



Semnan University



Research Article

Evaluation of Factors Affecting Transient Overvoltages Caused by Vacuum Circuit Breaker Switching in the Distribution Network and Solutions to Reduce Their Severity

Ahmad Moradi ^a, Hossein Dost Mohammadi ^a, Asghar Akbari Foroud ^{a,*} 

^a Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-02-12

Revised: 2024-05-26

Accepted: 2024-06-11

Keywords:

Switching transients;
Vacuum Circuit Breakers (VCBs);
Low-voltage distribution network;
Distribution transformer;
low-voltage arrester;
Surge Protection Device (SPD).

ABSTRACT

In power systems, power switches of all kinds are known to be a source of transient overvoltage. Meanwhile, compared to other switch types, vacuum circuit breakers (VCBs) cause more severe overvoltage. Customers' electrical equipment may be damaged by overvoltages that arises from the power switch switching in the medium-voltage distribution network and then reaches the low-voltage distribution network through distribution transformers. This article examines how different factors affect the degree of overvoltage brought on by switching in medium-voltage distribution networks and how those overvoltages enter the low-voltage distribution network. This article explores the factors that influence the severity of overvoltages caused by switching, including the dielectric recovery power of the switch, the amount of current chopping, reignition, and prestrike, and the transformer's location in the medium-voltage distribution network. This study also examines the efficacy of installing a surge protection device (SPD) at the distribution substation to suppress transient switching overvoltages that penetrate to the low-voltage distribution level. The EMTP-RV program was used to conduct these investigations. The research findings indicate that installing SPD at the secondary side of the distribution transformer can suppress transient overvoltages brought on by the 20 kV switch's switching, which enters the low-voltage distribution network.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.33256.2621>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding Author.

E-mail address: aakbari@semnan.ac.ir

How to cite this article:

Moradi, A. , Doustmohammadi, H. and Akbari Foroud, A. (2025). Evaluation of factors affecting transient overvoltage caused by vacuum circuit breaker switching in the distribution network and solution to reduce its severity. Journal of Modeling in Engineering, 23(80), 269-287. doi: 10.22075/jme.2024.33256.2621

بررسی عوامل مؤثر بر اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از کلیدزنی کلید خلاء در شبکه توزیع و راهکارهای کاهش شدت آنها

احمد مرادی^۱، حسین دوست محمدی^۱، اصغر اکبری فرود^{۱*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳	کلیدهای قدرت از هر نوعی که باشند، به عنوان یک منبع تولید اضافه ولتاژهای گذرا در سیستم‌های قدرت شناخته می‌شوند. در این بین، کلیدهای قدرت از نوع خلاء (Vacuum Circuit Breaker-VCB) اضافه ولتاژهای شدیدتری را نسبت به دیگر انواع کلیدها تولید می‌کنند. اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی کلیدهای قدرت در شبکه توزیع فشار متوسط می‌توانند از ترانسفورماتورهای توزیع عبور کرده و وارد شبکه توزیع فشار ضعیف شوند و باعث صدمه به تجهیزات برقی مشترکین گردند. در این مقاله، تاثیر عوامل مختلف بر شدت اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی در شبکه های توزیع فشار متوسط و همچنین، چگونگی نفوذ آنها به شبکه توزیع فشار ضعیف مورد بررسی قرار می‌گیرد. قدرت بازبایی دی‌الکتریک کلید، میزان برش جریان، قوس مجدد (Reignition)، Prestrike و همچنین مکان قرارگیری ترانسفورماتور در شبکه توزیع فشار متوسط از جمله عواملی هستند که بر شدت اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی مؤثر هستند که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین، میزان تاثیرگذاری نصب برقیگر فشار ضعیف (Surge Protection Device-SPD) در پای پست بر سرکوب اضافه ولتاژهای گذرای کلیدزنی نفوذ کرده به سطح توزیع فشار ضعیف نیز در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مطالعات در نرم افزار EMTP-RV انجام شده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که نصب SPD در پای پست می‌تواند بر کاهش شدت اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از کلیدزنی کلید ۲۰ کیلوولت که به سطح توزیع فشار ضعیف نفوذ کرده‌اند مؤثر باشد.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲	
واژگان کلیدی: گذراهای کلیدزنی، کلید خلاء (VCB)، شبکه فشار ضعیف، ترانسفورماتور توزیع، برقیگر فشار ضعیف (SPD).	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.33256.2621>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

تجهیزات شبکه و همچنین تجهیزات مشترکین تأثیر مخرب می‌گذارند [۱، ۲]. از این رو، تجزیه و تحلیل شبکه‌های برق، بخصوص شبکه‌های توزیع از منظر نحوه شکل‌گیری و ایجاد این ضربه‌ها و همچنین کارایی سیستم‌های حفاظتی در برابر آنها بسیار مهم است. از سوی دیگر، افزایش مداوم الزامات قابلیت اطمینان شبکه‌های الکتریکی، ضرورت این ارزیابی‌ها

اضافه ولتاژهای گذرا در سیستم‌های قدرت الکتریکی عمدتاً با برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه و فعالیت‌های کلیدزنی تولید می‌شوند. اضافه ولتاژهای گذرا که به آنها ضربه (Surge) نیز اطلاق می‌شود از ترانسفورماتورها از طریق القاء و کوپلاژ خازنی عبور می‌کنند و بر عایق

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: aakbari@semnan.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

استناد به این مقاله:

مرادی، احمد، دوست محمدی، حسین و اکبری فرود، اصغر. (۱۴۰۴). بررسی عوامل مؤثر بر اضافه ولتاژ گذرای ناشی از کلیدزنی کلید خلاء در شبکه توزیع و راهکار کاهش شدت آن. مدل سازی در مهندسی، ۲۳(۸۰)، ۲۶۹-۲۸۷. doi: 10.22075/jme.2024.33256.2621

قوس مجدد (Reignition) و قطع (Prestrike)) بر شدت اضافه ولتاژهای گذرا در سطح توزیع فشار ضعیف؛ عدم بررسی تاثیر موقعیت قرارگیری ترانسفورماتور توزیع در طول فیدر فشار متوسط بر شدت اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از کلیدزنی؛ عدم بررسی تاثیر موقعیت قرارگیری مشترکین در طول فیدر توزیع فشار ضعیف، بر شدت اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از کلیدزنی کلید ۲۰ کیلوولت؛ عدم بررسی نقش SPD^۷ منصوبه در ثانویه ترانسفورماتور توزیع (یعنی در پای پست) در سرکوب اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از کلیدزنی کلید ۲۰ کیلوولت.

بر اساس خلاء تحقیقاتی تشریح شده، نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر است:

- ۱- بررسی و مقایسه تاثیر فاکتورهای کلیدزنی بریکرهای ۲۰ کیلوولت (برش جریان، قوس مجدد و قطع (Prestrike) بر شدت اضافه ولتاژهای گذرا در سطح توزیع فشار ضعیف.
- ۲- بررسی تاثیر موقعیت قرارگیری ترانسفورماتور توزیع در طول فیدر فشار متوسط، بر شدت اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از کلیدزنی کلیدهای ۲۰ کیلوولت.
- ۳- بررسی تاثیر موقعیت قرارگیری مشترکین در طول فیدر توزیع فشار ضعیف، بر شدت اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از کلیدزنی کلید ۲۰ کیلوولت.
- ۴- بررسی نقش SPD^۷ منصوبه در ثانویه ترانسفورماتور توزیع (یعنی در پای پست) بر سرکوب اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از کلیدزنی کلید ۲۰ کیلوولت که به سطح فشار ضعیف نفوذ کرده‌اند.

۲- شبکه مورد مطالعه

برای مطالعات در نظر گرفته شده در این مقاله، از مداری که در شکل (۱) نشان داده شده است، استفاده می‌شود. در این مدار (شکل ۱) یک پست فوق توزیع ۶۳/۲۰ کیلوولت با ظرفیت ۳۰ مگاوات آمپر با امیدانس ۱۳.۴۲ درصد با نسبت $X/R = 40$ ، با قدرت اتصال کوتاه سه فاز ۱۰ کیلوآمپر در سمت فشارقوی مدل شده است. اندازه صفحات ظرفیت خازن‌های پراکنده تجهیزات نوعی پست مدل شده و در نظر گرفته شده است [۲۲]. به دلیل اینکه تجهیزات پست مانند CT^۸، PT^۹، سکسیونر زمین، برقگیر فشارقوی،

را برجسته‌تر می‌کند [۳-۶]. تا کنون پژوهش‌های متعددی بر روی عوامل موثر بر شدت اضافه ولتاژهای گذرا در شبکه فشار ضعیف و با در نظر گرفتن ترانسفورماتورها انجام شده است [۷-۱۳]، ولی به مطالعات گذراهای ناشی از فعالیت‌های کلیدزنی در شبکه توزیع کمتر پرداخته شده است. عملیات‌های کلیدزنی در شبکه قدرت شاید توانایی تولید اضافه ولتاژهایی با دامنه‌ای در حد صاعقه نداشته باشند، اما یک منبع تولید اضافه ولتاژهای گذرا با di/dt بزرگ هستند [۱۴]. از دلایل ایجاد di/dt توسط یک کلید قدرت را می‌توان به پدیده‌های مثل؛ ولتاژ گذرای بازبایی^۲ (TRV) در کلید، برش جریان^۳، قوس مجدد^۴ و پیش‌ضربه^۵، اشاره کرد. در میان کلیدهای قدرت، کلیدهای نوع خلاء^۶ (VCB) به دلیل مزایایی مانند سازگاری با محیط زیست، قابلیت قطع در جریان‌های بالا، ابعاد کوچک، هزینه مناسب که دارند، مورد توجه زیادی قرار می‌گیرند [۱۵]. در مطالعات پیشین، دامنه و di/dt حاصل از عملیات کلیدزنی کلید خلاء بررسی شده است و همچنین نقش آن در خرابی ترانسفورماتورها مورد تحلیل قرار گرفته است [۱۶، ۱۷]. علاوه بر این، ولتاژ استقامت عایقی سیم‌پیچ ترانسفورماتور (BSL) به طور قابل توجهی با کاهش زمان پیشانی موج گذرای اعمال شده کاهش می‌یابد [۱۸]. بنابراین، به منظور برآورد مناسب اثرات اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از کلیدزنی بر طول عمر عایق ترانسفورماتور، یک تحلیل تصادفی با در نظر گرفتن نرخ افزایش و تعداد نوسانات گذرا انجام شده است [۱۹]. همچنین دیده شده است که اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی یک کلید خلاء در حالت‌های بارگذاری کم یا بارگذاری با رفتار سلفی، بیشترین تاثیر منفی را بر روی عایق ترانسفورماتور دارد [۲۰]. در [۱۵]، اثر عواملی همچون خازن‌های پراکنده تجهیزات واقع در طرفین VCBها، طول کابل، نرخ قدرت دی الکتریک و زوایای کلیدزنی بر میزان اضافه ولتاژها، نرخ افزایش ولتاژ و تعداد دفعات Reignition در حین باز شدن VCB مورد بررسی قرار گرفته است [۲۱].

بر اساس بررسی‌های انجام گرفته، خلاء تحقیقاتی در مقاله‌های قبلی عبارتند از: عدم بررسی و مقایسه تاثیر فاکتورهای کلیدزنی (برش جریان (Current chopping)،

^۶ Vacuum Circuit Breaker

^۷ Surge Protection Devices

^۸ Current Transformer

^۹ Potential Transformer

^۲ Transient recovery voltage

^۳ Current chopping

^۴ Reignition

^۵ Prestrike

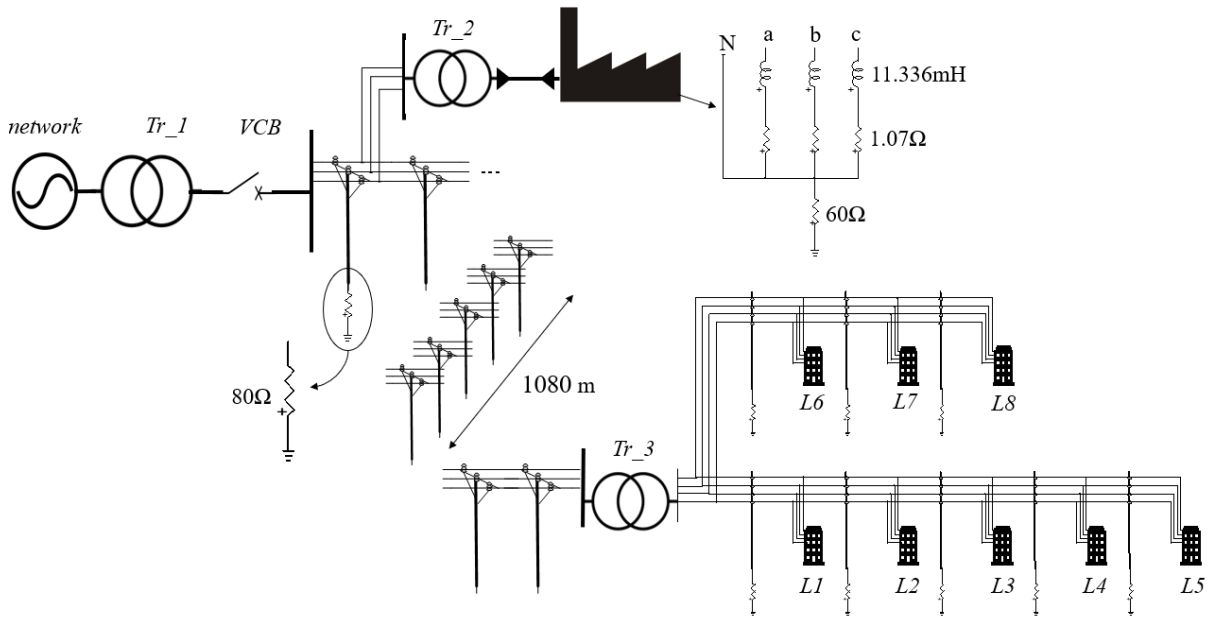
(۱) انجام شده است [۲۵].

$$Z = 60 \ln \sqrt{2} \left(\frac{2h}{r} \right) - 60 \quad (1)$$

h : ارتفاع پایه، r : شعاع پای پایه است. از آنجاییکه پایه‌های شبکه فشار متوسط و فشارضعیف ساختار پیچیده‌ای ندارند، مدل امپدانس ثابت برای مدل‌سازی آنها استفاده شده است. اثر شکست عایقی مقره‌ها روی تمامی پایه‌ها، نیز لحاظ شده است. برای مدل‌سازی شکست عایقی مقره‌ها از مدل اسپارک گپ در نرم‌افزار EMTP استفاده شده است. در شکل شماره (۵)، مدل شبیه‌سازی شده پایه‌ها در نرم‌افزار EMTP نشان داده شده است. در مناطق کوهستانی و سنگلاخی، مقاومت زمین می‌تواند بسیار بالاتر از مقدار استاندارد باشد. این افزایش مقاومت ناشی از شرایط جغرافیایی و اقلیمی خاص این مناطق است. علاوه بر این، تغییرات فصلی، اقلیمی و بحران کم‌آبی و خشکسالی نیز موجب افزایش مقاومت زمین می‌شود. این مسئله باید در طراحی و بررسی‌های حفاظتی شبکه‌های فشار ضعیف مدنظر قرار گیرد تا راهکارهای مناسبی برای مقابله با اضافه‌ولتاژهای گذرا و حفاظت شبکه در شرایط سخت ارائه شود. در این مطالعات مقاومت زمین تمامی پایه‌ها ۸۰ اهم و مقاومت زمین نول ترانسفورماتور ۱۵ اهم است.

برقگیر فشارمتوسط با مشخصات ارائه شده در [۲۶] مدل 3EL5 انتخاب شده است منحنی مشخصه آن در شکل (۲) نشان داده شده است. مدل فرکانس بالای برقگیر برگرفته از مرجع [۲۴] می‌باشد [۱]. مدار شبیه‌سازی این مدل در نرم‌افزار EMTP، در شکل شماره (۳) نشان داده شده است. در این مطالعات برای ترانسفورماتور از مدل ارائه شده در [۲۷] که در شکل (۴) نشان داده شده استفاده شده است. مقادیر خازن‌های کوپلاژ ترانسفورماتورها در جدول شماره ۲ درج شده است. برای سطح ولتاژ زیر ۱۰۰ کیلوولت، دو کلاس، مدارشکن S1 و S2 در استاندارد IEEE C37.04 بسته به نوع استفاده، معرفی شده‌اند. کلاس S1 برای سیستم کابلی و کلاس S2 برای سیستم خطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تعریف سیستم کابلی در بین سطح ولتاژ ۱ تا ۱۰۰ کیلوولت محدود می‌شود. کلید خلاء استفاده شده در مطالعات از مدل S1 [۲۸، ۲۹]، با ولتاژ نامی ۲۴ کیلوولت و قدرت قطع جریان اتصال کوتاه ۲۵ کیلوآمپر می‌باشد.

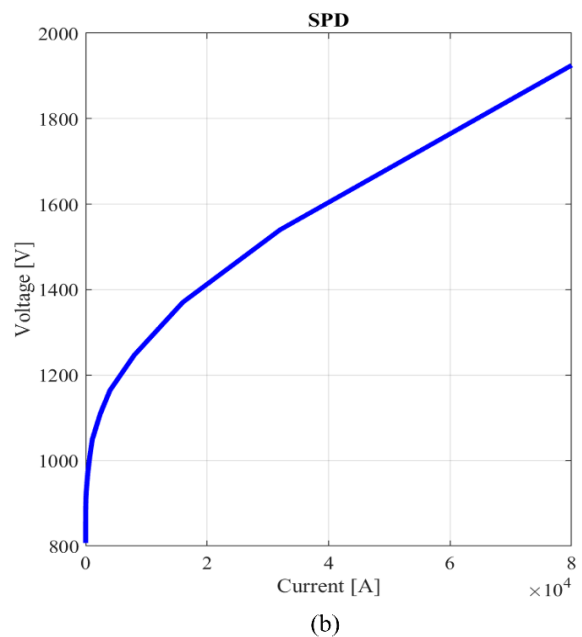
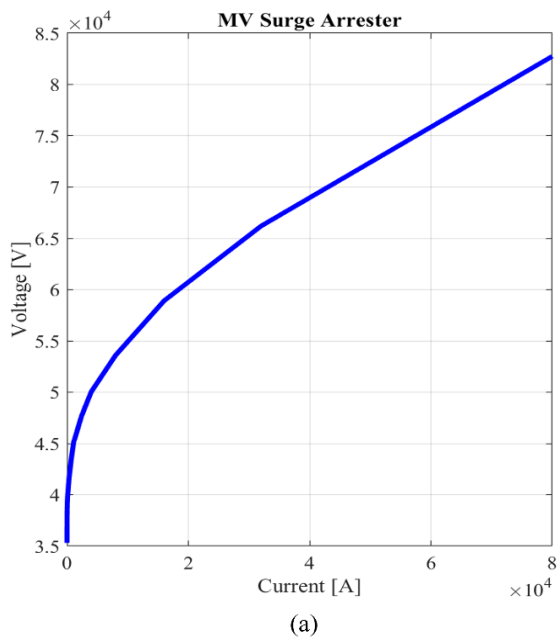
کلید قدرت و باس‌بار به یکدیگر نزدیک هستند، ظرفیت خازن‌های پراکنندگی آنها با یکدیگر جمع شده و بصورت یک خازن تجمیع شده با ظرفیت ۱۳۷۵۵ پیکوفاراد در نظر گرفته شده است. ظرفیت خازنی تجهیزات یک پست توزیع نوعی ۶۳/۲۰ کیلوولت در جدول شماره (۱) نشان داده شده است. هر فیدر توزیع فشار متوسط (فیدر خروجی) دارای یک کلید از نوع خلاء می‌باشد و بعد از کلید خلاء یک کابل ۱۵۰ * ۳ میلی‌متر مربع به طول ۵۰ متر وجود دارد که به خط هوایی خروجی فشار متوسط متصل می‌شود. برای مدل‌سازی کابل زمینی از بلوک کابل وابسته به فرکانس (FDQ) در نرم‌افزار EMTP استفاده شده است. در این مدار از دو ترانسفورماتور ۲۵۰ کیلوولت آمپری یکی در ابتدای فیدر فشارمتوسط و دیگری در انتهای فیدر استفاده شده است. سمت ثانویه هر دو ترانسفورماتور خط هوایی با سیم لخت است. بار ترانسفورماتور ابتدای فیدر (TR_2)، یک مجموعه صنعتی است که با مدار RL سری، با مقاومت ۱۰۰۷ اهم و اندوکتانس ۱۱.۳۳۶ میلی‌هنری مدل شده است. بار ترانسفورماتور انتهای فیدر (TR_3)، یک شبکه فشارضعیف است که دارای دو فیدر موازی می‌باشد که مشترکین مسکونی را تغذیه می‌کند. مشترکین مسکونی با مدار RL سری با مقاومت ۶.۶ اهم و اندوکتانس ۹.۷۷ میلی‌هنری مدل شده‌اند. مقاومت زمین مشترکین مسکونی ۶۰ اهم است. سیستم زمین شبکه توزیع فشارضعیف از نوع TN-C-S است. شبکه فشارضعیف از نوع خط هوایی با سیم لخت ۷۰ میلی‌متر مربع روی پایه‌هایی با ارتفاع ۹ متر و با اسپن ۳۰ متر می‌باشد. برقگیرهای فشارضعیف (SPD) که در مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است با مشخصات ارائه شده در [۲۳] با مدل 5SD7413-1 بوده و منحنی مشخصه آن در شکل (۲) آورده شده است، مدل فرکانس بالای آن در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است [۲۴]. خط فشار متوسط ۲۰ کیلوولت مدل شده با سیم لخت هوایی با سطح مقطع ۷۰ میلی‌متر مربع روی پایه‌های ۱۲ متری قرار گرفته است. مدل خط فشارضعیف هوایی و خط فشار متوسط هوایی استفاده شده در مطالعات این مقاله، مدل وابسته به فرکانس (FD) است. برای مدل‌سازی پایه‌ها، از مدل امپدانس ثابت استفاده شده و محاسبه امپدانس موحی آن که یک پارامتر مهم به شمار می‌رود بر اساس فرمول شماره



شکل ۱- مدار مطالعاتی

جدول ۱- ظرفیت خازن‌های پراکنده‌گی تجهیزات یک پست ۶۳ به ۲۰ کیلوولت نوعی [۲۲]

تجهیز	تعداد/ طول	ظرفیت خازنی به ازای هر عدد/ به ازای هر متر (pF)	ظرفیت خازنی تجهیز با در نظر گرفتن تعداد آن بر حسب pF
سکسیونر	۲۲	۵۰	۱۱۰۰
CT	۲۴	۲۰۰	۴۸۰۰
PT	۶	۲۰۰	۱۲۰۰
کلید	۲۸	۱۰۰	۲۸۰۰
برقگیر	۴	۸۰	۳۲۰
باسبار	۷۰ متر	پیکوفاراد بر متر ۵۰/۵	۳۵۳۵



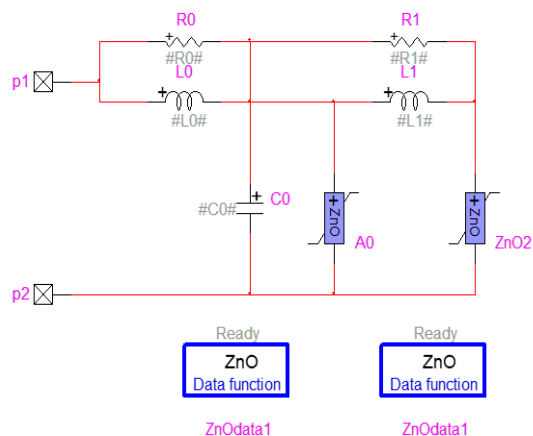
شکل ۲- منحنی مشخصه VI برای: (a) برقگیر فشار متوسط و (b) برقگیر فشارضعیف (SPD)

di/dt بالا تبدیل می‌کنند بررسی می‌شوند. این عوامل عبارتند از:

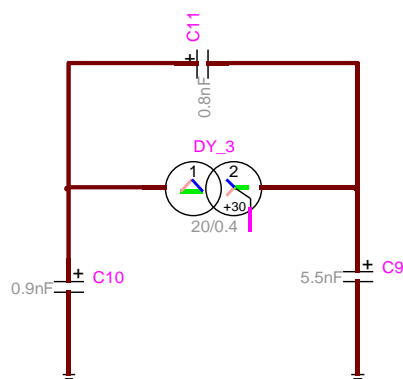
- برش جریان (Current chopping)
- قوس مجدد (Reignition)
- قطع Prestrike

۳-۱- برش جریان (Current chopping)

معمولاً قوس، زمانی که جریانش به صفر طبیعی خودش می‌رسد پایان می‌پذیرد، اما گاهی ممکن است جریان قوس قبل از رسیدن به صفر طبیعی خود، بصورت ناگهانی صفر شود. برش جریان، به صفرشدن ناگهانی جریان، قبل از اینکه جریان سینوسی به صفر طبیعی خود برسد اطلاق می‌شود. این موضوع با ناپایداری پلاسمای قوس، نوسان کردن جریان قوس با فرکانس بالا و توانایی مدارشکن در بازیابی قدرت دی‌الکتریک مرتبط است [۳۰، ۳۱]. در زمان عملکرد قطع کلید، پلاسمای قوس ممکن است، به دلیل فرکانس بالای نوسانات جریان، ناپایدار شود، در زمان ناپایداری ممکن است قوس ناگهان صفر شده و باعث ایجاد di/dt بالایی در شبکه شود و اگر دی‌الکتریک بتواند به سرعت بازیابی شود، مقداری انرژی که در سمت بار کلید، حبس شده، باعث ایجاد اضافه ولتاژ می‌شود. در بعضی مواقع، بازیابی دی‌الکتریک اتفاق نمی‌افتد و بلافاصله بعد از برش جریان، دوباره جریان قوس برقرار می‌شود که به این پدیده، "قوس مجدد (Reignition)" گفته می‌شود [۳۲]. قدرت بازیابی دی‌الکتریک در کلیدهای خلاء بسیار بالاست و باعث می‌شود در صورت سالم بودن مدارشکن، بعد از رخ دادن برش جریان، احتمال کمی وجود داشته باشد که قوس مجدد (Reignition) برقرار شود. در مقایسه قدرت بازیابی دی‌الکتریک در مدارشکن خلاء با SF6 و دو گاز دیگر، مشهود است که مدارشکن خلاء در بازیابی دی‌الکتریک، دارای قدرت بالایی است [۳۳]. فرایند برش جریان بیشتر در کلیدهای خلاء و هوای فشرده اتفاق می‌افتد. همچنین مقدار جریان برش یافته، در کلیدهای خلاء، نسبت به کلیدهای SF6 بیشتر است. در مدارشکن خلاء میزان جریان برش داده شده به جنس تیغه‌ها بستگی دارد لذا همانطور که مشاهده شده است امکان رخ دادن برش جریان در جریان‌های بالا در مدارشکن خلاء امکان پذیر است [۳۴]. میزان جریان برش یافته ارتباط با خاصیت بار نیز دارد، [۳۵]. بطوریکه با بار خازنی میزان آن افزایش می‌یابد و با بارهای مقاومتی و سلفی کاهش پیدا می‌کند [۳۵].



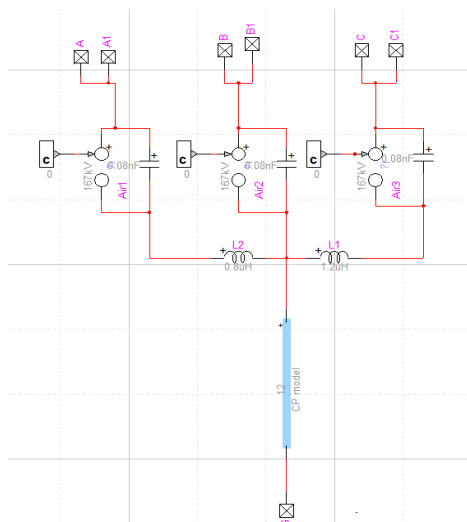
شکل ۳- مدل فرکانس بالای IEEE برای برقییر



شکل ۴- مدل فرکانس بالای ترانسفورماتور

جدول ۲- مقادیر خازن‌های کوپلاژ ترانسفورماتورها

CH-L (nF)	CL-g (nF)	CH-g (nF)	ترانسفورماتور (kVA)
۰.۸	۵.۵	۰.۹	۲۵۰



شکل ۵- مدل پایه در نرم‌افزار EMTP

۳- پدیده‌های مورد مطالعه

در این قسمت پدیده‌هایی که کلید خلاء را به یک منبع

۲-۳- قوس مجدد (Reignition)

وقتی که کنتاکت‌های کلید از هم باز می‌شوند اضافه ولتاژهایی با مقادیر قابل توجه می‌توانند در اثر چندین Reignition پشت سر هم ایجاد شوند. در این شرایط، امکان ۵ تا ۲۰ رخداد با di/dt بالا و پشت سرهم وجود دارد که برای سیستم قدرت مضر است. دو کلید SF6 و کلید خلاء در شرایط یکسان برای کلیدزنی قطع تست شده‌اند و در کلید خلاء Reignition مشاهده شده است اما در کلید SF6 این پدیده مشاهده نشده است [۳۲]. لازم به ذکر است، Reignition در مدارشکن‌های SF6 به ندرت رخ می‌دهد. حال در ادامه، دلیل رخ دادن Reignition در مدارشکن‌های خلاء را بررسی می‌شود. جریان قوس در مدارشکن‌های خلاء از الکترون‌هایی که از فلز خارج شده و با میدان مغناطیسی روبرو می‌شوند، از کاتد به آند شکل می‌گیرد. جریان از نقاطی به نام Cathode spots شکل گرفته و به نقاطی به نام Anode spots ختم می‌شود. یکی از عوامل موثر در شکل‌گیری Cathode spotها گرمایش است، یعنی به عبارت دیگر گرمایش محلی سطح کنتاکت باعث ایجاد Cathode spotها می‌شود. زمانی که Cathode spot شکل می‌گیرد شرایط برای ایجاد قوس فراهم می‌شود [۳۶]. باید اضافه شود که پیک ولتاژ Reignition نیز با خاصیت بار ارتباط دارد؛ بدین گونه که با افزایش خاصیت خازنی بار، مقدار آن کاهش می‌یابد و با افزایش خاصیت مقاومتی و سلفی، مقدار آن تشدید می‌شود [۳۵].

برای سطح تیغه‌هایی که کاملاً صاف هستند، میدان الکتریکی تحت شرایط عملکرد نرمال کلید در حین قطع بسیار پایین است و امکان رخداد Reignition کم است. با این حال، کاملاً صاف نبودن سطح تیغه‌ها و وجود بی‌نظمی‌ها در سطح تیغه‌ها نیز امکان‌پذیر است. وجود نقاط نوک تیز و افزایش میدان الکتریکی در آن نقاط، تمرکز چگالی جریان را در نقاط نوک تیز بیشتر می‌کند و باعث می‌شود جریان قوس بصورت یکنواخت در تیغه پخش نشود و این موضوع باعث می‌شود زمانی که تیغه‌ها از همدیگر جدا شدند و قوس خاموش شد، دما در نقاط نوک تیز نسبت به نقاط دیگر بیشتر باشد و همانطور که گفته شد، شرایط جهت ایجاد Cathode spotها را فراهم کند و امکان شکل‌گیری دوباره قوس فراهم آید و به عبارت دیگر، باعث رخ دادن Reignition بین تیغه‌های مدارشکن شود [۲۴].

در مدارشکن‌های خلاء، نوع ماده‌ی استفاده شده در تیغه‌ها، سطح تیغه و هندسه‌ی آن، ویژگی دی‌الکتریک را مشخص می‌کند. تاریخچه‌ی قوس‌های رخ داده شده و آثار بجا مانده از این قوس‌ها بر روی سطح کنتاکت‌ها، بر ویژگی دی‌الکتریک اثر می‌گذارد. به دلیل سطح بسیار تمیز کنتاکت‌های مدارشکن خلاء و فشار بالایی که به یکدیگر وارد می‌کنند، جوش خوردگی در کنتاکت‌ها در هنگام عبور جریان اتصال کوتاه بسیار محتمل است و پس از جدا شدن کنتاکت‌ها ممکن است شکل تیغه‌ها دچار تغییر شود. حتی جدا شدن تیغه‌ها در شرایط بدون بار نیز می‌تواند بر روی قدرت دی‌الکتریک تاثیر بگذارد، به این صورت که وقتی دو سطح فلزی بسیار تمیز با فشار بالایی به هم دیگر متصل باشند، جوش سرد باعث می‌شود که بعد از جدا شدن تیغه‌ها، میکرو برآمدگی‌هایی ناشی از جدا شدن جوش‌ها باعث ایجاد بی‌نظمی در سطح صاف کنتاکت‌ها شود و بر روی قدرت دی‌الکتریک مدارشکن تاثیر بگذارد [۳۳]. همچنین با ایجاد قوس، پدیده‌ای تحت عنوان خوردگی قوس ایجاد می‌شود که به مرور زمان قدرت دی‌الکتریک را کاهش می‌دهد. تاثیر بین تعداد عملکرد کلید و خوردگی، تقریباً خطی است. همچنین رابطه‌ی بین تعداد عملکرد کلید و اثر آن بر جریان نامی اتصال کوتاه کلید و به عبارت دیگر تاثیر خوردگی کنتاکت‌های کلید بر قدرت دی‌الکتریک حائز اهمیت است. مشاهده می‌شود که با بالا رفتن تعداد عملکرد کلید، جریان نامی اتصال کوتاه کلید، کاهش می‌یابد [۳۴].

۳-۳- قطع Prestrike

Prestrike نیز از گذراهایی است که قطع آن باعث ایجاد di/dt بالا در سیستم می‌شود. این عمل در زمان وصل کلید اتفاق می‌افتد. با توجه به لحظه کلیدزنی وصل که ممکن است در حوالی پیک ولتاژ اتفاق بیفتد، اختلاف پتانسیل دو سر کلید ممکن است از حد تحمل عایقی کلید فراتر باشد و قبل از لمس کردن فیزیکی کامل دو تیغه، اتصال به صورت الکتریکی و به صورت قوس برقرار می‌شود که به آن Prestrike گفته می‌شود [۱۹]. زمانیکه دو کنتاکت کلید به هم نزدیک می‌شوند، لحظه‌ای که اختلاف پتانسیل دو سر کلید از تحمل قدرت دی‌الکتریک بین دو کنتاکت بیشتر می‌شود باعث ایجاد قوس شده و اتصال الکتریکی با یک قوس که به آن Prestrike گفته می‌شود رخ می‌دهد. در مدارشکن‌های خلاء ممکن است در هنگام رخ دادن

(۶) شکل موج‌های TRV برای این سناریو آورده شده است. رابطه میان پارامترهای شبکه و اضافه ولتاژهای ناشی از برش جریان طبق معادله‌ی (۲) می‌باشد [۳۹].

$$U_{MAX} = \sqrt{U_{ch}^2 + \frac{L_L}{C_L} i_{ch}^2} \quad (2)$$

U_{ch} نشان‌دهنده‌ی ولتاژ لحظه‌ای شبکه در زمان قطع جریان قوس می‌باشد. I_{ch} مقدار جریانی است که برش داده شده است. L_L بیانگر اندوکتانس معادل شبکه‌ی پایین دست است. همچنین، ظرفیت خازنی شبکه پایین دست با C_L نشان داده شده است. با توجه به معادله‌ی فوق می‌توان گفت که با اضافه کردن خازن، اضافه ولتاژهای ناشی از برش جریان را می‌توان کاهش داد، اما از طرفی دیگر مقدار بزرگ خازن ممکن است خود باعث افزایش مقدار برش جریان شود [۴۰]. با مقایسه‌ی نمودارهای شکل (۶) (مقادیر مختلف برش جریان) مشاهده می‌شود، همانطور که انتظار می‌رفت، نرخ افزایش ولتاژ بازیابی (Rate of rise of Recovery Voltage- RRRV) شدیدتر شده است و پیک محلی TRV در برش جریان‌های بزرگتر از اولین پیک محلی TRV در حالت بدون برش جریان، دامنه‌ی بیشتری دارد. با مشاهده شکل (۷) می‌توان اثر میزان برش جریان بر شدت شیب تغییرات دامنه ولتاژ TRV را مشاهده کرد. در شکل‌های (۸) و (۹) شکل موج ولتاژ فاز b ثانویه ترانسفورماتورهای ۲۵۰ kVA ابتدا و انتهای فیدر، در حالت‌های مختلف با میزان برش‌های جریان صفر، ۱، ۲ و ۳ آمپر آورده شده است. با بررسی این شکل‌ها مشخص است که پیک دامنه‌ی ولتاژ در ثانویه‌ی ترانسفورماتورها به مقادیر خطرناکی برای سیم‌پیچ ترانسفورماتور نمی‌رسد. ولی با افزایش میزان برش جریان در کلید خلاء، مقدار دامنه اضافه ولتاژهای گذرا در شبکه توزیع فشارضعیف رو به افزایش است. البته همانطور که از رابطه (۲) پیداست، علاوه بر میزان برش جریان، مقدار خازن و اندوکتانس معادل شبکه پایین دست نیز در دامنه اضافه ولتاژ ایجاد شده مؤثر هستند.

(ب) بررسی تاثیر پایین آمدن قدرت بازیابی دی‌الکتریک کلید بر TRV و تاثیر آن بر اضافه ولتاژهای گذرا

در کلیدهای خلاء، نوع ماده‌ی استفاده شده در تیغه‌ها، سطح تیغه و هندسه‌ی آن، ویژگی دی‌الکتریک را مشخص

Prestrike، کلید اقدام به برش آن کند و سپس دوباره به دلیل اتفاق افتادن TRV و نزدیک‌تر شدن دو کنتاکت کلید، دوباره پدیده‌ی Prestrike اتفاق بیفتد [۳۷]. همچنین در مدارشکن‌های خلاء به دلیل اینکه دو تیغه، به صورت دو سطح صاف هستند که هنگام عمل وصل، به همدیگر برخورد می‌کنند، ممکن است اگر کلید به خوبی طراحی نشده باشد، پدیده Bounce اتفاق بیفتد؛ به این صورت که تیغه‌ها بعد از برخورد، مقداری از هم جدا شده (به دلیل عکس‌العمل ناشی از برخورد تو تیغه به هم با سرعت بالا) و دوباره وصل شوند این موضوع باعث رخ دادن اضافه ولتاژهایی با فرکانس بالا می‌شود که در مدارشکن‌های خلاء نسبت به مدارشکن‌های دیگر بیشتر است [۳۸]. لازم به ذکر است درایو مدارشکن خلاء باید به گونه‌ای طراحی شود که پدیده‌ی Bounce را حداقل کند. اتفاق افتادن Prestrike و قطع آن و اتفاق افتادن دوباره آن و همچنین عمل Bounce باعث می‌شود جریانی با di/dt بالا ایجاد کند که در مدارشکن‌های خلاء نسبت به مدارشکن‌های SF6 بسیار بیشتر است [۳۷].

۴- مطالعات نرم‌افزاری در EMTP

در این بخش با مطالعه بر روی مدار نشان داده شده در شکل (۱) به بررسی شدت TRV و اضافه ولتاژهای گذرا در نقاط مختلف شبکه فشارضعیف پرداخته می‌شود. برای انجام شبیه‌سازی‌ها، ۴ سناریو تعریف شده است.

(الف) بررسی اثر مقادیر برش جریان‌های مختلف بر روی شدت TRV و اضافه ولتاژهای گذرا

(ب) بررسی تاثیر پایین آمدن قدرت بازیابی دی‌الکتریک کلید بر TRV و تاثیر آن بر اضافه ولتاژهای گذرا

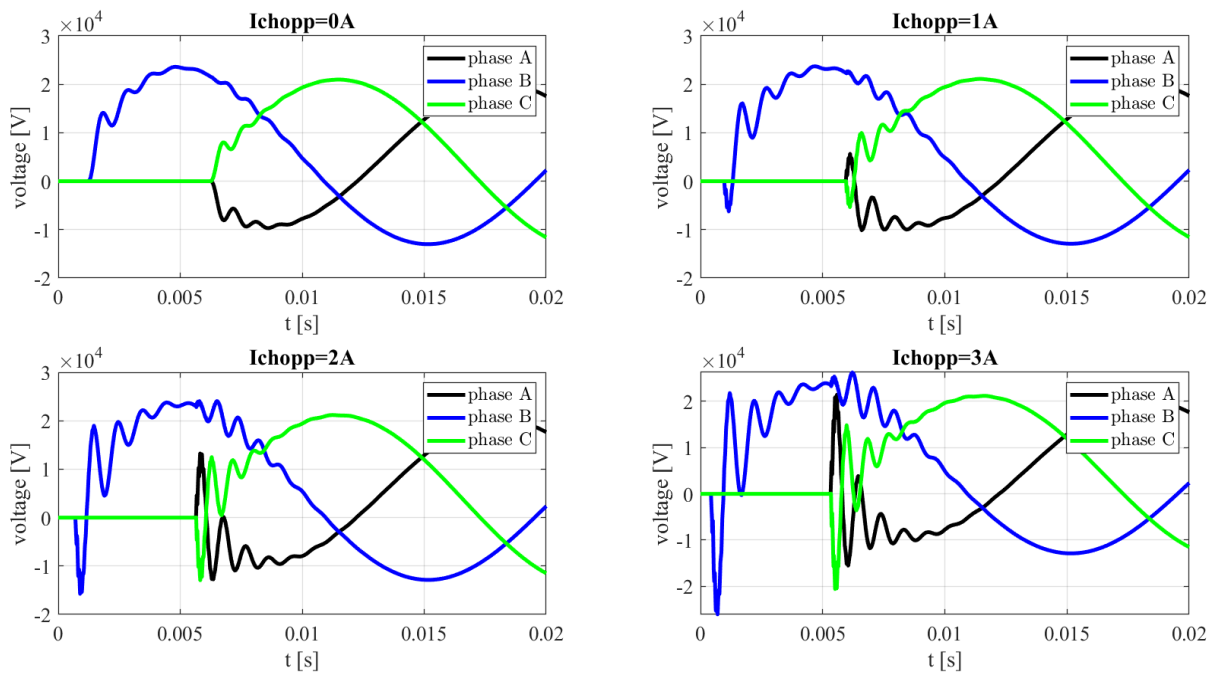
(پ) بررسی اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از کلیدزنی وصل (ت) بررسی اثر نصب SPD در ثانویه ترانسفورماتور بر کاهش دامنه اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از کلیدزنی کلید ۲۰ کیلوولت که از ترانسفورماتور عبور کرده و به سطح توزیع فشارضعیف رسیده‌اند.

(الف) بررسی مقادیر برش جریان‌های مختلف

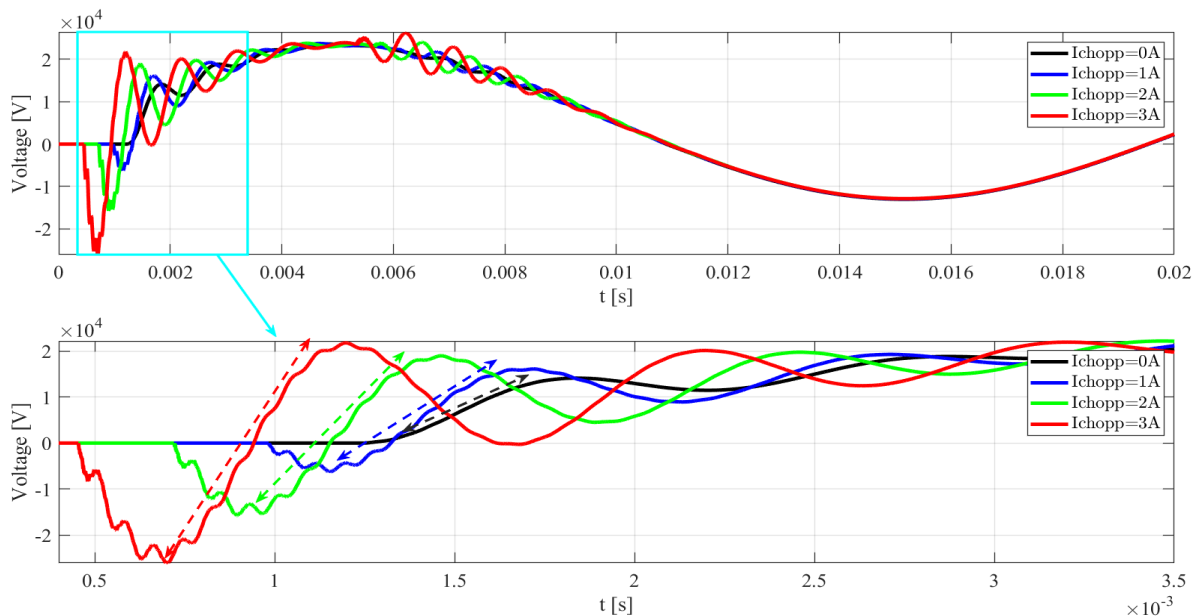
شبیه‌سازی‌های مرتبط با این سناریو بر روی مدار نشان داده شده در شکل (۱) انجام شده است. در این سناریو مقادیر برش جریان تغییر داده می‌شود و اثر آنها بر شدت TRV و اضافه‌ولتاژهای گذرا بررسی می‌شود. مقادیر برش جریان ۱، ۲ و ۳ و صفر آمپر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در شکل شماره

می‌شود، T3 نشان دهنده مدت زمانی است که مشخصه TRV کلید، به ولتاژ حد بالای خود یعنی U_c (۲۴kV) می‌رسد. شرایط پایین آمدن قدرت بازیابی دی‌الکتریک کلید خلاء با تغییر این مشخصه شبیه‌سازی شده است. مطالعات در این سناریو بر روی مدار نشان داده شده در شکل (۱) انجام شده است. برش جریان کلید روی ۳ آمپر تنظیم شده است.

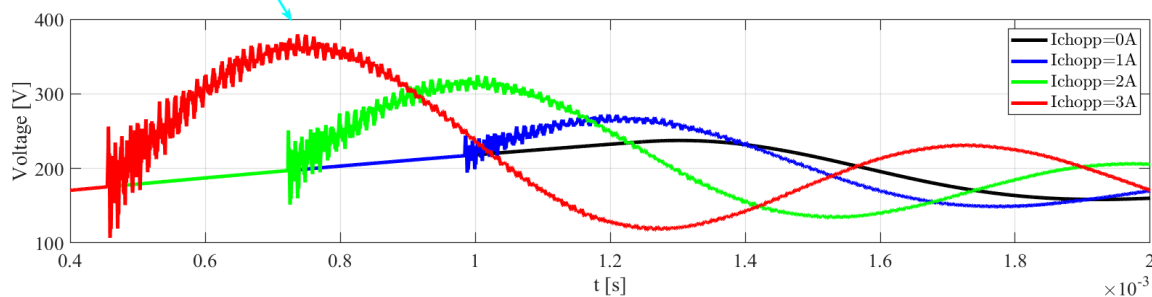
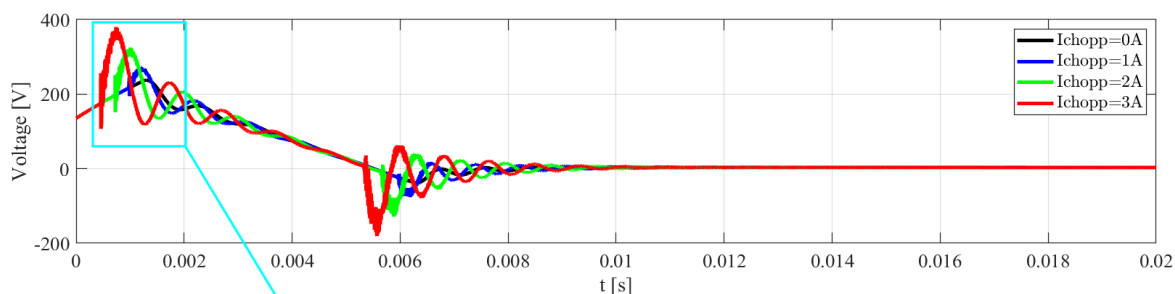
می‌کند. دلایل مختلفی مثل، قوس‌های رخ داده در قبل، جوش خوردگی سطح کنتاکت‌ها، میکرو برآمدگی‌های ناشی از جوش سرد و غیره ممکن است باعث پایین آمدن قدرت بازیابی دی‌الکتریک کلید خلاء شود [۳۳] و همین موضوع ممکن است باعث افزایش رخ دادن پدیده Reignition شود. در این قسمت، قدرت دی‌الکتریک کلید با تغییر مشخصه TRV آن پایین آورده شده است. با کاهش شیب منحنی TRV که این کار با تغییر T3 (افزایش T3) انجام



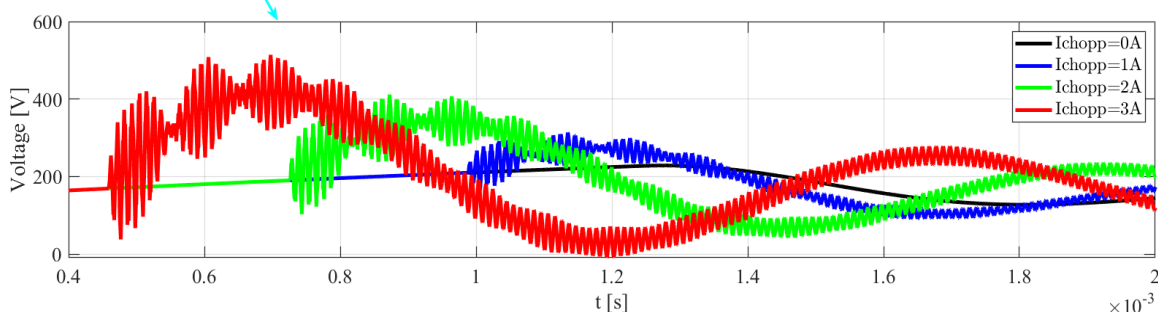
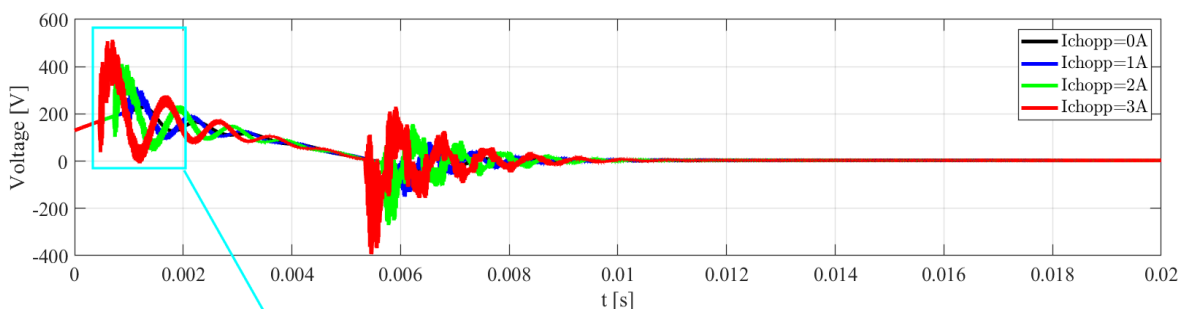
شکل ۶- شکل موج TRV در کلید مربوط به برش جریان‌های صفر، ۱، ۲، ۳ آمپر



شکل ۷- dv/dt غیر یکسان، روی منحنی TRV در برش جریان‌های مختلف



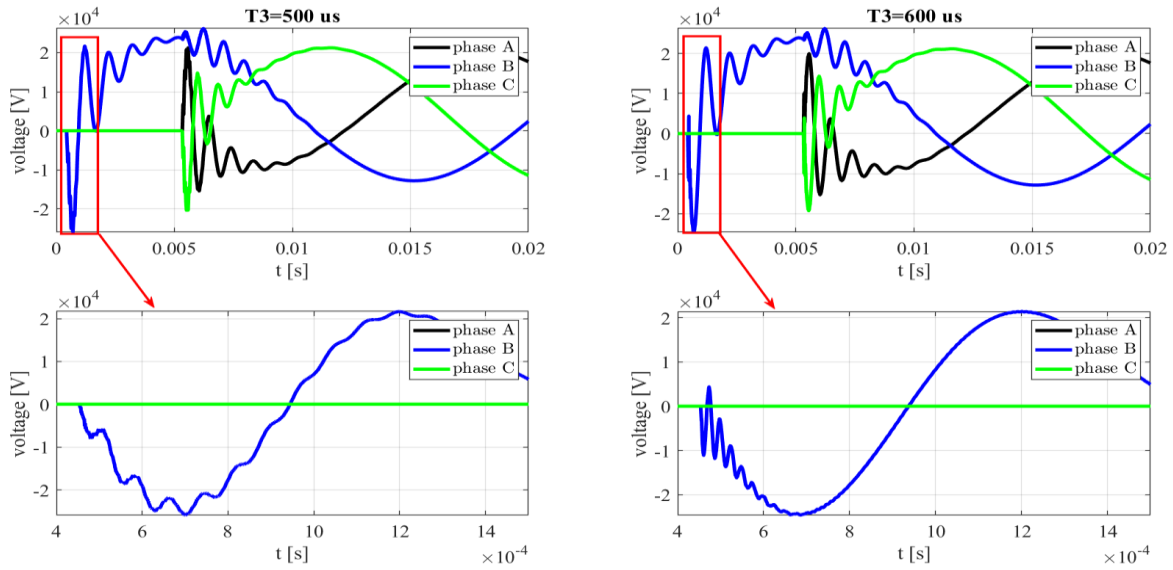
شکل ۸- شکل موج ولتاژ فاز b ثانویه ترانسفورماتور ۲۵۰ kVA ابتدای فیدر، در برش جریان‌های مختلف کلید خلاء



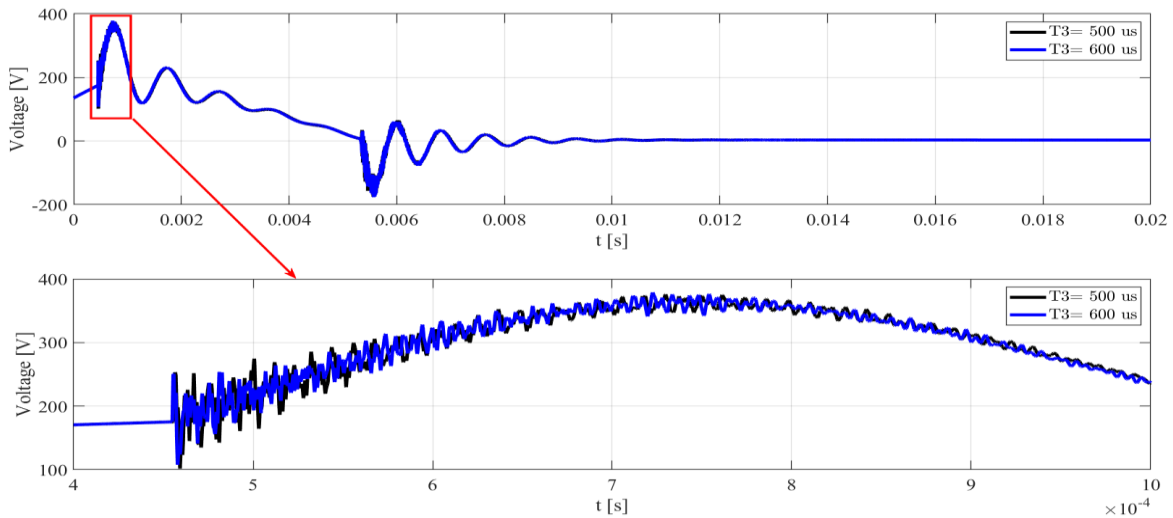
شکل ۹- شکل موج ولتاژ فاز b در ثانویه ترانسفورماتور ۲۵۰ kVA واقع در انتهای فیدر، در برش جریان‌های مختلف کلید خلاء

ترانسفورماتورها نیز شده است. مطابق شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌شود که با افزایش dv/dt میزان اضافه ولتاژ گذرای منتقل شده به سمت ثانویه ترانسفورماتور قدری افزایش پیدا کرده است

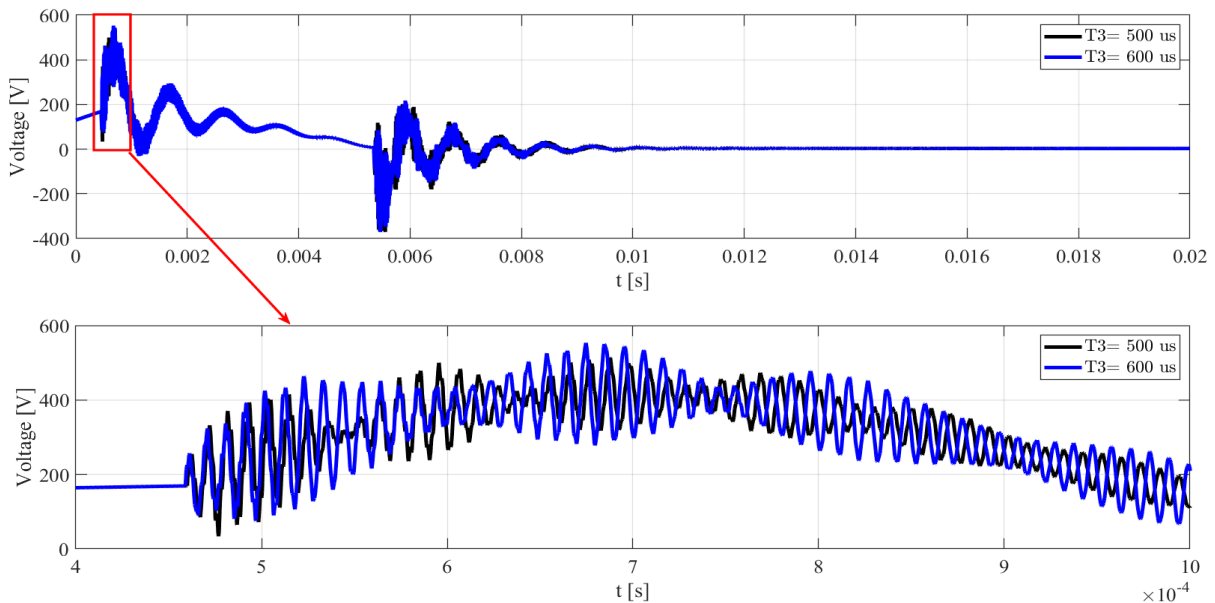
در شکل (۱۰) که نمایشگر TRV کلید است، مشاهده می‌شود که با کاهش قدرت بازیابی دی‌الکتریک کلید، تعداد reignitionها افزایش پیدا کرده است. این موضوع که نشان دهنده افزایش RRRV این اضافه ولتاژها است، باعث رخ دادن اضافه ولتاژهای شدیدتری نسبت به قبل در ثانویه‌ی



شکل ۱۰- شکل موج TRV کلید خلاء در دو حالت با قدرت بازیابی دی‌الکتریک‌های متفاوت



شکل ۱۱- شکل موج ولتاژ در ثانویه ترانسفورماتور ۲۵۰ kVA واقع در ابتدای فیدر، در دو حالت قدرت بازیابی دی‌الکتریک‌های متفاوت



شکل ۱۲- شکل موج ولتاژ در ثانویه ترانسفورماتور ۲۵۰ kVA واقع در انتهای فیدر، در دو حالت قدرت بازیابی دی‌الکتریک‌های متفاوت

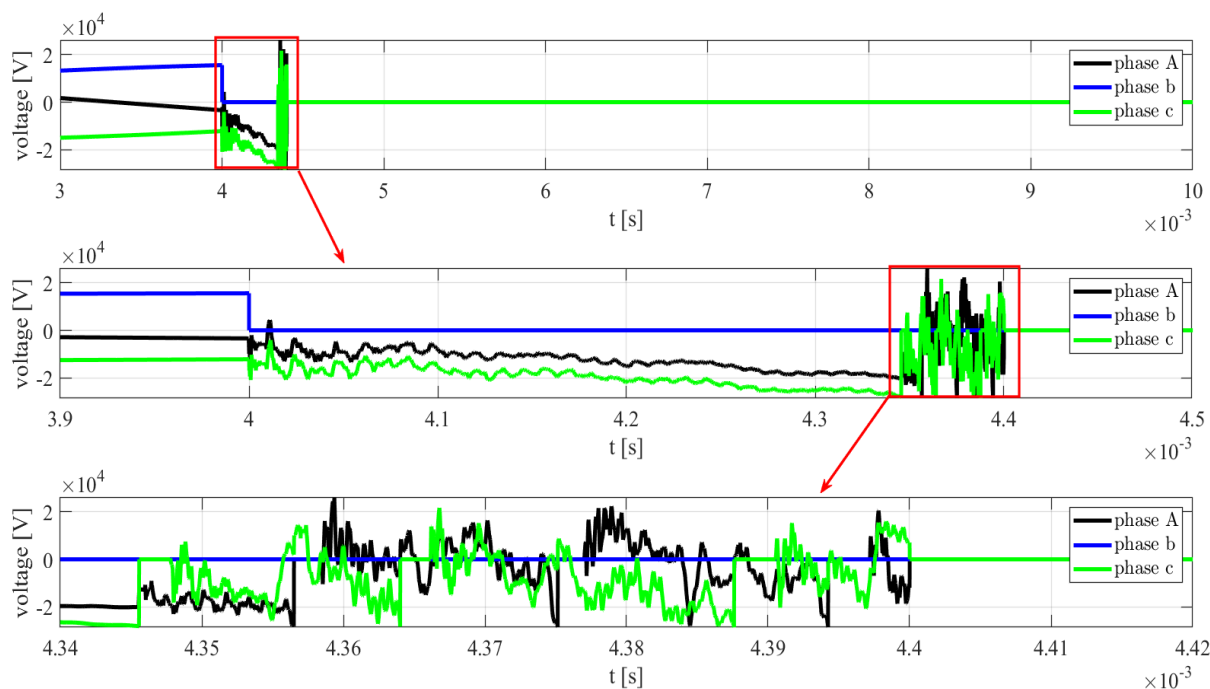
پ) بررسی اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از کلیدزنی وصل

کلیدزنی وصل فیدرهای ۲۰ کیلوولت یکی از عوامل ایجاد اضافه ولتاژهای گذرا در شبکه‌های توزیع است. اضافه ولتاژ گذرای ناشی از وصل کلید، به عوامل مختلفی مثل، لحظه‌ی وصل کلید، امپدانس موجی خط، مشخصات مداری سمت منبع کلید، مقدار بار و غیره وابسته است. دلیل اصلی ایجاد اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی وصل در شبکه فشارضعیف، پدیده Prestrike است که به تفصیل در بخش قبل توضیح داده شد. لازم به ذکر است در مطالعات انجام شده روی Prestrike و Reignition، در مقایسه این دو مشاهده شده است که اضافه ولتاژهای ناشی از Prestrike، تحت تاثیر شرایطی مانند شتاب بالای کنتاکت‌های کلید، پرش کنتاکت‌ها پس از برخورد با هم، ممکن است، دارای شیب تندتری نسبت به Reignition باشند [۴۱]. همین دلایل در انتقال اضافه ولتاژهای گذرا به ثانویه ترانسفورماتورهای توزیع بسیار مؤثر هستند. مطالعات شبیه‌سازی انجام شده در این بخش در مدار مطالعاتی نشان داده شده در شکل (۱)، صورت گرفته است. با توجه به شکل (۱۳) که ولتاژ دو سر کلید VCB در لحظه بسته شدن را نشان می‌دهد، در فاز a و c کلید، پیش از بسته شدن کامل (لحظه ۴.۴ میلی ثانیه)، چندین بار شکست عایقی رخ داده

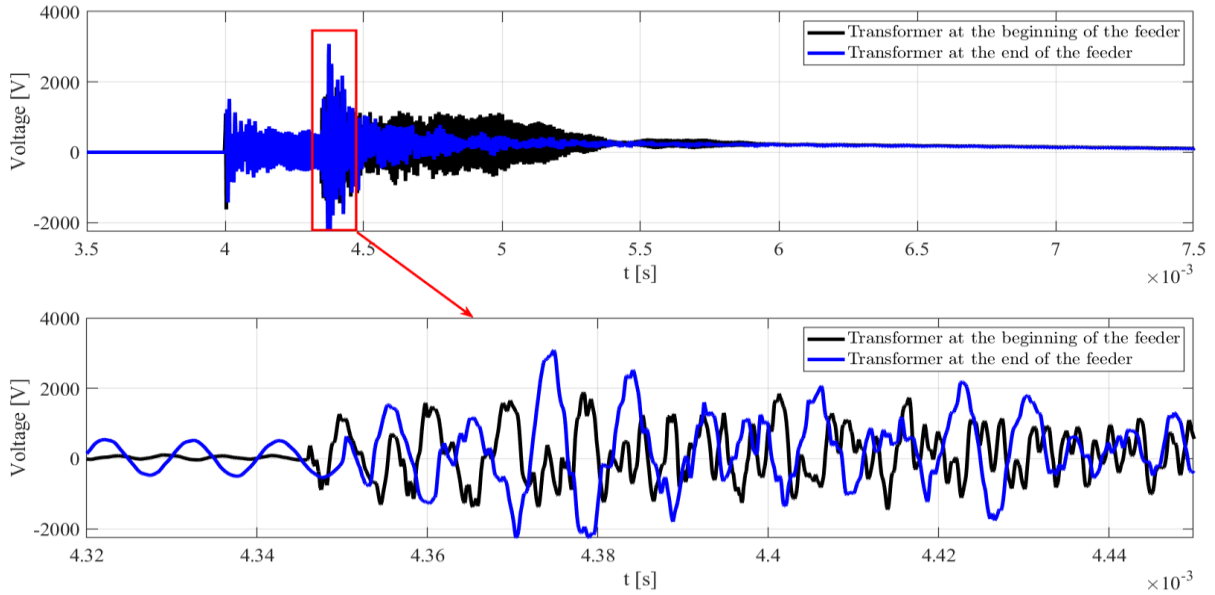
و ارتباط الکتریکی پیش از اتصال کنتاکت‌ها (یعنی پدیده Prestrike) رخ داده است. در شکل (۱۴) شکل موج ولتاژ مربوط به فاز b ثانویه ترانسفورماتورهای ابتدا و انتهای فیدر فشار متوسط، نشان داده شده است. دامنه اضافه ولتاژهای گذرا به بیش از ۳۰۸۰ ولت در ثانویه ترانسفورماتور رسیده است. که این رقم بیشتر از ۱۳ پیرونیوت ولتاژ نامی سیستم در شبکه فشارضعیف است. همچنین در شکل (۱۴) به وضوح دیده می‌شود که دامنه اضافه ولتاژها در ترانسفورماتور واقع در انتهای فیدر از ترانسفورماتور واقع در ابتدای فیدر شدیدتر است.

ت) اثر نصب SPD در شبکه فشارضعیف و بررسی شدت اضافه ولتاژهای گذرا در مکان‌های مختلف

پس از بررسی‌های انجام شده در سناریوهای قبل، بیشتر توجه روی عوامل تاثیرگذار بر روی شدت اضافه ولتاژهای گذرا در ترمینال‌های ثانویه ترانسفورماتور بود. در سال‌های اخیر که تجهیزات خانگی مصرف‌کنندگان شبکه فشارضعیف حساسیت بیشتری پیدا کرده‌اند، بررسی اضافه ولتاژهای گذرا در شبکه فشارضعیف و اثرات نصب SPDها در مکان‌های مختلف شبکه فشارضعیف، الزام پیدا کرده است. در این سناریو، حالت‌های مختلفی که در آنها SPD در مکان‌های مختلفی از شبکه فشارضعیف نصب شده است بررسی می‌شود.



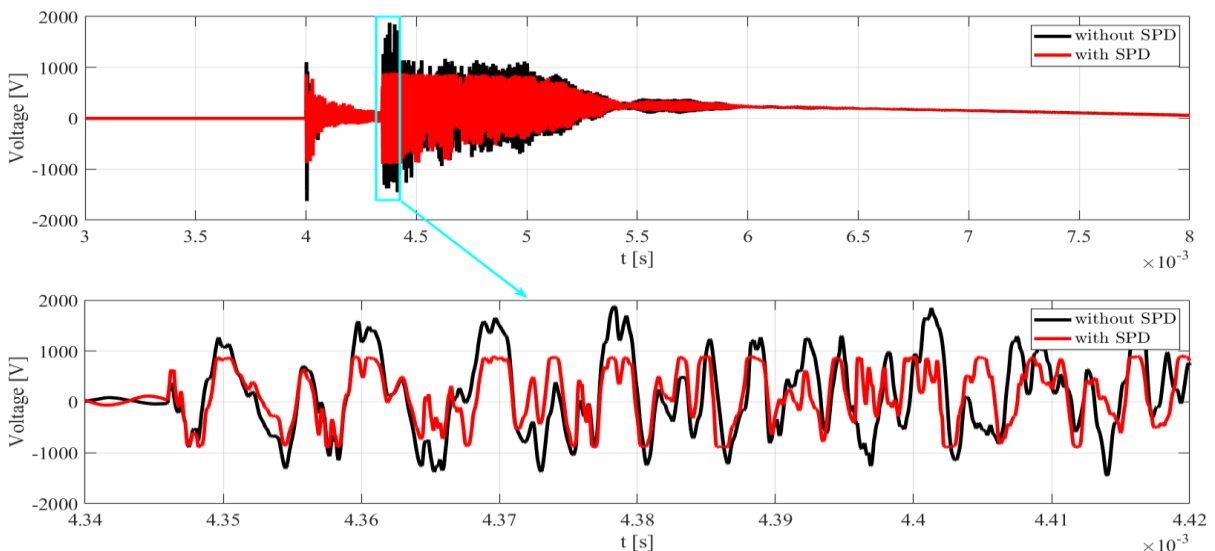
شکل ۱۳- شکل موج ولتاژ دو سر کلید ۲۰ کیلوولت در هنگام بسته شدن آن



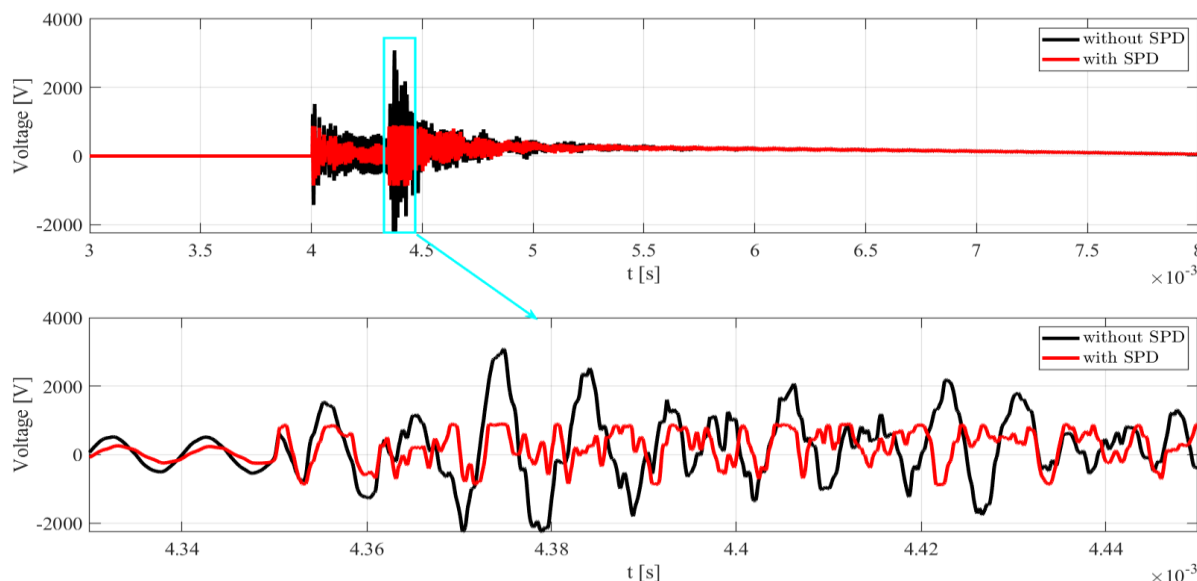
شکل ۱۴- شکل موج ولتاژ فاز b در ثانویه ترانسفورماتورهای واقع در ابتدا و انتهای فیدر فشار متوسط

بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه مشاهده گردید شدت اضافه ولتاژهای ناشی از لحظه‌ی وصل کلید در ثانویه ترانسفورماتور موجب ایجاد اضافه ولتاژهای گذرای شدیدی در ثانویه ترانسفورماتورها می‌شود، در این سناریو کلیدزنی وصل به عنوان منبع اضافه ولتاژهای گذرا مطالعه شده است. با مشاهده شکل‌های (۱۵) و (۱۶) که ولتاژ فاز b ثانویه ترانسفورماتورهای توزیع واقع در ابتدا و انتهای فیدر را نشان می‌دهند، نصب SPD برای هر دو ترانسفورماتور توانسته است دامنه اضافه ولتاژها را به زیر ۱ کیلوولت کاهش دهد.

این حالات عبارت‌اند از:
 (۱) هیچگونه SPD در شبکه فشارضعیف نصب نشده است.
 (۲) یک SPD در ثانویه ترانسفورماتور توزیع (یعنی در پای پست) نصب شده است.
 (۳) SPDها برای همه مصرف‌کنندگان هر دو فیدر بعلاوه ثانویه ترانسفورماتور نصب شده است.
 در این بخش، سه حالت ذکر شده در فوق با انجام شبیه‌سازی‌ها در مدار نشان داده شده در شکل (۱) مورد



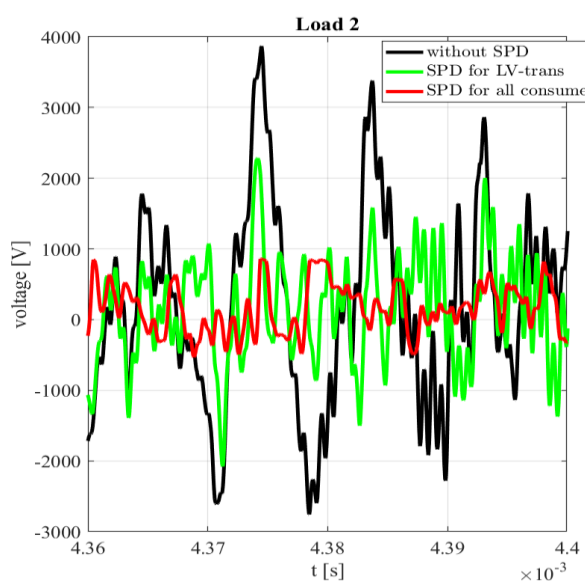
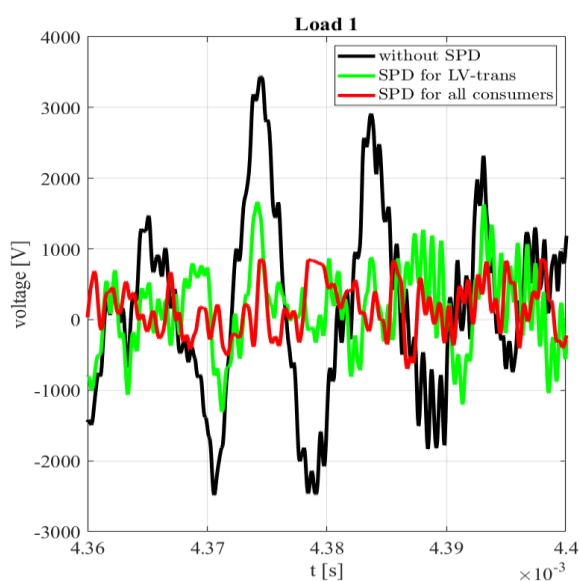
شکل ۱۵- شکل موج ولتاژ در ثانویه ترانسفورماتور واقع در ابتدای فیدر فشار متوسط، در دو حالت نصب و عدم نصب SPD در سمت فشارضعیف ترانسفورماتور (پای پست)



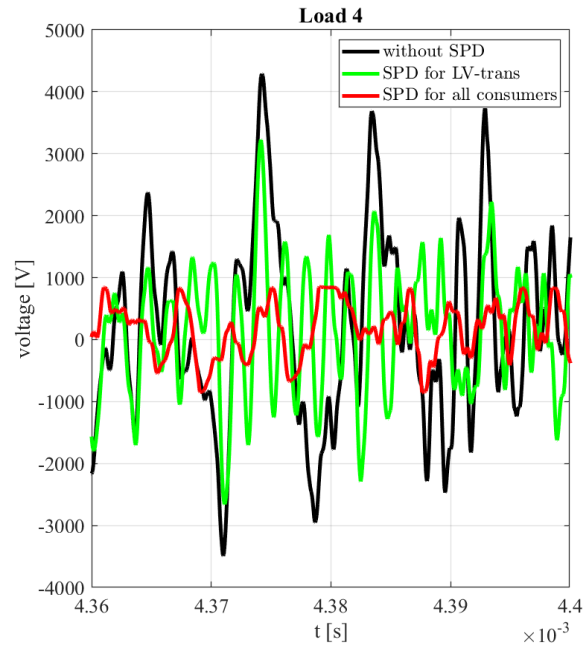
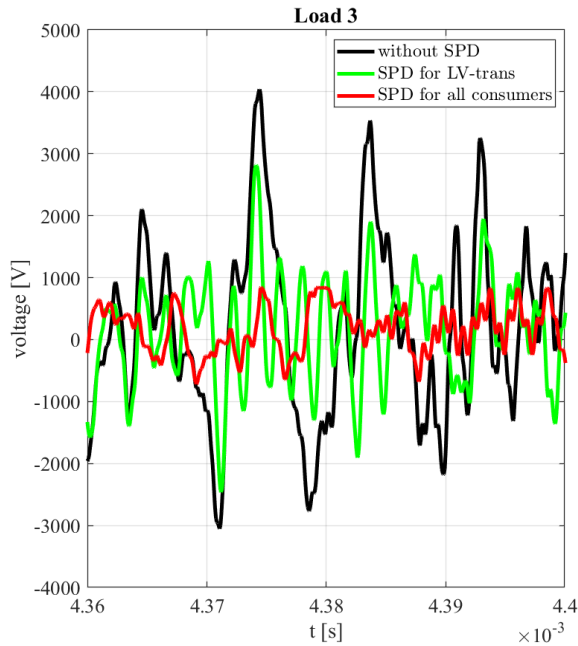
شکل ۱۶- شکل موج ولتاژ در ثانویه ترانسفورماتور واقع در انتهای فیدر فشار متوسط، در دو حالت نصب و عدم نصب SPD در سمت فشارضعیف ترانسفورماتور (پای پست)

ثانویه ترانسفورماتور توزیع همانطور که در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) مشاهده می‌شود، دامنه اضافه ولتاژها در ترمینال‌های ثانویه ترانسفورماتور کاهش می‌یابد. همچنین، نصب SPD در ثانویه ترانسفورماتور، بطور نسبی باعث کاهش دامنه اضافه ولتاژهای گذرا در ترمینال مشترکین در طول فیدر فشارضعیف نیز شده است. با بررسی دقیق تر ولتاژ ترمینال مصرف‌کنندگان هر دو فیدر، مشاهده می‌شود که پس از نصب SPD در پای پست توزیع، دامنه اضافه ولتاژها برای مصرف‌کنندگان فیدر شماره ۲ (فیدر کوتاه‌تر) به نسبت فیدر شماره ۱ (فیدر بلندتر) کاهش بیشتری داشته است.

با بررسی دقیق شکل (۱۶)، می‌توان دید که در صورت عدم نصب SPD در ثانویه ترانسفورماتور، دامنه اضافه ولتاژها به بیش از ۳ کیلوولت هم می‌رسد. در شکل‌های (۱۷) تا (۲۰) ولتاژ در ترمینال ورودی مصرف‌کنندگان شبکه فشارضعیف نشان داده شده است. با بررسی دقیق این شکل‌ها نکاتی قابل توجه است؛ اول اینکه اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی کلید خلاء برای مصرف‌کنندگان خطرناک است. نکته دوم اینکه دامنه اضافه ولتاژهای گذرا در انتهای دو فیدر توزیع فشارضعیف (یعنی بارهای ۵ و ۸) بیشتر از ابتدای آنها (یعنی بارهای ۱ و ۶) است. در بررسی حالت دو، با نصب SPD



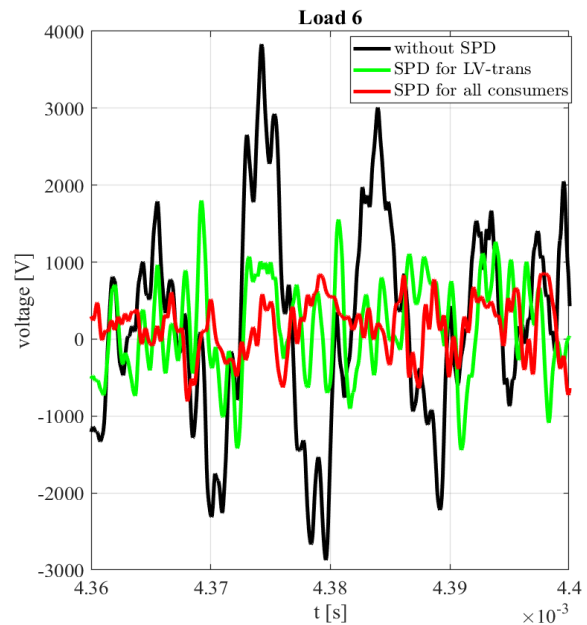
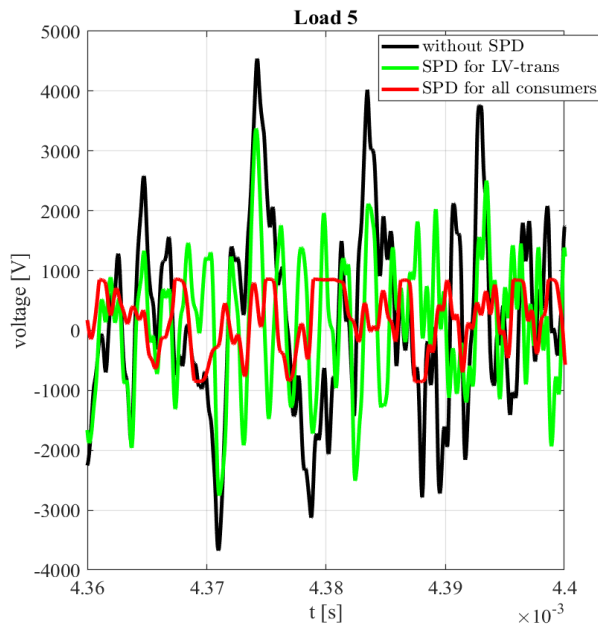
شکل ۱۷- شکل موج ولتاژ ترمینال بارهای ۱ و ۲ در شبکه فشارضعیف قرار گرفته در ثانویه ترانسفورماتور انتهای فیدر فشار متوسط در حالات مختلف نصب SPD در شبکه



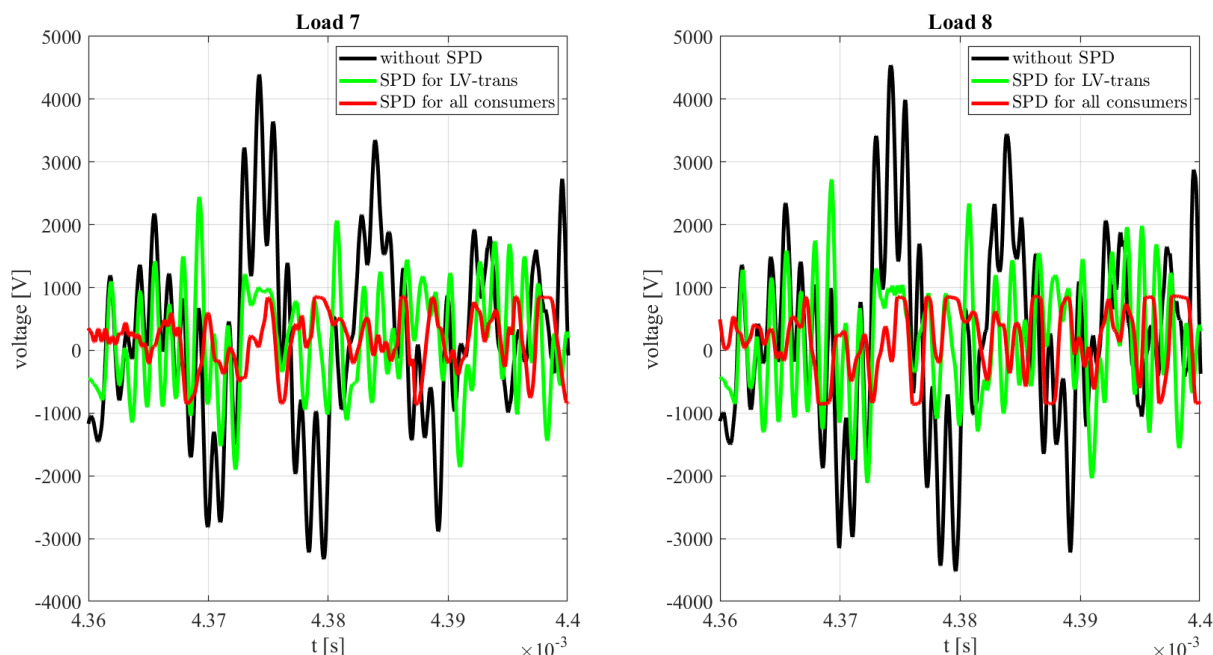
شکل ۱۸- شکل موج ولتاژ ترمینال بارهای ۳ و ۴ در شبکه فشارضعیف قرار گرفته در ثانویه ترانسفورماتور انتهای فیدر فشار متوسط در حالات مختلف نصب SPD در شبکه

حفاظت از تجهیزات مصرف‌کنندگان شبکه فشارضعیف است. بر اساس نتایج ارائه شده در مقاله، یک الگوریتم پیشنهادی برای کاهش ولتاژهای ناشی از کلیدزنی کلیدهای خلاء در شکل شماره (۲۱) ارائه شده است.

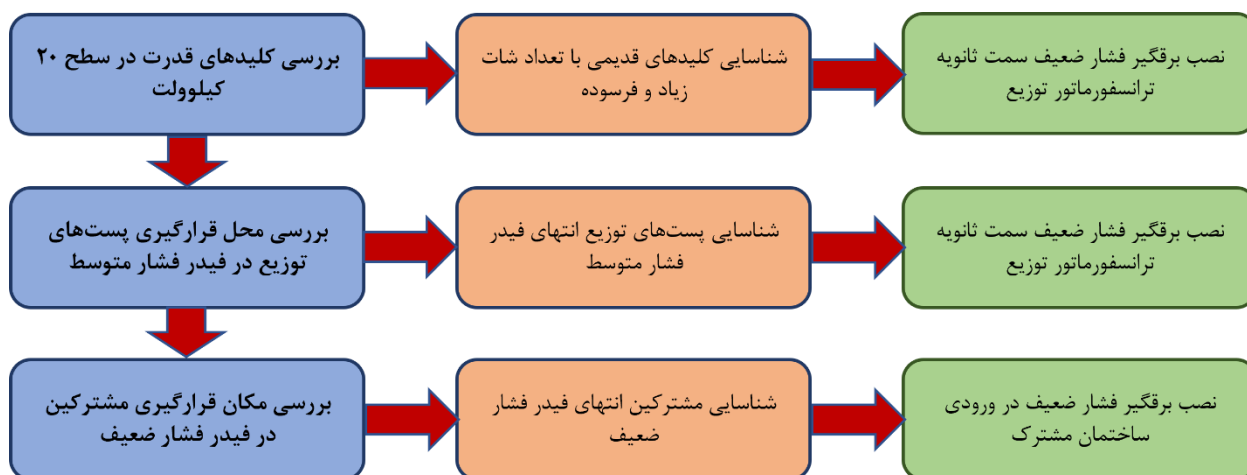
در بررسی‌های انجام شده در حالت سوم، نصب SPD برای همه مصرف‌کنندگان به همراه ثانویه ترانسفورماتور، توانسته است دامنه اضافه ولتاژها برای همه مصرف‌کنندگان را به زیر یک کیلوولت کاهش دهد که این عدد خوبی برای



شکل ۱۹- شکل موج ولتاژ ترمینال بارهای ۵ و ۶ در شبکه فشارضعیف قرار گرفته در ثانویه ترانسفورماتور انتهای فیدر فشار متوسط در حالات مختلف نصب SPD در شبکه



شکل ۲۰- شکل موج ولتاژ ترمینال بارهای ۷ و ۸ در شبکه فشارضعیف قرار گرفته در ثانویه ترانسفورماتور انتهای فیدر فشار متوسط در حالات مختلف نصب SPD در شبکه



شکل ۲۱- الگوریتم روش پیشنهادی جهت کاهش اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی کلید خلاء

کنتاکت‌ها می‌شود، با ایجاد پدیده‌های Reignition، Current chopping و Prestrike، اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی تشدید می‌شوند. با در نظر داشتن این موضوع، مشترکین شبکه فشار ضعیفی که از یک پست فوق توزیع قدیمی تغذیه می‌شوند، همواره در معرض ریسک بیشتری از اضافه ولتاژهای گذرا قرار دارند.

ب) بر اساس بررسی‌های انجام شده در این مقاله، پست‌هایی که در بخش‌های انتهایی فیدر فشار متوسط قرار دارند اضافه ولتاژهای کلیدزنی شدیدتری را در مقایسه با پست‌های واقع در بخش‌های ابتدایی فیدر تجربه می‌کنند. لذا نصب SPD

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، عوامل مؤثر بر اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از کلیدزنی کلید خلاء در شبکه توزیع و راهکارهای کاهش شدت آنها مورد بررسی قرار گرفت. کلیدزنی کلیدهای ۲۰ کیلوولت از نوع خلاء، در مقایسه با انواع دیگر کلید، اضافه ولتاژهای گذرای بیشتر و شدیدتری را ایجاد می‌کند. با مطالعات و شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله، نتایج زیر حاصل شد:

الف) با گذر زمان و افزایش تعداد کلیدزنی‌ها که موجب فرسودگی و کاهش قدرت بازیابی دی‌الکتریک کلید و خرابی

در ثانویه پست‌های توزیع واقع در بخش‌های انتهایی فیدر به منظور حفاظت از مشترکین این پست‌ها در برابر اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از کلیدزنی کلیدهای ۲۰ کیلوولت، از اولویت بالاتری برخوردار است.

ج) بر اساس مطالعات انجام شده، نصب SPDهای نوع ۱ در ثانویه پست‌های توزیع که اغلب دارای ولتاژ حفاظتی ۲.۵ کیلوولت هستند، در سرکوب ضربه‌های ناشی از کلیدزنی مؤثر هستند.

د) مطالعات نشان داد که دامنه اضافه ولتاژهای گذرا در انتهای فیدرهای فشارضعیف نسبت به ابتدای آنها شدیدتر است. این موضوع از منظر اولویت‌بندی مشترکین برای اجرای طرح حفاظتی، برای شرکت‌های برق دارای اهمیت است. همچنین مشاهده شد که با نصب SPD در ثانویه پست توزیع، از شدت اضافه ولتاژهای گذرا در ترمینال مصرف‌کنندگان کاسته می‌شود ولی ممکن است در ضربه‌های شدیدتر، حفاظت کامل از مصرف‌کنندگان تامین نگردد و برای تامین حفاظت کامل لازم است که SPD در ترمینال ورودی هر مصرف‌کننده نصب گردد.

مراجع

- [1] Marek. Florkowski, J. Furgał, and M. Kuniewski. "Propagation of overvoltages transferred through distribution transformers in electric networks." *IET Generation, Transmission & Distribution* 10, no. 10 (2016): 2531-2537.
- [2] F. Safaei, and M. Niasati. "Analysis of transformer insulation risk due to back flashover lightning on high voltage substations by considering the effect of environmental pollution." *Journal of Modeling in Engineering* 22, no. 76 (2024): 123-139.
- [3] J. Furgał, M. Kuniewski, and P. Pająk. "Analysis of internal overvoltages in transformer windings during transients in electrical networks." *Energies* 13, no. 10 (2020): 2644.
- [4] A. Allame, and A. Akbari Foroud. "Maintenance Scheduling of Wind Power Plants from the Viewpoint of the Power Plant Owner with the Aim of Minimizing the Economic Loss." *Journal of Modeling in Engineering* 22, no. 77 (2023):175-188.
- [5] S.Z. Motlagh, and A. Akbari Foroud. "Power quality disturbances recognition using adaptive chirp mode pursuit and grasshopper optimized support vector machines." *Measurement* 168 (2021): 108461.
- [6] G. Ansari, and R. Keypour. "Optimizing the performance of commercial demand response aggregator using the risk-averse function of information-gap decision theory." *Sustainability* 15, no. 7 (2023): 6243.
- [7] A. Borghetti, A. Morched, F. Napolitano, C.A. Nucci, and M. Paolone. "Lightning-induced overvoltages transferred through distribution power transformers." *IEEE Transactions on Power Delivery* 24, no. 1 (2008): 360-372.
- [8] N.A. Sabiha, and M. Lehtonen. "Lightning-induced overvoltages transmitted over distribution transformer with MV spark-gap operation—Part I: High-frequency transformer model." *IEEE Transactions on Power Delivery* 25, no. 4 (2010): 2472-2480.
- [9] T.E. Tsovilis, A.Y. Hadjicostas, E.T. Staikos, and G.D. Peppas. "An experimental methodology for modeling surge protective devices: An application to DC SPDs for electric vehicle charging stations." *IEEE Transactions on Industry Applications* 60, no. 1 (2023): 1645-1655.
- [10] T. Kisielewicz, G. Battista Lo Piparo, and C. Mazzetti. "Simplified approach for protection of apparatus powered by an HV/LV transformer against lightning strokes to the structure." In *2022 IEEE International*

تعارض منافع:

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی:

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان:

احمد مرادی: روش شناسی، نرم افزار، اعتبارسنجی، تحقیق، نگارش پیش نویس اصلی، بررسی و ویرایش.

امیرحسین دوست محمدی: روش شناسی، نرم افزار، اعتبارسنجی، تحقیق، نگارش پیش نویس اصلی.

اصغر اکبری فرود: روش شناسی، اعتبارسنجی، بررسی و ویرایش، منابع، راهنمایی.

منابع مالی:

در انجام پژوهش هیچ منابع مالی مورد استفاده قرار نگرفته است.

Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), pp. 1-6. IEEE, 2022.

- [11] B. Gustavsen, and K. Longva. "Neutral point overvoltages in wye-wye connected distribution transformer caused by lightning current in low-voltage winding." *IEEE Transactions on Power Delivery* 36, no. 5 (2020): 2851-2860.
- [12] F. Safaei, N. Ramezani, and M. Niazazari. "Evaluation and Prediction of Over-Voltages Effects Caused by Direct/Indirect Lightning Stroke on Complex Power Distribution Networks Using High Frequency Modeling of the Components." *Journal of Modeling in Engineering* 16, no. 53 (2018): 243-258.
- [13] A. Moradi, and A. Akbari Foroud. "Investigating the Factors Affecting the Transient Overvoltages Caused by Lightning in the Low-Voltage Network and the Role of the SPD Installed in the Substation in Protecting the Network." *Journal of Modeling in Engineering* 22, no. 76 (2024): 223-239.
- [14] D. Smugała, W. Piasecki, M. Ostrogorska, M. Florkowski, M. Fulczyk, and P. Kłys. "Distribution transformers protection against high frequency switching transients." *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review)*, ISSN (2012): 0033-2097.
- [15] M. Homma, M. Sakaki, E. Kaneko, and S. Yanabu. "History of vacuum circuit breakers and recent developments in Japan." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 13, no. 1 (2006): 85-92.
- [16] D.D. Shipp, T.J. Dionise, V. Lorch, and B.G. MacFarlane. "Transformer failure due to circuit-breaker-induced switching transients." *IEEE Transactions on Industry Applications* 47, no. 2 (2010): 707-718.
- [17] L. Czarnecki, and M. Lindmayer. "Measurement and statistical simulation of multiple reignitions in vacuum switches." *IEEE Transactions on Plasma Science* 13, no. 5 (1985): 304-310.
- [18] B. Thomas, and U. Savadamuthu. "Impulse breakdown characteristics of aged oil impregnated paper." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 24, no. 4 (2017): 2354-2361.
- [19] S. Ghasemi, M. Allahbakhshi, B. Behdani, M. Tajdinian, and M. Popov. "Probabilistic analysis of switching transients due to vacuum circuit breaker operation on wind turbine step-up transformers." *Electric Power Systems Research* 182 (2020): 106204.
- [20] N. Du, Y. Guan, J. Zhang, J. Niu, S. Yao, and G. Xu. "Phenomena and mechanism analysis on overvoltages caused by 40.5-kV vacuum circuit breakers switching off shunt reactors." *IEEE Transactions on Power Delivery* 26, no. 4 (2011): 2102-2110.
- [21] Y.L. Xin, W.H. Tang, J.J. Zhou, Y.H. Yang, and G. Liu. "Sensitivity analysis of reignition overvoltage for vacuum circuit breaker in offshore wind farm using experiment-based modeling." *Electric Power Systems Research* 172 (2019): 86-95.
- [22] N. Watson, J. Arrillaga, and J. Arrillaga. *Power Systems Electromagnetic Transients Simulation*. Vol. 39. Iet, 2003.
- [23] Siemens. "Overvoltage Protection Devices." In *Siemens LV 10*. Germany, 2019.
- [24] J.A Martinez-Velasco, ed. *Power system transients: parameter determination*. CRC press, 2017.
- [25] M.A. Sargent, and M. Darveniza. "Tower surge impedance." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 5 (1969): 680-687.
- [26] Siemens. "Station and Intermediate Class Surge Arresters." In *Energy Management*, 76. Germany, 2015.
- [27] J.C. Das. "Surges transferred through transformers." In *Conference Record of the 2002 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (Cat. No. 02CH37352)*, pp. 139-147. IEEE, 2002.
- [28] IEEE. *Std C37.04*. USA: IEEE, 1999(R2006).
- [29] IEC. *62271-100 62271*. Geneva: IEC, 2021.
- [30] E.P. Van Lanen, M. Popov, L. Van der Sluis, and R.P. Smeets. "Vacuum circuit breaker current-zero phenomena." *IEEE Transactions on Plasma Science* 33, no. 5 (2005): 1589-1593.
- [31] T. Abdulahovic, T. Thiringer, M. Reza, and H. Breder. "Vacuum circuit-breaker parameter calculation and modelling for power system transient studies." *IEEE Transactions on Power Delivery* 32, no. 3 (2014): 1165-1172.
- [32] D.L. Swindler. "A comparison of vacuum and SF6 technologies at 5-38 kV." *IEEE Transactions on Industry Applications* 5 (1984): 1355-1363.

- [33] R. Smeets, L. Van der Sluis, M. Kapetanovic, D.F. Peelo, and A. Janssen. *Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems*. John Wiley & Sons, 2015.
- [34] P.G. Slade. *The Vacuum Interrupter: Theory, Design, and Application*. CRC press, 2018.
- [35] C. Ding, and S. Yanabu. "Effect of parallel circuit parameters on the instability of a low-current vacuum arc." *IEEE Transactions on Plasma Science* 31, no. 5 (2003): 877-883.
- [36] S. Kaneda, S. Yamamoto, and T. Iwao. "Evaporation speed affected by moving speed of vacuum arc cathode spot of copper." In *2016 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS)*, pp. 1-1. IEEE, 2016.
- [37] M.B. Barbieri, R.B. Lastra, P.L. Arnera, and J.L. Agüero. "Transients due to multiple prestrike phenomenon when energizing capacitor banks with a vacuum circuit-breaker." In *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, pp. 1-6. IEEE, 2006.
- [38] E.W. Boehne, and S.S. Low. "Shunt capacitor energization with vacuum interrupters-a possible source of overvoltage." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 9 (1969): 1424-1443.
- [39] Breakers, AC High Voltage Generator Circuit. "Rated on a symmetrical current basis." *IEEE Standard C 37*.
- [40] R. Smeets, L. Van der Sluis, M. Kapetanovic, D.F. Peelo, and A. Janssen. *Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems*. John Wiley & Sons, 2015.
- [41] T. Abdulahovic. *Analysis of high-frequency electrical transients in offshore wind parks*. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden), 2011.