یک محدودساز جریان هجومی حالت جامد کارآمد

تیمور قنبری[1]، دانشیار ، احسان باقری[2]،دانشجوی کارشناسی ارشد، نیما تشکر [2]، کارشناسی ارشد، ابراهیم فرجاه[2]، استاد

۱- دانشکده فناوری‌های نوین- دانشگاه شیراز - شیراز- ایران
ghanbarih@shirazu.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شیراز - شیراز- ایران
Bagheri.ehsan@shirazu.ac.ir
ntashakor@shirazu.ac.ir
farjah@shirazu.ac.ir

چکیده: عبور جریان هجومی بالا از ترانسفورماتورهای قدرت باعث کاهش طول عمر و عملکرد نادرست رله های حفاظتی آن‌ها می‌گردد. در این مقاله یک محدود کننده جریان هجومی حالت جامد (SSICL[1]) جدید برای ترانسفورمرهای قدرت ولتاژ متوسط جهت به کارگیری با مدارشکن‌های موجود ارایه می شود. ساختار پیشنهادی متشکل از مجموعه سوییچ‌های نیمه هادی دوسویه مشابه و یک مقاومت محدودکننده جریان هجومی می باشد. با استفاده از یک روش مبتنی بر فیلتر کالمن[2]، جریان هجومی ترانسفورماتور در طول فرآیند مغناطیسی کاهش داده شده است. در واقع شکل جریان هجومی به وجود آمده مطابق با جریان تخمینی توسط یک فیلتر کالمن با پاسخ کند تعیین می شود. ساختار SSICL پیشنهادی در محیط MATLAB-SIMULINK شبیه سازی شده و یک نمونه اولیه آزمایشگاهی تکفاز از آن پیاده سازی گردیده است. الگوی کنترلی ساختار پیشنهادی با استفاده از میکروکنترلر dsPIC30F4011 اجرا شده است. به منظور ارزیابی عملکرد محدود کننده جریان هجومی حالت جامد جدید آزمایش-هایی صورت گرفته است. نتایج شبیه سازی و آزمایش‌ها نشان می‌دهد که ساختار ارایه شده می‌تواند به‌طور قابل توجهی جریان هجومی ترانسفورماتور را کاهش دهد.

واژه های کلیدی: ترانسفورماتورهای صنعتی، جریان هجومی، فیلتر کالمن، ولتاژ متوسط، محدود کننده جریان هجومی

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۵/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۶/۰۵/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر تیمور قنبری

نشانی نویسنده‌ی مسئول : شیراز میدان نمازی دانشکده مهندسی بخش قدرت و کنترل دانشگاه شیراز

[1]Solid-State Inrush Current Limiter

[2] Kalman Filter

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.7.4]

۱- مقدمه

یکی از مشکلات اساسی شبکه‌های توزیع، عبور جریان هجومی از ترانسفورماتورهای صنعتی و ماشین‌های الکتریکی در هنگام راه‌اندازی می‌باشد. دامنه زیاد، عدم تقارن، هارمونیک بالا و داشتن مولفه‌های DC از جمله ویژگی های جریان هجومی می‌باشد[1]. از جمله مشکلات اساسی در رابطه با جریان هجومی عملکرد غیر عادی رله‌های حفاظتی، کاهش طول عمر ترانسفورماتورها، استرس مکانیکی و گرمایی بر روی تجهیزات، کاهش کیفیت توان و ولتاژ گذرای بالا است[2]. جریان هجومی برای برخی موارد مانند ترانسفورماتورهای صنعتی به کار رفته در دریا، در مقایسه با ترانسفورماتورهای شبکه، می‌تواند پیامد های سنگین‌تری را در برداشته باشد. در چنین ترانسفورماتورهایی جریان هجومی می‌تواند سبب اضافه ولتاژهای گذرایی شود که ناشی از تحریک فرکانس تشدید بوجود آمده توسط خازن‌های بزرگ موازی با کابل های زیر دریا است[3]. علاوه بر جریان مغناطیس کنندگی ترانسفورماتورها ، سوییچ زنی بانک‌های خازنی و راه‌اندازی بارهای سلفی بزرگ، دو منبع اصلی دیگر ایجاد جریان هجومی می‌باشند. در سال‌های اخیر، تجهیزات مشابهی برای محدود سازی جریان هجومی در این کاربردها ارایه شده است[4-6]. جریان مغناطیس کنندگی به میزان شار پسماند در لحظه سوییچ زنی ، زاویه آتش سوییچینگ، مقاومت مدار سمت اولیه، مشخصه مغناطیسی هسته ترانسفورماتور و عوامل دیگری بستگی دارد[2]. بر این اساس در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی برای محدود سازی جریان هجومی ترانسفورماتورهای قدرت انجام شده است [20-7]. تکنیک‌ها ارایه شده به ساختارهای بهبود دهنده ترانسفورماتور و روش‌های مبتنی بر تجهیزات مکمل یا مدارهای کنترلی دسته‌بندی می‌شوند. از بین بردن شار پسماند با روش‌هایی همچون بهره‌گیری از هسته‌های با کیفیت بالا و جبرانگرهای سری [7]، ساختارهایی با سیم پیچی نامتقارن [8]،فاصله هوایی مجازی[3] [9] و افزایش اندوکتانس گذرای سیم پیچ اولیه با تغییر توزیع سیم پیچی هسته[10] ممکن می‌باشد.

روش‌های مبتنی بر بهبود ساختار یا استفاده از تجهیزات جانبی باعث افزایش هزینه و پیچیدگی ساختار می‌گردد. بنابراین این روش‌ها در ترانسفورماتورهای از پیش ساخته شده ممکن است مورد استفاده قرار نگیرد. قراردادن مقاومت، سلف و یا کنترل سوییچینگ ترانسفورماتور، روش‌های شناخته شده مبتنی بر استفاده از تجهیزات مکمل و مدار-های کنترلی می‌باشند[7,11-14]. ضرورت تعیین دقیق میزان شار پسماند ، مشکلات مربوط به اندازه‌گیری لحظه‌ای شار پسماند ترانسفورماتور و فاکتور عدم قطعیت در مدارشکن‌ها مهم‌ترین معایب استفاده از روش‌هایی مبتی بر کنترل لحظه سوییچزنی می‌باشد[8]. در مقالات [12-11] ، شار پسماند با استفاده از انتگرال گیری از ولتاژ محاسبه شده و الگوی سوییچینگ فازهای مختلف بر اساس شارپسماند محاسبه شده باعث توزیع نامساوی ولتاژ بین فازها می‌گردد. این اقدام شار پسماند فازهای مختلف را یکسان نموده و جریان هجومی را کاهش می‌دهد. تجهیزات مکمل الکترونیک قدرتی محدود کننده جریان هجومی نسبت به روش‌های بیان شده مورد توجه بوده و قابلیت‌های بیشتری را فراهم می‌کند[17-15]. بیشتر تجهیزات مکمل پیشنهادی و مدارهای کنترلی با استفاده از سوییچ‌های الکترونیک قدرت با توانایی بالا قابل پیاده سازی می‌باشند. در [15,16] استفاده از یک سلف نوع DC در یک پل دیودی برای محدود کردن جریان پیشنهاد شده است. در این ساختار هیچ گونه سیستم کنترلی وجود ندارد و سوییچینگ رخ نمی‌دهد. میزان سلف به کار رفته در این روش‌ها رابطه مستقیمی با میزان جریان محدودشونده دارد. علاوه براین با افزایش میزان مقاومت سلف نوع DC، ضریب اعوجاج هارمونیکی کلی[4] جریان، افت ولتاژ و تلفات در حالت عملکرد عادی به طرز قابل توجهی افزایش می‌یابد. در [17] یک مدار جبرانساز ولتاژ به ساختار پل دیودی اضافه شده است. اضافه شدن جبرانساز به صورت سری باعث می‌شود که پیچیدگی ساختار بیشتر شده اما عملکرد کلی سیستم و میزان تلفات حالت دائم کاهش می‌یابد.

در [18] یک محدود کننده جریان حالت جامد نوع رزونانسی(SSICL) و در [19] استفاده از یک محدود کننده هیبریدی جریان خطای ابررسانا (SFCL[5]) برای کاهش جریان هجومی ارایه شده است. در ساختار هیبریدی [19]، از چهار سوییچ که براساس یک الگوریتم کنترلی مبتنی بر مقدار موثر جریان سوییچ زنی می‌شوند بهره برده است که پیچیدگی مدار را افزایش داده است. اگرچه روش-های مبتنی بر استفاده از تجهیزات الکترونیک قدرت در محدودسازی جریان هجومی مزایای قابل قبولی نسبت به دیگر روش‌ها دارا می‌باشند اما نیازمند تحقیقاتی به منظور بهبود عملکرد و بالا بردن قابلیت‌ها در مصارف صنعتی می‌باشند. سیکل اول کلیدی‌ترین بخش در بحث محدود سازی جریان هجومی می‌باشد زیرا در این بخش جریان بیشترین مقدار خود را دارد. اگر چه در مقایسه با سوییچ‌های تمام کنترلی، سوییچ‌های نیمه کنترلی دارای رنج توانی بالاتر می‌باشند. اما عدم قابلیت خاموشی در هنگام عبور جریان، استفاده از آن‌ها را در برخی کاربردهای محدود سازی جریان نامناسب می‌سازد. پیشرفت‌های اخیر در سوییچ‌های تمام کنترلی مانند IGBT و IGCT می‌تواند فرصت‌های زیادی در طراحی محدود کننده‌های جریان با کارایی بالاتر ایجاد کند. مهم‌ترین چالش پیش روی محدود کننده‌های مبتنی بر الکترونیک قدرت، عدم دسترسی به سوییچ‌های توان بالا است. خوشبختانه با پیشرفت‌های اخیر در زمینه سوییچ‌های توان بالا، سوییچ های تمام کنترلی در رنج‌های توانی معمول ترانسفورماتورهای صنعتی در دسترس می‌باشند.

[3] Virtual Air Gap

[4] Total Harmonic Distortion (THD)

[5] Superconducting Fault Current Limiter

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.7.4]

جدول (۱): مقایسه روشهای محدود کننده جریان هجومی

نوع محدود کننده	هزینه	پیچیدگی کنترل	قابلیت اطمینان	کاربرد	اعوجاج	منبع
راکتور DC	کم	ساده	خوب	متوسط	زیاد	[15]
ابرهادی	خیلی زیاد	متوسط	خوب	زیر متوسط	کم	[19]
کنترل زاویه سوییچینگ	متوسط	پیچیده	متوسط	متوسط	کم	[11-13]
راکتور DC جبران کننده ولتاژ	متوسط	خیلی ساده	خوب	متوسط	کم	[17]
ساختار سیم-پیچی متقارن یا فاصله هوایی مجازی	کمتر از متوسط	ساده	زیر متوسط	زیر متوسط	کم	[8-9]
روش پیشنهادی	متوسط	متوسط	خوب	متوسط	کم	-

در این مقاله یک محدود کننده جریان با ساختار ساده و عملکرد مناسب به منظور محدودسازی جریان هجومی سطح بالا ارایه می‌گردد. بر اساس ساختار [20]، یک روش جدید برای محدودسازی جریان هجومی ترانسفورماتور پیشنهاد شده است. در این روش سوییچ‌ها با کمک یک الگوریتم فیلتر کالمن با پاسخ کند کنترل می‌شوند. سیگنال خطا به صورت تفاضل جریان تخمینی فیلتر و جریان اندازه‌گیری شده تعریف می‌شود. سیگنال خطا الگوی سوییچینگ را در طول دوره مغناطیسی شدن ترانسفورماتور تعیین می‌کند. در شرایط عملکرد عادی ترانسفورماتور سیگنال خطا صفر بوده و سوییچ ها بسته می‌مانند.

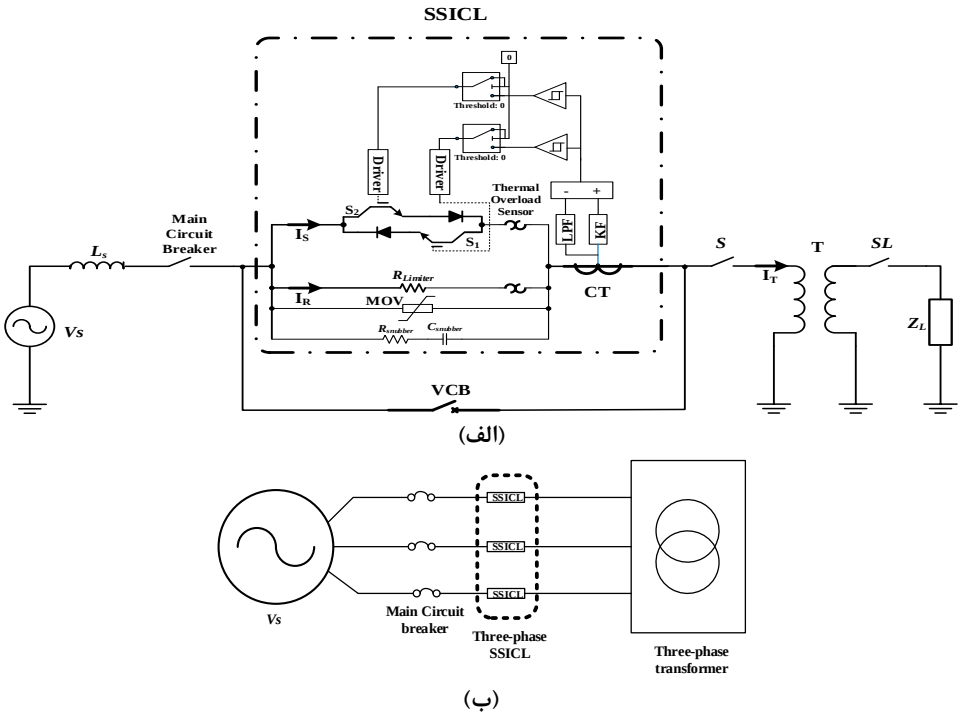
در جدول (۱)، مزایا و معایب روش‌های مختلف با یکدیگر و با روش پیشنهادی این مقاله مقایسه شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی دارای قابلیت اطمینان مطلوب، پیچیدگی کنترلی قابل قبول و اعوجاج کم می‌باشد.

در ادامه مقاله مفهوم کلی SSICL سه فاز مورد بحث قرار گرفته و جزییات یک نمونه اولیه تکفاز بررسی شده است. به منظور تایید قابلیت‌های SSICL پیشنهادی داده‌های عملی نشان داده می‌شود. مدار SSICL و روش کنترلی آن در MATLAB-SIMULINK شبیه سازی و یک نمونه اولیه تکفاز محدود کننده در آزمایشگاه ساخته شده است.

۲- ساختار و نحوه عملکردSSICL پیشنهادی

در شکل(۱)(الف) ساختار تکفاز SSICL پیشنهادی نشان داده شده است. این ساختار متشکل از یک سوییچ دوسویه[6] سریع به کمک نیمه هادی‌های الکترونیک قدرت مانند IGBT یا IGCT همراه با دیود معکوس موازی[7]،یک مقاومت محدود کننده جریان هجومی، یک مقاومت غیر خطی اکسید آهن[8] و یک مدار اسنابر می‌باشد.

ساختار مشخص شده بر اساس برخی ملاحظات مانند تلفات هدایتی، تلفات سوئیچینگ و همچنین حالت گذرای مربوط به جریان بازیابی معکوس دیود انتخاب شده است. جریان خط به کمک ترانسفورماتور



شکل (۱): (الف) ساختار تکفاز SSICL پیشنهادی (ب) ساختار SSICL سه فاز

[6] bidirectional switch

[7] anti-parallel

[8] Metal Oxide Varistor

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.7.4]

جریان (CT[9]) اندازه‌گیری و به کمک فیلتر کالمن با پاسخ کند تخمین زده می شود. برای جلوگیری از وجود نویز، در خروجی CT از یک فیلتر پایین‌گذر (LPF[10]) استفاده می‌شود.

سیگنال تخمینی برای تعیین بازه‌های زمانی هدایت IGBT ها در هنگام تحریک مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیگنال خطا از تفاضل جریان تخمینی و سیگنال خروجی LPF تولید می‌شود. هنگامی که سیگنال خطا از بازه تعیین شده قبلی ($\pm I_{th}$) خارج شود، سوییچ‌ها خاموش شده و جریان از مقاومت محدودکننده، مدار اسنابر و MOV عبور می‌کند. در نتیجه زمانی که سیگنال خطا با راه‌اندازی ترانسفورماتور افزایش می‌یابد، جریان هجومی به کمک مقاومت محدود کننده کاهش می‌یابد. مدار اسنابر و MOV به منظور فرونشاندن و حفاظت در برابر ولتاژهای گذرای سوییچینگ به کار گرفته می‌شوند. بسته به پارامترهای فیلتر کالمن، بعد از گذشت چند سیکل، سیگنال خطا تضعیف شده و بازه زمانی هدایت IGBT ها افزایش یافته و زمان در مدار بودن مقاومت محدود کننده کاهش می‌یابد. نهایتا در حالت ماندگار محدود کننده از مدار خارج شده و سوییچ دوسویه جریان خط را به طور مستمر عبور می‌دهد.

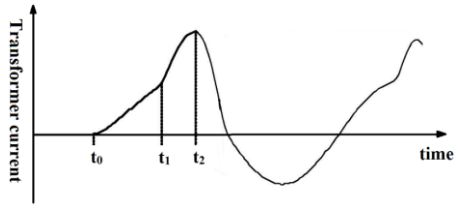
از آنجایی که IGBT ها در حالت عملکرد عادی به طور مستمر هدایت را انجام می‌دهند، تلفات هدایتی در سوییچ‌ها، درحدود ۱٪ توان نامی می‌باشد[20]. به همین دلیل سوییچ دوسویه با استفاده از یک قطع کننده مدار خلا (VCB[11]) در حالت عملکرد نرمال کنار گذاشته می‌شود. همانطور که در شکل(۱) (الف) نشان داده شده، می‌توان یک SSICL را به صورت موازی با یک CB نصب کرد. ساختار SSICL سه فاز که متشکل از سه مجموعه مشابه می‌باشد در شکل(۱) (ب) نشان داده شده‌است. مدار کنترلی هر فاز، SSICL مربوطه را بر اساس جریان همان فاز مستقلاً کنترل می‌کند.

۳- ملاحظات طراحی SSICL

۳-۱- آنالیز مدار

یک نمونه از جریان هجومی ترانسفورماتور در شکل(۲) نشان داده شده است. ترانسفورماتور درزمان t_0 سوییچ شده و در بازه t_0-t_2 شارژ می‌شود. در t_1 هسته ترانسفورماتور اشباع می‌شود و سلف مغناطیس کننده آن از L_{NS} به L_S تغییر می‌یابد. در بازه زمانی t_1-t_2 جریان هجومی با یک شیب زیاد افزایش می‌یابد.

بنابراین در طول بخش مهم سیکل سیگنال خطا از مقدار تعیین شده



شکل (۲) : نمونه‌ای از جریان هجومی

$\pm I_{th}$ فراتر رفته و IGBT ها خاموش هستند پس جریان خط از مقاومت محدود کننده عبور می‌کند. به تدریج تخمین فیلتر کالمن دقیق‌تر شده و سیگنال خطا کاهش می‌یابد و سهم سوییچ دوسویه در عبور جریان خط افزایش میابد. با این توصیف دو حالت عملکردی برای SSICL در محدود سازی جریان هجومی قابل ملاحظه می‌باشد

الف) بازه زمانی روشن بودن سوییچ دوسویه

ب)بازه زمانی خاموش بودن سوییچ دوسویه .

شکل(۳) مدار معادل سیستم را در دو حالت عملکرد نشان می‌دهد. شکل(۳) (الف) بازه زمانی روشن بودن سوییچ و شکل(۳) (ب) مدار معادل را برای بازه‌ی در مدار قرار گرفتن مقاومت محدود کننده نشان می‌دهد. در این‌جا L_s و r_s به ترتیب بیانگر مقاومت و سلف خط می‌باشند. V_{fD} و V_{fs} افت ولتاژ هدایتی دیود و سوییچ، r_D و r_{sw} مقاومت‌های هدایتی دیود و سوییچ و L'_m و r'_m مدار معادل سلف مغناطیس کنندگی سیم پیچ سمت ثانویه و امپدانس بار در این حالت می باشند.

در لحظه سوییچ‌زنی بر اساس شکل(۳) (الف) داریم:

$$V_m \sin(\omega t) = L_{eq1}\frac{di_1}{dt} + R_{eq1} i_1 + V_{fD} + V_{fs} \qquad (۱)$$

که در آن $R_{eq1} = r_s + r_D + r_{sw} + r_1 + r'_m$ و $L_{eq1} = L_s + L_1 + L'_m$ ، $Z_{eq1} = \sqrt{R_{eq1}^2 + (\omega L_{eq1})^2}$ و $\theta_1 = \tan^{-1}(\frac{L_{eq1}\omega}{r_{eq1}})$ می باشد.

با در نظر گرفتن t_0 به عنوان لحظه سوییچ‌زنی ترانسفورماتور، $i_1(t)$ با استفاده از (۲) قابل محاسبه می‌باشد.

$$i_1(t) = e^{-\frac{R_{eq1}}{L_{eq1}}(t-t_0)}\left[I_2 - \frac{V_m}{Z_{eq1}}\sin(\omega t_0 - \theta_1) + \frac{V_{fD}+V_{fs}}{R_{eq1}}\right] + \ldots \qquad (۲)$$
$$\ldots \frac{V_m}{Z_{eq1}}\sin(\omega t - \theta_1) - \frac{V_{fD}+V_{fs}}{R_{eq1}}$$

زمانی که سیگنال خطا از مقدار تعیین شده عبور می‌کند، سوییچ خاموش می‌شود. براساس شکل (۳) (ب) داریم:

$$V_m \sin(\omega t) = L_{eq2}\frac{di_2}{dt} + R_{eq2} i_2 \qquad (۳)$$

که در آن $L_{eq2} = L_{eq1}$ ، $R_{eq2} = r_s + R_{Limiter} + r_1 + r'_m$ ، $Z_{eq2} = \sqrt{R_{eq2}^2 + (\omega L_{eq2})^2}$ و $\theta_2 = \tan^{-1}(\frac{L_{eq2}\omega}{r_{eq2}})$ می‌باشد.

اگر سوییچ در لحظه t_1 سوییچ خاموش شود، $i_2(t)$ با استفاده از (۴) قابل محاسبه می‌باشد.

$$i_2(t) = e^{-\frac{R_{eq2}}{L_{eq2}}(t-t_1)}\left[i_1(t_1) - \frac{V_m}{Z_{eq2}}\sin(\omega t_1 - \theta_2)\right] + \frac{V_m}{Z_{eq2}}\sin(\omega t - \theta_2) \qquad (۴)$$

بعد از محدودسازی جریان، سوییچ در t_2 روشن شده و جریان با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه است اما در این‌جا $I_2 = i_2(t_2)$ می‌باشد. زمانی که ماکزیمم جریان در سیکل اول رخ می‌دهد براساس i_2 این مقدار قابل محاسبه است. با مشتق گیری از رابطه (۴)، زمانی که جریان ماکزیمم می‌شود t_{max} قابل دستیابی است که :

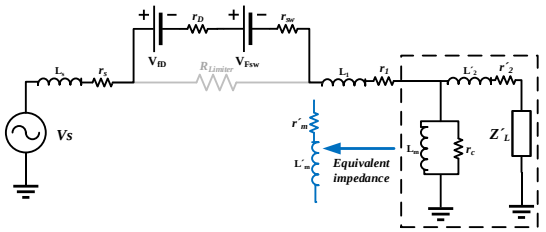
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.7.4]

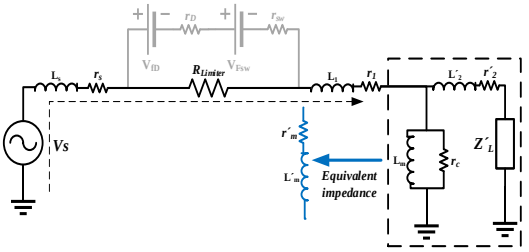
$$i_2'(t) = K_1 e^{-\frac{R_{eq2}}{L_{eq2}}(t_{\max}-t_1)} + K_2\cos(\omega t_{\max}-\theta_2) = 0 \qquad (۵)$$

که $K_1 = -\frac{R_{eq2}}{L_{eq2}}\left[i_1(t_1) - \frac{V_m}{Z_{eq2}}\sin(\omega t_1-\theta_2)\right]$ و $K_2 = \frac{V_m\omega}{Z_{eq2}}$ است.

زمانی که i'_2 یک حل صریح نداشته باشد بهتر است از روش‌های عددی حل شود. با استفاده از t_{max} بر اساس رابطه (۴) ماکزیمم جریان $i_{peak} = i_2(t_{\max})$ قابل محاسبه است. حداکثر جریان هجومی به حداکثر جمله سینوسی نزدیک است. از آن‌جایی که $i_1(t_1)$ در مقایسه با ماکزیمم جریان هجومی قابل صرف نظر است و در حالت اشباع مقدار $e^{-\frac{R_{eq2}}{L_{eq2}}(t_{\max}-t_1)}$ به شدت کاهش می‌یابد، پاسخ حالت گذرای رابطه (۴) صرف نظر می‌شود. از این رو با توجه به [14]زمان پیک زدن جریان هجومی به صورت زیر محاسبه می‌شود:



(الف)



(ب)

شکل (۳): مدار معادل در دو حالت عملکرد (الف) سوییچ روشن و مقاومت خارج از مدار (ب) سوییچ خاموش و مقاومت داخل مدار

$$t_{\max} = \frac{\frac{\pi}{2} + \tan^{-1}\left(\frac{\omega L_{eq2-saturated}}{R_{eq2}}\right)}{\omega} \qquad (۶)$$

هم‌چنین با در نظر گرفتن بدترین شرایط و صرف نظر از جمله پاسخ گذرا، جریان ماکزیمم با توجه به [14] برابر است با:

$$i_{peak} = \frac{V_m}{Z_{eq2-saturation}} \qquad (۷)$$

۳-۲- کالمن فیلتر

کنترل SSICL پیشنهادی بر اساس جریان تخمین زده شده‌ی فیلتر کالمن می‌باشد. با استفاده از یک فیلتر کالمن با پاسخ کند، مولفه اصلی جریان اندازه گیری شده همزمان تخمین زده می‌شود. یک مدل ریاضی از سیگنال جریان در فضای حالت به عنوان مدل فیلتر کالمن استفاده می‌شود. . یک سیگنال مدل گسسته سینوسی با دامنه و فاز دلخواه برای مدل در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا سیگنال جریان اندازه‌گیری شده به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$S_n = a\cos(\omega_0 n + \varphi) \qquad (۸)$$

که $\omega_0 = 2\pi f_0/f_s$ می‌باشد و f_0 و f_s به ترتیب فرکانس‌های اندازه‌گیری شده و نمونه برداری می‌باشند و n شاخص زمان است.با استفاده از روابط مثلثاتی S_n را می‌توان به روش بازگشتی به صورت زیر محاسبه کرد:

$$S_{n+1} + S_{n-1} = 2\cos(\omega_0)S_n + \psi_n \qquad (۹)$$

که ψ_n بیانگر یک تابع احتمالی اضافی با میانگین صفر می‌باشد که به نمایندگی از خطاهای مدل ممکن از جمله دامنه ، فاز یا انحراف فرکانس از مقدار واقعی در نظر گرفته شده است. با توجه به اندازه گیری و دیگر عوامل نویز سیگنال جریان می تواند بر روی سیگنال مدل اصلی منطبق شود، بنابراین:

$$y_n = S_n + v_n \qquad (۱۰)$$

که S_n مولفه اصلی سیگنال اندازه‌گیری و v_n یک تابع احتمالی با میانگین صفر است که بیانگر نویز می‌باشد.

به منظور ساختن یک فیلتر کالمنی که مولفه اصلی را تخمین بزند نیاز است تا معادله دینامیکی (۹) به فرم فضای حالت تبدیل شود. بنابراین می‌توان (۹) و (۱۰) را برای مولفه اصلی به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$X_{n+1} = MX_n + b\psi_n,\ y_n = h^T X_n + v_n \qquad (۱۱)$$

که $X_n \doteq [x_n \quad x_{n-1}]^{-1}$ ، $M \doteq \begin{bmatrix} 2\cos(\omega_0) & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ ، $b \doteq [1\ 0]^T$ ، $h \doteq [1\ 0]^T$ ، $T_s = f_s^{-1}$ و K وابسته به نسبت X/R سیستم می‌باشد. در معادله (۱۱) می‌توان دیگر مولفه های هارمونیکی مانند هارمونیک دوم و مولفه DC را نیز در نظر گرفت. مدل دینامیکی حالا کامل شده است. مولفه اصلی سیگنال جریان اندازه گیری شده را می‌توان با استفاده از معادلات کلاسیک تکراری فیلتر کالمن که در [21] آورده شده است محاسبه نمود. سیگنال خطا (باقی‌مانده) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$error_n = S_{fn} - y_n \qquad (۱۲)$$

که S_f خروجی فیلتر پایین گذر می‌باشد در شرایط حالت ماندگار فیلتر می‌توان مدل را فرآیند ثابت $(q_n = q)$ و مشاهدات ثابت $(error_n = r)$ در نظر گرفت (پیوست را مشاهده کنید). ماتریس کوواریانس نویز[۱۲] q و r نقش تنظیم کننده پارامترها را برای متعادل سازی پاسخ دینامیکی بازی می‌کنند. نسبت q/r به جای مقدار عملی پاسخ دینامیکی را تعیین می‌کند. این می‌تواند یک تعادل را بین حساسیت به نویز و پاسخ دینامیکی فیلتر برقرار کند. بنابراین برای داشتن یک فیلتر کالمن کند باید q/r بزرگ انتخاب شود.

[12] Noise covariance matrixes

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.7.4]

۳-۳- ملاحظات طراحی

۳-۳-۱- طراحی مقاومت محدود کننده

قابلیت محدودسازی یک محدود کننده به وسیله مقدار $R_{Limiter}$ مشخص می‌شود. با استفاده از رابطه (۴) ماکزیمم دامنه جریان هجومی قابل محاسبه می‌باشد اما زمانی که رابطه بسیار غیرخطی باشد می‌توان به کمک روش‌های عددی به جواب رسید. به منظور دستیابی به یک رابطه برای مقاومت محدود کننده از رابطه (۷) استفاده می‌کنیم. در این صورت داریم:

$$R_{Limiter} = \sqrt{\frac{V_m^2}{i_{peak}^2} - \left(\omega L_{eq2-saturated}\right)^2} - r_s - r_1 - r_m^{'} \qquad (۱۳)$$

اما زمانی که مقاومت با استفاده از سوییچ دوسویه از مدار خارج می‌شود باید مقدار مقاومت موثر با توجه به بازه کاری[13] سوییچ در نظر گرفته شود. اگر D نسبت زمان هدایت دیود به کل یک دوره تناوب باشد مقدار مقاومت موثر برابر است با:

$$R_{Limiter-effective} = R_{Limiter-actual}\left(1-D\right) \qquad (۱۴)$$

در رابطه فوق D تابعی از کنترلر هیسترزیسی باند محدود و رفتار فیلتر کالمن می‌باشد. در بدترین شرایط ابتدا سوییچ روشن است (D=1)، اما در زمان راه‌اندازی میزان خطا زیاد است و D به صفر کاهش می‌یابد. اگر چه هیچ رابطه دقیقی برای تخمین D با توجه به پارامترهای سیستم وجود ندارد اما $R_{effective}$ متناسب با سیگنال خطا است. عامل دیگری که باید مدنظر قرار بگیرد محدودیت قدرت است. در طول فرآیند راه‌اندازی ترانسفورماتور $R_{Limiter}$ تلفات توان بالایی دارد. اگر τ_e به عنوان حداکثر ثابت زمانی این فرآیند در نظر گرفته شود مقاومت انتخابی باید بتواند در مقابل انرژی تلفاتی یک سیکل کامل ایستادگی کند پس:

$$E_{loss} = R_{Limiter_effective} \times i_{effective}^2 \times \tau_{saturation} \qquad (۱۵)$$

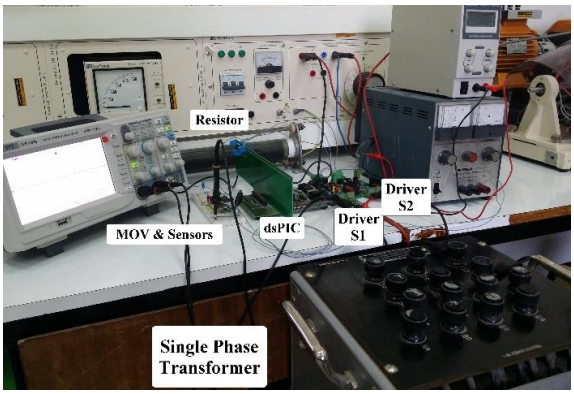
که $\tau_{saturation} = \frac{4L_{eq2}}{R_{eq2}}$ می‌باشد. پس انتخاب یک مقاومت محدود کننده مناسب یک سبک و سنگین کردن بین حداکثر جریان، حداکثر بازه جریان هجومی، تلفات انرژی قابل قبول و هم چنین هزینه می‌باشد.

۳-۳-۲- سوییچ دوسویه

یک بن برای انتخاب یک سوییچ دوسویه مجموعه ای از الزامات باید برآورده شود. در این کاربرد مهم ترین ویژگی‌ها ولتاژ نامی، حاکثر جریان قابل تحمل و فرکانس سوییچینگ است[۲۰]. ساختار پیشنهادی را می توان برای سطوح ولتاژی که در آن نیمه هادی به طور کامل تحت کنترل در دسترس هستند طراحی کرد. باتوجه به در دسترس بودن IGBTها در سطوح ولتاژ متوسط (2-36 kV) به نظر می‌رسد که این ساختار در این سطوح قابل پیاده سازی است. دیگر المان‌های ساختار نیز در سطوح ولتاژ متوسط در دسترس می‌باشند. سوییچ‌های نیمه هادی توان بالا تا جریان 24 kA و ولتاژ 4 kV موجود است. زمانی که بازه جریان هجومی محدود باشد و SSICL در شرایط عملکرد عادی کنار گذاشته شود نگرانی از بابت دمای نقطه اتصال IGBT وجود ندارد. علاوه بر این از آنجا که حداکثر زمان سوئیچینگ IGBT کمتر از ۲ میکرو ثانیه است، فرکانس سوئیچینگ باید کنترل شود [۱۴].

۴- نتایج شبیه سازی و داده‌های عملی

به منظور بررسی عملکرد ساختار SSICL پیشنهادی، یک نمونه از سیستم نشان داده شده در **شکل (۱)** شبیه سازی و در آزمایشگاه پیاده‌سازی شد. مشخصات سیستم و نمونه اولیه تکفاز SSICL در جدول(۲) و مشخصات ترانسفورماتور T در جدول(۳) بیان شده است. در **شکل (۱)** شرایط جریان هجومی با بستن S زمانی که SL باز است



شکل (۴): نمونه آزمایشگاهی اولیه SSICL

جدول(۲): پارامتر های سیستم و SSICL

نماد	مقدار
V_s	220 V
L_s	5 mH
R_s	1 Ω
$R_{Limiter}$	10 Ω
$C_{snubber}$	47 nf
$R_{snubber}$	15 Ω
T_1	220/380
IGBT	BUP314D
MOV	10N180M

جدول(۳): پارامتر های ترانسفورماتور

نماد	مقدار
S_n	2.3 KVA
V_1	220 V
V_2	380 V
Z	1.13+2.2 Ω
X_m	169 Ω
R_c	2.29 KΩ

[13] duty cycle

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

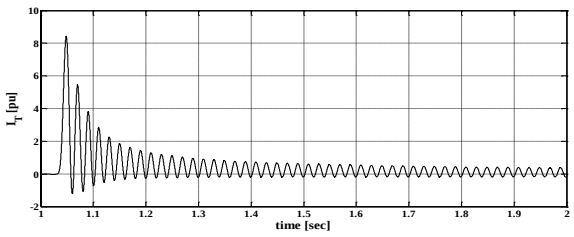
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.7.4]

اتفاق می‌افتد. کنترلSSICL بر عهده dsPIC30F4011 است. نمونه آزمایشگاهی که برای تست مورد استفاده قرار گرفته شده در**شکل** (۴) نمایش داده شده است. کلیدزنی ترانسفورماتور در لحظه عبور از صفر شکل موج ولتاژ ممکن است جریان هجومی بالایی را به دنبال داشته باشد. علاوه بر این شار پسماند اثر قابل توجهی بر روی جریان هجومی داشته و تعیین کننده مقدار حداکثر آن می‌باشد. ازاین رو قابلیت SSICL در لحظه عبور از صفر برای چندین مقدار مختلف شار باقی‌مانده مطالعه می‌شود. یک روش آزمون و خطا برای تعیین شار پسماند یکسان در شرایط مغناطیسی کردن با و بدون حضور SSICL به کار گرفته شده است.

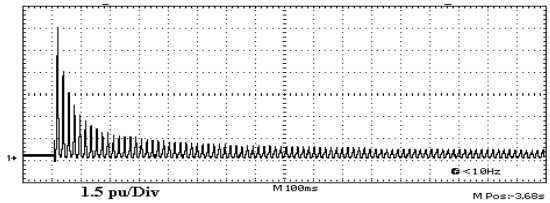
شکل(۵) (الف) و (ب) شکل موج شبیه‌سازی شده و عملی جریان هجومی بدون حضور SSICL را در لحظه عبور از صفر ولتاژ منبع نشان می‌دهد. ماکزیمم جریان هجومی ۹ برابر مبنای واحد است و با بالا رفتن ظرفیت ترانسفورماتور این مقدار نیز افزایش می‌یابد. به منظور ارزیابی عملکرد SSICL پیشنهادی باید شرایط ماکزیمم جریان هجومی را با و بدون حضور SSICL فراهم کرد.

باید به این نکته نیز توجه نمود که میزان شار پسماند قبل از راه‌اندازی ترانسفورماتور در عمل ناشناخته است، در حالی که مقدار دقیق شار پسماند برای یک ارزیابی صحیح از ساختار لازم است. بنابراین تنها راه ممکن برای فراهم آوردن شرایط بالا، تکرار فرآیند راه‌اندازی بدون حضور SSICL به دفعات زیاد است. هم‌چنین برای هر مورد با استفاده از یک روش آزمون و خطا باید مقادیر شار پسماند مناسب تعیین شود. بعد از تکرار روند فوق برای حداقل ۲۰۰ مرتبه نتیجه گرفته شد که جریان هجومی در حضور SSICL تقریبا یک‌دهم مقدار آن بدون حضور SSICL است.

همان‌طور که قبلا نیز بیان شد برای تولید سیگنال‌های آتش سوییچ‌های دوسویه یک کنترلر هیسترزیس به کار گرفته شده است. کنترلر هیسترزیس باند محدود تعیین کننده فرکانس سوییچینگ است. با



(الف)

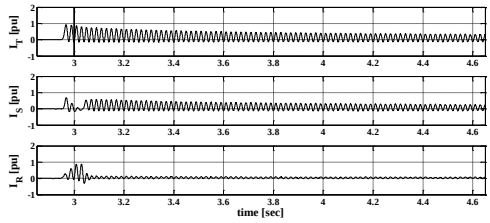


(ب)

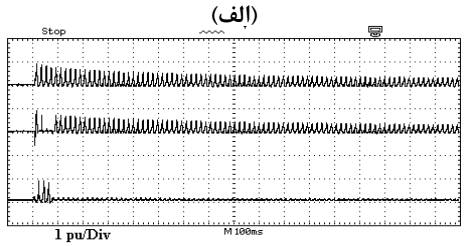
شکل(۵): جریان هجومی را بدون حضور SSICL (الف) نتایج شبیه سازی (ب) نتایج عملی

افزایش محدوده باند کاری کنترلر، فرکانس سوییچینگ در زمان راه‌اندازی کاهش می‌یابد. کاهش فرکانس منجر به کاهش تلفات سوییچینگ می‌گردد. از سوی دیگر در این شرایط مدت زمانی که مقاومت در مدار است افزایش می‌یابد و نیاز به مقاومتی با اندازه بزرگ‌تر است.

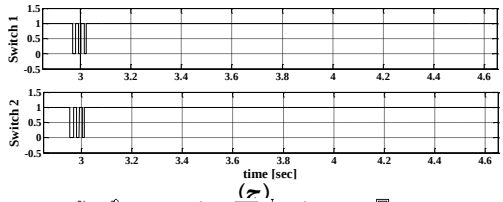
شکل(۶) (الف) و (ب) نتایج شبیه سازی و داده‌های عملی جریان هجومی در حضور SSICL را نشان می دهد که I_T ، I_S و I_R به ترتیب جریان‌های ترانسفورماتور، سوییچ دوسویه و مقاومت محدود کننده هستند. همان‌طور که واضح است در مقایسه با حالت بدون محدود کننده جریان به شدت کاهش می‌یابد. در این حالت حداکثر جریان کمتر از یک مبنای واحد است. در عمل حداکثر جریان هجومی به کمتر از ۰/۹ مبنای واحد محدود شد. نتایج شبیه سازی و عملی برای برخی سیگنالهای اندازه‌گیری شده با حضور SSICL نشان داده شده اند. با توجه به شکل (۶)(ب)، در حالت ماندگار سوییچ روشن می‌ماند و مقاومت محدود کننده کنار گذاشته می‌شود. جریان هجومی در حضور SSICL تقریبا یک‌دهم مقدار آن بدون حضور SSICL می باشد.



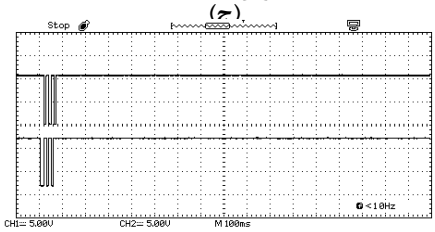
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل(۶): نتایج با حضور SSICL (الف) نتایج شبیه سازی جریان ترانسفورماتور، سوییچ دوسویه و مقاومت محدود کننده (ب) جریان ترانسفورماتور، سوییچ دوسویه و مقاومت محدود کننده در نمونه عملی (ج) نتایج شبیه سازی سیگنال‌های آتش سوییچ‌ها (د) سیگنال‌های آتش سوییچ‌ها در عمل

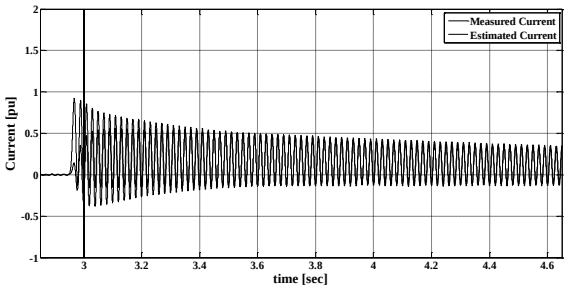
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.7.4]

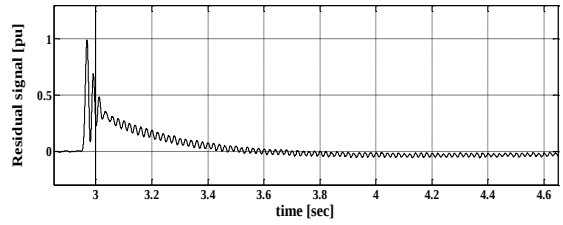
شکل(۷) (الف) جریان هجومی اندازه گیری شده و تخمین زده شده با الگوریتم فیلتر کالمن را نشان می‌دهد. شکل(۷) (ب) سیگنال خطای مربوط به محدود کننده جریان هجومی را ارایه می‌کند. در لحظات ابتدایی راه‌اندازی، سیگنال خطا بزرگ است و با گذشت زمان سیگنال خطا کاهش می‌یابد. در شرایط حالت ماندگار سیگنال خطا از مقدار از پیش تعیین شده کنترلر تجاوز نمی‌کند.

همان‌طور که بیان شد این ساختار پیشنهادی می‌تواند جریان هجومی بارهایی شبیه موتور القایی را محدود کنند. در واقع SSICL نقش یک راه‌انداز نرم[۱۴] برای بارهای با جریان هجومی قابل توجه را دارد. شکل(۸)(الف) جریان‌های کشیده شده هنگام راه اندازی یک موتور القایی و شکل(۸) (ب) سیگنال‌های آتش سوییچ را درشبیه سازی نشان می‌دهد و داده‌های عملی مربوطه نیز در شکل(۸)(ج) و (د) آمده است. ترانسفورماتور در زمان ۲/۵۶ ثانیه در مدار قرار گرفته و موتور القایی تکفاز در ۳/۹ ثانیه به سمت ثانویه ترانسفورماتور متصل گردیده است.

همان‌طور که پیداست پیاده سازی محدود کننده جریان هجومی با استفاده از فیلتر کالمن اگرچه باعث افزایش پیچیدگی سیستم کنترلی می‌شود اما دقت عملکرد سیستم را به طرز قابل توجهی بهبود داده و با توجه به استفاده بهینه از مقاومت محدود کننده تلفات کلی سیستم را کاهش می‌دهد. با کاهش میزان تلفات، ساختار پیشنهادی این قابلیت را دارد تا در رنج های توانی بالاتر مورد استفاده قرار بگیرد. نتایج شبیه‌سازی و عملی نیز تایید کننده این موضوع می باشد که در این روش سرعت عملکرد سیستم در مقایسه با روش هایی که از راکتور DC یا جبران کننده های ولتاژ استفاده می‌کنند بهبود یافته است. هم‌چنین حداکثر جریان هجومی در حالت راه اندازی کمتر از یک حد

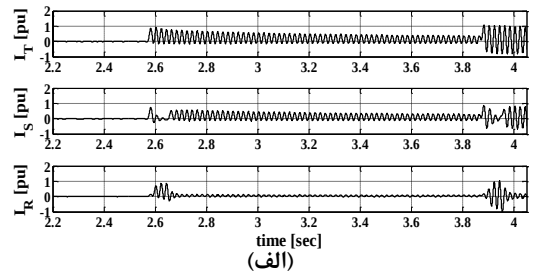


(الف)

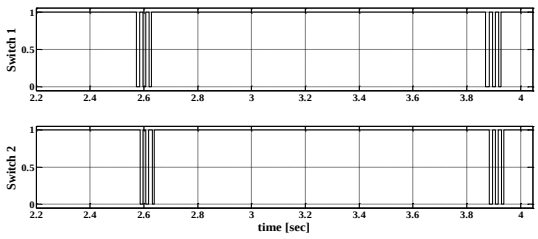


(ب)

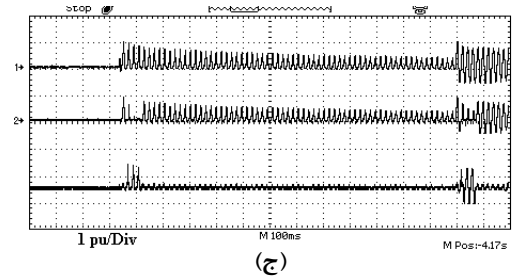
شکل(۷): (الف) جریان هجومی اندازه گیری شده و تخمین زده شده با الگوریتم فیلتر کالمن (ب) سیگنال خطا



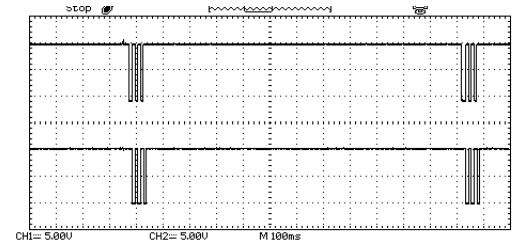
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل(۸): (الف) جریان شبیه سازی شده ترانسفورماتور، سوییچ-ها و مقاومت محدود کننده هنگام راه اندازی یک موتور القایی (ب) سیگنال آتش سوییچ‌ها (ج) جریان نمونه عملی ترانسفورماتور، سوییچ‌ها و مقاومت محدود کننده هنگام راه اندازی یک موتور القایی (د) سیگنال آتش سوییچ‌ها در نمونه عملی

مشخص است و با تغییر ناگهانی بار همانند آنچه در شکل(۸) نشان داده شده است، خللی در عملکرد کلی سیستم کنترلی ایجاد نمی‌شود.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک SSICL با عملکرد مناسب ارایه شد. نشان داده شد که با استفاده از سوییچ‌های تحت کنترل کامل موازی با مقاومت محدود کننده می‌توان جریان هجومی را به شکل قابل توجهی کاهش داد. سوییچ ها با کمک یک الگوریتم جدید پاسخ کند فیلتر کالمن کنترل می‌شدند. نمونه اولیه قادر بود که جریان هجومی راه اندازی ترانسفورماتور و سوییچینگ بار را به یک دهم مقدار در حالت بدون حضور SSICL تقلیل دهد. از جمله مزایای SSICL پیشنهادی می-

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.7.4]

توان به تلفات هدایتی کم در شرایط عـادی، عملکـرد سـریع و سـاختار ساده اشاره کرد. نتایج شبیه سازی و نمونه عملی عملکرد و قابلیت‌هـای این ساختار را مورد تایید قرار داد.

مراجع

[1] M. Heathcote, *J & P transformer book*: Newnes, 2011.

[2] C.-K. Cheng, J.-F. Chen, T.-J. Liang, and S.-D. Chen, "Transformer design with consideration of restrained inrush current," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, pp ,۱۰۸-۱۰۲ . .۲۰۰٦

[3] K. Smith, L. Ran, and B. Leyman, "Analysis of transformer inrush transients in offshore electrical systems," *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 146, pp. 89-95, 1999.

[4] T. Ghanbari and E. Farjah, "Development of an efficient solid-state fault current limiter for microgrid," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, pp. 1829-1834, 2012.

[5] T. Ghanbari, E. Farjah, and A. Zandnia, "Solid-state transient limiter for capacitor bank switching transients ",*IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, pp. 1272-1277, 2013.

[6] T. Ghanbari, E. Farjah, and A. Zandnia, "Development of a high-performance bridge-type fault current limiter," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, pp. 486-494.۲۰۱٤ ,

[7] J.-L. Shyu, "A novel control strategy to reduce transformer inrush currents by series compensator," in *2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems*, 2005, pp. 1283-1288.

[8] J.-F. Chen, T.-J. Liang, C.-K. Cheng, S.-D. Chen, R.-L. Lin, and W.-H. Yang, "Asymmetrical winding configuration to reduce inrush current with appropriate short-circuit current in transformer," *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 152, pp. 605-611, 2005.

[9] V. Molcrette, J.-L. Kotny, J-.P. Swan, and J.-F. Brudny, "Reduction of inrush current in single-phase transformer using virtual air gap technique," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, pp. 1192-1194, 1998.

[10] C.-K. Cheng, T.-J. Liang, J.-F. Chen, S.-D. Chen, and W.-H. Yang, "Novel approach to reducing the inrush current of a power transformer," *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 151, pp. 289-295, 2004.

[11] J. H. Brunke and K. J. Frohlich, "Elimination of transformer inrush currents by controlled switching. I. Theoretical considerations," *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 16, pp. 276-280, 2001.

[12] J. H. Brunke and K. J. Frohlich, "Elimination of transformer inrush currents by controlled switching. II. Application and performance considerations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, pp. 281-285, 2001.

[13] O. A. Mahgoub, "Microcontroller-based switch for three-phase transformer inrush current minimization," in *Power Electronics Congress, 1996. Technical Proceedings. CIEP'96., V IEEE International*, 1996, pp. 107-112.

[14] S. G. Abdulsalam and W. Xu, "A sequential phase energization method for transformer inrush current reduction—Transient performance and practical considerations," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 22, pp. 208-216, 2007.

[15] M. T. Hagh and M. Abapour, "DC reactor type transformer inrush current limiter," *IET Electric Power Applications*, vol. 1, pp. 808-814, 2007.

[16] S. Madani, M. Rostami, G. Gharehpetian, and R. Haghmaram, "Inrush current limiter based on three-phase diode bridge for Y-yg transformers," *IET electric power applications*, vol. 6, pp. 345-352, 2012.

[17] H.-T. Tseng and J.-F. Chen, "Voltage compensation-type inrush current limiter for reducing power transformer inrush current," *IET electric power applications*, vol. 6, pp. 101-110, 2012.

[18] T. Ghanbari and E. Farjah, "Efficient resonant-type transformer inrush current limiter," *IET electric power applications*, vol. 6, pp. 429-436, 2012.

[19] H.-C. Seo, C.-H. Kim, S.-B. Rhee, J.-C. Kim, and O.-B. Hyun, "Superconducting fault current limiter application for reduction of the transformer inrush current: a decision scheme of the optimal insertion resistance," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 20, pp. 2255-2264, 2010.

[20] M. Ahmed, G. Putrus ,L. Ran, and R. Penlington, "Development of a prototype solid-state fault-current limiting and interrupting device for low-voltage distribution networks," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 21, pp. 1997-2005, 2006.

[21] Ghanbari, Teymoor. "Kalman filter based incipient fault detection method for underground cables." *IET Generation, Transmission & Distribution* 9.14 (2015): 1988-1997.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.7.4]