

CẢI THIỆN CHẾ ĐỘ VẬN HÀNH HỆ THỐNG ĐIỆN PHÂN PHỐI SỬ DỤNG UPFC BẰNG PHƯƠNG PHÁP NEWTON-RAPHSON TRONG HỆ THỐNG ĐIỆN IEEE 33 NÚT

IMPROVING THE OPERATING CONDITION OF DISTRIBUTION POWER SYSTEMS USING UPFC BY THE NEWTON-RAPHSON METHOD IN THE IEEE 33-BUS TEST SYSTEM

NGUYỄN NGỌC KHÔI^{1,a}, NGUYỄN VĂN MINH²

¹Học viên cao học, Trường Đại học SPKT Vĩnh Long

²Trường Đại học SPKT Vĩnh Long

^aTác giả liên hệ: nnkhoi@hgcc.edu.vn, 0987807078

Nhận bài(Received): 7/4/2026; Phản biện (Reviewed):4/5/2026; Chấp nhận(Accepted):16/6/2026

TÓM TẮT

Chế độ vận hành của hệ thống điện cùng bài toán phân bố công suất kết hợp với thiết bị điều khiển dòng công suất tổng hợp tìm ra giải pháp cải thiện chất lượng điện năng ngày càng được quan tâm. Mô hình điều khiển dòng công suất tổng hợp được kết hợp vào bài toán phân bố công suất, cho thấy khả năng điều khiển linh hoạt công suất tác dụng, công suất phản kháng và điện áp nút. Khi không có thiết bị điều khiển dòng công suất tổng hợp, điện áp sụt giảm mạnh và xuất hiện dao động lớn của công suất và góc pha. Bên cạnh đó, phương pháp Newton–Raphson được áp dụng để phân tích lưới IEEE-33 nút trong điều kiện sự cố ngắn mạch làm cơ sở cho bài toán đặt ra. Nghiên cứu này khẳng định hiệu quả của thiết bị điều khiển dòng công suất tổng hợp trong việc nâng cao chất lượng điện năng và ổn định hệ thống điện. Điện áp nút được nâng từ khoảng 0,67–0,88 pu lên gần 0,95–1,01 pu, trong đó điện áp thấp nhất tăng khoảng 40–50%. Tổn thất công suất giảm đáng kể từ mức 0,05–0,08 pu xuống còn 0,02–0,03 pu, tương ứng giảm khoảng 40–70%. Bên cạnh đó, phân bố dòng công suất trở nên đồng đều hơn, giảm hiện tượng quá tải trên các nhánh chính.

Từ khóa: FACTS; UPFC; Sự cố ngắn mạch; Chất lượng điện năng; Newton-Raphson;

ABSTRACT

The operating modes of power systems, along with the optimal power flow problem incorporating Flexible AC Transmission Systems (FACTS) devices, have received increasing attention in finding solutions to improve power quality. The Unified Power Flow Controller (UPFC) model is integrated into the optimal power flow formulation, demonstrating its flexible control capability over active power, reactive power, and bus voltages. Without the UPFC, the system experiences severe voltage drops and large oscillations in both active power and phase angles. Simulation results on the IEEE 33-bus system show that the installation of UPFC significantly improves bus voltage profiles, reduces power losses, and optimizes power flow distribution in the network. In addition, the Newton–Raphson method is applied to analyze the IEEE 33-bus system under short-circuit fault conditions, serving as the basis for the proposed study. This research confirms the effectiveness of the UPFC in enhancing power quality and improving the stability of power systems.

Key words: FACTS; UPFC; Short circuit fault; Newton-Raphson; Power Quality.

1. GIỚI THIỆU

Nhu cầu điện năng tại Việt Nam đang tăng trưởng mạnh mẽ trong những năm gần đây, gây áp lực lớn lên hệ thống lưới điện phân phối và dẫn đến nhiều vấn đề về chất lượng điện năng, điển hình là tình trạng sụt áp nghiêm trọng và tổn thất công suất cao

[1]. Các giải pháp bù công suất truyền thống như tụ điện bù tĩnh và máy biến áp điều áp có những hạn chế rõ rệt về khả năng điều khiển động cũng như khả năng tích hợp với các nguồn năng lượng tái tạo [2, 3].

Thiết bị FACTS được xem là công nghệ tiên tiến, cho phép điều khiển linh hoạt các

thông số quan trọng như công suất tác dụng, công suất phản kháng, điện áp nút và trở kháng đường dây [4]. Trong số các thiết bị FACTS, UPFC nổi bật nhờ khả năng điều khiển linh hoạt và ổn định vận hành của hệ thống.

Một số nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc tích hợp Unified Power Flow Controller vào bài toán phân bố công suất bằng Newton–Raphson nhằm cải thiện điện áp và giảm tổn thất hệ thống. Nghiên cứu của Zhang, X.P. đã đề xuất mô hình UPFC tích hợp trực tiếp vào phương pháp Newton–Raphson thông qua ma trận Jacobian mở rộng, giúp nâng cao ổn định điện áp và khả năng điều khiển dòng công suất. Jiang, H. và Chen, Y. đã phát triển phương pháp phân tích load flow có FACTS bằng cách bổ sung các biến điều khiển mới vào hệ NR, giúp tăng độ chính xác và cải thiện hội tụ. Ngoài ra, các nghiên cứu hiện đại còn kết hợp các thuật toán tối ưu như PSO và AI để xác định vị trí UPFC tối ưu, mô hình của C. R. Fuerte-Esquivel và cộng sự đã chứng minh thành công phương trình UPFC vào ma trận Jacobi để giữ nguyên tốc độ hội tụ bậc hai cho thuật toán Newton-Raphson. Khi áp dụng vào thực tế, O. I. Adebisi và cộng sự đã dùng phương pháp này để chứng minh lưới IEEE 33 nút bị sụt áp nghiêm trọng ở cuối đường dây, làm rõ lý do cần lắp thiết bị bù. Để giải quyết vấn đề đó, mô hình của K. R. Devabalaji và K. Ravi đã tính toán vị trí đặt UPFC tối ưu nhằm giảm tổn thất công suất và ổn định điện áp nút. Nhằm đơn giản hóa việc tính toán, S. N. Singh và A. K. David đã quy đổi UPFC thành các nguồn bơm công suất gián tiếp giúp tái sử dụng cấu trúc code truyền thống. Cuối cùng, mô hình cải tiến của A. S. Al-Hinai và M. A. Al-Abri sử dụng kỹ thuật ma trận thưa giúp thuật toán hội tụ nhanh chóng, tránh quá tải bộ nhớ khi lưới phân phối có thêm thiết bị công suất lớn. Qua đó giảm tổn thất công suất và nâng cao chất lượng điện áp hệ thống đã chứng minh hiệu quả của UPFC trong việc cải thiện điện áp, giảm tổn thất công suất và tăng khả năng truyền tải trên các hệ thống phân phối dạng tia khi kết hợp với phương pháp Newton-Raphson [5, 6]. Bài báo này tập trung nghiên cứu vận hành tối ưu của

UPFC trên hệ thống IEEE 33 nút bằng phương pháp Newton–Raphson được thực hiện trong môi trường MATLAB/Simulink. Hiệu quả vận hành được đánh giá và so sánh giữa hai trường hợp: không có UPFC và có lắp đặt UPFC trên đường dây giữa nút 17 và nút 18.

Đóng góp chính của bài báo là xây dựng mô hình mô phỏng chi tiết tích hợp UPFC vào lưới điện phân phối. Thông qua phân tích so sánh, nghiên cứu định lượng được mức độ cải thiện chất lượng điện năng và khả năng phục hồi hệ thống sau sự cố. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở kỹ thuật quan trọng, góp phần thúc đẩy ứng dụng thực tiễn công nghệ UPFC tại các lưới điện phân phối của Việt Nam

2. NỘI DUNG

2.1. Giới thiệu về bộ điều khiển công suất hợp nhất (UPFC)

2.1.1 Nguyên lý hoạt động

Bộ điều khiển công suất hợp nhất UPFC là sự kết hợp của hai bộ biến đổi nguồn áp nối tiếp và song song thông qua liên kết điện áp một chiều chung.

Bộ biến đổi nối tiếp được mắc nối tiếp với đường dây truyền tải thông qua máy biến áp. Bộ này bơm một điện áp xoay chiều có biên độ và góc pha có thể điều khiển độc lập ($0 \leq \delta \leq 360^\circ$) vào đường dây. Nhờ đó, UPFC có khả năng điều khiển linh hoạt và độc lập công suất tác dụng (P) và công suất phản kháng (Q) trên đường dây.

Bộ biến đổi song song được mắc song song với hệ thống qua máy biến áp. Bộ này có hai chức năng chính: (i) Cung cấp hoặc hấp thụ công suất thực cần thiết cho bộ biến đổi nối tiếp thông qua liên kết DC chung. (ii) Độc lập phát hoặc thu công suất phản kháng tại nút lắp đặt, thực hiện chức năng bù công suất phản kháng.

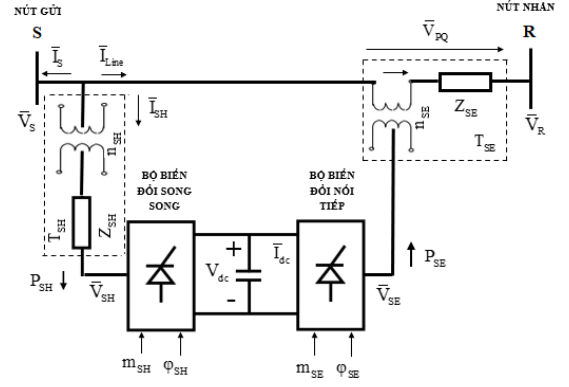
Nhờ cấu trúc này, UPFC có thể đồng thời thực hiện các chức năng điều khiển điện áp nút, bù công suất phản kháng, dịch pha và điều khiển dòng công suất, làm cho nó trở thành thiết bị FACTS linh hoạt và toàn diện nhất.

Mô hình cơ bản của UPFC được trình bày tại Hình 1. Mô hình cơ bản của UPFC điện áp đầu ra của bộ biến đổi nối tiếp và song song được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} V_{SF} &= \frac{1}{2\sqrt{2}} m_{SE} V_{DC} \\ V_{SH} &= \frac{1}{2\sqrt{2}} m_{SH} V_{DC} \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó:

$\bar{V}_S$	Điện áp nút gửi
$\bar{V}_R$	Điện áp nút nhận
$\bar{I}_S$	Dòng điện đầu gửi
$\bar{I}_{Line}$	Dòng trên đường dây
$\bar{I}_{SH}$	Dòng bộ biến đổi song song
$\bar{V}_{SH}$	Điện áp bộ biến đổi song song
Z_{SH}	Trở kháng nhánh song song
P_{SH}	Công suất bộ song song
m_{SH}	Hệ số điều chế bộ song song
φ_{SH}	Góc pha bộ song song
V_{dc}	Điện áp DC-link
I_{dc}	Dòng DC-link
$\bar{V}_{SE}$	Điện áp bơm nối tiếp
$\bar{I}_{SE}$	Dòng nhánh nối tiếp
Z_{SE}	Trở kháng nhánh nối tiếp
P_{SE}	Công suất bộ nối tiếp
m_{SE}	Hệ số điều chế bộ nối tiếp
φ_{SE}	Góc pha bộ nối tiếp
$\bar{V}_{PQ}$	Điện áp sau khi UPFC bơm nối tiếp



Hình 1 Mô hình cơ bản của UPFC

2.1.2 Quy luật điều khiển

Quy luật điều khiển của UPFC như Hình 1. Mô hình cơ bản của UPFC được thực hiện chủ yếu thông qua việc thay đổi biên độ điện áp nối tiếp được UPFC bơm vào đường dây (V_{SE}) và góc pha của điện áp nối tiếp φ_{SE} do bộ biến đổi nối tiếp tạo ra, đồng thời kết hợp với bộ biến đổi song song [10, 11].

UPFC có thể hoạt động theo các chế độ điều khiển chính sau:

- Điều chỉnh điện áp nút: Tiêm điện áp nối tiếp đồng pha hoặc ngược pha với điện áp đường dây để duy trì điện áp tại nút ở mức tham chiếu.
- Bù nối tiếp: Tiêm điện áp vuông góc với dòng điện để thay đổi trở kháng hiệu quả của đường dây.
- Dịch pha Thay đổi góc pha giữa hai đầu đường dây nhằm điều khiển công suất tác dụng.
- Điều khiển dòng công suất: Kết hợp các chức năng trên để điều khiển độc lập công suất tác dụng (P) và công suất phản kháng (Q) truyền trên đường dây [12, 13].

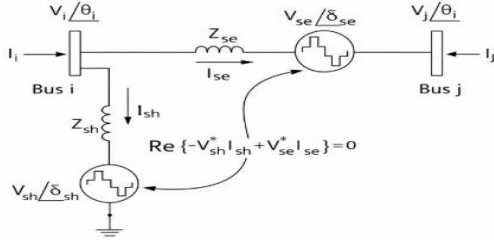
UPFC áp dụng phương pháp điều khiển vector. Bộ điều khiển song song điều chỉnh điện áp DC và công suất phản kháng độc lập, trong khi bộ biến đổi nối tiếp kiểm soát biên độ và góc pha của điện áp tiêm V_{SE} theo các giá trị tham chiếu công suất tác dụng và công suất phản kháng mong muốn P_{ref} , Q_{ref} và V_{ref} [11].

Khi tích hợp vào bài toán phân bố công suất bằng phương pháp Newton–Raphson, mô hình UPFC được bổ sung vào ma trận Jacobian thông qua các phương trình điều khiển liên quan đến độ lớn và góc pha của

nguồn điện áp song song V_{SH}, φ_{SH} và nối tiếp V_{SE}, φ_{SE} . Thiết bị cho phép chọn nhiều chế độ kết hợp, bao gồm cả chức năng dập dao động công suất trong điều kiện quá độ và sự cố [14].

2.2. Mô hình toán của UPFC

Mạch tương đương UPFC trong phân tích trạng thái xác lập được trình bày trong Hình 2 các nguồn điện áp đại diện cho thành phần cơ bản của điện áp do các bộ biến đổi tạo ra [15].



Hình 2 Mạch tương đương UPFC.

Các nguồn điện áp UPFC là

$$E_{VR} = V_{VR} (\cos \delta_{VR} + j \sin \delta_{VR}) \quad (2)$$

$$E_{CR} = V_{CR} (\cos \delta_{CR} + j \sin \delta_{CR}) \quad (3)$$

Trong đó V_{VR} và d_{VR} là cường độ có thể điều khiển được

($V_{VR} \min \leq V_{VR} \leq V_{VR} \max$) và góc pha ($0 \leq d_{VR} \leq 2p$) của nguồn điện áp đại diện cho bộ biến đổi song song. Độ lớn và pha góc V_{CR} của nguồn điện áp dụng đại diện cho bộ biến đổi kết nối được điều khiển giữa các giới hạn

($V_{CR} \min \leq V_{CR} \leq V_{CR} \max$) và ($0 \leq d_{CR} \leq 2p$) tương thích.

Dòng công suất được trình bày tại công thức (2) và công thức (3), các công thức công suất tác dụng và công suất phản kháng tại nút K:

$$\begin{aligned} P_k = & V_k^2 G_{kk} + V_k V_m \left[G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) \right. \\ & \left. + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \right] \\ & + V_k V_{CR} \left[G_{km} \cos(\theta_k - \delta_{CR}) \right. \\ & \left. + B_{km} \sin(\theta_k - \delta_{CR}) \right] \\ & + V_k V_{VR} \left[G_{VR} \cos(\theta_k - \delta_{VR}) \right. \\ & \left. + B_{VR} \sin(\theta_k - \delta_{VR}) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Q_k = & -V_k^2 B_{kk} \\ & + V_k V_m \left[G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \right. \\ & \left. - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) \right] \\ & + V_k V_{CR} \left[G_{km} \sin(\theta_k - \delta_{CR}) \right. \\ & \left. - B_{km} \cos(\theta_k - \delta_{CR}) \right] \\ & + V_k V_{VR} \left[G_{VR} \sin(\theta_k - \delta_{VR}) \right. \\ & \left. - B_{VR} \cos(\theta_k - \delta_{VR}) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

Tại nút m:

$$\begin{aligned} P_m = & V_m^2 G_{mm} \\ & + V_m V_k \left[G_{mk} \cos(\theta_m - \theta_k) \right. \\ & \left. + B_{mk} \sin(\theta_m - \theta_k) \right] \\ & + V_m V_{CR} \left[G_{mm} \cos(\theta_m - \delta_{CR}) \right. \\ & \left. + B_{mm} \sin(\theta_m - \delta_{CR}) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Q_m = & -V_m^2 B_{mm} \\ & + V_m V_k \left[G_{mk} \sin(\theta_m - \theta_k) \right. \\ & \left. - B_{mk} \cos(\theta_m - \theta_k) \right] \\ & + V_m V_{CR} \left[G_{mm} \sin(\theta_m - \delta_{CR}) \right. \\ & \left. - B_{mm} \cos(\theta_m - \delta_{CR}) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

Chuyển đổi dòng:

$$\begin{aligned} P_{cR} = & V_{cR}^2 G_{mm} \\ & + V_{cR} V_k \left[G_{km} \cos(\delta_{cR} - \theta_k) \right. \\ & \left. + B_{km} \sin(\delta_{cR} - \theta_k) \right] \\ & + V_{cR} V_m \left[G_{mm} \cos(\delta_{cR} - \theta_m) \right. \\ & \left. + B_{mm} \sin(\delta_{cR} - \theta_m) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} Q_{cR} = & -V_{cR}^2 B_{mm} \\ & + V_{cR} V_k \left[G_{km} \sin(\delta_{cR} - \theta_k) \right. \\ & \left. - B_{km} \cos(\delta_{cR} - \theta_k) \right] \\ & + V_{cR} V_m \left[G_{mm} \sin(\delta_{cR} - \theta_m) \right. \\ & \left. - B_{mm} \cos(\delta_{cR} - \theta_m) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Chuyển đổi song song:

$$P_{VR} = V_{VR}^2 G_{VR} + V_{VR} V_k \left[G_{VR} \cos(\delta_{VR} - \theta_k) + B_{VR} \sin(\delta_{VR} - \theta_k) \right] \quad (10)$$

$$Q_{VR} = -V_{VR}^2 B_{VR} + V_{VR} V_k \left[G_{VR} \sin(\delta_{VR} - \theta_k) - B_{VR} \cos(\delta_{VR} - \theta_k) \right] \quad (11)$$

Giả sử giá trị tổn thất của bộ biến đổi ít hơn, công suất tác dụng được cung cấp cho bộ biến đổi song song, P_{RV} bằng công suất tác dụng được yêu cầu bởi bộ chuyển đổi chuỗi P_{CR} yêu cầu: nghĩa là

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{mk} \\ \Delta Q_{mk} \\ \Delta P_{bb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{VR}} V_{VR} & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{CR}} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{CR}} V_{CR} & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{VR}} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_m}{\partial \delta_{CR}} & \frac{\partial P_m}{\partial V_{CR}} V_{CR} & 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{VR}} V_{VR} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{CR}} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{CR}} V_{CR} & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{VR}} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_{CR}} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_{CR}} V_{CR} & 0 \\ \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_{CR}} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_{CR}} V_{CR} & 0 \\ \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_{CR}} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_{CR}} V_{CR} & 0 \\ \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_{VR}} V_{VR} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{CR}} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_{CR}} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{VR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_{VR} \\ \Delta V_m \\ \Delta \delta_{CR} \\ \Delta V_{CR} \\ \Delta \delta_{VR} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Trong đó ΔP_{bb} là công suất sai số được thực hiện bởi công thức (12). Nếu điều khiển điện ở nút k bị vô hiệu hóa, cột thứ ba của công thức (13) được thay thế bằng các đạo hàm riêng của sai số công suất tại nút và sai số công suất do UPFC gây ra với độ lớn điện áp nút V_k . Hơn nữa, cường độ điện

$$P_{VR} + P_{CR} = 0 \quad (12)$$

Hơn nữa, nếu giả sử máy biến áp ghép nối không có điện trở thì công suất tác dụng tại nút k phù hợp với công suất tác dụng tại nút m, tương ứng,

$$P_{VR} + P_{CR} = P_k + P_m = 0 \quad (13)$$

Các phương trình công suất UPFC, ở dạng tuyến tính hóa, được kết hợp với các phương trình của lưới điện xoay chiều. Đối với trường hợp UPFC kiểm soát các tham số sau: (i) Độ lớn điện áp tại bộ chuyển đổi shunt (nút K). (ii) Hiệu suất truyền tải từ m đến nút k. (iii) Công suất phản kháng được đưa vào tại nút m, coi nút m là nút PQ được tuyến tính hóa phương trình của hệ như sau:

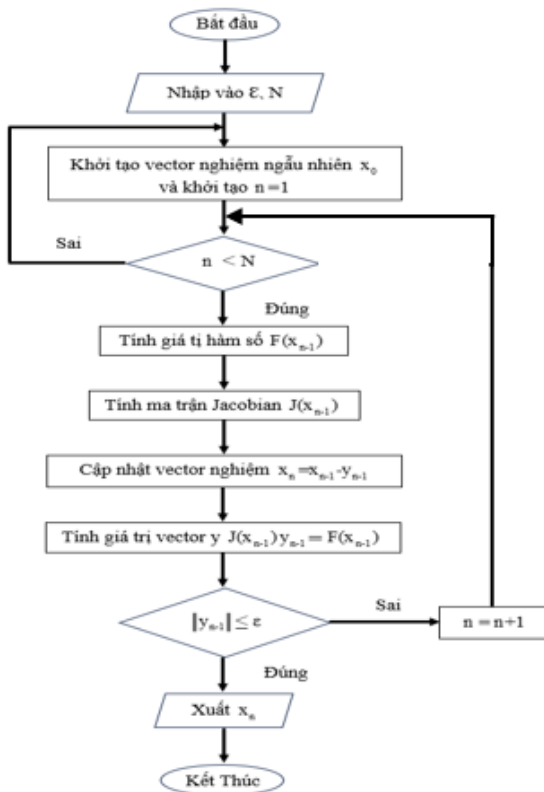
ứng dụng của nguồn shunt $\frac{D V_{VR}}{V_{VR}}$ được thay thế bằng cường độ điện áp tăng cường trên nút k, $\frac{D V_k}{V_k}$.

Nếu cả hai nút, k và m đều là P_Q thì hệ thống tuyến tính hóa như sau:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{mk} \\ \Delta Q_{mk} \\ \Delta P_{bb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{CR}} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{CR}} V_{CR} & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{VR}} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_m}{\partial \delta_{CR}} & \frac{\partial P_m}{\partial V_{CR}} V_{CR} & 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} V_{VR} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{CR}} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{CR}} V_{CR} & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{VR}} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_{CR}} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_{CR}} V_{CR} & 0 \\ \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_{CR}} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_{CR}} V_{CR} & 0 \\ \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_{CR}} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_{CR}} V_{CR} & 0 \\ \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_k} V_{VR} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{CR}} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_{CR}} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{VR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \frac{\Delta V_k}{V_k} \\ \frac{\Delta V_m}{V_m} \\ \Delta \delta_{CR} \\ \frac{\Delta V_{CR}}{V_{CR}} \\ \Delta \delta_{VR} \end{bmatrix} \quad (15)$$

2.3 Phương Pháp Newton-Raphson

Phương pháp Newton – Raphson là một cách để nhanh chóng tìm ra một xấp xỉ tốt cho nghiệm nguyên của một hàm có giá trị thực $f(x) = 0$. [11].



Hình 3 Lưu đồ thuật toán của phương pháp Newton Raphson

2.4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

2.4.1 Mối liên hệ giữa UPFC trong hệ 5 nút và phương pháp Newton-Raphson

trong hệ 33 nút

Hệ 5 nút và hệ IEEE 33 nút đóng vai trò hỗ trợ cho nhau trong nghiên cứu.

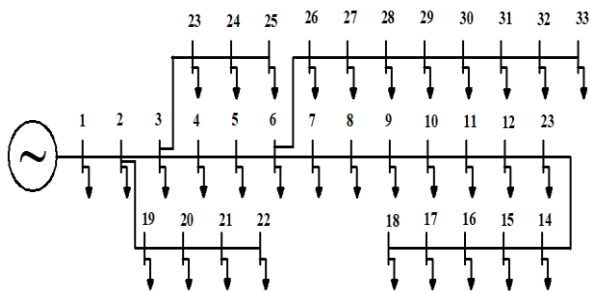
Hệ 5 nút được sử dụng như một hệ thống thử nghiệm nhỏ, đơn giản để xây dựng và kiểm chứng mô hình toán học của UPFC khi tích hợp vào phương pháp giải dòng công suất Newton-Raphson (NR). Nhờ quy mô nhỏ, hệ 5 nút giúp việc lập trình, kiểm tra lỗi, mở rộng ma trận Jacobian và quan sát sự hội tụ trở nên dễ dàng và nhanh chóng.

Sau khi mô hình UPFC kết hợp NR được kiểm chứng chính xác trên hệ 5 nút (thông qua so sánh kết quả với có UPFC và không có UPFC), mô hình này sẽ được áp dụng lên hệ thống phân phối IEEE 33 nút tiêu chuẩn.

Hệ 33 nút được dùng để đánh giá hiệu quả thực tế của UPFC trong việc cải thiện chế độ vận hành của hệ thống phân phối, bao gồm: nâng cao biên độ điện áp, giảm tổn thất công suất và kiểm soát dòng công suất.

2.4.2 Hệ thống IEEE-33 nút

Hệ thống phân phối IEEE 33 nút là một mô hình chuẩn được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu và mô phỏng hệ thống điện phân phối. Mô hình này gồm 33 nút (bus) và 32 nhánh phân phối, hoạt động ở cấp điện áp 12,66 kV với cấu trúc hình tia (radial distribution system). Tổng công suất phụ tải của hệ thống vào khoảng 3,715 MW và 2,3 MVar, được phân bố dọc theo các nút tải trên lưới điện.



Hình 1 Sơ đồ lưới IEEE-33 nút

Bảng 1 Điện áp nút và góc pha theo phương pháp dòng tải Newton Raphson lưới IEE-33 nút

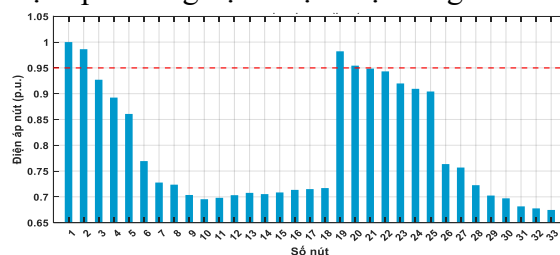
Số nút	Điện áp(pu)	Góc pha (radians)
1	1,0000	0,0000
2	0,9862	0,0116
3	0,9270	0,0743
4	0,8924	0,1218
5	0,8607	0,1739
6	0,7693	0,2954
7	0,7277	0,3218
8	0,7236	0,3904
9	0,7036	0,4948
10	0,6954	0,5951
11	0,6981	0,6094
12	0,7032	0,6330
13	0,7077	0,7334
14	0,7053	0,7737
15	0,7085	0,8019
16	0,7135	0,8253
17	0,7150	0,8631
18	0,7170	0,8706
19	0,9821	0,0116
20	0,9543	0,0124
21	0,9486	0,0118
22	0,9432	0,0110
23	0,9198	0,0769
24	0,9094	0,0800
25	0,9042	0,0814

26	0,7635	0,3074
27	0,7568	0,3226
28	0,7226	0,3739
29	0,7025	0,4090
30	0,6971	0,4272
31	0,6815	0,4554
32	0,6776	0,4616
33	0,6746	0,4653

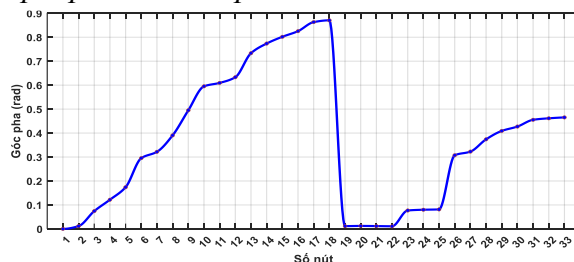
Kết quả phân bố điện áp và góc pha cho thấy điện áp tại nút nguồn giữ ở mức 1,0 pu, sau đó giảm dần theo chiều dài đường dây và đạt giá trị thấp nhất khoảng 0,6746 pu tại nút 33. Nhìn chung, nhiều nút trong hệ thống có điện áp dưới 0,9 pu (đặc biệt từ nút 5 trở đi), thể hiện hiện tượng sụt áp rõ rệt do tổn thất công suất trên đường truyền.

Về góc pha, giá trị tăng dần từ 0 rad tại nút 1 lên đến khoảng 0,86–0,87 rad ở các nút trung gian và duy trì mức cao ở các nút xa nguồn, cho thấy sự gia tăng chênh lệch pha dọc theo hệ thống. Điều này phản ánh dòng công suất truyền tải lớn và điện kháng đường dây đáng kể.

Tổng thể, hệ thống xuất hiện sụt áp đáng kể và chênh lệch góc pha lớn, đặc biệt tại các nút cuối, cho thấy đây là các nút yếu và cần có biện pháp bù công suất hoặc điều khiển dòng công suất để cải thiện chất lượng điện áp và tăng độ ổn định hệ thống.



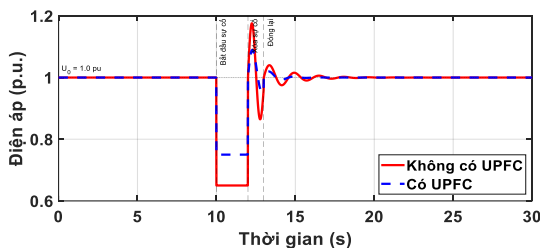
Hình 2 Điện áp nút khi sử dụng phương pháp Newton Raphson lưới IEEE-33 nút



Hình 3 Góc pha của máy phát khi sử dụng phương pháp Newton Raphson lưới IEEE-33 nút

Nhận xét: Kết quả phân tích phân bố công suất bằng phương pháp Newton–Raphson trên lưới IEEE-33 được thể hiện trong Hình 2, điện áp giảm dần theo khoảng cách từ nút nguồn. Cụ thể, điện áp từ 1,000 pu tại nút 1 giảm xuống 0,7693 pu tại nút 6, và tiếp tục giảm sâu đến 0,6746 pu tại nút 33, tương đương mức sụt áp khoảng 32,54% so với nút nguồn. Đáng chú ý, có tới 29/33 nút có điện áp thấp hơn ngưỡng cho phép 0,95 pu, cho thấy chất lượng điện áp của hệ thống chưa đảm bảo. Trong Hình 3 cho thấy góc pha tăng dần từ 0 rad tại nút 1 lên khoảng 0,8706 rad tại nút 18, phản ánh sự gia tăng tổn thất và dòng công suất theo chiều truyền tải. Sự biến thiên góc pha lớn tại các nút cuối lưới cho thấy mức độ tải cao và suy giảm điện áp nghiêm trọng.

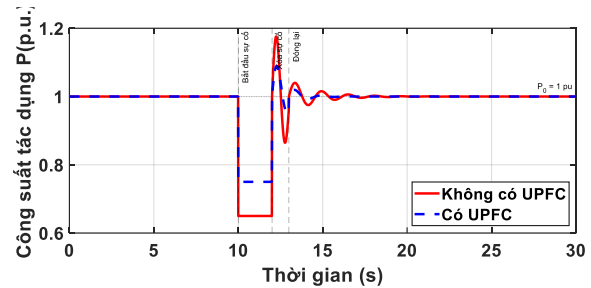
Mô phỏng sự cố ngắn mạch: Mô phỏng sự cố ngắn mạch đường dây (nút 17 - nút18) của hệ thống điện IEEE – 33.



Hình 4: Điện áp khi không có và có UPFC lưới IEEE-33 nút

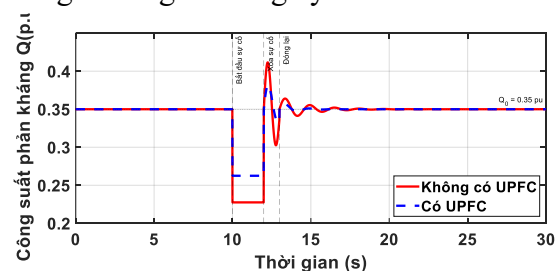
Hình 4 Đáp ứng điện áp tại đường dây (nút 17-nút 18) khi xảy ra sự cố ngắn mạch ba pha tại $t = 10s$, xóa sự cố và tái đóng điện thành công tại $t \approx 10,15s$. (i) Không có UPFC. Khi xảy ra ngắn mạch ba pha, điện áp giảm tức thời xuống gần 0 pu. Sau khi xóa sự cố và tái đóng điện thành công, điện áp chỉ phục hồi được lên khoảng 0,65–0,70 pu và xuất hiện dao động mạnh kéo dài với biên độ $>0,4$ pu, tần số thấp ($\sim 0,8-1$ Hz). Hệ thống mất hơn 30 giây mới tắt dần dao động và vẫn chưa đạt lại 1,0 pu $\rightarrow$ nguy cơ sụp điện áp rất cao. (ii) Khi có UPFC, Nó phản ứng cực nhanh ngay khi xảy ra sự cố: Độ sâu sụt áp giảm đáng kể, đáy điện áp chỉ còn $\approx 0,80$ pu. Sau khi tái đóng điện, điện áp phục hồi rất nhanh lên 1,0 pu chỉ trong vòng 4–5 giây. Biên độ dao động giảm mạnh còn

$\approx 0,15$ pu và tắt dần hoàn toàn sau khoảng 12–15 giây.



Hình 5 Công suất tác dụng khi không có và có UPFC lưới IEEE-33 nút

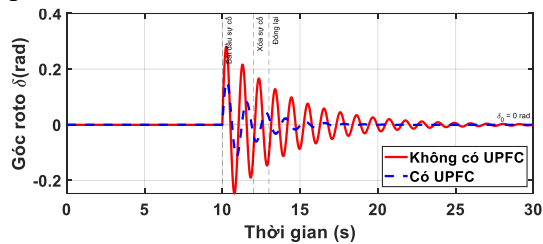
Hình 5 Đáp ứng công suất tác dụng truyền trên lưới điện bị sự cố khi xảy ra ngắn mạch ba pha tại $t = 10 s$, xóa sự cố và tái đóng điện thành công tại $t \approx 10,15s$. (i) Khi không có UPFC, lúc sự cố xảy ra, công suất tác dụng trên đường dây bị sự cố giảm tức thời về gần 0 pu. Sau khi tái đóng điện thành công, công suất chỉ phục hồi được lên khoảng 0,65–0,70 pu và xuất hiện dao động mạnh với biên độ $>0,45$ pu, tần số thấp. Quá trình tắt dần cực chậm ($>30 s$) và vẫn còn dư dao động lớn $\rightarrow$ nguy cơ quá tải các đường dây còn lại rất cao, hệ thống gần ngưỡng mất ổn định công suất. (ii) Khi có UPFC: Ngay trong thời gian tồn tại sự cố, công suất tác dụng đã được duy trì ở mức $\approx 0,80-0,85$ pu nhờ nhánh cung cấp điện áp bù nối tiếp và điều chỉnh lại góc pha. Sau tái đóng điện, công suất trở về 1,0 pu chỉ trong vòng 5–6 giây. Biên độ dao động giảm mạnh còn $\approx 0,15$ pu và tắt dần hoàn toàn trong khoảng 12–15 giây.



Hình 6 Công suất phản kháng khi không có và có UPFC lưới IEEE-33 nút

Hình 6 Công suất phản kháng phát ra từ thiết bị UPFC khi xảy ra ngắn mạch ba pha tại $t = 10 s$, xóa sự cố và tái đóng điện thành công tại $t \approx 10,15s$ như sau: (i) Khi không có UPFC Không có thiết bị nào bù phản kháng động $\rightarrow$ công suất phản kháng hệ thống vẫn ở mức thấp (khoảng 0,22–0,25

pu) và không có khả năng tăng đột biến để hỗ trợ điện áp khi sự cố xảy ra → dẫn đến sụt áp sâu và dao động kéo dài như đã thấy ở các hình trước. (ii) Khi có UPFC, Ngay khi phát hiện sự cố ($t = 10$ s), UPFC lập tức tăng công suất phản kháng phát ra lên tới 0,41–0,42 pu (gấp gần 1,9 lần giá trị trước sự cố). Sau khi tái đóng điện, Q giảm dần về mức bình thường ($\approx 0,35$ pu) trong khoảng 8–10 giây, vẫn còn một vài dao động nhỏ. Tổng lượng phản kháng bổ sung kịp thời đã giúp nâng điện áp lên và rút ngắn thời gian phục hồi hệ thống như đã quan sát ở các kết quả trước.



Hình 7 Góc roto máy phát khi không có và có UPFC lưới IEEE-33 nút

Hình 7 Dao động góc công suất (δ) giữa hai khu vực (hoặc góc rotor tương đương) sau sự cố ngắn mạch ba pha tại $t = 10$ s, xóa sự cố và tái đóng điện thành công tại $t \approx 10,15$ s như sau: (i) Khi không có UPFC. Sau sự cố, góc công suất δ dao động cực mạnh với biên độ cực đại $> 0,28$ rad ($\approx 16^\circ$) và tần số dao động thấp $\approx 0,8$ –1 Hz. Quá trình tắt dần cực chậm (> 35 giây) và sau 40 giây vẫn còn dư dao động $\approx 0,05$ rad → hệ thống rất gần ngưỡng mất ổn định góc và có thể dẫn đến mất đồng bộ liên khu vực nếu sự cố kéo dài thêm. (ii) Khi có UPFC, nó thực hiện chức năng lực dập dao động công suất rất hiệu quả: Biên độ cực đại giảm mạnh còn $\approx 0,12$ rad (giảm 57 % so với không UPFC). Thời gian tắt dần rút xuống

còn ≈ 18 –20 giây. Sau 30 giây dao động đã rất nhỏ ($< 0,02$ rad).

Nhận xét chính: Từ các kết quả mô phỏng, có thể rút ra các nhận xét chính như sau: (i) UPFC giúp cải thiện đáng kể điện áp nút và giảm tổn thất công suất trong chế độ xác lập. (ii) UPFC có khả năng điều khiển linh hoạt dòng công suất, góp phần tối ưu phân bố công suất trong lưới. (iii) Trong điều kiện sự cố, UPFC giúp giảm độ sâu sụt áp, tăng tốc độ phục hồi và giảm dao động hệ thống. (iv) Khả năng bù công suất phản kháng động và điều khiển góc pha là yếu tố then chốt giúp nâng cao ổn định điện áp và ổn định quá độ. Ma trận Jacobian kh tích hợp vào bài toán cân suất bằng phương pháp Newton – Raphson được mở rộng thêm các biến điều khiển như V_{SE} và ϕ_{SE} , giúp cải thiện điều khiển điện áp và dòng công suất. Kết quả cho thấy hệ thống hội tụ nhanh hơn, điện áp ổn định hơn và tổn thất công suất giảm đáng kể.

3. KẾT LUẬN

Bài báo đã áp dụng phương pháp Newton–Raphson để phân tích chế độ xác lập và đánh giá hiệu quả của UPFC trong hệ thống điện phân phối. Kết quả cho thấy UPFC giúp cải thiện rõ rệt điện áp nút, giảm tổn thất công suất và nâng cao ổn định hệ thống, đặc biệt trong điều kiện sự cố ngắn mạch tại đường dây (nút 17–18). Điều này khẳng định tiềm năng ứng dụng của UPFC trong việc nâng cao chất lượng điện năng và vận hành lưới điện hiện đại.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, cần xem xét tối ưu vị trí và dung lượng UPFC bằng các thuật toán thông minh như PSO, EO hoặc GA, đồng thời mở rộng nghiên cứu trên các lưới điện quy mô lớn và điều kiện vận hành thực tế nhằm nâng cao hiệu quả ứng dụng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. S. Siddiqui et al., “Optimal location and sizing of conglomerate DG-FACTS devices in distribution systems for voltage profile improvement and loss minimization,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 59, no. 2, pp. 1234–1245, Mar./Apr. 2023.
- [2] M. E. Hussein, M. A. Elgendy, and M. A. Abido, “Effective modeling of OUPFC into Newton-Raphson power flow considering multi-control modes and operating constraints,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 129394–129406, 2021.

- [3] C. A. Hongji et al., “Optimal power flow calculation of active distribution network with UPFC based on improved Newton-Raphson method,” *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, vol. 27, no. 2, pp. 142–151, 2022.
- [4] S. Mohanty and B. K. Sahu, “Performance improvement of power transmission system using FACTS devices with Newton-Raphson load flow analysis,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2335, no. 1, p. 012047, 2022.
- [5] Z. Ou et al., “The effect of power flow entropy on available load supply capability with unified power flow controller,” *Sustainability*, vol. 15, no. 8, p. 6997, 2023.
- [6] M. J. T. Corpus et al., “Evaluation of FACTS contributions using branch flow model and Newton–Raphson algorithm,” *Energies*, vol. 17, no. 4, 2024.
- [7] N. M. Ndjankeu et al., “Modern sensitivity index-based optimal UPFC location for power quality enhancement,” *Energy Reports*, 2025.
- [8] M. A. Abdelrahman et al., “Modified unified power flow controller for medium voltage distribution networks,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2023.
- [9] F. Banakhr et al., “Unified power flow controller models for power flow studies,” *Yanbu Journal of Engineering Sciences*, 2022.
- [10] N. V. A. Ravikumar et al., “Non linear modelling and control of unified power flow controller,” in *Proceedings of E3S Web of Conferences (ICPEES 2024)*, 2024.
- [11] M. Thulasingham et al., “Radial distribution systems performance enhancement through RE integration and comprehensive contingency ranking analysis,” *Green Energy and Intelligent Transportation*, 2025.
- [12] M. J. T. Corpus et al., “Evaluation of FACTS contributions using branch flow model and Newton–Raphson algorithm,” *Energies*, vol. 17, no. 4, p. 918, 2024.
- [13] A. M. Elkholy et al., “Comparative analysis of FACTS devices for optimal improvement of power quality in unbalanced distribution systems,” *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, 2025.
- [14] S. Kamel et al., “Developed generalised unified power flow controller model in the Newton–Raphson power-flow analysis using combined mismatches method,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 9, pp. 2177–2184, 2016. (Updated version referenced in recent studies 2022–2024).
- [15] P. Arbolea et al., “Modeling FACTS for power flow purposes,” *Electric Power Systems Research*, vol. 114, pp. 1–10, 2014. (Widely cited in recent UPFC Newton-Raphson papers 2021–2025).