

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO**  
**TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ KỸ THUẬT TP HCM**

**NGUYỄN LÊ DUY LUÂN**

**NGHIÊN CỨU TÁC ĐỘNG VÀ MỨC ĐỘ THÂM NHẬP  
CỦA ĐIỆN MẶT TRỜI LÊN LƯỚI ĐIỆN TRUNG THỂ**

Chuyên ngành: Kỹ thuật điện  
Mã số chuyên ngành: 9520201

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ**

**TP. HỒ CHÍ MINH – THÁNG 07 NĂM 2026**

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật  
Tp.HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS. TS. Võ Viết Cường

Người hướng dẫn khoa học 2: PGS. TS. Võ Ngọc Điều

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án cơ sở họp tại  
Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật TP.HCM vào ngày            tháng  
năm

## DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

### **Tạp chí quốc tế**

1. Le Duy Luan Nguyen, Phuc Khai Nguyen, Viet Cuong Vo, Ngoc Dieu Vo, Thang Trung Nguyen, and Tan Minh Phan, "Applications of Recent Metaheuristic Algorithms for Loss Reduction in Distribution Power Systems considering Maximum Penetration of Photovoltaic Units," International Transactions on Electrical Energy Systems, vol.23, article ID 9709608, 2003.

### **Tạp chí trong nước**

1. Nguyễn Phúc Khải, Nguyễn Lê Duy Luân, Phạm An Thái, Võ Ngọc Điều, Võ Viết Cường, Phan Thanh Vinh, "Phương pháp luận để cắt giảm công suất tối ưu điện mặt trời mái nhà cho lưới điện Bình Thuận," Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng, vol.21, no.10, pp. 85-89.

### **Hội thảo quốc tế**

1. Luan D. L. Nguyen, Nguyen Hoang Phuong, Luc G. Le, Long N. T. Tran, Dieu, N. Vo, Cuong V. Vo, "Active power losses and the maximum penetration of PV in the MV distribution grid: Case-study of Pleiku, Vietnam," In Proceedings of the 2023 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), pp. 337-342, IEEE, Ho Chi Minh City, July, 2023.

### **Các nghiên cứu liên quan đến luận án**

1. Đề tài khoa học và công nghệ cấp Bộ "Nghiên cứu xác định mức thâm nhập tối đa cho phép của nguồn năng lượng tái tạo vào lưới điện trung áp," thuộc chương trình "Nghiên cứu đề xuất các giải pháp nâng cao hiệu quả sử dụng nguồn điện mặt trời và điện gió khi kết nối với hệ thống điện quốc gia khu vực miền Trung". Tổ chức chủ trì: Đại học Đà Nẵng, mã số CT2022.07-DNA-09, Bộ Giáo dục và Đào tạo, nghiệm thu tháng 09/2025.
2. Ngoc Thien Le, Tran Hong An, Nguyen Le Duy Luan, Truong Cong Dinh, Le Thuong Du, Nguyen Van Son, Nguyen Hoang Minh Vu, Dinh Ngoc Sang, "Exploring the potentials applications of community solar system for greenfield project in Vietnam," In Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Symposium on Power, Energy and Cybernetics (ISPEC), Hanoi, 18-19 Dec, 2020.

# CHƯƠNG 1. GIỚI THIỆU

## 1.1. Đặt vấn đề

Điện mặt trời áp mái (RPV) đóng vai trò đặc biệt quan trọng trong cấu trúc nguồn phát phân tán (DG) của lưới điện. Các nguồn ĐMT quy mô lớn đều tập trung ở cấp truyền tải, RPV được lắp sau công tơ và phân tán ở cấp phân phối. Đặc trưng phân tán, phụ thuộc thời tiết và tính tự nguyện đầu tư của khách hàng khiến RPV là DG có tính bất ổn định cao; khi RPV thâm nhập ở mức cao có thể phát ngược công suất lên lưới trung thế (MV) gây ra (1) Vấn đề điện áp; (2) Quá tải đường dây và máy biến áp (MBA); (3) Giảm chất lượng điện năng; và (4) Sai lệch phối hợp bảo vệ rơ-le. Để tối đa hóa mức thâm nhập RPV vào lưới, đánh giá hiệu quả thâm nhập để giảm tác động bất lợi là yêu cầu bắt buộc.

## 1.2. Khoảng trống nghiên cứu

Trong quá khứ, nghiên cứu tích hợp RPV vào lưới MV tập trung xử lý bài toán tối ưu hóa ở trạng thái tĩnh, theo kịch bản rời rạc; không/chưa xét đến bản chất biến thiên của RPV và các bất định theo thời gian thực. Đây là khoảng trống cần được khai phá. Mới đây, học tăng cường sâu (DRL) được gợi ý để giải quyết các bài toán điều khiển vận hành lưới đa mục tiêu theo thời gian thực.

Mức thâm nhập tối đa (HC) là tỷ số giữa công suất đặt tối đa nguồn DG và nhu cầu tải cực đại; mức thâm nhập khả dụng (AHC) chỉ lượng công suất DG tối đa có thể thâm nhập vào một nút hoặc một vùng trên lưới tại một thời điểm.

## 1.3. Mục tiêu và phương hướng nghiên cứu

Mục tiêu chính của luận án là đánh giá tác động của sự thâm nhập cao RPV đến điện áp, dòng điện và tổn thất công suất trên lưới MV và xác HC công suất RPV vào lưới; phát triển phương pháp luận tối ưu hóa đa mục tiêu nhằm nâng cao mức thâm nhập RPV cho lưới. Trình tự thực hiện: (1) Phân tích và định lượng tác động của sự thâm nhập cao RPV đến  $V$ ,  $I$ , và  $\Delta P$  trên lưới MV; (2) Xây dựng mô hình và giải thuật cắt giảm công suất thâm nhập RPV để hạn chế tác động bất lợi đến lưới (bài toán cắt giảm); (3) Xây dựng mô hình và giải thuật xác định tối ưu mức thâm nhập RPV lên lưới (bài toán HC); và (4) Xây dựng mô hình lai giữa DRL và ANN để nâng cao mức thâm nhập RPV thông qua điều khiển vận hành lưới.

## 1.4. Đối tượng nghiên cứu

- Hệ thống RPV có công suất đặt dưới  $1 \text{ MW}_{AC}$  (tương đương  $1,25 \text{ MWp}$ );
- Lưới điện/một phần lưới MV 22 kV hình tia có tích hợp RPV;
- Lưới điện mô phỏng IEEE 33 và 69 nút chuẩn;
- Thiết bị điều áp dưới tải (OLTC) và biến tần thông minh (SI);
- Giải thuật tối ưu hóa ngẫu nhiên (MH) chim sẫm màu (COOA) và dơi (BA);
- Mô hình lai DRL và ANN.

## 1.5. Phạm vi nghiên cứu

- Hệ thống RPV có công suất đặt dưới  $1 \text{ MW}_{AC}$  (tương đương  $1,25 \text{ MWp}$ );
- Lưới điện mô phỏng IEEE 33 và 69 nút chuẩn; kiểm chứng thực tế trên xuất tuyến trung thế 22 kV tham khảo tại miền Trung Việt Nam;

- Tổn thất công suất, dao động điện áp và dòng điện vận hành trên lưới;
- Không xét tác động cộng hưởng do các nguồn NLTT khác, xe điện, hệ thống lưu trữ năng lượng (BESS), các thiết bị điều khiển điện áp ngoài OLTC và SI gây ra đồng thời trên lưới; các tác động trong chế độ quá độ và sự cố;
- Nghiên cứu được thực hiện theo các điều kiện hiện hành về các cơ chế, chính sách phát triển RPV tại Việt Nam

### **1.6. Phương pháp nghiên cứu**

Luận án sử dụng linh hoạt các phương pháp: nghiên cứu, phân tích, tổng hợp tài liệu, mô phỏng/mô hình hóa và phương pháp điều tra, khảo sát thực địa, phương pháp dự báo và xây dựng kịch bản.

### **1.7. Giá trị thực tiễn của luận án**

- Các nghiên cứu được thực hiện trong luận án bám sát tiến trình phát triển thực tế của ĐMT tại Việt Nam: phát triển thần tốc thiếu kiểm soát nhờ biểu giá FIT-1 và FIT-2, hạ nhiệt và nghiên cứu chuyên sâu, và phát triển có kiểm soát nhờ tích hợp điều khiển vận hành. Nhờ đó, kết quả nghiên cứu tại từng giai đoạn là nguồn tham khảo để giải quyết các bài toán cấp bách của thực tiễn vận hành;
- Các mô hình đề xuất được kiểm chứng trên lưới mô phỏng IEEE với kết quả khả quan, có tiềm năng triển khai trên lưới thực tế;
- Mô hình DRL khắc phục được hạn chế phổ biến của lưới MV nói chung và lưới Việt Nam nói riêng về thiếu cơ sở dữ liệu vận hành, hạ tầng đo đếm từ xa còn chưa hoàn thiện ở một số khu vực, mức độ ứng dụng SCADA còn hạn chế;
- Cung cấp luận cứ kỹ thuật cho các Công ty Điện lực trong việc thẩm định dự án đầu nối RPV và cơ sở khoa học cho cơ quan quản lý nhà nước trong việc cập nhật quy chuẩn, tiêu chuẩn kỹ thuật quốc gia về tích hợp RPV vào lưới trung thế; và
- Tài liệu mô phỏng và các mô hình đề xuất trong luận án có thể được sử dụng làm tài liệu tham khảo phục vụ đào tạo trình độ đại học, sau đại học; cũng như làm nền tảng cho các nghiên cứu chuyên sâu về tích hợp NLTT vào lưới MV.

### **1.8. Cấu trúc luận án**

Chương 1. Giới thiệu

Chương 2. Cơ sở lý thuyết

Chương 3. Xác định mức thâm nhập tối đa và tối ưu công suất cắt RPV – Áp dụng tại Việt Nam

Chương 4. Tối ưu hóa metaheuristic xác định mức thâm nhập tối đa RPV vào lưới trung thế

Chương 5. Ứng dụng mô hình DRL nâng cao khả năng thâm nhập RPV vào lưới trung thế

Chương 6. Kết luận và hướng phát triển

## CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

### 2.1. Tổng quan tác động của RPV lên lưới MV

Số lượng nghiên cứu về tác động của RPV lên lưới MV tăng đột biến trong giai đoạn 2015 – 2019, phản ánh rõ nét xu hướng thâm nhập RPV ngày càng cao vào lưới MV. [1] liệt kê bốn đặc tính cốt lõi của RPV gồm: phân tán, phát điện ban ngày, phụ thuộc biến tần và không liên tục; các đặc tính này là cơ chế quyết định bốn nhóm tác động tự nhiên của RPV lên lưới: các vấn đề điện áp, tổn thất công suất do dòng công suất ngược, lỗi phối hợp bảo vệ rơ-le và chất lượng điện năng. Trong đó, các vấn đề điện áp (mất cân bằng, dao động, quá áp tại điểm đầu nối) là những ràng buộc quan trọng nhất giới hạn mức thâm nhập của RPV vào lưới MV.

### 2.2. Công cụ đánh giá tác động của RPV lên lưới MV

Do đếm và phân tích trực tiếp bằng thiết bị chuyên dụng trên lưới thực sẽ cho kết quả chính xác nhất nhưng không khả thi do chi phí hạ tầng cao. Nhiều công cụ đánh giá tác động của RPV lên lưới MV đã được phát triển để thay thế như: GAMS, MATLAB/Simulink, PLEXOS, MATPOWER, FESTIV, DigSILENT, OpenDSS, PowerFactory, PSS/E, ETAP, RTDs, eMEGAsim, HYPERSIM, Typhoon HIL.

### 2.3. Mô hình đánh giá tác động của RPV lên lưới MV

Có bốn nhóm: (1) Mô hình xác định cố định toàn bộ các biến đầu vào, tính nhanh và lập trình đơn giản nhất; (2) Mô hình xác suất mô tả các biến đầu vào bằng hàm xác suất, tính mức thâm nhập RPV trên lưới nhỏ; (3) Mô hình chuẩn – tĩnh theo chuỗi thời gian mô phỏng lưới lớn với độ phân giải theo giờ, chính xác cao; và (4) Mô hình dữ liệu vận hành thực tính toán mức thâm nhập dựa trên hạ tầng đo đếm thông minh và SCADA, độ chính xác cao.

### 2.4. Phân tích trào lưu công suất

Phân tích trào lưu công suất áp dụng hai định luật Kirchhoff cho mạch phi tuyến có biến thiên điện áp và tần số. Phương trình công suất được viết dưới dạng:

$$P_i - jQ_i = [|V_i| \angle (-\delta)]. \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.1)$$

Hai cách giải phổ biến nhất là Gauss Seidel (GS) và Newton-Raphson (NR). NR giải bằng tuyến tính hóa và lặp cho đến khi hội tụ, tốc độ hội tụ cao.

### 2.5. Tính toán công suất RPV

Công suất RPV thâm nhập vào lưới được tính bằng mô hình Gaussian:

$$GHI(t) = GHI_{\max} \times e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t-t_{\text{noon}}}{\sigma_{\text{mt}}}\right)^2\right]}, t \in [t_{\text{mọc}}; t_{\text{lặn}}] \quad (2.2)$$

$GHI(t)$  là BXMT tính tại giờ thứ  $t$  trong ngày,  $[W/m^2]$ ;  $GHI_{\max}$  là BXMT cực đại tại giờ đỉnh  $t_{\text{noon}}$ ,  $[W/m^2]$  và  $\sigma_{\text{mt}}$  đặc trưng cho số giờ nắng trong ngày.

Hệ số công suất (CF) chuyển đổi  $GHI(t)$  thành công suất điện so với danh định:

$$CF(t) = \frac{GHI(t)}{GHI_{\text{STC}}} \quad (2.3)$$

Sản lượng RPV cho từng nút và toàn lưới điện được tính theo các công thức:

$$P_{RPV,m}(t) = P_{RPV,m}^{\text{đặt}} \times CF(t) \times \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \quad (2.4)$$

$$P_{RPV,\text{total}}(t) = \sum_{m \in \mathbb{R}} P_{RPV,m}(t) \quad (2.5)$$

$\mathbb{R}$  là tập hợp nút lắp RPV;  $P_{RPV,m}^{\text{đặt}}$  là công suất đặt RPV tại nút  $m$ , [kW];  $\eta_1$  là hệ số suy giảm do nhiệt vận hành;  $\eta_2$  là hiệu suất biến tần và  $\eta_3$  là tổn thất hệ thống.

## 2.6. Tính toán thông số vận hành lưới điện

### 2.6.1. Dao động điện áp trên lưới

Công thức tính sụt áp trên lưới cho trường hợp trước và sau khi có RPV là:

$$\Delta V_{\text{bf}} = \frac{P_{\text{load}} \cdot R + jQ_{\text{load}} \cdot X}{V_n} \quad (2.6)$$

$$\Delta V_{\text{af}} = \frac{[P_{\text{load}} - (\pm P_{\text{RPV}})] \cdot R + j[Q_{\text{load}} - (\pm Q_{\text{RPV}})] \cdot X}{V_n} \quad (2.7)$$

Dao động điện áp sau khi tích hợp RPV vào lưới được tính bằng

$$\Delta V_{\text{tăng}} = \frac{\Delta V_{\text{af}}}{V_{\text{ph.n}}} \approx \frac{R_{\text{rp}} \cdot P_{\text{o.RPV}}}{3V_n^2} \quad (2.8)$$

$R$  và  $jX$  là điện trở và điện kháng mắc nối tiếp của đường dây, [ $\Omega$ ];  $P_{\text{load}}$ ,  $Q_{\text{load}}$  là công suất tác dụng [W] và phản kháng [VAR] của tải;  $P_{\text{RPV}}$  và  $Q_{\text{RPV}}$  là công suất tác dụng và phản kháng mà hệ thống RPV phát tại nút;  $V_n$  là điện áp định mức của hệ thống, [V];  $R_{\text{rp}}$  là thành phần điện trở trong tổng trở ngắn mạch tại điểm kết nối.

### 2.6.2. Tổn thất công suất trên lưới

Biến động về tổn thất phản ánh hiệu quả cải thiện tổn thất nhờ RPV thâm nhập:

$$\Delta P = \sum_{k=1}^{N_{\text{br}}} \int_0^T P_{\text{RPV}}^t(t) \cdot [P_{\text{RPV}}^t(t) - 2P_{\text{load},i}^t(t)] \cdot dt \quad (2.9)$$

Trong đó,  $N_{\text{br}}$  là số xuất tuyến trên lưới;  $T$  là khoảng thời gian xét,  $P_{\text{load},i}^t(t)$  là công suất tiêu thụ trên nhánh  $k$  trong giờ thứ  $t$ , [kW].

Nếu  $\Delta P > 0$  nghĩa là  $P_{\text{RPV}}^t > P_{\text{load},i}^t$  thì tổn thất tăng. Ngược lại, nếu hiệu số  $P_{\text{RPV}}^t(t) - 2P_{\text{load},i}^t(t) < 0$  thì  $\Delta P < 0$ , nghĩa là tổn thất của hệ thống giảm.

### 2.6.3. Giới hạn quá tải của đường dây, máy biến áp và công suất phát tối đa của RPV vào lưới MV

Sau khi tích hợp RPV, công suất phụ tải đạt tối đa nếu:

$$S_{\text{max.af}} = \sqrt{(P_{\text{RPV.max}} - P_{\text{load.min}})^2 + Q_{\text{load.min}}^2} \quad (2.10)$$

Giới hạn công suất phát tối đa của RPV vào lưới:

$$P_{\text{RPV.max}} < P_{\text{load.min}} + \sqrt{S_{\text{max.bf}}^2 - Q_{\text{load.min}}^2} \quad (2.11)$$

## 2.7. Tối ưu hóa và metaheuristic

### 2.7.1. Tối ưu hóa trong hệ thống điện

Tối ưu hóa (TUH) là tập hợp nguyên lý và phương pháp toán được áp dụng để giải bài toán tối ưu, tìm giải pháp tốt nhất trong các lời giải khả thi. Bài toán TUH gồm ba bước: xây dựng mô hình, xây dựng hàm mục tiêu và ràng buộc, áp dụng giải thuật. TUH phát triển mạnh từ thế kỷ XVII, gồm: (1) Phân tích toán học chính xác; (2) Xấp xỉ hóa: (a) Xấp xỉ theo quy tắc (heuristics); (b) Xấp xỉ ngẫu nhiên/TUH siêu kinh nghiệm (metaheuristics); và (c) Xấp xỉ tự điều chỉnh/TUH tự thích nghi (hyperheuristics). Gần đây, AI và các phương pháp lai bắt đầu phổ biến.

### 2.7.2. Tối ưu hóa metaheuristic và bài toán tối đa mức thâm nhập RPV

MH TUH bằng hai thuộc tính: khai thác và thám hiểm. TUH MH được dùng phổ biến để tối đa mức thâm nhập RPV. Mỗi MH bao gồm hoặc không bao gồm các bước: (1) Khởi tạo tập dân số; (2) Phân nhóm tập dân số; (3) Đánh giá đặc điểm từng nhóm dân số và các điều kiện dừng ngẫu nhiên; (4) Xây dựng hàm toán TUH; (5) Xây dựng hàm toán cho cơ chế khai thác; (6) Xây dựng hàm toán cho cơ chế cập nhật hoặc chọn lọc ngẫu nhiên; và (7) Kiểm tra các điều kiện dừng.

## 2.8. Mức thâm nhập của RPV vào lưới MV

### 2.8.1. Định nghĩa

Mức thâm nhập là đại lượng định lượng công suất nối lưới của một DG nhưng không gây mất an toàn vận hành và không làm thay đổi hạ tầng hiện hữu của lưới.

Mức thâm nhập tối đa công suất RPV ( $HC_{RPV}$ ) là công suất RPV lớn nhất có thể tích hợp vào lưới mà không vi phạm ràng buộc điện áp, dòng điện và tổn hao.

$$HC_{RPV}(\%) = \frac{\sum_{m=1}^n P_{RPV,m}}{P_{\max}} \cdot 100 \quad (2.12)$$

$P_{RPV,m}$  là công suất đặt RPV  $m$ , [kW];  $P_{\max}$  là công suất nhu cầu cực đại, [kW].

AHC là lượng công suất RPV tối đa có thể thâm nhập vào một nút hoặc một vùng trên lưới tại một thời điểm nhưng không vi phạm ràng buộc vận hành; phản ánh mức thâm nhập thực của RPV khi tích hợp điều khiển vận hành lưới.

### 2.8.2. Bài toán xác định mức thâm nhập tối đa RPV vào lưới

Hàm toán xác định mức thâm nhập tối đa RPV vào lưới:

$$F = \max_{P_{RPV}} \sum_{m \in \mathbb{R}} P_{RPV,m} \quad (2.139)$$

(i) Giới hạn  $HC_{RPV}$  gồm: (1) Giới hạn nhiệt thiết bị; (2) Khả năng chịu dòng ngắn mạch của thiết bị và (3) Tỷ lệ giữa  $P_{\max}$  và  $P_{RPV}$ ; (ii) Ràng buộc của bài toán gồm một hoặc nhiều trong số các điều kiện: Giới hạn điện áp, giới hạn nhiệt, giới hạn dòng ngắn mạch, cân bằng công suất.

Hiện có năm nhóm phương pháp tìm  $HC_{RPV}$ : xác định, ngẫu nhiên, mô phỏng kịch bản và TUH, tạo chuỗi thời gian và tính gián lưới.

Khi tích hợp các giải pháp điều khiển vận hành lưới, bài toán AHC dựa trên phân tích biên và độ nhạy điện áp của các nút lắp RPV. Độ nhạy điện áp thể hiện mức độ bị tác động của điện áp nút RPV khi tăng thêm một lượng công suất phát RPV tại nút đó, nút nhạy nhất là nút dễ vi phạm các ràng buộc nhất nên chiến lược điều khiển vận hành tối ưu cho lưới sẽ dựa vào nút đó. Phân tích biên điện áp giúp



xác định dư địa điện áp có thể được khai thác để tăng thêm công suất thâm nhập RPV mà không vi phạm ràng buộc vận hành [2].

### **2.8.3. Giải pháp nâng cao mức thâm nhập RPV trên lưới MV**

Nâng cao mức thâm nhập RPV trên lưới MV là bài toán tối ưu đa mục tiêu được hỗ trợ thông qua: điều khiển tối ưu công suất phản kháng bằng biến tần thông minh (SI), tích hợp BESS trên lưới, tái cấu trúc lưới, điều khiển điện áp bằng OLTC. Hiệu quả nâng cao mức thâm nhập của các giải pháp lần lượt là: 45%-78%, 50%-111%, 50%-150%, 50%-100%. Tại Việt Nam, OLTC và tái cấu trúc lưới đã được áp dụng hiệu quả để xử lý các vấn đề phát sinh do sự thâm nhập cao RPV.

## **2.9. Học sâu tăng cường và ứng dụng trên lưới MV**

DRL là mô hình AI có cơ chế cập nhật liên tục để giải bài toán biến thiên bằng cách kết hợp (1) Hiệu quả kiểm soát lưới điện của học tăng cường (RL) và (2) khả năng giám sát, phân tích, xử lý dữ liệu và dự báo của mạng nơ-ron sâu (DL).

RL dựa trên nền tảng quá trình quyết định Markov (MDP) với 05 yếu tố chính: (1) Không gian trạng thái  $S$ ; (2) Không gian hành động  $A$ ; (3) Hàm xác suất chuyển trạng thái  $\Psi$ ; (4) Hàm phần thưởng  $R$ ; và (5) Hệ số lợi nhuận  $\gamma$ . Tại một thời điểm  $t$  bất kỳ, một tác tử học máy (agent) sẽ quan sát trạng thái hiện tại của không gian trạng thái ( $s_t \in S$ ) để đưa ra quyết định cho một hành động ( $a_t \in A$ ), hành động này sẽ cập nhật một phần thưởng  $r_t$  và chuyển sang trạng thái mới ( $s_{t+1}$ ). Quá trình học lặp đi lặp lại đến khi tìm được một chiến lược tối ưu  $\pi_{\text{optimal}}$ .

## **CHƯƠNG 3. XÁC ĐỊNH MỨC THÂM NHẬP TỐI ĐA VÀ TỐI ƯU CÔNG SUẤT CẮT RPV – ÁP DỤNG TẠI VIỆT NAM**

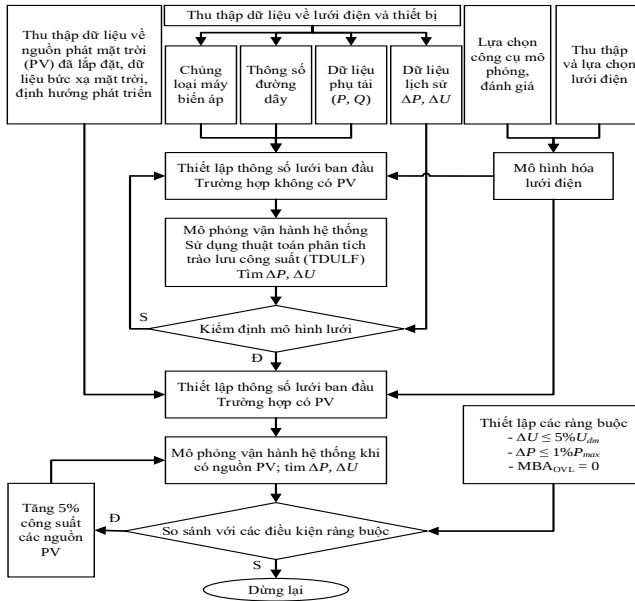
### **3.1. Đặt vấn đề**

Tổng công suất ĐMT dự kiến chiếm hơn 30% cơ cấu nguồn tại Việt Nam vào năm 2050, trong đó RPV được ưu tiên phát triển không giới hạn [3]. Tuy nhiên, phân bố sản lượng không đều theo vùng địa lý gây áp lực đến vận hành khi tỷ lệ phát ngược lên lưới quốc gia vượt 59.0% ở miền Nam và 33,78% ở miền Trung gây quá tải cục bộ trên một số xuất tuyến MV. Thực trạng này buộc cơ quan điều độ phải cắt giảm công suất ĐMT trong nhiều thời điểm.

### **3.2. Tính toán mức thâm nhập tối đa RPV trên lưới MV bằng phương pháp xác định**

Bài toán giải quyết hai vấn đề: Đánh giá tác động của sự thâm nhập RPV đối với tổn thất công suất ( $\Delta P$ ) trên lưới MV và xác định mức thâm nhập tối đa RPV bằng phương pháp xác định trong các điều kiện ràng buộc tĩnh của hệ thống. Công cụ phân tích trào lưu công suất theo miền thời gian (TDULF) được áp dụng trên xuất tuyến 472 C42/DHO của lưới điện phường Pleiku, tỉnh Gia Lai.

#### **3.2.1. Lưu đồ bài toán**



Hình 3.1. Lưu đồ tính toán mức thâm nhập tối đa RPV bằng DEM

### 3.2.2. Thông số đầu vào

Bao gồm: cấp điện (chiều dài, loại cáp, điện áp định mức, vật liệu cách nhiệt, tần số vận hành, điện trở, điện kháng, tiết diện cáp), MBA, dữ liệu lịch sử phụ tải (công suất tác dụng và phản kháng, điện áp, dòng điện), BXMT từ PVGIS.

### 3.2.3. Kết quả và thảo luận

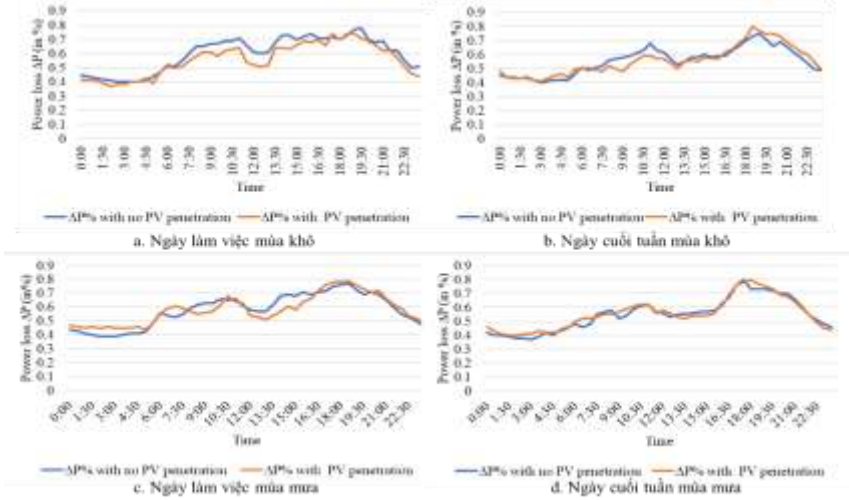
Pleiku có sáu tháng khô và sáu tháng mưa, đặc điểm tiêu thụ điện khác biệt đáng kể giữa hai mùa; Tải sinh hoạt chiếm tỷ trọng cao, biến động theo mùa, ngày trong tuần và giờ trong ngày. Luận án lựa chọn bốn ngày đặc trưng để xem xét tác động của RPV đến tổn thất lưới: ngày làm việc mùa khô (LVK), ngày cuối tuần mùa khô (CTK), ngày làm việc mùa mưa (LVM) và ngày cuối tuần mùa mưa (CTM).

Trong LVK, sự thâm nhập RPV giúp giảm đáng kể  $\Delta P$  của lưới. Khi chưa có RPV,  $\Delta P_{\max} = 0,78\%$  lúc 19:30 và  $\Delta P_{\max} = 0,74\%$  từ 17:30 đến 19:00 khi RPV có RPV. Tại đỉnh BXMT, RPV giúp giảm  $\Delta P$  từ 0,78% xuống 0,52%. Trong CTK,  $\Delta P$  có quy luật tương tự như trường hợp LVK,  $\Delta P_{\max} = 0,56\%$  sau khi lắp RPV.

Trong LVM,  $\Delta P$  dao động phức tạp và bất thường do  $P_{RPV}$  bị biến động do mưa và mây mù; mức tổn thất trung bình gần như không đổi, tối đa đạt xấp xỉ 0,58% trước và sau khi lắp RPV.  $\Delta P$  của trường hợp CTM có quy luật tương tự,  $\Delta P_{\max.bf} = 0,55\%$  và  $\Delta P_{\max.af} = 0,54\%$ . Điều này chứng minh sự tham gia của RPV trên lưới giúp giảm tổn thất lưới, đặc biệt hiệu quả với LVK và CTK.

Trường hợp xấu nhất ( $P_{load.min}$  và  $P_{RPV.max}$ ) cho thấy  $\Delta P \rightarrow \Delta P_{\max}$ , MBA quá tải. Xét ràng buộc: (1)  $\Delta V_{\max} \leq 5\%$ ; (2)  $\Delta P_{\max} \leq 1\%$ ; và (3) Không quá tải MBA, kết quả cho thấy  $\Delta P > 1\%$  tại ngưỡng thâm nhập 85% và tất cả MBA trên xuất

tuyến quá tải khi công suất đặt RPV vượt 135%  $P_{load}$ . Khi  $P_{RPV}$  tăng, dòng làm việc trên đường dây giảm nên  $\Delta P$  giảm theo. Khi  $P_{RPV} > 135\%P_{load}$ , dòng công suất ngược đổ về lưới gây quá dòng trên đường dây làm tăng  $\Delta P$ .



Hình 3.2. Kết quả mô phỏng tổn thất công suất tác dụng

Kết quả chứng minh: (1) Mô hình hợp lý; (2) DEM đơn giản, cơ bản đáp ứng được yêu cầu ước lượng nhanh mức thâm nhập RPV vào lưới; (3) Kiểm soát mức thâm nhập RPV hợp lý giúp cải thiện  $\Delta P$ ; và (4) Kết quả có ý nghĩa thực nghiệm.

### 3.3. Mô hình thuật toán dơi cắt giảm tối ưu công suất RPV cho lưới

Cắt giảm công suất RPV đã xảy ra ở Hoa Kỳ, Đức, Trung Quốc, Chile do cơ sở hạ tầng năng lượng không thể đáp ứng sự thâm nhập nhanh với công suất lớn RPV. Việt Nam cũng phải cắt giảm ĐMT trong một số trường hợp nhưng chưa đủ cơ sở khoa học để xác định mức cắt giảm tối ưu công suất RPV.

#### 3.3.1. Giới thiệu thuật toán dơi

Thuật toán dơi (BA) được dùng để giải các bài toán quy hoạch nguồn DG, điều độ, điều khiển điện áp, cắt giảm RPV và quản lý tắc nghẽn lưới [4] thông qua các điều kiện xấp xỉ: (1) Tất cả dơi định vị bằng tiếng vang trong không gian; (2) Mỗi dơi bay với vận tốc  $v_i$  tại vị trí  $x_i$ , sử dụng tần số cố định  $f_{min}$ , bước sóng  $\lambda$  và độ ồn  $A_0$  để tìm kiếm con mồi; và (3) Độ ồn luôn dương và chỉ thay đổi trong khoảng  $[A_0; A_{min}]$ . Trong quá trình TUH,  $x_i$ ,  $f_i$  và  $v_i$  liên tục được cập nhật.

#### 3.3.2. Xây dựng hàm mục tiêu

Mục tiêu của bài toán là cực tiểu tổng công suất cắt giảm RPV trên lưới

$$F(x) = \sum_{t=7}^{17} \sum_1^{N_{RPV}} P_{m,t}^{cur} = \sum_{t=7}^{17} \sum_1^{N_{RPV}} (P_{RPV,m,t}^{max} - P_{RPV,m,t}^{pen}) \quad (3.1)$$

Trong đó,  $P_{m,t}^{\text{cur}}$ ,  $P_{\text{RPV},m,t}^{\text{max}}$ ,  $P_{\text{RPV},m,t}^{\text{pen}}$  lần lượt là công suất cắt giảm, công suất phát cực đại, và công suất được phép phát tại nút RPV thứ  $m$  tại giờ thứ  $t$ , [kW].

### 3.3.3. Các ràng buộc

– Công suất phát RPV:

$$0 \leq P_{\text{RPV},m,t} \leq P_{\text{RPV},m,t}^{\text{max}} \quad (3.2)$$

– Giới hạn dòng điện trên đường dây: Dòng điện vận hành trên nhánh phân phối ( $I_{op,k}$ ) không được vượt quá dòng chịu tải tối đa của cáp ( $I_k^{\text{max}}$ ).

$$I_k^{\text{max}} \geq I_{op,k} \text{ với } k = 1, 2, \dots, N_{\text{br}} \quad (3.3)$$

– Giới hạn điện áp nút:

$$V_{\min} \leq V_{\text{nút},i} \leq V_{\max} \text{ với } i = 1, 2, \dots, N_{\text{nút}} \quad (3.4)$$

– Phương trình cân bằng công suất:

$$P_0 + \sum_{m=1}^{N_{\text{RPV}}} P_{\text{RPV},m} - \sum_{i=1}^{N_{\text{nút}}} P_{\text{load},i} - \sum_{k=1}^{N_{\text{br}}} P_{\text{loss},k} = 0 \quad (3.5)$$

$$Q_0 + \sum_{m=1}^{N_{\text{RPV}}} Q_{\text{inv},m} - \sum_{i=1}^{N_{\text{nút}}} Q_{\text{load},i} - \sum_{k=1}^{N_{\text{br}}} Q_{\text{loss},k} = 0 \quad (3.6)$$

### 3.3.4. Áp dụng BA vào bài toán cắt giảm cho phát tuyến 471LS Bình Thuận

Xuất tuyến 471LS gồm 582 nút MV, 316 đoạn đường dây, 196 TBA và 2 tụ bù (0,3 MVar/tụ), 10 nguồn RPV nối lưới với tổng công suất 9,28 MWp (09 nguồn 1 MWp, 1 nguồn 0,28 MWp).  $P_{\text{load},\min} = 1,945$  MW tại 11:00 trưa (BXMT đỉnh);  $P_{\text{load},\max} = 5,156$  MW tại 17:00 chiều (BXMT  $\rightarrow$  0). Sự lệch pha giữa thời điểm  $P_{\text{RPV},\max}$  và  $P_{\text{load},\max}$  là nguyên nhân dẫn đến dòng công suất ngược và quá tải.

Mỗi cá thể đại diện một phương án cắt giảm, tương ứng với một vector  $x_i = x_{\text{cur}}$  trong không gian tìm kiếm. Kích thước của không gian có  $d = N_{\text{RPV}} \cdot n_t$  chiều, với  $n_t$  là số thời điểm xét trong ngày. BA sử dụng hàm phạt để cập nhật liên tục lượng phạt vào hàm mục tiêu mỗi khi có cá thể vi phạm ràng buộc.

$$\tilde{F}(x) = F(x) + \omega_V \cdot \sum_{i=1}^{N_{\text{nút}}} \max(V_i - V_{\max}, 0) + \omega_S \cdot \sum_{j=1}^{N_{\text{br}}} \max(S_{ij} - S_{ij}^{\max}, 0) \quad (3.7)$$

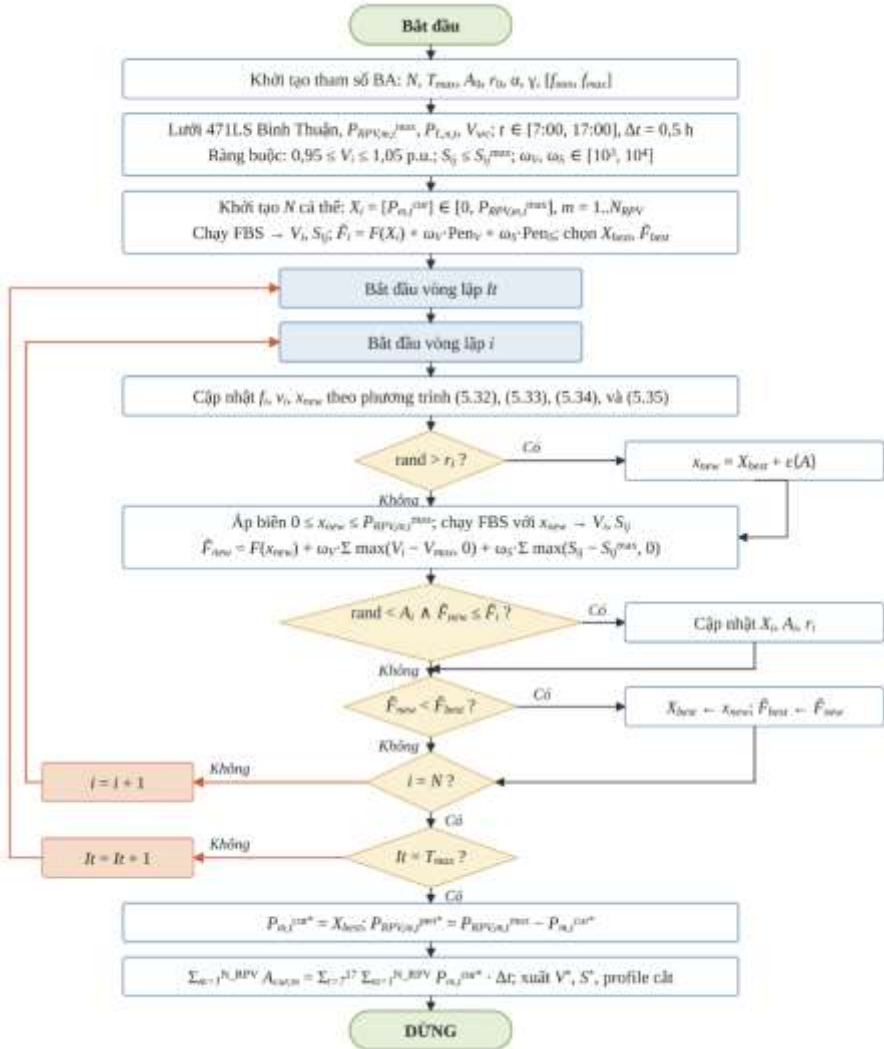
$V_i$  là điện áp tại nút  $i$ , [p.u.];  $S_{ij}$  là công suất trên nhánh  $ij$ , [MVA];  $\omega_V$ ,  $\omega_S$  là hệ số phạt vi phạm các ràng buộc, được chọn trong khoảng  $[10^3; 10^4]$ .

Tham số đầu vào: (1) Kích thước quần thể: 20; (2) Số vòng lặp: 200; (3) Miền tần số xung:  $[0; 2]$ ; (4) Độ ồn ban đầu: 1,0; (5) Tốc độ phát xung ban đầu: 0,5; (6) Hệ số giảm độ ồn: 0,9; và (7) Hệ số tăng tốc độ phát xung: 0,9.

Lưu đồ bài toán được thể hiện ở Hình 3.3.

### 3.3.5. Kết quả và thảo luận

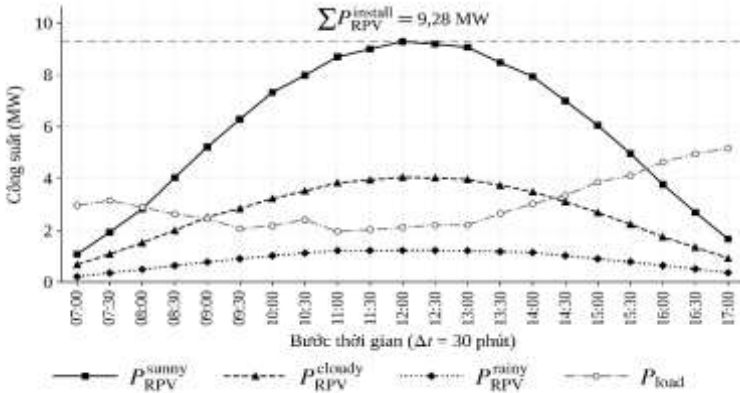
Các trường hợp xét: RPV phát 100% công suất trong trời nắng, 40% công suất khi nhiều mây, 10% công suất lúc trời mưa.



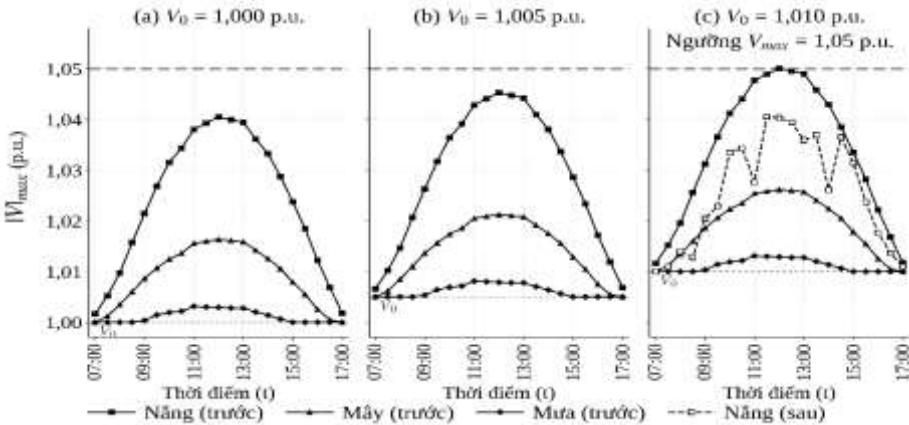
Hình 3.3. Lưu đồ xác định công suất cắt giảm RPV tối ưu bằng BA

– Cắt giảm công suất RPV khi điện áp đầu nguồn dưới 1,010 p.u.

Hình 3.4 thể hiện đường cong  $P_{load}$  và  $P_{RPV}$  trong khoảng thời gian có bức xạ (07:00 đến 17:00). Trong ngày mưa,  $P_{RPV,t,max}^{rainy} = 1,217 \text{ MW}$  lúc 12:00, trên toàn tuyến không xuất hiện quá tải. Trong ngày nhiều mây,  $P_{RPV,t,max}^{cloudy} = 4,043 \text{ MW}$  lúc 12:00, không xuất hiện quá tải và quá áp trên xuất tuyến. Do đó, hai trường hợp trên không cần cắt giảm. Vào ngày nắng, RPV phát tối đa gây quá tải và quá áp, buộc phải cắt giảm. Điện áp đầu nguồn ( $V_0$ ) gây ảnh hưởng đến điện áp toàn lưới nên xét bảy trường hợp: 1,000, 1,005, 1,010, 1,015, 1,020, 1,025, và 1,030 p.u.



Hình 3.4. Đường cong phụ tải và công suất phát RPV trong ngày



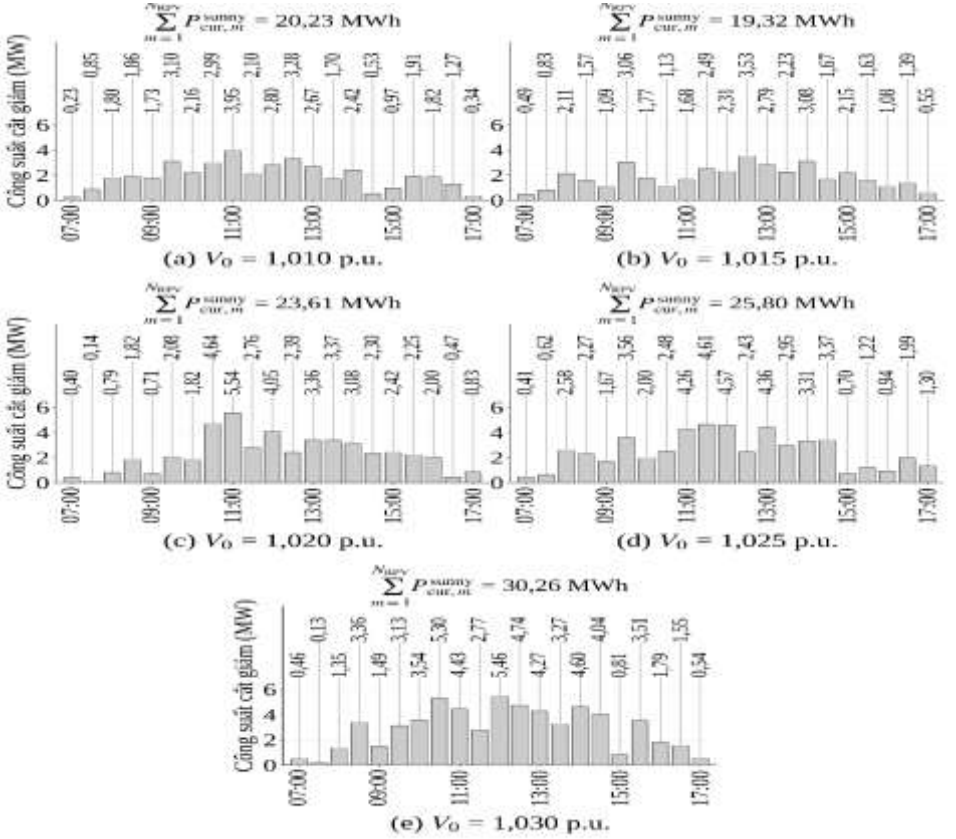
Hình 3.5. Điện áp theo giờ ở 03 điều kiện thời tiết và 03 mức điện áp nguồn

Trong ba trường hợp, RPV không gây quá áp. Tổng phát RPV ngày nắng vượt 308% nhu cầu nên cần xử lý: (1) Cho truyền ngược về thanh cái để mang lợi ích cho khách; (2) Cắt để tránh truyền ngược, lượng dư được chia đều cho các nguồn RPV. Mức  $V_0 < 1.010$  p.u. cho phép khai thác tối đa tiềm năng phát RPV trên xuất tuyến mà không vi phạm chất lượng điện, mức thâm nhập tối đa RPV đạt 190,4%..

– Cắt giảm công suất RPV khi điện áp đầu nguồn từ 1,010 đến 1,030 p.u.

Khi  $V_0 = 1,010$  p.u., tại 12:00 có 25 nút vi phạm điện áp, BA chọn cắt 2,80 MWh để không còn nút vi phạm điện áp. Ngày mây và mưa không xảy ra vi phạm.

Khi  $V_0 = 1,015$ , tại 12:00 có 176 nút vi phạm điện áp, BA cắt chọn lọc 19,32 MWh. Các trường hợp còn lại ( $V_0 = 1,020, 1,025, 1,030$  p.u.), tại 12:00 có lần lượt 353 nút, 466 nút và 353 nút vi phạm, BA cắt chọn lọc 23,61 MWh, 25,79 MWh và 30,27 MWh để đảm bảo không còn vi phạm điện áp.



Hình 3.6. Điện áp theo giờ ở 03 điều kiện thời tiết và 04 mức điện áp nguồn

Kết quả cho thấy BA đã khai thác gần như tối đa biên ràng buộc. Sản lượng cắt giảm không đồng đều ở từng nguồn RPV phản ánh chiến lược chọn lọc của BA là ưu tiên cắt các nguồn nằm gần nút  $V_{max}$  cao nhất (dựa vào độ nhạy để cắt).

## CHƯƠNG 4. TỐI ƯU HÓA METAHEURISTIC

### XÁC ĐỊNH MỨC THÂM NHẬP TỐI ĐA RPV VÀO LƯỚI TRUNG THỂ

#### 4.1. Đặt vấn đề

Điện trở và cảm kháng trên đường dây gây ra  $P_{loss}$  và  $Q_{loss}$ , đồng thời tác động đến  $\Delta V$  lưới.  $\Delta P$  và  $\Delta V$  tỷ lệ thuận với cường độ dòng điện vận hành ( $I_{op,k}$ ). Khi  $P_{load}$  tăng thì kéo theo  $I_{op,k}$ ,  $\Delta P$  và  $\Delta V$  tăng tương ứng. Khi một RPV kết nối vào lưới,  $P_{load}$  thay đổi sẽ kéo theo  $I_{op,k}$ ,  $\Delta P$  và  $\Delta V$  thay đổi.

#### 4.2. Mô hình COOA tính toán mức thâm nhập tối đa RPV trên lưới

##### 4.2.1. Xây dựng hàm mục tiêu

Hàm mục tiêu của bài toán tối đa mức thâm nhập RPV vào lưới như sau:

$$F = \min \sum_{k=1}^{N_{br}} P_{loss,k} \quad (4.1)$$

$P_{loss,k}$  là tổn thất công suất nhánh  $k$ , [kW]; và  $N_{br}$  là số xuất tuyến trên lưới.

#### 4.2.2. Các ràng buộc

– Giới hạn điện áp nút: thỏa mãn phương trình (3.4);

– Vị trí lắp đặt nguồn RPV: nút bất kỳ ngoài nút số 1

$$2 \leq L_{RPV,p} \leq N_{nút} \text{ với } p = 1, 2, \dots, N_{nút} \quad (4.2)$$

– Giới hạn tổng công suất lắp đặt RPV:

$$\sum_{m=1}^{N_{RPV}} P_{RPV,m}^{đặt} \leq \sum_{i=1}^{N_{nút}} P_{load,i} + \sum_{k=1}^{N_{br}} P_{loss,k} \quad (4.3)$$

– Giới hạn dòng điện trên đường dây: thỏa mãn phương trình (3.3);

– Giới hạn công suất phản kháng và hệ số công suất phát RPV:

$$PF^{\min} \leq PF_{RPV,m} \leq PF^{\max} \quad (4.4)$$

$$\sum_{m=1}^{N_{RPV}} Q_{inv,m} \leq \sum_{i=1}^{N_{nút}} Q_{load,i} \leq \sum_{k=1}^{N_{br}} Q_{loss,k} \quad (4.5)$$

– Phương trình cân bằng công suất: thỏa mãn phương trình (3.5) và (3.6).

#### 4.2.3. Áp dụng thuật toán COOA tối đa hóa mức thâm nhập RPV trên lưới MV

COOA mô phỏng qua hai giai đoạn: hỗn loạn và đồng bộ. COOA khác các MH khác ở cơ chế cập nhật và chọn lọc giá trị tốt nhất. COOA sử dụng bốn cơ chế cập nhật vị trí trong quá trình TUH: (1) Hỗn loạn; (2) Tâm điểm; (3) Đo bám cá thể đầu đàn; và (4) Cập nhật đầu đàn [5]. Lưu đồ áp dụng được thể hiện ở Hình 4.1.

Quần thể ban đầu được khởi tạo ngẫu nhiên bằng phương trình:

$$X_i = \text{random}(1, D) \cdot (X^{\max} - X^{\min}) + X^{\min}; i = 1, \dots, \text{No}_p \quad (4.6)$$

Trong đó, tối đa 20% quần thể thuộc nhóm cá thể đầu đàn (LC).

Biến điều khiển của thuật toán gồm công suất đặt, hệ số công suất phát của mỗi RPV và vị trí lắp đặt các RPV trên lưới. Mỗi nghiệm  $X_i$  của thuật toán có dạng:

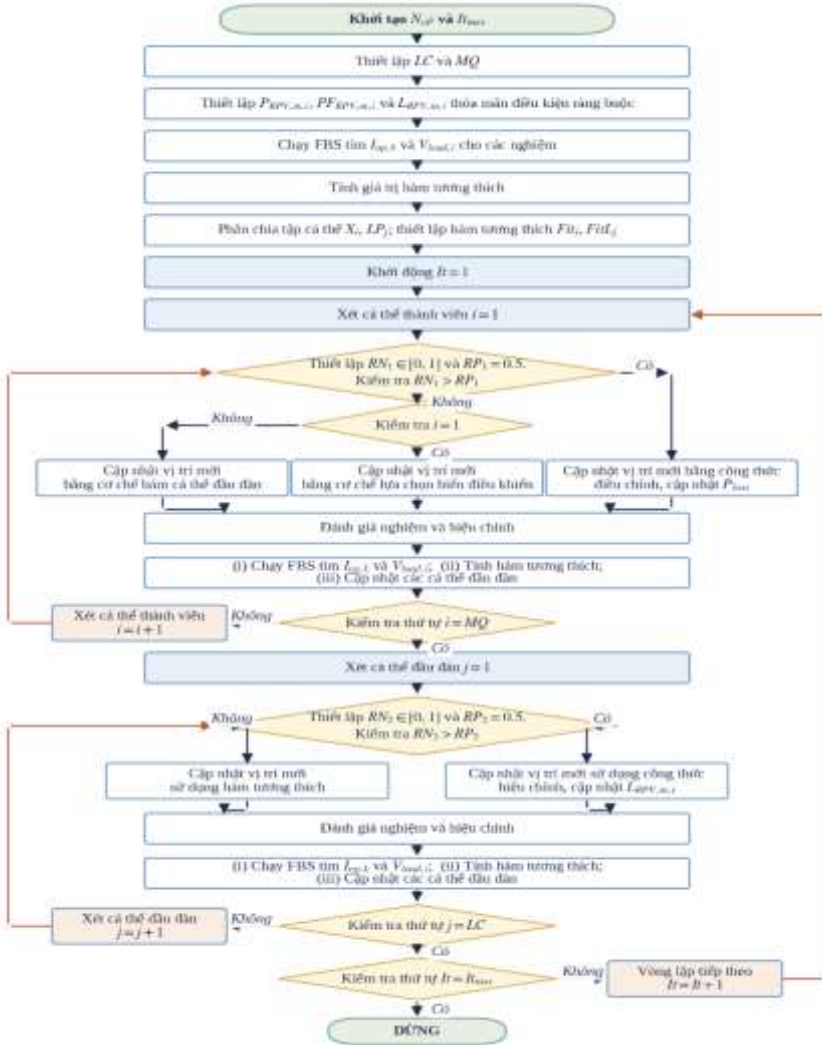
$$X_i = [P_{RPV,m,i}, PF_{RPV,m,i}, L_{RPV,m,i}]; m = 1, \dots, N_{RPV} \quad (4.7)$$

Thuật toán quét ngược – xuôi được chạy để tìm biến phụ thuộc  $P_{ij}, Q_{ij}, V_j, I_{op,k}$ . Kết quả tìm được dùng để tính  $P_{loss,k}, \Delta V_i$  và  $\Delta I_{op,k}$ . Hàm tương thích nghiệm  $X_i$ :

$$Fit_i = P_{loss,i} + \beta \sum_{k=1}^{N_{br}} (\Delta I_{op,k})^2 + \beta \sum_{i=1}^{N_{nút}} (\Delta V_i)^2 \quad (4.8)$$

20% nghiệm tương thích tốt được đưa vào nhóm LC, quá trình lặp chạy liên tục đến khi tìm được cá thể tốt nhất. Mỗi lần ra kết quả, nghiệm được cập nhật như sau:





Hình 4.1. Lưu đồ xác định mức thâm nhập tối đa RPV vào lưới bằng COOA

$$L_{RPV,m,i}^{new} = \begin{cases} L_{RPV,m,i}^{new} & \text{if } L_{RPV,m,i}^{new} \in [2; N_{nút}] \\ N_{nút} & \text{if } N_{nút} < L_{RPV,m,i}^{new} \\ 2 & \text{if } L_{RPV,m,i}^{new} < 2 \end{cases} ; m = 2, \dots, N_{nút} \quad (4.9)$$

$$P_{RPV,m,i}^{new} = \begin{cases} P_{RPV,m,i}^{new} & \text{if } P_{RPV}^{min} \leq P_{RPV,m,i}^{new} \leq P_{RPV}^{max} \\ P_{RPV}^{min} & \text{if } P_{RPV}^{min} > P_{RPV,m,i}^{new} \\ P_{RPV}^{max} & \text{if } P_{RPV}^{max} < P_{RPV,m,i}^{new} \end{cases} ; m = 1, \dots, N_{RPV} \quad (4.10)$$

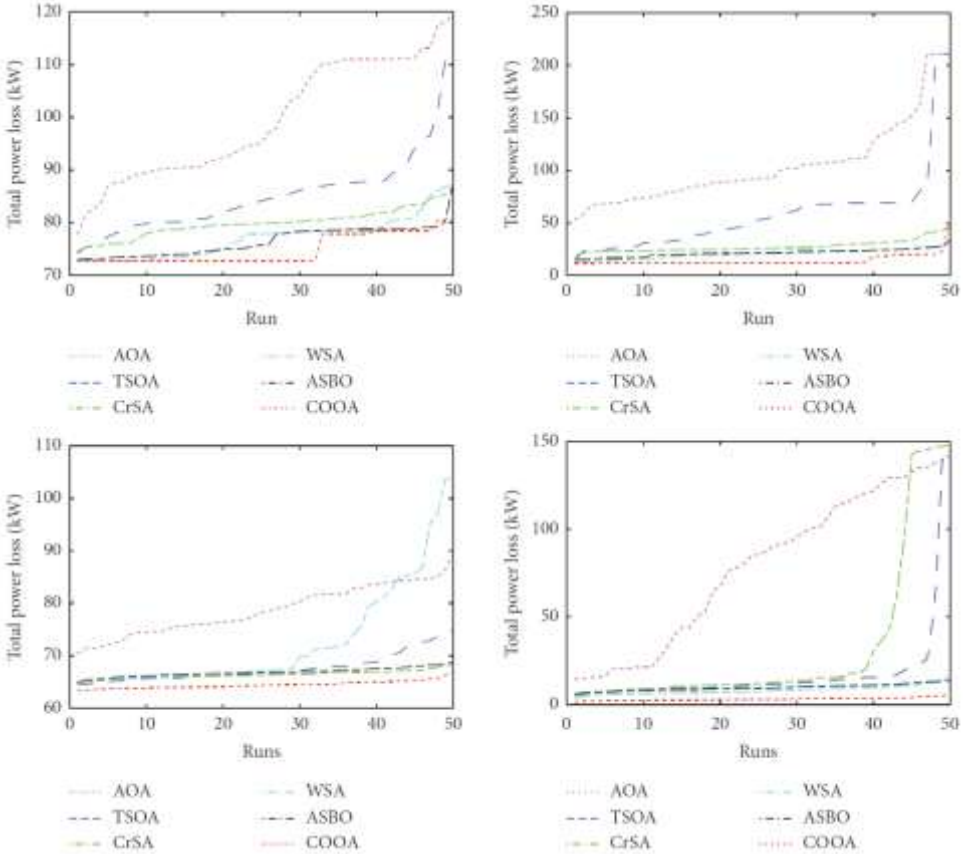
$$PF_{RPV,m,i}^{new} = \begin{cases} PF_{RPV,m,i}^{new} & \text{if } PF_{RPV}^{min} \leq PF_{RPV,m,i}^{new} \leq PF_{RPV}^{max} \\ PF_{RPV}^{min} & \text{if } PF_{RPV}^{min} > PF_{RPV,m,i}^{new} \\ PF_{RPV}^{max} & \text{if } PF_{RPV}^{max} < PF_{RPV,m,i}^{new} \end{cases} \quad (4.11)$$

Cá thể đầu đàn sử dụng cơ chế xác định vị trí tốt nhất để cập nhật vị trí.

Lưới mô phỏng IEEE 33 và 69 nút được tham khảo từ [6] và [7]. Mỗi lưới mô phỏng 4 trường hợp: (1)  $C_1S_1$  và  $C_1S_2$ : Cố định  $N_{RPV}$  và  $PF_{RPV}$ , tìm  $L_{RPV}$  và  $P_{RPV}^{đặt}$ ; (2)  $C_2S_1$  và  $C_2S_2$ : Cố định  $N_{RPV}$ , tìm 03 giá trị còn lại; (3)  $C_3S_1$  và  $C_3S_2$ : Cố định  $PF_{RPV}$ , tìm 03 giá trị còn lại; và (4)  $C_4S_1$  và  $C_4S_2$ : Tìm ngẫu nhiên 04 giá trị.

#### 4.2.4. Kết quả và thảo luận

– Kết quả mô phỏng trên mạng tia 33 nút

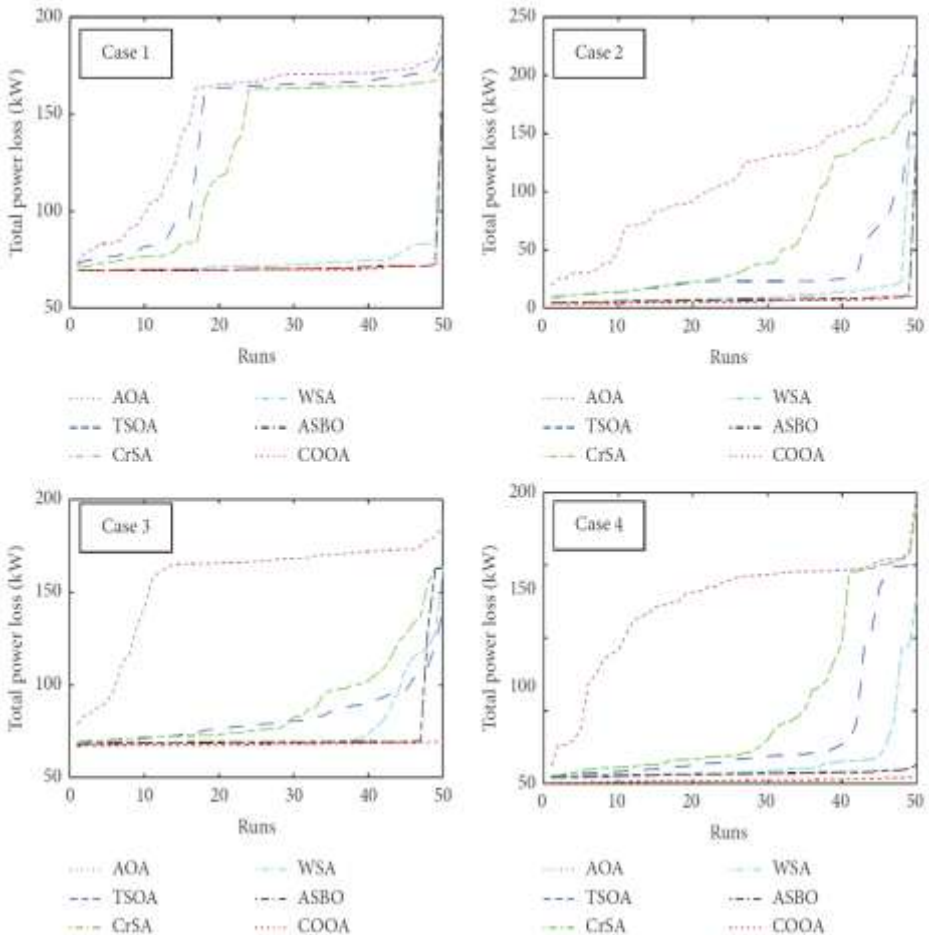


Hình 4.2. So sánh kết quả mô phỏng các kịch bản trên lưới 33 nút

Hình 4.2 cho thấy: (1) Tổn thất từ COOA thấp hơn kết quả của các MH khác; (2) Tổn thất cực tiểu từ COOA ổn định hơn với 30 lần mô phỏng ra cùng kết quả. COOA được so sánh với 23 MH khác về tổng công suất RPV thâm nhập, tổng tổn thất lưới, tỷ lệ cắt giảm tổn thất trên lưới và thời gian xử lý thuật toán. Tỷ lệ  $\% \Delta P_{re}$

của COOA ở  $C_1S_1$ ,  $C_2S_1$  đạt 65,5% và 94,4%; tỷ lệ thâm nhập đạt 75,1% và 89,3%. Thời gian mô phỏng COOA cao hơn từ 02 đến 10 lần so với các MH khác, trung bình 8,3 giây/lần chạy. Tương tự,  $C_3S_1$  của COOA cho kết quả tổn thất thấp nhất,  $\% \Delta P_{re}$  giảm 70% so với trước tích hợp RPV; đề xuất tích hợp 09 RPV vào mạng điện với công suất và vị trí khác nhau, các nút lắp đặt tối ưu gồm 3, 7, 10, 16, 21, 24, 25, 30, 32; khác 03 vị trí so với ISOSA. Công suất thâm nhập tối đa đạt 93,5%. Trong  $C_4S_1$ , Tổng tổn thất tính toán là 1,66 kW, giảm 99,2% so với trường hợp cơ sở. Thời gian chạy mô phỏng mất 34 giây. COOA đề xuất lắp đặt 09 RPV tại các nút 6, 8, 14, 18, 21, 24, 25, 30 và 32 (khác 04 vị trí so với ISOSA). Mức thâm nhập tối đa đạt 103,7%. Có thể khẳng định COOA giải quyết bài toán đặt ra rất hiệu quả.

– Kết quả mô phỏng trên mạng tia 69 nút



Hình 4.3. So sánh kết quả mô phỏng các kịch bản trên lưới 69 nút

Hình 4.3 thể hiện: (1) Tổn thất trên lưới nhờ TUH bằng COOA thấp hơn kết quả các MH khác cho trường hợp  $C_1S_2$ ,  $C_2S_2$ ,  $C_3S_2$  và  $C_4S_2$ ; (2) Kết quả tổn thất theo

COOA không có sự khác biệt đáng kể trong các lần chạy, COOA ổn định hơn. So với trường hợp cơ sở, COOA cắt giảm 69,14% tổn thất ( $C_1S_2$ ) và 98,1% ( $C_2S_2$ ). Thời gian mô phỏng của COOA gần tương đồng với các MH khác (~10-20 giây/lần chạy). Mức thâm nhập tối đa cho hai trường hợp đầu lần lượt là 65,2% và 77,5% so với nhu cầu tải. Đối với hai trường hợp còn lại, tỷ lệ  $\% \Delta P_{re}$  nhờ COOA thấp hơn các MH khác, dao động từ 0,17% đến 15,10% ( $C_3S_2$ ) và từ 46,20% đến 95,39% ( $C_4S_2$ ); thời gian mô phỏng từ 30–40 giây/lần chạy. COOA đề xuất 09 vị trí lắp đặt RPV cho trường hợp  $C_3S_2$  trong khi các MH khác chỉ đề xuất 07 vị trí. Tương tự, COOA đề xuất lắp đặt 09 RPV cho trường hợp  $C_4S_2$ . Mức thâm nhập tối đa ở hai trường hợp khó nhất này lần lượt là 84,6% và 114,8%.

Có thể khẳng định việc áp dụng COOA để tối đa hóa mức thâm nhập RPV vào lưới MV là phù hợp, khả thi và có độ tin cậy. Kết quả tối ưu từ thuật toán chứng minh mức thâm nhập RPV vào lưới trong điều kiện tĩnh, không có điều khiển đạt trên 65% tùy kịch bản, trong đó kịch bản tốt nhất đạt đến 115%.

## **CHƯƠNG 5. ỨNG DỤNG MÔ HÌNH DRL NÂNG CAO KHẢ NĂNG THÂM NHẬP RPV VÀO LƯỚI PHÂN PHỐI TRUNG THỂ**

### **5.1. DRL và bài toán nâng cao mức thâm nhập RPV vào lưới MV**

DRL là giải pháp học máy tăng cường có thể quan sát liên tục trạng thái lưới điện và tự thích ứng thông qua quá trình học tương tác để xây dựng chiến lược điều khiển vận hành lưới. DRL được ứng dụng để xử lý bài toán ổn định hệ thống điện [8], tối ưu hóa lưới, xây dựng kịch bản vận hành trực tuyến, tối ưu hóa vận hành lưới bằng cắt tải đỉnh và dịch chuyển tải [9], kiểm soát điện áp lưới [10], quản lý năng lượng trong siêu vi lưới đa nguồn [11], kiểm soát an toàn [12]. Các mô hình TUH dựa trên DRL có các ưu điểm: (1) Không cần xây dựng mô hình; (2) Phản ứng thời gian thực với biến động lưới và môi trường; (3) Chiến lược học và ràng buộc được mã hóa trong hàm thưởng; (4) TUH đa mục tiêu và xử lý ràng buộc tốt. Tuy nhiên, nghiên cứu ứng dụng DRL trong lưới MV còn hạn chế.

### **5.2. Xây dựng bài toán nâng cao mức thâm nhập RPV vào lưới MV**

#### **5.2.1. Xây dựng hàm mục tiêu**

- Mục tiêu cực đại  $HC_{RPV}$ :

$$F_1 = \max \sum_{t=0}^{23} \sum_{m \in \mathbb{R}} P_{RPV}(m, t, a) \quad (5.1)$$

- Mục tiêu cực tiểu tổn thất công suất:

$$F_2 = \min \sum_{t=0}^{23} \sum_{k \in \mathbb{Q}} P_{loss}(k, t, a) \quad (5.2)$$

- Mục tiêu cực tiểu chi phí vận hành OLTC:

$$F_3 = \min \sum_{t=0}^{23} |\Delta tap(t, a)| \quad (5.3)$$

$\mathbb{R}$  là tập hợp nút lắp RPV trên lưới;  $P_{RPV}(m, t, a)$ ,  $P_{loss}(k, t, a)$  là công suất RPV thực tế tại nút  $m$  và tổn thất nhánh  $k$  ở giờ thứ  $t$  dưới tác động của hành động  $a$  từ DRL, [kW];  $\mathbb{Q}$  là tập hợp nhánh dây trên lưới; và  $\Delta tap(t, a)$  là số lần thay đổi nấc phân áp OLTC dưới tác động của hành động  $a$  từ DRL

### 5.2.2. Các ràng buộc

- Giới hạn điện áp nút: thỏa mãn phương trình (3.4);
- Giới hạn dòng điện trên đường dây: thỏa mãn phương trình (3.3);
- Ràng buộc trào lưu công suất:

$$P_{gen,i} - P_{load,i} + P_{RPV,m} = V_i \cdot \sum_{j \in \Omega_N} V_j (G_{ij} \cdot \cos \theta_{ij} + B_{ij} \cdot \sin \theta_{ij}) \quad (5.4)$$

$$Q_{gen,i} - Q_{load,i} \pm Q_{inv,m} = V_i \cdot \sum_{j \in \Omega_N} V_j (G_{ij} \cdot \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cdot \cos \theta_{ij}) \quad (5.5)$$

- Khả năng điều chỉnh của SI:

$$P_{inv}^2(m, t, a) + Q_{inv,m}^2(m, t, a) \leq S_{inv,m}^2(m, t, a) \quad (5.6)$$

- Giới hạn nấc phân áp OLTC:

$$-8 \leq tap \leq +8 \quad (5.7)$$

$$|\Delta tap(t, a)| \leq 1 \quad (5.8)$$

### 5.2.3. Lưu đồ giải thuật

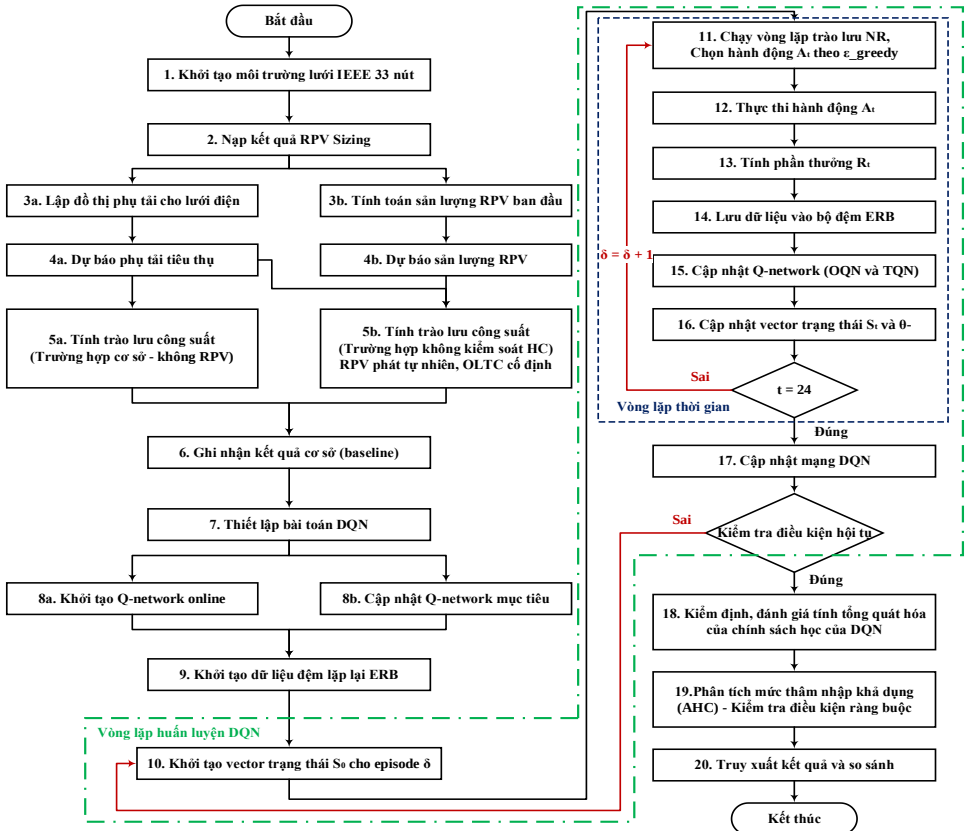
Lưu đồ giải thuật được thể hiện ở Hình 5.1.

### 5.2.4. Kết quả và thảo luận

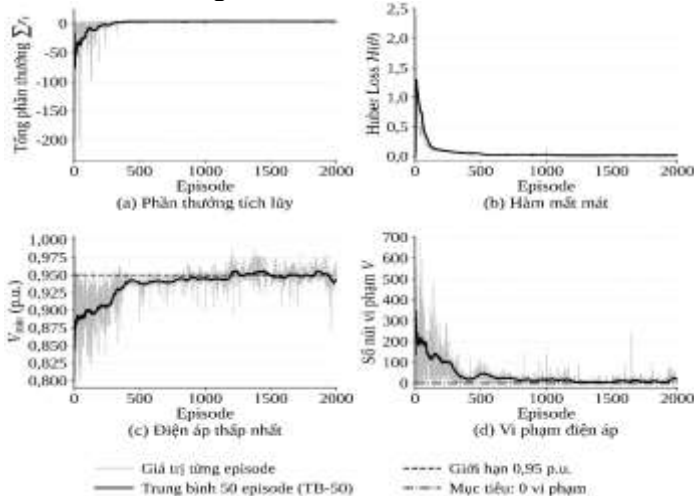
- Kết quả huấn luyện DDQN

Phần thưởng dao động mạnh trong 250 vòng lặp đầu, từ vòng lặp 355 thì không còn âm chứng tỏ phần thưởng nhờ RPV đã vượt tổng phạt. Định  $\mathcal{H}(\theta) = 2.34$  ở vòng lặp thứ 5 và giảm 95% trong 250 vòng lặp tiếp theo cho thấy tác tử học rất hiệu quả.  $V_{min, worst} = 0.7956$  (sụt 20,4% so với  $V_0$ ) tại vòng lặp 40 do tác tử chọn ngẫu nhiên hành động giảm  $tap_{OLTC}$  và điều khiển sai SI tại giờ cực đoạn.  $V_{min}$  dao động quanh 0.95 p.u. từ vòng lặp 1250. Sau 500 vòng lặp, số lần vi phạm giảm còn ~30% tổng số lần xét, tác tử bắt đầu biết tránh vi phạm  $V$ . Sau 1000 vòng lặp giảm còn 16% chứng minh quá trình huấn luyện có hiệu quả, học đúng.

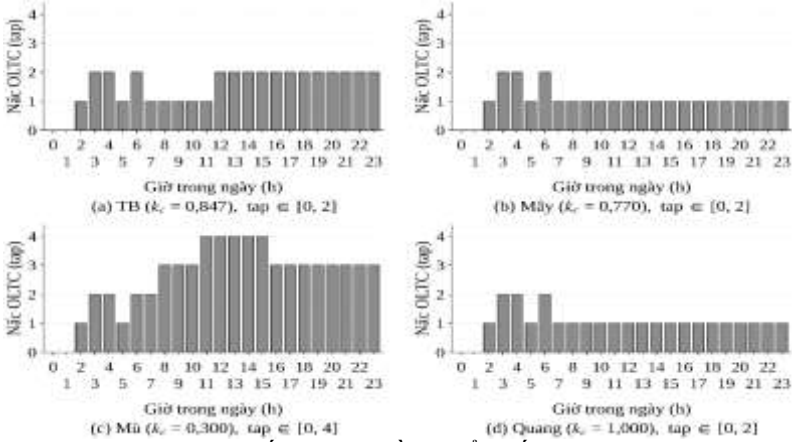
Lúc nửa đêm,  $tap_{OLTC} = 0$ ,  $Q_{inv} = P_{RPV} = 0$ , không cần điều khiển. Lúc 07:00, tải tăng nhanh hơn RPV,  $tap_{OLTC} = +1$  cho KB TB, +2 cho KB mây mù, toàn bộ RPV bơm  $Q_{inv}$  vào lưới để nâng  $V_{min}$ . Lúc giữa trưa, bơm  $Q_{inv}$  trên nhánh chính. Lúc 19:00,  $tap_{OLTC} = +2$  cho KB TB, +3 cho KB mây mù, và +1 cho hai KB còn lại; toàn bộ RPV bơm  $Q_{inv}$  để giảm tổn thất. Chiến lược: khi  $P_{RPV}$  tăng thì  $tap_{OLTC}$  giảm và ngược lại; bơm  $Q_{inv}$  liên tục trong ngày tại 9 nút RPV là tối ưu; bơm  $Q_{inv}$  trên nhánh chính tại  $t = 01:00$  giờ, 11:00 giờ, 14:00 giờ, và 16:00 giờ là tinh chỉnh tại 03 nút nhạy nhất (7, 16, 30); hấp thụ  $Q_{sys}$  trên nhánh chính tại  $t = 02:00$  giờ, 03:00 giờ khi điện áp lưới tăng; và không bao giờ hấp thụ  $Q_{sys}$  từ lưới.



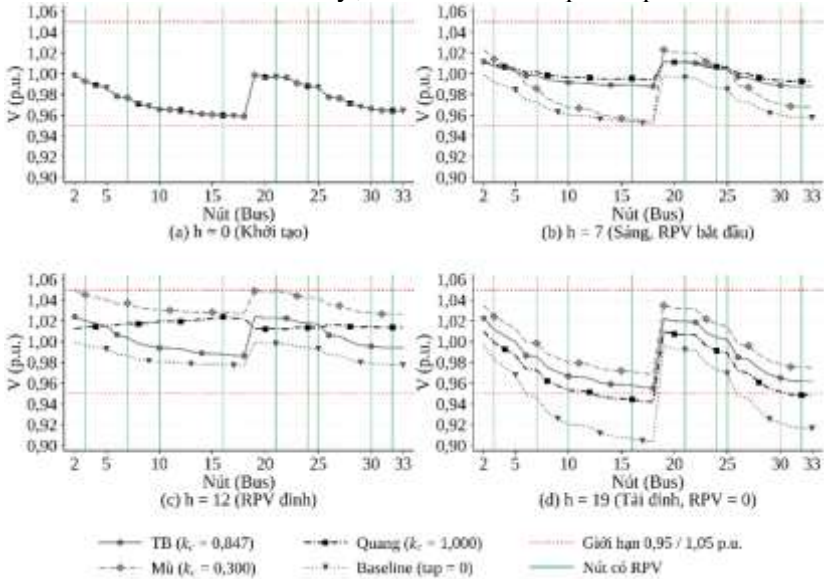
Hình 5.1. Lưu đồ giải thuật bài toán tối ưu đa mục tiêu đề xuất



Hình 5.2. Kết quả huấn luyện DDQN



Hình 5.3. Huấn luyện điều khiển nấc phân áp OLTC



Hình 5.4. Biên dạng điện áp lưới ở 4 giờ quan trọng

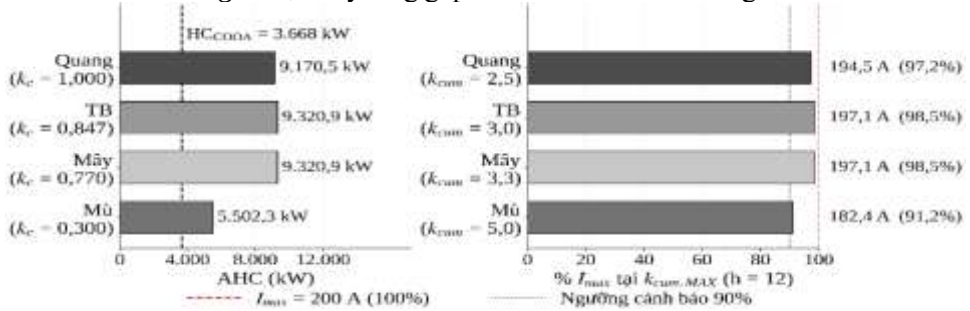
- Kết quả phân tích độ nhạy và biên điện áp tại điểm vận hành DRL

Nút 16 là nút nhạy điện áp nhất nhưng là nút có biên điện áp lớn nhất, đây là nút cơ sở để xác định AHC của lưới và định hướng chiến lược điều khiển DDQN: ưu tiên điều khiển SI hấp thụ  $Q_{inv}$  tại nút 16 và các nút RPV khác trên nhánh dài nhất trong các giờ bức xạ cao, xử lý nút 16 trước. Nút 21 có biên hẹp nhất nên cần tăng bơm  $Q_{inv}$  để duy trì điện áp nhánh 2-19-20-21 trong trường hợp RPV đạt đỉnh – tải cao. Tổng AHC tính độc lập tại 9 nút đạt  $\sim 23.077$  kW vào giữa trưa, nhưng không có nghĩa là AHC đạt đến giá trị này vì chưa xét đến khả năng đáp ứng của lưới.

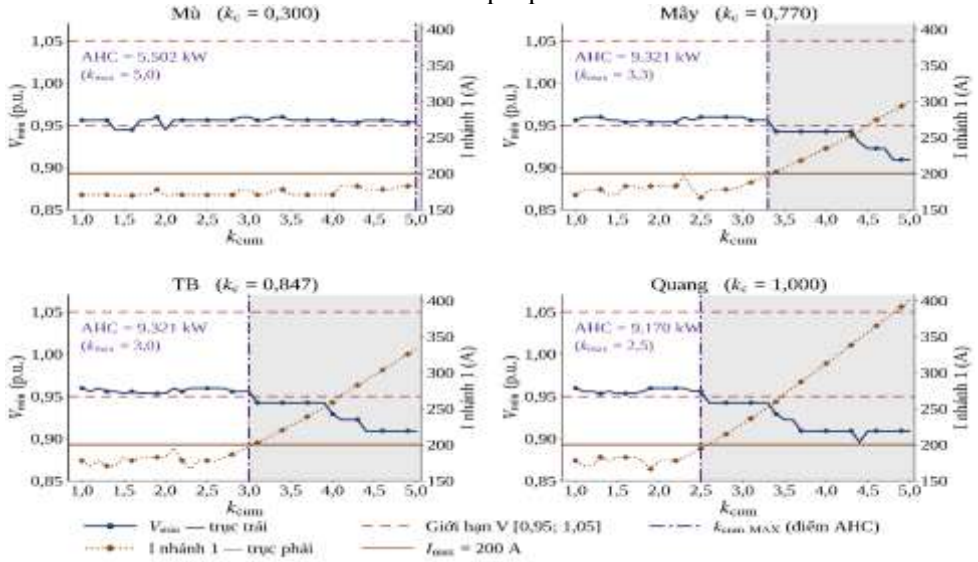
- Kết quả phân tích AHC với ràng buộc điện áp và nhiệt đường dây



Ràng buộc  $V$  và  $I$  phải cùng thỏa mãn để xác định  $k_{cum,max}$  mà tại đó AHC RPV đạt tối đa. KB trời quang, TB, và mây hội tụ về  $AHC = 9320,9$  [kW]; đây là vùng giới hạn mà DDQN có thể giữ hệ thống an toàn trước khi xảy ra một trong hai vi phạm; cũng là giới hạn thâm nhập tối đa công suất RPV vào lưới mà DDQN có thể điều khiển, giới hạn này tăng gấp 2,54 lần so với khả năng tối ưu của COOA.



Hình 5.5. Kết quả phân tích AHC



Hình 5.6. Kết quả phân tích quét gia số

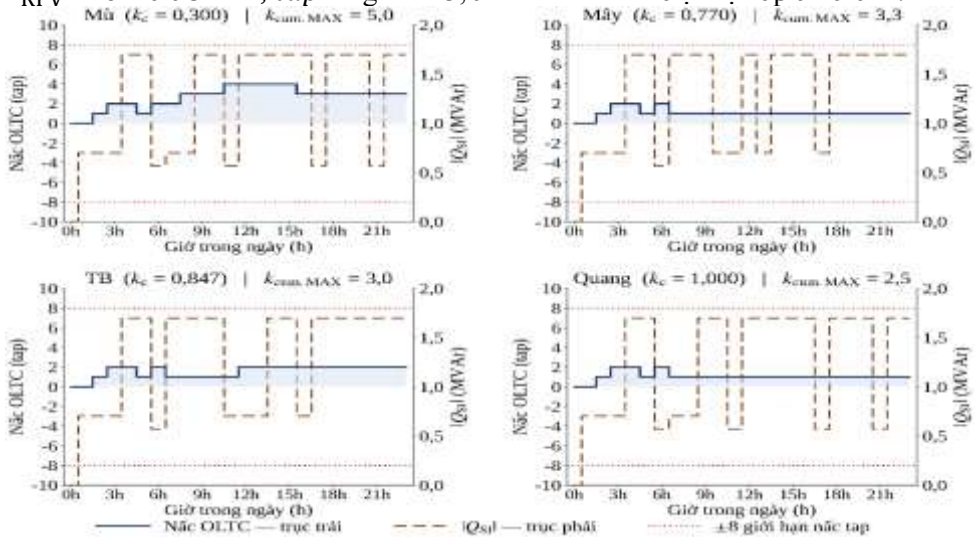
Ở Hình 5.5a, tất cả KB vượt đường tham chiếu 3.668,2 [kW], AHC của mỗi KB thể hiện ngưỡng vật lý của lưới, mức thâm nhập RPV không thể vượt qua giá trị này để tránh quá tải nhánh gốc. Ở biểu đồ thứ hai, đường tham chiếu 100% là ngưỡng giới hạn nhiệt và đường 90% là ngưỡng cảnh báo an toàn, dòng  $I_{max}$  của mỗi KB không nên vượt quá đường 90% để hạn chế rủi ro vi phạm  $I$  khi nhiệt độ môi trường tăng cao. Lúc này, AHC thực tế chỉ đạt 204 – 231% so với mức cơ sở, tương ứng mức tăng thâm nhập từ 121 – 147%.

Mỗi biểu đồ ở Hình 5.6 tương ứng một KB  $k_c$ , mỗi điểm trên biểu đồ thể hiện 24 giờ mô phỏng, mỗi điểm vi phạm thể hiện ít nhất 1/24 giờ vi phạm một trong



hai ràng buộc. KB mù không biến động, vi phạm phi đơn điệu ở  $k_{cum} > 2$  do độ nhạy chính sách điều khiển của DDQN. KB mù không có rủi ro tràn công suất ngược. KB mây duy trì ổn định trên 0,95 [p.u.] nhưng sụp đột ngột sau  $k_{cum} = 3$  và không phục hồi. KB TB có xu hướng tương tự KB mây nhưng mất ổn định sớm hơn (từ  $k_{cum} = 2,6$ ),  $I_{TB}$  tăng tuyến tính và cắt ngưỡng  $I_{max}$  tại  $k_{cum} = 3,1$ . KB quang vi phạm đồng thời hai ràng buộc tại  $k_{cum} = 2,6$ , DDQN phải kích hoạt hấp thụ  $Q_{inv,max}$  sớm hơn để kiểm soát quá áp. Kết quả khẳng định: (1) Vi phạm V-I xảy ra đồng thời, không có thứ tự ưu tiên; (2)  $V_{min}$  giảm nhanh khi  $k_c$  lớn – chứng tỏ khi SI bão hòa hấp thụ thì DDQN mất khả năng điều khiển, OLTC mất tác dụng.

Mỗi biểu đồ Hình 5.7 gồm 6 giai đoạn: (1) 01:00–03:00, 4 KB tăng *tap* từ 0 đến +1 (02:00) và +2 (03:00) để đáp ứng điện áp thấp giữa đêm, SI bơm  $Q_{inv}$  vào nút 7, 16, 30 để bù áp; (2) 03:00–07:00, *tap* 4 kích bản duy trì mức +2, SI bơm  $Q_{inv}$  vào 9 nút để bù áp lúc tải thấp tự nhiên. Đến 06:00 (có RPV), SI hấp thụ một phần  $Q_{inv}$  để hạn chế quá áp cục bộ tại các nút gần RPV; (3) 07:00–10:00,  $HC_{RPV}$  tăng từ 28,8% đến 69,5%, *tap* vẫn giữ mức 2, các SI hấp thụ  $Q$  trên nhánh chính để cân bằng điện áp. 4 kích bản có cùng hành động; (4) 10:00–13:00, KB mây chưa xuất hiện dòng công suất ngược nhưng 3 KB còn lại thì có. *tap*<sub>OLTC</sub> của KB mây hạ xuống +1 vào 11:00 và duy trì đến 13:00, các SI không tác động. *tap*<sub>OLTC</sub> của 3 kích bản còn lại hạ liên tiếp 3 nấc xuống -1, 9 SI hấp thụ tối đa để hạn chế vi phạm V-I; (5) Từ 13:00 đến 17:00:  $P_{RPV}$  giảm dần, *tap* của các kích bản tăng dần đến +1 lúc 17:00, SI chuyển từ hấp thụ về không tác động; và (6) Từ 17:00 đến 00:00,  $P_{RPV} = 0$  ở tất cả KB, *tap* tăng lên +3, 9 SI bơm để hỗ trợ điện áp tải thuận.



Hình 5.7. Kết quả phân tích lịch trình OLTC và SI

Từ đó khẳng định: (1) DDQN đã học được chiến lược điều khiển hợp lý và có dự phòng an toàn; (2) Ràng buộc vật lý về thời gian tác động giữa hai lần liên tiếp của OLTC là ràng buộc cứng quyết định AHC; (3) 09 SI hấp thụ  $Q_{inv,max}$  trong

suốt giai đoạn 4 là rủi ro quá tải cục bộ trên nhánh gần nguồn; và (4) OLTC không thể bảo hòa. Nếu tích hợp ràng buộc nhiệt vào hàm thường, mức thâm nhập sẽ tăng.

### 5.2.5. **Đánh giá, so sánh kết quả**

Về phương pháp: (1) DDQN lựa chọn hành động rời rạc phù hợp với tính chất cơ học của OLTC, sử dụng tác tử để xử lý 24.213 tham số cho mạng nơ-ron để giảm tính toán, nhỏ hơn nhiều so với các nghiên cứu [13], [14], [15], [16], [17] và [18]; (2) 6/7 mô hình sử dụng lưới chuẩn IEEE 33 nút có cùng thông số hệ thống và ràng buộc; (3) DDQN sử dụng 50 kịch bản RPV và phụ tải bảo đảm bao phủ kịch bản vận hành; (4) Duy nhất DDQN sử dụng 4 KB BXMT để đánh giá AHC và bổ sung ràng buộc  $I$ . Kết quả mô phỏng chứng minh hiệu quả của 07 nghiên cứu trong việc loại bỏ vi phạm  $V$ , giảm tổn thất và chi phí vận hành. Xét kết quả phân tích AHC, DDQN được so sánh với [19], [20] và [21] do sự tương đồng về phương pháp và điều kiện mô phỏng. Khả năng cải thiện mức thâm nhập tăng từ 60 – 200% tùy chiến lược điều khiển. [19] đạt AHC 229% khi sử dụng nhiều thiết bị điều khiển nhất nhưng cho phép vi phạm  $V$  rất nhỏ và không xét ràng buộc  $I$ . [20] không điều khiển điện áp toàn lưới mà dùng PSO tìm tập điểm thiết lập tối ưu Volt-Var cho từng nút RPV giúp lưới đạt mức thâm nhập tĩnh 174,8% và AHC nâng thêm 44,3%; [21] phân tích toàn diện các giải pháp điều khiển có tính đến cực tiểu chi phí khách hàng,  $HC_{RPV}$  đạt 113% và AHC cải thiện 49,2%. DDQN đề xuất đạt mức nâng thâm nhập từ 121 – 147% so với mức cơ sở của COOA.

## CHƯƠNG 6. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

### 6.1. **Kết luận**

Luận án đã nghiên cứu, phân tích tác động của RPV đến dòng điện, điện áp và tổn thất khi thâm nhập cao vào lưới MV, đồng thời đề xuất hai mô hình xác định khả năng thâm nhập tối đa công suất RPV và một mô hình cắt giảm chọn lọc công suất RPV để bảo đảm vận hành an toàn, kinh tế. Bốn bài toán được thực hiện:

Bài toán 1 – Nghiên cứu tác động của RPV vào lưới MV – có ý nghĩa thực tiễn khi ĐMT thâm nhập nhanh vào lưới MV nhưng điện lực địa phương chưa đủ kinh nghiệm vận hành lưới tích hợp. 07 RPV có công suất đặt ~650 kWp được lắp trên lưới. Kết quả chứng minh sự thâm nhập RPV vào lưới ở mức độ hợp lý giúp cải thiện hiệu quả  $\Delta P$  của lưới. Trong ràng buộc giả định của bài toán, RPV thâm nhập trên 85% gây vượt ngưỡng  $\Delta P$ , đạt 135% làm quá tải toàn bộ MBA trên xuất tuyến.

Bài toán 2 có giá trị thực tiễn cho việc cắt giảm tối ưu công suất RPV trên lưới MV. Bài toán là hệ quả của quy hoạch bất hợp lý RPV tích hợp vào lưới. Kết quả chứng minh sản lượng cắt phụ thuộc vào điện áp nguồn tại thanh cái và cắt giảm trong điều kiện cực đoan bắt buộc phải được xem xét khi tích hợp RPV vào bất cứ nút nào trên lưới. Với tổng công suất thâm nhập 9,28 MWp, tại điện áp cơ sở và điều kiện nắng tốt, RPV có thể thâm nhập đến 190,4% nhu cầu tải mà không gây bất cứ vi phạm nào. Khi  $V_0$  tăng lên thì số lượng vi phạm V-I tăng theo cấp số nhân, tỷ lệ cắt giảm RPV cũng tăng, dao động từ 21,08% đến 48,69% tổng sản lượng phát trong ngày theo kịch bản. BA là thuật toán MH hiệu quả để giải bài toán này.

Bài toán 3 xác định mức thâm nhập tối đa RPV bảo đảm tổng tổn thất nhỏ nhất. COOA kết hợp FBS xác định mức thâm nhập tối đa nguồn RPV tại mỗi vị trí. Bộ kết quả tối ưu bao gồm vị trí lắp đặt, công suất phát, và hệ số công suất phát tối ưu tại mỗi vị trí trên lưới. Trên cả hai lưới mô phỏng chuẩn, COOA cho kết quả vượt trội so với hầu hết các MH khác. Kết quả cho thấy: với kích bản cố định  $PF_{RPV,m} = 1$ , khả năng thâm nhập RPV đúng bằng  $P_{sys}$  của lưới; nếu không cố định  $PF_{RPV,m}$ ,  $L_{RPV,i}$ , và  $N_{RPV}$ , kết quả thâm nhập biến thiên từ 65% đến 115% nhu cầu  $P_{sys}$ . Tỷ lệ cắt giảm tổn thất công suất khi cố định  $N_{RPV}$ ,  $L_{RPV,i}$  và  $PF_{RPV,m} = 1$  cho hai lưới lần lượt là 65,50% và 69,14%; trong khi nếu linh hoạt  $PF_{RPV,m}$ ,  $N_{RPV}$ ,  $L_{RPV,i}$ , COOA có thể tự tối ưu để cắt giảm hơn 99% tổn thất trên lưới.

Trong bài toán 4, mô hình DDQN được đề xuất nhằm tận dụng khả năng học tăng cường sâu, tự thích ứng thông qua học tương tác và ra quyết định của DRL, kết hợp với khả năng phân tích và xử lý dữ liệu của ANN để điều khiển vận hành lưới. Với ba mục tiêu tối ưu, OLTC và SI được sử dụng để điều khiển điện áp và công suất phản kháng trên lưới. Sau 500 vòng lặp huấn luyện, DDQN đã độc lập điều khiển lưới một cách hiệu quả. Ràng buộc nhiệt đường dây là giới hạn chính song song với điện áp trong việc quyết định AHC của lưới. Khi tăng dần mức thâm nhập RPV, AHC biến thiên không theo quy luật BXMT và đạt giới hạn ở mức 150%  $P_{sys}$  với kích bản mây mù, 254,1% với kích bản trời mây và trung bình, và 250% với kích bản trời quang. Khi xét đến nhiệt độ vận hành của RPV và môi trường tại thời điểm BXMT cực đại, AHC mô phỏng có thể giảm đến 30%.

## 6.2. Hướng nghiên cứu tiếp theo

Mặc dù đã đạt được một số kết quả nhất định, luận án vẫn còn một số khía cạnh chưa được khảo sát và nghiên cứu đầy đủ. Trong các nghiên cứu tiếp theo, tác giả tập trung mở rộng các vấn đề sau (nghiên cứu độc lập hoặc đồng thời):

- Mở rộng nghiên cứu  $HC_{RPV}$  và AHC cho lưới hạ thế;
- Nghiên cứu  $HC_{RPV}$  và AHC sử dụng dữ liệu lịch sử và thời gian thực thay cho dữ liệu dự báo;
- Mở rộng phạm vi phụ tải và thiết bị điều khiển, tích hợp giải pháp điều áp và lưu trữ năng lượng;
- Xem xét đến cấu trúc lưới MV mạch vòng;
- Bổ sung ràng buộc vận hành và đa dạng hóa mục tiêu điều khiển;
- Nghiên cứu mô hình lai mới và triển khai thực nghiệm trên xuất tuyến thực tế của Việt Nam.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. Karimi, H. Mokhlis, K. Naidu, S. Uddin and A. H. A. Bakar, "Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network - A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 594-605, 2016.
- [2] S. M. Ismael, S. H. E. A. Aleem, A. Y. Abdelaziz and A. F. Zobaa, "State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation," *Renewable Energy*, vol. 130, pp. 1002-1020, 2019.
- [3] Vietnam, "Quyết định số 768/QĐ-TTg của Thủ tướng Chính phủ: Phê duyệt Điều chỉnh Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050," Chính phủ nước Cộng hòa Xã hội Chủ nghĩa Việt Nam, Hà Nội, 2025.
- [4] S. Remha, C. Saliha and S. Arif, "A Novel Multi-Objective Bat Algorithm for Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation in Radial Distributed Systems," *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 15, no. 5, pp. 736-746, 2018.
- [5] I. Naruei and F. Keynia, "A new optimization method based on COOT bird natural life model," *Expert Systems with Applications*, vol. 183, p. 115352, 2021.
- [6] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1408, 1989.
- [7] T. N. Thuan, T. N. Thang and V. V. Cuong, "Reconfiguration of Distribution Network Considering Photovoltaic System Placement Based on Metaheuristic Algorithms," in *Advances in Artificial Intelligence for Renewable Energy Systems and Energy Autonomy*, Switzerland, Springer Nature Link Switzerland, 2023, pp. 135-156.
- [8] M. Massaoudi, H. Abu-Rub and A. Ghraryeb, "Navigating the Landscape of Deep Reinforcement Learning for Power System Stability Control: A Review," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 134298-134317, 2023.
- [9] Y. Li, J. Wu and Y. Pan, "Deep reinforcement learning for online scheduling of photovoltaic systems with battery energy storage systems," *Intelligent and Converged Networks*, vol. 5, no. 1, pp. 28-41, 2024.
- [10] Y. Cui, Y. Xu, Y. Li, Y. Wang and X. Zou, "Deep Reinforcement Learning Based Optimal Energy Management of Multi-energy Microgrids with Uncertainties," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 1002-1014, 2026.
- [11] L. Yan and C. Cheng, "Voltage Control for Distribution Networks Based on Large Language Model-Assisted Deep Reinforcement Learning," *IEEE Power & Energy Society Section*, vol. 13, pp. 76072-76084, 2025.
- [12] M. Zhang, G. Guo and T. X. Q. Zhao, "DNN Assisted Projection Based Deep Reinforcement Learning for Safe Control of Distribution Grids," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 39, no. 4, pp. 5687-5698, 2024.
- [13] D. Cao, W. Hu, J. Zhao, Q. Huang, Z. Chen and F. Blaabjerg, "A Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Based Voltage Regulation Using Coordinated PV Inverters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 5, pp. 4120-4123, 2020.

- [14] M. Ma, W. Du, L. Wang, C. Ding and S. Liu, "Research on the multi-timescale optimal voltage control method for distribution network based on a DQN-DDPG algorithm," *Frontiers in Energy Research*, 2022.
- [15] R. Hossain, M. Gautam, J. Thapa, H. Livani and M. Benidris, "Deep reinforcement learning assisted co-optimization of Volt-VAR grid service in distribution networks," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 35, p. 101086, 2023.
- [16] J. Suchithra, D. A. Robinson and A. Rajabi, "A Model-Free Deep Reinforcement Learning-Based Approach for Assessment of Real-Time PV Hosting Capacity," *Energies*, vol. 17, p. 2075, 2024.
- [17] D. Hua, F. Peng, S. Liu, Q. Lin, J. Fan and Q. Li, "Coordinated Volt/VAR Control in Distribution Networks Considering Demand Response via Safe Deep Reinforcement Learning," *Energies*, vol. 18, no. 2, p. 333, 2025.
- [18] K. Xiong, C. Ye, B. Liu and X. Suo, "Multi-agent deep reinforcement learning-enabled voltage regulation approach for partitioned active distribution network using heterogeneous PV inverters," *Energy Conversion and Economics*, vol. 6, no. 6, pp. 359-370, 2025.
- [19] A. Ali, K. Mahmoud and M. Lehtonen, "Maximizing Hosting Capacity of Uncertain Photovoltaics by Coordinated Management of OLTC, VAr Sources and Stochastic EVs," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 127, p. 106627, 2021.
- [20] B. Jaramillo-Leon, S. Zambrano-Asanza, J. F. Franco and J. B. Leite, "Simulation-based optimization framework to increase distribution system photovoltaic hosting capacity through optimal settings of smart inverter Volt-VAr control function," *Electric Power Systems Research*, vol. 215, no. A, p. 108971, 2023.
- [21] Z. M. Zenhom, S. H. E. A. Aleem, E. A. Zahab and T. A. Boghdady, "Simultaneous distributed generation and electric vehicles hosting capacity enhancement through a synergetic hierarchical bi-level optimization approach based on demand response and Volt/VAR control," *Scientific Report, Ai Cáp*, 2025.