

پیشنهاد یک روش تحلیلی کارا جهت طراحی فیلتر حالت گذرای سمت فشارقوی ترانسفورماتورهای کوره قوسی

معین عابدینی^۱ مهدی داورپناه^۲

۱- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران- ایران

m.abedini@ut.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران- ایران

m.davarpanah@ut.ac.ir

چکیده: استفاده از کلیدهای قدرت خلا در شبکه برق به ویژه شبکه‌های صنعتی به دلیل مزایای زیاد آن نظیر ابعاد کوچک، عدم نیاز به تعمیرات اساسی و امکان تعداد قطع و وصل زیاد رو به فزونی است. یکی از موارد کاربرد، استفاده در سمت فشارقوی ترانسفورماتورهای کوره قوسی در شرکت‌های فولاد است. کلیدهای خلا در کنار مزایای قابل ملاحظه، در برخی از شرایط شبکه حالت گذراهایی را ایجاد می‌کنند که این حالت گذراها می‌تواند باعث آسیب به سیم‌پیچ ترانسفورماتور، تپ چنجر و حتی برقی‌های فاز به زمین گردد. براساس تئوری مذکور و تجربه عملی سوختن ترانسفورماتورها در یکی از شرکت‌های فولادسازی کشور، ضروری است که برای میرا کردن و مستهلک کردن حالت گذراهای مرتبط با کلید خلا، فیلتر حالت گذراهایی طراحی شود. هدف از این مقاله پیشنهاد یک روش تحلیلی کارا جهت طراحی فیلتر مذکور است. جهت ارزیابی صحت عملکرد این فیلتر، ضروری است کلید خلا به صورت دقیق مدل‌سازی گردد تا پدیده‌های فرکانس بالا در این مدل مطالعه شود. با پیاده‌سازی یک مدل دقیق از کلید خلا، کارایی عملکردی فیلتر حالت گذرا نشان داده شد. نتایج پیاده‌سازی عملی در یکی از شرکت‌های فولاد تاییدگر صحت روش طراحی است.

واژه‌های کلیدی: ترانسفورماتور کوره قوس، کلید خلا، پدیده جرقه زنی چندباره، حالت گذرا

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.21.2.109

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۶/۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر معین عابدینی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - آمیرآباد - دانشکده فنی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران

۱- مقدمه

استفاده از کلیدهای خلا در سطوح فشارم توسط به دلایل اقتصادی و عدم نیاز به تعمیرات اساسی رو به فزونی است [۱]-[۳]. یکی از قابلیت‌های مهم کلیدخلا، بالابودن استقامت عایقی آن است که به دلیل استقامت الکتریکی بسیار زیاد خلا، فاصله کنتاکتها کمتر از انواع کلیدهای دیگر است و لذا:

- حجم کلیدهای خلا به مراتب کمتر از سایر کلیدهای قدرت است و فضای کمتری را اشغال می‌نماید.
- به دلیل بازیابی سریع عایقی، زمان قطع قوس کم می‌باشد. این ویژگی باعث محدود شدن انرژی قوس الکتریکی، خوردگی کمتر کنتاکتهای کلید و در نتیجه افزایش عمر محفظه قطع می‌شود.
- به دلیل کم بودن فاصله‌ای که باید به هنگام باز شدن کنتاکتها طی شود، به مکانیزم مکانیکی قطع/وصل کلید نیز تنش مکانیکی کمتری وارد می‌شود که افزایش عمر آن را به همراه دارد.

از سوی دیگر بازیابی سریع عایقی در محفظه قطع کلید خلا باعث می‌شود که این کلید، قابلیت قطع جریان‌های با فرکانس بالا را نیز داشته باشد. لذا در مواجهه با ولتاژهای گذرای فرکانس بالا باعث ایجاد جریانی می‌شود و حول صفر نوسان می‌کند (یعنی مقدار جریان مثبت و منفی می‌شود) که سبب می‌شود در زمان کوتاهی پس از صفر جریان، کلید باز شود. در این حالت که کلید در لحظه صفر شدن جریان فرکانس بالایی قطع شده است، اولاً دو سر کلید اضافه ولتاژ زیادی وجود دارد و ثانیاً اگر زمان باز شدن کنتاکتهای کلید نزدیک به صفر جریان رخ داده باشد، در اینصورت فاصله بین کنتاکتهای کلید نیز کم است [۴]. بنابراین در این شرایط مجدداً قوس بین کنتاکتهای کلید برمی‌گردد و اضافه ولتاژهای نوسانی جدیدی شکل می‌گیرد. این پدیده ممکن است چند ده بار و گاهی چند صد بار به هنگام قطع بارهای سلفی تکرار شود که پس از مدتی، مشکلات عایقی را برای تجهیزات سیستم به دنبال دارد [۵].

در سایر کلیدها (نظیر کلید SF6) اولاً به دلیل اینکه در دامنه کمتری نسبت به کلید خلا، برش جریان بوجود می‌آید و از طرف دیگر، کلید قدرت توانایی عملکرد در برابر جریان‌های فرکانس بالا را ندارد، اساساً چنین مشکلی وجود ندارد [۶].

بازیابی سریع عایقی خلا در کلیدهای خلا موجب می‌شود که قوس الکتریکی در جریان بالاتر از صفر بصورت ناگهانی قطع شود که به آن برش جریان^۱ گفته می‌شود. در واقع پدیده برش جریان، صفر شدن اجباری و ناگهانی جریان قبل از رسیدن به صفر طبیعی جریان است که سبب ایجاد اضافه ولتاژ (به دلیل $L di/dt$ بزرگ در سیستم) می‌شود. ضمناً، بازیابی سریع عایقی در خلا موجب می‌شود که کلید خلا، قابلیت قطع جریان‌های فرکانس بالا را نیز داشته باشد. چنین

خاصیتی منشاء پیدایش پدیده جرقه‌زنی‌های چندباره^۲ در کلیدهای خلا است که پدیده‌های دیگری از قبیل ازدیاد ولتاژ^۳، برش جریان مجازی^۴ و پیش شکست‌ها^۵ را نیز به دنبال خواهد داشت. جریان فرکانس بالای ایجاد شده در یک فاز مربوط به سیستم سه‌فاز، القای الکترومغناطیسی با دو فاز دیگر نیز دارد و موجب پیدایش جریان‌های فرکانس بالا در دو فاز دیگر نیز می‌شود. جریان‌های فرکانس بالای مذکور نیز ممکن است قبل از صفر طبیعی جریان بصورت ناگهانی قطع شوند که به این پدیده، برش جریان مجازی گفته می‌شود [۷]. با صفر شدن ناگهانی جریان عبوری از دو فاز سالم، اضافه ولتاژ بزرگی در آن دو فاز نیز ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر برش جریان عادی فقط باعث اضافه ولتاژ در فاز معیوب می‌شود ولی برش جریان مجازی موجب پیدایش اضافه ولتاژ در دو فاز سالم نیز خواهد شد [۸].

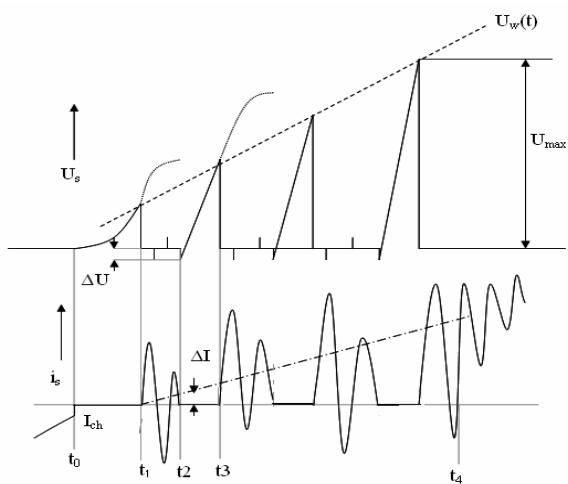
مقالاتی به بررسی پدیده جرقه‌زنی چندباره در کلیدهای خلا و ارائه راهکار برای کاهش آسیب‌های آن به تجهیزات شبکه پرداخته‌اند [۹]-[۱۷]. مهم‌ترین نکته در این مقالات نحوه مدل‌سازی کلید خلا و استقامت عایقی این کلید در شرایط باز شدن کنتاکتها است. روش صنعتی جهت کاهش استرس وارد شده بر تجهیزات، استفاده از فیلتر RC است. اما در این مقالات روش کارایی برای تعیین مقادیر خازن و مقاومت مربوط ارائه نشده است. روش پیشنهادی عمده این مقالات، مبتنی بر شبیه‌سازی حالت گذرا است.

هدف از این پژوهش، پیشنهاد یک روش سیستماتیک و کارایی تحلیلی جهت میراسازی اضافه ولتاژهای ناشی از پدیده جرقه‌زنی چندباره است. بدین منظور، در ابتدا نحوه مدل‌سازی پدیده جرقه‌زنی چندباره در کلید خلا شرح داده می‌شود. سپس براساس این مدل‌سازی، اضافه ولتاژهای گذرا در شرایط قطع کلید نشان داده می‌شود. بعداً این، یک روش کارا جهت طراحی فیلتر حالت گذرای کلید خلا پیشنهاد می‌شود. در این روش، نه تنها پارامترهای ترانسفورماتور کوره بلکه پارامترهای شبکه نیز در نظر گرفته می‌شود. به نحوی که براساس نتایج مطالعات، امکان تعیین خازن براساس اضافه ولتاژ مدنظر بدون انجام شبیه‌سازی حالت گذرا محقق است. جهت صحت‌سنجی، بخشی از شبکه واقعی یکی از شرکت‌های فولاد کشور مدل‌سازی می‌شود و کارایی روش پیشنهادی در میرای‌سازی اضافه ولتاژهای گذرا نشان داده می‌شود. در نهایت، نتیجه‌گیری از این مقاله بیان می‌شود.

۲- تئوری حالت گذرای کلید خلا

شکل (۱) مدار پایه و ساده شده برای مطالعه پدیده‌های گذرای کلید خلا است، که در آن یک بار سلفی (با اندوکتانس L_T) به همراه خازن‌های بین فاز و زمین سیستم و اندوکتانس کابل‌های ارتباطی بین کلید و بار (L_{KL}) در سمت راست کلید قرار دارند. از طرف دیگر امپدانس تونن شبکه با پارامتر L_N و خازن بین فاز و زمین (نظیر خازن موازی خطوط انتقال در شبکه) با پارامتر C_N به همراه اندوکتانس بین باس اصلی پست و کلید خلا با پارامتر L_{KL} در سمت چپ کلید

می‌دهد. پس از بازگشت قوس، یک جریان فرکانس بالا شکل می‌گیرد که در حد چند صد کیلوهرتز است [۳]. به خاطر قابلیت مطلوب خاموش شدن قوس در کلید خلاء، در یکی از صفرهای بعدی جریان (زمان t_2)، جریان عبوری از کلید، دوباره قطع می‌شود. پس از خاموش شدن قوس، مجدداً ولتاژ TRV جدیدی شکل می‌گیرد. این بار که تحمل ولتاژ بین کنتاکت‌های کلید (به دلیل افزایش فاصله آنها) بیشتر شده است، شکست مجدد عایقی بین کنتاکت‌های کلید در ولتاژ بالاتری (زمان t_3) رخ می‌دهد و این سیکل چندین بار تکرار می‌شود تا درنهایت به دلیل افزایش کافی فاصله بین کنتاکت‌ها، TRV کمتر از تحمل عایقی کلید شده و از بازگشت قوس جلوگیری شود.



شکل (۲): مکانیزم جرقه‌زنی‌های چندباره

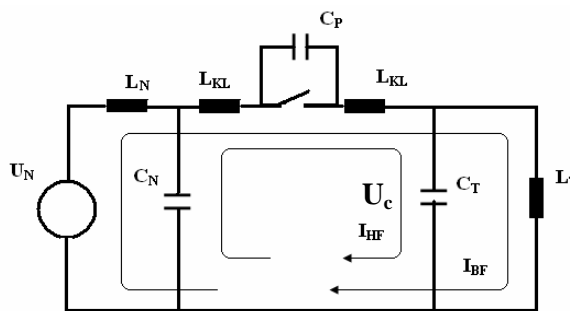
۳- تشریح مدل فرکانس بالای کلید خلاء

در این بخش روش مدل‌سازی ریاضی کلید خلاء توضیح داده می‌شود. سپس براساس روابط بیان شده، مدل مناسبی با استفاده از بلوک‌های کنترلی موجود در نرم افزار PSCAD ارائه خواهد شد. شکل (۳) نمای کلی کلید خلاء پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار PSCAD را نشان می‌دهد که شامل یک سوئیچ ایده آل است که توسط منطق کنترلی مناسبی قطع و وصل می‌شود. در این مدل با نمونه‌گیری از جریان عبوری از کلید و هم‌چنین ولتاژ دو سر آن، فرمان قطع و وصل به سوئیچ ایده‌آل صادر می‌شود. در مدل‌سازی کلید خلاء، حالت‌های مختلفی وجود دارد که برای هر کدام از آنها بایستی از مدل مناسبی استفاده شود. حالت‌های مختلف کلید به صورت زیر در مدل لحاظ شده است:

- در حالت عادی فرض می‌شود که کلید در حالت بسته است.
- پس از ارسال فرمان باز شدن و بعد از جدا شدن کنتاکت‌های کلید از یکدیگر، به محض اینکه مقدار لحظه‌ای جریان از مقدار سطح برش متداول (یعنی current chipping) در کلید خلاء که به جنس کنتاکت‌ها وابسته است) کمتر شد، در اینصورت سوئیچ ایده‌آل باز می‌شود و در نتیجه بطور ناگهانی جریان

خلاء در نظر گرفته شده‌اند [۱۸]. در صورتی که لحظه جدا شدن کنتاکت‌های کلید خلاء مدت زمان کوتاهی پیش از رسیدن به صفر جریان عبوری از کلید باشد، در این صورت هنگامی که کلید قرار است جریان را قطع کند، فاصله کنتاکت‌های آن از یکدیگر، خیلی کم است. بنابراین استقامت عایقی آن نیز کم بوده و در نتیجه کلید خلاء ممکن است قادر به تحمل ولتاژ بازبایی گذرا (TRV) در دو سر کنتاکت‌ها را نداشته باشد. در این شرایط، شکست عایقی دو سر کنتاکت‌های کلید ایجاد می‌شود و جریان از فاصله بین کنتاکت‌ها جاری می‌گردد.

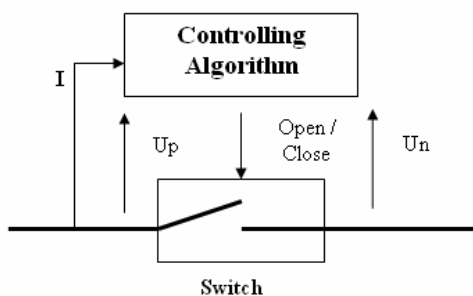
با توجه به اینکه شکست عایقی دو سر کنتاکت‌های کلید خلاء به دلیل اضافه ولتاژ بالای سیستم ایجاد شده است، بنابراین در لحظه برقراری مجدد جریان، انرژی زیادی در خازن‌ها و سلف‌های سیستم وجود دارد. پس از بسته شدن مجدد کلید (ناشی از شکست عایقی دو سر کنتاکت‌های آن)، انرژی مذکور بین سلف و خازن‌های شبکه جابجا شده و جریان‌های فرکانس بالایی را بوجود می‌آورد. در کلیدهای SF6 که قابلیت قطع جریان‌های فرکانس بالا را ندارد، قطع مجدد قوس زمانی رخ می‌دهد که جریان‌های فرکانس بالا میرا شده و در نتیجه انرژی ذخیره شده در سلف و خازن‌های مدار میرا شده‌اند. لیکن در کلیدهای خلاء که قابلیت قطع جریان‌های فرکانس بالا را دارند، قطع قوس زمانی اتفاق می‌افتد که انرژی زیادی در سلف و خازن‌ها وجود دارد و لذا TRV بزرگتری شکل می‌گیرد. بنابراین مجدداً ممکن است فرایند برگشت قوس (وصل کلید از طریق برقراری قوس بین کنتاکت‌ها) و قطع مجدد آن (در اثر ایجاد جریان‌های فرکانس بالا) تکرار می‌شود که به این پدیده، جرقه‌زنی چند باره گفته می‌شود. ضمناً پس از هر بار بازگشت مجدد قوس در بین کنتاکت‌های کلید، اضافه



شکل (۱): مدار پایه و ساده برای مطالعه حالت‌های گذرای کلید خلاء

ولتاژ شدیدتری در سیستم ایجاد می‌شود که به این پدیده، ازدیاد ولتاژ گفته می‌شود. با افزایش فاصله بین کنتاکت‌ها، قدرت قطع کلید نیز به تدریج اضافه می‌شود و درنهایت پس از چند میلی‌ثانیه پس از جدا شدن کنتاکت‌ها، قدرت قطع کلید به حدی می‌رسد که قادر به تحمل ولتاژ TRV بوده و قوس بطور کامل قطع می‌شود [۱۵].

شکل (۲) جریان عبوری از کلید و ولتاژ دو سر ترمینال‌های آن را نشان می‌دهد. بعد از اینکه جریان در t_0 صفر شد، ولتاژ بازبایی گذرا (TRV) بایستی توسط خلاء بین کنتاکت‌های کلید قابل تحمل باشد. اگر TRV بیش از ولتاژ قابل تحمل کلید باشد، جرقه‌زنی در t_1 رخ



(ج)

شکل (۳): نمای کلی از الف) ساختار ب) الگوریتم و ج) نحوه مدل سازی کلید خلا

شد، کنترل می‌شود. در ادامه، منطق کنترلی مذکور، بصورت ریاضی نیز مدل‌سازی می‌شود.

۳-۱- پدیده برش جریان

پدیده برش جریان به مفهوم صفرشدن اجباری جریان، قبل از زمان رسیدن به صفر طبیعی جریان است. این پدیده به دلیل ناپایداری قوس الکتریکی در کلیدهای خلا در جریان کم به وجود می‌آید [۲]. زمانی که برش جریان رخ می‌دهد، انرژی ذخیره شده در اندوکتانس معادل به خازن فاز به زمین معادل در یک سمت کلید (مجموع خازن بار، کابل بین کلید و بار و خازن جبران ساز توان راکتیو با اتصال ستاره زمین شده) منتقل شده و سبب اضافه ولتاژ می‌گردد [۳]. لازم به ذکر است که اندوکتانس و خازن معادل با L_T و C_T معرفی شده‌اند. لازم به ذکر است که افزایش ظرفیت خازن C_T علاوه بر کاهش فرکانس بازیابی، تعداد جرقه‌زنی‌های بعد از برش جریان را کاهش می‌دهد. با توجه به مدار معادل نشان داده شده در شکل (۱) ولتاژ به وجود آمده در ترمینال بار به هنگام برش جریان را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود.

$$U_c = I_{ch} \sqrt{\frac{L_T}{C_T}} \sin \omega_n t + U_N \cos \omega_n t \quad (۱)$$

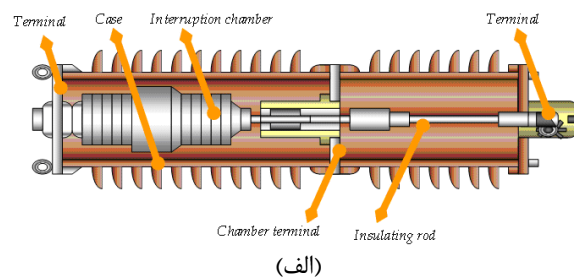
یکی از موارد مهم بررسی پدیده برش جریان، قطع ترانسفورماتور بی بار از شبکه است. در این حالت L_T اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی ترانسفورماتور است که اندازه بزرگی دارد. در نتیجه با توجه به رابطه فوق، کلیدزنی ترانسفورماتور بی بار اضافه ولتاژ بزرگی را به وجود می‌آورد که به عایق ترانسفورماتور صدمه وارد می‌کند. اندازه دقیق برش جریان در انواع کلیدهای قدرت مشخص نبوده و در انواع مختلف کلید، مقدار متفاوتی دارد. با این وجود تحقیقات مختلف سطح برش جریان را برای انواع بارها و جنس مواد به کار رفته در کنتاکت کلید تعیین کرده است [۳]. بر اساس مرجع [۳] می‌توان سطح برش جریان را به صورت زیر تعیین نمود:

عبوری از مدار، صفر می‌شود. البته شرط دوم برای باز شدن سوئیچ مذکور این است که شیب جریان عبوری از کلید، از مقدار شیب بحرانی کمتر باشد.

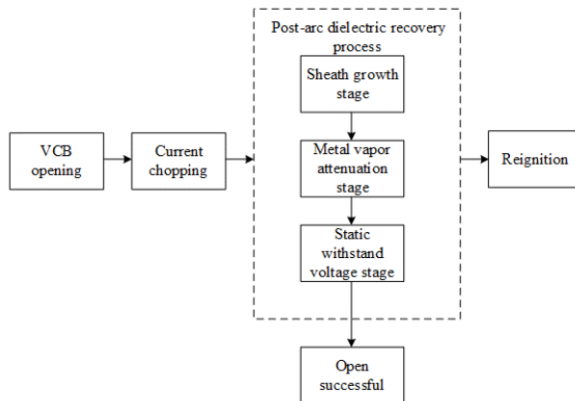
- بعد از اینکه جریان صفر گردید ولتاژ بازیابی گذرا (TRV) اندازه گیری می‌شود. چنانچه TRV بیش از ولتاژ استقامت عایقی کلید باشد، در اینصورت برگشت قوس اتفاق افتاده و لذا سوئیچ ایده آل دوباره وصل می‌شود.
- پس از اینکه مقدار لحظه ای جریان کمتر از سطح برش متداول شد و همچنین شیب جریان کمتر از شیب بحرانی گردید، در اینصورت قوس الکتریکی دو سر کنتاکتهای کلید مجددا خاموش شده و جریان عبوری از آن بطور ناگهانی صفر می‌شود. در چنین شرایطی با ایجاد برش جریان، ولتاژ نوسانی با دامنه نسبتاً بزرگی دو سر کلید ظاهر می‌شود (یعنی TRV) که می‌تواند منجر به شکست الکتریکی دو سر عایق کلید شود.

با گذشت زمان از لحظه جدا شدن کنتاکتها و افزایش فاصله بین آنها، تحمل عایقی دو سر کنتاکتهای کلید افزایش می‌یابد و در نتیجه احتمال برگشت قوس کمتر می‌شود. یعنی ممکن است کلید به حالت کاملاً باز برود. زمان قطع و وصل جریان در کلید را به خاطر طبیعت تصادفی آن نمی‌توان به طور دقیق تعیین نمود [۵]. بدین منظور در شبیه‌سازی‌ها طبیعت تصادفی کلید به صورت یک متغیر تصادفی در مدل‌سازی قرار داده می‌شود.

همانطور که پیشتر بیان شد، مدل کلید خلاء شامل سوئیچ ایده آلی است که با منطق کنترلی که بصورت کیفی نحوه عملکرد آن بیان



(الف)



(ب)

قادر به قطع قوس می‌باشد. شیب بحرانی جریان را می‌توان به صورت رابطه زیر بصورت وابسته به زمان، تعریف کرد:

$$\frac{di(t)}{dt} = C(t - t_{open}) + D \quad (4)$$

مقدار مشتق جریان، اندازه شیب بحرانی جریان در هر لحظه است. همانند مشخصه استقامت دی‌الکتریک می‌توان مشخصه شیب جریان را نیز با در نظر گرفتن مقادیر تصادفی برای ضرایب C و D مدل کرد. اندازه شیب بحرانی جریان با افزایش زمان به تدریج زیاد می‌شود. هر چند که ممکن است در حین باز شدن کنتاکتها، شیب جریان عبوری کلید از شیب بحرانی جریان بیشتر باشد اما با گذشت زمان و افزایش فاصله کنتاکتها احتمال وقوع این رویداد کمتر شده و احتمال برگشت مجدد قوس کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به مشخصات و ویژگی‌های بیان شده برای کلیدهای خلا، بایستی نکات زیر را برای این گونه کلیدها در نظر گرفت.

- حاصل ضرب di/dt قبل از صفر جریان در dv/dt ولتاژ بازیابی بعد از صفر جریان، می‌تواند به عنوان قدرت قطع کلید تلقی گردد. از این جهت، کلیدهای خلا دارای قدرت قطع بالاتری از سایر کلیدها نظیر کلیدهای SF6 هستند.
- کلید خلا به دلیل زمان بازیابی سریع عایق دی‌الکتریک آن، قادر به قطع جریانهای فرکانس بالا است که می‌تواند در مدارهای حاوی مولفه‌های فرکانس بالا مفید واقع شود. هر چند که ممکن است عملکردهای ناخواسته‌ای در اثر ویژگی‌های توضیح داده شده مربوط به حالت گذرهای کلید خلا به وجود آید و باعث ایجاد جرقه‌زنی‌های چند باره شود.
- برخی کلیدهای خلا دارای جریان برش بیشتری نسبت به سایر کلیدهای خلا موجود هستند که البته این ویژگی وابستگی مستقیمی به جنس کنتاکتهای مورد استفاده در آنها دارد.
- با ایجاد Thermal Re-ignition به ویژه در صورت برش جریان، یک جریان فرکانس بالا به جریان فرکانس قدرت اضافه می‌شود. در سایر کلیدها که زمان بازیابی (Recovery) ماده عایقی نسبتاً زیاد است، این نوسانات فرکانس بالا به تدریج میرا می‌شود و احتمال قطع قوس در صفر جریان با فرکانس بالا تقریباً صفر است. ولی در کلیدهای خلا، با صفر شدن جریان فرکانس بالا، کلید ممکن است قطع شود که باعث ایجاد TRV دو سر کلید خلا می‌گردد. این حالت تا قطع کامل قوس ممکن است چندین بار تکرار شود.
- به دلیل مشخصه تصادفی برش جریان و شکست الکتریکی در کلیدهای خلا با اطمینان نمی‌توان گفت که جرقه‌زنی‌های بعدی نسبت به قبل، در سطح بالاتری رخ می‌دهند. نکته قابل توجه این است که به دلیل زمان کوتاه پیشانی موج ضربه ایجاد شده، برگشتی ممکن است به دلیل تاخیر ذاتی، قادر به عملکرد نباشد. در چنین شرایطی به عایق ترانسفورماتور (به ویژه قسمتهای

$$I_{CH} = (\omega \cdot \bar{i} \cdot \alpha \cdot \beta)^q, \quad \omega = 2\pi \times 50, \quad \beta = 14.3 \quad (2)$$

$$\alpha = 6.2 \times 10^{-16}, \quad q = (1 - \beta)^{-1}$$

در رابطه فوق، \bar{i} دامنه (پیک) جریان فرکانس قدرت عبوری از کلید و I_{CH} سطح برش جریان تخمینی در کلید است.

۲-۳- استقامت دی‌الکتریک

ویژگی دوم در کلید، استقامت دی‌الکتریک بین کنتاکتها به هنگام باز شدن آنها است. پس از جدا شدن کنتاکتها، استقامت دی‌الکتریک مذکور به دلیل افزایش فاصله بین کنتاکتها، به مرور زمان زیاد می‌شود که این اثر را می‌توان به صورت یک تابع زمانی مطابق رابطه (۳) در نظر گرفت [۶]:

$$U_b(t) = A(t - t_{open}) + B \quad (3)$$

در رابطه فوق t_{open} لحظه جدا شدن کنتاکتها، و پارامترهای A و B ضرایب ثابت مربوط به استقامت دی‌الکتریک کلید هستند. این ضرایب معمولاً با استفاده از اندازه‌گیری، تعیین شده و در مدل شبیه‌سازی شده، قابلیت تغییر آنها وجود دارد تا هر کلید با هر مشخصه استقامت دی‌الکتریک را بتوان پیاده‌سازی کرد. برای نزدیک شدن پاسخ شبیه‌سازی‌های انجام شده از کلید خلا به عملکرد واقعی آنها در شبکه مناسب است ضرایب A و B در یک محدوده منطقی به صورت تصادفی انتخاب گردد.

۳-۳- قابلیت قطع جریانهای فرکانس بالا

دو طرف کلید خلا، بار الکتریکی و منبع ولتاژ وجود دارد که می‌توان هر یک از آنها را بصورت ساده، شامل یک اندوکتانس موازی با خازن نمایش داد. پس از جدا شدن کنتاکتهای کلید و برش جریان توسط کلید خلا، انرژی باقیمانده در سلف و خازنهای سیستم ساده مذکور، بین L و C مدار جابجا شده و ولتاژهای رزونانسی با فرکانس مشخصی را ایجاد می‌نماید که معمولاً مقدار فرکانس در سمت بار با منبع متفاوت است. ولتاژهای رزونانسی مذکور باعث پیدایش ولتاژی در دو سر کنتاکتهای کلید می‌شود که به ولتاژ بازیابی گذرا (TRV) معروف است.

زمانی که ولتاژ بازیابی گذرا، بزرگتر از استقامت دی‌الکتریک کلید (یعنی ولتاژ $U_b(t)$) شود، برگشت قوس دو سر کنتاکتهای کلید رخ می‌دهد. در این حالت، هم‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، جریان عبوری از کلید، متشکل از مولفه‌های فرکانس بالا است. نکته قابل تامل این است که کلید خلا در زمان بسیار کوتاهی قادر است سیستم عایقی بین کنتاکتها را احیاء نماید. یعنی مدت کوتاهی پس از قطع قوس، استقامت عایقی نسبتاً بالایی دو سر کنتاکتهای آن ایجاد می‌شود. از این رو، چنانچه جریان فرکانس بالای عبوری از کلید، دارای شیب کمتر از حد بحرانی باشد، در اینصورت در نزدیکی صفر جریان،

مغناطیسی مسیر خود را از هسته می‌بندد و رفتار هسته تقریباً مشابه رفتار آن در فرکانس قدرت است. یعنی شار ناشی از جریان فوکو در مقطع ورقه‌های هسته به اندازه‌ای نیست که شار اصلی عبوری از هسته را منحرف کند. لذا در این محدوده فرکانسی از مدار معادل ساده شده ترانسفورماتور استفاده می‌شود فقط بایستی اثر خازنهای سری و موازی سیم‌پیچ‌ها بصورت خازنهای فشرده مدل شود. در محدوده فرکانسی چند کیلوهرتز تا فرکانس بحرانی (که معمولاً چند صد کیلوهرتز تا حدود یک مگاهرتز است)، شکل‌گیری جریانهای گردابی در حدی است که باعث انحراف میدان مغناطیسی اصلی از داخل هسته به سمت بیرون آن می‌گردد و لذا مدل و مقدار پارامترهای مدار معادل ساده در این حالت قابل استفاده نمی‌باشد. در این محدوده فرکانسی، اغلب فرکانسهای تشدید ناشی از خازنهای C_g و اندوکتانس سیم‌پیچ‌ها است. منظور از فرکانس بحرانی، فرکانس تشدید بین L و C_s است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$f_{cr} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \times C_s}}, W_{cr} = 2\pi f_{cr} \quad (5)$$

تا قبل از فرکانس بحرانی، مدار معادل L و C_s بصورت سلفی بوده و به ازای فرکانسهای بزرگتر از فرکانس بحرانی، مدار معادل آن بصورت خازنی است. به عبارت دیگر در مقادیر بالاتر از فرکانس بحرانی، می‌توان امیدانس معادل L و C_s را بصورت خازن در نظر گرفت و در نتیجه مدل ترانسفورماتور در چنین حالتی بصورت یک شبکه نردبانی خازنی است. در این محدوده بایستی به تاثیر خازنهای پراکندگی خارجی (نظیر کابل‌های ارتباطی) نیز توجه ویژه نمود. بر اساس مدار معادل فرکانس بالای ترانسفورماتور، مشخص است که ولتاژ اعمال شده به لایه‌های ابتدایی سیم‌پیچ بیشتر از توزیع ولتاژ در لایه‌های انتهایی آن است که نسبت آنها به ظرفیت خازنهای C_g وابسته است. در واقع هر چه نسبت C_g به C_s بزرگتر باشد، توزیع ولتاژ غیرخطی‌تر شده و به لایه‌های ابتدایی سیم‌پیچ تنش ولتاژی بیشتری وارد می‌شود. ضمناً نسبت C_g به C_s به نوع سیم‌پیچی وابسته است، به نحوی که باعث می‌شود که توزیع ولتاژ در سیم‌پیچ لایه ای بسیار غیر خطی باشد (تقریباً ۸۰٪ دامنه ولتاژ با فرکانس بالا، بر روی ۲۰٪ ابتدایی سیم‌پیچ افت می‌کند) و در سیم‌پیچ دیسکی کمی بهتر می‌شود و در سیم‌پیچ‌های درهم (Interleaved) توزیع ولتاژ خیلی بهتر می‌شود.

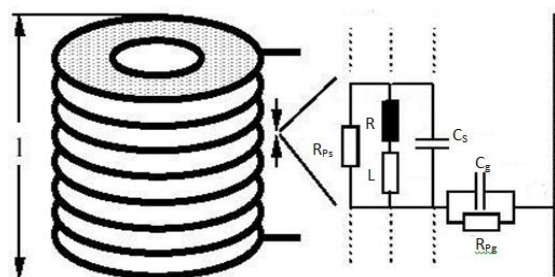
نکته قابل توجه این است که به منظور بررسی دامنه اضافه ولتاژهای ایجاد شده در ترمینالهای ترانسفورماتور، لزومی به در نظر گرفتن مدل دقیقی (مدل مشروح) برای سیم‌پیچ ترانسفورماتور نمی‌باشد. لیکن برای انجام این نوع از مطالعات که اضافه ولتاژ داخل سیم‌پیچ مدنظر نیست، می‌توان سیم‌پیچ ترانسفورماتور را بصورت امیدانس موجی مدل کرد که به محدوده فرکانسی مورد مطالعه وابسته است:

ابتدایی سیم‌پیچ ترانسفورماتور) آسیب وارد می‌شود. در این حالت، گاهی استفاده از خازن موازی با تجهیز (و یا ضربه گیر R-C) الزامی است. بنابراین در به‌کارگیری کلید خلا جهت سوئیچینگ راکتور، موتور و ترانسفورماتور بایستی مطالعه و شبیه سازی مناسب انجام شود.

۴- تحلیل تاثیر حالت گذرای کلید خلا در قطع ترانسفورماتور بی بار

با توجه به اینکه جرقه‌زنی چندباره کلید خلا یک پدیده فرکانس بالا است از این رو در ابتدا بایستی مدل فرکانس بالای ترانسفورماتور بررسی گردد. مدل مشروح، یکی از روشهای دقیق مدل‌سازی سیم‌پیچ ترانسفورماتور است که برای انجام مطالعات فرکانس بالا از آن استفاده می‌شود. در این روش، کوچکترین عنصر در سیم‌پیچ، یک حلقه یا گروهی از حلقه‌ها (مثلاً یک یا چند بشقاب) در نظر گرفته شده و این عنصر مطابق شکل (۴) به صورت RLC مدل می‌شود. تعداد واحدهای سیم‌پیچ به میزان دقت مورد نیاز در شبیه‌سازی بستگی دارد. با افزایش تعداد واحدهای سیم‌پیچ حد اعتبار فرکانسی مدل افزایش می‌یابد ولی بدست آوردن پارامترهای مدل مشروح و حل مداری آن به محاسبات زیادی نیاز دارد.

در این مدل R و L مقادیر مقاومت و اندوکتانس نشتی سیم‌پیچ و C_s مجموع خازن سری سیم‌پیچ است. ظرفیت خازن C_s با توجه به مجموع انرژی ذخیره شده در خازن بین حلقه‌ها و لایه‌ها محاسبه و یا با فیلتر خاصی اندازه‌گیری می‌شود. این خازن ایده‌آل نبوده و دارای تلفات عایقی می‌باشد که با مقاومت R_p (بصورت موازی با خازن C_s) نشان داده می‌شود. بین هر واحد سیم‌پیچ و زمین نیز عایقی وجود دارد که بصورت خازن C_g و مقاومت R_{pg} (که مبین تلفات عایقی آن



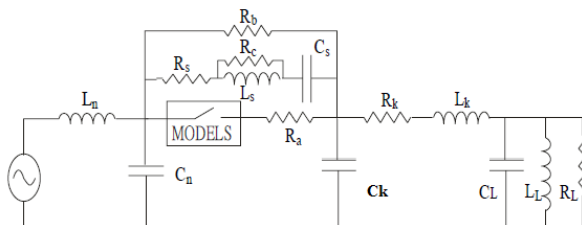
شکل (۴): نحوه مدل RLC حلقه‌های ترانسفورماتور

است) مدل می‌شود که ظرفیت خازن موازی و مقاومت مربوطه را می‌توان با پل Schering (تست $tg\delta$) اندازه‌گیری نمود.

مدل نهایی از ترکیب چندین واحد سیم‌پیچ تشکیل می‌شود که البته در این مدل بایستی به وجود اندوکتانس متقابل بین واحدهای سیم‌پیچ نیز توجه نمود. شکل این مدل به تابع تبدیل مورد نظر بستگی دارد. در محدوده فرکانسی کمتر از ۲ کیلوهرتز، شارهای

۵- ساختار فیلتر حالت گذرای فرکانس بالای ناشی از کلید خلاء

به منظور بررسی مولفه فرکانسی کمیت‌های ولتاژ و جریان در زمان باز شدن کلید خلاء، مدل پیشنهادی هلمر [۵] مطابق شکل (۵) در نظر گرفته شده است. در این مدار مقاومت R_b نشانگر میرایی طبیعی و



شکل (۵): شماتیک مدار هلمر

ذاتی کلید خلاء است که در عمل وجود دارد. R_a یک مقاومت قابل صرف نظر در مدل جهت اندازه‌گیری مناسب جریان است. L_c و C_s به ترتیب اندوکتانس و خازن پراکندگی کلید می‌باشند. مقاومت R_c به صورت موازی با اندوکتانس L_s و به منظور میرا کردن نوسانات اضافی در زمان قطع کلید، در نظر گرفته شده است. L_L و R_L مقادیر مقاومت اندوکتانس بار (یا ترانسفورماتور) است که عملاً در این مقاله از شاخه مقاومتی صرف نظر شده است. C_L برابر با خازن بار (یا ترانسفورماتور) است. پارامترهای R_k و L_k مربوط به اندوکتانس و مقاومت مولفه مثبت کابل و خازن فاز به شیلد در کابل است. ضمناً L_n و C_n اندوکتانس سری و خازن فاز به زمین در سمت منبع هستند. با رخداد اغتشاش خارجی نظیر باز شدن کلید خلاء، ممکن است فرکانس‌های مشخصه مدار فوق (هلمر) تحریک شود. در این حالت نوساناتی با فرکانس‌های مختلف در کمیت‌های ولتاژ و جریان در بخش‌های مختلف مدار ظاهر می‌شود. به صورت شهودی و تقریبی می‌توان فرکانس‌های ایجاد شده در مدار مشخصه را تعیین نمود که شامل موارد زیر است:

- فرکانس ناشی از رزونانس خازن‌های C_s و C_k با اندوکتانس L_k و L_s . فرکانس ایجاد شده در این حالت برابر است با:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_s + L_k) \left(\frac{1}{\frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_k} + \frac{1}{C_n}} \right)}}$$

- فرکانس ناشی از رزونانس خازن بار (یا ترانسفورماتور بی بار) و اندوکتانس بار (یا ترانسفورماتور بی بار). فرکانس رزونانس در این حالت برابر است با:

$$f_2 = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_L L_L}}$$

- فرکانس ناشی از رزونانس خازن‌های بار (یا ترانسفورماتور بی بار) و کابل و اندوکتانس کابل (L_k و C_L). فرکانس رزونانس در این حالت برابر است با:

الف. در محدوده فرکانس‌های پائین، سیم پیچ ترانسفورماتور را می‌توان بصورت یک خط انتقال بدون تلفات مدل کرد. در این حالت می‌توان با دقت مناسبی از خازن C_s صرف‌نظر کرد. لذا امپدانس موجی ترانسفورماتور در این حالت برابر امپدانس مشخصه در مدل خط انتقال می‌باشد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C_g}} = \sqrt{\frac{L_t}{l} \times \frac{l}{C_t}} = \sqrt{\frac{L_t}{C_t}} \quad (6)$$

L و C_g مقادیر اندوکتانس و خازن شنت هر واحد سیم‌پیچ، L_t اندوکتانس کل سیم پیچ و C_t مجموع خازن شنت بین سیم‌پیچ و زمین می‌باشد که بر مبنای تست $tg\delta$ بدست می‌آید.

ب. در فرکانس‌های نزدیک فرکانس بحرانی می‌توان اندوکتانس معادل را از ترکیب موازی خازن C_s و سلف L محاسبه نمود و لذا امپدانس موجی بصورت تابعی از فرکانس محاسبه می‌شود:

$$j\omega L_{eq} = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC_s} = \frac{j\omega L}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_{cr}^2}} \quad (7)$$

بنابراین مدل ترانسفورماتور بصورت یک خط انتقال با سلف L_{eq} وابسته به فرکانس می‌باشد. لذا امپدانس موجی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_{cr}^2}}} = \sqrt{\frac{L}{C_g}} = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - \frac{\omega^2}{\omega_{cr}^2}}} \quad (8)$$

لازم به ذکر است که در فرکانس $\omega = \omega_{cr}$ ، امپدانس موجی ترانسفورماتور، بینهایت می‌شود.

ج. در محدوده فرکانسی بالا که $\omega \geq \omega_{cr}$ است، ترانسفورماتور بصورت یک شبکه خازنی نردبانی می‌باشد. امپدانس موجی ترانسفورماتور بر خلاف دو حالت قبل که بصورت اهمی خالص بودند، در این حالت بصورت خازنی خالص می‌باشد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C_g \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{cr}} \right)^2 \right]}} \approx \sqrt{\frac{L}{C_g \left[- \left(\frac{\omega}{\omega_{cr}} \right)^2 \right]}} = \frac{1}{j\omega \sqrt{C_g \cdot C_s}} \quad (9)$$

با توجه به اینکه در فرکانس بالا می‌توان گفت که با یک مدار صرفاً خازنی رو به رو هستیم. با توجه به مقالات مختلف جهت شبیه‌سازی حالت گذرای کلید خلاء، می‌توان ترانسفورماتور را با یک مدار LC مدل کرد که برای نشان دادن پدیده جرقه‌زنی‌های چندباره کافی است [۵].

داد. برای این منظور کافی است از یک فیلتر خازنی بصورت موازی با ترانسفورماتور استفاده شود.

$$U_c = I_{ch} \sqrt{\frac{L_T}{C_T}} \sin \omega_n t + U_N \cos \omega_n t \quad (10)$$

در رابطه فوق I_{ch} جریان برش یافته، L_T اندوکتانس مغناطیسی کنندگی ترانسفورماتور و C_T مجموع ظرفیت خازن موجی ترانسفورماتور و خازن فیلتر است. نکته قابل توجه این است که با افزایش خازن معادل، شیب اضافه ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور کاهش یافته و در نتیجه برقیگیر نیز زمان کافی برای عملکرد مطمئن، پیدا می‌کند. ضمناً در این حالت برای تلف نمودن انرژی ذخیره شده در سلف‌ها و خازن‌های سیستم، و در نتیجه میرا کردن دامنه اضافه ولتاژ دو سر ترانسفورماتور، مناسب است از یک مقاومت بصورت سری با خازن فیلتر استفاده شود. به عبارت دیگر پیشنهاد می‌شود که از یک فیلتر RC بصورت موازی با ترمینال ترانسفورماتور استفاده نمود تا ضمن کاهش شیب و دامنه اضافه ولتاژ دو سر ترانسفورماتور (توسط خازن فیلتر RC)، میرایی سریع نوسانات را نیز (توسط مقاومت فیلتر RC) تامین نماید.

۶- محاسبه مقادیر پارامترهای فیلتر R-C

در لحظه جدا شدن کنتاکت‌های کلید، انرژی مغناطیسی و الکتریکی در سمت ترانسفورماتور به ترتیب در اندوکتانس شاخه مغناطیس کنندگی و ظرفیت خازن معادل ترانسفورماتور ذخیره می‌شود. انرژی‌های مذکور می‌تواند بین L_T و C_T جابجا شوند. یعنی همانطور که در رابطه (۱۱) مشاهده می‌شود، انرژی ذخیره شده در L_T می‌تواند به خازن منتقل شده و باعث پیدایش ولتاژ V دو سر خازن شود. بدیهی است هر چه ظرفیت خازن C_T بیشتر باشد، ولتاژ دو سر آن کاهش می‌یابد.

$$W_{elec} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} Li_0^2 = W_{mag} \quad (11)$$

در رابطه فوق i_0 جریان برشی توسط کلید خلاء، V ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور، L_T سلف شاخه مغناطیسی ترانسفورماتور و C_T ظرفیت خازن معادل ترانسفورماتور است. می‌خواهیم ولتاژ ترانسفورماتور از k برابر ولتاژ نامی آن بیشتر نشود. در بدترین شرایط فرض می‌شود که جریان برش کلید خلاء در قطع ترانسفورماتور بی‌بار، برابر با جریان مغناطیس کنندگی ترانسفورماتور باشد. در این صورت می‌توان نوشت:

$$f_3 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_K \frac{C_k C_L}{C_k + C_L}}}$$

• فرکانس ناشی از رزونانس خازن و اندوکتانس پراکنندگی کلید (Cs و Ls). فرکانس رزونانس در این حالت برابر است با:

$$f_4 = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_s L_s}}$$

با در نظر گرفتن یک ترانسفورماتور بی بار به عنوان بار الکتریکی و با توجه به پارامترهای جدول (۱) محدوده تقریبی فرکانس رزونانس مدار در (۲) آورده شده است.

جدول (۱): پارامترهای مدار مورد مطالعه در سمت بار و کلید [۵]

$R_s=50 \text{ Ohm}$	$L_L=10 \text{ H}$	$C_L=10 \text{ nF}$
$R_k=20 \text{ Ohm}$	$L_s=50 \text{ nH}$	$C_s=200 \text{ pF}$
$R_a=1e(-5) \text{ Ohm}$	$L_k=40 \mu \text{ H}$	$C_k=200 \text{ nF}$

جدول (۲): فرکانس رزونانس تقریبی مدار مورد مطالعه

f_1	1.6 MHz
f_2	500 Hz
f_3	0.25 MHz
f_4	50 MHz

فرکانسهای f_1 و f_3 در حدود ۱،۶ و ۰،۲۵ مگاهرتز هستند و می‌توانند منجر به ولتاژهایی با شیب تند در ترمینال ترانسفورماتور - گردند. از آنجا که کلید خلاء ممکن است قادر به قطع جریان با فرکانس در حد مگاهرتز باشد، بنابراین امکان رخداد جرقه‌زنی چندباره ناشی از مولفه‌های فرکانسی f_1 و f_3 وجود دارد. با توجه به اینکه توزیع ولتاژ با فرکانس بالا بر روی لایه‌های سیم پیچ ترانسفورماتور به شدت غیرخطی است (به عنوان نمونه در سیم پیچ لایه‌ای، بیش از ۸۰ درصد افت ولتاژ روی ۲۰ درصد ابتدای سیم پیچ‌ها قرار می‌گیرد)، بایستی به نحوی این مولفه فرکانسی‌ها را حذف کرد. در غیر اینصورت ممکن است منجر به بروز آسیب عایقی به سیم پیچ ترانسفورماتور شود. نکته مهم این است که فرکانس رزونانس f_1 برابر ۱،۶ مگاهرتز است و از حداکثر فرکانس عملکرد برقیگیر (۶۰۰ کیلوهرتز) به مراتب بیشتر است. بنابراین در مورد میرا نمودن این مولفه فرکانسی باید دقت نظر بیشتری داشت. در مورد فرکانس f_4 (مساوی با ۵۰ مگاهرتز)، این نکته را باید در نظر گرفت که به علت شیب زیاد این مولفه و بیش‌تر بودن آن از شیب بحرانی، کلید خلاء معمولاً این فرکانس را قطع نمی‌کند. از طرف دیگر این مولفه به سرعت میرا می‌شود.

لازم به ذکر است که ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور بعد از باز شدن کلید و برش جریان، مطابق رابطه (۱۰) به دست می‌آید. براساس رابطه (۱۰)، به منظور کاهش دامنه ولتاژ بار (ترانسفورماتور)، می‌توان خازن C_T (خازن معادل ترمینال ترانسفورماتور نسبت به زمین) را افزایش

$$s = \frac{-R_s \pm \sqrt{R_s^2 - \frac{4L_k}{C_{eq}}}}{2L_k} \quad (14)$$

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_k} + \frac{1}{C_{TS}} \quad (15)$$

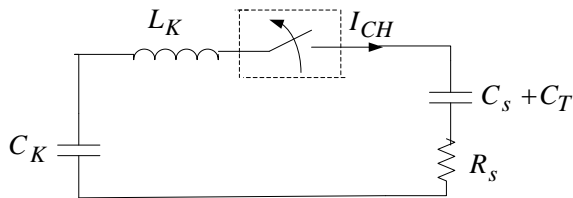
$$C_{TS} = C_T + C_S$$

بنابراین چنانچه رابطه زیر برقرار باشد:

$$R_s \geq 2 \sqrt{\frac{L_k}{C_{eq}}} \quad (16)$$

مدار از مد نوسانی خارج شده و ولتاژ و جریان آن سریع تر میرا می گردد. لازم به ذکر است که در اثبات رابطه مذکور برای تعیین R_s راکتور سری بین ترانسفورماتور ایستگاه اصلی و ترانسفورماتور کوره در نظر گرفته نشده است. درحالی که اگر در ترانسفورماتورهای کوره از این راکتور سری استفاده شده است. بنابراین با در نظر گرفتن راکتور مذکور بایستی از رابطه زیر برای تعیین مقاومت فیلتر RC استفاده شود که در آن اندوکتانس راکتور سری است.

$$R_s \geq 2 \sqrt{\frac{L_k + L_R}{C_{eq}}} \quad (17)$$



شکل (۶): مدار معادل مجموعه ترانسفورماتور، فیلتر و کابل

لازم به ذکر است که به دلیل بزرگ بودن سلف شاخه مغناطیس کنندگی ترانسفورماتور، می توان گفت انرژی ذخیره شده در راکتور سری در مقایسه با انرژی ذخیره شده در اندوکتانس مغناطیس کنندگی ترانسفورماتور قابل صرف نظر کردن است. بنابراین در تعیین ظرفیت خازنی فیلتر، فقط اندوکتانس مغناطیس کنندگی ترانسفورماتور در نظر گرفته می شود. لیکن برای تعیین مقاومت فیلتر، پیشنهاد می شود که از رابطه زیر استفاده شود.

$$R_s \geq 2 \sqrt{\frac{L_k + L_R}{C_{eq}}} \quad (18)$$

$$\frac{1}{2} C_s k^2 V_n^2 = \frac{1}{2} L i_0^2$$

$$C_s = \frac{L i_0^2}{k^2 V_n^2} = \frac{i_0^2}{k^2 V_n^2} \times \frac{V}{\omega i_0}$$

$$\frac{i_0}{k^2 \omega V_n} = \frac{I_{mag} \times I_n}{k^2 \omega V_n} =$$

$$\frac{I_{mag} \times I_n}{200 \pi k^2 f V_n} = \frac{I_{mag} \times (S_n / \sqrt{3} V_{L-L})}{200 \pi k^2 f (V_{L-L} / \sqrt{3})}$$

$$C_s = \frac{I_{mag} \times S_n}{200 \pi k^2 f (V_{L-L})^2} \quad (12)$$

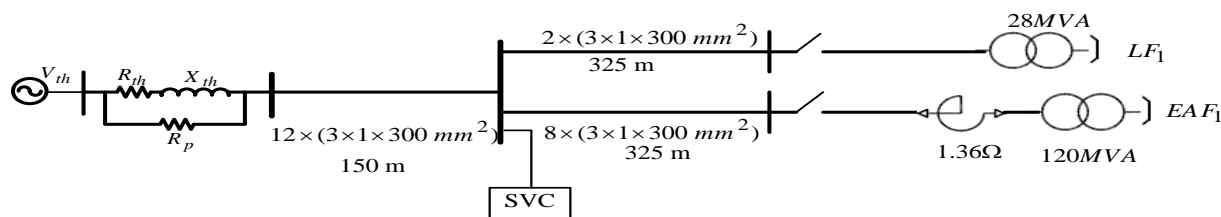
که S_n ظرفیت نامی ترانسفورماتور بر حسب MVA، I_{mag} جریان مغناطیسی (جریان بی باری) ترانسفورماتور کوره بر حسب درصدی از جریان نامی ترانسفورماتور، V_{L-L} ولتاژ نامی شبکه بر حسب کیلوولت، در سمتی که فیلتر RC متصل شده است (سمت فشار قوی ترانسفورماتور کوره) و f فرکانس نامی سیستم (۵۰ هرتز)، I_n جریان نامی ترانسفورماتور است. در این رابطه k اضافه ولتاژ ایجاد شده بر روی ترمینال ترانسفورماتور نسبت به ولتاژ نامی است.

به منظور مطالعه فرکانس های طبیعی مدار در حضور فیلتر RC (شامل خازن C_s فوق الذکر که با یک مقاومت R_s سری شده است)، شکل (۶) در نظر گرفته می شود که شامل مدار معادل ترانسفورماتور، فیلتر و کابل است. لازم به ذکر است که به دلیل بزرگ بودن اندوکتانس مغناطیس کنندگی ترانسفورماتور در مقابل راکتانس خازن C_s ، می توان به منظور تعیین میرایی سیستم از L_T صرف نظر نمود. با افزودن فیلتر RC دامنه ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور کاهش می یابد. لیکن مدت زمان استمرار این اضافه ولتاژ ممکن است زیاد بوده و در بلند مدت، موجب وارد آمدن آسیب به عایق ترانسفورماتور شود. بنابراین به انتهای خازن C_s یک مقاومت R_s نیز سری می شود تا میرایی مناسب سیستم، توسط این مقاومت تامین گردد و مدار را از مد نوسانی خارج نماید. با صرف نظر از سلف مغناطیس کنندگی ترانسفورماتور و لحاظ کردن خازن ظرفیت آن در فیلتر C_s (بصورت تقریبی)، مدار معادل زیر به دست می آید. لازم به ذکر است که از مولفه فرکانس بالای کلید و مقاومت R_b صرف نظر شده است. معادله مشخصه مدار فوق برابر است با:

$$L_k s^2 + (R_s) s + \frac{1}{C_{TS}} + \frac{1}{C_k} = 0 \quad (13)$$

جواب معادله فوق برابر است با:

۷- مدل سازی شبکه



شکل (۷): دیاگرام تک خطی کوره ۱

شده در ترمینال ترانسفورماتور ناشی از برش جریان، بیشتر است. از این رو در نهایت، طراحی فیلتر RC بایستی بر اساس تپ حداکثر در ترانسفورماتور کوره انجام شود. لازم به ذکر است که ظرفیت ترانسفورماتور کوره ۱۲۰ MVA و جریان بیشینه بی‌باری آن ۰٫۴۳٪ است. جدول (۵) نتایج خازن محاسبه شده به ازای اضافه ولتاژهای مختلف را نشان می‌دهد. مطابق این جدول، افزایش ظرفیت خازنی

جدول (۵): محاسبه مقدار خازن فیلتر ترانسفورماتور کوره قوسی

خازن فیلتر محاسبه شده (μF)	حداکثر دامنه اضافه ولتاژ (pu)
۲/۲	۱
۰/۹	۱/۵
۰/۵۵	۲
۰/۳۵	۲/۵
۰/۲۵	۳
۰/۱۳	۴

فیلتر RC باعث محدود شدن دامنه اضافه ولتاژهای دو سر ترانسفورماتور کوره می‌شود. از طرف دیگر، افزایش مقاومت در فیلتر RC موجب بهبود میرایی نوسانات خواهد شد.

۸- ارزیابی عملکرد فیلتر RC بر مبنای شبیه‌سازی حوزه زمان

ابتدا فرض شود که کوره قوسی فاقد فیلتر RC باشد تا حداکثر اضافه ولتاژهای ایجاد شده در زمان قطع کلید خلاء تعیین شود. لازم به ذکر است که چنین حالتی می‌تواند در زمان سوختن فیوزهای فیلتر RC ایجاد شود که بعضاً در شرکت های فولاد مشاهده شده است. شکل (۸) ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور کوره قوسی را در حالتی نشان می‌دهد که در زمان ۰٫۰۹۹۹ ثانیه، کلید خلاء ترانسفورماتور (در حالت بی‌باری) باز شده باشد. با توجه به اینکه جریان بی‌باری ترانسفورماتور تقریباً معادل با سطح برش جریان در کلید خلاء است، از این رو انتظار می‌رود که اضافه ولتاژ شدیدی در زمان قطع جریان بی‌باری حاصل شود. مطابق این شکل، ولتاژ ترمینالهای ترانسفورماتور تا حدود ۴ میلی

شکل (۷)، شبکه ۳۳ کیلوولت تحت مطالعه را نشان می‌دهد که بخشی از یک شبکه واقعی در یکی از شرکت‌های فولاد کشور است. به

جدول (۳): اطلاعات نمونه مربوط به کابلهای با ولتاژ ۳۳ کیلوولت

نوع کابل	جریان نامی در زمین	جریان نامی در هوا	مقاومت اندوکتانس	ظرفیت خازنی
۱×۳۰۰	۶۴۱	۸۲۹	۰٫۰۶۰۱	۰٫۳۷۳
۱×۴۰۰	۶۹۸	۹۲۷	۰٫۰۴۷۰	۰٫۲۷۱

جدول (۴): خازن های ظرفیت ترانسفورماتور

خازن سیم پیچ فشار ضعیف	1.37 nF/ph
خازن سیم پیچ فشار قوی	4.4 nF/ph
خازن متقابل فشار ضعیف و قوی	7.97 nF/ph
خازن معادل	5.56 nF/ph

منظور تغذیه کوره‌های موجود در شرکت فولاد از دو نوع کابل ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی مترمربع با ولتاژ ۳۳ کیلوولت استفاده شده است. پارامترهای نمونه کابل‌های مذکور که براساس اطلاعات داده شده توسط یکی از سازندگان کابل اقتباس شده است، در جدول (۳)

مشاهده می‌شود. جدول (۴) خازن سیم‌پیچ‌ها و معادل یکی از ترانسفورماتورهای کوره را نشان می‌دهد که از آزمایش ضریب تلفات عایقی ترانسفورماتور حاصل شده اند. در این مقاله از خازن معادل بدست آمده بصورت موازی با اندوکتانس مغناطیسی ترانسفورماتور برای مدل‌سازی ترانسفورماتور در مواجهه با حالت‌های گذرای ناشی از قطع کلید خلاء استفاده شده است. با تغییر تپ ترانسفورماتور، جریان مغناطیس‌کنندگی آن تغییر می‌کند. از طرف دیگر مطابق رابطه (۱۲)، ظرفیت خازنی فیلتر RC به جریان بی‌باری ترانسفورماتور وابسته است. لازم به ذکر است که طراحی ترانسفورماتورهای کوره به دلیل اینکه بایستی بصورت مداوم جریان اتصال کوتاه را تحمل نمایند قدری با ترانسفورماتورهای قدرت عادی متفاوت است [۲۲-۲۳].

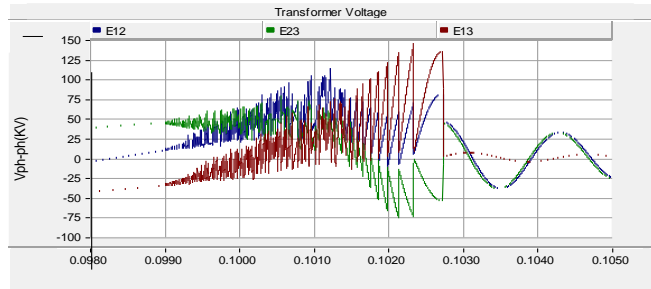
از این رو فیلتر RC براساس تپ نامی و همچنین تپ حداکثر (یعنی کمترین تعداد دور سیم پیچ و لذا بالاترین جریان بی‌باری) طراحی شده است. هر چه جریان بی‌باری بیشتر باشد، اضافه ولتاژهای ایجاد

می‌شود. در نتیجه با توجه به تعداد زیاد کلیدزنی ترانسفورماتورهای کوره، اضافه ولتاژهای مذکور می‌تواند در مدت زمان محدودی تنش ولتاژی شدیدی را به ترانسفورماتور اعمال کرده و موجبات پیری زودرس و آسیب جدی به سیستم عایقی را فراهم نماید. از این رو فیلتر RC نقش مهمی را در ترانسفورماتور کوره ایفا نموده و اطمینان از در مدار بودن فیلتر (مثلا اطمینان از سلامت فیوزهای سری با آن) بسیار مهم است.

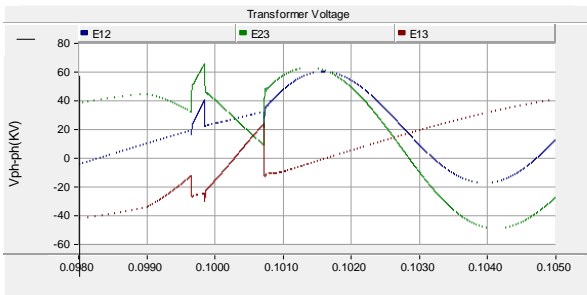
لازم به ذکر است که دامنه و میزان تکرار اضافه ولتاژهای ناشی از قطع ترانسفورماتور توسط کلید خلاء، وابسته به عوامل مختلفی از قبیل لحظه جدا شدن کنتاکت‌های کلید، میزان برش جریان، بار دار بودن یا بی‌بار بودن ترانسفورماتور در لحظه قطع کلید و نیز مشخصه دی‌الکتریک کلید خلاء است. مطابق شبیه‌سازی انجام شده، مشاهده می‌شود، پیک ولتاژ فاز به فاز (ولتاژ دو سر سیم‌پیچ ترانسفورماتور کوره با اتصال مثلث) به مقدار ۱۵۰ کیلوولت می‌رسد. بعلاوه ولتاژهای با شیب تند (فرکانس بالا) ایجاد می‌شود که توزیع آنها بر روی سیم‌پیچ

ثانیه پس از جدا شدن کنتاکت‌های کلید، به تدریج افزایش یافته و پدیده‌های جرقه‌زنی چند باره و همچنین ازدیاد ولتاژ در آن به وضوح مشاهده می‌شود.

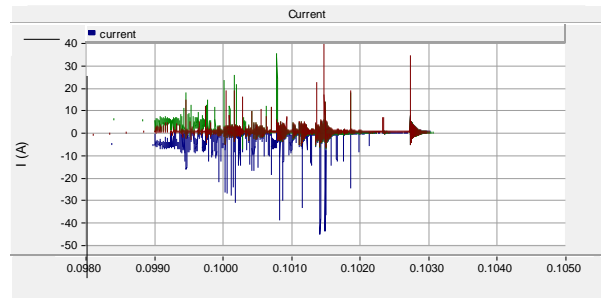
لازم به ذکر است که دامنه اضافه ولتاژهای ایجاد شده در این حالت، کمتر از ۱۷۰ کیلوولت (ولتاژ صاعقه قابل تحمل توسط سیم پیچ ترانسفورماتور) است. ولی اولاً مدت زمان استمرار اضافه ولتاژ کلیدزنی



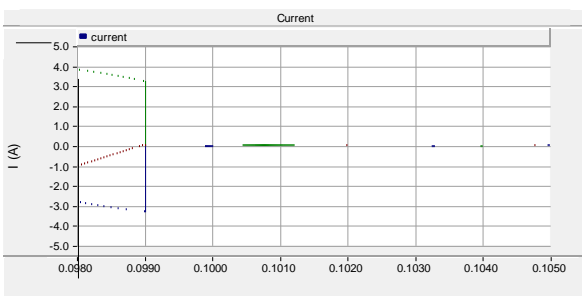
شکل (۸): ولتاژهای فاز به زمین و فاز به فاز ترمینال ترانسفورماتور کوره قوسی شماره ۱ (شکل های جدا)



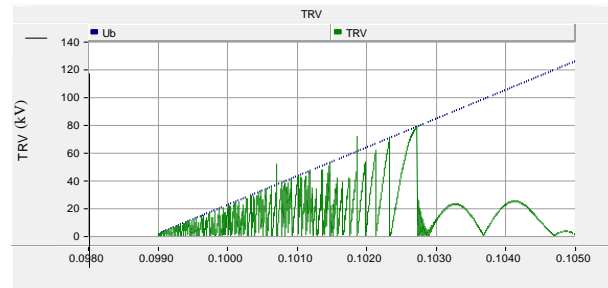
شکل (۱۱): ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور با وجود فیلتر محاسبه شده با پارامترهای CS2 و RS2



شکل (۹): جریان عبوری از ترانسفورماتور کوره قوسی در حین باز شدن کنتاکت‌های کلید تا قطع کامل آن



شکل (۱۲): جریان عبوری از کلید خلا در قطع جریان بی‌باری نامی ترانس در حضور فیلتر



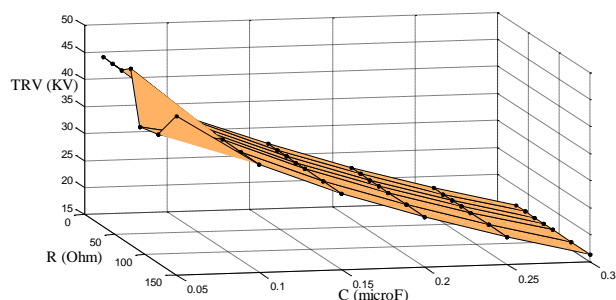
شکل (۱۰): ولتاژ TRV کلید در حین باز شدن کنتاکت‌های کلید تا قطع کامل آن در مقایسه با مشخصه ولتاژ استقامت دی‌الکتریک کلید خلاء

بصورت غیرخطی بوده و به لایه‌های نزدیک به ترمینال آسیب بیشتری وارد می‌نماید. شکل (۹) و شکل (۱۰) جریان کلید خلا و ولتاژ بازیابی گذرا بین قطب‌های (Pole) کلید را نشان می‌دهد. قابلیت قطع جریان-های فرکانس بالا در کلید خلاء سبب شده است که کلید در فرکانس‌های بالا نیز قطع شده و پدیده برش جریان در این حالت نیز ایجاد شود. با دقت در این شکلها مشخص می‌شود که افزایش TRV از ولتاژ استقامت دی‌الکتریک کلید باعث شده است که کلید خلاء در

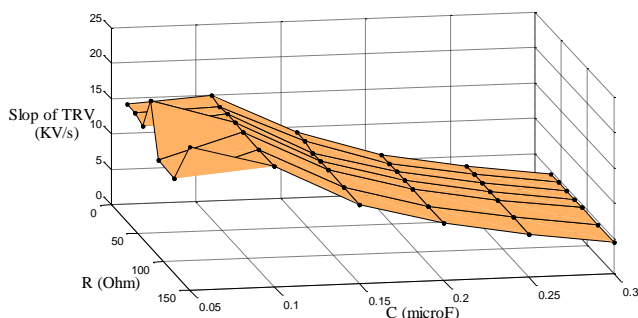
ممکن است بیشتر از مدت زمان استمرار مشخصه صاعقه استاندارد باشد و از این رو ممکن است چنین اضافه ولتاژی توسط سیم پیچ ترانسفورماتور قابل تحمل نباشد. ثانيا اضافه ولتاژهای مذکور در هر بار قطع ترانسفورماتور ممکن است ایجاد شود (چنانچه لحظه جدا شدن کنتاکت‌های کلید خلاء مدت زمان کوتاهی قبل از لحظه صفر طبیعی جریان باشد). ثالثا در هر بار وقوع این پدیده، به دلیل جرقه زنی چندباره و همچنین پدیده ازدیاد ولتاژ، چند ده بار و گاهی چند صد بار، اضافه ولتاژ با دامنه و شیب زیاد به سیم پیچ ترانسفورماتور وارد

۹- نتیجه گیری

مطالعات انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که در هنگام باز شدن کلید خلا، اضافه ولتاژهای گذرای در ترمینال ترانسفورماتورهای کوره ایجاد می‌شود که فرکانس نوسانات بسیار بالایی دارند. به دلیل کوتاه بودن زمان پیشانی موج ضربه ایجاد شده در هنگام باز شدن کلید (یعنی بالا بودن فرکانس نوسانات آن) و تاخیر ذاتی برقی‌گیرها، اولاً برقی‌گیر تاثیر چندانی بر کاهش دامنه این نوع اضافه ولتاژها ندارد و ثانياً تقسیم این نوع اضافه ولتاژ در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور بصورت خطی نمی‌باشد (یعنی در لایه‌های اولیه سیم‌پیچ و نزدیک به ترمینالها، ولتاژ بیشتری افت می‌نماید). با اینکه این نوع اضافه ولتاژها دامنه خیلی بزرگی ندارند، ولی به دلیل تکرار زیاد این پدیده در ترانسفورماتورهای کوره، به مرور زمان منجر به وارد آمدن آسیب عایقی به سیم‌پیچها می‌شود. بنابراین بایستی از پیدایش این اضافه ولتاژها جلوگیری به عمل آید. بدین منظور می‌توان از یک فیلتر پایین‌گذر استفاده نمود تا فرکانس‌های بالای ولتاژ را حذف نماید. یکی از انواع فیلتر پایین‌گذر، شامل یک مقاومت و خازن سری است که به اختصار به آن فیلتر RC گفته می‌شود. با استفاده از این فیلتر، دامنه و



شکل (۱۳): دامنه TRV برحسب مقادیر مختلف فیلتر در جریان بی‌باری نامی (تپ نامی) ترانسفورماتور کوره



شکل (۱۴): شیب TRV برحسب مقادیر مختلف فیلتر در جریان بی‌باری نامی (تپ نامی) ترانسفورماتور کوره

شیب اضافه ولتاژهای ایجاد شده به هنگام قطع کلید خلاء به شدت کاهش یافته و همچنین از پیدایش جرقه‌زنی‌های چند باره در کلید خلا نیز جلوگیری می‌شود. یعنی استفاده از این فیلتر باعث افزایش عمر ترانسفورماتور و سایر تجهیزات شبکه (نظیر ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان) و همچنین افزایش عمر کلید خلاء خواهد شد. مطالعات مبتنی بر شبیه‌سازی با نرم‌افزار PSCAD/EMTDC نشان داد که با

مدت زمان حدود ۳ میلی ثانیه، نزدیک به ۴۰ بار جریان را قطع و وصل نماید.

طبق محاسبات انجام شده با در نظر گرفتن راکتور سری با ترانسفورماتور کوره، مقدار مقاومت و خازن فیلتر به ترتیب برابر با ۳۵۰ اهم و ۸۴ نانوفاراد هستند. شکل (۱۱) ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور را در صورت وجود فیلتر RC به ترمینال ترانسفورماتور نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود با استفاده از فیلتر RC محاسبه شده، به خوبی ولتاژهای با شیب بالا میرا می‌شود. به نحوی که دامنه اضافه ولتاژ در این حالت به ۶۱ کیلوولت محدود می‌شود که به مراتب کمتر از ولتاژ ۱۵۰ کیلوولت (در حالت عدم وجود فیلتر) است. لازم به ذکر است که در این بخش ترانسفورماتور در ماکزیمم تپ خود و به عبارتی بیشترین مقدار جریان بی‌باری قرار دارد.

به منظور انجام آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مقاومت و خازن فیلتر، شبیه‌سازی‌های مختلف صورت گرفته است. در این شبیه‌سازی‌ها فرض شده است ترانسفورماتور کوره در تپ نامی خود باشد. به عنوان شاخص‌های عملکرد فیلتر می‌توان از سه پارامتر حداکثر مقدار TRV، حداکثر شیب TRV و زمان میرایی نوسانات استفاده کرد. در شکل (۱۳) و شکل (۱۴) حداکثر مقدار TRV و حداکثر شیب TRV بر حسب مقادیر مختلف RS و CS نشان داده شده‌اند. از این شکل‌ها نتیجه می‌شود که با افزایش مقدار خازن، دامنه و شیب TRV کاهش می‌یابد. این نکته بسیار مهمی است چرا که با کاهش TRV امکان جرقه‌زنی‌های چند باره به طور محسوسی کاهش یافته و لذا ولتاژهای ایجاد شده با شیب تند و حاوی فرکانس بالا، از بین می‌روند. نکته دیگر این است که اندازه مقاومت تاثیر قابل محسوسی بر ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور و TRV ندارد. با توجه به آنالیزهای صورت گرفته نتایج زیر قابل بیان است:

- هر چه خازن فیلتر بزرگتر باشد، میرایی اضافه ولتاژهای ایجاد شده بهتر صورت می‌گیرد و TRV و شیب آن کاهش می‌یابد.
- با افزایش اندازه خازن، جریان کشیده شده آن در حالت ماندگار بیش‌تر می‌شود. از این رو باید در این نکته نیز دقت شود. در عمل استفاده از خازن در محدوده ۰٫۲ تا ۰٫۳ میکروفاراد برای کوره‌های قوسی و ۰٫۰۵ تا ۰٫۱ میکروفاراد برای کوره‌های پاتیلی مناسب خواهد بود.
- مقاومت فیلتر تاثیر قابل ملاحظه‌ای در TRV و شیب آن ندارد.
- هر چه مقاومت بیش‌تر شود، بعد از قطع کلید و خاموش شدن قوس ولتاژ ترانسفورماتور سریع‌تر صفر می‌شود و از این رو ترانسفورماتور اضافه ولتاژهای احتمالی کمتری را تجربه می‌کند.
- بدترین حالت اضافه ولتاژهای گذرا مربوط به زمانی است که تپ ترانسفورماتور روی ماکزیمم خود باشد و به عبارتی جریان بی‌باری آن بیشینه باشد. بنابراین طراحی را بایستی برای این حالت انجام داد.

- [13] J. Mahseredjian, S. Lefebvre and X.-D. Do, "A new method for timedomain modelling of nonlinear circuits in large linear networks", Proc. of 11th Power Systems Computation Conference PSCC, August 1993.
- [14] G. Paap, A. Alkema, L. van der Sluis, Overvoltages in power transformers caused by no-load switching, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10, no. 1, pages 301-307, Jan 1995.
- [15] D. Shipp, T. Dionise, V. Lorch, and B. MacFarlane, "Transformer failure due to circuit breaker induced switching transients", in Conf. Rec. IEEE Pulp Paper Ind., San Antonio, TX, 2010, pp. 1-10.
- [16] T. Kuczek and M. Florkowski, "Vacuum circuit breaker switching in photovoltaic power plants - overvoltage analyses for various topologies and network conditions", Zeszyty Naukowe Wydziału Elektro-techniki i Automatyki PG, no. 36, pp. 529-551, 2013.
- [17] K. Niayesh, and M. Berth, "Resonance like phenomena in motor drive circuits caused by multiple reignitions of vacuum circuit breakers", IEEE/PES T&D Conference and Exhibition, Vol. 2, PP. 914 - 918.
- [18] J. Helmer, and M. Lindmayer, "Mathematical modeling of the high frequency behavior of vacuum interrupters and comparison with measured transients in power systems", Discharges & Electrical Insulation in Vacuum, Proceedings. ISDEIV, XVIIth International Symposium on Vol. 1, PP. 323 - 331, 21-26 July.
- [19] B. Lastra, and M. Barbieri, "Fast transients in the operation of an induction motor with vacuum switches", <http://www.ipst.org/TechPapers/2001/>.
- [20] H. Arthur, J. Blalock, "Extensive field measurements support new approach to protection of arc furnace transformers against switching transients", IEEE Transactions on PAS, vol. PAS - 94, no. 2, March/April - 1975.
- [21] I. Hess, W. Schultz, "Switching arc furnace transformers in the medium voltage range", CIRED 13th International Conference on Electricity Distribution 1995.
- [22] A. H. Moore, T. J. Blalock, Extensive field measurement support new approach to protection of arc furnace transformer against switching transients. Conference aper submitted for 1974 IEEE Summer Power Meeting, Vol. PAS-94, No. 2.

افزایش ظرفیت خازنی فیلتر RC می‌توان دامنه TRV کلید را کاهش داد و از بازگشت قوس الکتریکی در کلید جلوگیری کرد (یعنی افزایش ظرفیت خازنی، مانع پیدایش جرقه‌زنی‌های چندباره در کلید می‌شود). افزایش مقاومت نیز باعث میرایی اضافه ولتاژهای ایجاد شده در زمان قطع کلید خلاء می‌شود. البته انتخاب مقاومت خیلی بزرگ باعث افزایش شیب و دامنه اضافه ولتاژها می‌شود که چندان مطلوب نمی‌باشد. مقادیر مناسب مقاومت و ظرفیت خازنی فیلتر RC در ترانسفورماتورهای کوره یکی از شرکت‌های فولاد کشور انجام شد. نتایج بدست آمده، صحت روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

مراجع

- [1] M. Rahimi pour, M. Amini, A. Jaillian "Distribution network reconfiguration for voltage sag improvement using particle swarm optimization", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers. 2022; 19 (1) :201-211
- [2] H. Karimi and S. Jadid, "Optimal pricing design for demand response programs with the aims of simultaneously improving the profits and load factor", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 17, pp. 149-159, 2020.
- [3] H. Karimi and S. Jadid, "Real-time pricing design considering uncertainty of renewable energy resources and thermal loads in smart grids", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 16, pp. 1-10, 2019.
- [4] R. P. P. Smeets, D. W. Thielens and R. W. P. Kerkenaar, "The duration of arcing following late breakdown in vacuum circuit breakers", in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 33, no. 5, pp. 1582-1588, Oct. 2005, doi: 10.1109/TPS.2005.856503.
- [5] R. Smeets, et al. "Essential parameters of vacuum interrupter and circuit related to occurrence of virtual current chopping in motor circuits", IEE of Japan Power & Energy, PP. 311-316, 1993.
- [6] P. Sarraillh et al., "Two-dimensional simulation of the post-arc phase of a vacuum circuit breaker", in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 36, no. 4, pp. 1046-1047, Aug. 2008, doi: 10.1109/TPS.2008.924502.
- [7] T. E. Browne, Jr., Circuit Interruption: Theory and Techniques, America: Marcel Dekker, 1984.
- [8] H. Weinert, "Reignition phenomena after high-frequency current interruption with short vacuum gaps", Plasma Science, IEEE Transactions on Vol. 27, No. 4, PP. 944 - 948, 1999.
- [9] J. D. Gibbs, D. Koch, P. Malkin, K.J. Cornick, "Comparison of performance of switching technologies on E Cigre motor simulation circuit", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 4-3, July, 1989, pp.1745-1750.
- [10] D. Penkov, C. Vollet, B. De Metz-Noblat, R. Nikodem, "Overvoltage protection study on vacuum breaker switched MV motors", Proc. of the 5th Petroleum and Chemical Industry Conferenc europe - Electrical and Instrumentation Applications, PCIC Europe 2008.
- [11] M. Rao, S. A. Naveed, J. Amaranath, S. Kamakshaiha, B.P. Singh, "Reduction of switching transients in the operation of induction motor drives", Proc of the 12th International Symposium on Electrets, 2005, pp: 388 - 391.
- [12] R. B. Lastra, M. Barbieri, "Fast transients in the operation of an induction motor with vacuum switches", Prof. of the Int. Conf. on Power Systems Transients IPST 2001, 24-28 June 2001, Rio de Janeiro (Brasil), paper 063.

¹ Current Chopping

² Multiple Re- Ignition

³ Voltage Escalation

⁴ Virtual Current Chopping

⁵ Prestrike