

TÍNH TOÁN TỐI ƯU CẤU TRÚC DẪN SÉT CỦA CỘT BÊ TÔNG LY TÂM CHO ĐƯỜNG DÂY TRUNG THỂ BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

FINITE ELEMENT-BASED OPTIMIZATION OF THE LIGHTNING CONDUCTION STRUCTURE IN REINFORCED POLES FOR MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION LINES

Trần Anh Tùng, Nguyễn Đức Quang

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 07/5/2025, Ngày chấp nhận đăng: 30/5/2025

Tóm tắt:

Điện áp quá độ do sét trên cách điện đường dây trung thể chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố trong đó bao gồm tổng trở sóng của cột bê tông ly tâm. Các tính toán tổng trở sóng thường sử dụng công thức giải tích đối với các cấu trúc cột đơn giản, không có công thức cho các cột đi kèm dây nối đất ngoài thân cột. Chính vì vậy, nghiên cứu này đề xuất giải pháp tính toán sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method - FEM) để tính toán tổng trở sóng của các cột bê tông kèm dây nối đất ngoài thân cột có cấu trúc phức tạp hơn. Phương pháp tính toán này cho phép đề xuất cấu trúc dẫn sét tối ưu của cột bê tông ly tâm nhằm cải thiện hiệu năng thoát sét cho các đường dây trung thể.

Từ khóa: FEM, tổng trở sóng, cột bê tông, cách điện, dây nối đất ngoài.

Abstract:

Lightning-induced overvoltages pose a significant threat to the reliability of medium voltage (MV) distribution lines in power systems, particularly through their impact on line insulators. Among the key parameters influencing these overvoltages is the surge impedance of pole structures, especially reinforced concrete poles commonly used in MV networks. Traditional analytical methods for surge impedance calculation are limited to simple pole geometries and do not adequately address configurations that include external grounding wires. This paper proposes a finite element method (FEM)-based approach to accurately compute the surge impedance of more complex pole structures incorporating external grounding conductors. The proposed method enables the detailed modeling of electromagnetic interactions within the pole-ground system and facilitates the optimization of grounding designs. Simulation results demonstrate that the optimized grounding structure significantly improves lightning discharge performance, offering a practical implementation to enhance the resilience of MV distribution systems against lightning-induced transients.

Key words: FEM, surge impedance, reinforced concrete pole, insulator, external grounding conductor.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khi các đường dây trung thể trên không bị sét đánh sẽ gây ra quá điện áp đặt lên các chuỗi cách điện đường dây. Các quá điện áp này, nếu không được tiêu thoát bằng các biện pháp

bảo vệ, có thể dẫn đến phóng điện trên cách điện đường dây và gây ra mất điện. Một trong những yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến mức độ quá điện áp là thông số tổng trở sóng của các cấu trúc cột bê tông ly tâm.

Trong những năm gần đây, cột bê tông ly tâm quay ngày càng được sử dụng rộng rãi cho các đường dây trung thế trên không do độ bền cơ học và khả năng chống lại sự xuống cấp do môi trường. Tuy nhiên, hình dạng phức tạp và thành phần vật liệu của cột bê tông gây ra khó khăn trong việc mô tả chính xác đáp ứng của chúng trong điều kiện quá độ do sét. Đặc biệt, tổng trở sóng của cột bê tông còn chịu ảnh hưởng của cấu trúc hình học, tính chất điện môi và sự có mặt của các dây nối đất bên ngoài thân cột.

Các mô hình giải tích ban đầu về tổng trở sóng của cột bê tông ly tâm chủ yếu áp dụng cho cấu trúc cột đơn giản, chẳng hạn như các dây nối đất thẳng đứng hoặc cột hình trụ. Phayomhom và cộng sự [1] đã phát triển các công thức giải tích cho các cột thẳng đứng đơn và nhiều cột, cung cấp những hiểu biết cơ bản về các phép tính tổng trở sóng cho các cấu trúc cơ bản. Tương tự như vậy, Wagner và Hileman [2] đã đưa ra các biểu thức cho tổng trở sóng trung bình của các cột thẳng đứng, sau đó được Sargent và Darveniza [3] tinh chỉnh để tính đến các cấu hình phức tạp hơn.

Để thu hẹp khoảng cách giữa các mô hình giải tích đơn giản và bản chất phức tạp của các cột bê tông, các nhà nghiên cứu đã phát triển các mô hình thực nghiệm và bán thực nghiệm. Ví dụ, một nghiên cứu của Hintamai và Hokierti [4] đã trình bày một phương pháp dựa trên lý thuyết trường điện từ để phân tích phản ứng xung sét của các cột bê tông cốt thép, kết hợp các đặc tính điện của bê tông vào mô hình. Các phát hiện của họ cho phép làm rõ tác động của tính chất điện của bê tông đến trị số tổng trở sóng của cột. Nhìn chung, hạn chế của các mô

hình giải tích là chưa tính đến cấu trúc tổng thể của cột bê tông đi kèm dây nối đất đi bên ngoài cột. Cấu trúc này lại đặc biệt phổ biến cho các đường dây trung thế tại Việt Nam.

Với những hạn chế của các mô hình giải tích thuần túy kể trên, các phương pháp số đã được quan tâm nhiều trong những năm gần đây. Các phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) và Miền thời gian hữu hạn (FDTD) cho phép mô hình hóa chi tiết các cấu trúc phức tạp, bao gồm bản chất không đồng nhất của các cột bê tông và tương tác của chúng với các hệ thống nối đất như dây nối đất bên ngoài cột. Các nghiên cứu sử dụng FEM đã chứng minh độ chính xác được cải thiện trong việc mô phỏng các trường điện từ bên trong các cấu trúc phi kim loại, mở ra cách thức mới hướng tới các thiết kế thực tế và tối ưu hơn.

Bài báo này vì vậy đề xuất mô hình tính toán tổng trở sóng của cột bê tông ly tâm bằng mô phỏng FEM, có xét đến cấu trúc cột thực tế, tính chất điện của bê tông và sự có mặt của dây nối đất ngoài thân cột. Phương pháp mô phỏng được giới thiệu trong phần 2 và các kết quả tính toán được giới thiệu trong phần 3. Các kết quả đạt được cho phép đề xuất cấu trúc tối ưu của cột bê tông ly tâm nhằm cải thiện khả năng thoát sét của cột.

2. TÍNH TOÁN TỔNG TRỞ SÓNG CỦA CỘT BÊ TÔNG LY TÂM BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

Để cải thiện khả năng dẫn và thoát sét trên các đường dây trung thế, giảm tổng trở đặc tính (tổng trở sóng) của cột bê tông ly tâm là một điều kiện cần thực hiện.

Chương trình Comsol Multiphysics ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng để tính toán tổng trở sóng của cột bê tông ly tâm đi kèm dây nối đất ngoài thân cột. Theo Cigré, tổng trở sóng của cột có thể được tính toán từ điện dung toàn phần của cột điện đó và thời gian lan truyền của sóng sét [5] theo phương trình sau:

$$Z_t = T_t / C_t \quad (1)$$

Khi biết v là vận tốc lan truyền của sóng điện từ, H_t là chiều cao của cột bê tông, phương trình (1) trở thành:

$$Z_t = H_t / (v * C_t) \quad (2)$$

Mô đun AC/DC Electrostatics của chương trình Comsol Multiphysic được sử dụng để tính toán năng lượng điện trường tích trữ giữa cột bê tông ly tâm và đất, từ đó xác định được điện dung của cấu trúc. Từ trị số điện dung được mô phỏng tính toán, tổng trở sóng của cột được xác định theo phương trình (2).

Ưu điểm của phương pháp mô phỏng số nằm ở việc tái tạo chính xác cấu trúc cột bê tông ly tâm thực tế và hiện trạng dây nối đất bên ngoài cột. Mô hình mô phỏng cột được đặt trong một hộp không khí với điều kiện bờ được đặt trên bề mặt của hộp có điện thế bằng không. Mặt phẳng đất được đặt điều kiện Zero Charge để đảm bảo tính đối xứng của các điều kiện bờ. Điều kiện bờ Terminal có điện thế 1 V được đặt lên cấu trúc cột bê tông để tạo điện trường cho mô hình mô phỏng.

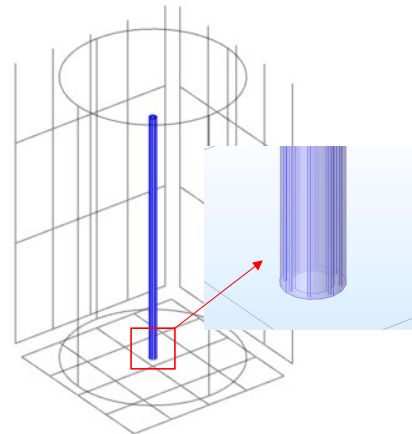
Cột bê tông với thông số hình học thực tế như trong Bảng 1, được mô phỏng 3D như minh họa trên Hình 1, Hình 2 theo hai cấu trúc:

Cột bê tông có dây nối đất xương cột, bằng 8 sợi thép hình trụ nằm trong thân cột;

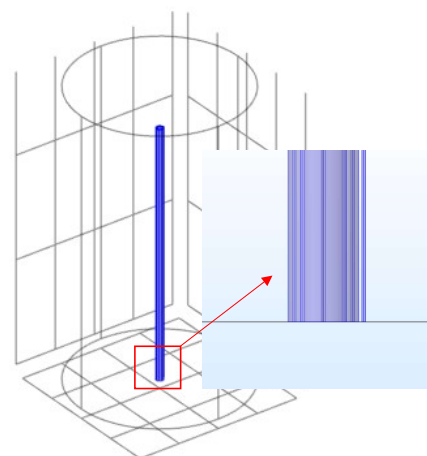
Cột bê tông ngoài tiếp địa xương cột còn sử dụng thêm dây nối đất bên ngoài, dạng dây tiết diện tròn và dây tiếp địa tiết diện chữ nhật.

Bảng 1. Thông số cột bê tông ly tâm và dây nối đất ngoài

Thông số	Giá trị (m)
Đường kính trong	0,23
Đường kính ngoài	0,35
Đường kính sợi cốt thép trong thân cột	0,02
Chiều cao cột	12

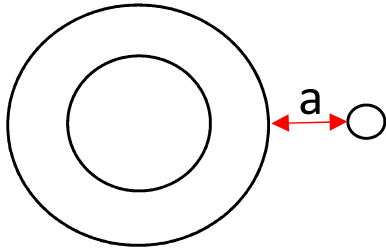


Hình 1. Mô hình cột bê tông ly tâm sử dụng dây nối đất xương cột

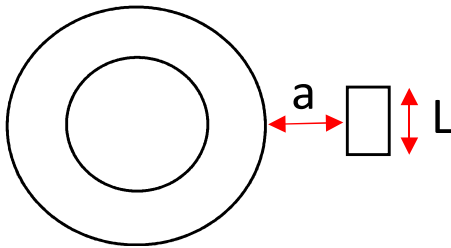


Hình 2. Mô hình cột bê tông ly tâm có dây nối đất bên ngoài.

Cách bố trí dây tiếp địa bên ngoài so với cột bê tông và dạng tiết diện dây được thể hiện trên mặt cắt ngang như minh họa trên Hình 3 và Hình 4.



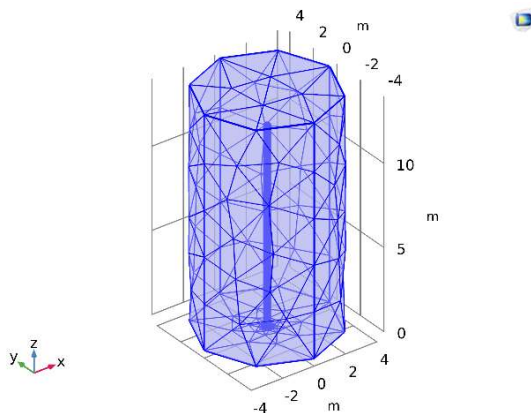
Hình 3. Bố trí dây nối đất tiết diện tròn bên ngoài thân cột bê tông, cách thân cột a cm



Hình 4. Bố trí dây nối đất tiết diện chữ nhật bên ngoài thân cột bê tông, cách thân cột a cm

Trong đó: a là khoảng cách từ mặt ngoài cột bê tông đến dây tiếp địa ngoài thân cột; L là bề rộng của dây tiếp địa dạng chữ nhật.

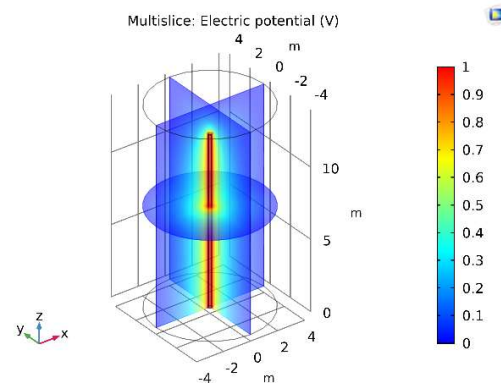
Các phần tử đa giác Free Tetrahedral được sử dụng để lưới hóa mô hình cột bê tông ở mức độ siêu mịn và vùng không khí bao quanh cột ở mức độ thưa. Mô hình lưới hóa được giới thiệu trên Hình 5.



Hình 5. Mô hình lưới hóa cột bê tông ly tâm

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

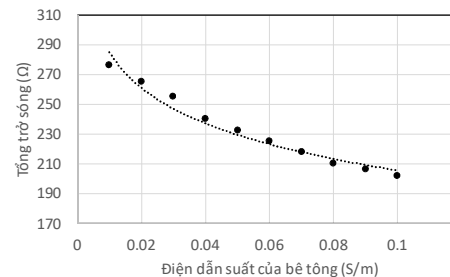
Phân bố điện thế trên cột bê tông ly tâm tiếp địa xương cột được giới thiệu trên Hình 6 để minh họa cho kết quả mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Tổng trở sóng trong các trường hợp nghiên cứu của cột bê tông sau đó được tính toán từ kết quả mô phỏng điện dung của các cấu trúc này.



Hình 6. Phân bố điện thế trên cột bê tông sử dụng tiếp địa xương cột

Ảnh hưởng của tính chất vật liệu bê tông

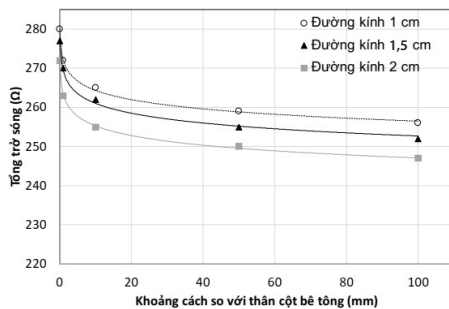
Tổng trở sóng của cột bê tông ly tâm phụ thuộc vào điện dẫn suất của bê tông được tính toán và giới thiệu trên Hình 7.



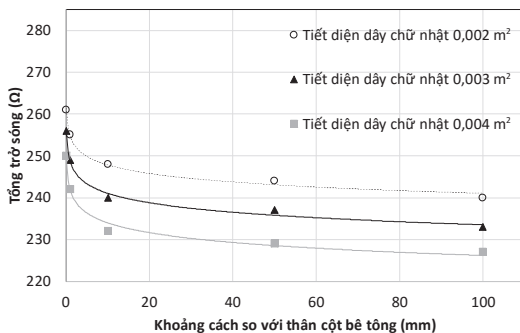
Hình 7. Sự phụ thuộc của tổng trở sóng vào điện dẫn suất của cột bê tông

Từ kết quả mô phỏng có thể thấy tổng trở sóng của cột tỷ lệ nghịch với điện dẫn suất của bê tông, trị số tổng trở sóng giảm khi điện dẫn suất tăng lên. Trên thực tế điều kiện này xảy ra khi cột bê tông bị ẩm ướt hoặc mật độ cốt thép tăng lên.

Ảnh hưởng của kích thước và cách bố trí dây nối đất ngoài thân cột



Hình 8. Tổng trở sóng của cấu trúc cột bê tông và dây nối đất ngoài dạng tròn



Hình 9. Tổng trở sóng của cấu trúc cột bê tông và dây nối đất ngoài dạng chữ nhật

Các Hình 8 và Hình 9 trình bày kết quả tính toán tổng trở sóng của cột bê tông ly tâm phụ thuộc vào hình dạng, kích thước và cách lắp đặt dây nối đất bên ngoài thân cột. Các kết quả này cho thấy tổng trở sóng của cột có xu hướng giảm dần khi kích thước của dây nối đất bên ngoài tăng lên. Điều này cũng được quan sát thấy khi khoảng cách lắp đặt dây nối đất so với cột tăng lên. Điều này cho thấy việc sử dụng các loại cột bê tông kèm dây nối đất ngoài có kích thước lớn và lắp đặt có khoảng cách so với thân cột cho phép giảm tổng trở sóng của cột. Các giải pháp này cho phép hạn chế được quá điện áp do sét giáng lên thân cột cũng như các cấu trúc liên quan như xà và cách điện đường dây.

Hiệu năng chống sét cho các đường dây trung thế có thể được cải thiện khi thực hiện các cải tiến giảm tổng trở sóng cho cột bê tông ly tâm của các đường dây này.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn để phân tích và tối ưu hóa cấu trúc dẫn sét của cột bê tông ly tâm sử dụng cho đường dây trung thế, với trọng tâm là đặc tính tổng trở sóng của cột. Mô hình mô phỏng cho thấy tổng trở sóng chịu ảnh hưởng của tính dẫn điện của bê tông, bởi kích thước và vị trí lắp đặt của dây nối đất ngoài thân cột. Dây nối đất có kích thước lớn và lắp đặt có khoảng cách so với thân cột cho phép giảm đáng kể tổng trở sóng của cột.

Hiệu năng chống sét cho các đường dây trung thế từ đó có thể được cải thiện khi thực hiện các cải tiến giảm tổng trở sóng cho cột bê tông ly tâm của các đường dây này.

Các nghiên cứu tiếp theo có thể thực hiện đo lường thực nghiệm điện dẫn suất của bê tông trong các điều kiện vận hành thực tế để có trị số thực tế cho các điều kiện mô phỏng tính toán. Bên cạnh đó, trị số tổng trở sóng tính toán bằng mô phỏng FEM có thể ứng dụng để tính toán quá điện áp trên cách điện đường dây trung thế trong các mô phỏng ứng dụng chương trình quá độ điện từ.

LỜI CẢM ƠN

Các tác giả trân trọng cảm ơn Trường Đại học Điện lực đã cấp kinh phí thực hiện nghiên cứu này trong khuôn khổ của Đề tài nghiên cứu khoa học cấp Trường, mã số đề tài: 04.ĐTKHCN/2023.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. A. Phayomhom and S. Sirisumrannukul, "Lightning Performance Improvement of 115 kV and 24 kV Circuits by External Ground in MEA's Distribution System," in GMSARN International Journal, vol. 3, pp. 39 – 46, 2009.
- [2]. Wagner, C.F. and A.R. Hileman, "A new approach to calculation of lightning performance of transmission lines," in AIEE Trans. PT. 79, pp. 589-603, 1960.
- [3]. Sargent, A. and M. Darveniza, "Tower surge impedance," in IEEE Trans. PAS. 88, pp. 680-687, 1969.
- [4]. Samroeng Hintamai and Jamnarn Hokierti, "Lightning Surge Response of Concrete Pole due to Effect of the Electrical Properties of Concrete based on the Electromagnetic Field Method," in 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (IEEE Cat. No.03CH37495), Dallas, TX, USA, 2003, pp. 568-573 vol.2.
- [5]. W. Chisholm, Y.L. Chow, "Travel time of transmission towers," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 10, pp. 2922-2928, 1985.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả **Trần Anh Tùng** tốt nghiệp Đại học Bách khoa Hà Nội chuyên ngành hệ thống điện năm 2007, nhận bằng Thạc sĩ chuyên ngành kỹ thuật điện tại Đại học Bách khoa Grenoble, Pháp năm 2008, nhận bằng Tiến sĩ chuyên ngành kỹ thuật điện tại Đại học Paul-Sabatier, Toulouse, Pháp năm 2012. Tác giả đang công tác tại Khoa Kỹ thuật điện, trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: Lưới điện thông minh, quá điện áp trong hệ thống điện, vật liệu cách điện polyme và nanocomposite.



Tác giả **Nguyễn Đức Quang** tốt nghiệp Thạc sĩ tại trường Đại học Lille 1 và bảo vệ luận án Tiến sĩ chuyên ngành Kỹ thuật điện tại trường Đại học quốc gia Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Metiers Paristech, Pháp. Tác giả đang công tác tại Khoa Kỹ thuật điện, trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: các phương pháp số trong nghiên cứu máy điện và hệ thống điện, tác động của trường điện từ tương hồ, xe điện và các nguồn năng lượng tái tạo.