

# KHÔI PHỤC DẠNG SÓNG KHI BIẾN DÒNG ĐIỆN BỊ BÃO HÒA ỨNG DỤNG ĐỊNH VỊ SỰ CỐ TRÊN ĐƯỜNG DÂY TRUYỀN TẢI ĐIỆN

## RESTORATION OF WAVEFORM WHEN CURRENT TRANSFORMER IS SATURATED, APPLYING FAULT LOCATION ON A TRANSMISSION LINE

Nguyễn Xuân Vinh<sup>1</sup>, Nguyễn Đức Huy<sup>2</sup>, Nguyễn Xuân Tùng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long; vinhnx@vnlute.edu.vn

<sup>2</sup>Đại học Bách khoa Hà Nội; huy.nguyenduc1@hust.edu.vn, tung.nguyenxuan@hust.edu.vn

**Tóm tắt** - Bài báo này trình bày thuật toán cải tiến xác định vị trí sự cố xảy ra trên đường dây truyền tải điện khi máy biến dòng điện đo lường ở một đầu đường dây bị bão hòa. Thuật toán chỉ sử dụng tín hiệu điện áp và dòng điện đo lường từ hai đầu đường dây. Thuật toán bao gồm hai bước: áp dụng thuật toán hồi quy Fourier rời rạc (*DFT*) để khôi phục lại dạng sóng tín hiệu dòng điện do máy biến dòng điện bị bão hòa; xác định vị trí sự cố sử dụng tín hiệu điện áp đo lường từ hai đầu, dòng điện đo lường từ đầu đường dây không bị bão hòa và dòng điện bão hòa sau khi được khôi phục dạng sóng. Tính chính xác và hiệu quả của thuật toán được mô phỏng và kiểm chứng sử dụng môi trường Simulink của phần mềm Matlab.

**Từ khóa** - bão hòa máy biến dòng; định vị sự cố; đường dây truyền tải; lọc thành phần một chiều; biến đổi Fourier rời rạc.

### 1. Đặt vấn đề

Bài toán xác định chính xác điểm sự cố trên đường dây tải điện mang một ý nghĩa quan trọng đối với hệ thống truyền tải điện và công ty điện lực. Định vị chính xác điểm sự cố sẽ làm giảm thời gian ngừng cấp điện, giảm nhân công huy động, nâng cao độ tin cậy của lưới điện truyền tải, giảm sự than phiền của khách hàng và góp phần tăng lợi nhuận của các công ty điện lực. Bài toán định vị sự cố có rất nhiều yếu tố ảnh hưởng đến độ chính xác định vị sự cố: đường dây không đồng nhất, dòng tải trước sự cố, điện trở sự cố, sai số thiết bị đo lường... và hiện tượng bão hòa của máy biến dòng đo lường do thành phần *DC* có trong dòng điện quá độ dẫn đến kết quả đo lường và định vị sự cố bị sai số.

Tài liệu [1] trình bày thuật toán phát hiện và phục hồi dạng sóng khi máy biến dòng điện bị bão hòa. Thuật toán phân tích thành phần *DC* trong tín hiệu dòng điện sự cố, từ đó phát hiện máy biến dòng bị bão hòa. Sau đó thuật toán áp dụng thuật toán hồi quy *DFT* và sử dụng chu kỳ dòng điện chưa bị bão hòa để phục hồi dạng sóng dòng điện bị bão hòa. Nhưng thuật toán [1] chưa đề cập đến bài toán định vị sự cố.

Tài liệu [2] trình bày thuật toán định vị sự cố trên đường dây truyền tải, sử dụng tín hiệu điện áp và dòng điện đo lường từ hai đầu đường dây, từ đó thành lập phân bố điện áp tại điểm sự cố xác định từ tín hiệu hai đầu đường dây và giao điểm của hai phân bố điện áp là vị trí xảy ra sự cố trên đường dây. Thuật toán chỉ sử dụng biên độ của điện áp tại điểm sự cố, vì vậy thuật toán không yêu cầu tín hiệu điện áp và dòng điện phải đo lường đồng bộ, nhưng tài liệu [2] không đề cập đến vấn đề khôi phục dạng sóng dòng điện bị méo dạng do máy biến dòng điện bị bão hòa.

**Abstract** - This paper presents an improved algorithm to locate the fault that occurs on the power transmission line when current transformer at one end is saturated. The algorithm uses only the voltage signals and measurement currents from two-ends. The algorithm consists of two steps: applying the regression discrete Fourier transformation (*DFT*) to restore electrical current signal waveform due to saturated current transformer; locating the fault using voltage measurement signals from two-ends, unsaturated measurement currents from one end and saturated current signals from the other end after waveform being restored. The accuracy and efficiency of the algorithm is modeled and verified using Simulink environment of Matlab software.

**Key words** - saturated current transformer; fault location; transmission line; DC filter; DFT.

Tài liệu [3], [4] trình bày thuật toán định vị sự cố xảy ra trên đường dây truyền tải. Thuật toán yêu cầu dữ liệu đầu vào là thông số đường dây, tổng trở nguồn ở hai đầu đường dây và tín hiệu điện áp đo lường đồng bộ từ hai đầu đường dây, mà không yêu cầu tín hiệu dòng điện. Vì vậy, thuật toán định vị sự cố không bị ảnh hưởng bởi bão hòa của máy biến dòng điện đo lường, nhưng thuật toán định vị sự cố chỉ sử dụng tín hiệu điện áp. Vì thế, tài liệu [3], [4] chưa quan tâm đến vấn đề khôi phục dạng sóng dòng điện bị méo dạng do máy biến dòng điện bị bão hòa.

Thuật toán [1-4] chỉ dừng lại ở định vị sự cố trên đường dây truyền tải hoặc định vị sự cố chỉ sử dụng tín hiệu điện áp. Vì vậy, thuật toán không bị ảnh hưởng bởi hiện tượng bão hòa biến dòng, nhưng thuật toán yêu cầu phải biết thông số đường dây và thông số tổng trở của nguồn phát ở hai đầu đường dây, và chưa quan tâm đến vấn đề khôi phục dạng sóng dòng điện bị méo dạng do máy biến dòng điện bị bão hòa hoặc chỉ quan tâm đến vấn đề khôi phục dạng sóng dòng điện bị méo dạng do máy biến dòng điện bị bão hòa mà không quan tâm đến bài toán định vị sự cố. Do vậy, bài báo này đề xuất thuật toán cải tiến trên cơ sở tổng hợp ưu điểm của các thuật toán nêu trên. Thuật toán có hai bước: phục hồi dạng sóng dòng điện do máy biến dòng điện bị bão hòa; xác định vị trí sự cố sử dụng phân bố điện áp tính từ hai đầu đường dây. Thuật toán chỉ sử dụng biên độ của điện áp tại điểm sự cố, vì vậy thuật toán không bị sai số trong trường hợp tín hiệu đo lường không được đồng bộ chính xác. Thuật toán sử dụng thành phần thứ tự thuận của tín hiệu điện áp và dòng điện đo lường từ hai đầu đường dây. Thành phần này có mặt trong tất cả các kiểu sự cố, vì thế giải thuật trình bày trong bài báo này có thể áp dụng định vị sự cố cho tất cả các loại sự cố, đồng thời không yêu cầu phân loại sự cố.

## 2. Thuật toán

### 2.1. Xác định phasor tín hiệu đo lường

Áp dụng thuật toán phân tích Fourier rời rạc kết hợp thuật toán hồi quy [5] xác định phasor của tín hiệu đo lường, xét tín hiệu đo lường có biểu thức sau:

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

Trong đó:  $X_m$ : Biên độ thành phần xoay chiều;

$\varphi$ : Góc pha ban đầu(rad);

$f$ : Tần số lưới điện(50Hz);

$\omega$ : Tần số góc  $\omega = 2\pi f(\text{rad} / \text{s})$ .

Biểu diễn (1) ở dạng véctơ (phasor)  $\dot{X}$ :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= X_{re} + j \cdot X_{im} \\ &= \frac{X_m}{\sqrt{2}} \cos(\varphi) + j \cdot \frac{X_m}{\sqrt{2}} \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó:  $X_{re}$ : Phần thực của  $\dot{X}$ ;  $X_{im}$ : Phần ảo của  $\dot{X}$

Nếu tín hiệu (1) được lấy mẫu với tần số  $f_s$  thì số mẫu tín hiệu thu được trong một chu kỳ  $N = f_s / 50$ . Áp dụng thuật toán bình phương cực tiểu xác định phasor của tín hiệu đo lường:

$$\begin{vmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{N-1} \end{vmatrix} = \sqrt{2} \begin{vmatrix} \cos(0) & -\sin(0) \\ \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos(2\theta) & -\sin(2\theta) \\ \vdots & \vdots \\ \cos((N-1)\theta) & -\sin((N-1)\theta) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X_{re} \\ X_{im} \end{vmatrix} \quad (3)$$

Trong đó:  $\theta = 2\pi / N$

### 2.2. Loại DC và phục hồi dạng sóng dòng điện bị bão hòa

Áp dụng thuật toán [1], xét dòng điện quá độ (4) bao gồm thành phần xoay chiều tần số  $f = 50\text{Hz}$  và thành phần một chiều tắt dần DC:

$$i(t) = I \cos(\omega t + \varphi) + I_{dc} e^{-t/\tau} \quad (4)$$

Trong đó:

$I$ : Biên độ thành phần xoay chiều(A);

$\varphi$ : Góc pha ban đầu(rad);

$\omega$ : Tần số góc  $\omega = 2\pi f(\text{rad} / \text{s})$ ;

$I_{dc}$ : Biên độ thành phần một chiều(A);

$\tau$ : Thời hằng.

Nếu dòng điện được lấy mẫu với tần số  $f_s$  thì số mẫu tín hiệu thu được trong một chu kỳ  $N = f_s / 50$ , mẫu thứ  $m$  của dòng điện có thể được biểu diễn như sau:

$$i(m) = i(m\Delta t) = I \cos(m\theta + \varphi) + I_{dc} \cdot \kappa^m \quad (5)$$

Trong đó:  $\kappa = e^{-\Delta t/\tau}$

Áp dụng công thức (5), ta được biểu diễn của mẫu thứ 1, 2, 3 như sau:

$$\begin{cases} i(1) = i(1.\Delta t) = I \cos(1.\theta + \varphi) + I_{dc} \cdot \kappa^1 \\ i(2) = i(2.\Delta t) = I \cos(2.\theta + \varphi) + I_{dc} \cdot \kappa^2 \\ i(3) = i(3.\Delta t) = I \cos(3.\theta + \varphi) + I_{dc} \cdot \kappa^3 \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó:  $\Delta t = 1 / (50.N)$

Áp dụng phân tích Fourier rời rạc kết hợp thuật toán hồi quy [5] xác định phasor ước lượng (vì vẫn còn thành phần DC) của  $i(m)$ :

- Sử dụng giá trị của mẫu  $i_0$  và mẫu  $i_1$  xác định phasor ước lượng của  $i(1)$ :

$$\begin{vmatrix} i_0 \\ i_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(0) & -\sin(0) \\ \cos(\theta) & -\sin(\theta) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \widehat{I_{1re}} \\ \widehat{I_{1im}} \end{vmatrix} \quad (7)$$

- Sử dụng giá trị của mẫu  $i_1$  và mẫu  $i_2$  xác định phasor ước lượng của  $i(2)$ :

$$\begin{vmatrix} i_1 \\ i_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos(2\theta) & -\sin(2\theta) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \widehat{I_{2re}} \\ \widehat{I_{2im}} \end{vmatrix} \quad (8)$$

- Sử dụng giá trị của mẫu  $i_2$  và mẫu  $i_3$  xác định phasor ước lượng của  $i(3)$ :

$$\begin{vmatrix} i_2 \\ i_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(2\theta) & -\sin(2\theta) \\ \cos(3\theta) & -\sin(3\theta) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \widehat{I_{3re}} \\ \widehat{I_{3im}} \end{vmatrix} \quad (9)$$

Trong đó,  $i_0, i_1, i_2, \dots, i_{N-1}$ : Giá trị của dòng điện ở từng thời điểm lấy mẫu.

$\widehat{I_{re}}$ : Phần thực ước lượng của dòng điện  $i(m)$ ;

$\widehat{I_{im}}$ : Phần ảo ước lượng của dòng điện  $i(m)$ .

$$\Rightarrow \begin{cases} i(1) = AC_1 + DC_1 \\ i(2) = AC_2 + DC_2 \\ i(3) = AC_3 + DC_3 \end{cases} \quad (10)$$

So sánh phasor của các  $i(m)$ , từ đó xác định mối liên hệ giữa  $i(1)$ ,  $i(2)$  và  $i(3)$ :

$$\begin{cases} AC_1 = AC_2 = AC_3 \\ DC_2 = DC_1 \cdot \kappa \\ DC_3 = DC_1 \cdot \kappa^2 = DC_2 \cdot \kappa \end{cases} \quad (11)$$

Xác định thành phần  $\kappa$ :

$$\frac{i(3) - i(2)}{i(2) - i(1)} = \frac{AC_3 - AC_2 + DC_3 - DC_2}{AC_2 - AC_1 + DC_2 - DC_1} \quad (12)$$

Kết hợp (11) và (12) được kết quả như sau:

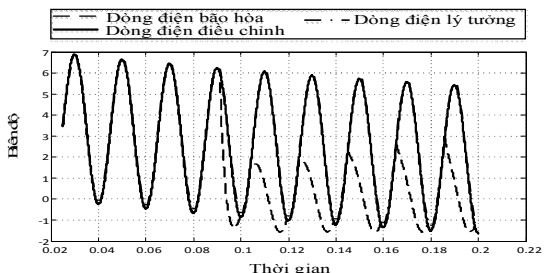
$$\begin{aligned} \frac{i(3) - i(2)}{i(2) - i(1)} &= \frac{DC_1 \cdot \kappa^3 - DC_1 \cdot \kappa^2}{DC_1 \cdot \kappa^2 - DC_1 \cdot \kappa} = \frac{DC_1 \cdot (\kappa - 1) \cdot \kappa^2}{DC_1 \cdot (\kappa - 1) \cdot \kappa} \\ \Rightarrow \kappa &= e^{-\Delta t/\tau} = \frac{i(3) - i(2)}{i(2) - i(1)} \end{aligned} \quad (13)$$

Khi đã xác định được thành phần  $e^{-\Delta t/\tau}$  trong thành phần DC tắt dần, áp dụng thuật toán [5] để xác định phasor và biên độ  $I_{dc}$  của thành phần DC tắt dần trong tín hiệu dòng điện đo lường:

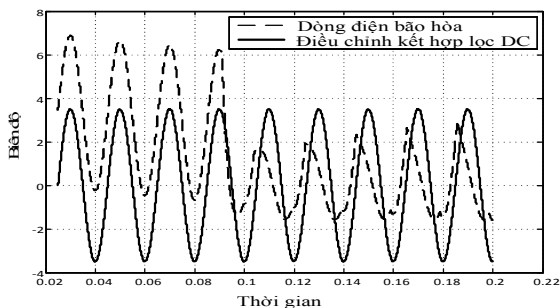
$$\begin{vmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(0) & -\sin(0) & e^{-0.\Delta t/\tau} \\ \cos(\theta) & -\sin(\theta) & e^{-1.\Delta t/\tau} \\ \cos(2\theta) & -\sin(2\theta) & e^{-2.\Delta t/\tau} \\ \cos(3\theta) & -\sin(3\theta) & e^{-3.\Delta t/\tau} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{re} \\ I_{im} \\ I_{dc} \end{vmatrix} \quad (14)$$

Hình 1 thể hiện kết quả khi áp dụng thuật toán phức hồi dạng sóng dòng điện bị bão hòa. Hình vẽ cho thấy dạng sóng dòng điện sau khi phức hồi hoàn toàn trùng khớp với dạng sóng lý tưởng.

Hình 2 thể hiện kết quả khi áp dụng thuật toán phức hồi dạng sóng bão hòa kết hợp lọc thành phần DC.



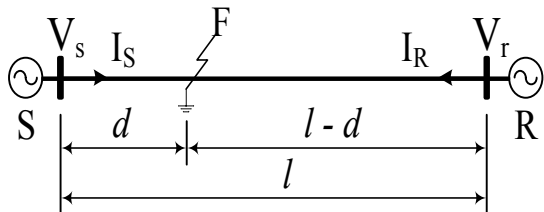
Hình 1. Phức hồi dạng sóng dòng điện bị bão hòa



Hình 2. Phức hồi dạng sóng dòng điện bị bão hòa kết hợp lọc DC

2.3. Thuật toán định vị sự cố

Trong Hình 3, đường dây truyền tải được sử dụng để minh họa cho thuật toán định vị sự cố.



Hình 3. Mô hình đường dây truyền tải bị sự cố

Ký hiệu:

$V_s, V_r, I_s, I_r$ : Điện áp và dòng điện trước sự cố;

$V_{sf}, V_{rf}, I_{sf}, I_{rf}$ : Điện áp và dòng điện trong sự cố;

$V_{si}, V_{ri}, I_{si}, I_{ri}, V_{sfi}, V_{rfi}, I_{sfi}, I_{rfi}$ : Điện áp và dòng điện thành phần đối xứng trước và trong sự cố;

$i = 0, 1, 2$ : Thành phần thứ tự không, thuận, nghịch;

$d$ : Khoảng từ đầu S đến điểm sự cố F;

$l$ : Chiều dài đường dây.

Áp dụng thuật toán [2], xác định điện áp tại điểm sự cố F sử dụng tín hiệu điện áp và dòng điện đo lường từ đầu S:

$$V_{fs1} = \cosh(\gamma_1 d) \cdot V_{sf1} + Z_{c1} \cdot \sinh(\gamma_1 d) \cdot I_{sf1} \quad (15)$$

Xác định điện áp tại điểm sự cố F sử dụng tín hiệu điện áp và dòng điện đo lường từ đầu R:

$$V_{fr1} = \cosh[\gamma_1 (l - d)] \cdot V_{rf1} + Z_{c1} \cdot \sinh[\gamma_1 (l - d)] \cdot I_{rf1} \quad (16)$$

Điện áp tại điểm sự cố F xác định sử dụng tín hiệu đầu S phải bằng với điện áp tại điểm sự cố xác định sử dụng tín hiệu đầu R:

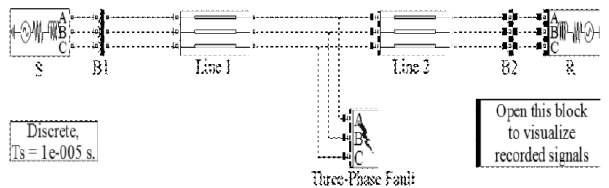
$$|V_{fs1}| = |V_{fr1}| \quad (17)$$

$$\Rightarrow \left| \cosh(\gamma_1 d) \cdot V_{sf1} + Z_{c1} \cdot \sinh(\gamma_1 d) \cdot I_{sf1} \right| - \left| \cosh[\gamma_1 (l - d)] \cdot V_{rf1} + Z_{c1} \cdot \sinh[\gamma_1 (l - d)] \cdot I_{rf1} \right| = 0 \quad (18)$$

Hàm mục tiêu (18) là hàm phi tuyến một biến  $d$ , sử dụng lệnh `fminbnd` trong phần mềm Matlab với ràng buộc biến  $0 \leq d \leq l$ , từ đó xác định khoảng cách từ đầu S đến điểm sự cố F là  $d$ .

3. Kết quả mô phỏng

Hình 4 thể hiện đường dây truyền tải điện được mô phỏng sử dụng môi trường Simulink của phần mềm Matlab. Mô hình này được sử dụng để kiểm chứng tính chính xác, hiệu quả của thuật toán được đề xuất. Đề trích xuất được tín hiệu điện áp và dòng điện từ hai đầu đường dây thì thông số của các phần tử của mô hình phải được cung cấp: thông số đường dây được cho ở Bảng 1, thông số nguồn được trình bày ở Bảng 2.



Hình 4. Mô hình mô phỏng đường dây truyền tải

Bảng 1. Thông số đường dây Line 1,  $2l = 100\text{km}$

Thông số	Thứ tự thuận	Thứ tự nghịch
R ( $\Omega/\text{km}$ )	0.01143	0.24665
L (H/km)	0.00086839	0.0030886
C (F/km)	1.3426e-008	8.5885e-009

Bảng 2. Thông số nguồn

Nguồn	Điện áp (KV)	X/R	Góc pha
S	230	10	5
R	235	10	0

Đề trích xuất tín hiệu điện áp và dòng điện sử dụng khối đo lường B1, B2 (Three-Phase V-I Measurement trong SimPowerSystems\Measurements); tín hiệu dòng điện của B1, B2 được đưa qua máy biến dòng điện để tạo ra dạng sóng dòng điện bị méo dạng do máy biến dòng điện bị bão hòa.

Sau đó, sử dụng thuật toán được trình bày ở Phần 2.2 phức hồi dạng sóng dòng điện bị méo dạng, và sử dụng thuật toán ở Phần 2.3 với tín hiệu điện áp đo lường từ hai đầu đường dây và tín hiệu dòng điện được đo lường từ hai đầu đường dây sau khi đã được khôi phục dạng sóng để định vị sự cố xảy ra trên đường dây truyền tải, kết quả định vị sự cố ở Bảng 3.

**Bảng 3. Kết quả của thuật toán**

Thứ tự	<i>d</i> thực tế (km)	<i>d</i> kết quả thuật toán (km)	Sai số (%)
1	5	5.0540	0.0540
2	15	15.2937	0.2937
3	30	29.2882	0.7118
4	35	35.7966	0.7966
5	50	50.5284	0.5284
6	60	58.4080	1.5920
7	70	69.9791	0.0209
8	80	79.6778	0.3222
9	85	83.7415	1.2585
10	95	94.1614	0.8386

#### 4. Kết luận

Bài báo này trình bày thuật toán cải tiến trên cơ sở tổng hợp các thuật toán [1-4]. Thuật toán được áp dụng để định vị sự cố xảy ra trên đường dây truyền tải khi máy biến dòng điện một đầu bị bão hòa:

- Thuật toán có hai bước: khôi phục dạng sóng dòng điện bị méo dạng do máy biến dòng điện bị bão hòa sử dụng thuật toán hồi quy *DFT*; định vị sự cố sử dụng phân bố điện áp tại điểm sự cố xác định từ tín hiệu đo

lượng từ hai đầu đường dây.

- Định vị sự cố chỉ sử dụng biên độ điện áp, nên thuật toán tránh được sai số khi tín hiệu đo lường từ hai đầu đường dây không được đồng bộ chính xác.

- Kết quả mô phỏng rất khả quan với sai số định vị sự cố lớn nhất khoảng 1.59%, qua đó thể hiện tính chính xác, hiệu quả và khả năng ứng dụng thuật toán cho định vị sự cố xảy ra trên đường dây của lưới truyền tải cũng như của lưới phân phối.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] C. Yu, "Detection and Correction of Saturated Current Transformer Measurements Using Decaying DC Components", *IEEE Trans. POWER Deliv. VOL. 25, NO. 3, JULY 2010*, vol. 25, no. 3, pp. 1340–1347, 2010.
  - [2] E. G. Silveira and C. Pereira, "Transmission Line Fault Location Using Two-Terminal Data Without Time Synchronization", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 498–499, Feb. 2007.
  - [3] S. M. Brahma and a. a. Girgis, "Fault Location on a Transmission Line Using Synchronized Voltage Measurements", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 4, pp. 1619–1622, Oct. 2004.
  - [4] S. M. Brahma, "Fault Location Scheme for a Multi-Terminal Transmission Line Using Synchronized Voltage Measurements", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2, pp. 1325–1331, Apr. 2005.
- A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. Springer International Publishing, 2008.

(BBT nhận bài: 09/06/2015, phản biện xong: 07/12/2015)