

EVALUATING THE IMPACT OF DISTRIBUTED GENERATION ON POWER LOSSES IN RADIAL DISTRIBUTION GRIDS USING TWO APPROXIMATION MODELS: A COMPARISON

Do Quang Duy, Pham Nang Van*

Hanoi University of Science and Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 24/9/2021 Revised: 05/11/2021 Published: 08/11/2021	This paper presents linear approximation and quadratic approximation models to calculate the power loss in radial distribution grids due to the influence of Distributed Generation. Power loss is expressed as a first-degree function of Distributed Generation output using the power loss sensitivity factors in the linear approximation model. For the quadratic approximation model, power loss is given as a quadratic function of Distributed Generation output. Coefficients of quadratic and linear approximation approaches are both determined from an initial power flow. A six-bus distribution system is employed to evaluate the impact of Distributed Generation on power loss using the above two models. At the same time, the calculated results from these two models are also compared with those of the precise non-linear power flow method. The comparison reveals that the quadratic approximation model is more accurate than the linear approximation model. The quadratic approximation model, therefore, can be exploited to compute power loss of distribution power grids swiftly.
KEYWORDS Distributed Generation (DG) Radial Distribution Grids Power Loss Sensitivity Factors Linear Approximation Model Quadratic Approximation Model	

SO SÁNH HAI MÔ HÌNH XẤP XỈ ĐỂ ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA NGUỒN ĐIỆN PHÂN TÁN ĐẾN TỔN THẤT CÔNG SUẤT CỦA LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI HÌNH TIA

Đỗ Quang Duy, Phạm Năng Văn*

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 24/9/2021 Ngày hoàn thiện: 05/11/2021 Ngày đăng: 08/11/2021	Bài báo trình bày các mô hình xấp xỉ tuyến tính và xấp xỉ bậc hai để tính toán tổn thất công suất trong lưới điện phân phối hình tia do ảnh hưởng của nguồn điện phân tán. Với mô hình xấp xỉ tuyến tính, tổn thất công suất được biểu diễn là hàm bậc một của công suất phát nguồn điện phân tán sử dụng hệ số độ nhạy tổn thất công suất. Với mô hình xấp xỉ bậc hai, tổn thất công suất được biểu diễn là hàm bậc hai của công suất phát nguồn điện phân tán. Các hệ số của các mô hình xấp xỉ tuyến tính và bậc hai đều được xác định từ chế độ xác lập ban đầu. Lưới điện phân phối sáu nút được áp dụng để đánh giá ảnh hưởng của nguồn điện phân tán đến tổn thất công suất sử dụng hai mô hình trên. Đồng thời, các kết quả tính toán theo hai mô hình cũng được so sánh với kết quả của phương pháp trào lưu công suất phi tuyến chính xác. Sự so sánh cho thấy rằng, mô hình xấp xỉ bậc hai chính xác hơn mô hình xấp xỉ tuyến tính và có thể được áp dụng để tính toán nhanh tổn thất công suất của lưới điện phân phối.
TỪ KHÓA Nguồn điện phân tán (DG) Lưới điện phân phối hình tia Hệ số độ nhạy tổn thất công suất Mô hình xấp xỉ tuyến tính Mô hình xấp xỉ bậc hai	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5080>

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

1. Giới thiệu

Hiện nay, mức độ thâm nhập của các nguồn điện phân tán (DG) vào lưới điện phân phối ngày càng tăng. Xu hướng này dẫn đến nhu cầu đánh giá chi tiết các ảnh hưởng của nguồn điện phân tán đến tổn thất công suất, ổn định điện áp và cấu trúc vận hành tối ưu... của lưới điện phân phối. Vị trí đặt và công suất phát của các DG có ảnh hưởng nhiều đến tổn thất công suất của lưới điện phân phối.

Theo truyền thống, các phương pháp trào lưu công suất phi tuyến như Gauss-Seidel, Newton-Raphson và cộng công suất (PSM) được áp dụng để tính toán chính xác tổn thất công suất của lưới điện phân phối [1]. Tuy nhiên, các mô hình trào lưu công suất phi tuyến thường phức tạp và có tốc độ tính toán chậm. Do đó, một số nghiên cứu đã đề xuất sử dụng các phương pháp trào lưu công suất tuyến tính hóa để tính toán tổn thất công suất của lưới điện phân phối [1], [2]. Sử dụng các mô hình xấp xỉ với hệ số độ nhạy là một tiếp cận khác để tính toán tổn thất công suất của lưới điện phân phối.

Theo truyền thống, mô hình xấp xỉ tuyến tính với hệ số độ nhạy tổn thất thường được sử dụng để tính toán tổn thất công suất của hệ thống điện [3]. Trong bài báo [4], tác giả đã đề xuất một phương pháp tính toán nhanh và hiệu quả để xác định hệ số độ nhạy tổn thất công suất trong vận hành thời gian thực của hệ thống điện. Cấu trúc hình tia của lưới điện phân phối cũng được xem xét khi tính toán hệ số độ nhạy tổn thất công suất [5]. Bên cạnh mô hình xấp xỉ tuyến tính, nghiên cứu [6] đã đề xuất mô hình xấp xỉ bậc hai để tính toán tổn thất công suất của lưới điện. Tuy nhiên, mức độ chính xác của các phương pháp xấp xỉ này cần phải được đánh giá thêm khi tính toán tổn thất công suất của lưới điện phân phối có các nguồn điện phân tán.

Xét về ứng dụng của phương pháp độ nhạy, bài báo [7] trình bày thuật toán cho bài toán tái cấu trúc lưới nhằm cực tiểu tổn thất công suất dựa trên độ nhạy của tổn thất công suất theo tổng trở nhánh. Phương pháp độ nhạy cũng được nghiên cứu nhiều trong phân tích lưới điện phân phối không đối xứng [8]. Trong bài báo [9], hệ số độ nhạy dựa trên phương pháp thuật toán điểm trong được áp dụng để chuyển các biến điều khiển liên tục thành các biến rời rạc. Các nghiên cứu [10], [11] trình bày sự phân tách giá biên nút lưới điện phân phối (DLMP) thành các thành phần bao gồm năng lượng, tổn thất, nghẽn mạch và điện áp sử dụng hệ số độ nhạy tổn thất công suất và hệ số độ nhạy điện áp nút theo công suất của tải.

Mục đích của bài báo này là so sánh kết quả tính toán tổn thất công suất của lưới điện phân phối có các nguồn điện phân tán sử dụng các mô hình xấp xỉ tuyến tính và bậc hai. Các đóng góp chính của nghiên cứu này bao gồm:

- Trình bày chi tiết các bước tính toán tổn thất công suất sử dụng hai mô hình xấp xỉ cho hệ thống điện 6 nút khi có sự thay đổi công suất phát của DG.
- Đánh giá sai số của tổn thất công suất tính theo hai mô hình xấp xỉ so với phương pháp cộng công suất ứng với các mức độ thay đổi công suất phát khác nhau của DG.

Bài báo gồm 4 phần. Phần 2 trình bày các biểu thức toán học của phương pháp cộng công suất và hai mô hình xấp xỉ trong việc tính toán tổn thất công suất của lưới khi DG thay đổi công suất phát. Kết quả và nhận xét đối với lưới điện phân phối 6 nút được cho trong phần 3, những kết luận và hướng phát triển được mô tả trong phần 4.

2. Cơ sở phương pháp nghiên cứu

2.1. Phương pháp cộng công suất (PSM)

Lưới điện phân phối hình tia có cấu trúc giống như sơ đồ cây với nút nguồn thường là trạm biến áp phân phối. Khi đó, để phù hợp cho các phương pháp dưới đây, nút nguồn được đánh số là 1 và chỉ số của một nút phải lớn hơn nút nguồn liên kết trực tiếp với nút đó. Nếu hệ thống có N nút thì tất cả các nút được đánh số liên tục từ 1 đến N .

Phương pháp cộng công suất là mô hình trào lưu công suất dòng điện xoay chiều (ACPF). Thuật toán tính điện áp nút và dòng công suất nhánh sử dụng phương pháp cộng công suất gồm 5 bước:

- Bước 1: Chọn xấp xỉ đầu điện áp các nút là 1 pu (trừ nút cân bằng, nút 1). Bước lặp $r = 1$.
- Bước 2: Từ tập hợp điện áp các nút đã chọn, tính toán các công suất nút có gộp công suất của các tổng dẫn nhánh ngang:

$$\dot{S}_i^{(r)} = \dot{S}_i^{\text{sp}} + y_{si}^* \left(U_i^{(r)} \right)^2 \quad i = N, N-1, \dots, 2 \quad (1)$$

Trong đó, $\dot{S}_i^{\text{sp}}$ là công suất phức bơm vào nút i ; y_{si} là tổng dẫn nhánh ngang nối vào nút i ; $U_i^{(r)}$ là mô-đun của điện áp tại nút i ở bước lặp thứ r và N là tổng số nút của hệ thống điện.

- Bước 3: Quá trình ngược

Thực hiện tính ngược tất cả các nhánh cây (bắt đầu từ nhánh có chỉ số lớn nhất và hướng tới nhánh có chỉ số bằng 1), tính công suất phức cuối nhánh theo biểu thức (2):

$$\dot{S}_{ik}^{(r)} = \dot{S}_k^{(r)} + \sum_{m \in \Omega_k, m \neq i} \left[\dot{S}_{km}^{(r)} + \left(\frac{S_{km}^{(r)}}{U_m^{(r)}} \right)^2 \dot{Z}_{km} \right] \quad k = N, N-1, \dots, 2 \quad (2)$$

Trong đó, Ω_k là tập hợp các nút nối với nút k và $\dot{Z}_{km}$ là tổng trở nhánh dọc của nhánh nối giữa nút k và nút m .

- Bước 4: Quá trình thuận

Thực hiện tính cây theo hướng ngược lại, cập nhật điện áp nút từ nút nguồn bằng cách trừ đi tổn thất điện áp nhánh tương ứng:

$$\dot{U}_k^{(r+1)} = \dot{U}_i^{(r+1)} - \frac{\left(\dot{S}_{ik}^{(r)} \right)^*}{\left(\dot{U}_k^{(r)} \right)^*} \dot{Z}_{ik} \quad k = 2, 3, \dots, N \quad (3)$$

- Bước 5: Sử dụng biểu thức (4) để so sánh điện áp nút trong lần lặp $(r+1)$ với điện áp nút tương ứng từ lần lặp r . Nếu trị tuyệt đối độ lệch này nhỏ hơn sai số cho trước thì dừng thuật toán. Nếu không thì quay lại bước 2 với điện áp các nút bằng điện áp đã tính được ở bước 4.

$$\max_{i=2,3,\dots,N} \left\{ \left| \dot{U}_i^{(r)} - \dot{U}_i^{(r+1)} \right| \right\} \leq \varepsilon \quad (4)$$

Sau khi thuật toán hội tụ, tổng tổn thất công suất của hệ thống được tính theo (5).

$$\Delta P = \sum_{\forall \text{nhánh } ik} \Delta P_{ik} \quad (5)$$

2.2. Mô hình xấp xỉ tuyến tính

Với mô hình xấp xỉ tuyến tính, tổn thất công suất tác dụng sau khi DG thay đổi công suất phát được tính như sau:

$$\Delta P^{\text{new}} = \Delta P^{\text{old}} + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Gj}} \cdot \Delta P_{Gj} + \frac{\partial \Delta P}{\partial Q_{Gj}} \cdot \Delta Q_{Gj} \quad (6)$$

Trong đó:

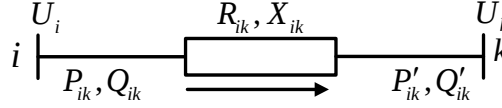
- ΔP^{old} là tổn thất công suất ở trạng thái ban đầu;
- ΔP_{Gj} và ΔQ_{Gj} lần lượt là sự thay đổi công suất tác dụng và công suất phản kháng của DG tại nút j ;

- $\frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Gj}}$ và $\frac{\partial \Delta P}{\partial Q_{Gj}}$ lần lượt là các hệ số độ nhạy tổn thất công suất theo công suất phát của nguồn DG tại nút j .

Xét lưới điện hai nút có sơ đồ thay thế như Hình 1. Các ký hiệu trên hình vẽ này được chú thích như sau:

- P_{ik} và Q_{ik} lần lượt là dòng công suất tác dụng và phản kháng ở đầu nhánh ik ;
- P'_{ik} và Q'_{ik} lần lượt là dòng công suất tác dụng và phản kháng ở cuối nhánh ik ;

- U_i và U_k lần lượt là mô-đun điện áp tại các nút i và k ;
- R_{ik} và X_{ik} lần lượt là điện trở và điện kháng của nhánh ik ;



Hình 1. Sơ đồ thay thế của nhánh ik

Một ma trận $\mathbf{T}$ kích cỡ $(N \times N)$ được xác định, trong đó phần tử $T(k, j) = 1$ nếu nút j thuộc nhánh có nút gốc là k ; ngược lại, phần tử $T(k, j) = 0$.

Dựa vào ma trận $\mathbf{T}$, dòng công suất nhánh cuối đường dây ik được thể hiện như sau:

$$P'_{ik} = \sum_{j=k}^N T(k, j) \cdot (P_{Dj} - P_{Gj}) + \sum_{j=k+1}^N T(k, j) \cdot \Delta P_{mj} \quad (7)$$

$$Q'_{ik} = \sum_{j=k}^N T(k, j) \cdot (Q_{Dj} - Q_{Gj}) + \sum_{j=k+1}^N T(k, j) \cdot \Delta Q_{mj} \quad (8)$$

Trong đó:

- P_{Dj} (Q_{Dj}) và P_{Gj} (Q_{Gj}) lần lượt là công suất tác dụng (công suất phản kháng) của tải và nguồn tại nút j ;
- m là nút nguồn nối trực tiếp với nút j ;
- ΔP_{mj} và ΔQ_{mj} là tổn thất công suất tác dụng và công suất phản kháng trên nhánh mj .

Tổn thất công suất tác dụng và công suất phản kháng trên nhánh ik được xác định theo (9).

$$\Delta P_{ik} = \frac{(P'_{ik})^2 + (Q'_{ik})^2}{U_k^2} \cdot R_{ik}; \quad \Delta Q_{ik} = \frac{(P'_{ik})^2 + (Q'_{ik})^2}{U_k^2} \cdot X_{ik} \quad (9)$$

Giả sử rằng, trị số điện áp tại nút k không đổi khi công suất phát của các DG thay đổi. Do đó, độ nhạy của tổn thất công suất trên nhánh ik theo công suất phát của DG ở nút j được viết như sau:

$$\frac{\partial \Delta P_{ik}}{\partial P_{Gj}} = \left(2P'_{ik} \frac{\partial P'_{ik}}{\partial P_{Gj}} + 2Q'_{ik} \frac{\partial Q'_{ik}}{\partial P_{Gj}} \right) \cdot \frac{R_{ik}}{U_k^2}; \quad \frac{\partial \Delta Q_{ik}}{\partial P_{Gj}} = \left(2P'_{ik} \frac{\partial P'_{ik}}{\partial P_{Gj}} + 2Q'_{ik} \frac{\partial Q'_{ik}}{\partial P_{Gj}} \right) \cdot \frac{X_{ik}}{U_k^2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \Delta P_{ik}}{\partial Q_{Gj}} = \left(2P'_{ik} \frac{\partial P'_{ik}}{\partial Q_{Gj}} + 2Q'_{ik} \frac{\partial Q'_{ik}}{\partial Q_{Gj}} \right) \cdot \frac{R_{ik}}{U_k^2}; \quad \frac{\partial \Delta Q_{ik}}{\partial Q_{Gj}} = \left(2P'_{ik} \frac{\partial P'_{ik}}{\partial Q_{Gj}} + 2Q'_{ik} \frac{\partial Q'_{ik}}{\partial Q_{Gj}} \right) \cdot \frac{X_{ik}}{U_k^2} \quad (11)$$

Hệ số độ nhạy tổn thất công suất đối với lưới phân phối khi công suất phát của DG tại nút j thay đổi được tính bằng tổng độ nhạy của tổn thất công suất tất cả các nhánh trong lưới phân phối:

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Gj}} = \sum_{\forall \text{ nhánh } ik} \frac{\partial \Delta P_{ik}}{\partial P_{Gj}}; \quad \frac{\partial \Delta P}{\partial Q_{Gj}} = \sum_{\forall \text{ nhánh } ik} \frac{\partial \Delta P_{ik}}{\partial Q_{Gj}}; \quad \frac{\partial \Delta Q}{\partial P_{Gj}} = \sum_{\forall \text{ nhánh } ik} \frac{\partial \Delta Q_{ik}}{\partial P_{Gj}}; \quad \frac{\partial \Delta Q}{\partial Q_{Gj}} = \sum_{\forall \text{ nhánh } ik} \frac{\partial \Delta Q_{ik}}{\partial Q_{Gj}} \quad (12)$$

Theo (7) và (8), các hệ số độ nhạy của dòng công suất nhánh theo công suất phát của DG được xác định dưới đây:

$$\frac{\partial P'_{ik}}{\partial P_{Gj}} = -T(k, j) + \sum_{j=k+1}^N T(k, j) \cdot \frac{\partial \Delta P_{mj}}{\partial P_{Gj}}; \quad \frac{\partial Q'_{ik}}{\partial P_{Gj}} = \sum_{j=k+1}^N T(k, j) \cdot \frac{\partial \Delta Q_{mj}}{\partial P_{Gj}} \quad (13)$$

$$\frac{\partial P'_{ik}}{\partial Q_{Gj}} = \sum_{j=k+1}^N T(k, j) \cdot \frac{\partial \Delta P_{mj}}{\partial Q_{Gj}}; \quad \frac{\partial Q'_{ik}}{\partial Q_{Gj}} = -T(k, j) + \sum_{j=k+1}^N T(k, j) \cdot \frac{\partial \Delta Q_{mj}}{\partial Q_{Gj}} \quad (14)$$

Các phương trình (13)-(14) được thay vào các biểu thức (10)-(11). Sau đó, hệ số tổn thất có thể được biểu diễn theo thuật toán đệ quy.

2.3. Mô hình xấp xỉ bậc hai

Khi DG tại nút j thay đổi công suất phát một lượng ΔP_{Gj} và ΔQ_{Gj} , tổn thất công suất theo mô hình xấp xỉ bậc hai được tính như sau:

$$\begin{aligned}\Delta P^{\text{new}} &= \Delta P^{\text{old}} + \Delta P \\ &= \Delta P^{\text{old}} + \sum_{\forall \text{ nhánh } ik} R_{ik} \cdot \frac{\left(P'_{ik} - \sum_{k \in M_j^{\text{lpath}}} \Delta P_{Gj} \right)^2 + \left(Q'_{ik} - \sum_{k \in M_j^{\text{lpath}}} \Delta Q_{Gj} \right)^2}{U_k^2} - \sum_{\forall \text{ nhánh } ik} R_{ik} \cdot \frac{P'^2_{ik} + Q'^2_{ik}}{U_k^2} \\ &= \Delta P^{\text{old}} + \sum_{\forall \text{ nhánh } ik} \frac{R_{ik}}{U_k^2} \cdot \left(\sum_{k \in M_j^{\text{lpath}}} \Delta P_{Gj} \right)^2 - \sum_{\forall \text{ nhánh } ik} \frac{2R_{ik} P'_{ik}}{U_k^2} \cdot \left(\sum_{k \in M_j^{\text{lpath}}} \Delta P_{Gj} \right) \\ &\quad + \sum_{\forall \text{ nhánh } ik} \frac{R_{ik}}{U_k^2} \cdot \left(\sum_{k \in M_j^{\text{lpath}}} \Delta Q_{Gj} \right)^2 - \sum_{\forall \text{ nhánh } ik} \frac{2R_{ik} Q'_{ik}}{U_k^2} \cdot \left(\sum_{k \in M_j^{\text{lpath}}} \Delta Q_{Gj} \right)\end{aligned}\quad (15)$$

Trong đó, M_j^{lpath} là tập hợp các nút thuộc các nhánh từ nút nguồn đến nút j .

Phương trình (15) mô tả mô hình xấp xỉ bậc hai của tổng tổn thất trên lưới điện theo công suất phát của DG. Trong phương trình (15), điện áp nút và công suất nhánh được lấy từ kết quả trào lưu công suất của trường hợp cơ sở.

3. Kết quả tính toán và thảo luận

Trong phần này, hệ số độ nhạy tổn thất công suất và tổng tổn thất công suất được tính toán sử dụng lưới điện phân phối sáu nút như Hình 2. Điện áp định mức của hệ thống điện này bằng 10 kV. Công suất tác dụng và công suất phản kháng phát của mỗi nguồn điện phân tán (DG) trong trạng thái cơ sở (ban đầu) được cho dưới đây ($S_{cb} = 1000$ kVA):

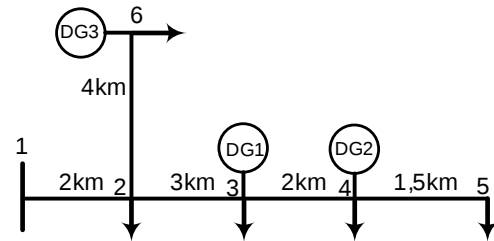
$$\dot{S}_{DG1} = 0,5765 + j1,0000 \text{ pu}; \quad \dot{S}_{DG2} = 1,0000 + j0,3287 \text{ pu}; \quad \dot{S}_{DG3} = 1,0000 + j0,3287 \text{ pu}$$

Điện trở và điện kháng đơn vị của tất cả các nhánh là bằng nhau và có trị số lần lượt là 0,33 Ω/km và 0,395 Ω/km . Bên cạnh đó, trị số điện áp nút nguồn được đặt là 1,05 pu ($U_{cb} = 10$ kV).

Công suất phức của phụ tải tại các nút trong hệ thống này:

$$\dot{S}_{D2} = 1,4 + j0,7; \quad \dot{S}_{D3} = 1,2 + j0,45;$$

$$\dot{S}_{D4} = 0,8 + j0,5; \quad \dot{S}_{D5} = 1 + j0,6; \quad \dot{S}_{D6} = 2,5 + j1,2$$



Hình 2. Lưới điện phân phối sáu nút

Sử dụng MATPOWER [12], trào lưu công suất cơ sở được cho ở Bảng 1.

Bảng 1. Trào lưu công suất trạng thái cơ sở

Nhánh (i-k)	1-2	2-3	3-4	4-5	2-6
S'_{ik} (pu)	4,4031 + j1,8879	1,4394 + j0,2403	0,8072 + j0,7799	1,0000 + j0,6000	1,5000 + j0,8713
U_k (pu)	1,0061	0,9886	0,9769	0,9681	0,9714

3.1. Hệ số độ nhạy tổn thất công suất

Dòng công suất cuối nhánh của hệ thống điện 6 nút được biểu diễn:

$$P'_{45} = P_{D5}; \quad P'_{34} = P_{D4} - P_{G4} + P_{D5} + \Delta P_{45}; \quad P'_{23} = P_{D3} - P_{G3} + P_{D4} - P_{G4} + P_{D5} + \Delta P_{34} + \Delta P_{45}$$

$$P'_{26} = P_{D6} - P_{G6}; \quad P'_{12} = P_{D2} + P_{D3} - P_{G3} + P_{D4} - P_{G4} + P_{D5} + P_{D6} - P_{G6} + \Delta P_{23} + \Delta P_{34} + \Delta P_{45} + \Delta P_{26}$$

$$Q'_{45} = Q_{D5}; \quad Q'_{34} = Q_{D4} - Q_{G4} + Q_{D5} + \Delta Q_{45}; \quad Q'_{23} = Q_{D3} - Q_{G3} + Q_{D4} - Q_{G4} + Q_{D5} + \Delta Q_{34} + \Delta Q_{45}$$

$$Q'_{26} = Q_{D6} - Q_{G6}; \quad Q'_{12} = Q_{D2} + Q_{D3} - Q_{G3} + Q_{D4} - Q_{G4} + Q_{D5} + Q_{D6} - Q_{G6} + \Delta Q_{23} + \Delta Q_{34} + \Delta Q_{45} + \Delta Q_{26}$$

Hệ số độ nhạy tổn thất công suất của các nhánh 4-5 và 3-4 đối với sự thay đổi công suất tác dụng phát của DG tại nút 4 trình bày chi tiết như dưới đây.

- Hệ số độ nhạy tổn thất công suất đối với nhánh nối giữa nút 4 và 5:

$$\frac{\partial P'_{45}}{\partial P_{G4}} = 0; \quad \frac{\partial Q'_{45}}{\partial P_{G4}} = 0; \quad \frac{\partial \Delta P_{45}}{\partial P_{G4}} = \left(2P'_{45} \frac{\partial P'_{45}}{\partial P_{G4}} + 2Q'_{45} \frac{\partial Q'_{45}}{\partial P_{G4}} \right) \cdot \frac{R_{45}}{U_5^2} = 0; \quad \frac{\partial \Delta Q_{45}}{\partial P_{G4}} = \frac{\partial \Delta P_{45}}{\partial P_{G4}} \cdot \frac{X_{45}}{R_{45}} = 0$$

- Hệ số độ nhạy tổn thất công suất đối với nhánh nối giữa nút 3 và 4:

$$\frac{\partial P'_{34}}{\partial P_{G4}} = -1 + \frac{\partial \Delta P_{45}}{\partial P_{G4}} = -1 + 0 = -1; \quad \frac{\partial Q'_{34}}{\partial P_{G4}} = \frac{\partial \Delta Q_{45}}{\partial P_{G4}} = 0$$

$$\frac{\partial \Delta P_{34}}{\partial P_{G4}} = \left(2P'_{34} \frac{\partial P'_{34}}{\partial P_{G4}} + 2Q'_{34} \frac{\partial Q'_{34}}{\partial P_{G4}} \right) \cdot \frac{R_{34}}{U_4^2} = [2.0,8072 \cdot (-1) + 2.0,7799 \cdot 0] \cdot \frac{2.0,0033}{0,9769^2} = -0,01116$$

$$\frac{\partial \Delta Q_{34}}{\partial P_{G4}} = \frac{\partial \Delta P_{34}}{\partial P_{G4}} \cdot \frac{X_{34}}{R_{34}} = -0,01336$$

Tính toán tương tự, hệ số độ nhạy tổn thất công suất khi công suất phát của các DG thay đổi đối với lưới phân phối 6 nút mô tả trong Bảng 2.

3.2. Trường hợp 1: Sự thay đổi công suất phát của DG tại nút 4

Giả thiết rằng công suất phát của DG tại nút 4 tăng từ 1000 kW đến 2000 kW, hệ số công suất cố định như trạng thái cơ sở (0,95). Bước tăng công suất phát là 100 kW.

Khi DG tại nút 4 tăng công suất phát lên giá trị 1,1 MW thì tổng tổn thất công suất tác dụng của lưới được tính theo hai mô hình xấp xỉ như sau:

- Mô hình xấp xỉ tuyến tính:

$$\Delta P^{\text{new}} = \Delta P^{\text{old}} + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{G4}} \cdot \Delta P_{G4} + \frac{\partial \Delta P}{\partial Q_{G4}} \cdot \Delta Q_{G4} = 0,2292 - 0,10168 \cdot 0,1 - 0,04205 \cdot 0,0329 = 0,2177 \text{ MW}$$

- Mô hình xấp xỉ bậc hai:

$$\Delta P^{\text{new}} = \left(\frac{R_{12}}{U_2^2} + \frac{R_{23}}{U_3^2} + \frac{R_{34}}{U_4^2} \right) \cdot (\Delta P_{G4}^2 + \Delta Q_{G4}^2) - 2 \left(\frac{R_{12}P'_{12}}{U_2^2} + \frac{R_{23}P'_{23}}{U_3^2} + \frac{R_{34}P'_{34}}{U_4^2} \right) \Delta P_{G4}$$

$$- 2 \left(\frac{R_{12}Q'_{12}}{U_2^2} + \frac{R_{23}Q'_{23}}{U_3^2} + \frac{R_{34}Q'_{34}}{U_4^2} \right) \Delta Q_{G4} + \Delta P^{\text{old}}$$

$$\Delta P^{\text{new}} = \left(\frac{0,0066}{1,0061^2} + \frac{0,0099}{0,9886^2} + \frac{0,0066}{0,9769^2} \right) \cdot (0,1^2 + 0,0329^2)$$

$$- 2 \cdot \left(\frac{0,0066 \cdot 4,4031}{1,0061^2} + \frac{0,0099 \cdot 1,4394}{0,9886^2} + \frac{0,0066 \cdot 0,8072}{0,9769^2} \right) \cdot 0,1$$

$$- 2 \cdot \left(\frac{0,0066 \cdot 1,8879}{1,0061^2} + \frac{0,0099 \cdot 0,2403}{0,9886^2} + \frac{0,0066 \cdot 0,7799}{0,9769^2} \right) \cdot 0,0329 + 0,2292$$

$$= 0,2184 \text{ MW}$$

Tương tự, kết quả tính toán của tổng tổn thất công suất tác dụng với sự thay đổi công suất phát DG tại nút 4 bằng hai phương pháp xấp xỉ được mô tả trong Bảng 3.

Bảng 3 cho thấy rằng, khi DG tại nút 4 tăng công suất phát, tổn thất công suất tác dụng của lưới điện tính theo ba phương pháp đều giảm. Điều này cho thấy ưu điểm của tích hợp nguồn điện phân tán vào lưới phân phối xét về phương diện tổn thất công suất.

Khi so sánh hai mô hình xấp xỉ, ta thấy khi DG tăng từ 1000 kW đến 1600 kW (tăng 60%), tổn thất công suất được tính toán từ phương pháp xấp xỉ tuyến tính rất gần so với phương pháp

cộng công suất (sai số dưới 5%). Khi DG tăng trên 60% tới 100%, sai số của phương pháp xấp xỉ tuyến tính tăng đáng kể (tại mức tăng 100%, sai số là 18,206%). Tuy nhiên, sai số của mô hình xấp xỉ bậc hai khi DG tăng đến 100% đều dưới 5%. Điều này cho thấy, mô hình xấp xỉ bậc hai chính xác hơn mô hình xấp xỉ tuyến tính.

Bảng 2. Hệ số độ nhạy tổn thất công suất

DG tại nút j	$\partial \Delta P / \partial P_{Gj}$	$\partial \Delta P / \partial Q_{Gj}$	$\partial \Delta Q / \partial P_{Gj}$	$\partial \Delta Q / \partial Q_{Gj}$
2	-0,05742	-0,02462	-0,06873	-0,02947
3	-0,08912	-0,02991	-0,10667	-0,0358
4	-0,10168	-0,04205	-0,1217	-0,05033
5	-0,11384	-0,04935	-0,13627	-0,05907
6	-0,10303	-0,05111	-0,12333	-0,06118

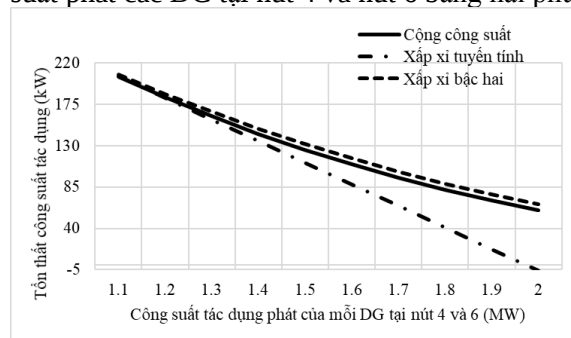
Bảng 3. Tổn thất công suất và sai số của hai phương pháp xấp xỉ

Công suất phát của DG tại nút 4			Tổn thất công suất (MW)		Sai số (%)	
P_{G4} (MW)	Q_{G4} (MVar)	PSM	Phương pháp xấp xỉ tuyến tính	Phương pháp xấp xỉ bậc hai	Phương pháp xấp xỉ tuyến tính	Phương pháp xấp xỉ bậc hai
1,1	0,3616	0,2173	0,2177	0,2184	0,151	0,478
1,2	0,3944	0,2061	0,2061	0,2081	0,009	0,935
1,3	0,4273	0,1956	0,1946	0,1983	0,523	1,371
1,4	0,4602	0,1857	0,1830	0,1890	1,437	1,784
1,5	0,4930	0,1764	0,1715	0,1803	2,803	2,176
1,6	0,5259	0,1678	0,1599	0,1720	4,671	2,545
1,7	0,5588	0,1597	0,1484	0,1643	7,095	2,893
1,8	0,5916	0,1522	0,1368	0,1571	10,127	3,221
1,9	0,6245	0,1454	0,1253	0,1505	13,816	3,528
2	0,6574	0,1390	0,1137	0,1443	18,206	3,818

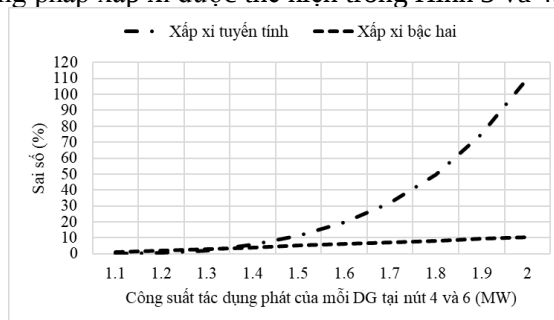
3.3. Trường hợp 2: Sự thay đổi công suất phát đồng thời của DG tại nút 4 và 6

Giả sử công suất phát của DG tại nút 4 và nút 6 đều tăng giống nhau từ 1000 kW đến 2000 kW, hệ số công suất giữ cố định như trạng thái cơ sở.

Tương tự, kết quả tính toán của tổng tổn thất công suất tác dụng và sai số với sự thay đổi công suất phát các DG tại nút 4 và nút 6 bằng hai phương pháp xấp xỉ được thể hiện trong Hình 3 và 4.



Hình 3. Tổn thất công suất tác dụng theo ba mô hình (trường hợp 2)



Hình 4. Sai số của công suất tác dụng theo hai mô hình xấp xỉ (trường hợp 2)

Hình 3 và 4 cho thấy rằng, kết quả tính theo phương pháp xấp xỉ bậc hai rất gần với phương pháp cộng công suất. Khi các DG đồng thời thay đổi công suất phát đến 30% thì sai số của hai mô hình xấp xỉ đều nhỏ hơn 5%. Tuy nhiên, khi các DG đồng thời thay đổi công suất phát từ 30% đến 50% thì sai số của cả hai mô hình tăng dần nhưng mô hình xấp xỉ tuyến tính tăng nhanh hơn. Sai số của mô hình xấp xỉ bậc hai chỉ bằng 10,607% trong khi mô hình xấp xỉ tuyến tính bằng 110,242% ở mức công suất phát của mỗi DG tại nút 4 và 6 đều bằng 2 MW (tăng 100%).

4. Kết luận

Bài báo này nghiên cứu về ảnh hưởng của nguồn điện phân tán tới tổn thất công suất tác dụng của lưới phân phối sử dụng các mô hình xấp xỉ. Phương pháp cộng công suất được sử dụng làm cơ sở để so sánh tính hiệu quả của các phương pháp xấp xỉ tuyến tính và bậc hai. Các hệ số độ nhạy được tính toán từ trạng thái cơ sở và được sử dụng để xác định tổn thất công suất của lưới điện phân phối sáu nút. Sai số của tổn thất công suất theo các phương pháp xấp xỉ là nhỏ và thời gian tính toán là nhanh hơn rất nhiều so với phương pháp cộng công suất trong phạm vi biến đổi nhất định của nguồn điện phân tán. Ngoài ra, phương pháp xấp xỉ bậc hai có độ chính xác cao hơn phương pháp xấp xỉ tuyến tính.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] 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, doi: 10.34238/tnu-jst.4665.
- [2] A. Garces, "A Linear Three-Phase Load Flow for Power Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 827-828, Jan. 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2394296.
- [3] F. Tamp and P. Ciufo, "A Sensitivity Analysis Toolkit for the Simplification of MV Distribution Network Voltage Management," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 559-568, Mar. 2014, doi: 10.1109/TSG.2014.2300146.
- [4] J. Zhu, D. Hwang, and A. Sadjadpour, "Real-time loss sensitivity calculation in power systems operation," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 73, no. 1, pp. 53-60, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.epsr.2004.05.004.
- [5] Z. Tian, W. Wu, and B. Zhang, "A Mixed Integer Quadratic Programming Model for Topology Identification in Distribution Network," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 823-824, Jan. 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2394454.
- [6] S. Wang, Q. Liu, and X. Ji, "A Fast Sensitivity Method for Determining Line Loss and Node Voltages in Active Distribution Network," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 1148-1150, Jan. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2735898.
- [7] G. Raju and P. R. Bijwe, "An Efficient Algorithm for Minimum Loss Reconfiguration of Distribution System Based on Sensitivity and Heuristics," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1280-1287, Aug. 2008, doi: 10.1109/TPWRS.2008.926084.
- [8] K. H. Youssef, "A New Method for Online Sensitivity-Based Distributed Voltage Control and Short Circuit Analysis of Unbalanced Distribution Feeders," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp. 1253-1260, May 2015, doi: 10.1109/TSG.2014.2363158.
- [9] A. Mohapatra, P. R. Bijwe, and B. K. Panigrahi, "An Efficient Hybrid Approach for Volt/Var Control in Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 4, pp. 1780-1788, Aug. 2014, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2306845.
- [10] L. Bai, J. Wang, C. Wang, C. Chen, and F. Li, "Distribution Locational Marginal Pricing (DLMP) for Congestion Management and Voltage Support," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 4, pp. 4061-4073, Jul. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2767632.
- [11] H. Yuan, F. Li, Y. Wei, and J. Zhu, "Novel Linearized Power Flow and Linearized OPF Models for Active Distribution Networks With Application in Distribution LMP," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 1, pp. 438-448, Jan. 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2594814.
- [12] MATPOWER. [Online]. Available: <https://matpower.org/> [Accessed August 2021].