

NEWTON METHOD BASED ON A WIRTINGER'S CALCULUS FORMULATION FOR THE LOAD FLOW IN POWER DISTRIBUTION GRIDS INTEGRATED TIME-VARYING ZIP LOAD: A CASE STUDY IN VIETNAM

Dao Long Vu, Do Thao Vi, Do Minh Hong, Pham Nang Van*

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

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	16/7/2024	Power flow analysis is an important problem in the operation and planning of power systems. The purpose of this problem is to determine the bus voltages, branch power flows, and power losses of power networks. Traditionally, power flow analysis has been performed using the Newton-Raphson method. The traditional Newton-Raphson method solves the nonlinear algebraic equations in the real domain. This paper proposes a Newton method based on Wirtinger calculus to directly solve the algebraic equations in the complex domain. Additionally, the voltage-dependent load model (ZIP load) with time-varying power consumption is also considered in this paper. The proposed Newton method is programmed using the MATLAB language and evaluated on the 102-bus grid of Luc Ngan district, Bac Giang province, in the year 2021. The obtained results show that the bus voltages, power losses, and energy losses calculated from the proposed Newton method have very small errors compared to the traditional Newton-Raphson method.
Revised:	29/10/2024	
Published:	29/10/2024	
KEYWORDS		
Wirtinger's Calculus		
Power flow		
Newton's method		
ZIP load model		
Power distribution grids		

PHƯƠNG PHÁP NEWTON SỬ DỤNG GIẢI TÍCH WIRTINGER ĐỂ TÍNH TOÁN TRÀO LƯU CÔNG SUẤT CỦA LƯỚI PHÂN PHỐI TẠI VIỆT NAM CÓ XÉT TẢI ZIP THAY ĐỔI CÔNG SUẤT TIÊU THỤ THEO THỜI GIAN

Đào Long Vũ, Đỗ Thảo Vi, Đỗ Minh Hồng, Phạm Năng Văn*

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

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	16/7/2024	Phân tích chế độ xác lập là vô cùng quan trọng trong vận hành và quy hoạch hệ thống điện. Mục đích chính của việc xác định các thông số chế độ trong trạng thái xác lập là xác định điện áp các nút, phân bố công suất và công suất tiêu hao của lưới điện. Theo truyền thống, tính toán chế độ xác lập được thực hiện bằng cách sử dụng thuật toán Newton-Raphson. Phương pháp Newton-Raphson truyền thống giải hệ phương trình đại số phi tuyến trên miền số thực. Bài báo này đề xuất phương pháp Newton dựa trên phép tính Wirtinger để giải trực tiếp hệ phương trình đại số trên miền số phức. Đồng thời, mô hình công suất tải phụ thuộc vào điện áp (tải ZIP) với công suất tiêu thụ thay đổi theo thời gian cũng được xem xét trong bài báo này. Phương pháp Newton dựa trên phép tính Wirtinger được lập trình bằng ngôn ngữ MATLAB và sử dụng lưới điện 102 nút, huyện Lục Ngạn, tỉnh Bắc Giang năm 2021 để đánh giá. Kết quả so sánh điện áp nút, công suất tiêu hao và tổn thất điện năng giữa phương pháp Newton đề xuất và phương pháp Newton-Raphson truyền thống có sai số nhỏ và có thể bỏ qua trong các áp dụng tính toán thời gian thực.
Ngày hoàn thiện:	29/10/2024	
Ngày đăng:	29/10/2024	
TỪ KHÓA		
Phép tính Wirtinger		
Phân tích trào lưu công suất		
Thuật toán Newton		
Mô hình tải ZIP		
Lưới điện phân phối		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.10775>

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

1. Giới thiệu

Phân tích chế độ xác lập là bài toán quan trọng trong việc vận hành, quy hoạch và thiết kế lưới điện phân phối. Lưới điện phân phối có tỷ số R/X lớn và có các đoạn đường dây rất ngắn. Do đó, phương pháp tách biến nhanh (FDPF) [1] thường không hội tụ khi áp dụng để tính toán các thông số chế độ trong trạng thái xác lập của lưới điện phân phối. Bên cạnh đó, phương pháp truyền thống Newton-Raphson cũng khó tìm được lời giải trong các trường hợp giải kém [2]. Mặt khác, lưới điện phân phối thường được vận hành với cấu trúc hình tia để giảm chi phí các thiết bị bảo vệ và đơn giản hóa quy trình vận hành. Do đó, các kỹ thuật lập Ladder như phương pháp cộng công suất và phương pháp cộng dòng điện thường được sử dụng. Tuy nhiên, lưới điện phân phối hiện nay đang ngày càng trở nên phức tạp do sự thâm nhập đáng kể của nguồn điện phân tán (DG). Phương pháp lập Ladder chỉ áp dụng với lưới điện phân phối có nguồn DG đã biết công suất hữu công và công suất vô công. Bài báo [3] đã chỉ ra phương pháp lập Ladder không áp dụng được cho lưới điện phân phối có phân bố các nguồn phân tán có khả năng điều khiển điện áp. Bên cạnh các phương pháp truyền thống, phân tích chế độ xác lập sử dụng mô hình tối ưu đang được nghiên cứu rộng rãi [4] - [6]. Bài báo [7], [8] đã sử dụng mô hình SOCP để phân tích chế độ xác lập của lưới điện phân phối. Mô hình tối ưu cho phép tích hợp hệ phương trình mô tả lưới điện trong chế độ xác lập vào các bài toán tối ưu trong vận hành và quy hoạch hệ thống điện.

Từ các bài báo [1]-[8], ta thấy rằng các phương pháp lập hoặc mô hình tối ưu thường được sử dụng cho các bài toán tính toán các thông số chế độ của lưới điện ở trạng thái xác lập. Có thể thấy, hầu hết các phương pháp phân tích chế độ xác lập trong lưới phân phối dựa trên phân tích trong miền số thực mặc dù công suất tính toán trong miền số phức. Trong cách tiếp cận truyền thống, phương trình trào lưu công suất được phân tách thành phần thực và phần ảo để thu được mô hình trong miền số thực, từ đó các đại lượng được phân tách thành phần và phần ảo trên mất đi tính chất đại số của chúng trong miền phức. Phân tích trong miền số phức sẽ là cách tiếp cận tự nhiên nhất cho các bài toán tính toán các thông số chế độ của lưới điện ở trạng thái xác lập. Khó khăn chính của các phương trình trào lưu công suất trên miền phức là không khả vi phức; do đó, không thể khai triển trực tiếp Taylor trong miền phức. Vì vậy, phép tính Wirtinger được sử dụng để thay thế hệ phương trình số thực thành hệ phương trình số phức [9].

Một lý thuyết về các hàm không khả vi phức của Poncaré được Wilhelm Wirtinger phát triển thêm [10]. Lý thuyết này giải quyết các hàm không khả vi phức bằng cách định nghĩa các toán tử mới, được gọi là đạo hàm Wirtinger. Các toán tử này không thỏa mãn tất cả các tính chất của đạo hàm phức thông thường (ví dụ như điều kiện Cauchy – Riemann); đây có lẽ là lý do chính khiến phép tính Wirtinger ít được biết đến trong cộng đồng toán học. Ngoài ra, phép tính Wirtinger có một vài ưu thế trong tính toán các thông số chế độ của hệ thống điện ở trạng thái xác lập, bao gồm lưới điện cao áp và lưới điện phân phối. Bài báo này, các tác giả áp dụng phương pháp Newton dựa trên giải tích Wirtinger để phân tích chế độ xác lập của lưới điện phân phối, trong đó các phần tử trong ma trận Jacobi được biểu diễn gọn gàng bằng toán tử mới được gọi là đạo hàm Wirtinger. Ma trận Jacobi gọn gàng dẫn đến thời gian giải nhanh.

Mục đích chính của bài báo nhằm thực hiện tính toán các thông số chế độ của lưới điện trong trạng thái xác lập sử dụng phương pháp Newton sử dụng phép tính Wirtinger có xét nguồn điện phân tán và mô hình tải phụ thuộc điện áp với công suất tiêu thụ thay đổi theo thời gian. Các đóng góp của bài báo bao gồm:

- Đề xuất thuật toán Newton sử dụng phép tính Wirtinger để tính toán các thông số chế độ của lưới điện phân phối ở trạng thái xác lập.
- Kết quả tính toán của phương pháp đề xuất được đối chiếu với phương pháp Newton-Raphson để khẳng định sự chính xác và hiệu quả.
- So sánh kết quả điện áp nút của lưới điện có xét mô hình tải ZIP và tải công suất hằng.

Bài báo gồm 4 phần. Phần 2 triển khai phương pháp tiếp cận nghiên cứu, gồm có mô hình trào lưu công suất sử dụng phép tính Wirtinger, mô hình phụ tải ZIP và bài toán phân tích trào lưu công

suất sử dụng phép tính Wirtinger với phụ tải mô hình tải ZIP có công suất tiêu thụ thay đổi theo thời gian. Phần 3 biểu diễn kết quả tính toán cho lưới điện phân phối xuất tuyến 374 huyện Lục Ngạn, tỉnh Bắc Giang. Những kết luận và hướng nghiên cứu tương lai được diễn tả trong phần 4.

2. Phương pháp tiếp cận nghiên cứu

2.1. Mô hình phân tích chế độ xác lập sử dụng phép tính Wirtinger

Xét một lưới điện phân phối, ta biết được ma trận tổng dẫn $\mathbf{Y}_{\text{BUS}} = [\dot{Y}_{km}]$ của nó. Nút cân bằng (slack bus) được đánh số 1 và các nút còn lại là $N = \{2, \dots, N\}$. Điện áp nút cân bằng là \dot{V}_1 được cho trước, do đó ta cần tìm điện áp nút k : \dot{V}_k với $k \in [2, \dots, N]$. Tất cả các biến số, phương trình được biểu diễn trong miền phức và tất cả các đạo hàm là đạo hàm Wirtinger. Để đơn giản, ta xét mô hình phụ tải với công suất không đổi (tải công suất hằng). Với \dot{V}_k là điện áp nút k , \dot{I}_k là dòng điện nút k . Do đó, công suất nút k là \dot{S}_k và dòng điện nút \dot{I}_k được xác định bởi:

$$\dot{S}_k^* = \dot{V}_k^* \cdot \dot{I}_k; \quad \dot{I}_k = \dot{Y}_{k1} \dot{V}_1 + \dot{Y}_{kk} \dot{V}_k + \sum_{m=2, m \neq k}^N \dot{Y}_{km} \dot{V}_m \quad (1)$$

Chú ý rằng, \dot{S}_k^* được sử dụng thay cho \dot{S}_k để đơn giản hóa. Lưu ý rằng hàm này không phải là hàm khả vi bởi vì nó phụ thuộc vào cả \dot{V} và \dot{V}^* . Để có thể sử dụng phương pháp Newton, ta cần tính toán các đạo hàm và đạo hàm liên hợp sau đây:

$$\frac{\partial \dot{S}_k^*}{\partial \dot{V}_k} = \dot{V}_k^* \frac{\partial \dot{I}_k}{\partial \dot{V}_k} = \dot{Y}_{kk} \dot{V}_k^*; \quad \frac{\partial \dot{S}_k^*}{\partial \dot{V}_k^*} = \dot{I}_k; \quad \frac{\partial \dot{S}_k^*}{\partial \dot{V}_m} = \dot{V}_k^* \frac{\partial \dot{I}_k}{\partial \dot{V}_m} = \dot{Y}_{km} \dot{V}_k^*; \quad \frac{\partial \dot{S}_k^*}{\partial \dot{V}_m^*} = 0 \quad (2)$$

Vì vậy, chúng ta có thể tính toán vi phân $d\dot{S}_k^* \equiv \Delta \dot{S}_k^*$, do đó ta có công thức sau:

$$\Delta \dot{S}_k^* = \frac{\partial \dot{S}_k^*}{\partial \dot{V}_k} \Delta \dot{V}_k + \frac{\partial \dot{S}_k^*}{\partial \dot{V}_k^*} \Delta \dot{V}_k^* + \frac{\partial \dot{S}_k^*}{\partial \dot{V}_m} \Delta \dot{V}_m + \frac{\partial \dot{S}_k^*}{\partial \dot{V}_m^*} \Delta \dot{V}_m^* \quad (3)$$

Thực hiện khai triển và biến đổi đại số đơn giản, chúng ta có thể đưa biểu thức vi phân trên vào dạng ma trận như sau:

$$\Delta \mathbf{S}_{N-1}^* = \left(\text{diag}(\mathbf{V}_{N-1}^*) \mathbf{Y}_{(N-1)(N-1)} \right) \Delta \mathbf{V}_{N-1} + \text{diag}(\mathbf{I}_{N-1}) \Delta \mathbf{V}_{N-1}^* \quad (4)$$

trong đó, $\Delta \mathbf{S}_{N-1}^*$ là vector cột của liên hợp của độ lệch công suất tại $N-1$ nút (trừ nút cân bằng); $\text{diag}(\mathbf{V}_{N-1}^*)$ là ma trận đường chéo với các phần tử trên đường chéo là số phức liên hợp của điện áp nút của $N-1$ nút; $\mathbf{Y}_{(N-1)(N-1)}$ là ma trận con của ma trận tổng dẫn khi bỏ đi cột đầu và hàng đầu của ma trận tổng dẫn; $\Delta \mathbf{V}_{N-1}$, $\Delta \mathbf{V}_{N-1}^*$ lần lượt là vector cột của độ lệch điện áp nút sau mỗi bước lặp từ nút 2 tới nút N và số phức liên hợp của nó; $\text{diag}(\mathbf{I}_{N-1})$ là ma trận đường chéo với các phần tử trên đường chéo là tổng dòng điện đi vào các nút từ 2 đến N .

Để giải hệ (4), ta có thể thực hiện nhân (4) với $\text{diag}(\mathbf{V}_{N-1}^*)^{-1}$ để thu được:

$$\Delta \mathbf{S}_{N-1}^* / \mathbf{V}_{N-1}^* = \mathbf{Y}_{(N-1)(N-1)} \Delta \mathbf{V}_{N-1} + \text{diag}(\mathbf{I}_{N-1} / \mathbf{V}_{N-1}^*) \Delta \mathbf{V}_{N-1}^* \quad (5)$$

trong đó, $\Delta \mathbf{S}_{N-1}^* / \mathbf{V}_{N-1}^*$ và $\mathbf{I}_{N-1} / \mathbf{V}_{N-1}^*$ là phép chia từng phần tử.

Đặt $\mathbf{J}_{N-1} = \Delta \mathbf{S}_{N-1}^* / \mathbf{V}_{N-1}^*$ và $\mathbf{K}_{N-1} = \text{diag}(\mathbf{I}_{N-1} / \mathbf{V}_{N-1}^*)$ vì thế ta có thể đơn giản hóa hàm (4) là:

$$\mathbf{J}_{N-1} = \mathbf{Y}_{(N-1)(N-1)} \Delta \mathbf{V}_{N-1} + \mathbf{K}_{N-1} \Delta \mathbf{V}_{N-1}^* \quad (6)$$

Lưu ý rằng \mathbf{J}_{N-1} và \mathbf{K}_{N-1} lần lượt là một vector và một ma trận đường chéo. Thông qua một phép ghép đơn giản, chúng ta có thể thu được hệ phương trình tuyến tính như sau:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{J}_{N-1} \\ \mathbf{J}_{N-1}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{(N-1)(N-1)} & \mathbf{K}_{N-1} \\ \mathbf{K}_{N-1}^* & \mathbf{Y}_{(N-1)(N-1)}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{V}_{N-1} \\ \Delta \mathbf{V}_{N-1}^* \end{pmatrix} \quad (7)$$

Lợi ích chính của phép tính Wirtinger là chúng ta có thể thu được các phương trình trào lưu công suất một cách trực tiếp mà không cần tách riêng phần thực và ảo, dẫn đến một biểu diễn gọn gàng của ma trận Jacobi như trong (4), vẫn ở dạng số phức.

2.2. Phân tích chế độ xác lập bằng phương pháp Newton sử dụng phép tính Wirtinger với phụ tải mô hình tải ZIP

Mô hình phụ tải là một vấn đề quan trọng khi tính toán các thông số chế độ của lưới điện trong trạng thái xác lập. Mô hình toán học của một phụ tải nhất định trong hệ thống điện tương đối đơn giản. Tuy nhiên, trong thực tế, phụ tải có nhiều loại khác nhau. Phụ tải chủ yếu chia làm 3 loại chính là: phụ tải sinh hoạt, phụ tải dịch vụ và phụ tải công nghiệp. Với phụ tải hỗn hợp như vậy, việc mô hình hóa chi tiết phụ tải là khá phức tạp, thậm chí không thể mô hình được. Phụ tải tổng hợp có thể được mô tả sử dụng các mô hình: Công suất hằng, tổng trở hằng và dòng điện hằng. Trong hầu hết các trường hợp, phụ tải không thể được mô tả sử dụng duy nhất một kiểu mô hình. Vì vậy, việc sử dụng một mô hình cho các loại tải khác nhau có nhiều ưu điểm. Trong nghiên cứu này, mô hình công suất tải phụ thuộc vào điện áp (tải ZIP) được áp dụng để mô tả phụ tải hỗn hợp.

Mô hình phụ tải ZIP được sử dụng để mô tả tải hỗn hợp:

$$P_{Dk} = P_{D0k} (a_k^p U_k^2 + b_k^p U_k + c_k^p); \quad Q_{Dk} = Q_{D0k} (a_k^q U_k^2 + b_k^q U_k + c_k^q) \quad (8)$$

trong đó, $a_k^p, b_k^p, c_k^p, a_k^q, b_k^q, c_k^q$ và c_k^q là hệ số của mô hình tải ZIP; P_{D0k} và Q_{D0k} theo thứ tự là công suất hữu công và công suất vô công của phụ tải nút k tại điện áp định mức (pu).

Phương pháp đề xuất có trình tự giải bài toán tính toán các thông số chế độ của lưới điện ở trạng thái xác lập với mô hình tải ZIP trong 24 khoảng thời gian như sau:

Bước 0: Đặt $t = 1$.

Bước 1: Đặt số bước lặp $r = 0$, xấp xỉ giá trị đầu của điện áp nút tại thời điểm t $V_{k,t}^{(1)} = 1; \forall k \in [2; N]$, ta được ma trận $\mathbf{V}_{N-1,t}^{(0)} (N \times 1)$.

Bước 2: Tính toán công suất phụ tải theo (8) để xác định ma trận $\mathbf{S}_{(N-1),t} ((N-1) \times 1)$ tại thời điểm t với tổng công suất tại nút k ($k \in [2, \dots, N]$) được viết như sau:

$$\dot{S}_{k,t} = (P_{DG(k,t)} - P_{D(k,t)}) + j(Q_{DG(k,t)} - Q_{D(k,t)}) \quad (9)$$

trong đó, $P_{DG(k,t)}, Q_{DG(k,t)}$ theo thứ tự là công suất hữu công và công suất vô công của nguồn DG tại nút k tại thời điểm t ; $P_{D(k,t)}, Q_{D(k,t)}$ theo thứ tự là là công suất hữu công và công suất vô công của phụ tải tại nút k tại thời điểm t .

Bước 3: Tính toán dòng điện truyền vào các nút:

$$\mathbf{I}_{N,t}^{(r)} = \mathbf{Y}_{\text{BUS},t} \mathbf{V}_{N,t}^{(r)} \quad (10)$$

Bước 4: Tính độ lệch công suất nút so với công suất nút đã biết của lưới điện và so sánh với một số ε . Nếu phép so sánh dưới đúng thì dừng quá trình lặp tại thời điểm t và ghi kết quả tại thời điểm t . Sau đó, ta kiểm tra $t < 24$; nếu đúng thì tăng $t = t + 1$ và quay lại **Bước 1**, nếu sai dừng giải và đưa ra kết quả tại tất cả các thời gian xét đến.

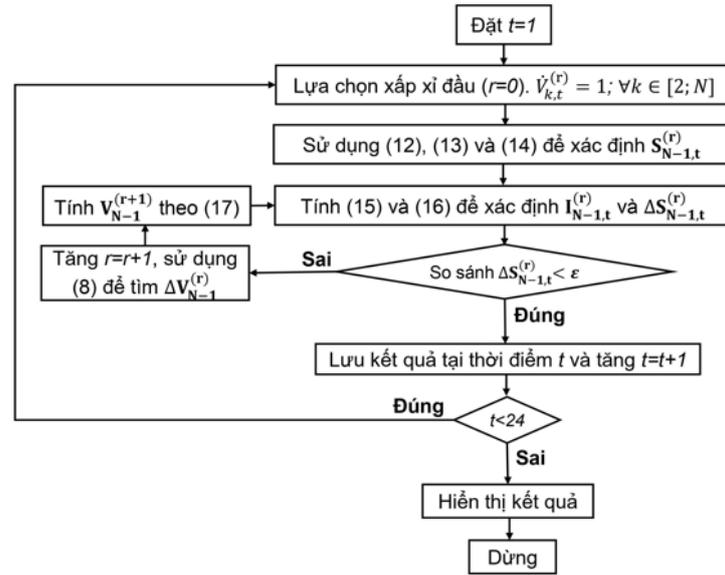
$$\Delta \mathbf{S}_{N-1,t} = \|\mathbf{S}_{N-1,t} - \mathbf{V}_{N-1,t}^{(r)} \mathbf{I}_{N-1,t}^{(r)*}\| < \varepsilon \quad (11)$$

Nếu phép so sánh sai thì ta tăng số lần lặp lên $r = r + 1$ và thực hiện giải hệ phương trình (4) để có $\Delta \mathbf{V}_{N-1,t}^{(r)}$ và điện áp nút lần lặp mới được xác định theo:

$$\mathbf{V}_{N-1,t}^{(r+1)} = \mathbf{V}_{N-1,t}^{(r)} + \Delta \mathbf{V}_{N-1,t}^{(r)} \quad (12)$$

và quay lại **Bước 2**.

Hình 1 mô tả lưu đồ thuật toán của phương pháp tính toán các thông số chế độ của lưới điện phân phối ở trạng thái xác lập sử dụng phép tính Wirtinger có xét mô hình tải ZIP.

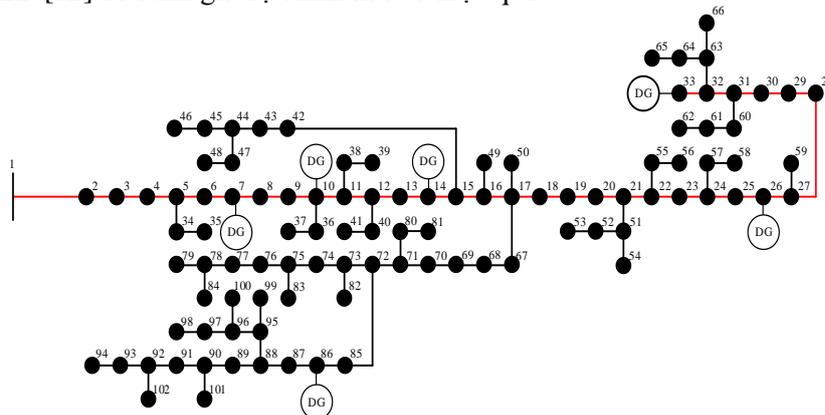


Hình 1. Thuật toán đề xuất

3. Kết quả tính toán

Phần này áp dụng phương pháp Newton dựa trên phép tính Wirtinger được đề xuất ở mục 2 để tính toán các thông số chế độ trong trạng thái xác lập của xuất tuyến 374, huyện Lục Ngạn, tỉnh Bắc Giang năm 2021 có xét nguồn DG. Sơ đồ lưới điện với 102 nút và điện áp định mức là 35 kV (xem Hình 2). Tổng công suất phụ tải cực đại tại điện áp định mức là $S_{D0} = 13,219 + j6,401$ MVA .

Mô hình giải sử dụng phép tính Wirtinger được lập trình sử dụng phần mềm MATLAB [11] trên máy tính có thông số Intel(R) Core(TM) i5-7500 CPU @3.40GHz 3.41 GHz và 8GB RAM. Phương pháp đề xuất được đối chiếu với phương pháp Newton-Raphson (NR) trên phần mềm POWERWORLD [12] để đánh giá độ chính xác và hiệu quả.

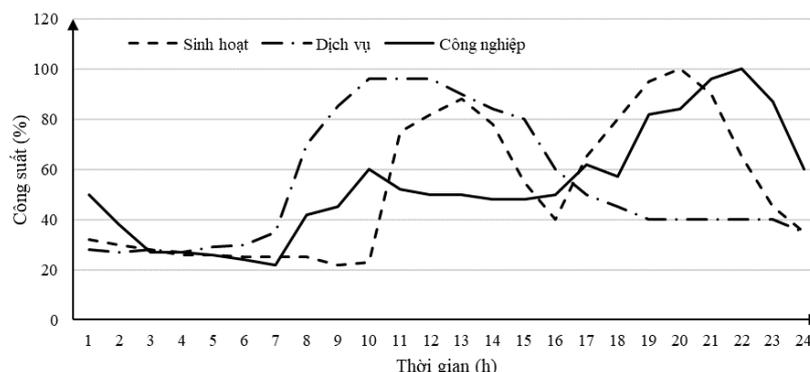


Hình 2. Sơ đồ xuất tuyến 374 huyện Lục Ngạn, tỉnh Bắc Giang

3.1. Dữ liệu tính toán

Điện áp tại nút 1 (nút cân bằng) là 1,05 pu và tất cả các dữ liệu được xử lý trong hệ đơn vị tương đối với $S_{sb} = 1$ MVA . Phụ tải có công suất tiêu thụ thay đổi theo thời gian được diễn tả trong Hình 3 và loại phụ tải tại các nút được trình bày trong Bảng 1. Mô hình tải ZIP có các hệ số đối với các kiểu phụ tải trong hệ đơn vị tương đối được trình bày như sau [13]:

- Phụ tải sinh hoạt: $a_k^P = 0,24; b_k^P = 0,62; c_k^P = 0,13; a_k^Q = 2,44; b_k^Q = -1,94; c_k^Q = 0,50$
- Phụ tải dịch vụ: $a_k^P = 0,16; b_k^P = 0,80; c_k^P = 0,04; a_k^Q = 3,26; b_k^Q = -3,10; c_k^Q = 0,84$
- Phụ tải công nghiệp: $a_k^P = -0,07; b_k^P = 0,24; c_k^P = 0,83; a_k^Q = 1,00; b_k^Q = 0; c_k^Q = 0$

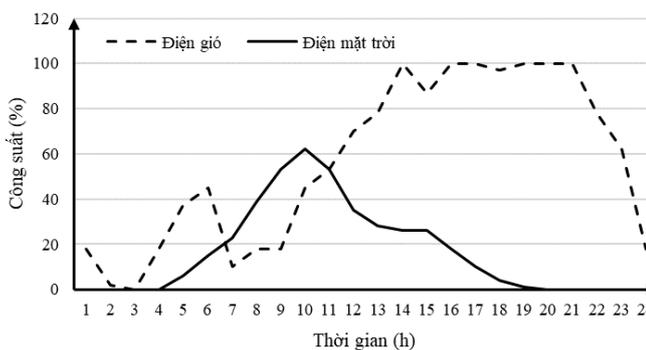


Hình 3. Công suất cực đại của phụ tải trong mỗi giờ

Bảng 1. Phân loại tải

Loại tải	Dịch vụ	Công nghiệp	Sinh hoạt
Nút	6, 12, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 60, 80	5, 10, 14, 18, 51, 54, 70, 82, 90, 94	Các nút còn lại

Hơn nữa, lưới phân phối có phân bố 3 nguồn điện gió tại các nút 10, 26 và 33 có cùng công suất khả phát là 1000 kW. Ngoài ra, ba nguồn điện mặt trời được đặt tại các nút 7, 14 và 86 với công suất khả phát lần lượt là 800 kW, 1200 kW và 1000 kW. Tất cả các nguồn DG đều có cùng $\cos \varphi = 0,95$ và có công suất phát trong mỗi giờ được diễn tả trong Hình 4.



Hình 4. Công suất phát trong mỗi giờ của DG

3.2. Kết quả tính toán

Bảng 2 so sánh kết quả về mô-đun điện áp tại giờ thứ 12 của phương pháp đề xuất với phương pháp Newton-Raphson. Trong đó, mô-đun điện áp thấp nhất đều tại nút 94 (1,0237479 pu với phương pháp Newton dựa trên phép tính Wirtinger và 1,0237457 pu với phương pháp NR). Bên cạnh đó, sai số lớn nhất về mô-đun điện áp giữa hai phương pháp là $0,2823 \times 10^{-3}$ (tại nút 32). Nhấn mạnh rằng, sai số này là rất nhỏ do đó phương pháp đề xuất phù hợp với thực tế.

Bảng 3 trình bày kết quả so sánh thời gian giải của phương pháp đề xuất và phương pháp NR. Thời gian tính toán của phương pháp đề xuất nhỏ hơn rất nhiều so với phương pháp NR. Cụ thể, thời gian giải của phương pháp Wirtinger và phương pháp Newton truyền thống lần lượt là 0,3146 giây và 4,6315 giây.

Bảng 4 và Bảng 5 trình bày công suất tiêu hao và năng lượng điện tiêu hao giữa hai phương pháp (phương pháp Newton dựa trên Wirtinger và phương pháp NR) tại giờ thứ 12. Trong đó, sai số về công suất tiêu hao là rất nhỏ (0,01608% với tổn thất công suất hữu công và 0,01607% với tổn thất công suất vô công). Bên cạnh đó, sai số về năng lượng tiêu hao trong 24 giờ là 0,0041%. Kết quả tính toán khẳng định tính chính xác và hiệu quả của phương pháp Newton dựa trên phép tính Wirtinger.

Bảng 2. So sánh điện áp nút theo phương pháp Wirtinger và Newton-Raphson tại $t = 12$

Nút	U (pu)		Sai số ($10^{-3}\%$)	Nút	U (pu)		Sai số ($10^{-3}\%$)
	Wirtinger	NR			Wirtinger	NR	
1	1,0500000	1,0500000	0,0000	52	1,0285034	1,0285008	0,2515
2	1,0496740	1,0496740	0,0056	53	1,0284287	1,0284261	0,2515
3	1,0493615	1,0493614	0,0108	54	1,0285619	1,0285593	0,2513
4	1,0490533	1,0490531	0,0158	55	1,0285075	1,0285049	0,2528
5	1,0463665	1,0463659	0,0581	56	1,0284975	1,0284949	0,2528
6	1,0455093	1,0455086	0,0705	57	1,0282391	1,0282364	0,2607
7	1,0446618	1,0446609	0,0823	58	1,0282026	1,0281999	0,2607
8	1,0435547	1,0435537	0,0966	59	1,0270839	1,0270810	0,2769
9	1,0421951	1,0421940	0,1138	60	1,0266556	1,0266527	0,2821
10	1,0397916	1,0397901	0,1441	61	1,0266150	1,0266121	0,2820
11	1,0387501	1,0387485	0,1562	62	1,0265786	1,0265757	0,2820
12	1,0372806	1,0372788	0,1726	63	1,0268193	1,0268164	0,2822
13	1,0362297	1,0362278	0,1814	64	1,0267439	1,0267410	0,2822
14	1,0358133	1,0358114	0,1849	65	1,0266651	1,0266622	0,2821
15	1,0318162	1,0318139	0,2164	66	1,0267530	1,0267501	0,2822
16	1,0309745	1,0309722	0,2222	67	1,0295924	1,0295901	0,2256
17	1,0303812	1,0303789	0,2262	68	1,0292888	1,0292865	0,2254
18	1,0302981	1,0302958	0,2273	69	1,0288514	1,0288491	0,2250
19	1,0293014	1,0292990	0,2417	70	1,0278442	1,0278419	0,2238
20	1,0290507	1,0290481	0,2455	71	1,0269305	1,0269282	0,2229
21	1,0286520	1,0286494	0,2515	72	1,0253401	1,0253378	0,2204
22	1,0285818	1,0285792	0,2527	73	1,0251078	1,0251056	0,2201
23	1,0285198	1,0285172	0,2541	74	1,0250221	1,0250198	0,2200
24	1,0282490	1,0282464	0,2606	75	1,0248718	1,0248695	0,2199
25	1,0282237	1,0282210	0,2614	76	1,0247426	1,0247404	0,2198
26	1,0281320	1,0281293	0,2641	77	1,0245788	1,0245765	0,2197
27	1,0271137	1,0271109	0,2769	78	1,0244795	1,0244772	0,2196
28	1,0270353	1,0270324	0,2782	79	1,0242064	1,0242041	0,2194
29	1,0269471	1,0269442	0,2797	80	1,0268571	1,0268548	0,2230
30	1,0268766	1,0268738	0,2811	81	1,0268355	1,0268332	0,2230
31	1,0268609	1,0268580	0,2815	82	1,0250864	1,0250841	0,2200
32	1,0268765	1,0268736	0,2823	83	1,0248559	1,0248536	0,2199
33	1,0269609	1,0269580	0,2824	84	1,0244215	1,0244193	0,2196
34	1,0463024	1,0463018	0,0598	85	1,0249826	1,0249804	0,2197
35	1,0462925	1,0462919	0,0602	86	1,0248754	1,0248731	0,2195
36	1,0397542	1,0397527	0,1442	87	1,0246689	1,0246666	0,2191
37	1,0397354	1,0397339	0,1441	88	1,0243660	1,0243638	0,2187
38	1,0386493	1,0386477	0,1571	89	1,0241530	1,0241507	0,2199
39	1,0385665	1,0385648	0,1577	90	1,0240716	1,0240693	0,2205
40	1,0371934	1,0371915	0,1740	91	1,0240021	1,0239998	0,2202
41	1,0371747	1,0371729	0,1741	92	1,0239634	1,0239611	0,2201
42	1,0315707	1,0315685	0,2177	93	1,0238988	1,0238965	0,2197
43	1,0314414	1,0314392	0,2184	94	1,0237479	1,0237457	0,2188
44	1,0314066	1,0314044	0,2186	95	1,0243359	1,0243337	0,2184
45	1,0312432	1,0312409	0,2200	96	1,0242752	1,0242729	0,2183
46	1,0312349	1,0312326	0,2200	97	1,0242172	1,0242150	0,2183
47	1,0313068	1,0313046	0,2189	98	1,0241634	1,0241612	0,2182
48	1,0312653	1,0312630	0,2191	99	1,0242962	1,0242940	0,2176
49	1,0309426	1,0309403	0,2223	100	1,0242540	1,0242517	0,2183
50	1,0303679	1,0303656	0,2262	101	1,0239392	1,0239369	0,2230
51	1,0285698	1,0285672	0,2514	102	1,0239386	1,0239363	0,2200

Bảng 3. So sánh thời gian tính toán giữa hai phương pháp Wirtinger và NR

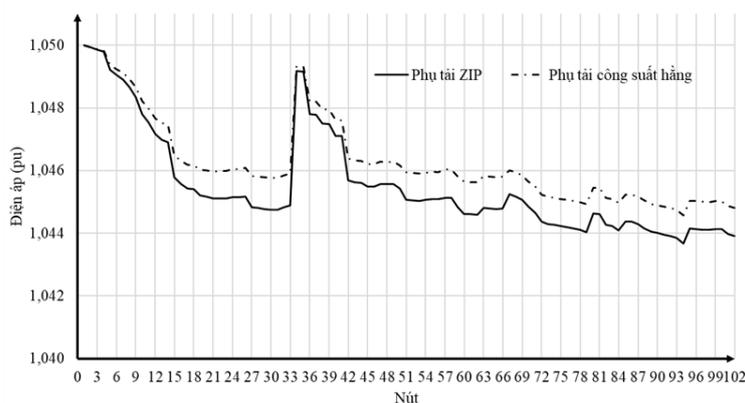
	Wirtinger	NR
Thời gian tính toán (giây)	0,3146	4,6315

Bảng 4. So sánh tổng công suất tiêu hao theo phương pháp Wirtinger và NR tại giờ thứ 12

	Wirtinger	NR	Sai số (%)
ΔP (kW)	108,400	108,382	0,01608
ΔQ (kVAr)	127,167	127,147	0,01607

Bảng 5. So sánh tổng năng lượng tiêu hao trong 24h của phương pháp Wirtinger và NR

	Wirtinger	NR	Sai số (%)
ΔA (kWh)	1321,506	1321,451	0,0041

**Hình 5.** Phân bố mô-đun điện áp của lưới điện với mô hình tải công suất không đổi và mô hình tải ZIP tại giờ thứ 10

Kịch bản 1 sử dụng phương pháp đề xuất có xét đến mô hình tải ZIP. Kịch bản 2 sử dụng phương pháp đề xuất với mô hình phụ tải công suất không đổi. Hình 5 minh họa điện áp các nút của lưới điện tại giờ thứ 10 của 2 kịch bản. Trong đó, mô-đun điện áp tại các nút của kịch bản 1 nhỏ hơn mô-đun điện áp của kịch bản 2. Trong kịch bản 2, điện áp tại tất cả các nút đều lớn hơn 1 pu do đó công suất phụ tải khi sử dụng mô hình tải ZIP sẽ lớn hơn công suất phụ tải khi sử dụng mô hình công suất không đổi. Điều này dẫn đến tổn thất điện áp của kịch bản 1 sẽ lớn hơn kịch bản 2. Nhấn mạnh rằng, mô hình phụ tải chính xác (tải ZIP) sẽ ảnh hưởng đáng kể đến thông số chế độ trong trạng thái xác lập.

4. Kết luận

Bài báo áp dụng phương pháp Newton dựa trên phép tính Wirtinger để xác định thông số chế độ của lưới điện ở trạng thái xác lập với 24 khoảng thời gian của lưới điện phân phối có xét mô hình tải phụ thuộc điện áp (mô hình tải ZIP). Phương pháp sử dụng phép tính Wirtinger này có các biến số và phương trình được biểu diễn trong miền phức và tất cả các đạo hàm là đạo hàm Wirtinger. Xuất tuyến 374 lưới điện huyện Lục Ngạn, tỉnh Bắc Giang được sử dụng để thực hiện tính toán chế độ xác lập của lưới điện. Các kết quả tính toán chế độ xác lập của phương pháp Wirtinger và phương pháp NR truyền thống có chênh lệch không đáng kể. Hơn nữa, với phương pháp Wirtinger, các phần tử trong ma trận Jacobi được biểu diễn gọn gàng bằng toán tử mới được gọi là đạo hàm Wirtinger. Ma trận Jacobi gọn gàng dẫn đến thời gian tính toán nhanh. Bên cạnh đó, kết quả tính toán cho thấy rằng mô hình tải ZIP có tác động đến điện áp tại các nút; vì vậy mô hình tải ZIP cần phải được xét đến khi tính toán các thông số chế độ của lưới điện phân phối ở trạng thái xác lập. Phép tính Wirtinger có thể mở rộng sang các lĩnh vực tối ưu trong hệ thống điện. Phép tính Wirtinger có tiềm năng triển khai vào các bài toán: phân bố tối ưu công suất và phân tích ổn định hệ thống điện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] B. Stott and O. Alsac, "Fast Decoupled Load Flow," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-93, no. 3, pp. 859-869, May 1974, doi: 10.1109/TPAS.1974.293985.
- [2] S. C. Tripathy, G. D. Prasad, O. P. Malik, and G. S. Hope, "Load-Flow Solutions for Ill-Conditioned Power Systems by a Newton-Like Method," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-101, no. 10, pp. 3648-3657, Oct. 1982, doi: 10.1109/TPAS.1982.317050.
- [3] S. C. Tripathy, G. D. Prasad, O. P. Malik, and G. S. Hope, "An efficient power flow algorithm for distribution systems with polynomial load," *Int. J. Electr. Eng. Educ.*, vol. 39, no. 4, pp. 371-386, 2002.
- [4] S. H. Low, "Convex Relaxation of Optimal Power Flow—Part I: Formulations and Equivalence," *IEEE Trans Control Netw Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 15-27, Mar. 2014.
- [5] S. H. Low, "Convex relaxation of Optimal power flow—Part II: Exactness," *IEEE Trans Control Netw Syst*, vol. 1, no. 2, pp. 177-189, 2014.
- [6] R. A. Jabr, "A Conic Quadratic Format for the Load Flow Equations of Meshed Networks," *IEEE Trans Power Syst*, vol. 22, no. 4, pp. 2285-2286, Oct. 2007.
- [7] R. A. Jabr, "Radial distribution load flow using conic programming," *IEEE Trans Power Syst*, vol. 21, no. 3, pp. 1458-1459, Aug. 2006.
- [8] D. G. Ha, T. Le, and N. V. Pham, "Using second-order cone programming for power flow analysis considering ZIP load model in power distribution systems," *TNU J. Sci. Technol.*, vol. 228, no. 02, pp. 184-192, Jan. 2023.
- [9] I. Dzafic, R. A. Jabr, and T. Hrnjic, "High Performance Distribution Network Power Flow Using Wirtinger Calculus," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 3311-3319, May 2019.
- [10] W. Wirtinger, "On the formal theory of functions of several complex variables," *Math. Ann.*, vol. 97, no. 1, pp. 357-375, Dec. 1927.
- [11] MATLAB Development Corporation, "MathWorks," 2024. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com>. [Accessed Jul. 08, 2024].
- [12] POWERWORLD Corporation, "PowerWorld User's Manual," 2024. [Online]. Available: <https://www.powerworld.com>. [Accessed Jan. 19, 2024].
- [13] J. R. Marti, H. Ahmadi, and L. Bashualdo, "Linear Power-Flow Formulation Based on a Voltage-Dependent Load Model," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 3, pp. 1682-1690, Jul. 2013.