

TỐI ƯU HÓA TRONG KIỂM SOÁT PHÂN TÁN ĐỐI VỚI LƯỚI ĐIỆN DC SIÊU NHỎ

OPTIMIZATION IN DISTRIBUTED CONTROL OF DC MICROGRIDS

Nguyễn Thị Thu Hiền¹, Phạm Thị Phương Thảo^{1,*}

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.258>

TÓM TẮT

Lưới điện DC siêu nhỏ (DCMG) đang là xu hướng phát triển trên thế giới cũng như ở Việt Nam trong thời gian gần đây. Lưới điện DC siêu nhỏ có ưu điểm là có khả năng tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo, thân thiện với môi trường. Tuy nhiên việc tối ưu hóa trong kiểm soát lưới điện DC siêu nhỏ đang là vấn đề được nhiều nhà khoa học quan tâm. Bài báo đề xuất phương pháp điều khiển cho lưới điện DC siêu nhỏ phân tán, phương pháp không chỉ đạt được cân bằng công suất và điều chỉnh điện áp mà còn loại bỏ tác động tiêu cực của tải. Chất lượng của bộ điều khiển đề xuất được đánh giá thông qua kết quả mô phỏng bằng phần mềm PSIM.

Từ khóa: Lưới điện DC siêu nhỏ; điều khiển phân tán; phụ tải không đổi; kiểm soát độ dốc $V^2 - P$.

ABSTRACT

DC micro-grid (DCMG) is a growing trend in the world as well as in Vietnam recently. DC micro-grid has the advantage of being able to integrate renewable, environmentally friendly energy sources. However, optimization of DC micro-grid control is an issue of concern to many scientists. This article proposes a control method for distributed DC micro-grid, which not only achieves power balance and voltage regulation but also eliminates the negative impact of the load. The quality of the proposed controller is evaluated through simulation results using PSIM software.

Keywords: DC microgrid, distributed control, constant power load, $V^2 - P$ droop control.

¹Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực

*Email: thaoptp@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 25/6/2024

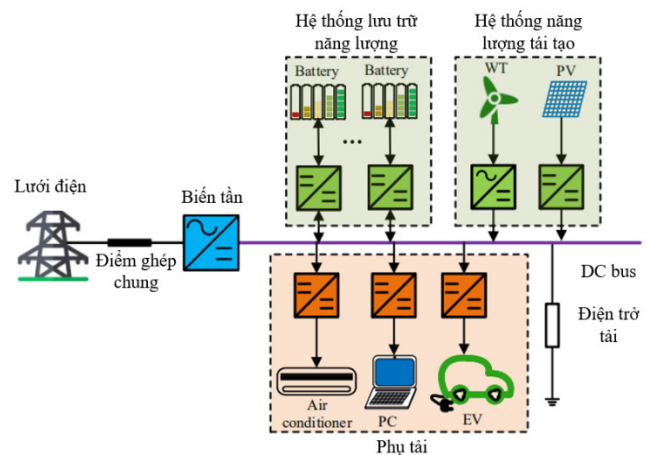
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/8/2024

Ngày chấp nhận đăng: 27/8/2024

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

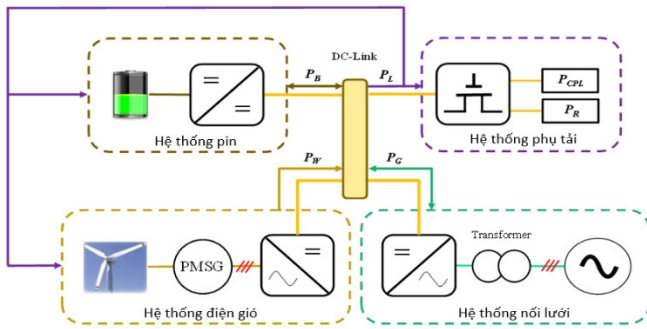
Lưới điện siêu nhỏ một chiều DCMG đơn giản hơn nhiều so với lưới điện siêu nhỏ AC [1], do bỏ qua bước

chuyển đổi năng lượng cũng như những khó khăn trong việc điều khiển như: sóng hài, tần số và công suất phản kháng. Do đó, lưới điện DCMG đang ngày càng thu hút được sự quan tâm [2]. Dựa trên liên kết truyền thông, có ba phương pháp điều khiển lưới điện siêu nhỏ khác nhau, đó là điều khiển tập trung, điều khiển phân tán và điều khiển phi tập trung. Kỹ thuật điều khiển phân tán nổi bật trong số các phương pháp này vì không bị ảnh hưởng của các sai số cục bộ và có sự ổn định của toàn bộ hệ thống [3, 4]. Ngoài ra, tải công suất không đổi (CPL) là tải có công suất không đổi khi điện áp hoặc dòng điện thay đổi, như động cơ điện, bộ truyền động và bộ chuyển đổi điện tử công suất phải được điều khiển sao cho công suất đầu ra không đổi. CPL làm cho hệ thống phi tuyến, dẫn đến mất cân bằng công suất và hệ thống không ổn định [5]. Bài báo trình bày phương pháp điều khiển DCMG phân tán dựa trên phương pháp kiểm soát độ sụt $V^2 - P$ để đạt được cân bằng công suất và điều chỉnh điện áp với phụ tải điện không đổi ở cả chế độ nối lưới và chế độ độc lập. Hiệu quả và độ tin cậy của phương pháp đề xuất được chứng minh bằng kết quả mô phỏng.



Hình 1. Cấu trúc lưới điện DCMG

2. CẤU TRÚC HỆ THỐNG DCMG

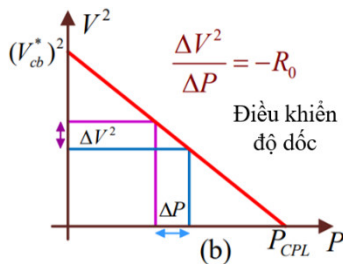
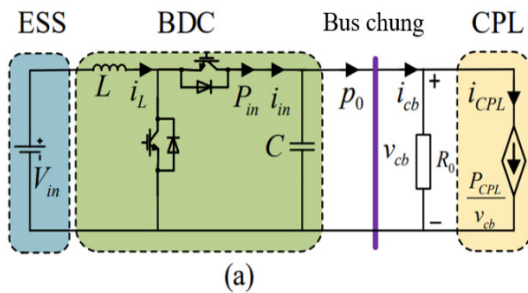


Hình 2. Cấu trúc mạng DCMG phân tán

Cấu trúc của mạng DCMG phân tán được đề xuất trong hình 2 với bốn thành phần: pin, tải, tuabin điện gió và nối lưới. Trong sơ đồ đề xuất này, dữ liệu công suất của tải được đưa đến tuabin gió và hệ thống pin dự phòng và chỉ cần có hai liên kết truyền thông là đủ để đảm bảo điều chỉnh điện áp và cân bằng điện năng, giúp giảm đáng kể giá thành hệ thống.

3. KIỂM SOÁT LƯỚI ĐIỆN DCMG PHÂN TÁN

Phương pháp độ dốc $V^2 - P$



Hình 3. Sơ đồ điều khiển độ sụt

Một bộ chuyển đổi DC-DC hai chiều (BDC) đơn giản hóa điển hình được thể hiện trong hình 3 (a), hệ thống lưu trữ năng lượng (ESS) cung cấp nguồn điện một chiều thông qua BDC đến CPL và tải điện trở. Mối quan hệ động giữa điện áp bus chung v_{cb} và dòng điện đầu ra i_{cb} có thể được biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} C \frac{dv_{cb}}{dt} = i_{in} - i_{cb} \\ i_{cb} = \frac{v_{cb}}{R_0} + \frac{P_{CPL}}{v_{cb}} \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó, C là điện dung bộ lọc, i_{in} là dòng điện đầu vào, R_0 là điện trở của tải thụ động và P_{CPL} là công suất của CPL. Giữa v_{cb} và i_{cb} có một mối quan hệ phi tuyến tính. Xét phương trình cân bằng công suất:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} C \frac{dv_{cb}^2}{dt} = P_{in} - P_0 = V_{in} i_L - P_0 \\ P_0 = \frac{v_{cb}^2}{R_0} + P_{CPL} \end{cases} \quad (2)$$

Với P_{in} là công suất đầu vào và P_0 là công suất đầu ra bao gồm tải tĩnh và CPL. V_{in} và i_L là điện áp và dòng điện đầu ra của ESS. Từ (2), có một mối quan hệ tuyến tính giữa v_{cb}^2 và i_L mà không cần xem xét P_0 . Do đó, các bộ điều khiển tuyến tính (ví dụ: PI) có thể được thiết kế để ổn định hệ thống xung quanh một điểm hoạt động cụ thể. Quy trình thiết kế của bộ điều khiển tự động được đề xuất được đơn giản hóa rất nhiều dựa trên mối quan hệ $V^2 - P$ cho BDC là:

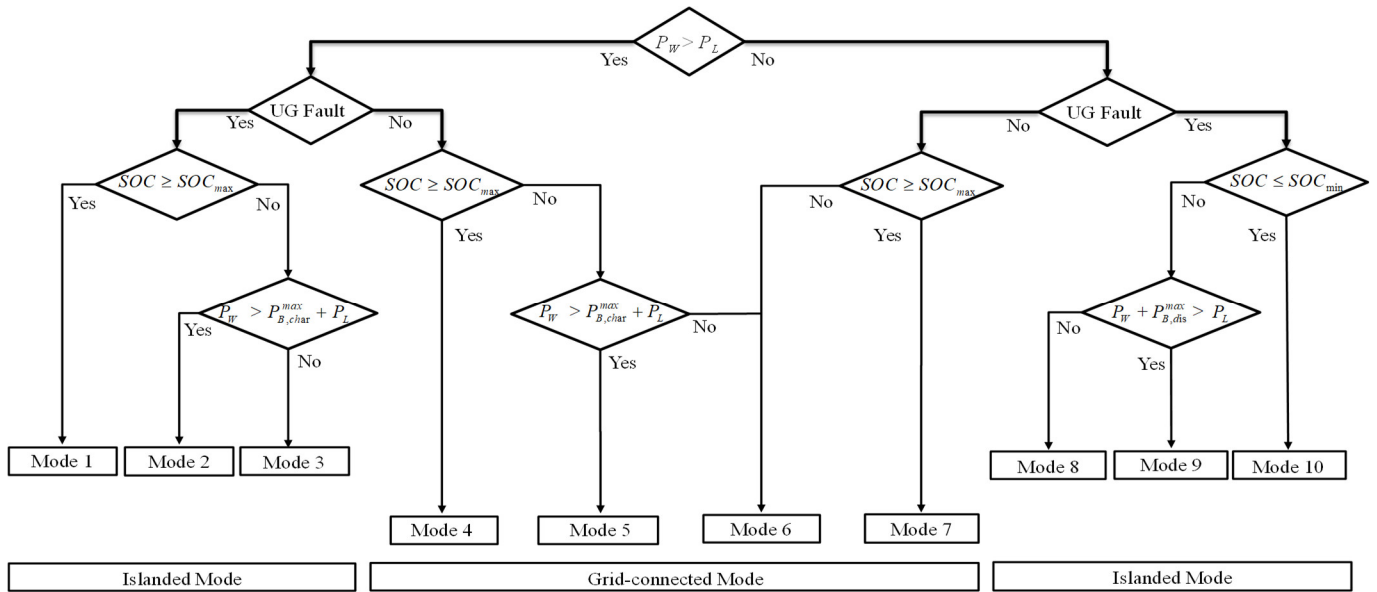
$$v_{ref}^2 = (V_{cb}^*)^2 - m_r P_0 \quad \text{với } m_r = \frac{(V_{cb}^{max})^2 - (V_{cb}^{min})^2}{P_{dis}^{max} - P_{ch}^{max}} \quad (3)$$

Trong đó, v_{ref}^2 là giá trị tham chiếu được tạo ra bởi bộ điều khiển độ dốc. V_{cb}^* và m_r lần lượt là điện áp danh định của bus chung và hệ số độ dốc. V_{cb}^{max} , V_{cb}^{min} , P_{dis}^{max} và P_{ch}^{max} là điện áp bus chung lớn nhất và nhỏ nhất, giá trị công suất xả và sạc tối đa. Hình 3 (b) cho thấy, các đặc tính tuyến tính của bộ điều khiển độ dốc $V^2 - P$ với CPL.

Phương pháp điều khiển đề xuất của hệ thống DCMG phân tán dựa trên phương pháp điều khiển độ dốc $V^2 - P$ thể hiện trên hình 4. Với các chế độ hoạt động trong bảng 1. Dựa trên mối quan hệ giữa công suất của điện gió, tải yêu cầu, trạng thái sạc của pin (SOCB) và tính khả dụng của lưới điện, mười chế độ hoạt động đặt ra để duy trì quản lý công suất và ổn định điện.

Bảng 1. Các chế độ hoạt động của lưới điện phân tán DCMG

Chế độ	Điện gió	Pin lưu trữ	Nối lưới	Tải
1	VDCM	IDLE	Fault	NOR/REC
2	VDCM	BCCM _{char}	Fault	NOR/REC
3	MPPT	BVDM _{char}	Fault	NOR/REC
4	VCM	IDLE	GVCM _{inv}	NOR/REC
5	MPPT	BCCM _{char}	GVCM _{inv}	NOR/REC
6	MPPT	BCCM _{char}	GVCM _{con}	NOR/REC
7	MPPT	IDLE	GVCM _{con}	NOR/REC
8	VCM	BVDM _{dis}	Fault	SHED
9	MPPT	BVDM _{dis}	Fault	NOR/SHED
10	MPPT	IDLE	Fault	SHED



Hình 4. Chế độ điều khiển hệ thống DCMG

Ở chế độ kết nối lưới, tác nhân lưới điều chỉnh DCV ở giá trị mong muốn bằng điều khiển DCV theo chế độ biến tần (GVCM_{inv}) hoặc chế độ chuyển đổi (GVCM_{con}). Cả chế độ GVCM_{inv} và GVCM_{con} đều sử dụng bộ điều khiển tích phân tỷ lệ (PI) để điều chỉnh điện áp. Từ thông tin của các thành phần mà hệ thống sẽ chọn chế độ làm việc phù hợp, như khi tuabin gió ở chế độ theo dõi điểm công suất cực đại (MPPT), tuabin gió, pin và tải chạy ở chế độ MPPT, chế độ sạc ở chế độ điều khiển dòng điện cực đại (BCCM_{char}) cho đến khi trạng thái sạc đầy (SOCB) và chế độ bình thường (IDLE), tải hoạt động ở chế độ NOR/REC.

Ở chế độ độc lập, pin hoặc tuabin gió được điều chỉnh điện áp và cân bằng công suất dựa trên phương pháp điều khiển độ dốc V² - P. Sơ đồ điều khiển như hình 5.

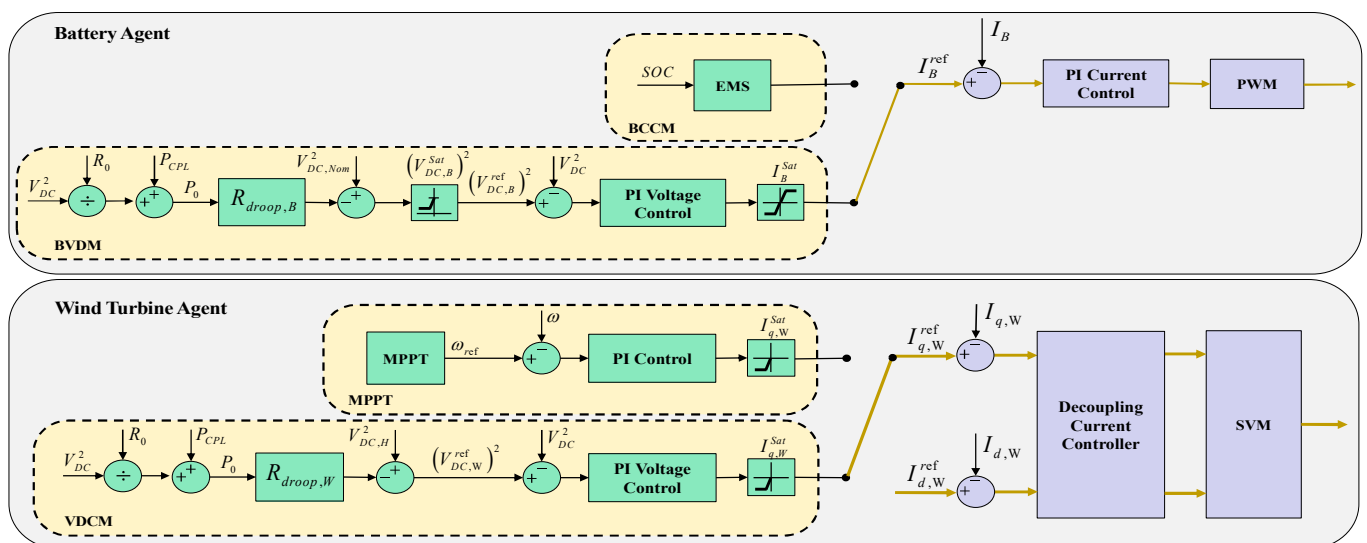
$$R_{droop,B} = \frac{(V_{DC,nom})^2 - (V_{DC,L})^2}{P_{B,char}^{max} - P_{B,dis}^{max}} = \frac{\Delta V_{DC}^2}{\Delta P_B} \quad (4)$$

$$R_{droop,W} = \frac{(V_{DC,H})^2 - (V_{DC,nom})^2}{0 - P_W^{max}} = \frac{\Delta V_{DC}^2}{\Delta P_W} \quad (5)$$

Với V_{DC,nom}, V_{DC,L}, V_{DC,H} mức DCV mong muốn, thấp và cao. P_{B,char}^{max}, P_{B,dis}^{max}, P_W^{max} là công suất sạc, xả pin tối đa và công suất lớn nhất của bộ phận tuabin gió. Tổng công suất tải được tính:

$$P_0 = P_L + P_{CPL} \quad (6)$$

Khi công suất tải yêu cầu vượt quá công suất máy phát điện gió tạo ra, bộ điều khiển pin dự phòng sẽ điều chỉnh DCV với giá trị tham chiếu như sau:



Hình 5. Sơ đồ kiểm soát độ dốc cho pin và tuabin gió trong lưới điện DCMG
Điện trở độ dốc được xác định theo công thức (4), (5):

$$(V_{DC,B}^{ref})^2 = (V_{DC,nom})^2 - R_{droop,B} P_0 \quad (7)$$

$$I_B^{ref} = G_{V,B}(s) \left[(V_{DC,B}^{ref})^2 - V_{DC}^2 \right] = \left(K_{PV,B} + \frac{K_{IV,B}}{s} \right) \left[(V_{DC,B}^{ref})^2 - V_{DC}^2 \right] \tag{8}$$

Trong trường hợp công suất tải yêu cầu vượt quá tổng công suất tuabin gió và công suất pin tạo ra, chế độ cắt tải sẽ được kích hoạt để tránh hệ thống bị quá tải.

Khi công suất tuabin gió tạo ra vượt quá tổng công suất tải yêu cầu và công suất pin, bộ điều khiển tuabin gió sẽ điều chỉnh DCV với giá trị tham chiếu của thanh điện áp có thể thu được như sau:

$$(V_{DC,W}^{ref})^2 = (V_{DC,H})^2 - R_{droop,W} P_0 \tag{9}$$

$$I_{q,W}^{ref} = G_{V,W}(s) \left[(V_{DC,W}^{ref})^2 - V_{DC}^2 \right] = \left(K_{PV,W} + \frac{K_{IV,W}}{s} \right) \left[(V_{DC,W}^{ref})^2 - V_{DC}^2 \right] \tag{10}$$

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

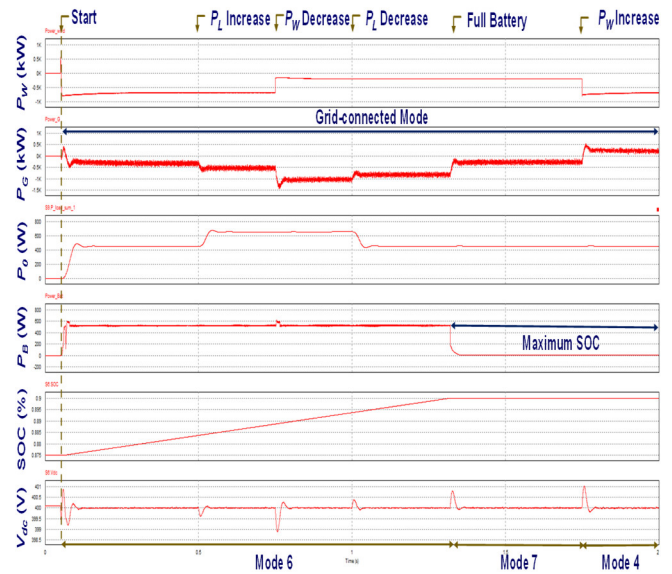
Trong phần này, các mô phỏng được triển khai cho DCMG phân tán để chứng minh tính khả thi và độ tin cậy của sơ đồ điều khiển được đề xuất theo CPL dựa trên phần mềm PSIM với các tham số hệ thống được liệt kê trong bảng 2.

Bảng 2. Tham số hệ thống mô phỏng

Thành phần	Tham số	Kí hiệu	Giá trị
Lưới	Điện áp lưới	V_G^{rms}	220V
	Tần số	f	60Hz
	Biến áp Y/Δ	T	380/220V
Tuabin gió	Công suất lớn nhất	P_W^{max}	-3000W
Pin	Maximum SOC	$SOC_{B,max}$	90%
	Minimum SOC	$SOC_{B,min}$	20%
	Công suất định mức	C	30Ah
	Công suất sạc tối đa	$P_{B,char}^{max}$	540W
	Công suất xả tối đa	$P_{B,dis}^{max}$	-540W
	Điện áp lớn nhất	V_B^{max}	180V
Tải	Điện cảm của bộ lọc L	L_B	7mH
	Công suất tải 1	P_{L1}	200W
	Công suất tải 2	P_{L2}	200W
	Công suất tải không đổi	CPL	230W
	Mức ưu tiên: load 1 > load 2	-	-

Trường hợp 1: Hệ thống nối lưới

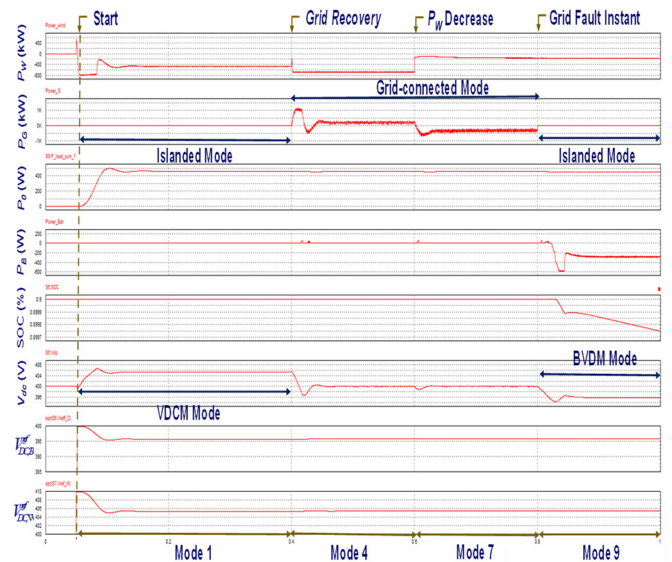
Trong trường hợp này, tuabin gió hoạt động ở chế độ MPPT, trong khi pin tiếp tục sạc cho đến khi đầy.



Hình 6. Kết quả mô phỏng trong chế độ kết nối lưới

Trường hợp 2: Hệ thống chuyển từ chế độ độc lập sang chế độ nối lưới

Khi tuabin gió cung cấp điện cao hơn tổng nhu cầu của tải và công suất sạc pin, nên tuabin gió điều chỉnh DCV dựa trên $V^2 - P$. Khi lưới điện tiện ích được kết nối với hệ thống DCMG phân tán, DCV được điều chỉnh ở giá trị mong muốn bởi $GVC_{M_{inv}}$, tuabin gió thay đổi chế độ hoạt động từ chế độ VCM sang chế độ MPPT.



Hình 7. Kết quả mô phỏng hệ thống chuyển từ chế độ độc lập sang chế độ nối lưới

Khi công suất tuabin gió giảm, lưới điện tiện ích sẽ thay đổi chế độ vận hành từ $GVC_{M_{inv}}$ sang $GVC_{M_{con}}$. Tại các sai số của lưới điện tiện ích, pin sẽ điều chỉnh DCV dựa trên điều khiển độ dốc $V^2 - P$ trong khi tuabin gió hoạt động ở chế độ MPPT.

Nhận xét:

Kết quả sau khi mô phỏng cho thấy với các chế độ đề xuất, lưới điện DCMG giữ ổn định, thời gian chuyển đổi nhỏ, sai số xác lập dưới 0,2%.

5. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày một phương pháp điều khiển DCMG phân tán dựa trên điều khiển độ sụt $V^2 - P$ để đảm bảo cân bằng công suất và điều chỉnh điện áp khi tải công suất không đổi ở cả chế độ kết nối lưới và chế độ độc lập. Với sơ đồ điều khiển đề xuất, hệ thống DCMG không chỉ duy trì điện áp liên kết DC một cách đáng tin cậy mà còn loại bỏ các tác động tiêu cực của tải công suất không đổi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Dragicevic, X. Lu, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, "DC microgrids -Part I: A review of control strategies and stabilization techniques," *IEEE Trans. Power Electron.*, 31, 7, 4876-4891, 2016.
- [2]. X. Ge, Q. L. Han, L. Ding, Y. L. Wang, X. M. Zhang, "Dynamic event-triggered distributed coordination control and its applications: A survey of trends and techniques," *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 50, 9, 3112-3125, 2020.
- [3]. F. Guo, Q. Xu, C. Wen, L. Wang, P. Wang, "Distributed secondary control for power allocation and voltage restoration in islanded DC microgrids," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, 9, 4, 1857-1869, 2018.
- [4]. F. Guo, L. Wang, C. Wen, D. Zhang, Q. Xu, "Distributed voltage restoration and current sharing control in islanded DC microgrid systems without continuous communication," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 67, 4, 3043-3053, 2020.
- [5]. G. Ensermu, A. Bhattacharya, "Design of decentralized droop control structure of DC microgrid with constant power loads and source disturbances," *2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, 91-96, 2018.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Thi Thu Hien, Pham Thi Phuong Thao

Faculty of Electrical Engineering, Electric Power University, Vietnam