

ĐIỀU KHIỂN ĐIỆN ÁP CỦA HỆ THỐNG PIN MẶT TRỜI TÍCH HỢP VÀO LƯỚI PHÂN PHỐI

VOLTAGE CONTROL OF PV SYSTEMS IN THE DISTRIBUTION NETWORK

Lê Thị Minh Châu¹, Lê Đức Tùng¹, Nguyễn Thùy Linh²

¹Trường Đại học Bách khoa Hà Nội; chau.lethiminh@hust.edu.vn, leductung.htd@gmail.com

²Trường Đại học Phạm Văn Đồng, Quảng Ngãi; vinhlinhhtd84@gmail.com

Tóm tắt - Khi kết nối hệ thống điện mặt trời (PV) vào lưới phân phối có thể gây ra sự thay đổi đáng kể của điện áp tại điểm kết nối. Nếu không có bộ điều khiển để giữ điện áp tại điểm kết nối hệ thống PV trong giới hạn cho phép, có thể gây ra sự ngắt kết nối của hệ thống PV ra khỏi lưới. Vì vậy, bài báo này tập trung nghiên cứu thuật toán điều khiển điện áp cục bộ được dựa trên việc tự động điều chỉnh điện áp của hệ thống PV. Việc điều chỉnh này sử dụng thông tin cục bộ nên cho phép hệ thống PV kết nối dễ dàng hơn và giảm chi phí kết nối, giúp tăng cường sự thâm nhập nhiều năng lượng mặt trời vào hệ thống điện. Bộ điều chỉnh điện áp này không chỉ điều khiển điện áp tại điểm kết nối mà có thể áp dụng cho mọi điểm trên lưới điện. Kết quả nghiên cứu bằng mô phỏng Matlab-Simulink đã khẳng định hiệu quả đối với lưới điện phân phối có tính đến sự kết nối của các hệ thống PV khác nhau.

Từ khóa - hệ thống điện mặt trời; tự động điều chỉnh điện áp; lưới phân phối; điều khiển P/Q; điều khiển P/V.

Abstract - There are interactions between photovoltaic installations (PV) and power network. PV system can have a significant impact on the operation of the electrical system or may cause malfunctions. The connection of PV systems on a distribution network causes important variations of voltage at the connection point. This variation can cause a tripping of the PV systems without a regulator to maintain the voltage of the PV within the acceptable limits. Thus, this paper presents a development of a local voltage control based on auto-adaptive voltage control of PV systems which makes the connection easier, reduces its cost and increases the penetration of solar energy into the electrical system. The regulator can control voltage not only at the connection point but also everywhere on the grid. The proposed solution is applied for a distribution network with presence of different types of PVs. The models and simulations are developed in Matlab-Simulink and the obtained results show the effectiveness of the proposed method.

Key words - PV systems; auto-adaptive voltage control; distribution network; P/Q control; P/V control.

1. Đặt vấn đề

Nguồn năng lượng trong tương lai đang đứng trước một thách thức lớn. Mức tiêu thụ năng lượng của thế giới ngày càng tăng cao (khoảng 2% mỗi năm) và hầu hết sản lượng năng lượng trên toàn thế giới được đảm bảo bởi các nguồn hóa thạch, do đó, năng lượng sẽ trở nên quý hiếm và đắt tiền. Bên cạnh đó, việc tiêu thụ các nguồn năng lượng hóa thạch sẽ dẫn đến sự thay đổi khí hậu, hiệu ứng nhà kính do phát thải khí CO₂, ô nhiễm môi trường, v.v...

Trong bối cảnh đó, năng lượng tái tạo ngày càng khẳng định được vị thế và tầm quan trọng so với các nguồn năng lượng truyền thống như than đá, khí đốt, dầu mỏ và hạt nhân. Sự phát triển không ngừng của thị trường năng lượng tái tạo đã làm bùng lên hy vọng vào sự ra đời của một kỷ nguyên mới – kỷ nguyên năng lượng tái tạo.

Trong số các nguồn năng lượng tái tạo, năng lượng quang điện mặt trời là một nguồn đầy hứa hẹn. Trong bối cảnh kinh tế hiện nay, rất thuận lợi cho sự phát triển của hệ thống quang điện mặt trời (khoa học công nghệ phát triển, chính sách trợ giá, ưu đãi thuế, trợ cấp vốn, hỗ trợ kỹ thuật,...), số lượng yêu cầu kết nối các hệ thống PV đang tăng theo cấp số mũ trên thế giới, đặc biệt cho các mô hình điện mặt trời lắp mái.

Việc kết nối một hệ thống điện mặt trời (PV) sẽ gây ra những thay đổi về điện áp trên lưới do sự thay đổi dòng công suất tác dụng và phản kháng trong lưới. Một cách tổng quát, điện áp sẽ tăng lên tại điểm kết nối và các điểm lộ đường dây ra, điều này kéo theo sẽ có những thay đổi về điện áp tại các điểm khác trên lưới. Tùy thuộc vào mức độ và sự dao động (không liên tục) đóng góp năng lượng của các hệ thống PV vào mạng lưới phân phối có thể gây ra sự thay đổi đáng kể của điện áp tại điểm kết nối [4, 5]. Đặc

biệt dẫn đến hiện tượng quá điện áp tại điểm kết nối trong trường hợp non tải mà mức độ thâm nhập của điện mặt trời nhiều. Nếu không có bộ điều chỉnh để duy trì điện áp của hệ thống PV trong giới hạn cho phép thì có thể gây ra sự ngắt kết nối ra khỏi lưới.

Bài báo này trình bày việc xây dựng bộ điều khiển điện áp cục bộ dựa trên việc tự động điều chỉnh thích nghi điện áp của hệ thống điện mặt trời. Xây dựng bộ điều chỉnh điện áp này nhằm mục đích tăng cường mức độ thâm nhập năng lượng mặt trời vào hệ thống điện, tăng hiệu suất và tính linh hoạt của việc kết nối hệ thống PV vào lưới điện.

2. Xây dựng bộ điều khiển điện áp cho hệ thống điện mặt trời

Bộ biến tần của hệ thống điện mặt trời có thể hoạt động với các thuật toán điều khiển khác nhau tùy thuộc vào chế độ hoạt động của nó [2, 6, 7, 8, 9]. Một trong ba loại sơ đồ điều chỉnh công suất phản kháng có thể được áp dụng cho biến tần kết nối lưới: hoặc là điều khiển công suất tác dụng và công suất phản kháng (điều khiển P/Q), hoặc là điều khiển hệ số công suất (điều khiển P/PF), hoặc là điều khiển công suất tác dụng và điện áp (điều khiển P/V). Mô hình điều khiển điện áp/tần số (điều khiển V/F) thường được sử dụng cho các bộ biến tần kết nối lưới.

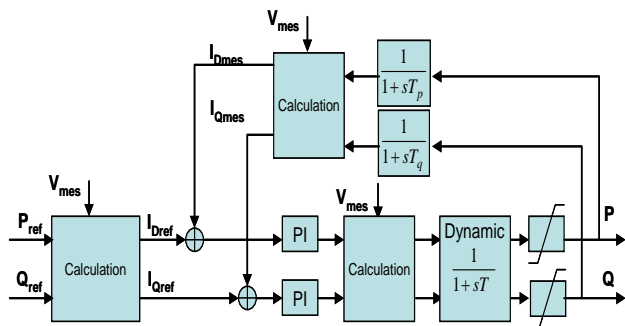
Với sơ đồ điều khiển P/Q, thuật toán điều khiển là điều chỉnh dòng công suất bơm vào, bởi nguồn phân tán, tại điểm kết nối. Mục đích của bộ điều khiển là giữ công suất tác dụng và công suất phản kháng bơm vào tại điểm kết nối không đổi và bằng giá trị đặt P_{ref} và Q_{ref} . Thực tế, công suất tác dụng P_{ref} được xác định bởi thuật toán MPPT và công suất phản kháng Q_{ref} bằng 0. Tương tự, đối với sơ đồ điều khiển hệ số công suất (điều khiển P/PF), công suất tác dụng và hệ số

công suất được giữ ở giá trị đặt, bằng cách thay đổi công suất phản kháng thì hệ số công suất được giữ không đổi.

Đối với mô hình điều khiển điện áp/tần số (điều khiển V/f), điện áp và tần số được giữ ở giá trị đặt V_{ref} và f_{ref} . Công suất tác dụng và công suất phản kháng được điều khiển để giữ tần số và điện áp không đổi. Thay đổi công suất tác dụng để điều chỉnh tần số và thay đổi công suất phản kháng để điều khiển điện áp.

Sơ đồ điều khiển P/Q

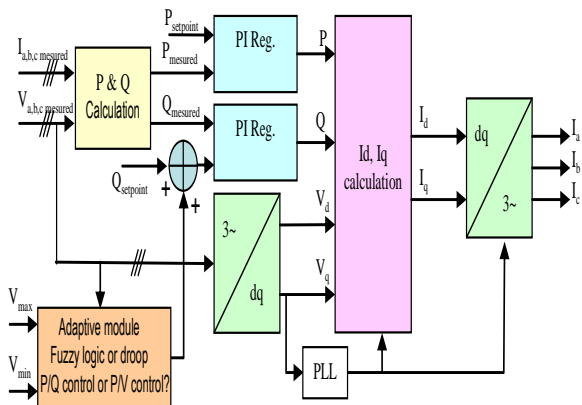
Hệ thống PV được mô phỏng bằng một nguồn dòng và hoạt động ở chế độ điều khiển P/Q. Đối với sơ đồ này, công suất tác dụng và phản kháng đầu ra của hệ thống PV được giữ bằng giá trị đặt P_{ref} (phụ thuộc cường độ bức xạ và nhiệt độ mặt trời) và Q_{ref} (bằng 0). Bộ biến tần được hòa đồng bộ với lưới điện bằng khối PLL.



Hình 1. Sơ đồ điều khiển công suất P/Q

Nguyên lý hoạt động của sơ đồ này được mô tả như Hình 1, từ dòng điện và điện áp đo được tại điểm kết nối, ta xác định được công suất (P_{mes} và Q_{mes}) và điện áp tương ứng. Các công suất này sẽ được điều chỉnh bởi hai bộ điều khiển tỷ lệ-tích phân (PI). Sự sai lệch giữa công suất đặt P_{ref} và Q_{ref} và công suất đo P_{mes} và Q_{mes} sẽ được xử lý bởi bộ tỷ lệ (K_p) và bộ tích phân (K_i/p). Sau khi qua bộ PI, từ công suất đầu ra, ta có thể tính được dòng điện bơm vào nhờ phép biến đổi Park:

$$\begin{cases} I_d = \frac{2(P * V_d + Q * V_q)}{3(V_d^2 + V_q^2)} \\ I_q = \frac{2(P * V_q - Q * V_d)}{3(V_d^2 + V_q^2)} \end{cases}$$



Hình 2. Sơ đồ điều khiển tự động thích nghi điện áp

Hình 22 giới thiệu sơ đồ điều khiển tự động thích nghi

điện áp. Mô hình hệ thống PV được xây dựng cho 3 pha và 1 pha. Mô hình này bao gồm 2 chế độ điều khiển P/Q và điều khiển P/V. Với chế độ điều khiển P/V, điện áp đặt (setpoint) được thay đổi một cách tự động thích nghi, bằng cách sử dụng mô-đun mờ (fuzzy logic). Sự thay đổi các giá trị của điện áp đặt được thiết lập tương ứng với sự hoạt động và vị trí kết nối của hệ thống PV và phụ thuộc công suất phản kháng giới hạn của mỗi hệ thống PV.

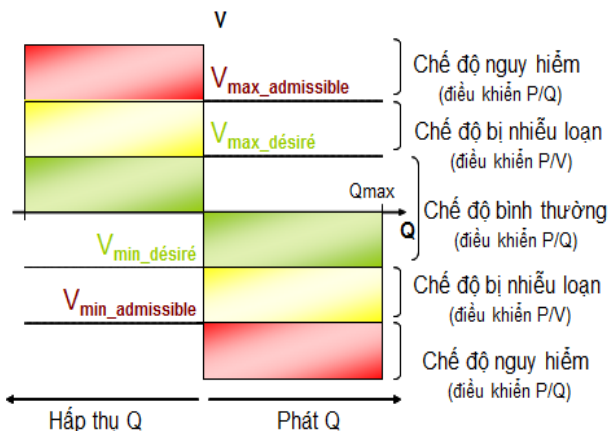
Nguyên lý hoạt động của thuật toán điều chỉnh điện áp tương ứng với 3 chế độ điều khiển sau (Hình 3):

- **Chế độ bình thường:** Khi điện áp tại điểm kết nối nằm trong khoảng điện áp “mong muốn” ($V_{min_desired} \leq V \leq V_{max_desired}$). Trong chế độ này, hệ thống PV sẽ hoạt động theo chế độ điều khiển công suất (P/Q) (hoặc điều khiển điện áp PF/VAR).

- **Chế độ bị nhiễu loạn:** xảy ra khi điện áp nằm tại điểm kết nối nằm ngoài các giới hạn điện áp mong muốn ($V > V_{max_desired}$ hoặc $V < V_{min_desired}$). Nguyên lý của việc điều khiển thích nghi là duy trì điện áp (trong giới hạn của hệ thống) nằm trong dải các giá trị cố định này. Do đó, trong trạng thái bị nhiễu loạn, hệ thống PV chuyển sang hoạt động trong chế độ điều khiển điện áp (điều khiển P/V). Ở đây chỉ có công suất phản kháng được sử dụng để điều chỉnh điện áp tại điểm kết nối hệ thống PV. Điện áp đặt $V_{min_desired}$ hoặc $V_{max_desired}$ được xác định phụ thuộc theo cấu hình điện áp của lưới điện quá thấp hay quá cao. Nếu công suất phản kháng của hệ thống PV đạt giới hạn cho phép ($Q = Q_{min}$ hoặc $Q = Q_{max}$) thì nó không thể đảm bảo việc điều chỉnh được điện áp mong muốn nữa. Điện áp đặt chuyển sang chế độ nguy hiểm khi điện áp tại điểm kết nối vượt qua giới hạn cho phép.

- **Chế độ nguy hiểm:** xảy ra khi điện áp tại điểm kết nối vượt qua giới hạn cho phép ($V > V_{max_admissible}$ hoặc $V < V_{min_admissible}$, đối với lưới Việt Nam $V_{max_admissible} = 1,1$ pu, $V_{min_admissible} = 0,9$ pu) và như giải thích ở trên, hệ thống điện mặt trời không thể điều chỉnh điện áp bằng công suất phản kháng nữa. Vậy, trong trạng thái nguy hiểm thì điều khiển công suất tác dụng trở nên cần thiết. Vậy hệ thống PV chuyển sang chế độ điều khiển công suất tác dụng, có nghĩa là, hệ thống PV thay đổi công suất tác dụng phát ra để đưa điện áp về trong giới hạn cho phép.

Việc chuyển đổi các chế độ hoạt động của hệ thống năng lượng mặt trời được thực hiện một cách tự động và tự thích nghi.



Hình 3. Nguyên lý hoạt động của thuật toán điều chỉnh điện áp

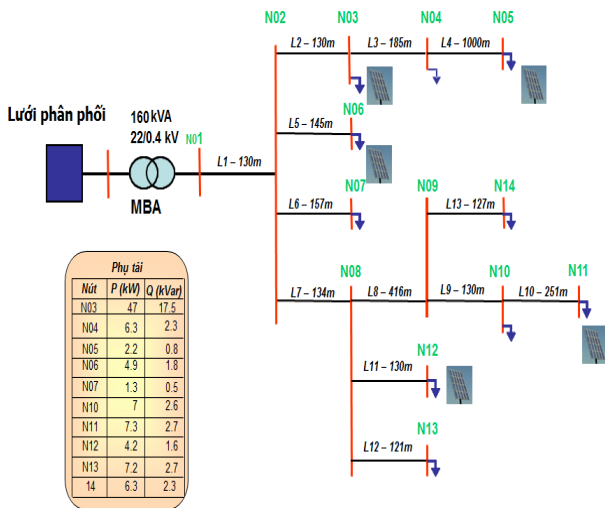
Dải điện áp mong muốn

Bộ điều khiển thay đổi một cách thích nghi đưa ra các giá trị điện áp mong muốn (tương ứng với các trạng thái) bằng cách điều chỉnh công suất phản kháng trong giới hạn cho phép của mỗi hệ thống PV. Bên cạnh đó, phụ thuộc vào giá trị điện áp trên xuất tuyến nó kết nối và lượng công suất phát ra hay tiêu thụ, các giá trị điện áp $V_{min_desired}$ và $V_{max_desired}$ sẽ thay đổi. Nếu điện áp đo được tại điểm kết càng gần 1 pu thì dải điện áp mong muốn của bộ điều khiển càng được thu hẹp. Dải điện áp này di chuyển theo lượng công suất phản kháng phát ra hoặc hấp thụ so với các giới hạn vật lý của hệ thống PV được xem xét. Sự đóng góp của công suất phản kháng càng quan trọng thì dải điện áp càng mở rộng và tuân theo quy luật $V_{min_admissible} \leq V_{min_desired} \leq V_{max_desired} \leq V_{max_admissible}$.

Sự thích nghi điện áp này được thực hiện bằng việc sử dụng một mô-đun thích nghi dựa trên thuật toán điều khiển logic mờ [fuzzy logic]. Logic mờ được lựa chọn vì tính năng nội suy của nó. Thực tế, logic này chính xác hơn logic Boolean để điều chỉnh dải điện áp mong muốn theo từng điện áp và công suất phản kháng đo được tại điểm kết nối.

3. Áp dụng

Để kiểm nghiệm hiệu quả của thuật toán điều khiển chỉnh điện áp tại điểm kết nối hệ thống PV vào lưới, một lưới điện như Hình 4 được nghiên cứu.



Hình 4. Sơ đồ lưới điện phân phối

Lưới phân phối được cấp nguồn từ trạm biến áp 22/0,4 kV, 160 kVA, bao gồm 14 nút, 10 nút tải và 5 hệ thống điện mặt trời. Tải ở nút 3 là tải 3 pha còn tải các nút khác là tải 1 pha.

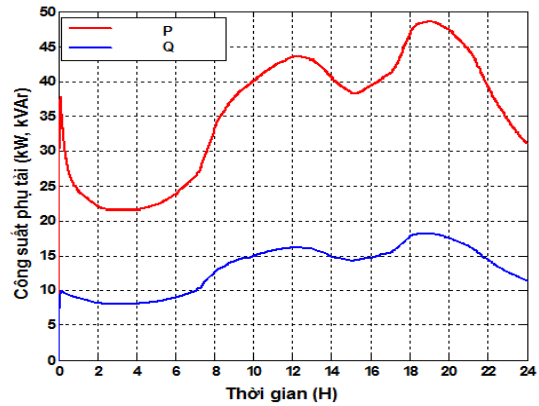
Lưới phân phối hạ áp có kết nối hệ thống điện mặt trời được mô phỏng bằng Matlab-Simulink.

Hai kiểu hệ thống điện mặt trời được sử dụng:

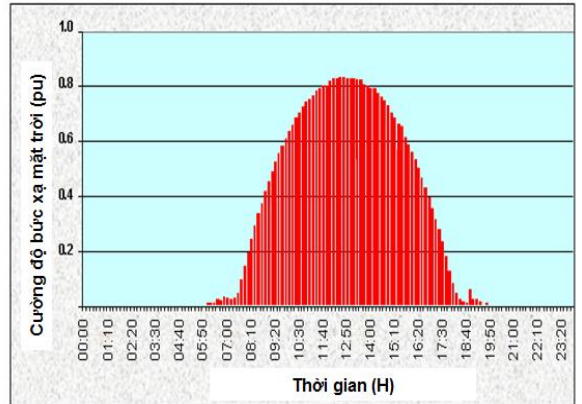
- Hệ thống PV 3 pha được kết nối tại nút N03 (30kW).
- Hệ thống PV 1 pha được kết nối tại nút N05, N06, N11, N12 (3kW).

Hai thuật toán điều khiển của bộ biến tần PV được sử dụng:

- Điều khiển cổ điển (điều khiển P/Q).
- Điều khiển thích nghi điện áp.



Hình 5. Đồ thị phụ tải thay đổi trong một ngày đêm



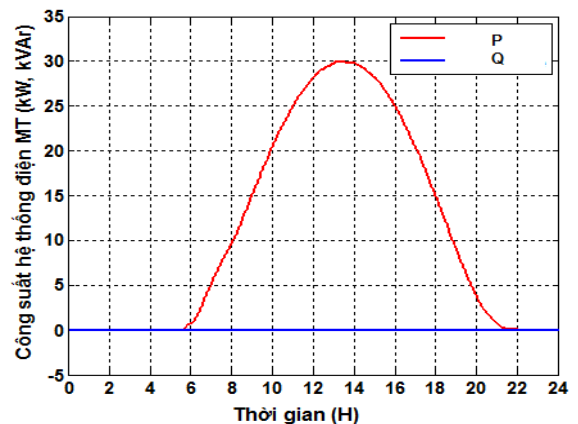
Hình 6. Cường độ bức xạ mặt trời trong 24 tiếng

Hình 5 biểu diễn sự biến đổi của tải 3 pha tại nút 3 trong 1 ngày đêm. Hình 6 giới thiệu cường độ bức xạ mặt trời trong 24 tiếng được sử dụng trong mô phỏng.

Đối với thuật toán điều khiển P/Q

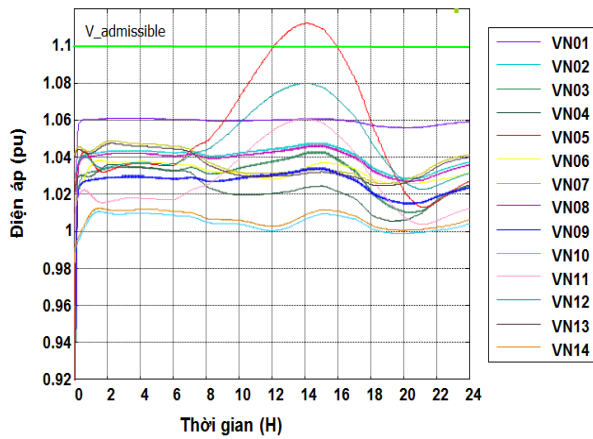
Trong trường hợp này, chúng ta giả sử rằng tất cả hệ thống PV đều hoạt động theo thuật toán điều khiển công suất P/Q.

Hình 7 thể hiện công suất của hệ thống PV kết nối tại nút N03 (3 pha, 30 kW). Công suất đầu ra của hệ thống PV thay đổi theo cường độ bức xạ mặt trời tương ứng với Hình 6. Công suất phản kháng trong trường hợp này được giữ bằng 0.

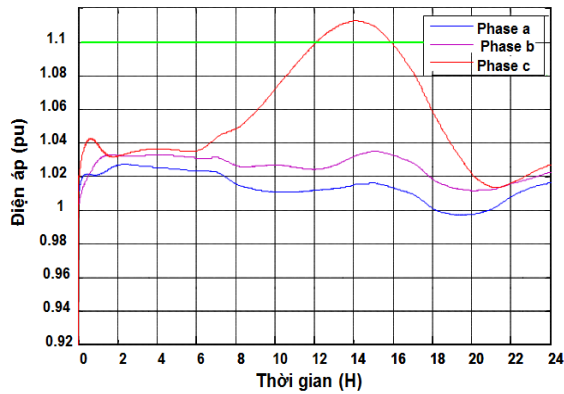


Hình 7. Công suất của hệ thống PV kết nối tại nút 3 (3 pha, 30 kW)

Sau khi kết nối các hệ thống PV vào lưới phân phối hạ áp, ta có đồ thị điện áp tại các nút trên lưới như Hình 8. Hình 9 là điện áp 3 pha tại nút N05 khi có hệ thống PV (1 pha, 3 kW) kết nối vào pha c.



Hình 8. Điện áp tại các nút trên lưới điện khi có kết nối các hệ thống điện mặt trời



Hình 9. Điện áp tại nút N05 khi có hệ thống PV (3 kW) kết nối vào pha c

Dựa vào kết quả mô phỏng, ta thấy rằng:

- Với thuật toán điều khiển công suất P/Q cố định ($Q=0$), có hiện tượng quá áp tại nút N05 ($V > 1,1$ pu, Hình 8), tại thời điểm cường độ của mặt trời chiếu mạnh.

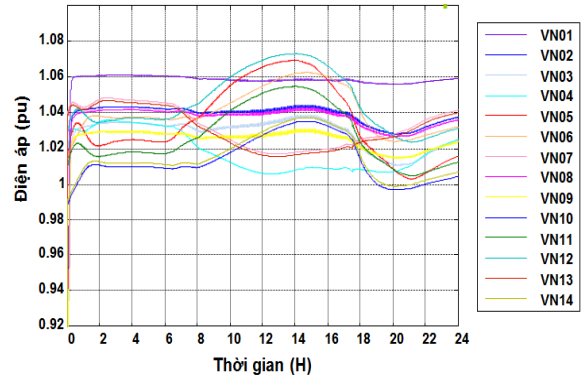
- Đối với hệ thống PV 1 pha khi kết nối lưới, có sự mất cân bằng giữa các pha và quá áp khi hệ thống PV được kết nối (Ví dụ: quá áp trên pha c tại nút N05).

Đối với thuật toán điều khiển thích nghi điện áp

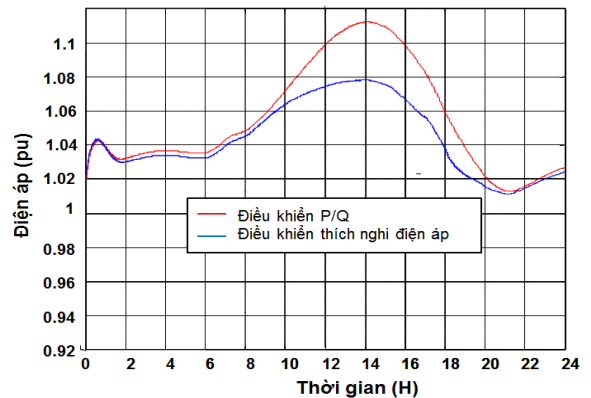
Trong trường hợp này, các thông số của lưới điện và các kịch bản tương tự với trường hợp trước, nhưng ở đây tất cả các hệ thống PV đều có khả năng tự điều chỉnh thích nghi điện áp. Hình 10 giới thiệu điện áp tại các nút trên lưới điện khi hệ thống PV có điều chỉnh thích nghi điện áp. Hiệu quả của việc áp dụng thuật toán điều khiển được thể hiện rõ hơn trong Hình 11.

Cũng như trường hợp trước, công suất đầu ra của hệ thống PV biến đổi theo cường độ bức xạ mặt trời. Nhưng đối với trường hợp này, công suất phản kháng lại biến đổi. Để giảm hiện tượng quá điện áp do hệ thống PV bơm công suất tác dụng, công suất phản kháng được hấp thụ (phát công suất

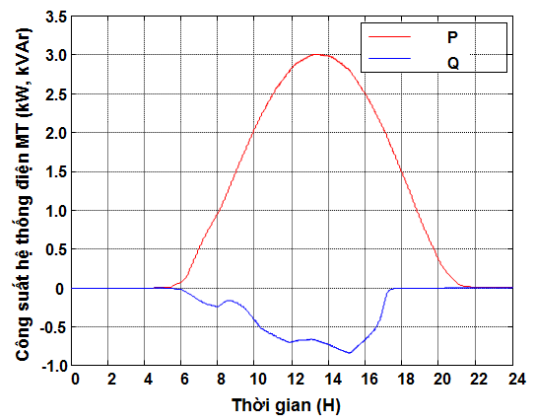
- Q). Hình 12 biểu thị công suất đầu ra của hệ thống PV được kết nối tại nút N05 (pha c, 3 kW).



Hình 10. Điện áp tại các nút trên lưới điện khi hệ thống PV có điều chỉnh thích nghi điện áp



Hình 11. Điện áp tại điểm kết nối hệ thống PV khi không có/có điều chỉnh thích nghi điện áp



Hình 12. Công suất đầu ra của hệ thống PV được kết nối tại nút N05 (pha c, 3 kW)

Mức độ hấp thụ công suất phản kháng phụ thuộc vào các yếu tố khác nhau như vị trí kết nối, khả năng cung cấp công suất phản kháng của các hệ thống PV, điện áp lưới và các thông số của lưới điện... Với thuật toán điều chỉnh thích nghi điện áp (Hình 10), ta nhận thấy rằng tất cả điện áp nút được giữ trong giới hạn cho phép (0,9 pu – 1,1 pu) và đồng thời giảm được sự mất cân bằng pha điện áp.

4. Kết luận

Bài báo giới thiệu thuật toán điều chỉnh thích nghi điện

áp tại điểm kết nối lưới phân phối của hệ thống năng lượng mặt trời. Thuật toán này có nhiều ưu điểm:

- Có khả năng giữ điện áp trong giới hạn cho phép (0,9 pu – 1,1 pu).
- Không cần bất kỳ hệ thống thông tin liên lạc.
- Một giải pháp tốt để giảm sự mất cân bằng điện áp trong mạng lưới phân phối hạ áp.
- Hấp thụ công suất phản kháng chỉ khi cần thiết và do đó hạn chế tổn thất điện năng trong đường dây.
- Hoạt động tự động.
- Tăng cường mức độ thâm nhập năng lượng mặt trời vào hệ thống điện, tăng hiệu suất và tính linh hoạt của việc kết nối hệ thống PV vào lưới điện.
- Không chi để điều chỉnh điện áp tại điểm kết nối mà còn áp dụng cho mọi điểm trên lưới điện.

Thuật toán điều khiển điện áp này thích hợp cho các hệ thống năng lượng mặt trời kết nối vào lưới phân phối hạ áp.

Hướng phát triển:

- Thử nghiệm khả năng hoạt động ổn định và giới hạn của thuật toán với nhiều hệ thống PV 1 pha và kết nối ngẫu nhiên trên các pha.
- Thử nghiệm khả năng điều chỉnh công suất tác dụng của hệ thống năng lượng mặt trời.
- Thử nghiệm với thiết bị mô phỏng thời gian thực.

Lời cảm ơn

Tác giả xin gửi lời cảm ơn đến Trường Đại học Bách khoa Hà Nội vì đã cấp kinh phí cho nghiên cứu này, theo đề tài mã số T2016 –PC-090.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Muralekrishnen. R, Sivakumar. P, *Improving the power quality performance for distributed power generation*, 2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET), 2012, pp. 203 - 211.
- [2] E. Rezapour, Md. T. Bina, A. Hajizadeh, “Active and reactive power controller for single phase connected photovoltaic systems”, *International Journal of Emerging Science and Engineering*, Vol. 2, Issue. 5, March 2014, pp. 22-24.
- [3] Mahmud. M.A, Hossain. M.J, Pota. H.R, “Voltage Variation on Distribution Networks With Distributed Generation: Worst Case Scenario”, *Systems Journal, IEEE*, Vol. 8, No. 4, 2014, pp. 1096 - 1103.
- [4] Aramizu. J, Vieira. J.C.M, *Analysis of PV generation impacts on voltage imbalance and on voltage regulation in distribution networks*, IEEE on Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013, pp. 1-5.
- [5] Achim Woyte, Vu Van Thong, Ronnie Belmans, and Johan Nijs, “Voltage Fluctuations on Distribution Level Introduced by Photovoltaic Systems”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 1, March 2006, pp. 202-209.
- [6] T. Tran-Quoc, G. Rami, A. Almeida, N. Hadjsaid, J. C. Kieny, J.C.Sabonadiere, *Méthode et dispositif de régulation pour un dispositif de production décentralisée d'énergie, et installation comportant au moins deux dispositifs de production dotes dudit dispositif de régulation*, Brevet d'Invention International, Nov. 2005.
- [7] T. Tran-Quoc, C. Andrieu, N. Hadjsaid, *Technical impacts of small distributed generation units on LV networks*, IEEE General Meeting 2003, Canada, June 2003.
- [8] Minh. Q. Duong, K. H. Le, T. S. Dinh, M. Mussetta, G. N. Sava, *Effects of Bypass Diode Configurations on Solar Photovoltaic Modules Suffering from Shading Phenomenon*, IEEE-The 10th International Symposium on Advanced topics in Electrical Engineering, 2017.
- [9] Minh. Q. Duong, H. H. Nguyen, S. Leva, M. Mussetta, G. N. Sava, S. Costinas, *Performance Analysis of a 310Wp Photovoltaic Module based on Single and Double Diode Model*, IEEE- 2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering, 2016.

(BBT nhận bài: 09/08/2017, hoàn tất thủ tục phản biện: 22/08/2017)