

MÔ PHỎNG HOẠT ĐỘNG, PHÂN TÍCH VÀ ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP ĐẢM BẢO CHẤT LƯỢNG ĐIỆN ÁP CỦA MỘT MICROGRID Ở CHẾ ĐỘ TÁCH LƯỚI

SIMULATION, OPERATIONAL ANALYSIS, AND PROPOSED SOLUTIONS TO ENSURE VOLTAGE QUALITY OF A MICROGRID IN ISLANDED MODE

Nguyễn Duy Minh

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 12/5/2025, Ngày chấp nhận đăng: 30/5/2025,

Tóm tắt:

Bài báo mô phỏng hoạt động và phân tích một Microgrid khi vận hành ở chế độ tách lưới. Nghiên cứu cũng tập trung vào đánh giá hiệu quả của giải pháp lắp đặt tụ bù tĩnh nhằm nâng cao chất lượng điện áp trong hệ thống này.

Phương pháp nghiên cứu là xây dựng một mô hình mô phỏng chi tiết của Microgrid trên nền MATLAB-Simulink. Mô hình này sử dụng các phần tử từ thư viện Simscape Electrical để mô phỏng chính xác các thành phần vật lý đặc trưng như hệ thống PV, pin lưu trữ (BESS), máy phát diesel, phụ tải và các bộ biến đổi. Điểm đặc biệt và mới của mô hình là nó bao gồm nhiều nút lưới ở cả cấp trung áp và hạ áp, được kết nối qua đường dây phân phối, phản ánh cấu trúc mạng lưới phân phối thực tế và chi tiết hơn các mô hình trong các nghiên cứu đã công bố. Nghiên cứu tiến hành mô phỏng Microgrid ở chế độ tách lưới với các kịch bản phụ tải khác nhau và tập trung đánh giá hiệu quả của việc bổ sung tụ bù tĩnh trong kịch bản phụ tải cực đại.

Kết quả thu được từ mô phỏng cho thấy, khi Microgrid hoạt động ở chế độ tách lưới với phụ tải cực đại, điện áp tại nhiều nút có xu hướng giảm thấp và vượt ra ngoài giới hạn cho phép. Tuy nhiên, việc lắp đặt bổ sung tụ bù tĩnh tại các nút có phụ tải lớn đã cải thiện đáng kể tình trạng suy giảm điện áp, giúp đưa điện áp tại các nút trở về mức cho phép. Giải pháp bù này đồng thời giúp giảm tải công suất phản kháng cho máy phát diesel, góp phần nâng cao hiệu suất vận hành và độ tin cậy của hệ thống.

Từ khóa: Microgrid; cân bằng công suất; ổn định điện áp; bù công suất phản kháng.

Abstract:

This paper presents the simulation and analysis of a Microgrid operating in islanded mode. The study focuses on evaluating the effectiveness of integrating compensation capacitors to improve voltage quality within the system.

A detailed simulation model of the Microgrid is developed using the MATLAB-Simulink, employing components from the Simscape Electrical library to accurately represent key physical elements such as photovoltaic (PV) systems, battery energy storage systems (BESS), diesel generators, loads, and power converters. A notable feature of the model is its inclusion of multiple nodes at both medium-voltage and low-voltage levels, interconnected through distribution lines, thereby more closely reflecting the structure of real-world distribution networks than models used in previous studies. The Microgrid is simulated under various loading scenarios in islanded mode, with a particular focus on assessing the performance of compensation capacitors under peak load conditions.

Simulation results indicate that, under peak load in islanded operation, voltage levels at several buses tend to drop below acceptable limits. However, the addition of shunt capacitors at heavily loaded buses significantly mitigates voltage drops and restores voltage to permissible levels. This compensation approach also reduces the reactive power burden on the diesel generator, thereby enhancing the overall efficiency and reliability of the system.

Keywords: Microgrid; power balancing; voltage stability; reactive power compensation.

1. TỔNG QUAN

Sự phát triển của lưới điện phân phối thông minh đã đưa lưới điện siêu nhỏ (Microgrid) trở thành một cấu trúc quan trọng. Microgrid, với khả năng tích hợp các nguồn năng lượng phân tán (Distributed Energy Resources - DERs) và hệ thống lưu trữ năng lượng (Energy Storage Systems - ESS) cùng các phụ tải linh hoạt, mang lại nhiều lợi ích trong vận hành hệ thống điện hiện đại [1,2].

Microgrid có thể hoạt động ở hai chế độ là kết nối lưới hoặc tách lưới:

- Ở chế độ kết nối lưới (grid connected mode), Microgrid được liên kết với lưới điện chính – lưới hệ thống và dòng năng lượng có thể chạy theo cả hai chiều. Microgrid sẽ nhận năng lượng từ lưới chính khi thiếu hụt và ngược lại có thể đẩy năng lượng dư thừa từ Microgrid vào lưới chính. Các tính năng, đặc điểm chính của Microgrid ở chế độ này bao gồm tham gia vào các chương trình đáp ứng – điều chỉnh nhu cầu (Demand Response) ; tích hợp với lưới điện để thực hiện các dịch vụ phụ trợ lưới như điều chỉnh tần số; cải thiện đáng kể chất lượng điện năng thông qua điều khiển công suất tác dụng và công suất phản kháng [3].
- Ở chế độ tách lưới (islanded mode), Microgrid sẽ ngắt kết nối khỏi lưới chính và hoạt động độc lập. Chế độ này được kích hoạt khi mất điện lưới hoặc trong các tình huống khẩn cấp. Một số thách thức khi hoạt động

ở chế độ tách lưới là duy trì ổn định tần số và điện áp, đảm bảo cân bằng cung-cầu khi không có nguồn hỗ trợ từ bên ngoài; ngoài ra còn vấn đề đảm bảo chuyển đổi giữa hai chế độ nối lưới và tách lưới [4].

Các nghiên cứu về Microgrid đã được thực hiện rộng rãi, tập trung vào nhiều khía cạnh khác nhau nhằm nâng cao hiệu quả vận hành, độ tin cậy và khả năng tích hợp các nguồn năng lượng phân tán. Một số hướng nghiên cứu phổ biến trong lĩnh vực Microgrid có thể kể đến như sau:

- Các chiến lược điều khiển và quản lý năng lượng (Energy Management System - EMS): nhiều nghiên cứu tập trung vào việc tối ưu hóa vận hành Microgrid thông qua các chiến lược quản lý năng lượng. Chẳng hạn một số nghiên cứu đã đề cập đến việc sử dụng quy hoạch tuyến tính, logic mờ hoặc các thuật toán tối ưu hóa phức tạp như thuật toán tìm kiếm backtracking, mạng nơ-ron để tối ưu hóa chi phí vận hành, giảm tổn thất, hoặc quản lý năng lượng trong hệ thống PV-lưu trữ [3,4]. Các nghiên cứu này thường hướng đến lớp quản lý hoặc điều khiển trên cùng, tập trung vào luồng năng lượng tổng thể và mục tiêu kinh tế/môi trường.
- Phân tích ổn định và điều khiển lưới: Một số bài báo đi sâu vào các phương pháp điều khiển để duy trì ổn định tần số và điện áp trong Microgrid, đặc biệt khi hoạt động ở

chế độ tách lưới các phương pháp như điều khiển lặp (repetitive control), điều khiển thích ứng (adaptive control), điều khiển hỗn hợp (compound control), hoặc điều khiển dựa trên đặc tính sụt giảm (droop control) đã được đề xuất và xác thực qua mô phỏng hoặc thực nghiệm để cải thiện đặc tính động và ổn định hệ thống [5,6,7,8]. Các nghiên cứu này thường sử dụng mô hình tập trung vào khía cạnh điều khiển động các bộ biến đổi của các nguồn phân tán hoặc hệ thống BESS.

Tính toán dòng tải (Load Flow): Một hướng nghiên cứu khác là phát triển các phương pháp tính toán dòng tải cho Microgrid có tính đến đặc điểm khi hoạt động độc lập như phương pháp Gauss-Seidel cải biên (Modified Gauss-Seidel), phương pháp Newton–Raphson tối ưu hóa, áp dụng trên các hệ thống thử nghiệm nhiều nút lưới để phân tích sự phân bố công suất [9,10].

Từ đó cho thấy các nghiên cứu hiện có thường tập trung vào chiến lược điều khiển và quản lý năng lượng ở cấp trên hay mô hình hóa và đi sâu vào điều khiển động của các bộ biến đổi hoặc các phương pháp số để tính toán mà chưa xây dựng mô hình mô phỏng chi tiết cho Microgrid quy mô đầy đủ gồm nhiều nút lưới cùng các phần tử đặc trưng như hệ thống PV, pin lưu trữ (BESS), máy phát diesel và tải động trên nền tảng mô phỏng vật lý chi tiết từng thành phần. Sự thiếu hụt này có thể dẫn đến hạn chế trong việc đánh giá toàn diện tương tác giữa các thành phần và hiệu suất tổng thể của hệ thống, đặc biệt là các vấn đề liên quan trực tiếp đến chất lượng điện năng như suy giảm điện áp trên mạng lưới phân phối nhiều nút.

Nhằm lấp vào khoảng trống còn tồn tại này, trong một nghiên cứu được công bố gần đây [11]

tác giả đã xây dựng một mô hình mô phỏng chi tiết của Microgrid bằng MATLAB-Simulink, sử dụng các phần tử từ thư viện Simscape Electrical để mô phỏng chính xác các thành phần vật lý như hệ thống PV, BESS, máy phát diesel, tải tại các nút và các bộ biến đổi DC/AC. Mô hình này đặc biệt bao gồm nhiều nút lưới ở cả cấp trung áp (MV) và hạ áp (LV), kết nối qua các đường dây phân phối, phản ánh cấu trúc mạng lưới phân phối thực tế - đây là một điểm mới quan trọng so với các nghiên cứu khác.

Nghiên cứu đã công bố [11] thực hiện phân tích hoạt động của mô hình Microgrid trong cả hai chế độ kết nối lưới và tách lưới. Kết quả từ nghiên cứu này đã chỉ ra rằng, khi hoạt động ở chế độ tách lưới với phụ tải cực đại, điện áp tại nhiều nút trong Microgrid có xu hướng giảm thấp, thậm chí nằm ngoài giới hạn cho phép. Vấn đề suy giảm điện áp này ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng điện năng cung cấp cho phụ tải và sự ổn định chung của hệ thống. Để khắc phục tình trạng điện áp thấp trong Microgrid khi hoạt động độc lập dưới tải nặng, cần có các giải pháp bù công suất phản kháng. Tụ bù tĩnh là một lựa chọn đơn giản, đáng tin cậy và có chi phí đầu tư tương đối thấp, phù hợp để cải thiện tình trạng suy giảm điện áp tại các nút lưới.

Tiếp nối nghiên cứu trước, bài báo này phát triển mở rộng bằng cách tập trung vào mô phỏng hoạt động của Microgrid ở chế độ tách lưới với các kịch bản phụ tải khác nhau và đánh giá hiệu quả của việc lắp đặt bổ sung các tụ bù tĩnh tại các nút có điện áp thấp hoặc phụ tải công suất phản kháng lớn trong mô hình Microgrid đã xây dựng.

2. MÔ HÌNH MICROGRID SỬ DỤNG TRONG NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu trong bài báo này tiếp tục phát triển mô hình mô phỏng Microgrid đã được xây dựng và trình bày trong bài báo [11]. Mô hình được xây dựng trên phần mềm Matlab-Simulink và dựa trên cấu trúc lưới phân phối IEEE 14 nút, bao gồm hai cấp điện áp Trung áp (MV) và Hạ áp (LV) (Hình 1).

Các thành phần chính của mô hình Microgrid, được mô tả chi tiết với các thông số cụ thể trong [11], bao gồm:

- Lưới hệ thống: Mô hình hóa bằng nguồn áp 110 kV, 100 MVA tại điểm đấu nối PCC (lưu ý: trong nghiên cứu này tập trung vào chế độ tách lưới, nên kết nối này sẽ được ngắt trong kịch bản mô phỏng chính).
- Cấu trúc lưới phân phối: Dựa trên lưới 14 nút, với các đường dây và máy biến áp được mô hình hóa bằng tổng trở. Chi tiết về 6 máy biến áp (T1-T6) và 14 đường dây (DZ1-DZ14) cùng thông số tương ứng đã được nêu trong [11].
- Các nguồn phát năng lượng phân tán (DERs):

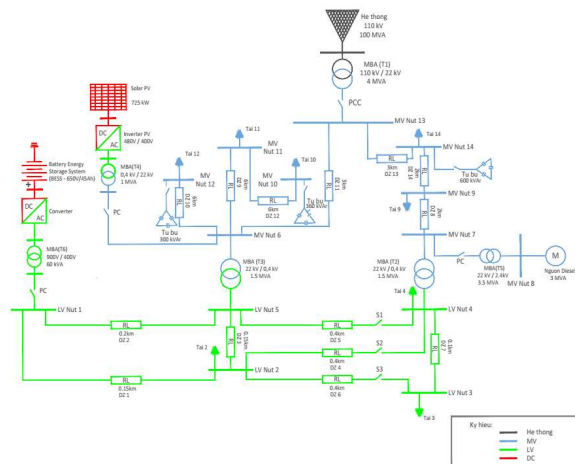
+ Hệ thống PV: Mô hình hóa nguồn năng lượng tái tạo, công suất 725 kW, đây là công suất lắp đặt và cũng là công suất phát lớn nhất của hệ thống PV do mô hình không mô phỏng chi tiết các tổn thất hay suy giảm hiệu suất do nhiệt độ, bụi bẩn hay hiệu ứng bóng râm, v.v...

+ Máy phát điện diesel: Nguồn phát truyền thống, công suất 3 MVA, mô hình hóa như nguồn áp/nút cân bằng (Swing bus), đóng vai trò cân bằng công suất trong chế độ tách lưới.

+ Hệ thống pin lưu trữ (BESS): Gồm 3 khối pin Ni-MH, điện áp 650 V, dòng 15 Ah ; tổng dung lượng là 650 V / 45 Ah mô hình lấy từ thư viện Matlab/Simscape.

- Các bộ biến đổi điện tử công suất: Đảm nhận vai trò kết nối các nguồn DC (PV, BESS) với lưới AC, sử dụng các bộ nghịch lưu và bộ biến đổi hai chiều DC/AC.

- Phụ tải: Tổng cộng 8 phụ tải ở hai cấp MV và LV, mô hình hóa dạng tổng trở không đổi cho bài toán load-flow. Các phụ tải trong nghiên cứu này có điểm khác so với nghiên cứu trước là chỉ xét phụ tải đối xứng. Công suất cực đại và hệ số công suất ($\cos \varphi$) được kê chi tiết trong Bảng 1.



Hình 1. Mô hình Microgrid có đặt tụ bù tĩnh sử dụng trong nghiên cứu

Bảng 1. Ký hiệu và thông số phụ tải

Nút	Ký hiệu tải	Smax (kVA)	Cos φ
LV2	Tải 2	40	0,9
LV3	Tải 3	30	0,85
LV4	Tải 4	50	0,9
MV9	Tải 9	160	0,8
MV10	Tải 10	600	0,8
MV11	Tải 11	200	0,8
MV12	Tải 12	500	0,8
MV14	Tải 14	1000	0,8

3. CÁC KỊCH BẢN MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ

Phần này trình bày và phân tích kết quả mô phỏng công suất và điện áp của các nút trong Microgrid ở chế độ tách lưới với phụ tải cực đại và cực tiểu. Ngoài ra, kết quả mô phỏng kịch bản phụ tải cực đại ở chế độ tách lưới với giải pháp bù công suất phản kháng bằng tụ bù tĩnh được lắp đặt bổ sung sẽ được phân tích và so sánh với trường hợp không có bù để đánh giá hiệu quả của giải pháp bù.

Công suất tác dụng và phản kháng ở các nút được tính toán từ tín hiệu dòng điện và điện áp ở tần số cơ bản tại từng nút tương ứng sử dụng khối công suất (power block). Để thực hiện tính toán này, khối công suất sẽ xác định biên độ điện áp V_i và biên độ dòng điện I_i với i là pha thứ i - ở đây lần lượt là các pha (a,b,c) và góc lệch pha từ hai tín hiệu đầu vào là điện áp $V(t)$ và dòng điện $I(t)$ tại từng thời điểm; từ đó tính toán được đầu ra là công suất tác dụng P_i và công suất phản kháng Q_i như sau:

$$\varphi_i = \varphi_{Vi} - \varphi_{Ii} \quad (1)$$

$$P_i = \frac{|V_i| |I_i|}{\sqrt{2} \sqrt{2}} \cos(\varphi_i) \quad (2)$$

$$Q_i = \frac{|V_i| |I_i|}{\sqrt{2} \sqrt{2}} \sin(\varphi_i) \quad (3)$$

3.1. Phụ tải cực đại, không đặt bù

Các điều kiện thực hiện mô phỏng trong trường hợp này là phụ tải cực đại (Bảng 1); hệ thống PV phát cực đại; hệ thống BESS được điều khiển làm việc ở chế độ xả và máy phát diesel phát năng lượng để đáp ứng nhu cầu phụ tải.

Kết quả mô phỏng điện áp được thể hiện trên (Hình 2) cho chúng ta thấy trong trường hợp phụ tải cực đại, điện áp tại các nút khá thấp và nằm ngoài vùng điện áp thông thường cho phép là từ 0,95 đến 1,05 pu [12], cụ thể là trong khoảng từ 0,91 (pu) tới 0,95 (pu). Trong các nút, chỉ duy nhất nút 8 là nút máy phát có điện áp ở mức 0,95 (pu) là mức cho phép.

Kết quả mô phỏng công suất tác dụng và công suất phản kháng các nút lần lượt được thể hiện trên (Hình 3) và (Hình 4). Giá trị công suất âm thể hiện nút đó là nút nguồn phát công suất, giá trị dương thể hiện là nút tải tiêu thụ công suất.

Nhìn vào kết quả trên (Hình 3) ta thấy các nút 1, 2, 5, 8 là có giá trị âm tức là nút phát công

suất vào lưới. Trong đó nút 1 là nút kết nối với hệ thống BESS được điều khiển để hoạt động ở chế độ xả năng lượng và nút 8 là nút máy phát giữ vai trò là nút cân bằng (swing bus). Nút 2 và nút 5 cũng biểu thị là nút phát công suất được giải thích bởi hai nút này nối với nút 1, truyền tải công suất từ nút 1 tới các nút/phụ tải phía sau. Nút 6 là nút chuyển tiếp kết nối nhiều đường dây, kết quả mô phỏng cho thấy nút 6 là nút tải tức tổng công suất tải tiêu thụ từ nút 6 (các tải MV10, MV11 và MV12) lớn hơn công suất nguồn phát vào nút 6 là hệ thống PV. Các nút chỉ có 1 đường dây đầu nối và tại đó có 1 phụ tải duy nhất gồm nút 10 và nút 12 cho kết quả chính là công suất tiêu thụ của phụ tải tương ứng tại nút. Các nút còn lại đều có nhiều đường dây đầu nối đồng thời có thể có cả phụ tải đầu vào (9, 11 và 14) đều có kết quả công suất dương (tương ứng là nút tải) thể hiện công suất được tiêu thụ tại nút đó. Nút 13 ngắt kết nối với lưới hệ thống có công suất bằng 0.

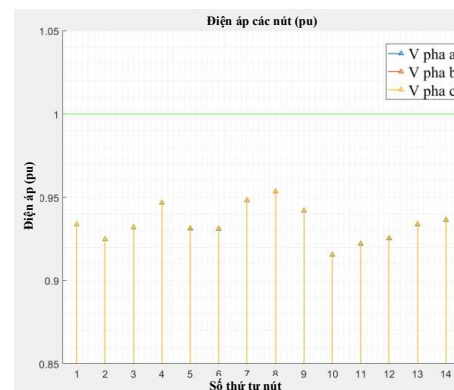
Kết quả mô phỏng công suất phản kháng các nút trên (Hình 4) cho thấy chỉ có một nguồn phát công suất phản kháng để cân bằng công suất là từ máy phát diesel – nút 8. Tất cả các nút còn lại là nút tiêu thụ hoặc/và chuyển tiếp công suất phản kháng có giá trị công suất dương, trừ nút 13 là nút kết nối hệ thống có giá trị bằng 0.

Ta cũng có nhận xét rằng giá trị công suất P và Q tính toán theo các công thức (1, 2, 3) phía trên được biểu diễn trên các (Hình 3) và (Hình 4) nhỏ hơn giá trị công suất danh định tại các nút tải (Bảng 2); điều này được giải thích bởi điện áp tại các nút sử dụng trong tính

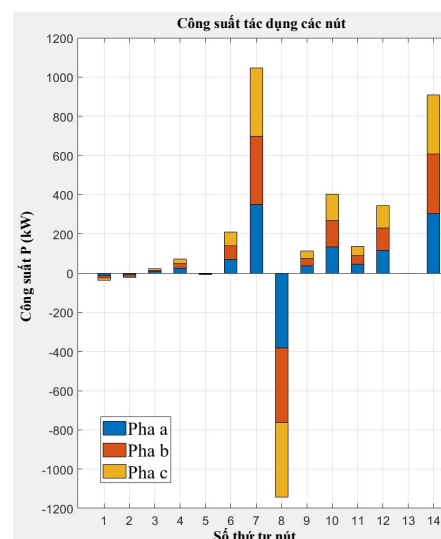
toán không đạt mức 1 pu như biểu diễn trong (Hình 2).

Bảng 2. Công suất S,P,Q chế độ cực đại

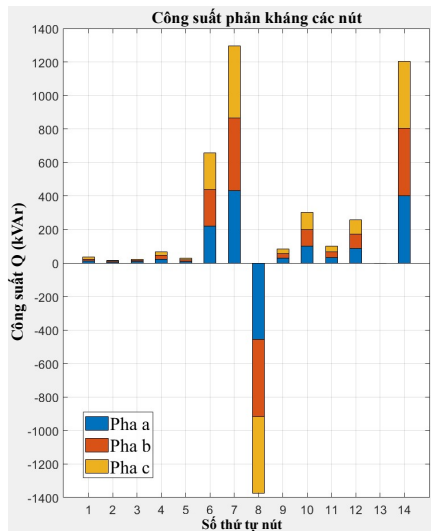
Tải	S (kVA)	P (kW)	Q (kVar)
Tải 2	40	36	17,4
Tải 3	30	25,5	15,8
Tải 4	50	45	21,8
Tải 9	160	128	96
Tải 10	600	480	360
Tải 11	200	160	120
Tải 12	500	400	300
Tải 14	1000	800	600
Tổng	2577,6	2074,5	1531



Hình 2. Điện áp tại các nút khi phụ tải cực đại



Hình 3. Công suất tác dụng tại các nút



Hình 4. Công suất phản kháng tại các nút

Như vậy khi Microgrid hoạt động với phụ tải cực đại, điện áp tại nhiều nút giảm xuống dưới mức cho phép, dao động trong khoảng 0,91 - 0,95 pu. Máy phát diesel đóng vai trò nguồn cân bằng công suất và cung cấp công suất phản kháng nhưng không đủ để duy trì điện áp ở mức cho phép.

3.2. Phụ tải cực tiểu, không đặt bù

Vẫn thực hiện mô phỏng ở chế độ tách lưới với các điều kiện thực hiện mô phỏng trong trường hợp này là phụ tải cực tiểu có độ lớn bằng 35% cực đại (thông số chi tiết trong Bảng 3); hệ thống PV phát cực đại; hệ thống BESS được điều khiển làm việc ở chế độ nạp và máy phát diesel phát năng lượng để đáp ứng nhu cầu phụ tải.

Kết quả mô phỏng điện áp được thể hiện trên (Hình 5) cho chúng ta thấy trong trường hợp phụ tải cực tiểu, điện áp tất cả các nút đều nằm trong dải điện áp thông thường cho phép, cụ thể là trong khoảng từ 0,95(pu) tới 0,97(pu). Trong đó chỉ duy nhất nút 1 có điện áp thấp nhất nhưng vẫn đạt xấp xỉ 0,95(pu) là mức

cho phép, nút này kết nối hệ thống BESS được điều khiển ở chế độ nạp năng lượng.

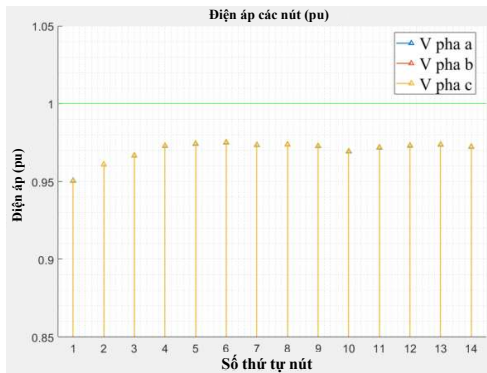
Bảng 3. Công suất các tải chế độ cực tiểu

Tải	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAr)
Tải 2	14	12,6	6,1
Tải 3	10,5	8,9	5,5
Tải 4	17,5	15,8	7,6
Tải 9	56	44,8	33,6
Tải 10	210	168,0	126,0
Tải 11	70	56,0	42,0
Tải 12	175	140,0	105,0
Tải 14	350	280,0	210,0
Tổng	902,4	726,1	535,9

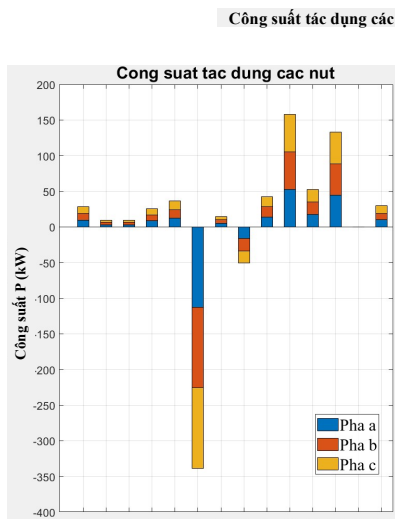
Kết quả mô phỏng công suất tác dụng được biểu diễn trên (Hình 6), trong trường hợp này ta thấy nút 6 và nút 8 là các nút phát công suất vào lưới. Trong đó nút 6 là nút kết nối với hệ thống PV phát công suất cực đại là 725 kW, tuy nhiên giá trị tính toán thể hiện ở đây chỉ là phát 340 kW, điều này được giải thích bởi tổng công suất các phụ tải đầu nối vào nút 6 (các tải 10, 11 và 12) đã tiêu thụ ~ 364 kW [Bảng 3]; do đó phân công suất phát đi từ nút 6 chỉ còn giá trị như trên. Chúng ta cũng nhận thấy, mặc dù tổng công suất tác dụng các tải trong Microgrid chỉ là 726,1 kW xấp xỉ giá trị công suất phát của hệ thống PV nhưng kết quả mô phỏng thể hiện máy phát diesel vẫn cần phát thêm 50 kW để cân bằng công suất tác dụng, đó là do tổn thất công suất trên toàn hệ thống Microgrid. Các nút còn lại trong Microgrid là các nút tải có giá trị công suất dương và nút 13 kết nối lưới hệ thống có công suất bằng 0.

Kết quả mô phỏng công suất phản kháng các nút trên (Hình 7) cho thấy chỉ có một nguồn phát công suất phản kháng để cân bằng công suất là từ máy

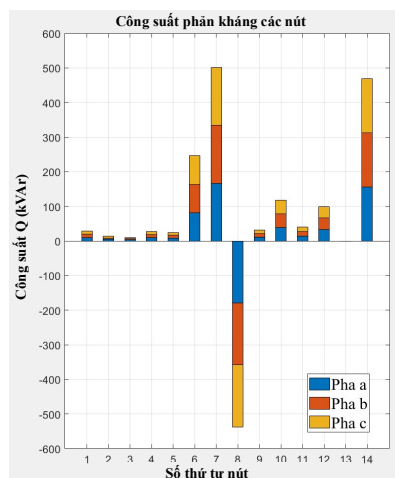
phát diesel – nút 8, giá trị công suất phản kháng phát ra từ nút 8 hoàn toàn phù hợp với tổng công suất phản kháng các nút phụ tải trong (Bảng 3).



Hình 5. Điện áp tại các nút khi phụ tải cực tiểu



Hình 6. Công suất tác dụng tại các nút



Hình 7. Công suất phản kháng tại các nút

Trong chế độ phụ tải cực tiểu, điện áp tại các nút tăng lên so với chế độ cực đại, có giá trị từ 0,95 pu đến 0,97 pu là điện áp trong mức thông thường cho phép. Máy phát diesel phát công suất để đảm bảo cân bằng công suất và duy trì điện áp trong ngưỡng cho phép.

3.3. Phụ tải cực đại, có đặt bù

Từ kết quả mục 3.1 ta thấy rằng điện áp các nút ở chế độ phụ tải cực đại thấp hơn mức cho phép. Một biện pháp đơn giản, chi phí hợp lý và hiệu quả để nâng cao điện áp là thực hiện bù công suất phản kháng bằng các tụ bù tĩnh. Trong phần này của bài báo, ta tiến hành đặt bù tại các nút 10, 12 và 14 vì đây là các nút có phụ tải lớn nhất trong Microgrid, hơn nữa giá trị điện áp tại nút 10 cũng là thấp nhất trong các nút chỉ đạt 0,915 pu (Hình 2); giá trị đặt bù được lựa chọn để mô phỏng bằng với công suất phản kháng tiêu thụ tại từng nút khi cực đại tương ứng với các nút 10, 12 và 14 lần lượt là 360 kVar, 300 kVar và 600 kVar (Bảng 2).

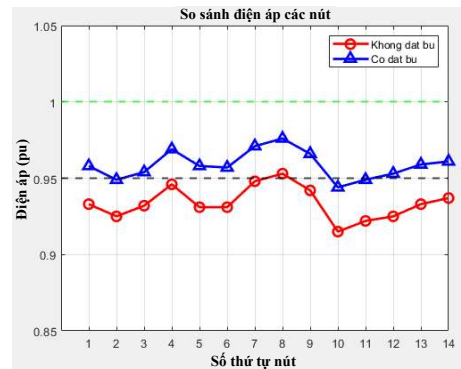
Kết quả mô phỏng điện áp, công suất tác dụng và công suất phản kháng trong trường hợp có đặt bù lần lượt được thể hiện trên Hình 8, Hình 9 và Hình 10.

Mặc dù các tải trong mô hình được mô hình hóa là đối xứng ba pha, MATLAB/Simulink thực hiện tính toán riêng biệt cho từng pha và ghi nhận một mức độ lệch nhỏ giữa các pha về điện áp và công suất. Do độ lệch này là không đáng kể, để có thể biểu diễn và so sánh điện áp ở hai kịch bản có đặt bù và không đặt bù, kết quả trình bày trong (Hình 8) chỉ thể hiện giá trị điện áp trên một pha đại diện (pha A). Với ba vị trí bù và dung lượng bù như trên cho kết

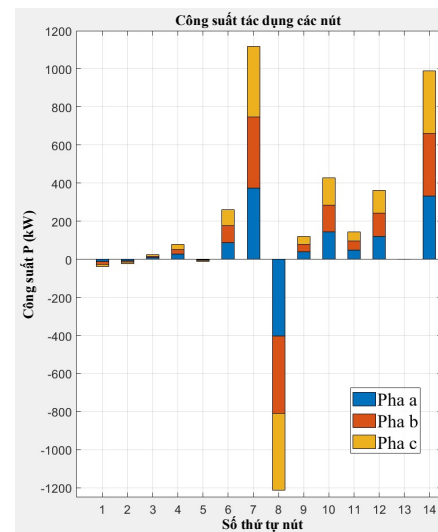
qua cải thiện chất lượng điện áp đáng kể so với trường hợp không đặt bù. Tất cả các nút điện áp đều đạt mức lớn hơn 0,95 pu là mức thông thường cho phép trừ nút 10 là điện áp chỉ đạt 0,943 pu ; giá trị điện áp này vẫn thấp hơn một chút so với mức cho phép vì nút 10 là nút có điện áp thấp nhất khi chưa đặt bù như đã phân tích ở trên.

So sánh kết quả mô phỏng cân bằng công suất tác dụng trường hợp phụ tải cực đại có đặt bù (Hình 9) với trường hợp không đặt bù (Hình 3) ta thấy công suất phát của máy phát diesel – nút 8 tăng lên, ở mức 1215 kW so với 1140 kW, điều này được giải thích bởi điện áp các nút khi đặt bù tăng lên tiến gần tới giá trị định mức nên công suất các phụ tải cũng tăng lên tương ứng tiến tới giá trị công suất danh định.

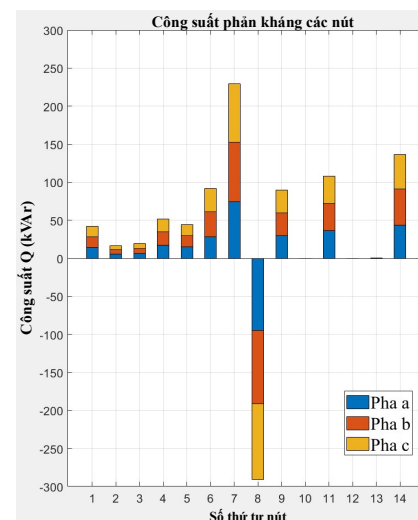
Kết quả mô phỏng công suất phản kháng các nút trên (Hình 10) cho thấy chỉ có một nguồn phát công suất phản kháng để cân bằng công suất là từ máy phát diesel, tuy nhiên giá trị công suất phát đã giảm đi một lượng tương ứng công suất đặt bù, chỉ còn khoảng 290 kVAR so với 1370 kVAR khi không đặt bù (Hình 4). Các nút 10 và nút 12 có giá trị công suất phản kháng bằng 0 do công suất đặt bù tương ứng bằng công suất phản kháng tiêu thụ và tại các nút này chỉ có duy nhất 1 phụ tải đầu nối, nút 13 cũng có công suất phản kháng bằng 0 là nút nối lưới nhưng đã ngắt kết nối. Nút 14 cũng đặt bù với công suất bằng công suất của tải 14 nhưng vẫn thể hiện là nút tiêu thụ công suất phản kháng vì tại nút này có các đường dây đầu nối chuyển tiếp công suất phản kháng đi các nút khác.



Hình 8. Điện áp tại các nút khi phụ tải cực đại có đặt bù và không có bù



Hình 9. Công suất tác dụng tại các nút



Hình 10. Công suất phản kháng tại các nút

Như vậy, việc lắp đặt tụ bù tại các nút 10, 12 và 14 (tổng công suất bù 1260 kVAr), điện áp các nút cải thiện đáng kể so với trường hợp không đặt bù, đạt trên 0,95 pu (Hình 11). Máy phát diesel cũng giảm phát tương ứng công suất phản kháng, giúp nâng cao hiệu suất vận hành, đáp ứng yêu cầu các phụ tải.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã mô phỏng và phân tích hoạt động của một hệ thống Microgrid ở chế độ tách lưới trong hai kịch bản phụ tải cực đại và cực tiểu, đồng thời đánh giá và định lượng hiệu quả của việc lắp đặt tụ bù công suất phản kháng đến chất lượng điện áp. Kết quả chỉ ra rằng, trong chế độ tách lưới với phụ tải cực đại, điện áp tại nhiều nút có xu hướng giảm thấp hơn mức giới hạn cho phép, ảnh hưởng đến sự ổn định của hệ thống.

Việc lắp đặt bổ sung tụ bù tĩnh tại các nút có phụ tải lớn giúp cải thiện đáng kể độ suy giảm điện áp, đưa điện áp tại các nút về mức cho phép, đồng thời giảm tải công suất phản kháng từ máy phát diesel. Điều này không chỉ nâng cao hiệu suất vận hành của Microgrid mà còn góp phần tối ưu hóa cân bằng công suất, giảm tổn thất hệ thống và tăng độ tin cậy trong chế độ tách lưới.

Các nghiên cứu hiện có chưa xây dựng mô hình mô phỏng chi tiết cho Microgrid quy mô đầy đủ gồm nhiều nút lưới cùng các phần tử đặc trưng như hệ thống PV, pin lưu trữ (BESS), máy phát diesel và tải động. Sự thiếu hụt này dẫn đến hạn chế trong việc đánh giá toàn diện tương tác giữa các thành phần và hiệu suất tổng thể của hệ thống. Bài báo xây dựng mô hình Microgrid nhiều nút với cấu trúc đầy đủ, bao gồm nguồn phát tái tạo, thiết bị lưu trữ đi kèm các bộ biến đổi điện tử công suất và máy phát truyền thống. Mô hình được xác thực thông qua kết quả mô phỏng hợp lý, có khả năng cung cấp công cụ phân tích linh hoạt cho cả nghiên cứu lẫn ứng dụng thực tiễn.

Trong tương lai, nghiên cứu có thể mở rộng bằng cách sử dụng phương pháp bù linh hoạt như D-STATCOM để tăng cường khả năng ổn định điện áp, dù điều này đòi hỏi chi phí đầu tư cao và kỹ thuật điều khiển phức tạp. Ngoài ra, việc tích hợp các thuật toán tối ưu hóa để điều chỉnh vị trí và dung lượng bù dựa trên biến động phụ tải hoặc xây dựng các kịch bản điều khiển linh hoạt nguồn PV và hệ thống BESS cũng là hướng phát triển tiềm năng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Eklas Hossain et al., Microgrid testbeds around the world: State of the art, Energy Conversion and Management, Vol. 86, pp. 132-153, 2014.
- [2]. Nikos D. Hatziargyriou et al., Microgrids, IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 5 Iss. 4, pp. 78 – 94, 2007.
- [3]. Mohammed Abdullah H. Alshehri et al; Energy Management Strategies of Grid-Connected Microgrids under Different Reliability Conditions, Energies, 16(9), 3951, 22 pages, 2023.
- [4]. Jose Maurilio Raya-Armenta et al, Energy management system optimization in islanded microgrids: An overview and future trends, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 149, 111327, 20 pages, 2021.
- [5]. M. A. Ebrahim et al., Adaptive Control of a Hybrid Microgrid With Energy Storage System, IEEE Open Journal of Power Electronics, Vol. 6, pp. 196-211, 2025.

- [6]. Ali Mahmoudian et al., Adaptive power-sharing strategy in hybrid AC/DC microgrid for enhancing voltage and frequency regulation, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 156, 109696, 15 pages, 2024.
- [7]. Q. Liu and Y. Shan, Research on energy control of low voltage PV storage microgrid, Int. J. Low Carbon Technol, 16 (4), pp. 1397–1407, 2021.
- [8]. Bahador Fani et al; Inverter-based islanded microgrid: A review on technologies and control, e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, Vol. 2, 100068, 14 pages, 2022.
- [9]. A. H. Lone and N. Gupta, Load Flow Analysis of Islanded Microgrids, 2021 IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 1-6, 2021.
- [10]. Zhongmei Pan et al., Load flow calculation for droop-controlled islanded microgrids based on direct Newton–Raphson method with step size optimisation, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 14 Iss. 21, pp. 4775 - 4787, 2020.
- [11]. Nguyễn Duy Minh, Nghiên cứu và mô phỏng cân bằng công suất trong hệ thống Microgrid với nhiều nguồn phát, Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Trường Đại học Công Nghiệp Hà Nội, Tập 60 – Số 6, trang 24-29, 2024.
- [12]. Thông tư số 39/2015/TT-BCT.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả **Nguyễn Duy Minh** tốt nghiệp Đại học ngành Hệ thống điện trường Đại học Bách khoa Hà Nội vào năm 2004. Sau đó, tác giả theo học Thạc sĩ và Tiến sĩ tại Viện Khoa học ứng dụng quốc gia Lyon (Pháp) và nhận bằng Tiến sĩ ngành Năng lượng và các hệ thống vào năm 2011. Hiện tác giả đang công tác tại Khoa Kỹ thuật điện, trường Đại học Điện lực.

Hướng nghiên cứu chính: smart-grid, điện tử công suất trong hệ thống điện.