

## A COMPARISON OF LINEAR LOAD FLOW MODELS FOR 39-BUS NEW ENGLAND TRANSMISSION SYSTEM

Nguyen Duy Duc, Vo Trong Sang, Pham Nang Van\*

School of Electrical and Electronic Engineering - Hanoi University of Science and Technology

| ARTICLE INFO                           |                   | ABSTRACT  |
|--|-------------------|---|
| <b>Received:</b>                       | <b>04/7/2024</b>  | Power flow equations are fundamental mathematical models that serve as the foundation for planning and operating electrical systems. While traditional alternating current power flow (ACPF) methodologies yield accurate outcomes, their nonlinear characteristics, poor convergence, and low efficiency in computation restrict their applications in power systems. This paper compares two linear power flow methods for electrical grids, namely the direct current power flow (DCPF) method and the decoupled linear power flow (DLPF) method. These power flow methods are applied to the 39-bus NewEngland transmission grid to compute voltage magnitudes, voltage phase angles, and power flow on branches. The computational results indicate that the decoupled linear power flow (DLPF) method yields better results in terms of nodal voltage magnitudes and phase angles compared to the direct current power flow (DCPF) method. Nevertheless, the DLPF approach exhibits inferior performance in terms of power flow on branches when compared to the DCPF method. |
| <b>Revised:</b>                        | <b>29/10/2024</b> |   |
| <b>Published:</b>                      | <b>29/10/2024</b> |   |
| <b>KEYWORDS</b>                        |                   |   |
| Power flow equations                   |                   |   |
| 39-bus NewEngland system               |                   |   |
| Linear power flow method               |                   |   |
| Direct current power flow (DCPF)       |                   |   |
| Decoupled linearized power flow (DLPF) |                   |   |

## SO SÁNH CÁC PHƯƠNG PHÁP TUYẾN TÍNH ĐỂ PHÂN TÍCH CHẾ ĐỘ XÁC LẬP CỦA LƯỚI ĐIỆN TRUYỀN TẢI 39 NÚT NEW ENGLAND

Nguyễn Duy Đức, Võ Trọng Sáng, Phạm Năng Văn\*

Trường Điện – Điện tử - Đại học Bách khoa Hà Nội

| THÔNG TIN BÀI BÁO                              | TÓM TẮT   |
|--|---|
| <b>Ngày nhận bài:</b> 04/7/2024                | Hệ phương trình trào lưu công suất có vai trò quan trọng trong các bài toán quy hoạch và vận hành hệ thống điện. Các phương pháp phân tích trào lưu công suất xoay chiều (ACPF) truyền thống cho kết quả chính xác, nhưng do tính phi tuyến, khả năng hội tụ kém và hiệu suất tính toán thấp nên ứng dụng trong hệ thống điện bị hạn chế. Bài báo này so sánh hai phương pháp tuyến tính để phân tích chế độ xác lập của lưới điện, bao gồm phương pháp dòng điện một chiều (DCPF) và phương pháp trào lưu công suất tuyến tính tách biến (DLPF). Các phương pháp phân tích chế độ xác lập này được so sánh sử dụng lưới điện truyền tải 39 nút New England để tính toán mô-đun điện áp nút, góc pha điện áp nút và dòng công suất tác dụng trên các nhánh. Các kết quả tính toán cho thấy phương pháp trào lưu công suất tách biến (DLPF) cho kết quả tốt hơn về mô-đun và góc pha điện áp nút so với phương pháp dòng điện một chiều (DCPF), trong khi đó kết quả về dòng công suất tác dụng trên các nhánh của phương pháp DLPF lại kém hơn so với phương pháp DCPF. |
| <b>Ngày hoàn thiện:</b> 29/10/2024             |   |
| <b>Ngày đăng:</b> 29/10/2024                   |   |
| <b>TỪ KHÓA</b>                                 |   |
| Hệ phương trình trào lưu công suất             |   |
| Hệ thống điện 39 nút NewEngland                |   |
| Mô hình trào lưu công suất tuyến tính          |   |
| Trào lưu công suất một chiều (DCPF)            |   |
| Trào lưu công suất tuyến tính tách biến (DLPF) |   |

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.10704>

\* Corresponding author. Email: van.phammang@hust.edu.vn

## 1. Giới thiệu

Trong thời gian gần đây, lĩnh vực hệ thống điện trên thế giới đã chứng kiến những sự thay đổi đáng kể và tiên bộ to lớn. Sự phát triển này có nguồn gốc từ nhiều yếu tố khác nhau, bao gồm sự gia tăng của nguồn năng lượng tái tạo, sự tiên bộ trong công nghệ và quản lý hệ thống, cũng như nhu cầu ngày càng tăng về một nền công nghiệp xanh và bền vững. Do đó, ngày càng có nhiều thách thức liên quan đến việc điều khiển và tối ưu hệ thống điện. Trong đó, phân tích trào lưu công suất là một công cụ cơ bản và là chìa khóa để giải quyết các vấn đề đó. Phân tích trào lưu công suất mang ý nghĩa quan trọng trong việc tính toán sự cố [1], đánh giá độ tin cậy [2] và phân tích trào lưu công suất xác suất (PLF) [3] một cách chính xác và hiệu quả.

Các phương trình trào lưu công suất tiêu chuẩn dựa trên một hệ phương trình phi tuyến yêu cầu tính toán phức tạp do phải sử dụng các phép lặp. Bên cạnh sự phức tạp về mặt tính toán, tính phi tuyến dẫn đến các nhược điểm sau: khó khăn khi tìm nghiệm (ví dụ các trường hợp giải kém); không thể kết luận được rằng lời giải không tồn tại hoặc không thể đạt trong trường hợp thuật toán không hội tụ và sự tồn tại nhiều nghiệm [4]. Nguyên nhân chính là do mối quan hệ phi tuyến giữa mô-đun điện áp và góc pha. Chính mối quan hệ phi tuyến này đã thu hút nhiều nhà nghiên cứu đề xuất các phương pháp khác nhau để tính trào lưu công suất. Do đó, việc tìm ra một mô hình trào lưu công suất tuyến tính có tốc độ tính toán nhanh, độ chính xác và độ ổn định hợp lý cho tất cả các loại lưới điện nhận được sự quan tâm rất lớn. Mô hình tuyến tính như vậy cũng có thể mang lại lợi ích trong việc giải quyết các bài toán tối ưu hóa. Bằng cách sử dụng mô hình trào lưu công suất tuyến tính, các bài toán tối ưu phi tuyến như định giá biên nút (LMP) [5] và lựa chọn tổ máy vận hành có ràng buộc an toàn (SCUC) [6] có thể được chuyển thành các bài toán tối ưu tuyến tính.

Phương pháp dòng điện một chiều (DCPF) là một trong những mô hình trào lưu công suất tuyến tính được áp dụng rộng rãi trong lĩnh vực hệ thống điện. Vì tính tuyến tính của nó, mô hình này có tốc độ tính toán nhanh và không đòi hỏi việc sử dụng các phép lặp để đạt được độ chính xác hợp lý trong tính toán dòng công suất tác dụng so với phương pháp dòng điện xoay chiều (ACPF) [7]. Phương pháp dòng điện một chiều (DCPF) cổ điển được xây dựng dựa trên giả thiết mô-đun điện áp các nút bằng 1 pu và bỏ qua tổn thất công suất tác dụng trên các nhánh [4]. Ngoài ra, các nghiên cứu đã đề xuất các phiên bản tổng quát hơn của mô hình trào lưu công suất một chiều (DCPF) bao gồm mô hình khởi động nóng (hot-start) và khởi động lạnh (cold-start) nhằm mở rộng ứng dụng của mô hình [8]. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp dòng điện một chiều (DCPF) là không thể tính toán mô-đun điện áp nút.

Phương pháp trào lưu công suất tuyến tính tách biến (DLPF) [9] liên quan đến phân tách mô-đun điện áp và góc pha giúp khắc phục những hạn chế do tính phi tuyến của phương pháp dòng điện xoay chiều (ACPF) [10] và giả thiết mô-đun điện áp các nút bằng 1 pu của phương pháp dòng điện một chiều (DCPF). Tương tự như phương pháp DCPF, việc xây dựng hệ phương trình tuyến tính của phương pháp DLPF không đòi hỏi phải biết trước điểm làm việc ban đầu của hệ thống điện. Nói cách khác, việc xây dựng hệ phương trình tuyến tính theo phương pháp DLPF độc lập với trạng thái làm việc của hệ thống điện. Đây là sự khác biệt của phương pháp DLPF so với phương pháp Newton-Raphson bởi vì hệ phương trình tuyến tính trong mỗi bước lặp của phương pháp Newton-Raphson được xây dựng dựa trên điểm làm việc của hệ thống điện đã được biết. Trong một nghiên cứu trước đây [11], một mô hình tuyến tính đã được đề xuất cho hệ thống phân phối hình tia. Tuy nhiên, mô hình này chỉ áp dụng cho các hệ thống phân phối hình tia cụ thể và không thể mở rộng cho các hệ thống điện truyền tải. Một tiên bộ quan trọng đã đạt được trong nghiên cứu [8], khi các tác giả đã xây dựng hệ phương trình trào lưu công suất tuyến tính có xét dòng công suất phản kháng. Mô hình này phản ánh cả sự cân bằng công suất tác dụng và công suất phản kháng, liên quan đến bình phương của mô-đun điện áp  $U^2$  và góc pha được điều chỉnh  $\delta$ . Tuy nhiên, vì mô-đun điện áp và góc pha không thể phân tách nên các bài toán tối ưu có dạng quy hoạch bậc hai. Do đó, nghiên cứu này đề xuất một mô hình trào lưu công suất tuyến tính phân tách  $U - \delta$  nhằm nâng cao độ chính xác trong tính toán mô-đun điện áp nút.

Mục đích của nghiên cứu này là so sánh kết quả tính toán chế độ xác lập cho lưới điện truyền tải 39 nút New England sử dụng hai mô hình tuyến tính, bao gồm phương pháp dòng điện một chiều (DCPF) và phương pháp trào lưu công suất tuyến tính tách biến (DLPF). Các đóng góp chính của bài báo bao gồm: (1) Trình bày chi tiết hai phương pháp tuyến tính để tính toán chế độ xác lập của lưới điện; (2) So sánh kết quả tính toán chế độ xác lập cho lưới điện truyền tải 39 nút New England.

Bài báo gồm 4 phần. Mô hình toán học của hai phương pháp trào lưu công suất tuyến tính được trình bày ở Phần 2. Sự áp dụng tính toán của hai mô hình tuyến tính cho lưới điện 39 nút New England được mô tả trong Phần 3. Các kết luận và chủ đề nghiên cứu tương lai được trình bày trong Phần 4.

## 2. Phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Hệ phương trình trào lưu công suất phi tuyến

Phân tích chế độ xác lập nhằm mục đích tính toán mô-đun và góc pha điện áp tại các nút; công suất phát của các nguồn điện; dòng công suất tác dụng và phản kháng trên các đường dây và tổn thất công suất trong lưới điện [12].

Xét hệ thống điện với  $N$  nút, và mạng lưới điện được mô tả bởi ma trận tổng dẫn nút  $\mathbf{Y}_{\text{bus}}$ .

Lưới điện trong chế độ xác lập được mô tả bởi hệ phương trình phi tuyến như sau:

$$P_i = U_i \sum_{k=1}^N U_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}); \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$Q_i = U_i \sum_{k=1}^N U_k (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}); \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

trong đó:

- $P_i, Q_i$  tương ứng là công suất hữu công và vô công tại nút  $i$ ;
- $U_i, U_k$  tương ứng là mô-đun điện áp tại các nút  $i$  và  $k$ ;
- $G_{ik}, B_{ik}$  tương ứng là phần thực và ảo của phần tử  $ik$  trong ma trận  $\mathbf{Y}_{\text{bus}}$ ;
- $\delta_i, \delta_k$  tương ứng là góc pha điện áp tại các nút  $i$  và  $k$ .

Phương pháp Newton-Rapson [13] thường được áp dụng để tìm nghiệm của hệ phương trình phi tuyến (1)-(2). Theo phương pháp này, tại bước lặp thứ  $r$ , ta cần giải hệ phương trình tuyến tính:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix}^{(r)} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{bmatrix}^{(r)} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\delta} \\ \Delta \mathbf{U} / \mathbf{U} \end{bmatrix}^{(r)} \quad (3)$$

trong đó,  $\mathbf{H}, \mathbf{N}, \mathbf{M}$  và  $\mathbf{L}$  là các ma trận con của ma trận Jacobi.

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} | \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_{N-1} | \Delta Q_1, \Delta Q_2, \dots, \Delta Q_{N_D} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

### 2.2. Phương pháp trào lưu công suất một chiều (DCPF)

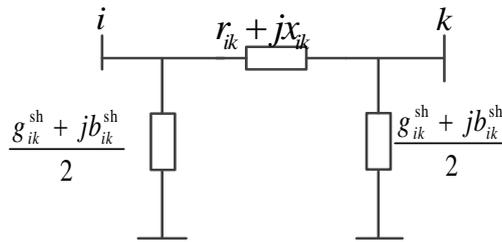
Phương pháp trào lưu công suất một chiều (DCPF) được mô tả trong các tài liệu tham khảo [7], [8], [14], [15] và được trình bày chi tiết như dưới đây. Phương pháp DCPF chỉ phù hợp để tính toán chế độ xác lập của lưới điện có điện áp định mức từ 220 kV trở lên. Ngoài ra, hệ phương trình trào lưu công suất theo phương pháp DCPF cũng được áp dụng rộng rãi trong các bài toán tối ưu cho lưới điện 220 kV trở lên như phân bố tối ưu công suất (ED – Economic Dispatch), lập lịch vận hành cho các tổ máy phát (UC – Unit Commitment) và tính giá biên nút trong thị trường điện bán buôn.

Với lưới điện có điện áp định mức từ 220 kV trở lên, dòng công suất phản kháng trên các đường dây thường nhỏ hơn nhiều dòng công suất tác dụng. Dựa trên đặc điểm này, phương pháp

DCPF chỉ xét dòng công suất tác dụng và bỏ qua dòng công suất phản kháng, tức là chỉ tính toán với (1) và bỏ qua (2).

Bên cạnh đó, các đường dây có điện áp từ 220 kV trở lên thường sử dụng dây dẫn với tiết diện lớn và có phân pha. Đồng thời, khoảng cách giữa các pha của các đường dây này cũng lớn. Do đó, trong sơ đồ thay thế của đường dây (xem Hình 1), trị số điện trở tác dụng ( $r_{ik}$ ) nhỏ hơn nhiều điện kháng ( $x_{ik}$ ) và trị số điện dẫn tác dụng ( $g_{ik}^{sh}$ ) nhỏ hơn nhiều dung dẫn ( $b_{ik}^{sh}$ ). Dựa trên đặc điểm này, phương pháp DCPF coi trị số điện trở tác dụng và điện dẫn tác dụng bằng 0. Khi đó,  $G_{ik} = 0$  và biểu thức (1) được viết lại như sau:

$$P_i = U_i \sum_{k=1}^N U_k B_{ik} \sin \delta_{ik}; \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$



Hình 1. Sơ đồ thay thế của đường dây

Ngoài ra, trong chế độ xác lập bình thường, mô-đun điện áp tại các nút của lưới điện thường lệch không quá 5% so với điện áp định mức. Do đó, với phương pháp DCPF, mô-đun điện áp các nút được giả sử bằng 1 pu. Khi đó, biểu thức (5) được xấp xỉ như sau:

$$P_i = \sum_{k=1}^N B_{ik} \sin \delta_{ik}; \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

Đặc điểm tiếp theo của vận hành hệ thống điện trong chế độ xác lập bình thường là chênh lệch góc pha điện áp giữa hai nút liền kề nhau thường nhỏ ( $|\delta_i - \delta_k| \leq 5^\circ$ ). Khi đó, biểu thức (6) được xấp xỉ như sau:

$$P_i = \sum_{k=1}^N B_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k) \approx \sum_{k=1}^N B_{ik} (\delta_i - \delta_k) = \sum_{k=1, k \neq i}^N B_{ik} (\delta_i - \delta_k); \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

Thành phần  $B_{ik, i \neq k}$  bằng trừ của phần ảo của tổng dẫn dọc nhánh  $ik$ , tức là  $B_{ik, i \neq k} = 1/x_{ik}$ . Khi đó, biểu thức (7) được viết lại như sau:

$$P_i = \sum_{k=1, k \neq i}^N \frac{1}{x_{ik}} (\delta_i - \delta_k); \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

### 2.3. Phương pháp trào lưu công suất tuyến tính tách biến (DLPF)

Các xấp xỉ tuyến tính được áp dụng vào (1) để phân tách mô-đun điện áp và góc pha điện áp:

$$\begin{aligned} P_i &= U_i^2 G_{ii} + U_i \sum_{k=1, k \neq i}^N U_k G_{ik} \cos \delta_{ik} + U_i \sum_{k=1, k \neq i}^N U_k B_{ik} \sin \delta_{ik} \\ &= U_i^2 \left( g_{ii} + \sum_{k=1, k \neq i}^N g_{ik} \right) + U_i \sum_{k=1, k \neq i}^N U_k (-g_{ik}) \cos \delta_{ik} + U_i \sum_{k=1, k \neq i}^N U_k (-b_{ik}) \sin \delta_{ik} \\ &= U_i^2 g_{ii} + \sum_{k=1, k \neq i}^N U_i g_{ik} (U_i - U_k \cos \delta_{ik}) - \sum_{k=1, k \neq i}^N U_i U_k b_{ik} \sin \delta_{ik} \\ &\approx U_i g_{ii} + \sum_{k=1, k \neq i}^N g_{ik} (U_i - U_k) - \sum_{k=1, k \neq i}^N b_{ik} (\delta_i - \delta_k) = \sum_{k=1}^N G_{ik} U_k - \sum_{k=1}^N B'_{ik} \delta_k \end{aligned} \quad (9)$$

trong đó:

- $Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik} = \begin{cases} y_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^N y_{ij} & \text{khi } k = i \\ -y_{ik} & \text{khi } k \neq i \end{cases}; \quad Y'_{ik} = G'_{ik} + jB'_{ik} = \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq i}^N y_{ij} & \text{khi } k = i \\ -y_{ik} & \text{khi } k \neq i \end{cases}$
- $G_{ik}, B_{ik}$  lần lượt là phần thực và phần ảo của phần tử thuộc hàng  $i$ , cột  $k$  trong ma trận tổng dẫn  $\mathbf{Y}$ ;
- $G'_{ik}, B'_{ik}$  lần lượt là phần thực và phần ảo của phần tử thuộc hàng  $i$ , cột  $k$  trong ma trận tổng dẫn  $\mathbf{Y}$  với sự bỏ qua thành phần ngang;
- $y_{ik} = g_{ik} + jb_{ik}$  là tổng dẫn dọc của đường dây  $ik$ ;
- $y_{ii} = g_{ii} + jb_{ii}$  là tổng dẫn ngang của nút  $i$ .

Tương tự, phương trình (2) cho công suất vô công của nút  $i$  được xấp xỉ như sau:

$$Q_i = -\sum_{k=1}^N B_{ik} U_k - \sum_{k=1}^N G'_{ik} \delta_k \quad (10)$$

Lưu ý rằng, vì điện dẫn tác dụng có thể xem như không đáng kể so với điện dẫn phản kháng trong tổng dẫn ngang ( $g_{ii} \ll b_{ii}$ ) do đó  $G'_{ik} \approx G_{ik}$ .

Dòng công suất vô công của nút  $i$  được xấp xỉ viết lại như sau:

$$Q_i = -\sum_{k=1}^N B_{ik} U_k - \sum_{k=1}^N G_{ik} \delta_k \quad (11)$$

Ta xét xấp xỉ trong biểu thức của dòng công suất tác dụng trên nhánh của phương pháp trào lưu công suất tuyến tính tách biến (DLTP) như sau:

$$g_{ik} U_i (U_i - U_k \cos \delta_{ik}) \approx g_{ik} (U_i - U_k) \quad (12)$$

Cơ sở lý thuyết giải thích cho phép xấp xỉ trên được đề xuất trong mô hình DLTP như sau:

$$\begin{aligned} g_{ik} U_i (U_i - U_k \cos \delta_{ik}) &\approx g_{ik} U_i (U_i - U_k) = g_{ik} (1 + \Delta U_i) (\Delta U_i - \Delta U_k) \\ &\approx g_{ik} (\Delta U_i - \Delta U_k) = g_{ik} (1 + \Delta U_i - 1 - \Delta U_k) = g_{ik} (U_i - U_k) \end{aligned} \quad (13)$$

Lưu ý rằng,  $U_i$  và  $U_k$  lần lượt phân tách thành  $(1 + \Delta U_i)$  và  $(1 + \Delta U_k)$ , trong đó  $\Delta U_i$  và  $\Delta U_k$  thường nhỏ hơn  $U_i$  và  $U_k$  một bậc thập phân. Trong bước thứ hai của phương trình trên, có thể bỏ qua  $U_i^2$  và  $\Delta U_i \Delta U_k$  mà không gây ra sai số đáng kể vì chúng nhỏ hơn  $U_i$  và  $U_k$  hai bậc thập phân.

Biểu thức tuyến tính cho dòng công suất hữu công và dòng công suất vô công:

$$\begin{aligned} P_{ik} &\approx g_{ik} (U_i - U_k) - b_{ik} (\delta_i - \delta_k) \\ Q_{ik} &\approx -b_{ik} (U_i - U_k) - g_{ik} (\delta_i - \delta_k) - b_{ik}^{\text{sh}} U_i / 2 \end{aligned} \quad (14)$$

trong đó,  $b_{ik}^{\text{sh}}$  là tổng dẫn ngang của nhánh  $ik$ .

Lưu ý rằng, để đảm bảo tính tuyến tính, tổn thất công suất trên đường dây được bỏ qua. Do đó,  $P_{ik} = -P_{ki}$ , trong đó  $P_{ik}$  là dòng công suất hữu công từ nút  $i$  đến nút  $k$ .

Phương trình (9) và (10) biểu thị công thức cơ bản của mô hình DLTP. Dạng ma trận của các phương trình này được viết như sau:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{B}' & -\mathbf{G} \\ \mathbf{G} & \mathbf{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \mathbf{U} \end{bmatrix} \quad (15)$$

trong đó:

- $\mathbf{P}, \mathbf{Q}$  lần lượt là ma trận công suất hữu công và vô công;
- $\mathbf{G}, \mathbf{B}$  lần lượt là phần thực và phần ảo của ma trận tổng dẫn;

- $\mathbf{B}'$  là phần ảo của ma trận tổng dẫn bỏ qua thành phần ngang;
- $\delta, \mathbf{U}$  lần lượt là ma trận góc pha điện áp, mô-đun điện áp nút.

Để thuận tiện cho việc tính toán, ta sắp xếp các nút này theo thứ tự sau: nút cân bằng, nút  $PV$  và nút  $PQ$ .

$$\delta = [\delta_R^T, \delta_S^T, \delta_L^T]^T; \quad \mathbf{U} = [\mathbf{U}_R^T, \mathbf{U}_S^T, \mathbf{U}_L^T]^T \quad (16)$$

trong đó:

- $\delta_R, \mathbf{U}_R$  lần lượt là các véc-tơ góc pha điện áp, mô-đun điện áp của nút cân bằng;
- $\delta_S, \mathbf{U}_S$  lần lượt là các véc-tơ góc pha điện áp, mô-đun điện áp của nút  $PV$ ;
- $\delta_L, \mathbf{U}_L$  lần lượt là các véc-tơ góc pha điện áp, mô-đun điện áp của nút  $PQ$ .

Ma trận tổng dẫn  $\mathbf{Y}$  cũng có thể được phân tách theo cách tương tự:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{RR} & \mathbf{Y}_{RS} & \mathbf{Y}_{RL} \\ \mathbf{Y}_{SR} & \mathbf{Y}_{SS} & \mathbf{Y}_{SL} \\ \mathbf{Y}_{LR} & \mathbf{Y}_{LS} & \mathbf{Y}_{LL} \end{bmatrix} \quad (17)$$

trong đó:

- $\mathbf{Y}_{RR}$  là ma trận tổng dẫn giữa nút cân bằng với nút cân bằng;
- $\mathbf{Y}_{RS}$  là ma trận tổng dẫn giữa nút cân bằng với các nút  $PV$ ;
- $\mathbf{Y}_{RL}$  là ma trận tổng dẫn giữa nút cân bằng với các nút  $PQ$ .

Với sự có mặt của các véc-tơ con  $\delta_R, \mathbf{U}_R$  và  $\mathbf{U}_S$ , ta có thể biến đổi biểu thức (15) thành:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{P}} \\ \tilde{\mathbf{Q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\delta} \\ \tilde{\mathbf{U}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

trong đó:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{P}} \\ \tilde{\mathbf{Q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_S \\ \mathbf{P}_L \\ \mathbf{Q}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}'_{SL} & -\mathbf{G}_{SR} & -\mathbf{G}_{SS} \\ \mathbf{B}'_{LR} & -\mathbf{G}_{LR} & -\mathbf{G}_{LS} \\ \mathbf{G}_{LR} & \mathbf{B}_{LR} & \mathbf{B}_{LS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_R \\ \mathbf{U}_R \\ \mathbf{U}_S \end{bmatrix} \quad (19)$$

với:

- $\mathbf{P}_S$  là công suất tác dụng của nút  $PV$ ;
- $\mathbf{P}_L, \mathbf{Q}_L$  lần lượt là công suất tác dụng, công suất phản kháng của nút  $PQ$ ;
- $\mathbf{B}'_{SL}$  là phần ảo của ma trận tổng dẫn  $\mathbf{Y}_{SL}$  bỏ qua thành phần ngang;
- $\mathbf{G}_{SR}$  là phần thực của ma trận tổng dẫn  $\mathbf{Y}_{SR}$ .

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{B}'_{SS} & \mathbf{B}'_{SL} & -\mathbf{G}_{SL} \\ \mathbf{B}'_{LS} & \mathbf{B}'_{LL} & -\mathbf{G}_{LL} \\ \mathbf{G}_{LS} & \mathbf{G}_{LL} & \mathbf{B}_{LL} \end{bmatrix} \quad (20)$$

các ma trận  $\mathbf{H}, \mathbf{N}, \mathbf{M}, \mathbf{L}$  được định nghĩa như sau:

$$\mathbf{H} = - \begin{bmatrix} \mathbf{B}'_{SS} & \mathbf{B}'_{SL} \\ \mathbf{B}'_{LS} & \mathbf{B}'_{LL} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{N} = - \begin{bmatrix} -\mathbf{G}_{SL} \\ -\mathbf{G}_{LL} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{M} = -[\mathbf{G}_{LS} \quad \mathbf{G}_{LL}]; \quad \mathbf{L} = -[\mathbf{B}_{LL}] \quad (21)$$

$$\tilde{\delta} = [\delta_S^T, \delta_L^T]; \quad \tilde{\mathbf{U}} = \mathbf{U}_L \quad (22)$$

Thực hiện các phép biến đổi hàng cho biểu thức (18), ta được:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{P}} - \mathbf{N}\mathbf{L}^{-1}\tilde{\mathbf{Q}} \\ \tilde{\mathbf{Q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} - \mathbf{N}\mathbf{L}^{-1}\mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\delta} \\ \tilde{\mathbf{U}} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\text{và} \quad \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{P}} \\ \tilde{\mathbf{Q}} - \mathbf{M}\mathbf{H}^{-1}\tilde{\mathbf{P}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L} - \mathbf{M}\mathbf{H}^{-1}\mathbf{N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{\delta}} \\ \tilde{\mathbf{U}} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Kết hợp hàng 1 của biểu thức (23) và hàng 2 của biểu thức (24) ta thu được ma trận mới sẽ dẫn đến sự phân tách mô-đun và góc pha điện áp như sau:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{P}} - \mathbf{N}\mathbf{L}^{-1}\tilde{\mathbf{Q}} \\ \tilde{\mathbf{Q}} - \mathbf{M}\mathbf{H}^{-1}\tilde{\mathbf{P}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{L}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{\delta}} \\ \tilde{\mathbf{U}} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\text{trong đó:} \quad \tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H} - \mathbf{N}\mathbf{L}^{-1}\mathbf{M}; \quad \tilde{\mathbf{L}} = \mathbf{L} - \mathbf{M}\mathbf{H}^{-1}\mathbf{N} \quad (26)$$

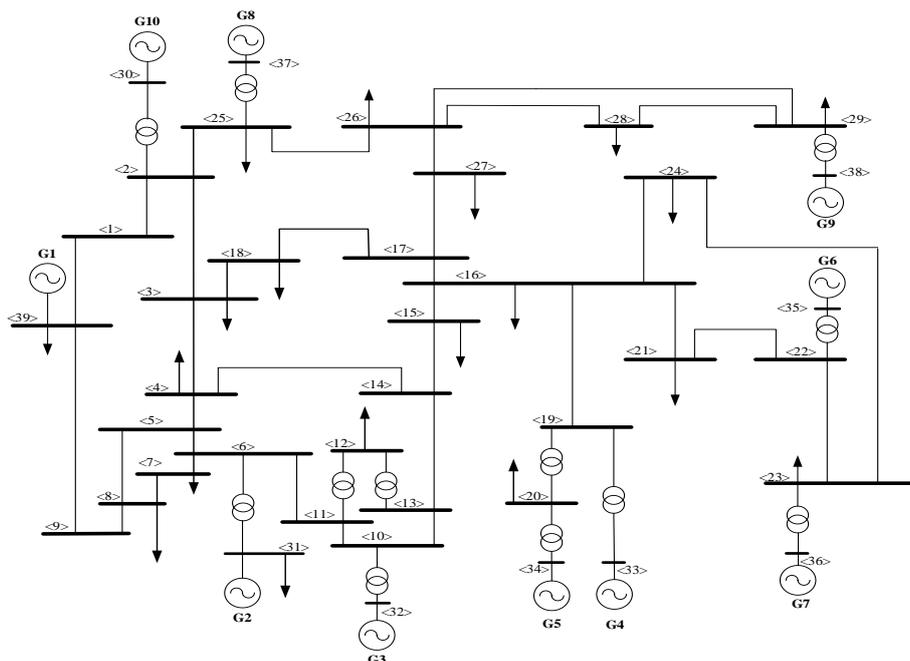
Từ biểu thức (25) ta suy ra được biểu thức tính toán các giá trị góc pha điện áp và mô-đun điện áp của các nút chưa biết dựa vào công suất  $\tilde{\mathbf{P}}$  và  $\tilde{\mathbf{Q}}$  được bơm vào nút được viết như sau:

$$\tilde{\boldsymbol{\delta}} = \tilde{\mathbf{H}}^{-1}\tilde{\mathbf{P}} - \tilde{\mathbf{H}}^{-1}\mathbf{N}\mathbf{L}^{-1}\tilde{\mathbf{Q}}; \quad \tilde{\mathbf{U}} = \tilde{\mathbf{L}}^{-1}\tilde{\mathbf{Q}} - \tilde{\mathbf{L}}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{H}^{-1}\tilde{\mathbf{P}} \quad (27)$$

### 3. Kết quả tính toán và thảo luận

#### 3.1. Mô tả dữ liệu lưới 39 nút New England

Lưới điện truyền tải 39 nút New England [16] được mô tả như Hình 2. Lưới điện có 39 nút và 46 nhánh, trong đó có 10 nút nguồn tại các nút 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39 với nút 31 là nút cân bằng. Dữ liệu cơ sở:  $S_{cb} = 100 \text{ MVA}$ ,  $U_{cb} = 345 \text{ kV}$ . Tổng công suất phụ tải bằng  $625,42 + j138,71 \text{ MVA}$ .



Hình 2. Lưới điện 39 nút New England

Dữ liệu nút, thông số nhánh đường dây và máy biến áp của lưới điện truyền tải 39 nút New England được mô tả ở Bảng 1 và Bảng 2.

Bảng 1. Dữ liệu nút

| Nút | Loại nút | $U$ (pu) | $\delta$ | $P_G$ (pu) | $Q_G$ (pu) | $P_D$ (pu) | $Q_D$ (pu) | $Q_{Gmax}$ (pu) | $Q_{Gmin}$ (pu) |
|-----|----------|----------|----------|------------|------------|------------|------------|-----------------|-----------------|
| 1   | PQ       |          |          |            |            | 0,976      | 0,442      |                 |                 |
| 2   | PQ       |          |          |            |            | 0          | 0          |                 |                 |
| 3   | PQ       |          |          |            |            | 3,22       | 0,024      |                 |                 |

| Nút | Loại nút | $U$ (pu) | $\delta$ | $P_G$ (pu) | $Q_G$ (pu) | $P_D$ (pu) | $Q_D$ (pu) | $Q_{Gmax}$ (pu) | $Q_{Gmin}$ (pu) |
|-----|----------|----------|----------|------------|------------|------------|------------|-----------------|-----------------|
| 4   | PQ       |          |          |            |            | 5,00       | 1,84       |                 |                 |
| 5   | PQ       |          |          |            |            | 0          | 0          |                 |                 |
| 6   | PQ       |          |          |            |            | 0          | 0          |                 |                 |
| 7   | PQ       |          |          |            |            | 2,338      | 0,84       |                 |                 |
| 8   | PQ       |          |          |            |            | 5,22       | 1,766      |                 |                 |
| 9   | PQ       |          |          |            |            | 0,065      | -0,666     |                 |                 |
| 10  | PQ       |          |          |            |            | 0          | 0          |                 |                 |
| 11  | PQ       |          |          |            |            | 0          | 0          |                 |                 |
| 12  | PQ       |          |          |            |            | 0,0853     | 0,88       |                 |                 |
| 13  | PQ       |          |          |            |            | 0          | 0          |                 |                 |
| 14  | PQ       |          |          |            |            | 0          | 0          |                 |                 |
| 15  | PQ       |          |          |            |            | 3,20       | 1,53       |                 |                 |
| 16  | PQ       |          |          |            |            | 3,29       | 0,323      |                 |                 |
| 17  | PQ       |          |          |            |            | 0          | 0          |                 |                 |
| 18  | PQ       |          |          |            |            | 1,58       | 0,30       |                 |                 |
| 19  | PQ       |          |          |            |            | 0          | 0          |                 |                 |
| 20  | PQ       |          |          |            |            | 6,80       | 1,03       |                 |                 |
| 21  | PQ       |          |          |            |            | 2,74       | 1,15       |                 |                 |
| 22  | PQ       |          |          |            |            | 0          | 0          |                 |                 |
| 23  | PQ       |          |          |            |            | 2,475      | 0,846      |                 |                 |
| 24  | PQ       |          |          |            |            | 3,086      | -0,922     |                 |                 |
| 25  | PQ       |          |          |            |            | 2,24       | 0,472      |                 |                 |
| 26  | PQ       |          |          |            |            | 1,39       | 0,17       |                 |                 |
| 27  | PQ       |          |          |            |            | 2,81       | 0,755      |                 |                 |
| 28  | PQ       |          |          |            |            | 2,06       | 0,276      |                 |                 |
| 29  | PQ       |          |          |            |            | 2,835      | 0,269      |                 |                 |
| 30  | PV       | 1,0499   |          | 2,50       | 1,618      | 0          | 0          | 4,00            | 1,40            |
| 31  | Cân bằng | 0,982    | 0        | 6,779      | 2,216      | 0,092      | 0,046      | 3,00            | -1,00           |
| 32  | PV       | 0,9841   |          | 6,50       | 2,070      | 0          | 0          | 3,00            | 1,50            |
| 33  | PV       | 0,9972   |          | 6,32       | 1,083      | 0          | 0          | 2,50            | 0               |
| 34  | PV       | 1,0123   |          | 5,08       | 1,667      | 0          | 0          | 1,67            | 0               |
| 35  | PV       | 1,0494   |          | 6,50       | 2,107      | 0          | 0          | 3,00            | -1,00           |
| 36  | PV       | 1,0636   |          | 5,60       | 1,002      | 0          | 0          | 2,40            | 0               |
| 37  | PV       | 1,0275   |          | 5,40       | -0,0134    | 0          | 0          | 2,50            | 0               |
| 38  | PV       | 1,0265   |          | 8,30       | 0,217      | 0          | 0          | 3,00            | -1,50           |
| 39  | PV       | 1,03     |          | 10         | 0,785      | 1,104      | 2,50       | 3,00            | -1,00           |

Bảng 2. Thông số nhánh đường dây và máy biến áp

| Nhánh | $r$ (pu) | $x$ (pu) | $b^{sh}$ (pu) | Nhánh | $r$ (pu) | $x$ (pu) | $b^{sh}$ (pu) |
|-------|----------|----------|---------------|-------|----------|----------|---------------|
| 1-2   | 0,0035   | 0,0411   | 0,6987        | 14-15 | 0,0018   | 0,0217   | 0,366         |
| 1-39  | 0,001    | 0,025    | 0,75          | 15-16 | 0,0009   | 0,0094   | 0,171         |
| 2-3   | 0,0013   | 0,0151   | 0,2572        | 16-17 | 0,0007   | 0,0089   | 0,1342        |
| 2-25  | 0,007    | 0,0086   | 0,146         | 16-19 | 0,0016   | 0,0195   | 0,304         |
| 2-30  | 0        | 0,0181   | 0             | 16-21 | 0,0008   | 0,0135   | 0,2548        |
| 3-4   | 0,0013   | 0,0213   | 0,2214        | 16-24 | 0,0003   | 0,0059   | 0,068         |
| 3-18  | 0,0011   | 0,0133   | 0,2138        | 17-18 | 0,0007   | 0,0082   | 0,1319        |
| 4-5   | 0,0008   | 0,0128   | 0,1342        | 17-27 | 0,0013   | 0,0173   | 0,3216        |
| 4-14  | 0,0008   | 0,0129   | 0,1382        | 19-20 | 0,0007   | 0,0138   | 0             |
| 5-6   | 0,0002   | 0,0026   | 0,0434        | 19-33 | 0,0007   | 0,0142   | 0             |
| 5-8   | 0,0008   | 0,0112   | 0,1476        | 20-34 | 0,0009   | 0,018    | 0             |
| 6-7   | 0,0006   | 0,0092   | 0,113         | 21-22 | 0,0008   | 0,014    | 0,2565        |
| 6-11  | 0,0007   | 0,0082   | 0,1389        | 22-23 | 0,0006   | 0,0096   | 0,1846        |
| 6-31  | 0        | 0,025    | 0             | 22-35 | 0        | 0,0143   | 0             |

| Nhánh | $r$ (pu) | $x$ (pu) | $b^{sh}$ (pu) | Nhánh | $r$ (pu) | $x$ (pu) | $b^{sh}$ (pu) |
|-------|----------|----------|---------------|-------|----------|----------|---------------|
| 7-8   | 0,0004   | 0,0046   | 0,078         | 23-24 | 0,0022   | 0,035    | 0,361         |
| 8-9   | 0,0023   | 0,0363   | 0,3804        | 23-36 | 0,0005   | 0,0272   | 0             |
| 9-39  | 0,001    | 0,025    | 1,2           | 25-26 | 0,0032   | 0,0323   | 0,531         |
| 10-11 | 0,0004   | 0,0043   | 0,0729        | 25-37 | 0,0006   | 0,0232   | 0             |
| 10-13 | 0,0004   | 0,0043   | 0,0729        | 26-27 | 0,0014   | 0,0147   | 0,2396        |
| 10-32 | 0        | 0,02     | 0             | 26-28 | 0,0043   | 0,0474   | 0,7802        |
| 12-11 | 0,0016   | 0,0435   | 0             | 26-29 | 0,0057   | 0,0625   | 1,029         |
| 12-13 | 0,0016   | 0,0435   | 0             | 28-29 | 0,0014   | 0,0151   | 0,249         |
| 13-14 | 0,0009   | 0,0101   | 0,1723        | 29-38 | 0,0008   | 0,0156   | 0             |

### 3.2. Kết quả tính toán

Trong phần này, hai mô hình trào lưu công suất tuyến tính được tính toán sử dụng phần mềm MATLAB. Phương pháp Newton-Raphson (N-R) được tính toán bằng phần mềm MATPOWER [17]. Kết quả tính toán mô-đun điện áp nút được trình bày trong Bảng 3. Lưu ý rằng, giả thiết của phương pháp DCPF là coi điện áp tại các nút bằng 1 pu. Kết quả tính toán góc pha điện áp và dòng công suất tác dụng trên các nhánh được mô tả tương ứng trong Bảng 4 và Bảng 5. Kết quả tính toán dòng công suất tác dụng nhánh (bao gồm chiều và trị số) theo phương pháp DLPF được mô tả trên Hình 3, trong đó, mũi tên trên các nhánh mô tả chiều dòng công suất tác dụng và trị số cạnh mũi tên là trị số công suất tác dụng nhánh với đơn vị MW.

**Bảng 3.** Kết quả mô-đun điện áp nút (pu)

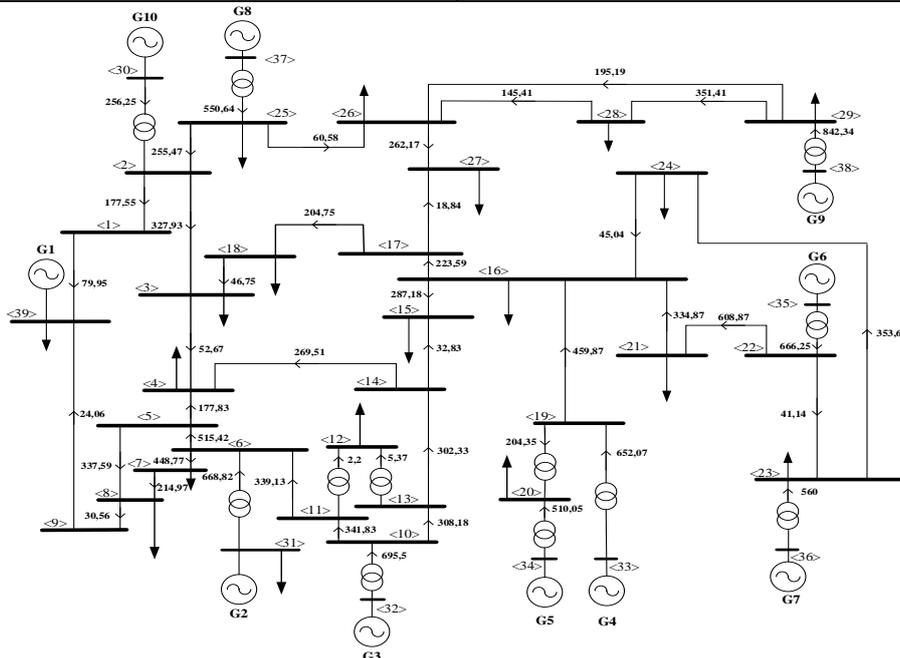
| Nút | Phương pháp |       |      | Nút | Phương pháp |       |      | Nút | Phương pháp |       |      |
|-----|-------------|-------|------|-----|-------------|-------|------|-----|-------------|-------|------|
|     | N-R         | DLPF  | DCPF |     | N-R         | DLPF  | DCPF |     | N-R         | DLPF  | DCPF |
| 1   | 1,039       | 1,043 | 1    | 14  | 1,012       | 1,031 | 1    | 27  | 1,038       | 1,055 | 1    |
| 2   | 1,04        | 1,057 | 1    | 15  | 1,016       | 1,034 | 1    | 28  | 1,050       | 1,066 | 1    |
| 3   | 1,030       | 1,044 | 1    | 16  | 1,032       | 1,049 | 1    | 29  | 1,050       | 1,063 | 1    |
| 4   | 1,004       | 1,022 | 1    | 17  | 1,034       | 1,050 | 1    | 30  | 1,05        | 1,05  | 1    |
| 5   | 1,006       | 1,024 | 1    | 18  | 1,031       | 1,047 | 1    | 31  | 0,982       | 0,982 | 1    |
| 6   | 1,008       | 1,026 | 1    | 19  | 1,05        | 1,061 | 1    | 32  | 0,984       | 0,984 | 1    |
| 7   | 0,998       | 1,016 | 1    | 20  | 0,991       | 0,998 | 1    | 33  | 0,997       | 0,997 | 1    |
| 8   | 0,997       | 1,015 | 1    | 21  | 1,032       | 1,049 | 1    | 34  | 1,012       | 1,012 | 1    |
| 9   | 1,038       | 1,046 | 1    | 22  | 1,050       | 1,063 | 1    | 35  | 1,049       | 1,049 | 1    |
| 10  | 1,017       | 1,035 | 1    | 23  | 1,045       | 1,059 | 1    | 36  | 1,063       | 1,063 | 1    |
| 11  | 1,013       | 1,031 | 1    | 24  | 1,038       | 1,056 | 1    | 37  | 1,027       | 1,02  | 1    |
| 12  | 1,000       | 1,018 | 1    | 25  | 1,057       | 1,06  | 1    | 38  | 1,02        | 1,02  | 1    |
| 13  | 1,01        | 1,032 | 1    | 26  | 1,052       | 1,068 | 1    | 39  | 1,030       | 1,030 | 1    |

**Bảng 4.** Kết quả góc pha điện áp (độ)

| Nút | Phương pháp |       |       | Nút | Phương pháp |       |       | Nút | Phương pháp |       |       |
|-----|-------------|-------|-------|-----|-------------|-------|-------|-----|-------------|-------|-------|
|     | N-R         | DLPF  | DCPF  |     | N-R         | DLPF  | DCPF  |     | N-R         | DLPF  | DCPF  |
| 1   | -13,52      | -12,4 | -12,3 | 14  | -10,72      | -9,67 | -9,67 | 27  | -9,9        | -9,9  | -9,9  |
| 2   | -9,78       | -8,3  | -8,10 | 15  | -11,3       | -10,1 | -10,1 | 28  | -5,9        | -3,8  | -3,8  |
| 3   | -12,27      | -11,1 | -10,9 | 16  | -10,0       | -8,6  | -8,5  | 29  | -3,1        | -0,7  | -0,8  |
| 4   | -12,63      | -11,6 | -11,6 | 17  | -11,1       | -9,7  | -9,7  | 30  | -7,3        | -5,6  | -5,4  |
| 5   | -11,19      | -10,3 | -10,3 | 18  | -11,9       | -10,7 | -10,6 | 31  | 0           | 0     | 0     |
| 6   | -10,41      | -9,64 | -9,65 | 19  | -5,41       | -3,51 | -3,43 | 32  | -0,2        | 0,8   | 0,8   |
| 7   | -12,76      | -11,9 | -11,9 | 20  | -6,82       | -4,95 | -4,87 | 33  | -0,2        | 1,9   | 2,1   |
| 8   | -13,36      | -12,5 | -12,5 | 21  | -7,63       | -6,03 | -5,98 | 34  | -1,6        | 0,2   | 0,4   |
| 9   | -14,18      | -13,2 | -13,1 | 22  | -3,18       | -1,17 | -1,09 | 35  | 1,8         | 4,2   | 4,3   |
| 10  | -8,17       | -7,17 | -7,15 | 23  | -3,38       | -1,38 | -1,32 | 36  | 4,5         | 7,3   | 7,4   |
| 11  | -8,94       | -7,99 | -7,99 | 24  | -9,91       | -8,43 | -8,41 | 37  | -1,5        | 0,7   | 0,5   |
| 12  | -8,99       | -8,02 | -8,06 | 25  | -8,36       | -6,69 | -6,81 | 38  | 3,9         | 6,9   | 6,7   |
| 13  | -8,93       | -7,9  | -7,9  | 26  | -9,45       | -7,8  | -7,8  | 39  | -9,5        | -9,51 | -9,42 |

**Bảng 5. Kết quả dòng công suất tác dụng nhánh (MW)**

| Nhánh | DLPF    | DCPF    | N-R       | Nhánh | DLPF    | DCPF    | N-R       |
|-------|---------|---------|-----------|-------|---------|---------|-----------|
| 1-2   | -177,55 | -178,36 | -174,1888 | 14-15 | 32,83   | 35,07   | 50,2879   |
| 1-39  | 79,95   | 80,76   | 76,0670   | 15-16 | -287,18 | -284,94 | -270,1509 |
| 2-3   | 327,93  | 333,44  | 319,2471  | 16-17 | 223,59  | 225,97  | 223,8482  |
| 2-25  | -255,47 | -261,79 | -246,7606 | 16-19 | -459,87 | -460    | -452,8377 |
| 2-30  | -256,25 | -250    | -250,0000 | 16-21 | -334,87 | -334,78 | -330,0122 |
| 3-4   | 52,67   | 54,12   | 37,2358   | 16-24 | -45,04  | -45,13  | -42,6950  |
| 3-18  | -46,75  | -42,69  | -40,7687  | 17-18 | 204,75  | 200,69  | 198,9081  |
| 4-5   | -177,83 | -177,69 | -197,6041 | 17-27 | 18,84   | 25,29   | 24,6326   |
| 4-14  | -269,51 | -268,2  | -265,7044 | 19-20 | 204,35  | 172     | 174,6197  |
| 5-6   | -515,42 | -514,76 | -537,2231 | 19-33 | -652,07 | -632    | -630,5529 |
| 5-8   | 337,59  | 337,07  | 338,7112  | 20-34 | -510,05 | -508    | -506,7447 |
| 6-7   | 448,77  | 448,48  | 453,1853  | 21-22 | -608,87 | -608,78 | -605,8143 |
| 6-11  | -339,13 | -338,21 | -323,0160 | 22-23 | 41,14   | 41,23   | 42,7817   |
| 6-31  | -668,82 | -625,03 | -668,6711 | 22-35 | -666,25 | -650    | -650,0000 |
| 7-8   | 214,97  | 214,68  | 218,6589  | 23-24 | 353,64  | 353,73  | 352,5744  |
| 8-9   | 30,56   | 29,75   | 34,6455   | 23-36 | -560    | -560    | -559,2848 |
| 9-39  | 24,06   | 23,25   | 27,9749   | 25-26 | 60,58   | 54,22   | 65,3510   |
| 10-11 | 341,83  | 340,91  | 327,6823  | 25-37 | -550,64 | -540    | -539,1714 |
| 10-13 | 308,18  | 309,1   | 321,8951  | 26-27 | 262,17  | 255,72  | 256,8355  |
| 10-32 | -695,5  | -650    | -650,2    | 26-28 | -145,41 | -145,37 | -141,2135 |
| 12-11 | -2,2    | -2,71   | -4,0707   | 26-29 | -195,19 | -195,14 | -191,1453 |
| 12-13 | -5,37   | -5,83   | -4,4909   | 28-29 | -351,41 | -351,37 | -348,3858 |
| 13-14 | 302,33  | 303,27  | 316,7440  | 29-38 | -842,34 | -830    | -827,3830 |



**Hình 3. Chiều và trị số (MW) dòng công suất tác dụng theo phương pháp DLPF**

**3.3. Đánh giá sai số**

**Bảng 6. So sánh sai số của hai phương pháp**

|                          | Mô-đun điện áp (pu) |        | Góc pha điện áp (°) |        | Dòng công suất tác dụng (pu) |        |
|--------------------------|---------------------|--------|---------------------|--------|------------------------------|--------|
|                          | DLPF                | DCPF   | DLPF                | DCPF   | DLPF                         | DCPF   |
| <b>Sai số trung bình</b> | 0,0112              | 0,0288 | 1,4816              | 1,5121 | 0,0886                       | 0,0674 |

Lấy kết quả của phương pháp Newton-Raphson làm tiêu chuẩn, sai số của các phương pháp (md) được tính như sau:

$$\begin{aligned}\varepsilon_U^{tb} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |U_i^{md} - U_i^{NR}| \text{ (pu)}; \quad \varepsilon_\delta^{tb} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\delta_i^{md} - \delta_i^{NR}| \text{ (}^\circ\text{)}; \quad i=1, \dots, n \\ \varepsilon_P^{tb} &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |P_i^{md} - P_i^{NR}| \text{ (pu)}; \quad i=1, \dots, m\end{aligned}\quad (28)$$

trong đó,  $\varepsilon_U^{tb}, \varepsilon_\delta^{tb}, \varepsilon_P^{tb}$  là sai số trung bình của mô-đun điện áp, góc pha điện áp và dòng công suất tác dụng nhánh.

Kết quả đánh giá sai số của các đại lượng mô-đun điện áp, góc pha điện áp, dòng công suất tác dụng nhánh được trình bày trong Bảng 6. Ta thấy rằng, sai số trung bình về mô-đun điện áp của phương pháp DLPF tốt hơn phương pháp DCPF. Sai số trung bình của góc pha điện áp so với phương pháp Newton-Rapson là  $1,4816^\circ$  khi sử dụng phương pháp DLPF và  $1,5121^\circ$  khi sử dụng phương pháp DCPF. Ta thấy rằng, kết quả sai số của dòng công suất tác dụng nhánh của phương pháp DCPF tốt hơn so với phương pháp DLPF. Tuy nhiên, ưu điểm nổi bật của phương pháp DLPF là tính rất chính xác mô-đun điện áp nút, trong khi phương pháp DCPF không tính được.

#### 4. Kết luận

Bài báo so sánh hai phương pháp trào lưu công suất tuyến tính cho lưới điện truyền tải 39 nút New England, bao gồm phương pháp dòng điện một chiều (DCPF) và phương pháp trào lưu công suất tuyến tính tách biên (DLPF). Sai số trung bình về dòng công suất tác dụng nhánh của phương pháp DCPF tốt hơn so với phương pháp DLPF. Tuy nhiên, sai số trung bình về mô-đun điện áp nút và góc pha điện áp nút của phương pháp DLPF đều tốt hơn so với phương pháp DCPF. Về phạm vi áp dụng, phương pháp DLPF có thể áp dụng cho cả lưới điện phân phối và lưới điện truyền tải. Tuy nhiên, phương pháp DCPF chỉ áp dụng được cho lưới điện truyền tải. Chủ đề nghiên cứu trong tương lai là so sánh các phương pháp trào lưu công suất tuyến tính cho hệ thống điện không đối xứng có nguồn điện phân tán.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] H. Bulat, D. Franković, and S. Vlahinić, "Enhanced Contingency Analysis—A Power System Operator Tool," *Energies*, vol. 14, no. 4, p. 923, Feb. 2021, doi: 10.3390/en14040923.
- [2] H. Li *et al.*, "Research on Distribution Network Reliability Assessment Method Considering Distributed Power Access," in *2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Tianjin: IEEE, Sep. 2018, pp. 2407-2411, doi: 10.1109/CICED.2018.8592264.
- [3] Z. Hu and X. Wang, "A Probabilistic Load Flow Method Considering Branch Outages," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 507-514, May 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.873118.
- [4] J. D. Glover, T. Overbye, and M. S. Sarma, *Power System Analysis and Design*, SI Edition, Cengage Learning, 2016.
- [5] F. Li and R. Bo, "DCOPF-Based LMP Simulation: Algorithm, Comparison With ACOPF, and Sensitivity," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 1475-1485, Nov. 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2007.907924.
- [6] M. F. Azis, J. Habibuddin, Mutmainnah, T. Muchtar, and D. Purwanto, "Unit commitment direct current optimal power flow using mixed-integer linear programming," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 885, no. 1, p. 012007, Jul. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/885/1/012007.
- [7] B. Stott, J. Jardim, and O. Alsac, "DC Power Flow Revisited," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 1290-1300, Aug. 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2021235.
- [8] S. Abedi and S. M. Fatemi, "Introducing a novel DC power flow method with reactive power considerations," *2015 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, 2015, doi: 10.1109/PESGM.2015.7286627.
- [9] J. Yang, N. Zhang, C. Kang, and Q. Xia, "A State-Independent Linear Power Flow Model With Accurate Estimation of Voltage Magnitude," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 5, pp. 3607-3617, Sep. 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2638923.

- 
- [10] A. C. Melhorn and J. Taylor, "Modeling Discrete Random Variables with Linear and Nonlinear Dependence for Probabilistic Load Flow," *2022 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet. PESGM*, Oct. 2022, doi: 10.1109/PESGM48719.2022.9916896.
- [11] S. Bolognani and S. Zampieri, "On the Existence and Linear Approximation of the Power Flow Solution in Power Distribution Networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 163-172, Jan. 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2395452.
- [12] P. N. Van and D. Q. Duy, "Different linear power flow models for radial power distribution grids: a comparison," *TNU J. Sci. Technol.*, vol. 226, no. 15, pp. 12-19, Aug. 2021.
- [13] S. Zhou, M. Wang, J. Wang, M. Yang, and X. Dong, "Time-Process Power Flow Calculation Considering Thermal Behavior of Transmission Components," *IEEE Trans Power Syst.*, vol. 35, no. 6, pp. 4232-4250, Nov. 2020.
- [14] M. Li, Y. Du, J. Mohammadi, C. Crozier, K. Baker, and S. Kar, "Numerical Comparisons of Linear Power Flow Approximations: Optimality, Feasibility, and Computation Time," in *2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Denver, CO, USA: IEEE, Jul. 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM48719.2022.9916903.
- [15] D. Liu, L. Liu, H. Z. Cheng, S. Zhang, and J. Xin, "An Extended DC Power Flow Model Considering Voltage Magnitude," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 9, no. 3, pp. 679-683, May 2021, doi: 10.35833/MPCE.2019.000146.
- [16] C. Muscas, P. A. Pegoraro, S. Sulis, M. Pau, F. Ponci, and A. Monti, "New Kalman Filter Approach Exploiting Frequency Knowledge for Accurate PMU-Based Power System State Estimation," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 69, no. 9, pp. 6713-6722, Sep. 2020, doi: 10.1109/TIM.2020.2977744.
- [17] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sanchez, and R. J. Thomas, "MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 12-19, Feb. 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2051168.