

Power system state estimation by using a generalized maximum likelihood method

Le Tuan Ho^{1,*}

¹Faculty of Engineering and Technology, Quy Nhon University

Received: 14/07/2019; Accepted: 14/08/2019

ABSTRACT

In the operation of modern power systems, the state parameters of the system in real time need to be calculated and measured with high accuracy in order to provide the data needed for assessment and control the safety of the power supply and the economics of the system. This requirement can be implemented by using power system state estimation methods and it is a main task of the electricity system control centers. Therefore, the main purpose of this paper is to study and implement the power system state estimation algorithm by using a generalized maximum likelihood estimation method. In addition, the conventional weighted least square method is applied in power system state estimation problem. Both estimation methods are utilized to estimate the operation parameters of the IEEE 57-bus system. The estimated values of voltage and bus angle by using two proposed methods were compared with the state parameters of the IEEE 57-bus system.

Keywords: *Generalized maximum likelihood method, weighted least square method, IEEE 57-bus system.*

**Corresponding author.
Email: tuanhole@qnu.edu.vn*

Ước lượng trạng thái vận hành lưới điện sử dụng phương pháp ước lượng hợp lý cực đại tổng quát

Lê Tuấn Hộ^{1,*}

¹Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Quy Nhơn

Ngày nhận bài: 14/07/2019; Ngày nhận đăng: 14/08/2019

TÓM TẮT

Trong vận hành các hệ thống điện hiện đại, các thông số trạng thái của hệ thống trong thời gian thực cần phải được tính toán, đo đạc với độ chính xác cao nhằm tạo nên một cơ sở dữ liệu cần thiết cho việc đánh giá và điều khiển độ an toàn cung cấp điện cũng như tính kinh tế của hệ thống. Yêu cầu này được thực hiện bởi bài toán ước lượng trạng thái của hệ thống điện, và là một nhiệm vụ chính của các trung tâm điều độ, điều khiển hệ thống điện. Vì vậy, mục tiêu của bài báo này là nghiên cứu và xây dựng bài toán ước lượng trạng thái hệ thống điện dựa trên phương pháp ước lượng hợp lý cực đại tổng quát. Ngoài ra, bài báo cũng sử dụng phương pháp truyền thống thường được dùng để ước lượng trạng thái hệ thống điện là phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số. Cả hai phương pháp ước lượng được ứng dụng để ước lượng các thông số vận hành của lưới điện chuẩn IEEE 57 nút. Các kết quả ước lượng của điện áp và góc pha điện áp từ hai phương pháp được so sánh với các thông số trạng thái của lưới điện chuẩn IEEE 57 nút.

Từ khóa: Phương pháp ước lượng hợp lý cực đại tổng quát, phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số, lưới điện chuẩn IEEE 57 nút.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Theo quan điểm ước lượng trạng thái, hệ thống điện là một lưới truyền tải cao áp rộng lớn bao gồm các đường dây và các máy biến áp nối đến các nút. Các máy phát điện đồng bộ sẽ cung cấp một lượng công suất cho các nút này hoặc từ các nút này sẽ cung cấp một lượng công suất cho phụ tải tiêu thụ thông qua lưới điện phân phối. Hệ thống này sẽ được giám sát bởi các trung tâm điều khiển và cung cấp các thông tin thu thập được trong thời gian thực cho người vận hành. Các thông tin này có thể là tình trạng của máy cắt và một tập hợp các thông tin đo đếm được. Trạng thái của tất cả các máy cắt sẽ mô tả hiện trạng của lưới điện đang vận hành. Đối với các thông tin đo đếm, chúng thường được thu thập theo chu

kỳ từ 1 đến 10 giây. Các thông tin này phải đầy đủ để đảm bảo khả năng quan sát được của hệ thống. Những thông tin này sẽ được xử lý thông qua chức năng ước lượng trạng thái và gửi đến người vận hành để giúp đưa ra các phương thức điều khiển cho các nhà máy điện và trạm biến áp.

Tuy nhiên, ở đây gặp phải vấn đề là các thông số đo đếm này không hoàn thiện: chúng không chính xác, thậm chí sai, hoặc thiếu (thiếu điểm đo hoặc hư hỏng hệ thống đo và truyền số liệu). Sai số của các phép đo là không thể tránh khỏi và do nhiều nguyên nhân như:

- ✓ Sai số của thiết bị đo và máy biến áp/ dòng đo lường,
- ✓ Sai số của khâu biến đổi tương tự - số (dữ liệu thường được truyền bằng tín hiệu số;

*Tác giả liên hệ chính.

Email: tuanhole@qnu.edu.vn

nếu truyền bằng tín hiệu tương tự sai số còn cao hơn nhiều),

✓ Nhiều trong kênh truyền,

✓ Bộ dữ liệu không đồng nhất về thời điểm đo. Do hằng số thời gian của thiết bị đo, của việc truyền số liệu và do phương pháp hỏi - đáp tuần tự giữa trung tâm điều khiển và các RTU, mà độ lệch thời gian này thường tới vài giây. Sai lệch còn nặng hơn trong trường hợp nhiều hệ thống thu thập dữ liệu tham gia đóng góp cho một cơ sở dữ liệu của hệ thống điện hợp nhất.

Vì vậy, các phương pháp ước lượng trạng thái hệ thống điện đã được nghiên cứu và phát triển. Mục tiêu chính của bài toán ước lượng trạng thái hệ thống điện là sử dụng các công cụ toán học và xác suất thống kê để ước lượng hai thông số trạng thái hệ thống cơ bản là môđun điện áp và góc pha điện áp của tất cả các nút dựa trên cơ sở dữ liệu về các thông số cấu trúc và các thông số trạng thái đo. Phương pháp cơ bản nhất thường được sử dụng để ước lượng trạng thái hệ thống điện là phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số (weighted least square hay WLS) và được trình bày trong nhiều công trình nghiên cứu.²⁻⁴ Phương pháp này được sử dụng dựa trên các giả thiết sai số phép đo trên hệ thống độc lập nhau và tuân theo hàm phân phối chuẩn. Phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số có đặc điểm là sử dụng quy luật chiếu dữ liệu xấu dựa trên phần dư có trọng số (weighted residuals) hoặc phần dư được chuẩn hóa (normalized residuals). Tuy nhiên, đặc tính của nó bị suy giảm nhiều khi các dữ liệu xấu xuất hiện hoặc khi không biết ma trận hiệp phương sai của sai số do các hỏng hóc của dụng cụ, nhiễu loạn xung thông tin, tính bất định của mô hình.⁵ Do đó, để hạn chế những nhược điểm này của phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số các phương pháp khác đã được nghiên cứu và phát triển. Trong thống kê, phương pháp có thể xử lý nhiều trường hợp khác nhau của dữ liệu xấu mà vẫn đảm bảo tốt hiệu quả ước lượng thống kê khi không biết sai số/nhiều đo lường đó là phương pháp ước lượng hợp lý cực đại tổng

quát. Phương pháp này có ưu điểm là hạn chế sự ảnh hưởng của các điểm đòn bẩy xấu (leverage point) bằng cách giới hạn cả sự ảnh hưởng của phần dư và của cả vị trí. Do đó, bài báo này tập trung vào việc xây dựng chương trình ước lượng trạng thái hệ thống điện dựa trên phương pháp ước lượng hợp lý cực đại tổng quát. Từ đó, bài báo phân tích kết quả ước lượng đạt được từ phương pháp đề xuất so với kết quả đạt được từ phương pháp hay được sử dụng là bình phương cực tiểu có trọng số và so với kết quả thực của các nút để thấy được hiệu quả của phương pháp.

2. PHƯƠNG PHÁP ƯỚC LƯỢNG BÌNH PHƯƠNG CỰC TIỂU CÓ TRỌNG SỐ

Giả thiết cơ bản của phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số [6], [7] là vector sai số $\mathbf{e}$ bao gồm nhiều biến ngẫu nhiên độc lập tuân theo phân bố Gaussian, e_i , có giá trị trung bình bằng không:

$$\mathbf{e} \sim N(0, \mathbf{R}) \quad (1)$$

và ma trận hiệp phương sai đã biết

$$\mathbf{R} = \text{diag}(\sigma_i^2). \quad (2)$$

Sử dụng giả thiết này, mục tiêu của bài toán là ước lượng vector trạng thái $\mathbf{x}$ bao gồm điện áp V và góc pha θ tại tất cả các nút gọi trừ nút quy chiếu. Nút này được gọi là nút chuẩn và thường được đặt bằng 0. Do đó, vector trạng thái $\mathbf{x}$ có n chiều thường được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{x} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{N-1}, V_1, V_2, \dots, V_N]^T, \quad (3)$$

ở đây N là số nút của hệ thống và $n = 2N - 1$. Vector $\mathbf{x}$ liên quan đến vector đo lường m chiều $\mathbf{z}$ thông qua mô hình phi tuyến.

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{e} \quad (4)$$

ở đây $\mathbf{h}(\cdot)$ là một hàm phi tuyến.

Đặt $\mathbf{H} = \partial \mathbf{h}(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{x}$ là ma trận Jacobian có kích thước $(m \times n)$ và

$$\mathbf{l}_i = [\mathbf{l}_{i1}, \dots, \mathbf{l}_{im}]^T \quad (5)$$

là cột thứ i của $(\mathbf{R}^{-1/2} \mathbf{H})$. Mỗi vector $\mathbf{l}_i$ tương ứng với một phép đo riêng và xác định điểm không gian nhân tử của ước lượng trạng thái.

Hampel [8] đã chỉ ra rằng hàm ảnh hưởng tổng $\mathbf{IT}$ của một hồi quy $\hat{\mathbf{x}}$ tại $\mathbf{F}$ bằng tích của hàm ảnh hưởng vô hướng của phần dư, $\mathbf{IR}$, và ảnh hưởng giá trị vectơ trong không gian nhân tử, $\mathbf{IP}$. Lưu ý rằng $\mathbf{IR}$ giống với $\mathbf{IF}$ trong trường hợp một chiều. Hàm này biểu diễn như sau:

$$\mathbf{IT}(\mathbf{z}, \hat{\mathbf{x}}, \mathbf{F}, \mathbf{I}, \Lambda) = \mathbf{IT}(\mathbf{z}, \hat{\mathbf{x}}, \mathbf{F}) \mathbf{IP}(\mathbf{I}, \Lambda) \quad (6)$$

ở đây

$$\mathbf{IP}(\mathbf{I}, \Lambda) = \left(\mathbf{E} \left[\mathbf{I} \times \mathbf{I}^T \right] \right)^{-1} \mathbf{I} \quad (7)$$

và ở đây $\mathbf{E} \left[\mathbf{I} \times \mathbf{I}^T \right]$ là ma trận hiệp phương sai của vectơ $\mathbf{I}$, giả thiết nó có giá trị trung bình bằng không. Rõ ràng rằng các điểm đo không những ảnh hưởng đến các điểm đo khác ở xa theo chiều $\mathbf{z}$ (giá trị ngoại lệ dọc trục) mà còn ảnh hưởng đến các khoảng cách khác trong không gian nhân tử, thường hay được gọi là điểm đòn bẩy. Các điểm đòn bẩy trong ước lượng trạng thái hệ thống điện bởi các phép đo lường trong các trường hợp sau:⁹

✓ Dòng trên các nhánh và công suất bơm vào các nút tương ứng với nhánh tương đối nhỏ so với các nút khác;

✓ Công suất bơm vào các nút mà có số lượng lớn các nhánh.

Toàn bộ ma trận Jacobian liên quan đến các phép đo như vậy trở nên lớn hơn. Kết quả là chúng ta có thể xác nhận rằng bất cứ mô hình hệ thống điện thực tế nào cũng có nhiều điểm đòn bẩy, thường trong 1 mẫu nhóm.

Mục tiêu của phương pháp ước lượng bình phương cực tiểu có trọng số là tối thiểu hóa tổng bình phương của các phần dư có trọng số, $r_{wi} = r_i / \sigma_i$, và có được biểu thức:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m r_{wi}^2 = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]. \quad (8)$$

Điều kiện cần để $\mathbf{J}(\hat{\mathbf{x}})$ đạt giá trị cực tiểu là đạo hàm công thức (8) theo $\hat{\mathbf{x}}$ và cho bằng không:

$$\mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}) \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})] = \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r} = \mathbf{0}, \quad (9)$$

ở đây

$$\mathbf{r} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}), \quad (10)$$

là vectơ phần dư. Phương trình (9) thường được giải bằng phương pháp lặp Gauss-Newton và có được kết quả

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_k)(\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k) = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}_k) \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})], \quad (11)$$

ở đây $\mathbf{x}_k$ là giá trị của $\mathbf{x}$ tại phép lặp thứ k , và

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_k) = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}_k) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}(\mathbf{x}_k) \quad (12)$$

là ma trận thông tin. Tuyến tính hóa $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ tại $\hat{\mathbf{x}}$ có được

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) \approx \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}})(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}). \quad (13)$$

Thay các phương trình (4), (13) và các phương trình (9), (10), ta được:

$$\mathbf{r} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{e} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}) - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}})(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}) \quad (14)$$

$$\mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}) \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}})(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})] = \mathbf{0}. \quad (15)$$

Do đó,

$$\mathbf{r} = \mathbf{W} \mathbf{e}, \quad (16)$$

ở đây

$$\mathbf{W} = \mathbf{I} - \mathbf{H}(\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \quad (17)$$

là ma trận độ nhạy phần dư có kích thước $(m \times m)$.

Dưới giả thiết tuân theo hàm phân phối Gauss, vectơ phần dư có giá trị trung bình bằng không

$$\mathbf{E}[\mathbf{r}] = \mathbf{W} \mathbf{E}[\mathbf{e}] = \mathbf{0}, \quad (18)$$

và ma trận hiệp phương sai

$$\text{Cov}[\mathbf{r}] = \mathbf{E}[\mathbf{r} \mathbf{r}^T] = \mathbf{W} \mathbf{R}. \quad (19)$$

3. PHƯƠNG PHÁP ƯỚC LƯỢNG ĐỀ XUẤT

3.1. Phương pháp ước lượng hợp lý cực đại

Phương pháp ước lượng hợp lý cực đại được nghiên cứu và đề xuất trong tài liệu tham khảo.¹⁰ Thay vì sử dụng phương trình (8), phương pháp này dùng để tối thiểu hóa tiêu chuẩn:

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^m \rho \left(\frac{z_i - h_i(\mathbf{x})}{\sigma_i} \right) = \sum_{i=1}^m \rho(r_{wi}), \quad (20)$$

ở đây ρ là một hàm riêng của phần dư. Để có được giá trị của $\mathbf{x}$, ta lấy đạo hàm phương trình (20) theo $\mathbf{x}$ và cho bằng 0, ta có:

$$\sum_{i=1}^m \psi(r_{wi}) \mathbf{I}_i = \mathbf{0}. \quad (21)$$

Các dạng hàm của ρ và ψ được định nghĩa và phân loại trong tài liệu tham khảo.¹¹

3.2. Phương pháp ước lượng hợp lý cực đại tổng quát

Đã có rất nhiều nghiên cứu được tiến hành để tìm ra phương pháp tăng cường hiệu quả của các phương pháp ước lượng hợp lý cực đại khi xuất hiện các điểm đòn bẩy xấu; đó là phương pháp ước lượng hợp lý cực đại tổng quát (hay ước lượng hồi quy ảnh hưởng giới hạn). Dạng phương trình ước lượng (21) có thể được viết lại dưới dạng sau:

$$\sum_{i=1}^m u(I_i) \psi(r_{wi} v(I_i)) I_i = 0. \quad (22)$$

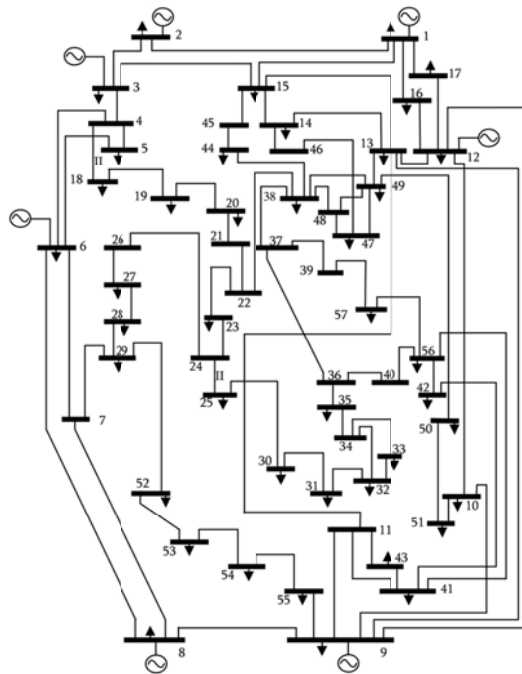
ở đây $u(I_i)$ và $v(I_i)$ là các hàm trọng số mà vai trò của nó là giảm sự ảnh hưởng của các điểm đòn bẩy đến kết quả hồi quy. Trong hệ thống điện, ý tưởng không chọn các hằng số chuyển cố định giống nhau cho tất cả các phần dư có trọng số nhưng chọn một hằng số chuyển $b\sqrt{W_{ii}}$, giá trị của hằng số này thay đổi theo độ lệch chuẩn của chúng theo phương trình (17). Dem so sánh phần dư được chuẩn hóa này với b , mối tương quan này có thể được thiết lập như sau:

$$v(I_i) = \frac{1}{u(I_i)} = \frac{1}{\sqrt{W_{ii}}}. \quad (23)$$

4. TRƯỜNG HỢP NGHIÊN CỨU

Trường hợp dùng để nghiên cứu hiệu quả của phương pháp đề xuất là lưới điện tiêu chuẩn IEEE 57 nút.¹² Lưới điện này có 57 nút trong đó có 7 máy phát, 42 phụ tải, 17 máy biến áp và 63 đường dây nối giữa các nút. Sơ đồ lưới điện IEEE 57 nút được trình bày ở Hình 1. Dữ liệu về các thông số tổng trở, tổng dẫn của các nhánh và dữ liệu về điện áp, công suất tác dụng và phản kháng của các máy phát, công suất tác dụng và phản kháng của các phụ tải có thể tìm thấy trong tài liệu tham khảo.¹² Dữ liệu về điện áp, công suất đi vào nút và công suất giữa các nhánh được mô tả trong Bảng 1, trong đó các loại nút được đánh số 1, 2, 3, 4, 5 lần lượt ký hiệu cho loại nút điện áp, công suất tác dụng bơm vào nút, công suất phản kháng bơm vào nút, dòng công suất tác

dụng và dòng công suất phản kháng. Các giá trị được cho trong đơn vị tương đối (pu).



Hình 1. Sơ đồ lưới điện chuẩn IEEE 57 nút

Bảng 1. Dữ liệu đo được của lưới IEEE 57 nút

STT	Loại nút	Giá trị (pu)	Từ nút	Đến nút
1	1	1.0400	1	0
2	2	422.832/100	1	0
3	2	-3.000/100	2	0
4	2	-1.000/100	3	0
5	2	-75.000/100	6	0
6	2	300.000/100	8	0
7	2	-121.000/100	9	0
8	2	-67.000/100	12	0
9	3	46.411/100	1	0
10	3	-76.553/100	2	0
11	3	28.337/100	3	0
12	3	-20.240/100	6	0
13	3	112.568/100	8	0
14	3	-38.270/100	9	0
15	3	82.457/100	12	0
16	4	102.007/100	1	2
17	4	149.733/100	1	15
18	4	78.505/100	1	16
19	4	92.586/100	1	17
20	4	98.052/100	2	3
21	4	60.542/100	3	4
22	4	33.596/100	3	15

23	4	13.988/100	4	5
24	4	14.702/100	4	6
25	4	31.454/100	4	18
26	4	0.855/100	5	6
27	4	-17.375/100	6	7
28	4	-42.184/100	6	8
29	4	-78.180/100	7	8
30	4	60.728/100	7	29
31	4	178.029/100	8	9
32	4	17.088/100	9	10
33	4	13.117/100	9	11
34	4	2.315/100	9	12
35	4	2.479/100	9	13
36	4	18.829/100	9	55
37	4	-17.582/100	10	12
38	4	29.565/100	10	51
39	4	-9.700/100	11	13
40	4	9.173/100	11	41
41	4	13.575/100	11	43
42	4	-1.956/100	12	13
43	4	-32.704/100	12	16
44	4	-47.753/100	12	17
45	4	-10.695/100	13	14
46	4	-49.353/100	13	15
47	4	32.415/100	13	49
48	4	-69.313/100	14	15
49	4	48.032/100	14	16
50	4	37.218/100	15	45
51	4	4.254/100	18	19
52	4	0.868/100	19	20
53	4	-1.434/100	20	21
54	4	-1.434/100	21	22
55	4	8.937/100	22	23
56	4	-10.373/100	22	38
57	4	2.628/100	23	24
58	4	13.515/100	24	25
59	4	-10.907/100	24	26
60	4	7.215/100	25	30
61	4	-10.907/100	26	27
62	4	-20.464/100	27	28
63	4	-25.341/100	28	29
64	4	18.102/100	29	52
65	4	3.524/100	30	31
66	4	-2.329/100	31	32
67	4	3.808/100	32	33
68	4	-7.778/100	32	34
69	4	-7.778/100	34	35

70	4	-13.823/100	35	36
71	4	-17.421/100	36	37
72	4	3.487/100	36	40
73	4	-21.390/100	37	38
74	4	3.843/100	37	39
75	4	-24.274/100	38	44
76	4	-17.302/100	38	48
77	4	-4.634/100	38	49
78	4	3.837/100	39	57
79	4	3.479/100	40	56
80	4	8.842/100	41	42
81	4	-11.575/100	41	43
82	4	5.606/100	41	56
83	4	1.567/100	42	56
84	4	-36.441/100	44	45
85	4	48.032/100	46	47
86	4	17.739/100	47	48
87	4	0.144/100	48	49
88	4	9.731/100	49	50
89	4	-11.351/100	50	51
90	4	12.709/100	52	53
91	4	-7.424/100	53	54
92	4	-11.701/100	54	55
93	4	2.877/100	56	57
94	5	45.085/100	1	2
95	5	17.698/100	1	15
96	5	-1.472/100	1	16
97	5	1.919/100	1	17
98	5	-23.722/100	2	3
99	5	0.058/100	3	4
100	5	5.215/100	3	15
101	5	-4.455/100	4	5
102	5	-5.080/100	4	6
103	5	2.021/100	4	18
104	5	-6.802/100	5	6
105	5	-9.516/100	6	7
106	5	-16.776/100	6	8
107	5	-28.739/100	7	8
108	5	-35.723/100	7	29
109	5	65.584/100	8	9
110	5	-0.631/100	9	10
111	5	10.150/100	9	11
112	5	-5.626/100	9	12
113	5	7.078/100	9	13
114	5	-45.314/100	9	55
115	5	-11.764/100	10	12
116	5	-102.328/100	10	51

117	5	3.565/100	11	13
118	5	-3.022/100	11	41
119	5	-24.963/100	11	43
120	5	48.845/100	12	13
121	5	13.207/100	12	16
122	5	14.936/100	12	17
123	5	23.076/100	13	14
124	5	5.723/100	13	15
125	5	-33.761/100	13	49
126	5	-9.490/100	14	15
127	5	-136.098/100	14	46
128	5	-48.804/100	15	45
129	5	0.860/100	18	19
130	5	0.133/100	19	20
131	5	-5.952/100	20	21
132	5	-0.893/100	21	22
133	5	4.032/100	22	23
134	5	-4.929/100	22	38
135	5	2.363/100	23	24
136	5	8.153/100	24	25
137	5	81.254/100	24	26
138	5	3.505/100	25	30
139	5	-5.459/100	26	27
140	5	-6.353/100	27	28
141	5	-9.081/100	28	29
142	5	6.813/100	29	52
143	5	1.567/100	30	31
144	5	-1.313/100	31	32
145	5	1.907/100	32	33
146	5	-1.607/100	32	34
147	5	-4.729/100	34	35
148	5	-7.563/100	35	36
149	5	-11.396/100	36	37
150	5	3.775/100	36	40
151	5	-14.113/100	37	38
152	5	2.658/100	37	39
153	5	5.220/100	38	44
154	5	-20.638/100	38	48
155	5	-10.942/100	38	49
156	5	1.103/100	39	57
157	5	-0.013/100	40	56
158	5	3.196/100	41	42
159	5	-2.982/100	41	43
160	5	-0.336/100	41	56
161	5	-1.102/100	42	56
162	5	3.405/100	44	45
163	5	26.544/100	46	47

164	5	13.368/100	47	48
165	5	-7.438/100	48	49
166	5	4.366/100	49	50
167	5	-6.265/100	50	51
168	5	3.973/100	52	53
169	5	-6.199/100	53	54
170	5	-7.818/100	54	55
171	5	-0.347/100	56	57

Kết quả tính toán ước lượng trạng thái hệ thống điện IEEE 57 nút (điện áp và góc pha) bằng phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số (WLS) và phương pháp ước lượng hợp lý cực đại tổng quát (GMM) sử dụng phần mềm Matlab được trình bày trên các Bảng 2 và 3. Ngoài ra, sự sai khác về điện áp và góc pha giữa giá trị thực tế và giá trị ước lượng bằng 2 phương pháp đã sử dụng cũng được minh họa trên các Hình 2 và 3.

Bảng 2. Kết quả ước lượng điện áp tại các nút

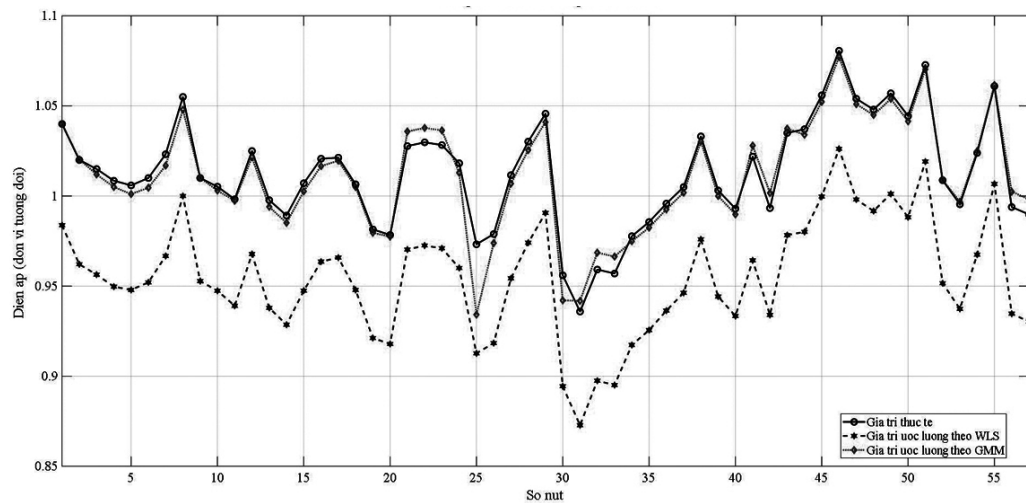
Nút	V (pu)	V-WLS (pu)	Sai số (%)	V-GMM (pu)	Sai số (%)
1	1.040	0.9838	5.4069	1.0399	0.0095
2	1.0200	0.9621	5.6760	1.0203	0.0341
3	1.0150	0.9564	5.7719	1.0120	0.2992
4	1.0085	0.9497	5.8291	1.0050	0.3506
5	1.0059	0.9479	5.7703	1.0011	0.4802
6	1.0100	0.9521	5.7310	1.0046	0.5307
7	1.0232	0.9667	5.5207	1.0169	0.6116
8	1.0550	1.0000	5.2108	1.0479	0.6703
9	1.0100	0.9528	5.6666	1.0101	0.0075
10	1.0052	0.9474	5.7455	1.0030	0.2158
11	0.9982	0.9391	5.9241	0.9974	0.0841
12	1.0250	0.9678	5.5816	1.0216	0.3342
13	0.9977	0.9379	5.9934	0.9940	0.3758
14	0.9892	0.9286	6.1234	0.9851	0.4168
15	1.0071	0.9475	5.9161	1.0026	0.4485
16	1.0207	0.9636	5.5944	1.0166	0.4065
17	1.0213	0.9658	5.4365	1.0196	0.1676
18	1.0065	0.9479	5.8213	1.0050	0.1467
19	0.9815	0.9212	6.1404	0.9796	0.1897
20	0.9784	0.9179	6.1855	0.9775	0.0958
21	1.0277	0.9703	5.5823	1.0358	0.7843
22	1.0298	0.9725	5.5650	1.0378	0.7766
23	1.0283	0.9710	5.5767	1.0364	0.7916
24	1.0182	0.9601	5.7077	1.0129	0.5168
25	0.9732	0.9127	6.2125	0.9342	4.0043
26	0.9789	0.9184	6.1832	0.9739	0.5083

27	1.0116	0.9543	5.6669	1.0069	0.4695
28	1.0302	0.9741	5.4413	1.0255	0.4569
29	1.0457	0.9906	5.2687	1.0410	0.4479
30	0.9560	0.8944	6.4479	0.9421	1.4561
31	0.9359	0.8728	6.7419	0.9418	0.6257
32	0.9592	0.8975	6.4340	0.9686	0.9786
33	0.9570	0.8951	6.4726	0.9664	0.9790
34	0.9777	0.9173	6.1756	0.9749	0.2849
35	0.9856	0.9256	6.0834	0.9825	0.3165
36	0.9958	0.9364	5.9630	0.9926	0.3217
37	1.0050	0.9463	5.8434	1.0019	0.3052
38	1.0331	0.9760	5.5247	1.0302	0.2821
39	1.0031	0.9442	5.8679	1.0000	0.3055
40	0.9930	0.9334	5.9995	0.9898	0.3256
41	1.0219	0.9643	5.6322	1.0280	0.5994
42	0.9933	0.9340	5.9661	1.0017	0.8438
43	1.0350	0.9783	5.4814	1.0374	0.2340
44	1.0371	0.9801	5.4959	1.0340	0.3016
45	1.0559	0.9997	5.3249	1.0523	0.3430
46	1.0806	1.0262	5.0355	1.0772	0.3153
47	1.0540	0.9981	5.3040	1.0510	0.2888
48	1.0480	0.9917	5.3674	1.0450	0.2848
49	1.0570	1.0012	5.2769	1.0539	0.2925
50	1.0444	0.9882	5.3819	1.0415	0.2759
51	1.0728	1.0191	5.0049	1.0703	0.2289
52	1.0088	0.9516	5.6680	1.0090	0.0214
53	0.9954	0.9374	5.8303	0.9968	0.1425
54	1.0239	0.9675	5.5129	1.0249	0.0957
55	1.0610	1.0067	5.1214	1.0616	0.0562
56	0.9939	0.9347	5.9582	1.0024	0.8588
57	0.9898	0.9303	6.0084	0.9982	0.8470

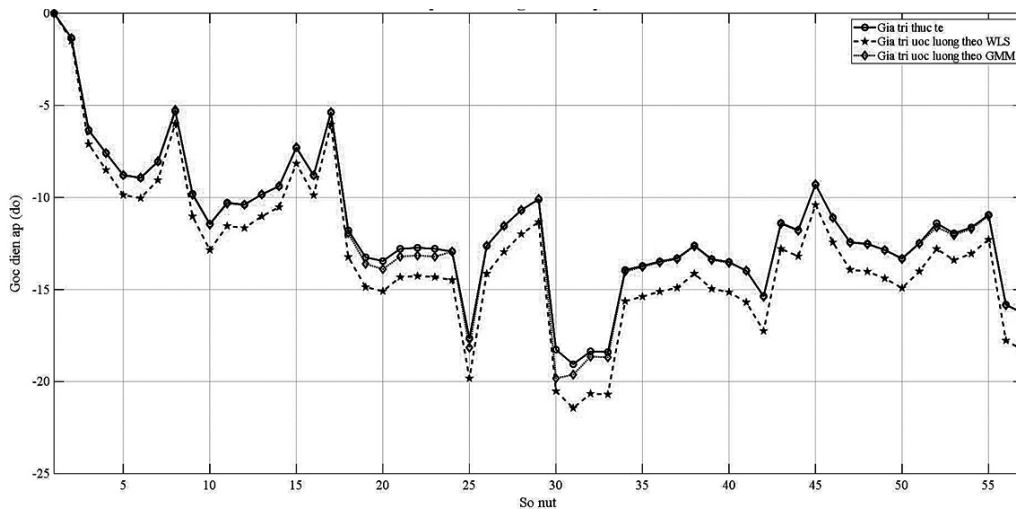
Bảng 3. Kết quả ước lượng góc pha điện áp tại các nút

Nút	theta (độ)	theta- WLS (độ)	Sai số (%)	theta -GMM (độ)	Sai số (%)
1	0	0	0	0	0
2	-1.3407	-1.4929	11.3552	-1.3500	0.6937
3	-6.3508	-7.1043	11.8644	-6.3300	0.3275
4	-7.5907	-8.5020	12.0050	-7.5900	0.0092
5	-8.7908	-9.8691	12.2661	-8.7800	0.1229
6	-8.9376	-10.0331	12.2568	-8.9200	0.1969
7	-8.0605	-9.0551	12.3398	-8.0300	0.3784
8	-5.3169	-5.9942	12.7385	-5.2400	1.4463
9	-9.8066	-11.0229	12.4027	-9.8500	0.4426
10	-11.4391	-12.8529	12.3594	-11.4700	0.2701
11	-10.2900	-11.5483	12.2280	-10.3300	0.3887

12	-10.3864	-11.6567	12.2303	-10.3900	0.0347
13	-9.8357	-11.0253	12.0951	-9.8300	0.0580
14	-9.3894	-10.5222	12.0644	-9.3800	0.1001
15	-7.3015	-8.1587	11.7403	-7.2700	0.4314
16	-8.7998	-9.8749	12.2176	-8.7900	0.1114
17	-5.3771	-6.0308	12.1563	-5.3700	0.1320
18	-11.7862	-13.2325	12.2708	-11.9300	1.2201
19	-13.2463	-14.8667	12.2327	-13.6000	2.6702
20	-13.4487	-15.0891	12.1971	-13.8900	3.2814
21	-12.7866	-14.3256	12.0361	-13.2100	3.3113
22	-12.7314	-14.2632	12.0318	-13.1500	3.2879
23	-12.7833	-14.3215	12.0332	-13.2100	3.3379
24	-12.9367	-14.4845	11.9647	-12.9400	0.0255
25	-17.6522	-19.8237	12.3015	-18.1500	2.8200
26	-12.6274	-14.1357	11.9449	-12.6200	0.0586
27	-11.5454	-12.9450	12.1227	-11.5400	0.0468
28	-10.6879	-11.9877	12.1612	-10.6800	0.0739
29	-10.0987	-11.3313	12.2059	-10.0800	0.1852
30	-18.2584	-20.5156	12.3626	-19.8200	8.5528
31	-19.0527	-21.4332	12.4942	-19.6200	2.9775
32	-18.3553	-20.6506	12.5049	-18.6400	1.5511
33	-18.3942	-20.6951	12.5087	-18.6800	1.5538
34	-13.9354	-15.6319	12.1738	-14.0200	0.6071
35	-13.7208	-15.3839	12.1207	-13.7700	0.3586
36	-13.4773	-15.1063	12.0869	-13.5200	0.3168
37	-13.3015	-14.9077	12.0755	-13.3400	0.2894
38	-12.6175	-14.1352	12.0286	-12.6500	0.2576
39	-13.3482	-14.9604	12.0780	-13.3900	0.3132
40	-13.5059	-15.1386	12.0887	-13.5500	0.3265
41	-13.9778	-15.6893	12.2444	-13.9700	0.0558
42	-15.3613	-17.2470	12.2754	-15.3900	0.1868
43	-11.3936	-12.7897	12.2530	-11.4300	0.3195
44	-11.7775	-13.1908	12.0001	-11.8000	0.1910
45	-9.2975	-10.4043	11.9045	-9.2800	0.1882
46	-11.0928	-12.4363	12.1111	-11.1000	0.0649
47	-12.4288	-13.9233	12.0241	-12.4500	0.1706
48	-12.5170	-14.0223	12.0259	-12.5400	0.1838
49	-12.8474	-14.3930	12.0305	-12.8600	0.0981
50	-13.3123	-14.9194	12.0722	-13.3400	0.2081
51	-12.4793	-14.0131	12.2908	-12.5100	0.2460
52	-11.4038	-12.7935	12.1860	-11.6100	1.8082
53	-11.9446	-13.4028	12.2082	-12.0400	0.7987
54	-11.6307	-13.0533	12.2311	-11.7000	0.5958
55	-10.9470	-12.2932	12.2975	-11.0000	0.4842
56	-15.8191	-17.7631	12.2889	-15.8500	0.1953
57	-16.2899	-18.2952	12.3101	-16.3000	0.0620



Hình 2. Kết quả so sánh độ lớn điện áp nút



Hình 3. Kết quả so sánh góc pha điện áp nút

Trên các Hình 2 và 3, đường nét liền (màu đen) để chỉ các giá trị điện áp và góc pha thực tế; các đường nét gạch (màu xanh) để chỉ các giá trị điện áp và góc pha ước lượng được từ phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số và các đường nét chấm (màu đỏ) để chỉ các giá trị điện áp và góc pha ước lượng được từ phương pháp ước lượng hợp lý cực đại tổng quát. Trên Hình 2, ta có thể thấy rõ ràng rằng các giá trị ước lượng bằng phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số chệch xa với đường giá trị thực tế, trong khi đó đường ước lượng bằng phương pháp ước lượng hợp lý cực đại tổng quát rất gần với đường giá trị thực tế. Tương tự như vậy đối với Hình 3, đường biểu diễn giá trị ước lượng

góc pha bằng phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số chệch xa so với đường biểu diễn giá trị thực tế trong khi đó đường biểu diễn giá trị ước lượng bằng phương pháp ước lượng hợp lý cực đại tổng quát rất gần với giá trị thực tế. Điều này chứng tỏ rằng phương pháp ước lượng hợp lý cực đại tổng quát thể hiện khả năng ước lượng tốt hơn so với phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số trong trường hợp này.

Ngoài ra, thông qua các Bảng 2 và 3, ta có thể thấy khi sử dụng phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số, điện áp sai khác lớn nhất 6,7419% và sai số nhỏ nhất là 5,0049%; góc pha sai khác lớn nhất 12,7385% và khi sử dụng phương pháp ước lượng hợp lý cực đại tổng

quát, điện áp sai khác lớn nhất 4,0043% và sai số nhỏ nhất là 0,0075%; góc pha sai khác lớn nhất 8,5528%. Điều này càng chứng tỏ hiệu quả ước lượng trạng thái hệ thống điện của phương pháp ước lượng hợp lý cực đại tổng quát.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu và xây dựng chương trình ước lượng trạng thái hệ thống điện sử dụng phương pháp bình ước lượng hợp lý cực đại tổng quát để ước lượng môđun và góc pha điện áp các nút. Chương trình này được tính toán và mô phỏng trên nền tảng phần mềm Matlab. Phương pháp được đề xuất trong bài báo này đã cho kết quả tốt hơn phương pháp thường được sử dụng để ước lượng trạng thái hệ thống điện đó là phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số. Trong tương lai, bài báo có thể mở rộng hướng nghiên cứu theo hướng phân tích các hàm phân phối của dữ liệu cho nhiều trường hợp nghiên cứu để có thể chỉ ra các dữ liệu xấu (outlier) và đề xuất biện pháp khắc phục các dữ liệu xấu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Đỗ Xuân Khôi. *Tính toán phân tích hệ thống điện*, Nxb Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2001.
2. T. P. Vishnu, V. Viswan, 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 (PICC), Thrissur, 2015.
3. Ali Abur, Antonio Gómez Expósito. *Power System State Estimation: Theory and Implementation*. Marcel Dekker, Inc., 2004.
4. F. Tanyi, E. Mbinkar. Real-time state estimation in the Cameroon power system. *ISRN Power Engineering*, 2013.
5. J. Zhao, G. Zhang, M. La Scala. *A two-stage robust power system state estimation method with unknown measurement noise*. IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016, (1-5).
6. T. P. Vishnu, V. Viswan, 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 (PICC), Thrissur, 2015.
7. Ali Abur, Antonio Gómez Expósito. *Power System State Estimation: Theory and Implementation*. Marcel Dekker, Inc., 2004.
8. F. R. Hampel. *Optimally bounding the gross-error-sensitivity and the influence of position in factor space*. Proceedings of the ASA statistical computing section, 1978, 59-64.
9. L. Mili, V. Phaniraj, P. J. Rousseeuw. Least median of squares estimation in electric power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1991, 6 (2), 511-523.
10. P. J. Huber. Robust regression: asymptotics, conjectures and Monte Carlo. *The Annals of Statistics*, 1973, 1 (5), 799-821.
11. L. Mili, V. Phaniraj, P. J. Rousseeuw. Robust estimation theory for bad data diagnostics in electric power systems. *Control and Dynamic Systems*, 1990, 37, 271-325.
12. R. Anand, V. Balaji. Power Flow Analysis of Simulink IEEE 57 Bus Test System Model using PSAT. *Indian Journal of Science and Technology*, 2015, 8 (23).