

ƯỚC LƯỢNG GIÁ TRỊ BIẾN TRẠNG THÁI HỆ THỐNG ĐIỆN BẰNG KẾT HỢP THUẬT TOÁN DI TRUYỀN VÀ THUẬT TOÁN TỐI ƯU BẦY ĐÀN VỚI QUÁ TRÌNH TÁCH BIẾN

POWER SYSTEM STATE ESTIMATION BY THE COMBINASION OF GENETIC ALGORITHM, PARTICLE SWARM OPTIMIZATION AND DECOUPLED VARIABLES

Kiều Thị Thanh Hoa, Trần Thanh Sơn

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 23/01/2024, Ngày chấp nhận đăng: 08/04/2024, Phản biện: PGS.TS. Nguyễn Minh Ý

Tóm tắt:

Công cụ ước lượng trạng thái là một phần không thể thiếu trong quá trình thực hiện giám sát và điều khiển hệ thống điện, là một phần quan trọng của quá trình thực hiện lưới điện thông minh. Trong đó, giá trị ước lượng của biến trạng thái giúp người vận hành đưa ra các quyết định điều khiển khi thông số vượt giới hạn cho phép nhằm mục tiêu đảm bảo hệ thống vận hành an toàn và tin cậy. Trong bài báo này, việc kết hợp giữa thuật toán di truyền, thuật toán tối ưu bầy đàn và kỹ thuật tách biến được áp dụng để giải quyết bài toán ước lượng giá trị biến trạng thái đối với lưới điện truyền tải. Quá trình ước lượng môđun điện áp và góc pha điện áp được thực hiện lần lượt thông qua thuật toán tối ưu bầy đàn và thuật toán di truyền. Phương pháp đề xuất được kiểm chứng bằng các tính toán trên các lưới điện mẫu IEEE 14, 30 và 118 nút. Giá trị ước lượng điện áp tại các nút của các lưới điện rất gần với các giá trị tham chiếu cho thấy tính khả thi của phương pháp đề xuất.

Từ khóa:

Ước lượng trạng thái hệ thống điện, thuật toán di truyền, thuật toán tối ưu bầy đàn, tách biến.

Abstract:

State estimation tools is an indispensable part in the process of implementing power system monitoring and control, and is an important part of the smart grid implementation process. In particular, the estimated value of the state variable helps the operator make control decisions when parameters exceed allowable limits with the goal of ensuring safe and reliable system operation. In this paper, the combination of genetic algorithm, swarm optimization algorithm and variable separation technique is applied to solve the problem of estimating state variable values for power transmission grids. The process of estimating the voltage module and voltage phase angle is performed through the swarm optimization algorithm and the genetic algorithm, respectively. The proposed method is validated by calculations on sample IEEE 14, 30 and 118 node power grids. The estimated results of voltage magnitude and phase angle are approximated to the reference values.

Keywords:

Power system state estimation, genetic algorithm, particle swarm optimization, decoupled variable.

1. GIỚI THIỆU

Từ hệ thống giám sát và thu thập dữ liệu hoặc từ các thiết bị đo đồng bộ pha đặt trên lưới điện, dữ liệu đo sẽ được gửi về trung tâm điều khiển, làm dữ liệu đầu vào cho các công cụ hỗ trợ công việc vận hành hệ thống điện. Tuy nhiên, trên hệ thống điện, số liệu từ các thiết bị đo này thường không có đầy đủ cho tất cả các nút và có thể có sai số (do lỗi trong thiết bị đo, do lỗi đo từ xa, do nhiễu) hoặc có lỗi đường truyền, khiến người vận hành hệ thống không xác định được các thông tin liên quan của một số khu vực của hệ thống điện. Do đó các thuật toán ước lượng trạng thái hệ thống đã được các tác giả trong các bài báo [1], [2], [3] nghiên cứu phát triển.

Thông số đầu vào của bài toán ước lượng trạng thái hệ thống điện thường gồm dữ liệu kết nối của hệ thống, các thông số đường dây, máy biến áp, thiết bị bù và các giá trị đo như biên độ điện áp, góc pha điện áp, công suất tác dụng, công suất phản kháng, dòng điện nhánh. Thông số đầu ra của bài toán là kết quả ước lượng các giá trị môđun điện áp và góc pha điện áp tại các nút. Dựa trên các kết quả ước lượng đó, người vận hành có thể đưa ra các quyết định điều khiển khi thông số vượt giới hạn cho phép hoặc ở giá trị “tới hạn”, nhằm mục tiêu đảm bảo hệ thống vận hành an toàn và tin cậy.

Để giải quyết bài toán này, các thuật toán tìm kiếm tối ưu heuristic được áp dụng như thuật toán tìm kiếm hấp dẫn (Gravitational search algorithm) [4], thuật

toán tối ưu hóa đàn cá nhân tạo (Artificial Fish Swarm Optimization Algorithm - AFSSOA) [5], thuật toán lai dùng Cellular Computational Network [6], thuật toán tối ưu bầy đàn (Particle Swarm Optimization - PSO) [7], [8], thuật toán di truyền (Genetic Algorithm - GA) [9], [10], [11]. Ưu điểm của các thuật toán này là khả năng tìm giá trị tối ưu toàn cục khi làm việc với thông tin của hàm mục tiêu, hàm ràng buộc, và thuật toán không quá phức tạp. Tuy nhiên, đa phần các kết quả được công bố khi thực hiện mô phỏng đối với các lưới điện nhỏ như lưới không nhiều hơn 6 nút [5], [9], [10] hoặc lưới 14 và 30 nút [4], hoặc lưới 68 nút [6].

Thuật toán PSO và GA có chung đặc điểm là quá trình tìm kiếm được thực hiện qua các bước và dựa trên thông tin của một tập các cá thể (tập các phương án nghiệm của bài toán). Vì vậy, có nhiều nghiên cứu thực hiện việc kết hợp hai thuật toán này để giúp quá trình tìm kiếm nghiệm tối ưu được tốt hơn. Trong [12], các cá thể được sắp xếp theo giá trị hàm mục tiêu, giữ lại một nửa số cá thể tốt, sau đó đưa qua thuật toán PSO và GA. Tập cá thể ở bước tiếp theo sẽ có một nửa số cá thể được tạo thành qua thuật toán PSO. Các cá thể sau khi qua PSO cũng sẽ được đưa qua GA để tạo một nửa tập cá thể còn lại. Trong [13], thuật toán PSO được sử dụng cho việc tìm công suất của nguồn phân tán và GA được sử dụng để tìm vị trí của nguồn phân tán. Trong [14], các cá thể sẽ được lựa chọn ngẫu nhiên và được biến đổi thông qua GA hoặc PSO tùy theo điều kiện đặt của thuật toán. Trong [15],

tác giả sử dụng kết hợp phép chọn lọc của GA vào thuật toán PSO trước khi tiến hành cập nhật vị trí các cá thể.

Với các bài báo sử dụng thuật toán PSO ([7]) và GA ([9], [10], [16]) các cá thể gồm cả giá trị môđun và góc pha điện áp. Với PSO, sau mỗi bước lặp, các giá trị môđun điện áp và góc pha điện áp đều có thay đổi tương ứng với giá trị vận tốc được tính toán. Với thuật toán GA, qua quá trình lai ghép, giá trị môđun điện áp và góc pha điện áp cũng thường được biến đổi đồng thời. Khi xét bài toán với lưới điện truyền tải, là lưới điện mà đường dây có tỉ lệ giữa điện kháng X và điện trở R khá cao thì có thể xét đến mối quan hệ: sự thay đổi về giá trị môđun điện áp ảnh hưởng nhiều đến công suất phản kháng, trong khi sự thay đổi của góc pha điện áp ảnh hưởng nhiều đến thay đổi công suất tác dụng [17]. Vì vậy, khi các thuật toán thực hiện đồng thời biến đổi cả hai giá trị môđun điện áp và góc pha điện áp trong quá trình tìm kiếm nghiệm có thể khiến bỏ qua các trường hợp nghiệm tương ứng với giá trị môđun điện áp hoặc góc pha điện áp tốt.

Các phân tích trên cho thấy thuật toán GA và PSO với việc biến đổi đồng thời các giá trị trong cá thể đã được áp dụng để ước lượng trạng thái hệ thống điện. Bài báo [11] áp dụng GA và quá trình ước lượng tách rời. Bên cạnh đó, việc kết hợp giữa GA và PSO đã được áp dụng để giải quyết các bài toán như thiết kế mạng hồi quy (recurrent network design) [12], tìm vị trí và công suất tối ưu của nguồn phân tán ở lưới điện phân phối (optimal DG

location and sizing in distribution systems) [13], giải quyết các bài toán mẫu (benchmark problem) [14], ước lượng trạng thái lưới phân phối [15]. Tuy nhiên, chưa có các công bố chi tiết về việc kết hợp kết hợp GA-PSO với kỹ thuật tách biến để ước lượng giá trị biến trạng thái đối với lưới điện truyền tải. Từ đó, bài báo này đề xuất thuật toán ước lượng giá trị biến trạng thái hệ thống điện theo vòng lặp bằng GA-PSO. Cụ thể, khi ước lượng giá trị góc pha, giá trị môđun điện áp được giữ cố định bằng giá trị tốt nhất ở bước trước và ngược lại.

2. MÔ HÌNH BÀI TOÁN ƯỚC LƯỢNG TRẠNG THÁI HỆ THỐNG ĐIỆN

Thông số đầu vào của bài toán ước lượng trạng thái hệ thống điện là các dữ liệu kết nối của hệ thống, các thông số đường dây, máy biến áp, các giá trị đo của biên độ điện áp, công suất tác dụng, công suất phản kháng,... Xét một hệ gồm tập hợp các phép đo z_i với $i = 1..m$ có sai số và phương sai lần lượt là e_i , σ_i^2 .

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:

$$z = h(x) + e \quad (1)$$

Các biến x_i bị ràng buộc bởi điều kiện sau:

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \quad (2)$$

Trong đó:

m : số phép đo;

x : vector trạng thái của hệ thống, gồm giá trị biên độ điện áp và góc pha điện áp tại các nút;

e : vector sai số đo;

$h_i(x)$: hàm tương ứng với loại phép đo của z_i , có thể là hàm của dòng công suất tác dụng, dòng công suất phản kháng, dòng điện nhánh, điện áp, hoặc góc pha;

$x_i^{\min}$ và $x_i^{\max}$: các giá trị giới hạn của biến trạng thái x_i .

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 [18]:

$$J(x) = w_i^2 (z_i - h_i(x))^2 = \sum_{i=1}^m \frac{1}{\sigma_i^2} e_i^2 \quad (3)$$

Trong đó : $w_i = \frac{1}{\sigma_i}$, với σ_i là độ lệch chuẩn của phép đo thứ i , biểu thị độ chính xác dự kiến của thiết bị đo.

Với các bài toán có ràng buộc có thể thêm hàm phạt $P(x)$ vào hàm mục tiêu $J(x)$ để đưa bài toán thành không ràng buộc. Khi đó, hàm mục tiêu của bài toán trở thành:

$$F(x) = J(x) + P(x) \quad (4)$$

$$P(x) = \lambda \sum_{i=1}^n \{\max(0, x_i - x_i^{\max})\}^2 + \lambda \sum_{i=1}^n \{\max(0, x_i^{\min} - x_i)\}^2 \quad (5)$$

Với n là số biến trạng thái và λ là hệ số phạt. Vì hàm mục tiêu của bài toán là tìm giá trị cực tiểu nên λ được chọn có giá trị dương đủ lớn để nếu cá thể có biến trạng thái bị vi phạm giới hạn thì cá thể đó sẽ có

giá trị hàm mục tiêu được cộng thêm một giá trị khá lớn tương ứng với giá trị của hàm phạt. Khi đó cá thể sẽ có xác suất được lựa chọn vào quần thể tiếp theo rất nhỏ, và bị loại khỏi tập cá thể tốt.

3. THUẬT TOÁN

Để có thể áp dụng thuật toán di truyền và thuật toán tối ưu bầy đàn vào giải quyết bài toán ước lượng trạng thái hệ thống điện, ta sẽ làm rõ cụ thể một số thuật ngữ được sử dụng trong thuật toán như: cá thể, vị trí cá thể, vận tốc của cá thể, quần thể.

- Cá thể ở đây được hiểu là một nghiệm có thể của bài toán. Một cá thể sẽ bao gồm các giá trị của biến trạng thái, cụ thể là các giá trị môđun điện áp và/hoặc góc pha điện áp tại các nút.
- Vị trí cá thể được xác định bởi giá trị của các biến trạng thái.
- Vận tốc của cá thể được hiểu là giá trị thêm vào giá trị của biến trạng thái ở cá thể bước trước để tạo ra cá thể ở bước tiếp theo, giá trị này sẽ giúp mở rộng không gian tìm kiếm và tăng khả năng tìm được giá trị tối ưu toàn cục.
- Quần thể ở đây được hiểu là tập hợp bao gồm nhiều cá thể.

3.1. Thuật toán di truyền

Trong GA, việc tìm kiếm cá thể tối ưu được bắt đầu với một quần thể được tạo theo điều kiện ban đầu. Ở mỗi bước, các cá thể trong quần thể hiện tại được đánh giá thông qua giá trị hàm thích nghi (hàm mục tiêu), cá thể nào phát triển hơn, thích

ứng hơn với môi trường sẽ tồn tại và ngược lại sẽ bị loại bỏ. Trong bước tiếp theo, quần thể mới sẽ được tạo bao gồm các cá thể tốt được giữ lại từ quần thể ở bước trước và các cá thể được tạo mới thông qua các hàm chọn lọc, hàm lai ghép và hàm đột biến [19], [20], [21], [22]. Trong bài báo này, các hàm của GA được sử dụng là chọn lọc theo bánh xe roulette, lai ghép heuristic, đột biến ngẫu nhiên.

3.1.1. Chọn lọc theo bánh xe roulette

Với phép chọn lọc này, ta coi tổng xác suất lựa chọn các cá thể của quần thể gồm N cá thể bằng 1. Gọi $F(i)$ là giá trị hàm mục tiêu của cá thể i , khi đó mỗi cá thể i sẽ tương ứng với một xác suất lựa chọn $P(i)$ được tính theo công thức :

$$P(i) = \frac{F(i)}{\sum_{i=1}^N F(i)} \quad (6)$$

Xác suất tích lũy (cumulative probability) của cá thể i được tính theo công thức:

$$q(i) = \sum_{j=1}^i P(j) \quad (7)$$

Sau khi tính xác suất tích lũy, một giá trị r ngẫu nhiên được tạo ra trong khoảng $(0,1)$ và so sánh với các giá trị xác suất tích lũy q_i .

Nếu $r < q_1$ thì cá thể $i = 1$ sẽ được chọn vào tập bố mẹ.

Nếu $r > q_1$ thì sẽ chọn cá thể i có giá trị xác suất tích lũy thỏa mãn điều kiện:

$$q_{i-1} < r < q_i$$

Quá trình này sẽ được lặp cho đến khi

chọn được số cá thể bố mẹ theo yêu cầu.

3.1.2. Lai ghép heuristics

Phép lai ghép heuristic sử dụng giá trị hàm mục tiêu của cá thể bố mẹ để quyết định hướng tìm kiếm. Gọi $F(B)$ và $F(M)$ là giá trị hàm mục tiêu của cá thể bố và cá thể mẹ, phép lai ghép này chỉ tạo ra một cá thể con theo công thức sau:

Nếu $F(B) > F(M)$ thì

$$C = \beta \cdot (B - M) + B \quad (8)$$

Nếu $F(B) < F(M)$ thì

$$C = \beta \cdot (M - B) + M \quad (9)$$

Với β được tạo ngẫu nhiên trong khoảng $(0, 1)$ cho từng biến trạng thái

3.1.3. Đột biến

Phép đột biến được thực hiện như sau:

- Chọn tỉ lệ đột biến.
- Chọn ngẫu nhiên vị trí đột biến theo tỉ lệ đột biến đã chọn.
- Thực hiện đột biến tại vị trí đã chọn: giá trị của biến trạng thái tại vị trí được chọn sẽ được thay thế bằng một giá trị ngẫu nhiên nằm trong khoảng giới hạn.

3.2. Thuật toán tối ưu bầy đàn

Theo phương pháp PSO, một nhóm cá thể được khởi tạo ngẫu nhiên và sau đó nghiệm tối ưu được tìm thấy thông qua việc cập nhật các thể hệ. Trong mỗi thế hệ, mỗi cá thể được kết nối và có thể lấy thông tin từ mọi cá thể khác trong nhóm cá thể. Bên cạnh đó, các cá thể được giả sử là có khả năng ghi nhớ vị trí tốt nhất mà nó từng đạt được, đồng thời có khả

năng biết và ghi nhớ vị trí tốt nhất của quần thể.

Trong bài báo, vận tốc của cá thể được tính theo công thức (10) [23] và vị trí cá thể được cập nhật theo công thức (11):

$$V_{id} = \chi \cdot (V_{id} + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{id} - x_{id}) + c_2 \cdot r_2 \cdot (p_{gd} - x_{id})) \quad (10)$$

$$x_{id} = x_{id} + V_{id} \quad (11)$$

Trong đó:

$$\chi = 0,729; c_1 = c_2 = 2,05;$$

r_1 và r_2 : giá trị ngẫu nhiên nằm trong khoảng (0,1);

p_{gd} : vị trí tốt nhất của tập cá thể;

p_{id} : vị trí tốt nhất của cá thể i .

3.3. Thuật toán GA-PSO tách biến

Trong bài báo này, giá trị biến trạng thái được thực hiện bởi thuật toán kết hợp giữa GA, PSO và quá trình tách biến. Khi đó, lưới điện N nút sẽ có hai dạng cá thể, một là các cá thể x_1 gồm $(N-1)$ gen tương ứng với $(N-1)$ giá trị góc pha điện áp; một là các cá thể x_2 gồm N gen tương ứng với N giá trị môđun điện áp. Việc ước lượng các giá trị này được tiến hành tách riêng và thực hiện theo bước lặp. Thuật toán được mô tả như sơ đồ khối ở Hình 1 và gồm các bước như sau:

- Bước 1: Nhập thông số dữ liệu đầu vào của bài toán ước lượng giá trị biến trạng thái gồm dữ liệu về kết nối lưới điện, dữ liệu về thông số của đường dây, máy biến áp, dữ liệu về thông số đo (giá trị đo, loại phép đo, vị trí đo).
- Bước 2: Xác định hàm mục tiêu, xác

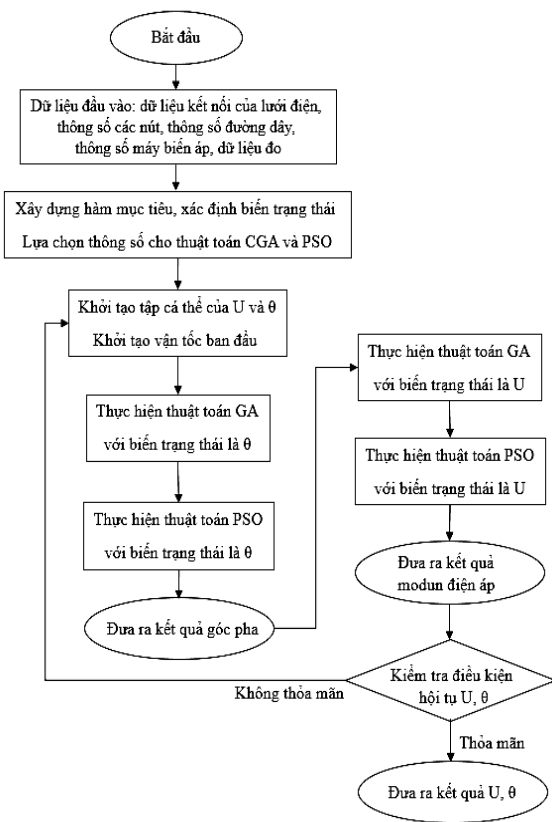
định cách thành lập cá thể; xác định các thông số của thuật toán. Đối với thuật toán CGA, xác định tỉ lệ chọn lọc, tỉ lệ lai ghép, tỉ lệ đột biến, tỉ lệ cá thể được giữ lại. Đối với thuật toán PSO xác định cách xác định vận tốc, cách cập nhật cá thể.

- Bước 3: Khởi tạo tập cá thể x_1 tương ứng với giá trị của góc pha điện áp và tập cá thể x_2 tương ứng với giá trị của môđun điện áp. Khởi tạo vận tốc ban đầu đối với thuật toán PSO. Với vòng lặp đầu tiên, việc khởi tạo được thực hiện với số lượng cá thể tương ứng của từng thuật toán. Với các vòng lặp tiếp theo, chỉ tạo mới 90% số cá thể, 10% số cá thể được đưa sang từ bước 10.

- Bước 4: Thực hiện thuật toán di truyền với biến trạng thái là góc pha điện áp: Tính giá trị hàm mục tiêu ứng với từng cá thể góc pha điện áp. Giá trị này được tính theo giá trị môđun điện áp tốt nhất ở bước lặp trước và giá trị góc pha điện áp của cá thể. Sau đó, một số cá thể tốt nhất của tập x_1 được chọn giữ lại để đưa sang tập cá thể mới. Tiếp theo, quá trình chọn lọc, lai ghép, đột biến được thực hiện để tạo quần thể mới. Kiểm tra điều kiện dừng lặp theo thuật toán GA và đưa một số các cá thể tốt sang bước 5.

- Bước 5: Thực hiện thuật toán tối ưu bầy đàn với biến trạng thái là góc pha điện áp: tính giá trị hàm mục tiêu của các cá thể; sau đó, thực hiện quá trình tìm giá trị tốt nhất của cá thể p_{id} và tốt nhất của tập cá thể p_{gd} , tính toán giá trị vận tốc của cá thể và cập nhật vị trí của các cá thể để tạo quần thể mới. Kiểm tra điều kiện dừng lặp theo thuật toán PSO và đưa ra một số các cá thể tốt.

- Bước 6: Đưa ra cá thể tốt nhất từ các cá thể tốt tìm được sau bước 5, gồm các giá trị góc pha điện áp, các giá trị này được dùng để tính giá trị hàm mục tiêu của tập cá thể x_2 .
- Bước 7: Thực hiện tương tự bước 4 với cá thể là các giá trị môđun điện áp.
- Bước 8: Thực hiện tương tự bước 5 với cá thể là các giá trị môđun điện áp.



Hình 1. Sơ đồ khởi thuật toán

- Bước 9: Thực hiện tương tự bước 6 với cá thể là các giá trị môđun điện áp.
- Bước 10: Kiểm tra điều kiện hội tụ của bài toán, có thể là khi đạt số bước lặp lớn nhất. Nếu thỏa mãn, dừng lặp và đưa kết quả. Nếu không thỏa mãn, quay lại bước 3. Một số cá thể tốt nhất của tập x_1 và x_2

sẽ được giữ và đưa sang bước 3. Trong bài báo, các tác giả lựa chọn đưa 10% cá thể tốt nhất sang bước 3 và tiếp tục quá trình lặp.

Trong bài báo, thuật toán được áp dụng mô phỏng cho lưới điện với dữ liệu đo từ PMU, các dữ liệu này được đồng bộ về mặt thời gian và tính chính xác cũng cao hơn so với việc sử dụng các thiết bị đo thông thường, vì vậy khi thực hiện thuật toán, các giá trị đo môđun điện áp và góc pha điện áp từ PMU sẽ được đưa thông tin vào trong bước 3 của thuật toán. Cụ thể như sau:

- Tại nút có đo môđun điện áp và góc pha điện áp: giá trị này sẽ được gán cho nút tương ứng trong bước 3.
- Giới hạn tìm kiếm của môđun điện áp và góc pha điện áp tại nút có thông số đo sẽ được giới hạn lại và việc tạo giá trị trong bước 3 của các nút có giá trị đo từ PMU có thể được tạo theo giới hạn mới này. Cụ thể, ta có thể xác định giới hạn mới như trong công thức (12).

$$\begin{aligned} x_{i,\text{new}}^{\min} &= \max(x_i^{\min}, z_i - a) \\ x_{i,\text{new}}^{\max} &= \min(x_i^{\max}, z_i + a) \end{aligned} \quad (12)$$

Trong đó $x_{i,\text{new}}^{\min}$, $x_{i,\text{new}}^{\max}$ là giới hạn mới của biến trạng thái x_i , z_i là giá trị đo của biến trạng thái x_i , a là giá trị phụ thuộc vào sai số của phép đo z_i . Nếu phép đo có sai số 5%, thì $a = 5\% \cdot z_i$.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Thuật toán kết hợp GA-PSO và quá trình

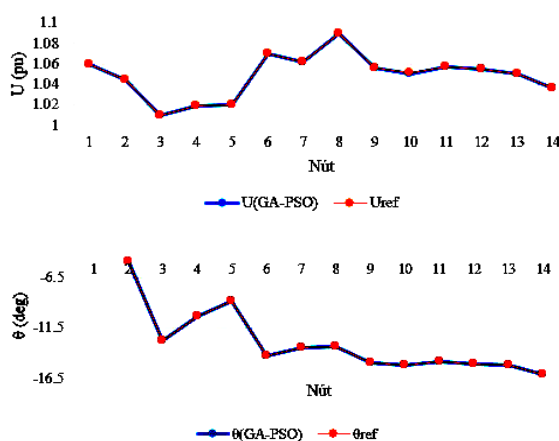
ước lượng tách biến như nêu trong mục 3.3 được áp dụng mô phỏng cho lưới điện IEEE 14 nút, IEEE 30 nút và IEEE 118 nút, xét đến trường hợp khi dùng dữ liệu đo từ PMU. Trong bài báo này, giả sử dữ liệu đo được lấy từ các PMU đặt ở các vị trí được đề xuất trong [24] tương ứng với từng lưới điện. Ta có bảng dữ liệu của vị trí đặt thiết bị đo, loại phép đo và tổng số phép đo của các lưới điện được thể hiện như trong Bảng 1. Các thông số đo từ PMU sẽ bao gồm các giá trị modun điện áp nút: U_i , góc pha điện áp nút θ_i , dòng điện nhánh I_{ij} và góc pha dòng điện nhánh φ_{ij} . Tổng số phép đo đầu vào được sử dụng cho các lưới điện 14, 30, 118 nút lần lượt là 38, 104 và 328.

Kết quả ước lượng U - θ của ba lưới điện được so sánh với giá trị tham chiếu và thể hiện trên các hình từ Hình 2 đến Hình 4. Kết quả thể hiện trên các hình cho thấy giá trị ước lượng từ thuật toán rất gần

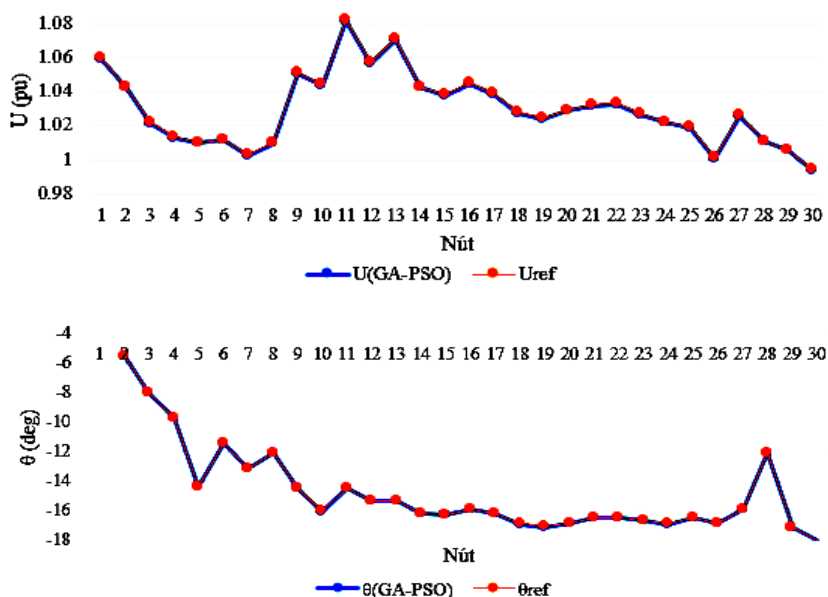
hoặc bằng với các giá trị tham chiếu.

Bảng 1. Vị trí PMU và tổng số phép đo

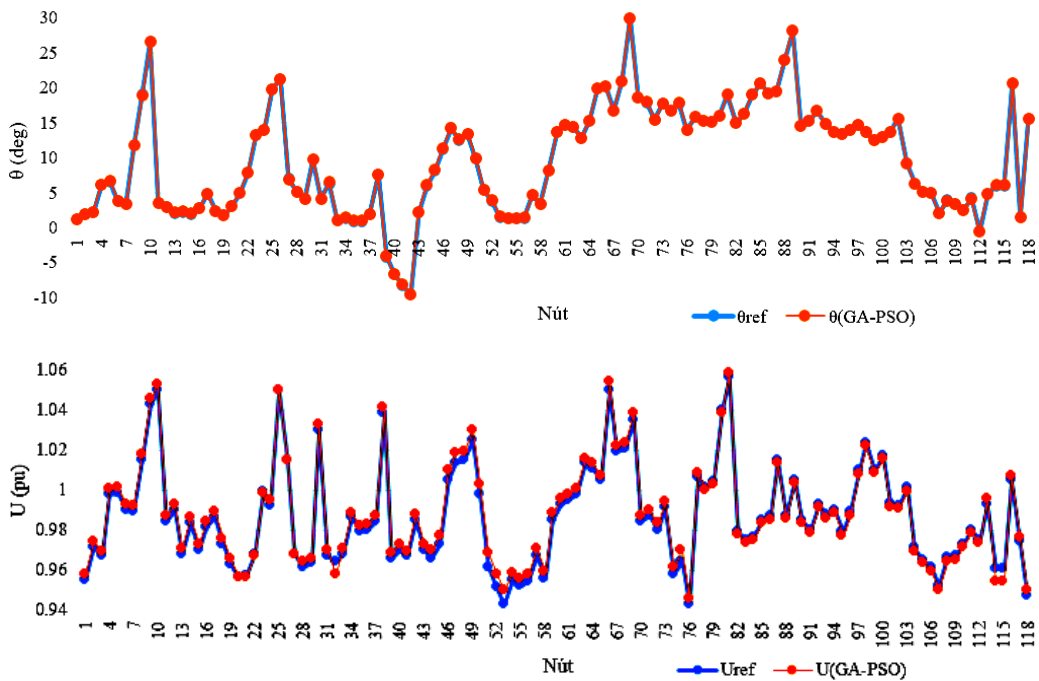
Lưới điện	Vị trí PMU
14 nút	2, 6, 7, 9
30 nút	2, 4, 6, 9, 10, 12, 15, 18, 25, 27
118 nút	3, 5, 9, 12, 15, 17, 21, 25, 29, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 64, 68, 70, 71, 76, 79, 85, 86, 89, 92, 96, 100, 105, 110, 114



Hình 2. Kết quả ước lượng U , θ khi dùng dữ liệu đo từ PMU của lưới điện 14 nút



Hình 3. Kết quả ước lượng U , θ khi dùng dữ liệu đo từ PMU của lưới điện 30 nút



Hình 4. Kết quả ước lượng U , θ khi dùng dữ liệu đo từ PMU của lưới điện 118 nút

Sai số của kết quả ước lượng được thể hiện trong Bảng 2. Giá trị ước lượng modun điện áp và góc pha điện áp ở lưới điện 14 nút có sai số lớn nhất là 0,035%. Sai số này ở lưới điện 30 nút là 0,573% và ở lưới điện 118 nút là 10,521%. Giá trị ước lượng modun điện áp ở cả 3 lưới điện đều có sai số nhỏ hơn 1%. Với giá trị ước lượng góc pha của lưới 118 nút, có 2 nút có sai số lớn hơn 5%, các kết quả này được thể hiện chi tiết trong Bảng 3. Nhìn vào bảng kết quả ta thấy rằng các nút này có giá trị ước lượng cũng rất gần với giá trị tham chiếu.

Bảng 2. Sai số lớn nhất của kết quả ước lượng trạng thái

Lưới điện	% SS U	%SS θ
14 nút	0,014	0,035
30 nút	0,116	0,573
118 nút	0,751	10,521

Bảng 3. Giá trị ước lượng góc pha điện áp tại các nút có sai số lớn hơn 5%

Nút	53	112
Giá trị tham chiếu (deg)	1,4553	-0,5378
Giá trị ước lượng (deg)	1,6084	-0,5712

Quá trình mô phỏng được thực hiện với máy tính Dell Inspiron, Intel Core i7-1165G7, 8GB RAM. Khi so sánh với thời gian mô phỏng của một số công bố trước đây như trong các bài báo [7], [25], [4], [26] thì thuật toán sử dụng trong bài báo này cần thời gian lâu hơn.

5. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày nghiên cứu về ước lượng giá trị các biến trạng thái của hệ thống điện khi sử dụng thông tin từ các thiết bị đo PMU trên lưới. Để nghiên cứu

bài toán này, thuật toán di truyền và thuật toán tối ưu bầy đàn được sử dụng kết hợp với quá trình tách biến. Kết quả mô phỏng được thực hiện với các lưới điện 14, 30 và 118 nút cho thấy thuật toán là thích hợp

để áp dụng giải quyết bài toán với lưới điện lớn. Bên cạnh đó, các nghiên cứu về việc giảm thời gian tính toán của thuật toán cũng cần được thực hiện trong hướng nghiên cứu tiếp theo trong tương lai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] F.C. Schweppe and J. Wildes, "Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 1, pp. 120–125, Jan. 1970, doi: 10.1109/TPAS.1970.292678.
- [2] F.C. Schweppe and D.B. Rom, "Power System Static-State Estimation, Part II: Approximate Model," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 1, pp. 125–130, Jan. 1970, doi: 10.1109/TPAS.1970.292679.
- [3] F.C. Schweppe, "Power System Static-State Estimation, Part III: Implementation," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 1, pp. 130–135, Jan. 1970, doi: 10.1109/TPAS.1970.292680.
- [4] B. Vedik and A. K. Chandel, "Power system state estimation using gravitational search algorithm," in *International Conference on Computer and Computational Sciences (ICCCS)*, Greater Noida, India, Jan. 2015, pp. 32–38. doi: 10.1109/ICCCS.2015.7361318.
- [5] S.R. Salkuti, "Artificial fish swarm optimization algorithm for power system state estimation," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 18, no. 3, Art. no. 3, 2020, doi: 10.11591/ijeecs.v18.i3.pp1130-1137.
- [6] Md. A. Rahman and G. K. Venayagamoorthy, "A hybrid method for power system state estimation using Cellular Computational Network," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 64, pp. 140–151, 2017, doi: 10.1016/j.engappai.2017.05.018.
- [7] D.H. Tungadio, J.A. Jordaan, and M.W. Siti, "Power system state estimation solution using modified models of PSO algorithm: Comparative study," *Measurement*, vol. 92, pp. 508–523, 2016, doi: 10.1016/j.measurement.2016.06.052.
- [8] M.A. Hussein and A.J. Sultan, "Enhancement of State Estimation Power System Based Hybrid Algorithm," in *1st Annual International Conference on Information and Science (AiCIS)*, Fallujah, Iraq, Nov. 2018, pp. 164–169. doi: 10.1109/AiCIS.2018.00040.
- [9] T.Q.D. Khoa, P.T.T. Binh, and T.V. Khoa, "Hopfield network and parallel genetic algorithm for solving state estimate in power systems," in *International Conference on Power System Technology. PowerCon 2004*, Singapore, 2004, pp. 845–849 Vol.1. doi: 10.1109/ICPST.2004.1460111.
- [10] A.A. Hossam-Eldin, E.N. Abdallah, and M.S. El-Nozahy, "A Modified Genetic Based Technique for Solving the Power System State Estimation Problem," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 3, no. 7, pp. 1438–1447, 2009, doi: doi.org/10.5281/zenodo.1074922.
- [11] T.-S. Tran, T.-T.-H. Kieu, and D.-T. Le, "Decoupling of voltage magnitude and phase in genetic algorithms for smart transmission network state estimation," *Frontiers in Energy Research*, vol. 11, 2023, Accessed: Jan. 14, 2024. [Online]. Available:

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2023.1204072>

- [12] C.-F. Juang, "A hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization for recurrent network design," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 34, no. 2, pp. 997–1006, Apr. 2004, doi: 10.1109/TSMCB.2003.818557.
- [13] M.H. Moradi and M. Abedini, "A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 66–74, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2011.08.023.
- [14] M. Andalib Sahnehsaraei, M. J. Mahmoodabadi, M. Taherkhorsandi, K. K. Castillo-Villar, and S. M. Mortazavi Yazdi, "A Hybrid Global Optimization Algorithm: Particle Swarm Optimization in Association with a Genetic Algorithm," in *Complex System Modelling and Control Through Intelligent Soft Computations*, Q. Zhu and A. T. Azar, Eds., in Studies in Fuzziness and Soft Computing, Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 45–86. doi: 10.1007/978-3-319-12883-2_2.
- [15] S. Naka, T. Genji, T. Yura, and Y. Fukuyama, "Practical distribution state estimation using hybrid particle swarm optimization," in *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)*, Jan. 2001, pp. 815–820 vol.2. doi: 10.1109/PESW.2001.916969.
- [16] T.S. Tran and T.T.H. Kieu, "Choice of Selection Methods in Genetic Algorithms for Power System State Estimation," in *Advances in Engineering Research and Application*, K.-U. Sattler, D.C. Nguyen, N.P. Vu, B.T. Long, and H. Puta, Eds., in Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 178. Springer, Cham, 2021, pp. 223–231. doi: 10.1007/978-3-030-64719-3_26.
- [17] H. Saadat, *Power system analysis*. New York, USA: McGraw Hill, 1999.
- [18] A. Abur and A.G. Expósito, *Power System State Estimation: Theory and Implementation*. New York, USA: Marcel Dekker, 2004.
- [19] Randy L. Haupt and Sue Ellen Haupt, *Practical Genetic Algorithms*, 2nd ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2004.
- [20] T. Baeck, D.B. Fogel, and Z. Michalewicz, *Evolutionary Computation 1: Basic Algorithms and Operators*. New York, USA: CRC Press, 2000.
- [21] A.H. Wright, "Genetic Algorithms for Real Parameter Optimization," in *Foundations of Genetic Algorithms*, vol. 1, G.J.E. Rawlins, Ed., Elsevier, 1991, pp. 205–218. doi: 10.1016/B978-0-08-050684-5.50016-1.
- [22] M. Zbigniew, *Genetic algorithms+ data structures= evolution programs*, 3rd, revised and extended ed. New York, USA: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996.
- [23] M. Clerc and J. Kennedy, "The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 1, pp. 58–73, Feb. 2002, doi: 10.1109/4235.985692.
- [24] T.-S. Tran and T.-T.-H. Kieu, "A New Technique of Genetic Algorithm for Optimal Placement of Phasor Measurement Units in Power System Observability," *GMSARN International Journal*, vol. 17, pp. 420–431, 2023.
- [25] T. Jin and X. Shen, "A Mixed WLS Power System State Estimation Method Integrating a Wide-Area Measurement System and SCADA Technology," *Energies*, vol. 11, no. 2, Art. no. 2, 2018, doi: 10.3390/en11020408.

- [26] D. Ni, W. Zhang, B. Yu, and W. Gong, "A new algorithm for power system state estimation with PMU measurements," in *International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC)*, Jilin, China, 2011, pp. 114–117. doi: 10.1109/MEC.2011.6025413.

Giới thiệu tác giả:



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. Hiện nay tác giả là giảng viên Trường Đại học Điện lực.

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



Tác giả Trần Thanh Sơn tốt nghiệp đại học ngành hệ thống điện tại Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2004; nhận bằng Thạc sĩ ngành kỹ thuật điện tại Đại học Bách khoa Grenoble - Cộng hoà Pháp năm 2005, bằng Tiến sĩ ngành kỹ thuật điện tại Đại học Joseph Fourier - Cộng hoà Pháp năm 2009. Hiện nay tác giả là Trưởng Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực.

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.

