

# Áp dụng phương pháp RBF-FD vào việc tính toán điện áp quá độ đường dây truyền tải điện

- Vũ Phạm Lan Anh <sup>1</sup>
- Lê Quốc Việt <sup>1</sup>
- Vũ Phan Tú <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM

<sup>2</sup> Đại Học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh

(Bản nhận ngày 20 tháng 01 năm 2014, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 28 tháng 04 năm 2016)

## TÓM TẮT

Bài báo này trình bày việc áp dụng Phương pháp sai phân hữu hạn miền thời gian sử dụng hàm bán kính cơ sở (Radial Basis Function-based Finite Difference – RBF-FD) cho việc giải bài toán quá độ điện được định nghĩa bằng hệ phương trình vi phân phụ thuộc thời gian. Trong phương pháp này, các xấp xỉ sai phân hữu hạn của các đạo hàm bậc một và bậc hai trong miền thời gian được xây dựng tương tự như các xấp xỉ sai phân hữu hạn trong miền không gian sử dụng hàm MQ (Multiquadrics) đã được giới thiệu trong [1]. Phương pháp MQ RBF-FD đã được

kiểm chứng về khả năng áp dụng, độ chính xác và tính hiệu quả thông qua việc tính toán điện áp quá độ trong mô hình mạch điện chuẩn và đường dây truyền tải thực tế 220kV của Việt Nam. Kết quả số của chúng tôi được so sánh với các kết quả thu được từ các phương pháp giải tích, FD truyền thống và phần mềm ATP/EMTP. Kết quả so sánh cho thấy phương pháp MQ RBF-FD có độ chính xác cao hơn các phương pháp truyền thống, đặc biệt khi xác định được thông số hình dạng tối ưu.

**Keywords:** quá độ, đường dây truyền tải, phương pháp RBF-FD

## 1. GIỚI THIỆU

Như đã biết để có được một hệ thống truyền tải điện tin cậy, đảm bảo vận hành một cách an toàn, liên tục thì các quá trình diễn ra trong hệ thống truyền tải điện phải được nghiên cứu tính toán một cách kỹ lưỡng với độ chính xác cao. Trong quá trình vận hành hệ thống truyền tải điện, có thể chia hoạt động của nó làm hai quá trình là quá độ và xác lập. Trong đó, quá trình quá

độ là quá trình tương tác nhanh giữa năng lượng trong các phần tử  $L$  và  $C$  do tác động bởi xung sét, ngắn mạch, đóng cắt đường dây, đóng cắt trạm biến áp, tụ bù...[2]-[3]. Các sóng quá độ dòng và áp xuất hiện trong thời gian rất ngắn, thường chỉ vài chu kỳ, truyền theo đường dây truyền tải tới các thiết bị đầu cuối như máy biến áp, máy phát, máy cắt, tụ bù... Tùy thuộc vào thời

gian tồn tại và độ lớn, các sóng quá độ này có thể làm hư hỏng cách điện của các thiết bị điện và dẫn đến có thể mất điện. Do đó, việc tính toán quá độ một cách chính xác đóng vai trò quan trọng trong việc thiết kế, lắp đặt các thiết bị bảo vệ và chọn lựa cấp cách điện phù hợp.

Tổng quát, các biến dòng và áp của quá trình quá độ do đóng điện không tải đường dây được biểu diễn trong dạng toán học bởi hệ phương trình vi phân hoặc trong miền tần số hoặc trong miền thời gian. Dạng thứ hai, trong đó các biến dòng và áp phụ thuộc vào không gian – thời gian hoặc chỉ phụ thuộc vào thời gian theo dạng phương trình vi phân thường (Ordinary Differential Equation - ODE) là dạng thông dụng nhất và được nghiên cứu từ rất lâu bằng việc sử dụng phương pháp tích phân kinh điển, phương pháp biến đổi Laplace, phương pháp tích chập và tích phân Duhamel... Mặc dù kết quả tính toán có độ chính xác cao nhưng các phương pháp này thường phức tạp và đặc biệt là khối lượng tính toán tương đối lớn khi áp dụng vào các hệ thống truyền tải phức tạp. Trong khi đó, các phương pháp số truyền thống như phương pháp biến trạng thái, phương pháp FD, phương pháp TLM, phương pháp moment, phương pháp wavelets,... đã cho thấy một ưu thế khi được áp dụng vào giải các bài toán quá độ -[4]-[8].

Trong quá trình nghiên cứu phát triển các phương pháp số hiện đại, phương pháp hàm bán kính cơ sở RBF là một công cụ hàng đầu trong việc nội suy các giá trị rời rạc của không gian đa chiều bằng cách sử dụng các hàm bán kính cơ sở -[9]. Phương pháp này được giới thiệu lần đầu tiên bởi Kansa – [10]. Do bản chất của RBF là từ phương pháp không lưới (Mesh-free) nên nó nhận được ngày càng nhiều quan tâm trong việc xấp xỉ các vi phân và giải phương trình vi phân riêng phần.

Trong bài báo này, chúng tôi giới thiệu phương pháp RBF-FD sử dụng các hàm MQ được cải tiến từ sự kết hợp giữa phương pháp FD và phương pháp RBF. Phương pháp này được xây dựng một cách tổng quát từ phương pháp MQ RBF-FD trong miền không gian được giới thiệu bởi V. Bayona và các đồng nghiệp - [1]. Bản chất của phương pháp này là xấp xỉ đạo hàm bằng tổ hợp tuyến tính các giá trị của hàm đó tại các điểm phân bố đồng nhất và không đồng nhất. Trên cơ sở đó, phương pháp MQ RBF-FD có thể được ứng dụng để giải quyết các bài toán tuyến tính và phi tuyến miền không gian – thời gian với độ chính xác cao.

Để kiểm chứng độ chính xác và khả năng ứng dụng của phương pháp MQ RBF-FD, chúng tôi áp dụng các phương pháp này vào việc tính toán điện áp quá độ trên một mạch điện chuẩn và một mô hình đường dây truyền tải ba pha được định nghĩa bởi hệ phương trình vi phân thường một chiều trong miền thời gian, nghĩa là chỉ phụ thuộc vào biến thời gian. Bên cạnh đó, để đạt được kết quả có độ chính xác cao nhất, chúng tôi đã sử dụng thuật toán xác định hệ số hình dạng tối ưu trong tham khảo [11]. Kết quả tính toán được trình bày trong các hình vẽ và bảng số liệu trong Mục III. Kết quả tính toán cho thấy phương pháp RBF-FD luôn luôn chính xác hơn phương pháp FD truyền thống trong việc giải bài toán quá độ phụ thuộc thời gian, và nó là hiệu quả cao khi áp dụng cho các bài toán thực tế trong ngành kỹ thuật điện.

## 2. PHƯƠNG PHÁP MQ RBF-FD

### 2.1 Tổng quát về phương pháp RBF-FD

Trong phần này, đặc cơ sở trên việc xây dựng xấp xỉ sai phân hữu hạn RBF trong miền không gian được trình bày bởi V. Bayona trong

[1], chúng tôi sẽ đi xây dựng xấp xỉ sai phân hữu hạn RBF trong miền thời gian như sau

Xét bài toán quá độ điện phụ thuộc miền thời gian trong không gian một chiều, giả thiết hàm  $u(t)$  liên tục trong miền thời gian, được biểu diễn bằng phương trình vi phân như sau

$$L[u(t)] = g(t), \tag{1}$$

Trong đó:  $L[u(t)]$  là biểu thức vi phân của hàm  $u$  theo  $t$ ;  $g(t)$  là hàm thực theo  $t$

Trong phương pháp RBF-FD, chúng ta xấp xỉ hàm  $L[u(t)]$  tại thời điểm  $t = t_j$  bằng cách tổ hợp tuyến tính những giá trị chưa biết của hàm  $u$  tại  $n$  điểm rời rạc xung quanh điểm  $t_j$

$$L[u(t_j)] \approx \sum_{i=1}^n \alpha_{ji} u(t_i), \quad j = 1, \dots, N \tag{2}$$

Với  $N$  là số nút được chia theo khoảng chia  $h$  trên miền thời gian;  $\alpha_{ji}$  là trọng số được xác định bằng cách nội suy từ đa thức, cụ thể trong phương pháp này chúng ta sử dụng các đa thức là hàm bán kính cơ sở RBF được viết như sau

$$u(t_j) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \phi(r_i(t_j), c) \tag{3}$$

Trong đó:  $r_i(t_j) = \|t_j - t_i\|$  là khoảng cách từ nút  $t_j$  đến điểm lân cận  $t_i$ ;  $\phi$  là hàm bán kính cơ sở phụ thuộc vào hệ số hình dạng  $c (c > 0)$ . Ba kiểu hàm bán kính cơ sở thông dụng [9]-[10] được trình bày như trong Bảng 1.

**Bảng 1.** Các biểu thức hàm RBF với biến thời gian

Kiểu hàm RBF	Biểu thức
MQ	$\sqrt{(t-t_j)^2 + c^2}$

IMQ	$\frac{1}{\sqrt{(t-t_j)^2 + c^2}}$
GA	$\frac{(t-t_j)^2}{e^{c^2}}$

Thế (3) vào (2), chúng ta xác định được các trọng số  $\alpha_{ji}$  chưa biết bằng cách giải hệ phương trình tuyến tính sau

$$L[\phi(r_k(t_j), c)] = \sum_{i=1}^n \alpha_{ji} \phi(r_k(t_i), c), \quad k = 1, \dots, n \tag{4}$$

Các xấp xỉ đạo hàm bậc một và bậc hai trong miền thời gian sử dụng hàm MQ RBF ứng với  $n=3$  được viết như sau

$$u'(t_j) = \alpha_1 u(t_j - \Delta t) + \alpha_2 u(t_j) + \alpha_3 u(t_j + \Delta t) \tag{5}$$

$$u''(t_j) = \beta_1 u(t_j - \Delta t) + \beta_2 u(t_j) + \beta_3 u(t_j + \Delta t) \tag{6}$$

Sử dụng hàm bán kính MQ, chúng ta xác định được các công thức tính trọng số  $(\alpha_1^{MQ}, \alpha_2^{MQ}, \alpha_3^{MQ})$  và  $(\beta_1^{MQ}, \beta_2^{MQ}, \beta_3^{MQ})$  trong miền thời gian như sau trong miền không gian - [1]

$$\alpha_1^{MQ} = -\alpha_3^{MQ} = -\frac{c + \sqrt{c^2 + 4\Delta t^2}}{4\Delta t \sqrt{\Delta t^2 + c^2}}, \tag{7}$$

$$\alpha_2^{MQ} = 0 \tag{8}$$

và

$$\beta_1^{MQ} = \beta_3^{MQ} = \frac{\frac{2\Delta t^2 - c^2}{(\sqrt{\Delta t^2 + c^2})^5} + \frac{1}{c^2 \sqrt{\Delta t^2 + c^2}}}{\frac{1}{c} + \frac{1}{\sqrt{4\Delta t^2 + c^2}} - \frac{2c}{\Delta t^2 + c^2}} \tag{9}$$

$$\beta_2^{MQ} = -\frac{2c^3 + (\Delta t^2 + 2c^2)\sqrt{4\Delta t^2 + c^2} + 3c\Delta t^2}{2c\Delta t^2(\Delta t^2 + c^2)} \tag{10}$$

Thực hiện cách tiếp cận tương tự như cho hàm MQ [1], chúng ta có thể tìm được các hệ số  $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$  và  $(\beta_1, \beta_2, \beta_3)$  tương ứng với các hàm IMQ và GA RBFs như sau

Sử dụng hàm IMQ, chúng ta có

$$\alpha_1^{IMQ} = -\alpha_3^{IMQ} = -\frac{c\sqrt{c^2 + 4\Delta t^2} \left( c + \sqrt{c^2 + 4\Delta t^2} \right)}{4\Delta t \left( \sqrt{\Delta t^2 + c^2} \right)^3} \quad (11)$$

$$\alpha_2^{IMQ} = 0, \quad (12)$$

và

$$\beta_1^{IMQ} = \beta_3^{IMQ} = \frac{\frac{2\Delta t^2 - c^2}{\left( \sqrt{\Delta t^2 + c^2} \right)^5} + \frac{1}{c^2 \sqrt{\Delta t^2 + c^2}}}{\frac{1}{c} + \frac{1}{\sqrt{4\Delta t^2 + c^2}} - \frac{2c}{\Delta t^2 + c^2}} \quad (13)$$

$$\beta_2^{IMQ} = -\frac{1}{c^2} - \frac{\frac{2c(2\Delta t^2 - c^2)}{\left( \sqrt{\Delta t^2 + c^2} \right)^5} + \frac{2}{c\sqrt{\Delta t^2 + c^2}}}{\frac{1}{c} + \frac{1}{\sqrt{4\Delta t^2 + c^2}} - \frac{2c}{\Delta t^2 + c^2}} \quad (14)$$

Và với hàm GA, chúng ta thu được

$$\alpha_1^{GA} = -\alpha_3^{GA} = -\frac{2\Delta t \cdot e^{-\frac{\Delta t^2}{c^2}}}{c^2 \left( 1 - e^{-\frac{4\Delta t^2}{c^2}} \right)} \quad (15)$$

$$\alpha_2^{GA} = 0 \quad (16)$$

và

$$\beta_1^{GA} = \beta_3^{GA} = \frac{4\Delta t^2 \cdot e^{-\frac{\Delta t^2}{c^2}}}{c^4 \left( 1 - e^{-\frac{2\Delta t^2}{c^2}} \right)^2} \quad (17)$$

$$\beta_2^{GA} = -\frac{2}{c^2} - \frac{8\Delta t^2 \cdot e^{-\frac{2\Delta t^2}{c^2}}}{c^4 \left( 1 - e^{-\frac{2\Delta t^2}{c^2}} \right)^2} \quad (18)$$

## 2.2 Thuật toán xác định thông số hình dạng tối ưu

Trong phương pháp MQ RBF-FD, hệ số hình dạng  $c$  quyết định rất nhiều đến độ chính xác của bài toán. Do đó việc nghiên cứu, kết hợp các mô hình toán để tìm ra giá trị  $c$  tối ưu là một điều hết sức cần thiết và là một vấn đề mở đang được các nhà khoa học trên thế giới nghiên cứu –[9], [11]-[13].

Trong bài báo này, để xác định thông số hình dạng tối ưu  $c$  của phương pháp MQ RBF-FD chúng tôi áp dụng thuật toán được giới thiệu trong [11] vào trong miền thời gian như sau

Thế công thức (2) vào (1), chúng ta có

$$\sum_{i=1}^n \alpha_{ji}(c)u(t_i) = g(t_j) + \varepsilon_n(t_j; c) \quad (19)$$

Trong đó:  $\varepsilon_n(t_j; c)$  là giá trị sai số của biểu thức toán tử vi phân  $L[u(t_j)]$  được xác định bằng phương pháp MQ RBF-FD. Sai số này có thể được xác định gần đúng theo [1] dựa trên kết quả tính toán bằng phương pháp FD truyền thống.

Viết lại (19) ở dạng ma trận

$$\mathbf{A}(c) \cdot \mathbf{u} = \mathbf{g} + \boldsymbol{\varepsilon}(c) \quad (20)$$

Trong đó:  $\mathbf{u}$  là vector trị số lời giải chính xác;  $\mathbf{A}(c)$  là ma trận được tạo bởi các trọng số  $\alpha_{ji}$  được xác định bằng công thức (2);  $\boldsymbol{\varepsilon}(c)$  là vector sai số của xấp xỉ MQ RBF-FD được thành lập từ các phần tử  $\varepsilon_n(t_j; c)$ .

Giá trị xấp xỉ MQ RBF-FD  $\hat{\mathbf{u}}$  được xác định thông qua việc giải phương trình tuyến tính

$$\hat{\mathbf{u}} = \mathbf{A}^{-1}(c)\mathbf{g} \quad (21)$$

và sai số của xấp xỉ RBF-FD được xác định như sau

$$\mathbf{E}(c) = \mathbf{u} - \hat{\mathbf{u}}(c) \quad (22)$$

Thế công thức (20), (21) vào (22), chúng ta được

$$\mathbf{E}(c) = \mathbf{A}^{-1}(c)\boldsymbol{\varepsilon}(c) \quad (23)$$

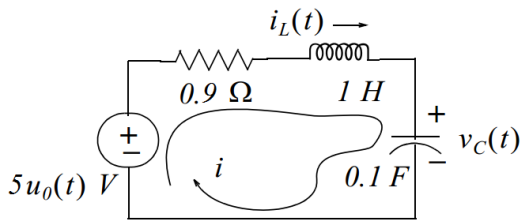
Theo đó, để xác định giá trị hệ số hình dạng tối ưu  $c^*$ , chúng ta cần cực tiểu hóa sai số xấp xỉ RBF-FD  $\mathbf{E}(c)$  như sau

$$\|\mathbf{E}(c^*)\|_{\infty} = \min_c \|\mathbf{E}(c)\|_{\infty} = \min_c \|\mathbf{A}^{-1}(c)\boldsymbol{\varepsilon}(c)\|_{\infty} \quad (24)$$

### 3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG SỐ

#### 3.1 Mạch điện chuẩn RLC

Để đánh giá độ chính xác của phương pháp MQ RBF-FD, ở đây, chúng tôi áp dụng phương pháp này vào việc tính điện áp trên tụ điện  $v_C(t)$  trong mạch điện RLC với các giá trị được cho như Hình 1 -[3].



Hình 1. Mô hình mạch điện RLC

Nguồn áp trong mạch ở Hình 1. được đóng tại thời điểm  $t=0$ . Áp dụng định luật Kirchhoff, chúng ta thu được hệ phương trình vi phân trong miền thời gian

$$Ri_L(t) + L \frac{di_L(t)}{dt} + v_C(t) = 5 \quad (25)$$

$$i_C(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt} \quad (26)$$

Do  $i_L=i_C$  nên sau khi thế (26) vào (25) chúng ta có phương trình vi phân bậc hai theo thời gian như sau

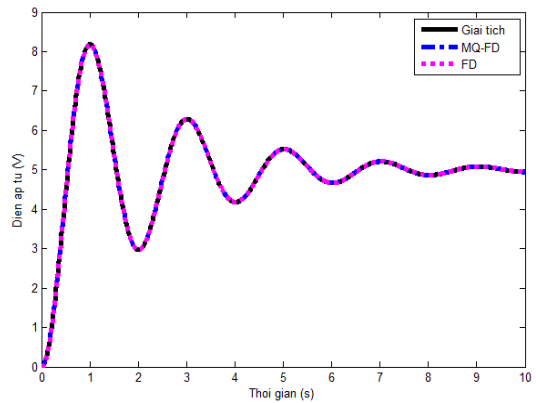
$$LC \frac{d^2 v_C}{dt^2} + RC \frac{dv_C}{dt} + v_C = 5 \quad (27)$$

Áp dụng phương pháp MQ RBF-FD để xác định điện áp quá độ trên tụ điện trong phương trình (27), chúng ta thu được lời giải MQ RBF-FD

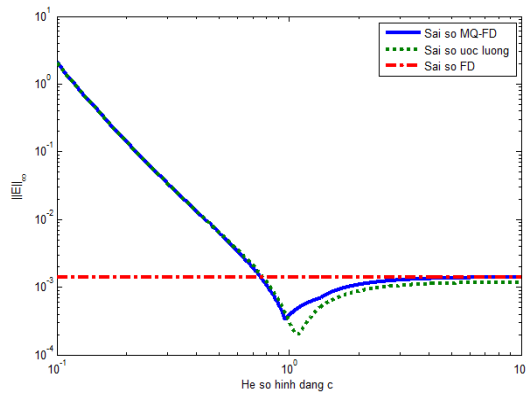
$$v_C^{n+1} = \frac{1}{RC\alpha_3 + LC\beta_3} \begin{bmatrix} 5 - (RC\alpha_2 + LC\beta_2 + 1) \cdot v_C^n \\ -(RC\alpha_1 + LC\beta_1) \cdot v_C^{n-1} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Ở đây, các hệ số  $\alpha$  và  $\beta$  được lấy từ các công thức xấp xỉ MQ (7)-(10) trong Mục II.

Kết quả tính toán điện áp  $v_C(t)$  bằng các phương pháp giải tích, MQ RBF-FD và FD được giới thiệu trên Hình 2. Ở đó chúng ta thấy các lời giải là gần như trùng nhau. Điều này chứng tỏ phương pháp MQ RBF-FD là hoàn toàn có thể áp dụng cho bài toán quá độ mạch điện. Tuy nhiên, để thấy rõ hơn về độ chính xác của các phương pháp, kết quả so sánh sai số giữa các phương pháp FD và MQ RBF-FD được trình bày trên Hình 3 và Bảng 2. Kết quả so sánh cho thấy phương pháp MQ RBF-FD có độ chính xác cao hơn phương pháp FD, đặc biệt khi chúng ta tìm được hệ số hình dạng tối ưu.



Hình 2. Sóng điện áp quá độ trên tụ điện  $v_C(t)$  của mạch điện RLC.



**Hình 3.** So sánh sai số giữa phương pháp RBF-FD và FD của mạch điện RLC.

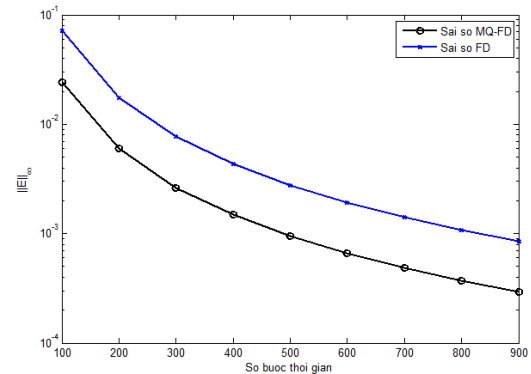
**Bảng 2.** So sánh sai số, hệ số hình dáng tối ưu theo số bước thời gian trong trường hợp mạch RLC

	N=101	N=301	N=501	N=701
$\ E_{ATP-EMTP}\ _\infty$	0.68829	0.219860	0.130660	0.092220
$\ E_{FD}\ _\infty$	0.06929	0.007686	0.002766	0.001411
$c^*$	0.95140	0.961300	0.961300	0.961300
$\ E(c^*)\ _\infty$	0.01663	0.001832	0.0006641	0.000339
$c_e^*$	1.08000	1.080000	1.080000	1.080000
$\ E(c_e^*)\ _\infty$	0.02387	0.002609	0.000939	0.000478
$ c^*-c_e^* $	0.02860	0.018700	0.018700	0.018700

Trong đó:  $\|E_{FD}\|_\infty$  là chuẩn sai số vô cùng của phương pháp FD;  $c^*$  là hệ số hình dáng tối ưu xác định thông qua lời giải giải tích;  $\|E(c^*)\|_\infty$  là chuẩn sai số vô cùng của phương pháp MQ-FD ứng với  $c^*$ ;  $c_e^*$  là hệ số hình dáng tối ưu xác định bằng giải thuật tối ưu thông qua lời giải bằng phương pháp FD; và  $\|E(c_e^*)\|_\infty$  là chuẩn sai số vô cùng của phương pháp MQ-FD ứng với  $c_e^*$ .

Hình 4 cho thấy tính hiệu quả của phương pháp MQ RBF-FD, ở đó chúng ta có thể thấy rằng đường cong sai số của phương pháp MQ RBF-FD luôn luôn thấp hơn FD trong khi tăng số khoảng chia miền thời gian trong quá trình tính toán. Một ưu điểm nữa của phương pháp MQ RBF-FD là nếu muốn đạt được một sai số tương tự như phương pháp FD, chúng ta chỉ cần sử dụng

số khoảng chia nhỏ hơn nhiều trong phương pháp MQ RBF-FD. Điều này sẽ làm giảm chi phí tính toán rất nhiều trong các bài toán phức tạp.



**Hình 4.** So sánh sai số giữa phương pháp RBF-FD và FD trong khi tăng số bước thời gian của mạch RLC.

### 3.2 Mô hình đường dây truyền tải điện 220kV thực tế tại Việt Nam

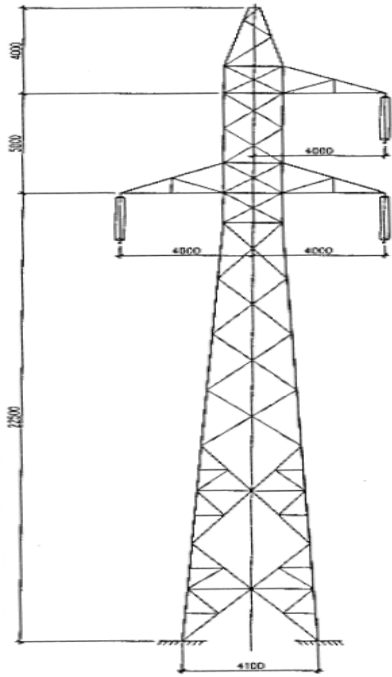
Trong phần này, chúng tôi trình bày việc áp dụng phương pháp MQ RBF-FD trong bài toán thực tế với một đường dây truyền tải điện 220kV thực tế là đường dây Long Thành – Hàm Thuận với cấu trúc trụ và thông số cơ bản được cho như trên Hình 5 và Bảng 3-5. Chiều dài đường dây là 140km; Điện trở suất của đất là 210  $\Omega$ m.

**Bảng 3.** Thông số điện cơ bản của đường dây

Công suất cơ bản (MVA)	Điện áp định mức (kV)	Tần số (Hz)	Số sợi mỗi pha	Số mạch
100	220	50	2	1

**Bảng 4.** Dữ liệu tọa độ dây dẫn

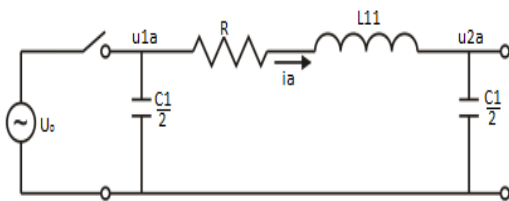
Tên danh định	Tọa độ Y của dây dẫn	Tọa độ X của dây dẫn
Pha a	20.232	4.000
Pha b	16.232	-4.000
Pha c	16.232	4.000
Dây đất e	25.200	0



**Hình 5.** Mô hình cột điện 220 kV của đường dây Long Thành – Hàm Thuận.

**Bảng 5.** Thông số dây dẫn

	Dữ liệu dây pha	Dữ liệu dây đất
<b>Bán kính ngoài (cm)</b>	1.47	0.825
<b>Số tao mỗi sợi</b>	30	7
<b>Đường kính mỗi tao (mm)</b>	3.00	2.75
<b>Điện trở suất của dây dẫn (Ω.m)</b>	3.457e-08	1.887e-07



**Hình 6.** Mạch tương đương một pha của đường dây truyền tải Long Thành – Hàm Thuận.

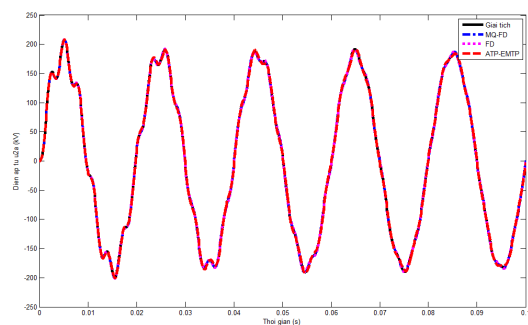
Đóng điện không tải đường dây truyền tải cao áp là một trường hợp gây ra hiện tượng quá độ điện áp đáng kể. Khi đường dây không tải, điện áp cuối đường dây là điện áp đặt trên điện dung đường dây, lúc này mạch điện chỉ gồm tổng trở và tổng dẫn của đường dây - [14] như Hình 6.

Bước một, để đơn giản chúng tôi chỉ xét sơ đồ một pha của đường dây truyền tải Long Thành – Hàm Thuận như trên Hình 6. Ở đó, nguồn cao áp  $U_0$  được đóng tại thời điểm  $t=0$ , khi đó điện áp đầu nhận và giá trị dòng điện thỏa các phương trình sau

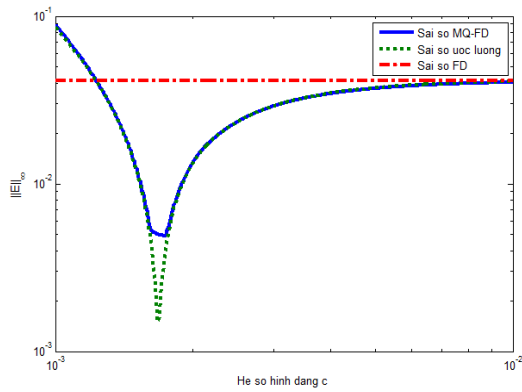
$$u_{1a} = u_{2a} + Ri_a + L_{11} \frac{di_a}{dt} \quad (29)$$

$$i_a = \frac{C_1}{2} \cdot \frac{du_{2a}}{dt} \quad (30)$$

Áp dụng phương pháp MQ RBF-FD vào việc giải hệ phương trình vi phân phụ thuộc thời gian (29)-(30), chúng ta thu được lời giải số của điện áp quá độ đầu nhận như trên Hình 7. Ở đó, nó được so sánh với lời giải thu được bằng phương pháp giải tích, FD và phần mềm thông dụng ATP/EMTP với số khoảng chia thời gian là 700. Tương tự như kết quả trên Hình 2, các lời giải của điện áp quá độ là hoàn toàn trùng nhau. Điều này cho thấy khả năng áp dụng của phương pháp MQ RBF-FD vào mô hình thực tế.



**Hình 7.** Sóng điện áp quá độ  $u_{2a}(t)$  của đường dây truyền tải Long Thành – Hàm Thuận.

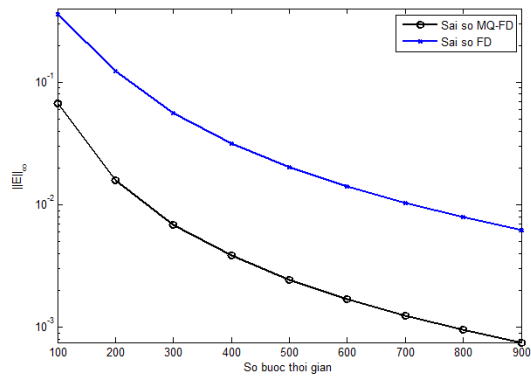


**Hình 8.** So sánh sai số giữa phương pháp RBF-FD và FD của đường dây truyền tải Long Thành – Hàm Thuận.

**Bảng 6.** So sánh sai số, hệ số hình dáng tối ưu theo số bước thời gian trong trường hợp đường dây truyền tải Long Thành – Hàm Thuận

	N=301	N=501	N=701
$\ E_{ATP-EMTP}\ _\infty$	0.296700	0.146100	0.085500
$\ E_{FD}\ _\infty$	0.206300	0.080900	0.041400
$c^*$	0.001648	0.001729	0.001747
$\ E(c^*)\ _\infty$	0.027010	0.009585	0.004927
$c_{e^*}$	0.001612	0.001666	0.001675
$\ E(c_{e^*})\ _\infty$	0.028160	0.009943	0.004994

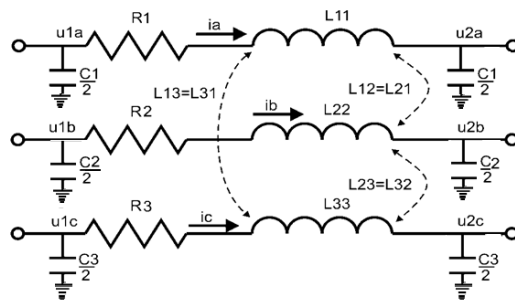
Kết quả so sánh sai số giữa các phương pháp FD và MQ RBF-FD được trình bày trên Hình 8 và Bảng 6 cho thấy phương pháp MQ RBF-FD có độ chính xác cao hơn phương pháp FD và kết quả mô phỏng thu được từ phần mềm ATP/EMTP, đặc biệt khi chúng ta tìm được hệ số hình dáng tối ưu. Hơn nữa, tương tự như Hình 4, Hình 9 một lần nữa đã cho thấy tính hiệu quả của phương pháp MQ RBF-FD so với FD trong khi thay đổi số khoảng chia thời gian tính toán. Đây là một ưu điểm nổi bật của phương pháp RBF-FD khi áp dụng cho các bài toán thực tế phức tạp, ở đó thời gian tính toán được giảm rất nhiều nhưng vẫn đảm bảo được sai số theo yêu cầu khi so sánh với phương pháp FD truyền thống.



**Hình 9.** So sánh sai số giữa phương pháp RBF-FD và FD trong khi tăng số bước thời gian của bài toán quá độ cho đường dây truyền tải Long Thành – Hàm Thuận.

Bước hai, chúng tôi áp dụng phương pháp MQ RBF-FD vào mạch ba pha của đường dây truyền tải 220kV Long Thành – Hàm Thuận có mạch điện tương đương như trong Hình 10. Trong bài toán quá độ này, điện dung tương hỗ được bỏ qua, chúng tôi chỉ xét đến các thông số điện cảm tương hỗ. Các thông số đường dây sau khi được tính toán:  $[R] = [21.25 \ 20.78 \ 20.78]$   $\Omega$ ,  $[C] = [1.32 \ 1.26 \ 1.33]$   $\mu F$ ,

$$[L] = \begin{bmatrix} 292.302 & 136.484 & 158.995 \\ 136.484 & 292.693 & 139.800 \\ 158.995 & 139.800 & 292.694 \end{bmatrix} \text{ mH.}$$



**Hình 10.** Mạch điện tương đương ba pha của đường dây truyền tải Long Thành – Hàm Thuận..



Nguồn cao áp xoay chiều ba pha trong mạch trên được đóng vào đường dây tại thời điểm  $t = 0$ , khi đó điện áp đầu nhận và dòng điện phải thỏa mãn hệ phương trình vi phân

➤ Pha a

$$u_{1a} = u_{2a} + Ri_a + L_{11} \frac{di_a}{dt} + L_{12} \frac{di_b}{dt} + L_{13} \frac{di_c}{dt} \quad (31)$$

$$i_a = \frac{C_1}{2} \cdot \frac{du_{2a}}{dt} \quad (32)$$

➤ Pha b

$$u_{1b} = u_{2b} + Ri_b + L_{21} \frac{di_a}{dt} + L_{22} \frac{di_b}{dt} + L_{23} \frac{di_c}{dt} \quad (35)$$

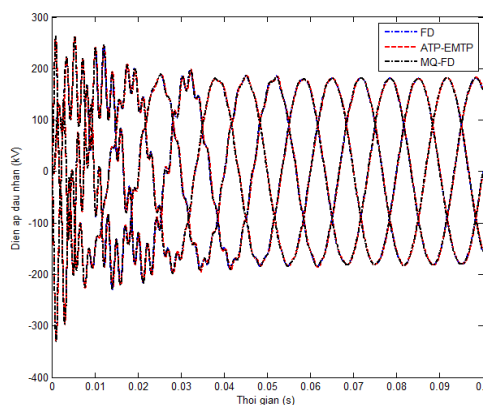
$$i_b = \frac{C_2}{2} \cdot \frac{du_{2b}}{dt} \quad (34)$$

➤ Pha c

$$u_{1c} = u_{2c} + Ri_c + L_{31} \frac{di_a}{dt} + L_{32} \frac{di_b}{dt} + L_{33} \frac{di_c}{dt} \quad (35)$$

$$i_c = \frac{C_3}{2} \cdot \frac{du_{2c}}{dt} \quad (36)$$

Hình 11 trình bày kết quả điện áp quá độ tại đầu nhận của đường dây truyền tải 220kV Long Thành – Hàm Thuận được tính toán bằng các phương pháp FD, MQ RBF-FD và phần mềm ATP/EMTP với số khoảng chia thời gian là 1000. Ở đây, sử dụng giải thuật tìm thông số hình dạng tối ưu mà không cần phải có lời giải giải tích như được trình bày trong Mục 2.2., chúng tôi xác định được giá trị thông số hình dạng  $c=0.0023$ . Kết quả so sánh giá trị đỉnh lớn nhất của điện áp quá độ được trình bày trong Bảng 7.



**Hình 11.** Điện áp quá độ tại đầu nhận của đường dây truyền tải 220kV Long Thành – Hàm Thuận.

**Bảng 7.** Giá trị đỉnh cực đại của điện áp quá độ

Phương pháp	Điện áp đỉnh (kV)		
	Pha a	Pha b	Pha c
ATP-EMTP	262.1650	-329.6980	262.3720
FD	261.4679	-330.6339	262.6958
MQ-FD	261.6411	-330.6978	262.7097

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo này, trên cơ sở phương pháp RBF-FDM [1], đã trình bày cách tiếp cận mới để xây dựng các xấp xỉ sai phân hữu hạn của các đạo hàm bậc một và bậc hai trong miền thời gian sử dụng hàm bán kính cơ sở RBFs. Trên cơ sở đó, phương pháp số mới MQ RBF-FD được thành lập và được áp dụng lần đầu tiên cho việc tính toán điện áp quá độ của mạch điện chuẩn và đường dây truyền tải ba pha thực tế của Việt Nam được định nghĩa về mặt toán học bởi phương trình ODE phụ thuộc thời gian. Bên cạnh đó, thuật toán xác định thông số hình dạng tối ưu trong [11] cũng đã được đề xuất đưa vào phương pháp MQ RBF-FD của chúng tôi. Kết quả tính toán các trường hợp trên đã cho thấy phương pháp MQ RBF-FD có độ chính xác cao hơn các phương pháp truyền thống như FD và phần mềm ATP/EMTP, đặc biệt khi tìm được thông số hình

dạng tối ưu. Một ưu điểm nữa của việc kết hợp thuật toán trong [11] và phương pháp MQ RBF-FD là chúng ta có thể xác định được giá trị thông số hình dáng tối ưu cho bất kỳ bài toán quá độ thực tế nào không cần phải có lời giải giải tích mà chỉ cần có lời giải FD.

**Ghi nhận:** Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Tp.HCM trong khuôn khổ Đề tài mã số C2014-20-10.

# Application of the MQ RBF-FD method to calculating transient voltages of power transmission lines

- Vu Pham Lan Anh <sup>1</sup>
- Le Quoc Viet <sup>1</sup>
- Vu Phan Tu <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ho Chi Minh city University of Technology, VNU-HCM

<sup>2</sup> Vietnam National University – Ho Chi Minh city

## ABSTRACT

*This paper presents an application of the Radial Basis Function – Based Finite Difference Method (RBF-FD) to solving the electrical transient problems defined by the time-dependent ordinary differential equations. In this method, the finite difference approximations of first- and second-order derivatives in time domain are formalated the same as those in space domain based on the MQ (Multiquadrics) function presented in [1]. The MQ RBF-FD method are for the sake of evaluating the accuracy,*

*effectiveness and applicability used to compute the transient voltages on the benchmark circuit and 220 kV three-phase transmission line of Viet Nam. Our numerical results are compared with those obtained by the analytical method, the traditional FD method and ATP/EMTP software. The compared results have been shown that the MQ RBF-FD method has accuracy that is higher than ones of the traditional numerical methods, especially with the optimal shape parameter.*

**Keywords:** transient, transmission line, RBF-FD method.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. V. Bayona, M. Moscoso, M. Carretero, M. Kindelan, “RBF-FD formulas and convergence properties”, *J. Comput. Phys.* 229 (2010) 8281-8285.
- [2]. Alland Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, Jonh Willey and Sons, 1991.
- [3]. Steven T. Karris, *Circuit Analysis II with MATLAB Applications*, Orchard Publications, 2003.
- [4]. Clayton R. Paul, “Incorporation of Terminal Constraints in the FDTD Analysis of Transmission Lines,” *IEEE Trans. on EMC*, Vol. 36, No. 2, May 1994.
- [5]. Lubomír Brančík, Břetislav Ševčík, “Time-Domain Simulation of Nonuniform Multiconductor Transmission Lines in Matlab,” *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, Issue 2, Volume 5, pp. 77-84, 2011.
- [6]. M. Tang and J. F. Mao, “Transient Analysis of Lossy Nonuniform Transmission Lines Using A Time-Step Integration Method,” *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 69, 257–266, 2007.
- [7]. Jose A. Rosendo Macías, Antonio Gómez Expósito, Alfonso Bachiller Soler, “A Comparison of Techniques for State-Space Transient Analysis of Transmission Lines,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 20, No. 2, April 2005.
- [8]. Vũ Phan Tú, *Phương Pháp Số trong Trường Điện Từ*, NXB ĐHQG-HCM, 2013.
- [9]. Gregory E. Fasshauer, *Meshfree Approximation Methods With Matlab*, World Scientific Publishing Co., 2007.
- [10]. E. J. Kansa, “Multiquadrics A scattered data approximation scheme with application to computational fluid dynamics-I. Surface approximations and partial derivative estimates,” *Comput. Math. Appl.*, 19, pp. 127–145, 1990.
- [11]. V. Bayona, M. Moscoso, M. Kindelan, “Optimal constant shape parameter for multiquadric based RBF-FD method”, *J. Comput. Phys.* 230 (2011) 7384-7399.
- [12]. Yong Yuan Shan, Chang Shu and Ning Qin, “Multiquadric FiniteDifference (MQ - FD) Method and its Application”, *Adv. Appl. Math. Mech.*, Vol. 1, No. 5, pp. 615-638, 2009.
- [13]. Bengt Fornberg, Erik Lehto, Collin Powell: ‘Stable calculation of Gaussian-based RBF-FD stencils’, *Computers and Mathematics with Applications*, 2013, **65**, pp. 627–637
- [14]. Trần Đình Long, *Sách tra cứu về chất lượng điện năng*, NXB Bách Khoa – Hà Nội, 2014.