



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

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

Ahmad Moradi ^a, Asghar Akbari Foroud ^{b,*}

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

^b Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 04 December 2023

Revised: 13 February 2024

Accepted: 20 February 2024

Keywords:

Direct lightning strike
Indirect lightning strike,
Low voltage network,
Surge Protective Device (SPD),
Self-supporting cables,
Distributed neutrals.

ABSTRACT

Surges caused by direct or indirect lightning strikes on distribution networks threaten network equipment and consumers. Several parameters affect the intensity of transient over-voltages caused by lightning (surge), and significant studies have been done in this field. However, the effect of some parameters on the surges in the low-voltage network has not been investigated. Among these cases, we can mention using self-supporting cable instead of open wire and the effect of neutrals distributed along the low-voltage feeder. Therefore, in this article, the role of the two mentioned factors on the intensity of transient over-voltages in the low-voltage distribution network is investigated. The presence of a surge protective device (SPD) in the secondary of the distribution transformer has a significant effect on the protection of the distribution transformer against direct and indirect lightning strikes to the low-voltage distribution network. But so far, some of the effects of this SPD on surges at the input of low-voltage consumers have not been investigated. Therefore, in this article, the positive and negative role of the SPD installed in the distribution substation on the consumers is investigated. Based on the investigations, it is determined that the SPD installed at the substation has a positive or negative effect on which subscribers and under what conditions. Based on the studies, it was concluded that the presence of SPD at the distribution substation reduces the intensity of the surge for some subscribers and increases the intensity of the surge for others.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32554.2576>

© 2024 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., & Akbari Foroud, A. (2024). 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(76), 223-239. doi: 10.22075/jme.2024.32554.2576

بررسی عوامل مؤثر بر اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از صاعقه در شبکه فشار ضعیف و نقش SPD منصوبه در پای پست در حفاظت از شبکه

احمد مرادی^۱، اصغر اکبری فرود^{۲*}

چکیده	اطلاعات مقاله
موج‌های ضربه ناشی از برخورد مستقیم و یا غیرمستقیم صاعقه به شبکه‌های توزیع، تجهیزات شبکه و مصرف‌کنندگان را تهدید می‌کنند. پارامترهای متعددی بر روی شدت اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از صاعقه (surge)، مؤثر هستند و مطالعات قابل توجهی نیز در این حوزه به انجام رسیده است. اما، اثر برخی پارامترها بر ضربه‌های گذرا در شبکه فشار ضعیف مورد بررسی قرار نگرفته است. از جمله این موارد می‌توان به استفاده از کابل خودنگهدار بجای سیم لخت هوایی و اثر نول‌های توزیع شده در طول فیدر فشار ضعیف اشاره کرد. لذا، در این مقاله به بررسی نقش دو عامل ذکر شده، بر شدت اضافه ولتاژهای گذرا در شبکه توزیع فشار ضعیف پرداخته می‌شود. وجود دستگاه محافظ در برابر موج گذرا (SPD) در ثانویه ترانسفورماتور توزیع، تأثیر قابل توجهی بر حفاظت از ترانسفورماتور توزیع در برابر برخورد مستقیم و غیر مستقیم صاعقه به شبکه توزیع فشار ضعیف دارد. اما تا کنون برخی از تأثیرات این SPD بر ضربه‌های گذرا در ورودی مشترکین شبکه توزیع فشار ضعیف، مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در این مقاله، نقش مثبت و منفی SPD نصب شده در پای پست توزیع، بر مشترکین موجود بر روی فیدرهای توزیع فشار ضعیف مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر اساس بررسی‌ها مشخص می‌شود که SPD نصب شده در پای پست بر کدام مشترکین و در چه شرایطی اثر مثبت و یا منفی دارد. بر اساس مطالعات این نتیجه حاصل شد که وجود SPD در پای پست، برای برخی از مشترکین باعث کاهش شدت موج ضربه و برای برخی دیگر باعث افزایش شدت آن می‌گردد.	دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۳ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۰۱
	واژگان کلیدی: برخورد مستقیم صاعقه، برخورد غیرمستقیم صاعقه، شبکه فشار ضعیف، دستگاه محافظ در برابر موج گذرا (SPD)، کابل خودنگهدار، نول‌های توزیع شده.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32554.2576>

© 2024 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/>)

مصرف‌کنندگان شبکه فشار ضعیف به شدت در برابر نوسانات ولتاژ حساس شده‌اند [۷] و همین موضوع باعث شده است که میزان قابل توجهی از تجهیزات مشترکین شبکه فشار ضعیف به دلیل اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه آسیب ببینند. در همین مدت در طی سالیان اخیر کاملاً مشخص شده است که امواج گذرای صاعقه یکی از عوامل خرابی ترانسفورماتورهای توزیع نیز هستند [۸-۱۱].

۱- مقدمه

در گذر زمان با توجه به تغییر شیوه زندگی مردم، کره زمین روز به روز گرم‌تر می‌شود و این موضوع باعث افزایش وقوع و شدت صاعقه در سال‌های اخیر شده است [۱، ۲]. صاعقه به عنوان یک رویداد طبیعی با رفتار کاملاً تصادفی بر روی سازه‌ها و شبکه توزیع نیروی فشار ضعیف اثرگذار است [۳-۶]. با رشد صنعت الکترونیک و مخابرات، تجهیزات

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

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

۲. استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

استناد به این مقاله:

مرادی، احمد، و اکبری فرود، اصغر. (۱۴۰۳). بررسی عوامل مؤثر بر اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از صاعقه در شبکه فشار ضعیف و نقش SPD منصوبه در پای پست در حفاظت از شبکه. مدل سازی در مهندسی، ۲۲(۷۶)، ۲۲۳-۲۳۹. doi: 10.22075/jme.2024.32554.2576

سازندگان زیادی تولید می‌شوند و در شبکه فشارضعیف مورد استفاده قرار می‌گیرند. در تحقیقات انجام شده، استفاده از SPD و اثرات آن بر کاهش دامنه اضافه ولتاژها در ثانویه ترانسفورماتور و همچنین ترمینال تجهیزات مصرف‌کننده بررسی شده است. اما همچنان موضوعاتی هستند که به آنها توجه چندانی نشده است. بطور کلی SPD قادر است یک حفاظت مناسب در محل نصب خودش ارائه دهد ولی برای دیگر تجهیزات که نسبت به آن فاصله دارند حفاظتی را فراهم نمی‌کند، به همین دلیل برای حفاظت از تجهیزات حساس، نیاز به نصب چند SPD با رعایت قواعد هماهنگی، لازم است [۲۱].

مسائلی که در تحقیقات پیشین مورد بررسی قرار نگرفته است و در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرند و به عبارت دیگر، نوآوری‌های این مقاله هستند به شرح زیر می‌باشند:

- مدلسازی کابل خودنگهدار و بررسی اثر آن بر اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از صاعقه.
- بررسی اثر نول‌های توزیع شده در طول شبکه فشارضعیف در کاهش دامنه اضافه ولتاژها.
- بررسی اثرات SPD نصب شده در ثانویه ترانسفورماتور توزیع بر مشترکین شبکه فشارضعیف.
- بررسی اثر SPD نصب شده در ورودی مصرف‌کنندگان بر ترانسفورماتور و دیگر مشترکین.

مطالعات انجام شده در محیط نرم‌افزار EMTP-RV انجام شده است، منبع امواج گذرا، برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه با شبکه فشارضعیف و یک مورد هم برخورد مستقیم صاعقه با شبکه فشار متوسط، شبکه فشار ضعیف با سیستم زمین TN-C-S می‌باشد.

۲- شبکه مورد استفاده در مطالعه

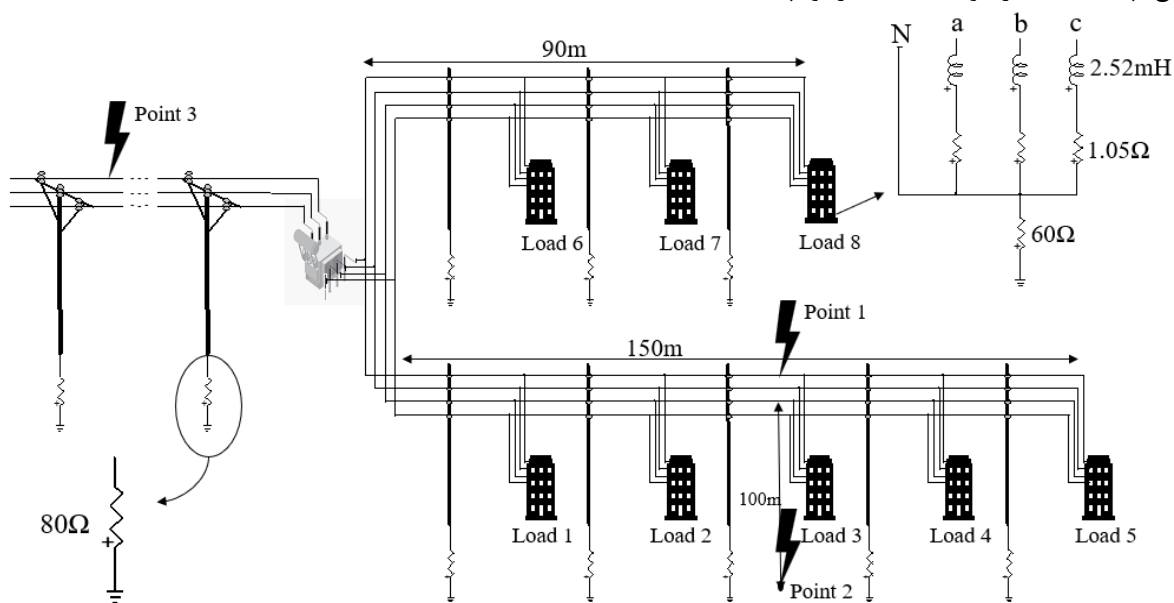
مداری که مطالعات نرم‌افزاری روی آن انجام شده است، در شکل (۱) نشان داده شده است، مدل خط فشارضعیف هوایی و خط فشار متوسط هوایی استفاده شده در مطالعات این مقاله، مدل وابسته به فرکانس (FD) است. که شامل شبکه فشارمتوسط به طول ۶۰۰ متر با اسپن های ۶۰ متری، با خط هوایی سیم لخت ۱۲۰ میلی‌متر مربع است. در سمت اولیه ترانسفورماتور در فاصله ۳.۵ متری از

همین موضوع باعث شد تا مطالعات زیادی در خصوص حفاظت شبکه‌های فشارضعیف در برابر صاعقه انجام گیرد. به دلیل اینکه منبع بیشتر امواج گذرا وارد شده به شبکه فشارضعیف در سمت شبکه فشارمتوسط است، تا کنون مطالعات قابل توجهی روی منابع امواج گذرا ناشی از برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه با شبکه فشار متوسط انجام شده است [۱۲، ۱۳]. در مطالعات انجام شده، پارامترها و عوامل موثر بر شدت اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه در شبکه فشارضعیف بررسی شده است. برخی از آنها مانند: اثر مدل فرکانس بالای ترانسفورماتور [۱۴، ۱۵]، اثر طول سیم رابط بین برقگیر فشارمتوسط و ترانسفورماتور [۱۶]، مقاومت زمین نول ترانسفورماتور، مقاومت زمین مشترکین، مقاومت زمین پایه‌ها و غیره مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲، ۱۷]. هر یک از پارامترهای بررسی شده به میزان مشخصی بر شدت اضافه ولتاژها در ترمینال‌های ثانویه ترانسفورماتور و مصرف‌کنندگان موثر هستند. بعنوان مثال، مشخص شده است که کاهش طول لید اتصال برقگیر فشارمتوسط در کاهش دامنه اضافه ولتاژها در سمت اولیه ترانسفورماتور موثر است، اما در کاهش سطح امواج گذرای منتقل شده به شبکه فشارضعیف نقش چندانی ندارد [۱۸]. همواره باید در نظر داشت که، با وجود اینکه احتمال برخورد صاعقه با شبکه فشارضعیف کم است، ولی میزان آسیب آن می‌تواند چند برابر امواج گذرا ناشی از برخورد صاعقه با شبکه فشار متوسط یا عملیات کلیدزنی کلیدهای قدرت که از طریق ترانسفورماتور توزیع به شبکه فشارضعیف انتقال می‌یابند، باشد. البته لازم به ذکر است، احتمال برخورد صاعقه غیر مستقیم به شبکه فشار ضعیف، در مناطق روستایی به مراتب بیشتر است.

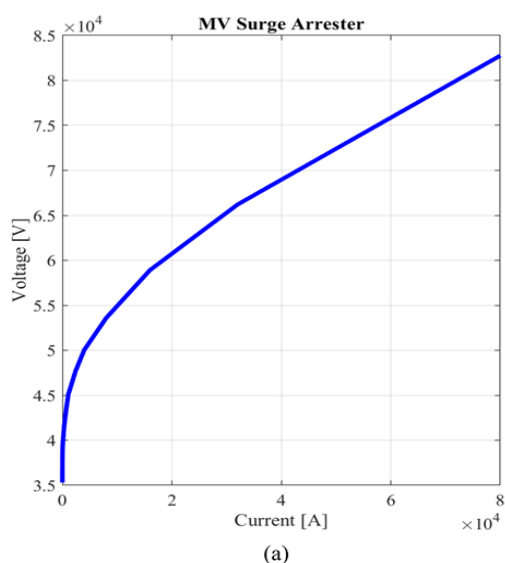
در منابع ذکر شده که یکی از راهکارهای شناخته شده برای حفاظت از شبکه فشارضعیف در برابر ضربه‌های ناشی از صاعقه، دستگاه محافظ در برابر موج گذرا (SPD) است. SPDها عموماً یک دستگاه مبتنی بر فناوری MOV یا GDT هستند [۱۹]، که مطابق با منحنی مشخصه ولتاژ-جریان معینی، در برابر موج ضربه رفتار می‌کنند. طبق تعریف استاندارد IEC 61643-12، دستگاه محافظ در برابر موج گذرا (SPD) به عنوان وسیله‌ای تعریف می‌شود که دارای حداقل یک جزء غیرخطی است، که برای محدود کردن اضافه ولتاژهای گذرا و منحرف کردن جریان موجی طراحی شده است [۲۰]. امروزه این دستگاه‌ها توسط

فشار ضعیف ۹ متر است. در این مطالعات مدل امپدانس ثابت برای مدل فرکانسی پایه‌ها در نظر گرفته شده است [۲۶]. همچنین شکست عایقی مقره‌ها در پایه‌ها در نظر گرفته شده است [۲۷]. از مدل فرکانس بالای ترانسفورماتور معروف به مدار PI خازنی [۲۸] برای ترانسفورماتور ۲۰/۰.۴ کیلوولت با ظرفیت ۳۱۵ kVA استفاده شده است (شکل ۵). شبکه فشار ضعیف با خط هوایی سیم لخت ۷۰ میلی‌متر مربع، در شکل (۱) دارای دو فیدر است. فیدر اول، دارای ۵ مصرف‌کننده (بارهای ۱ تا ۵) با بار سه فاز متقارن است، طول فیدر ۱ برابر ۱۵۰ متر با اسپن‌های ۳۰ متری است.

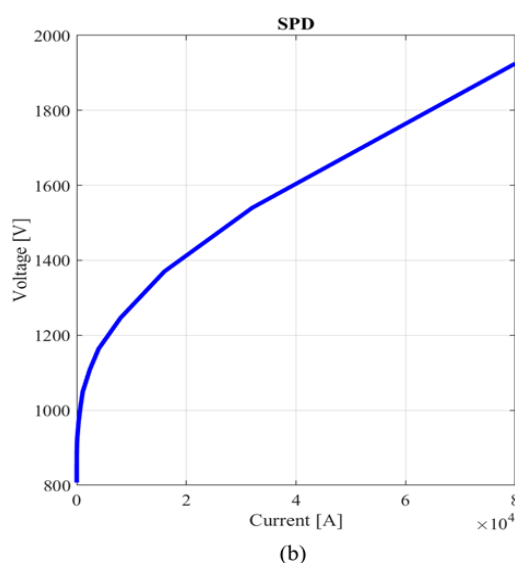
ترانسفورماتور برقگیرهای فشار متوسط نصب شده است. برای مدل‌سازی برقگیرها از مدل مطرح IEEE استفاده شده است [۲۲، ۲۳]. مدار شبیه‌سازی این مدل در نرم‌افزار EMTP، در شکل شماره (۴) نشان داده شده است. منحنی مشخصه V/I برقگیرهای فشار متوسط و فشار ضعیف (SPD) در شکل (۲) نشان داده شده است. در مطالعات انجام شده از SPD مدل 5SD7413-1 مبتنی بر اطلاعات مرجع [۲] استفاده شده است. همچنین لازم به ذکر است که برقگیر فشار متوسط به کار رفته در مدل‌سازی‌ها، مدل 3EL5 است که اطلاعات آن از مرجع [۳] گرفته شده است. ارتفاع پایه‌های فشار متوسط ۱۲ متر و پایه‌های شبکه



شکل ۱- مدار تحت مطالعه

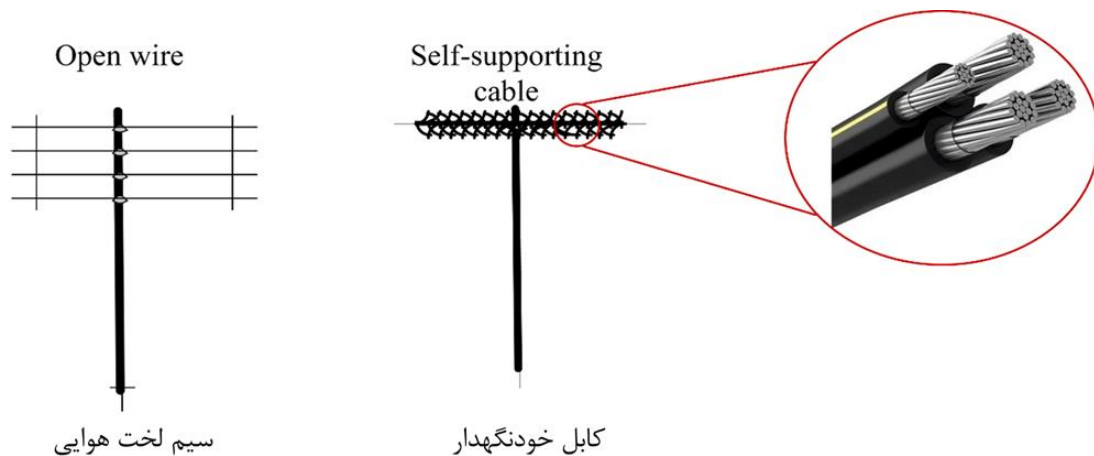


(a)



(b)

شکل ۲- منحنی مشخصه V/I: (a) برقگیر فشار متوسط، (b) برقگیر فشار ضعیف (SPD)



شکل ۳- سیم لخت هوایی و کابل خودنگهدار

شبکه فشارضعیف، یکبار با خط هوایی سیم لخت و یکبار با خط هوایی کابل خودنگهدار، مشابه آنچه که در شکل (۳) و (۶) نشان داده شده مدل و مطالعه شده است.

۳- سناریوهای مطالعه

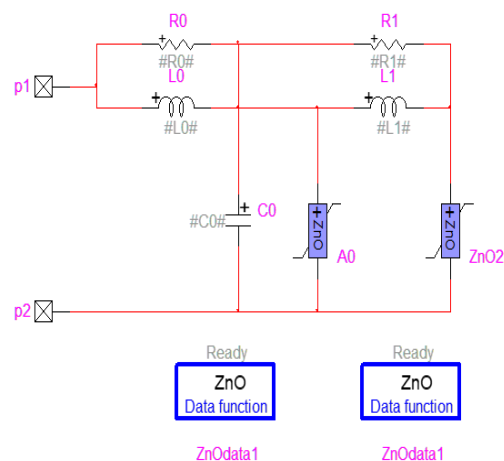
در این بخش بر روی مدار مطالعاتی نشان داده شده در شکل (۱)، مطالعات زیر انجام شده است:

- الف) برخورد مستقیم صاعقه به شبکه فشارضعیف
- ب) برخورد غیرمستقیم صاعقه به شبکه فشارضعیف
- ج) بررسی اثر نول‌های توزیع شده در طول فیدر فشارضعیف
- د) بررسی کابل خودنگهدار در شبکه فشارضعیف
- ه) بررسی نصب SPD در پای پست توزیع و مکان‌های مختلف شبکه فشارضعیف

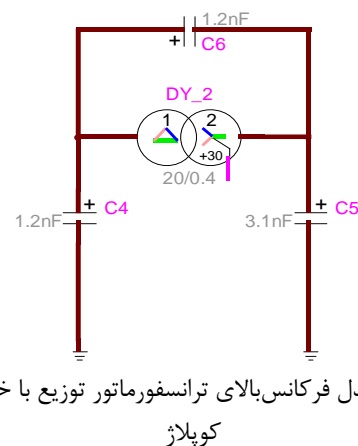
الف) برخورد مستقیم صاعقه به شبکه فشارضعیف

احتمال برخورد مستقیم صاعقه به شبکه فشارضعیف کم است، ولی در مناطق با تراکم کم مانند روستاها و شهرک‌های صنعتی کوچک، این احتمال تقویت می‌شود [۲۹]. باید در نظر داشت که احتمال برخورد مستقیم یک صاعقه با دامنه کم و شیب تند به شبکه فشار ضعیف که معرف ضربه‌های ثانویه پدیده صاعقه است به شبکه‌های فشارضعیف وجود دارد [۳۰]. همچنین قابل ذکر است، با استناد به استاندارد IEC 62305-1، احتمال برخورد صاعقه ۵ کیلوآمپری، ۹۵٪ است. در این سناریو، یک صاعقه ۵ کیلوآمپری با شکل موج استاندارد ۸/۲۰ میکروثانیه که مدل کننده ضربه ثانویه صاعقه است [۳۱]، در حدفاصل پایه سوم و چهارم فیدر یک با فاز A Point 1 مشخص شده در شکل (۱) برخورد می‌کند.

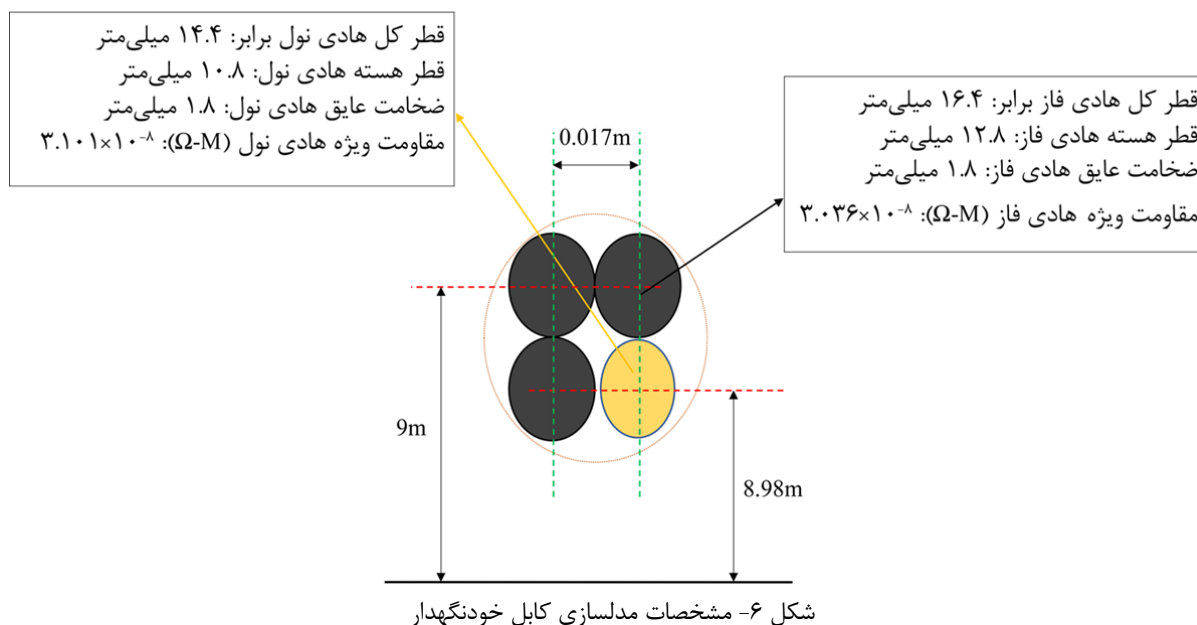
فیدر دوم دارای ۳ مصرف‌کننده (بارهای ۶ تا ۸) با بارهای مشابه فیدر ۱ هستند طول فیدر ۲ برابر ۹۰ متر است، بار هر مصرف‌کننده معادل ۴۰ kVA با ضریب قدرت ۰.۸ است. مقاومت زمین پایه‌ها ۸۰ اهم، مقاومت زمین مصرف‌کننده‌ها ۶۰ اهم، مقامت زمین ترانسفورماتور ۱۵ اهم در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- مدل فرکانس بالای IEEE برای برقگیر



شکل ۵- مدل فرکانس بالای ترانسفورماتور توزیع با خازن‌های کوپلاژ



است. با بررسی شکل‌های (۷) تا (۹) نتایج زیر حاصل می‌شود:

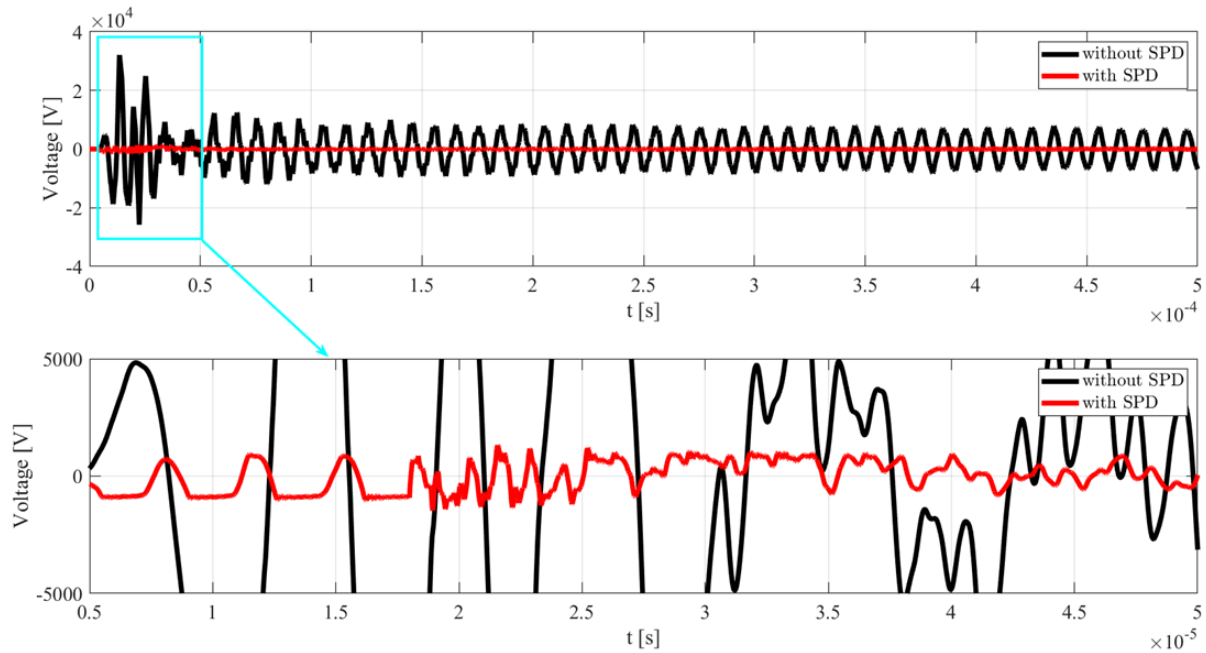
۱- امواج گذرا ناشی از برخورد ضربه ثانویه صاعقه به فیدر توزیع فشار ضعیف می‌تواند باعث سوختن ترانسفورماتور شود و نصب SPD در ثانویه ترانسفورماتور حفاظت کامل از ترانسفورماتور را در برابر این ضربه انجام می‌دهد.

۲- نصب SPD در پای پست باعث افزایش شدت موج ضربه در ورودی مشترکین فیدری که مورد اصابت صاعقه قرار گرفته است می‌شود و بنابراین بر روی این مشترکین اثر منفی دارد. این اثر منفی بر مشترکین انتهایی فیدر شدیدتر است.

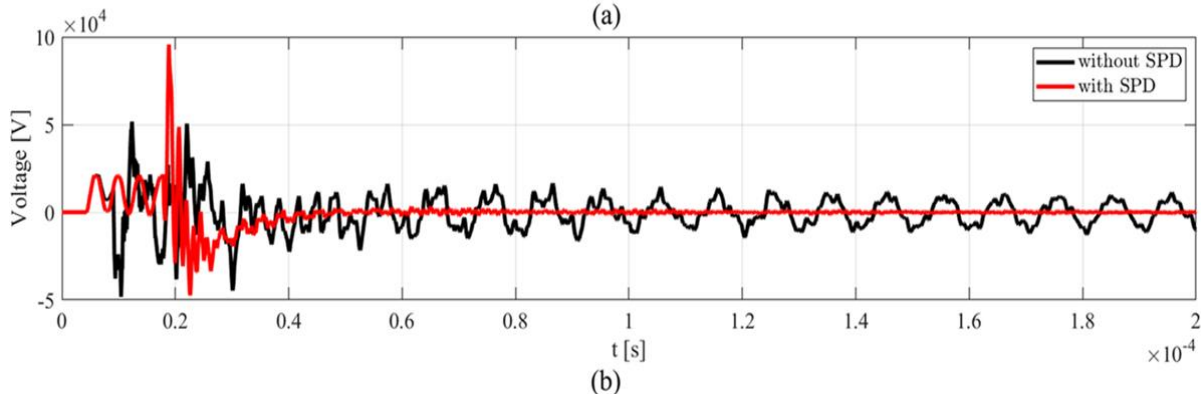
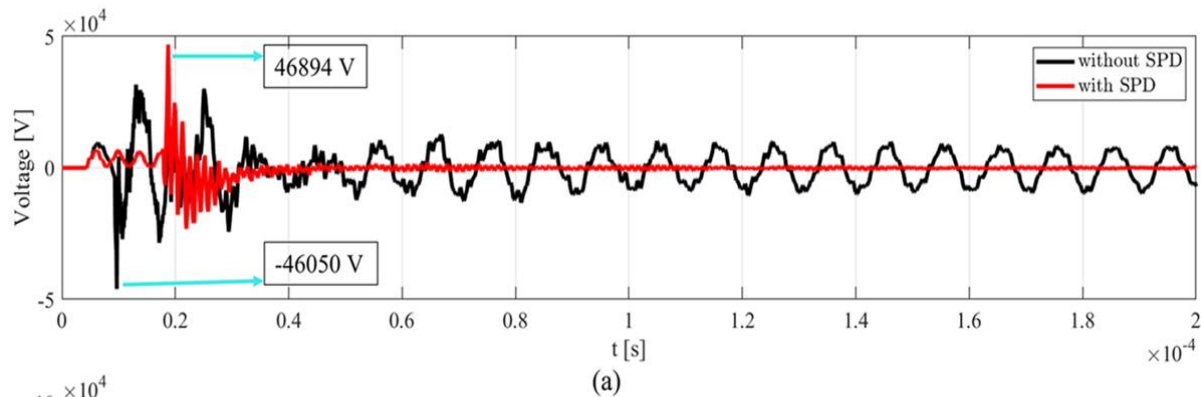
۳- نصب SPD در پای پست باعث کاهش قابل توجه شدت موج ضربه در ورودی مشترکین سایر فیدرهای توزیع فشار ضعیف این پست می‌گردد و از این نظر نقش بسیار مثبتی را دارد. به عبارت دیگر، نصب SPD در ثانویه ترانسفورماتور، مانع انتقال موج ضربه از یک فیدر توزیع، به فیدرهای دیگر همان پست می‌شود.

۴- شدت ضربه‌ها در انتهای فیدرهای توزیع فشار ضعیف شدیدتر از ابتدای آنهاست.

ولتاژهای اندازه‌گیری شده، ولتاژ بین فاز و نول در ثانویه ترانسفورماتور و ورودی مصرف‌کنندگان می‌باشد و فازی که بزرگترین ولتاژ را دارد در شکل‌ها به نمایش درآمده است. هدف از مطالعات در این سناریو بررسی نقش وجود SPD در ثانویه ترانسفورماتور (پای پست توزیع)، بر شدت موج ضربه در پای پست، شدت موج ضربه در ورودی مشترکین فیدری که صاعقه به آن برخورد کرده است و شدت موج ضربه در ورودی مشترکین سایر فیدرها می‌باشد. با مشاهده شکل (۷) مشخص است که برخورد مستقیم یک صاعقه، حتی ضعیف، با شبکه فشار ضعیف با ایجاد اضافه ولتاژهایی با دامنه بزرگتر از سطح استقامت عایقی (BIL) سیم‌پیچ فشار ضعیف که حدود ۳۰ کیلوولت است [۱۸]، می‌تواند باعث صدمه به ترانسفورماتور شود. یادآوری می‌شود که در حال حاضر معمول‌ترین حفاظت ترانسفورماتورهای توزیع در برابر اضافه ولتاژهای گذرا، نصب برقی‌گیر فشار متوسط در سمت اولیه است که هیچ کمکی به حفاظت از ترانسفورماتور در برابر امواج گذرا با منشأ از سمت فشار ضعیف نمی‌کند. در شکل‌های (۸) و (۹) شکل موج ولتاژ فاز و نول مصرف‌کنندگان ابتدا و انتهای هر دو فیدر نشان داده شده



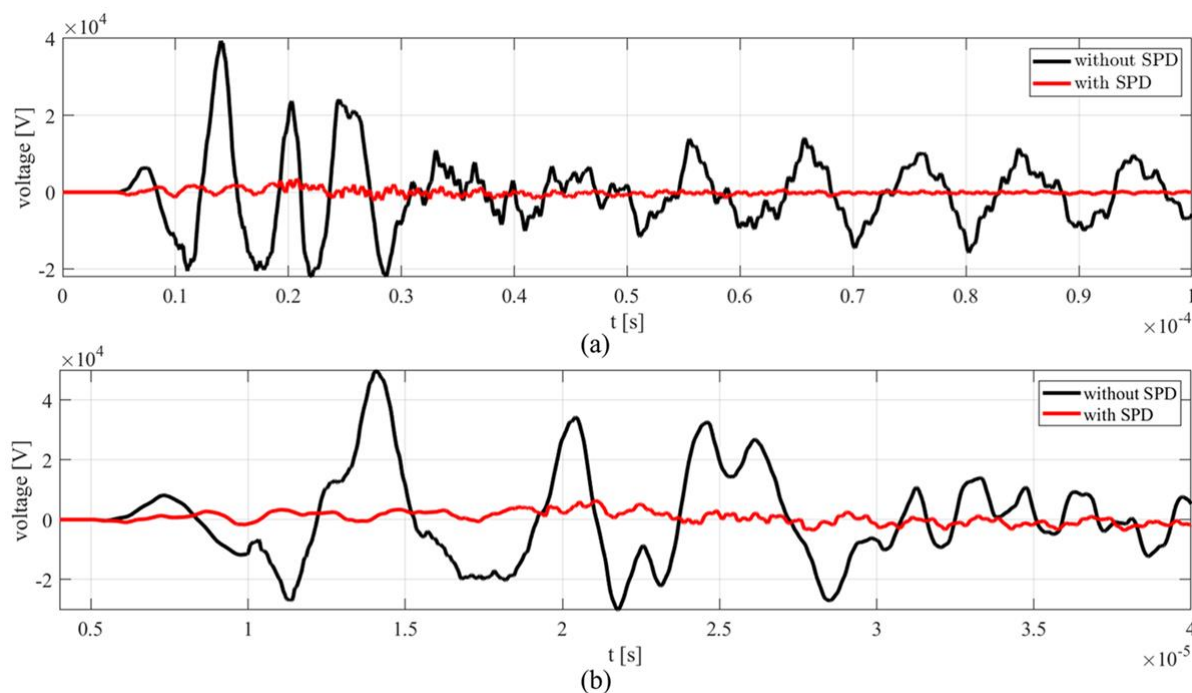
شکل ۷- ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور در دو حالت: بدون نصب و با نصب SPD در سمت فشارضعیف ترانسفورماتور



شکل ۸- ولتاژ در ترمینال مصرف‌کنندگان ابتدا و انتهای فیدر یک، در دو حالت بدون نصب و با نصب SPD در سمت فشارضعیف ترانسفورماتور؛ (a) بار شماره ۱ (b) بار شماره ۵

میکروثانیه) که احتمال وقوع آن ۰.۵٪ است، در فاصله ۱۰۰ متری از خط فشارضعیف، مشابه نقطه ۲ Point در شکل (۱) به زمین برخورد می‌کند. امواج گذرا القاء شده از این صاعقه بر روی خط فشار ضعیف، بر اساس رابطه راسک برگرفته از [۳۲] محاسبه شده است (رابطه ۱).

(ب) برخورد غیرمستقیم صاعقه به شبکه فشارضعیف احتمال برخورد غیرمستقیم صاعقه با شبکه فشارضعیف و همچنین فراوانی وقوع آن به دلیل بزرگتر بودن گستره جغرافیایی مربوطه، بیشتر از صاعقه مستقیم است. از اینرو در این سناریو، یک صاعقه با دامنه ۱۰۰ کیلوآمپر (۱۰/۳۵۰)



شکل ۹- ولتاژ در ترمینال مصرف کنندگان ابتدا و انتهای فیدر دو، در دو حالت بدون نصب و با نصب SPD در سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور؛ (a) بار شماره ۶ (b) بار شماره ۸

نشان داده شده است. همچنین، ولتاژ در ورودی مصرف کنندگان در ابتدا و انتهای فیدر شماره دو، در دو حالت وجود و عدم وجود SPD در پای پست، در شکل (۱۲) نشان داده شده است. با بررسی شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) نتایج زیر حاصل می‌شود:

۱- موج ضربه ناشی از برخورد غیرمستقیم صاعقه به فیدر توزیع فشار ضعیف می‌تواند باعث صدمه به ترانسفورماتور شود و نصب SPD در ثانویه ترانسفورماتور حفاظت کامل از ترانسفورماتور را در برابر این ضربه انجام می‌دهد.
۲- تمامی مصرف کنندگان هر دو فیدر، اضافه ولتاژهای گذرا با دامنه‌های بزرگی را مشاهده می‌کنند ولی مصرف کنندگان انتهای هر دو فیدر همچنان در تهدید بیشتری به سر می‌برند.

۳- نصب SPD در پای پست باعث شده است که علاوه بر ارائه حفاظتی موثر و کامل از ترانسفورماتور، وضعیت مصرف کنندگان ابتدای دو فیدر را نیز بهبود ببخشد. اما همچنان مصرف کنندگان در پوشش حفاظتی ایمن نیستند. لازم به ذکر است حفاظت کامل از مصرف کنندگان فشار ضعیف در برابر امواج گذرا، به عوامل دیگری چون، ولتاژ استقامت تجهیز در برابر موج ضربه (U_w)، طول کابل اتصال SPD، همچنین مشخصات فنی SPD منصوبه دارد. با احتساب این موارد عموماً برای تکمیل یک طرح حفاظتی

$$V = 38.8 \times \frac{h I_s}{d} \quad (1)$$

h: ارتفاع خط؛ d: فاصله خط تا نقطه برخورد صاعقه؛ I_s : پیک جریان صاعقه؛ V: ولتاژ القاء شده)
ولتاژهای القاء شده بر روی خطوط فشار ضعیف (۳ فاز + ۱ نول) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردیده و در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- ولتاژ القاء شده روی خطوط فشار ضعیف

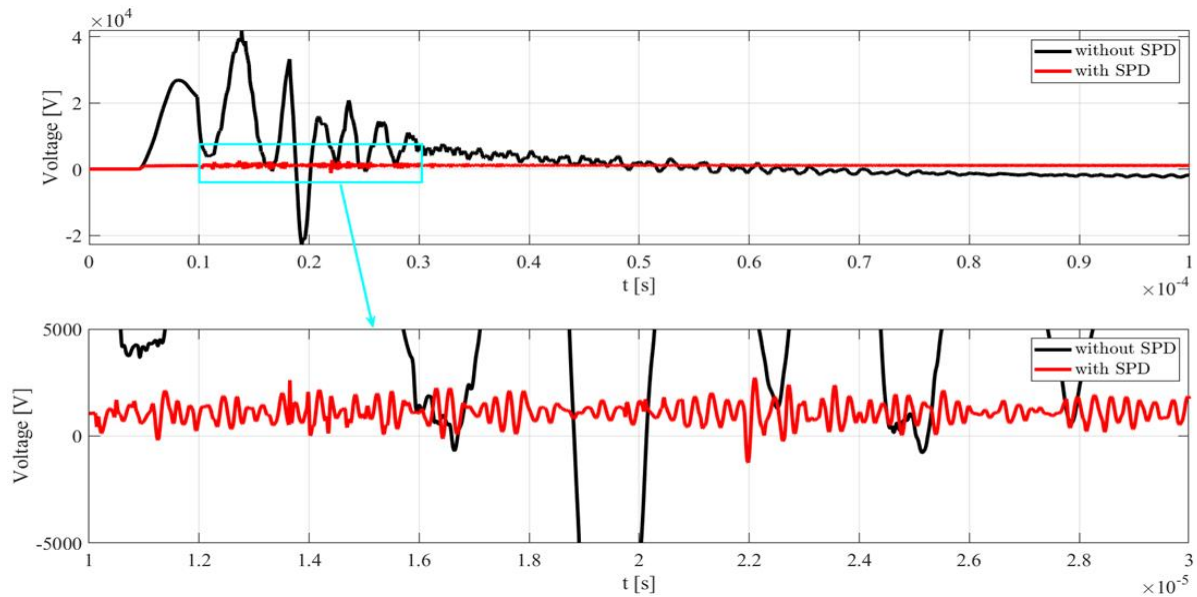
سیم	ولتاژ القاء شده (کیلوولت)
نول	۲۷۱.۶
فاز a	۲۶۳.۸۴
فاز b	۲۵۶.۰۸
فاز c	۲۴۸.۳۲

در شکل (۱۰)، موج ضربه ناشی از برخورد غیر مستقیم صاعقه به فیدر یک، در ثانویه ترانسفورماتور در دو حالت وجود و عدم وجود SPD نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، در حالت نبود SPD در ثانویه ترانسفورماتور، اضافه ولتاژهای گذرای با دامنه بزرگ‌تر از استقامت عایقی سیم‌پیچ فشار ضعیف در ترمینال ثانویه ترانسفورماتور ظاهر می‌شوند. ولتاژ در ورودی مصرف کنندگان در ابتدا و انتهای فیدر شماره یک، در دو حالت وجود و عدم وجود SPD در پای پست، در شکل (۱۱)

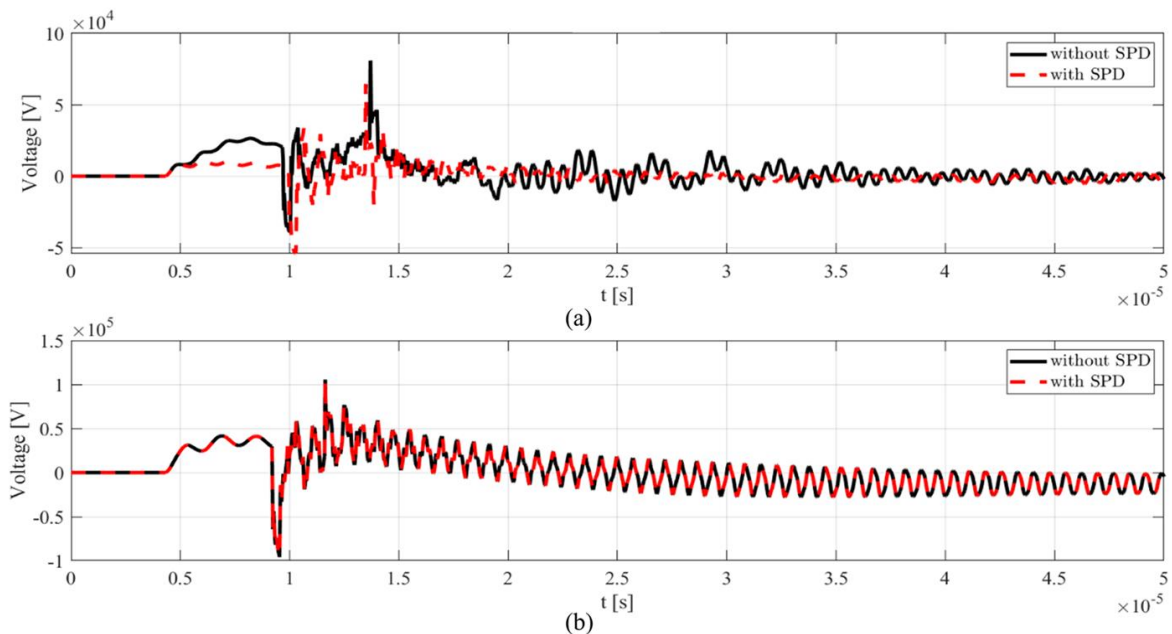
بر اساس پژوهش‌های قبلی، مشخص شده که بهبود وضعیت زمین، عملکرد شبکه فشارضعیف در برابر صاعقه را بهبود می‌بخشد [۱۲، ۳۳-۳۵]. در این بخش، اثر زمین کردن نول شبکه فشارضعیف در نقاط مختلف شبکه، بر روی شدت اضافه ولتاژهای گذرا در چندین حالت مختلف بررسی می‌شود. در دو حالت مختلف، نول شبکه فشارضعیف به یک زمین با مقاومت ۱۵ اهم متصل می‌شود.

باید از SPD های نوع ۲ و ۳ نیز استفاده شود. وضعیت مصرف‌کنندگان انتهایی فیدرها نشان می‌دهد که با نصب SPD در ثانویه ترانسفورماتور، دامنه اضافه ولتاژ برای آنها کاهش یافته است، ولی میزان کاهش، در مقایسه با مصرف‌کنندگان ابتدای فیدر، کمتر است.

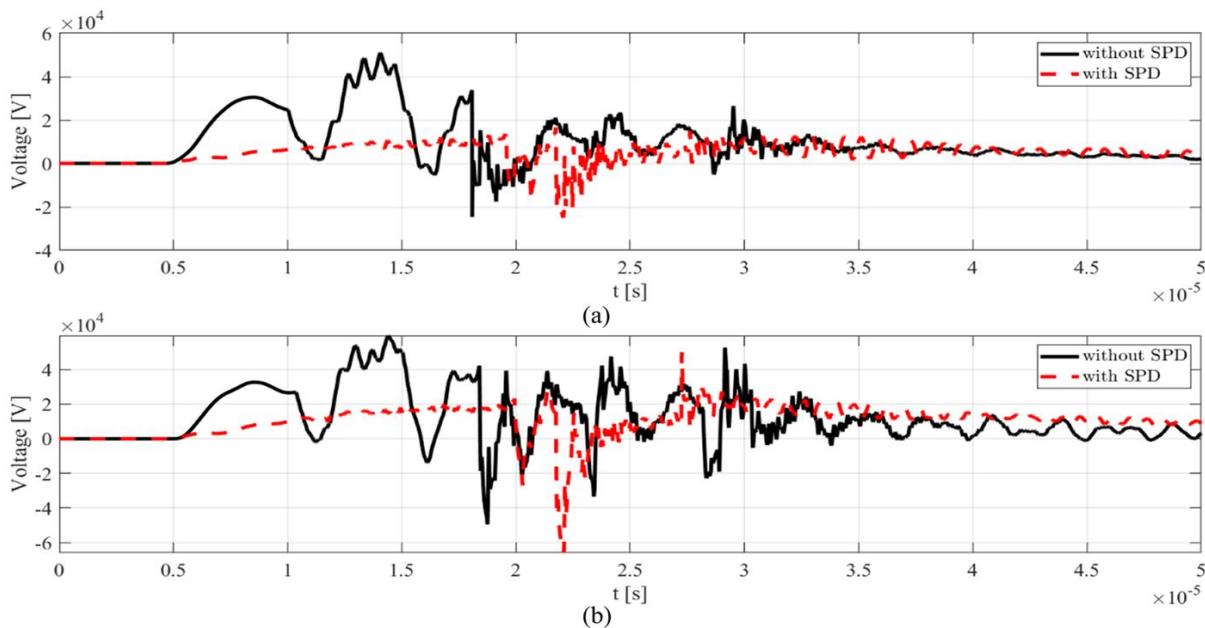
ج) بررسی اثر نول‌های توزیع شده در طول فیدر فشارضعیف



شکل ۱۰- ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور در دو حالت: بدون نصب SPD و با نصب SPD در سمت فشارضعیف ترانسفورماتور



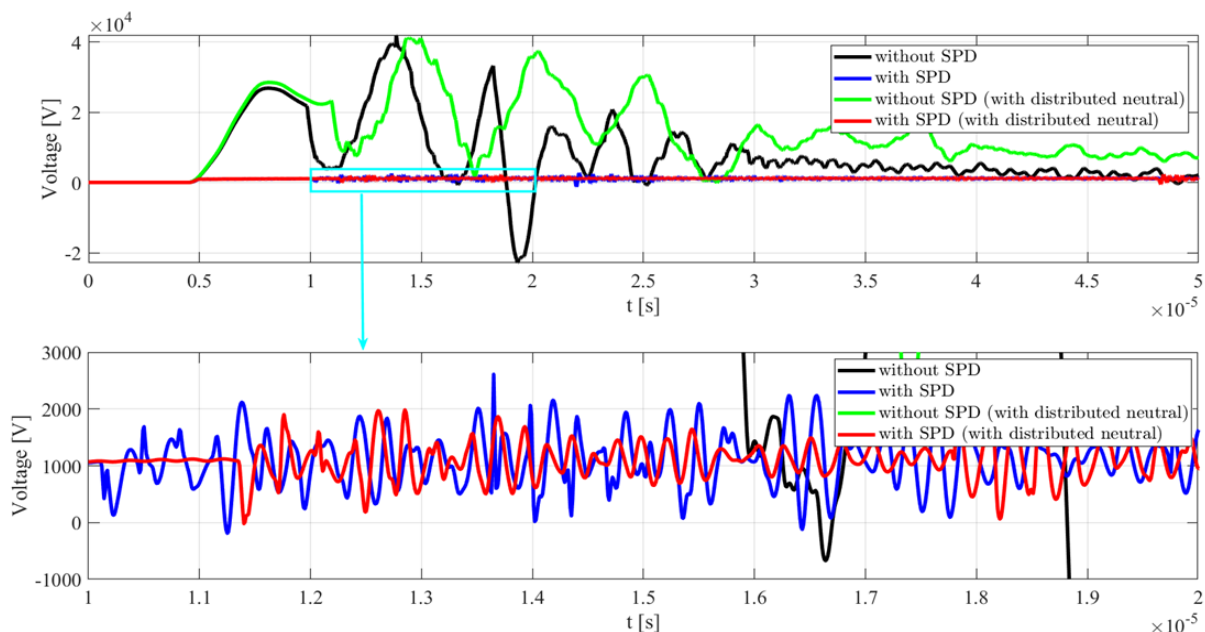
شکل ۱۱- ولتاژ در ترمینال مصرف‌کنندگان ابتدا و انتهای فیدر یک، در دو حالت بدون نصب و با نصب SPD در سمت فشارضعیف ترانسفورماتور؛ (a) بار شماره ۱ (b) بار شماره ۵



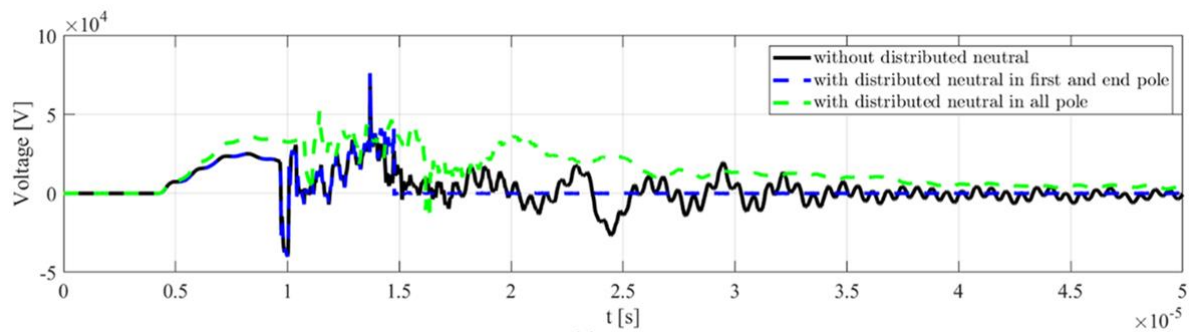
شکل ۱۲- ولتاژ در ترمینال مصرف‌کنندگان ابتدا و انتهای فیدر دو، در دو حالت بدون نصب و با نصب SPD در سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور؛ (a) بار شماره ۶ (b) بار شماره ۸

شکل‌های (۱۳) تا (۱۷) وضعیت ولتاژ در موقعیت‌های مختلف و همچنین حالت‌های مختلف از نظر تعداد نقاط زمین شده در شبکه توزیع فشار ضعیف به نمایش درآمده است. همچنین بیشینه ولتاژ در هر کدام از این نقاط در حالت‌های مختلف، در جدول ۲ درج شده است.

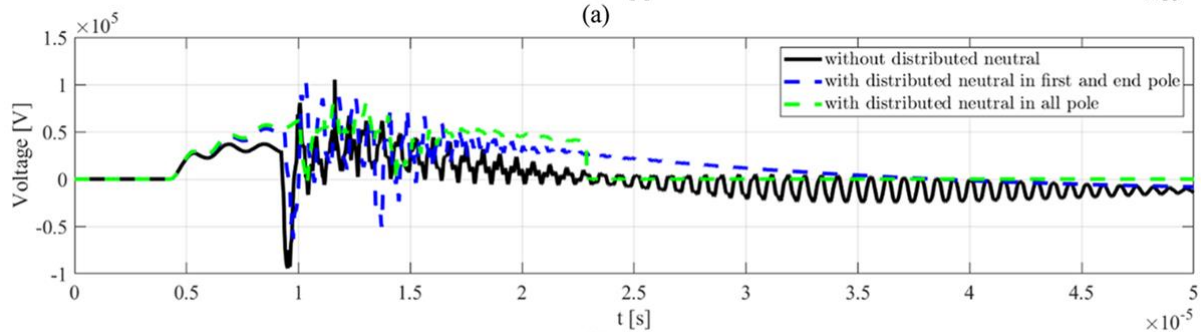
در حالت اول، در ابتدا و انتهای هر دو فیدر، نول شبکه زمین می‌شود و در حالت دوم، نول در تمامی پایه‌های هر دو فیدر زمین می‌شود. در این مطالعه، صرفاً اثر برخورد غیرمستقیم صاعقه به شبکه فشار ضعیف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در



شکل ۱۳- ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور در چهار حالت: بدون نصب و با نصب SPD در سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور و بدون نصب SPD به همراه نول‌های توزیع شده در تمام پایه‌های فیدرها و با نصب SPD در ثانویه ترانسفورماتور به همراه نول‌های توزیع شده در تمام پایه‌های فیدرها

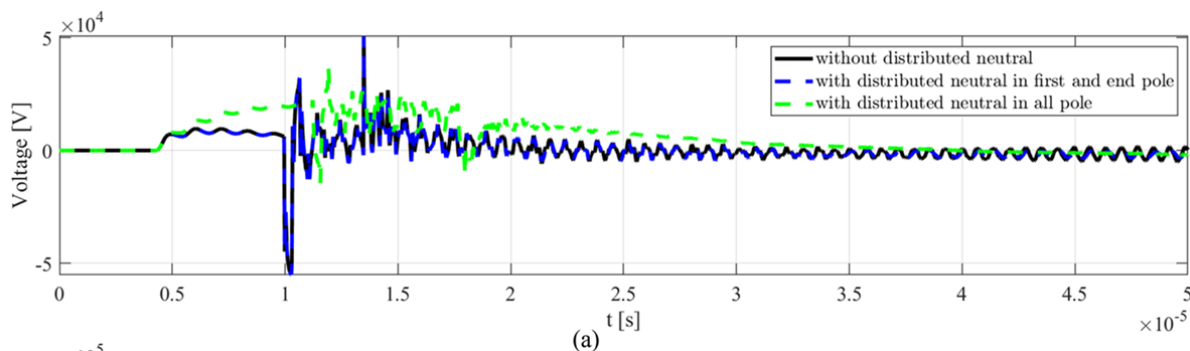


(a)

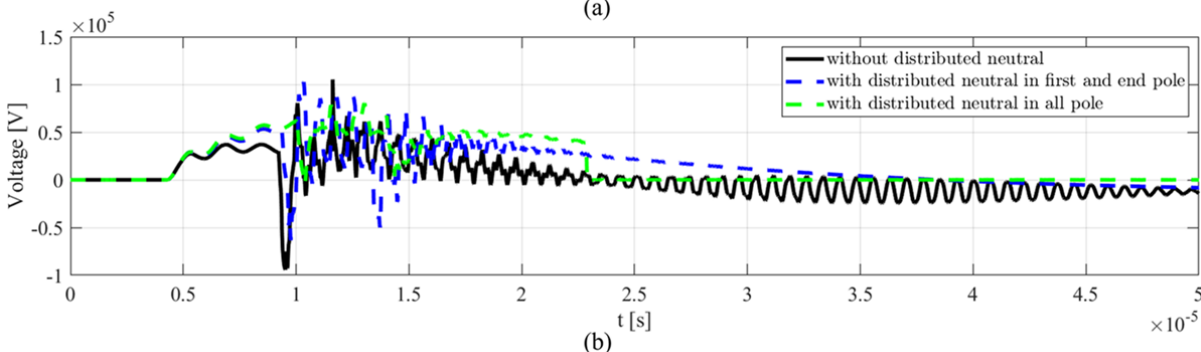


(b)

شکل ۱۴- ولتاژ در ترمینال مصرف‌کنندگان ابتدا و انتهای فیدر یک، بدون نصب SPD در سمت فشارضعیف ترانسفورماتور، در حالات بدون زمین کردن نول و زمین کردن نول در پایه‌های ابتدا و انتهای فیدرها و هم‌هی پایه‌های هر دو فیدر؛ (a) بار شماره ۱ (b) بار شماره ۵



(a)

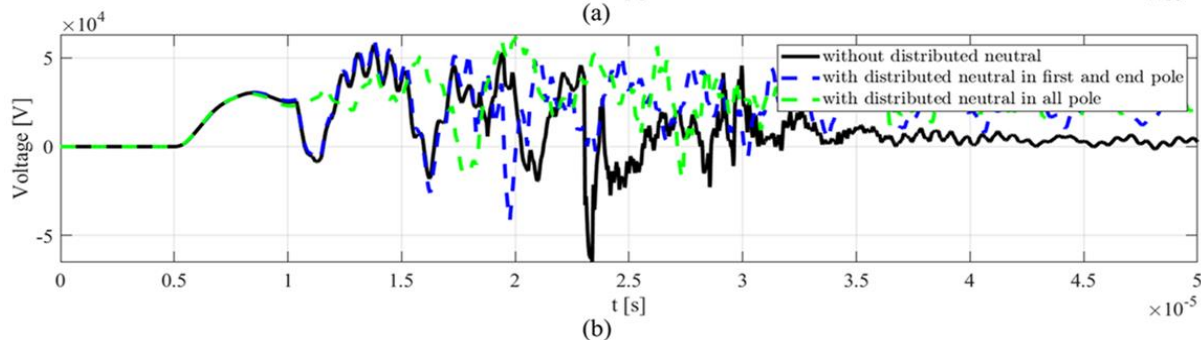
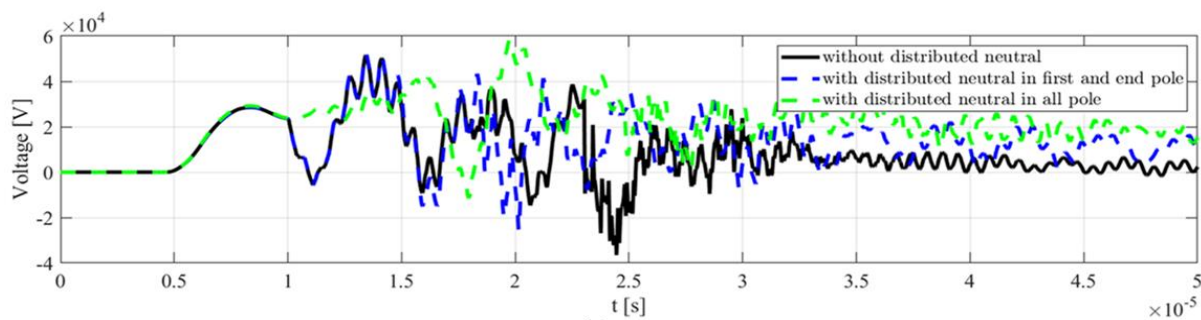


(b)

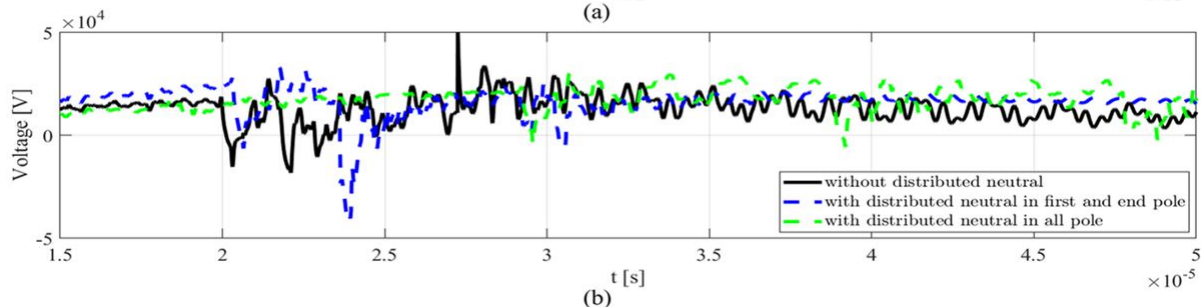
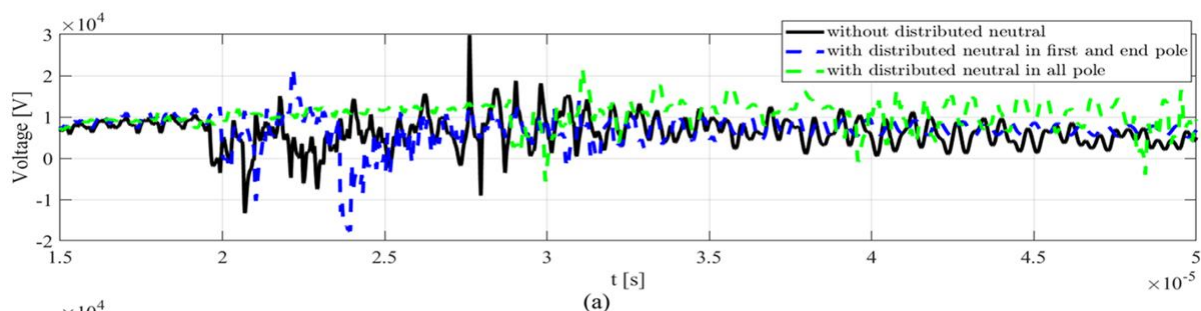
شکل ۱۵- ولتاژ در ترمینال مصرف‌کنندگان ابتدا و انتهای فیدر یک، با نصب SPD در سمت فشارضعیف ترانسفورماتور، در حالات بدون زمین کردن نول و زمین کردن نول در پایه‌های ابتدا و انتهای فیدرها و هم‌هی پایه‌های هر دو فیدر؛ (a) بار شماره ۱ (b) بار شماره ۵

گذار است؛ اما این تاثیر اندک است. با کمی دقت مشخص می‌شود که با تقویت نول شبکه، SPD نصب شده در ثانویه ترانسفورماتور نیز قدری بهتر عمل می‌کند اما تفاوت چندان بارز نیست.

با بررسی‌های نمودارها در شکل‌های (۱۳) تا (۱۷) و همچنین اطلاعات درج شده در جدول (۲) این نتیجه حاصل می‌شود که افزایش نقاط زمین شدن نول شبکه فشارضعیف، مقداری روی کاهش دامنه اضافه ولتاژها اثر



شکل ۱۶- ولتاژ در ترمینال مصرف‌کنندگان ابتدا و انتهای فیدر دو، بدون نصب SPD در سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور، در حالات بدون زمین کردن نول و زمین کردن نول در پایه‌های ابتدا و انتهای فیدرها و همی پایه‌های هر دو فیدر؛ (a) بار شماره ۶ (b) بار شماره ۸



شکل ۱۷- ولتاژ در ترمینال مصرف‌کنندگان ابتدا و انتهای فیدر دو، با نصب SPD در سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور، در حالات بدون زمین کردن نول و زمین کردن نول در پایه‌های ابتدا و انتهای فیدرها و همی پایه‌های هر دو فیدر؛ (a) بار شماره ۶ (b) بار شماره ۸

عملکرد شبکه فشار ضعیف دارای کابل‌های خودنگهدار در برابر وقایع صاعقه، مهم است.

در این بخش، بررسی شدت اضافه ولتاژهای گذرا در یک شبکه فشار ضعیف (شکل ۱) با کابل خودنگهدار و مقایسه عملکرد آن با سیم لخت هوایی انجام می‌شود. در مطالعات این بخش، از سیم لخت هوایی که در شبیه‌سازی‌های قبلی استفاده شد استفاده می‌گردد

(د) بررسی اثر کابل خودنگهدار در شبکه فشار ضعیف

در سالیان اخیر استفاده از کابل‌های خودنگهدار به دلیل مزیت‌هایی همانند، افزایش قابلیت اطمینان شبکه توزیع کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش تلفات، کاهش خطرات آتش‌سوزی و غیره، رو به افزایش گذاشته است. حتی در برخی از شبکه‌های قدیمی، سیم‌های لخت هوایی با کابل خودنگهدار جایگزین شده‌اند. بنابراین، بررسی

جدول ۳- بیشینه ولتاژ در موقعیت‌های مختلف در شبکه توزیع فشار ضعیف در شرایط مختلف

ولتاژ	حالات	بدون زمین کردن نول			زمین کردن نول در پایه‌های ابتدا و انتهای فیدر		
		بدون زمین کردن نول	پایه‌های ابتدا و انتهای فیدر	همه‌ی پایه‌های هر دو فیدر	بدون زمین کردن نول	پایه‌های ابتدا و انتهای فیدر	همه‌ی پایه‌های هر دو فیدر
ثانویه ترانسفورماتور		بدون نصب SPD در ثانویه ترانسفورماتور (V)			با نصب SPD در ثانویه ترانسفورماتور (V)		
		۴۱۷۷۲	۳۹۱۹۳	۴۱۱۶۷	۲۷۲۰	۲۶۲۵	۲۲۳۶
	بار شماره ۱	۷۶۳۲۸	۷۶۲۸۱	۵۲۱۶۵	-۵۵۱۴۳	-۵۵۱۴۶	۳۷۰۳۴
	بار شماره ۵	۱۰۵۱۱۲	۱۰۲۶۱۸	۸۰۷۵۰	۱۰۵۱۹۱	۱۰۲۵۵۰	۸۰۳۹۴
	بار شماره ۶	۵۱۵۶۱	۵۲۰۵۳	۵۸۱۴۰	۲۹۸۸۶	۲۱۸۷۳	۲۱۸۰۱
	بار شماره ۸	-۶۵۰۸۸	۵۹۸۸۹	۶۲۶۵۳	۵۰۱۹۳	-۴۱۷۲۲	۳۰۱۱۹

و برای کابل خودنگدار از کابل $۷۰ + ۱۲۰ * ۳$ میلی‌متر مربع استفاده می‌شود (شکل ۶). در این سناریو، یک صاعقه با دامنه ۳۰ کیلوآمپر و شکل موج $۱۰/۳۵۰$ میکروثانیه، که بر اساس استاندارد IEC 62305-1 احتمال وقوعی برابر با ۶۰% دارد، در فاصله ۱۲۰ متری از ترانسفورماتور، با فاز A شبکه فشار متوسط در نقطه Point 3 برخورد مستقیم می‌کند (شکل ۱). در شکل (۱۸)، ولتاژ در ثانویه ترانسفورماتور در دو حالت: شبکه فشار ضعیف با سیم لخت هوایی و شبکه فشار ضعیف با کابل خودنگهدار هوایی ترسیم شده است. با بررسی این شکل و مقایسه دو حالت استفاده از کابل خودنگهدار و سیم‌های لخت هوایی می‌توان دید که کابل‌های خودنگهدار توانسته‌اند دامنه اضافه ولتاژهای گذرا در سطح فشار ضعیف را تا حدودی کاهش دهند. در شکل‌های (۱۹) و (۲۰)، ولتاژ در ورودی مشترکین ابتدا و انتهای هر دو فیدر، در دو حالت شبکه فشار ضعیف سیم لخت هوایی و کابل خودنگهدار هوایی، بدون نصب SPD در سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور نشان داده شده است. با بررسی شکل‌های (۱۸) تا (۲۰) چند نکته حاصل می‌شود:

۱- کابل خودنگهدار بطور کلی سطح اضافه‌ولتاژهای گذرا در شبکه فشار ضعیف را بطور موثری کاهش می‌دهد. و این نتیجه به دلیل کوپلینگ الکترومغناطیسی ذاتی بالاتر، در هادی‌های کابل خودنگهدار، نسبت به سیم‌های لخت هوایی است [۳۶]. کاهش کوپلینگ

۲- استفاده از کابل‌های خودنگهدار باعث می‌شود که دامنه اضافه ولتاژها می‌گردد.

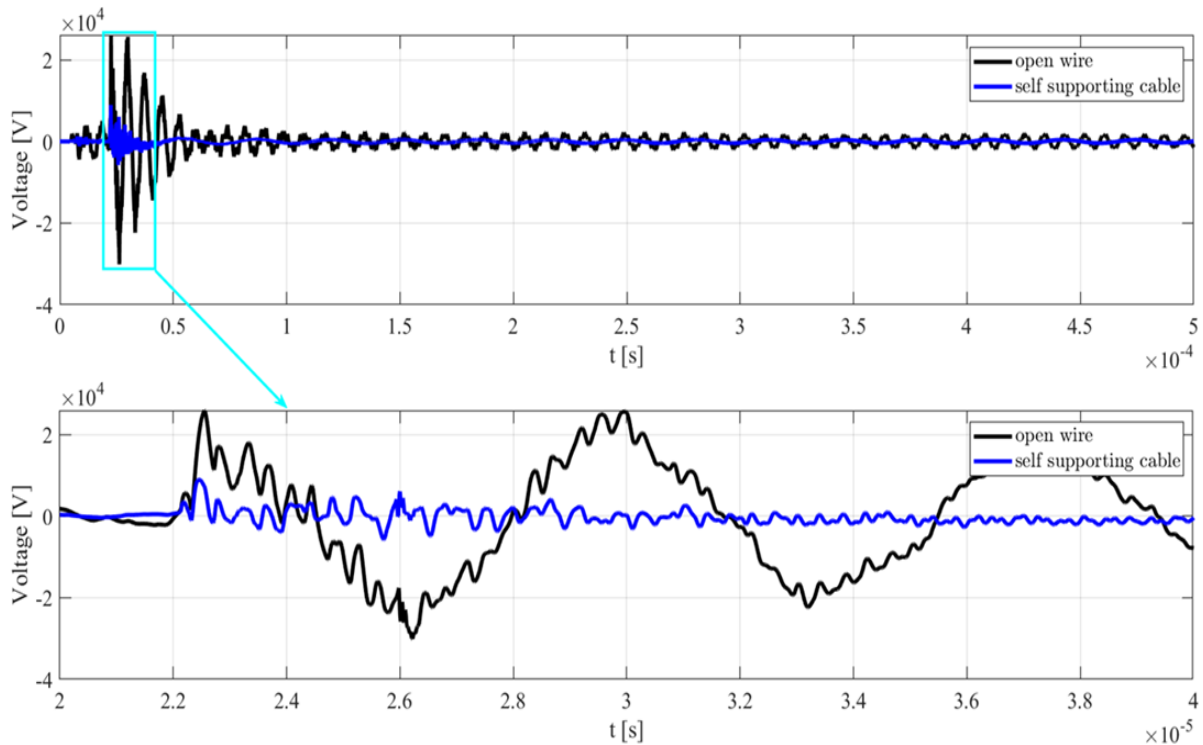
۳- استفاده از کابل‌های خودنگهدار باعث می‌شود که دامنه اضافه ولتاژهای گذرا در ترمینال مصرف‌کنندگان انتهایی فیدر (بارهای ۵ و ۸) نیز به اندازه مصرف‌کنندگان ابتدای فیدر (بارهای ۱ و ۶) کاهش داشته باشد. بطوریکه مشخص است، شدت اضافه ولتاژها در طول فیدر بطور یکنواخت‌تری نسبت به سیم لخت هوایی کاهش پیدا کرده است.

۴- با وجود اینکه استفاده از کابل خودنگهدار توانسته حفاظت نسبتاً خوبی برای شبکه فشار ضعیف ایجاد کند، اما هنوز تجهیزات مصرف‌کنندگان در حفاظت کامل به سر نمی‌برند.

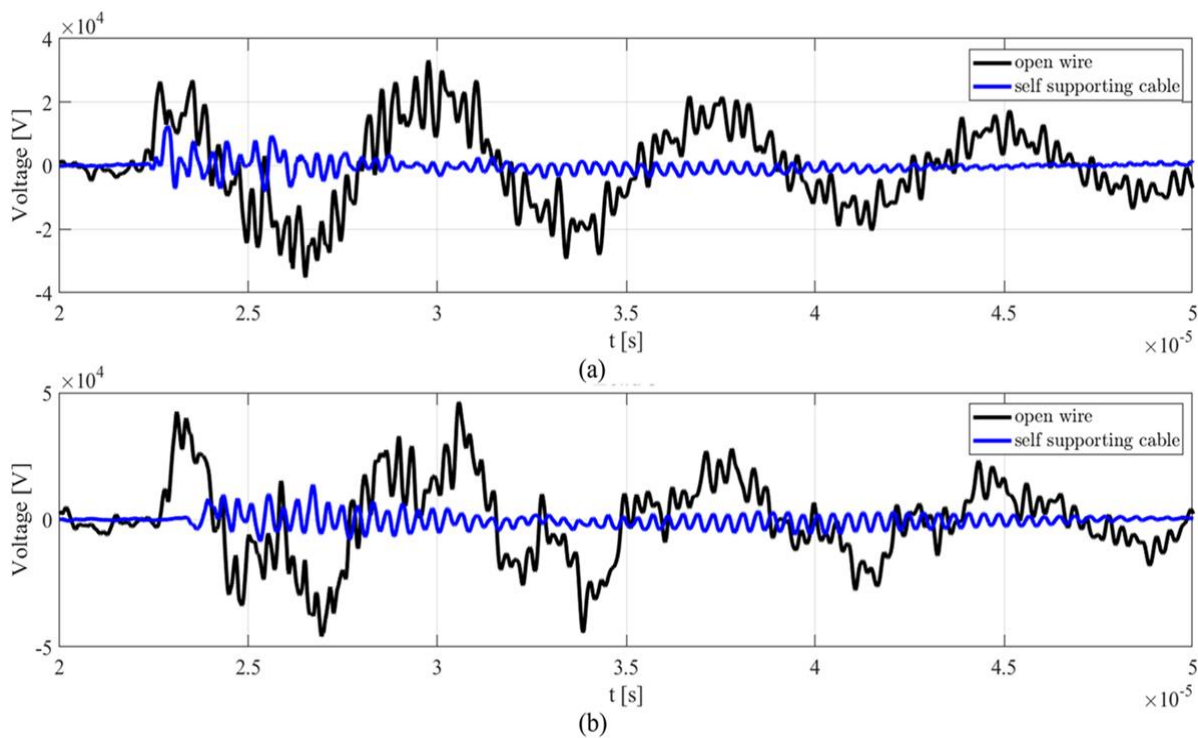
۵- نکته دیگری که با مقایسه اشکال شماره (۷) و شماره (۱۸) دیده می‌شود، که با وجود اینکه صاعقه برخورد کرده با شبکه فشار ضعیف دامنه کمتر (۵ کیلوآمپر) و شکل موج کوچک‌تری ($۸/۲۰$ میکروثانیه) در مقایسه با صاعقه برخورد کرده با شبکه فشار متوسط (۳۰ کیلوآمپر، با شکل موج $۱۰/۳۵۰$ میکروثانیه) داشته، ولی دامنه اضافه ولتاژهای گذرا در ثانویه ترانسفورماتور توزیع در حالت برخورد مستقیم صاعقه با شبکه فشار ضعیف شدیدتر شده است (جدول ۴).

جدول ۴- ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور در دو سناریوی مختلف

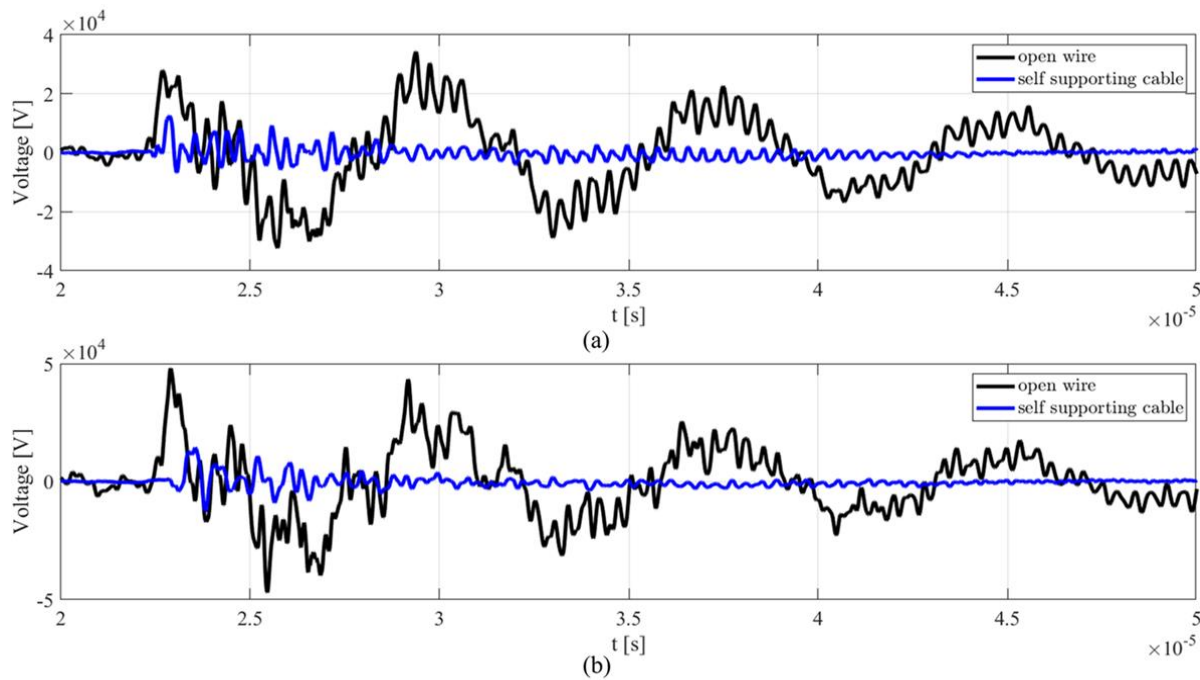
ولتاژ	حالات	
	برخورد مستقیم صاعقه با شبکه فشار متوسط	برخورد مستقیم صاعقه با شبکه فشار ضعیف
ثانویه ترانسفورماتور	(V)	
	-۳۰۱۱۷	۳۲۰۶۷



شکل ۱۸- ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور در دو حالت: شبکه فشار ضعیف با سیم لخت هوایی و شبکه فشار ضعیف با کابل خودنگهدار هوایی



شکل ۱۹- ولتاژ در ترمینال مصرف کنندگان ابتدا و انتهای فیدر یک، در دو حالت شبکه فشار ضعیف با سیم لخت هوایی و کابل خودنگهدار هوایی، بدون نصب SPD در سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور؛ (a) بار شماره ۱، (b) بار شماره ۵



شکل ۲۰- ولتاژ در ترمینال مصرف کنندگان ابتدا و انتهای فیدر دو، در دو حالت شبکه فشارضعیف با سیم لخت هوایی و کابل خودنگهدار هوایی، بدون نصب SPD در سمت فشارضعیف ترانسفورماتور؛ (a) بار شماره ۶، (b) بار شماره ۸.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، اثر زمین کردن متعدد سیم نول شبکه توزیع فشار ضعیف و همچنین استفاده از کابل‌های خودنگهدار بجای سیم لخت در شبکه توزیع، بر ضربه‌های ناشی از برخورد مستقیم و غیر مستقیم صاعقه به شبکه، مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج نشان داد که زمین کردن متعدد سیم نول در شبکه توزیع فشار ضعیف، تاثیر قابل توجهی بر کاهش شدت ضربه‌ها ندارد. اما، استفاده از کابل‌های خودنگهدار بجای سیم لخت در شبکه توزیع، تاثیر بسزایی در کاهش شدت ضربه‌ها در سطح توزیع فشار ضعیف دارد. البته باید در نظر داشت که استفاده از کابل خودنگهدار احتمال وقوع پدیده فرورزونانس را افزایش می‌دهد. علاوه بر موضوعات فوق، تاثیر نصب SPD در ثانویه ترانسفورماتور توزیع (پای پست) و میزان کارایی آن در حفاظت از ترانسفورماتور توزیع در برابر ضربه‌های ناشی از برخورد مستقیم و غیر مستقیم صاعقه به شبکه توزیع فشار ضعیف و همچنین نقش مثبت و منفی آن بر ضربه‌های گذرا در ورودی مشترکین مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- نصب SPD در ثانویه ترانسفورماتور توزیع، در هر حالتی بر سرکوب موج‌های ضربه در همان محل و حفاظت از ترانسفورماتور در برابر برخورد مستقیم و

غیر مستقیم صاعقه با شبکه فشارضعیف کمک شایانی می‌کند. البته باید اضافه گردد، همواره SPD باید در نزدیکترین فاصله ممکن به تجهیز مورد حفاظت نصب گردد. استانداردهای IEC 61643-12 و IEC 60364-4-44، پیشنهاد کرده‌اند این فاصله کمتر از ۱۰ متر باشد. در صورتیکه این امکان فراهم نبود، باید به کمک SPDهای مناسب دیگر و با رعایت اصول هماهنگی عایقی، طرح حفاظتی را کامل نمود.

- در صورت اجرای نول‌های توزیع شده در طول شبکه فشار ضعیف، اثرگذاری SPD نصب شده در پای پست در کاهش شدت اضافه ولتاژهای گذرا، بیشتر می‌شود.
- در مطالعات انجام شده بطور مشخصی دیده شد که مصرف‌کننده‌های انتهایی در فیدرهای توزیع فشار ضعیف، در حالات مختلف، اضافه ولتاژهای شدیدتری را متحمل می‌شوند. بنابراین در طرح‌های حفاظتی باید به این موضوع توجه شود.
- زمانی که یک فیدر توزیع مورد برخورد مستقیم و یا غیر مستقیم صاعقه قرار می‌گیرد، وجود SPD در پای پست، علاوه بر حفاظت ترانسفورماتور، باعث کاهش قابل توجه شدت امواج گذرا برای همه مشترکین در فیدرهای مجاور می‌شود.

مراجع

- [1] Z. Kasza, and K. Kovacs. "Risk Analysis About Lightning Protection for Buildings Focusing on Risk of Loss of Human Life." *Procedia Manufacturing* 32 (2019): 458-65.
- [2] N. Tenzin. "Risk Assessment of Buildings Due to Lightning Impulses: A Case Study at College of Science and Technology." *Bhutan Journal of Research and Development*, no. 2 (2023).
- [3] M. Darveniza, Z. Flisowski, A. Kern, E.U. Landers, G. LoPiparo, C. Mazzetti, A. Rousseau, and J. Sherlock. "Application Problems of the Probabilistic Approach to the Assessment of Risk for Structures and Services." (2005).
- [4] F. Napolitano, F. Tossani, J.D.R. Penaloza, A. Borghetti, G.L. Piparo, C. Mazzetti, and C.A. Nucci. "Statistical Assessment of Lightning-Induced Overvoltages in Low Voltage Lines." *Paper presented at the 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, 2018.
- [5] A. Ametani, and T. Kawamura. "A Method of a Lightning Surge Analysis Recommended in Japan Using Emtp." *IEEE Transactions on Power Delivery* 20, no. 2 (2005): 867-75.
- [6] 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." *Modeling in Engineering* (2023).
- [7] I.A. Metwally, and F.H. Heidler. "Computation of Transient Overvoltages in Low-Voltage Installations During Direct Strikes to Different Lightning Protection Systems." *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility* 49, no. 3 (2007): 602-13.
- [8] P.S. Georgilakis, and A.G. Kagiannas. "A Novel Validated Solution for Lightning and Surge Protection of Distribution Transformers." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 63 (2014): 373-81.
- [9] C. Ndungu, J. Nderu, L. Ngoo, and P. Hinga. "A Study of the Root Causes of High Failure Rate of Distribution Transformer-a Case Study." *International Journal of Engineering and Science* 6, no. 2 (2017): 14-18.
- [10] D.T. Subcormnittee,. "Secondary (Low-Side) Surges in Distribution Transformers." *IEEE Transactions on Power Delivery* 7, no. 2 (1992): 746.
- [11] 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." *Modeling in Engineering* (2023).
- [12] P.N. Mikropoulos, T.E. Tsovilis, Z. Politis, and A.G. Kagiannas. "Evaluation of Fast-Front Overvoltages Arising at a 20/0.4 Kv Distribution Transformer." (2010).
- [13] C.W. Plummer, G.L. Goedde, E.L. Pettit, J.S. Godbee, and M.G. Hennessey. "Reduction in Distribution Transformer Failure Rates and Nuisance Outages Using Improved Lightning Protection Concepts." *IEEE Transactions on Power Delivery* 10, no. 2 (1995): 768-77.
- [14] M.A Abdallah. "The effect of the secondary loads on the voltage surges transferred through distribution transformers." *In Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials*, 2005.(ISEIM 2005)., vol. 3, pp. 800-803. IEEE, 2005.
- [15] M. Fernando, and V. Cooray. "Lightning Surges at Distribution Transformer Secondary." *Paper presented at the 2010 5th International Conference on Industrial and Information Systems*, 2010.
- [16] G. Goedde, L.A. Kojovic, and J.J. Woodworth. "Surge arrester characteristics that provide reliable overvoltage protection in distribution and low-voltage systems." In 2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. no. 00CH37134), vol. 4, pp. 2375-2380. IEEE, 2000.
- [17] A. De Conti, F.H. Silveira, and S. Visacro. "On the Role of Transformer Grounding and Surge Arresters on Protecting Loads from Lightning-Induced Voltages in Complex Distribution Networks." *Electric Power Systems Research* 113 (2014): 204-12.
- [18] Z.G. Datsios, P.N. Mikropoulos, Z. Politis, A.G. Kagiannas, and T.E. Tsovilis. "Protection of Distribution Transformer against Arising or Transferred Fast-Front Overvoltages: Effects of Surge Arrester Connection Conductors Length." *Paper presented at the Proceedings of the 18th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Seoul, Republic of Korea, 2013.

- [19] N. Tsukamoto. "Surge Withstand Capability of Metal Oxide Varistors for 10/350 μ S Waveform." *Paper presented at the 2011 International Symposium on Lightning Protection*, 2011.
- [20] Devices-Part, Low-Voltage Surge Protective. "11: Surge Protective Devices Connected to Low-Voltage Power Systems Requirements and Test Methods, Document Iec 61643-11." *Geneva, Switzerland* (2011).
- [21] A. Rousseau, and T. Perche. "Coordination of Surge Arresters in the Low Voltage Field." *Paper presented at the Proceedings of INTELEC 95. 17th International Telecommunications Energy Conference*, 1995.
- [22] Martinez-Velasco, J.A. *Power System Transients: Parameter Determination*. CRC press, 2017.
- [23] S.M. Seyyedbarzegar, M. Mirzaie, and M. Khodsuz. "A New Approach to Electrical Modeling of Surge Arrester Considering Temperature Effect on Vi Characteristic." *Measurement* 111 (2017): 295-306.
- [24] Siemens. "Overvoltage Protection Devices." In *Siemens LV 10*. Germany, 2019.
- [25] Siemens. "Station and Intermediate Class Surge Arresters." In *Energy Management*, 76. Germany, 2015.
- [26] M.A. Sargent, and M. Darveniza. "Tower Surge Impedance." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, no. 5 (1969): 680-87.
- [27] C.P. Braz, A. Piantini, M. Shigihara, and M. C.E. Santo Ramos. "Analysis of the Disruptive Effect Model for the Prediction of the Breakdown Characteristics of Distribution Insulators under Non-Standard Lightning Impulses." *Paper presented at the 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2012.
- [28] J.C. Das. "Surges Transferred through Transformers." *Paper presented at the Conference Record of the 2002 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (Cat. No. 02CH37352)*, 2002.
- [29] G.B. Lo Piparo, R. Pomponi, T. Kisielewicz, C. Mazzetti, A. Rousseau, and V. Crevenat. "Performance Evaluation of a Coordinated Surge Protective Devices System." *Paper presented at the 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, 2020.
- [30] T. Kisielewicz, G.B. Lo Piparo, and C. Mazzetti. "Simplified Approach for Protection of Apparatus Powered by an Hv/Lv Transformer against Lightning Strokes to the Structure." *Paper Presented at the 2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, 2022.
- [31] A. Ametani, , and T. Kawamura. "A Method of a Lightning Surge Analysis Recommended in Japan Using Emtp." *IEEE Transactions on Power Delivery* 20, no. 2 (2005): 867-75.
- [32] S. Rusck. "Induced Lightning over-Voltage on Power Transmission Lines with Special Reference to the Overvoltage Protection of Low-Voltage Networks." *Trans. Royal Institute of Technology* 120 (1958).
- [33] S. Yasui, T. Kano, N. Triruttanapiruk, and T. Tsuchida. "Lightning Surge Overvoltage Protection for Low-Voltage Equipment Placed Outdoors in Tt System." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* (2023).
- [34] T.I. Aravanis, E.C. Pyrgioti, and I.F. Gonos. "Lightning-Induced Overvoltages in the Hellenic Electricity Distribution Network." *Paper Presented at the 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2016.
- [35] A. De Conti, and S. Visacro. "Evaluation of Lightning Surges Transferred from Medium Voltage to Low-Voltage Networks." *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution* 152, no. 3 (2005): 351-56.
- [36] R.C. Dugan, and S.D. Smith. "Low-Voltage-Side Current-Surge Phenomena in Single-Phase Distribution Transformer Systems." *IEEE Transactions on Power Delivery* 3, no. 2 (1988): 637-47.