JTE HCM-UTE
ISSN: 1859-1272

TẠP CHÍ KHOA HỌC GIÁO DỤC KỸ THUẬT
Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Website: https://jte.edu.vn
Email: jte@hcmute.edu.vn

Fast Linear Matrix-Based Economic Dispatch With Transmission Loss Consideration for Power Plants Connected to a Common Bus

Duc Van Lam, Trung Tien Dang*
Electric Power University, Vietnam

*Corresponding author. Email: trungdt@epu.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 20/07/2026
Revised: 21/09/2026
Accepted: 14/10/2026
Online First: 09/11/2026
Published:

KEYWORDS

Economic dispatch;
Generation dispatch;
Transmission losses;
Linear matrix;
Generation limits.

ABSTRACT

This paper proposes an economic dispatch method for a group of N power plants connected to a common bus, considering generation costs, transmission losses, and generation limits. Starting from the power balance constraint, the method applies variable substitution by treating the generation output of the *N-th* plant as the dependent variable, thereby deriving $N-1$ equations for the outputs of the remaining plants. These equations form a linear matrix system for a given value of the *N-th* plant's output, which is determined using the bisection or Newton method. During the solution process, generation limit violations are handled by updating the coefficient matrix and the right-hand-side vector while preserving their dimensions. Simulation results show that the proposed method yields solutions equivalent to those obtained using the Lagrange/KKT approach within numerical tolerance, with shorter computation times in the investigated cases. When the transmission loss coefficients or load demand change, the method maintains power balance and satisfies generation limits.

Xây dựng phương pháp điều độ kinh tế công suất phát nhanh bằng ma trận tuyến tính có xét tổn hao truyền tải cho cụm nhà máy điện nối chung nút điện

Lâm Văn Đức, Đặng Tiến Trung*
Trường Đại học Điện lực, Việt Nam

*Tác giả liên hệ. Email: trungdt@epu.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 20/07/2026
Ngày hoàn thiện: 21/09/2026
Ngày chấp nhận đăng: 14/10/2026
Ngày đăng trực tuyến: 09/11/2026
Ngày xuất bản:

TỪ KHÓA

Điều độ kinh tế;
Điều độ công suất phát;
Tổn hao truyền tải;
Ma trận tuyến tính;
Giới hạn công suất phát.

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất phương pháp điều độ kinh tế công suất phát cho cụm N nhà máy điện đấu nối về cùng một nút, có xét chi phí phát điện, tổn hao truyền tải và giới hạn công suất. Từ điều kiện cân bằng công suất, nghiên cứu đề xuất phương pháp thế biến lấy công suất phát nhà máy thứ N làm biến phụ thuộc, qua đó xây dựng $N-1$ phương trình xác định công suất các nhà máy còn lại. Các phương trình được biểu diễn thành hệ ma trận tuyến tính ứng với mỗi giá trị công suất nhà máy thứ N, được tìm bằng phương pháp chia đôi hoặc Newton. Trong quá trình giải, các trường hợp vi phạm giới hạn được xử lý bằng cách cập nhật ma trận hệ số và vectơ vế phải nhưng vẫn giữ nguyên kích thước. Kết quả mô phỏng cho thấy nghiệm tương đương với phương pháp Lagrange/KKT trong phạm vi sai số tính toán, với thời gian tính toán ngắn hơn trong các trường hợp khảo sát. Khi hệ số tổn hao hoặc phụ tải thay đổi, phương pháp vẫn đảm bảo cân bằng công suất và thỏa mãn giới hạn phát.

DOI: https://doi.org/10.54644/jte.2026.2528

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

Bài toán điều độ kinh tế công suất phát (Economic Dispatch – ED) là một trong những bài toán kinh điển trong vận hành hệ thống điện [1], [2]. Với mục tiêu Net Zero vào năm 2050, mức độ tích hợp các

nguồn năng lượng tái tạo vào lưới điện ngày càng cao [3], [4]. Điều này gây ra nhiều khó khăn, thách thức cho vận hành hệ thống điện do công suất đầu ra của các nguồn này biến thiên; đồng thời, phụ tải điện cũng thay đổi liên tục theo nhu cầu sử dụng điện của hệ thống, đặc biệt với sự phát triển mạnh mẽ của xe điện. Việc này làm cho quá trình vận hành và điều độ công suất trong cụm trở nên phức tạp hơn, đồng thời nguy cơ mất cân bằng công suất tại nút xảy ra thường xuyên hơn [5], [6].

Trong thực tế, bài toán điều độ công suất phát là một phần quan trọng trong vận hành hệ thống điện, công suất yêu cầu tại nút đấu nối được xác định dựa trên nhu cầu phụ tải và kết quả tính toán trào lưu công suất của hệ thống [7]. Theo báo cáo của REN21 [8], công suất nguồn năng lượng tái tạo bổ sung trên toàn cầu năm 2023 đạt khoảng 473 GW, tăng 36% so với năm 2022. Sự phát triển này đặt ra những yêu cầu về chất lượng điện năng và điều khiển thích khi các nguồn năng lượng tái tạo vào hệ thống điện [9]. Đối với các nút điện có phụ tải biến thiên và tích hợp nguồn điện gió, điện mặt trời, công suất cần được đáp ứng bởi các nhà máy điện trong cụm có thể thay đổi theo cả nhu cầu phụ tải và công suất phát của các nguồn này [5], [6]. Mặt khác, do sự khác nhau về đặc tính vận hành, nhiên liệu đầu vào và các ràng buộc kỹ thuật của từng nhà máy điện, chi phí phát điện giữa các nhà máy có sự khác biệt và khả năng điều chỉnh công suất cũng chịu những giới hạn nhất định. Những yếu tố này làm cho bài toán điều độ kinh tế công suất phát trở nên phức tạp hơn khi công suất yêu cầu tại nút thay đổi. Bên cạnh đó, khoảng cách và thông số đường dây truyền tải từ các nhà máy điện đến nút đấu nối có thể khác nhau, dẫn đến tổn hao công suất truyền tải của từng nhà máy cũng khác nhau. Yếu tố này không chỉ làm giảm hiệu quả truyền tải năng lượng và tăng chi phí vận hành mà còn ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình phân bổ công suất phát giữa các nhà máy trong cùng cụm. Vì vậy, việc xem xét đồng thời chi phí phát điện và tổn hao công suất truyền tải là cần thiết nhằm nâng cao hiệu quả vận hành kinh tế của hệ thống điện.

Trong các phương pháp giải bài toán điều độ kinh tế, phương pháp nhân tử Lagrange và điều kiện Karush–Kuhn–Tucker (KKT) là những công cụ tối ưu cổ điển có cơ sở toán học rõ ràng [10]. Bên cạnh đó, các thuật toán tối ưu hiện đại như tối ưu bầy đàn (particle swarm optimization – PSO) [11], thuật toán di truyền (genetic algorithm – GA) [12] và tiến hóa vi phân (differential evolution – DE) [13] đã được ứng dụng để giải các bài toán điều độ kinh tế có đặc tính phi tuyến và nhiều ràng buộc. Các phương pháp này có khả năng tìm kiếm nghiệm trong không gian rộng, tuy nhiên hiệu quả tính toán phụ thuộc vào việc lựa chọn tham số có thể rơi vào nghiệm tối ưu cục bộ. Mặt khác, vận hành hệ thống điện luôn đòi hỏi tính an toàn, tính ổn định và tính kinh tế, đặc biệt khi công suất yêu cầu thường xuyên biến động. Do đó, bài toán ED cần được giải trong thời gian ngắn, đồng thời nghiệm thu được phải bảo đảm điều kiện cân bằng công suất tại nút.

Trong những năm gần đây, một số nghiên cứu tập trung xây dựng phương pháp phân bổ công suất dựa trên điều kiện tối ưu của bài toán ED [14], trong khi các nghiên cứu khác mở rộng mô hình để xét tổn hao công suất, thành phần phi tuyến và các điều kiện vận hành [15], [16], [17]. Nghiên cứu [18] đã xây dựng nghiệm theo quan hệ đại số nhằm hạn chế quá trình tìm kiếm lặp, nhưng được áp dụng cho bài toán phân bổ đồng thời công suất điện và nhiệt. Đối với bài toán ED có hàm mục tiêu chi phí bậc hai và ràng buộc cân bằng công suất có thành phần tổn hao truyền tải bậc hai, phương pháp Lagrange/KKT cần xác định nhân tử λ để thỏa mãn điều kiện cân bằng công suất. Nhân tử này có thể được xác định bằng các phương pháp số như chia đôi hoặc Newton. Vì vậy, đối với cụm nhà máy điện đấu nối về một nút chung qua các đường dây độc lập, việc xây dựng một cấu trúc giải có cơ sở toán học rõ ràng và giảm thời gian tính toán vẫn cần được tiếp tục nghiên cứu.

Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất phương pháp thế biến cho bài toán ED có xét tổn hao công suất truyền tải trong đó công suất nhà máy thứ N được chọn làm biến phụ thuộc, từ đó xây dựng $N-1$ phương trình xác định công suất các nhà máy còn lại và được biểu diễn thành hệ phương trình ma trận tuyến tính ứng với mỗi giá trị công suất nhà máy thứ N. Đóng góp chính của nghiên cứu là khai thác cấu trúc ma trận đường chéo để đơn giản hóa việc phân bổ công suất và hạn chế tính toán lặp lại. Các giới hạn vận hành được xử lý bằng cách cập nhật ma trận hệ số và vectơ vế phải, vì vậy các ma trận được giữ nguyên kích thước. Khi một nhà máy được cố định tại biên, công suất yêu cầu còn lại được cập nhật để tiếp tục phân bổ cho các nhà máy chưa cố định.

2. Xây dựng mô hình toán

Xét một nút điện có cụm nhà máy điện gồm N nguồn phát. Do đặc tính chi phí của mỗi nguồn khác nhau nên hàm chi phí mỗi nhà máy được biểu diễn như sau:

$$J_i = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \tag{1}$$

Vì vậy, tổng chi phí trong cụm nhà máy điện được tính như sau:

$$J_{\Sigma} = \sum_{i}^{N} Z_i = \sum_{i=1}^{N} a_i P_i^2 + \sum_{i=1}^{N} b_i P_i + \sum_{i=1}^{N} c_i,\ i=1,2,...,N \tag{2}$$

Tại một thời điểm, công suất tác dụng yêu cầu tại nút được xác định thông qua bài toán trào lưu công suất và phụ tải tại nút được gọi là P_{yc}. Khi đó, điều kiện ràng buộc cân bằng công suất tại nút là:

$$P_{yc} = \sum_{i=1}^{N} P_i - \sum_{i=1}^{N} \Delta P_i,\ i=1,2,...,N \tag{3}$$

Trong đó: $\sum_{i}^{N} P_i$ là tổng công suất phát của các nhà máy điện trong cụm; $\sum_{i=1}^{N} \Delta P_i$ là tổng tổn hao nhánh tính từ nhà máy điện thứ i đến nút.

Theo [7], tổn hao công suất được xác định theo công thức:

$$\Delta P_i = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} r_i \tag{4}$$

Trong đó: U_i là điện áp của nhà máy thứ i; P_i là công suất tác dụng của nhà máy thứ i; Q_i là công suất phản kháng của nhà máy thứ i; r_i là điện trở trên đường dây truyền tải thứ i đến nút đấu nối chung.

Trong thực tế, do đầu phát của các nhà máy điện đến nút điện có khoảng cách rất bé nên có thể xem điện áp U_i và hệ số $\cos\varphi_i$ tại nhà máy thứ i là điện áp U và hệ số $cos\varphi$ tại nút. Mặt khác, Q_i có thể được biểu diễn thông qua P_i và hệ số công suất $\cos\varphi_i$ của từng nhà máy. Vì vậy, Q_i được tính như sau:

$$Q_i = P_i \tan\varphi \Rightarrow Q_i^2 = P_i^2 \tan^2\varphi = P_i^2 \left(\frac{1}{\cos^2\varphi} - 1 \right) \tag{5}$$

Tiến hành đặt:

$$\psi_i = \frac{1}{\cos^2\varphi} - 1 \tag{6}$$

Khi này, tổn hao của nhà máy thứ i đến nút điện được viết lại dưới dạng:

$$\Delta P_i = \frac{P_i^2 + \psi_i P_i^2}{U^2} r_i = \frac{1+\psi_i}{U^2} r_i P_i^2 \tag{7}$$

Gọi C_i là hệ số tổn hao, vì vậy:

$$C_i = \frac{1+\psi_i}{U^2} r_i \tag{8}$$

Phương trình tổn hao công suất tại nhà máy thứ i đến nút được viết gọn như sau:

$$\Delta P_i = C_i P_i^2 \tag{9}$$

Lúc này, tổng tổn hao của các nhà máy trong cụm được viết như sau:

$$\sum_{i=1}^{N}\Delta P_i=\sum_{i=1}^{N}C_iP_i^2,\ i=1,2,...,N \tag{10}$$

Vì vậy điều kiện ràng buộc cân bằng công suất tại nút được viết lại như sau:

$$P_{yc}=\sum_{i=1}^{N}P_i-\sum_{i=1}^{N}\Delta P_i=\sum_{i=1}^{N}P_i-\sum_{i=1}^{N}C_iP_i^2,\ \ i=1,2,...,N \tag{11}$$

Từ (11), công suất phát P_N được xác định như sau:

$$P_{yc}=\sum_{i}^{N}P_i-\sum_{i=1}^{N}C_iP_i^2=\sum_{i}^{N-1}P_i+P_N-\sum_{i=1}^{N}C_iP_i^2\Rightarrow P_N=P_{yc}-\sum_{i}^{N-1}P_i+\sum_{i=1}^{N}C_iP_i^2 \tag{12}$$

Lúc này, hàm chi phí phát điện của nhà máy thứ N được xác định như sau:

$$J_N=a_N\left(P_{yc}-\sum_{i=1}^{N-1}P_i+\sum_{i=1}^{N}C_iP_i^2\right)^2+b_N\left(P_{yc}-\sum_{i=1}^{N-1}P_i+\sum_{i=1}^{N}C_iP_i^2\right)+c_N \tag{13}$$

Khi đó, tổng chi phí của hệ thống được biểu diễn dưới dạng:

$$\begin{aligned}J_\Sigma&=\sum_{i}^{N}J_i=\sum_{i}^{N-1}J_i+J_N=\sum_{i=1}^{N-1}a_iP_i^2+\sum_{i=1}^{N-1}b_iP_i+\sum_{i=1}^{N-1}c_i+a_NP_N^2+b_NP_N+c_N\\&=\sum_{i=1}^{N-1}a_iP_i^2+\sum_{i=1}^{N-1}b_iP_i+\sum_{i=1}^{N-1}c_i+a_N\left(P_{yc}-\sum_{i=1}^{N-1}P_i+\sum_{i=1}^{N}C_iP_i^2\right)^2+b_N\left(P_{yc}-\sum_{i=1}^{N-1}P_i+\sum_{i=1}^{N}C_iP_i^2\right)+c_N\end{aligned} \tag{14}$$

Để xác định công suất phát tối thiểu hóa tổng chi phí có xét tổn hao truyền tải, sau khi sử dụng điều kiện cân bằng công suất (11) để thế biến, điều kiện dừng đối với các nhà máy chưa đạt giới hạn được viết lại như sau:

$$\begin{aligned}&\frac{\partial J_\Sigma}{\partial P_i}=0\Leftrightarrow\frac{\partial}{\partial P_i}\left(\sum_{i=1}^{N-1}a_iP_i^2+\sum_{i=1}^{N-1}b_iP_i+\sum_{i=1}^{N-1}c_i\right)\\&+a_N\frac{\partial}{\partial P_i}\left(P_{yc}-\sum_{i=1}^{N-1}P_i+\sum_{i=1}^{N}C_iP_i^2\right)^2+b_N\frac{\partial}{\partial P_i}\left(P_{yc}-\sum_{i=1}^{N-1}P_i+\sum_{i=1}^{N}C_iP_i^2\right)=0\end{aligned} \tag{15}$$

Ta có:

$$\frac{\partial}{\partial P_i}\left(\sum_{i=1}^{N-1}a_iP_i^2+\sum_{i=1}^{N-1}b_iP_i+\sum_{i=1}^{N-1}c_i\right)=2a_iP_i+b_i \tag{16}$$

$$\frac{\partial}{\partial P_i}\left(P_{yc}-\sum_{i=1}^{N-1}P_i+\sum_{i=1}^{N}C_iP_i^2\right)=-1+2C_iP_i=-\left(1-2C_iP_i\right) \tag{17}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial P_i}\left(P_{yc}-\sum_{i=1}^{N-1}P_i+\sum_{i=1}^{N}C_iP_i^2\right)^2=2\left[\left(P_{yc}-\sum_{i=1}^{N-1}P_i+\sum_{i=1}^{N}C_iP_i^2\right)\frac{\partial}{\partial P_i}\left(P_{yc}-\sum_{i=1}^{N-1}P_i+\sum_{i=1}^{N}C_iP_i^2\right)\right]\\&=2\left(P_{yc}-\sum_{i=1}^{N-1}P_i+\sum_{i=1}^{N}C_iP_i^2\right)\left[-\left(1-2C_iP_i\right)\right]\end{aligned} \tag{18}$$

Thay (16), (17) và (18) vào (15), ta thu được:

$$\begin{aligned}&2a_iP_i+b_i+2a_N\left(P_{yc}-\sum_{i=1}^{N-1}P_i+\sum_{i=1}^{N}C_iP_i^2\right)\left[-\left(1-2C_iP\right)\right]+b_N\left[-\left(1-2C_iP\right)\right]=0\\&\Leftrightarrow 2a_iP_i+b_i-\left[2a_N\left(P_{yc}-\sum_{i=1}^{N-1}P_i+\sum_{i=1}^{N}C_iP_i^2\right)+b_N\right]\left(1-2C_iP_i\right)=0\end{aligned}\tag{19}$$

Theo công thức xác định P_N ở (12), phương trình có thể được rút gọn như sau:

$$\begin{aligned}&2a_iP_i+b_i-\left(2a_NP_N+b_N\right)\left(1-2C_iP_i\right)=0\\&\Leftrightarrow 2a_iP_i+b_i-\left(2a_NP_N+b_N\right)+2C_iP_i\left(2a_NP_N+b_N\right)=0\end{aligned}\tag{20}$$

Gom các hạng tử chứa P_i về một bên và biến đổi phương trình, ta được:

$$\begin{aligned}&\left[2a_i+2C_i\left(2a_NP_N+b_N\right)\right]P_i+b_i-\left(2a_NP_N+b_N\right)=0\\&\Leftrightarrow\left[2a_i+2C_i\left(2a_NP_N+b_N\right)\right]P_i=2a_NP_N+b_N-b_i\\&\Leftrightarrow\left[2a_i+4a_NC_iP_N+2b_NC_i\right]P_i=2a_NP_N+b_N-b_i\\&i=1,2,...,N\text{-}1\end{aligned}\tag{21}$$

Từ (21), có thể xây dựng $N-1$ phương trình tương ứng như sau:

$$\begin{cases}\left(2a_1+4a_NC_1P_N+2b_NC_1\right)P_1=2a_NP_N+b_N-b_1\\\left(2a_2+4a_NC_2P_N+2b_NC_2\right)P_2=2a_NP_N+b_N-b_2\\\vdots\\\left(2a_{N-1}+4a_NC_{N-1}P_N+2b_NC_{N-1}\right)P_{N-1}=2a_NP_N+b_N-b_{N-1}\end{cases}\tag{22}$$

Nếu biểu diễn dưới dạng ma trận, ta có:

$$\begin{aligned}&\begin{bmatrix}2a_1+4a_NC_1P_N+2b_NC_1&0&\cdots&0\\0&2a_2+4a_NC_2P_N+2b_NC_2&\cdots&0\\\vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\0&0&\cdots&2a_{N-1}+4a_NC_{N-1}P_N+2b_NC_{N-1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}P_1\\P_2\\\vdots\\P_{N-1}\end{bmatrix}\\&=\begin{bmatrix}2a_NP_N+b_N-b_1\\2a_NP_N+b_N-b_2\\\vdots\\2a_NP_N+b_N-b_{N-1}\end{bmatrix}\end{aligned}\tag{23}$$

Định nghĩa:

$$A=\begin{bmatrix}2a_1+4a_NC_1P_N+2b_NC_1&0&\cdots&0\\0&2a_2+4a_NC_2P_N+2b_NC_2&\cdots&0\\\vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\0&0&\cdots&2a_{N-1}+4a_NC_{N-1}P_N+2b_NC_{N-1}\end{bmatrix}\tag{24}$$

$$P=\begin{bmatrix}P_1\\P_2\\\vdots\\P_{N-1}\end{bmatrix}\tag{25}$$

$$B = \begin{bmatrix} 2a_N P_N + b_N - b_1 \\ 2a_N P_N + b_N - b_2 \\ \vdots \\ 2a_N P_N + b_N - b_{N-1} \end{bmatrix} \tag{26}$$

Khi đó, phương trình có thể được viết gọn dưới dạng:

$$AP = B \tag{27}$$

Do A (24) là ma trận vuông đường chéo cấp $N-1$, trong đó các phần tử ngoài đường chéo $A_{ij} = 0$ với $i \neq j$, còn các phần tử trên đường chéo chính được xác định bởi:

$$A_{ii} = 2a_i + 4a_N C_i P_N + 2b_N C_i \tag{28}$$

Với $a_i > 0$, $a_N > 0$, $b_N > 0$, $C_i > 0$ và $P_N > 0$, suy ra $A_{ii} > 0$ với mọi $i = 1,..., N-1$. Mặt khác, A là ma trận đường chéo nên định thức của A bằng tích các phần tử trên đường chéo chính, tức là:

$$\det(A) = \prod_{i=1}^{N-1} \left(2a_i + 4a_N C_i P_N + 2b_N C_i\right) > 0 \tag{29}$$

Do $det(A) > 0$ nên ma trận A luôn khả nghịch. Vì vậy, vector công suất phát của $N-1$ nhà máy được xác định trực tiếp bởi:

$$P = A^{-1} B \tag{30}$$

Mặt khác, nghiệm đầu ra phải thỏa mãn:

$$P_i^* = \begin{cases} P_i^{\min}, P_i < P_i^{\min} \\ P_i^{\max}, P_i > P_i^{\max} \\ P_i, P_i^{\min} < P_i < P_i^{\max} \end{cases} \tag{31}$$

Theo ràng buộc công suất ở (11), P_N được tính như sau:

$$P_{yc} = \sum_{i=1}^{N} P_i - \sum_{i=1}^{N} C_i P_i^2 = \sum_{i=1}^{N-1} P_i + P_N - \sum_{i=1}^{N-1} C_i P_i^2 - C_N P_N^2 \tag{32}$$

Chuyển vế P_N sang một bên:

$$-C_N P_N^2 + P_N + \left(\sum_{i}^{N-1} P_i - \sum_{i=1}^{N-1} C_i P_i^2 - P_{yc}\right) = 0 \tag{33}$$

Từ (33) có thể thấy P_i được xác định thông qua P_N. Vì vậy phương trình được đưa về dạng bậc hai chỉ còn một ẩn P_N. Khi đó, các hệ số của phương trình bậc hai α, β, γ được xác định như sau:

$$\alpha = -C_N; \beta = 1; \gamma = \sum_{i}^{N-1} P_i - \sum_{i=1}^{N-1} C_i P_i^2 - P_{yc} \tag{34}$$

Tính biệt thức δ:

$$\delta = \beta^2 - 4\alpha\gamma = 1^2 - 4\left(-C_N\right)\left(\sum_{i}^{N-1} P_i - \sum_{i=1}^{N-1} C_i P_i^2 - P_{yc}\right) = 1 + 4C_N\left(\sum_{i}^{N-1} P_i - \sum_{i=1}^{N-1} C_i P_i^2 - P_{yc}\right) \tag{35}$$

Theo (32) biến đổi chuyển vế, ta được:

$$P_{yc} = \sum_{i}^{N-1} P_i + P_N - \sum_{i=1}^{N-1} C_i P_i^2 - C_N P_N^2 \Leftrightarrow \sum_{i}^{N-1} P_i - \sum_{i=1}^{N-1} C_i P_i^2 - P_{yc} = C_N P_N^2 - P_N \tag{36}$$

Thế (36) vào (35) ta được:

$$\delta = 1 + 4C_N\left(C_N P_N^2 - P_N\right) = 1 - 4C_N P_N + 4C_N^2 P_N^2 = \left(1 - 2C_N P_N\right)^2 > 0 \tag{37}$$

Vì $\delta > 0$, do đó nghiệm P_N được xác định như sau:

$$P_N = \frac{-b \pm \sqrt{\delta}}{2a} = \frac{-1 \pm \sqrt{\delta}}{-2C_N} = \frac{-1 \pm |1 - 2C_N P_N|}{-2C_N} \tag{38}$$

Trong miền công suất vận hành đang xét, C_N là hệ số tổn hao có giá trị nhỏ và $2C_N P_N < 1$, do đó $|1 - 2C_N P_N| = 1 - 2C_N P_N$. Thế vào (38), ta có 2 nghiệm:

$$P_N^+ = \frac{-1 + 1 - 2C_N P_N}{-2C_N} = \frac{-2C_N P_N}{-2C_N} = P_N \tag{39}$$

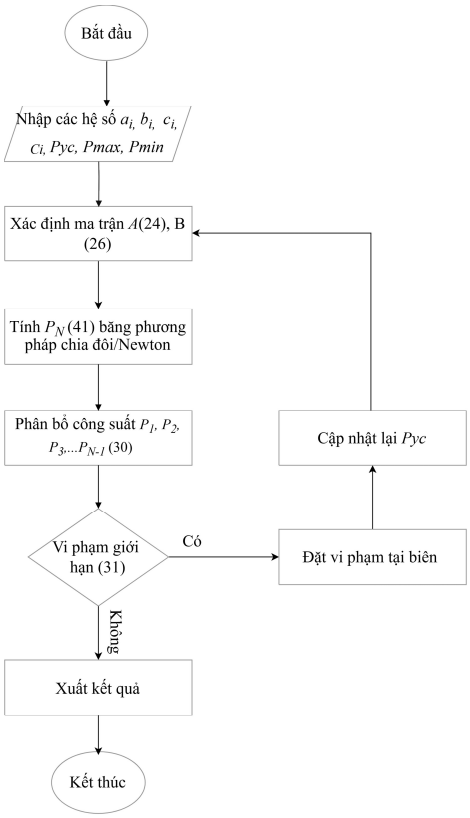
$$P_N^- = \frac{-1 - 1 - 2C_N P_N}{-2C_N} = \frac{-2 - 2C_N P_N}{-2C_N} = \frac{1}{C_N} - P_N \tag{40}$$

Do C_N có giá trị nhỏ nên nghiệm P_N^- có giá trị rất lớn và nằm ngoài miền công suất vận hành của nhà máy thứ N. Vì vậy, nghiệm ứng với dấu cộng trong (38) được lựa chọn để xác định công suất phát P_N. Từ đó:

$$P_N = \frac{-1 + \sqrt{\delta}}{-2C_N} = \frac{1 - \sqrt{\delta}}{2C_N} = \frac{1 - \sqrt{1 + 4C_N \left(\sum_{i=1}^{N-1} P_i - \sum_{i=1}^{N-1} C_i P_i^2 - P_{yc} \right)}}{2C_N} \tag{41}$$

Từ (41), do các P_i phụ thuộc vào P_N nên nghiệm P_N cần tìm là nghiệm của phương trình dạng điểm bất động $P_N = \Phi(P_N)$, trong đó Φ là vế phải của (41). Trong nghiên cứu này, phương pháp chia đôi và Newton được lựa chọn để xác định P_N.

Từ các phân tích trên, nghiên cứu đề xuất quy trình giải bài toán điều độ kinh tế công suất phát như trình bày trong Hình 1.



Hình 1. *Lưu đồ thực hiện.*

Hình 1 trình bày lưu đồ phương pháp đề xuất. Sau khi xác định ma trận A và vectơ B, thuật toán tìm P_N bằng phương pháp chia đôi hoặc Newton. Nếu P_N vượt giới hạn công suất thì được đặt tại biên tương ứng. Sau đó, P_N được thế ngược vào (30) để tính P_i; nếu P_i vi phạm giới hạn thì đặt $A_{ii,lim} = 1$ và $B_{i,lim}$ bằng P_i^{min} hoặc P_i^{max} tương ứng. Công suất P_{yc_new} được cập nhật lại bằng công thức sau:

$$P_{yc_new} = P_{yc_old} - P_{i,lim} + C_{i,lim} P_{i,lim}^2 \quad (42)$$

Trong đó $P_{i,lim}$ là công suất tại biên của nhà máy i vừa được cố định; $C_{i,lim}$ là hệ số tổn hao tương ứng. Vì vậy ma trận A và vectơ B giữ nguyên kích thước, công suất của các nhà máy tiếp tục được phân bổ theo công thức (30) theo dạng ma trận tuyến tính. Quá trình kết thúc khi thỏa cân bằng công suất (11) và giới hạn phát (31).

3. Kiểm chứng mô hình

Để kiểm chứng phương pháp đề xuất, các thông số đặc tính phát và giới hạn công suất của sáu tổ máy được tham khảo từ bộ dữ liệu IEEE 30-bus trong Bảng 1 của tài liệu [19] và sử dụng để xây dựng trường hợp mô phỏng cho cụm nhà máy điện nghiên cứu. Do mô hình khảo sát giả thiết các nhà máy đấu nối về một nút chung qua các đường dây độc lập, hệ số tổn hao C_i được thiết lập riêng cho từng đường dây để mô tả tổn hao truyền tải theo quan hệ $\Delta P_i = C_i P_i^2$. Các thông số mô phỏng được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. *Thông số giả lập mô phỏng.*

Nhà máy	a_i ($/MW²h)	b_i ($/MWh)	c_i ($/h)	P_{max} (MW)	P_{min} (MW)	C_i (MW^{-1})
1	0,00375	2,00	0	200	50	1,8 x 10^{-6}
2	0,01750	1,75	0	80	20	2,5 x 10^{-6}
3	0,06250	1,00	0	50	15	3,2 x 10^{-6}
4	0,00834	3,25	0	35	10	4,0 x 10^{-6}
5	0,02500	3,00	0	30	10	5,0 x 10^{-6}
6	0,02500	3,00	0	40	12	6,0 x 10^{-6}

Bảng 2. *So sánh kết quả của phương pháp đề xuất và phương pháp Lagrange.*

Phương pháp	P_1 (MW)	P_2 (MW)	P_3 (MW)	P_4 (MW)	P_5 (MW)	P_6 (MW)	ΔP (MW)	Thời gian tính toán (s)	J ($/h)
Đề xuất (chia đôi)	195,884	49,163	19,769	13,262	10,000	12,000	0,078	2,1 x 10^{-6}	824,9
Lagrange (chia đôi)	195,884	49,163	19,769	13,262	10,000	12,000	0,078	3,6 x 10^{-6}	824,9
Đề xuất (Newton)	195,884	49,163	19,769	13,262	10,000	12,000	0,078	1,1 x 10^{-6}	824,9
Lagrange (Newton)	195,884	49,163	19,769	13,262	10,000	12,000	0,078	1,3 x 10^{-6}	824,9

Với công suất phụ tải yêu cầu P_{yc} = 300 MW, kết quả trong Bảng 2 cho thấy cả phương pháp đề xuất và phương pháp Lagrange đều thỏa mãn điều kiện cân bằng công suất theo (11), với tổn hao công suất khoảng 0,078 MW và chi phí phát xấp xỉ 824,9 $/h. Khi sử dụng phương pháp chia đôi, thời gian tính

toán của phương pháp đề xuất là 2,1 x 10^{-6} s, thấp hơn phương pháp Lagrange 3,6 x 10^{-6} s. Với Newton, thời gian tính toán tương ứng 1,1 x 10^{-6} s và 1,3 x 10^{-6} s. Kết quả cho thấy phương pháp đề xuất cho kết quả phân bổ công suất gần với phương pháp Lagrange, đồng thời có thời gian tính toán thấp hơn trong cả hai trường hợp khảo sát.

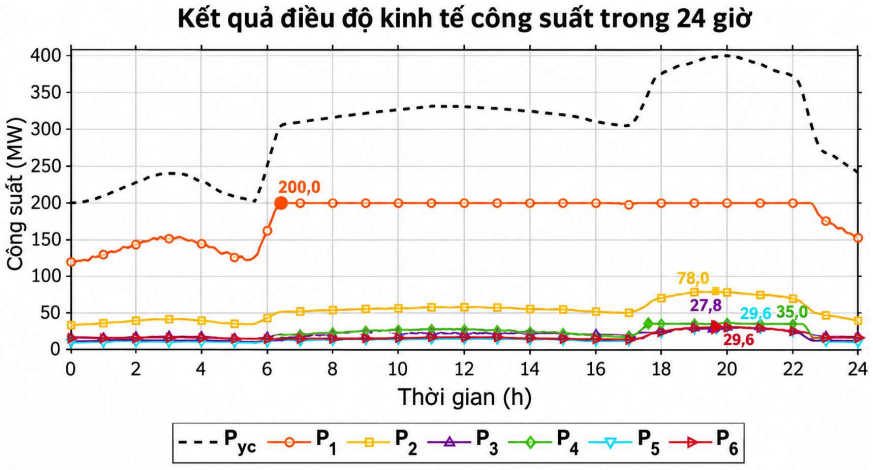
Mặt khác, kết quả trong Bảng 2 cũng cho thấy nhà máy 1 có khả năng phát công suất lớn nhất và đảm nhận tỷ trọng công suất cao trong hệ thống. Vì vậy, để đánh giá ảnh hưởng của tổn hao truyền tải đến quá trình phân bổ công suất, hệ số C_1 được thay đổi theo ba kịch bản: C_1, 10 C_1 và 100 C_1, trong khi các thông số còn lại được giữ không đổi.

Bảng 3. *Kết quả mô phỏng khi thay đổi hệ số tổn hao C_1.*

Hệ số C_1	P_1 (MW)	P_2 (MW)	P_3 (MW)	P_4 (MW)	P_5 (MW)	P_6 (MW)	ΔP (MW)	J ($/h)
C_1	195,884	49,163	19,769	13,262	10,000	12,000	0,078	824,9
10 C_1	195,009	49,605	19,893	14,187	10,000	12,000	0,694	827,0
100 C_1	184,386	53,498	20,983	22,347	12,459	12,457	6,132	847,8

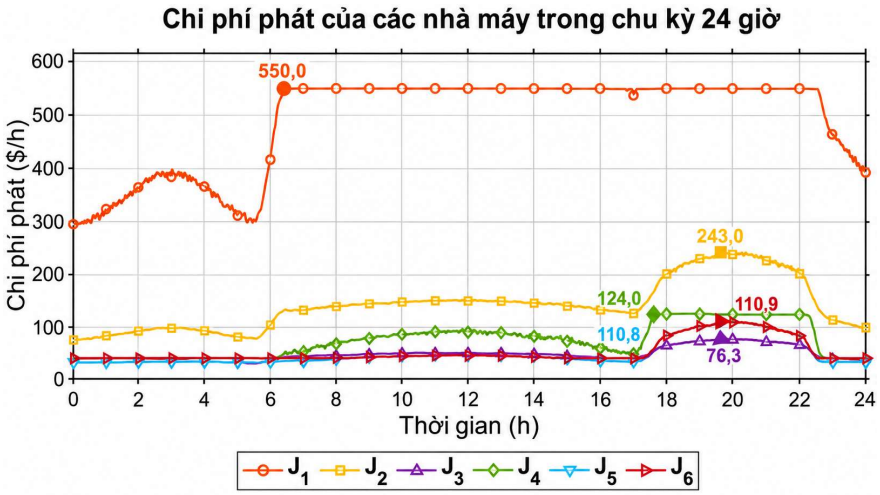
Kết quả Bảng 3 cho thấy khi hệ số tổn hao C_1 tăng, công suất phát của nhà máy 1 giảm và công suất được phân bổ lại cho các nhà máy còn lại. Khi C_1 tăng từ giá trị ban đầu lên 10 C_1 và 100 C_1, P_1 giảm từ 195,884 MW xuống 195,009 MW và 184,386 MW, trong khi tổng tổn hao công suất tăng tương ứng từ 0,078 MW lên 0,694 MW và 6,132 MW. Sự gia tăng tổn hao cũng làm chi phí phát tăng từ 824,9 $/h lên 827,0 $/h và 847,8 $/h. Kết quả cho thấy phương pháp đề xuất có khả năng tái phân bổ công suất khi đặc tính tổn hao thay đổi, đồng thời duy trì cân bằng công suất theo (11).

Kịch bản 3 mô phỏng phụ tải biến thiên trong 24 giờ, gồm các khoảng giờ bình thường, cao điểm và thấp điểm, nhằm khảo sát việc phân bổ công suất của các nhà máy theo mức phụ tải, đặc tính hàm chi phí và giới hạn công suất phát.



Hình 2. *Kết quả phân bổ công suất phát của các nguồn theo phụ tải yêu cầu trong chu kỳ 24 giờ.*

Kết quả trên Hình 2 cho thấy công suất các nhà máy được phân bổ theo sự biến thiên của phụ tải, đặc tính hàm chi phí và các giới hạn vận hành trong Bảng 1. Trong thời gian thấp điểm từ 0–6 h, nhà máy 1 được huy động với công suất lớn hơn do có hệ số chi phí a_1 nhỏ, trong khi nhà máy 5 và 6 được giữ tại P_{min} trong một số thời điểm. Khi P_{yc} tăng nhanh, các nhà máy có chi phí biên thấp được ưu tiên tăng công suất. Nhà máy 1 đạt P_1^{max} = 200 MW từ khoảng 6,5 h, sau đó phần công suất tăng thêm được phân bổ cho các nhà máy còn lại, trong đó nhà máy 2 tăng đáng kể do đặc tính chi phí thuận lợi. Trong giai đoạn cao điểm 18–22 h, nhà máy 4 đạt P_4^{max} = 35 MW, trong khi các nhà máy 2, 3, 5 và 6 vẫn dưới giới hạn cực đại. Khi phụ tải giảm sau 22 h, công suất các nhà máy cũng giảm theo.



Hình 3. *Chi phí phát của các nhà máy theo phụ tải yêu cầu trong chu kỳ 24 giờ.*

Kết quả trên Hình 3 cho thấy chi phí phát của các nhà máy biến thiên phù hợp với kết quả phân bổ công suất trên Hình 2 và đặc tính hàm chi phí trong Bảng 1. Nhà máy 1 được huy động với công suất lớn nhất nên chi phí phát đạt khoảng 550,0 $/h khi công suất chạm P_1^{max} = 200 MW. Trong giai đoạn cao điểm từ khoảng 18–22 h, công suất các nhà máy còn lại tăng nên chi phí phát cũng tăng tương ứng. Chi phí cực đại của các nhà máy 2–6 lần lượt đạt khoảng 243,0; 76,3; 124,0; 110,8 và 110,9 $/h.

4. Kết luận

Bài báo đã xây dựng phương pháp điều độ kinh tế công suất phát cho cụm nhà máy điện đấu nối về cùng một nút, có xét chi phí phát điện, tổn hao truyền tải và giới hạn công suất. Phương pháp khai thác cấu trúc ma trận đường chéo để tính công suất các nhà máy theo P_N, kết hợp chia đôi hoặc Newton để giải phương trình cân bằng công suất. Các giới hạn phát được xử lý bằng cách cập nhật các phần tử tương ứng của ma trận A và vectơ B, đồng thời giữ nguyên kích thước lưu trữ. Khi một máy được cố định tại biên, công suất yêu cầu còn lại được cập nhật để tiếp tục phân bổ. Kết quả mô phỏng cho thấy công suất phân bổ và chi phí phát tương đương với phương pháp Lagrange/KKT trong sai số tính toán, trong khi thời gian thực hiện thấp hơn ở các trường hợp khảo sát.

Trong phạm vi khảo sát, khi hệ số tổn hao C_1 tăng, công suất nhà máy 1 giảm và được phân bổ lại cho các nhà máy còn lại, đồng thời tổn hao và chi phí phát của hệ thống tăng. Với phụ tải biến thiên trong chu kỳ 24 giờ, phương pháp xác định được công suất phân bổ phù hợp với từng mức phụ tải và giới hạn phát của các nhà máy.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, phương pháp sẽ được mở rộng cho hệ thống điện nhiều nút, bổ sung các ràng buộc về điện áp, công suất phản kháng và tốc độ thay đổi công suất nhằm đáp ứng đầy đủ hơn các yêu cầu vận hành thực tế.

Lời cám ơn

Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ của Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Xung đột lợi ích

Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích trong bài báo này.

Tuyên bố dữ liệu sẵn có

Dữ liệu hỗ trợ cho các kết quả của nghiên cứu này có thể được cung cấp bởi tác giả liên hệ khi có yêu cầu hợp lý.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, and G. B. Sheblé, *Power Generation, Operation, and Control*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2014.
[2] A. J. Conejo, M. Carrión, and J. M. Morales, *Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets*. New York, NY, USA: Springer, 2010, doi: 10.1007/978-1-4419-7421-1.
[3] International Energy Agency, "Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector," IEA, Paris, France, 2021, doi: 10.1787/c8328405-en.
[4] Prime Minister of Vietnam, "Decision No. 500/QD-TTg, dated May 15, 2023, on Approval of the National Power Development Plan for the 2021–2030 Period, With a Vision to 2050 (PDP VIII)," Hanoi, Vietnam, 2023.
[5] N. Hatziargyriou, Ed., *Microgrids: Architectures and Control*. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2014, doi: 10.1002/9781118720677.
[6] T. Ackermann, Ed., *Wind Power in Power Systems*, 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2012, doi: 10.1002/9781119941842.
[7] H. Saadat, *Power System Analysis*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1999.
[8] REN21, "Renewables 2024 Global Status Report," REN21 Secretariat, Paris, France, 2024.
[9] Erdiwansyah, Mahidin, H. Husin, Nasaruddin, M. Zaki, and Muhibbuddin, "A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 6, Art. no. 3, 2021, doi: 10.1186/s41601-021-00181-3.
[10] J. Zhu, *Optimization of Power System Operation*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2015, doi: 10.1002/9781118887004.
[11] J. B. Park, K. S. Lee, J. R. Shin, and K. Y. Lee, "A particle swarm optimization for economic dispatch with nonsmooth cost functions," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 34–42, Feb. 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2004.831275.
[12] D. C. Walters and G. B. Sheblé, "Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 1325–1332, Aug. 1993, doi: 10.1109/59.260861.
[13] X. Shen, D. Zou, X. Zhang, Q. Zhang, and P. Xiao, "A phase-based adaptive differential evolution algorithm for the economic load dispatch considering valve-point effects and transmission losses," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2018, Art. no. 4585403, 2018, doi: 10.1155/2018/4585403.
[14] U. E. H. Alvi, W. Ahmed, K. S. Hong, M. Rehan, and S. Ahmed, "Optimality condition and distributed optimization for economic dispatch using a novel weighted incremental cost consensus approach," *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, Art. no. 722256, 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.722256.
[15] H. Sharifzadeh, "A reliable deterministic method for multi-area economic dispatch considering power losses," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 2720–2731, 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.08.043.
[16] Y. Zhang and M. Ni, "Fully distributed optimal economic dispatch for microgrids under directed communication networks considering time delays," *Energies*, vol. 16, no. 23, Art. no. 7898, 2023, doi: 10.3390/en16237898.
[17] O. Pérez Andrade, J. H. Tovar Hernández, and C. A. Tovar Ramírez, "Efficient centralized economic dispatch in AC/DC interconnected power systems considering bilateral contracts supported by FTRs and transmission and VSC losses," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 75640–75656, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3401628.
[18] D. N. Ohaegbuchi, O. S. Maliki, C. P. A. Okwaraoka, and H. E. Okwudiri, "Solution of combined heat and power economic dispatch problem using direct optimization algorithm," *Energy and Power Engineering*, vol. 14, no. 12, pp. 737–746, 2022, doi: 10.4236/epe.2022.1412040.
[19] R. Kyomugisha, C. M. Muriithi, and M. Edimu, "Multiobjective optimal power flow for static voltage stability margin improvement," *Heliyon*, vol. 7, no. 12, Art. no. e08631, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08631.

Lâm Văn Đức hiện là giảng viên Phòng Đào tạo, Trường Cao đẳng Dầu khí. Tác giả nhận bằng Thạc sĩ Kỹ thuật điện tại Trường Đại học Công nghệ kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh năm 2024 và hiện đang là nghiên cứu sinh ngành Kỹ thuật điện tại Trường Đại học Điện lực.
Email: lamduc140894@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-2212-5346.

Đặng Tiến Trung hiện là giảng viên tại Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực, Việt Nam. Tác giả tốt nghiệp đại học ngành Tự động hóa xí nghiệp công nghiệp tại Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2004, nhận bằng Thạc sĩ ngành Tự động hóa năm 2008 và bằng Tiến sĩ chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa năm 2019 tại Học viện Kỹ thuật Quân sự.
Email: trungdt@epu.edu.vn. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-9951-1181.