



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

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

ISSN: 2783-2538



Research Article

Modeling and evaluation of the performance of hybrid HV lines against transient lightning and switching surges

Ahmad Moradi ^a, Mohsen Niasati ^{a,*} 

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

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-**-**

Revised: 2024-**-**

Accepted: 2024-**-**

Keywords:

Hybrid transmission lines;

GIS;

Transient lightning surges;

Switching.

ABSTRACT

Due to economic and technical constraints, hybrid lines (OH line - cables) remain necessary in suburban and urban areas. A critical challenge in studying these hybrid lines is their performance under transient lightning and switching surges. These transient overvoltages risk a significant threat to the insulation of power grid equipment, with cables being particularly vulnerable. This article analyzes the critical parameters influencing the magnitude of transient overvoltages in hybrid lines and explores various methods for mitigating these surges. Utilizing EMTP-RV software for modeling and simulation, the article meticulously investigates the maximum stresses imposed on cable insulation by overvoltages. Additionally, it presents solutions and recommendations for reducing transient overvoltages to acceptable levels.

DOI: <https://doi.org/>

© 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: mnicasati@semnan.ac.ir

How to cite this article:

مدلسازی و ارزیابی عملکرد خطوط فشارقوی ترکیبی در برابر امواج گذرای صاعقه و کلیدزنی

احمد مرادی^۱، محسن نیاستی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: **/1403/1403	خطوط ترکیبی (خط هوایی-کابلی) به دلایل اقتصادی و فنی در حومه و داخل شهرهای بزرگ اجتناب ناپذیر هستند. یکی از مسائل مهم در مطالعات خطوط ترکیبی، عملکرد این نوع خطوط در برابر امواج گذرای صاعقه و کلیدزنی است. اضافه ولتاژهای گذرای صاعقه و کلیدزنی از عوامل اصلی تهدید عایقی تجهیزات شبکه‌های قدرت هستند و سرکابل‌ها بیشتر در معرض این تهدیدات قرار دارند. در این مقاله، ضمن مدلسازی و شبیه‌سازی فرکانس بالای خطوط ترکیبی و تجهیزات شبکه، نقش پارامترهای مهم و تاثیر گذار بر دامنه اضافه ولتاژهای گذرای تولید شده در این خطوط و راه کارهای مختلف کاهش دامنه امواج گذرای صاعقه و کلیدزنی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام شده در نرم افزار EMTP-RV، حداکثر تنش‌های ناشی از اضافه ولتاژ تجربه شده توسط عایق کابل به دقت تجزیه و تحلیل شده است. همچنین برای کاهش دامنه اضافه ولتاژهای گذرا به حد قابل قبول، راهکارهایی مطالعه و پیشنهاداتی ارائه شده است.
پژیرش مقاله: **/1403/1403	
واژگان کلیدی:	
خطوط انتقال ترکیبی،	
پست‌های GIS،	
امواج گذرای صاعقه،	
کلیدزنی،	
برقگیرها.	

DOI: <https://doi.org/>

© 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/>)

۱- مقدمه^۱

صاعقه و کلیدزنی، از عوامل اصلی تهدید عایقی تجهیزات شبکه‌های قدرت می‌باشند. عموماً سرکابل‌ها یا محل اتصال سیم‌های لخت خطوط هوایی به کابل‌ها بیشتر در معرض تهدید عایقی قرار دارند [۳-۵]. بررسی‌های جدید نشان می‌دهد که در خطوط ترکیبی AC/DC، عوامل ساختاری مانند طول کوپلینگ و موقعیت خطا تأثیر قابل توجهی بر پاسخ گذرای سیستم دارند [۶]. تاکنون مطالعات متعددی در خصوص بررسی رفتار خطوط هوایی فشارقوی و یا خطوط کابلی در برابر امواج گذرای صاعقه انجام شده است

استفاده از خطوط ترکیبی (خط هوایی-کابل فشارقوی) در حومه و داخل شهرهای بزرگ به دلایل مختلف اقتصادی و فنی اجتناب ناپذیر می‌باشد [۱، ۲]. همچنین رفتار کلی خطوط هوایی متصل به پست‌های گازی (GIS)، با توجه به مشخصه خازنی این نوع پست‌ها، تا حدود زیادی مشابه رفتار خطوط ترکیبی می‌باشد. یکی از مسائل مهم در مطالعات خطوط ترکیبی، عملکرد این نوع خطوط در برابر امواج گذرای صاعقه و کلیدزنی می‌باشد. اضافه ولتاژهای گذرای

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

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

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

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

GIS، عملکرد یک خط ۴۰۰ کیلوولت ترکیبی (خط هوایی-کابل فشارقوی)، با تمرکز بر روی شناسایی عوامل موثر بر شدت اضافه ولتاژها در محل سرکابل شدگی (اتصال خط هوایی به کابل فشارقوی) بررسی شده است. موارد زیر نوآوری‌های این مقاله است که بر اساس خلاء تحقیقاتی موجود شرح داده شده است:

- ۱- بررسی اثر مقاومت زمین چاه برقگیر منصوبه در محل سرکابل شدگی، بر روی عملکرد برقگیر در کاهش دامنه اضافه ولتاژهای گذرا
- ۲- بررسی اثر نصب چند برقگیر در دکل‌های منتهی به محل سرکابل شدگی، بر شدت اضافه ولتاژهای گذرا
- ۳- بررسی اثر اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی وصل کلید قدرت یک پست GIS و بررسی اثر PIR

با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام شده در نرم افزار EMTP-RV، به دقت حداکثر تنش‌های ناشی از اضافه ولتاژ تجربه شده توسط عایق کابل، تجزیه و تحلیل می‌شود. همچنین برای کاهش دامنه اضافه ولتاژهای گذرا به حد قابل قبول، راهکارهایی مطالعه و پیشنهاداتی ارائه خواهد شد.

۲- شبکه مورد مطالعه و مدلسازی فرکانس بالای تجهیزات شبکه

۲-۱- ساختار کلی شبکه تحت مطالعه

برای بررسی و مطالعه عملکرد خطوط ترکیبی در برابر امواج گذرای صاعقه و کلیدزنی، از دو شبکه ۴۰۰ کیلوولت با ساختار نشان داده شده در شکل‌های (۱) و (۲) استفاده می‌شود. در این مطالعات، صرفاً چند اسپن انتهایی خطوط هوایی (منتهی به پست فشارقوی ۴۰۰ کیلوولت)، مورد مدلسازی و مطالعه قرار می‌گیرند. در شبکه اول مطابق شکل (۱)، خط هوایی با یک کابل فشارقوی زمینی وارد پست می‌شود و در اینجا برای مطالعات عملکرد خط ترکیبی (خط هوایی-کابلی) در برابر برخورد مستقیم صاعقه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شبکه دوم مطابق شکل (۲)، خروجی ۴۰۰ کیلوولت پست GIS توسط یک کابل

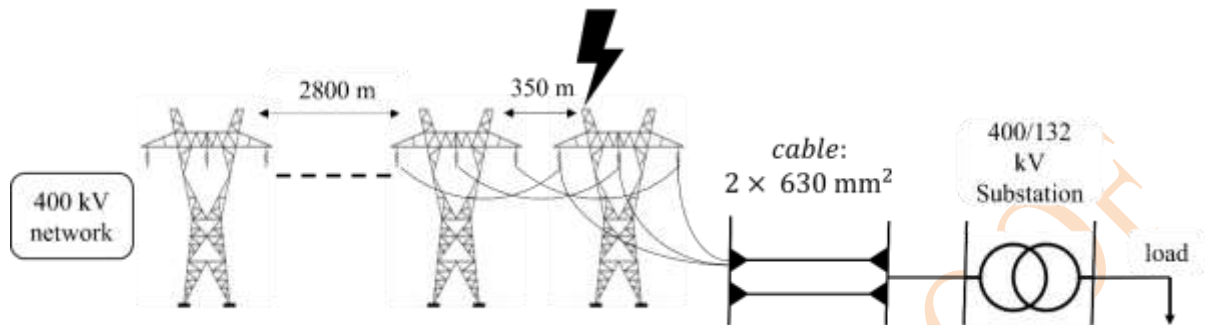
[۷]. اما در این مقاله، ضمن مدلسازی و شبیه‌سازی فرکانس بالای خطوط ترکیبی و تجهیزات شبکه، نقش پارامترهای مهم و تاثیر گذار بر دامنه اضافه ولتاژهای گذرای تولید شده در این خطوط و راه کارهای مختلف کاهش دامنه امواج گذرای صاعقه و کلیدزنی مورد بررسی و تحلیل قرار خواهند گرفت [۸، ۹]. امپدانس موجی هادی‌های لخت خطوط هوایی چند برابر امپدانس موجی کابل‌ها می‌باشد. از اینرو به دلیل تغییر شدید امپدانس موجی در محل اتصال خطوط هوایی و کابل‌ها (در محل سر کابل‌ها)، رفتار امواج گذرا در این محل ممکن است بسیار خطرناک برای عایق سرکابل‌ها باشد [۱۰، ۱۱]. علاوه بر این، سرعت انتشار موج در خط هوایی تقریباً دو برابر کابل است. هنگامی که یک کابل بین دو بخش نسبتاً طویل خط هوایی قرار می‌گیرد، ممکن است انعکاس سریع موج رخ بدهد. در صورت برخورد صاعقه، این می‌تواند منجر به اضافه ولتاژهای قابل توجهی در محل اتصال خط با کابل شود، به ویژه زمانی که کابل با طول نسبتاً کوتاه استفاده می‌شود [۱۲، ۱۳]. بنابراین امواج گذرا به عنوان یک چالش در شبکه‌های قدرت، برای کابل‌های زیرزمینی در خطوط انتقال هیبرید تلقی می‌شود. در حال حاضر تحقیقات قابل توجهی در رابطه با اثرات دامنه و شکل موج صاعقه، محل برخورد صاعقه، الگوهای شکست عایقی، ضربه برگشتی، اثر نصب برقگیر، مقاومت زمین پای دکل، بر روی دامنه اضافه ولتاژهای گذرای خطوط انتقال انجام شده است [۱۰، ۱۴، ۱۵]. با این وجود همچنان خطوط ترکیبی فشارقوی با چالش‌هایی روبرو هستند. عدم توجه به عملکرد برقگیر منصوبه در محل سرکابل شدگی و عدم بررسی اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی کلید قدرت یک پست GIS، را می‌توان از خلاءهای تحقیقاتی در این حوزه نام برد.

برقگیرهای فشارقوی به عنوان یک راهکار شناخته شده برای حفاظت در برابر اضافه ولتاژهای گذرا مورد استفاده است، که انتخاب آن توسط استاندارد IEC 60099-4 تشریح شده است [۱۶، ۱۷]. در این مقاله با مطالعه روی امواج گذرای ناشی از برخورد صاعقه و کلیدزنی در پست

مدلسازی و ارزیابی عملکرد خطوط فشارقوی ترکیبی در برابر امواج گذرای صاعقه و کلیدزنی

بررسی جداگانه عملکرد خطوط ترکیبی در مواجهه با امواج گذرای صاعقه و کلیدزنی در نظر گرفته شده‌اند. در جدول شماره (۱) مشخصات ساختاری شبکه‌های مطالعاتی ذکر گردیده است.

فشارقوی زمینی به خط هوایی متصل می‌شود. این شبکه برای بررسی عملکرد خط ترکیبی در برابر امواج گذرای کلیدزنی پست GIS، در نظر گرفته شده است. در شکل (۱)، پست فشارقوی از نوع AIS و در شکل (۲)، پست از نوع GIS می‌باشد. این دو نوع پست به منظور



شکل ۱- شبکه قدرت متشکل از خط هوایی، کابل و پست فشارقوی هوایی (AIS)، مطالعه اثر برخورد صاعقه.



شکل ۲- شبکه قدرت متشکل از خط هوایی، کابل و پست گازی (GIS)، مطالعه اثر کلیدزنی پست GIS.

جدول ۱- مشخصات ساختاری شبکه‌های مطالعاتی.

نوع کابل	طول کابل (متر)	نوع هادی	طول خط هوایی (متر)	نوع اتصال	منبع اضافه ولتاژ گذرا	نوع پست
XLPE 630 mm ²	۳۰۰	ACSR - Curlew	۳۱۵۰	خط هوایی به کابل	برخورد صاعقه	AIS
	۱۰۰۰					
	۳۰۰۰					
XLPE 630 mm ²	۱۰۰۰	ACSR - Curlew	۳۱۵۰	کابل به خط هوایی	کلیدزنی	GIS

بطور مثال احتمال وقوع صاعقه منفی با جریان ۱۰۰ کیلوآمپر تقریباً برابر ۰.۵٪ می‌باشد. پارامترهای مدل سیگنر شکل موج صاعقه، از روابط (۲) و (۳) بدست می‌آیند [۱۹]، [۲۰].

$$S_m = 6.5I_l^{0.376} \quad (kA/\mu s) \quad (2)$$

$$t_f = 0.906I_l^{0.411} \quad (\mu s) \quad (3)$$

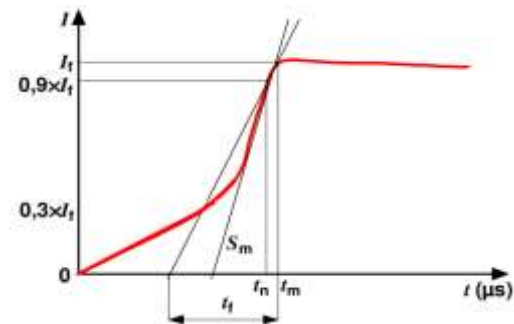
طبق پیشنهاد CIGRE، زمان پشت موج، برای موج اصلی صاعقه منفی با احتمال وقوع ۰.۵٪، ۲۰۰ میکروثانیه است

۲-۲- مدلسازی شکل موج جریان صاعقه

برای مدلسازی صاعقه از مدل ارائه شده توسط WG 33-01 CIGRE مطابق شکل (۳)، استفاده می‌شود. مقدار پیک دامنه جریان صاعقه (موج اصلی جریان صاعقه منفی) بوسیله رابطه (۱) تعیین می‌گردد [۱۸].

$$p(I_0 \geq i_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{i_0}{31}\right)^{2.6}} \quad (1)$$

[۲۱]. در این مقاله برای شبیه‌سازی‌ها، فرض می‌شود یک موج صاعقه ۱۰۰ کیلوآمپری مستقیماً به سیم فاز A خطوط تحت مطالعه برخورد نماید.



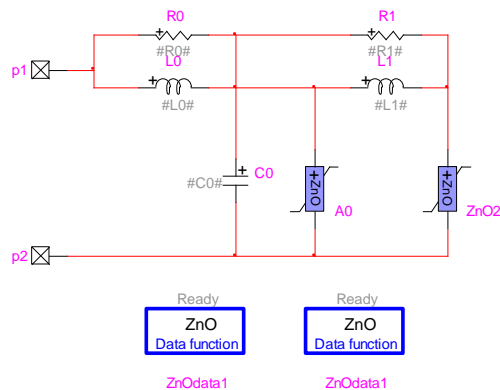
شکل ۳- شکل موج جریان صاعقه مطابق مدل CIGRE [۲۲].

۲-۳- مدلسازی خط هوایی و کابل زمینی

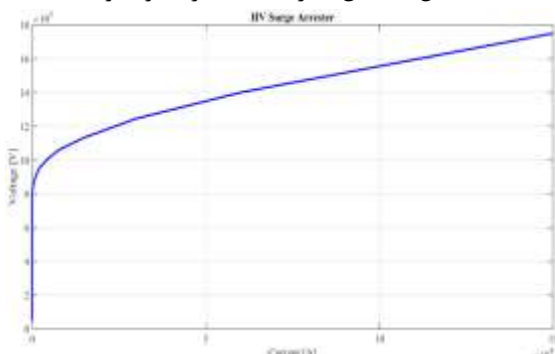
خط ترکیبی (هوایی-کابلی) شامل بخش هوایی به طول ۳۱۵۰ متر با هادی ACSR نوع Curlew در پیکربندی تک‌مداره و سه‌فاز است که به کابل‌های فشارقوی با عایق نوع XLPE با سطح مقطع ۶۳۰ میلی‌متر مربع متصل می‌شود. کابل‌ها به صورت دفنی در عمق یک متری و با فاصله ۰.۵ متری از یکدیگر نصب شده‌اند. اتصال بین خط هوایی و کابل از طریق سرکابل و ترمینال‌های استاندارد انجام می‌گیرد.

خطوط هوایی به صورت یک خط تک‌مداره با هادی ACSR با نام تجاری Curlew با ظرفیت جریانی ۱۲۲۷ آمپر در نظر گرفته شده‌اند. طول بخش انتهایی خط هوایی برابر ۳۱۵۰ متر و با اسپن معادل ۳۵۰ متر در نظر گرفته شده است. همچنین خطوط مذکور دارای ۲ سیم محافظ فولادی با روکش گالوانیزه می‌باشند. کابل فشارقوی مشخص شده در شکل‌های (۱) و (۲)، دارای سطح مقطع ۶۳۰ میلی‌متر مربع بوده که به صورت تک‌کور و دو رشته در هر فاز (در فاصله ۰.۵ متری از هم و در عمق ۱ متری از سطح زمین) به صورت دفنی نصب شده است. مشخصات مورد نیاز برای شبیه‌سازی کابل فشارقوی و هادی‌های خط

منحنی مشخصه (V-I) برقیگرمورد نظر (برقیگرم مدل 3EP6 شرکت زیمنس) مطابق شکل (۷) می‌باشد [۳۱].



شکل ۶- مدل مداری IEEE برای برقیگرم.



شکل ۷- منحنی مشخصه برقیگرم مدل 3EP6 شرکت زیمنس.

۴-۶- پست GIS

به دلیل وجود مولفه‌های فرکانس بسیار بالا در اضافه ولتاژهای بسیار سریع (VFTO) ناشی از عملیات سوئیچینگ در پست‌های GIS، اکثر تجهیزات این نوع پست‌ها با ظرفیت‌های خازنی مدل شوند. همچنین عموماً پست‌های گازی نسبت به پست‌های معمولی (AIS)، ابعاد کوتاه‌تر دارند، از اینرو می‌توان از المان‌های تجمیع شده برای مدلسازی اجزاء پست‌های گازی استفاده نمود. ساختار مدلسازی پست GIS تحت مطالعه و پارامترهای آن مطابق شکل (۸) و جدول شماره (۳) می‌باشد [۳۲-۳۵].

۳- شبیه‌سازی‌ها و تحلیل نتایج

در این بخش، سناریوهای مختلفی به شرح زیر جهت شناسایی عوامل موثر بر شدت اضافه ولتاژهای گذرا در محل سر کابل خط هیبرید (محل اتصال کابل به خط هوایی) در

سیستم ۴۰۰ کیلوولت، با ظرفیت خازنی ۵ میکوفاراد مدل می‌شود. در اینجا، شکست عایقی با استفاده از مشخصه ولت-زمان پیش‌بینی شده برای عایق، با یک شاخه جرقه‌زن مدل می‌شود [۲۹]. ولتاژ شکست زنجیره مقرر توسط رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$U_{breakdown} = K_1 + \frac{K_2}{t^{0.75}} \quad (5)$$

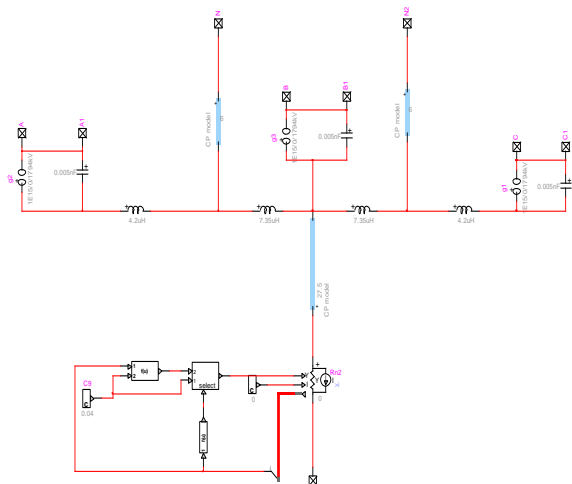
$$K_1 = 400.l$$

$$K_2 = 710.l$$

که در آن، l طول زنجیره مقرر و t زمان سپری شده پس از موج صاعقه است. برای مدلسازی مقاومت پای دکل، از مدل پیشنهادی استاندارد IEC 60071-4 (مدل یونیزاسون خاک) مطابق رابطه (۶) استفاده می‌شود:

$$R_t = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I_r}{I_g}}}; \quad I_g = \frac{E_0 \rho}{2\pi R_0} \quad (6)$$

که در آن، R_0 مقاومت فرکانس پایین زمین، I_r جریان تزریقی به زمین، I_g جریان بحرانی یونیزه کننده خاک و E_0 ولتاژ یونیزه شدن خاک (۴۰۰ کیلوولت مطابق IEC 60071-4) می‌باشد.



شکل شماره ۵- مدل مداری دکل فشارقوی در نرم‌افزار EMTP

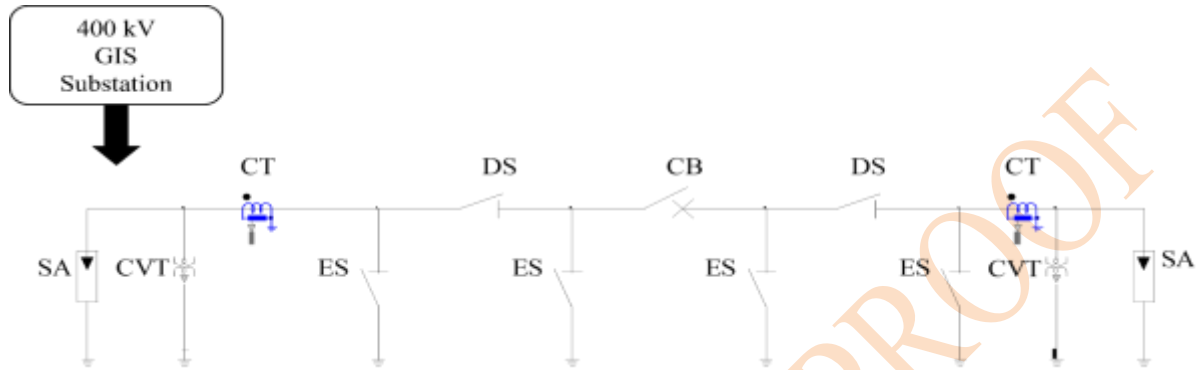
۲-۵- برقیگرم

شیب موج گذرای ورودی بر روی مشخصه‌های ولتاژ-جریان برقیگرم‌های اکسید فلزی (MOV) اثرگذار است [۲۸]. از اینرو در این مقاله از مدل فرکانس بالای IEEE (مطابق شکل ۶) برای مدلسازی برقیگرم استفاده شده است [۳۰].

مدلسازی و ارزیابی عملکرد خطوط فشارقوی ترکیبی در برابر امواج گذرای صاعقه و کلیدزنی

- (۳) اثر مقاومت شبکه زمین بر فیکر بر روی عملکرد حفاظتی بر فیکر (برخورد مستقیم صاعقه با سیم فاز)
 (۴) اثر نصب چند بر فیکر در دکل های منتهی به محل سرکابل (برخورد مستقیم صاعقه با سیم فاز)

- دو مدار نمونه مطابق شکل های ۱ و ۲، در محیط نرم افزار EMTP-RV مورد مطالعه قرار گرفته است.
 (۱) اثر مقاومت زمین پای دکل ها (برخورد مستقیم صاعقه با سیم محافظ)
 (۲) اثر نصب و عدم نصب بر فیکر در محل سرکابل (برخورد مستقیم صاعقه با سیم فاز)



شکل ۸- نمودار تک خطی پست GIS.

جدول ۳- اطلاعات تجهیزات پست GIS برای مدلسازی [۳۰، ۳۱، ۳۳].

مشخصات مدلسازی	تجهیز
خازن 200 pF نسبت به زمین	CT
خازن 5 pF نسبت به زمین	CVT
خط انتقال: $Z = 85 \Omega$, $v = 285 \text{ m}/\mu\text{s}$	باسبار GIS
خازن 4 pF نسبت به زمین	ارت سوئیچ
خازن 15 pF سری با مقاومت 0.1 نسبت به زمین	بر فیکر
خط با $Z = 250 \Omega$ با خازن 200 pF نسبت به زمین	پوشینگ
خط انتقال: $Z = 45 \Omega$, $v = 165 \text{ m}/\mu\text{s}$	کابل XLPE
خط انتقال: $Z = 350 \Omega$, $v = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$	خط هوایی

سرکابل نیز بر فیکر نصب نشده است. شکل موج ولتاژ در محل سرکابل به ازای مقادیر ۱۰، ۲۵ و ۱۰۰ اهم برای مقاومت زمین پای دکل مفروض، مطابق شکل (۷) می باشد. همانطور که قابل پیش بینی بود با کاهش مقاومت زمین پای دکل، دامنه اضافه ولتاژهای گذرا در سرکابل و شدت جرقه برگشتی روی آن کاهش می یابد.

۳-۲- تاثیر نصب بر فیکر در محل اتصال کابل به خط هوایی بر دامنه ولتاژهای گذرا

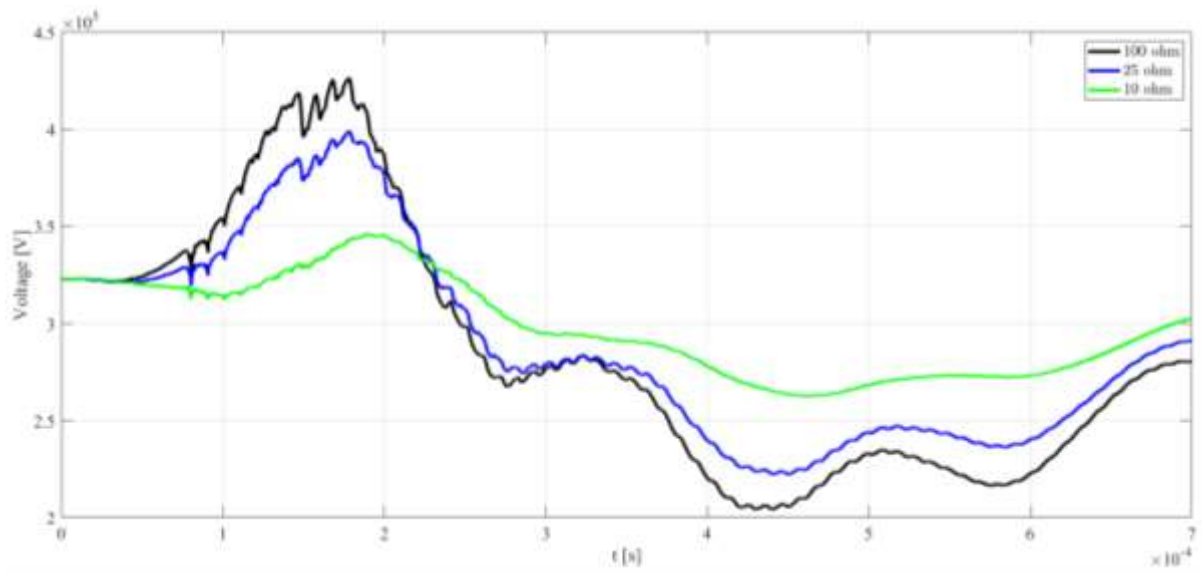
در این حالت با فرض برخورد مستقیم صاعقه با دامنه ۵۰ کیلوآمپر به هادی فاز A، دامنه ولتاژ گذرای تولید شده در محل سرکابل برای دو حالت بدون وجود بر فیکر و با وجود

- (۵) اثر طول کابل (برخورد مستقیم صاعقه با سیم فاز)
 (۶) اثر وجود PIR و عدم وجود PIR روی کلید قدرت (کلیدزنی پست GIS)

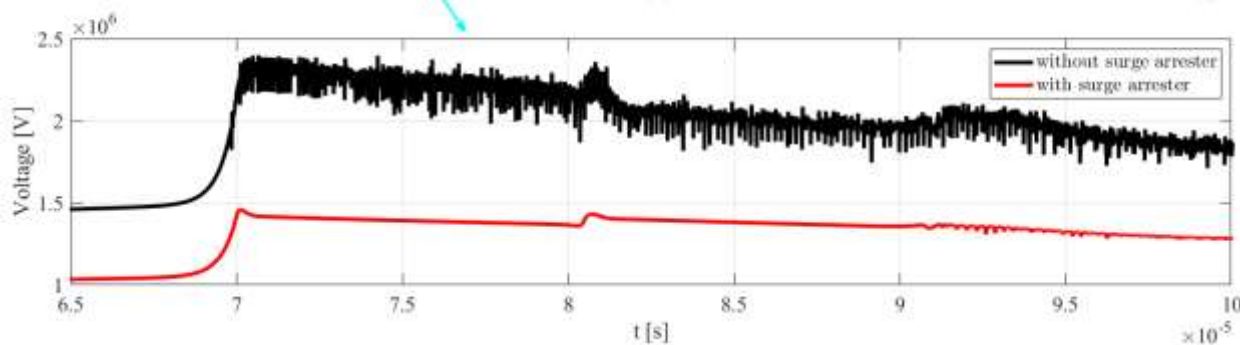
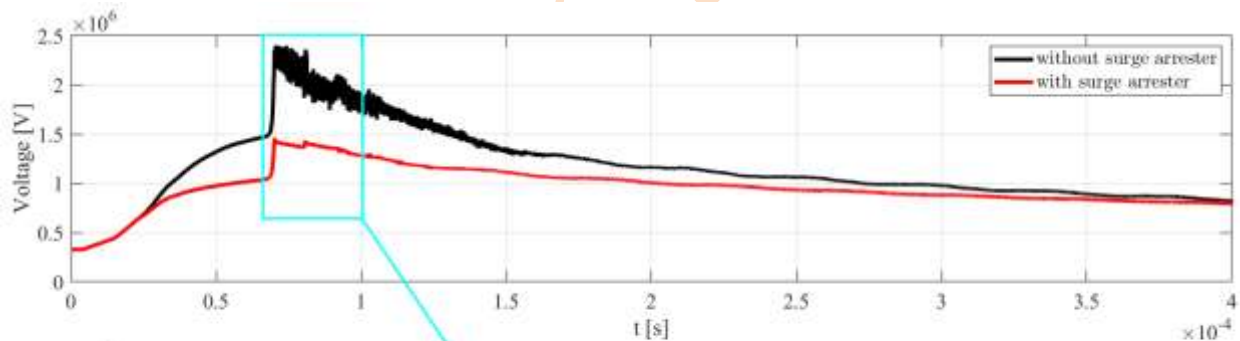
۳-۱- تاثیر مقاومت زمین پای دکل ها بر دامنه ولتاژهای گذرا ناشی از برخورد صاعقه به سیم محافظ در این حالت فرض شده است یک صاعقه ۱۰۰ کیلوآمپری به سیم محافظ نزدیک آخرین دکل خط هوایی برخورد نماید و اثر مقاومت زمین پای دکل بر دامنه ولتاژهای گذرای تولید شده در محل سرکابل مورد بررسی قرار گیرد. همچنین طول کابل ۱ کیلومتر فرض شده و در محل

سرکابل (۱۴۲۵ کیلوولت) بسیار بیشتر بوده و باعث وقوع جرقه می‌شود. اما با نصب برقگیر، دامنه اضافه ولتاژ ظاهر شده در محل سرکابل به طور قابل ملاحظه کاهش یافته است.

برقگیر مورد بررسی قرار می‌گیرد. برقگیرها بوسیله یک هادی به طول ۵ متر به فازها و بدنه دکل نصب شده و مقاومت زمین دکل ۱۵ اهم می‌باشد. مطابق شکل (۹) در اثر برخورد مستقیم صاعقه به سیم فاز، اضافه ولتاژ شدیدی در محل سرکابل ایجاد شده است که از حداکثر BIL



شکل ۹- تاثیر مقاومت زمین پای دکل بر شکل موج ولتاژ در محل سرکابل (بین خط هوایی و کابل).



شکل ۱۰- تاثیر نصب برقگیر بر شکل موج ولتاژ در محل سرکابل.

در این حالت که مشخصات شبیه‌سازی مشابه حالت قبل است، با تغییر مقاومت شبکه زمین برقگیر (۵ اهم، ۱۵ اهم

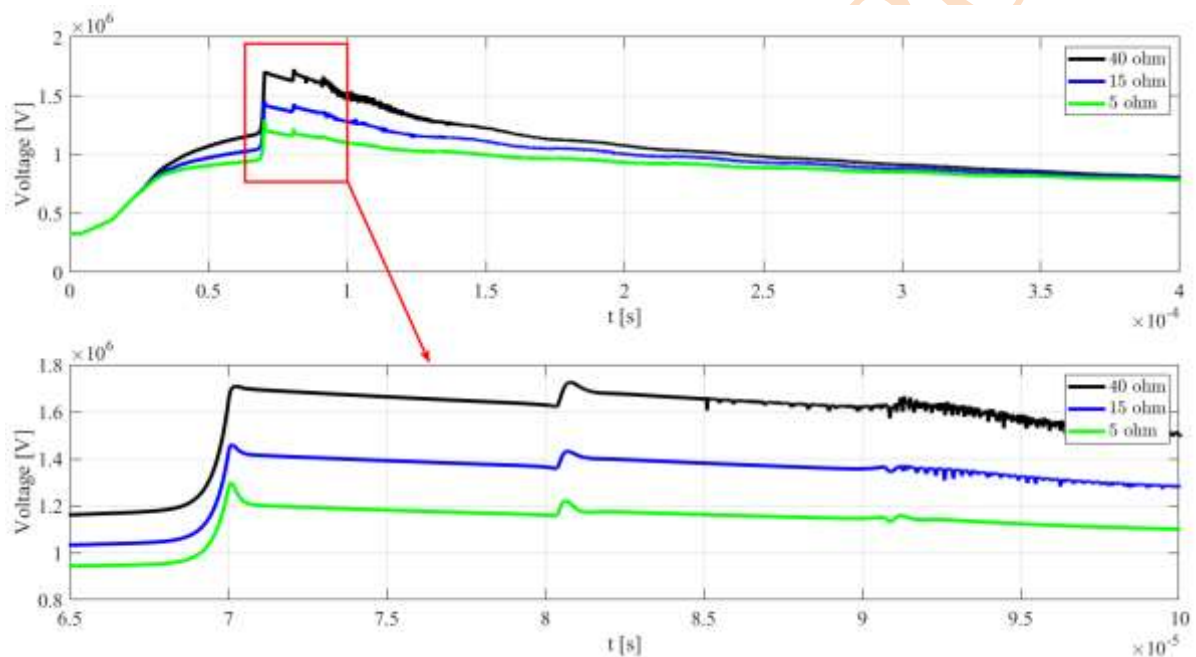
۳-۳- اثر مقاومت شبکه زمین پای برقگیر بر روی عملکرد حفاظتی آن

صاعقه در خطوط استفاده نمود. به همین منظور در این بخش فرض شده است که بر روی سه دکل منتهی به محل اتصال کابل به خط برقگیر نصب شده باشد. نتایج شبیه سازی‌ها نشان دادند که با نصب برقگیر روی سه دکل انتهایی، پیک دامنه اضافه ولتاژ در محل سرکابل نسبت به نصب برقگیر روی فقط یک دکل کاهش یافته است. نصب پشت سرهم برقگیرها در چند دکل انتهایی باعث تخلیه بخش عمده انرژی صاعقه به زمین و کاهش دامنه اضافه ولتاژ تولید شده در محل سرکابل می‌گردد. در شکل (۱۳) اثر ترکیبی نصب چند برقگیر و کاهش مقاومت زمین پای دکل (از ۱۵ اهم به ۵ اهم) نشان داده شده است.

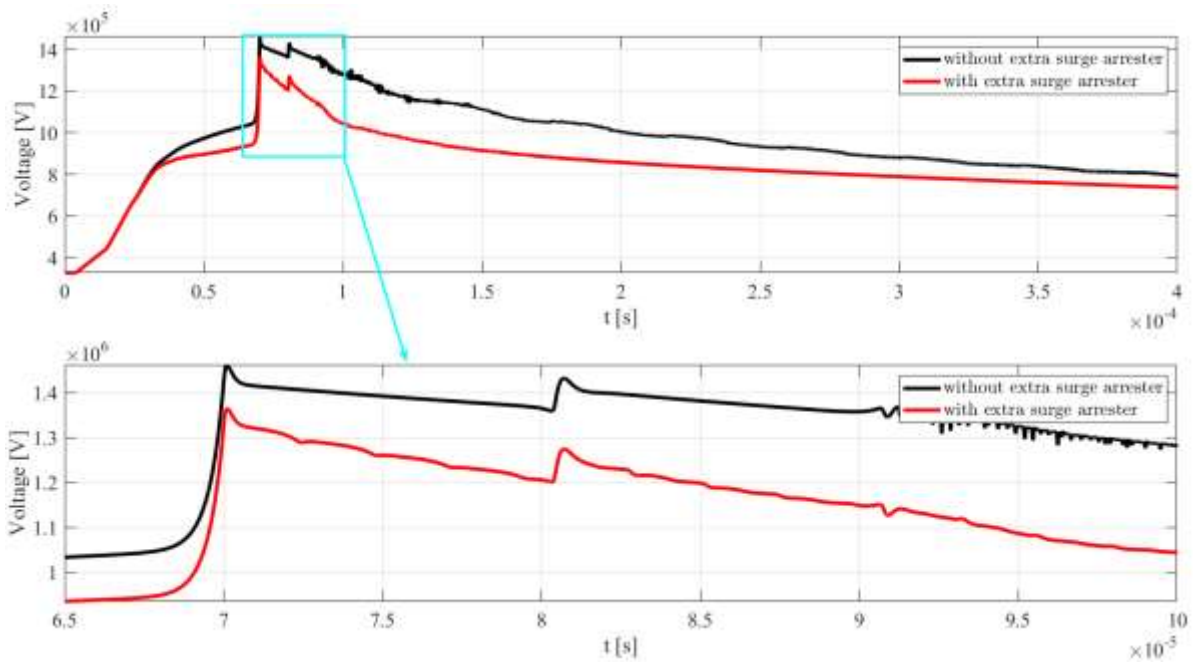
و ۴۰ اهم)، میزان حساسیت عملکرد برقگیر در کاهش دامنه اضافه ولتاژهای گذرا در محل سرکابل مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌گردد کاهش مقاومت شبکه زمین برقگیر باعث بهبود عملکرد برقگیر و کاهش دامنه اضافه ولتاژهای گذرا در محل سرکابل شده است.

۳-۴- اثر نصب برقگیر در دکل‌های منتهی به محل اتصال خط به کابل (سرکابل)

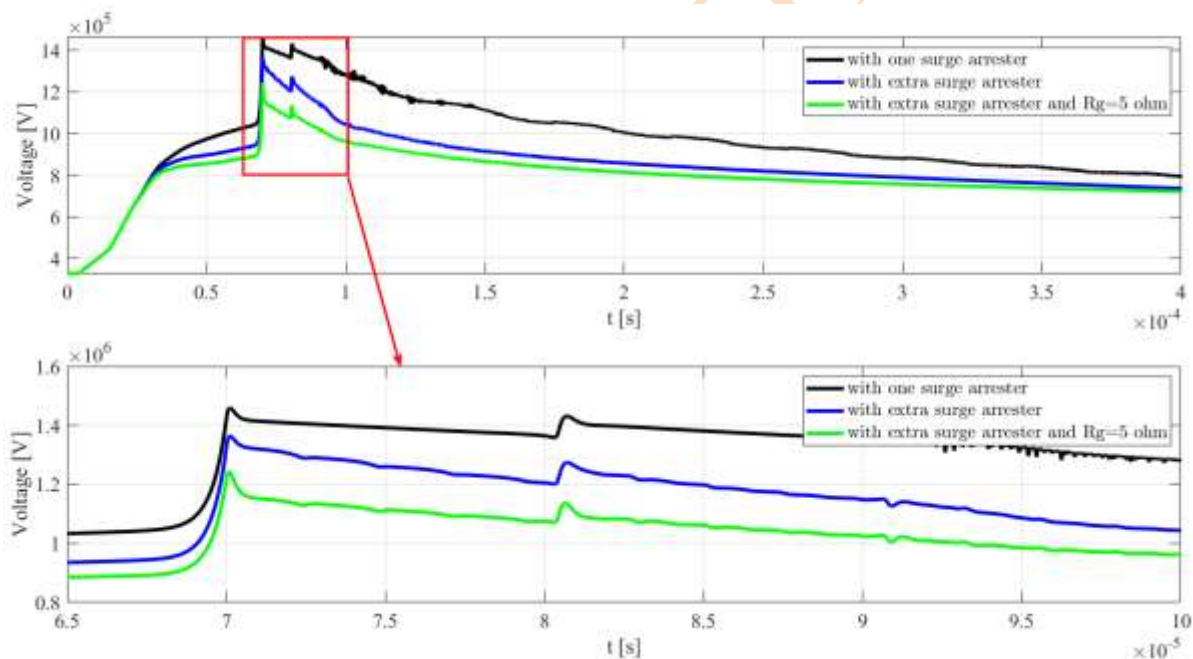
در مناطقی که به دلیل سنگلاخی بودن زمین و یا بالا بودن مقاومت مخصوص خاک، مقاومت زمین پای دکل بالاست باید از راه کارهای دیگر برای کاهش دامنه ولتاژ گذرای



شکل ۱۱- شکل موج ولتاژ در محل سرکابل، مقایسه سه مقاومت زمین برقگیر.



شکل ۱۲- شکل موج ولتاژ در محل سرکابل، در دو حالت نصب یک برقگیر و ۳ برقگیر (مقاومت زمین ۱۵ اهم).



شکل ۱۳- شکل موج ولتاژ در محل سرکابل، در سه حالت نصب یک برقگیر، ۳ برقگیر و ۳ برقگیر با کاهش مقاومت زمین.

نتایج مطالعات نشان می‌دهند با افزایش طول کابل، دامنه اضافه ولتاژ در محل سرکابل خط (در حضور برقگیر) تغییرات ناچیزی داشته است. همچنین مطابق شکل (۱۴)، با افزایش طول کابل دامنه ولتاژ در انتهای کابل (محل اتصال به پست) کاهش یافته است.

۳-۵- بررسی اثر طول کابل بر دامنه ولتاژ گذرا
در این حالت یک برقگیر در محل اتصال کابل به خط هوایی (با مقاومت زمین پای دکل ۱۵ اهم) نصب شده است و انتهای دیگر کابل در محل ورودی پست می‌باشد. در شکل (۱۳) اثر تغییر طول کابل (۳۰۰ متر، ۱ و ۳ کیلومتر) بر دامنه ولتاژ گذرا در محل سرکابل خط نشان داده شده است.

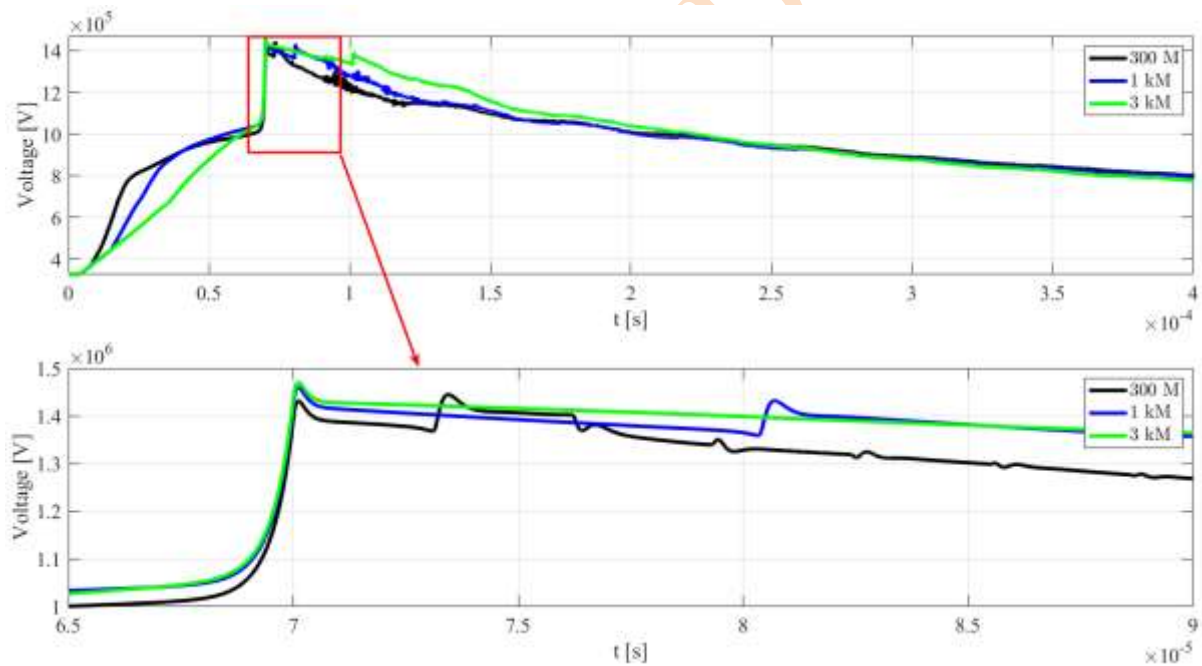
۳-۶- بررسی اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی پست

GIS و اثر کلیدهای مقاومت دار (PIR)

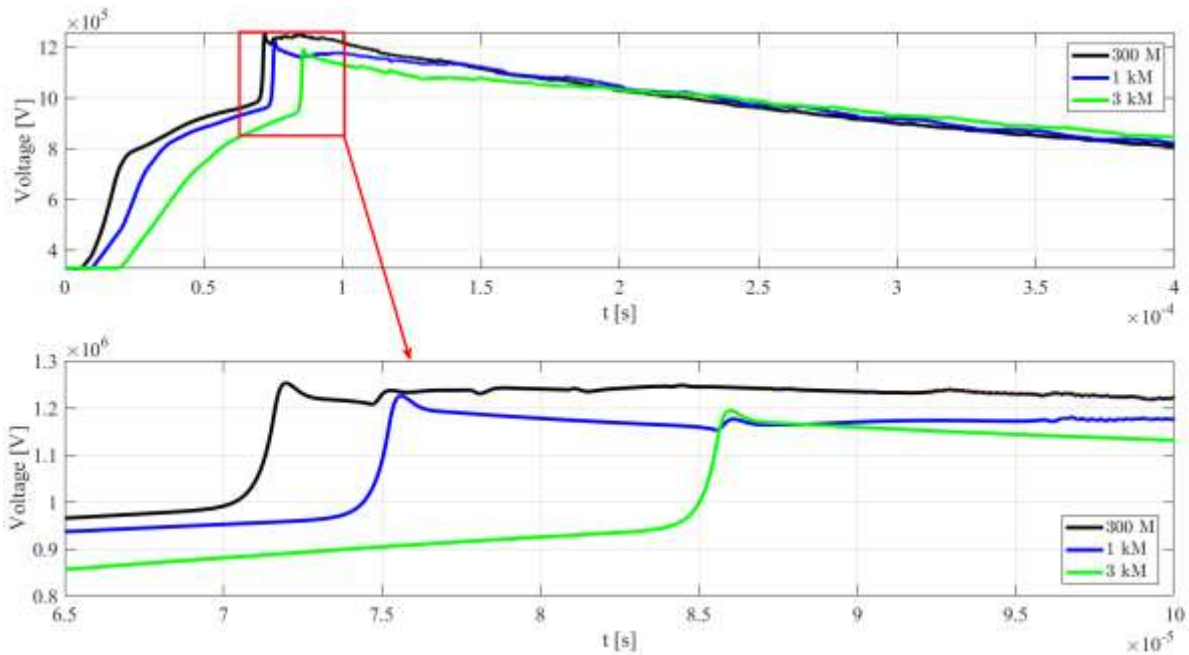
هنگام عملکرد کلید قدرت (CB) یا سکسیونر (DS) در پست‌های گازی (GIS)، تعداد قابل توجهی از ضربه‌ها بر روی تیغه‌های کلید اتفاق می‌افتد که باعث تولید اضافه ولتاژ با شیب بسیار سریع می‌شود. این امواج دارای زمان پیشانی موج در محدوده چند نانو ثانیه و فرکانس‌های بالا (در محدوده چند صد کیلوهرتز تا ۱۰۰ مگاهرتز) می‌باشند [۳۶، ۳۸]. به دلیل تکرار این امواج گذرای خیلی سریع، اثر تخریب عابقی آنها حتی با دامنه‌های کم نیز بالاست [۳۲]. لذا مطالعه رفتار این نوع اضافه ولتاژها برای حفاظت از خطوط هیبرید و کابلی، ضروری است. عموماً به منظور کنترل اضافه ولتاژهای کلیدزنی در سطوح ولتاژ بالا، از کلیدهای قدرت مقاومت دار (- Pre Insertion Resistor

(PIR) استفاده می‌شود. هنگامی که فرمان بسته شدن این نوع کلید داده می‌شود، ابتدا PIR به صورت سری یا موازی در مسیر قرار می‌گیرد و سپس بعد از چند میلی ثانیه، تیغه‌های اصلی کلید بسته می‌شوند [۳۸، ۳۹].

در این بخش، مطالعات شبیه‌سازی براساس شبکه شکل (۲) انجام شده است. طول کابل ۱ کیلومتر و اندازه مقاومت PIR، ۴۰۰ اهم می‌باشد. اضافه ولتاژ گذرا در محل اتصال کابل زمینی خروجی پست با خط هوایی برای دو حالت وجود و عدم وجود PIR بررسی شده است. مطابق شکل (۱۵)، اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی پست GIS فرکانس بسیار بالایی دارد. همچنین وجود PIR باعث کاهش دامنه ولتاژ گذرای کلیدزنی از ۷۶۷ کیلوولت به ۶۶۸ کیلوولت شده است. همچنین وجود مقاومت PIR باعث افزایش سرعت میرا شدن اضافه ولتاژ گذرا می‌شود.



شکل ۱۴- اثر تغییر طول کابل بر دامنه موج ولتاژ گذرا در محل سرکابل خط.



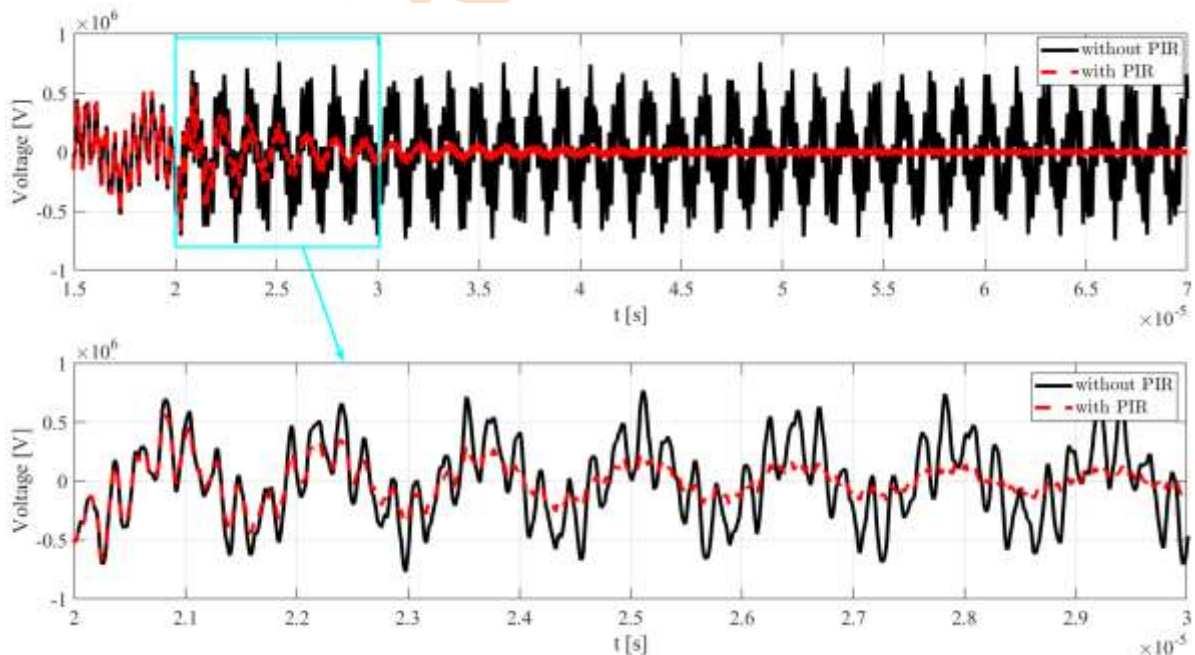
شکل ۱۵- اثر تغییر طول کابل بر دامنه موج ولتاژ گذرا در محل سرکابل پست.

کلیدزنی پست GIS مورد بررسی قرار گرفته است. با مدل‌سازی و شبیه‌سازی دو شبکه نمونه در نرم افزار EMTP-RV، نقش پارامترهای مهم و تاثیر گذار بر دامنه اضافه ولتاژهای گذرای تولید شده در خطوط و شبکه‌های ترکیبی برای حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و عملکرد و تاثیر راه کارهای مختلف جهت کاهش دامنه امواج گذرای صاعقه و کلیدزنی در محل اتصال کابل به خط و

برای مقایسه نتایج حالت‌های مختلف مورد مطالعه در این مقاله، خلاصه نتایج آنها در جداول شماره (۳) و (۴) نشان داده شده است.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، عملکرد یک خط ۴۰۰ کیلوولت ترکیبی (خط هوایی- کابل فشارقوی) در برابر امواج گذرای صاعقه و



شکل ۱۶- شکل موج ولتاژ در محل سرکابل انتهای کابل خروجی پست GIS.

جدول ۴- دامنه اضافه ولتاژهای گذرا در محل سرکابل ناشی از صاعقه

برخورد صاعقه با سیم فاز			مقاومت زمین پای دکل (اهم)			عدم نصب برقگیر			نصب برقگیر (مقاومت زمین چاه برقگیر)			تعداد برقگیرهای نصب شده			طول کابل (km)			حالات بررسی
۱۰۰	۲۵	۱۰	۴۰	۱۵	۵	۱	۳	۰.۳	۱	۳							ولتاژ سرکابل	
(PU)																		
۱.۸۵	۱.۷۳	۱.۵۵	۱۰.۱۶	۷.۵	۶.۳۴	۵.۶۴	۶.۳۴	۵.۹۳	۶.۲۸	۶.۳۴	۶.۳۹							

جدول ۵- دامنه اضافه ولتاژهای گذرا در محل سرکابل ناشی از کلیدزنی

کلیدزنی GIS		حالات بررسی
وجود PIR	عدم وجود PIR	
(PU)		
-۲.۹	-۳.۳۴	ولتاژ سرکابل

- در خصوص فیدرهای کابلی متصل به خط هوایی، با توجه به طول کابل باید ضرورت نصب برقگیر در هر دو انتهای کابل مورد بررسی قرار گیرد.
- استفاده از مقاومتهای پیش‌اتصال (PIR) در عملیات کلیدزنی پست GIS، تاثیر به سزایی بر کاهش دامنه اضافه ولتاژهای گذرای کلیدزنی و کاهش زمان استمرار آنها دارد.

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

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

مشارکت‌های نویسندگان:

احمد مرادی: روش‌شناسی، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، تحقیق، نگارش پیش نویس اصلی، بررسی و ویرایش.

محسن نیاستی: روش‌شناسی، اعتبارسنجی، بررسی و ویرایش، منابع، راهنمایی.

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

همچنین کابل به پست گازی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. براساس شبیه‌سازی‌های انجام شده، نتایج زیر مشاهده گردید:

- نصب برقگیر در محل سرکابل (محل اتصال خط هوایی به کابل) جهت کاهش دامنه امواج گذرای صاعقه و کلیدزنی و اثرات مخرب آن روی سرکابل و یا وقوع جرقه روی سرکابل ضروری است، اما ممکن است کافی نباشد.
- کاهش مقاومت شبکه زمین برقگیر، بر بهبود عملکرد برقگیر موثر بوده و شدت اضافه ولتاژ خط در محل نصب برقگیر را می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد.
- در مکان‌هایی که شدت و دفعات صاعقه بالاست (مناطق صاعقه خیز یا کوهستانی) و همچنین مواقعی که مقاومت زمین پای دکل‌های منتهی به پست فشارقوی بالا باشد، بهتر است روی چند دکل منتهی به پست فشارقوی یا سرکابل، برقگیر نصب شود.

مراجع

[1] Marzinotto, Massimo, and Giuseppe Pelliccione. "Comparing Frequency-Dependent and Distributed Parameter with Lumped Losses Power Cable Line Models for Cable Insulation Coordination against Overvoltages." *IET Science, Measurement & Technology* 13, no. 2 (2019): 115-22.

- [2] Yang, Guoqing, Zhe Huang, Lixiao Yao, Taorong Jia, Zeli Ju, and Xuefeng Zhao. "The Overvoltage of Hybrid Transmission Line of Long Distance Ultra-High Voltage Cable and Overhead Line." Paper presented at the 2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), 2020.
- [3] Soares, Amilton, Marco Aurélio O Schroeder, and Silvério Visacro. "Transient Voltages in Transmission Lines Caused by Direct Lightning Strikes." *IEEE Transactions on power delivery* 20, no. 2 (2005): 1447-52.
- [4] Moradi, Ahmad, and Asghar 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* (2024).
- [5] safaei, faridodoin, and mohsen 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): -. <https://doi.org/10.22075/jme.2023.31377.2505>.
- [6] Liu, Yang, Baina He, Yunwei Zhao, Fantao Meng, Shuo Wu, Weihai Dai, Yuanlong Wei, Shuo Wang, and Dongjin Zhang. "Study on transient characteristics of secondary arc of AC/DC hybrid transmission lines on the same tower." *Electrical Engineering* 107, no. 1 (2025): 53-63.
- [7] Moradi, Ahmad, and Asghar Akbari Foroud. "Analysis of transient overvoltages in EV charging stations due to direct lightning strikes." *IET Generation, Transmission & Distribution* 19, no. 1 (2025): e70001.
- [8] Zhou, Li-Ming, and Steven A Boggs. "Effect of Shielded Distribution Cables on Lightning-Induced Overvoltages in a Distribution System." *IEEE transactions on power delivery* 17, no. 2 (2002): 569-74.
- [9] MacKinlay, Ross. "Managing an Aging Underground High-Voltage Cable Network." *Power Engineering Journal* 4, no. 6 (1990): 271-77.
- [10] Hoogendorp, G., M. Popov, and L. Van der Sluis. *Lightning induced overvoltages in mixed 380 kV OHL-cable-OHL connections*. in *Proc. Int. Conf. Power Syst. Transients*. 2013.
- [11] Van der Sluis, L., *Transients in power systems*. Vol. 2001. 2001: Wiley New York.
- [12] Geri, A., et al. *Lightning performance of long mixed overhead-cable EHV lines*. in *Proceedings of 28th International Conference on Lightning Protection*. 2006.
- [13] Geri, A., et al. *Simulation of lightning response of a long mixed overhead cable EHV line*. in *Proceedings of International Conference on Grounding and Earthing*. 2006.
- [14] Bak, C.L. and F.F. Da Silva, *High Voltage AC underground cable systems for power transmission—A review of the Danish experience: Part 2*. Electric Power Systems Research, 2016. **140**: p. 995-1004.
- [15] Bak, C.L. and F.F. da Silva, *High voltage AC underground cable systems for power transmission—A review of the Danish experience, part 1*. Electric Power Systems Research, 2016. **140**: p. 984-994.
- [16] Commission, I.E., *Surge arresters—Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for ac systems 60099–4*. C systems, 2004 :p. 60099-4.
- [17] Hardi, S., A.A. Matondang, and A.H. Rambe. *Modeling of transient caused by lightning strike at Nias high voltage substation using ATP-EMTP case study*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. IOP Publishing.
- [18] Anderson, J., *Lightning performance of transmission lines*. Transmission Line Reference Book, 345kV and Above, 1981.
- [19] Ametani, A. and T. Kawamura, *A method of a lightning surge analysis recommended in Japan using EMTP*. IEEE Transactions on power delivery, 2005. **20**(2): p. 8.٨٧٥-٦٧
- [20] Martinez, J. and D. Durbak, *Parameter determination for modeling systems transients-Part V: Surge arresters*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005. **20**(3): p. 2073-2078.
- [21] Koehler, F. and J. Swingler, *Simplified analytical representation of lightning strike waveshapes*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015. **58**(1): p. 153-160.
- [22] SC, C., *Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines*. CIGRE Technical Brochure, 1991. **63**.
- [23] Marti, J.R. ,*Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations*. IEEE Transactions on power apparatus and systems, 1982(1): p. 147-157.
- [24] Stracqualursi, E., et al., *Application of the transfer matrix approach to direct lightning studies of overhead power lines with underbuilt shield wires—Part I: Theory*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021. **37**(2): p. 1226-1233.
- [25] Silveira, F.H. and S. Visacro, *Lightning performance of transmission lines: Impact of current waveform and front-time on backflashover occurrence*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019. **34**(6): p. 2145-2151.
- [26] Stracqualursi, E., et al., *Tower models for power systems transients: A review*. Energies, 2022. **15**(13): p. 4893.
- [27] Gharehpetian, G. ,A. Yazdani, and B. Zaker, *Power System Transients: Modelling Simulation and Applications*. 2023: CRC Press.
- [28] Imece, A.F., D.W. Durbak, and H. Elahi, *Modeling guidelines for fast front transients*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996. **11**(CONF-9501):(-٠٣
- [29] Yadee, P. and S. Premrudeepreechacharn. *Analysis of tower footing resistance effected back flashover across insulator in a transmission system*. in *International Conference on power systems transients*. 2007.

- [30] Jones, R., et al., *Modeling of metal-oxide surge arresters*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992. **7**(1): p. 302-309.
- [31] Siemens, *Station and intermediate class surge arresters*, in *Energy Management*. 2015: Germany. p. 76.
- [32] Kumar, V.V., J.M. Thomas, and M. Naidu, *Influence of switching conditions on the VFTO magnitudes in a GIS*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001. **16**(4): p. 539-544.
- [33] Shah, J.P. and S. Talati. *Modeling and analysis of very fast transient over-voltages in 400 kV GIS*. in *2019 8th International Conference on Power Systems (ICPS)*. 2019. IEEE.
- [34] Mao, K., et al. *Study on the Impact of Overvoltage Generated by the Operation of 110kV GIS Switch on the System*. in *2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*. ۲۰۱۹. IEEE.
- [35] Hileman, A.R., *Insulation coordination for power systems*. 2018: CRC Press.
- [36] Meppelink, J., et al., *Very fast transients in GIS*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989. **4**(1): p. 223-233.
- [37] IEC, *60071-1 Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules*, in *60071-1*. 2011, IEC: IEC Central Office Geneva Switzerland.
- [38] Heiermeier, H. and R.B. Raysaha, *Power testing of preinsertion resistors: limitations and solution*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016. **32**(4): (p. 1688-1695.
- [39] Garzon, R.D., *High voltage circuit breakers: design and applications*. 2002: CRC Press.

UNCORRECTED PROOF