BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC ĐIỆN LỰC

KIỀU THỊ THANH HOA

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN DI TRUYỀN VÀ THUẬT TOÁN TỐI ƯU BẦY ĐÀN ĐỂ ƯỚC LƯỢNG TRẠNG THÁI HỆ THỐNG ĐIỆN

Ngành: Kỹ thuật điện
Mã số : 9520201

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT ĐIỆN

Hà Nội – 2023

Công trình được hoàn thành tại:

Trường Đại học Điện lực

Người hướng dẫn khoa học: TS. Trần Thanh Sơn

Phản biện 1: PGS. TS. Nguyễn Đức Huy

Phản biện 2: PGS. TS. Nguyễn Minh Ý

Phản biện 3: PGS. TS. Nguyễn Hữu Đức

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Trường họp tại Trường Đại học Điện lực

Vào hồi 14 giờ 30 phút, ngày 22 tháng 12 năm 2023

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

1. Trung tâm học liệu - Trường Đại học Điện lực
2. Thư viện Quốc gia Việt Nam

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Trên hệ thống điện Việt Nam, bên cạnh hệ thống phần mềm quản lý năng lượng (Energy Management System – EMS) đang được khai thác sử dụng, hệ thống đo lường diện rộng (Wide Area Measurement System - WAMS) cũng đang bắt đầu được ứng dụng ở lưới điện 500kV. Với hệ thống EMS, thông số đầu vào là dữ liệu đo đạc từ các vị trí đo thuộc hệ thống giám sát và thu thập dữ liệu (SCADA); còn với hệ thống WAMS dữ liệu được lấy từ các thiết bị đo đồng bộ pha (PMU). Hệ thống EMS đóng vai trò thiết yếu trong việc hiện đại hóa lưới điện và cho phép tạo ra lưới điện thông minh và hệ thống năng lượng tự động hóa cao trong tương lai [17], trong đó ước lượng trạng thái hệ thống điện là một yếu tố thiết yếu [39].

Với lưới điện Việt Nam, các dữ liệu đo được từ PMU 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 [7].

Khi giám sát một hệ thống có thể gặp một số vấn đề như sai số của các thiết bị đo lường, lỗi đường truyền hoặc nhiễu trong khi gửi các giá trị đo về trung tâm điều khiển và giám sát, khiến người vận hành hệ thống không biết thông tin liên quan của một số khu vực. Do đó cần nghiên cứu phát triển các thuật toán ước lượng trạng thái hệ thống.

Hiện nay chưa có công bố nghiên cứu cụ thể về bài toán tìm số lượng, vị trí đặt thiết bị đo tối ưu cho lưới truyền tải điện của Việt Nam, cũng như những nghiên cứu chuyên sâu về bài toán ước lượng trạng thái hệ thống điện ở Việt Nam. Vì vậy việc thực hiện luận án là

cần thiết, là cơ sở để phát triển nghiên cứu và phân tích sâu hơn các vấn đề liên quan đến công việc vận hành trên lưới điện Việt Nam.

2. Mục đích của luận án

Nghiên cứu áp dụng thuật toán tối ưu bầy đàn và thuật toán di truyền để giải quyết bài toán tối ưu hóa số lượng và vị trí đặt thiết bị đo đồng bộ pha và giải quyết bài toán ước lượng giá trị các biến trạng thái (modun điện áp nút và góc pha điện áp nút) của hệ thống điện.

Nghiên cứu đề xuất sơ đồ khối của thuật toán và các bộ thông số thích hợp với vấn đề nghiên cứu để đạt được kết quả tốt.

3. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của luận án là bài toán tối ưu hóa số lượng và vị trí đặt thiết bị đo đồng bộ pha và bài toán ước lượng trạng thái hệ thống điện bằng thuật toán di truyền và thuật toán tối ưu bày đàn.

4. Phạm vi nghiên cứu

Phạm vi nghiên cứu của luận án là lưới điện truyền tải.

5. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu tài liệu: phân tích và tổng hợp lý thuyết.

Phương pháp thử nghiệm: xây dựng chương trình, mô phỏng, đề xuất các cải tiến và đánh giá.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

Ý nghĩa khoa học:

- Với bài toán tối ưu hóa số lượng, vị trí đặt thiết bị đo đồng bộ pha và đảm bảo điều kiện quan sát hệ thống điện:

+ Nghiên cứu đề xuất được giải thuật sử dụng thuật toán di truyền biến nhị phân cùng quá trình tính toán chỉ số quan sát của các nút với quy trình gồm ba bước. Thuật toán đề xuất này giúp giải quyết bài toán

mà không cần thêm các biến đổi hay kỹ thuật xử lý phức tạp như các nghiên cứu trước.

- Với bài toán ước lượng trạng thái hệ thống điện:

+ Nghiên cứu xác định được các hàm và thông số thích hợp khi sử dụng thuật toán di truyền.

+ Nghiên cứu áp dụng thành công quá trình tách biến cho thuật toán di truyền và thuật toán tối ưu bầy đàn để ước lượng trạng thái lưới điện truyền tải có số nút lớn.

Ý nghĩa thực tiễn:

- Nghiên cứu có thể được áp dụng cho các lưới điện thực tế, cụ thể trong luận án thực hiện tính toán được số lượng và vị trí đặt tối ưu cho các thiết bị đo đồng bộ pha trên lưới điện truyền tải Việt Nam để đảm bảo lưới truyền tải được quan sát trong các điều kiện khác nhau.

- Các kết quả nghiên cứu đạt được là cơ sở để nghiên cứu sâu hơn về vấn đề ước lượng trạng thái hệ thống khi áp dụng cho lưới điện Việt Nam cũng như các lưới điện khác.

7. Cấu trúc nội dung của luận án

- Chương 1: Tổng quan về bài toán và phương pháp nghiên cứu.

- Chương 2: Nghiên cứu tối ưu hóa số lượng và vị trí đặt thiết bị đo đồng bộ pha để đảm bảo điều kiện quan sát hệ thống điện.

- Chương 3: Nghiên cứu áp dụng thuật toán di truyền và thuật toán tối ưu bầy đàn để ước lượng trạng thái hệ thống điện.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ BÀI TOÁN VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

1.1. Tổng quan bài toán tìm số lượng, vị trí đặt thiết bị đo tối ưu

Tại nút có lắp đặt PMU có thể đo được trực tiếp các giá trị điện áp nút, góc pha điện áp nút và dòng điện nhánh và góc pha dòng điện trên các nhánh nối với nút đó nên có thể thông qua các định luật Ohm và định luật Kirchhoff để xác định thông số của các nút liên quan. Tuy nhiên chi phí mua và lắp đặt của thiết bị PMU khá cao [75]. Từ các lý do trên, một trong những vấn đề quan trọng là xác định số lượng và vị trí tối ưu đặt PMU sao cho vừa đảm bảo vấn đề quan sát hệ thống, vừa nâng cao độ chính xác kết quả ước lượng trạng thái, vừa đảm bảo tính kinh tế.

Việc phân tích khả năng quan sát của hệ thống có thể được thực hiện bằng phương pháp số (numerical method) hoặc phương pháp cấu trúc liên kết (topological method) [12]. Phương pháp cấu trúc liên kết 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 [12]. 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.

Khi việc đánh giá quan sát hệ thống có xét đến sự ảnh hưởng của các nút trung gian ZIB các ràng buộc trở thành ràng buộc phi tuyến và khiến vấn đề trở nên khó giải quyết, đôi khi các phương pháp như lập trình số nguyên không thể đưa ra phương án hợp lý [114]. Một số cách giải quyết được đưa ra như sử dụng phép biến đổi logic [109], đưa luật

cấu hình lại cấu trúc lại hệ thống [113], đưa thêm biến phụ và biến đổi các ràng buộc [18], [11], [88]. Khi đó, có thể sử dụng các thuật toán tìm kiếm heuristic, giúp giải quyết bài toán phi tuyến và có thể không cần các biến đổi phức tạp.

1.2. Tổng quan bài toán ước lượng trạng thái hệ thống điện

Trên hệ thống điện, số liệu từ các thiết bị đo đặt trên hệ thống điện là không 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 bị lỗi đường truyền, khiến người vận hành hệ thống không biết thông tin liên quan của một số khu vực của hệ thống điện. Thông số đầu vào của bài toán ước lượng trạng thái hệ thống điện 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 modun 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 nhằm mục tiêu đảm bảo hệ thống vận hành an toàn và tin cậy.

Đối với bài toán ước lượng giá trị các biến trạng thái, các công bố chi tiết chỉ áp dụng thuật toán di truyền mới chỉ đưa ra kết quả cho các lưới điện có không quá 6 nút và chưa đưa ra sơ đồ khối tính toán của GA khi áp dụng cho bài toán PSSE. Với PSO, thuật toán đã được sử dụng để giải quyết bài toán ước lượng giá trị biến trạng thái đối với lưới điện có nhiều nút [103], [49] và bài toán tìm vị trí đặt thiết bị đo tối ưu [45], [92].

Ở Việt Nam, thuật toán di truyền, thuật toán tối ưu bầy đàn đã được nghiên cứu và ứng dụng vào các lĩnh vực khác nhau nhưng đối với bài

toán ước lượng trạng thái hệ thống điện, các nghiên cứu liên quan còn hạn chế.

1.3. Thuật toán di truyền

Trong GA, 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 hoạt động chính: chọn lọc, lai ghép và đột biến ngẫu nhiên.

Đối với bài toán tối ưu hóa số lượng và vị trí đặt thiết bị đo đồng bộ pha, thuật toán di truyền biến nhị phân là thích hợp, còn đối với bài toán ước lượng trạng thái hệ thống điện, khi các biến trạng thái là số thực, thuật toán di truyền biến số thực thích hợp hơn.

1.3.1. Hàm chọn lọc

Chọn lọc theo bánh xe roulette, chọn lọc Boltzmann, chọn lọc theo thứ hạng, chọn lọc theo trọng số giá trị hàm mục tiêu, chọn lọc đấu vòng, chọn lọc ghép cặp lần lượt từ trên xuống và chọn lọc ngẫu nhiên.

1.3.2. Hàm lai ghép

Lai ghép một điểm, lai ghép uniform, lai ghép đại số, lai ghép heuristic

1.3.3. Phép đột biến

Việc lựa chọn vị trí và tạo giá trị đột biến được thực hiện ngẫu nhiên.

1.4. Thuật toán tối ưu bầy đàn

Nhóm cá thể được cập nhật tại từng thế hệ bằng cách cập nhật vận tốc theo (1-11) hoặc (1-13) hoặc (1-15) và vị trí của từng cá thể theo công thức (1-12)

$$v_{id} = {}_{vid} + c_1.r_1.(p_{id} - x_{id}) + c_2.r_2.(p_{gd} - x_{id}) \quad (1\text{-}11)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (1\text{-}12)$$

$$v_{id} = \omega.v_{id} + c_1.r_1.(p_{id} - x_{id}) + c_2.r_2.(p_{gd} - x_{id}) \quad (1\text{-}13)$$

$$v_{id} = \chi.(v_{id} + c_1.r_1.(p_{id} - x_{id}) + c_2.r_2.(p_{gd} - x_{id})) \quad (1\text{-}15)$$

Nếu chọn $\varphi = 4{,}1$, chuyển tương đương (1-15) về dạng (1-13) ta sẽ có các giá trị tương ứng trong (1-13) là: $\omega \approx 0{,}729$, hệ số gia tốc $c_1 = c_2 \approx 1{,}494$ [36], [28].

1.5. Những nội dung kế thừa và đề xuất hướng nghiên cứu

Hướng nghiên cứu của luận án như sau:

- Nghiên cứu xác định thuật toán tìm kiếm tối ưu giải quyết bài toán tìm kiếm số lượng và vị trí đặt thiết bị đo PMU với cách xử lý mới khi có xét đến vai trò của nút trung gian. Thuật toán đề xuất được áp dụng giải quyết bài toán cho lưới điện truyền tải.

- Nghiên cứu đề xuất sơ đồ tính toán và các bộ thông số thích hợp với đối tượng nghiên cứu để kết quả ước lượng trạng thái là tốt nhất và thực hiện mô phỏng nghiên cứu cho một số trường hợp cụ thể. Bên cạnh đó, luận án sẽ đề xuất, cải tiến thuật toán di truyền để có thể giải quyết được bài toán đối với lưới điện truyền tải có nhiều nút.

1.6. Kết luận chương 1

Nội dung trong Chương 1 làm cơ sở để xây dựng các thuật toán trong Chương 2 và Chương 3.

CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU TỐI ƯU HÓA SỐ LƯỢNG VÀ VỊ TRÍ ĐẶT THIẾT BỊ ĐO ĐỒNG BỘ PHA ĐỂ ĐẢM BẢO ĐIỀU KIỆN QUAN SÁT HỆ THỐNG ĐIỆN

2.1. Mô hình bài toán tối ưu hóa số lượng và vị trí đặt thiết bị đo đồng bộ pha

2.1.1. Hàm mục tiêu

Cực tiểu hóa hàm mục tiêu [103]:

$$F(x)=\sum_{i=1}^{N} g_i x_i \quad (2\text{-}1)$$

Trong đó:

- X là vectơ nhị phân, chứa thành phần x_i biểu diễn khả năng đặt PMU tại nút i.

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

- g_i là chi phí lắp đặt của PMU tại nút i, coi g_i bằng nhau và bằng 1.

2.1.2. Mô hình hàm ràng buộc khi không xét đến nút trung gian

Đánh giá khả năng quan sát của hệ thống và lựa chọn phương án tối ưu dựa trê hai chỉ số 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) [114].

Quy ước quan sát hệ thống được sử dụng dựa trên những đặc điểm của PMU và các định luật Ohm, định luật Kirchoff như sau [21]:

- Tại nút đặt PMU: biết các giá trị điện áp nút đó và dòng điện trên các nhánh nối với nút đó.

- Nếu biết giá trị điện áp và dòng điện tại một nút của nhánh thì thông qua định luật Ohm sẽ tính được giá trị góc pha điện áp ở nút còn lại.

- Nếu biết góc pha điện áp của hai nút thì sẽ tính được góc pha dòng điện trên nhánh nối hai nút đó.

Hàm ràng buộc của bài toán OPP:

$$f(x) = A.X \geq b \quad (2\text{-}4)$$

Trong đó:

- A là ma trận kết

$$A_{ij}=\begin{cases} 1 \text{ nếu i = j hoặc nút i nối với nút j} \\ 0 \text{ nếu nút i không nối với nút j} \end{cases} \quad (2\text{-}5)$$

- b là ma trận có giá trị của các phần tử đều bằng 1 hoặc 2 tùy bài toán.

2.1.3. Hàm ràng buộc khi có xét đến nút trung gian trong các công bố trước đây

Khi có xét ảnh hưởng của nút ZIB thường cần thành lập lại hàm ràng buộc với việc thêm vào các biến mới, hoặc thành lập lại ma trận kết nối, hoặc dùng các phép biến đổi logic. Một số bài báo đưa ra các mô hình mới của hàm ràng buộc nhưng một số kết quả đưa ra chưa đảm bảo hệ thống được quan sát hoàn toàn như trong bài báo [113], [70]. Một số bài báo khác cho kết quả tốt hơn, với điều kiện quan sát được đảm bảo, như trong các bài báo [88], [73], [67], [74].

2.2. Đề xuất thuật toán di truyền với cách tính chỉ số quan sát đơn giản cho bài toán tìm số lượng và vị trí đặt thiết bị đo tối ưu

Quá trình tính toán chỉ số quan sát theo ba bước:

Bước 1: tính chỉ số quan sát của các nút khi chưa xét nút ZIB

$$F(i)_1 = \sum_{j=1}^{N} A_{ij} x_j \quad , \quad i = 1 \dots N \tag{2-11}$$

Bước 2: tính chỉ số quan sát khi có xét ảnh hưởng của nút ZIB

$$F(i)_2 = F(i)_1 + \sum_{k=1}^{Nzib} \left(\prod_{\substack{n \neq i \\ n \in Gzib(k)}} F(n)_1 - x_k \right) \tag{2-12}$$

$$n = 1 \dots m$$

Bước 3: tính chỉ số quan sát có xét đến ảnh hưởng quan sát của nút ZIB tới nút ZIB khác

$$F(i)_3 = F(i)_2 + \sum_{k=1}^{Nzib} \left(\prod_{\substack{n \neq i \\ n \in Gzib(k)}} F(n)_2 - \prod_{\substack{n \neq i \\ n \in Gzib(k)}} F(n)_1 \right) \tag{2-13}$$

Khi áp dụng thuật toán di truyền vào giải quyết bài toán tối ưu hóa số lượng và vị trí đặt thiết bị đo PMU, mỗi gen trong cá thể sẽ tương ứng với việc đặt PMU tại một nút. Nếu hệ thống có N nút, cá thể sẽ gồm N gen và mỗi gen sẽ nhận giá trị 0 hoặc 1. Nếu gen ở vị trí thứ 10 của cá thể có giá trị là 1 thì có nghĩa là tại nút 10 sẽ đặt PMU. Dữ liệu đầu vào của bài toán gồm dữ liệu kết nối của lưới điện, vị trí nút ZIB, RB.

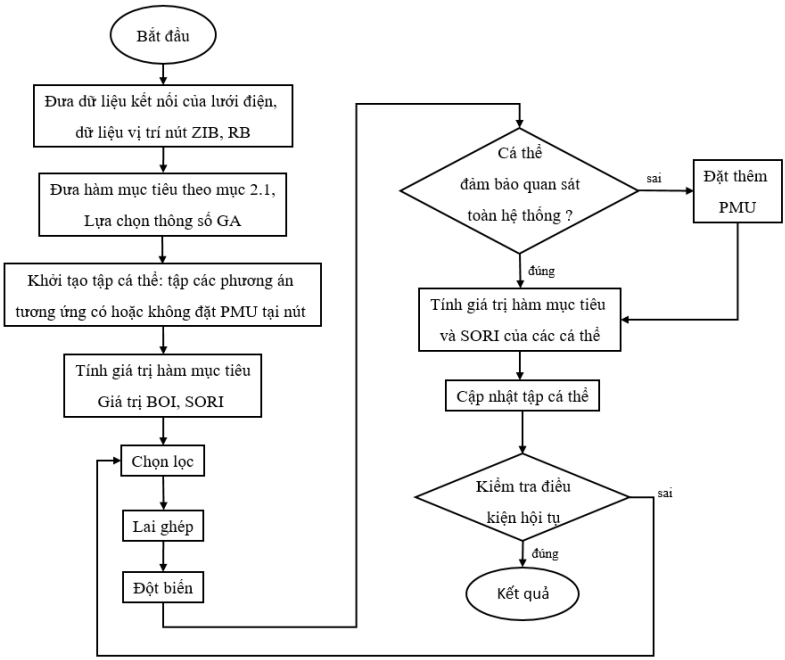
2.3. Kiểm chứng thuật toán trên lưới điện IEEE

- Trường hợp 1: Tìm vị trí đặt PMU khi không xét đến loại nút (ZIB và RB).
- Trường hợp 2: Tìm vị trí đặt PMU khi có xét đến loại nút (ZIB và RB).
- Trường hợp 3: Tìm vị trí đặt PMU trong trường hợp xét đến việc mất dữ liệu từ một PMU.

2.3.1. Dữ liệu lưới điện mô phỏng

2.3.2. Kết quả mô phỏng trường hợp 1: Tìm vị trí đặt PMU khi không xét đến loại nút

Trường hợp này tất cả các nút trên lưới đều được coi là nút có khả năng đặt PMU. Kết quả mông phỏng cho thấy cần 4, 10 và 32 PMU tương ứng cho lưới 14, 30 và 118 nút để đảm bảo hệ thống được quan sát đầy đủ.



Hình 2-5. Sơ đồ khối thuật toán GA cho bài toán OPP

2.3.3. Kết quả mô phỏng trường hợp 2: Tìm vị trí đặt PMU khi có xét đến loại nút

Kết quả mô phỏng cho thấy cần 3 PMU cho lưới điện 14 nút, 7 PMU cho lưới điện 30 nút và 29 PMU cho lưới điện 118 nút, ít hơn so với trường hợp 1, nhưng vẫn đảm bảo điều kiện quan sát của hệ thống.

2.3.4. Kết quả mô phỏng trường hợp 3: Tìm vị trí đặt PMU trong trường hợp xét đến việc mất dữ liệu từ một PMU

Trong trường hợp này vị trí đặt PMU sẽ được chọn để thỏa mãn mỗi nút được quan sát bởi ít nhất hai PMU. Ở lưới điện 14 nút, với cùng giá trị của tổng số lần quan sát là 35 và số lượng 7 PMU, có hai lựa chọn đặt PMU. Lưới điện 30 nút, có 8 lựa chọn đặt 14 PMU với

tổng số lần quan sát hệ thống bằng 80. Đối với lưới điện 118 nút, ta có hai lựa chọn vị trí đặt 60 PMU với chỉ số SORI bằng 310.

2.3.5. So sánh kết quả mô phỏng của ba lưới điện IEEE

Bảng 2-121. So sánh các kết quả đối với trường hợp 3 (sự cố một PMU)

Tài liệu	**Luận án**	[54]	[25]	[91]	[72]
14 nút	7	7	7	7	9
30 nút	14	14	15	15	-
118 nút	60	57	62	64	72
Tài liệu	[30]	[67]	[88]	[43]	[41]
14 nút	-	7	7	7	7
30 nút	21	16	14	14	14
118 nút	68	62	61	61	61

Bảng 2-13. So sánh các kết quả sử dụng GA cho bài toán OPP

Tài liệu	**Luận án**			[63]			[75]		
Trường hợp	1	2	3	1	2	3	1	2	3
14 nút	4	3	7	-	-	-	4	-	-
30 nút	10	7	14	10	7	-	10	-	-
118 nút	32	28	60	37	32	-	32	-	-
Tài liệu	[114]			[16]			[77]		
Trường hợp	1	2	3	1	2	3	1	2	3
14 nút	4	3	9	4	3	-	-	3	7
30 nút	10	7	21	10	7	-	-	7	14
118 nút	32	28	68	32	29	-	-	29	61
Tài liệu	[21]			[19]					
Trường hợp	1	2	3	1	2	3			
14 nút	4	3	-	3	3	-			
30 nút	10	7	-	7	7	-			
118 nút	33	29	-	28	28	-			

Số lượng thiết bị PMU cần dùng cho trường hợp 1 và trường hợp 2 là tương đương với hầu hết các công bố trước đây đối với các lưới điện IEEE 14 nút, 30 nút, và 118 nút. Trong trường hợp 3, Bảng 2-12 ta thấy đối với lưới điện 118 nút, kết quả đạt được của thuật toán đề

xuất trong luận án tốt hơn so với một số công bố trước đây. Cụ thể, thuật toán đưa ra 60 thiết bị PMU so với số lượng 61, 62, 64 hoặc 68 PMU ở các công bố trước đó. Nhìn vào Bảng 2-13, chỉ có 2/7 bài báo tham khảo (bài [114] và [77]) xem xét giải quyết bài toán OPP trong trường hợp 3. Hai bài báo này cũng yêu cầu số lượng PMU nhiều hơn đối với trường hợp 3, cụ thể là 68 PMU ở bài báo [114] và 61 PMU ở bài báo [77]. Các kết quả cho thấy thuật toán có tính tin cậy và có thể áp dụng nghiên cứu cho các lưới điện khác.

2.4. Mô phỏng với lưới điện truyền tải 350 nút của Việt Nam

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

Bảng 2-14. Kết quả bài toán OPP lưới truyền tải 350 nút Việt Nam trường hợp 1

Số lượng PMU	Vị trí đặt PMU khi không xét nút trung gian	Giá trị SORI
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

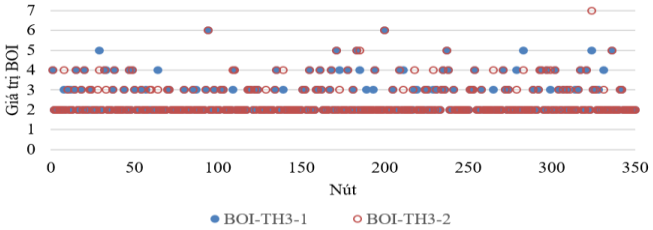
2.4.2. Trường hợp 2: tìm vị trí đặt PMU tối ưu khi xét đến ảnh hưởng của nút ZIB

Bảng 2-15. Kết quả bài toán OPP lưới truyền tải 350 nút Việt Nam trường hợp 2

Số lượng PMU	Vị trí đặt PMU khi có xét nút trung gian	Giá trị SORI

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

2.4.3. Trường hợp 3: tìm vị trí đặt PMU tối ưu khi sự cố một PMU, không xét đến ảnh hưởng của nút ZIB



Hình 2-12. Giá trị BOI của lưới truyền tải 350 nút Việt Nam (trường hợp 3)

Trường hợp thứ ba được xem xét trong trường hợp bị mất dữ liệu từ một PMU. 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. Chỉ số BOI của lưới điện 350 nút Việt Nam được thể hiện trên Hình 2-12.

2.4.4. Trường hợp 4: tìm vị trí đặt PMU tối ưu khi sự cố một PMU, có xét đến ảnh hưởng của nút ZIB

Trường hợp 4 cũng được mô phỏng khi xét sự cố của một thiết bị PMU bất kì, có xét đến ảnh hưởng của các nút ZIB. 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.

2.5. Kết luận chương 2

Luận án đề xuất thuật toán di truyền nhị phân cùng với một quá trình tính toán chỉ số quan sát nút được áp dụng để giải quyết bài toán tối ưu hóa số lượng và vị trí đặt thiết bị đo đồng bộ pha sao cho đảm bảo điều kiện quan sát của hệ thống. Việc tính toán để đánh giá quan sát hệ thống trở nên đơn giản hơn so với các công bố trước đây vì không cần đưa thêm các biến phụ trợ, không cần thực hiện biến đổi đơn giảm hàm ràng buộc, cũng như không cần thực hiện các biến đổi về cấu hình của hệ thống.

Sau khi đánh giá tính chính xác và hợp lý của thuật toán, luận án tiến hành áp dụng để giải quyết bài toán tối ưu hóa số lượng và vị trí đặt PMU cho lưới điện truyền tải điện của Việt Nam gồm 350 nút, 652 nhánh.

Các kết quả nghiên cứu trình bày trong chương này được công bố trong các bài báo [4], [5].

CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU ÁP DỤNG THUẬT TOÁN DI TRUYỀN VÀ THUẬT TOÁN TỐI ƯU BẦY ĐÀN ĐỂ ƯỚC LƯỢNG TRẠNG THÁI HỆ THỐNG ĐIỆN

3.1. Mô hình bài toán ước lượng trạng thái hệ thống điện

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

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \ldots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \ldots, x_n) \\ \vdots \\ h_M(x_1, x_2, \ldots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} = h(x) + e \qquad (3\text{-}2)$$

$$x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max} \qquad (3\text{-}3)$$

Cực tiểu hoá hàm mục tiêu sau [12]:

$$J(x) = w_i^2(z_i - h_i(x))^2 = \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{\sigma_i^2} e_i^2 \quad (3\text{-}8)$$

Khi sử dụng các thuật toán làm việc với bài toán cực trị không ràng buộc, ta có thể đưa bài toán tìm cực trị có ràng buộc về bài toán không ràng buộc bằng cách thêm hàm phạt P(x) vào hàm mục tiêu J(x). Hàm mục tiêu của bài toán trở thành:

$$F(x) = J(x) + P(x) \quad (3\text{-}9)$$

$$P(x) = \lambda \sum_{i=1}^{n} \{\max(0, x_i - x_i^{max})\}^2 + \lambda \sum_{i=1}^{n} \{\max(0, x_i^{min} - x_i)\}^2 \quad (3\text{-}10)$$

với n là số biến trạng thái và λ là hệ số phạt.

3.2. Ứng dụng thuật toán tối ưu bầy đàn để ước lượng trạng thái hệ thống điện

3.2.1. Mô phỏng lưới điện IEEE 14 nút

Với trường hợp sử dụng 29 phép đo, sai số lớn nhất với giá trị ước lượng điện áp là khoảng 0,04%, sai số lớn nhất với giá trị ước lượng góc pha điện áp là khoảng 0,29%. Khi sử dụng 28 phép đo đa phần cho kết quả nằm trong phạm vi sai số cho phép. Tuy nhiên còn một vài trường hợp sai số còn cao. Sai số đối với kết quả tính toán ước lượng điện áp tại các nút đều nhỏ hơn 2,5%, còn góc pha tại các nút, trường hợp sai số lớn là 10,4%.

3.2.2. Mô phỏng lưới điện IEEE 30 nút

Trường hợp 1 có kết quả ước lượng tốt nhất với sai số 4,05%, tương ứng với việc đặt giá trị $x_{id} = p_{id}$ khi x_{id} vi phạm giới hạn. Trường hợp 4 có kết quả ước lượng cũng khá tốt, với sai số khoảng 5,53%, là trường hợp sử dụng hàm phạt trong hàm mục tiêu. Kết quả mô phỏng này cho thấy tính khả thi của việc áp dụng thuật toán PSO vào giải quyết bài toán ước lượng trạng thái hệ thống điện.

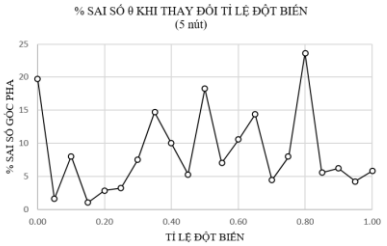
3.3. Ứng dụng thuật toán di truyền để ước lượng trạng thái hệ thống điện

- Với bài toán ước lượng trạng thái hệ thống điện, mỗi gen trong cá thể sẽ tương ứng với một biến trạng thái, là các giá trị của modun điện áp nút và góc pha điện áp.

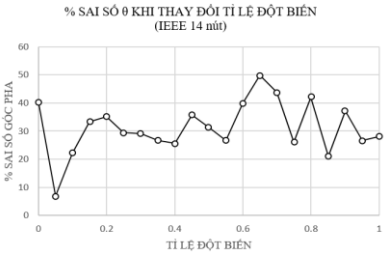
- Dữ liệu bài toán bao gồm các dữ liệu như dữ liệu kết nối của lưới điện, thông số các nút, thông số đường dây, máy biến áp.

3.3.1. Ảnh hưởng của tỉ lệ đột biến đến kết quả ước lượng trạng thái

Lưới điện 5 nút, ta thấy với Mp = 0,05 và 0,15 bài toán có kết quả ước lượng modun điện áp và góc pha điện áp tốt hơn so với các trường hợp khác, với sai số nhỏ hơn 2%. Đối với lưới điện IEEE 14 nút, đa số modun điện áp đều có sai số nhỏ hơn 5%, trừ trường hợp Mp = 0,45 và Mp = 0,6. Trường hợp Mp = 0,05 cho kết quả ước lượng trạng thái tốt nhất cả về giá trị modun điện áp và góc pha điện áp.

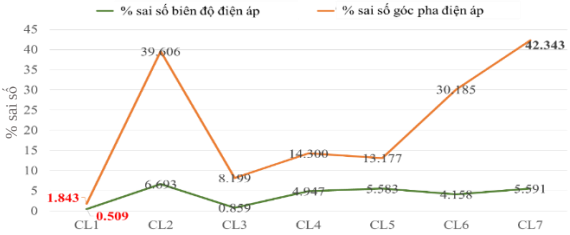


Hình 3-5. Giá trị sai số lớn nhất của góc pha điện áp lưới 5 nút khi thay đổi Mp



Hình 3-7. Giá trị sai số lớn nhất của góc pha điện áp lưới 14 nút khi thay đổi Mp

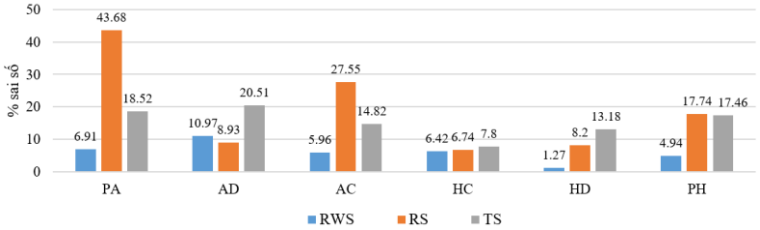
3.3.2. Lựa chọn hàm chọn lọc thích hợp cho bài toán ước lượng trạng thái



Hình 3-9. Giá trị sai số lớn nhất của biên độ và góc pha điện áp của lưới điện 14 nút khi sử dụng các hàm chọn lọc khác nhau

Quá trình chọn lọc cá thể để đưa vào tập cá thể bố mẹ có ảnh hưởng nhiều đến kết quả của bài toán khi sử dụng thuật toán di truyền. Với lưới điện 5 nút, kết quả ước lượng góc pha có sai số nhỏ hơn 1% khi sử dụng các phép chọn lọc CL1, CL4, CL5 và CL6. Đối với lưới điện IEEE 14 nút, Hình 3-9 cho thấy kết quả ước lượng modun điện áp khi sử dụng phép chọn lọc theo bánh xe Roulette và phép chọn lọc theo thứ hạng có sai số nhỏ hơn 1%, nhưng chỉ có trường hợp sử dụng phép chọn lọc theo bánh xe Roulette cho kết quả ước lượng góc pha tốt với sai số khoảng 1,8%.

3.3.3. Lựa chọn kết hợp giữa phép chọn lọc và phép lai ghép



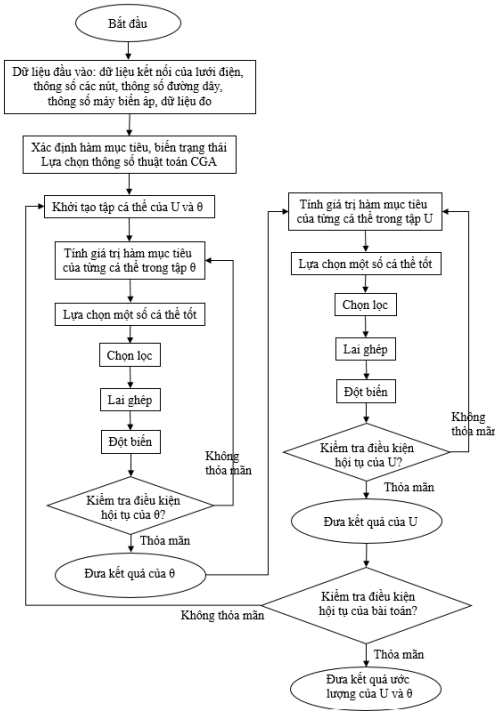
Hình 3-13. Giá trị sai số lớn nhất của kết quả ước lượng góc pha điện áp cho lưới điện 14 nút khi xét 18 kết hợp giữa hàm chọn lọc và hàm lai ghép

Từ các kết quả thể hiện trong Hình 3-12 và Hình 3-13, ta thấy rằng kết hợp RWS-HD có kết quả với sai số ổn định nhất với giá trị sai số

lớn nhất là 0,99% ở lưới 5 nút và 1,27% ở lưới 14 nút. Trong khi các trường hợp khác có sai số thay đổi rất nhiều.

3.4. Đề xuất thuật toán với quá trình ước lượng tách rời modun điện áp và góc pha điện áp

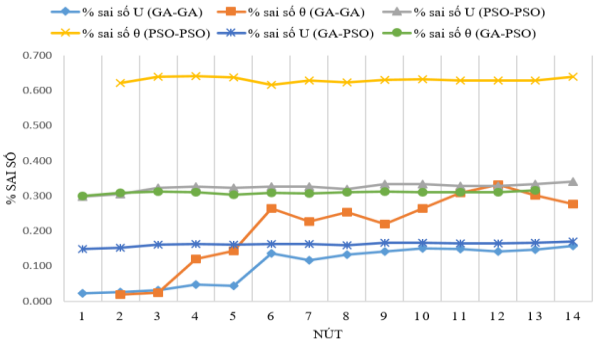
Việc cùng biến đổi cả hai giá trị modun điện áp và góc pha điện áp trong quá trình tìm kiếm nghiệm khi sử dụng thuật toán di truyền và thuật toán tối ưu bầy đàn có thể khiến thuật toán bỏ qua các trường hợp nghiệm tương ứng với giá trị modun điện áp hoặc góc pha điện áp tốt. Từ đó, luận án đề xuất thuật toán với hai quá trình ước lượng modun và góc pha tách biệt. Quá trình ước lượng này được thực hiện theo vòng lặp.



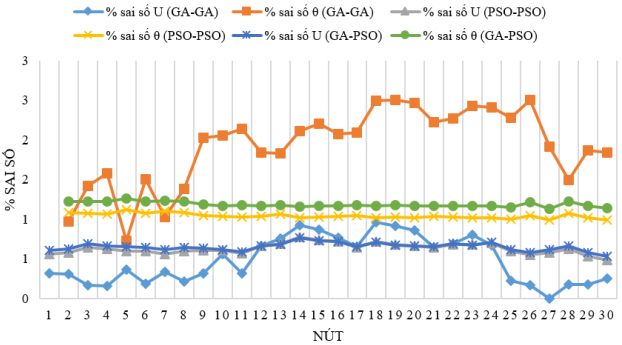
Hình 3-14. Sơ đồ khối tính ước lượng trạng thái sử dụng CGA - CGA

3.4.1. Kết quả ước lượng cho lưới điện IEEE 14 nút, 30 nút và 118 nút khi dùng số liệu đo công suất P, Q tại các nút và một phép đo điện áp nút.

Các kết quả được đưa ra cho thấy các thuật toán đề xuất đều có kết quả ước lượng tốt, với sai số của modun điện áp và góc pha điện áp đều nhỏ hơn 1% đối với lưới điện 14 nút và nhỏ hơn 2,6% ở lưới điện 30 nút. Tuy nhiên, trường hợp sử dụng 2N+1 dữ liệu đo này, các thuật toán đưa ra kết quả ước lượng cho lưới điện 118 nút với sai số rất lớn.



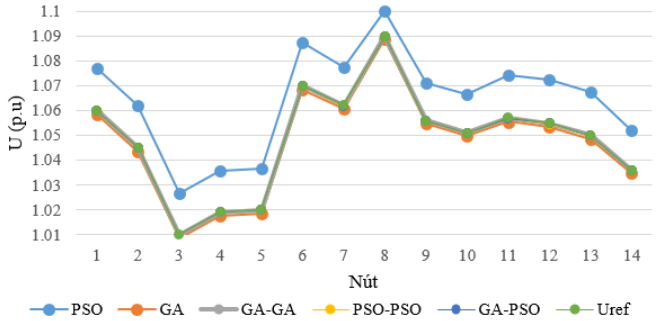
Hình 3-17. % sai số kết quả ước lượng khi dùng CGA-CGA, PSO-PSO và CGA-PSO cho lưới điện 14 nút (29 phép đo)



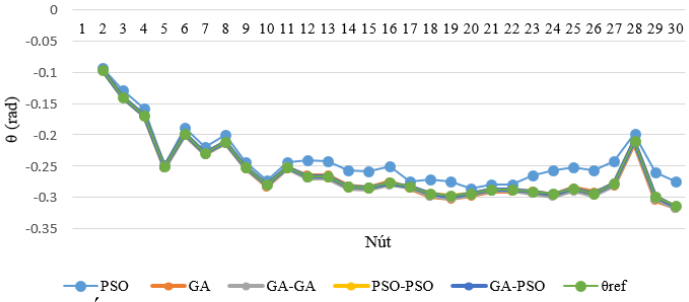
Hình 3-18. % sai số kết quả ước lượng khi dùng CGA-CGA, PSO-PSO và CGA-PSO cho lưới điện 30 nút (61 phép đo)

3.4.2. Kết quả mô phỏng cho lưới điện IEEE 14 nút, IEEE 30 nút và IEEE 118 nút khi dùng dữ liệu đo từ PMU

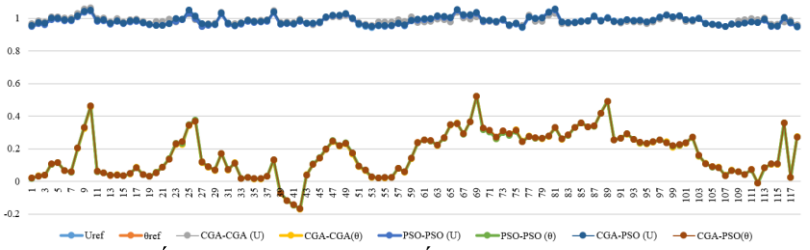
Hình 3-19 đến Hình 3-23 thể hiện so sánh khi mô phỏng cho lưới điện 14, 30 và 118 nút khi sử dụng dữ liệu đầu vào là các giá trị đo từ PMU. Thuật toán ước lượng tách rời đạt kết quả ước lượng với sai số modun và góc pha điện áp tốt hơn nhiều so với trường hợp ước lượng đồng thời. Với lưới điện 118 nút, thuật toán ước lượng đồng thời cho kết quả với sai số rất lớn, trong khi đó Hình 3-23 cho thấy rằng các đường biểu diễn giá trị ước lượng của modun điện áp và góc pha điện áp của các thuật toán ước lượng tách biến đề xuất rất gần hoặc bằng với giá trị thực.



Hình 3-19. Kết quả ước lượng U khi dùng dữ liệu đo từ PMU của lưới điện 14 nút



Hình 3-22. Kết quả ước lượng θ khi dùng dữ liệu đo từ PMU của lưới điện 30 nút



Hình 3-23. Kết quả ước lượng tách biến với dữ liệu từ PMU của lưới điện 118 nút

3.5. So sánh kết quả mô phỏng

Bảng 3-13. So sánh với các kết quả ước lượng trạng thái đã công bố

	% sai số lớn nhất của kết quả ước lượng		
Tài liệu	**14 nút**	**30 nút**	**118 nút**
Luận án (GA-GA)	1,360	1,743	8,924
Luận án (GA-PSO)	0,035	0,573	10,521
[102]	-	9,4	-
[108]	0,6	-	-
[85]	0,8	-	-
[53]	4,88	2,2	6,98
[57]	-	-	-
[103]	0,657	0,502	0,851
[48]	-	-	-
[51]	2,09	-	-
[61]	-	9,85	-

Nhìn Bảng 3-13 ta thấy huật toán đề xuất có thể giải quyết bài toán ước lượng trạng thái cho lưới điện truyền tải có nhiều nút với sai số khá tốt, trong khi rất nhiều bài báo chỉ đưa các kết quả đối với lưới điện nhỏ. Như vậy, các nghiên cứu trong luận án đã giải quyết được những hạn chế trước đó của các nghiên cứu chỉ sử dụng thuật toán di truyền, khi các tác giả trong các bài báo [57], [48] chỉ áp dụng thuật toán di truyền với lưới điện có không quá 6 nút.

3.6. Kết luận chương 3

Chương 3 trình bày nghiên cứu về bài toán ước lượng giá trị các biến trạng thái của hệ thống điện khi sử dụng thông tin từ các thiết bị đo trên lưới và sử dụng thuật toán di truyền và thuật toán tối ưu bầy đàn. Luận án đã đề xuất một quá trình tính toán ước lượng trạng thái hệ thống điện, thực hiện tách riêng giữa việc ước lượng modun điện áp và góc pha điện áp. Tính khả thi của thuật toán đề xuất (cá thể tách riêng U và θ) được thấy rõ hơn so với thuật toán ước lượng đồng thời (cá thể gồm cả U và θ) khi số lượng biến trạng thái tăng lên, như xét với lưới điện 30 nút và 118 nút.

Các nội dung nghiên cứu trong chương 3 đã được công bố trong các bài báo [1], [2], [3], [6], [7].

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Dựa vào các tổng hợp, phân tích nghiên cứu về các bài toán OPP và PSSE, cũng như dựa trên cơ sở lý thuyết của thuật toán di truyền và thuật toán tối ưu bầy đàn, luận án đã nghiên cứu áp dụng để giải quyết hai bài toán là tối ưu hóa số lượng và vị trí đặt thiết bị đo đồng bộ pha đảm bảo điều kiện quan sát của hệ thống, và bài toán ước lượng giá trị biến trạng thái. Các kết quả đạt được trong luận án đã thực hiện đầy đủ các mục tiêu nghiên cứu đặt ra.

Để nghiên cứu bài toán OPP, luận án đã đề xuất một quá trình tính toán chỉ số quan sát nút có xét đến ảnh hưởng của nút ZIB, sử dụng thuật toán di truyền nhị phân để giải quyết, đưa ra các phương án đảm bảo điều kiện quan sát của hệ thống. Bên cạnh đó, luận án đã áp dụng thuật toán để thực hiện nghiên cứu đối với mô hình lưới truyền tải 350 nút của Việt Nam. Các trường hợp mô phỏng được thực hiện với việc đảm bảo quan sát hệ thống trong trường hợp không xét sự cố của PMU

và khi xét sự cố PMU, có hoặc không xét ảnh hưởng của nút ZIB. Để đánh giá tính khả thi và ưu điểm của thuật toán sử dụng trong luận án, các so sánh với các kết quả nghiên cứu trước đây đã được thực hiện.

Bài toán ước lượng trạng thái hệ thống điện cũng đã được nghiên cứu giải quyết trong luận án. Cụ thể, với thuật toán PSO, nghiên cứu có xét đến ảnh hưởng của loại phép đo và ảnh hưởng của cách cập nhật vị trí cá thể, cũng như khi hàm mục tiêu có hay không có hàm phạt đến kết quả bài toán. Đối với thuật toán di truyền, luận án đã thực hiện nghiên cứu chi tiết đến các quá trình lai ghép, chọn lọc, đột biến và đưa ra thuật toán phù hợp. Sau khi thực hiện các mô phỏng, quá trình chọn lọc theo bánh xe roulette và lai ghép heuristic là kết hợp phù hợp khi sử dụng CGA cho bài toán này. Bên cạnh đó, luận án đã nghiên cứu đề xuất được giải thuật ước lượng trạng thái sử dụng thuật toán di truyền và thuật toán tối ưu bầy đàn với quá trình tách biến. Các thuật toán đề xuất có thể được ứng dụng giải quyết các lưới điện có số nút lớn.

Hướng phát triển tiếp theo của luận án

- Nghiên cứu ước lượng trạng thái khi sử dụng kết hợp dữ liệu đo từ hệ thống SCADA và từ thiết bị đo PMU.

- Nghiên cứu bài toán ước lượng trạng thái với hệ thống điện Việt Nam khi có các nguồn điện mới, đặc biệt là các nguồn điện phân tán.

- Nghiên cứu bài toán tối ưu hóa số lượng và vị trí đặt thiết bị PMU với lưới điện Việt Nam khi xét thêm thông tin về các vị trí đã có thiết bị đo. Bên cạnh đó, so sánh giữa kết quả nghiên cứu với thực tế tính toán đặt thiết bị PMU trên lưới.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA LUẬN ÁN

1. Trần Thanh Sơn, Đặng Thu Huyền, Kiều Thị Thanh Hoa (2019), Ảnh hưởng của loại và vị trí phép đo tới kết quả ước lượng trạng thái hệ thống điện bằng thuật toán tối ưu bầy đàn, *Tạp chí khoa học và công nghệ năng lượng - Trường đại học Điện lực*, 19, 1-8. (Đăng trước khi có quyết định công nhận nghiên cứu sinh)
2. Trần Thanh Sơn, Kiều Thị Thanh Hoa (2020), Ảnh hưởng của tỉ lệ đột biến tới kết quả ước lượng trạng thái hệ thống điện bằng thuật toán di truyền, *Tạp chí khoa học công nghệ và năng lượng - Trường Đại học Điện lực*, 23, 61-70.
3. Tran Thanh Son, Kieu Thi Thanh Hoa (2021), Choice of Selection Methods in Genetic Algorithms for Power System State Estimation, *In: Sattler KU., Nguyen D.C., Vu N.P., Long B.T., Puta H. (eds) Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*, 178, Springer Cham, 223-231.
4. Trần Thanh Sơn, Kiều Thị Thanh Hoa (2022), 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, *Tạp Chí Khoa học Và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, 20(8), 99–104.
5. Tran Thanh Son, Kieu Thi Thanh Hoa (2023), A New Technique of Genetic Algorithm for Optimal Placement of Phasor Measurement Units in Power System Observability, *GMSARN International Journal*, 17(2), 220-231.
6. Tran Thanh Son, Kieu Thi Thanh Hoa, Le Duc Tung (2023), Decoupling of voltage magnitude and phase in genetic algorithms for smart transmission network state estimation, *Frontiers in Energy Research*, 11, 1204072.
7. Kieu Thi Thanh Hoa, Tran Thanh Son (2023), "Appropriate Combination of Selection and Crossover Functions in Genetic Algorithm for Power System State Estimation", *2023 IEEE Asia Meeting on Environment and Electrical Engineering (EEE-AM),* đã được chấp nhận ngày 11/10/2023.