خروجی را تغییر داد. در حقیقت ضریب ثابت موجود در (۲) همان اندوکتانس متقابل بین کویل و هادی حامل جریان اولیه است.



شکل ۱ – پارامترهای کویل روگوفسکی [۱۰].

۵.ساخت کویل روگوفسکی

کویل روگوفسکی مورد نظر باید توانایی اندازه‌گیری جریان در بازه ۱۰ تا ۱۰۰ kA را داشته باشد. در طرح ساخته‌شده برای مغزی که کویل بر روی آن سیم‌پیچی می‌شود از لولهٔ پلاستیکی منعطف و توخالی استفاده شده است. انعطاف لوله باعث می‌شود که بتوان انتهای کویل را به راحتی جدا کرده و بر روی مسیر جریان با شکل‌های مختلف نصب شود. همچنین توخالی بودن کویل سبب می‌شود تا به راحتی بتوان مسیر برگشت را از درون سیم‌پیچی عبور داد.

برای سیم‌پیچی از سیم مسی لاکی به قطر ۰/۷۵ mm استفاده شده است. طول کویل برابر ۱۳۰ cm است و در این طول تعداد ۱٦۰۰ دور سیم‌پیچی انجام شده است. قطر لوله‌ای که سیم‌پیچی بر روی آن انجام شده است برابر ۲/۲ cm است. با این پارامترها اندوکتانس متقابل بین کویل و هادی جریان اولیه برابر است با:

$$M = \mu_0 \frac{NA}{S_m} = \mu_0 \times \frac{1600 \times \pi \times 0.011^2}{1.3} \approx 0.59 \mu H. \qquad (۳)$$

برای چنین آرایشی اگر جریان اولیه دارای پیک ۱۰ kA و ۵۰ Hz باشد، مقدار پیک ولتاژ القا شده در ثانویه برابر است با:

$$\hat{u} = M \frac{dI}{dt} = 0.59 \cdot 10^{-6} \times 100\pi \times 10 \cdot 10^3 = 1.85 \text{ V} \qquad (٤)$$

البته عدد فوق تنها حدود ولتاژ خروجی را در اختیار قرار می‌دهد و برای دقت کافی لازم است تا کل مجموعه در نهایت کالیبره شود.

٦.طراحی مدار انتگرال‌گیر

برای انتگرال‌گیر کویل روگوفسکی چندین راه متفاوت وجود دارد. انتگرال‌گیر کویل می‌تواند از نوع مقاومتی خازنی باشد. برای دقت بالاتر انتگرال‌گیری آنالوگ می‌تواند به جای مدار RC از تقویت‌کنندهٔ عملیاتی استفاده کند. با استفاده از تقویت‌کننده‌های با جریان ورودی بسیار کم می‌توان به صورت دقیقی انتگرال گرفت. معمولاً انتگرال‌گیری به کمک مدار RC برای فرکانس‌های بسیار بالا (>۱۰۰ MHz) و انتگرال‌گیری به کمک تقویت‌کنندهٔ عملیات برای فرکانس‌های پایین (<۱ MHz) مناسب است [۱۵]. یکی دیگر از روش‌های ممکن انتقال سیگنال با استفاده از یک مبدل آنالوگ به دیجیتال به کامپیوتر است. در کامپیوتر به کمک نرم‌افزارهای پردازش سیگنال هم می‌توان سیگنال را به صورت دیجیتالی فیلتر و تقویت

کرد و هم می‌توان فرآیند انتگرال‌گیری را انجام داد. این روش انتگرال‌گیری برای فرکانس‌های میانی بسیار مناسب است.

اگر مدار کویل روگوفسکی به وسیلهٔ مقاومت کوچکی بسته شود، کویل به صورت خود انتگرال‌گیر خواهد بود [۱۲]، زیرا در این حالت سلف کویل غالب خواهد بود و جریانی که از ثانویهٔ کویل عبور می‌کند انتگرال ولتاژ القا شده خواهد بود. در این صورت جریان عبوری از ثانویهٔ کویل روگوفسکی و ولتاژی که بر روی مقاومت کوچک افت می‌کند متناسب با جریان ورودی خواهد بود. در این حالت کارکرد کویل روگوفسکی نظیر یک ترانسفورماتور جریان سنتی است ولی خروجی آن کوچک می‌باشد. از بین موارد فوق گزینهٔ استفاده از مدار RC و تقویت‌کنندهٔ عملیاتی ساده‌ترین گزینه‌ها هستند.

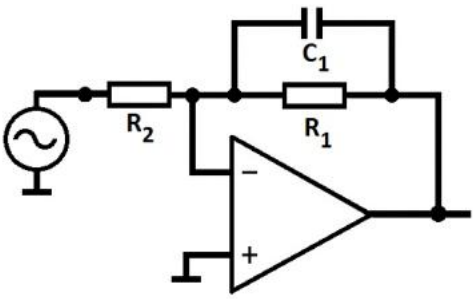
انتگرال‌گیر کویل روگوفسکی باید علاوه بر پوشش یک رنج فرکانسی وسیع دارای ثابت زمانی چندین برابر ثابت زمانی مدار اولیه باشد، ولی پیاده‌سازی چنین انتگرال‌گیری به کمک مدار RC محدودیت‌هایی دارد. از جمله:

الف) برای مثال یک انتگرال‌گیر RC که ثابت زمانی ۱۰ ثانیه دارد، می‌تواند توسط یک مقاومت ۱۰ MΩ و یک خازن ۱۰ μF پیاده‌سازی شود. ولی این انتگرال‌گیر به واسطهٔ خازن‌های پراکندگی موازی با مقاومت و همچنین به خاطر تلفات خازن پاسخ فرکانسی مناسبی را نمی‌تواند ارائه دهد.

ب) نسبت سیگنال خروجی به ورودی برای چنین انتگرال‌گیری بسیار کوچک است. مثلاً، بهرهٔ انتگرال‌گیر RC قبل در فرکانس ۵۰ Hz در حدود ۰/۰۰۳۱۸ می‌باشد. با توجه به اینکه تزویج خود کویل روگوفسکی به واسطهٔ هستهٔ هوایی کوچک است چنین بهرهٔ کوچکی می‌تواند اندازه‌گیری را بسیار سخت کند. با وجود چنین مشکلاتی و همچنین نیاز به تقویت کردن خروجی کویل روگوفسکی به نظر می‌رسد که انتگرال‌گیری برای اندازه‌گیری جریان‌های فرکانس قدرت به وسیلهٔ تقویت‌کنندهٔ عملیاتی گزینهٔ بهتری باشد.

تصویر مدار پایهٔ انتگرال‌گیر به کمک تقویت‌کنندهٔ عملیاتی در شکل ۲ نشان داده شده است. اگر R_1 از این مدار حذف شود، ثابت زمانی انتگرال‌گیر برابر $(1+G)R_2C$ خواهد بود که در آن G بهرهٔ حلقهٔ باز تقویت کننده است. این بهره در تقویت‌کننده‌های خوب به 10^5 نیز می‌رسد. این موضوع سبب می‌شود تا بروز هر گونه عدم تعادل با این بهره تقویت‌شده و به سرعت خروجی تقویت‌کننده به اشباع مثبت یا منفی برود. با قرار دادن مقاومت R_1 بهرهٔ DC تقویت‌کننده به مقدار R_1 / R_2 کاهش می‌یابد.

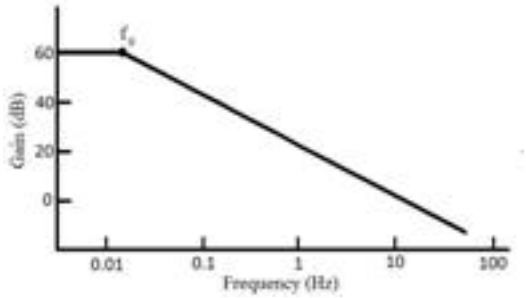
اگر منبع ورودی به پایهٔ منفی متصل باشد، نظیر آنچه در شکل ۲ نشان داده شده است، ولتاژ خروجی عکس خواهد بود و در نهایت لازم است که



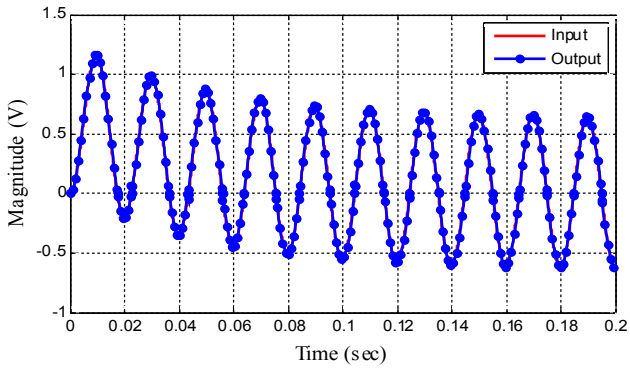
شکل ۲ – مدار انتگرال‌گیر پایه توسط تقویت‌کننده‌ی عملیاتی [۱۶].

معکوس شود. مرجع [۱۶] یک مدار انتگرال‌گیر را پیشنهاد داده است که ولتاژ ورودی به پایهٔ مثبت اعمال می‌شود. در چنین انتگرال‌گیری ولتاژ خروجی هم علامت انتگرال منبع ورودی است، اما مشکل چنین تقویت‌کننده‌ای آن است که در یک فرکانس بالا فرآیند انتگرال‌گیری متوقف می‌شود؛ به عبارت دیگر چنین مداری انتگرال‌گیری را در یک بازه انجام می‌دهد. این در حالی است که مدار شکل ۲ از فرکانسی به بالا تا فرکانس کاری Op-Amp انتگرال‌گیری را انجام می‌دهد. اگر منبع ورودی به سر مثبت متصل باشد مقاومت R_1 فرکانس شروع انتگرال‌گیری و مقاومت R_2 فرکانس پایان انتگرال‌گیری را تعیین می‌کند. همچنین این دو مقاومت مقدار بهرهٔ تقویت‌کننده را تعیین می‌کند؛ بنابراین تغییر R_2 هم بازهٔ انتگرال‌گیری و هم بهره را تغییر می‌دهد و در نتیجه دارای انعطاف‌پذیری زیادی نیست. اگر منبع ورودی همانند شکل ۲ به سر منفی متصل باشد، مقاومت R_1 فرکانس شروع انتگرال‌گیری و مقاومت R_2 مقدار بهره را تعیین می‌کند؛ بنابراین می‌توان مقدار R_2 را برای دستیابی به بهره‌های مختلف در بازه‌های مختلف جریان تغییر داد بدون اینکه بازهٔ انتگرال‌گیری دچار تغییر شود. به همین خاطر انتگرال‌گیر طرح ساخته‌شده بر اساس شکل ۲ طراحی شده است.

در طراحی انتگرال‌گیر توجه به دو نکته لازم است. اول اینکه مقدار بهرهٔ تقویت‌کننده باید به گونه‌ای باشد که ولتاژ خروجی در کمترین جریان به اندازهٔ کافی بزرگ باشد و همچنین در بیش‌ترین جریان دچار اشباع نشود.



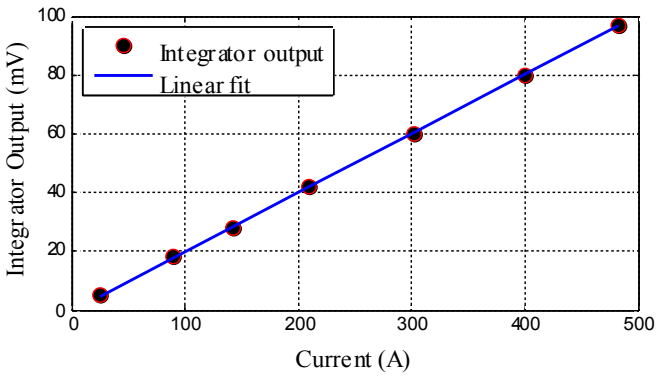
شکل ۳ – مشخصه‌ی فرکانسی عمومی انتگرال‌گیر به کمک تقویت‌کننده [۱۶].



شکل ٤ – جریان دارای مؤلفهٔ DC و خروجی انتگرال‌گیر. تطابق دو شکل موج نشان می‌دهد که مدار می‌تواند به درستی مؤلفهٔ DC را انتگرال‌گیری کند.

دوم آنکه اگر انتگرال‌گیر بخواهد علاوه بر فرکانس نامی، قادر به انتگرال‌گیری مؤلفهٔ میراشوندهٔ DC نیز باشد لازم است تا فرکانس شروع انتگرال‌گیری کوچک در نظر گرفته شود.

شکل ۳ مشخصه فرکانسی عمومی تقویت‌کننده را نشان می‌دهد. فرکانس شروع انتگرال‌گیری یعنی f_0 برابر $1/2\pi R_1 C_1$ است. در طراحی ساخته‌شده با انتخاب $R_1 = 10M\Omega$ و $R_2 = 10k\Omega$ بهرهٔ DC برابر ۱۰۰۰ حاصل شده است. با این بهره تغییر چندین میکروولت در ورودی به تغییر چندین میلی ولت در خروجی منجر می‌شود که برای حاشیهٔ اشباع V ۱۰+ و V ۱۰– قابل پذیرش است. با انتخاب $C_1 = 1\mu F$، f_0 برابر Hz ۰/۰۱٦ می‌شود. با انتگرال‌گیری در این فرکانس پایین، مؤلفهٔ DC میراشونده نیز به درستی انتگرال گرفته می‌شود. مدار انتگرال‌گیر با پارامترهای فوق در نرم‌افزار Pspice شبیه‌سازی شده است و مشخصهٔ فرکانسی آن استخراج شده است که با آنچه که در بالا بیان شد تطابق دارد. همچنین به ورودی آن مشتق یک شکل موج با مؤلفهٔ DC داده شده و خروجی آن با مقدار مورد انتظار مقایسه شده است. شکل موج جریانی که از آن مشتق گرفته شده و به



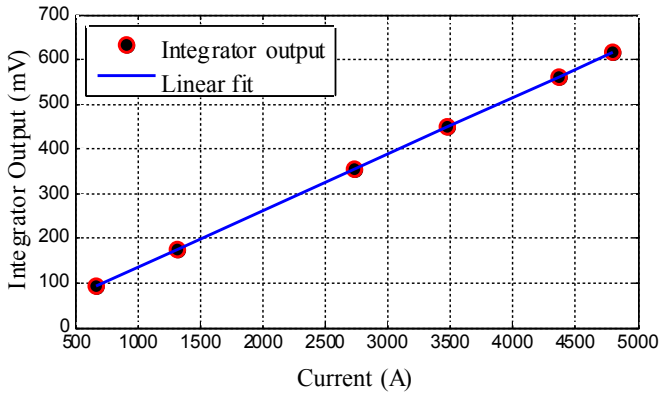
شکل ۵ – خروجی کویل روگوفسکی و خط برازش شده به آن برای جریان‌های کمتر از A ۵۰۰. نتایج با دقت بهتر از ٪۱ خطی هستند.

شکل ٦ – ترانسفورماتور جریان قوی و کویل روگوفسکی در ثانویهٔ آن

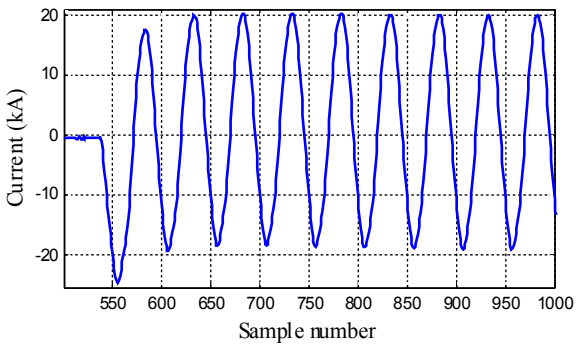
ورودی انتگرال‌گیر داده شده است به همراه خروجی مدار در شکل ٤ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که مداری با پارامترهای فوق می‌تواند به درستی مؤلفهٔ DC میراشونده را نیز انتگرال‌گیری کند و شکل موج جریان اصلی دچار اعوجاج نمی‌شود. با پارامترهای فوق مقدار بهرهٔ تقویت‌کننده در فرکانس قدرت برابر ۰/۷ است که باعث می‌شود تا انتگرال‌گیر تا جریان اندازه‌گیری kA ۵۰ اشباع نشود

۷. نتایج آزمایشگاهی

برای احراز صحت عملکرد مجموعهٔ کویل روگوفسکی و انتگرال‌گیر آن سه سری آزمایش انجام شده است. در آزمایش اول از یک ترانسفورماتور با خروجی تا جریان A ۵۰۰ استفاده شده است. کویل روگوفسکی ساخته‌شده بر روی ثانویهٔ این ترانسفورماتور نصب شده است و مقدار ولتاژ خروجی انتگرال‌گیر به ازای جریان‌های مختلف قرائت شده است. برای اندازه‌گیری جریان نیز از ترانسفورماتور جریان نوع کلمپی استفاده شده است. شکل ۵ نتیجهٔ این آزمایش را نشان می‌دهد. در شکل ۵ یک خط نیز به مجموعهٔ داده‌ها برازش شده است. هرچه داده‌های اندازه‌گیری به حالت خطی



شکل ۷ – خروجی کویل روگوفسکی و خط برازش شده به آن برای جریان‌های از A ۵۰۰ تا A ۵۰۰۰. نتایج با دقت بهتر از ٪۰/۵ خطی هستند.



شکل ۸–خروجی کویل روگوفسکی در آزمایش جریان قوی.

نزدیک‌تر باشد دقت کویل روگوفسکی بیشتر خواهد بود. نتایج این آزمایش با دقت بهتر از ۱٪ خطی می‌باشد.

در آزمایش دوم از یک ترانسفورماتور جریان قوی برای تولید جریان تا ۵ kA استفاده شده است. در این آزمایش جریان‌ها به کمک یک مقاومت شنت اندازه‌گیری شده است. شکل ٦ ترانسفورماتور جریان قوی و کویل روگوفسکی را در خروجی آن هنگام تست نشان می‌دهد. نتایج مربوط به این آزمایش در شکل ۷ آمده است. نتایج در این مرحله با دقت بهتر از ۰/۵٪ خطی هستند. تا زمانی که انتگرال‌گیر مربوط به کویل اشباع نشود عملکرد خطی کویل همچنان ادامه دارد شکل ۸ نیز جریان اندازه‌گیری شده توسط کویل روگوفسکی را در آزمایش سوم نشان می‌دهد. ولتاژ خروجی انتگرال‌گیر توسط یک مبدل آنالوگ به دیجیتال ثبت شده است. در این آزمایش مقدار موثر جریان ١٤ kA به یک تجهیز اعمال شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است مولفهٔ DC میراشونده نیز به درستی اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که مجموعهٔ ساخته‌شده از دقت مناسبی برای اندازه‌گیری جریان در آزمایش‌های جریان قوی برخوردار است.

۸ جمع‌بندی

در این مقاله ابتدا لزوم آزمایش‌های جریان قوی و اندازه‌گیری جریان تجهیز مورد آزمایش تبیین شد. سپس روش‌های متفاوت اندازه‌گیری جریان‌های بزرگ معرفی شد و علت ترجیح استفاده از کویل روگوفسکی توضیح داده شد. در ادامه تئوری نحوهٔ عملکرد کویل روگوفسکی مطرح و طراحی انجام‌شده بر اساس آن معرفی شد. سپس به روش‌های متفاوت انتگرال‌گیری پرداخته شد و انتگرال‌گیر با استفاده از تقویت‌کنندهٔ عملیاتی به عنوان بهترین گزینه انتخاب شد. فرآیند طراحی و نکاتی که باید در ساخت انتگرال‌گیر به آن توجه شود به تفصیل بیان شد و پارامترهای نهایی انتگرال‌گیر ساخته‌شده بیان شد. همچنین به کمک شبیه‌سازی نشان داده شد که انتگرال‌گیر طراحی‌شده توانایی اندازه‌گیری مؤلفهٔ DC میراشونده را به درستی داراست. در نهایت نتایج آزمایش‌های مربوط به مجموعهٔ کویل روگوفسکی و انتگرال‌گیر گزارش شده است و نشان می‌دهد که کویل ساخته‌شده دارای دقت بهتر از ۱٪ است که برای مقاصد اندازه‌گیری در آزمایشگاه جریان قوی کافی است. مجموعهٔ ساخته‌شده می‌تواند برای اندازه‌گیری بازه‌های جریان و فرکانس گسترده‌تر بهبود یابد.

۹. منابع

[1] *AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis - preferred ratings and related required preferred ratings and related capabilities.*, ANSI C37-06, IEEE, 1997.

[2] I. Kasicki, *Short circuits in power systems,* Weinheim, Germany, Wiley-VCH Verlag-Gmbh, 2002.

[3] A. L. Kojovic, "Applications of Rogowski coils for advanced power system soloutions," in *18th Int. Conf. and Exhibition Electricity Distribution*, Turin, CIRED 2005, 6-9 June, 2005.

[4] W. Li, W. Bowen, W. Ling, W. Zhihua, and H. Wenmei, "Large current measurements using a fibre optics current sensor," in *proc. 10th World Congr. Intelligent Control and Automation*, Beijing, WCICA, 6-8 July, 2012, pp. 4337-4340.

[5] X. Han, Y. Xu, C. Fu, and H. Rao, "Research about measurement performance of optic-electric DC current transformer in 500 kV HVDC power system," in *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf.,* Wuhan, APPEEC 2009, 27-31 March, 2009.

[6] S. L. Hays, B. Claypool, and G. W. Foster, "The 100000 Amp DC power supply for a staged hadron collider superferric magnet," *IEEE Trans. Appl. Supercond.,* vol. 16, pp. 1626-1629, June 2006.

[7] C. Berriaud and A. Donati, "A device for measuring high current at cryogenic temperatures," *IEEE Trans. Appl. Supercond.,* vol. 12, pp. 1264-1268, March 2002.

[8] R. Shiyan, "A 100000 A high precision on-site measurement calibration device for heavy direct current," *IEEE Trans. Instrum. Meas.,* vol. 39, pp. 19-22, Feb. 1990.

[9] C. Xianghu, Z. Xiangjun, D. Feng, and L. Ling, "Novel PCB sensor based on rogowski coil for transmission lines fault detection," in *IEEE Power & Energy Society General Meeting,* Calgary, PES '09, 26-30 July, 2009.

[10] M. Rigoni *et al.* "Rogowski coil current meters," *IEEE Potentials,* vol. 27, pp. 40-45, Aug. 2008.

[11] L. Kojovic, "PCB Rogowski coils benefit relay protection," *IEEE Comput. Appl. Power,* vol. 15, pp. 50-53, Aug. 2002.

[12] A. M. Lucianio and M. Savastano, "Wide band transformer based on a split-conductor current sensor and a Rogowski coil for high current measurement," in *IEEE Proc. Integrating Intelligent Instrumentation and Control Instrumentation and Measurement Technology Conf.,* Waltham, IMTC/95, 24-26 April, 1995.

[13] I. A. Metwally, "Self-integrating Rogowski coil for high-impulse current measurement," *IEEE Trans. Instrum. Meas.,* vol. 59, pp. 353-360, Feb. 2010.

[14] H. Bluhm, *Pulsed power systems, principles and applications,* Berlin, Springer, 2006.

[15] I. M. Shafiq, L. Kutt, M. Lehtonen, T. Niemienen, and M. Hashmi, "Parameters identification and modeling of high frequency current transducer for partial discharge measurements," *IEEE Sensors J.,* vol. 13, pp. 1081-1091, March 2013.

[16] J. A. J. Pettinga, and J. Siersema, "A poly phase 500 kA current measuring system with Rogowski coils," *IEE Proc. Electric Power Applicat.,* vol. 130, pp. 360-363, Sep. 1983.

View publication stats