JOURNAL OF SCIENCE
OF LAC HONG UNIVERSITY
ISSN: 2525 - 2186
Tạp chí Khoa học Lạc Hồng, 2026, 29, 008-012

PHƯƠNG PHÁP TÍNH NHANH DÒNG ĐIỆN SÉT TRÊN ĐƯỜNG DÂY CHỐNG SÉT VÀ ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG ĐẾN NỐI ĐẤT TRẠM BIẾN ÁP CAO THẾ

Nguyễn Văn Đức[1], Nguyễn Thanh Sơn*
Trường Đại học Lạc Hồng, Số 10 Huỳnh Văn Nghệ, phường Bửu Long, Biên Hòa, Đồng Nai, Việt Nam
*Tác giả liên hệ: nguyenthanhson@lhu.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận: 09/10/2026
Ngày hoàn thiện: 15/10/2026
Ngày chấp nhận: 31/10/2026
Ngày đăng: 04/11/2026

TỪ KHÓA

Dòng điện sét;
dây chống sét;
hệ thống nối đất;
trạm biến áp cao thế;
đường dây truyền tải.

TÓM TẮT

Khi sét đánh vào dây chống sét của đường dây tải điện, một phần dòng điện sét truyền vào hệ thống nối đất của trạm biến áp, ảnh hưởng đến điện áp trên lưới nối đất và an toàn vận hành. Nghiên cứu đề xuất phương pháp tính nhanh dòng điện sét truyền vào hệ thống nối đất khi sét đánh tại vị trí xác định trên dây chống sét. Dựa trên lý thuyết đường dây truyền tải, hệ thống được quy đổi thành mạch điện tương đương để thiết lập các biểu thức tính toán. Phương pháp giúp đơn giản hóa và rút ngắn thời gian xác định dòng điện sét trong các trường hợp khảo sát khác nhau.

FAST CALCULATION METHOD FOR LIGHTNING CURRENT ON THE OVERHEAD GROUND WIRE AND ASSESSMENT OF ITS IMPACT ON THE GROUNDING SYSTEM OF HIGH-VOLTAGE SUBSTATIONS

Nguyen Van Duc[1], Nguyen Thanh Son*
Lac Hong University, No. 10 Huynh Van Nghe Street, Buu Long Ward, Bien Hoa, Dong Nai Province, Vietnam
*Corresponding Author: nguyenthanhson@lhu.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: Oct 09th, 2026
Revised: Oct 15th, 2026
Accepted: Oct 31st, 2026
Published: Nov 04th, 2026

KEYWORDS

Lightning current;
overhead ground wire;
grounding system;
high-voltage substation;
transmission line.

ABSTRACT

When lightning strikes the overhead ground wire of a transmission line, part of the lightning current flows into the grounding system of the substation, affecting the ground potential and operational safety. This study proposes a fast method for calculating the lightning current flowing into the substation grounding system when lightning strikes at a specified location on the overhead ground wire. Based on transmission line theory, the system is represented by an equivalent electrical circuit to derive the corresponding calculation expressions. The proposed method simplifies the calculation process and reduces the time required to determine lightning current under different study conditions.

Available online at: https://lhj.vn

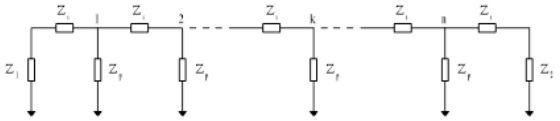
1. Tổng quan

Việc xác định chính xác dòng điện sét phân bố trong hệ thống nối đất của trạm biến áp là một vấn đề quan trọng trong quá trình thiết kế và đánh giá an toàn hệ thống điện [3, 4, 8, 9]. Khi sét đánh vào dây chống sét của đường dây truyền tải, dòng điện sét sẽ phân bố theo nhiều hướng, trong đó một phần truyền qua dây chống sét đến các cột điện và đi vào hệ thống nối đất, đồng thời một phần có thể truyền về phía trạm biến áp. Giá trị và sự phân bố của dòng điện này phụ thuộc vào nhiều yếu tố như vị trí sét đánh, tổng trở nối đất của các cột, đặc tính của dây chống sét, chiều dài đường dây và điều kiện đầu cuối của hệ thống.

Trong các nghiên cứu trước đây [5, 6, 7], bài toán phân bố dòng điện sét thường được giải quyết bằng các mô hình điện từ hoặc mô hình đường dây truyền tải kết hợp với các phương pháp tính toán số. Các phương pháp này có khả năng mô tả tương đối đầy đủ quá trình lan truyền và phân bố của dòng điện sét trong hệ thống. Tuy nhiên, việc xây dựng mô hình chi tiết thường đòi hỏi nhiều thông số đầu vào, quá trình tính toán tương đối phức tạp và cần sự hỗ trợ của các chương trình mô phỏng chuyên dụng. Điều này có thể gây khó khăn khi cần thực hiện các phép tính nhanh trong giai đoạn thiết kế, kiểm tra hoặc đánh giá sơ bộ hệ thống nối đất.

Bên cạnh các phương pháp mô phỏng số, lý thuyết đường dây truyền tải cũng được sử dụng để xây dựng các mô hình tương đương nhằm nghiên cứu sự lan truyền của sóng dòng điện trên dây chống sét. Cách tiếp cận này cho phép đơn giản hóa hệ thống thực tế thành các phần tử có thông số tương đương, từ đó thuận lợi hơn cho việc xác định sự phân bố dòng điện tại các vị trí khác nhau trên đường dây. Tuy nhiên, đối với hệ thống có nhiều khoảng vượt và nhiều cột nối đất, việc xác định trực tiếp dòng điện tại vị trí trạm vẫn có thể trở nên phức tạp nếu phải thực hiện đầy đủ các bước tính toán cho từng trường hợp.

Xuất phát từ yêu cầu trên, bài báo đề xuất một phương pháp tính nhanh dòng điện sét truyền vào hệ thống nối đất của trạm biến áp khi sét đánh tại một vị trí xác định trên dây chống sét của đường dây truyền tải. Phương pháp hướng đến việc giảm khối lượng tính toán nhưng vẫn bảo đảm cơ sở lý thuyết cần thiết để xác định dòng điện phân bố trong hệ thống.



Hình 1: *Mô hình mạch tương đương của đường dây chống sét*

Trên cơ sơ lý thuyết đường dây truyền tải [1-3], hệ thống dây chống sét và các cột điện có thể được quy đổi về một mạch điện tương đương như trình bày ở hình 1. Trong đó, n là số khoảng vượt, ở mỗi khoảng vượt được đặc trưng bởi một trở kháng nối đất của cột (Zp) và một trở kháng của dây chống sét (Zs). Z_1 là tổng trở nối đất tại trạm biến áp 1, Z_2 là tổng trở nối đất tại trạm biến áp 2. Nếu đường dây hở mạch $Z_2 = \infty$. Toàn bộ hệ thống dây chống sét_cột được mô hình hoá thành mạch n-pi tương đương, việc tính toán giá trị dòng điện sét sẽ là quá trình tính toán phân bố dòng điện trên mạch n-pi tương đương.

Từ mô hình trên, toàn bộ hệ thống dây chống sét – cột được mô hình hóa thành một mạch n-π tương đương. Khi đó, bài toán xác định dòng điện sét truyền qua hệ thống nối đất được chuyển thành bài toán xác định sự phân bố dòng điện trên mạch tương đương. Việc xây dựng mô hình này tạo cơ sở để thiết lập các biểu thức tính toán trực tiếp, qua đó rút ngắn quá trình xác định dòng điện sét tại trạm mà không cần phải xây dựng lại mô hình mô phỏng phức tạp cho từng trường hợp.

Phương pháp đề xuất có thể được sử dụng để khảo sát ảnh hưởng của các thông số chính như vị trí sét đánh, số lượng khoảng vượt, trở kháng nối đất của cột và tổng trở nối đất của trạm đến giá trị dòng điện truyền vào hệ thống nối đất. Đây cũng là cơ sở để tiếp tục đánh giá mức độ phù hợp của phương pháp tính nhanh thông qua việc so sánh với kết quả tính toán bằng các phương pháp số hoặc mô phỏng chi tiết.

2. Phương pháp tính:

2.1. Tính toán trở kháng:

Theo các nghiên cứu được trình bày trong [1, 2, 10], việc xác định tổng trở tương đương Thevenin của đường dây chống sét cần xét đến đặc tính của các khoảng vượt, trở kháng nối đất của các cột điện và điều kiện làm việc tại đầu cuối đường dây. Trong trường hợp tổng quát, khi cuối đường dây được giả thiết ở trạng thái hở mạch, tổng trở tương đương Thevenin nhìn từ đầu đường dây được xác định dựa trên ma trận đặc tính tương đương của toàn bộ hệ thống. Việc thiết lập biểu thức này cho phép mô tả ảnh hưởng của các thông số đường dây đến tổng trở nhìn vào, đồng thời tạo cơ sở để xác định dòng điện sét phân bố trong hệ thống khi có sét đánh vào dây chống sét. Khi đó, tổng trở tương đương Thevenin được xác định theo biểu thức sau:

$$\Rightarrow Z_{th0} = \frac{\alpha_1\left(b-\sqrt{4Z_sZ_p+Z_s^2}\right)^n - \alpha_2\left(b+\sqrt{4Z_sZ_p+Z_s^2}\right)^n}{\left(b+\sqrt{4Z_sZ_p+Z_s^2}\right)^n - \left(b-\sqrt{4Z_sZ_p+Z_s^2}\right)^n} \quad (1)$$

Trong đó:

$$b = 2Z_p + Z_s \quad (2)$$

$$\alpha_1 = \frac{-Z_s + \sqrt{4Z_sZ_p+Z_s^2}}{2} \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \frac{-Z_s - \sqrt{4Z_sZ_p+Z_s^2}}{2} \quad (4)$$

$$\text{hay } \alpha_2 = -\left(Z_s + \alpha_1\right) \quad (5)$$

Trong trường hợp đường dây chống sét có kết nối với hệ thống nối đất của trạm biến áp 1 thông qua tổng trở nối đất (Z1), điều kiện biên tại đầu đường dây cần được đưa vào quá trình xác định tổng trở tương đương. Khi đó, trở kháng Thevenin nhìn từ đầu đường dây không chỉ phụ thuộc vào đặc tính của dây chống sét và các cột điện trên đường dây mà còn chịu ảnh hưởng của tổng trở nối đất tại trạm biến áp. Dựa trên ma trận đặc tính tương đương của

hệ thống và áp dụng các điều kiện biên tương ứng, có thể thiết lập biểu thức xác định trở kháng Thevenin trong trường hợp này. Quá trình biến đổi và chứng minh công thức được trình bày chi tiết trong Phụ lục tính toán. Kết quả thu được được sử dụng làm cơ sở để xác định dòng điện sét truyền vào hệ thống nối đất của trạm biến áp khi sét đánh trên dây chống sét. Cụ thể, trở kháng Thevenin được xác định theo biểu thức sau (xem chứng minh trong phụ lục):

$$Z_{th1} = Z_{th0} - \frac{Z_{pTD}^2}{Z_{th0} + Z_1} \tag{6}$$

Trong đó:

$$Z_{pTD} = \frac{2^n Z_p^n \sqrt{4Z_s Z_p + Z_s^2}}{\left(b + \sqrt{4Z_s Z_p + Z_s^2}\right)^n - \left(b - \sqrt{4Z_s Z_p + Z_s^2}\right)^n} \tag{7}$$

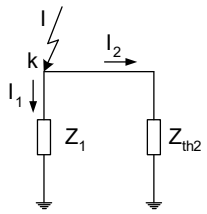
2.2. Tính toán dòng điện:

Như vậy, theo bài toán đặt ra, (xem hình H1) xét 2 trường hợp sau:

a. Trường hợp sét đánh ngay cột cổng của trạm biến áp 1

Khi sét đánh trực tiếp vào cột cổng của trạm biến áp 1, dòng điện sét sẽ phân chia theo các nhánh dẫn điện của hệ thống, trong đó một phần truyền vào hệ thống nối đất của trạm và phần còn lại lan truyền trên dây chống sét về phía đường dây truyền tải. Tỷ lệ phân chia dòng điện phụ thuộc vào trở kháng tại điểm sét đánh, tổng trở nối đất của trạm biến áp và trở kháng tương đương của đường dây chống sét nhìn từ vị trí sự cố. Do đó, việc xác định dòng điện sét đi vào hệ thống nối đất cần xem xét đồng thời các đặc tính điện của đường dây và hệ thống nối đất tại trạm.

Trong trường hợp này, do vị trí sét đánh nằm ngay tại cột cổng của trạm biến áp 1, bài toán có thể được thiết lập dựa trên mối quan hệ giữa dòng điện sét tổng, tổng trở nối đất của trạm và trở kháng Thevenin nhìn từ điểm sét đánh về phía đường dây chống sét. Từ mô hình mạch tương đương, dòng điện sét truyền vào hệ thống nối đất của trạm được xác định theo biểu thức sau:



Hình 2: *Mạch điện tương đương nhìn từ vị trí sét đánh*

Lúc đó, dòng điện đi qua hệ thống nối đất tại trạm được xác định như sau (xem hình H2):

$$\Rightarrow I_{z1} = \frac{Z_{th2}}{Z_1 + Z_{th2}} I \tag{8}$$

Trong đó:

Z_{th2} là trở kháng Thevenin nhìn từ đầu đường dây về phía trạm biến áp 2 (Ω).

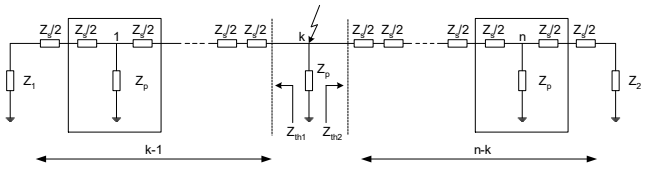
Z_1 là tổng trở của hệ tống nối đất tại trạm biến áp 1 (Ω).

I là giá trị dòng điện sét (kA)

b. Trường hợp sét đánh tại một cột thứ k trên đường dây

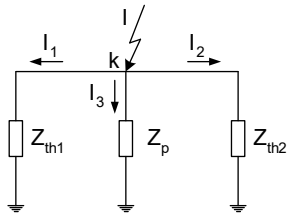
Khi sét đánh tại cột thứ (k) trên đường dây chống sét kết nối giữa hai trạm biến áp, dòng điện sét sẽ phân bố theo hai hướng dọc theo đường dây về phía hai trạm. Một phần dòng điện truyền về trạm biến áp 1 và đi vào hệ thống nối đất của trạm, phần còn lại truyền về phía trạm biến áp 2. Sự phân bố dòng điện phụ thuộc vào vị trí sét đánh, số khoảng vượt từ cột bị sét đánh đến mỗi trạm, trở kháng của dây chống sét, trở kháng nối đất của các cột và tổng trở nối đất tại hai trạm biến áp.

Để xác định dòng điện sét truyền vào hệ thống nối đất của trạm biến áp 1, đường dây được phân chia thành hai phần tại vị trí cột thứ (k). Mỗi phần được biểu diễn bằng một mạch điện tương đương, từ đó xác định trở kháng nhìn về phía từng trạm. Kết hợp các trở kháng tương đương này với tổng trở nối đất của hai trạm, có thể thiết lập mạch phân chia dòng điện tại vị trí sét đánh. Trên cơ sở đó, dòng điện sét đi qua hệ thống nối đất của trạm biến áp 1 được xác định theo biểu thức sau:



Hình 3: *Mô hình mạch hình PI khi có sét đánh vào vị trí thứ k*

Khi đó mạch điện tương đương được biến đổi về mạch điện như sau:



Hình 4: *Mạch điện tương đương nhìn từ vị trí sét đánh*

Như thế dòng điện chạy về mỗi phía được xác định từ mạch tương đương hình 4 là:

$$\begin{cases} I_1 = \dfrac{Z_{th2} Z_p}{Z_p Z_{th1} + Z_{th2} Z_p + Z_{th1} Z_{th2}} I \\ I_2 = \dfrac{Z_{th1} Z_p}{Z_p Z_{th2} + Z_{th1} Z_p + Z_{th1} Z_{th2}} I \\ I_3 = \dfrac{Z_{th1} Z_{th2}}{Z_p Z_{th2} + Z_{th1} Z_p + Z_{th1} Z_{th2}} I \end{cases} \tag{9-11}$$

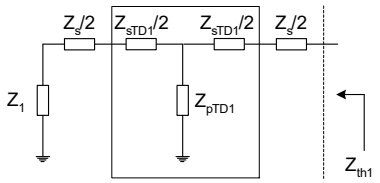
Trong đó:

Z_{th1} là trở kháng thevenin nhìn từ vị trí sét đánh về phía trạm biến áp 1 (Ω).

Z_{th2} là trở kháng thevenin nhìn từ vị trí sét đánh về phía trạm biến áp 2 (Ω).

Z_p là trở kháng nối đất của cột tại vị trí sét đánh (Ω).

Xét mạch điện hình T tương đương nhìn về phía trạm biến áp 1 như hình 5:



Hình 5: *Mạch Thevenin nhìn từ vị trí sét đánh về đầu đường dây*

Tính toán dòng điện chạy vào hệ thống nối đất tại trạm biến áp 1 có:

$$I_{z1} = \frac{Z_{pTD1}}{Z_1 + Z_{th01}} I_1 \quad (12)$$

Trong đó:

Z_{pTD1} là trở kháng tương đương khi biến đổi mạch điện phía trạm biến áp 1 (nhánh bên trái trong hình 3) về dạng hình T tương tương (Ω).

Z_{th01} là trở kháng Thevenin nhìn từ vị trí sét đánh về phía trạm biến áp 1 trong trường hợp hở mạch tại trạm biến áp này (Ω).

Z_1 là trở kháng hệ thống nối đất tại trạm biến áp 1 (Ω).

Tương tự:

$$I_{z2} = \frac{Z_{pTD2}}{Z_2 + Z_{th02}} I_2 \quad (13)$$

Trong đó:

Z_{pTD2} là trở kháng tương đương khi biến đổi mạch điện phía trạm biến áp 2 (nhánh bên phải trong hình 3) về dạng hình T tương tương (Ω).

Z_{th02} là trở kháng thevenin nhìn từ vị trí sét đánh về phía trạm biến áp 2 trong trường hợp hỡ mạch tại trạm biến áp này (Ω).

Z_2 là trở kháng hệ thống nối đất tại trạm biến áp 2 (Ω).

Thay kết quả trên vào các phương trình (3, 4) ta có dòng điện chạy vào hệ thống nối đất tại các trạm biến áp được xác định như sau:

$$\begin{cases} I_{z1} = \dfrac{Z_{pTD1} Z_{th2}}{Z_1 + Z_{th01}} \times \dfrac{Z_p}{Z_p Z_{th2} + Z_{th1} Z_p + Z_{th1} Z_{th2}} I \\ I_{z2} = \dfrac{Z_{pTD2} Z_{th1}}{Z_2 + Z_{th02}} \times \dfrac{Z_p}{Z_p Z_{th2} + Z_{th1} Z_p + Z_{th1} Z_{th2}} I \end{cases} \quad (14\text{-}15)$$

3. Phân tích và kết quả:

Từ các phân tích trên ta có thể rút ra phương pháp để tính toán dòng điện sét chạy vào hệ thống nối tại trạm biến áp khi sét đánh tại một vị trí bất kỳ trên đường dây chống sét như sau:

(i). Xác định trở kháng thevenin nhìn từ vị trí sét đánh về mỗi phía với số nút lần lượt là (k-1) và (n-k) trong trường hợp đường dây chống sét không đấu nối vào hệ thống nối đất tại các trạm biến áp:

$$\begin{cases} Z_{th01} = \dfrac{\alpha_1 \left(b - \sqrt{4Z_s Z_p + Z_s^2}\right)^{1-k} - \alpha_2 \left(b + \sqrt{4Z_s Z_p + Z_s^2}\right)^{1-k}}{\left(b + \sqrt{4Z_s Z_p + Z_s^2}\right)^{1-k} - \left(b - \sqrt{4Z_s Z_p + Z_s^2}\right)^{1-k}} \\ Z_{th02} = \dfrac{\alpha_1 \left(b - \sqrt{4Z_s Z_p + Z_s^2}\right)^{n-k} - \alpha_2 \left(b + \sqrt{4Z_s Z_p + Z_s^2}\right)^{n-k}}{\left(b + \sqrt{4Z_s Z_p + Z_s^2}\right)^{n-k} - \left(b - \sqrt{4Z_s Z_p + Z_s^2}\right)^{n-k}} \end{cases} \quad (16\text{-}17)$$

(ii). Xác định trở kháng thevenin nhìn từ vị trí sét đánh về mỗi phía đường dây khi dây chống sét kết nối với hệ thống nối đất của trạm biến áp:

$$\begin{cases} Z_{th1} = Z_{th01} - \dfrac{Z_{pTD1}^2}{Z_{th01} + Z_1} \\ Z_{th2} = Z_{th02} - \dfrac{Z_{pTD2}^2}{Z_{th02} + Z_1} \end{cases} \quad (18\text{-}19)$$

(iii). Tính toán giá trị dòng điện sét đi vào hệ thống nối đất tại mỗi trạm biến áp khi có sét đánh tại trí nút thứ k trên đường dây chống sét:

$$\begin{cases} I_{z1}(k) = \dfrac{Z_{pTD1}}{Z_1 + Z_{th01}} \times \dfrac{Z_p}{Z_p Z_{th2} + Z_{th1} Z_p + Z_{th1} Z_{th2}} \times Z_{th2} I \\ I_{z2}(k) = \dfrac{Z_{pTD2}}{Z_2 + Z_{th02}} \times \dfrac{Z_p}{Z_p Z_{th2} + Z_{th1} Z_p + Z_{th1} Z_{th2}} \times Z_{th1} I \end{cases} \quad (20\text{-}21)$$

4. Kết luận:

Bài báo đã đề xuất phương pháp và xây dựng một số công thức nhằm xác định nhanh giá trị dòng điện sét truyền qua hệ thống nối đất của trạm biến áp cao thế khi xảy ra sét đánh trên dây chống sét của đường dây tải điện kết nối với trạm. Phương pháp được xây dựng dựa trên việc quy đổi hệ thống dây chống sét và các cột điện thành mạch điện tương đương, từ đó đơn giản hóa quá trình xác định sự phân bố dòng điện sét trong hệ thống.

Kết quả nghiên cứu cho phép rút ngắn quá trình tính toán, giảm sự phụ thuộc vào các mô hình mô phỏng phức tạp và phần mềm chuyên dụng. Phương pháp có thể được sử dụng như một công cụ tính toán sơ bộ, hỗ trợ đánh giá dòng điện truyền vào hệ thống nối đất và phục vụ cho quá trình thiết kế, kiểm tra và lựa chọn các thông số phù hợp cho hệ thống nối đất của trạm biến áp cao thế..

5. Tài liệu tham khảo:

[1]. M.I.Lorentzou, N.D.Hatziargyriou – Modelling of Long Grounding Conductors Using EMTP – IPST '99 – International Conference on Power Systems Transients, June 20-24, 1999, Budapest – Hungary.

[2]. M.I.Lorentzou, N.D. Hatziargyriou.- Overview of Grounding Electrode Modes and Their Representation in Digital Simulations. International Conference on Power Systems Transients, IPST 2003 in New Orleans, USA.

[3]. Akifumi Yamanaka, Kazuyuki Ishimoto, Akiyoshi Tatematsu, "Lightning overvoltages incoming to a substation: Analysis with emphasis on the LEMP impact", Electric Power Systems Research, 2025.

[4]. Mladen Banjanin, "Lightning Protection of the 110 kV Substation at the Wind Park – Surge Arresters in

the Line Bay or at the Gantry Tower", ICCK Transactions on Electric Power Networks and Systems, 2025.

[5]. Alhassane Sylla, Christophe Volat et al., "Transient Lightning Response of a New Substation Grounding Method Using General FEM Software", Applied Sciences, 2026.

[6]. Research on Lightning Protection Grounding System of 35 kV Substation Based on Big Data Analysis, 2025.

[7] Y. Zhang, "A Practical Method for Transient Analysis of Grounding Grids," IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, vol. 18, no. 7, pp. 1120–1126, 2023. DOI: 10.1002/tee.23820.

[8] Z. X. Li, P. Li, X. Zhao, et al., "Galerkin boundary element method for simulating lightning response of grounding grid in horizontal multilayered soil model considering soil ionization effect," International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, vol. 37, no. 5, e3285, 2024. DOI: 10.1002/jnm.3285.

[9] R. Alipio, M. A. O. Schroeder, and M. M. Afonso, "Voltage Distribution Along Earth Grounding Grids Subjected to Lightning Currents," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 6, pp. 4912–4916, 2015. DOI: 10.1109/TIA.2015.2412518.

[10] R. Zeng, P. Kang, J. He, B. Zhang, et al., "Lightning transient performance analysis of substation based on complete transmission line model of power network and grounding systems," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, no. 4, pp. 875–878, 2006. DOI: 10.1109/TMAG.2006.871462.

6. Phụ lục tính toán:

Để xác định trở kháng Thevenin nhìn từ vị trí sự cố về phía cuối đường dây chống sét có kết nối với hệ thống nối đất của trạm biến áp, cần thiết lập mô hình mạch tương đương và xác định mối quan hệ giữa điện áp, dòng điện tại các đầu mạch. Trên cơ sở lý thuyết đường dây truyền tải, hệ thống gồm các khoảng vượt liên tiếp có thể được biểu diễn bằng các mạch tương đương dạng *pi*. Để thuận tiện cho quá trình tính toán, mỗi mạch *pi* được chuyển đổi thành mạch tương đương dạng T, từ đó hình thành một chuỗi gồm *n* mạng T mắc nối tiếp..

Giả sử các khoảng vượt trên đường dây có cùng thông số trở kháng, mỗi mạch T có thể được xem là một mạng hai cửa với ma trận đặc tính giống nhau. Ma trận này thể hiện mối quan hệ giữa các đại lượng điện áp và dòng điện ở hai đầu mạng, đồng thời là cơ sở để xác định đặc tính điện của toàn bộ hệ thống khi các khoảng vượt được ghép nối liên tiếp. Ma trận đặc tính của từng khoảng vượt được xác định như sau:

$$A_1 = A_2 = ... = A_n = A = \begin{bmatrix} \frac{2Z_p + Z_s}{2Z_p} & \frac{4Z_sZ_p + Z_s^2}{4Z_p} \\ \frac{1}{Z_p} & \frac{2Z_p + Z_s}{2Z_p} \end{bmatrix} \quad \text{(PL.1)}$$

Trong đó, (Zp) là trở kháng nối đất của cột điện và (Zs) là trở kháng đặc trưng cho dây chống sét trong mỗi khoảng vượt. Các phần tử của ma trận (A) mô tả mối quan hệ điện giữa hai cửa của mạng T tương đương. Việc xác định ma trận cho một khoảng vượt giúp đơn giản hóa quá trình phân tích, bởi đặc tính của toàn bộ đường dây có thể được suy ra từ đặc tính của các mạng thành phần.

Do các mạch T có cùng ma trận đặc tính và được mắc nối tiếp, ma trận đặc tính tổng hợp của toàn bộ hệ thống được xác định bằng tích các ma trận thành phần. Vì các ma trận này giống nhau, phép nhân ma trận có thể được biểu diễn dưới dạng lũy thừa bậc *n*. Như vậy, ma trận đặc tính tương đương của hệ thống được xác định theo biểu thức:

$$A_{TD} = A_1 \times A_2 \times \ldots \times A_n = A^n \quad \text{(PL.2)}$$

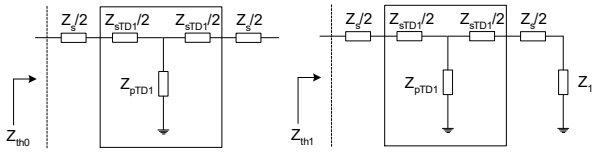
Áp dụng định lý Cayley-Hamilton để tính toán các phần tử của ma trân đặt tính tương đương:

$$\Rightarrow A_{TD} = \begin{bmatrix} \beta_0 + \beta_1 A(11) & A(12) \\ A(21) & \beta_0 + \beta_1 A(22) \end{bmatrix} \quad \text{(PL.3)}$$

Trong đó:

$$\begin{cases} \beta_0 = \dfrac{\lambda_2\lambda_1^n - \lambda_1\lambda_2^n}{\lambda_2 - \lambda_1} \\ \beta_1 = \dfrac{\lambda_1^n - \lambda_2^n}{\lambda_1 - \lambda_2} \end{cases} \text{ với } \begin{cases} \lambda_1 = \dfrac{2Z_p + Z_s + \sqrt{4Z_sZ_p + Z_s^2}}{2Z_p} \\ \lambda_2 = \dfrac{2Z_p + Z_s - \sqrt{4Z_sZ_p + Z_s^2}}{2Z_p} \end{cases}$$

Biến đổi ngược mạng hai cửa với ma trận đặt tính được xác định trong (PL.3) thành dạng mạch tương đương hình T:



Hình PL1: *Mạch điện tương đương Thevenin khi có và không có trở kháng cuối đường dây*

Khi này các thông số mạch hình T này được xác định như sau:

$$\begin{cases} Z_{sTD}/2 = Z_p + \dfrac{Z_s}{2} + Z_p\dfrac{\beta_0}{\beta_1} - \dfrac{Z_p}{\beta_1} \\ Z_{pTD} = \dfrac{Z_p}{\beta_1} \end{cases} \quad \text{(PL.4)}$$

Từ mạch tương đương (hình PL.1) ta có thể xác định được trở kháng Thevenin nhìn từ đầu đường dây khi không có và có trở kháng cuối đường dây:

$$\begin{cases} Z_{th0} = Z_s + Z_p\left(1 + \dfrac{\beta_0}{\beta_1}\right) \\ Z_{th1} = Z_{th0} - \dfrac{Z_{pTD}^2}{Z_{th0} + Z_1} \end{cases} \quad \text{(PL.5)}$$

Trong đó:

$$Z_{pTD} = \frac{2^n Z_p^n \sqrt{4Z_sZ_p + Z_s^2}}{\left(b + \sqrt{4Z_sZ_p + Z_s^2}\right)^n - \left(b - \sqrt{4Z_sZ_p + Z_s^2}\right)^n}$$

Với $b = 2Z_p + Z_s$