

A COMPARATIVE STUDY OF POWER LOSS ALLOCATION METHODS FOR IEEE 33-BUS DISTRIBUTION SYSTEM

Le Toan, Duong Duy Long, Ha Duy Giang, Nguyen Tuan Anh, Pham Nang Van*

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

| ARTICLE INFO | | ABSTRACT |
|---------------------------|------------------|---|
| Received: | 08/7/2022 | The restructuring of the electricity industry and the development of the electricity market have resulted in an increasing need for coping with the problem of allocating the cost pertaining to deploying power grids to market participants. One of the important components of network usage charges is the cost of power loss. However, because of the nonlinear relationship between power loss and branch power flow, the power loss allocation in power systems is highly challenging. As a result, current methods for allocating power loss usually do not ensure fairness for power grid users. This paper provides a detailed comparison of three alternative methods associated with power loss allocation, including the procedure using the superposition theorem, the methodology based on a modified distflow model and the marginal loss coefficient algorithm. The calculation results of power loss allocation for the IEEE 33-bus radial distribution grid are deployed with the aim of comparing and evaluating these three methods. |
| Revised: | 19/8/2022 | |
| Published: | 19/8/2022 | |
| KEYWORDS | | |
| Electricity market | | |
| Power loss allocation | | |
| Superposition theorem | | |
| Modified distflow | | |
| Marginal loss coefficient | | |

SO SÁNH CÁC PHƯƠNG PHÁP PHÂN BỐ TỔN THẤT CÔNG SUẤT CHO LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI 33 NÚT IEEE

Lê Toàn, Dương Duy Long, Hà Duy Giang, Nguyễn Tuấn Anh, Phạm Năng Văn*

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

| THÔNG TIN BÀI BÁO | | TÓM TẮT |
|-----------------------------|------------------|---|
| Ngày nhận bài: | 08/7/2022 | Sự tái cấu trúc ngành điện và phát triển thị trường điện đã dẫn đến nhu cầu thực hiện bài toán phân bố chi phí sử dụng lưới điện cho các đơn vị tham gia thị trường. Một trong các thành phần quan trọng của chi phí sử dụng lưới điện là chi phí cho tổn thất công suất trên lưới điện. Tuy nhiên, vì tổn thất công suất và công suất nút có mối quan hệ phi tuyến nên giải quyết bài toán phân bố tổn thất công suất trong lưới điện là một nhiệm vụ khó khăn. Do đó, các phương pháp phân bố tổn thất công suất hiện tại chưa đảm bảo được yếu tố công bằng cho các đơn vị sử dụng lưới điện. Bài báo này so sánh ba phương pháp phân bố tổn thất công suất của lưới điện, bao gồm phương pháp phân bố tổn thất công suất sử dụng nguyên lý xếp chồng, phương pháp dựa trên trào lưu công suất cải biên và phương pháp hệ số tổn thất biên. Kết quả phân bố tổn thất công suất cho lưới điện phân phối 33 nút IEEE được sử dụng để so sánh và đánh giá ba phương pháp. |
| Ngày hoàn thiện: | 19/8/2022 | |
| Ngày đăng: | 19/8/2022 | |
| TỪ KHÓA | | |
| Thị trường điện | | |
| Phân bố tổn thất công suất | | |
| Nguyên lý xếp chồng | | |
| Trào lưu công suất cải biên | | |
| Hệ số tổn thất biên | | |

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.6242>

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

1. Giới thiệu

Ngành công nghiệp điện trên toàn thế giới đã và đang thay đổi từ mô hình vận hành tập trung sang mô hình vận hành thị trường. Để thực hiện cân bằng thị trường, đơn vị vận hành thường sử dụng thủ tục đấu giá. Các đơn vị phát điện gửi bản chào bán điện và các đơn vị mua điện gửi bản chào mua điện. Sau đó, đơn vị vận hành thị trường điện sử dụng các bản chào này để xây dựng đường cong chào giá (đường cung) và đường cong trả giá (đường cầu). Giao điểm của hai đường cong là điểm cân bằng thị trường, từ đó tính toán được giá thị trường, công suất bán của các đơn vị phát điện và công suất mua của các đơn vị mua điện. Thủ tục đấu giá thường được thực hiện hằng ngày và cân bằng thị trường của ngày tới (ngày D) được xác định tại thời điểm buổi trưa của ngày trước (ngày D-1) [1].

Tuy nhiên, quy trình cân bằng thị trường nêu trên không xét lưới điện, tức là tổn thất công suất của lưới điện không được xem xét. Tuy nhiên, tổng công suất phát của các nguồn điện bằng tổng công suất tiêu thụ của phụ tải cộng với tổn thất công suất trên lưới điện. Từ đó, vấn đề đặt ra là “Ai sẽ là người trả tiền cho những tổn thất này”. Việc trả lời câu hỏi này dẫn đến nhu cầu thực hiện bài toán phân bổ tổn thất công suất cho các đơn vị tham gia thị trường.

Đối với các phương pháp phân bổ tổn thất công suất, các yêu cầu sau cần phải được đảm bảo: (1) Đơn giản; (2) Đảm bảo sự công bằng; (3) Nhất quán với lời giải phân tích trào lưu công suất; (4) Áp dụng được cho cả lưới điện hở và kín; (5) Khuyến khích sự cải thiện hệ số công suất của tải và (6) Phân bổ được cho nguồn và tải. Đối chiếu với những yêu cầu trên, phân bổ tổn thất công suất là bài toán rất phức tạp. Nguyên nhân là do mối quan hệ phi tuyến giữa tổn thất công suất và công suất nút.

Chính mối quan hệ phi tuyến này đã thu hút nhiều nhà nghiên cứu đề xuất các phương pháp khác nhau để phân bổ tổn thất công suất. Một số nghiên cứu hiện tại như sau:

1) *Phương pháp ma trận tổng trở nút* [2] dựa trên kết quả phân tích trào lưu công suất. Phương pháp này có thể phân bổ tổn thất công suất cho cả nguồn và phụ tải. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp là không thể áp dụng cho lưới điện phân phối chỉ có đường dây trên không.

2) *Phương pháp cộng công suất* [3] sử dụng hệ số kinh nghiệm để phân bổ tổn thất công suất. Do sử dụng hệ số kinh nghiệm nên kết quả của phương pháp này không đảm bảo sự công bằng. Một hạn chế khác của phương pháp cộng công suất là chỉ có thể áp dụng cho lưới điện phân phối.

3) *Phương pháp dựa trên giá trị τ* [4] áp dụng lý thuyết trò chơi. Nhược điểm của phương pháp này là khối lượng tính toán lớn và chỉ có thể áp dụng cho lưới hình tia hoặc lưới kín đơn giản.

4) *Phương pháp tỷ lệ* [5] rất đơn giản về mặt tính toán. Đầu tiên, 50% tổn thất công suất được phân bổ cho nguồn và 50% tổn thất công suất được phân bổ cho tải. Tiếp theo, tổn thất công suất được phân bổ cho từng nguồn (phụ tải) tỷ lệ với công suất phát (tiêu thụ) tương ứng. Nhược điểm của phương pháp này là bỏ qua vị trí của nguồn và phụ tải. Nếu lưới điện chỉ có một nguồn thì nguồn điện này sẽ được phân bổ một nửa tổng tổn thất công suất.

5) *Phương pháp sử dụng nguyên lý xếp chồng* [6], [7] không có giả thiết và có thể áp dụng cho cả lưới điện có mạch vòng kín và hình tia. Tuy nhiên phương pháp này chưa phân bổ tổn thất công suất đồng thời cho cả nguồn và tải.

6) *Phương pháp dựa trên trào lưu công suất cải biên* [8] chỉ phân bổ tổn thất công suất cho nút và chỉ áp dụng cho lưới phân phối hình tia.

7) *Phương pháp hệ số tổn thất biên* [5], [9] đang được sử dụng tại một số thị trường điện như PJM, CAISO, ISO-NE và SPP. Phương pháp này đòi hỏi bước hiệu chỉnh do kết quả phân bổ tổn thất công suất sử dụng hệ số tổn thất biên không nhất quán với lời giải trào lưu công suất.

Mục đích của bài báo này là so sánh kết quả phân bổ tổn thất công suất cho lưới điện phân phối 33 nút IEEE sử dụng ba phương pháp, bao gồm phương pháp sử dụng nguyên lý xếp chồng, phương pháp sử dụng trào lưu công suất cải biên và phương pháp hệ số tổn thất biên. Các đóng góp chính của nghiên cứu bao gồm: (1) Mô tả chi tiết ba phương pháp phân bổ tổn thất công suất của lưới điện; (2) So sánh kết quả phân bổ tổn thất công suất cho lưới điện phân phối 33 nút IEEE.

Bài báo gồm bốn phần. Phần 2 trình bày mô hình toán học của ba phương pháp phân bổ tổn thất công suất. Phần 3 áp dụng tính toán cho lưới điện 33 nút IEEE. Những kết luận và hướng nghiên cứu trong tương lai được mô tả trong phần 4.

2. Các phương pháp phân bổ tổn thất công suất

2.1. Phân bổ tổn thất công suất dựa trên nguyên lý xếp chồng

Quy trình phân bổ tổn thất công suất gồm ba bước chính: (1) Phân tích trào lưu công suất; (2) Mô hình hóa hệ thống điện và (3) Ứng dụng nguyên lý xếp chồng.

2.1.1. Phân tích trào lưu công suất

Phân tích trào lưu công suất nhằm mục đích xác định mô-đun và góc pha điện áp tại các nút; công suất tác dụng và công suất phản kháng của các nguồn điện; dòng công suất trên các nhánh và tổn thất công suất của lưới điện [10].

Giả sử hệ thống điện có N nút, ma trận tổng dẫn nút mô tả mạng điện được ký hiệu là \mathbf{Y}_{bus} .

Hệ phương trình phi tuyến mô tả hệ thống điện trong chế độ xác lập ở dạng tọa độ cực:

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

Trong đó, P_i , Q_i lần lượt là công suất tác dụng và công suất phản kháng tại nút i ; U_i , U_k lần lượt là mô-đun điện áp của nút i và k ; G_{ik} , B_{ik} lần lượt là phần thực và phần ảo của phần tử ik trong ma trận tổng dẫn nút; δ_i , δ_k lần lượt là góc pha điện áp nút i và k .

Để giải hệ phương trình phi tuyến (1), ta sử dụng phương pháp Newton-Raphson [11]. Theo phương pháp này, tại mỗi bước lặp, ta cần giải hệ phương trình tuyến tính sau:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix}^{(r)} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{bmatrix}^{(r)} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\delta} \\ \Delta \mathbf{U} / \mathbf{U} \end{bmatrix}^{(r)} \quad (2)$$

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

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} & \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_{N-1} & \Delta Q_1, \Delta Q_2, \dots, \Delta Q_{N_D} \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

2.1.2. Mô hình hóa hệ thống điện

Phụ tải ở nút k được mô hình hóa bằng một nguồn dòng tương đương:

$$j_{Dk} = - \frac{(P_{Dk} + jQ_{Dk})^*}{U_k^*} \quad (4)$$

Trong đó, P_{Dk} , Q_{Dk} và U_k^* biểu thị cho công suất tác dụng, công suất phản kháng của phụ tải và điện áp phức liên hợp tại nút k .

Nguồn điện được mô hình hóa bằng một tổng dẫn tương đương như sau:

$$y_{Gi} = - \frac{(P_{Gi} + jQ_{Gi})^*}{U_i^2} \quad (5)$$

Trong đó, P_{Gi} , Q_{Gi} và U_i tương ứng là công suất tác dụng, công suất phản kháng của nguồn điện và mô-đun điện áp tại nút i .

Sau đó, tổng dẫn tương đương của mỗi nguồn điện được thêm vào phần tử đường chéo (i,i) của ma trận tổng dẫn nút, ta thu được ma trận tổng dẫn nút cải biên \mathbf{Y}_{bus}^{mod} . Nghịch đảo của \mathbf{Y}_{bus}^{mod} được gọi là ma trận tổng trở nút cải biên như sau:

$$\mathbf{Z}_{\text{bus}}^{\text{mod}} = \left(\mathbf{Y}_{\text{bus}}^{\text{mod}} \right)^{-1} \quad (6)$$

2.1.3. Áp dụng nguyên lý xếp chồng

Giả thiết rằng hệ thống điện có N_D phụ tải, ta có ma trận đường chéo \mathbf{J} ($N_D \times N_D$):

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \dot{J}_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dot{J}_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dot{J}_{N_D} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Ma trận \mathbf{Z} ($N \times N_D$) được xây dựng bằng cách loại bỏ các cột ứng với nút nguồn của ma trận tổng trở nút cải biên $\mathbf{Z}_{\text{bus}}^{\text{mod}}$.

Bằng cách nhân hai ma trận \mathbf{Z} và \mathbf{J} , ma trận điện áp \mathbf{U} ($N \times N_D$) thu được như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1,1} & \dot{U}_{1,2} & \dots & \dot{U}_{1,N_D} \\ \dot{U}_{2,1} & \dot{U}_{2,2} & \dots & \dot{U}_{2,N_D} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dot{U}_{N,1} & \dot{U}_{N,2} & \dots & \dot{U}_{N,N_D} \end{bmatrix} = \mathbf{Z} \begin{bmatrix} \dot{J}_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dot{J}_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dot{J}_{N_D} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Trong đó, phần tử $\dot{U}_{i,k}$ của ma trận \mathbf{U} biểu thị cho mức độ đóng góp của nguồn dòng \dot{J}_k vào điện áp phức tại nút i (\dot{U}_i).

Cần lưu ý rằng mỗi cột của ma trận \mathbf{U} có thể được xây dựng bằng cách sử dụng nguyên lý xếp chồng khi chỉ một nguồn dòng tương đương hoạt động. Hơn nữa, điện áp phức tại nút i có thể được xác định từ hàng thứ i của ma trận \mathbf{U} như sau:

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{i,1} + \dot{U}_{i,2} + \dots + \dot{U}_{i,N_D} \quad (9)$$

Sự đóng góp của nguồn dòng \dot{J}_k vào dòng nhánh mn tại nút m được tính như sau:

$$\dot{I}_{mn,k} = (\dot{U}_{m,k} - \dot{U}_{n,k}) \dot{y}_{mn} + \dot{U}_{m,k} \dot{y}_{mn}^{\text{sh}} \quad (10)$$

Trong đó, \dot{y}_{mn} là tổng dẫn dọc của nhánh mn và \dot{y}_{mn}^{sh} là tổng dẫn ngang của nhánh mn nối với nút m .

Tương tự, sự đóng góp của nguồn dòng \dot{J}_k vào dòng nhánh mn tại nút n được tính như sau:

$$\dot{I}_{mn,k} = (\dot{U}_{n,k} - \dot{U}_{m,k}) \dot{y}_{mn} + \dot{U}_{n,k} \dot{y}_{nm}^{\text{sh}} \quad (11)$$

Trong đó, \dot{y}_{nm}^{sh} là tổng dẫn ngang của nhánh mn kết nối với nút n .

Sự đóng góp của nguồn dòng \dot{J}_k tới tổn thất công suất trên nhánh mn được xác định như sau:

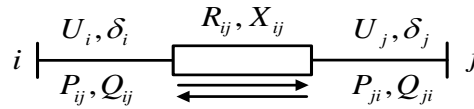
$$\Delta \dot{S}_{mn,k} = \dot{U}_m \dot{I}_{mn,k}^* + \dot{U}_n \dot{I}_{nm,k}^* \quad (12)$$

Sự đóng góp của mỗi phụ tải vào tổng tổn thất công suất của lưới điện được tính như sau:

$$\Delta \dot{S}_k = \sum_{\forall \text{ nhánh } mn} \Delta \dot{S}_{mn,k} \quad (13)$$

2.2. Phân bổ tổn thất công suất sử dụng trào lưu công suất cải biên

Xét hệ thống điện gồm hai nút được mô tả như Hình 1.



Hình 1. Hệ thống điện hai nút

Mối quan hệ giữa tỷ số của dòng công suất nhánh với mô-đun điện áp nút và tỷ số của công suất nút với mô-đun điện áp nút được biểu diễn như sau:

$$\frac{P_{ij}}{U_i} = \sum_{k=j}^N \frac{P_k}{U_k}; \quad \frac{Q_{ij}}{U_i} = \sum_{k=j}^N \frac{Q_k}{U_k} \quad (14)$$

Trong đó, N là tổng tất cả các nút có trong mạng điện.

Tổng tổn thất công suất tác dụng trên toàn lưới điện được xác định như sau:

$$\Delta P = \sum_{ij \in \Omega} R_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} = \sum_{ij \in \Omega} R_{ij} \left(\frac{P_{ij}}{U_i} \right)^2 + \sum_{ij \in \Omega} R_{ij} \left(\frac{Q_{ij}}{U_i} \right)^2 = \Delta P^P + \Delta P^Q \quad (15)$$

Trong đó, Ω là tập hợp các nhánh trên toàn lưới điện.

Ma trận chỉ số nhánh – đường (kí hiệu là \mathbf{T}) là ma trận được mô tả như sau:

$$T_{ij,k} = \begin{cases} 1 & l_{ij} \in \Psi_k \\ 0 & l_{ij} \notin \Psi_k \end{cases} \quad (16)$$

Trong đó, $T_{ij,k}$ là chỉ số liên hệ giữa nhánh ij và nút k ; l_{ij} là các phần tử thuộc Ω ; Ψ_k là tập hợp các nhánh nối giữa nút k và nút nguồn.

Biến đổi các biểu thức (14), (15) và ma trận \mathbf{T} , mối liên hệ giữa công suất nút, công suất nhánh và điện áp nút được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{U}_{S_diag}^{-1} \mathbf{P}_{Br} = \mathbf{T} \mathbf{U}_{R_diag}^{-1} \mathbf{P}_{bus}; \quad \mathbf{U}_{S_diag}^{-1} \mathbf{Q}_{Br} = \mathbf{T} \mathbf{U}_{R_diag}^{-1} \mathbf{Q}_{bus} \quad (17)$$

Trong đó, \mathbf{U}_{S_diag} , \mathbf{U}_{R_diag} là ma trận đường chéo mô-đun điện áp nút đầu và nút cuối của nhánh; \mathbf{P}_{Br} , \mathbf{Q}_{Br} tương ứng là ma trận cột dòng công suất trên nhánh; \mathbf{P}_{bus} , \mathbf{Q}_{bus} lần lượt là ma trận cột của công suất nút; các ma trận trên có thứ tự các phần tử tương ứng với ma trận \mathbf{T} .

Từ (15) và (17), tổn thất nhánh có thể được phân tách thành đóng góp của công suất tác dụng và công suất phản kháng:

$$\Delta P_{ij}^P = R_{ij} \left(\mathbf{T}_{ij} \mathbf{U}_{R_diag}^{-1} \mathbf{P}_{bus} \right)^2; \quad \Delta P_{ij}^Q = R_{ij} \left(\mathbf{T}_{ij} \mathbf{U}_{R_diag}^{-1} \mathbf{Q}_{bus} \right)^2 \quad (18)$$

Trong đó, \mathbf{T}_{ij} là ma trận hàng của ma trận \mathbf{T} tương ứng với nhánh ij .

Tổng tổn thất công suất trên mạng điện gây ra bởi công suất tác dụng và công suất phản kháng:

$$\Delta P^P = \left(\mathbf{T} \mathbf{U}_{R_diag}^{-1} \mathbf{P}_{bus} \right)^T \mathbf{R}_N \mathbf{T} \mathbf{U}_{R_diag}^{-1} \mathbf{P}_{bus}; \quad \Delta P^Q = \left(\mathbf{T} \mathbf{U}_{R_diag}^{-1} \mathbf{Q}_{bus} \right)^T \mathbf{R}_N \mathbf{T} \mathbf{U}_{R_diag}^{-1} \mathbf{Q}_{bus} \quad (19)$$

Trong đó, \mathbf{R}_N là ma trận đường chéo điện trở trên các nhánh tương ứng với ma trận \mathbf{T} .

Từ (18), phân bổ tổn thất công suất trên nhánh ij cho nút k gây ra bởi công suất tác dụng và công suất phản kháng được xác định bởi hai công thức sau:

$$\Delta P_{ij,k}^P = U_k^{-1} P_k R_{ij} \mathbf{T}_{ij} \mathbf{U}_{R_diag}^{-1} \mathbf{P}_{bus}; \quad \Delta P_{ij,k}^Q = U_k^{-1} Q_k R_{ij} \mathbf{T}_{ij} \mathbf{U}_{R_diag}^{-1} \mathbf{Q}_{bus} \quad (20)$$

Tổn thất công suất của mạng điện được phân bổ cho một nút bất kỳ:

$$\Delta P_k^P = \sum_{l_{ij}} \Delta P_{ij,k}^P = U_k^{-1} P_k \mathbf{T}_k^T \mathbf{R}_N \mathbf{T} \mathbf{U}_{R_diag}^{-1} \mathbf{P}_{bus} \quad (21)$$

$$\Delta P_k^Q = \sum_{l_{ij}} \Delta P_{ij,k}^Q = U_k^{-1} Q_k \mathbf{T}_k^T \mathbf{R}_N \mathbf{T} \mathbf{U}_{R_diag}^{-1} \mathbf{Q}_{bus} \quad (22)$$

2.3. Phân bố tổn thất công suất sử dụng hệ số tổn thất biên

Hệ phương trình tuyến tính để tính hệ số tổn thất biên:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_N} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_N} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial \delta_N} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_N} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_N} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_N} \\ \frac{\partial P_2}{\partial U_2} & \frac{\partial P_3}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial U_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_2}{\partial U_N} & \frac{\partial P_3}{\partial U_N} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial U_N} & \frac{\partial Q_2}{\partial U_N} & \frac{\partial Q_3}{\partial U_N} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial U_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial P_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial \Delta P}{\partial P_N} \\ \frac{\partial \Delta P}{\partial Q_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial \Delta P}{\partial Q_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta_N} \\ \frac{\partial \Delta P}{\partial U_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial \Delta P}{\partial U_N} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Hệ phương trình (23) có thể được viết dưới dạng gọn hơn như sau:

$$\mathbf{A} \cdot \vec{\mathbf{p}} = \mathbf{b} \quad (24)$$

Trong đó, ma trận \mathbf{A} là chuyển vị của ma trận Jacobi được xác định từ phân tích trào lưu công suất bằng phương pháp Newton-Raphson; $\vec{\mathbf{p}}$ là véc-tơ hệ số tổn thất biên và \mathbf{b} là véc-tơ hệ số độ nhạy của tổn thất công suất theo góc pha và mô-đun điện áp nút.

Tổng tổn thất công suất tác dụng của lưới điện:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N g_{ij} [U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (25)$$

Trong đó, g_{ij} là phần thực của tổng dẫn dọc nhánh ij .

Từ đó, các phần tử của véc-tơ \mathbf{b} trong hệ phương trình (24) được tính như sau:

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial \delta_i} = 2 \sum_{j=1}^N g_{ij} U_i U_j \sin(\delta_i - \delta_j); \quad \frac{\partial \Delta P}{\partial U_i} = 2 \sum_{j=1}^N g_{ij} [U_i - U_j \cos(\delta_i - \delta_j)]; \quad i = 1, \dots, N \quad (26)$$

Sau khi giải hệ phương trình (24), ta thu được hệ số tổn thất biên tại nút k :

$$K_k = \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Dk}} = - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_k} \quad (27)$$

Tổn thất công suất được phân bổ cho phụ tải k sử dụng hệ số tổn thất biên:

$$\Delta P'_{Dk} = P_{Dk} \cdot \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Dk}} = P_{Dk} \cdot K_k \quad (28)$$

Tuy nhiên, tổng tổn thất công suất được phân bổ ($\Delta P'$) sử dụng hệ số tổn thất biên không bằng với tổng tổn thất công suất của lưới điện (ΔP) khi phân tích trào lưu công suất:

$$\Delta P \neq \sum_{k=1}^{N_D} \Delta P'_{Dk} = \sum_{k=1}^{N_D} P_{Dk} \cdot K_k = \Delta P' \quad (29)$$

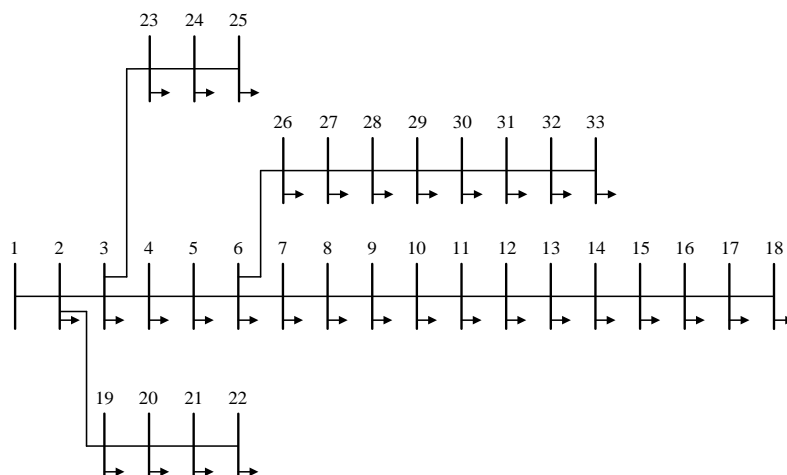
Từ đó, tổn thất công suất được phân bổ cho phụ tải k :

$$\Delta P_{Dk} = P_{Dk} \cdot K'_k = P_{Dk} \cdot K_k \cdot \frac{\Delta P}{\Delta P'} \quad (30)$$

3. Kết quả tính toán

3.1. Mô tả dữ liệu lưới 33 nút IEEE

Lưới điện phân phối hình tia 33 nút IEEE [4] được mô tả trên Hình 2. Lưới điện có một nguồn tại nút 1 với $U_1 = 1,05 \text{ pu}$ ($U_{cb} = 12,66 \text{ kV}$). Trong bài báo này, công suất của các phụ tải được tăng lên 150% so với dữ liệu ban đầu, và tổng công suất phụ tải bằng $5,5725 + j3,45 \text{ MVA}$.



Hình 2. Lưới điện phân phối 33 nút IEEE

3.2. Kết quả tính toán

Trong phần này, phân tích trào lưu công suất và phân bổ tổn thất của ba phương pháp được tính toán bằng phần mềm MATLAB [12].

Phân tích trào lưu công suất của lưới 33 nút, ta được mô-đun và góc pha điện áp nút trong Bảng 1 và tổng tổn thất công suất tác dụng của lưới điện là 439 kW.

Bảng 1. Kết quả phân tích trào lưu công suất

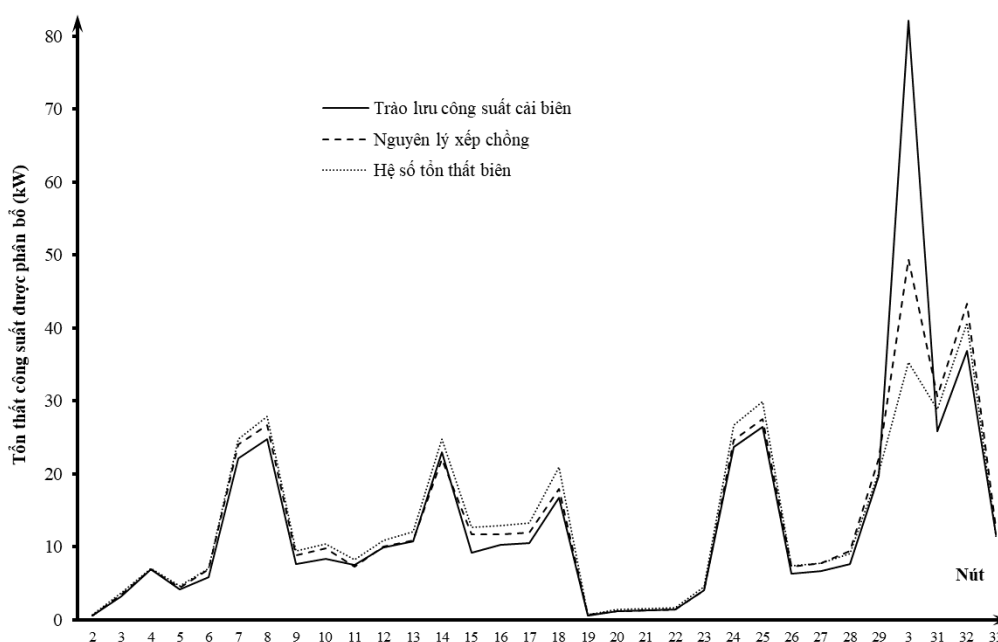
| Nút | U (pu) | δ ($^{\circ}$) | Nút | U (pu) | δ ($^{\circ}$) | Nút | U (pu) | δ ($^{\circ}$) |
|-----|----------|-------------------------|-----|----------|-------------------------|-----|----------|-------------------------|
| 1 | 1,050 | 0 | 12 | 0,942 | -0,255 | 23 | 1,020 | 0,093 |
| 2 | 1,046 | 0,020 | 13 | 0,933 | -0,388 | 24 | 1,010 | -0,030 |
| 3 | 1,025 | 0,136 | 14 | 0,930 | -0,503 | 25 | 1,005 | -0,091 |
| 4 | 1,014 | 0,229 | 15 | 0,928 | -0,558 | 26 | 0,973 | 0,247 |
| 5 | 1,003 | 0,324 | 16 | 0,926 | -0,592 | 27 | 0,969 | 0,328 |
| 6 | 0,976 | 0,190 | 17 | 0,923 | -0,706 | 28 | 0,952 | 0,446 |
| 7 | 0,971 | -0,140 | 18 | 0,922 | -0,720 | 29 | 0,940 | 0,559 |
| 8 | 0,964 | -0,087 | 19 | 1,045 | 0,006 | 30 | 0,935 | 0,712 |
| 9 | 0,954 | -0,192 | 20 | 1,040 | -0,086 | 31 | 0,929 | 0,589 |
| 10 | 0,946 | -0,282 | 21 | 1,039 | -0,112 | 32 | 0,927 | 0,555 |
| 11 | 0,944 | -0,272 | 22 | 1,038 | -0,140 | 33 | 0,927 | 0,543 |

Bảng 2. Kết quả tính toán hệ số tổn thất biên trước và sau khi hiệu chỉnh

| Nút | K | K' | Nút | K | K' | Nút | K | K' |
|-----|--------|--------|-----|--------|--------|-----|--------|--------|
| 1 | 0 | 0 | 12 | 0,1826 | 0,1215 | 23 | 0,0486 | 0,0323 |
| 2 | 0,0069 | 0,0046 | 13 | 0,2010 | 0,1338 | 24 | 0,0636 | 0,0423 |
| 3 | 0,0404 | 0,0269 | 14 | 0,2073 | 0,1380 | 25 | 0,0713 | 0,0475 |
| 4 | 0,0588 | 0,0391 | 15 | 0,2119 | 0,1410 | 26 | 0,1231 | 0,0819 |
| 5 | 0,0773 | 0,0514 | 16 | 0,2164 | 0,1440 | 27 | 0,1293 | 0,0861 |
| 6 | 0,1184 | 0,0788 | 17 | 0,2223 | 0,1479 | 28 | 0,1521 | 0,1012 |
| 7 | 0,1242 | 0,0826 | 18 | 0,2242 | 0,1492 | 29 | 0,1685 | 0,1121 |
| 8 | 0,1395 | 0,0928 | 19 | 0,0079 | 0,0053 | 30 | 0,1770 | 0,1178 |
| 9 | 0,1576 | 0,1049 | 20 | 0,0151 | 0,0101 | 31 | 0,1888 | 0,1257 |
| 10 | 0,1747 | 0,1163 | 21 | 0,0164 | 0,0109 | 32 | 0,1913 | 0,1273 |
| 11 | 0,1776 | 0,1182 | 22 | 0,0175 | 0,0116 | 33 | 0,1919 | 0,1277 |

Kết quả tính toán hệ số tổn thất biên được trình bày trong Bảng 2. Khi sử dụng hệ số tổn thất biên trước hiệu chỉnh (K), tổng tổn thất công suất được phân bổ cho các phụ tải bằng 660 kW. Tuy nhiên, với hệ số tổn thất biên sau khi hiệu chỉnh (K'), tổng tổn thất công suất được phân bổ cho các phụ tải là 439 kW. Trị số này chính xác bằng tổng tổn thất công suất khi phân tích trào lưu công suất.

Kết quả tính toán phân bổ tổn thất công suất sử dụng ba phương pháp được mô tả ở Hình 3. Từ Hình 3, ta thấy rằng, kết quả phân bổ tổn thất công suất cho phụ tải của ba phương pháp là khác nhau. Sự khác biệt lớn nhất giữa ba phương pháp phân bổ tại nút 30 (phụ tải có hệ số công suất bằng 0,316). Trong đó, tổn thất công suất được phân bổ bằng 82,16 kW khi sử dụng trào lưu công suất cải biên; 49,48 kW khi sử dụng nguyên lý xếp chồng và 35,34 kW khi sử dụng hệ số tổn thất biên. Đồng thời, với cùng phương pháp, tổn thất công suất được phân bổ cho các phụ tải phụ thuộc vào công suất tiêu thụ của phụ tải và vị trí của phụ tải trong lưới điện.



Hình 3. Kết quả phân bổ tổn thất công suất của ba phương pháp

4. Kết luận

Bài báo so sánh ba phương pháp phân bổ tổn thất công suất cho lưới điện phân phối 33 nút IEEE, bao gồm phương pháp dựa trên nguyên lý xếp chồng, phương pháp sử dụng trào lưu công suất cải biên và phương pháp hệ số tổn thất biên. Đặc điểm chung của ba phương pháp là dễ hiểu, có xét công suất tiêu thụ và vị trí của phụ tải trong lưới điện. Tuy nhiên, tổn thất công suất được phân bổ cho phụ tải sử dụng ba phương pháp là khác nhau. Điều này là do phương pháp phân bổ dựa trên nguyên lý xếp chồng không sử dụng mối quan hệ phi tuyến giữa tổn thất công suất và công suất nút. Đồng thời, phương pháp hệ số tổn thất biên đòi hỏi bước hiệu chỉnh để đảm bảo tổng tổn thất công suất được phân bổ bằng với giá trị có được từ phân tích trào lưu công suất. Về phạm vi áp dụng, phương pháp dựa trên nguyên lý xếp chồng và phương pháp hệ số tổn thất biên có thể áp dụng cho cả lưới điện kín và lưới điện hình tia. Tuy nhiên, phương pháp sử dụng trào lưu công suất cải biên chỉ áp dụng được cho lưới điện phân phối với cấu trúc hình tia. Hướng nghiên cứu tương lai là so sánh các phương pháp phân bổ tổn thất công suất cho lưới điện có các nguồn điện phân tán và không đối xứng, và đề xuất phương pháp phân bổ tổn thất cho các giao dịch song phương trong thị trường điện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] N. V. Pham, D. H. Nguyen, and D. H. Nguyen, "The impact of TCSC on transmission costs in wholesale power markets considering bilateral transactions and active power reserves," *Univ. Danang - J. Sci. Technol.*, vol. 12, no. 109, pp. 24–28, Dec. 2016.
- [2] A. J. Conejo, F. D. Galiana, and I. Kockar, "Z-bus loss allocation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 1, pp. 105–110, 2001.
- [3] M. Atanasovski and R. Taleski, "Power summation method for loss allocation in radial distribution networks with DG," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2491–2499, 2011.
- [4] S. Sharma and A. R. Abhyankar, "Loss allocation for weakly meshed distribution system using analytical formulation of Shapley value," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 2, pp. 1369–1377, 2016.
- [5] A. J. Conejo, J. M. Arroyo, N. Alguacil, and A. L. Guijarro, "Transmission loss allocation: a comparison of different practical algorithms," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 3, pp. 571–576, 2002.
- [6] D. Rajičić and M. Todorovski, "Participation of every generator to loads, currents, and power losses," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 2, pp. 1638–1640, 2020.
- [7] D. L. Duong, T. A. Nguyen, and N. V. Pham, "Superposition principle-based method for power loss allocation in power systems," *Univ. Danang - J. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 6.2, pp. 63–68, 2022.
- [8] T. Yang, Y. Guo, L. Deng, H. Shu, X. Shen, and H. Sun, "A distribution system loss allocation approach based on a modified distflow model," in *2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2020, pp. 1–5.
- [9] J. Mutale, G. Strbac, S. Curcic, and N. Jenkins, "Allocation of losses in distribution systems with embedded generation," *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 147, no. 1, pp. 7–14, 2000.
- [10] N. V. Pham and Q. D. Do, "Different linear power flow models for radial power distribution grids: a comparison," *TNT J. Sci. Technol.*, vol. 226, no. 15, pp. 12–19, Aug. 2021.
- [11] 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.
- [12] MATLAB [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> [Accessed June 2022].