

یک محدودساز جریان هجومی حالت جامد کارآمد

تیمور قنبری^۱، دانشیار، احسان باقری^۲، دانشجوی کارشناسی ارشد، نیما تشکر^۲، کارشناسی ارشد، ابراهیم فرجاه^۲، 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 می گردد. در این مقاله یک محدود کننده جریان هجومی حالت جامد (SSICL^۱) جدید برای ترانسفورمرهای قدرت ولتاژ متوسط جهت به کارگیری با مدارشکن های موجود ارائه می شود. ساختار پیشنهادی متشکل از مجموعه سوییچ های نیمه هادی دوسویه مشابه و یک مقاومت محدودکننده جریان هجومی می باشد. با استفاده از یک روش مبتنی بر فیلتر کالمن^۲، 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 آزمایش ها نشان می دهد که ساختار ارائه شده می تواند به طور 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 نویسنده ی مسئول : دکتر تیمور قنبری

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

¹Solid-State Inrush Current Limiter

² Kalman Filter

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 ویژگی‌های 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 پیامد‌های سنگین‌تری را در برداشته باشد. در چنین ترانسفورماتورهایی جریان هجومی می‌تواند سبب اضافه ولتاژهای گذرای شود که ناشی از تحریک فرکانس تشدید بوجود آمده توسط خازن‌های بزرگ موازی با کابل‌های زیر دریا است [3]. علاوه بر جریان مغناطیس‌کنندگی 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 مغناطیس‌کنندگی 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 [7-20]. 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 [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 مبتنی بر کنترل لحظه سوییچ زنی می‌باشد [8]. در مقالات [11-12]، شار پسماند با استفاده از انتگرال‌گیری 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 [15-17]. 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 هارمونیک کلی^۴ 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 روزناتی (SSICL) و در [19] استفاده از یک محدود کننده هیبریدی جریان خطای ابررسانا (SFCL^۵) 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، سوییچ‌های تمام کنترلی در رنج‌های توانی معمول ترانسفورماتورهای صنعتی در دسترس می‌باشند.

⁴ Total Harmonic Distortion (THD)

⁵ Superconducting Fault Current Limiter

³ Virtual Air Gap

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 سوئیچینگ	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	متوسط	ساده	زیر متوسط	زیر متوسط	کم	[8-9]
روش پیشنهادی	متوسط	متوسط	خوب	متوسط	کم	-

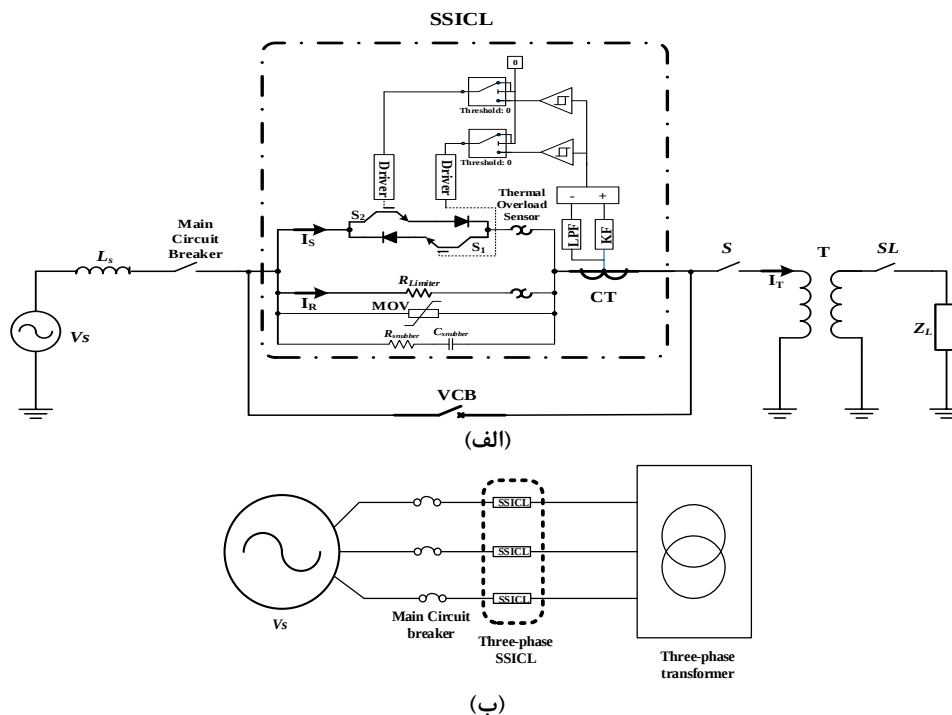
در جدول (۱)، مزایا و معایب روش‌های مختلف با یکدیگر و با روش پیشنهادی این مقاله مقایسه شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی دارای قابلیت اطمینان مطلوب، پیچیدگی کنترلی قابل قبول و اعوجاج کم می‌باشد.

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 عملکرد SSICL پیشنهادی

در شکل (۱) (الف) ساختار تکفاز SSICL پیشنهادی نشان داده شده است. این ساختار متشکل از یک سوئیچ دوسویه^۶ سریع به کمک نیمه هادی‌های الکترونیک قدرت مانند IGBT یا IGCT همراه با دیود معکوس موازی^۷، یک مقاومت محدود کننده جریان هجومی، یک مقاومت غیر خطی اکسید آهن^۸ و یک مدار اسنابر می‌باشد. ساختار مشخص شده بر اساس برخی ملاحظات مانند تلفات هدایتی،

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



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

تلفات سوئیچینگ و همچنین حالت گذرای مربوط به جریان بازایی معکوس دیود انتخاب شده است. جریان خط به کمک ترانسفورماتور

هجومی ترانسفورماتور پیشنهاد شده است. در این روش سوئیچ‌ها 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 سوئیچینگ را در طول دوره مغناطیسی شدن ترانسفورماتور تعیین می‌کند. در شرایط عملکرد عادی ترانسفورماتور سیگنال خطا صفر بوده و سوئیچ‌ها بسته می‌مانند.

⁶ bidirectional switch

⁷ anti-parallel

⁸ Metal Oxide Varistor

$\pm I_{th}$ فراتر رفته و IGBT ها خاموش هستند پس جریان خط از مقاومت محدود کننده عبور می کند. به تدریج تخمین فیلتر کالمن دقیق تر شده و سیگنال خط کاهش می یابد و سهم سویچ دوسویه در عبور جریان خط افزایش می یابد. با این توصیف دو حالت عملکردی برای SSICL در محدود سازی جریان هجومی قابل ملاحظه می باشد (الف) بازه زمانی روشن بودن سویچ دوسویه

(ب) بازه زمانی خاموش بودن سویچ دوسویه .

شکل (۳) مدار معادل سیستم را در دو حالت عملکرد نشان می دهد. شکل (۳) (الف) بازه زمانی روشن بودن سویچ و شکل (۳) (ب) مدار معادل را برای بازه ی در مدار قرار گرفتن مقاومت محدود کننده نشان می دهد. در این جا L_s و r_s به ترتیب بیانگر مقاومت و سلف خط می باشد. V_{fD} و V_{fS} افت ولتاژ هدایتی دیود و سویچ، r_{sw} و r_{eq1} مقاومت های هدایتی دیود و سویچ 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 سویچ زنی بر اساس شکل (۳) (الف) داریم:

$$V_m \sin(\omega t) = L_{eq1} \frac{di_1}{dt} + R_{eq1} i_1 + V_{fD} + V_{fS} \quad (1)$$

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

با در نظر گرفتن t_0 به عنوان لحظه سویچ زنی ترانسفورماتور، $i_1(t)$ با استفاده از (۲) قابل محاسبه می باشد.

$$i_1(t) = e^{-\frac{R_{eq1}(t-t_0)}{L_{eq1}}} \left[I_2 - \frac{V_m}{Z_{eq1}} \sin(\omega t_0 - \theta_1) + \frac{V_{fD} + V_{fS}}{R_{eq1}} \right] + \dots \\ \dots \frac{V_m}{Z_{eq1}} \sin(\omega t - \theta_1) - \frac{V_{fD} + V_{fS}}{R_{eq1}} \quad (2)$$

زمانی که سیگنال خط از مقدار تعیین شده عبور می کند، سویچ خاموش می شود. براساس شکل (۳) (ب) داریم:

$$V_m \sin(\omega t) = L_{eq2} \frac{di_2}{dt} + R_{eq2} i_2 \quad (3)$$

$$\text{که در آن } L_{eq2} = L_s + R_{limiter} + r_1 + r_m' \text{ و } L_{eq2} = L_{eq1} \\ Z_{eq2} = \sqrt{R_{eq2}^2 + (\omega L_{eq2})^2} \text{ و } \theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{L_{eq2} \omega}{R_{eq2}} \right) \text{ می باشد.}$$

اگر سویچ در لحظه t_1 سویچ خاموش شود، $i_2(t)$ با استفاده از (۴) قابل محاسبه می باشد.

$$i_2(t) = e^{-\frac{R_{eq2}(t-t_1)}{L_{eq2}}} \left[i_1(t_1) - \frac{V_m}{Z_{eq2}} \sin(\omega t_1 - \theta_2) \right] + \frac{V_m}{Z_{eq2}} \sin(\omega t - \theta_2) \quad (4)$$

بعد از محدود سازی جریان، سویچ در t_2 روشن شده و جریان با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه است اما در این جا $I_2 = i_2(t_2)$ می باشد. زمانی که ماکزیمم جریان در سیکل اول رخ می دهد براساس i_2 این مقدار قابل محاسبه است. با مشتق گیری از رابطه (۴)، زمانی که جریان ماکزیمم می شود t_{max} قابل دستیابی است که :

جریان (CT^1) اندازه گیری و به کمک فیلتر کالمن با پاسخ کند تخمین زده می شود. برای جلوگیری از وجود نویز، در خروجی CT از یک فیلتر پایین گذر (LPF^1) استفاده می شود.

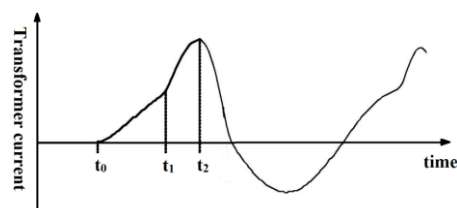
سیگنال تخمینی برای تعیین بازه های زمانی هدایت IGBT ها در هنگام تحریک مورد استفاده قرار می گیرد. سیگنال خط از تفاضل جریان تخمینی و سیگنال خروجی LPF تولید می شود. هنگامی که سیگنال خط از بازه تعیین شده قبلی $(\pm I_{th})$ خارج شود، سویچ ها خاموش شده و جریان از مقاومت محدود کننده، مدار اسنابر و MOV عبور می کند. در نتیجه زمانی که سیگنال خط با راه اندازی ترانسفورماتور افزایش می یابد، جریان هجومی به کمک مقاومت محدود کننده کاهش می یابد. مدار اسنابر و MOV به منظور فرونشاندن و حفاظت در برابر ولتاژهای گذرای سویچینگ به کار گرفته می شوند. بسته به پارامترهای فیلتر کالمن، بعد از گذشت چند سیکل، سیگنال خط تضعیف شده و بازه زمانی هدایت IGBT ها افزایش یافته و زمان در مدار بودن مقاومت محدود کننده کاهش می یابد. نهایتاً در حالت ماندگار محدود کننده از مدار خارج شده و سویچ دوسویه جریان خط را به طور مستمر عبور می دهد.

از آنجایی که IGBT ها در حالت عملکرد عادی به طور مستمر هدایت را انجام می دهند، تلفات هدایتی در سویچ ها، در حدود ۱٪ توان نامی می باشد [20]. به همین دلیل سویچ دوسویه با استفاده از یک قطع کننده مدار خلا (VCB^1) در حالت عملکرد نرمال کنار گذاشته می شود. همانطور که در شکل (۱) (الف) نشان داده شده، می توان یک SSICL را به صورت موازی با یک CB نصب کرد. ساختار SSICL سه فاز که متشکل از سه مجموعه مشابه می باشد در شکل (۱) (ب) نشان داده شده است. مدار کنترلی هر فاز، SSICL مربوطه را بر اساس جریان همان فاز مستقلاً کنترل می کند.

۳- ملاحظات طراحی SSICL

۳-۱- آنالیز مدار

یک نمونه از جریان هجومی ترانسفورماتور در شکل (۲) نشان داده شده است. ترانسفورماتور در زمان t_0 سویچ شده و در بازه t_0-t_2 شارژ می شود. در t_1 هسته ترانسفورماتور اشباع می شود و سلف مغناطیس کننده آن از L_{NS} به L_S تغییر می یابد. در بازه زمانی t_1-t_2 جریان هجومی با یک شیب زیاد افزایش می یابد. بنابراین در طول بخش مهم سیکل سیگنال خط از مقدار تعیین شده



شکل (۲): نمونه ای از جریان هجومی

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:

$$S_n = a \cos(\omega_0 n + \varphi) \quad (8)$$

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:

$$S_{n+1} + S_{n-1} = 2 \cos(\omega_0) S_n + \psi_n \quad (9)$$

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 اندازه‌گیری و دیگر عوامل نویز سیگنال جریان می‌تواند بر روی سیگنال مدل اصلی منطبق شود، بنابراین:

$$y_n = S_n + v_n \quad (10)$$

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:

$$X_{n+1} = MX_n + b v_n, y_n = h^T X_n + v_n \quad (11)$$

که $b \triangleq [1 \ 0]^T$, $M \triangleq \begin{bmatrix} 2 \cos(\omega_0) & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $X_n \triangleq [x_n \ x_{n-1}]^T$ و $T_s = f_s^{-1}$, $h \triangleq [1 \ 0]^T$ می‌توان دیگر مولفه‌های هارمونیک مانند هارمونیک دوم و مولفه DC را نیز در نظر گرفت. مدل دینامیکی حالا کامل شده است. مولفه اصلی سیگنال جریان اندازه‌گیری 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:

$$\text{error}_n = S_{fn} - y_n \quad (12)$$

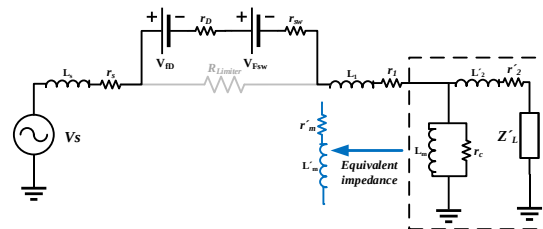
که S_{fn} خروجی فیلتر پایین‌گذر می‌باشد در شرایط حالت ماندگار فیلتر می‌توان مدل را فرآیند ثابت ($q_n = q$) و مشاهدات ثابت ($\text{error}_n = r$) در نظر گرفت (پیوست را مشاهده کنید). ماتریس کوواریانس نویز q و r نقش تنظیم‌کننده پارامترها را برای متعادل سازی پاسخ دینامیکی بازی می‌کنند. نسبت q/r به جای مقدار 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.

$$i_2'(t) = K_1 e^{-\frac{R_{eq2}}{L_{eq2}}(t_{max}-t_1)} + K_2 \cos(\omega t_{max} - \theta_2) = 0 \quad (5)$$

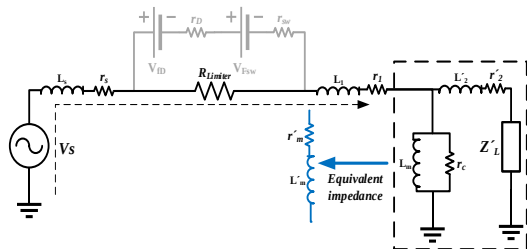
که $K_2 = \frac{V_m \omega}{Z_{eq2}}$ و $K_1 = -\frac{R_{eq2}}{L_{eq2}} \left[i_1(t_1) - \frac{V_m}{Z_{eq2}} \sin(\omega t_1 - \theta_2) \right]$ است.

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 قابل محاسبه است. حداکثر جریان هجومی به $i_{peak} = i_2(t_{max})$ 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) سویچ روشن و مقاومت خارج از مدار (ب) سویچ خاموش و مقاومت داخل مدار

$$t_{max} = \frac{\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{\omega L_{eq2-saturated}}{R_{eq2}} \right)}{\omega} \quad (6)$$

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

$$i_{peak} = \frac{V_m}{Z_{eq2-saturation}} \quad (7)$$

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 اندازه‌گیری شده همزمان تخمین زده می‌شود. یک مدل

¹² Noise covariance matrixes

۳-۳-۳- 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:

$$R_{Limiter} = \sqrt{\frac{V_m^2}{i_{peak}^2} - (\omega L_{eq2-saturated})^2} - r_s - r_1 - r_m' \quad (13)$$

اما زمانی که مقاومت با استفاده از سویچ دوسویه از مدار خارج می‌شود باید مقدار مقاومت موثر با توجه به بازه کاری^{۱۳} سویچ در نظر گرفته شود. اگر D نسبت زمان هدایت دیود به کل یک دوره تناوب باشد مقدار مقاومت موثر برابر است با:

$$R_{Limiter-effective} = R_{Limiter-actual} (1-D) \quad (14)$$

در رابطه فوق D تابعی از کنترلر هیستریزیسی باند محدود و رفتار فیلتر کالمن می‌باشد. در بدترین شرایط ابتدا سویچ 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:

$$E_{loss} = R_{Limiter-effective} \times i_{effective}^2 \times \tau_{saturation} \quad (15)$$

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.

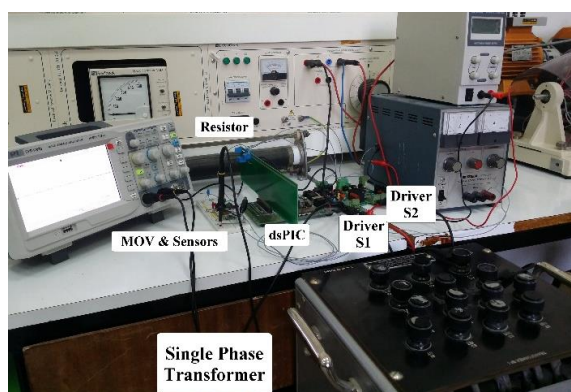
۳-۳-۲- سویچ دوسویه

یک بن برای انتخاب یک سویچ دوسویه مجموعه‌ای از الزامات باید برآورده شود. در این کاربرد مهم‌ترین ویژگی‌ها ولتاژ نامی، حاکثر جریان قابل تحمل و فرکانس سوئیچینگ است [۲۰]. ساختار پیشنهادی را می‌توان 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. سویچ‌های 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): پارامترهای 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

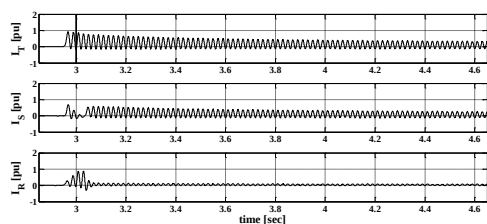
جدول (۳): پارامترهای ترانسفورماتور

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 K Ω

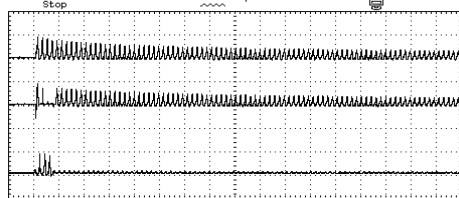
¹³ duty cycle

افزایش محدوده باند کاری کنترلر، فرکانس سوئیچینگ در زمان راه-اندازی کاهش می‌یابد. کاهش فرکانس منجر به کاهش تلفات سوئیچینگ می‌گردد. از سوی دیگر در این شرایط مدت زمانی که مقاومت در مدار است افزایش می‌یابد و نیاز به مقاومتی با اندازه بزرگ-تر است.

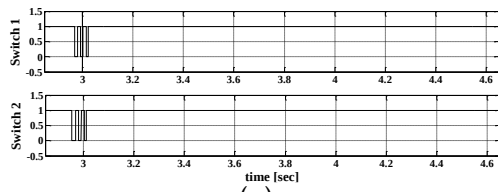
شکل (۶) (الف) و (ب) نتایج شبیه سازی و داده‌های عملی جریان هجومی در حضور SSICL را نشان می‌دهد که I_R ، I_S ، I_T به ترتیب جریان‌های ترانسفورماتور، سوئیچ دوسویه و مقاومت محدود کننده هستند. همان‌طور که واضح است در مقایسه با حالت بدون محدود کننده جریان به شدت کاهش می‌یابد. در این حالت حداکثر جریان کمتر از 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 سوئیچ روشن می‌ماند و مقاومت محدود کننده کنار گذاشته می‌شود. جریان هجومی در حضور SSICL تقریباً یک‌دهم مقدار آن بدون حضور SSICL می‌باشد.



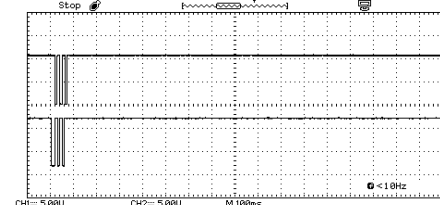
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

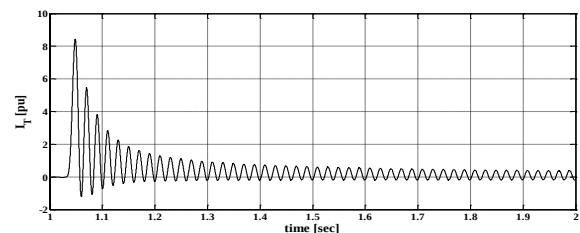
شکل (۶): نتایج با حضور SSICL (الف) نتایج شبیه سازی جریان ترانسفورماتور، سوئیچ دوسویه و مقاومت محدود کننده (ب) جریان ترانسفورماتور، سوئیچ دوسویه و مقاومت محدود کننده در نمونه عملی (ج) نتایج شبیه سازی سیگنال‌های آتش سوئیچ‌ها (د) سیگنال‌های آتش سوئیچ‌ها در عمل

اتفاق می‌افتد. کنترلر SSICL 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 هجونی 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. از این رو قابلیت SSICL در لحظه عبور از صفر برای چندین مقدار مختلف شار باقی-مانده 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.

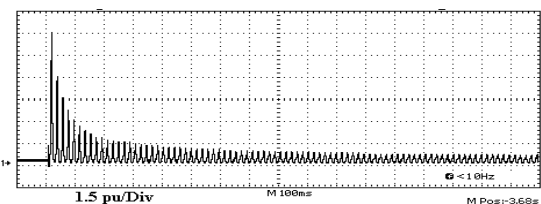
شکل (۵) (الف) و (ب) شکل موج شبیه‌سازی شده و عملی جریان هجومی بدون حضور SSICL را در لحظه عبور از صفر ولتاژ منبع نشان می‌دهد. ماکزیمم جریان هجومی ۹ برابر مبنای واحد است و با بالا رفتن ظرفیت ترانسفورماتور این مقدار نیز افزایش می‌یابد. به منظور ارزیابی عملکرد SSICL پیشنهادی باید شرایط ماکزیمم جریان هجومی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

همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد برای تولید سیگنال‌های آتش سوئیچ-های دوسویه یک کنترلر هیستریزس به کار گرفته شده است. کنترلر هیستریزس باند محدود تعیین کننده فرکانس سوئیچینگ است. با

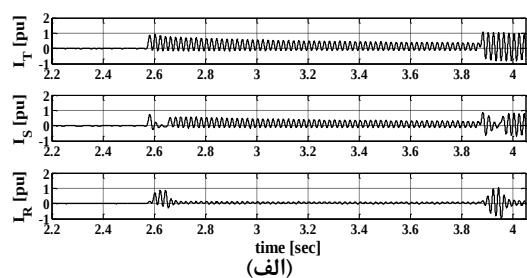


(الف)

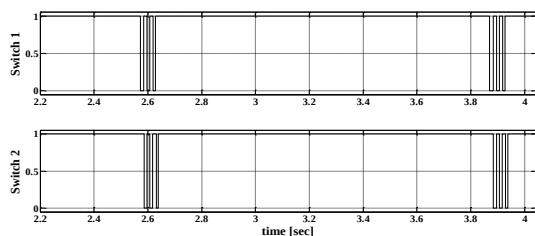


(ب)

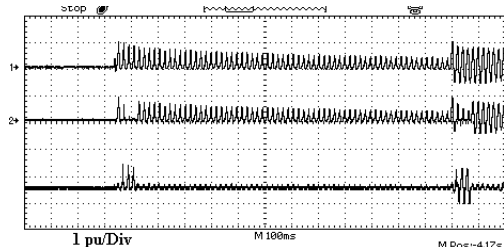
شکل (۵): جریان هجومی را بدون حضور SSICL (الف) نتایج شبیه سازی (ب) نتایج عملی



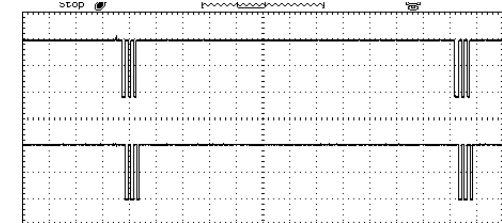
(الف)



(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 سوییچ ها (ج) جریان نمونه عملی ترانسفورماتور، سوییچ ها و مقاومت محدود کننده هنگام راه اندازی یک موتور القایی (د) سیگنال آتش سوییچ ها 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 نمی شود.

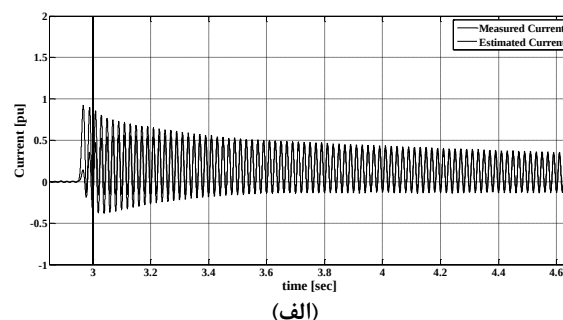
۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک SSICL با عملکرد مناسب ارائه شد. نشان داده شد که با استفاده از سوییچ های تحت کنترل کامل موازی با مقاومت محدود کننده می توان جریان هجومی را به شکل قابل توجهی کاهش داد. سوییچ ها با کمک یک الگوریتم جدید پاسخ کند فیلتر کالمن کنترل می شدند. 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-

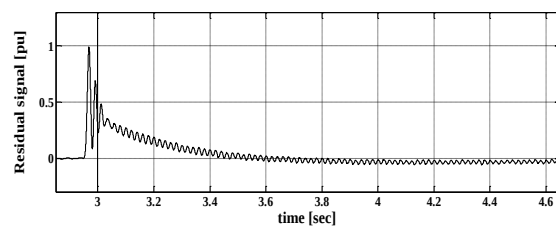
شکل (۷) (الف) جریان هجومی اندازه گیری شده و تخمین زده شده با الگوریتم فیلتر کالمن را نشان می دهد. شکل (۷) (ب) سیگنال خطای مربوط به محدود کننده جریان هجومی را ارائه می کند. در لحظات ابتدایی راه اندازی، سیگنال خطا بزرگ است و با گذشت زمان سیگنال خطا کاهش می یابد. در شرایط حالت ماندگار سیگنال خطا از مقدار از پیش تعیین شده کنترلر تجاوز نمی کند.

همان طور که بیان شد این ساختار پیشنهادی می تواند جریان هجومی بارهایی شبیه موتور القایی را محدود کنند. در واقع نقش یک راه انداز نرم^۴ برای بارهای با جریان هجومی قابل توجه را دارد. شکل (۸) (الف) جریان های کشیده شده هنگام راه اندازی یک موتور القایی و شکل (۸) (ب) سیگنال های آتش سوییچ را در شبیه سازی نشان می دهد و داده های عملی مربوطه نیز در شکل (۸) (ج) و (د) آمده است. ترانسفورماتور در زمان ۲/۵۶ ثانیه در مدار قرار گرفته و موتور القایی تک فاز در ۳/۹ ثانیه به سمت ثانویه ترانسفورماتور متصل گردیده است.

همان طور که پیداست پیاده سازی محدود کننده جریان هجومی با استفاده از فیلتر کالمن اگرچه باعث افزایش پیچیدگی سیستم کنترلی می شود 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 می دهد. با کاهش میزان تلفات، ساختار پیشنهادی این قابلیت را دارد تا در رنج های توانی بالاتر مورد استفاده قرار بگیرد. نتایج شبیه سازی 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 می کنند بهبود یافته است. هم چنین 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

- 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.
- توان به تلفات هدایتی کم در شرایط عادی، عملکرد سریع و ساختار ساده اشاره کرد. نتایج شبیه سازی و نمونه عملی عملکرد و قابلیت‌های 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. 108-112, 2006.
- [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, 2014.
- [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. Molcette, 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