

ƯỚC LƯỢNG TRẠNG THÁI HỆ THỐNG ĐIỆN BẰNG PHƯƠNG PHÁP BÌNH PHƯƠNG CỰC TIỂU CÓ TRỌNG SỐ

POWER SYSTEM STATE ESTIMATION BY WEIGHTED LEAST SQUARE METHOD

Trần Thanh Sơn, Đặng Thu Huyền, Kiều Thị Thanh Hoa

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 11/1/2018, Ngày chấp nhận đăng: 26/2/2018, Phản biện: TS. Lã Minh Khánh

Tóm tắt:

Bài báo giới thiệu nghiên cứu và xây dựng chương trình ước lượng trạng thái hệ thống điện bằng phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số trong môi trường Matlab. Sử dụng giả thiết sai số các phép đo trên hệ thống là độc lập nhau và có phân bố Gauss để thành lập hệ phương trình chuẩn của bài toán ước lượng trạng thái. Chương trình tính toán đã được viết thành công để giải hệ phương trình chuẩn này. Để kiểm chứng chương trình, một kịch bản ước lượng trạng thái hệ thống điện IEEE 14 nút được đề xuất. Các kết quả ước lượng của môđun và góc pha điện áp được so sánh với các kết quả tính toán ở chế độ xác lập bằng phương pháp lặp Newton-Raphson.

Từ khóa:

Ước lượng trạng thái; hệ thống điện; phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số; sai phương; phương pháp Newton-Raphson; IEEE 14 nút.

Abstract:

This paper presents the implemetation of weighted least square method in Matlab for power system state estimation. Assuming independant measurment errors and Gauss' distribution to formulate the standard equation system of power system state estimation. A program is wrote for solving this problem. A study case of IEEE 14 bus state estimation is proposed and are estimated by the program. The results are compared with the ones of Newton-Raphson method to validate the method and program.

Keywords:

State estimation; power system; weighted least square method; variance; Newton-Raphson method; IEEE 14 bus.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Trong quá trình vận hành hệ thống điện, trạng thái của hệ thống là một vấn đề được đặc biệt quan tâm cần phải xác định nhằm xem xét trạng thái vận hành có an toàn hay không, có khả năng chịu được các sự cố ngẫu nhiên hay không. Trạng

thái vận hành của hệ thống điện được đặc trưng bằng các thông số trạng thái như: môđun điện áp, góc pha điện áp, công suất tác dụng nút, công suất phản kháng nút, dòng công suất tác dụng trên đường dây, dòng công suất phản kháng trên đường dây, dòng điện trên đường dây, cầu

trúc của hệ thống... Các thông số trạng thái này không độc lập với nhau mà liên hệ với nhau thông qua hệ phương trình trạng thái. Khi biết được một số lượng thông số trạng thái nhất định ta có thể tính ra tất cả các thông số còn lại. Trạng thái của hệ thống điện được xác định bằng nhiều cách như lắp đặt trực tiếp các thiết bị đo tại tất cả các nút và đường dây trên hệ thống để đo và thu thập các thông số trạng thái. Tuy nhiên phương pháp này đòi hỏi một số lượng lớn các thiết bị đo, hệ thống truyền tin với khối lượng dữ liệu rất lớn. Ngoài ra trong trường hợp lắp đặt các thiết bị đo ở tất cả các nút và đường dây trên hệ thống để thu thập các thông số trạng thái thì vẫn gặp phải khó khăn về vấn đề sai số của thiết bị đo, lỗi thiết bị và nhiễu hoặc lỗi khi truyền dữ liệu. Do đó, nghiên cứu ước lượng trạng thái hệ thống điện đã được nghiên cứu phát triển. Mục tiêu của bài toán ước lượng trạng thái hệ thống điện dựa trên cơ sở dữ liệu các thông số về cấu trúc và các thông số trạng thái đo được để ước lượng các thông số trạng thái cơ bản của hệ thống bao gồm: môđun của điện áp U_i , góc pha điện áp θ_i tại tất cả các nút. Khi có tất cả các thông số cơ bản này ta có thể tính toán được các thông số còn lại, đánh giá sự chuẩn xác của dữ liệu đo, của cấu trúc và đánh giá được trạng thái của hệ thống là an toàn hay không. Các nghiên cứu về vấn đề ước lượng trạng thái hệ thống điện đã được đưa ra lần đầu tiên bởi Fred Schweppe [1-3]. Sau đó đã và đang có rất nhiều nhà khoa học tập trung vào bài toán này [4-10]. Bài báo này tập trung vào nghiên cứu xây dựng chương trình ước lượng trạng thái hệ thống điện trên cơ sở

phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số. Một kịch bản về ước lượng trạng thái hệ thống điện IEEE 14 nút được tính toán và so sánh với kết quả chuẩn. Các phần tiếp theo của bài báo gồm:

- Phần 2 giới thiệu phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số;
- Phần 3 giới thiệu ứng dụng phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số để ước lượng trạng thái hệ thống điện;
- Phần 4 giới thiệu về chương trình mà tác giả viết dựa trên các nghiên cứu ở phần 3 và áp dụng chương trình ước lượng trạng thái hệ thống điện IEEE 14 nút;
- Phần 5 là một số kết luận.

2. PHƯƠNG PHÁP BÌNH PHƯƠNG CỰC TIỂU CÓ TRỌNG SỐ ĐỂ ƯỚC LƯỢNG TRẠNG THÁI [10,11]

Xét một hệ gồm tập hợp các phép đo các biến z_i với $i = 1..m$ với sai số và sai phương lần lượt là e_i , σ_i . Giả thiết sai số của các phép đo phân bố theo phân bố Gauss và độc lập nhau, tức:

$$\text{cov}(e) = E[e.e^T] = R = \text{diag}\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_m^2\} \quad (1)$$

Gọi hàm $h_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ là hàm biểu diễn mối liên hệ z_i theo các biến trạng thái $x_1, x_2, \dots, x_n$, ta có:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ h_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} = h(x) + e \quad (2)$$

Để tìm các biến trạng thái $x_1, x_2, \dots, x_n$ tương ứng với các giá trị đo được, phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số thực hiện cực tiểu hoá hàm mục tiêu sau:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(x))^2}{R_{ii}} = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (3)$$

Hàm $J(x)$ đạt cực tiểu khi:

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x) R^{-1} [z - h(x)] = 0 \quad (4)$$

trong đó:

$$H(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h(x)}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Bỏ qua các thành phần đạo hàm bậc cao trong khai triển Taylor của hàm $g(x)$ tại bước lặp thứ $k+1$ ta có:

$$[G(x^k)] = \Delta x^{k+1} = -g(x^k) \quad (6)$$

trong đó:

$$g(x^k) = -H^T(x^k).R^{-1}.[z - h(x^k)]$$

$$G(x^k) = \frac{\partial g(x^k)}{\partial x} = H^T(x^k).R^{-1}.H(x^k) \quad (7)$$

Giải hệ phương trình (6) ta nhận được sai số của các biến trạng thái x_i . Trong trường hợp các sai số này nằm trong phạm vi cho phép thì ta nhận được kết quả, nếu không ta thực hiện cập nhật giá trị mới cho x_i và tiếp tục tính toán.

3. ÁP DỤNG PHƯƠNG PHÁP BÌNH PHƯƠNG CỰC TIỂU CÓ TRỌNG SỐ ĐỂ ƯỚC LƯỢNG TRẠNG THÁI HỆ THỐNG ĐIỆN [10,11]

Giả thiết ta có một tập hợp các phép đo bao gồm công suất tác dụng và phản

kháng nút lần lượt là P_i, Q_i ; dòng công suất tác dụng và phản kháng trên đường dây lần lượt là P_{ij}, Q_{ij} ; môđun điện áp U_i ; môđun dòng điện trên nhánh I_{ij} . Các thông số đo này là hàm của các thông số môđun và góc pha của điện áp U_i, θ_i tại tất cả các nút như sau [1-3]:

$$P_i = fP_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$Q_i = fQ_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

$$P_{ij} = fP_{ij} = U_i^2 (g_{ij} + g_{si}) - U_i U_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$Q_{ij} = fQ_{ij} = U_i^2 (b_{ij} + b_{si}) - U_i U_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij})$$

$$I_{ij} = fI_{ij} = \sqrt{(g_{ij}^2 + b_{ij}^2)(U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij})} \quad (8)$$

trong đó:

G_{ij}, B_{ij} : phần thực và phần ảo của thành phần ma trận tổng dẫn;

g_{ij}, b_{ij} : phần thực và phần ảo của tổng dẫn nhánh ij ;

g_{si}, b_{si} : phần thực và phần ảo của tổng dẫn shunt nối với nút i .

Ứng dụng phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số như trình bày ở mục 2 vào giải hệ phương trình (8), ta có thuật toán như sau:

- Bước 1: Đặt $k = 0$.
- Bước 2: Khởi tạo giá trị ban đầu của véc tơ thông số trạng thái cơ bản θ, U .
- Bước 3: Tính ma trận hệ số nhân $G(x^k)$.
- Bước 4: Tính

$$g^k = -H^T(x^k).R^{-1}.[z - h(x^k)] \quad (9)$$

- Bước 5: Giải tìm Δx^k
- Bước 6: Kiểm tra điều kiện hội tụ, $\max|\Delta x^k| \leq \varepsilon$. Nếu đúng, dừng. Nếu không, cập nhật giá trị x^{k+1} , đặt $k = k + 1$ và quay lại bước 3.

Ma trận Jacobi của các biến đo H có số phần tử tùy thuộc vào số lượng biến đo. H có dạng như sau:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{nut}}{\partial \theta} & \frac{\partial f_{nut}}{\partial U} \\ \frac{\partial f_{nhanh}}{\partial \theta} & \frac{\partial f_{nhanh}}{\partial U} \\ \frac{\partial f_{Q_{nut}}}{\partial \theta} & \frac{\partial f_{Q_{nut}}}{\partial U} \\ \frac{\partial f_{Q_{nhanh}}}{\partial \theta} & \frac{\partial f_{Q_{nhanh}}}{\partial U} \\ \frac{\partial f_{nhanh}}{\partial \theta} & \frac{\partial f_{nhanh}}{\partial U} \\ 0 & \frac{\partial U_{nut}}{\partial U} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Từ các công thức (8) ta suy ra các thành phần của H được tính như sau:

- Đạo hàm riêng của hàm công suất tác dụng nút:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{P_i}}{\partial \theta_i} &= \sum_{j=1}^n U_i U_j (-G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) - U_i^2 B_{ii} \\ \frac{\partial f_{P_i}}{\partial \theta_j} &= U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ \frac{\partial f_{P_i}}{\partial U_i} &= \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - U_i G_{ii} \\ \frac{\partial f_{P_i}}{\partial U_j} &= U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (11)$$

- Đạo hàm riêng của hàm công suất phản kháng nút:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{Q_i}}{\partial \theta_i} &= \sum_{j=1}^n U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - U_i^2 G_{ii} \\ \frac{\partial f_{Q_i}}{\partial \theta_j} &= U_i U_j (-G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \frac{\partial f_{Q_i}}{\partial U_i} &= \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - U_i B_{ii} \\ \frac{\partial f_{Q_i}}{\partial U_j} &= U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (12)$$

- Đạo hàm riêng của hàm công suất tác dụng nhánh:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{P_{ij}}}{\partial \theta_i} &= U_i U_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ \frac{\partial f_{P_{ij}}}{\partial \theta_j} &= -U_i U_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ \frac{\partial f_{P_{ij}}}{\partial U_i} &= -U_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) + 2(g_{ij} + g_{si}) U_i \\ \frac{\partial f_{P_{ij}}}{\partial U_j} &= -U_i (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (13)$$

- Đạo hàm riêng của hàm công suất phản kháng nhánh:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{Q_{ij}}}{\partial \theta_i} &= -U_i U_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} - b_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \frac{\partial f_{Q_{ij}}}{\partial \theta_j} &= U_i U_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \frac{\partial f_{Q_{ij}}}{\partial U_i} &= -U_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) - 2(b_{ij} + b_{si}) V_i \\ \frac{\partial f_{Q_{ij}}}{\partial U_j} &= -U_i (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (14)$$

- Đạo hàm riêng của môđun điện áp nút:

$$\frac{\partial U_i}{\partial U_i} = 1, \quad \frac{\partial U_i}{\partial U_j} = 0, \quad \frac{\partial U_j}{\partial U_i} = 1, \quad \frac{\partial U_j}{\partial U_j} = 1, \quad (15)$$

- Đạo hàm riêng của dòng điện nhánh:

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_{ij}}{\partial \theta_i} &= \frac{g_{ij}^2 + b_{ij}^2}{I_{ij}} U_i U_j \sin \theta_{ij} \\ \frac{\partial f_{ij}}{\partial \theta_j} &= \frac{g_{ij}^2 + b_{ij}^2}{I_{ij}} U_i U_j \sin \theta_{ij} \\ \frac{\partial f_{ij}}{\partial U_i} &= \frac{g_{ij}^2 + b_{ij}^2}{I_{ij}} (U_i - U_j \cos \theta_{ij}) \\ \frac{\partial f_{ij}}{\partial U_j} &= \frac{g_{ij}^2 + b_{ij}^2}{I_{ij}} (U_j - U_i \cos \theta_{ij})\end{aligned}\quad (16)$$

4. CHƯƠNG TRÌNH ƯỚC LƯỢNG TRẠNG THÁI HỆ THỐNG ĐIỆN

Trên cơ sở lý thuyết nghiên cứu tại phần 3, các tác giả đã thực hiện lập trình thuật toán thành chương trình với cấu trúc như sau:

```
Editor - /Volumes/2/Data/MATLAB/PSSE/mainPSSE.m
1 % Chương trình ước lượng trạng thái hệ thống điện
2 - cfc
3 - clear
4
5 % Đọc các dữ liệu nhánh, do từ file
6 [tongSoNut, loaNut, nut, Udm, Ucb, Scb, Ys,...
7 tongSoNhanh, soNhanh, nutDau, nutCuoi, Z, Yngang, heSoPhanAp,...
8 tongSoPhepDo, soPhepDo, loaPhepDo, viTriDo, thangSoDo]...
9 = readData('I3E14bus.xlsx');
10
11 % Tính ma trận tổng dẫn nút Ybus
12 [Ybus] = ybus(tongSoNhanh, soNhanh, nutDau, nutCuoi, Z, Yngang, heSoPhanAp, Ys);
13
14 % Ước lượng trạng thái hệ thống điện bằng phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số
15 batdau = cputime;
16 epsilon = 1e-6;
17 [U, theta, nbrate] = psseByWLS(tongSoNut, nut,...
18 Ybus,...
19 tongSoPhepDo, soPhepDo, loaPhepDo, viTriDo, thangSoDo,
20 epsilon);
21
22 keththuc = cputime;
23 thoigian = keththuc - batdau;
24
```

Hình 1. Hàm chính của chương trình ước lượng trạng thái hệ thống điện

Các hàm trong chương trình có chức năng như trên bảng 1.

Bảng 1. Chức năng các hàm trong chương trình

Hàm tương ứng	Chức năng
readData	Đọc dữ liệu
ybus	Tính ma trận tổng dẫn nút của lưới
psseByWLS	Ước lượng trạng thái hệ thống điện bằng phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số

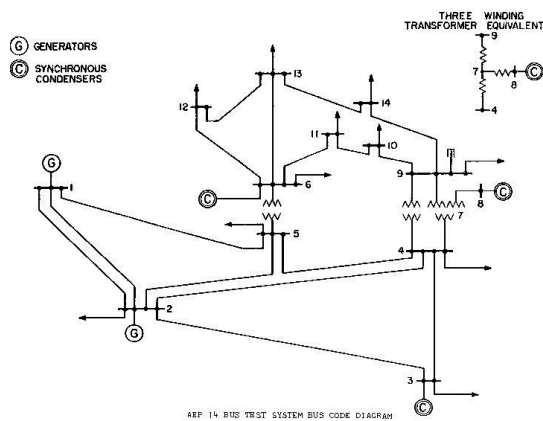
Các dữ liệu của bài toán được nhập vào trong file excel với định dạng quy định trước (hình 2). Sau đó hàm readData sẽ đọc các dữ liệu này và gán cho các biến tương ứng.

Phép đo số	Loại	Thông số đo	Từ nút	Đến nút	sigma
1	1	1.06	1	0	9.00E-04
2	2	2.323852	1	0	1.00E-04
3	2	0.183	2	0	1.00E-04
4	2	-0.942	3	0	1.00E-04
5	2	-0.478	4	0	1.00E-04
6	2	-0.076	5	0	1.00E-04
7	2	-0.112	6	0	1.00E-04

Hình 2. Cấu trúc file nhập thông số đo

Hàm ybus sẽ tính ma trận tổng dẫn của lưới và hàm psseByWLS sẽ thực hiện ước lượng môđun và góc pha của điện áp tại tất cả các nút của hệ thống.

Để có cơ sở kiểm chứng tính chính xác của chương trình, nhóm tác giả thực hiện tính toán chế độ xác lập của lưới điện IEEE 14 nút (hình 3) bằng phương pháp Newton-Raphson, từ đó tính ra điện áp và dòng công suất trên các nhánh. Sau đó nhóm tác giả giả thiết đặt các thiết bị đo công suất nút với các giá trị đo nhận được như ở kết quả tính toán chế độ xác lập. Từ các thông số "đo" này, chương trình tính toán thực hiện ước lượng giá trị môđun và góc pha điện áp. Các giá trị này được so sánh với các giá trị tính toán ở chế độ xác lập để kiểm chứng tính chính xác của chương trình.



Hình 3. Sơ đồ một sợi lưới điện IEEE 14 nút

Dữ liệu đo để ước lượng trạng thái hệ thống điện như trong bảng sau:

Bảng 2. Thông số đo dùng để ước lượng trạng thái hệ thống

Phép đo số	Loại	Thông số đo (pu)	Nút	σ
1	Môđun U	1,06	1	9,00E-04
2	Biết P nút	2,323852	1	1,00E-04
3		0,183	2	1,00E-04
4		-0,942	3	1,00E-04
5		-0,478	4	1,00E-04
6		-0,076	5	1,00E-04
7		-0,112	6	1,00E-04
8		0	7	1,00E-04
9		0	8	1,00E-04
10		-0,295	9	1,00E-04
11		-0,09	10	1,00E-04
12		-0,035	11	1,00E-04
13		-0,061	12	1,00E-04
14		-0,135	13	1,00E-04
15		-0,149	14	1,00E-04
16	Biết Q nút	-0,1688878	1	1,00E-04
17		0,2969625	2	1,00E-04
18		0,0439345	3	1,00E-04
19		0,039	4	1,00E-04

Phép đo số	Loại	Thông số đo (pu)	Nút	σ
20	Biết Q nút	-0,016	5	1,00E-04
21		0,0474046	6	1,00E-04
22		0	7	1,00E-04
23		0,1735663	8	1,00E-04
24		0,024	9	1,00E-04
25		-0,058	10	1,00E-04
26		-0,018	11	1,00E-04
27		-0,016	12	1,00E-04
28		-0,058	13	1,00E-04
29		-0,05	14	1,00E-04

Kết quả tính toán ước lượng trạng thái hệ thống bằng chương trình nhóm tác giả viết như trên bảng 3 và 4.

Bảng 3. Kết quả môđun điện áp ước lượng bằng phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số

Nút	PP bình phương cực tiểu có trọng số	PP Newton-Raphson	Sai số (%)
1	1,068475001	1,06	0,80
2	1,053525528	1,045	0,82
3	1,018738604	1,01	0,87
4	1,026845375	1,018623	0,81
5	1,028570432	1,020264	0,81
6	1,077996119	1,07	0,75
7	1,068940677	1,061951	0,66
8	1,096910196	1,09	0,63
9	1,062546922	1,056346	0,59
10	1,057954387	1,051328	0,63
11	1,064460247	1,057082	0,70
12	1,061952383	1,05522	0,64
13	1,058991246	1,050443	0,81
14	1,043242621	1,035795	0,72

Bảng 4. Kết quả góc pha điện áp ước lượng bằng phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số

Nút	PP bình phương cực tiểu có trọng số	Phương pháp Newton-Raphson	Sai số (%)
1	0	0	
2	-4,900302166	-4,980932	1,62
3	-12,50947224	-12,71793	1,64
4	-10,14850363	-10,32421	1,70
5	-8,635885152	-8,78256	1,67
6	-14,00998524	-14,22266	1,50
7	-13,14383958	-13,36825	1,68
8	-13,14497074	-13,36825	1,67
9	-14,69890424	-14,94661	1,66
10	-14,8599789	-15,10433	1,62
11	-14,5656229	-14,79527	1,55
12	-14,80993899	-15,07743	1,77
13	-14,95202275	-15,15895	1,37
14	-15,797669	-16,03894	1,50

Lấy kết quả phương pháp Newton-Raphson làm chuẩn, qua bảng so sánh ta thấy chương trình xây dựng trên cơ sở phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số cho kết quả chính xác. Sai số dưới 1% đối với môđun điện áp và dưới

2% đối với góc pha điện áp. Do hai phương pháp đều sử dụng khai triển Taylor và bỏ đi các thành phần đạo hàm bậc cao nên sai số này có thể do nguyên nhân hai phương pháp thực hiện các phép nghịch đảo ma trận khác nhau và/hoặc điều kiện dừng lặp của hai phương pháp khác nhau.

5. KẾT LUẬN

Bài báo giới thiệu nghiên cứu xây dựng chương trình ước lượng trạng thái hệ thống điện trên cơ sở phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số để ước lượng giá trị môđun và góc pha điện áp từ các dữ liệu đo của các thông số trạng thái. Dữ liệu của chương trình được nhập vào file excel định dạng sẵn, rất thuận tiện cho người sử dụng. Qua so sánh với kết quả tính toán bằng phương pháp Newton-Raphson ở chế độ xác lập cho thấy chương trình chạy với độ chính xác cao. Đây là một cơ sở quan trọng cho các nghiên cứu tiếp theo về khả năng quan sát hệ thống, xác định số lượng và các vị trí đo tối ưu, phát hiện lỗi dữ liệu và lỗi cấu trúc.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Schweppe F.C. and Wildes J., "Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-89, 1970, pp.120-125.
- [2] Schweppe F.C. and Rom D.B., "Power System Static-State Estimation, Part II: Approximate Model", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-89, 1970, pp.125-130.
- [3] Schweppe F.C., "Power System Static-State Estimation, Part III: Implementation", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-89, 1970, pp.130-135.
- [4] Junbo Zhao, Marcos Netto, Lamine Mili, "A Robust Iterated Extended Kalman Filter for Power System Dynamic State Estimation", Power Systems IEEE Transactions on, vol. 32, pp. 3205-3216, 2017, ISSN 0885-8950.

- [5] Colin Ponce, David S. Bindel, "FLiER: Practical Topology Update Detection Using Sparse PMUs", *Power Systems IEEE Transactions on*, vol. 32, pp. 4222-4232, 2017, ISSN 0885-8950.
- [6] Junbo Zhao, Gexiang Zhang, Massimo La Scala, Zhaoyu Wang, "Enhanced Robustness of State Estimator to Bad Data Processing Through Multi-innovation Analysis", *Industrial Informatics IEEE Transactions on*, vol. 13, pp. 1610-1619, 2017, ISSN 1551-3203.
- [7] Dhagash Mehta, Daniel K. Molzahn, Konstantin Turitsyn, "Recent advances in computational methods for the power flow equations", *American Control Conference (ACC) 2016*, pp. 1753-1765, 2016, ISSN 2378-5861.
- [8] Ariana Minot, Yue M. Lu, Na Li, "A Distributed Gauss-Newton Method for Power System State Estimation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume: 31, Issue: 5, Sept. 2016.
- [9] Mariano Rizzo; Aldo Jose Rubiales; Pablo Andres Lotito, "Hybrid method for power system state estimation", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol.9, Issue 7.
- [10] T. P. Vishnu, V. Viswan and A. M. Vipin, "Power system state estimation and bad data analysis using weighted least square method," 2015 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICCC), Thrissur, 2015.
- [11] Ali Abur, Antonio Gómez Expósito, "Power System State Estimation: Theory and Implementation," Marcel Dekker, Inc., 2004.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Trần Thanh Sơn tốt nghiệp đại học ngành hệ thống điện Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2004; nhận bằng Thạc sĩ ngành kỹ thuật điện tại Trường Đại học Bách khoa Grenoble, Cộng hoà Pháp năm 2005; và bằng Tiến sĩ ngành kỹ thuật điện tại Trường Đại học Joseph Fourier - Cộng hoà Pháp năm 2008.

Lĩnh vực nghiên cứu: ứng dụng phương pháp số trong tính toán, mô phỏng trường điện từ, các bài toán tối ưu hoá trong hệ thống điện, lưới điện thông minh.



Tác giả Đặng Thu Huyền tốt nghiệp đại học ngành hệ thống điện Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2003; nhận bằng Thạc sĩ năm 2006 và bằng Tiến sĩ năm 2010 ngành kỹ thuật điện tại Học Viện Bách Khoa Grenoble (INPG) - Cộng hoà Pháp.

Lĩnh vực nghiên cứu: tính toán hệ thống điện, kỹ thuật điện cao áp, vật liệu điện.



Tác giả Kiều Thị Thanh Hoa tốt nghiệp đại học ngành kỹ thuật điện tại Trường Đại học Điện lực năm 2011; nhận bằng Thạc sĩ ngành kỹ thuật điện - chương trình liên kết đào tạo giữa Trường Đại học Điện lực và Đại học Palermo năm 2014.

Lĩnh vực nghiên cứu: tính toán chế độ hệ thống điện, ước lượng trạng thái hệ thống, điều khiển kết nối nguồn phân tán.