

ارائه یک روش کنترلی الکترونیکی جدید به منظور میرا کردن اضافه‌ولتاژ ناشی از فرورزونانس در ترانسفورماتورهای ولتاژ خازنی

محمد نوایی لاریمی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ علی‌اکبر عبدوس^۲، استادیار؛ مجید شهابی^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- بابل- ایران - m.navaei@stu.nit.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- بابل- ایران - a.abdoos@nit.ac.ir

۳- گروه پژوهشی پست‌های فشار قوی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- بابل- ایران - shahabi.m@nit.ac.ir

چکیده: مدار میراکننده فرورزونانس مهم‌ترین تجهیز به‌منظور رفع اضافه‌ولتاژ و نوسانات ناشی از پدیده فرورزونانس در ترانسفورماتورهای ولتاژ خازنی است. این تجهیز در سه نوع پسیو، اکتیو و الکترونیکی وجود دارد که در سمت ثانویه به‌صورت موازی با بار ترانسفورماتور ولتاژ خازنی قرار می‌گیرد. در این مقاله یک سیستم کنترلی جدید برای مدار میراکننده نوع الکترونیکی و به‌منظور رفع سریع نوسانات و اضافه‌ولتاژ ناشی از فرورزونانس ارائه می‌گردد. این سیستم پیشنهادی از ولتاژ خروجی ترانسفورماتور ولتاژ خازنی نمونه‌برداری می‌کند و سپس با توجه به سطح اضافه‌ولتاژ خروجی، تریستورها را روشن می‌نماید. همچنین به‌محض رفع اضافه‌ولتاژها، تریستورها خاموش می‌گردند. با وجود این سیستم کنترلی نیازی به مدار آشکارساز فاز، مدار تعیین زاویه آتش و منبع مجزا برای تأمین پالس و تریگر کردن تریستورها نیست. برخلاف روش‌های دیگر، در مدار کنترلی ارائه‌شده، تریستورها برای یک زمان ثابت و مشخص (معمولاً ۸۰ میلی‌ثانیه) روشن نمی‌شوند، بلکه زمان روشن ماندن آن‌ها به سطح اضافه‌ولتاژ ناشی از فرورزونانس بستگی دارد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که سیستم کنترلی از سرعت عملکرد بالا و پایداری مطلوبی برخوردار است. علاوه‌براین سیستم کنترلی پیشنهادی هیچ تأثیر منفی بر روی پاسخ فرکانسی و پاسخ حالت گذرای ترانسفورماتور ولتاژ خازنی نخواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: ترانسفورماتور ولتاژ خازنی، مدار میراکننده فرورزونانس، فرورزونانس، مشخصه پاسخ فرکانسی.

A New Electronic Control Method to Suppress Ferroresonance Overvoltage in CVTs

M. Navaei Larimi¹, MSc Student; A. Abdoos², Assistant professor; M. Shahabi³, Assistant professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Email: m.navaei@stu.nit.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Email: a.abdoos@nit.ac.ir

3- HV Substation Research Group, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Email: shahabi.m@nit.ac.ir

Abstract: Ferroresonance Suppression Circuit (FSC) is the most important equipment used in Capacitor Voltage Transformer (CVT) for suppression of ferroresonance phenomenon. There are three types of FSC: active, passive and electronic type. This element is installed at the secondary side in parallel with CVT burden. In this paper, a new control unit is proposed for fast suppression of oscillations and overvoltages due to ferroresonance occurrence. The proposed control unit takes samples from CVT output voltage and then triggers SCRs according to level of overvoltage. Moreover, the SCRs are turned off in the absence of overvoltage. By using this control unit, phase detector unit, firing circuit and separate source for firing the SCRs are not required. Unlike some previously proposed methods, the SCRs are not triggered on for a prespecified time interval (typically 80 ms) but the SCRs turn-on time depends on the level of ferroresonance overvoltage. Simulation results show that the proposed control unit has desirable stability and fast response. Besides, the proposed control unit has not negative effect on frequency and CVT transient responses.

Keywords: Capacitor voltage transformer, ferroresonance suppression circuit, ferroresonance, frequency response characteristics.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۰۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۰۳ و ۱۳۹۶/۰۸/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۰

نام نویسنده مسئول: علی‌اکبر عبدوس

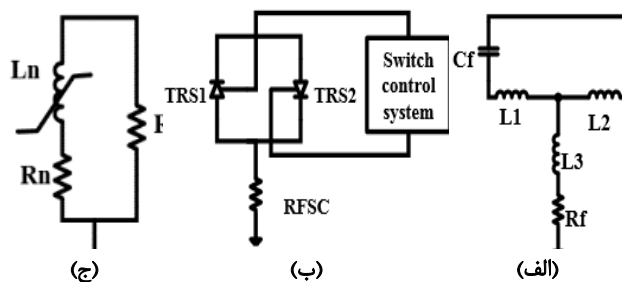
نشانی نویسنده مسئول: ایران - بابل - خیابان شریعتی - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

می‌گردد. در واقع مدار میراکننده فرورزونانس پسیو همانند منبع جریان کنترل‌شونده با ولتاژ عمل می‌کند [۹-۷]. مدار میراکننده فرورزونانس پسیو دارای کمترین سرعت پاسخ در بین مدارهای میراکننده است. مدار میراکننده فرورزونانس نوع الکترونیکی نیز دارای سریع‌ترین پاسخ و بهترین عملکرد حالت گذرا است. مدار میراکننده فرورزونانس الکترونیکی شامل دو سوئیچ الکترونیک قدرت است که در صورت ایجاد اضافه‌ولتاژ، مقاومتی را وارد مدار می‌کند و نوسانات فرورزونانس به زمین منتقل می‌گردد [۱۰-۱۲].

در این مقاله یک سیستم کنترلی جدید برای کنترل تریستورهای موجود در مدار میراکننده فرورزونانس الکترونیکی ارائه می‌گردد، به‌گونه‌ای که برخلاف [۱] نیاز به منبع پالس مجزا برای سوئیچینگ تریستورها ندارد. در واقع مدار پیشنهادی از خروجی ولتاژ CVT به‌عنوان نمونه ورودی سیستم کنترلی استفاده می‌کند و سپس این ولتاژ با یک مرجع مشخص مقایسه می‌گردد. در صورتی که خروجی CVT از مقدار مرجع بیشتر شده باشد، سیستم کنترلی پیشنهادی تریستورها (SCR) را وارد سیستم می‌کند. از طرف دیگر به محض برطرف شدن اضافه‌ولتاژها، سیستم کنترلی تریستورها را خاموش می‌نماید. در برخی مقالات از سوئیچ‌های الکترونیک قدرت IGBT^۱ و یا GTO^۲ برای مدار میراکننده الکترونیکی استفاده شده است که برای روشن و خاموش شدن این نوع سوئیچ‌ها نیاز به دو مدار فرمان مجزا به‌منظور ایجاد پالس مثبت و منفی می‌باشد [۱، ۷، ۱۳].

در این مقاله از تریستورهای SCR در مدار میراکننده فرورزونانس پیشنهادی استفاده می‌شود. لذا در سیستم کنترلی آن، نیازی به تولید پالس منفی نبوده و مدار میراکننده فرورزونانس پیشنهادی برخلاف دیگر مدارهای میراکننده الکترونیک تنها دارای یک مدار فرمان و کموتاسیون خودکار است. همچنین رفتار این سیستم کنترلی وابسته به مقدار ولتاژ لحظه‌ای سیستم است. این درحالی است که در مدارهای میراکننده فرورزونانس الکترونیک مراجع قبلی، بعد از ایجاد اضافه‌ولتاژ، تریستورها برای چند سیکل و یک زمان ثابت و مشخص (معمولاً ۸۰ میلی‌ثانیه) روشن می‌شوند و در آن مدت مشخص رفتار تریستورها به شرایط مدار بستگی ندارد [۷، ۱۳]. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که سیستم کنترلی پیشنهادی کاملاً پایدار است و در شرایطی که سیستم دارای حالت نرمال است، عملکردی ندارد.

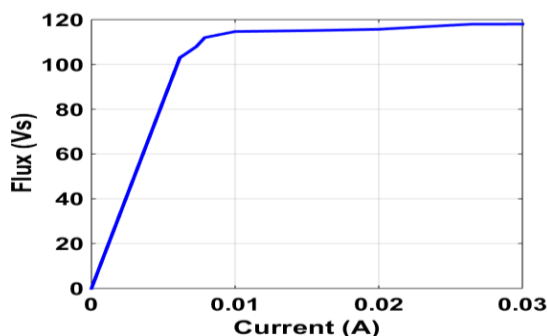


شکل ۱: انواع مدارهای میراکننده فرورزونانس: (الف) مدار میراکننده اکتیو، (ب) مدار میراکننده الکترونیک، (ج) مدار میراکننده پسیو

فرورزونانس یک پدیده کاملاً پیچیده و تصادفی است که امروزه به دلیل تغییر ساختار، کاهش تلفات سیستم قدرت، افزایش بارهای نامتعادل، افزایش تجهیزات غیرخطی احتمال وقوع آن افزایش پیدا کرده است. موارد ذکر شده موجب کاهش کیفیت توان شبکه نیز خواهد شد. فرورزونانس در ترانسفورماتورهای ولتاژ خازنی در اثر اشباع هسته مغناطیسی ترانسفورماتور میانی (کاهنده) و رزونانس آن با خازن سری موجود در سیستم (خازن‌های مقسم ولتاژ در CVT) رخ می‌دهد. ولتاژ خروجی CVT به‌عنوان ورودی برای سیستم‌های حفاظتی و همچنین در سیستم‌های اندازه‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این رو پیشگیری و یا میرا کردن سریع نوسانات و اضافه‌ولتاژ ناشی از فرورزونانس در CVT دارای اهمیت زیادی است. به عبارت دیگر در صورتی که سیگنال خروجی CVT نتواند ولتاژ ورودی را به خوبی دنبال کند، می‌تواند باعث عملکرد اشتباه و ناخواسته سیستم‌های حفاظتی مانند رله دیستانس در خطوط انتقال شود [۵-۱]. پدیده فرورزونانس همراه با هارمونیک‌های مرتبه بالا و پایین است و تجهیزات مورد استفاده در شبکه‌های قدرت آلوده به هارمونیک دچار تلفات اضافی در ترانسفورماتورها و افزایش تلفات توان در کابل‌ها، موتورها و خازن‌ها می‌شوند. علاوه بر آن وجود هارمونیک‌ها می‌تواند سبب عملکرد اشتباه تجهیزات اندازه‌گیری که برای ولتاژ سینوسی طراحی شده‌اند، شود [۶]. مدار میراکننده فرورزونانس (FSC) مهم‌ترین تجهیز است که برای مقابله با فرورزونانس در CVT مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساس عملکرد این مدارها به این صورت است که در زمان ایجاد اضافه‌ولتاژ ناشی از فرورزونانس، بار اضافی به سیستم تحمیل می‌کنند و باعث میرا شدن نوسانات و اضافه‌ولتاژها می‌شوند. این تجهیز معمولاً در سه نوع اکتیو، پسیو و الکترونیک وجود دارد که در شکل ۱ نشان داده شده است [۱]. مدارهای میراکننده فرورزونانس نوع اکتیو و پسیو بر خلاف نوع الکترونیک همواره در سیستم قرار دارند و تحت ولتاژ هستند. در نتیجه تلفات دائمی به سیستم اعمال می‌کنند. به دلیل حضور عناصر ذخیره‌کننده انرژی در مدار میراکننده فرورزونانس پسیو و اکتیو، سرعت عملکرد آن‌ها نسبت به مدار میراکننده فرورزونانس نوع الکترونیک کمتر است و پاسخ حالت گذرای نامطلوبی دارند. مدار میراکننده فرورزونانس نوع اکتیو به دلیل داشتن خازن و سلف نسبتاً بزرگ تأثیر نامطلوبی روی پاسخ فرکانسی CVT می‌گذارد [۷].

مدار میراکننده فرورزونانس اکتیو همانند یک فیلتر میان‌گذر عمل کرده و در حدود فرکانس نامی دارای بیش‌ترین مقدار امپدانس است. در خارج از محدوده فرکانس نامی، امپدانس مدار میراکننده فرورزونانس اکتیو به مقدار بسیار ناچیزی میل می‌کند. مدار میراکننده فرورزونانس نوع پسیو نیز شامل یک راکتور قابل اشباع است که در صورت افزایش ولتاژ از یک حد مشخص (معمولاً ولتاژ ۱.۵ پرینیت)، هسته مغناطیسی آن اشباع شده و در نتیجه اندوکتانس آن به شدت کاهش پیدا می‌کند و بار اضافی از طریق آن به سیستم تحمیل

حالت بدون مدار میراکننده فرورزونانس در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ بعد از رفع اتصال کوتاه و پس از چند سیکل گذرا، مد فرورزونانسی پایه ایجاد شده است. این موضوع ناشی از اشباع شدید مشخصه غیرخطی هسته مغناطیسی ترانسفورماتور میانی است که با مشخصه خازن معادلی که با آن سری شده است، رزونانس غیرخطی را تشکیل داده است و در نقطه‌ای دور از مبدأ مختصات یکدیگر را قطع کرده‌اند. در نتیجه جریان و ولتاژ بالایی در سیستم ایجاد شده است. جریان مغناطیسی هسته ترانسفورماتور میانی در شکل ۵ نشان داده شده است که پیک‌های سوزنی شکل پایدار نشان‌دهنده اشباع شدید هسته مغناطیسی است. طیف فرکانسی شامل فرکانس‌های ۵۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ هرتز است که مضرر صحیحی از فرکانس نامی شبکه (۵۰ هرتز) می‌باشد و در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این طیف فرکانسی، وجود مد فرورزونانسی پایه که شامل مضارب صحیحی از فرکانس نامی (معمولاً فرد) است، اثبات می‌گردد. مطابق با شکل ۴ حداکثر ولتاژ خروجی در این حالت به حدود ۵ پروینیت می‌رسد که می‌تواند آسیب شدیدی به سیستم عایقی و تجهیزات CVT وارد کند.

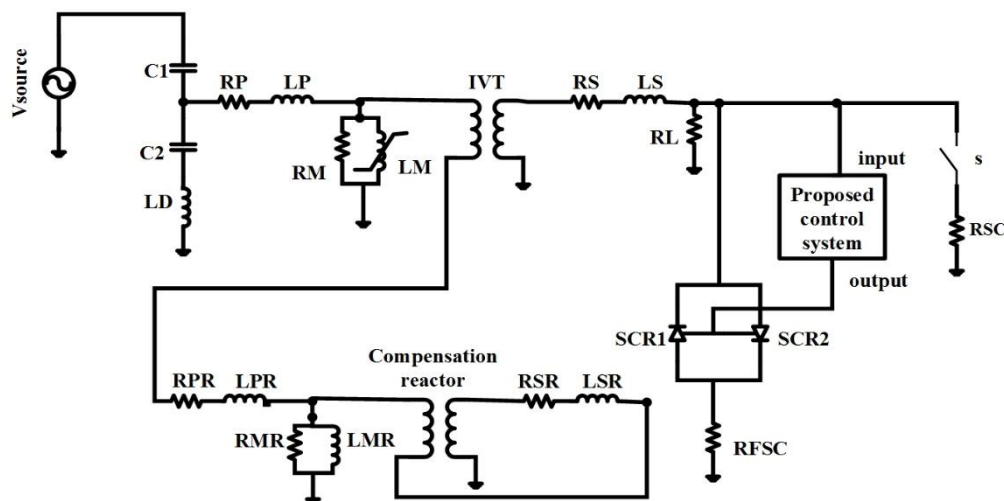


شکل ۲: مشخصه غیرخطی هسته مغناطیسی ترانسفورماتور میانی (IVT)

۲- تشریح ساختار مدار CVT مورد مطالعه

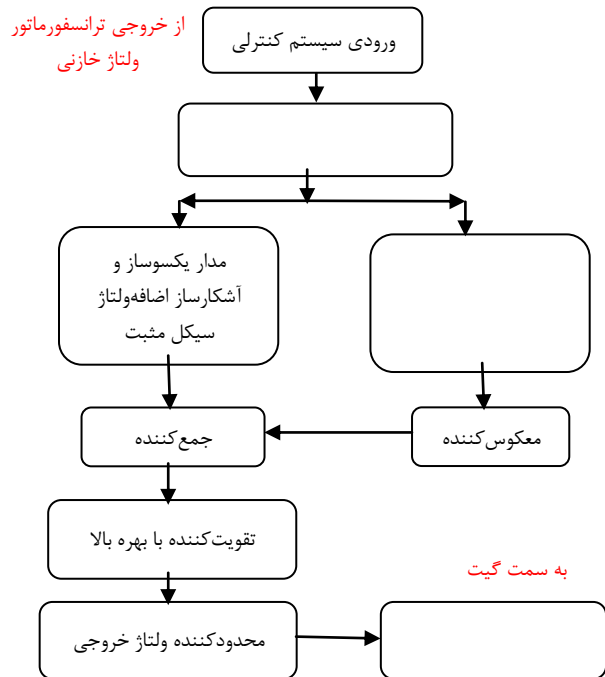
CVT مورد نظر و مشخصه غیرخطی هسته ترانسفورماتور میانی مطابق با [۳، ۱۴] در نظر گرفته شده که به ترتیب در شکل ۳ و شکل ۲ نشان داده شده است. پارامترهای CVT نیز در قسمت پیوست‌ها (جدول ۴) ارائه شده است. شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار Multisim انجام شده است که یک نرم‌افزار جامع برای شبیه‌سازی محیط‌های آزمایشگاهی و مشاهده نتایج است. مطابق با شکل ۳، C1 و C2 به ترتیب خازن‌های فشارقوی و فشار متوسط هستند. LP و RP اندوکتانس نشستی و مقاومت سمت اولیه ترانسفورماتور میانی، LM و RM اندوکتانس مغناطیس‌کننده غیرخطی و مقاومت هسته ترانسفورماتور میانی، LS و RS اندوکتانس نشستی و مقاومت سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور میانی می‌باشند. RL مقدار بار نامی CVT است. راکتور جبران‌ساز شیف‌ت‌فاز ناشی از خازن‌های CVT نیز به صورت یک اتوترانسفورماتور می‌باشد که در سمت اولیه CVT قرار دارد و پارامترهای آن عبارتند از RPR، LPR، RSR، LSR، LMR و RMR که توضیحات آن در جدول ۴ آمده است. راکتور جبران‌ساز شیف‌ت‌فاز به منظور جبران پیش‌فازی ناشی از خازن‌های مقسم C1 و C2 به گونه‌ای طراحی می‌گردد که مجموع امپدانس سلف راکتور جبران‌ساز و امپدانس سلف نشستی ترانسفورماتور میانی برابر با امپدانس خازن‌های مقسم باشد [۱۵].

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، برای ایجاد فرورزونانس مطابق با استاندارد IEC60044-5، یک اتصال کوتاه به مدت ۱۰۰ میلی‌ثانیه در سمت ثانویه CVT اعمال می‌گردد [۱۶]. در ابتدا فرض بر این است که CVT دارای مدار میراکننده فرورزونانس نیست. با توجه به اینکه احتمال ایجاد فرورزونانس در بی‌باری و کم‌باری بسیار زیاد است و هرچه بار الکتریکی سیستم افزایش پیدا کند از احتمال ایجاد فرورزونانس کاسته می‌شود، مقدار بار CVT برابر با ۰٫۱ پروینیت در نظر گرفته شده است. منحنی شکل موج ولتاژ خروجی CVT در

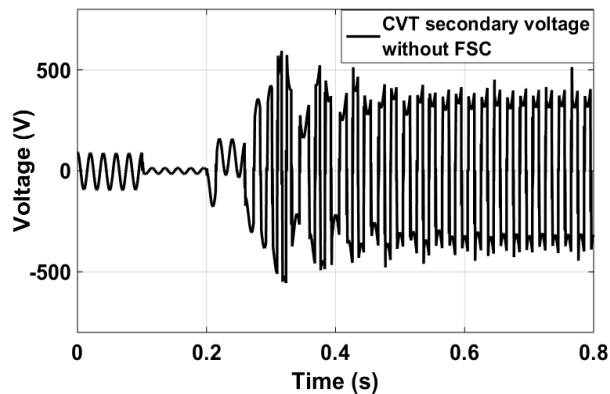


شکل ۳: مدار معادل CVT مورد نظر [۳] و [۱۴] به همراه سیستم کنترلی پیشنهادی

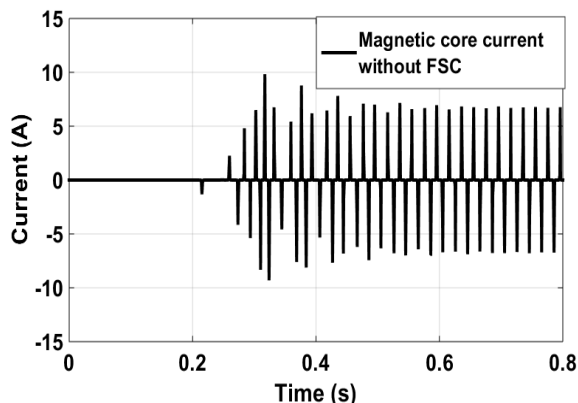
کننده دامنه ولتاژ برای سیگنال خطا وجود داشته باشد. همچنین با- توجه به اینکه اضافه ولتاژهای فرورزونانسی تا ۵ پریونیت هم افزایش پیدا می کنند، سیستم کنترلی پیشنهادی برای جلوگیری از آسیب به گیت تریتورها باید دارای یک محدودکننده ولتاژ خروجی نیز باشد تا در اضافه ولتاژهای بالا، سیگنال خروجی سیستم کنترلی محدود و ثابت گردد. الگوریتم طراحی مدار کنترلی پیشنهادی در شکل ۷ نشان داده شده است.



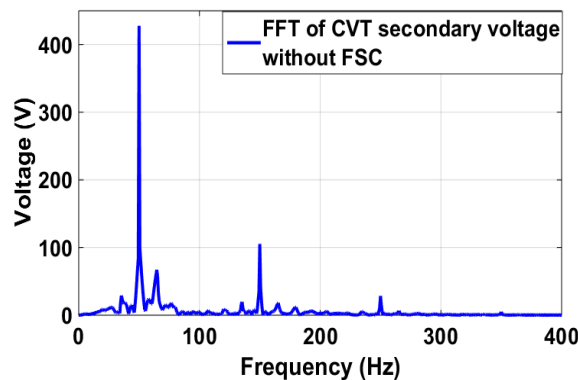
شکل ۷: بلوک دیاگرام سیستم کنترلی پیشنهادی مدار کنترلی طراحی شده یک سیستم کنترلی دارای فیدبک است که ورودی آن ولتاژ خروجی CVT می باشد و خروجی آن به گیت تریتورهای SCR داده می شود (مطابق با شکل ۳). سیستم کنترلی در صورت بروز اضافه ولتاژ فرورزونانسی از ولتاژ خروجی CVT برای تریتور کردن تریتورها استفاده می کند. لذا این سیستم نیاز به هیچ منبع مجزای دیگر برای ایجاد پالس و یا دو مدار فرمان برای پالس مثبت و منفی ندارد. با ایجاد شرایط اضافه ولتاژ ناشی از فرورزونانس، سیستم کنترلی با روشن کردن تریتورهای SCR، مقاومت RFSC را وارد مدار می کند. بعد از وارد شدن مقاومت در مدار، نوسانات فرورزونانس از طریق آن به زمین انتقال می یابد. در نتیجه اضافه ولتاژها کاهش پیدا می کند. با وارد شدن سیستم به وضعیت نرمال، سیگنال خطا از بین می رود و در نتیجه تریتورها در مدت زمان کوتاهی خاموش می گردند. سیستم کنترلی پیشنهادی مطابق با بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل ۸ پیاده شده است.



شکل ۴: ولتاژ خروجی CVT در عدم حضور مدار میراکننده فرورزونانس



شکل ۵: جریان مغناطیسی هسته ترانسفورماتور میانی در عدم حضور مدار میراکننده فرورزونانس



شکل ۶: طیف فرکانسی ولتاژ ثانویه CVT در عدم حضور مدار میراکننده فرورزونانس

۳- مدار پیشنهادی جهت کنترل الکترونیکی فرورزونانس

الگوریتم طراحی سیستم کنترلی پیشنهادی بر مبنای جداسازی اضافه- ولتاژ سیکل مثبت و منفی و مقایسه آن با مقدار مرجع است. بعد از انجام مقایسه، سیگنال خطا باید به پالس DC مورد نیاز به منظور سویچینگ تریتورهای SCR تبدیل گردد. با توجه به اینکه ممکن است اضافه ولتاژ ایجاد شده نسبت به مقدار مرجع ۱.۵ پریونیت مقدار اندکی باشد، سیستم کنترلی باید مجهز به یک آشکارساز مناسب خطا باشد تا بتواند اضافه ولتاژهای کوچک نسبت به مقدار مرجع را به خوبی تشخیص داده و عمل نماید. لذا باید در سیستم کنترلی یک تقویت-

کم، بعد از رفع اضافه‌ولتاژ، خازن به سرعت دشارژ شده و تریستورها در زمان بسیار کوتاهی خاموش می‌گردند. در سیکل منفی با توجه به اینکه ولتاژ DC منفی ساخته می‌شود، نیاز به یک معکوس‌کننده است تا مقدار ولتاژ مثبت گردد. منظور از مدار RC، یک صافی یا رگولاتور ولتاژ است که برای ایجاد ولتاژ نمایی با ثابت زمانی کوتاه از آن استفاده می‌شود. در نتیجه این مدار RC با فیلترهای موجود که برای محدوده خاصی از فرکانس‌ها طراحی می‌شوند، تفاوت دارد. در واقع مدار RC به همراه دیود قدرت ماقبل خود، تشکیل یک رگولاتور ولتاژ می‌دهد که یک ولتاژ DC به صورت نمایی و با ثابت زمانی کم تولید می‌کند. به عبارت دیگر در هر یک از سیکل‌های مثبت و منفی از روش مدارهای یکسوساز نیم‌موج به همراه صافی ولتاژ برای تولید ولتاژ نمایی با ثابت زمانی کوتاه استفاده گردیده است.

باتوجه به اینکه معادلات ریاضی در سیستم‌های کنترلی آنالوگ از طریق تقویت‌کننده‌های عملیاتی (آپ‌امپ) قابل پیاده‌سازی است، از این المان در مدار کنترل الکترونیکی مربوط به مدار میراکننده فرورزونانس استفاده می‌گردد. لذا سیکل منفی از طریق یک معکوس‌کننده با بهره واحد مثبت می‌گردد (نسبت $\frac{R6}{R5}$ برابر یک است). در

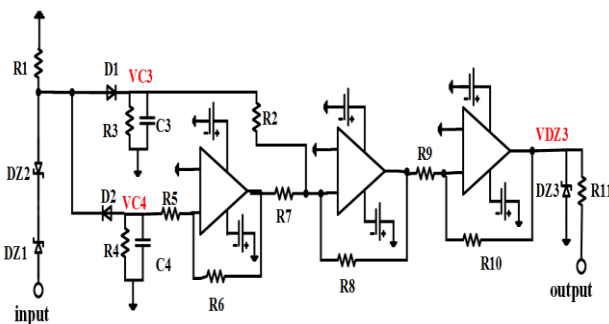
مرحله بعد، ولتاژهای DC ساخته شده در سیکل مثبت و منفی که دارای مقداری ریپل ولتاژ نیز هستند، از طریق جمع‌کننده آپ‌امپی با بهره واحد باهم جمع می‌گردند. سپس باتوجه به اینکه جمع‌کننده با علامت منفی سیگنال‌ها را جمع می‌کند و همچنین برای آشکارسازی بهتر اضافه‌ولتاژ در محدوده مقدار مجاز اضافه‌ولتاژ، از یک معکوس‌کننده با بهره بالا ($\frac{R10}{R9} = 10$) استفاده شده است. باتوجه به اینکه آپ-

امپها تقویت‌کننده‌هایی با مقاومت ورودی بالا هستند، سیستم کنترلی تأثیر منفی روی خروجی CVT نمی‌گذارد و به صورت یک بار بسیار کوچک و قابل صرف‌نظر دیده خواهد شد.

در آخرین مرحله، به منظور محدود کردن ولتاژ خروجی سیستم کنترلی و همچنین حذف ریپل ولتاژ، از یک دیود زبر برای برش ولتاژ استفاده می‌شود. باتوجه به اینکه تریستورها با ولتاژی در حدود چند ولت و جریان‌ی بین ۲۰ تا ۲۰۰ میلی‌آمپر روشن می‌شوند، ولتاژ شکست دیود زبر DZ3 در حد ۵ ولت در نظر گرفته شده است. در نهایت خروجی سیستم کنترلی از طریق مقاومت R11 به گیت تریستورها اعمال می‌شود. در واقع دیود DZ3 باعث برش ولتاژ بیشتر از ۵ ولت می‌شود. هرچقدر اضافه‌ولتاژ سیستم بیشتر باشد، مدت زمان برش ولتاژ توسط دیود زبر DZ3 افزایش می‌یابد و در نتیجه تریستورها مدت زمان بیشتری روشن خواهند بود. در جدول ۱ پارامترهای به کار گرفته شده در مدار کنترلی پیشنهادی به همراه مقادیر آن‌ها ارائه شده است.

به منظور بررسی عملکرد سیستم کنترلی پیشنهادی مدار میراکننده فرورزونانس الکترونیکی، یک نمونه از پاسخ کنترلی در حین فرورزونانس در شکل ۹ نشان داده شده است.

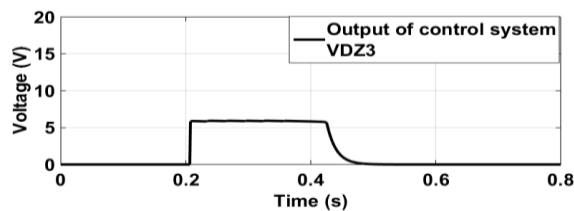
جدول ۱: مقادیر پارامترهای مدار پیشنهادی کنترل‌کننده الکترونیکی



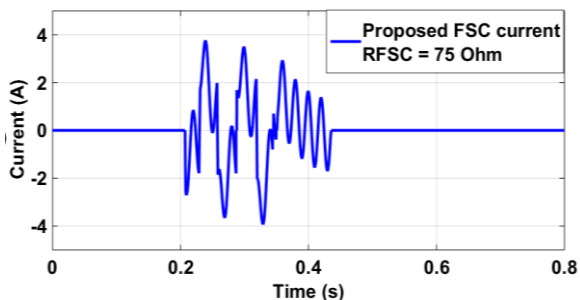
شکل ۸: پیاده‌سازی سیستم کنترلی پیشنهادی برای FSC الکترونیکی

مطابق با شکل ۸ در مرحله اول برای مقایسه ورودی سیستم کنترلی (input) با مرجع، از دو دیود زبر قدرت DZ1 و DZ2 که به صورت معکوس با هم سری شده‌اند، استفاده می‌شود. DZ1 برای مقایسه ولتاژ خروجی CVT در سیکل منفی قرار دارد. DZ2 نیز برای تکرار همین عمل در سیکل مثبت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در کاربردهای صنعتی دیودهای زبر در رنج ولتاژ شکست گسترده‌ای بین ۵ تا ۴۰۰ ولت وجود دارند. به طور مثال دیود زبر مدل 1N4996US دارای ولتاژ شکست ۳۹۰ ولت است. لذا از لحاظ سطح ولتاژ شکست برای دیود زبر مشکلی وجود ندارد. با توجه به این که محدوده مجاز اضافه‌ولتاژ و ولتاژ عملکرد تریستورها در مراجع تا ۱٫۵ پریونیت است [۱۲]، و از آنجایی که پیک ولتاژ خروجی CVT در حالت عادی در حدود ۹۰ ولت و مقدار مؤثر آن ۶۴ ولت است، ولتاژ شکست دیودهای زبر DZ1 و DZ2 را می‌توان حدود ۱۴۰ ولت در نظر گرفت.

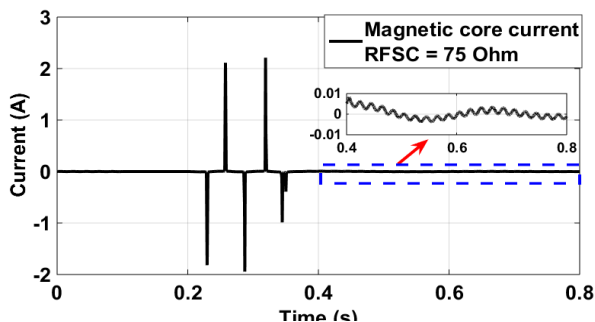
مجموعه دیودهای زبر DZ1 و DZ2 در ورودی همانند دیاک عمل می‌کنند و تا زمانی که ولتاژ خروجی CVT از حد مشخصی که برابر با ولتاژ شکست این دیودها است بیشتر نشده باشد، خروجی DZ1 و DZ2 صفر است. با افزایش اضافه‌ولتاژ و ورود دیودهای زبر به ناحیه شکست، ولتاژ شکست روی آن‌ها قرار می‌گیرد و در نتیجه اختلاف ولتاژ خروجی CVT و ولتاژ شکست این دیودها در خروجی این دیودهای زبر قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه دیودهای زبر به صورت معکوس به هم وصل شده‌اند، این عمل در هر دو سیکل مثبت و منفی انجام می‌شود. بعد از مقایسه ولتاژ با مقدار مرجع، جداسازی سیکل مثبت و منفی انجام می‌شود. بدین منظور از دو دیود قدرت استفاده می‌گردد تا اضافه‌ولتاژ سیکل مثبت از طریق D1 و سیکل منفی از طریق D2 جداسازی شود. با توجه به اینکه تریستورهای مورد استفاده در این مقاله از نوع SCR است و باید با یک ولتاژ مثبت DC تریگر شوند، یک پالس مثبت و DC با سرعت بالا در زمان ظهور اضافه‌ولتاژها مورد نیاز است. همچنین با حذف اضافه‌ولتاژ فرورزونانسی، پالس ساخته شده باید در زمان کوتاهی به صفر میل کند. بدین منظور از یک مدار RC با ثابت زمانی کم (در حد یک و نیم برابر سیکل قدرت) در هر دو سیکل مثبت و منفی استفاده شده است تا در صورت ایجاد اضافه‌ولتاژ، خازن به سرعت شارژ شود و به مقدار ثابت DC برسد. همچنین با توجه به ثابت‌زمانی



(ج) خروجی سیستم کنترلی



(د) جریان عبوری از FSC پیشنهادی



(ه) جریان هسته مغناطیسی ترانسفورماتور میانی

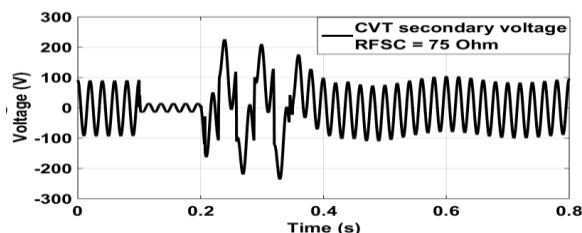
شکل ۹: یک نمونه نوعی از عملکرد سیستم کنترلی با $RFSC=75 \Omega$

۴- ختایج شبیه‌سازی و مطالعات موردی

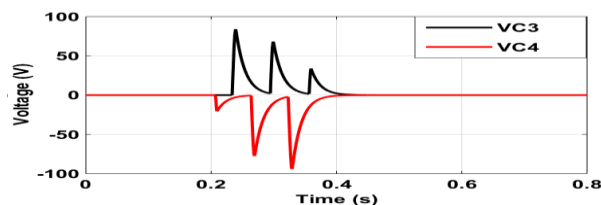
همان‌طور که در بخش ۲ اشاره شد، به منظور ایجاد فرورزونانس، کلید S در زمان ۰.۱ ثانیه بسته شده و در زمان ۰.۲ ثانیه باز می‌گردد. ولتاژ ثانویه CVT به‌ازای مقاومتهای میراکننده مختلف ۱۰، ۱۵، ۳۵ و ۷۰ اهمی به ترتیب در شکل ۱۰ (الف)، (ب)، (ج) و (د) نمایش داده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های به‌دست‌آمده در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که مقدار مقاومت بار بهینه مدار میراکننده پیشنهادی برابر ۳۵ اهم است. لازم‌به‌ذکر است که شبیه‌سازی به‌ازای رنج گسترده‌ای از مقاومت میراکننده انجام شده و به دلیل محدودیت نمایش، چند نمونه از آن به همراه مقدار بهینه مقاومت میراکننده ارائه گردیده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ (ج) مشاهده می‌شود، نوسانات اضافه‌ولتاژ با وجود مقاومت میراکننده ۳۵ اهمی به سرعت میرا می‌شود. لذا مقاومت ۳۵ اهمی بهترین عملکرد سیستم کنترلی را به همراه دارد و می‌تواند به‌عنوان بهترین مقدار انتخاب شود. در شکل ۱۰ (الف) و (ب) مشاهده می‌گردد که با کاهش مقاومت میراکننده RFSC به کمتر از مقدار بهینه یعنی ۱۰ و ۱۵ اهم، بعد از خاموش شدن ترستورها سیستم دچار نوسان زیاد می‌شود. در واقع اگر مقدار این مقاومت خیلی کوچک باشد، خاموش-

پارامترها	بلوک
$R1=10 \text{ K } \Omega$, $V_{Dz1}=V_{Dz2}=140 \text{ V}$	مقایسه‌گر
$R3=1 \text{ k } \Omega$, $C3=30 \mu F$	مدارهای RC
$R4=1 \text{ k } \Omega$, $C4=30 \mu F$	معکوس‌کننده‌ها
$R5, R6, R9=1 \text{ k } \Omega$, $R10=10 \text{ k } \Omega$	جمع‌کننده
$R8, R7, R2=1 \text{ k } \Omega$	محدودکننده
$R11=250 \Omega$, $V_{Dz3}=5 \text{ V}$	

مقاومت مدار میراکننده فرورزونانس پیشنهادی RFSC به صورت نوعی برابر با بار نامی (۷۵ اهم) در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۹ (الف) نشان داده شده است در زمان ۰.۲ ثانیه نوسانات ولتاژ آغاز می‌گردد و مقدار اضافه‌ولتاژ مطابق با شکل ۹ (ب) در سیکل مثبت (VC3) و سیکل منفی (VC4) تولید می‌گردد. خروجی سیستم کنترلی که پالس مورد نیاز گیت‌های ترستورها را فراهم می‌کند، در شکل ۹ (ج) نشان داده است. به محض ایجاد اضافه‌ولتاژ، پالس مورد نیاز برای عملکرد ترستورها با توجه به سطح اضافه‌ولتاژ فراهم می‌شود و همچنین بلافاصله پس از حذف اضافه‌ولتاژها پالس خروجی صفر می‌شود. متعاقب با عملکرد مدار میراکننده فرورزونانس، با توجه به وارد شدن مقاومت میراکننده، جریان مورد نیاز برای میراشدن فرورزونانس طبق شکل ۹ (د) ایجاد می‌شود. از طرف دیگر جریان مغناطیسی‌کننده ترانسفورماتور میانی مطابق با شکل ۹ (ه) در زمان ظهور فرورزونانس به شکل پیک‌های سوزنی شکل افزایش می‌یابد و بلافاصله با میراشدن اضافه‌ولتاژها از بین می‌رود. لازم‌به‌ذکر است که در این بخش اندازه مقاومت مدار میراکننده فرورزونانس برابر با بار نامی (۷۵ اهم) در نظر گرفته شده و در بخش بعدی مقدار مناسب مقاومت مدار میراکننده فرورزونانس پیشنهادی تعیین می‌شود.

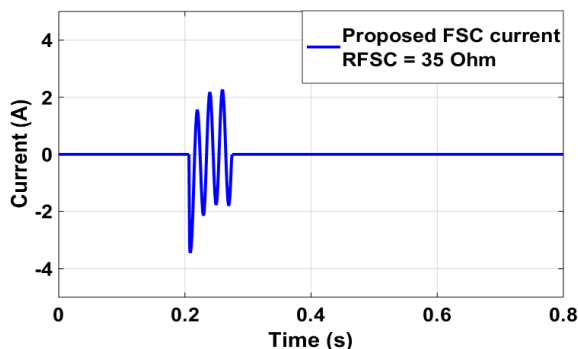


(الف) ولتاژ خروجی CVT

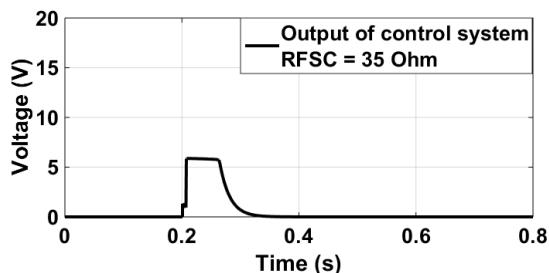


(ب) سیگنال ایجادشده در فیلترهای RC در سیکل مثبت و منفی

نتایج شبیه‌سازی در حضور FSC پیشنهادی و مقاومت میراکننده ۳۵ اهمی با جزییات بیشتر در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است. همان‌طور که در شکل ۱۰ (ج) ملاحظه گردید، اضافه‌ولتاژها در زمان ۰٫۲ ثانیه و بعد از رفع اتصال کوتاه ظاهر می‌شوند. شکل ۱۱ (الف) جریان عبوری از مدار میراکننده پیشنهادی را در حین عملکرد نشان می‌دهد. به‌دنبال ایجاد اضافه‌ولتاژ، مدار کنترلی سیگنال خطا در سیکل مثبت و منفی را جدا کرده (VC3 و VC4) و پس از عبور از بلوک معکوس‌کننده و جمع‌کننده، توسط دیود زبر DZ3 برش می‌دهد. خروجی بلوک کنترلی در شکل ۱۱ (ب) تصدیق می‌کند که پالس موردنیاز ترستورها با سرعت نسبتاً بالایی ایجاد شده و به گیت‌ها ارسال می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در صورت انتخاب مناسب مقاومت مدار میراکننده پیشنهادی، پاسخ CVT بسیار سریع و مناسب خواهد بود. در شکل ۱۰ (ج) مشاهده می‌شود که با وجود مقاومت بهینه (۳۵ اهم)، در مدت‌زمان کوتاهی اضافه‌ولتاژ رفع گردیده و مدار به حالت ماندگار می‌رسد. سرعت عملکرد مدار کنترلی پیشنهادی به حدی است که از اشباع شدید هسته مغناطیسی ترانسفورماتور میانی جلوگیری می‌نماید. این موضوع در شکل ۱۱ (ج) نشان داده شده‌است، به‌طوری‌که جریان مغناطیس‌کننده هسته ترانسفورماتور میانی وارد ناحیه اشباع نمی‌شود و جریان‌های سوزنی‌شکل که در حالت CVT بدون مدار میراکننده ظاهر شده‌بود (شکل ۵)، وجود ندارد. علت این موضوع آن است که به‌محض افزایش ولتاژ خروجی CVT به بیش از مقدار آستانه (۱۴۰ ولت)، سیگنال خطا ساخته‌شده و ترستورها وارد مدار می‌شوند.

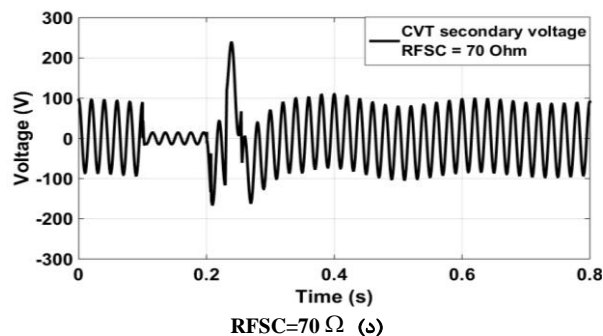
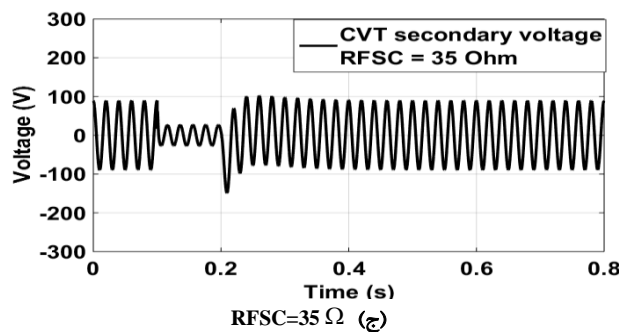
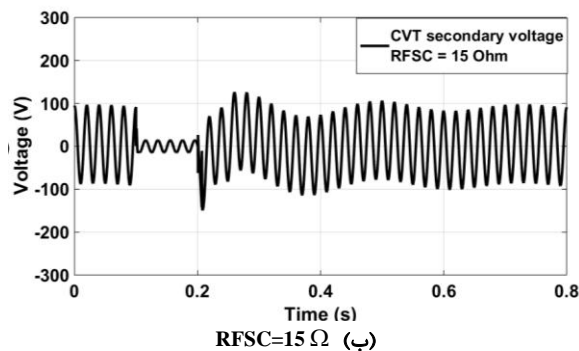
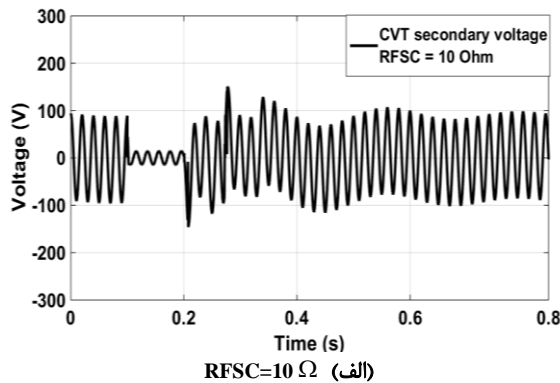


(الف) جریان عبوری از FSC پیشنهادی



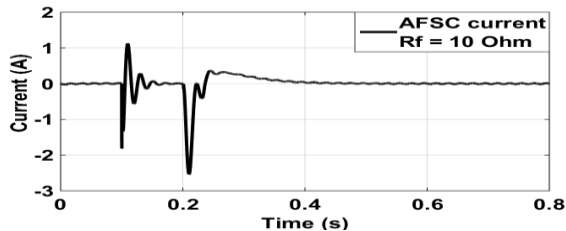
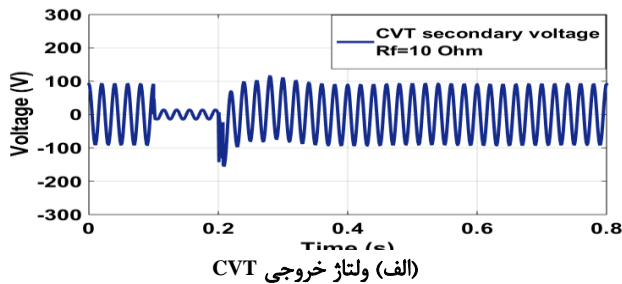
(ب) پالس تهیه‌شده برای گیت ترستورها

شدن ترستورها همانند رفع اتصال کوتاه و یا برداشتن یک بار بزرگ از خروجی CVT عمل کرده و طبیعتاً ممکن است مجدداً برای سیستم، مشکل اضافه‌ولتاژ و گاه‌ا‌گاه ایجاد مدهای فرورزونانسی ناشی از اشباع هسته ایجاد نماید. همچنین شکل ۱۰ (د) نشان می‌دهد در صورتی که مقاومت RFSC مقدار بالایی انتخاب شود (۷۰ اهم)، ممکن است میرایی لازم توسط مدار میراکننده ایجاد نشود و هسته مغناطیسی در اثر اضافه‌ولتاژ به اشباع رود.

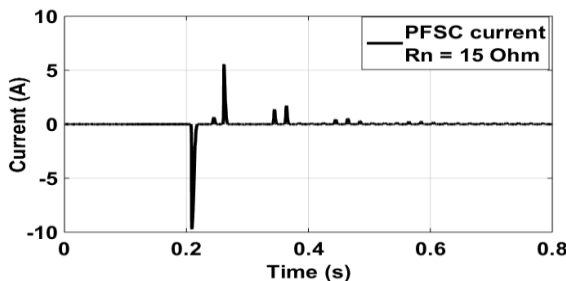
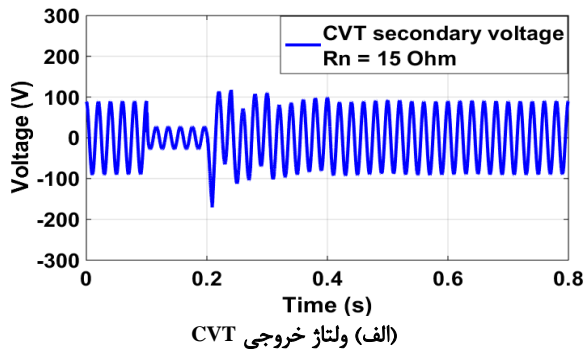


شکل ۱۰: ولتاژ خروجی CVT در حضور FSC پیشنهادی و به‌ازای مقاومت‌های میراکننده مختلف

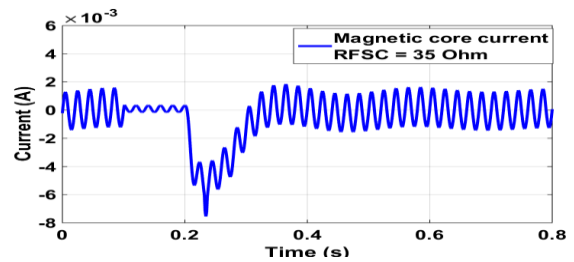
شده است. همان طور که از شکل ۱۲ (ب) و شکل ۱۳ (ب) مشخص است، مدارهای میراکننده نوع اکتیو و پسیو در شرایط نرمال سیستم نیز جریان کشیده و تلفات دائمی به سیستم تحمیل می کنند. البته مقدار جریان کشیده شده توسط مدار میراکننده پسیو در عدم حضور فرورزونانس با توجه به نقطه کار آن بسیار کوچک است. این در حالی است که مدار میراکننده الکترونیکی پیشنهادی مطابق با شکل ۱۱ (الف) فقط در زمان ایجاد اضافه ولتاژ ناشی از فرورزونانس جریان می کشد.



شکل ۱۲: عملکرد CVT مجهز به FSC اکتیو به ازای مقاومت بار بهینه $R_f=10 \Omega$



شکل ۱۳: عملکرد CVT مجهز به FSC پسیو به ازای مقاومت بار بهینه $R_n=15 \Omega$

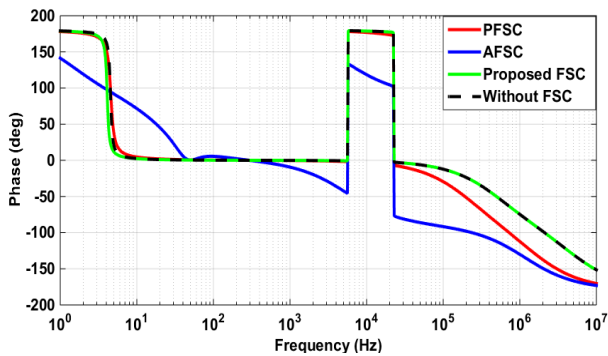


شکل ۱۱: عملکرد سیستم کنترلی پیشنهادی با وجود مقاومت بهینه $(R_{FSC}=35 \Omega)$

برای مقایسه عملکرد مدار میراکننده پیشنهادی با سایر روش های متداول، شبیه سازی ها برای نوع پسیو و اکتیو نیز انجام شده است. مدار میراکننده پسیو مطابق با شکل ۱ (ج) شامل مقاومت و راکتور قابل اشباع بوده و نقطه اشباع آن در ولتاژ ۱٫۵ پرینویت تنظیم می شود [۱۷]، [۱۸]. مشخصه اشباع راکتور مدار میراکننده پسیو در پیوست (جدول ۳) آمده است. این مشخصه مطابق با [۷]، [۸] برای ولتاژ مؤثر نامی مدار میراکننده فرورزونانس در حدود ۶۵ ولت در نظر گرفته شده است. در نتیجه با توجه به اینکه ولتاژ خروجی CVT مورد نظر در این مقاله برابر با مقدار مؤثر ۶۴ ولت است، مشخصه هسته مدار میراکننده پسیو در جدول ۳ تا حد بسیار زیادی قابل قبول می باشد. مدار میراکننده اکتیو نیز همانند یک فیلتر میان گذر و برای فرکانس نامی طراحی می شود و دارای ضریب کیفیت (Q) بالایی است. ویژگی های مختلف آن از جمله تأثیر نامطلوب بر روی پاسخ فرکانسی CVT در مقالات مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۹-۲۱]. در این مقاله پارامترهای مدار میراکننده اکتیو مطابق با روش ارائه شده در [۷]، برای فرکانس نامی ۵۰ هرتز، ولتاژ مؤثر خروجی ۶۳٫۵ ولت و بار نامی ۷۵ اهم طراحی شده است. پارامترهای فیلتر اکتیو مطابق با شکل ۱ (الف) به شرح زیر است.

$C_f=19.7 \mu F, L_1=343.8mH, L_2=171.9 mH, L_3=-114.6 mH$

نتایج شبیه سازی برای مدارهای میراکننده اکتیو و پسیو در حالت بهینه به ترتیب در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۲ (الف) و شکل ۱۳ (الف)، مقدار مقاومت بهینه برای مدارهای میراکننده فرورزونانس اکتیو و پسیو به منظور میرا کردن نوسانات به ترتیب برابر با ۱۰ و ۱۵ اهم است در حالی که مقاومت بهینه مدار میراکننده پیشنهادی برابر با ۳۵ اهم است. لذا مدارهای میراکننده فرورزونانس اکتیو و پسیو نسبت به مدار میراکننده الکترونیکی پیشنهادی به مقدار مقاومت میراکننده کوچک تری برای میرا کردن نوسانات فرورزونانس نیازمند هستند. از طرف دیگر مشاهده می شود که بهترین و سریع ترین عملکرد با توجه به شکل ۱۰ (ج)، شکل ۱۲ (الف) و شکل ۱۳ (الف) مربوط به مدار میراکننده الکترونیکی پیشنهادی است. با توجه به شکل ۱۳ (الف) بدترین عملکرد مختص مدار میراکننده پسیو است که مدت زمان بیشتری برای میرا شدن نوسانات نیاز دارد و نوسانات آن بیشتر است. همچنین جریان عبوری از مدارهای میراکننده فرورزونانس اکتیو و پسیو در شکل ۱۲ (ب) و شکل ۱۳ (ب) نشان داده



شکل ۱۵: نمودار فاز CVT به‌ازای استفاده از مدارهای میراکننده اکتیو، پسیو، الکترونیکی پیشنهادی و بدون مدار میراکننده.

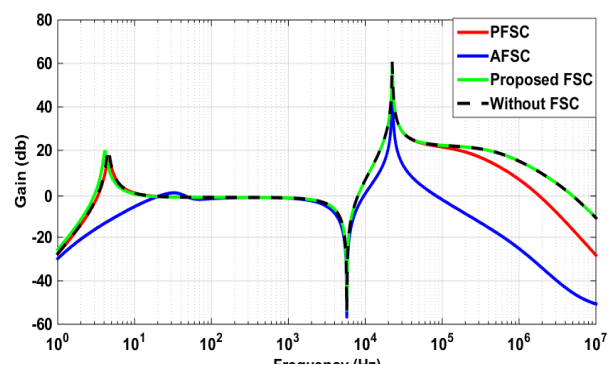
برای تحلیل پاسخ حالت گذرای CVT در حضور مدار میراکننده پیشنهادی از ایجاد اتصال کوتاه در سمت خازن فشارقوی (سمت باسبار) استفاده می‌شود. این سناریو در مقالات مختلفی بررسی شده است و ثابت شده است که اتصال کوتاه در لحظه صفر ولتاژ بدترین نوع خطا برای خروجی CVT است [۱۳، ۲۲]. به منظور بررسی قابلیت اطمینان سیستم کنترلی مدار میراکننده الکترونیکی پیشنهادی، یک خطای اتصال کوتاه در لحظه صفر ولتاژ ایجاد می‌گردد. نمودار ولتاژ خروجی CVT مجهز به مدار میراکننده پیشنهادی به‌هنگام ایجاد خطا در صفر ولتاژ در شکل ۱۶ نشان داده شده است. شکل ۱۶(الف) ایجاد اتصال کوتاه در صفر ولتاژ و در سمت باسبار را نشان می‌دهد. همچنین مطابق با شکل ۱۶(ب) با ایجاد اتصال کوتاه در سمت باسبار، حالت گذرای ناچیزی در ولتاژ ثانویه CVT ایجاد می‌گردد. مقدار اولیه حالت گذرا در حدود ۱۰ ولت است. با این حال مطابق با شکل ۱۶(ب)، نوسانات گذرای ایجاد شده در سمت ثانویه CVT بعد از طی حدود ۲/۵ سیکل به‌مقدار بسیار ناچیزی میل می‌کند. این موضوع در شکل ۱۶(ج) که طیف فرکانسی ولتاژ ثانویه CVT بعد از طی ۲/۵ سیکل از نوسانات می‌باشد، نشان داده شده است. مطابق با این شکل نوسانات فرکانس بالای کمتر از ۰/۳ ولت ایجاد می‌گردد. فرکانس این نوسانات در حدود ۴۵۵۰ هرتز می‌باشد. با توجه به اینکه مدار میراکننده فرورزونانس پیشنهادی دارای عناصر ذخیره‌کننده انرژی محسوسی نیست، حالت گذرای ایجاد شده بعد از ۲/۵ سیکل میرا گردیده است که ناشی از انرژی ذخیره شده موجود در هسته ترانسفورماتور میانی می‌باشد.

درواقع در صورت وجود عناصر ذخیره‌کننده در CVT و همچنین سیستم کنترلی پیشنهادی، یک تأخیر و ثابت‌زمانی وابسته به مقدار انرژی ذخیره شده در عناصر ذخیره‌کننده انرژی به سیستم تحمیل می‌شود. این ثابت‌زمانی بیانگر مدت‌زمان تخلیه انرژی در تجهیز ذخیره‌کننده انرژی است. در این صورت هر تغییری که در اولیه CVT ایجاد شود، ثانویه CVT بعد از طی آن ثابت‌زمانی رفتار سمت اولیه را دنبال می‌کند [۱۳]. به‌عنوان مثال مدارهای میراکننده فرورزونانس اکتیو که دارای سلف و خازن نسبتاً بزرگی هستند، روی پاسخ حالت گذرای CVT تأثیر نامناسبی می‌گذارند. لذا هرچه عناصر ذخیره‌کننده انرژی کمتر باشند، سبب بهبود پاسخ حالت گذرای CVT خواهد شد.

۵- تحلیل پاسخ فرکانسی و حالت گذرا در حضور FSC الکترونیکی پیشنهادی

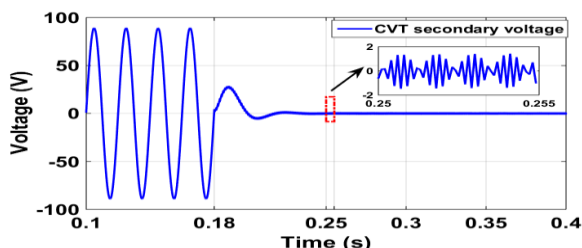
اگرچه عملکرد مدار میراکننده نوع اکتیو دارای سرعت قابل‌قبولی است ولی به‌دلیل وجود عناصر ذخیره‌کننده انرژی شامل خازن و سلف نسبتاً بزرگ، بر روی پاسخ فرکانسی CVT تأثیر منفی می‌گذارد. این موضوع مخصوصاً در تغییرات ناگهانی ولتاژ و شرایطی که هارمونیک‌های مرتبه بالا وجود دارد، دوچندان می‌شود. به‌همین دلیل در سیستم‌های قدرت که دارای هارمونیک بالا هستند نظیر خطوط HVDC و خطوط مجهز به ادوات FACTS از مدار میراکننده اکتیو استفاده نمی‌شود [۸]. به‌منظور بررسی تأثیر منفی انواع مختلف مدار میراکننده بر روی پاسخ فرکانسی و مقایسه آن با مدار میراکننده الکترونیکی پیشنهادی، نمودارهای بهره و فاز CVT به‌ترتیب در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ برای انواع پسیو، اکتیو، نوع الکترونیکی پیشنهادی و در شرایط بدون وجود مدار میراکننده نشان داده شده‌اند. لازم‌به‌ذکر است که رسم نمودار بهره و فاز یک سیستم از ویژگی‌های قابل‌ملاحظه نرم‌افزار Multisim است که بدون داشتن تابع تبدیل سیستم و صرفاً با داشتن ورودی و خروجی سیستم، نمودار بهره و فاز آن قابل ترسیم است.

همان‌طور که در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ دیده می‌شود، مدار میراکننده الکترونیکی پیشنهادی کمترین تأثیر را روی پاسخ فرکانسی بهره و فاز CVT دارد، به‌طوری‌که پاسخ فرکانسی آن بر مشخصه CVT بدون در نظر گرفتن مدار میراکننده، منطبق است. علت این موضوع پسیو خالص بودن این تجهیز می‌باشد. از طرف دیگر در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ مشاهده می‌گردد که مدار میراکننده نوع اکتیو بدترین تأثیر را روی پاسخ فرکانسی CVT داشته و باعث کاهش پهنای باند این تجهیز می‌شود. تأثیر منفی مدار میراکننده اکتیو روی منحنی فاز CVT بسیار بیشتر است. مدار میراکننده اکتیو بیش از ۶۰ درصد از محدوده باند فرکانسی مسطح موردنیاز را کاملاً ناهموار می‌سازد (شکل ۱۵). این بدین معنا است که فاز خروجی CVT، فاز ورودی CVT را به‌خوبی دنبال نمی‌کند و در نتیجه، این اختلاف فاز ممکن است باعث عملکرد اشتباه سیستم‌های حفاظتی در خطوط انتقال گردد (رله‌های دیستانس).

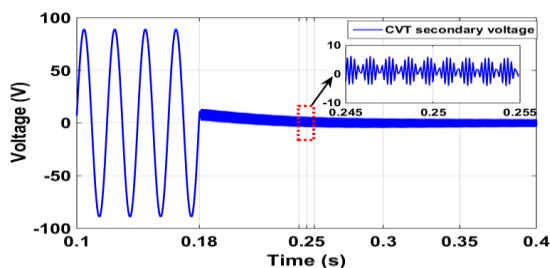


شکل ۱۴: نمودار بهره CVT به‌ازای استفاده از مدارهای میراکننده اکتیو، پسیو، الکترونیکی پیشنهادی و بدون مدار میراکننده

قرار دارد. شکل ۱۸ طیف فرکانسی مربوط به دو حالت CVT مجهز به مدار میراکننده اکتیو و پسیو را نشان داده است. مطابق شکل ۱۸(الف) اندازه مؤلفه‌های فرکانس بالا در حالت CVT مجهز به مدار میراکننده پسیو و بعد از طی شدن چند سیکل اول در حدود ۵ ولت است. مطابق با شکل ۱۸ در هر دو حالت CVT مجهز به مدار میراکننده پسیو و اکتیو، مقدار فرکانس نوسانات در حدود ۴۵۵۰ هرتز می‌باشد.

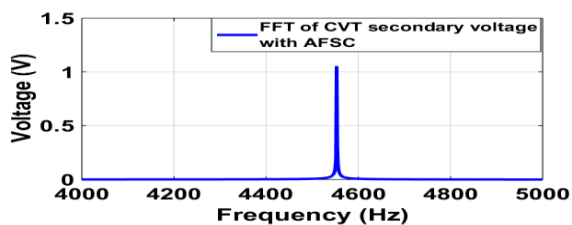


الف: CVT مجهز به مدار میراکننده اکتیو

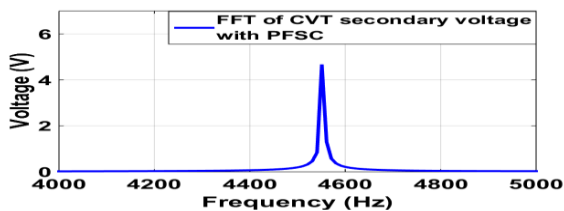


ب: CVT مجهز به مدار میراکننده پسیو

شکل ۱۷: پاسخ CVT به اتصال کوتاه ایجاد شده در صفر ولتاژ سمت باسبار و در حضور مدارهای میراکننده اکتیو (الف) و پسیو (ب)



الف: CVT مجهز به مدار میراکننده اکتیو

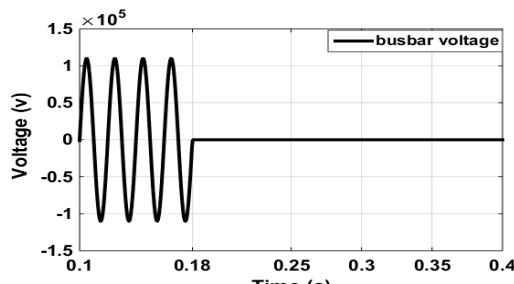


ب: CVT مجهز به مدار میراکننده پسیو

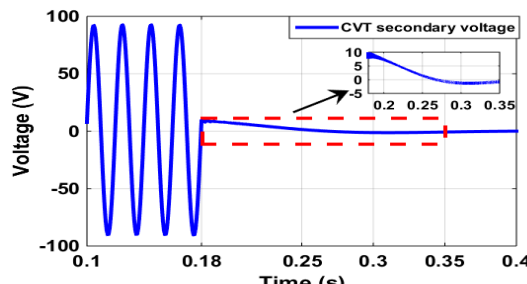
شکل ۱۸: طیف فرکانسی CVT به هنگام ایجاد اتصال کوتاه در صفر ولتاژ سمت باسبار و در حضور مدار میراکننده اکتیو (الف) و مدار میراکننده پسیو (ب)

جمع‌بندی کلی و مقایسه‌ای حاصل از نتایج عددی شبیه‌سازی‌ها در حضور مدار میراکننده پیشنهادی، سایر مدارهای میراکننده و سیستم بدون مدار میراکننده در جدول ۲ نشان داده شده است.

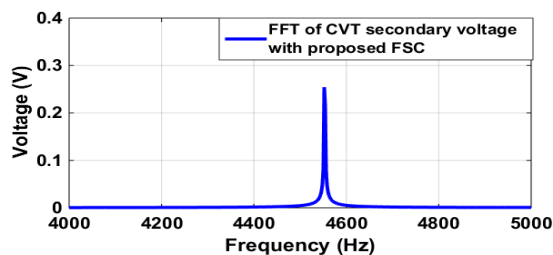
جدول ۲: مقایسه مدارهای میراکننده فرورزونانس در یک نگاه



(الف) ولتاژ باسبار در سمت فشارقوی



(ب) ولتاژ خروجی CVT



(ج) طیف فرکانسی ولتاژ خروجی CVT

شکل ۱۶: پاسخ CVT به اتصال کوتاه ایجاد شده در صفر ولتاژ سمت باسبار و در حضور FSC پیشنهادی و سیستم کنترلی آن

به منظور بررسی عملکرد حالت‌گذرای مدارهای میراکننده اکتیو و پسیو، شبیه‌سازی برای این مدارها نیز انجام گرفته و نتایج در شکل ۱۷ و شکل ۱۸ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۱۷(الف) در حالت CVT مجهز به مدار میراکننده اکتیو، با ایجاد اتصال کوتاه در باسبار، یک فراجاهش با مقدار بیشینه ۲۸ ولت در ولتاژ ثانویه CVT ایجاد می‌گردد. بعد از طی شدن فراجاهش ولتاژ خروجی، سیستم شامل مؤلفه‌های فرکانس بالای پایدار می‌گردد. مقدار این مؤلفه‌ها در حدود ۱/۲ ولت است. با توجه به مقدار فراجاهش و نوسانات پایدار در حالت CVT مجهز به مدار میراکننده اکتیو، این تجهیز تأثیر نامطلوبی روی پاسخ حالت‌گذرای CVT ایجاد می‌کند. درحالتی که CVT دارای مدار میراکننده پسیو است، سیستم دچار فراجاهش نمی‌شود. ولی نکته قابل توجه در حالت CVT مجهز به مدار میراکننده پسیو، حضور مؤلفه‌های فرکانس بالا و پایدار در حدود ۵ ولت می‌باشد که نسبت به مؤلفه‌های فرکانس بالای CVT مجهز به مدار میراکننده اکتیو بیشتر است (شکل ۱۷(ب)).

مطابق با شکل ۱۷(ب) مقدار این مؤلفه‌های فرکانس بالا برای خروجی CVT مجهز به مدار میراکننده پسیو در قبل از رسیدن به حالت پایدار در حدود ۱۰ ولت است. بعد از عبور از حالت‌گذرا، سیستم به مدت زیادی با نوسانات فرکانس بالا و مقدار ولتاژ حدودی ۵ ولت

گذشته با ایجاد اضافه‌ولتاژ فرورزونانسی، تریستورها برای یک زمان مشخص و از پیش تعیین شده (معمولاً ۸۰ میلی ثانیه) روشن می‌مانند. با توجه به اینکه سیستم کنترلی به صورت مجزا و در سمت ثانویه CVT نصب می‌گردد، نیازی به تغییر ساختار CVT و جداسازی قسمت‌های مختلف آن نیست. به منظور اثبات عملکرد این سیستم کنترلی، شبیه‌سازی‌ها برای مدارهای میراکننده فرورزونانس پسیو و اکتیو نیز انجام گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که عملکرد سیستم کنترلی پیشنهادی در صورت بهینه‌بودن مقاومت میراکننده سریع‌تر از نوع اکتیو و پسیو است. همچنین در شبیه‌سازی‌ها مشخص گردید که مدار میراکننده پسیو دارای کندترین عملکرد است. علاوه بر این نشان داده شد که برخلاف مدارهای میراکننده نوع اکتیو و پسیو، سیستم کنترلی پیشنهادی هیچ تأثیر منفی روی پاسخ فرکانسی بهره و فاز CVT ندارد. این در حالی است که مدار میراکننده اکتیو تأثیر نامطلوبی بر روی پاسخ فرکانسی CVT و به ویژه بر روی مشخصه فاز CVT داشته و در نمودار فاز، پهنای باند CVT را بیش از ۶۰ درصد کاهش می‌دهد. بررسی پاسخ حالت‌گذرای CVT در حضور مدار میراکننده پیشنهادی، اکتیو و پسیو در بدترین حالت (عبور از صفر ولتاژ) نشان داد که مدار میراکننده پیشنهادی بهترین عملکرد حالت گذرا را دارد. این در حالی بود که مدار میراکننده اکتیو دچار فراجش نسبتاً بزرگ و نوسانات فرکانس بالا با مقدار کوچک و طولانی مدت شد. همچنین مدار میراکننده پسیو دچار نوسانات فرکانس بالا با مقدار بزرگ‌تر و به مدت طولانی گردید.

پیوست‌ها

جدول ۳: مشخصه راکتور قابل اشباع FSC پسیو [۷ و ۸]

شار (وبر)	جریان (آمپر)
۰/۲۷	۰/۰۴۹۴۱۳
۰/۳۱۸۸۶	۰/۳۵۸۲۲۲
۰/۳۳۷۶۲	۰/۹۸۰۲۹۸
۰/۳۵۶۳۷	۲/۵۳۸۵۵۲
۰/۴	۱۰

جدول ۴: مشخصات CVT مورد نظر مطابق با [۲] و [۱۴]

پارامتر	مقدار	تعریف کمیت
Vsource	۷۶/۲ KV	ولتاژ فاز به زمین ورودی CVT
f	۵۰ Hz	فرکانس سیستم
C1	۵۳۴۸/۸ pF	خازن فشار قوی CVT
C2	۷۶۶۶۶/۶ pF	خازن فشار متوسط CVT
LD	۱۰ mH	سلف نشستی (برای سیستم PLC)
LP	۱/۵۴۷ H	اندوکتانس اولیه ترانسفورماتور میانی
RP	۲۲۰ Ω	مقاومت اولیه ترانسفورماتور میانی
RM	۶/۵ M Ω	مقاومت هسته مغناطیسی ترانسفورماتور میانی
IVT	۷۸/۷۴ / ۱	نسبت تبدیل ترانسفورماتور میانی
LS	۰/۱۰۰۷ mH	اندوکتانس نشستی ثانویه ترانسفورماتور میانی
RS	۰/۴۰ Ω	مقاومت سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور میانی

نوع مدار میراکننده	بدون مدار میراکننده	پسیو	اکتیو	پیشنهادی
حداکثر اضافه‌ولتاژ	بیش از ۵ پریونیت	۱/۸۳ پریونیت	۱/۶۹ پریونیت	۱/۶۱ پریونیت
مدت زمان ماندگاری ماندگاری	دائمی	۵ سیکل	۲ سیکل	کمتر از ۲ سیکل
تأثیر روی پاسخ فرکانسی	-	کاهش بهره و ایجاد اختلاف فاز در فرکانس‌های بالا	عدم تأثیر منفی بر روی باند فرکانسی اصلی کاهش بهره و ایجاد اختلاف فاز در فرکانس‌های بالا و پایین	تأثیر منفی
تأثیر روی پاسخ حالت گذرا	-	نوسانات فرکانس بالای دائمی ۵ ولتی	فراجش ۲۸ ولتی و نوسانات فرکانس بالای دائمی ۱/۲ ولتی	نوسانات فرکانس بالای ۰/۳ ولتی
حدود توان متوسط مصرفی	-	قبل: ۱۰ وات حین: ۱۱۵ وات	قبل: ۱۰ وات حین: ۱۱۵ وات	قبل: ۸۵ وات حین: ۸۵ وات

۶ نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی جدید برای جلوگیری و میرانمودن نوسانات و اضافه‌ولتاژهای ناشی از فرورزونانس در CVT ارائه گردید. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که سیستم کنترلی پیشنهادی برای مدار میراکننده فرورزونانس الکترونیکی دارای سرعت عملکرد بالایی بوده و در شرایط عادی سیستم کاملاً پایدار است. مدار پیشنهادی نیازی به ساخت پالس منفی برای گیت تریستورها ندارد و شامل یک مدار فرمان پالس مثبت است. لذا از حجم مدار دوفرمانه رایج در مقالات کاسته شده است. از طرفی این مدار کنترلی نیازی به منبع پالس مجزا و مدارهای کنترل زاویه آتش تریستورها ندارد و در واقع از ولتاژ ثانویه CVT برای تریگر کردن تریستورها استفاده می‌کند. عملکرد سیستم کنترلی پیشنهادی به مقدار اضافه‌ولتاژ وابسته است و هرچه این مقدار بیشتر باشد تریستورها برای مدت‌زمان بیشتری در سیستم خواهند بود. یکی دیگر از ویژگی‌های این مدار پیشنهادی وابستگی آن به ولتاژ لحظه‌ای است. به عبارت دیگر ولتاژ لحظه‌ای سیستم است که مشخص می‌کند تریستورها روشن و یا خاموش باشند. این در حالی است که در مقالات

- [9] Bakar, A. H. A., Lim, C. H., & Mekhilef, S., "Investigation of Transient Performance of Capacitor Voltage Transformer," IEEE Power and Energy Conference, Putra Jaya, Malaysia, Apr. 2007.
- [10] Ab Halim Abu Bakar, Shakil Ahamed Khan, Tan Chia Kwang, Nasrudin Abd. Rahim, "A review of ferroresonance in capacitive voltage transformer," IEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering, pp. 28–35, 2015.
- [11] M. Sanaye-Pasand, A. Rezaei-Zare, H. Mohseni, Sh. Farhangi, and R. Iravani, "Comparison of Performance of Various Ferroresonance Suppressing Methods in Inductive and Capacitive Voltage Transformers" IEEE Power India Conference, Jan. 2006.
- [12] F. Badrkhani Ajaei, M. Sanaye-Pasand, A. Rezaei-Zare, and R. Iravani, "Analysis and suppression of the coupling capacitor voltage transformer ferroresonance phenomenon," IEEE Trans. Power Del., vol. 24, no. 4, pp. 1968–1977, Oct. 2009.
- [13] J. Sakamuri, D. John Yesuraj, "Modeling and simulation of capacitor voltage transformer transients using pscad/emtcd," IEEE Trondheim Power Tech, pp. 1-8, 2011.
- [14] Shakil Ahamed Khan, A.H.A. Bakar, "Analysis of Ferroresonance Suppression and Transient Response Performances for Various Ferroresonance Suppression Circuits in Capacitive Voltage Transformers," IET International Conference, Nov. 2014.
- [15] M. Davarpanah, M. Sanaye-Pasand, and F. B. Ajaei, "CVT failure due to improper design of auxiliary voltage transformers," IEEE Trans. Power Del., vol. 27, no. 1, pp. 391–400, Jan. 2012.
- [16] Instrument Transformers-Part 5: Capacitor Voltage Transformers, IEC Standard 60044-5, 2004.
- [17] M. Kezunovic, L. J. Kojovic, V. Skendzic, C. W. Fromen, D. R. Sevcik, and S. L. Nilsson, "Digital models of coupling capacitor voltage transformers for protective relay transient studies," IEEE Trans. Power Del., vol. 7, no. 4, pp. 1927–1935, Oct. 1992.
- [18] D. Hou and J. Roberts, "Capacitive voltage transformers: Transient overreach concerns and solutions for distance relaying," presented at the Canadian Conf. Electrical and Computer Engineering, Calgary, May 26–29, 1996.
- [19] M. S. Sachdev and M. A. Barbeau, "A new algorithm for digital impedance relays," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-98, no. 6, pp. 2233–2240, Nov./Dec. 1979.
- [20] H. J. Vermeulen, L. R. Dann, and J. V. Rooijen, "Equivalent circuit modelling of a capacitive voltage transformer for power system harmonic frequencies," IEEE Trans. Power Del., vol. 10, no. 4, pp. 1743–1749, Oct. 1995.
- [21] D. F. Fernandes, Jr, W. L. A. Neves, and J. C. A. Vasconcelos, "Coupling capacitor voltage transformer: A model for electromagnetic transient studies," Elect. Power Syst. Res., vol. 77, pp. 125–134, 2007.
- [22] I. Sule, U. O. Aliyu, "Simulation model for assessing transient performance of capacitive voltage transformers," presented at the IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meeting, Montreal, QC, Canada, 2006.

RL	۷۵ Ω	بار اهمی نامی CVT
RSC	۰/۱ Ω	مقاومت اتصال کوتاه
RPR	۲۲۰ Ω	مقاومت اولیه راکتور جبران‌ساز
LPR	۱/۵۴۷ H	اندوکتانس اولیه راکتور جبران‌ساز
RMR	۰/۰۴ Ω	مقاومت هسته مغناطیسی راکتور جبران‌ساز
LMR	۰/۰۰۷ mH	اندوکتانس هسته مغناطیسی راکتور جبران‌ساز
Reactor	۲۸ / ۱	نسبت تبدیل راکتور جبران‌ساز
RSR	۶/۵ M Ω	مقاومت ثانویه راکتور جبران‌ساز
LSR	۸۸۴۱ H	اندوکتانس ثانویه راکتور جبران‌ساز

مراجع

- [1] C. Venkatesh, K. Shanti Swarup, "Performance assessment of distance protection fed by capacitor voltage transformer with electronic ferroresonance suppression circuit," Electric Power Systems Research, vol. 112, pp. 12–19, Jul. 2014.
- [2] M. Davarpanah, M. Sanaye-Pasand, and F. B. Ajaei, "Mitigating the Impacts of CCVT Subsidence Transients on the Distance Relay," IEEE Trans. Power Del., vol. 27, no. 2, pp. 497–505, April 2012.
- [3] A.H.A. Bakar a, N.A. Rahim a, M.K.M. Zambri, "Analysis of lightning-caused ferroresonance in capacitor voltage transformer (CVT)," journal of electrical power and energy systems, Vol. 33, no. 9, pp. 1536–1541, Jan. 2011.
- [4] M. R. Iravani, X. Wang, I. Polischchuk, J. Riebeiro, and A. Sarshar, "Digital time-domain investigation of transient behavior of coupling capacitor voltage transformer," IEEE Trans. Power Del., vol. 13, no. 2, pp. 622–629, Apr. 1998.
- [۵] داوود رضایی، اسکندر قلی‌پور، رحمت‌الله هوشمند، «استفاده بهینه از ظرفیت بهساز یکپارچه کیفیت توان به منظور جبران‌سازی همزمان توان راکتور بار و اعوجاجات ولتاژ»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۵، شماره ۳، صفحات ۴۶–۳۵، ۱۳۹۴.
- [۶] علیرضا حسنی اصل، مهدی معلم، محمد کیوان‌فرد، «بهبود عملکرد فیلترهای هارمونیک جبران‌کننده استاتیکی توان راکتور برای کوره‌های قوس الکتریکی با آنالیز حساسیت و استفاده از نتایج عملی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۱، صفحات ۸۶–۷۵، ۱۳۹۵.
- [7] S. Shahabi, A. Gholami, M. Mirzaei, "Investigation of performance of ferroresonance suppressing circuits in coupling capacitor voltage transformers," IEEE China Conference, Industrial Electronics and Applications, May. 2009.
- [8] M. Graovac, R. Iravani, X. Wang, and R. D. McTaggart, "Fast ferroresonance suppression of coupling capacitor voltage transformers," IEEE Trans. Power Del., vol. 18, no. 1, pp. 158-163, Jan. 2003.

زیرنویس‌ها

⁵ Gate Turn-off Thyristor

¹ Capacitor Voltage Transformer

² Ferroresonance Suppression Circuit

³ Silicon Controlled Rectifier

⁴ Insulated Gate Bipolar Transistor