

DOI:10.22144/ctujos.2025.020

TỐI ƯU VỊ TRÍ LẮP ĐẶT THIẾT BỊ ĐO LƯỜNG PHA TRÊN LƯỚI ĐIỆN 500 kV VIỆT NAM

Nguyễn Phúc Khải^{1,2*} và Dương Thị Lệ Huyền³

¹Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Bách khoa Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

³Công ty Cổ phần Tư vấn Xây dựng Điện 2, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): phuckhai@hcmut.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 28/06/2024

Sửa bài (Revised): 31/07/2024

Duyệt đăng (Accepted): 02/01/2025

Title: Optimal placement of phasor measurement units in Vietnam's 500 kV grid

Author(s): Nguyen Phuc Khai^{1,2*} and Duong Thi Le Huyen³

Affiliation(s): ¹Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology, Viet Nam; ²Vietnam National University Ho Chi Minh City, Viet Nam; ³Power Engineering Consulting Joint Stock Company 2, Viet Nam

TÓM TẮT

Thiết bị đo lường pha là thiết bị giám sát lưới điện trên diện rộng giúp các đơn vị vận hành lưới điện tính toán nhanh độ ổn định của hệ thống điện. Tuy nhiên, chi phí lắp đặt thiết bị đo lường pha khá cao và đòi hỏi hạ tầng truyền tải thông tin phức tạp. Vì vậy, mục tiêu của bài toán là xác định ngưỡng cực tiểu số lượng và vị trí lắp đặt thiết bị đo lường pha mà vẫn đảm bảo giám sát toàn diện hệ thống điện dựa trên quy hoạch tuyến tính số nguyên. Việc sử dụng kết hợp thiết bị đo lường pha và các phép đo dòng công suất hiện hữu khác trong hệ thống được nghiên cứu. Công cụ tính toán tối ưu của phần mềm Matlab được áp dụng giải bài toán trên các hệ thống điện có 7 nút, hệ thống IEEE 14 nút và hệ thống lưới 500 kV Việt Nam. Kết quả cho thấy hệ thống điện 500 kV Việt Nam với ước lượng 37 thanh cái 500 kV thì số lượng thiết bị đo lường pha tối thiểu là 10 bộ.

Từ khóa: Lưới điện 500 kV, quy hoạch tuyến tính số nguyên, tối ưu vị trí lắp đặt, thiết bị đo lường pha

ABSTRACT

A phasor measurement unit (PMU) is a large-scale grid monitoring device used by grid operators to assess the stability of the power system. However, installing PMUs is expensive and requires a complex information transmission infrastructure. Therefore, the goal is to determine the minimum number and optimal locations of PMUs needed to ensure comprehensive monitoring of the power system. This is achieved using integer linear programming, where the system combines PMUs with existing power flow measurements. The optimization calculations were performed using Matlab software to solve power system problems with 7 nodes, IEEE 14 nodes, and Vietnam's 500 kV grid system. The results indicate that Vietnam's 500 kV power system, with an estimated 37 buses, requires a minimum of 10 PMUs for effective monitoring.

Keywords: Linear integer program, optimal placement, phasor measurement unit, 500 kV power grid

1. GIỚI THIỆU

Thiết bị đo góc pha – Phasor Measurement Unit (PMU) là thiết bị có khả năng đồng bộ góc pha, tần số và tốc độ thay đổi của tần số thông qua việc đo các tín hiệu điện áp và/hoặc dòng điện và tín hiệu đồng bộ thời gian (Martin et al., 1998). Thiết bị PMU sử dụng thời gian chuẩn dựa trên đồng hồ vệ tinh, qua đó cho phép các tín hiệu tại các vị trí khác nhau trong hệ thống được đo trong cùng một mốc thời gian. Với độ chính xác cao, thiết bị cho phép so sánh được góc pha giữa các điểm khác nhau trong hệ thống điện. Độ chênh lệch góc pha giữa các nút đặc trưng cho trào lưu công suất truyền tải giữa chúng và là một thông tin quan trọng cho phép đánh giá mức độ ổn định của hệ thống điện.

Thiết bị PMU được đặt tại một số thanh cái để quan sát điện áp, góc pha tại thanh cái đó cũng như dòng điện, góc pha dòng điện đi qua và một số hoặc tất cả các dòng sự cố. Tuy nhiên, không thể lắp đặt thiết bị PMU ở tất cả thanh cái của hệ thống điện vì chi phí PMU khá cao và hạ tầng hệ thống thông tin liên lạc chưa đáp ứng được ở một số trạm biến áp. Hơn nữa, khi PMU được đặt tại một thanh cái, các thanh cái liền kề cũng xác định được giá trị điện áp, dòng điện trên các nhánh và góc pha dòng điện dựa trên giá trị tổng trở đường dây thông qua định luật Ohms (Dusabimana & Yoon 2020). Điều này đồng nghĩa với việc một hệ thống có thể được quan sát toàn diện với số lượng PMU nhỏ hơn số lượng thanh cái hiện có của hệ thống. Mục tiêu của vấn đề tối ưu vị trí lắp đặt PMU là xác định số lượng PMU tối thiểu và vị trí tương ứng của chúng để đạt được khả năng quan sát mạng đầy đủ.

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu quan trọng về vấn đề tối ưu vị trí lắp đặt thiết bị PMU được thực hiện. Các phương pháp cho bài toán lắp đặt PMU tối ưu có thể được phân thành hai loại là thuật toán toán học và thuật toán ngẫu nhiên. Một số phương pháp toán học tiêu biểu như phương pháp tìm kiếm toàn diện (Azizi et al., 2012; Mabaning et al., 2016), phương pháp quy hoạch số nguyên toàn phương (Theodorakatos et al., 2015). Các thuật toán tìm kiếm ngẫu nhiên có khả năng giải được những lưới điện có quy mô lớn hơn phương pháp toán học. Phương pháp Tabu search đã được áp dụng cho lưới điện IEEE 118 nút (Koutsoukis et al., 2013). Phương pháp hoa thụ phấn (Pollination algorithm) đã được áp dụng cho lưới điện tiêu chuẩn IEEE 118 nút và các lưới điện thực tế của New England (39 nút), Canal Network (49 nút), và Western Delta Network (52 nút, thuộc Cộng hòa Ai Cập) (Yang et al., 2014; Hassanin et al., 2017). Đáng kể nhất là

thuật toán gen, Liu et al. (2016) đã kết hợp thuật toán gen và mô hình “map reduce” để giải bài toán tối ưu hóa vị trí lắp đặt thiết bị PMU. Phương pháp đã giải bài toán cho lưới điện 2383 nút (Akachukwu et al., 2014; Liu et al., 2016). Trong nước, Tran & Kieu (2022) đã đề xuất sử dụng thuật toán di truyền để tính toán tối ưu PMU. Tuy nhiên, với quy mô lưới điện 500 kV của Việt Nam có 37 nút (tính đến hết năm 2020), các tác giả đã áp dụng phương pháp quy hoạch số nguyên tuyến tính để giải quyết bài toán.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Thiết bị PMU đo điện áp pha tại thanh cái được lắp đặt và pha dòng điện của tất cả các đường dây nối vào thanh cái này. Do đó, khi một thanh cái được lắp đặt thiết bị PMU thì tất cả các thanh cái nối vào thanh cái đó đều được quan sát.

Giả sử hệ thống điện có M nút, ma trận T_{PMU} là ma trận vuông đối xứng $M \times M$ mô tả trạng thái kết nối của các thanh cái trong hệ thống điện. Trong đó, phần tử $t_{ij} = 1$ khi $i = j$ hoặc thanh cái i có kết nối với thanh cái j , và $t_{ij} = 0$ khi thanh cái i không kết nối với thanh cái j .

Gọi X là véc-tơ vị trí cần lắp đặt thiết bị PMU. Số phần tử của véc-tơ X tương ứng với số lượng nút M trong hệ thống, nói cách X là ma trận có kích thước $M \times 1$. Phần tử $x_i = 1$, nếu thanh cái i được lắp thiết bị PMU và $x_i = 0$, nếu ngược lại.

Khi đó, hàm mục tiêu tối thiểu số lượng thiết bị PMU trên hệ thống điện được biểu diễn như sau:

$$\min \sum_{i=1}^M x_i \quad (1)$$

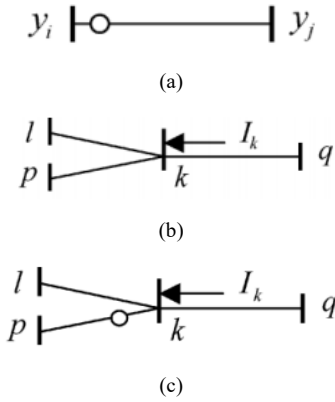
2.1. Trường hợp hệ thống chỉ sử dụng phép đo từ thiết bị PMU và không có thiết bị đo khác

Bài toán có điều kiện ràng buộc về số lần quét qua các nút của thiết bị PMU. Để đảm bảo quan sát được toàn diện hệ thống điện, tất cả các nút trong hệ thống điện đều phải được quét qua. Gọi ma trận Y là ma trận mô tả số lần quét qua của các thiết bị PMU, mỗi phần tử y_i xác định số lần quan sát được tại thanh cái i . Dựa theo định nghĩa đó, ma trận Y bằng tích số của ma trận T_{PMU} và véc-tơ X :

$$Y = T_{PMU}X \quad (2)$$

Điều kiện ràng buộc khi lắp đặt các thiết bị PMU là tất cả các nút đều phải được quan sát ít nhất một lần. Gọi véc-tơ b_{PMU} là véc-tơ điều kiện số lần quan

sát được của M nút. Khi đó, biểu thức của điều kiện ràng buộc được thể hiện như sau:



Hình 1. Các trường hợp thiết bị PMU kết hợp với các phép đo khác

- (a) Trường hợp có 1 phép đo công suất trên đường dây ij
 (b) Trường hợp có 1 phép đo công suất bơm vào thanh cái k
 (c) Trường hợp có cả phép đo công suất đường dây và phép đo công suất bơm vào nút.

$$T_{PMU}X \geq b_{PMU} \quad (3)$$

Trong đó: b_{PMU} là véc-tơ cột có M phần tử như sau:

$$b_{PMU} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{M \times 1} \quad (4)$$

2.2. Trường hợp hệ thống sử dụng kết hợp phép đo từ thiết bị PMU và các phép đo khác

Việc kết hợp phép đo từ thiết bị PMU và các phép đo khác giúp làm giảm số lượng thiết bị PMU cần thiết mà vẫn đảm bảo được việc quan sát toàn hệ thống. Để xác định chính xác số lượng phép đo từ thiết bị PMU, chúng ta xem xét các trường hợp như sau:

Trường hợp 1: có một phép đo công suất trên đường dây ij như Hình 1a:

Khi đó, chỉ cần một phép đo tại nút i hoặc nút j là đủ để quan sát nút còn lại. Nói cách khác tổng số lần quan sát y_i và y_j cần lớn hơn 1. Biểu thức điều kiện số lần quét qua của nút i và nút j là:

$$y_i + y_j \geq 1 \quad (5)$$

Trường hợp 2: có phép đo dòng công suất bơm vào lưới tại một nút như Hình 1b:

Giả sử rằng thanh cái k , kết nối với thanh cái l , p , và q , với vị trí thanh cái k có một phép đo dòng công suất bơm vào lưới. Khi đó, chỉ cần quan sát 3 trong 4 vị trí thanh cái l , k , p , q . Biểu thức điều kiện của các thanh cái l , k , p và q là

$$y_l + y_k + y_p + y_q \geq 3 \quad (6)$$

Trường hợp 3: vừa có phép đo công suất vừa có phép đo dòng công suất bơm vào lưới như Hình 1c:

Giữa nút p và nút k đã có 1 phép đo công suất; do đó áp dụng trường hợp 1, giữa 2 nút này chỉ cần quan sát 1 nút. Ngoài ra, do có phép đo công suất bơm vào lưới tại vị trí k , nên nút giữa nút l và nút q cũng chỉ cần quan sát 1 nút. Tổng hợp cả 2 trường hợp trên, biểu thức điều kiện của các thanh cái l , k , p là

$$\begin{cases} y_p + y_k \geq 1 \\ y_l + y_q \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

Ngoài ba trường hợp trên, các trường hợp còn lại nếu không có phép đo thông thường nào kết nối vào thanh cái thì số lần quan sát của thiết bị PMU vẫn lớn hơn hoặc bằng 1.

Gọi T_{con} là ma trận mô tả trạng thái phép đo của các thanh cái. Dựa trên dữ liệu ban đầu về các phép đo có sẵn, ma trận T_{con} được thành lập gồm 2 thành phần. Thành phần ma trận T_{meas} đại diện cho các thanh cái đã có phép đo hiện hữu. Cách xác định thành phần ma trận T_{meas} dựa trên 3 trường hợp có phép đo công suất nêu trên. Thành phần $I_{N \times N}$ là ma trận đơn vị cấp N , đại diện cho N thanh cái còn lại chưa có phép đo trên hệ thống điện. Véc-tơ điều kiện b_{con} trong trường hợp này có N phần tử đầu tiên bằng 1 tương ứng với N thanh cái chưa có phép đo. Các phần tử còn lại của véc-tơ b_{con} tương ứng với các biểu thức của phép đo công suất có sẵn xác định từ biểu thức (5), (6) và (7).

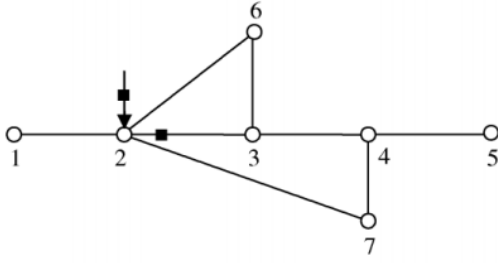
$$\begin{bmatrix} I_{N \times N} & 0 \\ 0 & T_{meas} \end{bmatrix} PY \geq b_{con} \quad (8)$$

Đặt:

$$T_{con} = \begin{bmatrix} I_{N \times N} & 0 \\ 0 & T_{meas} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Do thứ tự của các phép đo trong ma trận T_{con} có thể khác với thứ tự của các thanh cái trong ma trận T_{PMU} , vì vậy biểu thức (8) cần nhân ma trận P để sắp xếp lại cho đúng thứ tự các thanh cái. Biểu thức điều

kiện ràng buộc khi có xét các phép đo khác sẽ được biểu diễn như sau:



Hình 2. Sơ đồ kết nối hệ thống điện 7 nút (Gou, 2008)

$$T_{con} \cdot P \cdot T_{PMU} \cdot X \geq b_{con} \quad (10)$$

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Lưới điện 7 nút

Hệ thống điện được khảo sát gồm 7 nút và 8 nhánh như Hình 2. Tại nút 2, hệ thống sẵn có thiết bị đo công suất bơm vào lưới và thiết bị đo công suất trên nhánh 2-3, đã có sẵn thiết bị đo công suất truyền.

Với sơ đồ kết nối như Hình 2, ma trận T_{PMU} được xác định như sau:

$$T_{PMU} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Theo sơ đồ Hình 2, các thanh cái 1, 3, 6, 7 đều là những thanh cái liên quan trực tiếp đến phép đo công suất trên nhánh 2-3 và phép đo công suất bơm vào tại nút 2. Các thanh cái 4 và 5 không có liên hệ trực tiếp đến các phép đo thông thường này. Trường hợp kết nối trong hình tương ứng với Trường hợp 3 đã nêu trong mục 2.2. Do giữa nút 2 và nút 3 đã có 1 phép đo công suất, nên ta chỉ cần quan sát một trong hai nút. Trong 3 nút còn lại (nút 1, nút 6 và nút 7) do đã có sẵn phép đo công suất bơm vào tại nút 2, nên chỉ cần quan sát 2 trong 3 nút. Điều kiện ràng buộc của nhóm các thanh cái 1, 2, 3, 6, 7 được thể hiện như sau:

$$\begin{cases} y_2 + y_3 \geq 1 \\ y_1 + y_6 + y_7 \geq 2 \end{cases} \quad (12)$$

Từ biểu thức (12), ma trận T_{meas} được thể hiện các phần tử bên trái bất đẳng thức theo thứ tự các nút [1, 2, 3, 6, 7] có dạng:

$$T_{meas} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Do nút 4 và nút 5 không có liên hệ trực tiếp với các phép đo có sẵn, nên 2 nút này đều cần được khảo sát để lắp đặt PMU, ta dùng ma trận đơn vị $I_{2 \times 2}$ để mô tả trạng thái nút 4 và nút 5. Tổng hợp các ma trận mô tả phép đo công suất hiện hữu (13) và ma trận các nút không có phép đo công suất, ta được ma trận T_{con} :

$$T_{con} = \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & 0 \\ 0 & T_{meas} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Trong ma trận T_{con} , hàng 1 và hàng 2 tương ứng với mô tả trạng thái phép đo của nút 4 và nút 5. Do 2 nút này không kết nối trực tiếp với bất cứ phép đo nào khác, nên mỗi nút bị ràng buộc phải được quan sát ít nhất 1 lần. Vì vậy, hai phần tử đầu tiên của véc-tơ b_{con} tương ứng với nút 4 và nút 5 có giá trị bằng 1. Hai phần tử còn lại của véc-tơ b_{con} xác định từ vế phải trong bất đẳng thức (12). Từ đó, véc-tơ b_{con} bằng:

$$b_{con} = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 2]^T \quad (15)$$

Thứ tự của các phép đo trong ma trận T_{con} từ (14) tương ứng với vị trí thanh cái lần lượt là [4, 5, 1, 2, 3, 6, 7], trong khi đó ma trận T_{PMU} lại có trật tự là [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Do đó, ma trận P được thành lập nhằm chuyển trật tự của ma trận T_{con} phù hợp với ma trận T_{PMU} . Ma trận P là ma trận vuông cấp M , trong đó chỉ số hàng tương ứng trật tự của nút trong ma trận T_{PMU} và chỉ số cột tương ứng vị trí thanh cái trong ma trận T_{con} . Trong trường hợp này ma trận P được xác định bằng:

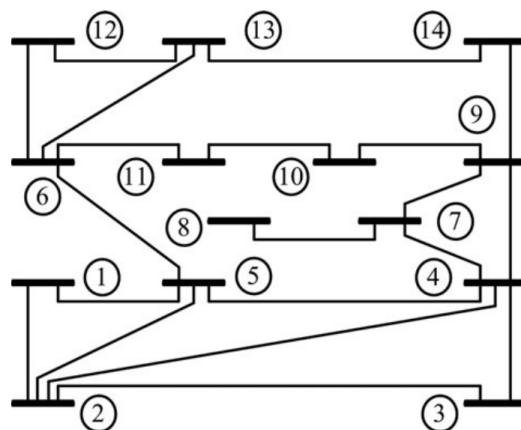
$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Từ những phân tích trên, chúng ta xác định được bài toán quy hoạch tuyến tính số nguyên cho lưới điện 7 nút như sau:

$$\min \sum_{i=1}^7 x_i$$

Điều kiện ràng buộc như (10), trong đó ma trận T_{con} xác định từ (14), ma trận P là ma trận chuyển đổi vị trí của ma trận T_{con} từ (16), ma trận T_{PMU} được xác định từ (11) và ma trận b_{con} được xác định từ (15).

Sử dụng hàm quy hoạch số nguyên *intlinprog()* cho sẵn trong phần mềm Matlab, kết quả tính toán cho thấy hệ thống cần lắp tối thiểu 2 thiết bị PMU tại thanh cái 2 và thanh cái 4.



Hình 3. Sơ đồ kết nối hệ thống điện IEEE 14 nút

Bảng 1. Kết quả tính toán số lượng thiết bị PMU cho lưới điện IEEE 14 nút

Trường hợp	Không có phép đo thông thường		Nút cân bằng tại thanh cái 7	
	Số lượng PMU	Vị trí lắp đặt	Số lượng PMU	Vị trí lắp đặt
Kết quả tính toán	4	2,8,10,13	3	2, 6, 9
Kết quả (Gou, 2008)	4	Không công bố	3	Không công bố
Bintprog (Theodorakatos et al., 2015)	4	2, 6, 7, 9	3	2, 6, 9
CBC solver (Theodorakatos et al., 2015)	4	2, 8, 10, 13	3	2, 6, 9
Fmincon (Theodorakatos et al., 2015)	4	2, 8, 10, 13	3	2, 6, 9

So sánh kết quả với các tác giả đã công bố trước đây cho lưới điện tương tự tại (Gou, 2008), kết quả tính toán đã đúng số lượng tối thiểu là 2 thiết bị, tuy nhiên vị trí lắp đặt có sự khác biệt. Theo kết quả công bố của (Gou, 2008), vị trí lắp đặt là thanh cái 2 và thanh cái 5. So sánh trên sơ đồ ta thấy thanh cái 4 và thanh cái 5 có vai trò tương tự nhau, vì vậy thiết bị PMU lắp đặt ở thanh cái 4 hay thanh cái 5 đều có thể quan sát được thanh cái còn lại. Tuy nhiên, việc lắp đặt PMU tại thanh cái 4 có thể cần nhiều hơn các phép tính phân tích dòng điện do thanh cái 4 kết nối đến nhiều nút khác hơn so với nút 5. Vì vậy, sự khác biệt không làm ảnh hưởng đến khả năng quan sát toàn diện của hệ thống.

3.2. Lưới điện tiêu chuẩn IEEE 14 nút

Các tác giả tiếp tục thực hiện khảo sát trên lưới điện tiêu chuẩn IEEE 14 nút. Lưới điện IEEE 14 nút mô tả khu vực Midwestern, Hoa Kỳ, vào năm 1962. Lưới điện có 14 thanh cái và 20 nhánh kết nối, sơ đồ kết nối của các thanh cái như Hình 4. Trong lưới điện này, các tác giả thực hiện tính toán cho hai trường hợp là trường hợp chỉ sử dụng thiết bị đo là thiết bị PMU, sử dụng điều kiện ràng buộc (3), và trường hợp có nút cân bằng tại thanh cái 7, tương

ứng với phép đo công suất bơm vào và sử dụng điều kiện ràng buộc (10).

Xét riêng trường hợp nút cân bằng tại thanh cái 7, biểu thức điều kiện cho các phép đo xung quanh thanh cái 7 như sau:

$$y_4 + y_7 + y_8 + y_9 \geq 3 \quad (17)$$

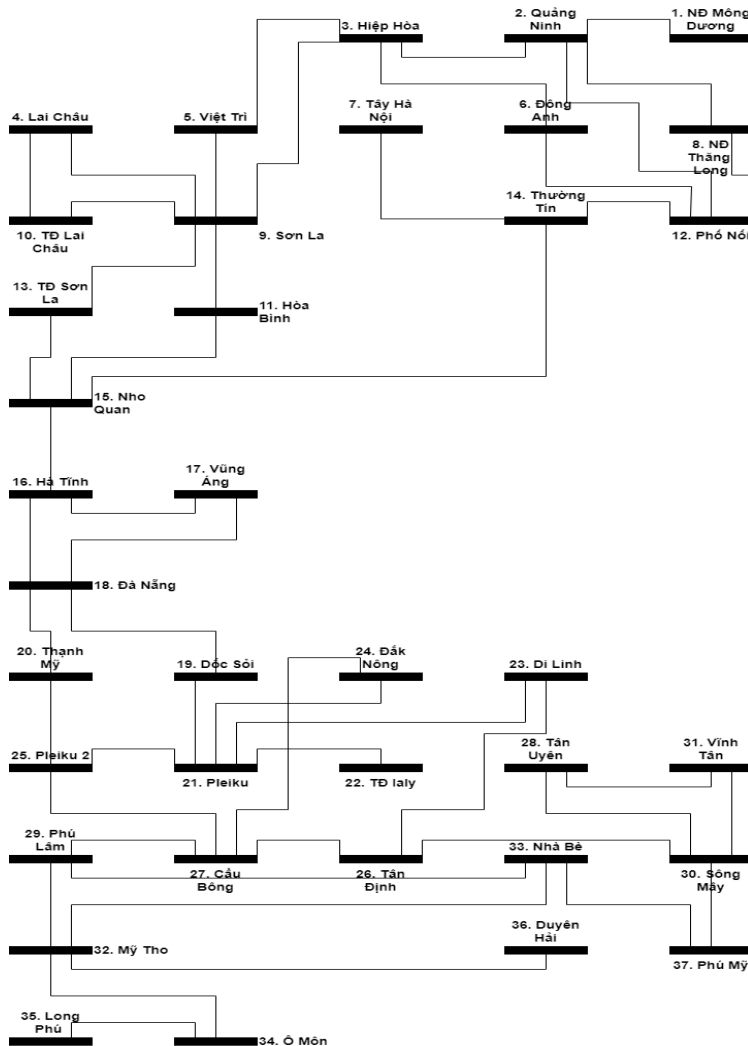
Kết quả tính toán bằng Matlab cho cả 2 trường hợp được so sánh với kết quả công bố trước đây được thể hiện ở Bảng 1. Từ bảng so sánh, ta thấy rằng số lượng thiết bị PMU từ kết quả tính toán bằng với số lượng của những nghiên cứu trước đã công bố với số lượng tương ứng là 4 thiết bị PMU cho trường hợp không có phép đo thông thường và 3 thiết bị PMU cho trường hợp có nút cân bằng tại thanh cái 7. Xét về vị trí lắp đặt, trong trường hợp không có phép đo thông thường kết quả tính toán trùng khớp vị trí với công cụ tính toán *CBC solver* và *fmincon* ở (Theodorakatos et al., 2015). Trong trường hợp có nút cân bằng tại thanh cái 7, kết quả tính toán đều phù hợp với các nghiên cứu trước đây. Từ kết quả tính toán cho trường hợp lưới điện tiêu chuẩn IEEE 14 nút, phương pháp xây dựng mô hình tính toán số lượng thiết bị PMU được thực hiện đã

đúng đắn, đáng tin cậy để sử dụng cho các trường hợp thực tế tại Việt Nam.

3.3. Lưới điện 500 kV Việt Nam

Lưới điện truyền tải 500 kV gồm 37 trạm biến áp đã đưa vào vận hành như Hình 5, chỉ số của các trạm được đánh số như trên hình. Sơ đồ kết nối hệ thống được xây dựng dựa trên tóm tắt từ Sơ đồ kết nối cơ bản hệ thống điện Việt Nam (Vo et al., 2020). Dựa vào sơ đồ nối dây, ta xác định được ma trận

T_{PMU} của lưới điện Việt Nam là ma trận vuông 37×37 . Trong trường hợp tính toán này, điều kiện về vị trí đặt PMU được sử dụng duy nhất đảm bảo độ bao phủ các thanh cái xung quanh, tương ứng biểu thức (3), được mô tả trong trường hợp 1 trình bày ở phần 2.2. Kết quả tính toán cho thấy số lượng thiết bị PMU tối thiểu cho hệ thống 500 kV là 10. Các vị trí lắp đặt tối ưu là ở các vị trí Quảng Ninh, Tây Hà Nội, Sơn La, Phố Nối, Hà Tĩnh, Pleiku, Pleiku2, Sông Mây, Mỹ Tho và Ô Môn.



Hình 4. Sơ đồ kết nối hệ thống điện 500 kV Việt Nam

4. TỔNG KẾT

Bài báo đã trình bày phương pháp xây dựng bài toán xác định vị trí tối ưu lắp đặt thiết bị đo pha PMU và tìm lời giải bài toán bằng phương pháp quy hoạch tuyến tính số nguyên. Mục tiêu của bài toán là tìm ra số lượng thiết bị PMU tối thiểu cần lắp đặt và vẫn đảm bảo quét được hết tất cả các thanh cái

trong hệ thống điện. Bài báo đã khảo sát cả hai trường hợp gồm chỉ sử dụng thiết bị PMU và có kết hợp với các phép đo truyền thống có sẵn trên hệ thống điện. Công cụ tính toán được sử dụng để thực hiện nghiên cứu là hàm quy hoạch tuyến tính số nguyên có sẵn trong phần mềm Matlab. Kết quả tính toán với lưới điện IEEE 14 nút cho thấy phù hợp với các nghiên cứu đã công bố trước đây. Để mở rộng

bài toán cho lưới điện 500 kV Việt Nam, việc lắp đặt 10 thiết bị PMU được đề xuất tại các trạm như: Quảng Ninh, Tây Hà Nội, Sơn La, Phố Nối, Hà Tĩnh, Pleiku, Pleiku2, Sông Mỹ, Mỹ Tho và Ô Môn.

Trong tương lai, việc xem xét bổ sung thêm các trường hợp vận hành khác của thiết bị PMU như

phát hiện thiết bị PMU bị mất kết nối cần được thực hiện.

LỜI CẢM ƠN

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO (REFERENCES)

- Akachukwu, C. M., Aibinu, A. M., Nwohu, M. N., & Salau, H. B. (2014, January). A decade survey of engineering applications of genetic algorithm in power system optimization. *In 2014 5th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation* (pp. 38-42). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISMS.2014.15>
- Azizi, S., Dobakhshari, A. S., Sarmadi, S. A. N., & Ranjbar, A. M. (2012). Optimal PMU placement by an equivalent linear formulation for exhaustive search. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1), pp. 174-182. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2167163>
- Dusabimana, E., & Yoon, S. G. (2020). A survey on the micro-phasor measurement unit in distribution networks. *Electronics*, 9(2), 305. <https://doi.org/10.3390/electronics9020305>
- Gou, B. (2008). Optimal placement of PMUs by integer linear programming. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(3), 1525-1526. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.926723>
- Hassanin, K. M., Abdelsalam, A. A., & Abdelaziz, A. Y. (2017, August). Optimal PMUs placement for full observability of electrical power systems using flower pollination algorithm. *In 2017 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)* (pp. 20-25). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SEGE.2017.8052770>
- Koutsoukis, N. C., Manousakis, N. M., Georgilakis, P. S., & Korres, G. N. (2013). Numerical observability method for optimal phasor measurement units placement using recursive Tabu search method. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 7(4), 347-356. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2012.0377>
- Liu, Z. J., Wang, M. Y., & Wang, D. D. (2016, August). Application of scaling genetic algorithms using MapReduce in optimizing the configuration of PMU. *In 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)* (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CICED.2016.7576167>
- Mabaning, A. A. G., & Orillaza, J. R. C. (2016, November). Complete solution of optimal PMU placement using reduced exhaustive search. *In 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)* (pp. 823-826). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2016.7848119>
- Martin, K. E., Benmouyal, G., Adamiak, M. G., Begovic, M., Burnett, R. O., Carr, K. R., Cobb, A., Kusters, J. A., Horowitz, S. H., Jensen, G. R., Michel, G. L., Murphy, R. J., Phadke, A. G., Sachdev, M. S., & Thorp, J. S. (1998). IEEE standard for synchrophasors for power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13(1), 73-77. <https://doi.org/10.1109/61.660853>
- Theodorakatos, N., Manousakis, N., & Korres, G. (2015). Optimal PMU placement using nonlinear programming. *arXiv preprint arXiv:1507.05258*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1507.05258>
- Theodorakatos, N. P., Manousakis, N. M., & Korres, G. N. (2015). Optimal placement of phasor measurement units with linear and non-linear models. *Electric Power Components and Systems*, 43(4), 357-373. <https://doi.org/10.1080/15325008.2014.981319>
- Tran T. S., & Kieu T. T. H. (2022). Application of binary genetic algorithm for optimal phasor measurement unit placement on Vietnam transmission system. *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, 20(8), 99-104 (in Vietnamese). <https://jst-ud.vn/jst-ud/article/view/7865>
- Vo, M. L., Vo, T. S. T., Nguyen, D. N., & Ngo, S. H. (2019). Principal one-line diagram Vietnam power system, *Vietnam National Load Dispatch Centre, EVN* (in Vietnamese).
- Yang, X. S., Karamanoglu, M., & He, X. (2014). Flower pollination algorithm: a novel approach for multiobjective optimization. *Engineering Optimization*, 46(9), 1222-1237. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2013.832237>