Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

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

ISSN: 2783-2538



Research Article

Evaluation and Improving of the performance of medium voltage networks against lightning transient overvoltages

Mohsen Niasati [a,*], Taha Geraeli [b], Nima Kazemi [c]

[a] *Assistant Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran*
[b] *BS Graduate Student, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran*
[c] *MSc Student, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran*

UNCORRECTED PROOF

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-**-**
Revised: 2025-**-**
Accepted: 2025-**-**

Keywords:

Distribution networks,
Lightning transient surges;
EMTP-RV;
High frequency modeling;
Surge protection;
ZnO surge arrester;

ABSTRACT

Overhead distribution networks (low voltage and medium voltage) are always exposed to threats from lightning transients due to their extensiveness and location in various and open environments. Lightning can directly and indirectly cause dangerous and destructive overvoltages in medium voltage (MV) networks. Due to the low voltage level and low insulation distances (low insulation withstand) of distribution network equipment, the possibility of damage to distribution network equipment and flashover occurrence and outages in these networks due to the effects of lightning electromagnetic waves is high. Therefore, protecting distribution networks against lightning transients is of great importance in order to MV network equipment and increase its reliability. Several factors affect the performance of distribution networks against lightning effects. Therefore, in this paper, by modeling and simulating the transient and high frequency behavior of all distribution network equipment and the factors affecting it, the performance of various solutions to reduce the amplitude of lightning transient overvoltages and increase the level of protection of distribution network equipment against lightning effects under different conditions has been investigated and analyzed. The results of the simulation and studies conducted with the EMTP-RV for the MV distribution network under study show that the resistance of the grounding network at the foot of the poles plays an effective role on the amplitude of the transient overvoltages generated. Also, the optimal use and installation of zinc oxide (ZnO) arresters is the most appropriate method to improve the performance of medium-voltage distribution networks and their equipment against lightning.

DOI: https://doi.org/

© 2026 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: Mniasati@semnan.ac.ir

How to cite this article:

Niasati, M. Geraeli, T. Kazemi, N. (2025). Evaluation and Improving of the performance of medium voltage networks against lightning transient overvoltages . *Journal of Modeling in Engineering*, *22*(76), 223-239. doi:

مقاله پژوهشی

ارزیابی و بهبود عملکرد شبکه‌های فشارمتوسط در برابر اضافه ولتاژهای گذرای صاعقه

محسن نیاستی[1,*]، طاها گرائلی[2]، نیما کاظمی[3]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: **/**/۱۴۰۴

بازنگری مقاله: **/**/۱۴۰۴

پذیرش مقاله: **/**/۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

شبکه های توزیع؛

امواج گذرای صاعقه؛

نرم افزار EMTP-RV؛

مدل‌سازی فرکانس بالا؛

حفاظت گذرا؛

برقگیر ZnO.

چکیده

شبکه‌های توزیع هوایی (فشار ضعیف و فشار متوسط) به علت گستردگی و قرار گرفتن در محیط‌های مختلف و باز، همواره در معرض تهدیدات ناشی از امواج گذرای صاعقه قرار دارند. صاعقه می‌تواند به صورت مستقیم و غیرمستقیم، باعث ایجاد اضافه ولتاژهای خطرناک و مخرب در شبکه‌های فشار متوسط گردد. به دلیل سطح ولتاژ پایین و فواصل عایقی (استقامت عایقی) کم تجهیزات شبکه های توزیع، احتمال آسیب دیدن تجهیزات شبکه های توزیع و وقوع جرقه و قطعی در این شبکه ها ناشی از اثرات اموج الکترومغناطیسی صاعقه زیاد می باشد. از اینرو حفاظت شبکه های توزیع در برابر امواج گذرای صاعقه به منظور حفظ تجهیزات شبکه و افزایش قابلیت اطمینان آن دارای اهمیت بالایی می باشد. عوامل متعددی بر عملکرد شبکه های توزیع در برابر اثرات صاعقه تاثیر گذار می باشند. از این‌رو، در این مقاله با مدل‌سازی و شبیه‌سازی کامل رفتار گذرا و فرکانس بالای کلیه تجهیزات شبکه های توزیع و عوامل موثر بر آن، عملکرد راهکارهای مختلف برای کاهش دامنه اضافه ولتاژهای گذرای صاعقه و افزایش سطح حفاظت تجهیزات شبکه های توزیع در برابر اثرات آنها تحت شرایط مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. بررسی نتایج شبیه‌سازی و مطالعات انجام شده در محیط نرم‌افزار EMTP-RV برای شبکه توزیع مورد مطالعه، نشان می‌دهد که مقاومت شبکه زمین پای تیرها بر دامنه اضافه ولتاژهای گذرای تولید شده نقش موثری دارد. همچنین بکارگیری و نصب بهینه برقگیرهای اکسید روی (ZnO)، مناسبترین روش برای بهبود عملکرد شبکه های توزیع فشارمتوسط و تجهیزات آنها در برابر صاعقه می باشد.

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/)

UNCORRECTED PROOF

۱-مقدمه

پایداری و قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع، به ویژه در سطوح فشارمتوسط که بخش عمده‌ای از مصرف کنندگان را تغذیه می‌کنند، اهمیت بسزایی دارد. نتایج میدانی نشان می‌دهد که امواج گذرای صاعقه یکی از عوامل اصلی تخریب تجهیزات شبکه‌های توزیع و ایجاد وقفه یا خاموشی در این شبکه‌ها می‌باشد[۲-۱]. افزایش وقوع صاعقه به دلیل تغییرات اقلیمی[۳]، گستردگی خطوط شبکه‌های توزیع و پایین بودن سطح استقامت عایقی تجهیزات آنها، باعث می‌گردد تا این شبکه‌ها همواره در معرض آسیب اضافه ولتاژهای گذرای صاعقه قرار داشته باشند. عموماً اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه در خطوط توزیع هوایی شامل دو نوع اضافه ولتاژهای القایی ناشی از برخورد غیرمستقیم صاعقه (در فواصل نزدیک) و اضافه ولتاژهای ناشی از اصابت مستقیم صاعقه به خط می‌باشند[۴].

به دلیل قرار گرفتن شبکه های فشار متوسط هوایی در مجاورت ساختمان‌ها و سازه‌های بلند، درختان و همچنین ارتفاع کم تیرهای برق، احتمال برخورد صاعقه به صورت

مستقیم به آنها کم می باشد. همچنین، با توجه به اینکه شعاع جذب صاعقه توسط اجسام، متناسب با دامنه جریان صاعقه می باشد، لذا عموما صاعقه های با دامنه جریان بالا به راحتی جذب سازه ها و اجسام مرتفع می گردند. از اینرو، صاعقه هایی که به تجهیزات شبکه های توزیع برخورد می کنند اغلب دارای دامنه جریان کم می باشند. عموما در مطالعات برخورد مستقیم صاعقه به شبکه های توزیع، صاعقه های با جریانهای کمتر از ۳۰ کیلوآمپر (با احتمال وقوع ۵۰٪) مورد بررسی قرار می گیرند. به هر حال، در صورت برخورد صاعقه به هادیهای فاز شبکه های توزیع، دامنه ولتاژ تولید شده می تواند بسیار بزرگتر از سطح استقامت عایقی تجهیزات و فاصله هوایی بین هادیها باشد. دامنه اضافه ولتاژ تولید شده روی هادی شبکه های هوایی ناشی از برخورد مستقیم صاعقه، مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود[۵].

$$U(kV) = 0.5ZI \qquad (۱)$$

که در آن، Z امپدانس موجی هادی (برحسب اهم) و I جریان صاعقه (برحسب کیلوآمپر) می باشد. بنابراین، بررسی برخورد مستقیم صاعقه در ارزیابی و مطالعات اثر اضافه ولتاژهای صاعقه بر تجهیزات شبکه‌های توزیع و نحوه حفاظت در برابر آن امری ضروری می باشد.

همچنین، براساس رابطه Rusk مقدار حداکثر دامنه اضافه ولتاژ القایی تولید شده روی هادی فاز شبکه هوایی ناشی از برخورد غیرمستقیم صاعقه ($Vmax(kV)$) مطابق رابطه (۲) محاسبه می گردد[۵].

$$V_{max} = \frac{38.8(h + 0.15\sqrt{\rho})I}{y} \qquad (۲)$$

که در آن، ρ مقاومت مخصوص خاک (برحسب اهم-متر)، h متوسط ارتفاع هادی خط هوایی نسبت به زمین (برحسب متر)، I دامنه جریان صاعقه در محل برخورد (برحسب کیلو آمپر) و y فاصله محل برخورد صاعقه تا شبکه هوایی (برحسب متر) می باشد.

در شبکه‌های توزیع، تجهیزاتی مثل ترانسفورماتورها، کابل‌ها، سرکابل‌ها و تجهیزات اندازه گیری جزء تجهیزات حساس، مهم و آسیب پذیر می باشند و باید در برابر اضافه ولتاژهای گذرای صاعقه محافظت گردند[۶].

حفاظت در برابر اضافه ولتاژهای گذرای صاعقه اساساً به دو روش صورت می‌گیرد[۷-۸]:

- کاهش دامنه و تعداد وقوع اضافه ولتاژهای صاعقه در محل وقوع (مثل نصب سیم محافظ و صاعقه گیر).
- محدود کردن اضافه ولتاژها در سر ترمینال تجهیزات.

در شبکه‌های فشارمتوسط، عموما از بعضی روشهای حفاظتی مثل نصب سیم محافظ بالاسری (سیم صاعقه گیر) برای کاهش تعداد برخورد مستقیم صاعقه و همچنین نصب برقگیر خط برای کاهش دامنه ولتاژ گذرای صاعقه استفاده نمی شود[۷-۹].

تاکنون، مطالعات متعددی در خصوص نحوه ایجاد و اثر گذاری صاعقه در شبکه های توزیع و روشهای حفاظت در برابر آنها انجام شد. اما، مطالعات جامع و یکپارچه که تاثیر پارامترهای مهم و مختلف (مثل مقاومت زمین پای تیرهای برق، مقاومت مخصوص خاک، امپدانس کابل، نوع تیر برق (چوبی یا فلزی)، ...) بر دامنه اضافه ولتاژهای گذرای تولید شده ناشی از برخورد صاعقه و همچنین مطالعات بررسی عملکرد کلیه روشهای حفاظتی مختلف در برابر صاعقه کمتر انجام شد[۱۰-۱۲].

در این مقاله، عملکرد بعضی از روش‌های حفاظت تجهیزات شبکه‌های فشار متوسط در برابر صاعقه شامل استفاده از سیم زمین یا سیم محافظ، حفاظت کابلی، نصب برقگیر و همچنین عوامل تاثیرگذار مانند مقاومت سیستم زمین پای تیرها، مقاومت سیستم زمین برقگیر و فاصله برقگیرها از تجهیزات تحت حفاظت، در محیط نرم افزار EMTP-RV مورد شبیه‌سازی و مطالعه قرار می گیرد.

۲- مدل‌سازی گذرای شبکه فشار متوسط

برای مطالعات، یک شبکه هوایی فشار متوسط (۲۰ کیلوولت) متشکل از هادیهای فاز و سیم محافظ، ترانسفورماتور، مقره و تیرهای برق در نظر گرفته شده است.

۲-۱- مدل‌سازی بدنه تیر برق

مشخصات تیرهای برق بتنی و چوبی مطابق جدول (۱) می‌باشد.

UNCORRECTED PROOF

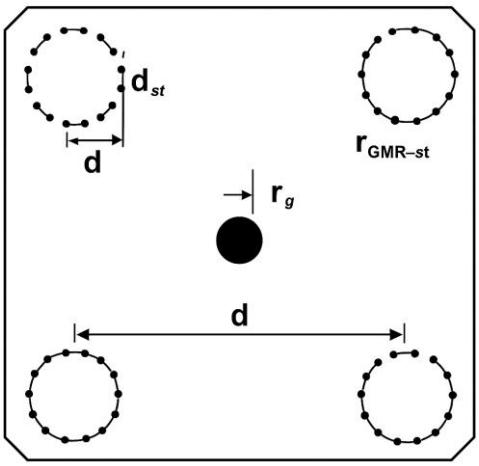
جدول (۱)- مشخصات هندسی خطوط شبکه مورد مطالعه

نوع تیر	چوبی	بتنی
تعداد تیرها	۱۴	۱۸
ارتفاع تیر (m)	۱۲	۱۲
مقاومت پایه هر تیر(Ω)	۱۰۰	۷۰
فاصله بین تیرها (m)	۴۰	۳۵

در مطالعات حالت گذرا، امپدانس موجی پایه ها یا تیرهای برق، یک عامل کلیدی در طراحی هماهنگی عایقی برای خطوط انتقال و توزیع است[۱۳]. مقدار امپدانس موجی پایه یا تیر خطوط هوایی نقش موثری بر احتمال وقوع جرقه الکتریکی[1] و جرقه برگشتی[2] در دو سر مقره‌ها ناشی از برخورد صاعقه دارد[۱۴]. در نرم‌افزار EMTP، امپدانس موجی بدنه تیر برق را عموما با خطوط پارامتر ثابت (CP-Line)، مدل‌سازی می گردد[۴]. مقدار امپدانس موجی تیرهای چوبی، از رابطه (۳) [۱۴] و برای تیرهای بتنی مسلح (دارای میلگرد) مطابق شکل (۱)، از روابط (۴) و (۵) به‌دست می‌آید[۱۳].

$$Z_{WP} = 60 \ln\left(\frac{2\sqrt{2}\,H_c}{r_c}\right) - 60 \qquad (۳)$$

در رابطه (۱)، H_C و r_C به ترتیب برابر مقدار متوسط ارتفاع تیر و مقدار شعاع قاعده تیر چوبی می‌باشند.



شکل ۱- تیربرق بتنی با چند میلگرد [۱۳]

$$Z_{CP} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r - j\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega}}} \ln\left(\frac{h + \sqrt{h^2 + R^2_{GMR}}}{R_{GMR}}\right) \qquad (۴)$$

$$R_{GMR} = \sqrt[5]{r_g^{1.5} \times r^{1.5}_{GMR,st} \times d^4} \qquad (۵)$$

که در آن، h میانگین ارتفاع تیر برق برحسب متر، ε_0 ثابت دی‌الکتریک خلأ (8.854×10^{-12} $\frac{F}{m}$)، ε_r ثابت دی‌الکتریک بتن، σ رسانایی الکتریکی بتن ($\frac{S}{m}$) و ω فرکانس زاویه‌ای ($\frac{rad}{s}$) می‌باشد.

۲-۲- مدل‌سازی مقره و فاصله هوایی

عموما برای مدل‌سازی مقره و فاصله هوایی آن در خطوط فشارمتوسط (با طول مقره کمتر از یک متر)، از مدل کلید فاصله هوایی[3] موازی با یک خازن استفاده می‌شود[۱۵]. برای شبیه‌سازی، از معادله (۶) برای محاسبه وقوع قوس سطحی در مقره استفاده می‌شود[۱۶].

$$\int_{t_0}^{t} \left(\left|V_{gap}(t)\right| - V_0\right)^K dt \geq D \qquad (۶)$$

مطابق مرجع [۱۶]، هرگاه مقادیر V_{gap} (ولتاژ دو سر فاصله هوایی مقره) نزدیک صفر (خیلی کمتر از اضافه‌ولتاژ بحرانی ($V_{50\%}$)) باشد، مقدار k بین ۳ تا ۵ انتخاب می شود و برای مقادیر V_{gap} حدود ۹۰٪ مقدار $V_{50\%}$، مقدار k حدود ۱ یا کمتر در نظر گرفته می‌شود. هرگاه رابطه (۶) برقرار گردد، قوس الکتریکی در فاصله هوایی رخ می‌دهد.

مقدار خازن کوپلاژ در مدل فرکانس بالای مقره‌ها (خازن موازی شده با کلید) به نوع، جنس، شکل هندسی مقره و همچنین شرایط محیط نصب آن بستگی دارد. عموما، مقدار ظرفیت خازن برای هر مقره سرامیکی، حدود ۸۰ پیکوفاراد و هر مقره سوزنی، حدود ۱۰۰ پیکوفاراد می باشد[۱۷].

1- Flashover
2- Back Flashover
3- Airgap switch

UNCORRECTED PROOF

۲-۳- مدل‌سازی سیستم زمین

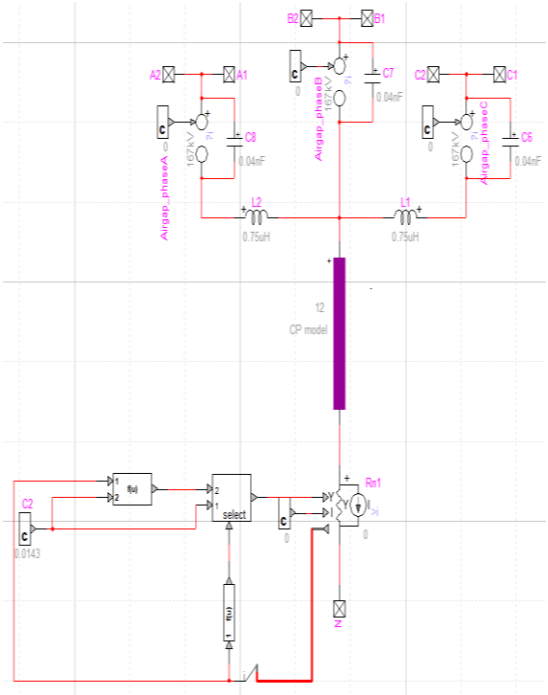
امپدانس موجی شبکه زمین نقش موثری در مطالعات امواج گذرای صاعقه برای خطوط و شبکه های برق دارد[۱۸]. از اینرو، مقاومت پایه تیرهای برق، تاثیر زیادی بر حداکثر اضافه‌ولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه به سیم‌های محافظ خطوط برق دارد[۱۵]. در این مقاله، طبق مدل پیشنهادی استاندارد IEC60071-4 و سیگره[۱۹]، از یک مقاومت غیرخطی، برای مدل‌سازی سیستم زمین استفاده شده است که در آن مقاومت سیستم زمین به علت پدیده یونیزاسیون خاک به عنوان تابعی از دامنه جریان عبوری از پایه تیر برق (مطابق رابطه (۷)) تغییر می‌کند[۱۸].

$$R_i = \frac{R_0}{\sqrt{1+\frac{I}{I_g}}} \qquad (۷)$$

که در آن، I_g طبق رابطه (۸) به‌دست خواهد آمد.

$$I_g = \frac{\rho E_0}{2\pi {R_0}^2} \qquad (۸)$$

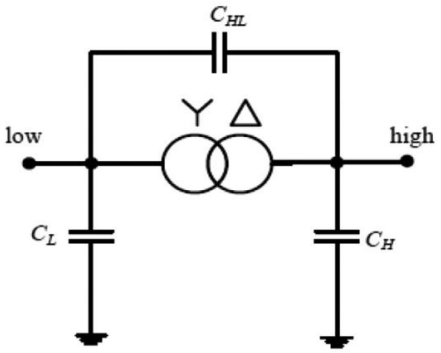
درنهایت، مدل کامل تیرهای برق در نرم افزار EMTP، مطابق شکل (۲) می‌باشد.



شکل ۲- مدل مداری تیرهای برق در نرم‌افزار EMTP

۲-۴- مدل‌سازی فرکانس بالای ترانسفورماتور

برای تحلیل عملکرد فرکانسی ترانسفورماتورها (برای فرکانسهای بالاتر از ۱۰ کیلوهرتز)، مطابق شکل (۳) مدل ترانسفورماتور شامل سه خازن کلیدی، C_L خازن بین سیم‌پیچ فشارضعیف و زمین، C_H خازن بین سیم‌پیچ فشارقوی و زمین، C_{HL} خازن بین سیم‌پیچ فشارقوی و فشارضعیف می‌باشد[۱۵ و ۲۰].



شکل ۳- مدل فرکانس بالا ترانسفورماتور [۱۵]

مقادیر کلی ظرفیت خازن‌های مدل فرکانس بالای ترانسفورماتورها در شکل (۳)، مطابق جدول (۲) می‌باشد.

جدول ۲- مقادیر کلی خازنهای مدل فرکانسی ترانسفورماتورها

ترانسفورماتورهای نوع هسته‌ای			
ظرفیت (MVA)	C_L (nF)	C_H (nF)	C_{HL} (nF)
۱	۱/۳-۱۶	۱/۲-۱۴	۱/۲-۱۷
۲	۳-۱۶	۱/۴-۱۶	۱-۱۸

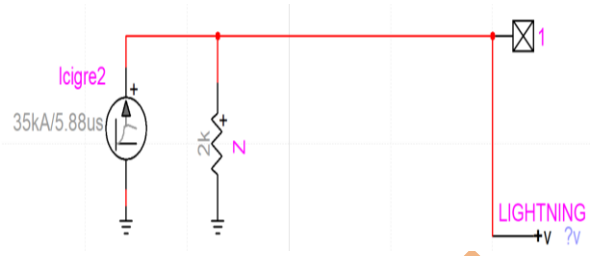
۲-۵- مدل‌سازی صاعقه

منبع جریان مدل سیگره از نظر مقادیر حداکثر دامنه جریان صاعقه، شکل پیشانی و پشت موج و بیشینه شیب، بسیار شبیه به موج واقعی جریان صاعقه می‌باشد[۱۵ و ۲۱]. لذا، در این مقاله برای مدل‌سازی صاعقه، از منبع جریان مدل سیگره و یک مقاومت موازی با آن، به عنوان مقاومت کانال صاعقه استفاده شد (مطابق شکل (۴)).

همچنین، مقدار بیشینه جریان صاعقه برابر ۳۵ کیلوآمپر در نظر گرفته شد. طبق استاندارد IEC 62305-1، ۵۰ درصد از صاعقه‌ها دارای جریان برابر یا کمتر از ۳۵ کیلوآمپر هستند. در اکثر مطالعات مثل مرجع [۲۲]، جریان پیک

UNCORRECTED PROOF

اولین ضربه صاعقه، معمولاً حدود ۳۰ کیلوآمپر در نظر گرفته می شود.



شکل ۴- مدل صاعقه در نرم‌افزار EMTP

مقادیر پارامترهای مدل منبع جریان سیگره جهت مدل‌سازی صاعقه (مطابق شکل (۵))، از روابط (۹) تا (۱۲) تعیین می شود [۲۳ و ۲۴].

$$I_m > 20\,kA \Rightarrow \begin{cases} S_m = 6.5 \times I_m^{0.376} \\ t_{d30/90} = 0.906 \times I_m^{0.411} \end{cases} \quad (۹)$$

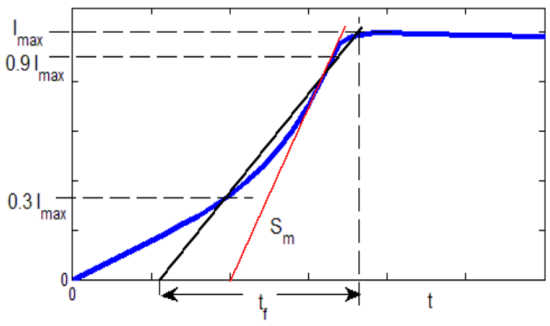
$$P = \frac{1}{1+\left(\frac{I_m}{31}\right)^{2.6}} \quad (۱۰)$$

$$t_h = 77.5 \times 10^{\left(\frac{log(\frac{1-P}{P})}{3.42\times 2.303}\right)} \times 10^{-6} \quad (۱۱)$$

$$t_f = \frac{I_m}{0.6 \times \frac{I_m}{t_{d30/90}}} \times 10^{-6} \quad (۱۲)$$

همچنین، مقدار مقاومت کانال صاعقه از رابطه (۱۳) محاسبه می‌گردد[۲۴]. به دلیل بزرگ بودن امپدانس کانال صاعقه در مقایسه با امپدانس زمین پای تیر یا دکل خطوط، بدون آن‌که دقت مطالعات کاهش قابل توجهی یابد می توان صاعقه را به صورت یک منبع جریان ایده‌آل ($Z=\infty$)، مدل نمود[۲۳].

$$Z = Max\{2000,\ 6987 - 158.45 \times I_m(kA)\} \quad (۱۳)$$



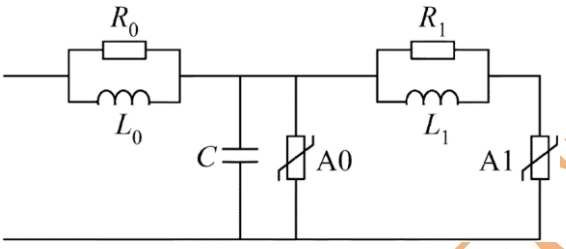
شکل ۵- شکل موج منبع جریان مدل CIGRE [۱۵]

۲-۶- مدل‌سازی خطوط

برای مدل‌سازی خطوط نیرو در نرم‌افزار EMTP، می‌توان از مدل وابسته به فرکانس (FD) استفاده نمود[۱۵]. در این صورت با وارد کردن مشخصات خطوط در ابزار Line Data، مدل‌سازی خطوط هوایی برای مطالعات حالت گذرا انجام خواهد شد.

۲-۷- مدل‌سازی برقگیر اکسید روی

عموماً، از برقگیرهای ZnO برای حفاظت تجهیزات مهم شبکه قدرت استفاده می‌شود[۲۵ و ۲۶]. در این مقاله از مدل IEEE برقگیرهای اکسید روی جهت مطالعات صاعقه، استفاده شد. این مدل، مطابق شکل (۶)، شامل مقاومت‌های غیرخطی A_0 و A_1 می‌باشد که توسط یک فیلتر R–L از هم جدا شده‌اند. مقادیر این مقاومت‌ها برحسب ولتاژ–جریان مطابق جدول (۳) می باشند[۲۵].



شکل ۶- مدل IEEE (وابسته به فرکانس) برقگیر

در این مدل، سلف L_1 و مقاومت R_1، فیلتر بین دو مقاومت متغیر را تشکیل می‌دهند و سلف L_0 متناسب با میدان‌های مغناطیسی اطراف برقگیر می باشد. همچنین، مقاومت R_0 برای پایداری عددی حل معادلات (در شبیه‌سازی) به مدار افزوده شده و خازن C نمایانگر ظرفیت بین دو سر ترمینال برقگیر می‌باشد[۲۷ و ۲۸]. پارامترهای مذکور، با استفاده از روابط (۱۴) تا (۱۸) محاسبه می‌شوند[۲۶].

$$L_1(\mu H) = 15\frac{d}{n} \quad (۱۴)$$

$$L_0(\mu H) = 0.2\frac{d}{n} \quad (۱۵)$$

$$R_1(\Omega) = 65\frac{d}{n} \quad (۱۶)$$

$$R_0(\Omega) = 100\frac{d}{n} \quad (۱۷)$$

$$C(pF) = 100\frac{n}{d} \quad (۱۸)$$

UNCORRECTED PROOF

در این روابط، d طول تقریبی برقگیر برحسب متر و n تعداد ستون‌های موازی دیسک‌های ZnO می‌باشد.

جدول ۳- مشخصه ولتاژ-جریان مقاومت‌های غیرخطی A_0 و A_1 [۲۵]

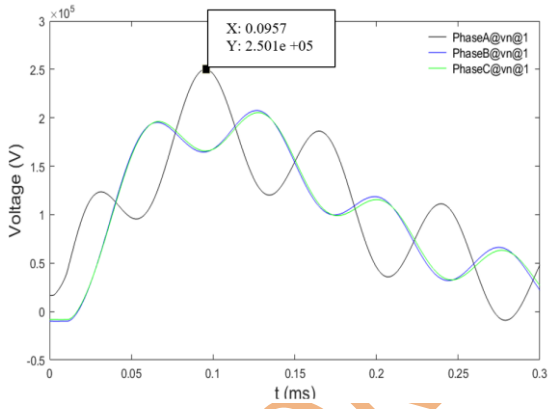
جریان تخلیه (kA)	ولتاژ تخلیه مقاومت A_0 (kV)	ولتاژ تخلیه مقاومت A_1 (kV)
۰/۰۱	۰/۸۵۷	۰
۰/۱	۰/۹۳۶	۰/۷۶۹
۱	۱/۰۵	۰/۸۵
۲	۱/۰۸۸	۰/۸۹۴
۴	۱/۱۲۵	۰/۹۲۵
۶	۱/۱۳۸	۰/۹۳۸
۸	۱/۱۶۹	۰/۹۵۶
۱۰	۱/۱۸۸	۰/۹۶۹
۱۲	۱/۲۰۶	۰/۹۷۵
۱۴	۱/۲۳۱	۰/۹۸۸
۱۶	۱/۲۵	۰/۹۹۴
۱۸	۱/۲۸۱	۱
۲۰	۱/۳۱۳	۱/۰۰۶

۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج مطالعات صاعقه

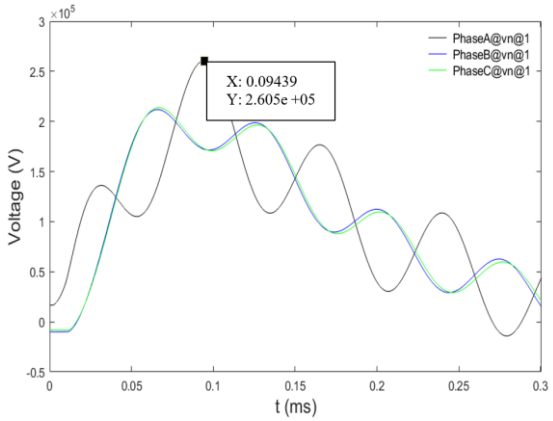
برای مطالعات صاعقه در شبکه توزیع و ارزیابی عملکرد انواع روش‌های حفاظت در برابر آن، اثر برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه در فاصله ۸۰ متری سمت ۲۰ کیلوولت ترانسفورماتور بر دامنه اضافه‌ولتاژ گذرای تولید شده در سر ترمینالهای ترانسفورماتور در حالت‌های مختلف بررسی شد. شکل (۷) ساختار کلی بخشی از شبکه فشارمتوسط تحت مطالعه را نشان می دهد. این شبکه شامل یک خط هوایی با تیرهای بتنی و به طول ۶۶۵ متر و یک خط هوایی با تیرهای چوبی و به طول ۶۰۰ متر بوده که هر خط به یک ترانسفورماتور توزیع ۳۵۰ کیلوولت‌آمپر متصل می‌باشد. مشخصات هر یک از خطوط مطابق جدول (۱) است. در این مقاله، حالت‌های مختلف زیر مورد مطالعه قرار گرفتند:

- بررسی عملکرد حفاظتی سیم محافظ
- بررسی عملکرد حفاظتی برقگیر
- بررسی عملکرد حفاظت کابلی
- بررسی تاثیر فاصله برقگیر از ترانسفورماتور
- بررسی تاثیر مقاومت سیستم زمین پای برقگیر
- بررسی تاثیر مقاومت سیستم زمین پای تیر برق

در صورت برخورد صاعقه به فاز A سمت فشارمتوسط خط بدون حفاظت، شکل موج اضافه‌ولتاژ گذرای ایجاد شده در ترمینال‌های ترانسفورماتور برای خط هوایی با تیر بتنی و خط با تیر چوبی به ترتیب مطابق شکلهای (۸) و (۹) می‌باشد. حداکثر دامنه ولتاژ گذرا سر ترمینال ۲۰ کیلوولت ترانسفورماتور برای خط با تیر بتنی و خط با تیر چوبی به ترتیب برابر ۲۵۰.۱ و ۲۶۰.۵ کیلوولت می باشد که خیلی بیشتر از مقدار مجاز قابل تحمل عایق ترانسفورماتورها (۱۲۵ کیلوولت تحت شرایط استاندارد و ۱۰۴ کیلوولت تحت شرایط محیطی مطابق استاندارد IEEE) می باشد.

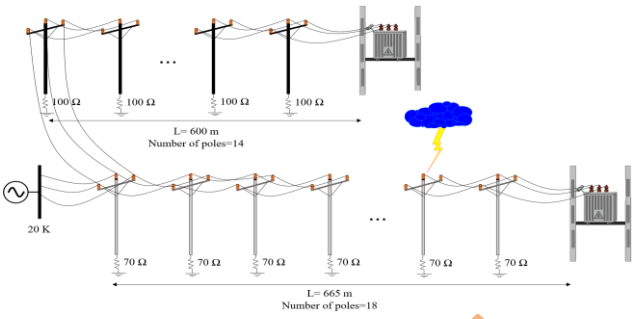


شکل ۸- شکل موج اضافه‌ولتاژ سر فازهای ترانسفورماتور در اثر برخورد مستقیم صاعقه به فاز A در خط با تیرهای بتنی



شکل ۹- شکل موج اضافه‌ولتاژ سر فازهای ترانسفورماتور در اثر برخورد مستقیم صاعقه به فاز A در خط با تیرهای چوبی

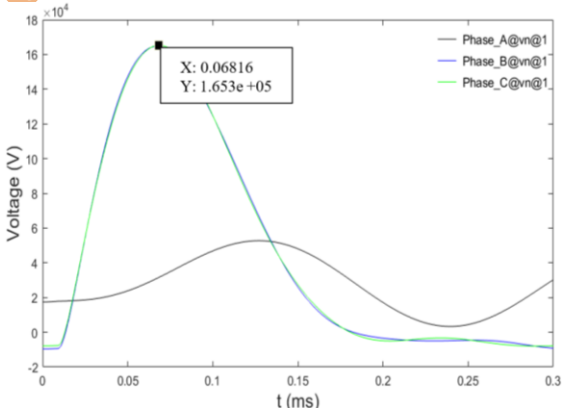
PROOFED



شکل ۷– ساختار شبکه فشارمتوسط تحت مطالعه

۳-۱- بررسی عملکرد حفاظتی سیم محافظ

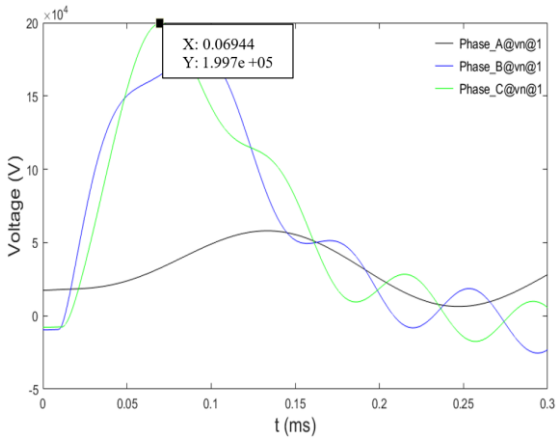
هرچند استفاده از سیم محافظ برای شبکه توزیع چندان مرسوم نیست، اما برای ارزیابی عملکرد حفاظتی آن، فرض شده است که خط فشارمتوسط تحت مطالعه دارای سیم محافظ بوده و مورد اصابت صاعقه با مشخصات مشابه بخش قبل قرار گرفته است. در این صورت مقدار اضافه‌ولتاژ گذرای ایجاد شده در سر ترمینال فشارمتوسط ترانسفورماتور برای شبکه های هوایی با تیرهای بتنی و تیرهای چوبی، مطابق شکل‌های (۱۰) و (۱۱) می‌باشد.



شکل ۱۰– شکل موج اضافه‌ولتاژ سر فازهای ترانسفورماتور در اثر برخورد صاعقه به سیم محافظ (خط با تیرهای بتنی)

همانطور که مشاهده می گردد، دامنه اضافه ولتاژ گذرا در سر ترمینال ترانسفورماتور از مقدار استقامت عایقی آن بیشتر است. به عبارت دیگر، تاثیر سیم محافظ جهت کاهش اضافه ولتاژ گذرای صاعقه در شبکه های فشارمتوسط ناچیز می‌باشد؛ زیرا به دلیل سطح استقامت عایقی پایین و فاصله عایقی کم بین سیم محافظ و بدنه با هادی‌های فاز در شبکه‌های فشارمتوسط، احتمال وقوع جرقه برگشتی ناش از برخورد صاعقه به سیم محافظ بسیار زیاد می‌باشد.

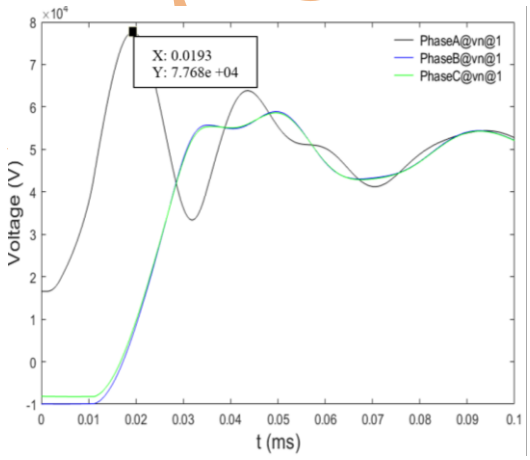
همچنین، در شبکه‌های توزیع هوایی ممکن است حتی با وجود سیم محافظ، صاعقه مستقیماً به هادی فاز برخورد نماید[۷]. لذا، نصب سیم محافظ برای حفاظت شبکه‌های فشارمتوسط در برابر صاعقه عملکرد مطلوبی ندارد.



شکل ۱۱– شکل موج اضافه‌ولتاژ سر فازهای ترانسفورماتور در اثر برخورد صاعقه به سیم محافظ (خط با تیرهای چوبی)

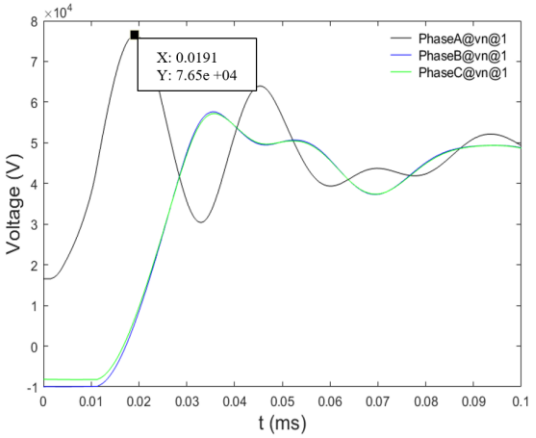
۳-۲- بررسی عملکرد حفاظتی برقگیر

به منظور بررسی عملکرد حفاظتی برقگیر، فرض شده صاعقه به فاز A برخورد کرده و ترانسفورماتور بوسیله برقگیرهایی با جریان تخلیه نامی ۵ و ۱۰ کیلوآمپر و سطح حفاظتی ۵۰٫۸ و ۵۴٫۶ کیلوولت (مطابق اطلاعات سازنده) محافظت شده است. تحت این شرایط و با صرف نظر کردن از مقاومت شبکه زمین پای برقگیر و پای تیر برق‌ها (چوبی و بتنی)، شکل موج اضافه‌ولتاژ گذرای ایجاد شده در ترمینال ترانسورماتور مطابق شکل‌های (۱۲) تا (۱۵) می‌باشد.

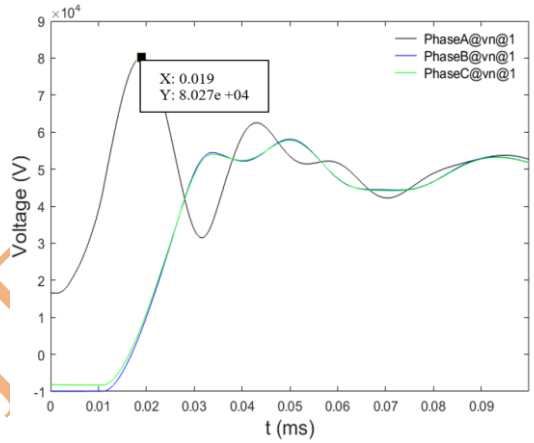


شکل ۱۲– شکل موج اضافه‌ولتاژ سر ترمینالهای ترانسفورماتور با برقگیر دارای جریان نامی ۱۰ کیلوآمپر (تیرهای بتنی)

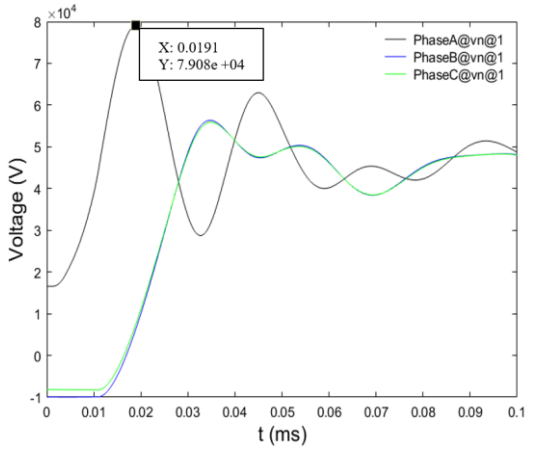
CORRECTED PROOF



شکل ۱۳- شکل موج اضافه‌ولتاژ سر ترمینالهای ترانسفورماتور با برقگیر دارای جریان نامی ۵ کیلوآمپر (تیرهای بتنی)



شکل ۱۴- شکل موج اضافه‌ولتاژ سر ترمینالهای ترانسفورماتور با برقگیر دارای جریان نامی ۱۰ کیلوآمپر (تیرهای چوبی)



شکل ۱۵- شکل موج اضافه‌ولتاژ سر ترمینالهای ترانسفورماتور با برقگیر دارای جریان نامی ۵ کیلوآمپر (تیرهای چوبی)

با مقایسه نتایج شبیه سازیها، مشاهده می‌گردد که برقگیرها برخلاف سیمهای محافظ، حفاظت بسیار مطلوبی را برای ترانسفورماتور شبکه های توزیع فراهم می کنند.

۳-۳- تاثیر حفاظت کابلی بر کاهش اضافه‌ولتاژ

براساس قوانین انتشار و انعکاس امواج سیار، هرگاه موج گذرا از سیم لخت خطوط هوایی وارد کابل (سیم روکش‌دار) شود، بخشی از موج به سمت خط هوایی برمی‌گردد و از دامنه موج گذرای رونده به محیط دوم کاسته می‌شود. از این‌رو، هرگاه خط هوایی بوسیله کابل روکش‌دار به ترانسفورماتور متصل شود، یک نوع حفاظت اولیه (حفاظت کابلی) برای ترانسفورماتور فراهم می‌شود[۵ و ۲۹].

در این‌جا فرض شده است سیم لخت خط هوایی فشارمتوسط بوسیله یک کابل مسی با سطح مقطع ۷۰ میلیمترمربع و روکش عایق PVC، به ترانسفورماتور متصل شده است. همچنین فرض شد یک صاعقه با مشخصات مشابه حالتهای قبل به هادی فاز A خط فشارمتوسط برخورد نماید. مطالعات برای حالتهای مختلف انجام شد. براساس نتایج شبیه‌سازی‌ها، تاثیر طول کابل بر عملکرد روش حفاظت کابلی جهت کاهش اضافه ولتاژهای گذرای تولید شده در سر ترمینالهای ترانسفورماتور توزیع مطابق جدول (۴) می‌باشد.

جدول ۴- تاثیر طول کابل بر حداکثر اضافه ولتاژ سر ترمینال‌های ترانسفورماتور (بدون برقگیر)

طول کابل (m)	ولتاژ گذرا سر ترمینال فاز A (kV)	ولتاژ گذرا سر ترمینال فاز B (kV)	ولتاژ گذرا سر ترمینال فاز C (kV)
صفر	۲۶۵٫۵	۲۱۳٫۹	۲۱۱٫۸
۵	۲۲۲	۲۰۰٫۴	۱۹۹٫۴
۱۰	۲۰۱٫۸	۱۹۰٫۴	۱۹۰٫۴
۱۵	۱۹۷٫۴	۱۹۲٫۵	۱۹۲
۲۰	۱۹۰٫۶	۱۸۸٫۴	۱۸۸٫۱
۲۵	۱۷۹٫۴	۱۷۷٫۷	۱۷۷٫۷
۳۰	۱۷۱٫۳	۱۶۹٫۲	۱۶۹٫۱
۳۵	۱۶۴٫۱	۱۶۴٫۵	۱۶۴٫۵
۴۰	۱۳۰٫۲	۱۲۸٫۲	۱۲۸

همچنین برای بررسی اثر امپدانس موجی کابل، شبیه‌سازی‌ها به ازای کابل با طول ۴۰ متر و امپدانس موجی ۶۶ اهم برای دو حالت بدون برقگیر و با برقگیر انجام شد و نتایج به ترتیب مطابق جداول (۵) و (۶) بدست آمد.

UNCORRECTED

جدول ۵- حداکثر ولتاژ ترمینال‌های ترانسفورماتور در حالت حفاظت کابلی (بدون برقگیر)

امپدانس موجی کابل (Ω)	ولتاژ گذرا سر ترمینال فاز A (kV)	ولتاژ گذرا سر ترمینال فاز B (kV)	ولتاژ گذرا سر ترمینال فاز C (kV)
-	۲۶۵٫۵	۲۱۳٫۹	۲۱۱٫۸
۲۷٫۲	۱۴۳٫۴	۱۴۱٫۱	۱۴۰٫۹
۳۸٫۳	۱۳۵٫۴	۱۳۳٫۲	۱۳۳
۴۳٫۶	۱۳۵٫۹	۱۳۳٫۸	۱۳۳٫۶
۶۶	۱۳۰٫۲	۱۲۸٫۲	۱۲۸

جدول ۶- حداکثر ولتاژ ترمینال‌های ترانسفورماتور در حالت حفاظت ترکیبی برقگیر و کابل

امپدانس موجی کابل (Ω)	ولتاژ گذرا سر ترمینال فاز A (kV)	ولتاژ گذرا سر ترمینال فاز B (kV)	ولتاژ گذرا سر ترمینال فاز C (kV)
-	۸۰٫۲۷	۵۸٫۳۷	۵۸٫۶۷
۲۷٫۲	۶۱٫۲۸	۵۸٫۷۲	۵۶٫۸۸
۳۸٫۳	۶۱٫۰۶	۵۶٫۹۷	۵۷٫۲۱
۴۳٫۶	۶۰٫۵۲	۵۷٫۸	۵۷٫۹
۶۶	۶۰٫۶۲	۵۷٫۷	۵۷٫۸۳

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از کابل مناسب جهت اتصال سیم لخت خط هوایی به ترانسفورماتور، می‌تواند تاثیر قابل توجهی در کاهش اضافه‌ولتاژهای گذرای ظاهر شده در سر ترمینال‌های ترانسفورماتور داشته باشد. بنابراین ترانسفورماتورهایی که با کابل روکشدار به شبکه هوایی متصل می گردند تحت تنش کمتری ناشی از امواج گذرای صاعقه و کلیدزنی قرار دارند. البته این روش ممکن است به تنهایی نتواند حفاظت کاملی برای ترانسفورماتور فراهم نماید اما می تواند به عنوان یک حفاظت اولیه در نظر گرفته شود.

لازم به ذکر است، در صورت استفاده از کابل‌های طویل برای اتصال خط هوایی به ترانسفورماتور، ممکن است دامنه امواج گذرا در سر ترمینال ترانسفورماتور بیش از حد مجاز قابل تحمل کابل و ترانسفورماتور افزایش یابد. در این صورت باید در هر دو سر کابل (سر اتصال به ترمینال ترانسفورماتور و سر اتصال به خط هوایی) برقگیر مناسب نصب گردد.

۳-۴- بررسی اثر فاصله برقگیر تا ترانسفورماتور

برای حفاظت تجهیزات، نرخ یا شیب افزایش ولتاژ اهمیت زیادی دارد؛ زیرا باعث ایجاد اثر جداسازی بین تجهیز حفاظتی و تجهیز تحت حفاظت می‌شود[۷]. در خطوط فشارمتوسط، نرخ افزایش ولتاژ برای ضربات مستقیم صاعقه معمولاً بین ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلوولت بر میکروثانیه و برای اضافه‌ولتاژهای القایی بین ۳۰ تا ۳۰۰ کیلوولت بر میکروثانیه است[۸]. مقدار بالای نرخ افزایش ولتاژ باعث می‌شود فاصله بین تجهیز و وسیله حفاظتی بسیار مهم باشد[۷، ۸]. هرچند عموماً در شبکه‌های توزیع، برقگیر در نزدیکی ترانسفورماتور نصب می‌شود، اما تعیین مقدار دقیق افزایش پتانسیل سر ترمینال‌های ترانسفورماتور ناشی از فاصله برقگیر تا ترانسفورماتور می‌تواند مهم باشد. در جدول(۷)، نتایج مطالعات مربوط به تاثیر فاصله بین برقگیر تا ترانسفورماتور نشان داده شده است.

جدول ۷- تاثیر فاصله برقگیر تا ترانسفورماتور بر دامنه اضافه ولتاژهای گذرا

فاصله از ترانسفورماتور (m)	ولتاژ ایجاد شده در فاز A (kV)	ولتاژ ایجاد شده در فاز B (kV)	ولتاژ ایجاد شده در فاز C (kV)
سر ترمینال	۷۷٫۳۷	۵۳٫۳۵	۵۹٫۸۶
۱	۷۸٫۶۲	۵۵٫۷۵	۶۲٫۸۷
۲	۷۹٫۸۱	۵۵٫۹۸	۶۳٫۶۵
۳	۸۰٫۸۵	۵۹٫۲۲	۶۷٫۲۹
۴	۸۰٫۴۱	۶۰٫۸۸	۶۹٫۴۵
۵	۸۱٫۱۶	۶۲٫۰۲	۷۰٫۹۸
۱۰	۸۵٫۲۴	۶۵٫۲	۷۵٫۸۹

همانطور که مشاهده می گردد با افزایش فاصله بین برقگیر تا ترمینال ترانسفورماتور، مقدار دامنه اضافه ولتاژ گذرا در سر ترمینال ترانسفورماتور نیز افزایش می یابد.

۳-۵- بررسی تاثیر مقاومت شبکه زمین پای برقگیر

مقدار مقاومت سیستم زمین توصیه شده برای برقگیرها طبق استاندارد IEC 60099، ۱۰ اهم (در جریان و فرکانس پایین) می‌باشد. اما ممکن است رسیدن به این عدد در

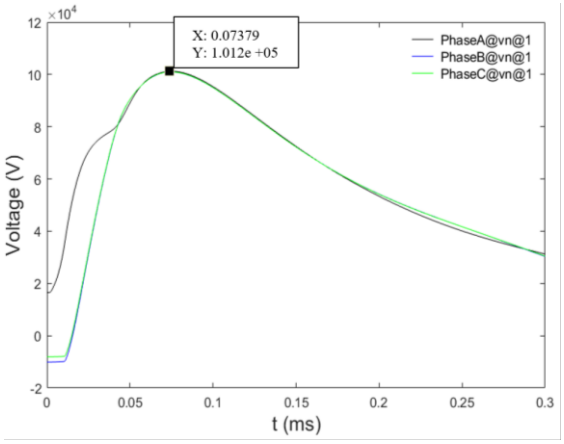
UNCORRECTED PROOF

مناطق سنگلاخی و کوهستانی، دشوار و پر هزینه باشد[۱]. تحت این شرایط، لازم است تا مطالعات برای اطمینان از عملکرد صحیح برقگیرها به عنوان تجهیز حفاظتی، برای کاهش اضافه‌ولتاژهای گذرا صورت گیرد. در این بخش فرض می‌شود که صاعقه‌ای به صورت مستقیم به فاز A برخورد کرده است. تحت این شرایط، تاثیر تغییرات مقاومت سیستم زمین برقگیرها بر حداکثر دامنه اضافه ولتاژ ظاهر شده در سر ترمینال ترانسفورماتور (با در نظر گرفتن مدل یونیزاسیون خاک)، مطابق جدول (۸) می‌باشد.

جدول ۸- تاثیر مقاومت شبکه زمین برقگیر بر حداکثر دامنه ولتاژ ایجاد شده سر ترمینال‌های ترانسفورماتور

مقاومت سیستم زمین برقگیر (Ω)	ولتاژ سر ترمینال فاز A (kV)	ولتاژ سر ترمینال فاز B (kV)	ولتاژ سر ترمینال فاز C (kV)
صفر	۷۷/۳۷	۵۳/۳۵	۵۹/۸۶
۱	۸۰/۲	۶۹/۱	۷۳/۲۲
۵	۱۰۹	۱۰۸/۳	۱۰۹/۵
۱۰	۱۳۳	۱۳۱/۸	۱۳۳
۲۵	۱۶۶/۱	۱۶۱	۱۵۹/۵

همان‌طور که مشاهده می‌گردد، با افزایش مقاومت سیستم زمین برقگیر، دامنه ولتاژ ظاهر شده در سر ترمینال‌های ترانسفورماتور نیز افزایش می‌یابد. بنابراین عملکرد حفاظتی برقگیر و همچنین شبکه قدرت در برابر امواج صاعقه به مقدار مقاومت شبکه زمین برقگیر نیز بستگی دارد. جدول (۸) نشان می‌دهد که حتی با مقاومت ۱۰ اهم سیستم زمین برقگیر، ممکن است نتوان اضافه ولتاژ را به کمتر از ولتاژ قابل تحمل ترانسفورماتور محدود نمود. در این مورد، با به کارگیری همزمان روش حفاظت کابلی و برقگیر، ولتاژ ظاهر شده در سر ترمینال‌های ترانسفورماتور به مقدار مجاز کاهش پیدا کرد. شکل (۱۶)، نمونه‌ای از شکل موج اضافه ولتاژ ظاهر شده در سر ترمینال‌های ترانسفورماتور را در حالت حفاظت شده به واسطه کابل مسی با سطح مقطع ۷۰ میلی‌متر مربع با طول ۴۰ متر و همچنین برقگیر با سیستم زمین ۱۰ اهم را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶- شکل موج اضافه‌ولتاژ سر ترمینال‌های ترانسفورماتور در حالت حفاظت ترکیبی کابل و برقگیر با سیستم زمین با مقاومت ۱۰ اهم

۳-۶- تاثیر مقاومت سیستم زمین پای تیر برق

برای کاهش اثر برخورد غیرمستقیم صاعقه، لازم است تا مقاومت پای تیرهای برق پایین باشد؛ زیرا در غیر این صورت ممکن است پدیده جرقه برگشتی روی مقره خط رخ دهد[۳۰]. برای بررسی تاثیر مقاومت سیستم زمین پای تیرهای برق، از یک مدل ساده شده شبکه برق متشکل از تیرهای با امپدانس موجی و فواصل (اسپن) یکسان استفاده شد. همچنین فرض شد که ترانسفورماتور تحت مطالعه، مجهز به برقگیر حفاظتی در ترمینال خود می‌باشد. نتایج مربوط به تاثیر مقدار مقاومت پای تیرهای برق بر سطح ولتاژ گذرای ظاهر شده در سر ترمینال ترانسفورماتور مطابق جداول (۹) و (۱۰) می‌باشد.

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت سیستم زمین پای تیرهای برق (در جریان و فرکانس پایین)، دامنه اضافه‌ولتاژ ایجاد شده در ترمینال‌های ترانسفورماتور ناشی از برخورد صاعقه افزایش می‌یابد. به‌عنوان نمونه، مقدار ولتاژ در فاز A از حدود ۶۳/۶۸ کیلوولت در مقاومت ۱۰ اهم، به ۷۹/۵۲ کیلوولت در مقاومت ۱۰۰ اهم افزایش یافته است. این روند افزایشی در فازهای B و C نیز مشاهده می‌شود. با اینکه کاهش مقاومت شبکه زمین پای تیرهای برق به حفاظت تجهیزات شبکه می کند، اما ممکن است در مناطق با زمین‌های سنگلاخی و کوهستانی، کاهش مقاومت سیستم زمین از نظر اقتصادی و فنی توجیه نداشته باشد و لازم گردد تا از سایر روش‌های حفاظتی استفاده گردد.

UNCORRECTED PROOF

جدول ۹- تاثیر مقاومت زمین پای تیر برق بر حداکثر مقدار ولتاژ سر ترمینال‌های ترانسفورماتور

مقاومت فرکانس پایین زمین پای تیرها (Ω)	ولتاژ سر ترمینال فاز A (kV)	ولتاژ سر ترمینال فاز B (kV)	ولتاژ سر ترمینال فاز C (kV)
۱۰	۶۳/۶۸	۵۵/۴۸	۵۶/۹۷
۲۰	۶۸/۵۲	۵۱/۱۵	۵۵/۱۱
۵۰	۷۴/۴۱	۵۴/۷۳	۶۱/۴
۷۰	۷۷/۳۷	۵۳/۳۵	۵۹/۸۶
۱۰۰	۷۹/۵۲	۵۵/۸۵	۶۲/۳۳

جدول ۱۰- تاثیر مقاومت زمین پای تیر برق بر دامنه ولتاژ سر ترمینال‌های ترانسفورماتور (برخورد صاعقه به سیم محافظ)

مقاومت فرکانس پایین زمین پای تیرها (Ω)	ولتاژ سر ترمینال فاز A (kV)	ولتاژ سر ترمینال فاز B (kV)	ولتاژ سر ترمینال فاز C (kV)
۱۰	۸۶/۸۹	۸۶/۲۲	۸۶/۶۹
۲۰	۹۵/۰۲	۹۵/۴۷	۹۹/۵۳
۵۰	۱۰۱/۷	۱۰۲/۴	۱۲۱
۷۰	۱۰۵/۳	۱۱۰/۵	۱۲۵/۹
۱۰۰	۱۰۷/۹	۱۱۴/۷	۱۳۰/۴

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ضرورت حفاظت و عملکرد تجهیزات شبکه فشارمتوسط و روش‌های حفاظتی رایج در برابر اضافه ولتاژهای گذرای صاعقه و عوامل تاثیرگذار بر عملکرد تجهیزات حفاظتی برای یک شبکه ۲۰ کیلوولت به دقت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از مدل‌سازی و شبیه‌سازی طرح‌های حفاظتی مختلف به شرح زیر می‌باشد.

۱- به علت طول کم فاصله هوایی مقره (پایین بودن سطح استقامت عایقی در شبکه‌های توزیع)، استفاده از سیم محافظ در این شبکه‌ها تاثیر زیادی برای جلوگیری از برخورد مستقیم صاعقه و کاهش اضافه‌ولتاژهای گذرای آن نداشته و نمی‌تواند مانع از وقوع پدیده جرقه برگشتی گردد.

۲- استفاده از برقگیرهای مناسب و بهینه، بهترین روش حفاظتی در برابر اضافه ولتاژهای گذرای صاعقه (برخورد مستقیم و برخورد غیرمستقیم) می‌باشد.

۳- اتصال خطوط هوایی به‌وسیله کابل به ترانسفورماتور، در کاهش اضافه‌ولتاژ ایجاد شده در سر ترمینال‌های ترانسفورماتور موثر بوده و می‌تواند به عنوان یک روش حفاظتی اولیه یا تکمیلی در کنار برقگیرها به کار گرفته شود.

۴- فاصله محل نصب برقگیر تا تجهیز تحت حفاظت و همچنین مقاومت شبکه زمین برقگیر نقش موثری بر عملکرد حفاظتی برقگیر دارد.

۵- هرچند کاهش مقاومت زمین پای تیرهای برق در کاهش اضافه ولتاژهای منتقل شده به تجهیز تحت حفاظت نقش موثر دارد، اما این روش در مناطقی که زمین و خاک محل دارای مقاومت ویژه بالایی باشد، توجیه اقتصادی و فنی ندارد.

۶- به دلیل کوچکتر بودن امپدانس موجی تیرهای بتنی نسبت به تیرهای چوبی، دامنه اضافه ولتاژهای گذرای صاعقه در شبکه های با تیرهای بتنی نسبت به شبکه های با تیرهای چوبی کمتر می باشد.

به طور کلی، براساس نتایج شبیه‌سازی‌ها و مطالعات انجام شده و همچنین با در نظر گرفتن مسائل فنی و اقتصادی، استفاده از برقگیرهای مناسب، بهترین روش برای حفاظت تجهیزات حساس و مهم شبکه‌های توزیع می‌باشد.

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:

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

طاها گرائلی: روش‌شناسی، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، تحقیق، نگارش پیش نویس اصلی، بررسی و ویرایش.

UNCORRECTED PROOF

نیما کاظمی: روش‌شناسی، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، تحقیق، نگارش پیش نویس اصلی، بررسی و ویرایش.

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

مراجع

[1] M. E. Ahmadi, M. Niasati, and M. R. Barzegar-Bafrooei, “Enhancing the lightning performance of overhead transmission lines with optimal EGLA and downstream shield wire placement in mountainous areas: a complete study,” IET Sci. Meas. Technol., vol. 14, no. 1, pp. 564–575, Mar. 2020.

[2] Cigre JWG C4.4.02 & Study Committee C4, “Protection of MV and LV networks against lightning – Part 1: Common topics,” Tech. Broch. 287, Cigré, 2006.

[3] M. Jamali, M. Niasati, and M. Jazaeri, "A two-layer soil model for the calculation of electrical parameters of grounding systems under lightning strikes," Electric Power Components and Systems, vol. 0, no. 0, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1080/15325008.2019.1575935.

[4] S. Matsuura, T. Noda, A. Asakawa, and S. Yokoyama, "EMTP modeling of a distribution line for lightning overvoltage studies," presented at the Int. Conf. Power Systems Transients (IPST), Lyon, France, Jun. 4–7, 2007.

[5] A. Golami, and M. Niasati. "Overvoltages and insulation coordination in power networks." First edition, Semnan University Press, (2015). (in Persian)

[6] 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, vol. 63, pp. 373–381, Dec. 2014.

[7] CIRFiD/CIGRE Working Group 05, “Lightning protection of distribution networks. Part II: Application to MV networks,” in Proc. 14th Int. Conf. Electr. Distribution (CIRED 97), Conf. Publ. 438, IEE, pp. 2.28.1–2.28.8, Jun. 2–5, 1997.

[8] Cigré Study Committee C4.402, “Protection of Medium Voltage and Low Voltage Networks Against Lightning,” Tech. Broch. 441, 39 pp., Cigré, Dec. 2010.

[9] IEC, IEC 60071-2: Insulation Co-ordination – Part 2: Application Guidelines, International Electrotechnical Commission, Geneva, 2023.

[10] S. Yokoyama, “Analytical and Corroborative Study on Over-voltages Induced on Power Distribution Line Due to Nearby Lightning Strokes,” CRIEPI Report, No. 123, May 1986.

[11] Subcommittee for Power Distribution Systems, Lightning Protection Design Committee, “Guide of Lightning Protection Design for Power Distribution Lines,” CRIEPI Report, No. T69, Feb. 2002.

[12] S. Matsuura, T. Noda, A. Asakawa, S. Yokoyama, “A Distribution Line Model for Lightning Overvoltage Studies”, IEEJ Transactions on Power and Energy, vol. 128, issue 9, pp. 1139-1149 2008.

[13] S. Hintamai and J. Hokierti, "Lightning surge response of concrete pole due to effect of the electrical properties of concrete based on the electromagnetic field method," Kasetsart J. Nat. Sci., Accepted: Dec. 27, 2004.

[14] R. J. Cabral, D. S. Gazzana, R. C. Leborgne, A. S. Bretas, G. A. D. Dias, and M. Telló, "Analysis of distribution lines performance against lightning using ATP-EMTP," in Proc. IEEE PES Transmission and Distribution Conf. Expo., 2012, ISBN: 978-1-4673-0717-8.

[15] F. Safaei and M. Niasati, "A new method for surge arrester placement in high-voltage substations considering environmental effects," IET Science, Measurement & Technology, vol. 18, pp. 550–563, 2024.

[16] K. Intholath and C. Banmongkol, "A simulation of breakdown characteristics of suspension insulators under standard lightning impulse voltages," in Proc. TENCON 2014 - IEEE Region 10 Conf., Piscataway, NJ, USA, 2014, pp. 1–4.

[17] A. F. Imece, D. W. Durbak, H. Elahi, S. Kolluri, A. Lux, D. Mader, T. E. McDemott, A. Morched, A. M. Mousa, R. Natarajan, L. Rugeles, and E. Tarasiewicz, "Modeling Guidelines for Fast Front Transients", IEEE Working Group on Fast Front Transients, 1996.

[18] M. Khodsuz, “Externally gapped line arrester performance in high voltage transmission line using frequency grounding system: Absorbed energy and expected life assessment,” IET Sci. Meas. Technol., vol. 16, no. 6, pp. 689–697, Dec. 2022.

[19] Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines,” CIGRE Working Group 33-01 (Lightning) of Study Committee 33 and Overvoltages and Insulation Coordination,Paris, France, Oct. 1991.

UNCORRECTED PROOF

[20] J. C. Das, Transients in Electrical Systems: Analysis, Recognition, and Mitigation, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2010.

[21] 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).

[22] W. F. Abu Shehab, A. Shehab, and M. I. Alsharari, “Lightning protection for power transformers of Aqaba Thermal Power Station,” Archives of Electrical Engineering, vol. 69, no. 3, pp. 645–660, Sep. 2020.

[23] CIGRÉ Study Committee C4, Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines – New Aspects, Technical Brochure No. 839, 2021.

[24] Powersys Solutions, “Lightning Stroke – Help File,” EMTPWorks Documentation, Feb. 6, 2023. [Online]. Available: https://www.emtp.com.

[25] Eshagh Ahmadi, M., Niasati, M., Barzegar-Bafrooei, M.R.: ‘Simulating and comparing the transient behavior of different models of MV metal oxide surge arresters’. 5th Regional Conf. on Electricity Distribution (CIRED), Iran, 2017, pp. 1–6.

[26] IEEE Working Group 3.4.11, "Modeling of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 1, January 1992.

[27] Christos A. Christodoulou, L. Ekonomou, A.D. Mitropoulou, V. Vita, I.A. Stathopulos, "Surge Arresters’ Circuit Models Review and Their Application to a Hellenic 150 kV Transmission Line", Simulation Modelling Practice and Theory.

[28] S. M. H. Hosseini and Y. Gharadaghi, “New modeling of metal oxide surge arresters,” Signal Processing and Renewable Energy, vol. 1, no. 3, pp. 27–37, Dec. 2017.

[29] A. Mousavi and E. Rahimpour, "Determining the traveling wave coefficients in power transformers using detailed model," in Proc. 2009 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA), Kuala Lumpur, Malaysia, Oct. 4–6, 2009.

[30] F. Safaei, and M. Niasati. "Calculation of UHV transformer insulation risk by extended Monte Carlo method." Electric Power Systems Research 218 (2023): 109219.

UNCORRECTED PROOF