

ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN DI TRUYỀN NHỊ PHÂN ĐỂ TÌM VỊ TRÍ ĐẶT TỐI ƯU THIẾT BỊ ĐO ĐẠI LƯỢNG PHA TRÊN LƯỚI TRUYỀN TẢI VIỆT NAM

APPLICATION OF BINARY GENETIC ALGORITHM FOR OPTIMAL PHASOR MEASUREMENT UNIT PLACEMENT ON VIETNAM TRANSMISSION SYSTEM

Trần Thanh Sơn*, Kiều Thị Thanh Hoa

Trường Đại học Điện lực, Hà Nội, Việt Nam¹

*Tác giả liên hệ: sontt@epu.edu.vn

(Nhận bài: 17/5/2022; Chấp nhận đăng: 10/8/2022)

Tóm tắt - Công việc vận hành các hệ thống điện hiện nay được hỗ trợ rất nhiều nhờ các phần mềm quản lý, trong đó, thông số quan trọng đầu vào chính là dữ liệu đo đạc từ các vị trí đo trên hệ thống. Hiện nay, các thiết bị đo đồng bộ pha (PMU) được sử dụng nhiều vì tính đồng bộ của dữ liệu về mặt thời gian, giúp nâng cao độ tin cậy của các đánh giá vận hành hệ thống. Việc thực hiện bài toán tìm vị trí tối ưu đặt thiết bị PMU là cần thiết, giúp đưa ra số lượng thiết bị cần dùng ít nhất và các vị trí đặt tối ưu nhằm đảm bảo quan sát được toàn bộ hệ thống. Để giải quyết bài toán này, bài báo sử dụng thuật toán di truyền biến nhị phân để tính toán chỉ số quan sát của các nút, giúp lựa chọn phương án. Thuật toán được áp dụng nghiên cứu cho lưới điện truyền tải của Việt Nam.

Từ khóa - Thuật toán di truyền nhị phân; thiết bị đo đồng bộ pha; nút trung gian; vị trí đặt tối ưu; lưới truyền tải Việt Nam

1. Đặt vấn đề

Hiện nay, sự tăng nhanh về nhu cầu năng lượng cũng như sự tăng nhanh về cấu trúc lưới khiến bài toán vận hành hệ thống điện trong thời gian thực đảm bảo tính an toàn, ổn định, tối ưu và hiệu quả được quan tâm ở hầu hết các quốc gia. Hệ thống phần mềm quản lý năng lượng EMS (Energy Management System) với tín hiệu đầu vào là các dữ liệu đo từ hệ thống giám sát và thu thập dữ liệu SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) được sử dụng để hỗ trợ cho công việc vận hành. Với các dữ liệu đo này, các giá trị điện áp nút và góc pha điện áp nút tại một thời điểm được tính toán để từ đó đánh giá được trạng thái của hệ thống điện. Tuy nhiên, các tín hiệu đo từ hệ thống SCADA được gửi về trung tâm điều khiển không đồng đều về mặt thời gian khiến cho tính tin cậy của kết quả không được cao. Để khắc phục vấn đề này, hệ thống đo lường diện rộng WAMS (Wide Area Measurement System) với tín hiệu đầu vào lấy từ các thiết bị đo đồng bộ pha PMU (Phasor Measurement Units) đã được sử dụng. Các tín hiệu đo từ PMU được đồng bộ về mặt thời gian dựa theo hệ thống GPS (Global Positioning System), và có thời gian cập nhật nhanh hơn so với các tín hiệu SCADA, cụ thể, PMU lấy dữ liệu 30-60 lần/giây thì SCADA lấy dữ liệu đo vài giây một lần [1]. Bên cạnh đó, các thiết bị PMU có thể đo được trực tiếp giá trị điện áp nút và dòng điện trên các nhánh giúp trực tiếp xác định trạng thái của hệ thống. Tuy nhiên, chi phí mua và lắp đặt của thiết bị PMU khá cao, nằm trong khoảng 40.000\$ đến 180.000\$ [2], nên việc lắp đặt PMU tại tất cả các nút trên lưới điện sẽ gặp vấn đề về mặt chi phí.

Abstract - Nowadays, the operation of power systems is greatly supported by management software, in which the essential input parameter is the measurement data from the system. Currently, phasor measurement units are widely used because the time synchronization data helps improve the reliability of system operation evaluations. It is necessary to study the optimal PMU placement problem because it helps find the minimum number of devices used and the optimal locations to ensure the observation of the entire system. This paper uses the binary variable genetic algorithm to compute the bus observability index for choosing the optimal solution. The algorithm is applied to simulation for the Vietnam transmission system.

Key words - Binary genetic algorithm; phasor measurement unit; zero injection bus; optimal placement; Vietnam transmission system

Một hệ thống điện được coi là được quan sát hoàn toàn nếu góc pha điện áp tại tất cả các nút có một giá trị ước lượng duy nhất khi sử dụng các thông số đo đang có [3]. Với thiết bị PMU, do đặc điểm có thể đo được trực tiếp các giá trị điện áp nút, góc pha điện áp nút và dòng điện trên các nhánh nối với nút có đặt PMU, nên có thể thông qua các định luật Ohm và định luật Kirchhoff để xác định thông số của các nút liên quan. Do đó, việc đặt thiết bị tại tất cả các nút là không cần thiết và đặt PMU tại một số vị trí nút được lựa chọn vẫn có thể đảm bảo hệ thống được quan sát. Có rất nhiều nghiên cứu được thực hiện để giải quyết bài toán xác định số lượng và vị trí tối ưu đặt PMU sao cho vừa đảm bảo vấn đề quan sát hệ thống, vừa đảm bảo tính kinh tế. Việc phân tích khả năng quan sát của hệ thống có thể được thực hiện bằng phương pháp đại số (numerical method) hoặc phương pháp cấu trúc liên kết (topological method) [3]. Phương pháp đại số được phát triển dựa trên hệ số của ma trận Jacobi; Còn phương pháp cấu trúc liên kết sử dụng lý thuyết đồ thị. Khi xem xét bài toán với lưới điện lớn, phương pháp đại số sẽ làm việc với ma trận Jacobi có kích thước lớn dẫn đến tăng khối lượng tính toán và tăng thời gian tính toán [4]. Còn đối với phương pháp cấu trúc liên kết, việc phân tích quan sát dựa trên tính logic, vì vậy phương pháp chỉ yêu cầu các thông tin về sự kết nối trong hệ thống, loại phép đo sử dụng và vị trí đặt thiết bị đo mà không cần thực hiện các tính toán phức tạp cũng như không cần các thông số của các phần tử như đường dây hay máy biến áp trên lưới điện [3]. Với những đặc điểm về tín hiệu đo của PMU, việc phân tích quan sát thường sử dụng phương pháp cấu trúc liên kết vì tính đơn giản và phù hợp của phương pháp này.

¹ Electric Power University, Hanoi, Vietnam (Tran Thanh Son, Kieu Thi Thanh Hoa)

Để giải quyết bài toán tìm vị trí đặt thiết bị đo tối ưu, các thuật toán được sử dụng như lập trình số nguyên [5], [6], thuật toán cận nhánh [4], [7], phương pháp xác suất và độ tin cậy [8], v.v. Khi việc đánh giá quan sát hệ thống có xét đến sự ảnh hưởng của các nút trung gian ZIB (zero injection bus), là các nút không có nguồn phát và cũng không có tải, các ràng buộc trở thành ràng buộc phi tuyến và khiến vấn đề trở nên khó giải quyết, đôi khi không thể đưa ra phương án hợp lý [9]. Để giải quyết vấn đề này, các thuật toán tìm kiếm heuristic được sử dụng như thuật toán tham lam (Greedy algorithm) [10], thuật toán tối ưu bầy đàn [11], thuật toán con doi nhị phân (binary bat algorithm) [12], thuật toán di truyền [2], [4], [9], v.v. Ưu điểm của các thuật toán này là chỉ cần có hàm mục tiêu và ràng buộc, thuật toán không quá phức tạp và có thể tìm giá trị tối ưu toàn cục. Hầu hết các thuật toán tối ưu thông thường tìm kiếm giá trị tối ưu từ một nghiệm ban đầu, còn thuật toán di truyền hoạt động dựa trên một tập hợp nghiệm, điều này giúp tăng cơ hội tìm kiếm tối ưu toàn cục nên nó có thể được ứng dụng cho tất cả các bài toán tối ưu. Thuật toán di truyền có thể làm việc với các biến nhị phân 0-1 hoặc với các biến giá trị thực. Đối với bài toán lựa chọn vị trí đặt thiết bị đo tối ưu, thuật toán di truyền biến nhị phân thích hợp hơn vì mỗi gen chỉ cần biểu diễn bằng giá trị 0 hoặc 1, thể hiện cho sự lựa chọn có hay không đặt thiết bị đo tại nút.

Việt Nam có đặc điểm địa hình trải dài theo hình chữ S, được chia làm 3 miền: Bắc Bộ, Trung Bộ, Nam Bộ, với 6 vùng kinh tế - xã hội: Trung du và miền núi phía Bắc, Đồng bằng sông Hồng, Bắc Trung Bộ và Duyên Hải miền Trung, Tây Nguyên, Đông Nam Bộ, và Đồng bằng sông Cửu Long. Đây là một quốc gia đang phát triển với sự tăng nhanh về nhu cầu năng lượng và sự mở rộng của hệ thống điện, với tốc độ tăng trưởng phụ tải lên tới 14% xét trong 10 năm gần đây [13]. Hệ thống điện Việt Nam bao gồm quá trình sản xuất, truyền tải và phân phối điện năng cho toàn bộ 63 tỉnh thành trên cả nước. Năm 2020, sản lượng điện tiêu thụ gần 250.000 triệu kWh, với công suất lớn nhất gần 40.000 MW, và tổng công suất đặt là hơn 60.000 MW [13]. Tuy nhiên, nhu cầu năng lượng giữa các miền và các vùng kinh tế là không đồng đều. Bên cạnh đó, nguồn năng lượng sơ cấp phân bố không đồng đều nên các nhà máy thủy điện tập trung chủ yếu ở miền Bắc và miền Trung, nhiệt điện than tập trung ở miền Bắc và miền Nam, điện mặt trời và điện gió chủ yếu ở miền Trung và miền Nam. Vì vậy, việc truyền tải công suất từ các nguồn tới phụ tải và truyền tải công suất giữa các miền là cần thiết và được thực hiện bởi lưới truyền tải 500 kV trải dài từ Bắc vào Nam với chiều dài gần 9.000 km. Miền Bắc kết nối với miền Trung qua 2 mạch đường dây 500kV, Miền Trung kết nối với miền Nam qua 4 mạch đường dây 500kV. Đường dây 500kV mạch 3 đang được xây dựng, kết nối Vũng Áng - Quảng Trạch - Dốc Sỏi để tăng cường khả năng truyền tải công suất giữa miền Bắc và miền Trung [13]. Lưới truyền tải còn bao gồm cấp điện áp 220kV có vai trò kết nối trong hệ thống điện miền.

Trên hệ thống điện Việt Nam, bên cạnh hệ thống EMS/SCADA đang được khai thác sử dụng, hệ thống WAMs cũng đang được ứng dụng ở lưới điện 500kV. Các dữ liệu đo được từ thiết bị PMU với thời gian thực đã mang đến lợi ích rất lớn trong việc cải thiện và nâng cao khả năng

xử lý tình huống, làm giảm thời gian khắc phục sự cố trong vận hành hệ thống điện, với trường hợp cụ thể là khi cơn bão số 9 và số 13 năm 2020 làm mất kết nối giữa lưới truyền tải hệ thống điện Bắc - Nam [14].

Tuy nhiên, hiện nay chưa có nghiên cứu cụ thể về bài toán tìm vị trí đặt thiết bị đo tối ưu cho lưới truyền tải điện của Việt Nam. Bài báo này trình bày kết quả ứng dụng thuật toán di truyền biến nhị phân để giải quyết bài toán tìm vị trí đặt thiết bị PMUs tối ưu cho lưới truyền tải Việt Nam.

2. Bài toán tìm vị trí đặt thiết bị đo PMU

2.1. Mô hình bài toán tìm vị trí đặt thiết bị đo tối ưu

Bài toán tìm vị trí đặt PMU tối ưu có thể được đưa về bài toán tìm giá trị cực tiểu của hàm chi phí lắp đặt PMU trên lưới sao cho thỏa mãn điều kiện hệ thống được quan sát đầy đủ. Khi xây dựng hàm mục tiêu theo phương pháp cấu trúc liên kết, một số quy ước quan sát hệ thống được đề xuất dựa trên những đặc điểm của PMU và có áp dụng các định luật Kirchhoff cho mạch điện [4]:

- Tại nút đặt PMU: Biết giá trị điện áp nút, góc pha điện áp nút và dòng điện của tất cả các nhánh nối với nút đó.
- Nếu biết giá trị điện áp và dòng điện tại một nút của nhánh thì sẽ tính được giá trị điện áp ở nút còn lại.
- Nếu biết điện áp của hai nút thì sẽ tính được dòng điện trên nhánh nối giữa hai nút đó.

Hàm mục tiêu cho bài toán tìm vị trí đặt thiết bị đo tối ưu với mô hình số nguyên cho hệ thống N nút có thể được mô tả như sau [5]:

Cực tiểu hóa hàm mục tiêu:

$$F(x) = \sum_{i=1}^N w_i x_i \quad (1)$$

Trong đó, x_i là biến nhị phân biểu diễn khả năng đặt PMU tại nút i , w_i là chi phí của PMU lắp đặt tại nút i .

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{nếu đặt PMU tại nút } i \\ 0 & \text{nếu không đặt PMU tại nút } i \end{cases} \quad (2)$$

Khi xây dựng hàm mục tiêu theo mô hình số nguyên, chi phí lắp đặt PMU tại nút thường được coi là như nhau, được lấy giá trị bằng một [9], và hàm mục tiêu khi đó có dạng như trong công thức (3):

$$F(x) = \sum_{i=1}^N x_i \quad (3)$$

Với mỗi phương án đặt thiết bị PMU, để thực hiện đánh giá khả năng quan sát của hệ thống và để lựa chọn phương án tối ưu, hai chỉ số được sử dụng là chỉ số quan sát của một nút (Bus Observability Index - BOI) và chỉ số quan sát của hệ thống (the System Observability Redundancy Index - SORI) [9]. Chỉ số quan sát của một nút cho biết nút đó được quan sát bao nhiêu lần, và chỉ số quan sát của hệ thống được tính bằng tổng chỉ số quan sát của các nút trên hệ thống điện.

2.2. Thuật toán di truyền

Thuật toán di truyền (Genetic Algorithm - GA) là thuật toán phỏng theo quá trình thích nghi tiến hóa của các quần thể sinh học dựa trên học thuyết Darwin. Thuật toán làm

việc với một tập cá thể, trong đó, mỗi cá thể sẽ tương ứng với một tập nghiệm của bài toán. Các cá thể của quần thể hiện tại là khởi nguồn cho quần thể thế hệ kế tiếp thông qua ba quá trình chính: chọn lọc, lai ghép và đột biến. Ở mỗi bước, các cá thể trong quần thể hiện tại được ước lượng, đánh giá thông qua giá trị hàm mục tiêu, cá thể nào phát triển hơn, thích ứng hơn với điều kiện của bài toán sẽ tồn tại và ngược lại sẽ bị loại bỏ. Với bài toán tìm vị trí đặt thiết bị đo tối ưu, bài báo này sử dụng thuật toán di truyền biến nhị phân được mô tả như trên Hình 1 và gồm các nội dung sau:

- Khởi tạo tập cá thể: Giá trị của các gen trong cá thể được khởi tạo bằng cách lấy giá trị ngẫu nhiên 0/1, tương ứng với việc không hoặc có đặt PMU tại nút.
- Tính giá trị hàm mục tiêu: Là tổng số lượng PMU cần đặt.
- Tính toán chỉ số quan sát của từng nút, của hệ thống và đánh giá các cá thể.
- Thực hiện phép toán chọn lọc theo phương pháp bánh xe roulette.
- Thực hiện phép toán lai ghép một điểm.
- Thực hiện phép toán đột biến.
- Tính toán chỉ số quan sát của hệ thống và đánh giá các cá thể. Nếu cá thể chưa đảm bảo được quan sát theo yêu cầu thì sẽ tiến hành đặt thêm PMU. Sau đó, sẽ cập nhật lại giá trị hàm mục tiêu và chỉ số quan sát của các cá thể này.
- Cập nhật tập cá thể mới: Gồm một phần cá thể tốt ở thế hệ trước, và phần còn lại được tạo thông qua phép lai ghép, phép đột biến.
- Kiểm tra điều kiện dừng lặp và đưa ra kết quả: Phương án tối ưu được lựa chọn dựa trên chỉ số SORI. Thuật toán dừng lặp được xác định theo một trong hai điều kiện sau:
 - + Điều kiện 1: Dừng theo số bước lặp tối đa;
 - + Điều kiện 2: Dừng khi 30 giá trị SORI liên tiếp không thay đổi.

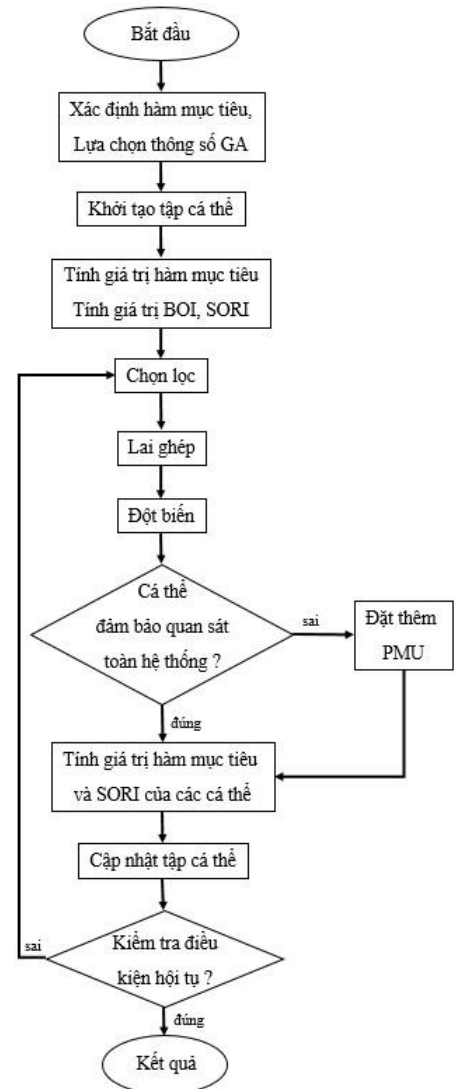
Trong bước tính toán chỉ số quan sát của hệ thống, nếu có xét đến các nút trung gian (ZIB – Zero Injection Bus) là các nút không có công suất phát và không có công suất tải thì có thể áp dụng định luật Kirchhoff dòng điện để xét sự quan sát của một nút. Giả sử xét một nhóm gồm 4 nút nối với nhau, trong đó có 1 nút là nút trung gian, nếu biết giá trị điện áp của 3 trong 4 nút, thì điện áp của nút còn lại sẽ có thể tính toán được. Như vậy, cả 4 nút sẽ đều được quan sát. Điều này có thể được hiểu rằng khi có xét nút ZIB, thay vì việc phải đặt thiết bị PMU để quan sát cả 4 nút, ta có thể đặt PMU để đảm bảo quan sát cho 3 nút, khi đó nút còn lại cũng sẽ được quan sát. Điều này có thể góp phần làm giảm số lượng thiết bị PMU cần sử dụng.

3. Kết quả tính toán

Lưới điện truyền tải Việt Nam được sử dụng nghiên cứu trong bài báo này là lưới gồm 350 nút, tổng số nhánh là 652. Trong đó, có 71 nút ở cấp điện áp 500 kV, 279 nút ở cấp điện áp 220 kV, và số lượng nút trung gian là 82 nút.

Thuật toán di truyền biến nhị phân được áp dụng để tính toán cho lưới trong bốn trường hợp:

- Trường hợp 1: Tìm vị trí đặt PMU tối ưu khi không xét đến ảnh hưởng của nút ZIB.



Hình 1. Sơ đồ khối thuật toán

- Trường hợp 2: Tìm vị trí đặt PMU tối ưu khi xét đến ảnh hưởng của nút ZIB.
- Trường hợp 3: Tìm vị trí đặt PMU tối ưu khi sự có một PMU, không xét đến ảnh hưởng của nút ZIB.
- Trường hợp 4: Tìm vị trí đặt PMU tối ưu khi sự có một PMU, có xét đến ảnh hưởng của nút ZIB.

Các thông số của thuật toán được sử dụng như sau:

- + Số bước lặp lớn nhất: 1000;
- + Số cá thể: 3000;
- + Tỷ lệ đột biến: 0,001;
- + Tỷ lệ lai ghép: 0,7.

Thuật toán di truyền là một trong số các thuật toán tìm kiếm tối ưu heuristic, và có thể bị ảnh hưởng bởi các yếu tố ngẫu nhiên. Vì vậy, để giảm ảnh hưởng của các yếu tố ngẫu nhiên, trong nghiên cứu này, việc mô phỏng đã được thực hiện 10 lần cho mỗi trường hợp. Kết quả tốt nhất trong 10 lần đó được chọn làm phương án đặt thiết bị đo PMU. Các kết quả mô phỏng được thể hiện trong Bảng 1, với thông tin về tổng số lượng PMU, vị trí đặt PMU và tổng chỉ số quan sát của hệ thống. Bảng 2 trình bày các giá trị quan sát của các nút trên hệ thống.

Bảng 1. Kết quả mô phỏng của bốn trường hợp

Trường hợp	Phương án	Số lượng PMU	Vị trí đặt PMU	Giá trị SORI
1 (Không xét nút trung gian)	1	104	1, 2, 8, 10, 12, 15, 18, 20, 23, 27, 37, 38, 42, 44, 49, 54, 55, 60, 61, 64, 71, 73, 76, 79, 80, 87, 89, 93, 94, 102, 103, 105, 110, 114, 118, 119, 123, 124, 127, 129, 132, 135, 139, 144, 150, 151, 155, 158, 159, 161, 162, 164, 167, 168, 171, 173, 178, 181, 183, 185, 193, 197, 200, 205, 206, 211, 213, 217, 218, 219, 224, 228, 229, 234, 236, 238, 245, 251, 252, 253, 264, 265, 270, 272, 274, 279, 283, 285, 289, 293, 294, 299, 309, 312, 316, 317, 318, 320, 324, 326, 331, 336, 341, 342	494
2 (Có xét nút trung gian)	1	89	1, 2, 10, 13, 15, 18, 26, 37, 38, 42, 44, 49, 54, 55, 60, 62, 64, 71, 73, 76, 80, 87, 89, 93, 94, 95, 102, 105, 110, 113, 120, 123, 124, 127, 129, 132, 135, 136, 139, 149, 151, 155, 161, 163, 164, 167, 171, 173, 178, 181, 183, 185, 193, 197, 200, 205, 211, 215, 217, 219, 222, 224, 229, 234, 235, 237, 238, 245, 253, 258, 264, 270, 272, 274, 283, 285, 293, 299, 303, 304, 312, 317, 318, 320, 323, 325, 336, 341, 342	559
3 (Sự cố một PMU bất kỳ và không xét nút trung gian)	1	226	1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 15, 18, 20, 22, 23, 26, 27, 29, 32, 33, 37, 38, 40, 42, 43, 44, 46, 47, 49, 50, 54, 55, 56, 57, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 66, 70, 72, 74, 75, 76, 79, 80, 82, 84, 86, 87, 88, 89, 91, 92, 93, 94, 95, 97, 98, 102, 103, 104, 105, 108, 110, 111, 113, 114, 116, 118, 119, 120, 121, 123, 124, 125, 127, 128, 129, 132, 133, 135, 136, 137, 138, 139, 144, 146, 149, 150, 151, 152, 154, 155, 156, 157, 159, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 181, 182, 183, 185, 186, 189, 190, 193, 195, 197, 198, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 210, 211, 212, 213, 214, 217, 218, 219, 220, 221, 224, 226, 228, 229, 230, 231, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 245, 246, 248, 249, 251, 252, 253, 254, 258, 262, 264, 265, 266, 268, 270, 271, 272, 273, 274, 279, 281, 283, 285, 286, 287, 289, 291, 292, 293, 294, 296, 297, 299, 303, 304, 307, 309, 312, 314, 316, 317, 318, 319, 321, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 335, 336, 337, 338, 339, 341, 342, 344, 346, 347, 348, 349, 350	861
	2		1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 19, 20, 22, 23, 26, 27, 29, 31, 33, 37, 38, 40, 42, 43, 44, 46, 47, 49, 50, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 67, 70, 72, 74, 75, 76, 79, 80, 82, 84, 86, 87, 88, 89, 92, 93, 94, 95, 97, 98, 101, 102, 103, 104, 105, 108, 110, 111, 113, 114, 116, 118, 119, 120, 121, 123, 124, 127, 128, 129, 131, 132, 133, 135, 136, 137, 138, 139, 142, 144, 146, 149, 150, 151, 152, 154, 155, 156, 158, 159, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 177, 178, 179, 181, 182, 183, 185, 186, 187, 189, 193, 195, 197, 198, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 211, 212, 213, 215, 216, 217, 218, 219, 221, 222, 224, 225, 228, 229, 230, 231, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 245, 246, 248, 249, 251, 252, 253, 254, 258, 262, 264, 265, 266, 267, 268, 270, 271, 272, 273, 274, 279, 283, 285, 287, 289, 291, 292, 293, 294, 296, 297, 299, 301, 303, 304, 307, 309, 311, 312, 314, 316, 317, 318, 320, 321, 323, 324, 325, 326, 327, 329, 330, 331, 333, 335, 336, 337, 338, 339, 341, 342, 344, 346, 347, 348, 349, 350	
4 (Sự cố một PMU bất kỳ và có xét nút trung gian)	1	175	1, 2, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 15, 18, 19, 23, 26, 27, 29, 38, 40, 42, 44, 45, 47, 49, 54, 55, 57, 59, 60, 62, 64, 72, 74, 75, 76, 79, 80, 84, 85, 92, 93, 97, 99, 101, 102, 103, 104, 105, 107, 108, 110, 111, 113, 114, 117, 119, 120, 124, 125, 127, 128, 129, 131, 132, 133, 135, 136, 137, 139, 144, 149, 150, 151, 152, 154, 155, 161, 162, 163, 164, 166, 167, 169, 171, 172, 173, 174, 175, 177, 178, 180, 181, 182, 185, 186, 193, 195, 197, 198, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 210, 212, 215, 217, 218, 219, 221, 224, 227, 229, 230, 231, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 245, 246, 248, 249, 251, 252, 253, 254, 258, 262, 264, 268, 270, 271, 272, 274, 276, 283, 285, 286, 287, 289, 292, 293, 296, 299, 301, 302, 304, 308, 312, 317, 318, 319, 320, 321, 323, 324, 325, 328, 331, 333, 335, 336, 337, 338, 339, 341, 342, 344, 346, 347, 348, 350	897

Bảng 2. Kết quả giá trị BOI của bốn trường hợp

Trường hợp	Phương án	Giá trị BOI																															
1 (Không xét nút trung gian)	1	1	2	1	1	1	1	1	3	1	2	1	2	1	2	3	2	1	2	1	2	1	1	2	3	1	1	1	2	2			
		1	1	1	1	2	2	2	1	3	2	1	2	1	1	2	1	1	3	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1			
		1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	2	1	1	1	2	1	1	3	1	2	2	1	1	1			
		1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	1	2	1	1	1	2	1	2	1		
		1	1	1	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1		
		1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	3	1	2	2	1	1	1	1	1	3	2	1	1	1	2	3	1	
		1	3	1	2	1	1	1	1	2	1	1	2	1	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	
		1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	1	1	1	2	2	2	2	
		2	2	1	1	1	2	1	1	2	2	2	3	2	1	1	3	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1
		2	2	1	2	1	2	2	1	1	1	1	2	2	3	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1
		1	1	1	1	2	1	1	2	1	3	1	1	1	2	1	1	3	1	2	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	3	1
2 (Có xét nút trung gian)	1	6	3	2	2	3	1	1	2	1	1	1	2	1	2	3	2	1	2	1	2	4	2	1	1	1	1	1	1	1	2		
		1	1	1	1	2	2	2	1	3	2	1	2	1	1	1	1	1	3	1	1	5	3	3	1	2	1	2	1	2	1		
		1	1	2	4	1	1	2	1	3	3	1	1	2	1	1	3	1	1	2	3	2	3	3	1	1	1	1	1	1	1		
		1	1	1	1	3	1	1	1	2	1	1	1	5	1	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1	3	1	2	1	2	1		
		1	2	2	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1	5	1	2	2	1	1	1	3	2	2	1	4	4	3	3	3	3		
		3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	3	3	3	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1		
		3	3	1	2	1	1	3	1	2	1	1	2	1	3	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1		
		1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	3	1	1	1	1	3	2	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	2	3	1	
		1	1	1	1	1	2	1	1	1	3	1	3	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	2
		1	1	3	4	4	2	2	2	1	1	1	4	2	2	1	1	1	2	1	1	2	2	1	2	2	1	2	1	4	3	3	
		1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	6	3	1	3	1	1	1	1	2	4	2	2	2	2	2	1	2	2	
1	1	1	2	1	1	4	1	1	1	1	2	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
3 (Sự có một PMU bất kỳ và không xét nút trung gian)	1	4	2	2	2	2	2	3	2	3	2	3	2	3	4	2	2	3	2	4	2	2	2	3	2	2	2	2	2	5			
		2	2	4	4	2	2	2	3	4	2	2	2	2	2	3	2	2	4	2	4	3	2	2	2	3	2	2	2	3			
		2	2	2	2	2	2	4	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	4	2	2	2			
		2	3	2	2	2	2	2	3	6	2	2	2	3	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2	3	4	2	2	2		
		2	2	2	2	3	3	3	2	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	4	2	2	2	3	2	2	2		
		2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	4	2	2	2	2	3	3	4	3	2	2	2	2	2	3	4	2	
		2	5	2	4	2	2	2	2	4	2	3	2	3	2	5	2	4	2	2	2	3	2	2	2	3	4	2	2	2	2		
		2	2	6	2	2	2	2	3	2	2	2	4	2	4	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2	3	2	
		3	2	2	3	2	3	2	2	3	4	3	5	4	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	
		4	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	4	3	2	3	2	2	2	2	2	4	2	2	
		2	5	2	2	2	2	2	3	2	2	3	4	4	2	2	4	2	2	4	2	3	2	2	4	2	3	2	2	3	2	3	
2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	3	3	2	3	2	2	2	4	2	2	2	2	2	5	2	2			
4 (Sự có một PMU bất kỳ và có xét nút trung gian)	1	6	4	4	4	3	2	2	3	2	2	2	2	2	3	4	2	2	3	2	2	4	2	3	3	2	2	2	3	3			
		2	3	2	3	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	2	3	2	2	4	2	4	5	3	3	2	4	3	3	2	2		
		2	2	3	4	2	2	2	4	3	3	3	3	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	6	3	2	2	3	2	2		
		2	3	2	2	3	2	2	4	6	2	3	2	5	2	2	2	4	2	2	2	2	2	2	2	2	4	2	2	2	2		
		2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	3	2	2	6	2	2	2	3	2	2	3	4	2	2	3	4	4	3	3	3		
		3	3	2	2	3	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3	3	4	4	2	4	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
		3	5	2	3	2	2	3	2	4	2	2	3	2	6	2	3	2	4	2	2	3	2	3	2	3	2	4	2	2	2		
		2	2	6	2	2	2	2	3	2	2	2	4	2	4	2	3	3	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	
		2	3	2	3	2	3	2	2	3	4	3	4	4	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	3	3	
		4	2	2	2	4	2	2	2	2	2	3	4	2	2	2	2	2	2	2	4	2	2	3	2	2	2	2	2	3	2	3	
		2	5	2	2	2	2	2	3	2	2	3	5	3	2	2	4	2	4	2	4	2	2	4	2	3	2	2	3	2	2	2	
2	2	2	2	3	2	2	4	2	2	2	4	2	2	6	3	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	5	2	2			

3.1. Trường hợp 1

Trường hợp đầu tiên được xem xét nghiên cứu là tìm vị trí đặt thiết bị PMU trên lưới với mục tiêu là số lượng PMU ít nhất và đảm bảo hệ thống được quan sát. Trong trường hợp này tất cả các nút trên lưới đều được coi là nút có khả năng đặt PMU. Miền không gian tìm kiếm sẽ gồm 350 nút, kết quả có số lượng PMU ít nhất và có giá trị SORI tốt nhất sẽ được chọn. Kết quả mô phỏng cho kết quả gồm phương án về vị trí đặt 104 PMU, đảm bảo ít nhất mỗi nút được quan sát một lần, với tổng số lần quan sát của hệ thống là 494 lần. Trong đó, hai vị trí nút số 94 và 210 được quan sát nhiều nhất là 4 lần, tương ứng với việc có 4 thiết bị PMU có liên kết đến mỗi nút. Có 21 vị trí nút được quan sát 3 lần, 96 vị trí nút được quan sát 2 lần, và các vị trí còn lại được quan sát 1 lần.

3.2. Trường hợp 2

Trong trường hợp này, để giảm bớt số lượng nút PMU cần đặt, thuật toán sẽ xét đến nút ZIB. Nút ZIB sẽ ảnh hưởng đến việc đánh giá khả năng quan sát của hệ thống. Kết quả tìm kiếm có số lượng PMU yêu cầu là 89. Số lượng PMU cần đặt giảm đi so với trường hợp 1 là 15, tuy nhiên do xét đến ảnh hưởng của nút ZIB, hệ thống vẫn được đảm bảo quan sát với tổng chỉ số quan sát hệ thống SORI bằng 559. Trong đó, các vị trí được quan sát nhiều nhất là vị trí nút số 1 và 295 được quan sát 6 lần, vị trí nút 50, 98, 127 được quan sát 5 lần.

3.3. Trường hợp 3

Trường hợp thứ ba được xem xét trong trường hợp bị mất dữ liệu từ một PMU. Điều này có thể xảy ra trên thực tế khá nhiều vì lượng dữ liệu của PMU khá lớn và vấn đề đường truyền cũng có thể là một yếu tố gây mất dữ liệu. Trong trường hợp này vị trí đặt PMU sẽ được chọn để thỏa mãn mỗi nút được quan sát ít nhất 2 lần. Với trường hợp này khi không xét đến ảnh hưởng của nút ZIB, số lượng PMU cần đặt là 226. Kết quả trong Bảng 1 thể hiện hai phương án đặt PMU với cùng chỉ số SORI là 861. Với kết quả này, các vị trí được quan sát nhiều nhất của phương án 1 là vị trí 94, 200, với BOI bằng 6. Còn với phương án 2, vị trí 324 được quan sát nhiều nhất với giá trị BOI là 7, vị trí 94 và 200 được quan sát với giá trị BOI là 6.

3.4. Trường hợp 4

Trường hợp 4 cũng được mô phỏng khi xét sự cố của một thiết bị PMU bất kì. Tuy nhiên, khác với trường hợp 3, trong trường hợp này có xét đến ảnh hưởng của các nút ZIB. Kết quả thể hiện như trong Bảng 1 cho thấy, cần đặt PMU tại 175 vị trí. Số lượng PMU tăng gần gấp đôi so với trường hợp 2, và tăng thêm 67 PMU so với trường hợp 1. So với trường hợp 3, số lượng PMU cần thiết giảm 51 thiết bị. Tuy nhiên, xét đến ảnh hưởng của nút ZIB nên các nút vẫn được đảm bảo quan sát ít nhất 2 lần, với giá trị SORI bằng 897.

4. Kết luận

Trong bài báo này, thuật toán di truyền biến nhị phân đã được sử dụng để giải quyết bài toán tìm vị trí đặt thiết

bị PMU tối ưu cho lưới điện truyền tải điện của Việt Nam gồm 350 nút, 652 nhánh. Vị trí đặt tối ưu của các thiết bị đo đại lượng pha phải đảm bảo hệ thống luôn được quan sát và tổng chi phí thiết bị là nhỏ nhất. Các tính toán được xét trong bốn trường hợp: Khi không xét nút trung gian, khi xét nút trung gian, khi xảy ra sự cố ở một PMU bất kỳ và khi xảy ra sự cố một PMU bất kỳ có xét ảnh hưởng của nút trung gian. Tổng số thiết bị PMU tương ứng với bốn trường hợp nghiên cứu lần lượt là 104, 89, 226 và 175. Kết quả tính toán cho thấy, khi áp dụng thuật toán di truyền biến nhị phân có xét đến nút trung gian thì số lượng PMUs giảm khoảng 14% và 23% so với khi không xét tương ứng với trường hợp bình thường và khi sự cố một PMU bất kì. Điều này tương ứng với chi phí cho thiết bị lắp đặt trên hệ thống cũng giảm tương ứng ít nhất là 14%.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] B. Özsoy and M. Göl, "A Hybrid State Estimation Strategy with Optimal Use of Pseudo-Measurements", *2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2018, pp. 1-6.
- [2] M. M. Devi, M. Geethanjali, "Hybrid of Genetic Algorithm and Minimum Spanning Tree method for Optimal PMU Placements", *Measurement*, Vol. 154, 2020, 107476.
- [3] A. Abur, A. G. Expósito, *Power System State Estimation - Theory and Implementation*, Marcel Dekker Inc., 2004.
- [4] B. Mohammadi-Ivatloo, "Optimal placement of PMUs for power system observability using topology based formulated algorithms", *Journal of Applied Sciences*, vols. 9 (13), pp. 2463-2468, 2009.
- [5] B. Xu and A. Abur, "Observability analysis and measurement placement for systems with PMUs", in *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, New York, USA, vol.2, 2004, pp. 943-946.
- [6] B. Gou, "Generalized Integer Linear Programming Formulation for Optimal PMU Placement", *IEEE Transactions on Power Systems*, vols. 23, no. 3, 2008, pp. 1099-1104.
- [7] M. Z. Kamh, M. R. Younis, A. M. Ibrahim, "Globally optimal phasor measurement unit placement using branch and bound algorithm", *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 12, Issue 3, 2021, pp. 2789-2798.
- [8] S. Kumar, "Optimal placement of PMU using probabilistic approach", *2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS)*, Chandigarh, India, 2014, pp. 1-6.
- [9] X. Zhou, H. Sun, C. Zhang, Q. Dai, "Optimal Placement of PMUs Using Adaptive Genetic Algorithm Considering Measurement Redundancy", *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, Vol. 23, No. 03, 2016, 1640001.
- [10] I. Akingeneye, J. Wu and J. Yang, "Optimum PMU placement for power system state estimation", *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Chicago, IL, USA, 2017, pp. 1-5.
- [11] A. A. Saleh, A. S. Adail, A. A. Wadoud, "Optimal phasor measurement units placement for full observability of power system using improved particle swarm optimisation", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 11 Iss. 7, 2017, pp. 1794-1800.
- [12] A. S. Tawfik, E. N. Abdallah, K. H. Youssef, "Optimal placement of phasor measurement units using binary bat algorithm", *2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Cairo, Egypt, 2017, pp. 559-564.
- [13] Trung tâm điều độ Hệ thống điện Quốc gia, *Giới thiệu hệ thống điện Việt Nam*, 2021, [Online] Xem tại: <https://www.nldc.evn.vn/newsg/6/1855/Gioi-thieu-he-thong-dien-Viet-Nam/default.aspx>.
- [14] Trung tâm điều độ Hệ thống điện Quốc gia, *Báo cáo tổng kết vận hành hệ thống điện năm 2020*, Hà Nội, Việt Nam, tháng 01/2021.