

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT  
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

TÔN NGỌC TRIỀU

MỞ RỘNG NGUỒN ĐIỆN PHÂN TÁN VÀ BỘ DỰ TRỮ  
NĂNG LƯỢNG TRÊN LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI

LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH, THÁNG 04 NĂM 2023

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT  
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**

**TÔN NGỌC TRIỀU**

**MỞ RỘNG NGUỒN ĐIỆN PHÂN TÁN VÀ BỘ DỰ TRỮ  
NĂNG LƯỢNG TRÊN LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI**

**NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỆN - 9520201**

**HƯỚNG DẪN KHOA HỌC 1: PGS. TS. TRƯƠNG VIỆT ANH**

**HƯỚNG DẪN KHOA HỌC 2: PGS. TS. VŨ PHAN TÚ**

**PHẢN BIỆN 1: PGS. TS.**

**PHẢN BIỆN 2: PGS. TS.**

**PHẢN BIỆN 3: PGS. TS.**

**TP. HỒ CHÍ MINH, THÁNG 6 NĂM 2023**

# QUYẾT ĐỊNH GIAO ĐỀ TÀI

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT  
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

Số: 741<sup>B</sup>/QĐ-ĐHSPKT

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM  
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

Tp. Hồ Chí Minh, ngày 17 tháng 5 năm 2017

## QUYẾT ĐỊNH

V.v giao đề tài luận án và người hướng dẫn NCS khóa 2017 - 2020

HIỆU TRƯỞNG TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HỒ CHÍ MINH

Căn cứ Quyết định số 426/TTg ngày 27 tháng 10 năm 1976 của Thủ tướng Chính phủ về một số vấn đề cấp bách trong mạng lưới các trường đại học và Quyết định số 118/2000/QĐ-TTg ngày 10 tháng 10 năm 2000 của Thủ tướng Chính phủ về việc tổ chức lại Đại học Quốc gia Thành Phố Hồ Chí Minh, tách Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh trực thuộc Bộ Giáo dục và Đào tạo;

Căn cứ Quyết định số 70/2014/QĐ-TTg ngày 10 tháng 12 năm 2014 của Thủ tướng Chính phủ về việc ban hành Điều lệ trường Đại học;

Căn cứ Thông tư số 10/2009/TT-BGDĐT ngày 07/5/2009 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc Ban hành Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ;

Căn cứ Thông tư số 05/2012/TT-BGDĐT ngày 15/02/2012 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc sửa đổi, bổ sung một số điều của Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ ban hành kèm theo Thông tư số 10/2009/TT-BGDĐT ngày 07/5/2009 của Bộ trưởng Bộ Giáo dục và Đào tạo;

Xét nhu cầu công tác và khả năng cán bộ;

Xét đề nghị của Trưởng phòng Đào tạo,

### QUYẾT ĐỊNH:

**Điều 1.** Giao đề tài luận án tiến sĩ và người hướng dẫn cho:

Nghiên cứu sinh : **Tôn Ngọc Triều**

Ngành : **Kỹ thuật điện**

Khoá: **2017 - 2020**

Tên luận án : **Mở rộng nguồn điện phân tán và bộ dự trữ năng lượng trên lưới điện phân phối**

Người HD thứ nhất (HD chính): **PGS.TS Trương Việt Anh**

Người HD thứ hai : **PGS.TS Vũ Phan Tú**

Thời gian thực hiện : **17/5/2017 đến 17/5/2020**

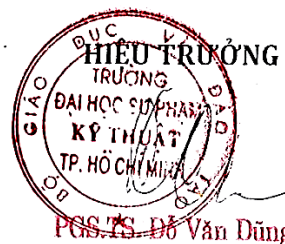
**Điều 2.** Giao cho Phòng Đào tạo quản lý, thực hiện theo đúng Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ của Bộ Giáo dục & Đào tạo đã ban hành.

**Điều 3.** Trưởng các đơn vị, phòng Đào tạo, các Khoa quản ngành tiến sĩ và các Ông (Bà) có tên tại Điều 1 chịu trách nhiệm thi hành quyết định này.

Quyết định có hiệu lực kể từ ngày ký./.

**Nơi nhận :**

- BGH (để biết);
- Như điều 2, 3;
- Lưu: VT, SDH (4b).



# LÝ LỊCH KHOA HỌC

## I. LÝ LỊCH SƠ LƯỢC:

Họ & tên: Tôn Ngọc Triều

Giới tính: Nam

Ngày, tháng, năm sinh: 20/10/1981

Nơi sinh: Quảng Ngãi

Quê quán: Quảng Ngãi

Dân tộc: Kinh

Địa chỉ liên lạc: 4/23, Đ129-Tây Hòa, P. Phước Long A, Tp. Thủ Đức, Tp. HCM

Điện thoại: 0989517318; E-mail: [trieutn.ncs@hcmute.edu.vn](mailto:trieutn.ncs@hcmute.edu.vn); [tonngoctrieu@gmail.com](mailto:tonngoctrieu@gmail.com)

## II. QUÁ TRÌNH ĐÀO TẠO:

### 1. Đại học:

Hệ đào tạo: Chính quy;

Thời gian đào tạo từ: 2000 - 2005

Nơi học: Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM

Ngành học: Điện khí hóa & Cung cấp điện

Tên đề án: Ứng dụng MATLAB trong giải tích mạng điện

Ngày & nơi bảo vệ đề án: Năm 2004 - Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM

### 2. Cao học:

Hệ đào tạo: Chính quy; Thời gian đào tạo từ: 2007-2009

Nơi học: Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM

Ngành học: Thiết bị mạng & Nhà máy điện

Tên đề án: Nâng cao hiệu suất của máy phát điện gió công suất nhỏ

Ngày & nơi bảo vệ LV: Năm 2009 - Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM

## III. QUÁ TRÌNH CÔNG TÁC CHUYÊN MÔN KỂ TỪ KHI TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC:

Thời gian	Nơi công tác	Công việc đảm nhiệm
2005 - 2007	Công ty CP Xây dựng – Cơ khí Giao thông	Kỹ sư
2007 - 2008	Trường Cao đẳng nghề Tp. HCM	Giáo viên
2008 - 2010	Trường Cao đẳng Viễn Đông	Phó trưởng khoa Công nghệ
2010 - nay	Trường Cao đẳng Công nghệ Thủ Đức	Trưởng khoa Điện – Điện tử

# LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của tôi.

Các số liệu, kết quả nêu trong Luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

*Tp. Hồ Chí Minh, ngày 10 tháng 6 năm 2023*

(Ký tên và ghi rõ họ tên)

Tôn Ngọc Triều

# LỜI CẢM ƠN

Trước hết, em xin được bày tỏ lòng biết ơn chân thành và sâu sắc nhất gửi đến thầy PGS. TS. Trương Việt Anh và thầy PGS. TS. Vũ Phan Tú là những người Thầy đã tận tình hướng dẫn em trong suốt quá trình nghiên cứu để hoàn thành Luận án này.

Xin cảm ơn quý Thầy Cô trong khoa Điện – Điện tử của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM, những người giảng viên đầy nhiệt huyết, thiện cảm đã truyền đạt những kiến thức chuyên môn, những kinh nghiệm quý báu, đã giảng dạy và hướng dẫn em trong suốt quá trình học tập và nghiên cứu.

Và cuối cùng, tôi xin cảm ơn đến tất cả các đồng nghiệp, bạn bè và gia đình đã giúp đỡ tôi về tinh thần, vật chất và công sức trong quá trình học tập cũng như để hoàn thành Luận án.

Xin trân trọng cảm ơn.

*Tp. Hồ Chí Minh, ngày 10 tháng 6 năm 2023*

NCS thực hiện

**Tôn Ngọc Triều**

# TÓM TẮT

Luận án phân tích và đề xuất bài toán mở rộng lưới điện phân phối (LĐPP), mở rộng công suất của nguồn điện phân tán (DG) và công suất vận hành của bộ dự trữ năng lượng (ESS) để nâng cao hiệu quả hoạt động của LĐPP. Luận án đề xuất ba bài toán mới và một bài toán áp dụng cho LĐPP Việt Nam, các bài toán như sau:

**Bài toán 1:** Mở rộng LĐPP thông qua xác định vị trí và công suất tối ưu của DG có xét tái cấu hình lưới điện phân phối (DNR). Luận án đưa ra một bài toán mới để giải quyết vấn đề tối ưu vị trí và công suất của DG thông qua hai giai đoạn. Giai đoạn I - tối ưu lắp đặt DG trong LĐPP kín (giai đoạn thiết kế) và giai đoạn II - tối ưu khóa mở để lưới điện vận hành hở (giai đoạn vận hành). Bài toán đề nghị thực hiện tối ưu lắp đặt DG có xét DNR với hàm mục tiêu là cực tiểu tổn thất công suất của hệ thống. Bài toán đề nghị hai giai đoạn là một dạng bài toán tối ưu mới trong lắp đặt DG có xét DNR bên cạnh các dạng bài toán tối ưu lắp đặt DG có xét DNR khác đã được công bố như bài toán tối ưu đồng thời vị trí, công suất và DNR (bài toán đồng thời) và bài toán tối ưu vị trí trước và sau đó tối ưu công suất và DNR (bài toán VT - CS và DNR). Bài toán đề nghị với hai giai đoạn tối ưu có ưu điểm là đưa ra lời giải tối ưu toàn cục cho vấn đề lắp đặt DG có xét DNR. Bài toán tối ưu DG thông qua hai giai đoạn cho thấy số biến giảm cho mỗi giai đoạn của thuật toán tối ưu bằng cách chia ra từng giai đoạn. Bài toán đề nghị cũng cho thấy sự phù hợp của vấn đề lắp đặt DG trong dài hạn (giai đoạn thiết kế) được ưu tiên trước và vấn đề DNR là ngắn hạn (giai đoạn vận hành) được thực hiện sau. LĐPP 33 nút và LĐPP 69 nút được kiểm tra và cho thấy tính hiệu quả của bài toán đề nghị. Bài toán đề nghị sử dụng thuật toán Runner Root Algorithm (RRA) thực hiện và so sánh với thuật toán Coyote Algorithm (COA) và Genetic Algorithm (GA). Về thuật toán, kết quả cho thấy các thuật toán RRA, COA và GA là các thuật toán hiệu quả để tối ưu lắp đặt DG cho LĐPP có xét DNR. Ngoài ra, bài toán đề nghị cũng được so sánh với các bài toán đồng thời và bài toán VT-CS và DNR với các thuật toán khác nhau cũng cho thấy hiệu quả của bài toán tách ra hai giai đoạn. Các kết quả mô phỏng của bài toán đề nghị cho thấy tổn thất công suất toàn hệ thống tương tự với bài toán đồng thời và tốt hơn so với bài toán VT- CS và DNR. Bài toán đề nghị tối ưu lắp đặt DG có xét DNR thông qua hai giai đoạn đã được nghiên cứu, thực hiện và công bố trong công trình số [1], [5] và [7].

**Bài toán 2:** Xác định cấu hình LĐPP khi mở rộng công suất của pin quang điện (PV). Luận án đề nghị thuật toán trao đổi nhánh với công suất nhánh trung bình (CSNTB) cải tiến nhằm xác định cấu hình vận hành LĐPP khi PV được mở rộng công suất với mục tiêu cực tiểu tổn thất năng lượng. Ưu điểm của bài toán đề nghị là đơn giản, dễ thực hiện và chính xác trong việc xác định cấu hình của LĐPP khi PV được mở rộng công suất. LĐPP 18 nút và LĐPP 33 nút được áp dụng thử nghiệm đã cho thấy phương pháp đề nghị là đơn giản, nhanh chóng xác định được cấu hình lưới điện và có độ chính xác cao khi so sánh với bài toán xác định cấu hình lưới điện theo phương pháp sử dụng công suất nhánh trung bình (CSNTB) và phương pháp sử dụng đồ thị phụ tải bằng các thuật toán tối ưu. Bài toán đề nghị đã được nghiên cứu, thực hiện và công bố ở công trình số [2] và [10].

**Bài toán 3:** Áp dụng mở rộng LĐPP Chư Prông – Gia Lai của Việt Nam. LĐPP Chư Prông được áp dụng để mở rộng thông qua lắp đặt DG nhằm tối đa công suất thâm nhập và cực tiểu tổn thất công suất của hệ thống. Bài toán đề xuất ba giai đoạn lắp đặt DG tương ứng với ba vị trí và công suất khả thi cho phép lắp đặt vào LĐPP Chư Prông. Thuật toán Runner Root Algorithm (RRA) và Coyote Algorithm (COA) được sử dụng hiệu quả cho bài toán 1 và tiếp tục được áp dụng để thử nghiệm cho vấn đề lắp đặt ba DG cho LĐPP Chư Prông không xét tái cấu hình. Từ kết quả ba DG đã được tối ưu, luận án đề xuất một kế hoạch lắp đặt mở rộng DG trên LĐPP Chư Prông qua ba giai đoạn nhằm phù hợp với vấn đề đầu tư và lắp đặt DG trong một thời gian dài. Bài toán đề nghị đã được nghiên cứu, thực hiện và công bố trong công trình số [3], [8] và [9].

**Bài toán 4:** Mở rộng LĐPP thông qua lắp đặt pin dự trữ năng lượng (BESS) để giảm chi phí mua điện. Luận án đề xuất bài toán xác định vị trí và dung lượng của BESS trên LĐPP nhằm giảm chi phí mua năng lượng cũng như giảm chi phí tổn thất năng lượng. Bài toán đề nghị với điểm mới là đưa ra hàm mục tiêu cực tiểu chi phí mua năng lượng và thuật toán CSA được áp dụng lần đầu tiên cho bài toán tối ưu vị trí và dung lượng của BESS. Việc tối ưu lắp đặt BESS vào hệ thống không những giảm chi phí mua điện năng mà còn giảm tổn thất năng lượng và khai thác hiệu quả các nguồn năng lượng tái tạo (RES). LĐPP 18 nút và LĐPP 33 nút có PV được thử nghiệm cho bài toán tối ưu lắp đặt BESS đã cho thấy tính hiệu quả của BESS khi



tham gia vào LĐPP. Bài toán đề nghị tối ưu lắp đặt BESS trên LĐPP đã được nghiên cứu, thực hiện và công bố trong công trình số [4] và công trình số [6].

Các bài toán trong luận án đề nghị mở rộng LĐPP thông qua lắp đặt và mở rộng công suất của DG và BESS nhằm nâng cao hiệu quả hoạt động của LĐPP. Đối với DG đã cho thấy giảm tổn thất công suất của hệ thống và đối với BESS cho thấy giảm chi phí mua điện năng rõ rệt.

## **ABSTRACT**

The thesis analyzes and proposes the problem of expanding the Distribution Network (DN), expanding the capacity of the Distributed Generation (DG) and the operating capacity of the Energy Storage System (ESS) to improve the efficiency of the distribution network. The thesis proposes three new problems and one applied to the distribution network of Vietnam, the problems are as follows:

The first point: Expanding the distribution network by determining the optimal location and capacity of the DG with consideration of the Distribution Network Reconfiguration (DNR): The thesis presents a new problem to optimize the position and capacity of the DG through two stages. Phase I - Optimizing the installation of DG in the closed loop of the distribution network (design phase) and Phase II - Optimizing open switching for the distribution network to operate open (operating phase). The problem proposes to optimize the installation of DG with consideration of reconfiguration with the objective function of minimizing the power loss of the system. The phase II proposed problem is a new type of optimization problem in DG installation optimization that considers reconfiguration besides optimization problems of VT- CS and DNR. The proposed problem with two optimization phases has the advantage of providing a globally optimal solution to the problem of installing DG with consideration of reconfiguration. The phase II problem shows that the number of variables decreases for each phase of the optimization algorithm by dividing it into two phases. In addition, the proposed two-phase problem also shows that it is suitable for long-term DG installation (design) to be prioritized and DNR to be short-term (operation). The distribution network of 33 nodes and distribution network 69 nodes is tested and shows the effectiveness of the proposed problem. The proposed problem uses Runner Root Algorithm (RRA) algorithm to perform and compare with Coyote Algorithm (COA) and Genetic Algorithm (GA). In terms of algorithms, the results show that RRA, COA and GA algorithms are effective algorithms to optimize DG installation for distribution networks considering reconfiguration. In addition, the proposed problem is also compared with concurrent problems and the VT- CS and DNR problems with different algorithms also show the effectiveness of the proposed problem. The simulation results of the proposed

problem show that the power loss of the whole system is similar to the concurrency problem and better than that of the VT- CS and DNR problems. The problem of proposing optimal installation of DG with consideration of reconfiguration through two phases has been studied, implemented and published in research [1], [5] and [7].

The second point: Determining the distribution network configuration when expanding the capacity of photovoltaic (PV). The thesis proposes an improved branch exchange algorithm with average branch capacity (CSNTB) to quickly determine the distribution network configuration when PV expands capacity with the objective function of minimizing energy loss. The outstanding advantage of the proposed problem is that it is simple, easy to implement and accurate in determining the configuration of the distribution network when PV is expanded to the installed capacity. The 18-node distribution network and the 33-node distribution network are applied experimentally, showing that the proposed method is simple, quickly determines the network configuration and has high accuracy when compared to the problem of determining the configuration of the distributed network. other distribution methods such as the method of using the average branch capacity (CSNTB) and the method of using the load graph by optimization algorithms. The proposed problem of using branch exchange algorithm using improved CSNTB has been studied, implemented and published in research [2] and [10].

Third point: Applying and expanding the distribution network of Chu Prong - Gia Lai in Vietnam. Chu Prong distribution network is applied to expand through DG installation in order to maximize the penetration capacity and minimize the power loss of the system. The problem proposes three installation stages of DG corresponding to three locations and feasible capacity to allow installation in Chu Pong distribution network. Runner Root (RRA) and Coyote (COA) algorithms are used effectively for problem 1 and continue to be applied to the problem of fitting 3 DG of Chu Pong distribution network. From the results of three optimized DGs, the thesis proposes a plan to install and expand DG of Chu Prong distribution network through three stages to suit the investment and installation of DG in a long time. The problem of proposing optimal installation of DG on distribution network by COA algorithm has been studied, implemented and published in research [3], [8] and [9].

Fourth point: Expand distribution network through installation of Battery Energy Storage System (BESS) to reduce electricity purchase costs. The thesis presents the problem of determining the location and capacity of BESS on the distribution network in order to reduce the cost of buying electricity as well as reducing the cost of energy loss. The proposed problem with a new point is to give the objective function to minimize the cost of purchasing energy and the CSA algorithm is applied for the first time for the optimization problem of location and capacity of BESS. Optimizing the installation of BESS when there is a PV connected to the system not only reduces the cost of purchasing electricity, but also reduces energy loss, but also effectively exploits renewable energy sources (RES). The distribution network of 18 nodes and 33 nodes with PV has been tested for the optimization problem of BESS installation and has shown the effectiveness of BESS when participating in the distribution network. The problem of optimally proposing the installation of BESS on the distribution network has been studied, implemented and published in research [4] and [6].

The problems in the thesis suggest expanding the distribution network through the installation and capacity expansion of DG and BESS in order to improve the operating efficiency of the distribution network. For DG it has been shown to reduce the power loss of the system and for BESS it has been shown to reduce the cost of purchasing electricity.

# MỤC LỤC

QUYẾT ĐỊNH GIAO ĐỀ TÀI .....	i
LÝ LỊCH KHOA HỌC .....	ii
LỜI CAM ĐOAN .....	iii
LỜI CẢM ƠN .....	iv
TÓM TẮT .....	v
ABSTRACT .....	viii
DANH SÁCH CÁC TỪ VIẾT TẮT .....	xiv
DANH SÁCH CÁC HÌNH .....	xvi
DANH SÁCH CÁC BẢNG .....	xviii
CHƯƠNG 1 GIỚI THIỆU .....	1
1.1. Đặt vấn đề .....	1
1.2. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu .....	4
1.3. Mục tiêu và nhiệm vụ nghiên cứu.....	4
1.4. Phương pháp nghiên cứu .....	4
1.5. Đóng góp của luận án .....	4
1.6. Bố cục của luận án .....	7
2.1. Lưới điện phân phối.....	8
2.2. Nguồn điện phân tán (DG).....	9
2.2.1. Giới thiệu về DG.....	9
2.2.2. Công nghệ của DG.....	10
2.2.3. Lợi ích của DG.....	12
2.2.4. Mục tiêu lắp đặt DG.....	13
2.3. Bộ dự trữ năng lượng (ESS) .....	14
2.3.1. Giới thiệu về ESS.....	14
2.3.2. Công nghệ của ESS .....	16
2.3.3. Lợi ích của ESS .....	17
2.3.4. Mục tiêu lắp đặt ESS .....	18
2.4. Phương pháp và thuật toán tối ưu lắp đặt DG và ESS.....	21
2.4.1. Thuật toán cổ điển.....	22

2.4.2. Phương pháp tìm kiếm cơ bản.....	22
2.4.3. Thuật toán lấy cảm hứng từ vật lý hoặc xã hội.....	23
2.4.4. Kỹ thuật lấy cảm hứng từ thiên nhiên.....	23
2.4.5. Thuật toán lai thông minh.....	23
2.5. Mở rộng lưới điện phân phối .....	23
2.5.1. Mở rộng sự thâm nhập của nguồn điện phân tán trên lưới điện phân tán....	25
2.5.2. Mở rộng sự thâm nhập của bộ dự trữ năng lượng trên lưới điện phân tán..	28
2.6. Kết luận chương 2.....	30
<b>CHƯƠNG 3 MỞ RỘNG SỰ THÂM NHẬP CỦA NGUỒN ĐIỆN PHÂN TÁN</b>	
<b>TRÊN LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI.....</b>	<b>31</b>
3.1. Giới thiệu .....	31
3.2. Mở rộng LĐPP thông qua lắp đặt DG có xét tái cấu hình lưới điện phân phối (DNR).....	34
3.2.1. Mô tả bài toán.....	37
3.2.2. Phương pháp tối ưu công suất và vị trí DG trên LĐPP có xét tái cấu hình lưới điện phân phối sử dụng thuật toán Runner Root Algorithm .....	41
3.2.3. Kết quả kiểm tra .....	46
3.2.4. Kết luận.....	56
3.3. Xác định cấu hình vận hành LĐPP khi mở rộng công suất DG .....	57
3.3.1. Mô hình toán học .....	59
3.3.2. Xác định cấu hình vận hành bằng thuật toán trao đổi nhánh cải tiến .....	71
3.3.3. Kết quả kiểm tra .....	73
3.3.4. Kết luận.....	76
3.4. Mở rộng nguồn điện phân tán cho LĐPP Chư Prông – Gia Lai.....	76
3.4.1. LĐPP Chư Prông – Gia Lai .....	77
3.4.2. Tối ưu vị trí và công suất của DG trên LĐPP Chư Prông sử dụng thuật toán Coyote Algorithm (COA).....	79
3.4.3. Kết quả kiểm tra.....	83
3.4.3. Kết luận.....	87
3.5. Kết luận chương 3.....	87

CHƯƠNG 4 MỞ RỘNG SỰ THÂM NHẬP CỦA BỘ DỰ TRỮ NĂNG LƯỢNG TRÊN LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI.....	90
4.1. Giới thiệu .....	90
4.2. Mô tả bài toán .....	96
4.3. Tối ưu công suất và vị trí của BESS .....	99
4.4. Kết quả kiểm tra.....	100
4.4.1. LĐPP 18 nút.....	102
4.4.2. LĐPP 33 nút.....	108
4.5. Kết luận chương 4 .....	113
CHƯƠNG 5 KẾT LUẬN.....	115
5.1. Kết luận.....	115
5.2. Hướng nghiên cứu tiếp theo.....	117
BÀI BÁO ĐÃ CÔNG BỐ .....	119
CÁC CÔNG BỐ LIÊN QUAN.....	120
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	121
PHỤ LỤC.....	130
Phụ lục 1. Thông số phụ tải LĐPP 18 nút .....	130
Phụ lục 2. Thông số đường dây LĐPP 18 nút .....	130
Phụ lục 3. Tỷ lệ loại tải thương mại, dân dụng và công nghiệp - LĐPP 18 nút .....	130
Phụ lục 4. Tỷ lệ các loại tải thương mại, dân dụng và công nghiệp - LĐPP 18 nút....	131
Phụ lục 5. Thông số phụ tải LĐPP 33 nút .....	131
Phụ lục 6. Thông số đường dây LĐPP 33 nút .....	132
Phụ lục 7. Tỷ lệ loại tải thương mại, dân dụng và công nghiệp - LĐPP 33 nút .....	133
Phụ lục 8. Tỷ lệ các loại tải thương mại, dân dụng và công nghiệp - LĐPP 33 nút....	133
Phụ lục 9. Thông số phụ tải LĐPP 69 nút .....	134
Phụ lục 10. Thông số đường dây LĐPP 69 nút .....	135
Phụ lục 11. Thông số phụ tải LĐPP Chư Prông .....	136
Phụ lục 12. Thông số đường dây LĐPP Chư Prông .....	139

# DANH SÁCH CÁC TỪ VIẾT TẮT

BESS	: Battery Energy Storage System - Hệ thống pin dự trữ năng lượng
ChES	: Chemical Energy Storage - Lưu trữ hóa học
COA	: Coyote Algorithm - Thuật toán Coyote
CSA	: Cuckoo Search Algorithm - Thuật toán tìm kiếm cuckoo
CSNTB	: Công suất nhánh trung bình
DEP	: Distribution Network Expansion Planning - Kế hoạch mở rộng LĐPP
DG	: Distributed Generation - Nguồn điện phân tán
DNR	: Distribution Network Reconfiguration - Tái cấu hình LĐPP
EAMES	: Electrostatic and Magnetic Energy Storage - Lưu trữ tĩnh điện và từ tính
EES	: Electrochemical Energy Storage - Lưu trữ điện hóa
EP	: Evolutionary Programming - Lập trình tiến hóa
ESS	: Energy Storage System- Hệ thống dự trữ năng lượng
FA	: Firefly Algorithm - Thuật toán đom đóm
FWA	: Fireworks Algorithm - Thuật toán pháo hoa
GA	: Genetic Algorithm - Thuật toán gen
GAOPF	: Genetic Algorithm Optimal Power Flow - Tối ưu di truyền và dòng công suất
GAPSO	: Genetic Algorithm-Particle Swarm Optimization -Tối ưu di truyền và bầy đàn
GATS	: Genetic Tabu search -Tìm kiếm di truyền và Tabu
GSA	: Gravitational Search Algorithm - Thuật toán tìm kiếm hấp dẫn
HESS	: Hybrid Energy Storage System - Hệ thống lưu trữ hỗn hợp
HSA	: Harmony Search Algorithm - Thuật toán tìm kiếm hài hòa
IWO	: Invasive Weed Optimization - Tối ưu hóa cỏ dại xâm lấn
LBI	: Load Balancing Index - Chỉ số cân bằng tải
LCF	: Load Carrying Factor - Hệ số mang tải
LĐPP	: Lưới điện phân phối
LF	: Hệ số tải
LLF	: Hệ số tổn thất
MES	: Mechanical Energy Storage - Lưu trữ cơ năng
OF	: Objective Function - Hàm mục tiêu



PFA	:	Path Finding Algorithm - Thuật toán tìm đường
PSO	:	Particle Swarm Optimization - Tối ưu bầy đàn
PV	:	Photovoltaic - Quang điện
RES	:	Renewable energy systems - Hệ thống năng lượng tái tạo
RI	:	Related Index - Chỉ số liên quan
RRA	:	Runner Root Algorithm - Thuật toán Runner Root
SFL	:	Shuffled Frog Leaping Algorithm – Thuật toán ếch nhảy xáo trộn
SFO	:	Sunflower Optimizatio - Tối ưu hoa hướng dương
SFS	:	Stochastic Fractal Search - Tìm kiếm ngẫu nhiên
SSA	:	Salp Swarm Algorithm - Thuật toán bầy đàn cá hồi
TES	:	Thermal Energy Storage - Lưu trữ nhiệt năng
VT-CS	:	Bài toán tối ưu vị trí trước - tối ưu công suất và DNR sau
WT	:	Wind Turbines - Tua bin gió
$\Delta A$	:	Tổn thất năng lượng
$\Delta P$	:	Tổn thất công suất

# DANH SÁCH CÁC HÌNH

Hình 1. 1. LĐPP có kết nối các DG và ESS .....	2
Hình 2. 1. Lưới điện trong truyền thống và tương lai [18] .....	9
Hình 2. 2. Các công nghệ DG [19].....	11
Hình 2. 3. Các mục tiêu khi tối ưu lắp đặt DG .....	13
Hình 2. 4. Nạp/ xả và san phẳng đồ thị với ESS [8] .....	15
Hình 2. 5. Các dạng công nghệ của ESS.....	16
Hình 2. 6. Mục tiêu lắp đặt ESS.....	19
Hình 2. 7. Các thuật toán tối ưu lắp đặt DG và ESS [35] .....	22
Hình 2. 8. Kế hoạch mở rộng LĐPP .....	24
Hình 2. 9. Các biến cần xem xét khi mở rộng LĐPP.....	25
Hình 2. 10. Mục tiêu mở rộng ESS .....	29
Hình 3. 1. Dạng bài toán tối ưu vị trí trước, sau đó công suất và DNR [83] .....	36
Hình 3. 2. Dạng bài toán tối ưu đồng thời vị trí, công suất của DG và DNR [86] ...	37
Hình 3. 3. LĐPP đơn giản một mạch vòng .....	38
Hình 3. 4. Cây dậu tây [91] .....	42
Hình 3. 5. Lưu đồ bài toán hai giai đoạn sử dụng RRA.....	45
Hình 3. 6. Sơ đồ đơn tuyến của LĐPP 33 nút [87] .....	48
Hình 3. 7. Đường cong hội tụ ở giai đoạn I (RRA) sau 50 lần chạy - LĐPP 33 nút	50
Hình 3. 8. Đường hội tụ ở giai đoạn II (RRA) sau 50 lần chạy - LĐPP 33 nút.....	50
Hình 3. 9. Cấu hình điện áp trong các trường hợp - LĐPP 33 nút .....	51
Hình 3. 10. Sơ đồ đơn tuyến của LĐPP 69 nút [92] .....	52
Hình 3. 11. Đường cong hội tụ giai đoạn I (RRA) sau 50 lần chạy - LĐPP 69 nút	54
Hình 3. 12. Đường cong hội tụ ở giai đoạn II (RRA) sau 50 lần chạy - LĐPP 69 nút .....	54
Hình 3. 13. Cấu hình điện áp trong các trường hợp - LĐPP 69 nút.....	55
Hình 3. 14. LĐPP đơn giản có một vòng kín.....	59
Hình 3. 15. LĐPP có kết nối với PV .....	61
Hình 3. 16. Công suất của tải và PV trong khoảng 24 giờ.....	61
Hình 3. 17. Sơ đồ đơn tuyến của LĐPP 18 nút.....	65
Hình 3. 18. Đồ thị tải và đồ thị của PV .....	65
Hình 3. 19. Chiều truyền của công suất khi không có PV .....	66
Hình 3. 20. Chiều truyền của công suất khi PV1 là 560 kW .....	66
Hình 3. 21. Chiều truyền của công suất khi thêm PV2 là 2440 kW .....	68
Hình 3. 22. Thuật toán trao đổi nhánh cải tiến khi có PV.....	72
Hình 3. 23. LĐPP 33 nút [70] .....	73
Hình 3. 24. Đồ thị của phụ tải và PV .....	74
Hình 3. 25. Quá trình tối ưu LĐPP 33 nút có PV .....	75
Hình 3. 26. Các vùng kết nối DG khả thi của LĐPP Chư Prông.....	78
Hình 3. 27. Lưu đồ tối ưu lắp đặt DG bằng thuật toán COA .....	82

Hình 3. 28. Hệ số mang tải của các nhánh và điện áp nút ở giai đoạn 1 .....	85
Hình 3. 29. Hệ số mang tải của các nhánh và điện áp nút ở giai đoạn 2 .....	85
Hình 3. 30. Hệ số mang tải của các nhánh và điện áp nút ở giai đoạn 3 .....	86
Hình 3. 31. LĐPP Chư Prông với 3 giai đoạn lắp đặt mở rộng DG .....	86
Hình 4. 1. BESS trong hệ thống năng lượng đơn giản [100].....	91
Hình 4. 2. Giá năng lượng trong 24 giờ .....	92
Hình 4. 3. Các giá trị trong một giải pháp điển hình của BESS .....	97
Hình 4. 4. LĐPP 18 nút có PV tham gia vào hệ thống .....	102
Hình 4. 5. Tải của LĐPP 18 nút.....	102
Hình 4. 6. Công suất phát của PV .....	103
Hình 4. 7. Công suất vận hành của BESS - LĐPP 18 nút.....	103
Hình 4. 8. Công suất mua của LĐPP 18 nút khi có hoặc không có BESS .....	104
Hình 4. 9. Giá trị của tổn thất năng lượng và chi phí tổn thất năng lượng khi có BESS - LĐPP 18 nút.....	104
Hình 4. 10. Dòng điện nhánh khi có BESS - LĐPP 18 nút .....	105
Hình 4. 11. Điện áp nút khi có BESS - LĐPP 18 nút .....	105
Hình 4. 12. Công suất vận hành BESS với CSA, GA, SFO và PFA - LĐPP 18 nút .....	107
Hình 4. 13. Đường cong hội tụ của PFA, SFO, GA và CSA - LĐPP 18 nút.....	108
Hình 4. 14. LĐPP 33 nút có 3 PV tham gia vào hệ thống .....	108
Hình 4. 15. Tải của LĐPP 33 nút.....	109
Hình 4. 16. Công suất vận hành của BESS - LĐPP 33 nút.....	109
Hình 4. 17. Công suất mua của LĐPP 33 nút khi có hoặc không có BESS .....	110
Hình 4. 18. Giá trị tổn thất năng lượng và chi phí tổn thất năng lượng khi có BESS - LĐPP 33 nút.....	110
Hình 4. 19. Điện áp nút khi có BESS - LĐPP 33 nút .....	111
Hình 4. 20. Dòng điện nhánh khi có BESS- LĐPP 33 nút .....	111
Hình 4. 21. Công suất vận hành BESS với CSA, GA, SFO và PFA - LĐPP 33 nút .....	111
Hình 4. 22. Đường cong hội tụ của PFA, SFO, GA và CSA - LĐPP 33 nút.....	112

## DANH SÁCH CÁC BẢNG

Bảng 2. 1. Phân loại DG.....	11
Bảng 2. 2. Lợi ích của việc kết nối DG vào LĐPP .....	12
Bảng 2. 3. Lợi ích của việc kết nối BESS vào LĐPP .....	18
Bảng 3. 1. Tham số chung của thuật toán RRA cho LĐPP 33 và 69 nút .....	47
Bảng 3. 2. Các kết quả của bài toán hai giai đoạn - LĐPP 33 nút .....	49
Bảng 3. 3. Kết quả tối ưu của các bài toán khác nhau - LĐPP 33 nút.....	51
Bảng 3. 4. Các kết quả của bài toán hai giai đoạn - LĐPP 69 nút .....	53
Bảng 3. 5. Kết quả tối ưu của các bài toán khác nhau - LĐPP 69 nút.....	55
Bảng 3. 6. Các thông số khi PV lắp đặt mở rộng tại nút 18 với PPV1= 560 kW .....	67
Bảng 3. 7. Khóa mở trong trường hợp PV1 có công suất 560 kW .....	68
Bảng 3. 8. Các thông số khi PV lắp đặt mở rộng tại nút 18 thêm PPV2 = 2440 kW .....	69
Bảng 3. 9. Khóa mở trong trường hợp khi mở rộng PV2 có công suất 2440 kW ....	70
Bảng 3. 10. Kết quả DNR của phương pháp đề xuất cho LĐPP 33 nút .....	74
Bảng 3. 11. Vùng và công suất cho phép DG kết nối - LĐPP Chư Prông [91].....	77
Bảng 3. 12. Kết quả tối ưu 3 DG cho LĐPP Chư Prông với thuật toán COA và RRA .....	83
Bảng 3. 13. Ba giai đoạn lắp đặt DG vào LĐPP Chư Prông .....	84
Bảng 4. 1. Chi phí truyền tải theo thời gian .....	93
Bảng 4. 2. Khung giờ và giá điện.....	101
Bảng 4. 3. Kết quả sau khi lắp đặt BESS đối với LĐPP 18 nút.....	105
Bảng 4. 4. Các kết quả tính toán của CSA, GA, SFO và PFA - LĐPP 18 nút .....	106
Bảng 4. 5. Hiệu quả của CSA, GA, SFO và PFA khi có BESS cho LĐPP 18 nút.....	107
Bảng 4. 6. Kết quả sau khi lắp đặt BESS đối với LĐPP 33 nút.....	110
Bảng 4. 7. Các kết quả tính toán của CSA, GA, SFO và PFA - LĐPP 33 nút .....	112
Bảng 4. 8. Hiệu quả của CSA, GA, SFO và PFA khi có BESS cho LĐPP 33 nút.....	113

# CHƯƠNG 1

## GIỚI THIỆU

### 1.1. Đặt vấn đề

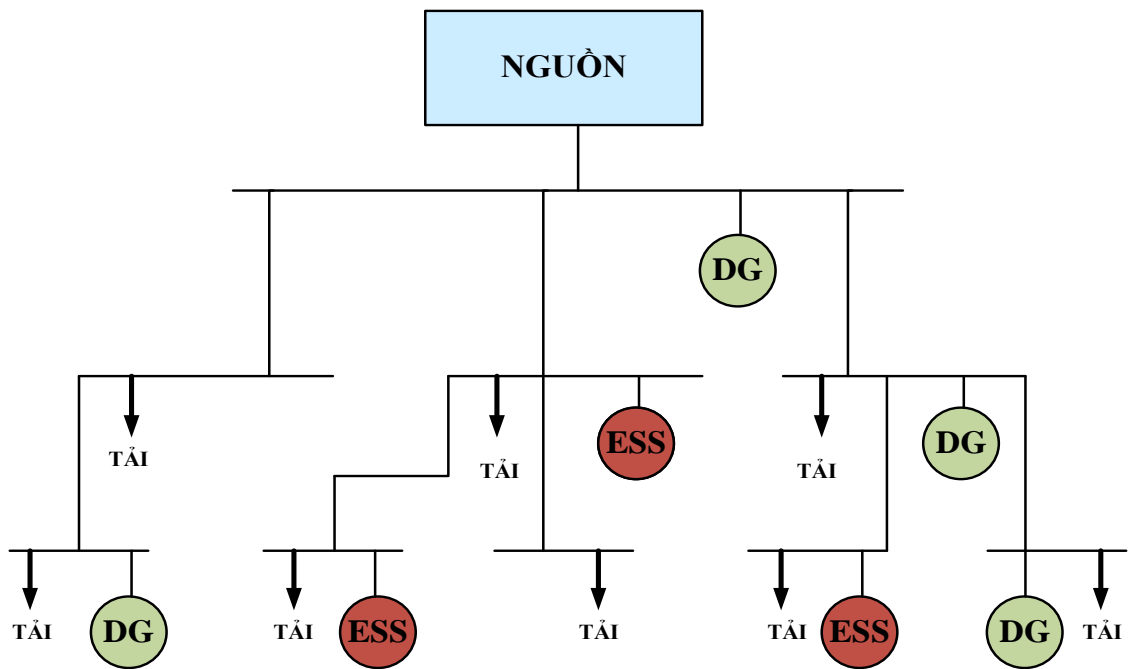
Ở mỗi quốc gia, điện năng ngày càng đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo ổn định và phát triển. Hiện nay, năng lượng bị thiếu do nhu cầu năng lượng có xu hướng gia tăng cũng như các yếu tố tác động đến môi trường. Lưới điện phân phối (LĐPP) và tải có sự thay đổi trong những năm tới với những yêu cầu và thách thức mới như là các dịch vụ, độ tin cậy, chi phí đầu tư, giá năng lượng và các yếu tố ảnh hưởng đến môi trường. Chính vì vậy, với yêu cầu và thách thức mới thì LĐPP cần phải được mở rộng. Để mở rộng lưới điện có thể thực hiện nâng cấp đường dây, xây dựng tuyến dây mới, lắp đặt thêm các trạm biến áp mới, mở rộng dung lượng trạm biến áp, lắp đặt nguồn điện phân tán (DG), mở rộng công suất DG, lắp đặt bộ dự trữ năng lượng (ESS) [1]. Việc cải tạo nâng cấp đường dây, xây dựng tuyến dây mới, lắp đặt thêm trạm biến áp hay nâng cấp các hệ thống để phục vụ ở một số thời điểm mà tải tăng cao sẽ làm tăng vốn đầu tư, tăng chi phí và không hiệu quả. Hiện nay, việc mở rộng LĐPP thông qua lắp đặt DG hay ESS để hỗ trợ cho hệ thống điện là một xu thế tất yếu [2].

Chiến lược năng lượng ở thời điểm hiện nay và sắp tới là tập trung vào việc khai thác các nguồn năng lượng tái tạo và khí thiên nhiên, tiết kiệm năng lượng, lưu trữ năng lượng và chính sách thu hút trong đầu tư nguồn điện từ tư nhân. Năng lượng bền vững hiện nay có một số công nghệ về mặt trời, gió và bộ dự trữ năng lượng được cho là rất hiệu quả đối với LĐPP [3], [4]. Các công nghệ này sử dụng tương đối là phổ biến vì nó có chi phí giảm mạnh và được nhiều chính sách hỗ trợ trong việc khai thác và sử dụng. Do đó, cần phải lắp đặt DG vào LĐPP nhằm đạt được các lợi ích kỹ thuật, kinh tế và môi trường từ DG [5], [6].

Bộ dự trữ năng lượng (ESS) là một trong các công nghệ của DG. ESS hiện đang phát triển và sử dụng trong lưới điện phân phối ngày càng nhiều [7]. Bởi vì trong một số giờ cao điểm, hệ thống không đáp ứng nhu cầu của phụ tải hoặc khách hàng phải chấp nhận mua năng lượng với chi phí cao. Ngoài ra, năng lượng phát ra dư thừa cần ESS lưu trữ ở thời điểm nhu cầu thấp và phát ra trở lại ở thời điểm nhu cầu cao. ESS

giúp lưới điện hoạt động hiệu quả như tránh phạt hợp đồng do sự cố mất điện, giảm giá năng lượng, ứng phó với việc tăng giá điện đột biến, giảm sự phụ thuộc vào nguồn năng lượng tái tạo (RES) và trì hoãn đầu tư nâng cấp hệ thống điện hiện có [8]. Chính vì vậy, cần nghiên cứu lắp đặt ESS cho LĐPP để nâng cao hiệu quả hoạt động. Trong các công nghệ của ESS thì hệ thống pin dự trữ năng lượng (BESS) được sử dụng nhiều nhất trong LĐPP cho đến thời điểm hiện nay [9], [10].

Thực trạng hiện nay, một số LĐPP đã được lắp đặt các DG tái tạo có giá thành đầu tư thấp, phần lớn là các pin quang điện (PV) [11]. Do vị trí lắp đặt, yếu tố môi trường, chính sách khuyến khích và khả năng của các nhà đầu tư nên các PV khó có thể được lựa chọn vị trí và công suất lắp đặt tối ưu. Trên thực tế, các PV được lắp đặt từng phần theo điều kiện đầu tư hiện có và tiếp tục mở rộng công suất tùy thuộc vào điều kiện thực tiễn. Vì vậy, LĐPP cần phải xác định cấu hình vận hành tối ưu để cho LĐPP hoạt động hiệu quả tốt nhất.



**Hình 1. 1.** LĐPP có kết nối các DG và ESS

DG và ESS thu hút rất nhiều nhà nghiên cứu trong bài toán tối ưu vị trí và dung lượng nhằm mở rộng LĐPP và nâng cao hiệu quả vận hành hệ thống điện [12], [13]. Khi LĐPP mở rộng với DG và ESS thì LĐPP sẽ làm việc hiệu quả hơn, kiểm soát được giá mua điện năng đồng thời giảm các yếu tố tác động đến môi trường [14], [15]. Chính vì thế, bài toán cho LĐPP hiện nay là:

- Đối với LĐPP chưa được lắp đặt DG: Việc mở rộng LĐPP thông qua xác định vị trí và công suất DG tham gia vào hệ thống nhằm nâng cao hiệu quả hoạt động của LĐPP. Trong đó, cực tiểu tổn thất công suất ( $\Delta P$ ) là yếu tố chính trong hàm mục tiêu tối ưu vì cực tiểu tổn thất công suất cho thấy được hiệu quả của DG tham gia vào hệ thống.

- Đối với LĐPP đã có lắp đặt DG (chủ yếu là PV): Việc tiếp tục mở rộng công suất của PV ở cùng một vị trí hay vị trí mới theo thời gian và khả năng đầu tư, chính sách khuyến khích, vị trí lắp đặt và yếu tố ảnh hưởng đến môi trường. Lúc này, LĐPP cần xác định lại cấu hình vận hành mới của LĐPP với hàm mục tiêu là cực tiểu tổn thất năng lượng ( $\Delta A$ ).

- Đối với LĐPP có chi phí mua điện cao thì cần giảm chi phí mua điện năng, hoặc LĐPP có DG là các nguồn năng lượng tái tạo (RES) có công suất đầu ra không ổn định thì cần phải khai thác hiệu quả RES. Việc mở rộng công suất vận hành của ESS trong hệ thống ngoài vấn đề giảm giá mua điện, khai thác hiệu quả RES thì vấn đề giảm tổn thất năng lượng, dịch chuyển thời gian và giảm đỉnh của phụ tải cũng được xem xét. Lúc này, cần xác định vị trí và dung lượng của ESS để LĐPP hoạt động với các lợi ích lớn mang lại từ ESS.

- Đối với LĐPP cần khai thác tiềm năng của các nguồn năng lượng tại chỗ: Việc mở rộng LĐPP cần tối đa công suất để tăng tỷ lệ tham gia của DG và giảm giá thành đầu tư của các nhà đầu tư DG [16]. Để thu hút các nhà đầu tư thì tối đa tỷ lệ thâm nhập của DG là một mục tiêu quan trọng vì tỷ lệ DG thâm nhập càng cao thì chi phí đầu tư trên 1 kW càng thấp. Trong vận hành hệ thống điện, một trong các vấn đề kỹ thuật quan trọng để giảm chi phí là cực tiểu tổn thất công suất [17]. Lúc này, bài toán cần phải tối đa công suất của DG và giảm thiểu tổn thất công suất của hệ thống.

Từ các công trình đã nghiên cứu và được công bố cũng như thực tiễn của LĐPP thì đề tài “Mở rộng nguồn điện phân tán và bộ dự trữ năng lượng trên lưới điện phân phối” với mục tiêu giải quyết bài toán mở rộng LĐPP thông qua lắp đặt DG và ESS với bốn vấn đề chính như sau:

- Mở rộng LĐPP thông qua lắp đặt mới DG có xét đến DNR với hàm mục tiêu là cực tiểu tổn thất công suất của hệ thống.

- Xác định cấu hình vận hành của LĐPP khi DG tiếp tục được mở rộng công suất với hàm mục tiêu là cực tiểu tổn thất năng lượng của hệ thống.

- Mở rộng LĐPP thông qua lắp đặt mới ESS với hàm mục tiêu là giảm chi phí mua điện và giảm chi phí tổn thất năng lượng của hệ thống.

- Mở rộng tối đa công suất thâm nhập của DG vào LĐPP với hàm mục tiêu là cực tiểu tổn thất công suất của hệ thống.

## **1.2. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu**

- Nghiên cứu lý thuyết về LĐPP, DG và ESS.

- Nghiên cứu các bài toán mở rộng LĐPP thông qua kết nối DG và ESS, mở rộng công suất của DG và công suất vận hành của ESS.

- Mô phỏng, kiểm tra trên LĐPP mẫu và so sánh kết quả với các công bố khác.

## **1.3. Mục tiêu và nhiệm vụ nghiên cứu**

- Mở rộng LĐPP thông qua lắp đặt mới các DG với mục tiêu là cực tiểu tổn thất công suất của hệ thống.

- Xác định cấu hình LĐPP khi mở rộng công suất DG với mục tiêu cực tiểu tổn thất năng lượng của hệ thống.

- Kế hoạch lắp đặt mở rộng DG thâm nhập vào LĐPP với mục tiêu cực tiểu tổn thất công suất cho LĐPP Chư Prông – Gia Lai, Việt Nam.

- Xác định vị trí và dung lượng của ESS với mục tiêu là giảm chi phí mua điện và giảm chi phí tổn thất năng lượng của hệ thống.

## **1.4. Phương pháp nghiên cứu**

- Nghiên cứu lý thuyết: Tìm hiểu, phân tích và tổng hợp một số tài liệu với nội dung của đề tài để giải quyết các yêu cầu của bài toán đặt ra.

- Mô phỏng trên các phần mềm MATLAB, PSS-ADEPT để kiểm tra các bài toán đề xuất trên các lưới điện mẫu.

## **1.5. Đóng góp của luận án**

Luận án phân tích và đề xuất bài toán mở rộng lưới điện phân phối (LĐPP), mở rộng công suất của nguồn phân tán (DG) và công suất vận hành của bộ dự trữ



năng lượng (ESS) để nâng cao hiệu quả hoạt động của LĐPP. Luận án đề xuất ba bài toán mới và một bài toán áp dụng cho LĐPP Việt Nam, các bài toán như sau:

**Bài toán 1:** Mở rộng LĐPP thông qua xác định vị trí và công suất tối ưu của DG có xét tái cấu hình lưới điện phân phối (DNR). Luận án đưa ra một bài toán mới để giải quyết vấn đề tối ưu vị trí và công suất của DG thông qua hai giai đoạn. Giai đoạn I - tối ưu lắp đặt DG trong LĐPP kín (giai đoạn thiết kế) và giai đoạn II - tối ưu khóa mở để lưới điện vận hành hở (giai đoạn vận hành). Bài toán đề nghị thực hiện tối ưu lắp đặt DG có xét DNR với hàm mục tiêu là cực tiểu tổn thất công suất của hệ thống. Bài toán đề nghị hai giai đoạn là một dạng bài toán tối ưu mới trong lắp đặt DG có xét DNR bên cạnh các dạng bài toán tối ưu lắp đặt DG có xét DNR khác đã được công bố như bài toán tối ưu đồng thời vị trí, công suất và DNR (bài toán đồng thời) và bài toán tối ưu vị trí trước và sau đó tối ưu công suất và DNR (bài toán VT - CS và DNR). Bài toán đề nghị với hai giai đoạn tối ưu có ưu điểm là đưa ra lời giải tối ưu toàn cục cho vấn đề lắp đặt DG có xét DNR. Bài toán tối ưu DG thông qua hai giai đoạn cho thấy số biến giảm cho mỗi giai đoạn của thuật toán tối ưu bằng cách chia ra từng giai đoạn. Bài toán đề nghị cũng cho thấy sự phù hợp của vấn đề lắp đặt DG trong dài hạn (giai đoạn thiết kế) được ưu tiên trước và vấn đề DNR là ngắn hạn (giai đoạn vận hành) được thực hiện sau. LĐPP 33 nút và LĐPP 69 nút được kiểm tra và cho thấy tính hiệu quả của bài toán đề nghị. Bài toán đề nghị sử dụng thuật toán Runner Root Algorithm (RRA) thực hiện và so sánh với thuật toán Coyote Algorithm (COA) và Genetic Algorithm (GA). Về thuật toán, kết quả cho thấy các thuật toán RRA, COA và GA là các thuật toán hiệu quả để tối ưu lắp đặt DG cho LĐPP có xét DNR. Ngoài ra, bài toán đề nghị cũng được so sánh với các bài toán đồng thời và bài toán VT-CS và DNR với các thuật toán khác nhau cũng cho thấy hiệu quả của bài toán tách ra hai giai đoạn. Các kết quả mô phỏng của bài toán đề nghị cho thấy tổn thất công suất toàn hệ thống tương tự với bài toán đồng thời và tốt hơn so với bài toán VT- CS và DNR. Bài toán đề nghị tối ưu lắp đặt DG có xét DNR thông qua hai giai đoạn đã được nghiên cứu, thực hiện và công bố trong công trình số [1], [5] và [7].

**Bài toán 2:** Xác định cấu hình LĐPP khi mở rộng công suất của pin quang điện (PV). Luận án đề nghị thuật toán trao đổi nhánh với công suất nhánh trung bình (CSNTB) cải tiến nhằm xác định cấu hình vận hành LĐPP khi PV được mở rộng công

suất với mục tiêu cực tiểu tổn thất năng lượng. Ưu điểm của bài toán đề nghị là đơn giản, dễ thực hiện và chính xác trong việc xác định cấu hình của LĐPP khi PV được mở rộng công suất. LĐPP 18 nút và LĐPP 33 nút được áp dụng thử nghiệm đã cho thấy phương pháp đề nghị là đơn giản, nhanh chóng xác định được cấu hình lưới điện và có độ chính xác cao khi so sánh với bài toán xác định cấu hình lưới điện theo phương pháp sử dụng công suất nhánh trung bình (CSNTB) và phương pháp sử dụng đồ thị phụ tải bằng các thuật toán tối ưu. Bài toán đề nghị đã được nghiên cứu, thực hiện và công bố ở công trình số [2] và [10].

**Bài toán 3:** Áp dụng mở rộng LĐPP Chư Prông – Gia Lai của Việt Nam. LĐPP Chư Prông được áp dụng để mở rộng thông qua lắp đặt DG nhằm tối đa công suất thâm nhập và cực tiểu tổn thất công suất của hệ thống. Bài toán đề xuất ba giai đoạn lắp đặt DG tương ứng với ba vị trí và công suất khả thi cho phép lắp đặt vào LĐPP Chư Prông. Thuật toán Runner Root Algorithm (RRA) và Coyote Algorithm (COA) được sử dụng hiệu quả cho bài toán 1 và tiếp tục được áp dụng để thử nghiệm cho vấn đề lắp đặt ba DG cho LĐPP Chư Prông không xét tái cấu hình. Từ kết quả ba DG đã được tối ưu, luận án đề xuất một kế hoạch lắp đặt mở rộng DG trên LĐPP Chư Prông qua ba giai đoạn nhằm phù hợp với vấn đề đầu tư và lắp đặt DG trong một thời gian dài. Bài toán đề nghị đã được nghiên cứu, thực hiện và công bố trong công trình số [3], [8] và [9].

**Bài toán 4:** Mở rộng LĐPP thông qua lắp đặt pin dự trữ năng lượng (BESS) để giảm chi phí mua điện. Luận án đề xuất bài toán xác định vị trí và dung lượng của BESS trên LĐPP nhằm giảm chi phí mua năng lượng cũng như giảm chi phí tổn thất năng lượng. Bài toán đề nghị với điểm mới là đưa ra hàm mục tiêu cực tiểu chi phí mua năng lượng và thuật toán CSA được áp dụng lần đầu tiên cho bài toán tối ưu vị trí và dung lượng của BESS. Việc tối ưu lắp đặt BESS vào hệ thống không những giảm chi phí mua điện năng mà còn giảm tổn thất năng lượng và khai thác hiệu quả các nguồn năng lượng tái tạo (RES). LĐPP 18 nút và LĐPP 33 nút có PV được thử nghiệm cho bài toán tối ưu lắp đặt BESS đã cho thấy tính hiệu quả của BESS khi tham gia vào LĐPP. Bài toán đề nghị tối ưu lắp đặt BESS trên LĐPP đã được nghiên cứu, thực hiện và công bố trong công trình số [4] và [6].

Các bài toán trong luận án đề nghị mở rộng LĐPP thông qua lắp đặt và mở rộng công suất của DG và BESS nhằm nâng cao hiệu quả hoạt động của LĐPP. Đối với DG đã cho thấy giảm tổn thất công suất của hệ thống và đối với BESS cho thấy giảm chi phí mua điện năng rõ rệt.

## **1.6. Bộ cục của luận án**

Chương 1: Giới thiệu

Chương 2: Tổng quan

Chương 3: Mở rộng sự thâm nhập của nguồn điện phân tán trên lưới điện phân phối

Chương 4: Mở rộng sự thâm nhập của bộ dự trữ năng lượng trên lưới điện phân phối

Chương 5: Kết luận

## CHƯƠNG 2

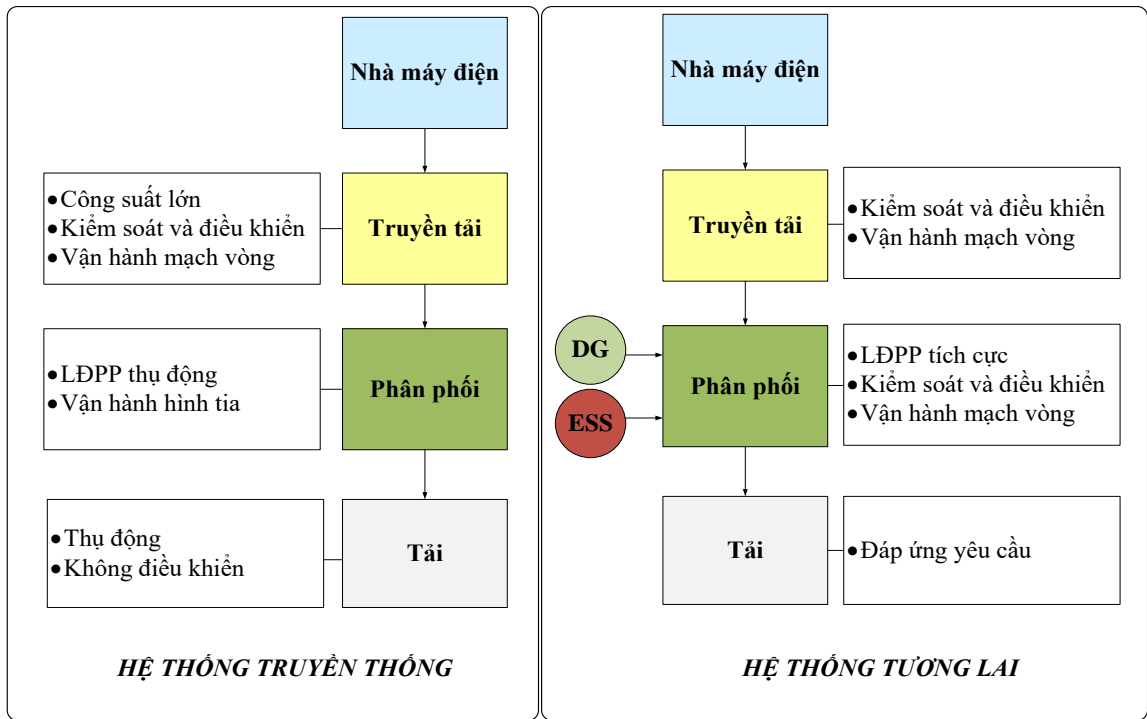
# TỔNG QUAN

### 2.1. Lưới điện phân phối

Lưới điện phân phối (LĐPP) là một phần rất quan trọng của hệ thống điện vì nó cung cấp điện trực tiếp cho các hộ phụ tải. Cấu trúc truyền thống của hệ thống điện có dạng dọc. Vì vậy, LĐPP sẽ nhận từ lưới điện truyền tải và sau đó cấp cho các hộ phụ tải. Lúc này, dòng công suất sẽ được truyền một chiều từ hệ thống truyền tải đến hệ thống phân phối và cấp cho các hộ phụ tải. Do đó, việc truyền tải từ nguồn điện đến hộ sử dụng điện sẽ gây ra tổn thất công suất lớn trong hệ thống. Đặc điểm của LĐPP là có nhiều loại phụ tải, phân bố không đều và các phụ tải có tải cao điểm khác nhau cũng như liên tục thay đổi theo nhu cầu. Điều này có thể gây ra quá tải đường dây ở vị trí này và non tải ở vị trí khác trong cùng một thời điểm dẫn đến tổn thất công suất tăng cao, vận hành không kinh tế, giảm độ tin cậy và dễ sự cố và làm ảnh hưởng xấu trong việc cung cấp điện.

Từ đặc điểm kỹ thuật và yêu cầu cung cấp điện nên LĐPP luôn được vận hành ở trạng thái mạch vòng hở (hình tia). Để nâng cao độ tin cậy thì các nhà hoạch định xây dựng lưới điện theo cấu trúc là mạch vòng và được vận hành theo cấu trúc hình tia. Ở mạch vòng thì các tuyến dây được liên kết thông qua các khóa chuyển mạch. Các khóa chuyển mạch này được vận hành ở vị trí mở, nhưng khi cần (sửa chữa hoặc có sự cố đường dây/ thiết bị) thì sẽ không bị gián đoạn nhờ các khóa chuyển mạch trong hệ thống.

Kết quả của các nghiên cứu cũng như từ thực tế vận hành đã cho thấy LĐPP khi vận hành hình tia có lợi ích là đơn giản trong vận hành, dễ định lại cấu hình của lưới (sau khi bị sự cố), vùng mất điện nhỏ và không lan tràn sự cố, giảm khó khăn trong vấn đề cắt điện cục bộ, dòng ngắn mạch bé nên đơn giản trong đóng cắt và bảo vệ trên các tuyến. LĐPP hình tia có các nhược điểm cần khắc phục là tổn thất công suất của hệ thống lớn, sụt áp cao và độ tin cậy thấp. Trong thiết kế, các khóa chuyển mạch được lắp đặt ở các vị trí thích hợp để thao tác cũng như giảm chi phí.



**Hình 2. 1.** Lưới điện trong truyền thống và tương lai [18]

Hình 2.1 cho thấy cấu trúc lưới điện trong truyền thống với cấu trúc ở dạng dọc. Cấu trúc mới của hệ thống hiện nay là cấu trúc ở dạng ngang do có sự tham gia của DG hay ESS. Lúc này, công suất trên các tuyến không chỉ truyền từ lưới điện truyền tải đến lưới điện phân phối mà còn lưu thông trong các bộ phận với nhau, thậm chí công suất còn truyền ngược về phía nguồn. Với cấu trúc mới ở dạng ngang thì hệ thống sẽ thực hiện nhiệm vụ tốt hơn như giảm tổn thất, nâng cao chất lượng, tăng độ tin cậy và mang lại các lợi ích khác.

## 2.2. Nguồn điện phân tán (DG)

### 2.2.1. Giới thiệu về DG

Nguồn điện phân tán (DG) hiện nay được tích hợp vào LĐPP là rất phổ biến vì năng lượng đảm bảo theo yêu cầu cũng như các lợi ích rất lớn về kinh tế [2], [19]. Các DG có công suất lớn là các nguồn năng lượng tái tạo (RES) như tua bin gió (Wind Turbines – WT), pin quang điện (Photovoltaic – PV), thủy điện thường được kết nối với lưới điện truyền tải. Vì điều kiện môi trường không thuận lợi như thiếu gió, thiếu nắng hoặc thiếu nước, điều này dẫn đến tình trạng thiếu hụt điện năng cung cấp cho

LĐPP từ hệ thống. Việc tìm giải pháp bù đắp điện năng cho sự thiếu hụt này là một vấn đề quan trọng của các nhà cung cấp năng lượng. Để bù đắp điện năng cho sự thiếu hụt này ngay tại LĐPP thì giải pháp lắp đặt DG có công suất nhỏ là hữu hiệu nhất. Lúc này, các DG sẽ được tham gia khi tải đỉnh, cung cấp điện năng giá rẻ và cung cấp nguồn khi hệ thống bị gián đoạn [20].

Đối với các nhà máy điện có công suất lớn như nhiệt điện hay thủy điện là các nguồn điện chính được tham gia trực tiếp vào hệ thống truyền tải. Còn đối với các nhà máy điện với công suất vừa và nhỏ thì thường tham gia vào LĐPP. Hiện nay, để xây dựng các nhà máy phát công suất lớn là khó khăn bởi vì đầu tư cao, nguồn sơ cấp giảm và các yếu tố ảnh hưởng đến môi trường. Thị trường cạnh tranh bán lẻ của ngành điện đã mang lại sự thay đổi nhanh chóng khi DG tham gia vào LĐPP. DG là một giải pháp hữu hiệu hiện nay để cung cấp năng lượng với chi phí thấp và bù đắp năng lượng thiếu hụt [21].

Khi DG được kết nối trên LĐPP thì lúc này DG cũng là một nguồn điện thứ hai. Vì vậy, LĐPP trở thành lưới điện kín có hai hoặc hơn hai nguồn cung cấp. Tuy nhiên, khi lắp đặt DG vào LĐPP sẽ làm thay đổi tổn thất công suất trên hệ thống, dòng ngắn mạch, công suất của đường dây, điện áp nút và gây ra một số ảnh hưởng như độ tin cậy, họa tần, cộng hưởng. Do đó, LĐPP cần quy hoạch công suất và các vị trí lắp đặt DG để kết nối với mục tiêu phù hợp, trong đó cực tiểu tổn thất công suất là mục tiêu hàng đầu được quan tâm rất lớn hiện nay vì việc giảm tổn thất công suất sẽ đánh giá sự hiệu quả của DG tham gia vào hệ thống. Chính vì thế, bài toán tối ưu công suất lắp đặt và vị trí lắp đặt DG sao cho tổn thất công suất của hệ thống nhỏ nhất và thỏa mãn các ràng buộc kỹ thuật là rất quan trọng.

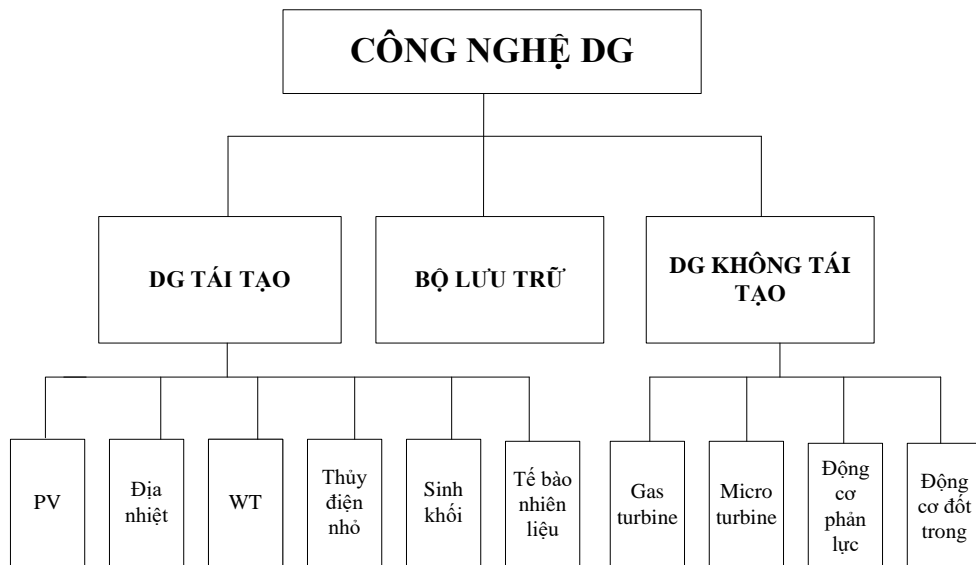
### **2.2.2. Công nghệ của DG**

Hiện tại DG có công nghệ không tái tạo và tái tạo với quy mô nhỏ được tích hợp vào LĐPP thông thường nhằm mục đích cung cấp năng lượng ngay tại các phụ tải hoặc gần các phụ tải. DG là các nguồn với công suất vừa hoặc nhỏ thường được lắp đặt tại/ gần vị trí phụ tải như ở các nơi không thể nối lưới, nông thôn hoặc ngoại thành. DG cơ bản có các loại như Bảng 2.1 [22], [23].

**Bảng 2. 1.** Phân loại DG

Theo loại công suất	Theo vị trí	Theo kích cỡ	Theo công nghệ
- DG1 là loại hỗ trợ P (PV, khí sinh học). - DG2 là loại hỗ trợ cả P và Q (WT, thủy triều, sóng biển). - DG3 là loại hỗ trợ Q (tụ bù, cuộn cảm). - DG4 là loại hỗ trợ Q và hấp thụ P (WT kép).	- DG kết nối ở phía LDPP. - DG kết nối ở phía phụ tải (rất gần, gần, xa với phụ tải).	- DG cỡ rất nhỏ (1 - 5 kW). - DG cỡ nhỏ (5 - 5MW). - DG cỡ trung bình (5 - 50 MW). - DG cỡ lớn (50 - 300 MW).	- Tái tạo (WT, PV, nhiệt, khối lượng sinh học, địa nhiệt, thủy triều và thủy điện nhỏ, siêu nhỏ). - Không tái tạo (tua bin khí loại nhỏ, tua bin đốt trong). - Lưu trữ (siêu tụ điện, pin, bánh đà, khí nén).

Công nghệ về DG được mô tả như Hình 2.2, tùy theo loại công nghệ sẽ có phương pháp lắp đặt và chi phí khác nhau [19].



**Hình 2. 2.** Các công nghệ DG [19]

### 2.2.2.1. DG tái tạo

Công nghệ về DG là các nguồn năng lượng tái tạo (RES) ngày càng cần thiết để cấp năng lượng cho LDPP. RES kết hợp nhiều công nghệ khác nhau như PV, WT, thủy điện nhỏ, sinh khối, địa nhiệt và thủy triều. Hiện nay, vấn đề sử dụng RES đã tăng lên rất nhiều do lo ngại về tác động môi trường. Việc RES tham gia vào hệ thống

hiện nay đã giúp giảm về việc thiếu hụt về năng lượng cũng như các lợi ích khác. Bởi vì, RES là nguồn năng lượng vô hạn và thân thiện với môi trường.

#### 2.2.2.2. DG không tái tạo

Các công nghệ DG không tái tạo bao gồm động cơ diesel, động cơ pittông, tuabin khí có thể cung cấp điện kết nối LĐPP và độc lập. Công nghệ không tái tạo đã trở nên phổ biến vì lợi ích kinh tế và kỹ thuật như tiết kiệm nhiên liệu, khởi động nhanh, tính sẵn sàng cao, hiệu suất cao, vận hành thấp, hiệu quả cao cũng như một số lợi ích khác. Do vậy, DG không tái tạo được ưa chuộng trong thương mại và công nghiệp.

#### 2.2.2.3. Bộ dự trữ năng lượng (ESS)

Công nghệ lưu trữ hiện nay có các dạng như pin lưu trữ, siêu tụ điện, bánh đà, hóa học, khí nén và từ tính. Các nguồn năng lượng tái tạo thường kết hợp với ESS để tăng hiệu quả ở một số ứng dụng.

#### 2.2.3. Lợi ích của DG

DG kết nối vào hệ thống có nhiều ưu điểm và mang lại lợi ích theo từng quan điểm khác nhau như ở Bảng 2.2 [18].

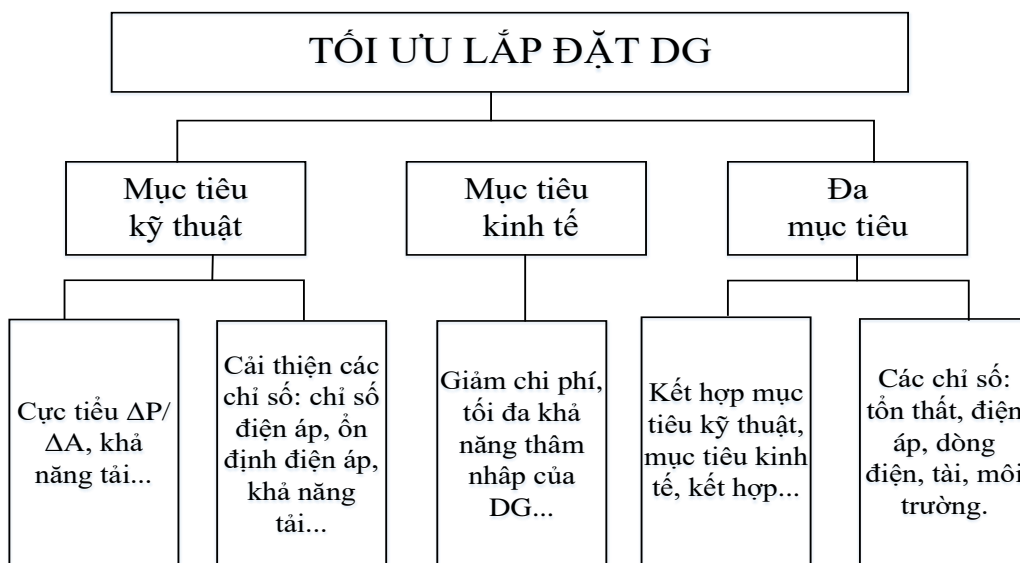
**Bảng 2. 2.** Lợi ích của việc kết nối DG vào LĐPP

<b>Quan điểm kỹ thuật</b>	<b>Quan điểm kinh tế</b>	<b>Quan điểm môi trường</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Giảm tổn thất công suất / tổn thất năng lượng.</li> <li>• Cải thiện chất lượng điện áp và điện năng.</li> <li>• Tăng độ tin cậy và an ninh.</li> <li>• Tự chủ cấp điện.</li> <li>• Tăng hiệu suất năng lượng.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoãn đầu tư cho hệ thống.</li> <li>• Giảm chi phí.</li> <li>• Hiệu suất nâng cao.</li> <li>• Giảm chi phí nhiên liệu.</li> <li>• Giảm yêu cầu dự trữ.</li> <li>• Chi phí vận hành thấp hơn.</li> <li>• Giảm rủi ro đầu tư.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Giảm phát thải.</li> <li>• Giảm sự ảm đạm lên toàn cầu.</li> <li>• Khuyến khích RES tham gia.</li> </ul>



## 2.2.4. Mục tiêu lắp đặt DG

Hầu hết các nghiên cứu tối ưu lắp đặt DG thực hiện phần lớn với hàm mục tiêu là cực tiểu tổn thất công suất tác dụng. Bên cạnh đó, giảm thiểu tổn thất công suất phản kháng, cải thiện cấu hình điện áp, giảm dòng điện trên các nhánh quá tải, tăng công suất dự phòng và công suất bơm tối đa vào hệ thống cũng được thực hiện. Thông thường, cực tiểu tổn thất công suất được chọn làm chỉ số mục tiêu cơ bản và các mục tiêu khác được sử dụng để hỗ trợ đơn hoặc đa mục tiêu nhằm tối ưu lắp đặt DG. Các kết hợp phổ biến được tóm tắt như Hình 2.3.



**Hình 2.3.** Các mục tiêu khi tối ưu lắp đặt DG

### 2.2.4.1. Mục tiêu giảm thiểu tổn thất công suất

Giảm tổn thất công suất là tiêu chí quan trọng nhất nhằm đánh giá mức độ hiệu quả DG tham gia vào LĐPP. Các DG được nghiên cứu trên LĐPP phần lớn nghiên cứu với mục tiêu là cực tiểu tổn thất công suất thông qua tối ưu lắp đặt DG [24], [25].

### 2.2.4.2. Mục tiêu cải thiện cấu hình điện áp

Trong các nghiên cứu về tối ưu lắp đặt DG, một số tập trung vào cấu hình điện áp hoặc cải thiện điện áp làm mục tiêu tối ưu. Nhưng hầu hết giảm tổn thất công suất và kết hợp với cải thiện cấu hình điện áp để làm mục tiêu tối ưu. Ngoài ra, các nghiên cứu khác kết hợp nhiều mục tiêu như độ tin cậy, độ nhạy đối với tăng điện áp, ổn định điện áp hoặc giá nút cũng được nghiên cứu.

### 2.2.4.3. Mục tiêu về tài chính

- Hiệu quả DG và tối đa công suất DG: Các nghiên cứu về công suất, vị trí và hiệu quả của DG thì các bài toán này đã giả sử một DG được lắp đặt trên mỗi nút. Tương tự như tổn thất công suất, tối đa công suất DG không thể là mục tiêu duy nhất để tối ưu. Tuy nhiên, để khai thác DG với công suất tối ưu thì cần phải đi kèm với mục tiêu khác.

- Tối thiểu chi phí và tối đa lợi nhuận: Chi phí sản xuất điện được nghiên cứu với mục tiêu như chi phí xây dựng, bảo trì, bảo dưỡng và vận hành DG. Các mục tiêu liên quan đến chi phí luôn trái ngược với các mục tiêu kỹ thuật và việc thu thập dưới dạng một hàm mục tiêu giá trị duy nhất là rất khó, thậm chí là không thể. Vì vậy, một hàm mục tiêu phù hợp có thể dưới dạng là hàm đa mục tiêu.

### 2.2.4.4. Tối ưu đa mục tiêu

Việc kết hợp các hàm đơn mục tiêu để đưa ra hàm đa mục tiêu trong tối ưu lắp đặt DG trên hệ thống. Hàm đa mục tiêu là một kế hoạch nhằm thỏa mãn giữa các mục tiêu với nhau trong lắp đặt DG. Các hàm đa mục tiêu tạo ra một mô hình tốt hơn thường chứa các mục tiêu mâu thuẫn và cho phép các nhà hoạch định chọn giải pháp tốt nhất từ các giải pháp khả thi. Tuy nhiên, khi lắp đặt DG thì cần xem xét các ràng buộc trong hàm đơn mục tiêu hoặc đa mục tiêu nhưng phải đảm bảo các điều kiện thiết kế, vận hành và điều kiện ràng buộc (công suất DG, điện áp nút, dòng điện nhánh) [14]. Những ràng buộc phổ biến như ràng buộc đẳng thức (cân bằng công suất đường dây và tại nút của hệ thống), ràng buộc bất đẳng thức (giới hạn cấu hình điện áp, dòng điện, công suất và số lượng DG, hệ số công suất, vị trí trạm, tổn thất và điện áp) [20], [26].

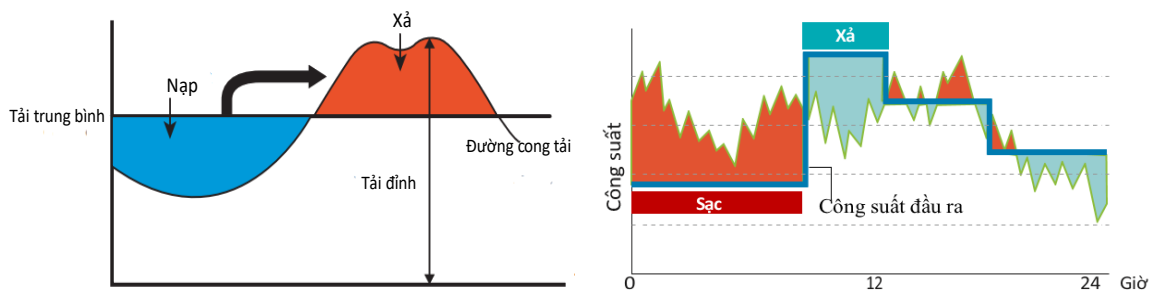
## 2.3. Bộ dự trữ năng lượng (ESS)

### 2.3.1. Giới thiệu về ESS

Bộ dự trữ năng lượng (ESS) là phần tử sẽ thực hiện quá trình chuyển điện năng từ lưới điện sang một dạng năng lượng khác có thể lưu trữ và chuyển đổi ngược trở lại thành điện năng khi cần thiết. Quá trình này cho phép sản xuất điện ở những thời điểm có nhu cầu thấp hay lúc giá mua điện năng thấp hoặc từ RES không liên tục và

sẽ dùng khi có nhu cầu cao hoặc lúc có giá mua điện năng cao. Các ESS có ứng dụng hầu hết ở các khâu phát điện - truyền tải - phân phối - DG (phần lớn là RES) - khách hàng. Điều đó có nghĩa là ESS giúp điện năng luôn được cân bằng trong hệ thống. Trên đà phát triển, ESS là cấp thiết đối với ngành điện và nó đang nổi lên với ưu điểm vượt trội là giảm chi phí năng lượng [27].

Thời gian gần đây, ESS trở nên rất quan trọng cho LDPP bởi vì ESS phục vụ nhiều lợi ích như chênh lệch giá, điều chỉnh tần số, độ ổn định và độ tin cậy được nâng cao do có sự tham gia đáng kể của RES. Các RES như WT và PV thường phát công suất gián đoạn, để giảm thiểu điều này bằng cách sử dụng ESS nhằm đảm bảo sự ổn định của nguồn cung cấp. Các RES đang được xây dựng trên các nơi khác nhau và đang dần thay thế các nhà máy điện thông thường. Công suất dư thừa của RES phát ra cần được lưu trữ để tránh truyền tải đến nơi không cần thiết gây ra tác động xấu đối với lưới điện. Lúc này, ESS cho phép cả phía mua và phía bán dự trữ trong lúc thấp điểm khi mức năng lượng của tải thấp và sử dụng hoặc bán lượng dự trữ đó trong lúc cao điểm. ESS đang tạo ra cơ hội mới trong kinh doanh cũng như tạo ra sự kết nối mới giữa người bán và người mua điện [28].



**Hình 2. 4.** Nạp/ xả và san phẳng đồ thị với ESS [8]

Trước đây, ESS không thể cạnh tranh với một số công nghệ khác. Hiện nay, các công nghệ ESS có ưu điểm để đáp ứng với yêu cầu mới từ hệ thống cũng như chi phí đầu tư cho ESS đang giảm dần và có khả năng sinh lợi nhuận [29]. Tuy nhiên, nhu cầu về năng lượng điện thay đổi đáng kể theo giờ, ngày và mùa. Thực tế, nhu cầu năng lượng điện cao điểm thường rơi vào trong vài giờ mỗi ngày. Điều này dẫn đến việc nâng cấp các nhà máy phát điện và hệ thống điện là không hiệu quả. ESS cho phép sản xuất được năng lượng kếp từ nguồn cung cấp của nó, tức là tự phát ra hoặc

thu vào. Với dung lượng lưu trữ có quy mô lớn, các nhà hoạch định hệ thống chỉ cần xây dựng công suất đủ đáp ứng nhu cầu trung bình chứ không phải là nhu cầu cao điểm [27]. ESS được xem như là công nghệ bắt buộc đối với hệ thống điện có lắp đặt DG, đặc biệt là các nguồn năng lượng tái tạo. Với ESS là một giải pháp chính để bù đắp linh hoạt và cung cấp điện liên tục đối với LDPP có DG. ESS trong hệ thống điện là một giải pháp bền vững, tin cậy, hiệu quả và thân thiện [8].

### 2.3.2. Công nghệ của ESS

Sự cần thiết ngày càng tăng của ESS đã thúc đẩy con người nỗ lực không ngừng để khám phá ra các phương pháp lưu trữ mới hiệu quả hơn để phục vụ đời sống. ESS được phân loại dựa trên tốc độ đáp ứng, thời gian lưu trữ và dạng lưu trữ. Hình 2.5 trình bày các công nghệ của ESS [29].



**Hình 2. 5.** Các dạng công nghệ của ESS

- Lưu trữ cơ học (MES): MES là dạng lưu trữ lâu đời nhất mà loài người đã và đang sử dụng. Ưu điểm của MES là lưu trữ dễ dàng, thời gian dài và linh hoạt. Cơ năng có thể xuất hiện dưới dạng thế năng hoặc động năng. Có ba dạng lưu trữ của MES là bơm, bánh đà và khí nén.

- Lưu trữ nhiệt (TES): TES là dạng lưu trữ nhiệt nóng hoặc nhiệt lạnh trong một phương tiện lưu trữ. TES thường có một kho chứa, thiết bị để phun và chiết nhiệt đến trung gian hoặc ngược lại.

- Lưu trữ điện hóa (EES): EES là lưu trữ dưới dạng pin hay tụ điện. Pin là thiết bị lưu trữ với điện áp cao và mật độ cao. Có nhiều loại khác nhau như pin lithiumion (Li-ion), natri-lưu huỳnh (NaS), niken-cadmium (NiCd), axit chì (axit Pb), pin chì-cacbon, pin dòng chảy... Hiện tại, pin Li-ion đã trở nên phổ biến nhờ vòng đời dài, điện áp hoạt động cao và tốc độ tự phóng điện thấp hơn các loại pin khác [30]. Pin Li-ion có mật độ sạc cao hơn và có trọng lượng thấp hơn so với các loại khác với cùng dung lượng.

- Lưu trữ tĩnh điện và từ tính (EAMES): EAMES là lưu trữ dưới dạng điện trường và từ trường nhờ các siêu tụ điện và nam châm siêu dẫn. Các loại này có mật độ năng lượng trung bình và công suất cao, rất hữu ích cho lưu trữ để đáp ứng tải cao điểm, làm mịn công suất đầu ra và thu hồi năng lượng.

- Lưu trữ hóa học (ChES): ChES là lưu trữ dưới dạng liên kết hóa học của các phân tử. Khi các phân tử phản ứng hóa học và sự dịch chuyển điện tử diễn ra và tạo ra năng lượng. Hai dạng ChES chính là nhiệt hóa và điện hóa.

- Lưu trữ hỗn hợp (HESS): Một loại ESS khó có thể đáp ứng nhu cầu, để đáp ứng tất cả các yêu cầu thì cần phải kết hợp nhiều ESS và được gọi là ESS lai (HESS).

### 2.3.3. Lợi ích của ESS

ESS đóng vai trò nổi bật trong chuỗi hoàn chỉnh của các khâu trong hệ thống phát điện – truyền tải – phân phối – tải. ESS được sử dụng nhiều cho các mục tiêu lắp đặt trên hệ thống điện như chênh lệch giá năng lượng, cân bằng tải, giảm đỉnh tải, dịch chuyển thời gian và quản lý tải. Với sự gia tăng tích hợp của các DG tái tạo với LDPP ngày càng nhiều nên ESS ngày càng thu hút nghiên cứu và đầu tư [31]. Hiện

nay, hệ thống pin dự trữ năng lượng (BESS) là một công nghệ được ưa chuộng trong các tất cả loại ESS với các ưu điểm nổi bật về khả năng lưu trữ, thời gian đáp ứng nhanh và tính độc lập [32]. Trong các loại của BESS thì pin lithium-ion (pin Li-ion) là lựa chọn phù hợp vì nó có thời gian đáp ứng nhanh, trọng lượng thấp, kích thước nhỏ và dễ triển khai [33].

Việc sử dụng ESS trên quy mô lớn có thể giúp chuyển từ phát điện tập trung sang phân tán. BESS mang lại một số các lợi ích nổi trội như nâng cao độ tin cậy, hiệu suất hệ thống, chất lượng điện năng, an ninh năng lượng và đáp ứng yêu cầu năng lượng ở nơi vùng sâu/ vùng xa. ESS tích hợp với PV làm ổn định công suất đầu ra, giảm điện năng gián đoạn và giúp duy trì sự ổn định hệ thống [34]. Chuỗi giá trị điện truyền thống đã được xem xét bao gồm năm liên kết là nguồn nhiên liệu - phát điện - truyền tải - phân phối - dịch vụ năng lượng phía khách hàng thì ESS đang trở thành liên kết thứ sáu để cung cấp năng lượng bất kỳ khi nào, những nơi cần thiết và nó tạo ra một thị trường phản ứng nhanh. Bảng 2.3 thể hiện lợi ích của việc lắp đặt ESS vào LDPP.

**Bảng 2. 3.** Lợi ích của việc kết nối BESS vào LDPP

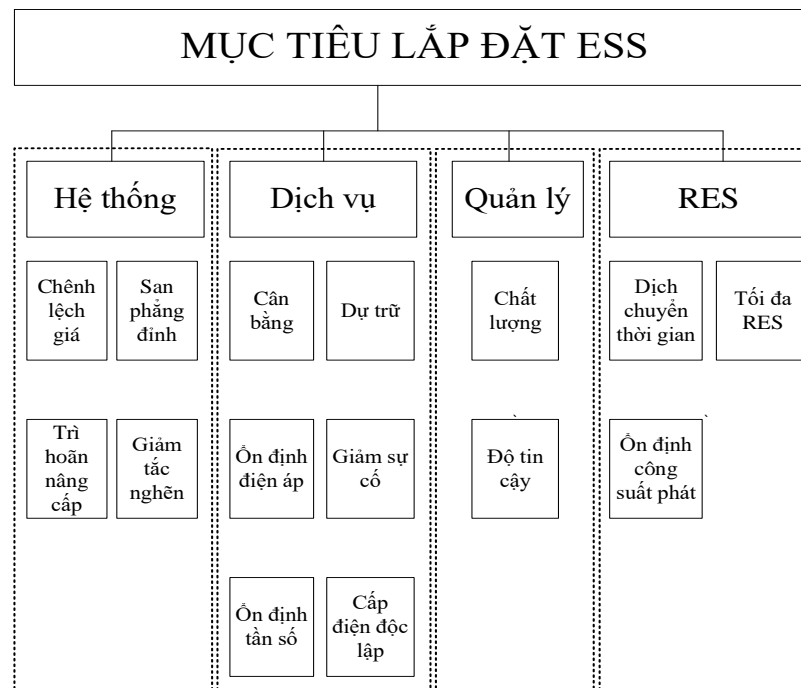
Công ty truyền tải và phân phối	Người sử dụng điện	Nguồn năng lượng tái tạo (RES)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoãn nâng cấp hệ thống.</li> <li>• San phẳng đỉnh tải.</li> <li>• Thay thế năng lượng truyền thống.</li> <li>• Giảm dự phòng và đa dạng nguồn.</li> <li>• Điều chỉnh tần số/ điện áp.</li> <li>• Đáp ứng yêu cầu ngoài hợp đồng</li> <li>• Ổn định hệ thống.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tăng chất lượng điện năng và giảm các chi phí.</li> <li>• Dịch chuyển thời gian sử dụng.</li> <li>• Khai thác RES.</li> <li>• Chênh lệch giá.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tối đa RES.</li> <li>• Điều chỉnh điện áp/ tần số.</li> <li>• Tránh bị phạt.</li> <li>• Cân bằng tải.</li> </ul>

#### 2.3.4. Mục tiêu lắp đặt ESS

Cũng như DG, khi LDPP có các ESS thì khách hàng kiểm soát chi phí mua điện năng và khách hàng có thể chuyển đổi nguồn điện kết nối sao cho chi phí mua điện là thấp nhất. Vì vậy, cần dựa vào các yếu tố: cấu hình lưới, công suất, giá điện,

yếu tố môi trường để từ đó đưa ra phương thức vận hành ESS tốt nhất nhưng phải đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật.

Khi ESS kết nối vào LĐPP, lúc này LĐPP không còn là hình tia hay vòng hở mà là lưới điện kín có hai hoặc hơn hai nguồn cung cấp. Với yêu cầu là phải mang lại lợi ích phù hợp cho các nhà đầu tư vào hệ thống nhưng song song đó vẫn phải đem lại lợi ích cho xã hội, khách hàng và công ty quản lý lưới. Do đó, cần xác định công suất và vị trí tối ưu của ESS được phép tham gia. ESS có bốn ứng dụng như trong Hình 2.6 [34].



**Hình 2. 6.** Mục tiêu lắp đặt ESS

#### 2.3.4.1. Trong hệ thống năng lượng

- **Chênh lệch giá năng lượng:** Việc tạo ra năng lượng rất tốn kém nên việc lưu trữ vừa làm tăng hiệu suất của hệ thống vừa tối ưu về mặt kinh tế. Dự trữ năng lượng khi giá thấp hơn và bán trong giờ cao điểm khi giá điện cao là mục tiêu chính.

- **San phẳng đỉnh tải:** San phẳng đỉnh tải giống với chênh lệch giá năng lượng. Sự khác biệt là san phẳng đỉnh được lắp đặt để che tải đỉnh không có mục tiêu kinh tế như chênh lệch giá năng lượng. Ứng dụng san phẳng đỉnh tải thường được lắp đặt tại nơi tiêu dùng, còn chênh lệch giá năng lượng được sử dụng ở phía cung cấp.

- **Hoãn nâng cấp hệ thống:** Để hoãn việc nâng cấp các đường dây hay trạm biến áp bằng cách lắp đặt DG gần tải. Tuy nhiên, DG đôi khi là không cần thiết nếu ESS được lắp đặt sẽ hỗ trợ cho hệ thống. Lúc này, sẽ hoãn các khoản đầu tư tốn kém và sử dụng tốt hơn các nguồn lực hiện có cho các khoản đầu tư khác.

- **Giảm tắc nghẽn:** Trong quá trình cân bằng cung cầu có thể xảy ra tắc nghẽn. Việc sử dụng một lượng lớn nguồn năng lượng tái tạo có thể gây tắc nghẽn hệ thống thì ESS là một giải pháp. Việc lắp đặt ESS tại vị trí phù hợp như cuối trạm biến áp hay đường dây tải nặng có thể sẽ làm giảm tắc nghẽn. ESS thay đổi cung hoặc cầu năng lượng theo thời gian và/ hoặc địa lý để giải quyết các điểm tắc nghẽn.

#### **2.3.4.2. Trong dịch vụ năng lượng**

- **Cân bằng năng lượng:** ESS có điểm đặc biệt là phản ứng nhanh cùng với tải thay đổi. ESS duy trì sự cân bằng giữa phát điện và tiêu thụ điện. ESS cũng hỗ trợ để hệ thống theo dõi tải tăng lên và giảm xuống.

- **Dự trữ năng lượng:** ESS là một phần công suất của nguồn không sử dụng trong suốt thời gian hoạt động bình thường. Việc phát điện dự phòng tiếp tục cho đến khi hệ thống dự phòng đạt đến giá trị danh định, còn lại ESS phải cấp điện trong một thời gian.

- **Ổn định điện áp:** Tính ổn định điện áp là rất quan trọng và nó đạt được bằng cách ổn định điện áp ở giới hạn quy định. Vì vậy, ESS quản lý công suất phản kháng để đạt được điều này và đóng vai trò nguồn hỗ trợ điện áp.

- **Giảm sự cố mất điện:** Với các sự cố không muốn có thể dẫn đến gián đoạn nguồn điện trên một bộ phận hoặc toàn hệ thống. ESS tạo ra công suất hoạt động để cung cấp năng lượng.

- **Ổn định tần số:** Ổn định tần số là rất quan trọng trong LĐPP để đối phó với nhiều biến đổi nhỏ xảy ra. ESS điều chỉnh tần số phục vụ cho hệ thống điện bằng cách hiệu chỉnh độ lệch tần số trong giới hạn cho phép.



- **Cấp điện độc lập:** Trong các ứng dụng ngoài lưới hoặc độc lập, RES kết hợp ESS để cấp năng lượng cho những tải độc lập. ESS đáp ứng tốt việc thu nhiều nguồn có công suất nhỏ, cân bằng giữa công suất phát với công suất sử dụng và đáp ứng nhanh với những thay đổi của cung hoặc cầu năng lượng.

#### **2.3.4.3. Trong quản lý năng lượng**

- **Chất lượng:** Đối với nguồn điện là nguồn năng lượng tái tạo phụ thuộc vào điều kiện môi trường. Do đó, sự dao động trong nguồn phát dẫn đến các lo ngại về chất lượng điện năng. Để quản lý và điều chỉnh chất lượng điện năng thì ESS chính là giải pháp chính.

- **Độ tin cậy:** ESS có nhiệm vụ mang lại nguồn điện có độ tin cậy cao với chất lượng tốt nhất có thể. ESS là nguồn điện phải được cấp liên tục, chất lượng và thời gian khôi phục nguồn điện nhanh chóng.

#### **2.3.4.4. Trong tích hợp RES**

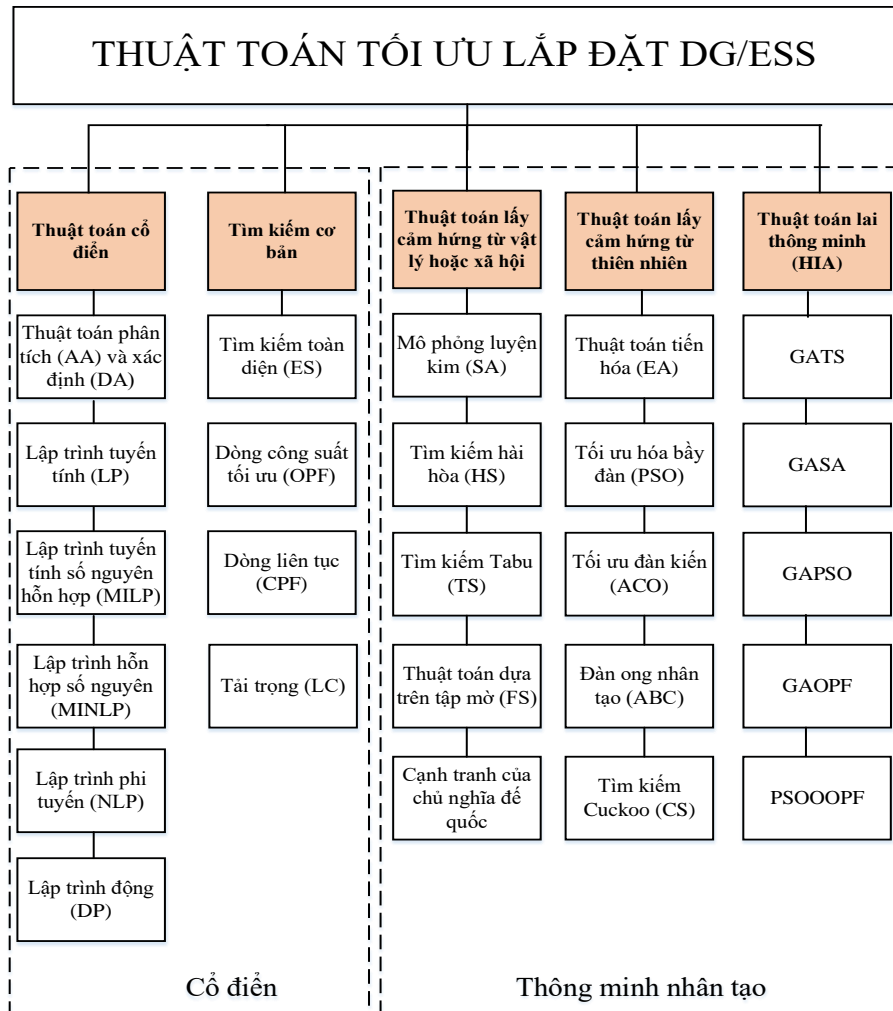
- **Tối đa sự tham gia:** Có nhiều biến động về nguồn điện do RES tạo ra có thể được ESS hỗ trợ để tối đa sự tham gia của nguồn năng lượng tái tạo.

- **Làm trơn hệ thống:** ESS sử dụng làm mịn công suất đầu ra gián đoạn của các nguồn năng lượng tái tạo do sự thay đổi tốc độ gió của tua bin gió (WT) hoặc những đám mây di chuyển nhanh trên các hệ thống pin quang điện (PV) sẽ làm thay đổi công suất đầu ra.

- **Dịch chuyển thời gian:** WT phải ngừng hoạt động do bão tố hoặc công suất đầu ra của các PV giảm do trời có nhiều mây hay bóng che. ESS sẽ xả năng lượng đã lưu trữ giúp giảm thời gian các nguồn năng lượng tái tạo phát ra công suất thấp. Chính vì thế, nguồn năng lượng tái tạo sẽ trở nên bền vững hơn khi có mặt ESS trên hệ thống điện.

### **2.4. Phương pháp và thuật toán tối ưu lắp đặt DG và ESS**

Thuật toán sử dụng trong tối ưu lắp đặt DG và ESS được phân chia thành hai nhóm cơ bản: là thuật toán cổ điển và thuật toán thông minh nhân tạo, Hình 2.7 [14]. Mỗi nhóm đều có ưu và nhược điểm cũng như mức độ phù hợp vào mỗi bài toán cần giải quyết [35].



**Hình 2. 7.** Các thuật toán tối ưu lắp đặt DG và ESS [35]

### 2.4.1. Thuật toán cổ điển

Thuật toán cổ điển chủ yếu dựa trên giải pháp toán học của vấn đề như các thuật toán phân tích [36], [37], quy hoạch tuyến tính [38], [39], phi tuyến, bậc hai tuần tự, tuyến tính số nguyên hỗn hợp... [35], [40].

### 2.4.2. Phương pháp tìm kiếm cơ bản

Phương pháp tìm kiếm cơ bản như Gradient, toàn diện, dòng công suất tối ưu và dòng công suất liên tục [41], [42].

### **2.4.3. Thuật toán lấy cảm hứng từ vật lý hoặc xã hội**

Để giải quyết với sự không chắc chắn và các kết quả tối ưu không toàn cục của bài toán tối ưu lấ đặt, các thuật toán tìm kiếm thông minh đã được tích hợp như các bộ giải heuristic. Có các nghiên cứu kết hợp các thuật toán này với một số thuật toán tối ưu thông thường hay các thuật toán dựa trên tập mờ để giải quyết. Một số phương pháp như mô phỏng luyện kim, tìm kiếm hài hòa và tìm kiếm Tabu [35].

### **2.4.4. Kỹ thuật lấy cảm hứng từ thiên nhiên**

Một số phương pháp được lấy từ cảm hứng từ thiên nhiên như thuật toán tối ưu đàn kiến, tiến hóa, đàn ong nhân tạo và tìm kiếm cuckoo hay tối ưu hóa bầy đàn...[35].

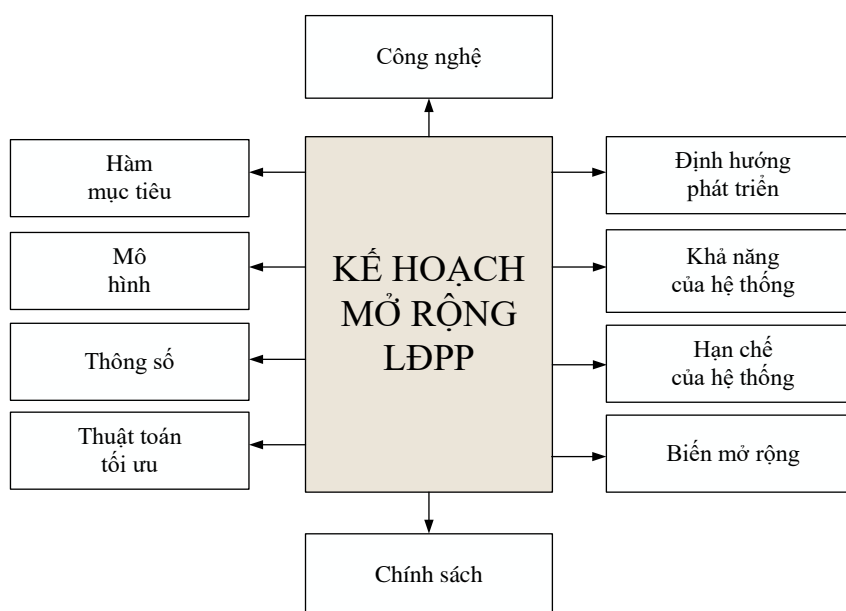
### **2.4.5. Thuật toán lai thông minh**

Thuật toán lai thông minh là thuật toán hỗn hợp của một số kỹ thuật thông minh nhân tạo khác nhau làm việc ở chế độ song song hoặc xếp tầng như GATS [43] và GAPSO [44].

## **2.5. Mở rộng lưới điện phân phối**

Hiện nay LĐPP chỉ có thể phục vụ các yêu cầu và tiêu chuẩn của những thập kỷ trước và khó đáp ứng với nhiệm vụ cũng như thách thức mới trong thời gian sắp tới. LĐPP và tải sẽ thay đổi đáng kể với các yêu cầu mới như độ tin cậy, dịch vụ mong đợi, chi phí đầu tư, giá năng lượng và môi trường. Vì vậy, cần có kế hoạch mở rộng LĐPP (DEP). DEP có kế hoạch ngắn hạn (từ 1- 4 năm), kế hoạch trung hạn (từ 5 - 20 năm) và kế hoạch dài hạn (hơn 20 năm) tùy thuộc vào giai đoạn phát triển và hoạch định. Mục đích của DEP là xác định cấu hình vận hành, lắp đặt mở rộng trạm biến áp, lắp đặt DG, lắp đặt ESS và nâng cấp đường dây... nhằm thỏa mãn các nhu cầu kịp thời, tiết kiệm về chi phí đồng thời đáp ứng tất cả các ràng buộc kỹ thuật của hệ thống. DEP tối ưu sẽ đem lại lợi thế về kỹ thuật và kinh tế, cải thiện các dịch vụ. Chính vì vậy, DEP cần xét các đặc tính của tải mới, chi phí mới, lợi ích của DG và ESS, mở rộng nhà cung cấp, mở rộng trạm biến áp, nâng cấp đường dây. Hình 2.8 cho thấy các vấn đề cần xem xét tổng thể đối với DEP.

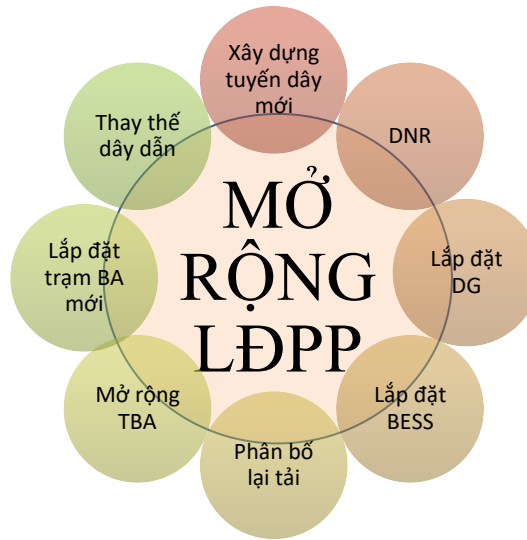
Gần đây, đã có một số nghiên cứu tập trung về DEP thông qua lắp đặt và khai thác khả năng cũng như các lợi ích từ DG và ESS [1]. Bởi vì, DG và ESS giúp giảm tổn thất, nâng cao chất lượng, giảm giá năng lượng, cải thiện độ tin cậy, cải thiện các dịch vụ, giảm phát thải, trì hoãn các hoạt động mở rộng khác ở cả cấp độ truyền tải và phân phối. Trong một vấn đề của DEP, điều mà được quan tâm nhiều nhất hiện nay là khai thác tối đa các DG mà phần lớn chủ yếu là RES. Khai thác RES để giảm tác động đến môi trường được xem là lựa chọn cơ bản trong DEP với mức đầu tư ít rủi ro, linh hoạt và nó phù hợp với sự phát triển tất yếu của LĐPP [45]. ESS cần phải xem là một yếu tố bắt buộc tham gia trong hệ thống, đặc biệt là khi LĐPP có RES. Chính vì vậy, DEP hướng đến mở rộng LĐPP thông qua lắp đặt DG và ESS là yếu tố chủ đạo trong quy hoạch mở rộng LĐPP.



**Hình 2. 8.** Kế hoạch mở rộng LĐPP

Hình 2.9 cho thấy các khía cạnh khác nhau của DEP. Các yêu cầu để quyết định DEP là địa điểm, quy mô và kế hoạch đầu tư để lắp đặt, mở rộng, nâng cấp DG và hoặc ESS dựa trên điều kiện địa lý, nguyên nhiên liệu, môi trường cũng như tính khả thi của DG. Phía nhà đầu tư DG hay ESS sẽ có lựa chọn tối ưu về công suất, vị trí và loại để lắp đặt dựa trên các điều kiện địa lý, tài nguyên và tính khả thi. Như vậy, mở rộng LĐPP hiện nay bằng cách lắp đặt mới hay mở rộng thêm công suất của DG và ESS để cho LĐPP làm việc hiệu quả là một nhu cầu quan trọng và cấp thiết. Do đó,

DEP chú trọng đến mức độ thâm nhập của DG và ESS thông qua tối ưu công suất và vị trí lắp đặt chúng vào hệ thống [46].



**Hình 2. 9.** Các biện cần xem xét khi mở rộng LĐPP

### 2.5.1. Mở rộng sự thâm nhập của nguồn điện phân tán trên lưới điện phân tán

- *Mở rộng LĐPP thông qua việc lắp đặt mới DG vào LĐPP:*

Có các kết hợp khác nhau về công suất, vị trí, số lượng và loại DG có những lợi thế khác nhau [1], [12]. Tùy theo mục tiêu của bài toán, có thể đưa ra hàm mục tiêu phù hợp để LĐPP hoạt động hiệu quả. Kế hoạch tối ưu LĐPP là một quá trình hỗ trợ cung cấp năng lượng thông qua DG nhằm đạt được lợi ích tiềm năng tối đa của DG với chi phí tối thiểu [48]. Lợi ích được quan tâm nhất hiện nay là lắp đặt tối đa công suất DG với mục tiêu là cực tiểu tổn thất công suất, bởi vì tổn thất công suất thể hiện cho việc đánh giá hiệu quả thâm nhập của DG vào LĐPP [24], [25].

Một số nghiên cứu đã đề nghị các phương pháp tối ưu lắp đặt mới DG vào LĐPP như thuật toán Invasive Weed Optimization (IWO) [49], Genetic Algorithm (GA) [50], Firefly Algorithm (FWA) [51], Cuckoo Search Algorithm (CSA) [52]. Ở các nghiên cứu này, chỉ tập trung việc tối ưu vị trí DG và công suất DG mà không xem xét tái cấu hình LĐPP (DNR). Trong khi đó, việc thay đổi cấu hình của LĐPP thông qua các khóa chuyển mạch cũng là một kỹ thuật hiệu quả để giảm tổn thất công suất. Kỹ thuật này được gọi là DNR, thực hiện thay đổi đóng hoặc mở khóa chuyển mạch và tuân thủ các ràng buộc [53]. DNR có nhiều kỹ thuật như nhánh và ràng buộc

rời rạc [54], kỹ thuật trao đổi nhánh [55], thuật toán FWA [56], thuật toán Shuffled Frog Leaping (SFL) [57] cũng được sử dụng. Các phương pháp trên chỉ tập trung việc đề xuất thuật toán để cực tiểu tổn thất công suất. Khi các DG được tích hợp vào LĐPP thì lúc này cấu hình vận hành sẽ được thay đổi. Với cấu hình LĐPP mới thì vị trí DG đã chọn có thể không phù hợp để cực tiểu tổn thất công suất và sự ổn định điện áp hoặc công suất của DG không phù hợp cũng sẽ gây ra tổn thất công suất lớn.

Có các nghiên cứu tích hợp tối ưu cả DNR và lắp đặt của DG để tăng cường hiệu quả hoạt động của LĐPP. Mặc dù, cả hai kỹ thuật DNR và lắp đặt DG đều góp phần giảm tổn thất công suất. Vấn đề lắp đặt DG là vấn đề thiết kế của LĐPP sử dụng cho mục đích lâu dài. Trong khi đó, DNR là vấn đề vận hành của LĐPP được sử dụng cho mục đích ngắn hạn. Do đó, công suất và vị trí lắp đặt DG đã được chọn là sẽ không thay đổi khi chúng ta xác định DNR vì đổi trạng thái các khóa chuyển mạch thì sẽ dễ hơn so với thay đổi DG sau khi lắp đặt. Yêu cầu giải quyết đồng thời cả hai vấn đề là không cần thiết vì lắp đặt DG đã tối ưu sẽ không còn là tốt nhất khi vị trí các khóa chuyển mạch mở thay đổi. Việc thực hiện vấn đề tối ưu kết hợp đồng thời thì các tham số của thuật toán sẽ phức tạp hơn so với việc giải quyết vấn đề riêng lẻ. Khi kết hợp đồng thời, các biến điều khiển lớn và sẽ tốn nhiều thời gian và số lần lặp nhiều hơn để tìm ra giải pháp tối ưu. Mặc dù, sử dụng các giải thuật tiến hóa khác nhau có khả năng xác định được cấu hình lưới có cực trị toàn cục nhưng cần rất nhiều thời gian để giải quyết bài toán, đặc biệt là khi LĐPP có cấu hình lớn và nhiều khóa mở. Vì thế, bài toán mở rộng LĐPP thông qua lắp đặt DG có xét DNR cần tách ra hai giai đoạn: giai đoạn I - là tối ưu lắp đặt DG trong LĐPP kín và giai đoạn II - là tối ưu các khóa mở để LĐPP vận hành hở. Như vậy, bài toán đề nghị sẽ thực hiện đơn giản cho các thuật toán tối ưu và rút ngắn thời gian cho giải thuật với số biến ít trong mỗi giai đoạn thực hiện tối ưu. Bài toán chia hai giai đoạn phù hợp cho vấn đề tối ưu lắp đặt DG trong LĐPP kín trước vì đây là vấn đề dài hạn (thiết kế) là quan trọng và DNR (vận hành) được thực hiện sau.

*- Mở rộng công suất của DG đã được lắp đặt vào LĐPP:*

Các DG được khuyến khích kết nối vào LĐPP hiện nay chủ yếu là RES. Phần lớn, các PV tham gia vào LĐPP là phổ biến vì công nghệ phát triển cũng như giá cả

đang được giảm dần. Các PV đang được kết nối vào LĐPP với số lượng, công suất và vị trí như thiết kế ban đầu là rất khó vì nó còn tùy thuộc vào chi phí đầu tư, điều kiện môi trường, vị trí địa lý, vốn đầu tư và chính sách của địa phương. Do đó, các PV được kết nối vào LĐPP có công suất và số lượng còn hạn chế. Vì vậy, với LĐPP có sẵn PV sẽ tiếp tục được mở rộng công suất ở cùng vị trí đã lắp đặt trước đó hay ở vị trí mới nhưng không trên phương thức tối ưu vận hành của hệ thống. Lúc này, việc lựa chọn phương án vận hành LĐPP nhằm cực tiểu tổn thất công suất là rất quan trọng. Trong đó, DNR là một phương pháp hiệu quả để xác định cấu hình vận hành với mục tiêu là giảm tổn thất công suất [58]. Đặc điểm khó khăn chung trong vận hành LĐPP là việc ghi lại chính xác công suất sử dụng ở một thời điểm nên khó xác định được đồ thị phụ tải trong ngày. Hơn nữa, trong các LĐPP có tải thay đổi liên tục, việc vận hành các khóa chuyển mạch theo đồ thị phụ tải là không khả thi. Do đó, cần xác định một cấu hình cho LĐPP vận hành trong khoảng thời gian nhất định nhằm giảm tổn thất công suất, giảm thiểu chi phí, cấp điện liên tục và cân bằng tải là một thách thức lớn đối với nhà hoạch định và vận hành [59]. Với một số khó khăn trên, bài toán DNR cực tiểu tổn thất công suất được lựa chọn thay thế cho cực tiểu tổn thất năng lượng [60].

Hiện nay có hai nhóm phương pháp sử dụng phổ biến cho vấn đề DNR để cực tiểu tổn thất năng lượng. Nhóm phương pháp thứ nhất là heuristic như phương pháp cắt vòng kín [58], kỹ thuật nhánh và ràng buộc [61], kỹ thuật trao đổi nhánh [62] và phương pháp phỏng đoán [63]. Nhóm phương pháp thứ hai là nhóm metaheuristic như GA [64], thuật toán Firefly Algorithm (FA) [56], thuật toán Harmony Search (HSA) [65], thuật toán CSA [52]. Việc lựa chọn metaheuristic hoặc heuristic để giải quyết vấn đề DNR tùy thuộc vào mục tiêu của bài toán. Đối với phương pháp metaheuristic thường đạt được giải pháp tối ưu toàn cục nhưng thường tính toán và lập trình phức tạp [66]. Còn đối với heuristics cho thấy giảm độ phức tạp của vấn đề DNR nên thường được lựa chọn cho vấn đề DNR. Trong đó, kỹ thuật trao đổi nhánh là một phương pháp cơ bản và dễ dàng thực hiện DNR cho LĐPP [62].

Để giải quyết bài toán cực tiểu tổn thất năng lượng có rất nhiều nghiên cứu đã thực hiện trong thời gian qua. Trong [60], các tác giả đã đề nghị phương pháp heuristic dựa vào thống kê thời điểm tải và điện áp nút cho vấn đề DNR ở một khoảng thời gian. Phương pháp này đưa ra kết quả chính xác nhưng các tham số tính toán lớn, nhiều

thông số đầu vào và phải dựa vào đồ thị phụ tải. Trong [67], nhóm tác giả đề nghị DNR dựa vào tải tối đa cố định để giải quyết bài toán. Trong [68], nhóm tác giả đề nghị tải ở ba mức là mức cao, mức thấp và mức trung bình để giải quyết bài toán. Trong [69], nhóm tác giả đề nghị sử dụng đường cong tải của ngày đặc trưng để giải quyết bài toán. Các nghiên cứu [67]- [69] cho thấy các tác giả sử dụng các phương pháp khác nhau để giải quyết bài toán nhưng nó có thể tối ưu mà không toàn cục. Bởi vì, các phương pháp này chọn tải điển hình để tính toán trong khi đó tải luôn thay đổi ở một khoảng thời gian nhất định và không xem xét các yếu tố ảnh hưởng từ DG tham gia vào LĐPP. Bởi vì, khi DG tham gia vào hệ thống thì sẽ làm ảnh hưởng đến chiều truyền của dòng công suất trên các nhánh. Trong khi đó sự tích hợp DG vào hệ thống là ngày càng phổ biến, nên cần có phương pháp phù hợp để thực hiện DNR [2].

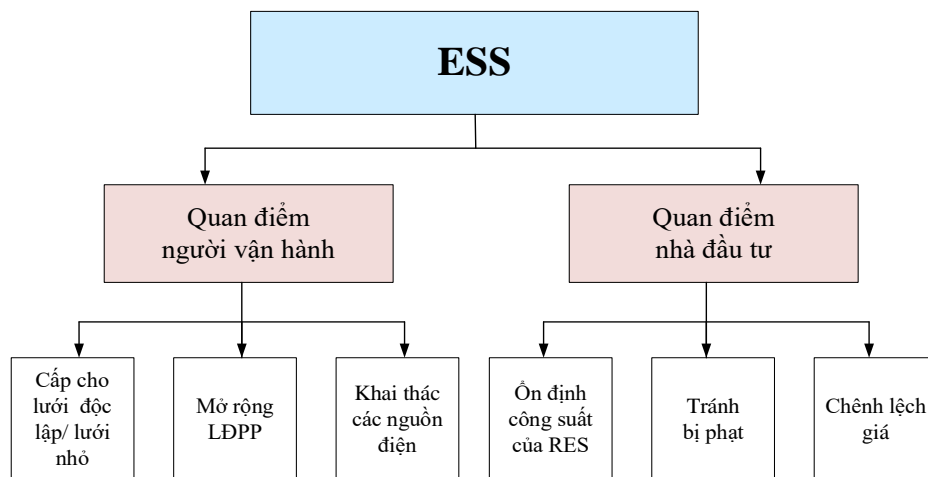
Trong [2], [19], nhóm tác giả đã đề nghị là nguồn DG với công suất cố định trong tính toán nhằm cực tiểu tổn thất năng lượng và giảm thiểu số lần chuyển khóa. Việc sử dụng DG có công suất cố định là không phù hợp vì các DG chủ yếu là PV luôn thay đổi trong ngày. Trong [70], nhóm tác giả đề nghị thuật toán Gravitational Search (GSA) để tái cấu hình lưới điện phân phối khi có kết nối PV. GSA được tính toán với một số lượng lớn các phép tính với mỗi cấu hình theo giờ của tải và PV. Trong [71], nhóm tác giả cũng đưa ra thuật toán Path Finding (PFA) để DNR khi LĐPP có DG để cực tiểu tổn thất năng lượng. Tuy nhiên, đề xuất này không xem xét đến sự ảnh hưởng từ công suất của DG tác động lên công suất nhánh của LĐPP. Nó có thể đưa ra DNR với cấu hình có tổn thất năng lượng không là cực tiểu khi DG được mở rộng. Khi công suất của DG tham gia vào LĐPP với công suất lớn thì tại một số thời điểm, hướng truyền công suất của một số nhánh có thể bị đổi hướng truyền so với khi không có kết nối DG. Do vậy, cần xem xét ảnh hưởng của công suất DG lên các nhánh của LĐPP cũng như phương pháp DNR chính xác và đơn giản để định cấu hình của LĐPP khi công suất của DG được mở rộng. Vì vậy, cần có phương pháp đơn giản để thực hiện chính xác DNR khi DG được lắp đặt hoặc mở rộng công suất.

### **2.5.2. Mở rộng sự thâm nhập của bộ dự trữ năng lượng trên lưới điện phân tán**

Với sự có mặt của nguồn năng lượng tái tạo đã đưa ra một số thách thức như vấn đề an ninh, độ tin cậy cũng như sự ổn định công suất đầu ra đối với nguồn năng



lượng tái tạo. Bộ dự trữ năng lượng (ESS) là công cụ rất hữu ích để giảm được những khó khăn trên của nguồn năng lượng tái tạo và ESS cũng đem lại các lợi ích nhất định trong vận hành LĐPP. Khi có ESS tham gia vào thì LĐPP sẽ dễ dàng kiểm soát, linh hoạt và cải thiện trong hệ thống. Trước đây, ESS được kết nối vào LĐPP chưa nhiều bởi vì nó chưa phát triển mạnh về công nghệ cũng như giá thành chưa cạnh tranh. Thời gian gần đây, với sự nhanh chóng tiếp cận và thay đổi công nghệ nên ESS được nghiên cứu sử dụng ngày càng nhiều với lợi ích rất đặc trưng là chênh lệch giá năng lượng và hỗ trợ cho nguồn năng lượng tái tạo. Việc mở rộng phạm vi công suất vận hành ESS là một vấn đề rất cấp thiết để mở rộng LĐPP. Các nghiên cứu mở rộng ESS là xác định công suất vận hành để giảm chi phí mua điện và vị trí lắp đặt của ESS để giảm tổn thất năng lượng trong hệ thống. Mở rộng ESS hiện nay đối với LĐPP với hai mục tiêu cơ bản được thể hiện như ở Hình 2.10 [72].



**Hình 2. 10.** Mục tiêu mở rộng ESS

Tùy thuộc vào mục tiêu lắp đặt của ESS cần phải xem xét về số lượng cũng như công suất và vị trí của ESS để khai thác hiệu quả LĐPP. Khi ESS được xác định tối ưu thì nó mới phát huy hiệu quả. Còn không, ESS sẽ ảnh hưởng không tốt đến hệ thống khi cho phép ESS tham gia [73]. Do đó, tối ưu công suất và vị trí của ESS là yếu tố cực kỳ quan trọng trong LĐPP. Lắp đặt ESS vào LĐPP để tối ưu là một bài toán rời rạc và phi tuyến tính với nhiều ràng buộc kỹ thuật như điện áp, dòng điện, giới hạn công suất và cân bằng công suất. Vì vậy, nó phải được giải quyết bằng các phương pháp đáng tin cậy và hiệu quả. Có hai cách tiếp cận cơ bản để tối ưu công suất vận hành và vị trí lắp đặt ESS vào LĐPP là dựa trên toán học và dựa trên siêu

hình. Phương pháp siêu hình là tốt hơn phương pháp toán học trong bài toán tối ưu ESS vì nó dễ thực hiện tính toán và nhanh hội tụ. Vì thế, phương pháp siêu hình được dùng nhiều cho bài toán lắp đặt ESS trong LĐPP như tối ưu Particle Swarm (PSO) [74], tối ưu Gray Wolf (GWO) [75], tối ưu Whale (WOA) [76].

Việc lắp đặt ESS vào LĐPP đem lại lợi ích kỹ thuật - kinh tế rất lớn. Do đó, nhiều nghiên cứu đã tối ưu lắp đặt ESS để đáp ứng tùy thuộc vào mục tiêu cụ thể. Việc tối ưu lắp đặt ESS vào LĐPP cần phải xét đến lợi nhuận từ chi phí mua điện dựa trên chênh lệch giá ở mỗi khoảng thời gian nhằm đem lại lợi nhuận và cải thiện hệ thống. ESS sẽ trữ vào lúc nhu cầu thấp có giá điện thấp và cung cấp điện cho hệ thống trong giờ cao điểm có giá điện cao. Điều này không những giúp đạt hiệu quả kinh tế mà nó còn giúp giảm quá tải cho hệ thống ở thời điểm cao điểm. Do đó, xác định công suất và vị trí của ESS trong 24 giờ để giảm chi phí mua điện là rất cần thiết. Ngoài ra, việc kết hợp ESS với nguồn năng lượng tái tạo để LĐPP hoạt động hiệu quả nhằm giảm giá năng lượng, dịch chuyển thời gian sử dụng, giảm chi phí nâng cấp đường truyền và khai thác hiệu quả từ nguồn năng lượng tái tạo.

## **2.6. Kết luận chương 2**

Trong chương 2 trình bày tổng quan về LĐPP, nguồn điện phân tán (DG), bộ dự trữ năng lượng (ESS) và vấn đề tích hợp DG/ ESS để mở rộng LĐPP nhằm khai thác tiềm năng và lợi ích của các DG và ESS là rất cấp thiết hiện nay. Nội dung mở rộng sự thâm nhập của DG và ESS được thể hiện ở các chương trong luận án. Trong chương 3 trình bày các hai bài toán mới: Bài toán mở rộng sự thâm nhập của DG trên LĐPP thông qua lắp đặt mới DG với hàm mục tiêu là cực tiểu tổn thất công suất và bài toán xác định cấu hình vận hành của lưới điện khi mở rộng công suất của DG với hàm mục tiêu là cực tiểu tổn thất điện năng. Ngoài ra, chương 3 cũng đề xuất một kế hoạch mở rộng sự thâm nhập của DG cho LĐPP Chư Prông – Gia Lai của Việt Nam để cho thấy được bài toán có thể áp dụng trong thực tế tại Việt Nam. Trong chương 4 trình bày bài toán mới mở rộng sự thâm nhập của ESS trên LĐPP thông qua việc xác định vị trí và công suất vận hành của ESS với hàm mục tiêu là cực tiểu chi phí mua năng lượng. Chương 5 trình bày kết luận và hướng phát triển của luận án.

# CHƯƠNG 3

## MỞ RỘNG SỰ THÂM NHẬP CỦA NGUỒN ĐIỆN PHÂN TÁN TRÊN LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI

### 3.1. Giới thiệu

Quy hoạch lắp đặt DG là một vấn đề rất quan trọng trong việc mở rộng sự thâm nhập của DG trên LĐPP. Vấn đề lắp đặt DG là xác định loại, vị trí và công suất của DG sẽ lắp đặt cho LĐPP nhằm cung cấp công suất tác dụng và công suất phản kháng cho hệ thống [2]. Lắp đặt DG có những lợi thế khác nhau tùy thuộc vào sự kết hợp khác nhau, chẳng hạn như về công suất của DG giúp giảm tổn thất công suất; về vị trí của DG giúp giảm tổn thất điện áp các nút và ổn định hệ thống; về công suất và vị trí giúp tăng cường sự ổn định của hệ thống điện; về công suất, vị trí và số lượng giúp tăng cường độ tin cậy và an ninh của hệ thống điện; về công suất, vị trí, số lượng và loại DG giúp tăng cường khả năng truyền tải điện. Vì vậy, tùy theo mục tiêu tối ưu có thể kết hợp phù hợp các yếu tố về loại, số lượng vị trí và công suất của DG để LĐPP hoạt động linh hoạt và hiệu quả hơn [20], [45]. Kế hoạch lắp đặt DG cần phải tối ưu lắp đặt DG trên LĐPP để hỗ trợ cung cấp năng lượng và đạt được lợi ích tiềm năng tối đa của DG với chi phí tối thiểu [48].

Hiện nay có nhiều loại DG, phần lớn DG được phân thành 4 nhóm cơ bản tùy thuộc vào khả năng phát công suất tác dụng và công suất phản kháng. Trong LĐPP hình tia, công suất toàn phần được cung cấp hoặc hấp thụ bởi DG kết nối ở đầu nhận của nhánh x được trình bày ở công thức (3.1) [77].

$$S_{G,x} = \begin{cases} P_{G,x} & \text{Loại DG I} \\ jQ_{G,x} & \text{Loại DG II} \\ P_{G,x} - jQ_{G,x} & \text{Loại DG III} \\ P_{G,x} + jQ_{G,x} & \text{Loại DG IV} \end{cases} \quad (3.1)$$

Trong đó,  $S_{G,x}$  (kVA) là công suất biểu kiến của DG ở đầu nhận của nhánh x (KVA);  $P_{G,x}$  (kW) và  $Q_{G,x}$  (kVAR) lần lượt là công suất tác dụng và công suất phản kháng của DG ở đầu nhận của nhánh x.

Đối với thực tế hiện nay công nghệ DG đang phát triển rất nhanh, giá thành đang giảm và có khả năng sinh ra lợi nhuận rất lớn. Với chiến lược hiện nay khai thác và sử dụng hiệu quả các nguồn năng lượng tái tạo thì nguồn năng lượng từ pin quang điện (PV) và tua bin gió (WT) đang phát triển và sử dụng rất phổ biến. Tuy nhiên, WT là nguồn năng lượng thường được xây dựng với công suất rất lớn nên WT phù hợp với việc kết nối lưới điện truyền tải. Còn đối với các nguồn năng lượng từ PV có công suất lắp đặt vừa/nhỏ thì phù hợp với LĐPP và PV hiện nay có giá thành đang giảm rất nhiều. Chính vì vậy, đối với DG nghiên cứu ở luận án này chỉ nghiên cứu tập trung vào loại DG I là các PV.

Bài toán tối ưu vị trí và công suất DG khi tham gia vào LĐPP với hàm mục tiêu chủ yếu là cực tiểu tổn thất công suất bởi vì tổn thất công suất đánh giá được hiệu suất của DG tham gia vào LĐPP [78], [79]. Tổn thất công suất tác dụng và tổn thất công suất phản kháng của nhánh  $x$  thể hiện như công thức (3.2) và (3.3). Tổng tổn thất công suất và tổn thất công suất phản kháng của toàn LĐPP được tính như công thức (3.4) và công thức (3.5).

$$\Delta P_x = \left( \frac{P_x^2 + Q_x^2}{|V_x|^2} \right) R_x \quad (3.2)$$

$$\Delta Q_x = \left( \frac{P_x^2 + Q_x^2}{|V_x|^2} \right) X_x \quad (3.3)$$

Với  $P_x$  và  $Q_x$  lần lượt là công suất tác dụng và phản kháng trên nhánh  $x$ ;  $R_x$  và  $X_x$  lần lượt là điện trở và điện kháng trên nhánh  $x$ ;  $V_x$  là điện áp tại nút  $X$ ;  $\Delta P_x$  và  $\Delta Q_x$  là tổn thất công suất của nhánh  $x$ ;  $\Delta P_\Sigma$  và  $\Delta Q_\Sigma$  là tổng tổn thất công suất trên các nhánh của toàn LĐPP.

$$\Delta P_\Sigma = \sum_{i=1}^n \Delta P \quad (3.4)$$

$$\Delta Q_\Sigma = \sum_{i=1}^n \Delta Q \quad (3.5)$$

Các ràng buộc trong lắp đặt DG có hai loại ràng buộc là ràng buộc cân bằng và không cân bằng [19], [80]. Tùy thuộc vào mỗi bài toán nhất định sẽ có các ràng

buộc cân bằng và không cân bằng phù hợp.

- Các ràng buộc cân bằng như cân bằng công suất tác dụng và công suất phản kháng của đường dây và tại nút của hệ thống.

- Các ràng buộc không cân bằng như các giới hạn cấu hình điện áp, giới hạn dòng trên các nhánh, giới hạn công suất máy biến áp, giới hạn công suất các DG, giới hạn số lượng DG, giới hạn dòng ngắn mạch, giới hạn công suất tham gia...[20], [26].

Trong chương 3 này sẽ trình bày ba bài toán mở rộng sự thâm nhập của DG trên LĐPP như sau:

- Bài toán 1 thể hiện trong phần 3.2, phần này sẽ trình bày bài toán mở rộng LĐPP thông qua lắp đặt DG có xét đến tái cấu hình lưới (DNR). Bài toán này sẽ đề xuất bài toán để giải quyết vấn đề lắp đặt DG trên LĐPP có xét DNR thông qua hai giai đoạn. Giai đoạn I – tối ưu lắp đặt DG trong lưới điện kín và giai đoạn II – tối ưu các khóa điện mở để LĐPP vận hành hở. Bài toán đề nghị hai giai đoạn là một dạng bài toán tối ưu mới trong tối ưu lắp đặt DG có xét DNR bên cạnh các dạng bài toán tối ưu lắp đặt DG có xét DNR khác đã được công bố như bài toán tối ưu đồng thời cả ba yếu tố vị trí, công suất và DNR (bài toán đồng thời) và bài toán tối ưu vị trí trước và sau đó tối ưu công suất và DNR (bài toán VT-CS và DNR). Bài toán đề nghị có ưu điểm là đưa ra lời giải tối ưu toàn cục cho bài toán lắp đặt DG có xét DNR. Bài toán hai giai đoạn cho thấy số biến giảm cho mỗi giai đoạn của thuật toán tối ưu bằng cách chia ra hai giai đoạn. Ngoài ra, bài toán đề nghị hai giai đoạn cũng cho thấy phù hợp với việc lắp đặt DG trong dài hạn (giai đoạn thiết kế) được ưu tiên trước và việc DNR là ngắn hạn (giai đoạn vận hành) được thực hiện sau. Bài toán đề nghị thực hiện tối ưu lắp đặt DG có xét đến DNR với hàm mục tiêu là cực tiểu tổn thất công suất của hệ thống. LĐPP 33 nút và LĐPP 69 nút được kiểm tra và cho thấy tính hiệu quả bài toán đề nghị. Bài toán đề nghị sử dụng thuật toán Runner Root Algorithm (RRA) thực hiện và so sánh với thuật toán Coyote Algorithm (COA) và Genetic Algorithm (GA). Ngoài ra, bài toán đề nghị cũng được so sánh với các bài toán đồng thời và bài toán VT-CS và DNR với các thuật toán khác nhau để cho thấy hiệu quả của bài toán đề nghị.

- Bài toán 2 thể hiện trong phần 3.3, phần này sẽ trình bày bài toán xác định cấu hình LĐPP khi mở rộng công suất của pin quang điện (PV). Bài toán đề nghị sử dụng thuật toán trao đổi nhánh với công suất nhánh trung bình (CSNTB) cải tiến nhằm xác định cấu hình vận hành LĐPP khi PV được mở rộng công suất với mục tiêu là cực tiểu tổn thất năng lượng. Ưu điểm của bài toán đề nghị là đơn giản, dễ thực hiện và chính xác trong việc xác định cấu hình của LĐPP khi PV được mở rộng công suất lắp đặt. LĐPP 18 nút và LĐPP 33 nút được áp dụng thử nghiệm đã cho thấy phương pháp đề nghị là đơn giản, nhanh chóng xác định được cấu hình lưới và có độ chính xác cao khi so sánh với bài toán xác định cấu hình lưới điện theo phương pháp sử dụng công suất nhánh trung bình (CSNTB) và phương pháp sử dụng đồ thị phụ tải bằng các thuật toán tối ưu.

- Bài toán 3 thể hiện trong phần 3.4, phần này sẽ trình bày bài toán áp dụng mở rộng cho LĐPP Chư Prông thông qua lắp đặt DG nhằm tối đa công suất thâm nhập của DG và cực tiểu tổn thất công suất của hệ thống. Bài toán đề xuất ba giai đoạn lắp đặt DG tương ứng với ba vị trí và công suất khả thi lắp đặt vào LĐPP Chư Prông. Thuật toán COA và RRA được sử dụng hiệu quả cho bài toán 1 và tiếp tục được áp dụng để thử nghiệm cho vấn đề lắp đặt ba DG cho LĐPP Chư Prông. Từ kết quả ba DG đã được tối ưu, phần này đề xuất một kế hoạch lắp đặt mở rộng DG trên LĐPP Chư Prông qua ba giai đoạn nhằm phù hợp với vấn đề đầu tư và lắp đặt DG trong một thời gian nhất định.

### **3.2. Mở rộng LĐPP thông qua lắp đặt DG có xét tái cấu hình lưới điện phân phối (DNR)**

Ở phần này, vấn đề mở rộng LĐPP thông qua lắp đặt DG có xét tái cấu hình lưới điện phân phối (DNR) chỉ tập trung nghiên cứu vấn đề tối ưu lắp đặt vị trí và công suất của DG có xét đến DNR với hàm mục tiêu (OF) là cực tiểu tổn thất công suất. Bởi vì cực tiểu tổn thất công suất sẽ đánh giá hiệu quả của DG tham gia vào LĐPP [24], [25]. Hiện nay, các nghiên cứu về tối ưu lắp đặt DG trên LĐPP với hàm mục tiêu là cực tiểu tổn thất công suất là khá phổ biến và phần lớn đề xuất các thuật toán tối ưu khác nhau cho bài toán lắp đặt DG như Invasive Weed Optimization (IWO) [49], Genetic Algorithm (GA) [50], Fireworks Algorithm (FWA) [51],

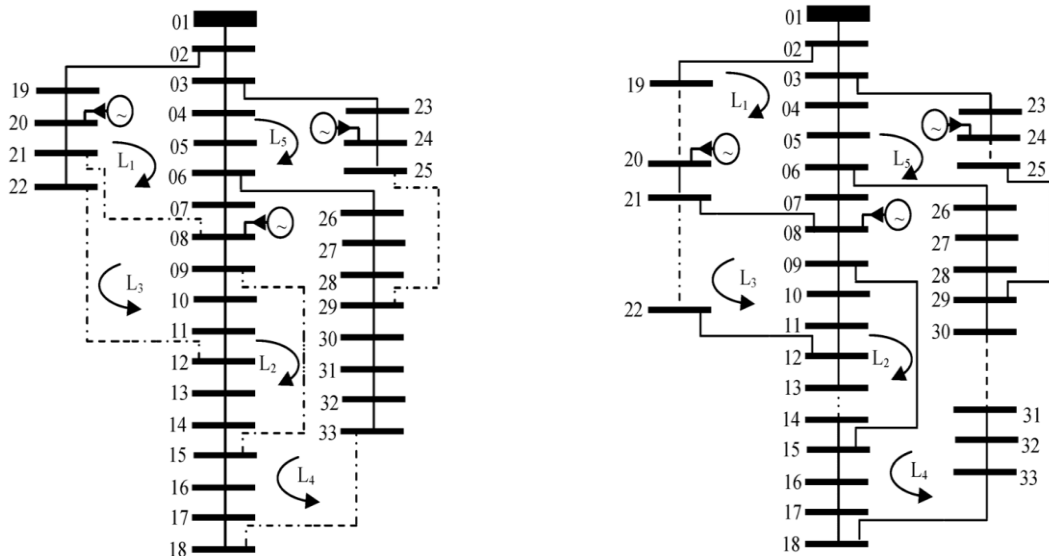
Cuckoo Search Algorithm (CSA) [52]. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chỉ tập trung việc tối ưu vị trí DG và công suất DG mà không xem xét tái cấu hình LĐPP (DNR). Trong khi đó, việc thay đổi cấu hình của LĐPP thông qua các khóa mở cũng là một kỹ thuật hiệu quả để giảm tổn thất công suất. Kỹ thuật này được gọi là DNR, thực hiện thay đổi đóng hoặc mở khóa và tuân thủ các ràng buộc [53]. DNR có nhiều kỹ thuật như nhánh và ràng buộc rời rạc [54], trao đổi nhánh [55], thuật toán FWA [56], Shuffled Frog Leaping Algorithm (SFL) [57] cũng được sử dụng. Các nghiên cứu trên chỉ tập trung việc đề xuất thuật toán để cực tiểu tổn thất công suất khi lắp đặt DG hoặc DNR.

Trên thực tế, khi các DG được tích hợp vào LĐPP thì lúc này cấu hình vận hành tối ưu sẽ được thay đổi, cấu hình vận hành trước đó có thể không còn phù hợp để cực tiểu tổn thất công suất và sự ổn định điện áp hoặc công suất của DG không phù hợp cũng sẽ gây ra tổn thất công suất lớn. Do đó, cần phải xem xét một cách toàn diện khi lắp đặt DG (thiết kế) kết hợp với DNR (vận hành) để LĐPP hoạt động hiệu quả nhất. Chính vì vậy, bài toán tối ưu lắp đặt DG phải được kết hợp với DNR. Hiện nay, bài toán tối ưu lắp đặt DG có xét đến DNR có rất nhiều nghiên cứu được công bố nhưng chủ yếu vẫn tập trung vào các thuật toán tối ưu là metaheuristic. Bởi vì metaheuristic giải quyết rất hiệu quả mức độ phức tạp và mang lại lời giải tối ưu toàn cục của bài toán [81]. Các nghiên cứu tối ưu lắp đặt DG có xét đến DG được tập trung hai dạng bài toán như sau:

- Dạng bài toán thứ nhất: Tối ưu vị trí trước, sau đó công suất và DNR (bài toán VT-CS và DNR). Dạng bài toán này sẽ được thực hiện lựa tối ưu vị trí trước, sau đó sẽ tối ưu công suất đồng thời với DNR. Diễn hình của bài toán VT-CS và DNR đã sử dụng thuật toán Fireworks Algorithm (FWA) như trong tài liệu tham khảo [82] và thuật toán Harmony Search Algorithm (HSA) như trong tài liệu tham khảo [83]. Trong Hình 3.1 thể hiện việc chọn vị trí lắp đặt DG trước, sau đó tối ưu công suất và tái cấu hình LĐPP.

Tuy nhiên, ở dạng bài toán thứ nhất tối ưu vị trí trước, sau đó công suất và DNR là sự lắp ghép giữa DNR và lắp đặt DG trên lưới điện hình tia. Với vị trí và công suất DG sẽ phụ thuộc vào cấu hình ban đầu. Sau khi DNR, với cấu hình mới thì

vị trí của DG đã được tối ưu trước đó có thể không phù hợp để cực tiểu tổn thất công suất và sự ổn định điện áp hoặc công suất của DG đã được tối ưu không phù hợp cũng sẽ gây ra tổn thất công suất lớn. Vì vậy, dạng bài toán thứ nhất tối ưu vị trí trước, sau đó công suất và DNR để rơi vào cực trị địa phương.



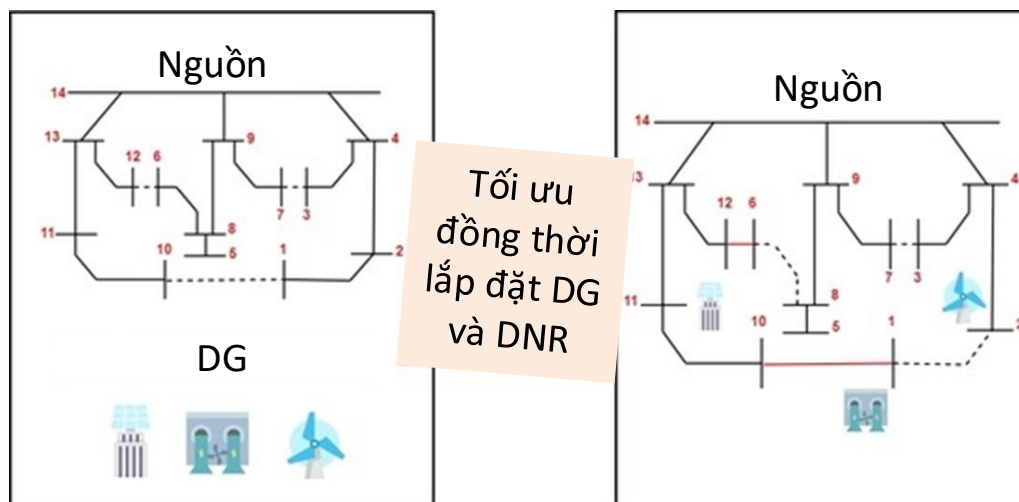
**Hình 3. 1.** Dạng bài toán tối ưu vị trí trước, sau đó công suất và DNR [83]

- Dạng bài toán thứ hai: Tối ưu đồng thời vị trí, công suất và DNR (bài toán đồng thời). Dạng bài toán này sẽ được thực hiện đồng thời cả ba vấn đề vị trí, công suất và DNR cùng lúc. Diễn hình của bài toán đồng thời sử dụng thuật toán Cuckoo Search Algorithm (CSA) như trong tài liệu tham khảo [84] và sử dụng thuật toán Adaptive Weighted Improved Discrete Particle Swarm Optimization (AWIDPSO) như trong tài liệu tham khảo [85] hay các thuật toán khác nhau để giải quyết bài toán đồng thời [86]. Hình 3. 2 thể hiện dạng bài toán tối ưu đồng thời vị trí, công suất của DG và DNR [86].

Bài toán dạng thứ hai tối ưu đồng thời vị trí, công suất và DNR có khả năng xác định cấu hình có cực trị toàn cục. Tuy nhiên, yêu cầu giải quyết đồng thời cả hai vấn đề là không cần thiết vì lắp đặt DG đã tối ưu sẽ không còn là tốt nhất khi vị trí các khóa mở thay đổi. Việc thực hiện vấn đề tối ưu đồng thời thì tham số của thuật toán sẽ phức tạp hơn so với việc giải quyết vấn đề riêng lẻ. Khi giải quyết đồng thời, các biến điều khiển lớn và sẽ tốn nhiều thời gian giải bài toán và số lần lặp lớn để có thể tìm ra lời giải tối ưu. Mặc dù, sử dụng các giải thuật tiến hóa khác nhau có khả



năng xác định được cấu hình lưới có cực trị toàn cục nhưng cần rất nhiều thời gian để giải quyết bài toán, đặc biệt là khi LĐPP có cấu hình lớn và nhiều khóa mở.



**Hình 3.3.** Dạng bài toán tối ưu đồng thời vị trí, công suất của DG và DNR [86]

Như vậy, vấn đề cần khắc phục cho cả hai dạng bài toán trên là: Vấn đề lắp đặt DG là dài hạn (thiết kế) ưu tiên trước và DNR là ngắn hạn (vận hành) thực hiện sau. Ngoài ra, cần phải giảm tham số cho thuật toán để bài toán thực hiện trở nên đơn giản, nhanh hội tụ và lời giải tối ưu toàn cục. Vì thế, bài toán mở rộng LĐPP thông qua lắp đặt DG có xét đến DNR cần tách ra hai giai đoạn:

- Giai đoạn I: Tối ưu lắp đặt DG trong LĐPP kín.
- Giai đoạn II: Tối ưu các khóa mở để LĐPP vận hành hở.

Như vậy, bài toán đề nghị sẽ thực hiện đơn giản đơn giản, nhanh hội tụ và lời giải tối ưu toàn cục với tham số đầu vào của thuật toán giảm hơn cho mỗi giai đoạn tối ưu và điều này cũng phù hợp với giai đoạn thiết kế và giai đoạn vận hành của LĐPP.

### 3.2.1. Mô tả bài toán

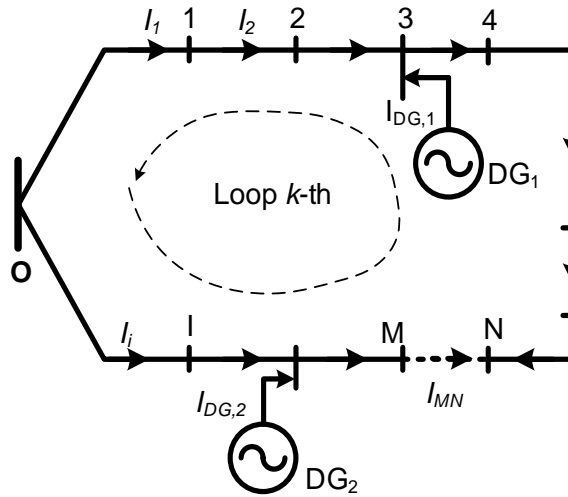
Vấn đề DNR được thể hiện bằng LĐPP kín đơn giản như ở Hình 3.3, với khóa điện MN đóng. Với  $I_i$  ( $i = 1, \dots, Nbr$ ) là dòng điện trên nhánh  $i^{th}$ , khi khóa chuyển mạch MN được mở, giả sử rằng dòng điện của nhánh OM giảm theo  $I_{MN}$  và dòng điện

của ON tăng theo  $I_{MN}$ . Tổng thất công suất của LĐPP kín ( $\Delta P^{kín}$ ) và tổng thất công suất của LĐPP hở ( $\Delta P^{hở}$ ) được thể hiện tương ứng theo công thức (3.6) và (3.7).

$$\Delta P^{kín} = \sum_{i \in OM}^{nbr} R_i I_i^2 + R_{MN} I_{MN}^2 + \sum_{i \in ON}^{nbr} (-I_i)^2 R_i \quad (3.6)$$

$$\Delta P^{hở} = \sum_{i \in OM}^{nbr} R_i (I_i - I_{MN})^2 + \sum_{i \in ON}^{nbr} R_i (I_i + I_{MN})^2 \quad (3.7)$$

Trong đó:  $R_i$  là điện trở của nhánh thứ  $i$ ;  $R_{MN}$  là điện trở của nhánh MN;  $I_i$  là dòng điện trên nhánh thứ  $i$ ;  $I_{MN}$  là dòng điện của nhánh MN.



**Hình 3. 4.** LĐPP đơn giản một mạch vòng

Ở đây, có thể thấy độ chênh lệch tổng thất công suất giữa LĐPP hở và LĐPP kín như công thức (3.8):

$$\begin{aligned} \Delta P^{hở} - \Delta P^{kín} &= \sum_{i \in OM}^{nbr} R_i (I_i^2 - 2I_{MN}I_i + I_{MN}^2) + \sum_{i \in ON}^{nbr} R_i (I_i^2 + 2I_{MN}I_i + I_{MN}^2) \\ &- \sum_{i \in OM}^{nbr} R_i I_i^2 - R_{MN} I_{MN}^2 - \sum_{i \in ON}^{nbr} (I_i)^2 R_i \end{aligned} \quad (3.8)$$

Tương đương: (3.9)

$$\begin{aligned} \Delta P^{\text{hở}} - \Delta P^{\text{kín}} &= \sum_{i \in \text{OM}}^{\text{nbr}} R_i (-2I_{\text{MN}}I_i + I_{\text{MN}}^2) + \sum_{i \in \text{ON}}^{\text{nbr}} R_i (2I_{\text{MN}}I_i + I_{\text{MN}}^2) - R_{\text{MN}}I_{\text{MN}}^2 \\ &\quad + R_{\text{MN}}I_{\text{MN}}^2 - R_{\text{MN}}I_{\text{MN}}^2 \end{aligned}$$

Rút ngắn công thức (3.9), kết quả như công thức (3.10):

$$\begin{aligned} \Delta P^{\text{hở}} - \Delta P^{\text{kín}} &= I_{\text{MN}}^2 \left( \sum_{i \in \text{OM}}^{\text{nbr}} R_i + R_{\text{MN}} + \sum_{i \in \text{ON}}^{\text{nbr}} R_i \right) \\ &\quad - 2I_{\text{MN}} \left( \sum_{i \in \text{OM}}^{\text{nbr}} R_i I_i + R_{\text{MN}}I_{\text{MN}} - \sum_{i \in \text{ON}}^{\text{nbr}} R_i I_i \right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Đặt  $R_{\text{Loop}} = \sum_{i \in \text{OM}}^{\text{nbr}} R_i + R_{\text{MN}} + \sum_{i \in \text{ON}}^{\text{nbr}} R_i$ ,  $R_{\text{Loop}}$  là điện trở của mạch vòng kín.

Rút gọn công thức (3.10), kết quả được thể hiện như công thức (3.11):

$$\Delta P^{\text{hở}} - \Delta P^{\text{kín}} = I_{\text{MN}}^2 R_{\text{Loop}} - 2I_{\text{MN}} \left( \sum_{i \in \text{OM}}^{\text{nbr}} R_i I_i + R_{\text{MN}}I_{\text{MN}} - \sum_{i \in \text{ON}}^{\text{nbr}} R_i I_i \right) \quad (3.11)$$

Mặt khác, trên LĐPP hình tia, dòng điện của các nhánh phụ thuộc vào công suất ở nút và không phụ thuộc vào điện kháng của các nhánh. Vì vậy, giả định tồn tại một LĐPP có điện kháng của các nhánh được thay bằng điện trở nhánh và tổn thất công suất của LĐPP này được tính như một LĐPP bình thường theo công thức (3.7). Vì vậy, khi đóng khóa MN thì theo định luật Kirchhoff 2 được trình bày như công thức (3.12).

$$\sum_{i \in \text{OM}}^{\text{nbr}} R_i I_i + R_{\text{MN}}I_{\text{MN}} - \sum_{i \in \text{ON}}^{\text{nbr}} R_i I_i = 0 \quad (3.12)$$

Vì vậy công thức (3.12) sẽ trở thành công thức (3.13):

$$\Delta P^{\text{hở}} - \Delta P^{\text{kín}} = I_{\text{MN}}^2 R_{\text{Loop}} \quad (3.13)$$

Có thể thấy từ công thức (3.13), tổn thất công suất của LĐPP là bé nhất khi LĐPP tồn tại một nhánh có dòng điện bằng 0 ( $I_{\text{MN}} = 0$ ) thì khi mở nhánh này, tổn thất

công suất của hệ thống sẽ là bé nhất và LĐPP sẽ trở thành hình tia. Tuy nhiên, trường hợp này là không thể vì khó duy trì dòng điện trong LĐPP mà dòng điện của một trong các nhánh bằng không. Do đó, chỉ bằng cách giảm thiểu tổn thất công suất của LĐPP hình tia, giá trị này mới giảm gần bằng giá trị tổn thất công suất của LĐPP kín. Thực tế đã chỉ ra rằng trong bài toán DNR nhằm giảm tổn thất công suất trong cấu hình tối ưu thì các khóa chuyển mạch mở thường được đặt trên các nhánh có dòng điện rất nhỏ nếu các khóa chuyển mạch mở này được đóng lại.

Tương tự, trong LĐPP tích hợp DG với công suất và vị trí DG đã được xác định để giảm thiểu tổn thất công suất thì giá trị tổn thất công suất trong trường hợp này sẽ là nhỏ nhất mà LĐPP có thể đạt được. Tiếp theo, nếu các nhánh có dòng điện nhỏ nhất được mở, LĐPP sẽ trở thành cấu hình hình tia và có tổn thất công suất xấp xỉ bằng với tổn thất công suất của LĐPP có DG. Do đó, vấn đề có thể được chia ra thành hai giai đoạn để tối ưu. Giai đoạn I là tối ưu lắp đặt DG trên LĐPP kín và giai đoạn II là tối ưu khóa mở của LĐPP sau khi lắp đặt các DG để LĐPP vận hành hình tia. Kết quả thu được từ giai đoạn II là kết quả của DNR để cực tiểu tổn thất công suất. Hơn nữa, trên LĐPP phức tạp có nhiều vòng lặp, rất khó xác định các nhánh có dòng điện tối thiểu do ảnh hưởng lẫn nhau giữa các vòng và thứ tự hoạt động của khóa chuyển mạch. Vì vậy ở giai đoạn II, vấn đề DNR cung cấp một giải pháp để tìm ra cấu hình LĐPP hình tia để cực tiểu tổn thất công suất.

Ngoài ra, vấn đề này cũng cho thấy công suất và vị trí DG đã được tối ưu không bị ảnh hưởng khi cấu hình của LĐPP thay đổi với mục tiêu cực tiểu tổn thất công suất. Việc thực hiện hai giai đoạn tối ưu riêng lẻ không chỉ giúp vấn đề thiết kế dài hạn (lắp đặt DG) không ảnh hưởng bởi vấn đề ngắn hạn (DNR) mà nó hỗ trợ các thuật toán tối ưu giải quyết vấn đề đơn giản hơn. Hàm mục tiêu cho hai giai đoạn được thể hiện trong (3.14)

$$\Delta P = \sum_{i=1}^{nbr} R_i \times \left( \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) \quad (3.14)$$

Có các ràng buộc của vấn đề tối ưu lắp đặt DG trên LĐPP như sau:

- Dòng điện mỗi nhánh và điện áp mỗi nút phải ở trong giới hạn cho từng giai đoạn:

$$0 \leq I_i \leq I_{\max,i}; i = 1, 2, \dots, n_{br} \quad (3.15)$$

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}; i = 1, 2, \dots, n_{bus} \quad (3.16)$$

- Cấu hình hình tia phải thỏa mãn và một số nút tải có kết nối DG cho giai đoạn II.

- Giới hạn công suất DG phải được duy trì cho giai đoạn I:

$$0 \leq P_{DG_i} \leq P_{DG_{\max,i}}; i = 1, 2, \dots, n_{dg} \quad (3.17)$$

Trong đó:  $I_i$  là dòng điện hiện tại trên nhánh thứ  $i$  (A);  $I_{\max,i}$  là dòng điện lớn nhất cho phép của nhánh thứ  $i$  (A);  $V_{\min}$  là điện áp nút thấp nhất cho phép (kV);  $V_{\max}$  là điện áp nút lớn nhất cho phép (kV);  $V_i$  là điện áp hiện tại của nhánh thứ  $i$  (kV);  $n_{br}$  là nhánh thứ  $n$ ;  $n_{bus}$  là nút thứ  $n$ ;  $P_{DG_i}$  là công suất của DG thứ  $i$  (MW);  $P_{DG_{\max,i}}$  là công suất cực đại cho phép của nhánh thứ  $i$  (MW);  $n_{dg}$  là nút lắp đặt DG.

### 3.2.2. Phương pháp tối ưu công suất và vị trí DG trên LĐPP có xét tái cấu hình lưới điện phân phối sử dụng thuật toán Runner Root Algorithm

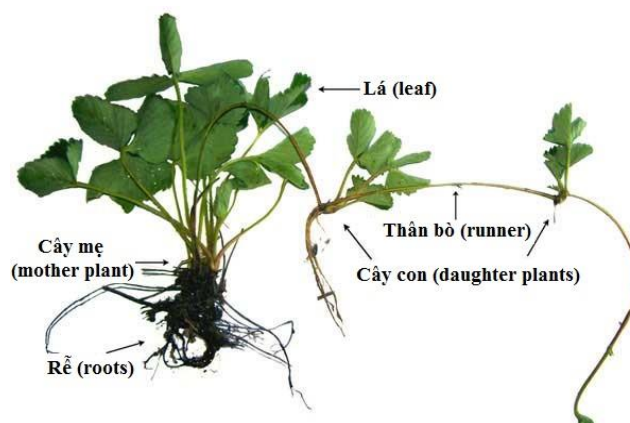
Thuật toán tối ưu được sử dụng là Runner Root Algorithm (RRA) [87] sẽ giải quyết bài toán hai giai đoạn và được thực hiện kiểm tra trên LĐPP 33 nút và LĐPP 69 nút. RRA được phát triển gần đây dựa trên ý tưởng từ các cây được nhân giống thông qua các Runners (gốc) và Roots (rễ) của cây dâu tây, như Hình 3.4. RRA đã vượt trội hơn các thuật toán khác thông qua 25 hàm điểm chuẩn. Gần đây, RRA được sử dụng cho bài toán DNR và nó đã chứng minh những ưu điểm so với các phương pháp khác [78]. Thuật toán Coyote Algorithm (COA) [88] và Genetic Algorithm (GA) [89] cũng được thực hiện để kiểm tra kết quả cho bài toán đề xuất.

Trong thuật toán COA, để tìm kiếm giải pháp trong không gian tìm kiếm, quần thể chó sói được chia thành các nhóm nhỏ  $N_g$  với  $N_c$  cá thể chó sói trong mỗi nhóm. Điều kiện xã hội của mỗi chó sói trong nhóm được xem như là một giải pháp cho bài toán. Quá trình tìm kiếm giải pháp mới được thực hiện dựa trên sự tiến hóa theo thể

hệ của quần thể chó sói. Các giải pháp mới được tạo ra trong quá trình tìm kiếm dựa trên sự tương tác giữa các cá thể trong cùng một nhóm và giữa các nhóm với nhau.

Thuật toán GA là kỹ thuật phỏng theo quá trình thích nghi tiến hóa của các quần thể sinh học. GA là phương pháp tìm kiếm tối ưu ngẫu nhiên bằng cách mô phỏng theo sự tiến hóa của con người hay của sinh vật. Điểm nổi bật của GA và các phương pháp tìm kiếm khác là thuật toán GA duy trì và xử lý một tập các lời giải (một quần thể). Các cá thể của quần thể hiện tại khởi nguồn cho quần thể thế hệ kế tiếp bằng các hoạt động lai ghép và đột biến ngẫu nhiên, được lấy mẫu sau các quá trình tiến hóa. Thuật toán GA giải quyết các bài toán kỹ thuật thông qua các quá trình cơ bản: lai tạo, đột biến và chọn lọc cho các cá thể trong quần thể.

Ngoài ra, bài toán đề nghị sẽ cùng thực hiện và so sánh với bài toán đồng thời tối ưu vị trí, công suất và DNR (bài toán đồng thời) sử dụng thuật toán RRA và thuật toán CSA [52]. Tương tự bài toán đề nghị cũng so sánh với bài tối ưu vị trí trước và sau đó công suất kết hợp DNR (bài toán VT-CS và DNR) sử dụng thuật toán FWA [51] và thuật toán HSA [90]. Để tối ưu lắp đặt DG và DNR cho LDPP thông qua hai giai đoạn được thực hiện như sau [87]:



**Hình 3. 5.** Cây dâu tây [91]

**Giai đoạn I - Để tối ưu lắp đặt DG trong LDPP kín, RRA thực hiện:**

*Bước 1: Khởi tạo.*

Trong giai đoạn I, công suất và vị trí DG được coi là cây mẹ. Do đó, những cây mẹ được khởi tạo ngẫu nhiên tại điểm bắt đầu của thuật toán như sau:

$$X_{\text{mother},k}(i) = \left\{ \begin{array}{l} \text{round} [ 2 + \text{rand} \times ( L_{\text{max},d} - 2 ) ], P_{\text{min},d} \\ + \text{rand} \times ( P_{\text{max},d} - P_{\text{min},d} ) \end{array} \right\} \quad (3.18)$$

Với  $k = 1, \dots, N$ ;  $i = 1, \dots, \text{Iter}_{1,\text{max}}$  và  $d = 1, \dots, \text{ndg}$ .

Trong đó:  $X_{\text{mother},k}(i)$  là cây mẹ được khởi tạo ngẫu nhiên ở vòng lặp thứ  $i$ ;  $L_{\text{max},d}$  là vị trí lớn nhất của DG (MW);  $P_{\text{min},d}$  là công suất nhỏ nhất của DG (MW);  $P_{\text{max},d}$  là công suất cực đại của DG (MW);  $\text{Iter}_{1,\text{max}}$  là số vòng lặp lớn nhất.

Từ quần thể của cây mẹ là công suất và vị trí DG, dữ liệu nút của LDPP được cập nhật và dòng điện được chạy qua bằng cách sử dụng phương pháp Newton Raphson để tính được tổn thất công suất, điện áp nút và dòng điện nhánh. Từ đó, xác định hàm mục tiêu tính bằng công thức (3.14). Cây tốt nhất ( $X_{\text{best}}$ ) của dân số được xác định.

*Bước 2: Tạo các cây con.*

Trong bước này, mỗi cây con được sinh ra tương ứng cây mẹ. Lưu ý rằng, cây đầu tiên được đổi mới bởi cây tốt nhất của thế hệ đầu. Trong trường hợp lặp lại đầu tiên, thế hệ đầu tiên là thế hệ sản sinh tốt nhất trong quần thể khởi tạo ngẫu nhiên.

$$X_{\text{daughter},k}(i) = \begin{cases} X_{\text{best}}(i-1) & , k = 1 \\ X_{\text{mother},k}(i) + d_{\text{runner}} \times \text{rand}, & k = 2, \dots, N \end{cases} \quad (3.19)$$

Trong đó:  $X_{\text{daughter},k}(i)$  là cây con được sinh ra;  $X_{\text{best}}(i-1)$  là giá trị phù hợp tốt nhất của các DG nút thứ  $(i-1)$  và nút thứ  $i$ ;  $d_{\text{runner}}$  là độ dài của thân.

Sau đó, các biến điều khiển được biểu thị cho vị trí của DG được làm tròn thành các giá trị nguyên và dữ liệu nút của LDPP được cập nhật và dòng điện được tính bằng phương pháp Newton Raphson để thu được tổn thất công suất, điện áp nút và dòng điện nhánh. Hàm mục tiêu tính bằng cách sử dụng (3.14). Cây tốt nhất ( $X_{\text{best}}(i)$ ) được xác định lại.

*Bước 3: Tìm kiếm nhỏ bằng khoảng cách lớn và nhỏ từ cây tốt nhất.*

Trong bước 3, nếu không có sự cải thiện trong hai lần lặp ( $i - 1$ ) và thứ  $i$  bởi chỉ số liên quan (RI), công thức (3.20). Cây tốt nhất được cập nhật như sau:

$$X_{\text{daughter},k}(i) = \begin{cases} X_{\text{best}}(i - 1) & , k = 1 \\ X_{\text{mother},k}(i) + d_{\text{runner}} \times \text{rand} & , k = 2, \dots, N \end{cases} \quad (3.20)$$

Với  $f(X_{\text{best}}(i - 1))$  và  $f(X_{\text{best}}(i))$  là giá trị phù hợp tốt nhất của các DG nút thứ  $(i - 1)$  và nút thứ  $i$ . Thu hẹp tìm kiếm với khoảng cách lớn: trong quy trình này, các cây mới của  $N_{\text{DG}}$  được tạo ra bằng cách điều chỉnh cây tốt nhất hiện tại dựa trên:

$$X_{\text{perturbed},d} = \text{round} [ \text{vec} \{1, 1 \dots, 1, 1, 1 + d_{\text{runner}} \times \text{rand}_d, 1, \dots, 1\} \times X_{\text{best}}(i) ] \quad (3.21)$$

Trong đó:  $d = 1, \dots, N_{\text{DG}}$ ;  $\text{vec} \{1, 1 \dots, 1, 1, 1 + d_{\text{runner}} \times \text{rand}, 1, \dots, 1\}$  là một vectơ với phần tử  $d_{\text{th}}$  được cập nhật bởi  $1 + d_{\text{runner}} \times \text{rand}$  và các phần tử còn lại.

Tìm kiếm hẹp với khoảng cách nhỏ: Trong bước này, cũng có các cây mới  $N_{\text{DG}}$  được sinh ra bằng cách sử dụng (3.22):

$$X_{\text{perturbed},d} = \text{round} [ \text{vec} \{1, 1 \dots, 1, 1, 1 + d_{\text{root}} \times \text{rand}_d, 1, \dots, 1\} \times X_{\text{best}}(i) ] \quad (3.22)$$

Từ các cây sản sinh mới  $2 \times N_{\text{DG}}$ , dữ liệu nút của LDPP được cập nhật và dòng điện được tính bằng Newton - Raphson để có những giá trị của hàm mục tiêu dựa trên công thức (3.14). Vào cuối bước, giải pháp tốt nhất ( $X_{\text{best}}(i)$ ) được làm mới thêm lần nữa.

*Bước 4: Tạo cây mới ở lần lặp tiếp theo.*

Ở bước cuối của mỗi thế hệ, các cây con mới cho lần lặp tiếp theo.

*Bước 5: Tránh giải pháp tối ưu không toàn cục.*

Ở bước này, nếu như không có sự cải thiện tốt đáng kể của các thế hệ sau số lần lặp được xác định trước ( $\text{stall}_{\text{max}}$ ). Lúc này, thuật toán RRA sẽ tái khởi động và tạo ngẫu nhiên các thế hệ gốc giống ở bước 1, ngược lại thì sang bước 2.

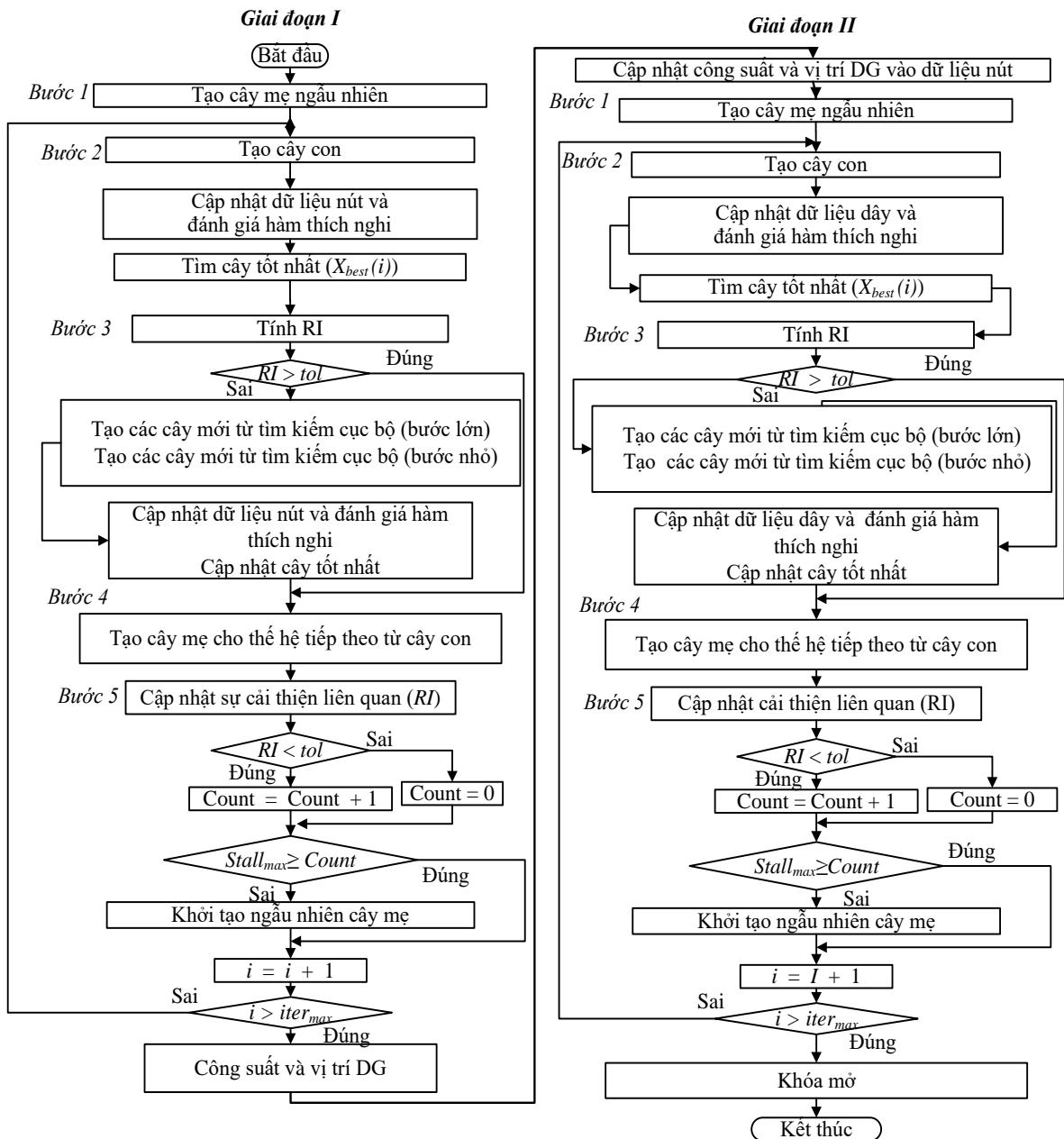


**Giai đoạn II - Để tối ưu các khóa mở để LDPP vận hành hỗ, RRA thực hiện giai đoạn II:**

Trong giai đoạn này, mỗi cấu hình hình tia của LDPP được trình bày theo vị trí của các khóa mở. Do đó, vị trí của các khóa mở được coi là cây mẹ và tạo ngẫu nhiên:

$$X_{\text{mother},k}(i) = \text{round} [ X_{\text{low},d} + \text{rand} \times ( X_{\text{high},d} - X_{\text{low},d} ) ] \quad (3.23)$$

Trong đó:  $d = 1, \dots, \text{NSW}$ ;  $X_{\text{low},d} = 1$  và  $X_{\text{high},d}$  là số lượng khóa trong vòng kín  $d_{\text{th}}$  của LDPP.



**Hình 3. 6.** Lưu đồ bài toán hai giai đoạn sử dụng RRA

Tương tự bước 2 ở giai đoạn I, mỗi cây mới sinh được tạo ra bằng cây mẹ tương ứng là công thức (3.24). Nhận thấy rằng, do cây con được đại diện bởi các khóa mở, tất cả các cây con được làm tròn thành giá trị nguyên. Sau đó, dữ liệu dây của LDPP được cập nhật và dòng công suất được tính toán để có được những giá trị hàm thích nghi dựa trên (3.24). Vào cuối bước, giải pháp tốt nhất ( $X_{best}(i)$ ) được làm mới một lần nữa.

$$X_{daughter,k}(i) = \begin{cases} X_{best}(i-1) & , k = 1 \\ \text{round}[X_{mother,k}(i) + d_{runner} \times \text{rand}] & , k = 2, \dots, N \end{cases} \quad (3.24)$$

Tương tự bước 3 ở giai đoạn I, giai đoạn II các cây mới  $2 \times N_{sw}$  được tạo nếu bước này sẽ được thực hiện bởi công thức (3.25) và (3.26). Từ công thức (3.25) và (3.26), cho thấy rằng tất cả các biến điều khiển cũng được làm tròn đến số nguyên gần nhất để biểu diễn các khóa mở.

$$X_{perturbed,d} = \text{round} [ \text{vec} \{ 1, 1 \dots, 1, 1, 1 + d_{runner} \times \text{rand}_d, 1, \dots, 1 \} \times X_{best}(i) ] \quad (3.25)$$

$$X_{perturbed,d} = \text{round} [ \text{vec} \{ 1, 1 \dots, 1, 1, 1 + d_{root} \times \text{rand}_d, 1, \dots, 1 \} \times X_{best}(i) ] \quad (3.26)$$

Trong đó:  $X_{perturbed,d}$  là cây con đại diện cho các khóa mở;  $d_{runner}$  là độ dài của thân;  $d_{root}$  là độ dài của rễ;  $X_{best}(i)$  là giải pháp tốt nhất;  $N_{sw}$  là số lượng khóa chuyển mạch.

Bước tạo ra các thế hệ sản sinh cho lần lặp tiếp theo và bước thoát khỏi giải pháp cục bộ tương tự như ở giai đoạn I. Lưu đồ của RRA sử dụng bài toán hai giai đoạn để tối ưu lắp đặt DG có xét DNR như ở Hình 3.5.

### 3.2.3. Kết quả kiểm tra

Phương pháp đề xuất đã được đánh giá trên hai LDPP bao gồm: LDPP 33 nút và LDPP 69 nút. Trong mỗi LDPP, 3 DG có công suất tối đa là 2 MW được lắp đặt. Phương pháp đề nghị được triển khai trong phần mềm Matlab trên máy tính cá nhân với CPU Intel Core i3 4160 @ 3.6 GHz, 1 CPU, 8 GB, Windows 7 SP1 (64-bit). Để thể hiện tính ưu việt của bài toán đề nghị, thuật toán RRA được sử dụng để mô phỏng

đồng thời kiểm tra thêm trên hai thuật toán COA và GA. Ngoài ra, bài toán đề nghị cũng được so sánh với các bài toán đồng thời (sử dụng thuật toán RRA, CSA) và bài toán VT – CS và DNR (sử dụng thuật toán HSA và FWA).

Các tham số của RRA, được xác định bởi nhiều lần thực hiện thử nghiệm và được áp dụng cho hai LĐPP được trình bày trong Bảng 3.1.

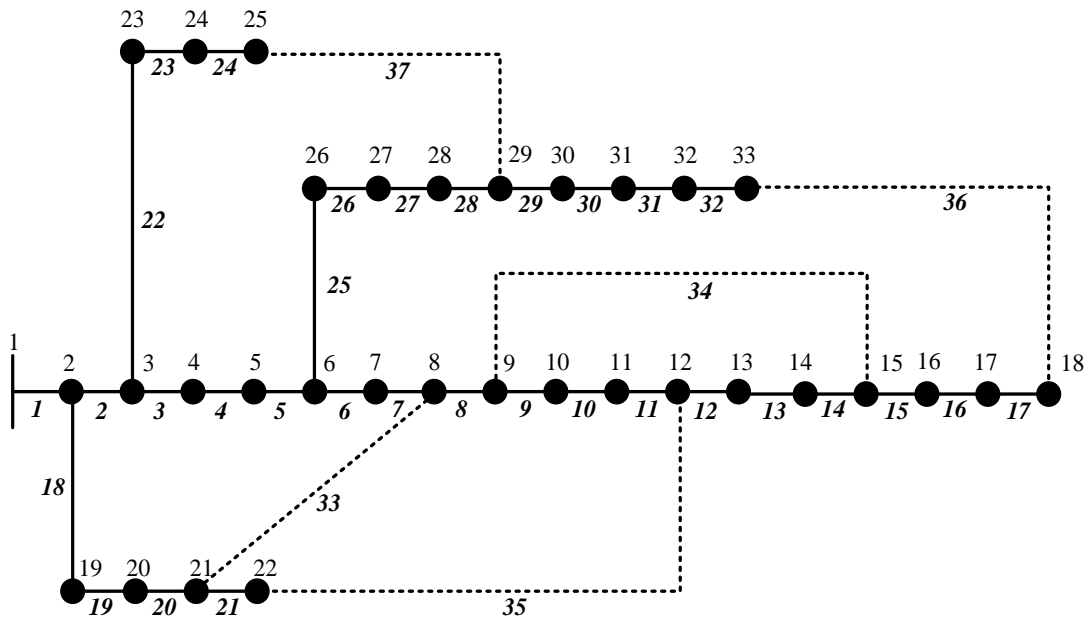
**Bảng 3. 1.** Tham số chung của thuật toán RRA cho LĐPP 33 và 69 nút

Hệ thống	Thông số chung của RRA - LĐPP 33 và LĐPP 69 nút		
	Giai đoạn I	Giai đoạn II	Đồng thời
Trường hợp			
Cây mẹ	30	30	30
Số lần lặp tối đa	300	150	1000
Kích thước	6	5	11
$d_{runner}$	4	4	4
$d_{root}$	2	2	2
$Stall_{max}$	50	50	50

Với thuật toán COA thông số điều khiển của COA được thiết lập cho cả hai giai đoạn bao gồm: số nhóm và số cá thể trong mỗi nhóm được chọn là 5 và 6. Số vòng lặp lớn nhất được chọn 300. Thuật toán GA với kích thước quần thể chọn là 30, tỉ lệ chọn lọc và đột biến được chọn lần lượt là 50% và 20% cho cả giai đoạn I và giai đoạn II. Trong khi đó, số vòng lặp lớn nhất được chọn trong giai đoạn I là 500 cho LĐPP 33 nút và 2000 cho LĐPP 69 nút và giai đoạn II là 150 cho cả hai LĐPP.

### 3.2.3.1. LĐPP 33 nút

Hình 3.6 thể hiện sơ đồ đơn tuyến của LĐPP 33 nút, bao gồm 5 khóa mở và 37 nhánh [87]. Thông số của các nút và thông số của các đường dây được thể hiện trong Phụ lục 5 và Phụ lục 6 [59]. Khi LĐPP 33 nút hoạt động ở chế độ bình thường với khóa mở là {33; 34; 35; 36 và 37}.



**Hình 3. 7.** Sơ đồ đơn tuyến của LĐPP 33 nút [87]

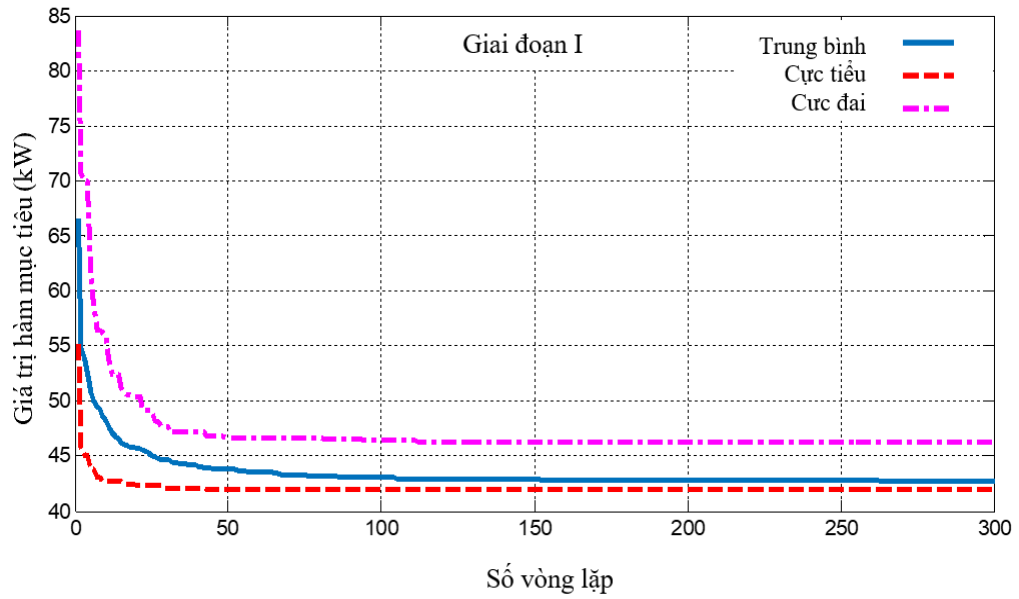
Kết quả từ Bảng 3.2 cho thấy tổn thất công suất ban đầu là 202,68 kW giảm xuống còn 41,905 kW ở giai đoạn I và ở giai đoạn II là 53,313 kW. Kết quả từ giai đoạn I cho thấy tổn thất công suất là tối thiểu vì đây là tổn thất do LĐPP kín gây ra. Ở giai đoạn I, tìm công suất và vị trí các DG trong LĐPP kín và trong giai đoạn II, xác định khóa mở sao cho LĐPP hình tia với khóa mở tối ưu là {33; 34; 11; 30; 28}. Vì vậy, ở giai đoạn II thì tổn thất công suất tăng lên tới 53,313 kW so với 41,905 kW ở giai đoạn I. Các kết quả của bài toán hai giai đoạn bằng thuật toán RRA tương tự với các kết quả của các thuật toán COA và thuật toán GA. Điều này, cho thấy bài toán hai giai đoạn được thực hiện với các thuật toán khác nhau cùng cho kết quả tương tự với nhau.

Kết quả thực hiện trên cùng một thuật toán RRA cho cả hai bài toán đồng thời sử dụng RRA và bài toán hai giai đoạn sử dụng RRA được thể hiện như ở Bảng 3.3. Tuy nhiên, các kết quả từ bài toán hai giai đoạn có giá trị tổn thất công suất gần giống với kết quả của bài toán đồng thời (RRA). Giá trị tổn thất công suất của bài toán đồng thời (RRA) là 50,825 kW thấp hơn 2,4879 kW so với giải pháp tối ưu của bài toán hai giai đoạn (RRA) đã đề nghị. Ngoài ra, bài toán hai giai đoạn chỉ mất 34,39 giây để thực hiện cho cả hai giai đoạn, ít hơn 46,39 giây so với bài toán đồng thời.

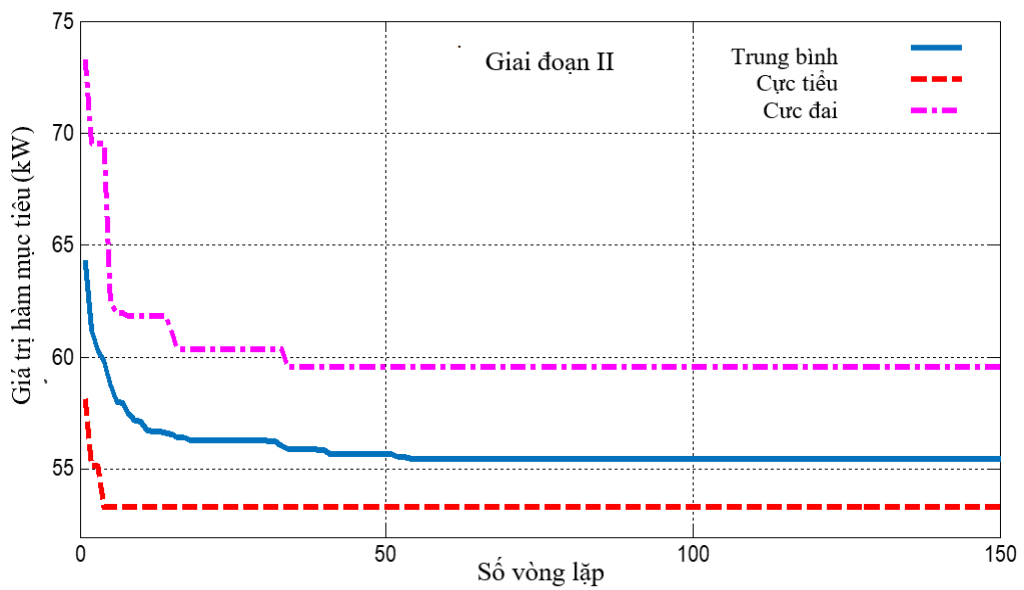
Từ kết quả ở Bảng 3.2, giá trị hàm thích nghi trung bình ở giai đoạn I và giai đoạn II của bài toán hai giai đoạn xấp xỉ giá trị tối thiểu hàm thích nghi hơn bài toán đồng thời. Điều này cho thấy rằng bài toán hai giai đoạn giúp cho RRA dễ dàng xác định kết quả tối ưu so với bài toán đồng thời.

**Bảng 3. 2.** Các kết quả của bài toán hai giai đoạn - LĐPP 33 nút

Thông số	Ban đầu	Bài toán đề nghị - Bài toán hai giai đoạn					
		RRA – Giai đoạn		COA – Giai đoạn		GA - Giai đoạn [89]	
		I	II	I	II	I	II
Khóa mở	33; 34; 35; 36; 37	Không có	33; 34; 11; 30; 28	Không có	33; 34; 11; 30; 28	Không có	33, 34, 11, 30, 28
PDG - MW (Nút số)	-	1,133(25) 0,815(32) 1,101(8)	1,133(25) 0,815(32) 1,101(8)	1,172(30) 0,754(14) 1,146(24)	1,172(30) 0,754(14) 1,146(24)	1,107(25) 0,823(32) 1,105(8)	1,107(25) 0,823(32) 1,105(8)
$\Delta P$ (kW)	202,68	41,905	53,313	42,342	54,035	41,9082	53,4274
% Giảm $\Delta P$	-	79,32	73,70	79,11	73,34	79,32	73,64
Hàm thích nghi tối đa	-	46,289	59,553	48,085	59,5526	44,2733	53,4274
Hàm thích nghi trung bình	-	42,695	55,472	42,6949	55,4702	42,5102	53,4274
Độ lệch chuẩn	-	1,177	2,509	1,17681	2,50883	0,9969	0
Thời gian CPU (s)	-	25,078	9,316	25,078	9,316	130,49	39,54
Số lần lặp trung bình	-	245,2	18,50	284,6	28,56	260,4	25,5

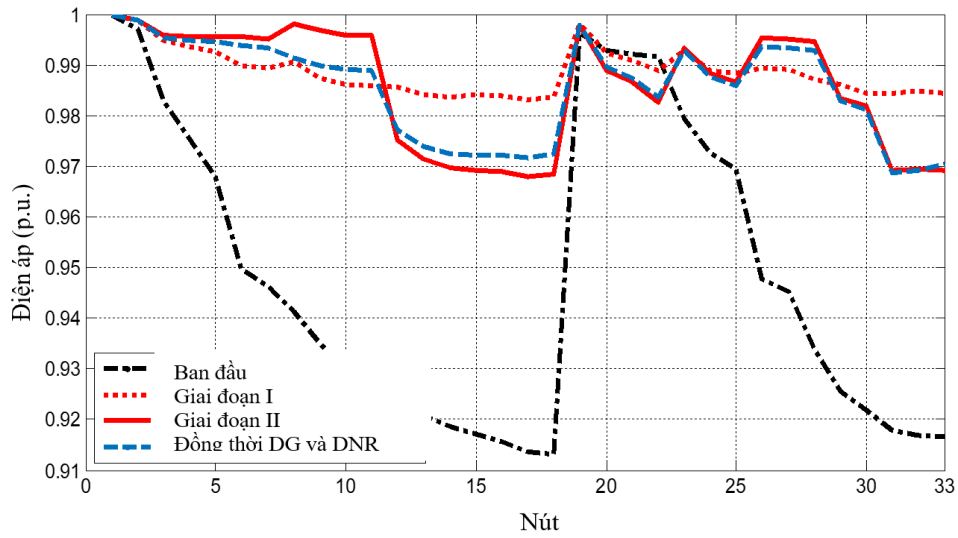


**Hình 3. 8.** Đường cong hội tụ ở giai đoạn I (RRA) sau 50 lần chạy - LDPP 33 nút



**Hình 3. 9.** Đường hội tụ ở giai đoạn II (RRA) sau 50 lần chạy - LDPP 33 nút

Hình 3.7 và Hình 3.8 cho thấy sự hội tụ của giai đoạn I và giai đoạn II (RRA). Các cấu hình điện áp của bài toán hai giai đoạn (RRA) và bài toán đồng thời (RRA) được thể hiện như Hình 3.9. Ở đây, bài toán đề nghị với điện áp ở các nút của giai đoạn II được nâng cao và có cấu hình điện áp gần giống bài toán đồng thời.



**Hình 3. 10.** Cấu hình điện áp trong các trường hợp - LDPP 33 nút

**Bảng 3. 3.** Kết quả tối ưu của các bài toán khác nhau - LDPP 33 nút

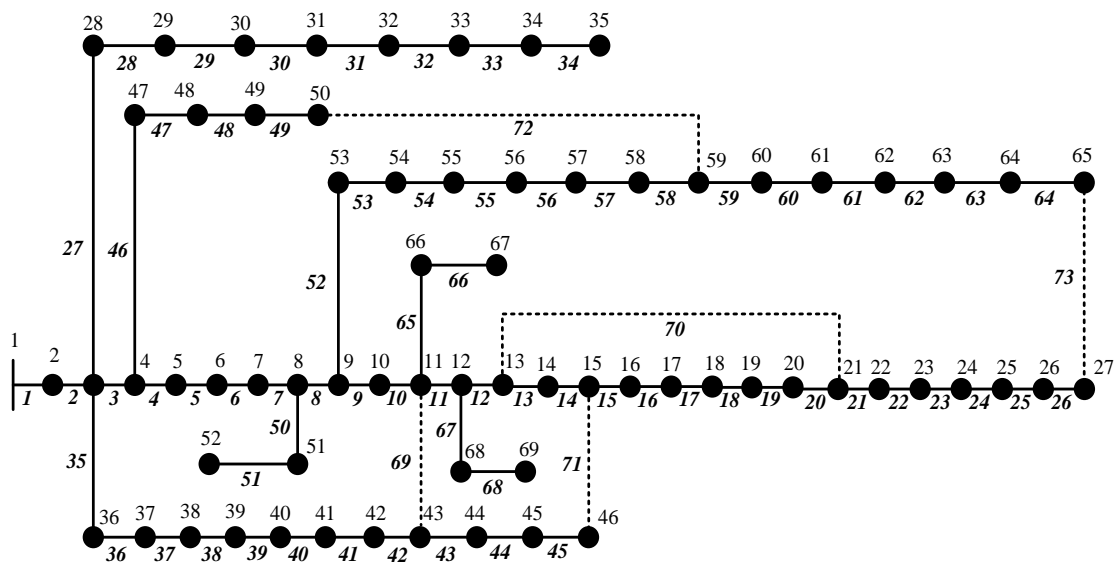
Thông số	Bài toán đề nghị - hai giai đoạn (RRA)	Bài toán đồng thời (RRA)	Bài toán đồng thời (CSA) [52]	Bài toán VT-CS và DNR (FWA) [51]	Bài toán VT-CS và DNR (HSA) [90]
Khóa mở	33; 34; 11; 30; 28	33; 34; 11; 30; 28	33; 34; 11; 31; 28	7; 14; 11; 32; 28	7; 14; 10; 32; 28
$P_{DG} - MW$ (Nút)	1,1326 (25) 0,8146 (32) 1,1011 (8)	1,12095 (25) 0,87689 (18) 0,969711 (7)	0,8968 (18) 1,4381 (25) 0,9646 (7)	0,5367 (32) 0,6158 (29) 0,5315 (18)	0,5258 (32); 0,5586 (31); 0,5840 (33)
$\Delta P$ (kW)	53,3129	50,825	53,21	67,11	73,05
% Giảm $\Delta P$	73,70	74,92	73,75	66,89	63,95
Thời gian (s)	34,39	46,39	52,4	64,3	74,8
Số lần lặp TB	63,7	751,9	724,6	668,4	704,5

Kết quả từ bài toán đề nghị so sánh với một số bài toán đã thực hiện trên cùng LDPP 33 nút như ở Bảng 3.3. Từ kết quả, cho thấy mức giảm % tổn thất công suất

của bài toán hai giai đoạn (RRA) cao hơn 0,05% so với kết quả bài toán đồng thời (CSA) và cao hơn 1,12% so với kết quả bài toán đồng thời (RRA) đạt được. Tuy nhiên, hiệu suất của bài toán hai giai đoạn (RRA) tốt hơn bài toán VT-CS và DNR (HSA) và bài toán VT-CS và DNR (FWA). Các mức giảm được thể hiện chi tiết ở Bảng 3.3 cho mỗi loại bài toán và thuật toán áp dụng để tối ưu. Ở bài toán VT-CS và DNR (FWA và HSA) là chọn vị trí lắp đặt DG trên LĐPP hình tia ban đầu trước khi tối ưu công suất của DG và DNR. Như vậy, với kết quả của kiểm tra trên LĐPP 33 nút đã cho thấy một bài toán mới đề nghị giải bài toán tối ưu lắp đặt DG và DNR thông qua hai giai đoạn cho kết quả tối ưu tương tự như bài toán tối ưu đồng thời và tốt hơn bài toán tối ưu vị trí trước và tối ưu công suất và tái cấu hình sau. Các thuật toán khác được sử dụng để tối ưu cho bài toán hai giai đoạn là RRA, COA và GA đã cho kết quả là gần giống nhau và đáng tin cậy.

### 3.2.3.2. LĐPP 69 nút

LĐPP 69 nút được trình bày trong Hình 3.10 có 73 nhánh và 5 khóa mở. Thông số của các nút như trong Phụ lục 9 và đường dây như trong Phụ lục 10. Khi LĐPP 69 nút hoạt động bình thường với khóa mở là { 69; 70; 71; 72; 73 } [92].



**Hình 3. 11.** Sơ đồ đơn tuyến của LĐPP 69 nút [92]

Kết quả của bài toán hai giai đoạn ở LĐPP 69 nút như ở Bảng 3.4. Với tổn thất công suất ban đầu là 224,89 kW đã giảm xuống còn 28,89 kW ở giai đoạn I và 39,31



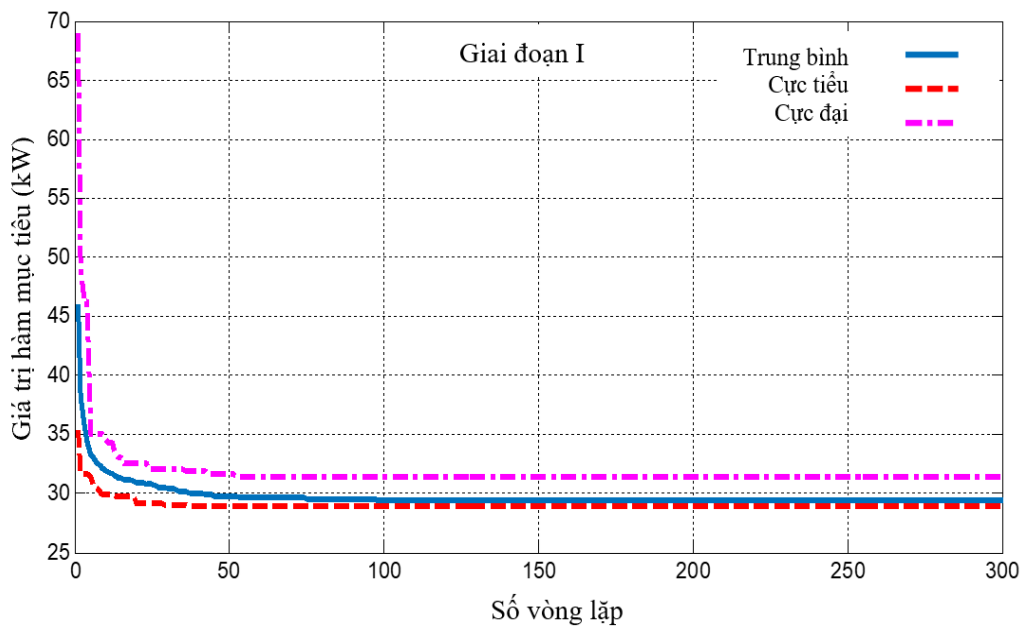
kW ở giai đoạn II. Các kết quả của bài toán hai giai đoạn bằng thuật toán RRA tương tự với các kết quả của các thuật toán COA và thuật toán GA. Điều này, cho thấy bài toán hai giai đoạn được thực hiện với các thuật toán khác nhau cùng cho kết quả tương tự với nhau.

**Bảng 3. 4.** Các kết quả của bài toán hai giai đoạn - LĐPP 69 nút

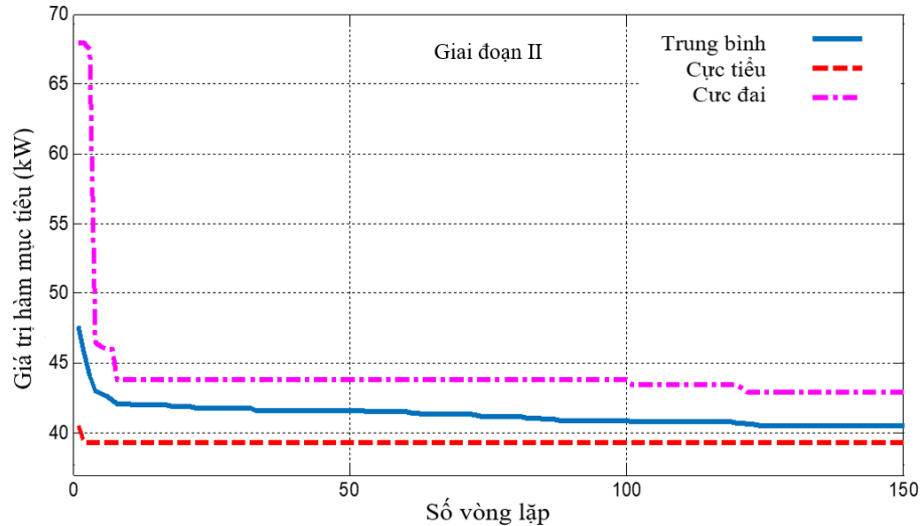
Thông số	Ban đầu	Bài toán đề nghị - Bài toán hai giai đoạn					
		RRA – Giai đoạn		COA – Giai đoạn		GA – Giai đoạn	
		I	II	I	II	I	II
Khóa mở	69; 70; 71; 72; 73	Không có	69; 70; 12; 55; 63	Không có	69; 70; 12; 55; 63	Không có	69; 70; 12; 55; 62
PDG - MW (Nút số)	-	1,618(61) 0,771(50) 0,675(21)	1,618(61) 0,771(50) 0,675(21)	1,554(62) 0,824(50) 0,735(21)	1,618(62) 0,771(50) 0,675(21)	1,622(61) 0,743(50) 0,678(21)	1,622(61)0, 0,743(50) 0,678(21)
$\Delta P$ (kW)	224,89	28,89	39,31	29,32	40,02	28,89	39,33
% Giảm $\Delta P$	-	87,15	82,52	85,53	80,25	85,75	80,60
Giá trị lớn nhất của hàm thích nghi	-	31,399	42,878	32,016	43,07	28,97	39,33
Giá trị trung bình của hàm thích nghi	-	29,380	40,544	30,021	41,18	28,92	39,93
Độ lệch chuẩn	-	0,723	1,469	0,893	1,824	0,023	6e-11
Thời gian CPU (s)	-	32,97	27,26	34,67	29,35	35,43	28,31
Số lần lặp trung bình	-	240,15	71,05	252,04	75,09	242,22	74,25

Có thể thấy rằng, các kết quả từ bài toán hai giai đoạn (RRA) gần giống với kết quả thu được từ bài toán đồng thời (RRA), như Bảng 3.5. Tồn thất công suất của bài toán đồng thời là 35,193 kW thấp hơn 4,171 kW so với bài toán hai giai đoạn.

Ngoài ra, về thời gian CPU, bài toán hai giai đoạn mất 60,23 giây để thu được kết quả cho cả hai giai đoạn, thấp hơn 184,26 giây so với bài toán đồng thời.



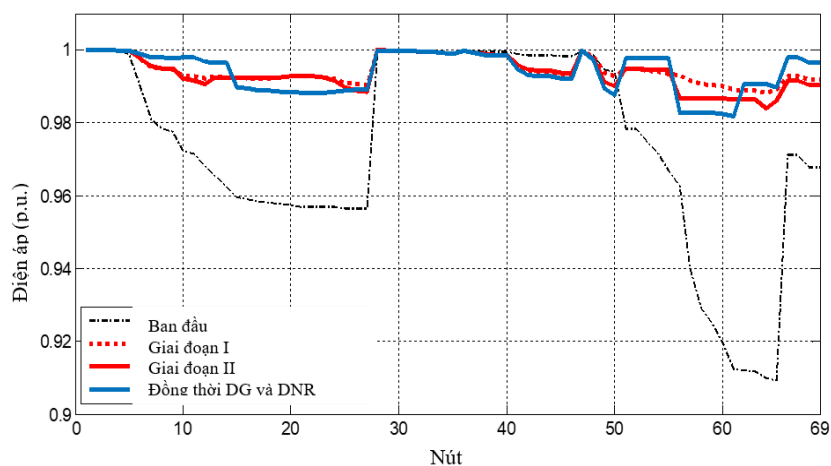
**Hình 3. 12.** Đường cong hội tụ giai đoạn I (RRA) sau 50 lần chạy - LDPP 69 nút



**Hình 3. 13.** Đường cong hội tụ ở giai đoạn II (RRA) sau 50 lần chạy - LDPP 69 nút

Ở Bảng 3.4 cho thấy các giá trị hàm thích nghi ở giai đoạn I và giai đoạn II gần với thông số tối thiểu của bài toán đồng thời (RRA). Sự hội tụ của bài toán hai giai đoạn như Hình 3.11 và Hình 3.12. Trong Hình 3.12 thể hiện cấu hình điện áp của bốn trường hợp khác nhau. Ở đây, điện áp các nút được nâng cao khi sử dụng bài toán

hai giai đoạn (RRA) và cấu hình điện áp của giai đoạn II gần giống với bài toán đồng thời (RRA).



**Hình 3. 14.** Cấu hình điện áp trong các trường hợp - LDPP 69 nút

**Bảng 3. 5.** Kết quả tối ưu của các bài toán khác nhau - LDPP 69 nút

Thông số	Bài toán hai giai đoạn (RRA)	Bài toán đồng thời (RRA)	Bài toán đồng thời (CSA) [52]	Bài toán VT-CS và DNR (FWA) [51]	Bài toán VT-CS và DNR (HSA) [90]
Khóa mở	69; 70; 12; 55; 63	69; 70; 14; 55; 61	69; 70; 14; 58; 61	69; 70; 13; 55; 63	69; 17; 13; 58; 61
PDG (MW)	1,6175 (61)	0,5161 (64)	0,5413 (11)	1,1272 (61)	1,0666 (61)
(Nút số)	0,7710 (50)	1,45167 (61)	0,5536 (65)	0,2750 (62)	0,3525 (60)
	0,6752 (21)	0,53696 (11)	1,7240 (61)	0,4159 (65)	0,4257 (62)
$\Delta P$ (kW)	39,31	35,193	37,02	39,25	40,3
% Giảm $\Delta P$	82,52	84,35	83,54	82,55	82,08
Thời gian CPU (s)	60,23	184,26	186,9	203,2	235,7
Số lần lặp TB	311,15	807,15	796,9	840,6	860,2

Bài toán đề nghị (RRA) có kết quả so với bài toán đồng thời (RRA và CSA), bài toán VT-CS và DNR (FWA và HSA) như Bảng 3.5. Ở đây, với tổn thất công suất của bài toán đề nghị là 82,52% cao hơn 1,02% so với bài toán đồng thời sử dụng CSA là 83,54% và cao hơn so với bài toán đồng thời sử dụng RRA 1,83%. Đối với bài toán VT-CS và DNR thì kết quả bài toán đề nghị gần bằng với bài toán VT-CS và DNR sử dụng thuật toán FWA là 82,55%, thậm chí tốt hơn so với bài toán VT-CS và DNR sử dụng thuật toán HSA là 82,08%. Như vậy, với kết quả của kiểm tra trên LĐPP 69 nút đã cho thấy một bài toán mới đề nghị giải bài toán tối ưu lắp đặt DG và DNR thông qua hai giai đoạn cho kết quả tối ưu tương tự như bài toán tối ưu đồng thời và tốt hơn bài toán tối ưu vị trí trước và tối ưu công suất và tái cấu hình sau. Các thuật toán khác được sử dụng để tối ưu cho bài toán hai giai đoạn là RRA, COA và GA đã cho kết quả là tương tự nhau và đáng tin cậy.

#### **3.2.4. Kết luận**

Ở phần 3.2 đề xuất bài toán tối ưu lắp đặt DG có xét tái cấu hình thông qua hai giai đoạn được đề nghị để mở rộng LĐPP. Trong giai đoạn I là tối ưu lắp đặt DG trong LĐPP kín và giai đoạn II là tối ưu khóa mở để vận hành hồ. LĐPP 33 nút và LĐPP 69 nút được kiểm tra bài toán đề nghị đã cho thấy bài toán hai giai đoạn hiệu quả để tối ưu lắp đặt DG (trong giai đoạn I) và xét đến DNR (trong giai đoạn II). Bài toán đề nghị cho thấy hiệu quả khi thực hiện kiểm tra trên hai LĐPP 33 nút và 69 nút bằng các thuật toán RRA, COA và GA có kết quả là tương tự nhau. Ngoài ra, bài toán đề nghị cũng thực hiện so sánh với các bài toán tối ưu đồng thời vị trí, công suất và DNR (bài toán đồng thời) và bài toán tối ưu vị trí trước và sau đó tối ưu công suất và tái cấu hình (bài toán VT-CS và DNR). Kết quả kiểm tra cũng cho thấy bài toán đề nghị có kết quả tương đương với bài toán đồng thời và tốt hơn bài toán tối ưu VT-CS và DNR. Như vậy, với bài toán đề nghị có kết quả tối ưu lắp đặt DG là không ảnh hưởng đến việc tối ưu khóa mở. Điều đó có nghĩa là vấn đề lắp đặt DG (thiết kế) không bị phụ thuộc vào vấn đề DNR (vận hành). Bài toán hai giai đoạn đã giải quyết hai vấn đề riêng lẻ giúp thuật toán tối ưu đơn giản, rút ngắn thời gian tính và hiệu quả trong từng giai đoạn thiết kế và vận hành LĐPP. Kết quả kiểm tra và so sánh trên LĐPP 33 nút và LĐPP 69 nút với các phương pháp khác đã cho thấy bài toán hai giai

đoạn là hiệu quả để tối ưu lắp đặt DG có xét DNR. Bài toán đề nghị được nghiên cứu, thực hiện và công bố trong công trình số [1], [5] và [7].

### 3.3. Xác định cấu hình vận hành LĐPP khi mở rộng công suất DG

Đối với các LĐPP chưa được lắp đặt DG thì việc thực hiện tối ưu và lắp đặt DG theo vị trí và công suất tối ưu là khả thi. Tuy nhiên, trong thực tế việc lắp đặt DG theo vị trí và công suất tối ưu cũng còn một số khó khăn. Bởi vì việc lắp đặt các DG cũng còn phụ thuộc vào các yếu tố như chính sách ưu đãi, định hướng phát triển, chi phí đầu tư, các yếu tố ảnh hưởng đến môi trường cũng như vị trí địa lý... Thực tế hiện nay, phần lớn các LĐPP được lắp đặt các PV là phổ biến, vì công nghệ của PV đang phát triển và giá thành của PV đã và đang giảm dần. PV lắp đặt theo công suất, vị trí và số lượng phù hợp với thiết kế ban đầu là rất khó thực hiện. Bởi vì, PV được lắp đặt vào LĐPP tùy thuộc vào các yếu tố khác nhau như chi phí đầu tư, môi trường, chính sách ưu đãi, công suất và vị trí DG cho phép kết nối. Vì vậy, các LĐPP có sẵn kết nối PV thì sẽ mở rộng công suất PV trong thời gian tiếp theo để đem lại hiệu quả hoạt động cho hệ thống điện phân phối.

Một số LĐPP lắp đặt DG không phù hợp vị trí và công suất tối ưu hay LĐPP tiếp tục mở rộng công suất của các nguồn PV đã được lắp đặt thì cần xem xét việc vận hành để LĐPP hoạt động hiệu quả thông qua việc giảm chi phí vận hành. Hàm mục tiêu giảm thiểu chi phí vận hành gồm có chi phí tổn thất công suất và chi phí thay đổi khóa điện, như công thức (3.27). Trong đó, việc thay đổi khóa điện và chi phí thay đổi khóa điện là rất lớn. Do đó, LĐPP cần xác định một cấu hình vận hành sao cho LĐPP vận hành với chi phí tổn thất là bé nhất [71] và DNR là phương pháp hiệu quả để giảm tổn thất công suất.

$$C = C_a \sum_{i=1}^n \Delta P_i \times T_i + n \times C_b. \quad (3.27)$$

Như vậy, LĐPP đã được lắp đặt PV cần phải có phương án vận hành nhằm cực tiểu tổn thất năng lượng trong một khoảng thời gian khảo sát. Điều này là rất đáng quan tâm với sự bùng nổ các trang trại PV hiện nay và trong tương lai. Tái cấu hình lưới điện phân phối (DNR) là một phương pháp rất hiệu quả trong xác định cấu hình vận

hành cho LĐPP khi PV mở rộng thêm công suất. Việc lắp đặt mở rộng công suất của PV trên LĐPP cần phải đi cùng với DNR là giải pháp thiết thực và hiệu quả để giảm thiểu tổn thất năng lượng.

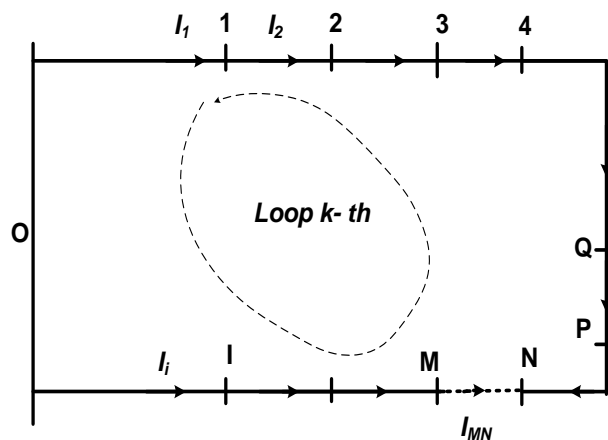
Những năm gần đây, DNR với mục tiêu tổn thất công suất hay tổn thất năng lượng là vấn đề đã và đang được nghiên cứu khá phổ biến [93]. Các nghiên cứu hiện nay chỉ tập trung chủ yếu vào các phương pháp tối ưu cho bài toán DNR. Tuy nhiên, có rất ít nghiên cứu DNR có xét đến sự tham gia của DG hoặc có xét DG nhưng không xét ảnh hưởng của DG trên LĐPP. Trong các phương pháp DNR thì tùy theo mức độ phức tạp của bài toán cũng như thông số đầu vào của bài toán để lựa chọn phương pháp giải bài toán phù hợp. Trong các phương pháp hiện nay, DNR sử dụng kỹ thuật trao đổi nhánh được sử dụng là khá đơn giản, giảm mức độ phức tạp của bài toán và nhanh chóng xác định được cấu hình vận hành của LĐPP. Ở nghiên cứu [71] đã cho thấy việc sử dụng công suất nhánh trung bình (CSNTB) là rất hiệu quả trong việc giải quyết vấn đề tối ưu DNR cho LĐPP. Trong nghiên cứu [94] đã ứng dụng hiệu quả kỹ thuật trao đổi nhánh cho bài toán DNR thông qua việc sử dụng CSNTB là rất hiệu quả và thậm chí không cần sử dụng đồ thị phụ tải [71].

Như vậy, sử dụng kỹ thuật trao đổi nhánh và CSNTB để giải quyết cho bài toán DNR là đơn giản và hiệu quả. Tuy nhiên, với sự thâm nhập ngày càng cao của PV vào LĐPP sẽ làm cho dòng công suất trên các nhánh ở một số thời điểm khảo sát có thể thay đổi hướng truyền công suất. Điều này, sẽ dẫn đến CSNTB không đảm bảo giá trị đúng để sử dụng DNR hoặc CSNTB của một số nhánh có thể bằng không mà tổn thất năng lượng không phải là nhỏ nhất. Việc xác định CSNTB chính xác khi LĐPP có kết nối PV là cần thiết cho DNR khi PV được mở rộng công suất để cực tiểu tổn thất năng lượng. Một phương pháp đề nghị để giải quyết bài toán DNR là sử dụng kỹ thuật trao đổi nhánh với CSNTB cải tiến. Kỹ thuật này là dựa vào hệ số phụ tải để xác định CSNTB cải tiến thông qua việc bổ sung (bù) một lượng công suất ở các nhánh có PV tham gia vào LĐPP. Vấn đề bổ sung công suất này cho các nhánh để CSNTB cải tiến chính xác và giúp cho quá trình DNR xác định cấu hình chính xác với tổn thất năng lượng là nhỏ nhất. Kỹ thuật trao đổi nhánh với CSNTB cải tiến phù hợp với bài toán DNR khi PV được lắp đặt và mở rộng công suất cho LĐPP.

Ở phần này đề nghị thuật toán trao đổi nhánh với công suất nhánh trung bình (CSNTB) cải tiến nhằm xác định nhanh cấu hình vận hành LĐPP khi PV được mở rộng công suất với mục tiêu là cực tiểu tổn thất năng lượng. Ưu điểm nổi bật của bài toán đề nghị là đơn giản, dễ thực hiện và chính xác trong việc xác định cấu hình của LĐPP khi PV được mở rộng công suất lắp đặt. LĐPP 18 nút và LĐPP 33 nút được áp dụng thử nghiệm đã cho thấy phương pháp đề nghị là đơn giản, nhanh chóng và chính xác để xác định cấu hình vận hành của LĐPP. Phương pháp đề nghị có độ chính xác cao khi so sánh với bài toán xác định cấu hình theo phương pháp sử dụng công suất nhánh trung bình (CSNTB) và phương pháp sử dụng đồ thị phụ tải bằng các thuật toán tối ưu. Phương pháp đề nghị mới tiến hành thực hiện kiểm tra trên LĐPP 18 nút và LĐPP 33 nút và so sánh với các phương pháp lập trình tiến hóa (EP) [70], phương pháp Gravitational Search (GSA) [70] và phương pháp đồ thị phụ tải của PSS-ADEPT 5.0 đã cho thấy tính hiệu quả của phương pháp đề nghị. Phần mềm PSS/ADEPT là công cụ để thiết kế và phân tích lưới điện phân phối cho phép thiết kế, chỉnh sửa và phân tích sơ đồ lưới và các mô hình lưới điện một cách trực quan.

### 3.3.1. Mô hình toán học

Hình 3.14 trình bày một LĐPP đơn giản, vấn đề DNR được thể hiện thông qua chuyển đổi vị trí khóa mở trong vòng kín. Ở đây, có hai khóa mở MN và PQ, mỗi khóa mở ở tại một thời điểm. Công thức (3.28) thể hiện mục tiêu bài toán DNR giảm tổn thất năng lượng [71].



**Hình 3. 15.** LĐPP đơn giản có một vòng kín

$$\text{Min: } \Delta A(X) = \sum_{m=1}^M t_m \times \sum_{i=1}^{N_{br}} R_i \times \left( \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) \quad (3.28)$$

Trong đó:  $R_i$  là điện trở nhánh ( $\Omega$ );  $P_i$  và  $Q_i$  là công suất tác dụng (kW) và phản kháng (kVAR) tải thứ  $i$  (kVAR);  $V_i$  là điện áp nút (kV);  $t_m$  là thời gian khảo sát (h).

Công thức (3.29) là độ lệch tổn thất công suất nhánh MN ( $\delta P_{MN}$ ) giữa LĐPP kín và LĐPP hở được tham khảo ở tài liệu [87].

$$\delta P_{MN} = \Delta P_{hở} - \Delta P_{kín} = I_{MNpeak}^2 R_{Loop} \quad (3.29)$$

Công thức độ lệch tổn thất năng lượng trên nhánh MN ( $\delta A_{MN}$ ) phụ thuộc vào  $\delta P_{MN}$ , hệ số tổn thất (LLF) và hệ số tải (LF) [95], [96]. Ta có  $\delta A_{MN}$  giữa LĐPP mạch kín và hình tia ở nhánh MN trong 24 giờ, như công thức (3.30) và công thức (3.31).

$$\delta A_{MN} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{iMN} T_i \quad (3.30)$$

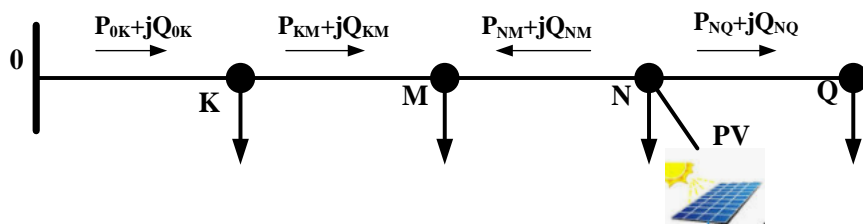
$$\begin{aligned} &= 24 \Delta P_{max} LLF = 24 R_{loop} I_{MNpeak}^2 LLF \\ &= 24 R_{Loop} \left( \frac{P_{MNpeak}^2 + Q_{MNpeak}^2}{V^2} \right) (a \cdot LF + (1 - a) LF^2) \\ &= 24 \frac{R_{Loop}}{V^2} \left( \left( \frac{P_{MNavg}}{LF} \right)^2 + \left( \frac{Q_{MNavg}}{LF} \right)^2 \right) (a LF + (1 - a) LF^2) \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\text{Với: } LLF = a LF + (1 - a) LF^2; \quad a = \frac{LLF - LF^2}{LF - LF^2}; \quad LF = \frac{P_{avg}}{P_{peak}}; \quad LFF = \frac{(P^2)_{avg}}{(P^2)_{peak}}$$

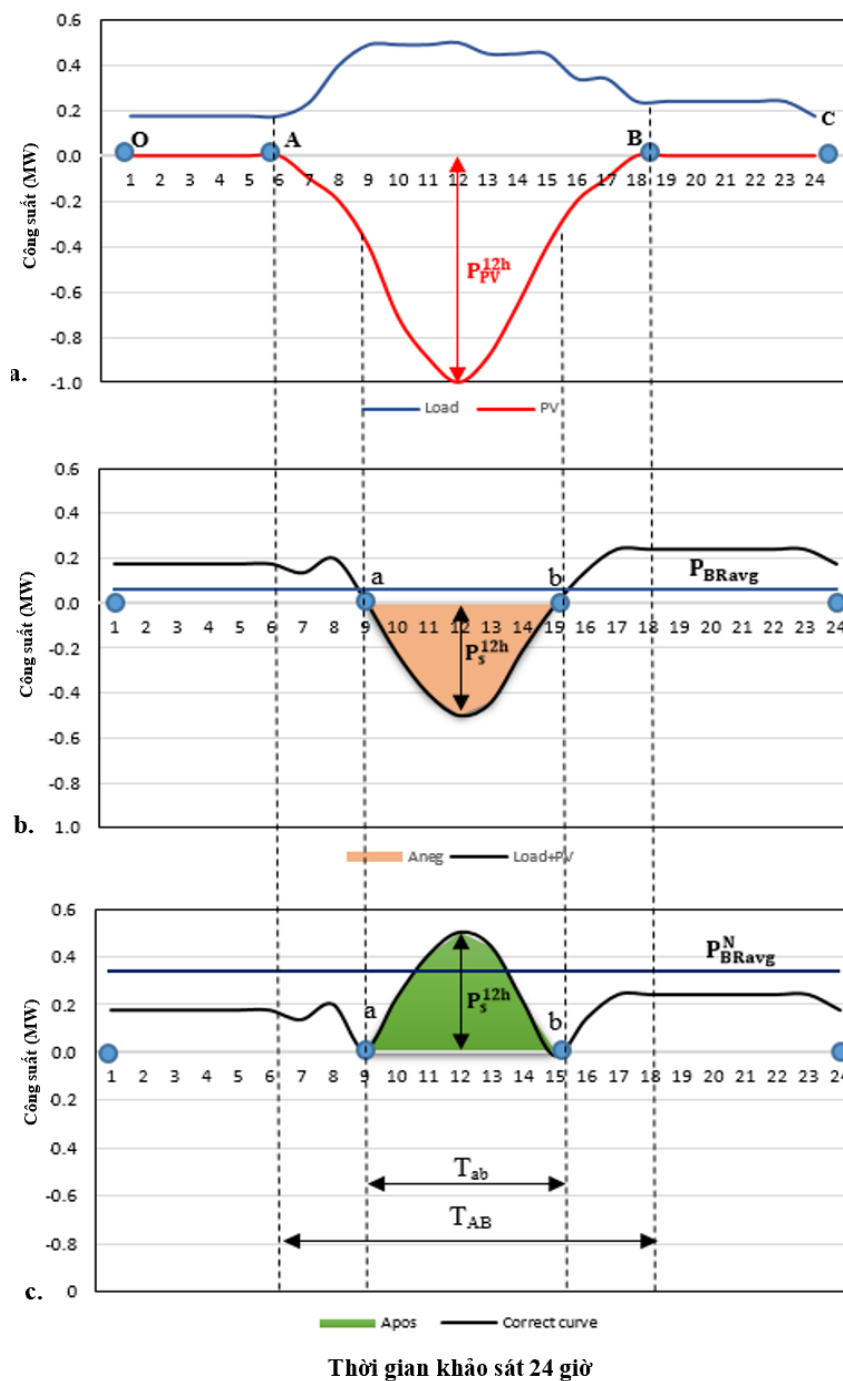
Ở đây, LF và LLF là hệ số tải và tổn thất;  $a$  là hằng số phụ thuộc LLF và LF;  $P_{peak}$  và  $Q_{peak}$  là công suất tác dụng cực đại và phản kháng cực đại;  $P_{BRavg}$  và  $Q_{BRavg}$  là CSNTB tác dụng và phản kháng.

Từ công thức (3.31), độ lệch tổn thất năng lượng ( $\delta A$ ) được xác định thông qua CSNTB ( $P_{BRavg}$ ) và hệ số tải LF. Với một số tải đặc trưng, giá trị LF được xác định dễ dàng trong một khoảng thời gian khảo sát [96].





Hình 3. 16. LDPP có kết nối với PV



Hình 3. 17. Công suất của tải và PV trong khoảng 24 giờ

- Hình 3.16 a biểu diễn công suất của tải và công suất phát của PV,  $P_{PV}^{12h}$  là công suất cực đại của PV vào lúc 12 giờ,  $T_{AB}$  là thời gian PV phát công suất.

- Hình 3.16 b biểu diễn đường cong của tải và PV với một phần năng lượng âm ( $A_{neg}$ ) sẽ được tính ra giá trị CSNTB ( $P_{BRavg}$ ).  $T_{ab}$  là thời gian công suất tạo năng lượng âm, có chiều truyền công suất ngược so với chiều truyền công suất khi không có PV.

- Hình 3.16 c biểu diễn năng lượng được quy đổi thành năng lượng dương ( $A_{pos}$ ) và CSNTB cải tiến ( $P_{BRavg}^N$ ).

Xét LĐPP có PV như Hình 3.15 với công suất của tải và PV trong thời gian khảo sát 24 giờ như Hình 3.16. Ở Hình 3.16 a cho thấy đồ thị của tải và đồ thị của PV. Hình 3.16 b cho thấy PV và đồ thị phụ tải kết hợp, ở đây cho thấy năng lượng âm ( $A_{neg}$ ) sẽ dẫn đến CSNTB ( $P_{BRavg}$ ) rất nhỏ. Hình 3.16 c cho thấy phần năng lượng âm ( $A_{neg}$ ) được chuyển đổi thành năng lượng dương ( $A_{pos}$ ) sẽ dẫn đến CSNTB cải tiến ( $P_{BRavg}^N$ ) phù hợp với lượng công suất được truyền trên nhánh. Nhánh MN được coi là có công suất (có PV) truyền ngược hướng so với công suất truyền trước đó (không PV). Bài toán DNR để giảm tổn thất năng lượng trong 24 giờ được xác định sao cho độ lệch tổn thất năng lượng ( $\delta A$ ) trong công thức (3.31) là thấp nhất. Tuy nhiên, giá trị  $\delta A$  sẽ không chính xác khi giá trị CSNTB bất thường như ở Hình 3.16 b, tức là công suất nhánh (có PV) có sự chuyển hướng ở một số thời điểm so với hướng trước đó (không có PV). Tại thời điểm này, CSNTB của nhánh MN lớn hơn của nhánh PQ vì do lượng công suất truyền ngược trên nhánh sẽ làm thay đổi giá trị thực về truyền năng lượng làm cho CSNTB không còn chính xác để sử dụng cho quá trình tối ưu DNR. Chính vì vậy, cần phải xét sự ảnh hưởng của công suất PV trên các nhánh trong quá trình DNR khi LĐPP có kết nối PV.

Để xét ảnh hưởng của CSNTB có PV, xem xét LĐPP được trên Hình 3.16. Nếu không có PV, CSNTB sẽ được truyền theo một chiều từ nguồn đến tải tại mỗi thời điểm trong khoảng 24 giờ. Khi PV tham gia vào LĐPP với công suất lớn hơn công suất trên nhánh MN, lúc này sẽ có công suất truyền ngược trong nhánh MN, tùy thuộc vào thời gian hoạt động của PV. Lúc này, CSNTB trên nhánh MN được tính theo phương pháp  $P_{BRavg}$  sẽ không chính xác cho việc tính đúng tổn thất năng lượng theo công thức (3.31) mà cần phải cải tiến CSNTB phù hợp để tính chính xác cho quá trình DNR. Hình 3.16

b cho thấy rằng, tại thời điểm từ 0 đến A và B đến C do tác động của PV là không có hoặc không đáng kể, nên công suất của nhánh MN có hướng thuận so với lúc không có PV. Nhưng tại thời điểm a đến b, tác động của PV tác động lên nhánh MN nên CSNTB của nhánh MN với chiều ngược so với thời điểm từ 0 đến a và b đến C. Do đó, CSNTB của nhánh MN trong 24 giờ là rất nhỏ. Vì vậy, sử dụng phương pháp CSNTB ( $P_{BRavg}$ ) để DNR sẽ mở khóa mà tổn thất năng lượng của hệ thống không phải là bé nhất theo công thức (3.30). Vì vậy, khi tham gia PV vào LĐPP thì cần CSNTB cần được cải tiến thành CSNTB cải tiến ( $P_{BRavg}^N$ ) để xác định chính xác nhánh khóa mở để tổn thất năng lượng là nhỏ nhất trong hệ thống. Từ Hình 4.16 a, có các trường hợp xem xét công suất của tải và PV như sau:

**Trường hợp 1:** CSNTB  $P_{BRavg}$  trên nhánh truyền một chiều từ nguồn đến tải được tính theo công thức (3.32)

$$\sum_{i \in 0C} P_{BRavg} = \frac{\sum_{i \in 0A} (P_{Load} t_i - P_{PV} t_i)}{\sum_{i \in 0A} t_i} + \frac{\sum_{i \in AB} (P_{PV} t_i - P_{Load} t_i)}{\sum_{i \in AB} t_i} + \frac{\sum_{i \in BC} (P_{Load} t_i - P_{PV} t_i)}{\sum_{i \in BC} t_i} \quad (3.32)$$

**Trường hợp 2:** CSNTB cải tiến  $P_{BRavg}^N$  trên nhánh truyền khi có PV. Lúc này công suất truyền hai chiều, được tính theo công thức (3.33)

$$\sum_{i \in 0C} P_{BRavg}^N = \frac{\sum_{i \in 0A} (P_{Load} t_i - P_{PV} t_i)}{\sum_{i \in 0A} t_i} - \frac{\sum_{i \in AB} (P_{PV} t_i - P_{Load} t_i)}{\sum_{i \in AB} t_i} + \frac{\sum_{i \in BC} (P_{Load} t_i - P_{PV} t_i)}{\sum_{i \in BC} t_i} \quad (3.33)$$

Trong đó:  $P_{Load}$  là công suất tải (kW);  $P_{PV}$  là công suất PV (kW);  $t_i$  là thời gian khảo sát (h).

Chúng ta có  $P_{BRavg}^N$  từ (3.32) và (3.33) khi kết nối với PV thì sẽ như công thức (3.34).

$$\begin{aligned} \sum_{i \in 0C} P_{BRavg}^N - \sum_{i \in 0C} P_{BRavg} &= 2 \frac{\sum_{i \in AB} (P_{Load} t_i - P_{PV} t_i)}{\sum_{i \in AB} t_i} \\ \Leftrightarrow \sum_{i \in 0C} P_{BRavg}^N &= \sum_{i \in 0C} P_{BRavg} + 2 \frac{\sum_{i \in AB} (P_{Load} t_i - P_{PV} t_i)}{\sum_{i \in AB} t_i} \\ &= \sum_{i \in 0C} P_{BRavg} + 2P_{BRavgAB} = \sum P_{BRavg} + P_{BRneg} \end{aligned} \quad (3.35)$$

Hình 3.16b cho thấy  $A_{neg}$  ở phần dưới (giá trị âm), nếu chúng ta tính giá trị CSNTB ( $P_{BRavg}$ ) thì giá trị này sẽ không chính xác. Do đó, giá trị  $A_{neg}$  (âm) phải được

quy đổi sang giá trị  $A_{\text{pos}}$  (dương) và CSNTB cải tiến ( $P_{\text{BRavg}}^{\text{N}}$ ) nhận giá trị chính xác để tính  $\delta A$ , như Hình 3.16 c. Giá trị  $P_{\text{BRavg}}^{\text{N}}$  là giá trị CSNTB cải tiến, thể hiện chính xác giá trị trung bình nhánh của hệ thống và  $P_{\text{BRneg}}$  là giá trị CSNTB cần bổ sung để nhánh có giá trị  $P_{\text{BRavg}}^{\text{N}}$ . Lúc này, với giá trị  $P_{\text{BRavg}}^{\text{N}}$  thì  $\delta A$  được xác định chính xác và cho kết quả nhánh mở có tổn thất năng lượng là thấp nhất (nhánh MN) theo công thức (3.30). Do đó, quá trình DNR sẽ cho kết quả chính xác cấu hình lưới là tối ưu. Giá trị  $P_{\text{BRneg}}$  là giá trị CSNTB bù cho mỗi nhánh có công suất truyền ngược (so với ban đầu) của LDPP khi có PV được tính như công thức (3.35).

Từ Hình 3.16, với hai phần năng lượng cung cấp của PV ( $A_{\text{PV}}$ ) và phần năng lượng còn lại của hệ thống ( $A_{\text{neg}}$ ). Xét một tam giác cân có đáy là AB và đường cao  $P_s^{12h}$ . Tính gần đúng tại thời điểm cực đại lúc 12 giờ, ta có:

$$A_{\text{neg}} = T_{\text{ab}} \frac{P_s^{12h}}{2} = T_{\text{AB}} \frac{P_s^{12h}}{P_{\text{PV}}^{12h}} \frac{P_s^{12h}}{2} = T_{\text{AB}} \frac{(P_s^{12h})^2}{2 P_{\text{PV}}^{12h}} = T_{\text{PV}} \frac{(P_s^{12h})^2}{2 P_{\text{PV}}^{12h}}$$

$$\Leftrightarrow A_{\text{neg}} = 24 P_{\text{BRneg}} = \frac{(P_s^{12h})^2 T_{\text{PV}}}{2 P_{\text{PV}}^{12h}}$$

$$\Leftrightarrow P_{\text{BRneg}} = \frac{(P_s^{12h})^2 T_{\text{PV}}}{2 P_{\text{PV}}^{12h} 24} \quad (3.35)$$

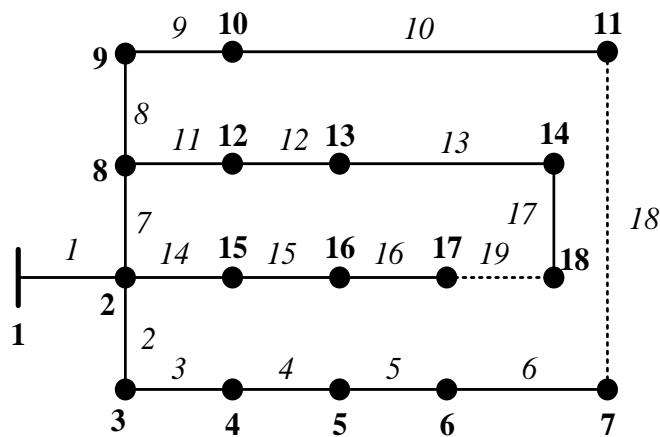
Trong đó:  $A_{\text{PV}}$  là năng lượng của PV (kWh);  $P_s^{12h}$  là công suất của hệ thống lúc 12 giờ (kW);  $P_{\text{PV}}^{12h}$  là công suất PV lúc 12 giờ (kW);  $T_{\text{AB}} = T_{\text{PV}}$  là thời gian phát công suất của PV (h);  $T_{\text{ab}}$  là thời gian của hệ thống có công suất âm (h);  $P_{\text{BRneg}}$  là CSNTB bổ sung (kW).

Giá trị của  $P_{\text{BRavg}}^{\text{N}}$  được tính bằng công thức (3.35). Cập nhật giá trị trên các nhánh trong hệ thống có dòng công suất truyền ngược khi LDPP có PV. Khóa được định nghĩa mở thông qua giá trị  $\delta A$  là nhỏ nhất giữa LDPP kín và LDPP hình tia, như công thức (3.36). Ở đây, PV chỉ tạo ra công suất tác dụng nên chỉ bù công suất tác dụng trên các nhánh bị ảnh hưởng mà không xét công suất phản kháng. Lúc này,  $\delta A$  được tính như công thức (3.37)

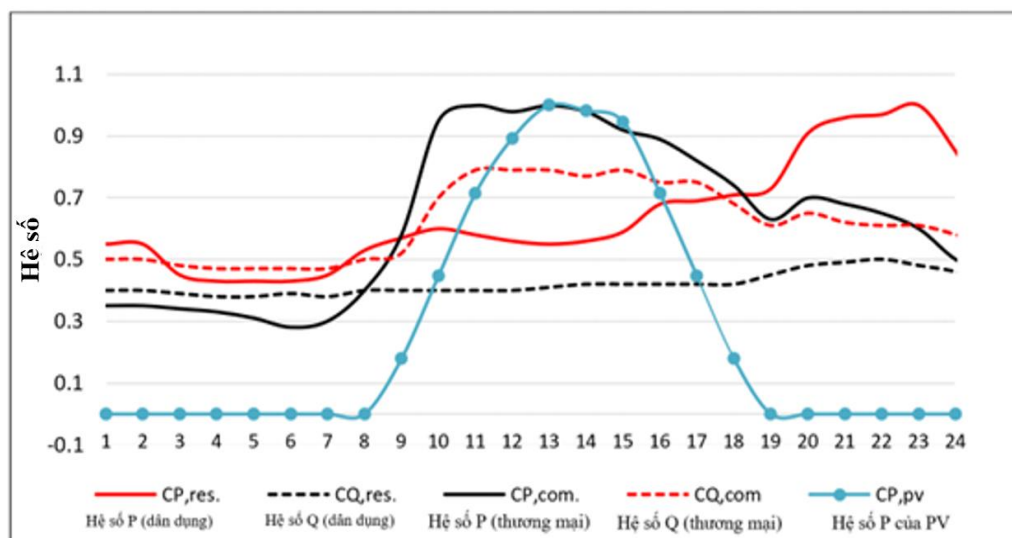
$$P_{\text{BRavg}}^{\text{N}} = P_{\text{BRavg}} + P_{\text{BRneg}} \quad (3.36)$$

$$\delta A = \frac{24R_{Loop}}{V_i^2} \left( \left( \frac{P_{BRavg}^N}{LF} \right)^2 + \left( \frac{Q_{BRavg}}{LF} \right)^2 \right) (aLF + (1-a)LF^2) \quad (3.37)$$

Xét LĐPP 10 kV có 18 nút: LĐPP có 19 nhánh với 17 khóa đóng và có 2 khóa mở {17, 18}. Sơ đồ đơn tuyến được thể hiện trong Hình 3.17 [60]. Thông số các nút như trong Phụ lục 1 và đường dây như trong Phụ lục 2. Các phụ tải bao gồm thương mại (Mcom.), dân dụng (Mres.) như trong Phụ lục 3. Đồ thị của từng loại phụ tải và đồ thị phát công suất PV được thể hiện trong Hình 3.18 [71]. LĐPP 18 nút thử nghiệm 2 kịch bản DNR với công suất PV ban đầu đã được lắp đặt và công suất của PV được mở rộng. Kết quả kiểm tra trong 2 trường hợp để kiểm tra ảnh hưởng của công suất PV sau khi mở rộng đến CSNTB của LĐPP.

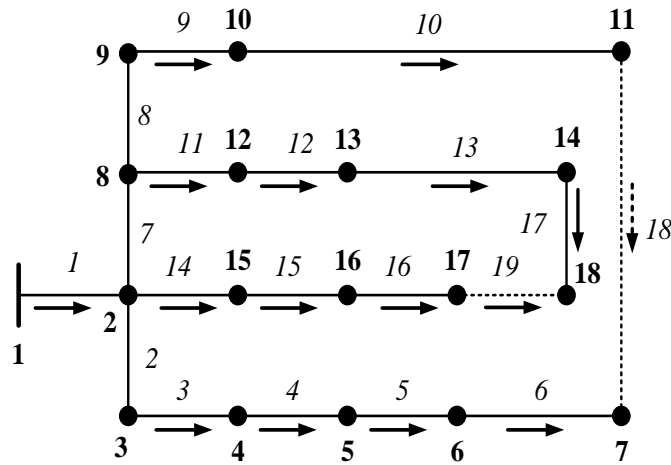


**Hình 3.18.** Sơ đồ đơn tuyến của LĐPP 18 nút



**Hình 3.19.** Đồ thị tải và đồ thị của PV

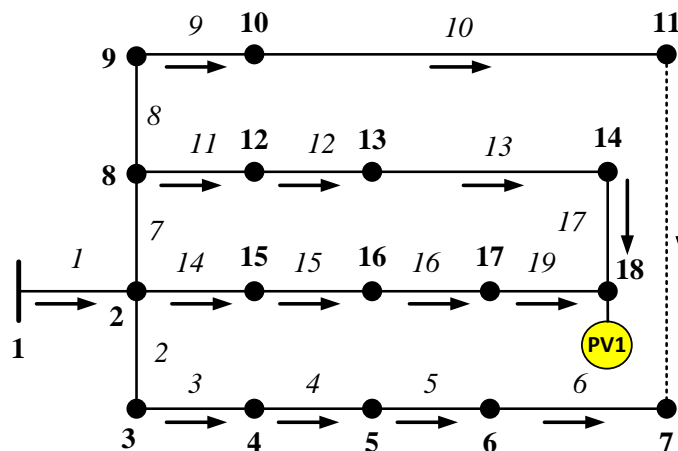
Khi LĐPP chưa có PV với các khóa mở ban đầu {18, 19}, tổn thất năng lượng là 1514,0 kWh. Nếu không có PV, hướng truyền tải điện của các nhánh của Vòng 1 và Vòng 2 như Hình 3.19. Với kết quả DNR giống với kết quả ở tài liệu tham khảo [60].



**Hình 3. 20.** Chiều truyền của công suất khi không có PV

**Trường hợp 1:** LĐPP mở rộng với PV1 tại nút 18 với  $P_{PV1} = 560$  kW:

Với việc kết nối PV với các khóa mở ban đầu {18, 19}, tổn thất năng lượng là 1345,5 kWh. Hình 3.20 cho thấy hướng truyền công suất của các nhánh khi PV là 560 kW. Quá trình DNR thực hiện thay đổi nhánh trong hai vòng kín. Đối với Vòng 1, hướng truyền công suất của các nhánh với PV là không đổi so với ban đầu. Vì công suất của PV nối với LĐPP nhỏ hơn công suất phụ tải tại nút 18 nên không nhánh nào có công suất truyền ngược chiều. Ở Bảng 3.6 cho thấy kết quả chi tiết trên các nhánh khi lắp đặt PV.



**Hình 3. 21.** Chiều truyền của công suất khi PV1 là 560 kW

**Bảng 3. 6.** Các thông số khi PV lắp đặt mở rộng tại nút 18 với  $P_{PV1} = 560$  kW

Nhánh	Khóa	$P_s^{12h}$ Không PV	$P_s^{12h}$ Có PV	Thay đổi hướng (Có / Không)	$P_{BRneg}$ (kW)	$P_{BRavg}$ (kW)	$P_{BRavg}^N$ (kW)	$Q_{BRavg}$ (kVAR)	$\delta A$ (Wh)
Vòng 1									
2 - 15	14	1671,2	1388,8	Không	0	1379,6	1379,6	325,4	1075,3
15 - 16	15	1337,1	1055,8	Không	0	990,9	990,9	242,1	556,9
16 - 17	16	1005,1	724,5	Không	0	603,9	603,9	159,5	208,8
17 - 18	19	668,5	388,4	Không	0	211,1	211,1	77,2	27,0
14 - 18	17	68,0	348,1	Không	0	23,5	23,5	79,3	3,7
13 - 14	13	332,1	52	Không	0	279,9	279,9	11,8	42,0
12 - 13	12	832,9	552,4	Không	0	600,7	600,7	134,1	202,7
8 - 12	11	1234,7	953,5	Không	0	857,8	857,8	225,6	421,1
2 - 8	7	2997	2714,2	Không	0	1984,6	1984,6	597,7	2299,2
Vòng 2									
2 - 3	2	1650,8	1650,8	Không	0	1504,6	1504,6	432	1390,8
3 - 4	3	1372,8	1372,8	Không	0	1180,5	1180,5	347	859,4
4 - 5	4	1096	1096	Không	0	857,6	857,6	262	456,4
5 - 6	5	820	820	Không	0	535,2	535,2	178	180,5
6 - 7	6	544,4	544,4	Không	0	213,3	213,3	93	30,7
7 - 11	18	144,1	144,1	Không	0	43,1	43,1	8,5	1,1
10 - 11	10	256	256	Không	0	299,6	299,6	74,2	54,1
9 - 10	9	656,5	656,5	Không	0	556,3	556,3	159	190,0
8 - 9	số 8	1157	1157	Không	0	876,7	876,7	267	476,7
2 - 8	7	2919,9	2919,9	Không	0	2004,6	2004,6	662	2528,2
<b>Khóa mở: {17, 18}</b>									

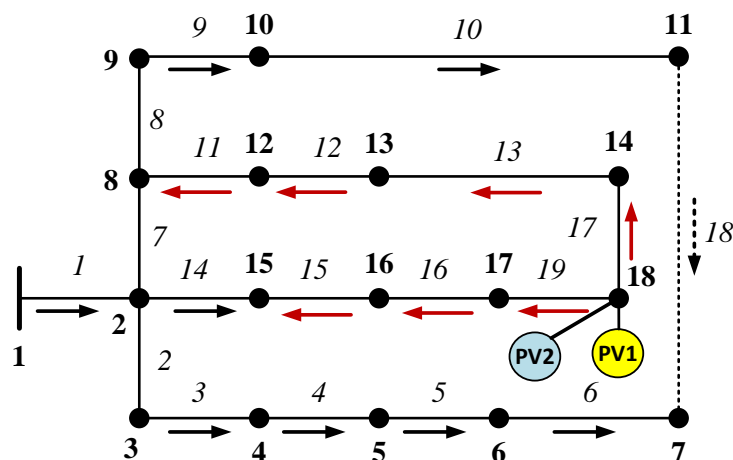
Bảng 3.7 cho thấy kết quả thử nghiệm với trường hợp ban đầu và  $P_{BRavg}^N$ . Kết quả tổn thất năng lượng của trường hợp khóa mở ban đầu là 1514 kWh (không có PV), còn khi có PV có là 1325,1 kWh. Phương pháp CSNTB cải tiến ( $P_{BRavg}^N$ ) đưa ra cấu hình với các khóa mở giống với phương pháp CSNTB ( $P_{BRavg}$ ) tương ứng tổn thất năng lượng là 1325,1 kWh, vì công suất của PV nhỏ nên không có nhánh nào trên LDPP 18 nút có công suất truyền ngược chiều so với chiều truyền công suất ban đầu.

**Bảng 3. 7.** Khóa mở trong trường hợp PV1 có công suất 560 kW

Trường hợp	$P_{PV1}$ (kW)	$P_{PV2}$ (kW)	$P_{PV}$ (kW)	Khóa mở	$\Delta A$ (kWh)
Ban đầu	-	-	-	{18, 19}	1514,0
Ban đầu	560	-	560	{18, 19}	1345,5
CSNTB	560	-	560	{17, 18}	1325,1
CSNTB cải tiến	560	-	560	{17, 18}	1325,1

**Trường hợp 2:** LDPP có  $P_{PV1}$  và mở rộng thêm PV2 tại nút 18 với  $P_{PV2} = 2440$  kW:

Với việc kết nối PV với các khóa mở ban đầu {18, 19} với tổn thất năng lượng sẽ là 1196,5 kWh. DNR thực hiện chuyển mạch các nhánh trong một vòng kín của hai vòng được thực hiện. Hình 3.21 và Bảng 3.8 thể hiện hướng truyền công suất của các nhánh khi công suất của PV là 3000 kW.



**Hình 3. 22.** Chiều truyền của công suất khi thêm PV2 là 2440 kW



**Bảng 3. 8.** Các thông số khi PV lắp đặt mở rộng tại nút 18 thêm  $P_{PV2} = 2440$  kW

Nhánh	Khóa	$P_S^{12h}$ Không PV	$P_S^{12h}$ Có PV	Thay đổi hướng (Có/ Không)	$P_{BRneg}$ (kW)	$P_{BRavg}$ (kW)	$P_{BRavg}^N$ (kW)	$Q_{BRavg}$ (kVAR)	$\delta A$ (Wh)
Vòng 1									
2 - 15	14	1671,2	166,2	Không	0	1046,5	1046,5	325,4	642,8
15 - 16	15	1337,1	164,4	Có	4,5	658,9	663,4	242,1	266,9
16 - 17	16	1005,1	494	Có	40,65	272,4	313,1	159,5	66,1
17 - 18	19	668,5	830	Có	114,8	<b>120,2</b>	<b>235</b>	77,2	<b>32,7</b>
14 - 18	17	68,0	1569	Có	410,3	307,8	718,1	79,3	279,4
13 - 14	13	332,1	1167,3	Có	227,1	<b>51,4</b>	<b>278,5</b>	11,8	<b>41,6</b>
12 - 13	12	832,9	666,4	Có	74	269	343,0	134,1	72,6
8 - 12	11	1234,7	266	Có	11,8	525,7	537,5	225,6	181,9
2 - 8	7	2997	1490	Không	0	1651	1651	597,7	1650
Vòng 2									
2 - 3	2	1650,8	1402	Không	0	1460	1460	432	1315,2
3 - 4	3	1372,8	1124	Không	0	1136	1136	347	800,4
4 - 5	4	1096	848	Không	0	813	813	262	413,9
5 - 6	5	820	572	Không	0	491	491	178	154,7
6 - 7	6	544,4	297	Không	0	169	169	93	21,1
7 - 11	18	144,1	102	Không	0	87,4	87,4	8,5	4,4
10 - 11	10	256	503	Không	0	601	601	74,2	208
9 - 10	9	656,5	904	Không	0	344	344	159	81,5
8 - 9	8	1157	1406	Không	0	921	921	267	521,7
2 - 8	7	2919,9	769	Không	0	1619	1619	662	1735,6
<b>Khóa mở: {18, 19}</b>									

Đối với Vòng 1, nhánh 2-15 (khóa 14), nhánh 2-8 (khóa 7) có công suất hệ thống (có PV) lúc 12 giờ với hướng không đổi (không) so với ban đầu (không PV) tại 12 giờ, vì vậy không cần bổ sung vào các nhánh này. Với nhánh 15 –16 (khóa 15), nhánh 16 – 17 (khóa 16), nhánh 17 – 18 (khóa 19), nhánh 14 – 18 (khóa 17), nhánh 13 – 14 (khóa 13), nhánh 12 – 13 (khóa 12) , nhánh 8 – 12 (khóa 11) với công suất hệ thống (có PV) lúc 12 giờ có hướng thay đổi (có) so với ban đầu (không PV) lúc 12 giờ. Lúc này, CSNTB là không đúng giá trị thực để tính độ lệch tổn thất năng lượng ( $\Delta A$ ). Do đó, ở một số nhánh có công suất bị đổi chiều thì cần bổ sung một giá trị CSNTB bổ sung lần lượt là 4,5 kW; 40,65 kW; 114,8 kW; 410,3 kW; 227,1 kW; 74,0 kW; 11,8 kW. Vì vậy, giá trị  $P_{BRavg}^N$  là các giá trị mới như Bảng 3.8. Lúc này, nhánh 17 – 18 (khóa 19) với độ lệch tổn thất năng lượng có giá trị là 32,7 Wh là nhỏ nhất, nên khóa mở ở Vòng 1 là khóa 19.

Tương tự, Vòng 2 không có công suất truyền ngược so với ban đầu. Bảng 3.8 thể hiện các kết quả tính toán của 2 vòng có với CSNTB, CSNTB cải tiến và độ lệch tổn thất năng lượng của các nhánh của 2 vòng kín.

Khi công suất PV là 3000 kW tại nút 18, với giá trị  $\Delta A$  nhỏ nhất, khóa mở cho Vòng 1 là khóa 19 và Vòng 2 là khóa 18. Bảng 3.9 cho thấy kết quả thử nghiệm với trường hợp ban đầu, phương pháp  $P_{BRavg}$  và phương pháp  $P_{BRavg}^N$ . Kết quả tổn thất năng lượng của trường hợp ban đầu là 1514 kWh khi không PV và khi có PV là 1196,5 kWh. Phương pháp  $P_{BRavg}$  cho khóa mở là {18, 13} với tổn thất năng lượng là 1312,0 kWh và  $P_{BRavg}^N$  cho khóa mở là {18, 19} với tổn thất năng lượng là 1196,5 kWh. Như vậy, phương pháp  $P_{BRavg}^N$  cho kết quả tối ưu với cấu hình có tổn thất năng lượng là nhỏ nhất.

**Bảng 3. 9.** Khóa mở trong trường hợp khi mở rộng PV2 có công suất 2440 kW

Trường hợp	$P_{PV1}$ (kW)	$P_{PV2}$ (kW)	$P_{PV}$ (kW)	Khóa mở	$\Delta A$ (kWh)
Ban đầu không PV	-	-	-	{18, 19}	1514,0
Ban đầu có PV	560	2440	3000	{18, 19}	1196,5
CSNTB	560	2440	3000	{18, 13}	1312,0
CSNTB cải tiến	560	2440	3000	{18, 19}	1196,5

Bảng 3.9 cho thấy kết quả thử nghiệm bằng các phương pháp sử dụng CSNTB và CSNTB cải tiến để xác định cấu hình LĐPP. Đối với phương pháp sử dụng CSNTB cải tiến cho kết quả xác định cấu hình với tổn thất năng lượng là thấp nhất còn phương pháp sử dụng CSNTB cho kết quả xác định cấu hình với tổn thất năng lượng không là thấp nhất. Bởi vì, CSNTB cải tiến được xác định có bổ sung một lượng công suất bù để CSNTB cải tiến được xác định đúng với giá trị độ lệch tổn thất năng lượng là nhỏ nhất để thực hiện khóa mở chính xác. Do tác động của PV đến các nhánh của LĐPP sẽ làm cho  $\delta A$  không chính xác, điều này sẽ dẫn đến kết quả DNR không chính xác (tổn thất năng lượng của hệ thống không là nhỏ nhất). Do đó, phương pháp  $P_{BRavg}^N$  sử dụng CSNTB cải tiến để DNR khi LĐPP có PV với tổn thất năng lượng là nhỏ nhất. Phương pháp  $P_{BRavg}^N$  là phương pháp đơn giản, dễ thực hiện và cho kết quả cấu hình LĐPP chính xác với tổn thất năng lượng là nhỏ nhất.

### 3.3.2. Xác định cấu hình vận hành bằng thuật toán trao đổi nhánh cải tiến

Thuật toán trao đổi nhánh đã chứng minh là một trong những thuật toán hiệu quả cho vấn đề DNR để cực tiểu tổn thất năng lượng [62]. Quá trình trao đổi nhánh của thuật toán là nhanh chóng cho kết quả cấu hình vận hành với mức giảm tổn thất năng lượng cao nhất dựa trên quy tắc heuristic kết hợp với công thức thực nghiệm. Thuật toán trao đổi nhánh được áp dụng trong các nghiên cứu này với thông số đầu vào để tính toán là công suất nhánh trung bình (CSNTB) cải tiến để khắc phục việc tác động của PV lên CSNTB. Do đó, DNR có thể cho kết quả tối ưu với một cấu hình lưới có tổn thất năng lượng không là nhỏ nhất. Trong công thức (3.37),  $\delta A_i$  và  $\delta A_j$  là độ lệch tổn thất năng lượng cho vòng lặp thứ  $i$  và vòng lặp thứ  $j$  được thể hiện như công thức (3.38) và (3.39).

$$\delta A_i = \Delta A_{initial} - \Delta A_i \quad (3.38)$$

$$\delta A_j = \Delta A_{initial} - \Delta A_j \quad (3.39)$$

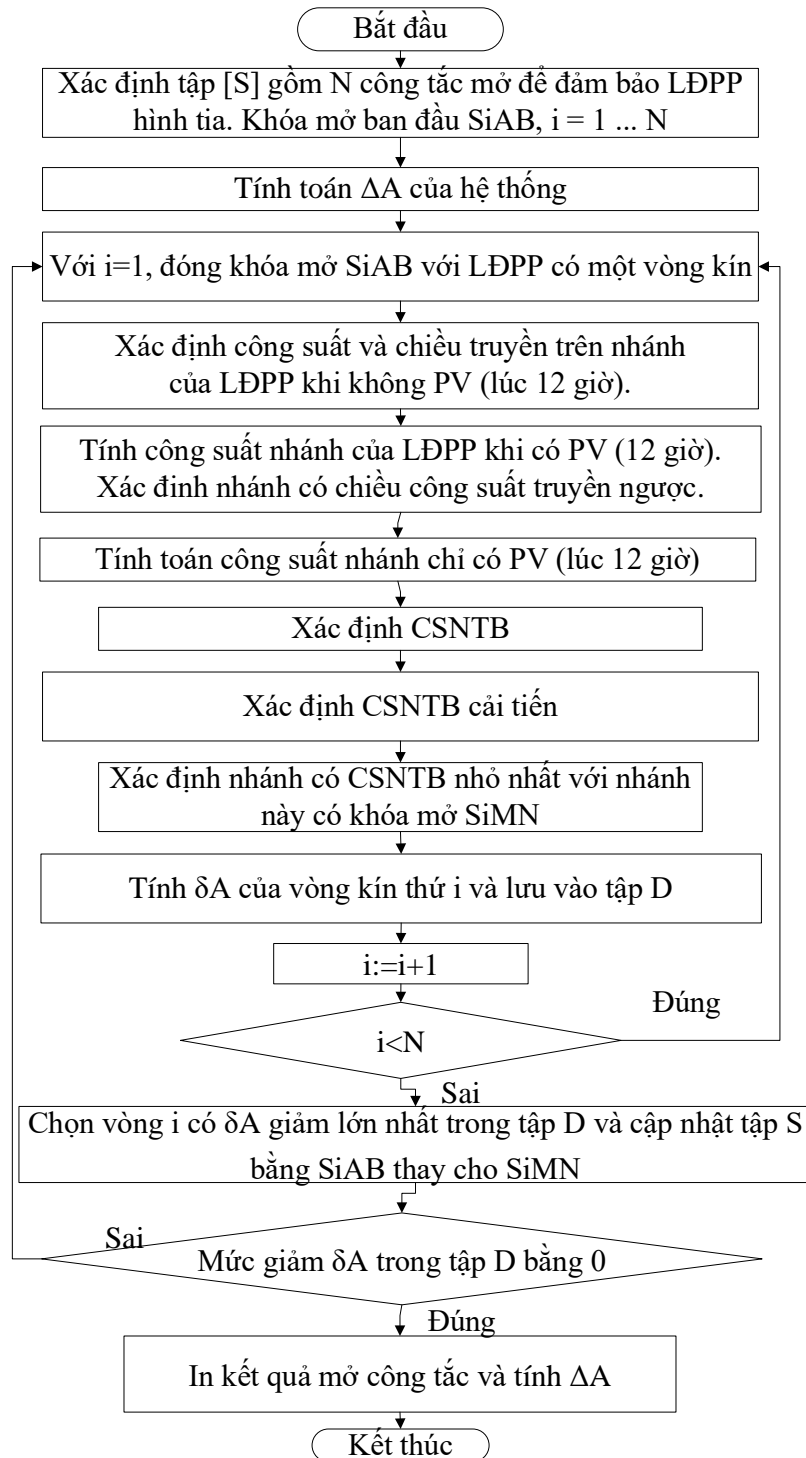
Ở công thức (3.37) và công thức (3.38),  $\Delta A_{initial}$  là giá trị là tổn thất năng lượng ban đầu của LĐPP trước khi DNR,  $\Delta A_i$  là giá trị tổn thất năng lượng khi mở/đóng một cặp khóa ở vòng lặp thứ  $i$  và  $\Delta A_j$  là tổn thất năng lượng khi mở/đóng một cặp khóa ở vòng lặp thứ  $j$ .

Ta có: công thức (3.39) - công thức (3.40)

$$\delta A_i - \delta A_j = \Delta A_j - \Delta A_i \quad (3.40)$$

Từ công thức (3.40), cho thấy:

$$\text{Nếu } \delta A_i > \delta A_j \text{ thì } \Delta A_i < \Delta A_j \quad (3.41)$$



**Hình 3. 23.** Thuật toán trao đổi nhánh cải tiến khi có PV

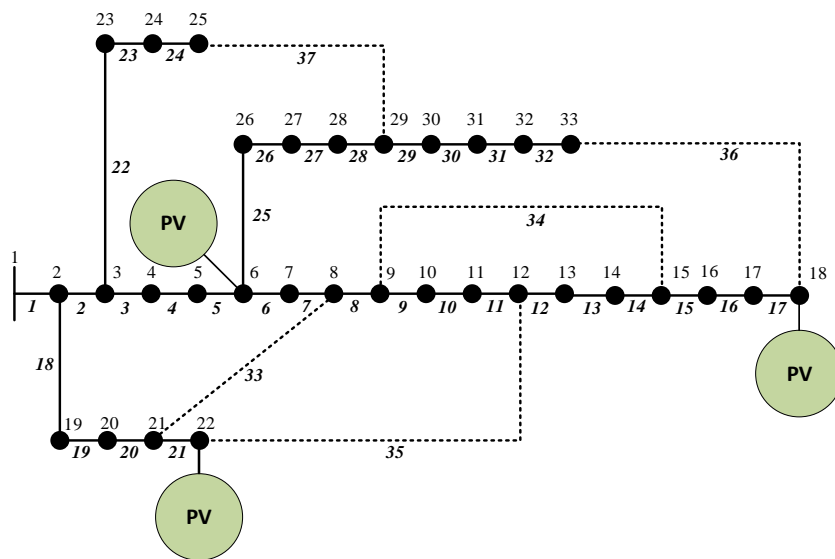
Từ công thức (3.41) cho thấy, trong nhiều cấu hình LĐPP được xét khi đóng/mở một cặp khóa điện, cấu hình nào có  $\delta A$  giữa hai vòng lặp lớn nhất sẽ có  $\Delta A$  là nhỏ nhất. Do đó, thuật toán trao đổi nhánh được cải tiến để DNR với sự ảnh hưởng của PV. Thuật toán này được cải tiến từ thuật toán trao đổi nhánh do Civanlar và các cộng sự [62] đề xuất để DNR với mục tiêu cực tiểu tổn thất năng lượng. Lưu đồ thuật toán trao đổi nhánh cải tiến thực hiện DNR cho LĐPP có PV như Hình 3.22. Có các ràng buộc của vấn đề tối ưu lắp đặt DG trên LĐPP là dòng điện mỗi nhánh và điện áp mỗi nút phải ở trong giới hạn cho phép như công thức (3.42).

$$0 \leq I_i \leq I_{\max,i}; i = 1, 2, \dots, n_{br} \quad (3.42)$$

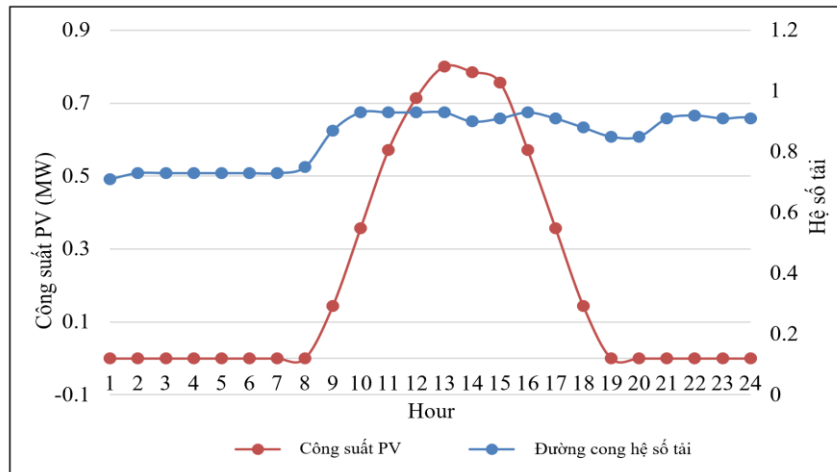
$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}; i = 1, 2, \dots, n_{bus}$$

### 3.3.3. Kết quả kiểm tra

LĐPP 12,66 kV có 33 nút: 37 nhánh với 32 khóa đóng và 5 khóa mở là {33, 34, 35, 36, 37}. Trong Hình 3.23 cho thấy sơ đồ đơn tuyến của LĐPP 33 nút. Dữ liệu của các nút như trong Phụ lục 5 và thông số của đường dây như trong Phụ lục 6 [59]. Đối với LĐPP 33 nút sau khi mở rộng sự thâm nhập của các DG là PV. LĐPP có 3 PV được lắp đặt ở nút 6, nút 18 và nút 22 của hệ thống. Với các PV có đồ thị hệ số của tải và đồ thị phát công suất được thể hiện trong Hình 3.24 [70].



Hình 3. 24. LĐPP 33 nút [70]

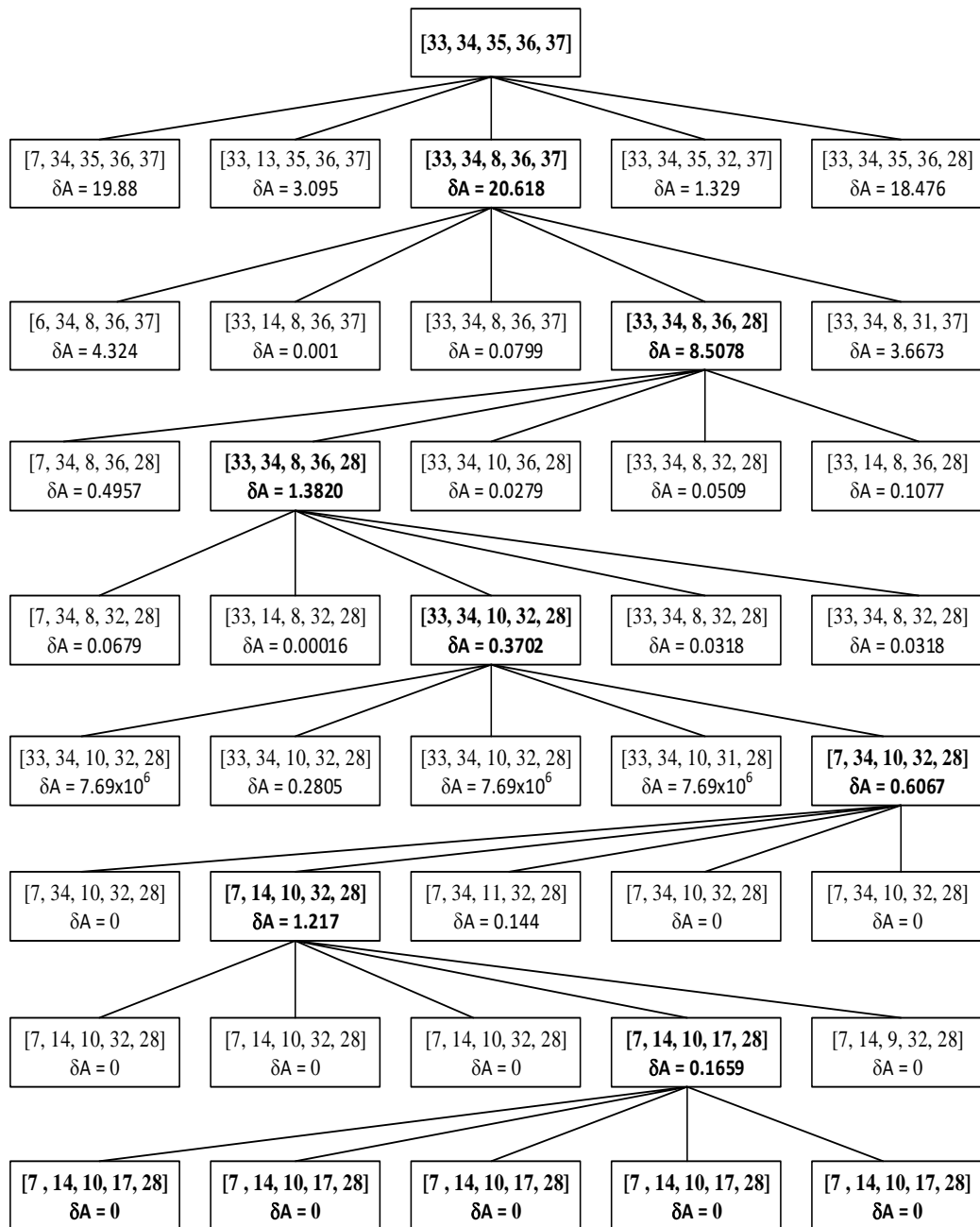


**Hình 3. 25.** Đồ thị của phụ tải và PV

Sau khi sử dụng CSNTB cải tiến và thuật toán trao đổi nhánh cải tiến để tối ưu cấu hình của LDPP với mục tiêu là cực tiểu tổn thất năng lượng. Ở Hình 3.24 cho thấy trình tự thực hiện của thuật toán trao đổi nhánh cải tiến sử dụng phương pháp CSNTB cải tiến. Để thực hiện phương pháp CSNTB cải tiến, trong mỗi vòng kín thay đổi các khóa mở bằng cách xác định CSNTB, CSNTB bổ sung, CSNTB cải tiến và độ lệch tổn thất năng lượng. Ở mỗi vòng kín, khóa mở dần được thay thế bằng cách xác định độ lệch tổn thất năng lượng của mỗi khóa mở. Đối với 5 vòng kín, tìm khóa mở có độ lệch tổn thất năng lượng lớn nhất cho mỗi vòng lặp, theo công thức (3.40). Quá trình này được thực hiện cho đến khi khóa mở chùng lên khóa mở trước đó thì thuật toán sẽ dừng lại. Kết quả cuối cùng sẽ được xác định với khóa mở với độ lệch tổn thất năng lượng bằng không. Từ các khóa mở này xác định được cấu hình lưới tối ưu với tổn thất năng lượng là nhỏ nhất trên toàn LDPP.

**Bảng 3. 10.** Kết quả DNR của phương pháp đề xuất cho LDPP 33 nút

Phương pháp	Khóa mở	$\Delta A$ (kWh)
Ban đầu	{ 33, 34, 35, 36, 37 }	3304,820
Phương pháp đồ thị	{ 7, 9, 14, 32, 37 }	2243,980
EP [70]	{ 7, 10, 14, 31, 37 }	2334,280
GSA [70]	{ 7, 10, 14, 17, 28 }	2075,510
Phương pháp trao đổi nhánh và CSNTB cải tiến	{ 7, 10, 14, 17, 28 }	2075,510



**Hình 3. 26.** Quá trình tối ưu LDPP 33 nút có PV

Với phương pháp đưa ra đã thử nghiệm và so sánh với các phương pháp khác như phương pháp sử dụng đồ thị, GSA [70] và EP [70], kết quả ở Bảng 3.10. LDPP 33 nút có 3 PV tham gia vào các nút 6, 18 và 22 [70]. LDPP ban đầu, chưa thực hiện DNR có khóa mở tương ứng { 33, 34, 35, 36, 37 } với tổn thất năng lượng ban đầu là 3304,82 kWh. Trong khi EP có khóa mở tương ứng là { 7, 10, 14, 31, 37 } với tổn thất năng lượng là 2334,28 kWh. Còn phương pháp đồ có khóa mở tương ứng là { 7, 9, 14, 32, 37 } với tổn thất năng lượng là 2243,98 kWh. Từ kết quả, phương pháp đã đưa ra cho kết quả giống với GSA có khóa mở { 7, 10, 14, 17, 28 } với tổn thất năng lượng là

2075,51 kWh. Phương pháp đã đưa ra cho thấy rằng kết quả DNR giống GSA với tổn thất năng lượng là thấp nhất và tốt hơn các phương pháp khác đã được kiểm tra. Tuy nhiên, đối với phương pháp đề xuất có tổng cộng 80 lần tính toán phân bố công suất: 40 lần (với PV) và 40 lần (không PV), Hình 3.25. Trong khi GSA phải tính phân bố công suất với dân số lựa chọn ( $N = 100$ ), số lần lặp lại ( $Ir = 5$ ) và số bậc trong đồ thị phụ tải (24 giờ). Như vậy, số lần tính toán phân bố công suất của GSA tương đương với 12.000 lần. Kết quả thực nghiệm trên LĐPP 33 nút cho thấy phương pháp CSNTB cải tiến là hiệu quả trong việc DNR cho LĐPP có ảnh hưởng của PV.

### **3.3.4. Kết luận**

Phần này đã đưa xuất thuật toán trao đổi nhánh với công suất nhánh trung bình (CSNTB) cải tiến nhằm xác định nhanh cấu hình vận hành LĐPP khi PV được mở rộng công suất với mục tiêu là cực tiểu tổn thất năng lượng. Bài toán đề nghị là sử dụng CSNTB cải tiến và thuật toán trao đổi nhánh cải tiến để xác định cấu hình vận hành của LĐPP thông qua độ lệch tổn thất năng lượng. Bài toán đề nghị đã cải tiến CSNTB để có giá trị chính xác cho độ lệch tổn thất công suất giữa vòng kín và vòng hở trong LĐPP và độ lệch tổn thất năng lượng giữa các cấu hình khác nhau. Từ đó, xác định được chính xác cấu hình có tổn thất năng lượng là nhỏ nhất. Ưu điểm nổi bật của bài toán đề nghị là đơn giản, dễ thực hiện và chính xác trong việc xác định cấu hình của LĐPP khi PV được mở rộng công suất lắp đặt. LĐPP 18 nút và LĐPP 33 nút được áp dụng thử nghiệm đã cho thấy phương pháp đề nghị là đơn giản, nhanh chóng xác định được cấu hình lưới và có độ chính xác cao khi so sánh với bài toán xác định cấu hình vận hành cho LĐPP theo phương pháp CSNTB và phương pháp sử dụng đồ thị phụ tải bằng các thuật toán tối ưu. Bài toán đề nghị đã được nghiên cứu, thực hiện và công bố ở công trình số [2] và [10].

### **3.4. Mở rộng nguồn điện phân tán cho LĐPP Chư Prông – Gia Lai**

Một trong những mục tiêu cho quá trình lắp đặt DG là tối đa công suất của DG thâm nhập vào LĐPP và thu hút các nhà đầu tư từ tư nhân. Bởi vì, công suất của các DG có thể kết nối với LĐPP càng nhiều thì chi phí cho 1 kW là càng thấp trong đầu tư và ngược lại. Ngoài ra, từ quan điểm vận hành LĐPP, yếu tố giúp giảm chi phí trong vận hành hệ thống là cực tiểu tổn thất công suất. Ở Việt Nam và các quốc gia



khác, chưa cuốn hút đầu tư lắp đặt các DG trên LĐPP vì chi phí lắp đặt các DG có công suất nhỏ có thể đắt hơn so với các DG có công suất lớn nằm trên hệ thống truyền tải về chi phí mỗi kW cho đầu tư DG. Do đó, LĐPP hiện nay cần phải được tăng tỷ lệ DG tham gia vào hệ thống với công suất tối đa nhằm thu hút đầu tư từ tư nhân.

DG được phát triển theo lộ trình kết nối vào LĐPP, do đó lựa chọn số lượng và công suất phù hợp để có kế hoạch kết nối vào LĐPP là vấn đề cần quan tâm. Để có được lợi ích tối đa từ DG, công suất và vị trí phải được xác định tối ưu để giảm các tác động xấu lên hệ thống. Do đó việc lập kế hoạch lắp đặt nguồn điện phân tán (DEP) với số lượng, vị trí và công suất thích hợp của DG sẽ cải thiện hiệu quả hoạt động của LĐPP [46]. Trong quá trình lắp đặt các DG theo thời gian, tùy thuộc vào số lượng và công suất DG sẽ lựa chọn giai đoạn lắp đặt vào LĐPP cho phù hợp và đạt hiệu quả. Từ đó, nhà hoạch định sẽ đưa ra kế hoạch lắp đặt DG cho mỗi giai đoạn cho LĐPP phù hợp với điều kiện thực tế.

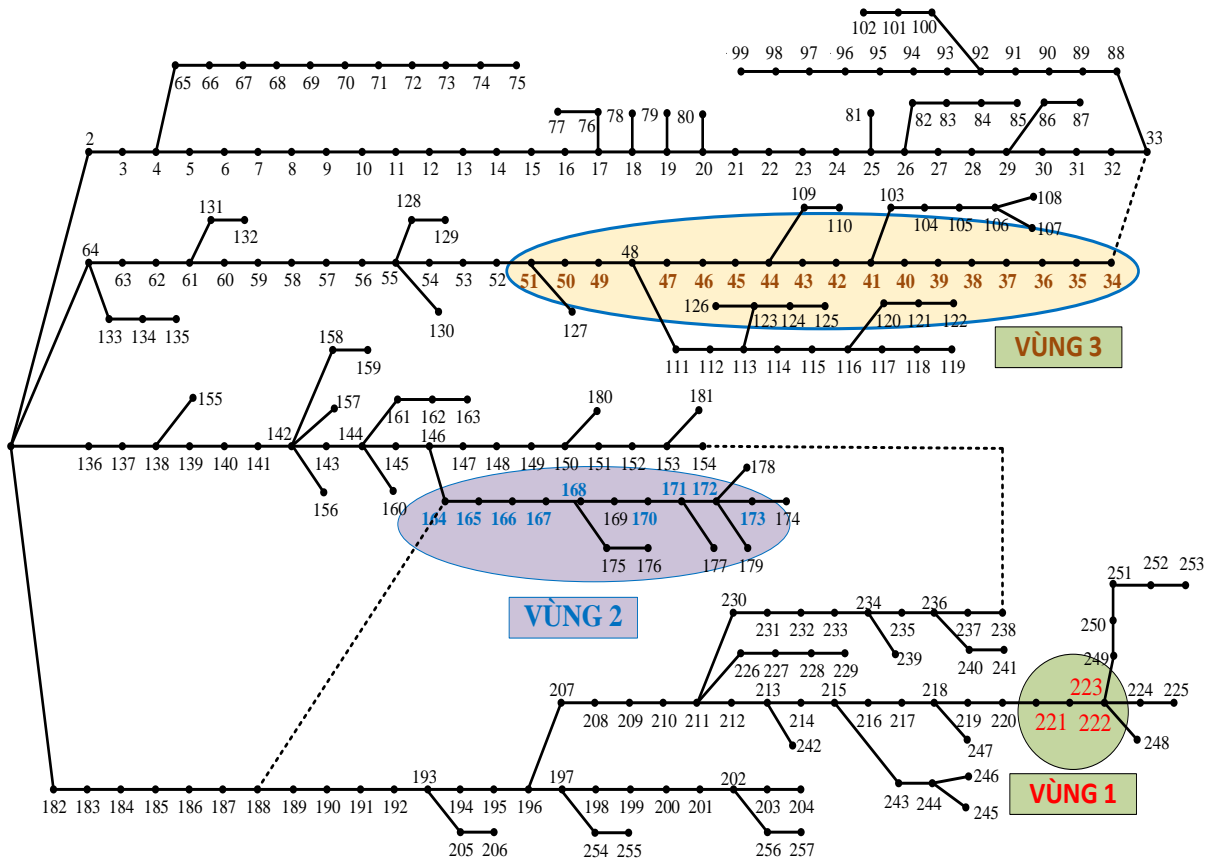
### 3.4.1. LĐPP Chư Prông – Gia Lai

LĐPP Chư Prông – Gia Lai có 257 nút, 259 nhánh, tổng tải là 8,6357 MW và có ba khóa mở tương ứng là {33 - 34, 154 - 238, 164 - 182} như sơ đồ ở Hình 3.26. Dữ liệu của đường dây và nút thể hiện ở Phụ lục 11 và Phụ lục 12 [91]. LĐPP Chư Prông được giả định rằng tải không đổi và cân bằng. Bảng 3.11 cho thấy thực tế khảo sát các DG dự kiến lắp đặt khả thi ở một số nút trong hệ thống với công suất của DG cho phép kết nối ở mỗi nút. Bảng 3.11 cho thấy vị trí và công suất khả thi cho phép DG kết nối của LĐPP Chư Prông – Gia Lai [91].

**Bảng 3. 11.** Vùng và công suất cho phép DG kết nối - LĐPP Chư Prông [91]

STT	DG được kết nối	P (MW)	Nút khả thi kết nối DG
1	Ia Drang 2 (DG 1)	1,50	221, 222, 223
2	Ia Drang 3 (DG 2)	1,60	164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173
3	Ia Puch 3 (DG 3)	3,40	34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51

Với giả thiết là tối ưu lắp đặt DG không xét đến cấu hình của LĐPP Chu Prông. Trong đó, có ba vị trí được chọn trong ba vùng khả thi với công suất lớn nhất tương ứng cho mỗi vị trí là 1,5 MW; 1,6 MW và 3,4 MW. Hình 3.26 cho thấy ba vùng với các vị trí được phép kết nối tương ứng mỗi vùng chỉ được chọn một vị trí để kết nối DG. Khi thực hiện tối ưu lắp đặt DG cho LĐPP Chu Prông – Gia Lai với mục tiêu là cực tiểu tổn thất công suất như công thức (3.14) trong bài toán 1.



**Hình 3. 27.** Các vùng kết nối DG khả thi của LĐPP Chu Prông

Do vận hành ở cấp điện áp thấp nên tổn thất công suất của LĐPP luôn chiếm tỷ trọng lớn trong tổng tổn thất của toàn hệ thống điện. Vì vậy, nâng cao hiệu quả của LĐPP thông qua giảm tổn thất công suất là một mục tiêu quan trọng. Hàm mục tiêu của bài toán xác định vị trí và công suất DGs trên LĐPP được mô tả như sau:

$$OF = \min(\sum \Delta P) \quad (3.43)$$

Khi lắp đặt DGs trên LĐPP phải đảm bảo công suất DGs nằm trong giới hạn cho phép:

$$P_{DG,i,min} \leq P_{DG,i} \leq P_{DG,i,max} ; i = 1 \quad (3.44)$$

Ngoài ra, trong quá trình lắp đặt DG trên LĐPP cần phải thỏa mãn các điều kiện ràng buộc cân bằng công suất, điện áp và dòng điện nằm trong giới hạn cho phép. Do đó, hàm thích nghi của bài toán được mô tả như sau:

$$fit = f + k. [\max(V_{min}^{lim} - V_{min}, 0) + \max(V_{max} - V_{max}^{lim}, 0) + \max(LCF_{max} - LCF_{max}^{lim}, 0)] \quad (3.45)$$

Trong đó: fit là giá trị của hàm thích nghi, k là hệ số phạt vi phạm ràng buộc điện áp và dòng điện.  $V_{min}^{lim}$  và  $V_{min}$  là giới hạn điện áp thấp nhất cho phép và điện áp thấp nhất trong LĐPP.  $V_{max}^{lim}$  và  $V_{max}$  là giới hạn điện áp lớn nhất cho phép và điện áp lớn nhất trong LĐPP.  $LCF_{max}$  và  $LCF_{max}^{lim}$  là hệ số mang tải lớn nhất trong LĐPP và hệ số mang tải cho phép.

### 3.4.2. Tối ưu vị trí và công suất của DG trên LĐPP Chư Prông sử dụng thuật toán Coyote Algorithm (COA)

Thuật toán Coyote Algorithm (COA) [97] đã được chứng minh tính hiệu quả trong bài toán hai giai đoạn để tối ưu lắp đặt DG và có xét tái cấu hình lưới điện phân phối (DNR). Trong phần này, thuật toán COA được thực hiện cho vấn đề lắp đặt tối ưu DG cho LĐPP Chư Prông. Trong COA, để tìm kiếm giải pháp trong không gian tìm kiếm, quần thể chó sói được chia thành các nhóm nhỏ  $N_g$  với  $N_c$  cá thể chó sói trong mỗi nhóm. Điều kiện xã hội của mỗi chó sói trong nhóm được xem như là một giải pháp cho bài toán. Quá trình tìm kiếm giải pháp mới được thực hiện dựa trên sự tiến hóa theo thể hệ của quần thể chó sói. Các giải pháp mới được tạo ra trong quá trình tìm kiếm dựa trên sự tương tác giữa các cá thể trong cùng một nhóm và giữa các nhóm với nhau. Chi tiết các bước thực hiện của COA cho bài toán xác định vị trí và công suất các DG được mô tả như sau:

Bước 1: Lựa chọn thông số

Ưu điểm của COA so với các thuật toán khác là không cần thông số điều khiển trong quá trình tính toán. Các thông số khởi tạo ban đầu chỉ bao gồm số nhóm chó sói  $N_g$ , số lượng cá thể trong mỗi nhóm  $N_c$  và số thế hệ khảo sát  $G_{max}$ . Với kích thước quần thể được xác định bằng  $N_g \times N_c$ .

## Bước 2: Khởi tạo

Điều kiện xã hội của mỗi cá thể chó sói trong mỗi nhóm được xem như một giải pháp của bài toán. Vì vậy, quần thể ban đầu được khởi tạo cho bài toán tối ưu vị trí và công suất DGs được khởi tạo như sau:

$$sc_c^g = [L_{1,c}^g, \dots, L_{N_{DG},c}^g, P_{1,c}^g, \dots, P_{N_{DG},c}^g] \quad (4.46)$$

Trong đó,  $g = 1, 2, \dots, N_g$  và  $c = 1, 2, \dots, N_c$ .  $L_{k,c}^g$  và  $P_{k,c}^g$  là vị trí và công suất của DG thứ k, với  $k = 1, 2, \dots, N_{DG}$ .

Khi đó, vị trí và công suất DGs được khởi tạo như sau:

$$L_{k,c}^g = \text{round}[2 + \text{rand}(0,1) \cdot (N_{bus} - 2)] \quad (4.47)$$

$$P_{k,c}^g = \text{rand}(0,1) \cdot (P_{k,max}^g - P_{k,min}^g) + P_{k,min}^g \quad (4.48)$$

Trong đó  $P_{k,max}^g$  và  $P_{k,min}^g$  là giới hạn công suất lớn nhất và nhỏ nhất của DG thứ k.

Sau khi quần thể ban đầu được khởi tạo, giá trị hàm thích nghi của mỗi cá thể được tính toán dựa trên biểu thức (4.44).

## Bước 3: Cập nhật điều kiện xã hội của các cá thể chó sói trong mỗi nhóm

Trong mỗi nhóm, hành vi của mỗi cá thể chó sói phụ thuộc vào cá thể đầu đàn alpha. Ngoài ra, mỗi nhóm thường có những tập tính riêng so với các nhóm khác. Dựa trên đặc điểm này, mỗi giải pháp trong COA được cập nhật: Trong nhóm thứ g, cá thể có hàm thích nghi tốt nhất được chọn trở thành cá thể alpha ( $al^g$ ). Xu hướng xã hội chung của nhóm ( $ct^g$ ) được xác định bằng điều kiện xã hội trung vị của các cá thể trong nhóm. Khi đó, điều kiện xã hội mới của các cá thể trong mỗi nhóm được tạo ra như sau:

$$n\_sc_c^g = sc_c^g + r_1 \cdot (al^g - sc_1^g) + r_2 \cdot (ct^g - sc_2^g) \quad (4.49)$$

Trong đó  $n\_sc_c^g$  và  $sc_c^g$  là điều kiện xã hội mới và điều kiện xã hội hiện tại của cá thể thứ c trong nhóm thứ g.  $sc_1^g$  và  $sc_2^g$  là điều kiện xã hội của hai cá thể được chọn ngẫu nhiên trong nhóm g.  $r_1$  và  $r_2$  là số ngẫu nhiên trong khoảng [0, 1].

Dựa trên điều kiện xã hội mới của các cá thể được tạo, giá trị hàm thích nghi như biểu thức (4.44) được tính toán. Nếu điều kiện xã hội mới có giá trị thích nghi tốt hơn điều kiện xã hội hiện tại của cá thể tương ứng, nó sẽ được chọn để trở thành điều kiện xã hội của cá thể đó.

Bước 4: Tạo ra cá thể mới thay thế cho cá thể có độ thích nghi kém trong mỗi nhóm

Trong mỗi nhóm, cá thể chó sói già vốn có sự thích nghi kém nhất trong nhóm sẽ bị chết đi và thay thế bởi cá thể chó sói con vốn được sinh ra nhờ sự tương tác giữa các cá thể trong nhóm như sau:

$$x_{puppy,j}^g = \begin{cases} x_{1,j}^g ; r_{3,j} < k_1 \\ x_{2,j}^g ; r_{3,j} < k_1 + k_2 \\ x_{r,j}^g ; \text{ngược lại} \end{cases} \quad (4.50)$$

Trong đó  $x_{puppy,j}^g$  ( $j = 1, 2, \dots, D$ ) là biến điều khiển thứ  $j$  trong vector giải pháp điều kiện xã hội của cá thể sói con.  $D$  là số biến cần tối ưu.  $x_{1,j}^g$  và  $x_{2,j}^g$  là biến điều khiển của hai giải pháp được chọn ngẫu nhiên trong nhóm.  $r_{3,j}$  là số ngẫu nhiên trong khoảng  $[0, 1]$ .  $x_{r,j}^g$  là biến được khởi tạo ngẫu nhiên.  $k_1$  và  $k_2$  là hai giá trị xác suất được xác định:

$$k_1 = 1/D \quad (4.51)$$

$$k_2 = (1 - k_1)/2 \quad (4.52)$$

Sau khi điều kiện xã hội mới của các cá thể sói con được tạo, giá trị hàm thích nghi được tính toán. Nếu điều kiện xã hội mới có giá trị thích nghi tốt hơn điều kiện xã hội của cá có độ thích nghi kém nhất trong nhóm, nó sẽ thay thế cá thể xấu nhất trong nhóm, ngược lại nó sẽ bị chết đi.

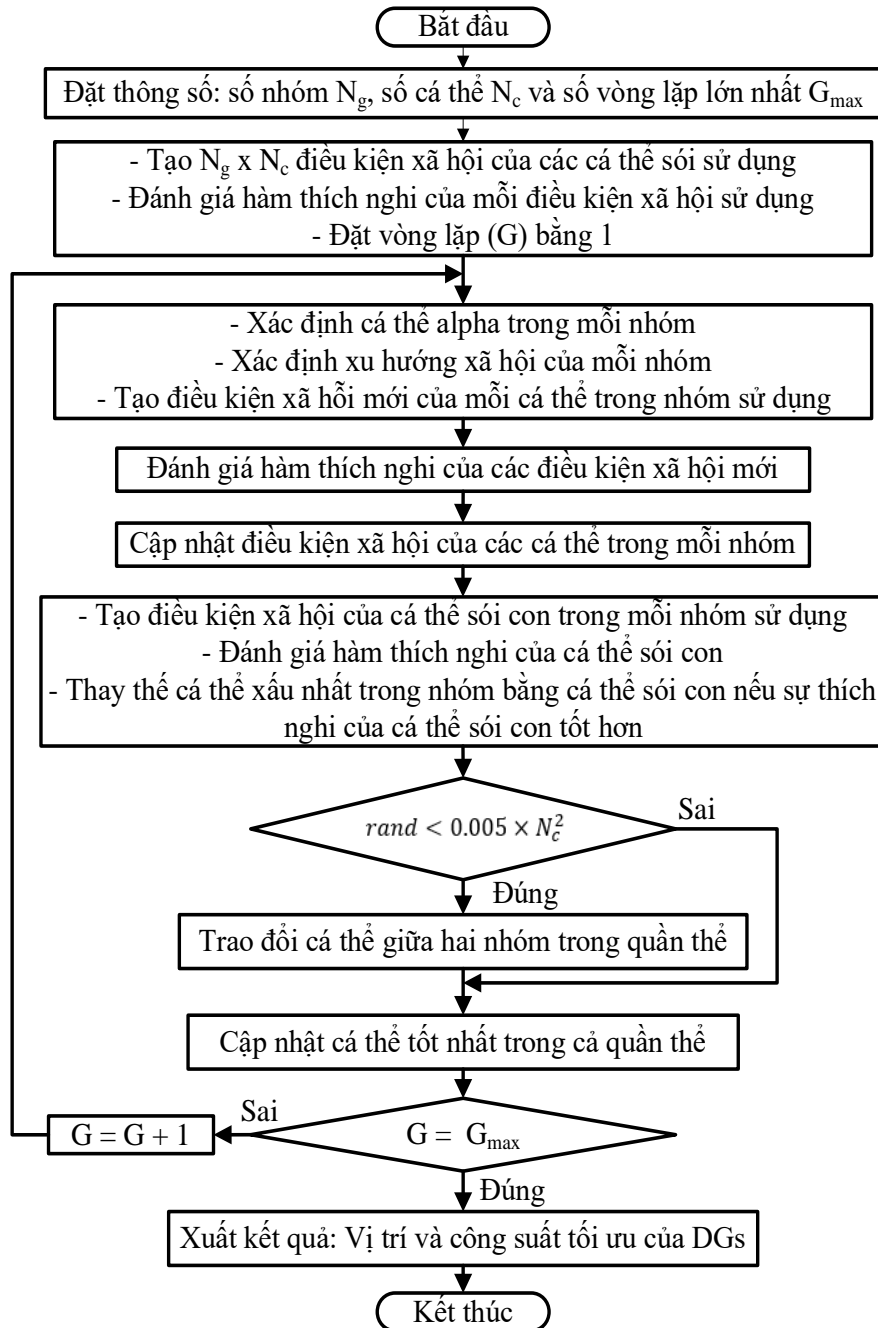
Bước 5: Trao đổi cá thể sói giữa các nhóm trong quần thể

Mặc dù sống thành từng nhóm, nhưng cũng có những cá thể rời bỏ nhóm để sống một mình hoặc tham gia các nhóm khác. Dựa trên tập tính này, trong COA để đa dạng thông tin giữa các nhóm trong quá trình tạo ra các giải pháp mới, có xảy ra sự trao đổi cá thể giữa các nhóm. Xác suất ( $P_l$ ) của một cá thể sói rời bỏ nhóm để tham gia một nhóm khác và ngược lại được xác định như sau:

$$P_l = 0.005 \times N_c^2 \quad (4.53)$$

Từ biểu thức trên có thể thấy rằng với số lượng sói trong mỗi nhóm lớn hơn hoặc bằng 14, sự trao đổi cá thể giữa các nhóm chắc chắn xảy ra. Khi xảy ra sự trao đổi cá thể giữa các nhóm, hai nhóm ngẫu nhiên sẽ được chọn và từ hai nhóm được chọn, hai cá thể ngẫu nhiên sẽ được chọn để trao đổi vị trí.

Bước 6: Điều kiện dừng tìm kiếm



Hình 3. 28. Lưu đồ tối ưu lắp đặt DG bằng thuật toán COA

Quá trình cập nhật điều kiện xã hội của mỗi cá thể sói trong mỗi nhóm, thay thế cá thể sói già bằng cá thể sói con trong mỗi nhóm, trao đổi cá thể giữa các nhóm trong

quần thể sẽ được thực hiện liên tục cho đến khi số vòng lặp đạt đến giá trị đặt trước ( $G_{max}$ ). Ngược lại, quá trình tìm kiếm giải pháp cho bài toán sẽ tiếp tục quay về bước 3 để tiếp tục thực hiện. Khi điều kiện dừng đạt được, cá thể có điều kiện xã hội tốt nhất được xem như là kết quả của bài toán xác định vị trí và công suất tối ưu của DGs trên LĐPP. Lưu đồ thuật toán COA được mô tả như Hình 3.27.

### 3.4.3. Kết quả kiểm tra

Phương pháp tối ưu vị trí và công suất DG dựa trên COA được xây dựng trong môi trường Matlab. Thông số điều khiển của COA được thiết lập cho hệ thống với số nhóm và số cá thể trong mỗi nhóm lần lượt được chọn là 5 và 6, số vòng lặp lớn nhất được chọn bằng 300. Thuật toán COA được chạy 50 lần độc lập và kết quả tối ưu thu được từ COA được so sánh với thuật toán RRA [87]. LĐPP Chư Prông được sử dụng mô phỏng tối ưu vị trí và dung lượng DG với 3 DG. Phương pháp đề nghị được triển khai trong phần mềm Matlab trên máy tính cá nhân với CPU Intel Core i3 4160 @ 3.6 GHz, 1 CPU, 8 GB, Windows 7 SP1 (64-bit).

**Bảng 3. 12.** Kết quả tối ưu 3 DG cho LĐPP Chư Prông với thuật toán COA và RRA

Thông số	Ban đầu	COA	RRA
$P_{DG}$ (MW)	-	0,661 (221); 1,489 (164); 2,256 (48)	0,731 (221); 1,502 (164); 2,156 (48)
Tổng công suất DG (MW)	-	4,406	4,389
$\Delta P$ (kW)	81,566	43,116	45,426
$V_{min}$ (pu)	0,9717 (nút 99)	0,9717 (nút 99)	0,9717 (nút 99)
$V_{max}$ (pu)	1,0 (nút 1)	1,0 (nút 1)	1,0 (nút 1)
LBI	0,00441	0,00141	0,00144
$(I/I_{dm})_{max}$	0,28341	0,17231	0,17245

Kết quả khi thực hiện tối ưu 3 DG cho LĐPP Chư Prông 3 thuật toán COA, RRA và GA được thể hiện ở Bảng 3.12. Trong đó, kết quả tối ưu bằng thuật toán COA cho tổn thất công suất là thấp nhất là 43,116 kW, đối với thuật toán RRA là 45,426 kW và thuật toán GA là 46,421 kW. Tương tự, tổng công suất DG tham gia vào LĐPP Chư Prông của COA là lớn nhất 4,406 MW so với thuật toán RRA và GA tương ứng là 4,389 MW và 4,255 MW. Như vậy, đối với LĐPP Chư Prông thì phương pháp COA là hiệu quả nhất. Đối với LĐPP Chư Prông cần xem xét để mở rộng kết nối DG để đáp ứng từng giai đoạn lắp đặt DG theo kịch bản là 3 giai đoạn lắp đặt với mỗi giai đoạn là 1 DG. Với các kết quả tối ưu cho công suất và vị trí của 3 DG đối với LĐPP Chư Prông cho thấy để đầu tư hiệu quả cần chia ra làm 3 giai đoạn lắp đặt DG tương ứng với 3 vị trí kết nối ở 3 vùng của hệ thống. Ba giai đoạn lắp đặt DG cho LĐPP Chư Prông được thể hiện như Bảng 3.13.

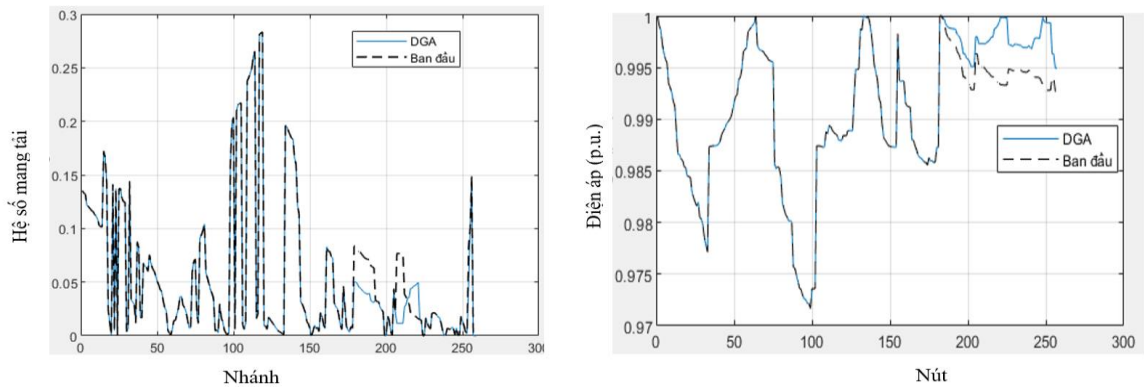
**Bảng 3. 13.** Ba giai đoạn lắp đặt DG vào LĐPP Chư Prông

Thông số	Ban đầu	Giai đoạn 1	Giai đoạn 2	Giai đoạn 3
$P_{DG}$ (MW)	-	0,661(221)	0,661 (221) 1,489 (164)	0,661 (221) 1,489 (164) 2,256 (48)
$\Delta P$ (kW)	81,566	77,259	63,339	43,116
Mức giảm % $\Delta P$	-	5,28	18,02	31,93
$V_{\min}$ (pu)	0,9717 (nút 99)	0,9717 (nút 99)	0,9717 (nút 99)	0,9717 (nút 99)
$V_{\max}$ (pu)	1,0 (nút 1)	1,0 (nút 1)	1,0 (nút 1)	1,0 (nút 1)
LBI	0,00441	0,00441	0,00381	0,00141
$(I/I_{dm})_{\max}$	0,28341	0,28341	0,28341	0,17231

- Trường hợp ban đầu: Khi chưa kết nối DG thì tổn thất công suất trên LĐPP là 81,5655 kW với điện áp nút thấp nhất tương ứng là 0,9717 pu (tại nút 99) và điện áp nút cao nhất tương ứng là 1,0 pu (tại nút 1). Hệ số cân bằng tải (LBI) là 0,00441 và tỷ số cực đại của dòng điện thực tế với dòng điện định mức  $(I/I_{dm})_{\max}$  là 0,28341.

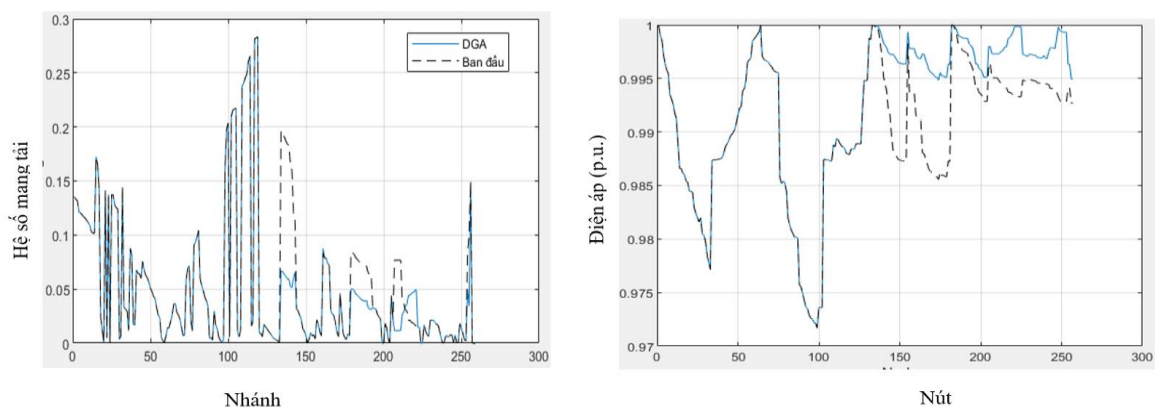


- Giai đoạn 1: Lắp đặt 1 DG với công suất là 0,6609 MW tại nút 221. Lúc này, hệ thống có tổn thất công suất giảm từ 81,566 kW xuống còn 77,26 kW tương ứng với mức giảm % tổn thất công suất là 5,28%. Điện áp thấp nhất là 0,9717 pu (tại nút 99) và điện áp cao nhất là 1,0 pu (tại nút 1). LBI là 0,00441 và  $(I/I_{\text{đm}})_{\text{max}}$  là 0,28341, các chỉ số không thay đổi so với trường hợp ban đầu vì công suất của DG là nhỏ như Hình 3.28.



**Hình 3.29.** Hệ số mang tải của các nhánh và điện áp nút ở giai đoạn 1

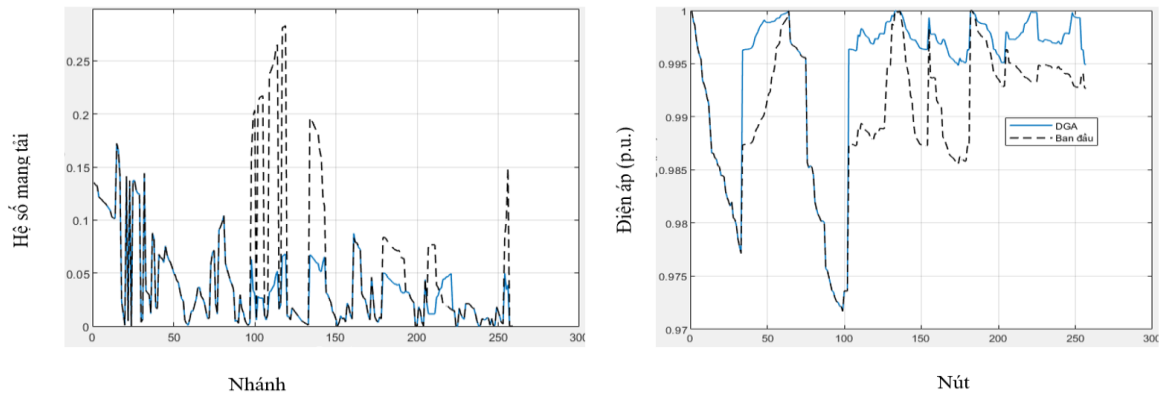
- Giai đoạn 2: Từ giai đoạn 1 tiếp tục lắp đặt thêm 1 DG với công suất là 1,4898 MW tại nút 164. Lúc này, hệ thống có tổn thất công suất giảm từ 81,566 kW còn 63,3393 kW tương ứng với mức giảm % tổn thất công suất là 18,02%. Điện áp nhỏ nhất là 0,9717 pu (tại nút 99) và điện áp cao nhất là 1,0 pu (tại nút 1). LBI là 0,00381 và  $(I/I_{\text{đm}})_{\text{max}}$  là 0,28341. Chỉ số LBI có cải thiện hơn so với trường hợp ban đầu và giai đoạn 1, như Hình 3.29.



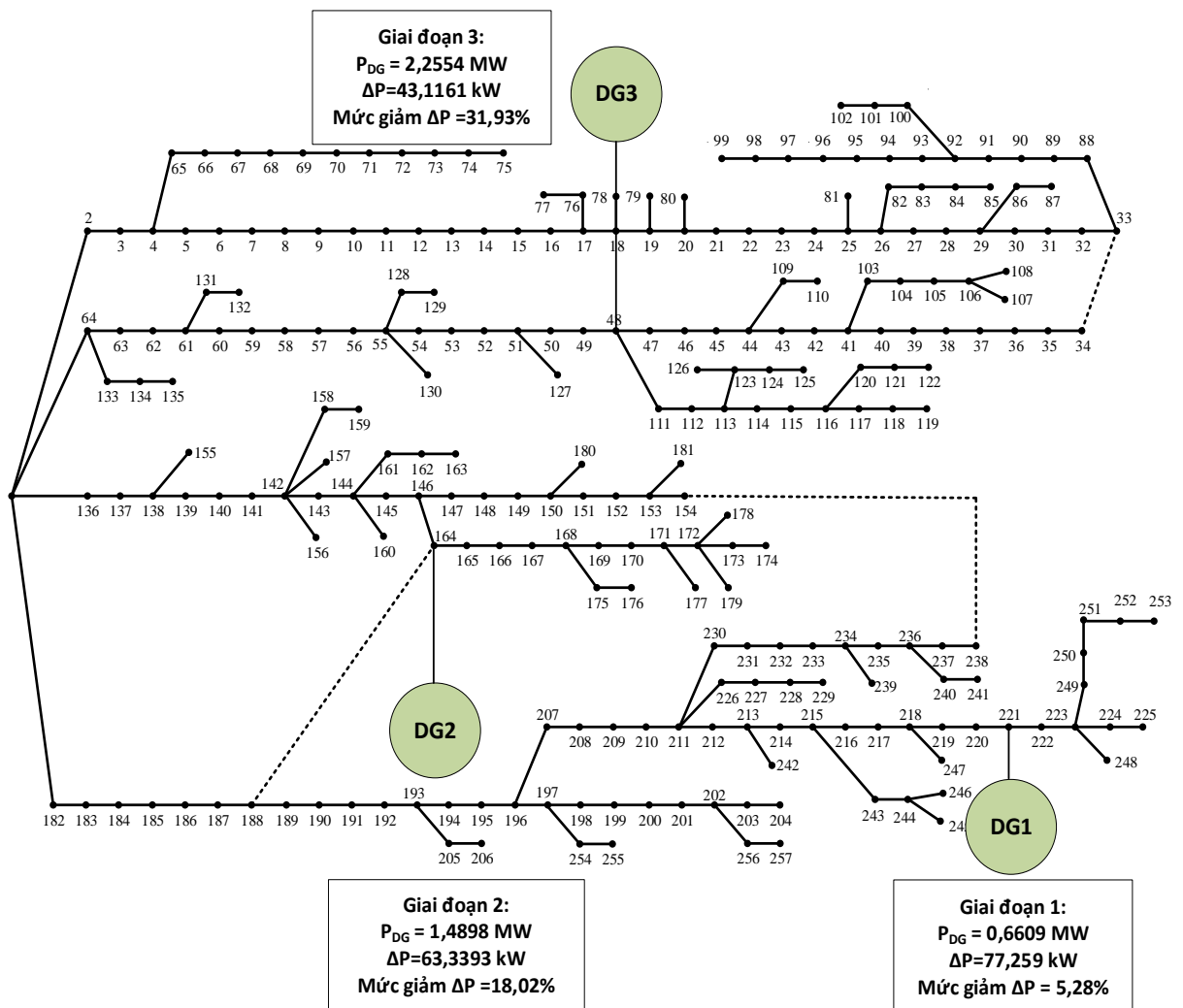
**Hình 3.30.** Hệ số mang tải của các nhánh và điện áp nút ở giai đoạn 2

- Giai đoạn 3: Từ giai đoạn 2 tiếp tục lắp đặt thêm 1 DG với công suất là 2,2554 MW tại nút 48. Lúc này, hệ thống có tổn thất công suất giảm từ 63,3393 kW còn

43,1161 kW tương ứng với mức giảm % tổn thất công suất là 31,93%. Điện áp nhỏ nhất là 0,9717 pu (tại nút 99) và điện áp cao nhất là 1,0 pu (tại nút 1). LBI là 0,00141 và  $(I/I_{\text{đm}})_{\text{max}}$  là 0,1723. Các chỉ số LBI và  $(I/I_{\text{đm}})_{\text{max}}$  cải thiện hơn so với ban đầu, giai đoạn 1 và giai đoạn 2 như Hình 3.30.



**Hình 3. 31.** Hệ số mang tải của các nhánh và điện áp nút ở giai đoạn 3



**Hình 3. 32.** LĐPP Chu Trình với 3 giai đoạn lắp đặt mở rộng DG

Hình 3.31 thể hiện các giai đoạn lắp đặt DG cho LĐPP LĐPP Chư Prông sau khi tối ưu bằng thuật toán COA với 3 DG. Để khai thác tối đa khả năng của DG cần có một kế hoạch lắp đặt DG trong từng giai đoạn. Trong ba giai đoạn lắp đặt cho thấy DG có thể mở rộng thêm DG có khả thi lắp đặt. Từ đó, tối ưu vị trí ứng với các nút có khả năng lắp đặt và công suất tối đa của DG tham gia vào LĐPP cho từng giai đoạn cụ thể. Ở đây, LĐPP Chư Prông lắp đặt 1 DG ở giai đoạn 1, tiếp theo bổ sung 1 DG nữa ở giai đoạn 2 và cuối cùng là lắp đặt thêm 1 DG cho giai đoạn 3. Như vậy, LĐPP Chư Prông có 3 DG được kết nối với số lượng, công suất và vị trí đã được tối ưu với mục tiêu là cực tiểu tổn thất công suất của hệ thống.

### **3.4.3. Kết luận**

Trong phần này, LĐPP Chư Prông – Gia Lai của Việt Nam được áp dụng để mở rộng thông qua lắp đặt DG nhằm tối đa công suất thâm nhập và cực tiểu tổn thất công suất của hệ thống. Bài toán đề xuất ba giai đoạn lắp đặt DG tương ứng với ba vị trí và công suất khả thi cho phép lắp đặt vào LĐPP Chư Prông. Thuật toán COA, RRA và GA được sử dụng hiệu quả cho bài toán 1 và tiếp tục được áp dụng để thử nghiệm cho vấn đề lắp đặt ba DG cho LĐPP Chư Prông. Từ kết quả ba DG đã được tối ưu, luận án đề xuất một kế hoạch lắp đặt mở rộng DG LĐPP Chư Prông qua ba giai đoạn nhằm phù hợp với vấn đề đầu tư và lắp đặt DG trong thời gian tới. Bài toán đề nghị tối ưu lắp đặt DG trên LĐPP bằng thuật toán COA đã được nghiên cứu, thực hiện và công bố trong công trình số [3], [8] và [9].

## **3.5. Kết luận chương 3**

Chương 3 phân tích và đề xuất bài toán mở rộng lưới điện phân phối (LĐPP), mở rộng công suất của nguồn phân tán (DG) để nâng cao hiệu quả LĐPP. Trong chương 3 đề xuất hai bài toán mới và một bài toán áp dụng cho LĐPP Việt Nam, các bài toán như sau:

Bài toán 1: Mở rộng LĐPP thông qua xác định vị trí và công suất tối ưu của DG có xét tái cấu hình lưới điện phân phối (DNR): Luận án đưa ra một bài toán mới để giải quyết vấn đề tối ưu vị trí và công suất của DG thông qua hai giai đoạn. Tương ứng, Giai đoạn I - Tối ưu lắp đặt DG trong LĐPP kín (giai đoạn thiết kế) và Giai đoạn II - Tối ưu khóa mở để lưới điện vận hành hở (giai đoạn vận hành). Bài toán đề nghị

thực hiện tối ưu lắp đặt DG có xét đến DNR với hàm mục tiêu là cực tiểu tổn thất công suất của hệ thống. Bài toán đề nghị hai giai đoạn là một dạng bài toán tối ưu mới trong tối ưu lắp đặt DG có xét DNR bên cạnh các dạng bài toán tối ưu lắp đặt DG có xét DNR khác đã được công bố như bài toán tối ưu đồng thời cả ba yếu tố vị trí, công suất và DNR (bài toán đồng thời) và bài toán tối ưu vị trí trước và sau đó tối ưu công suất và DNR (bài toán VT-CS và DNR). Bài toán đề nghị có ưu điểm nổi bật là đưa ra lời giải tối ưu toàn cục cho bài toán lắp đặt DG có xét DNR. Bài toán hai giai đoạn cho thấy số biến giảm cho mỗi giai đoạn của thuật toán tối ưu bằng cách chia ra hai giai đoạn. Ngoài ra, bài toán đề nghị hai giai đoạn cũng cho thấy phù hợp với việc lắp đặt DG trong dài hạn (giai đoạn thiết kế) được ưu tiên trước và việc DNR là ngắn hạn (giai đoạn vận hành). LĐPP 33 nút và LĐPP 69 nút được kiểm tra và cho thấy tính hiệu quả bài toán đề nghị. Bài toán đề nghị sử dụng thuật toán Runner Root Algorithm (RRA) để thực hiện và so sánh với một số thuật toán Coyote Algorithm (COA) và Genetic Algorithm (GA). Ngoài ra, bài toán đề nghị cũng được so sánh với các bài toán đồng thời và bài toán VT – CS và DNR với các thuật toán khác nhau để cho thấy hiệu quả của bài toán tách ra hai giai đoạn. Các kết quả mô phỏng của bài toán đề xuất cho thấy tổn thất công suất toàn hệ thống tương tự với bài toán đồng thời và tốt hơn so với bài toán VT – CS và DNR. Về thuật toán, kết quả cho thấy thuật toán RRA và COA là các thuật toán hiệu quả để tối ưu lắp đặt DG cho LĐPP. Bài toán đề nghị thông qua hai giai đoạn đã được nghiên cứu sinh nghiên cứu, thực hiện và công bố trong công trình số [1], [5] và công trình liên quan số [7].

Bài toán 2: Xác định cấu hình LĐPP khi mở rộng công suất của pin quang điện (PV): Luận án đề nghị thuật toán trao đổi nhánh với công suất nhánh trung bình (CSNTB) cải tiến nhằm xác định nhanh cấu hình vận hành LĐPP khi PV được mở rộng công suất với mục tiêu là cực tiểu tổn thất năng lượng. Ưu điểm nổi bật của bài toán đề nghị là đơn giản, dễ thực hiện và chính xác trong việc xác định cấu hình của LĐPP khi PV được mở rộng công suất lắp đặt. LĐPP 18 nút và LĐPP 33 nút được áp dụng thử nghiệm đã cho thấy phương pháp đề nghị là đơn giản, nhanh chóng xác định được cấu hình lưới và có độ chính xác cao khi so sánh với bài toán xác định cấu hình lưới điện theo phương pháp sử dụng công suất nhánh trung bình (CSNTB) và phương pháp sử dụng đồ thị phụ tải bằng các thuật toán tối ưu. Bài toán đề nghị sử dụng thuật

toán trao đổi nhánh sử dụng CSNTB cải tiến đã được nghiên cứu, thực hiện và công bố ở công trình số [2] và công trình liên quan số [10].

Bài toán áp dụng mở rộng LĐPP Chư Prông – Gia Lai của Việt Nam: LĐPP Chư Prông được áp dụng để mở rộng thông qua lắp đặt DG nhằm tối đa công suất thâm nhập và cực tiểu tổn thất công suất của hệ thống. Bài toán đề nghị ba giai đoạn lắp đặt DG tương ứng với ba vị trí và công suất khả thi cho phép lắp đặt vào LĐPP Chư Prông. Thuật toán COA và RRA được sử dụng hiệu quả cho bài toán 1 và tiếp tục được áp dụng để thử nghiệm cho vấn đề lắp đặt ba DG cho LĐPP Chư Prông. Từ kết quả ba DG đã được tối ưu, luận án đề nghị một kế hoạch lắp đặt mở rộng DG LĐPP Chư Prông qua ba giai đoạn nhằm phù hợp với vấn đề đầu tư và lắp đặt DG trong thời gian tới. Bài toán đề nghị tối ưu lắp đặt DG trên LĐPP bằng thuật toán COA đã được nghiên cứu, thực hiện và công bố trong công trình số [3] và công trình liên quan số [8], [9].

Chương 3 trình bày về vấn đề lắp đặt DG để mở rộng LĐPP có xét đến tái cấu hình điện, xác định cấu hình LĐPP khi các DG được mở công suất và kế hoạch mở rộng cho LĐPP Chư Prông – Gia Lai của Việt Nam. Chương 3 đã cho thấy được hai bài toán mới trong mở rộng LĐPP và mở rộng công suất của DG đã được lắp đặt để tối đa tỷ lệ tham gia của DG trên LĐPP. Tuy nhiên, khi LĐPP tham gia vào trong thị trường điện thì cần phải né tránh được vấn đề phạt hợp đồng do sự cố mất điện, chênh lệch giá năng lượng, ổn định công suất phát của các nguồn năng lượng tái tạo cũng như sự phát triển nhanh chóng về công nghệ thì bộ dự trữ năng lượng (ESS) trở nên rất quan trọng trên hệ thống điện hiện nay. Chương 4 sẽ trình bày vấn đề mở rộng sự thâm nhập của ESS trên LĐPP.

## CHƯƠNG 4

# MỞ RỘNG SỰ THÂM NHẬP CỦA BỘ DỰ TRỮ NĂNG LƯỢNG TRÊN LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI

### 4.1. Giới thiệu

Bộ dự trữ năng lượng (ESS) là công cụ rất hữu ích để tránh được những khó khăn về phạt hợp đồng khi tham gia vào thị trường điện do sự cố mất điện hay công suất phát không ổn định của các nguồn năng lượng tái tạo (RES) đồng thời ESS cũng đem lại các lợi ích nhất định trong vận hành LĐPP. Khi có ESS tham gia vào thì LĐPP sẽ dễ dàng kiểm soát, linh hoạt và cải thiện trong hệ thống. Trước đây, ESS được kết nối vào LĐPP chưa nhiều bởi vì công nghệ chưa được phát triển mạnh cũng như giá thành chưa đáp ứng tốt. Thời gian gần đây, với sự nhanh chóng tiếp cận và thay đổi công nghệ nên ESS được nghiên cứu sử dụng ngày càng nhiều với lợi ích rất lớn từ chênh lệch giá năng lượng và hỗ trợ cho RES. ESS có nhiều loại công nghệ khác nhau trên thị trường và trong mỗi loại có ưu và nhược điểm theo yêu cầu và mục đích khác nhau [9]. Trong các loại công nghệ của ESS thì pin dự trữ năng lượng (BESS) là một trong các loại công nghệ được sử dụng nhiều cho LĐPP vì thời gian đáp ứng nhanh, khả năng lưu trữ và tính độc lập [32]. BESS có ưu điểm nổi trội như linh hoạt, ổn định và dịch chuyển thời gian sử dụng công suất cũng như đáp ứng tốt công suất không ổn định của các DG tái tạo [98]. Chính vì thế, BESS ngày càng trở nên hấp dẫn và cần thiết đối với LĐPP hiện nay [13]. Pin lithium-ion là một trong các loại của BESS đáng chú ý nhất hiện nay vì nó có thời gian đáp ứng nhanh, trọng lượng thấp, kích thước nhỏ, dễ lắp đặt và tiết kiệm [33], [99]. Việc mở rộng công suất vận hành của BESS là một vấn đề cấp thiết để mở rộng LĐPP và khai thác hiệu quả các lợi ích từ BESS. Tùy thuộc vào quan điểm của người vận hành hay quan điểm của nhà đầu tư sẽ có sự lựa chọn lợi ích khai thác từ BESS phù hợp [72].

- Quan điểm đối với nhà vận hành: Cấp điện cho lưới nhỏ hay lưới độc lập, khai thác các nguồn điện tại chỗ.

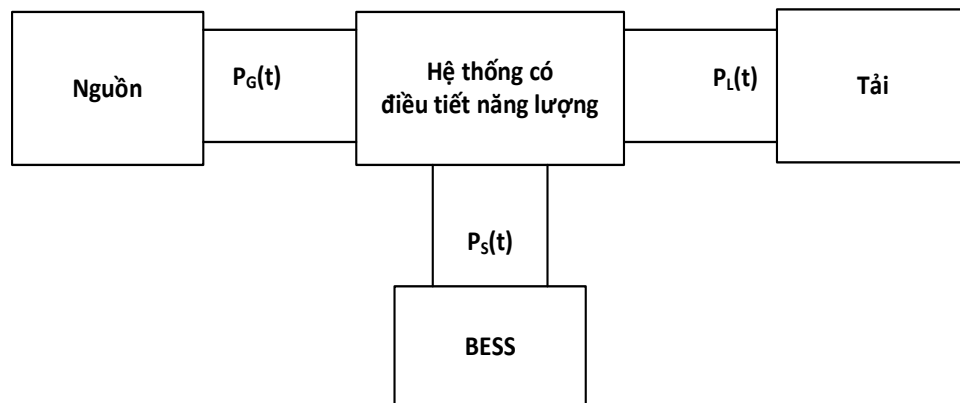
- Quan điểm đối với nhà đầu tư: ổn định công suất phát của RES, chênh lệch giá năng lượng, tránh bị phạt hợp đồng do sự cố mất điện.

Một mô hình năng lượng đơn giản của hệ thống có sự tham gia của BESS được thể hiện như ở Hình 4.1 có các thành phần là nguồn, hệ thống điều tiết năng lượng, tải và BESS. Công suất trong hệ thống giả định là tổn thất công suất được bỏ qua, công suất được tiêu thụ thông qua tải hoặc là được trữ lại như công thức (4.1). Công suất  $P_S(t)$  được xác định thông qua số dư của  $P_G(t)$  và  $P_L(t)$  như công thức (4.1), còn năng lượng của BESS được xác định như công thức (4.2) [100].

$$P_S(t) = P_G(t) - P_L(t) \quad (4.1)$$

$$W_S(t) = \int_0^t P_S(\tau) d \quad (4.2)$$

Ở đây:  $P_G(t)$  là công suất của nguồn (kW),  $P_L(t)$  là công suất độc lập của tải (kW),  $P_S(t)$  là công suất đầu vào (kW) và  $W_S(t)$  là năng lượng lưu trữ (kWh). Dung lượng BESS được xác định thông qua công suất định mức ( $P_{dm}$ ) và  $W_S(t)$ .



**Hình 4. 1.** BESS trong hệ thống năng lượng đơn giản [100]

Đối với BESS luôn có hai giai đoạn là giai đoạn sạc và giai đoạn xả [101].

Trong giai đoạn sạc:

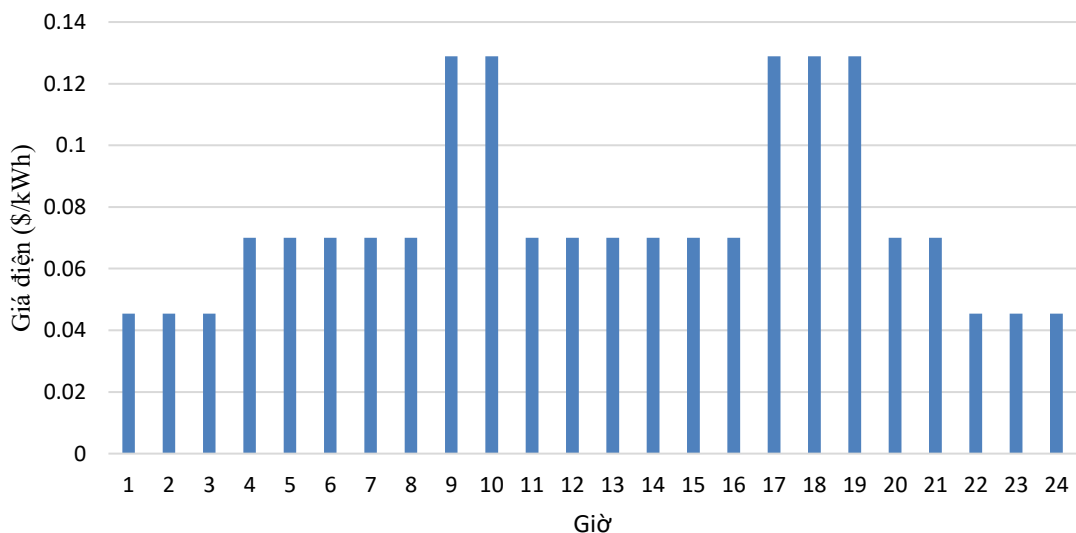
$$E_{t+1} = E_t + P_t \eta \quad (4.3)$$

Trong giai đoạn xả:

$$E_{t+1} = E_t - P_t \quad (4.4)$$

Với  $E_t$  là năng lượng lưu trữ tại thời điểm  $t$  (kWh),  $P_t$  là công suất sạc ( nạp) hoặc xả ở thời điểm  $t$  (giả định với  $t=1$  giờ) và  $\eta$  là hiệu suất. Để sử dụng BESS cần phải xác định thông số BESS như công suất định mức  $P_{dm}$  (kW) công suất cực đại  $P_{max}$  (kW), dung lượng  $S$  (kWh) và công suất vận hành  $P_i$  (kW) của BESS. Trong đó,  $P_i$  là công suất ở mỗi khoảng trong 24 giờ, nó được chọn làm các biến trạng thái trong quá trình tối ưu.

BESS đóng một vai trò nổi bật trong chuỗi hoàn chỉnh của hệ thống điện: phát điện - truyền tải - phân phối - tải. Nó tạo ra một cơ chế phản ứng nhanh trong chuỗi cung ứng mới của ngành điện. Với các ưu điểm vượt trội của BESS như chênh lệch giá, cân bằng tải, san tải đỉnh, dịch chuyển thời gian phát công suất, quản lý nhu cầu tải, giảm chi phí truyền tải và trì hoãn nâng cấp hệ thống. Trong đó, giá chênh lệch giữa các thời kỳ thì các nhà phân phối sẽ điều tiết mua rẻ ở một số thời điểm nhu cầu tải thấp để sạc (với giá rẻ) để sử dụng hoặc bán ra khi giá điện cao cho thấy mang lại lợi ích rất lớn từ chi phí mua điện đối với các nhà đầu tư hay các hộ tiêu thụ điện. Ngoài ra, giảm phí truyền tải và trì hoãn việc xây dựng hoặc nâng cấp hệ thống điện cũng mang lợi ích lớn cho ngành điện.



**Hình 4. 2.** Giá năng lượng trong 24 giờ



- Chênh lệch giá năng lượng: Hình 4.2 thể hiện giá mua điện của các khung giờ trong ngày từ hệ thống, các biến trạng thái như ở công thức (4.5).

$$P_i = P_i^+ - P_i^- \text{ với } i = 1 \dots 24 \quad (4.5)$$

Trong thời gian xả của BESS thì  $P_i = -P_i^-$  và trong thời gian sạc thì  $P_i = P_i^+$ . Vì vậy, lợi ích thông qua chênh lệch giá năng lượng theo các thời điểm được thể hiện như ở công thức (4.6). Trong đó  $P_i^+$  là đại lượng công suất sạc vào và  $P_i^-$  là đại công suất xả ra.

$$T_1 = \sum_i (P_i^+ - P_i^-) C_i \quad (4.6)$$

Trong đó,  $C_i$  là giá năng lượng giờ thứ  $i$  và  $T_1$  là lợi ích có được thông qua chênh lệch giá điện.

- Giảm chi phí truyền tải và đầu tư cho hệ thống:

+ Giảm chi phí chi phí truyền tải: Khi xét đến chi phí truyền tải thì người dùng phải trả phí.  $T_2$  là lợi ích của việc giảm chi phí truyền tải.

$$T_2 = \sum_{i \in \{\text{thời gian phí thấp}\}} (P_i^+ - P_i^-) C_a + \sum_{i \in \{\text{thời gian phí cao}\}} (P_i^+ - P_i^-) C_b + \sum_{i \in \{\text{thời gian phí trung bình}\}} (P_i^+ - P_i^-) C_c \quad (4.7)$$

Bảng 4.1 thể hiện chi phí truyền tải của các khoảng thời gian khác nhau. Với các tham số ở Bảng 4.1, lợi ích truyền tải được biểu diễn ở công thức (4.7). Chi phí truyền tải trong Bảng 4.1 là giá trị trung bình là một kW mỗi tháng.

**Bảng 4. 1.** Chi phí truyền tải theo thời gian

Chi phí truy cập đường truyền	Phí (\$ / kW - tháng)
Khoảng thời gian với chi phí thấp	$C_a$
Khoảng thời gian với chi phí cao	$C_b$
Khoảng thời gian với chi phí trung bình	$C_c$

+ Trì hoãn đầu tư: BESS sạc khi nhu cầu tải thấp và xả ra khi nhu cầu tải cao nên BESS có thể cắt giảm tải đỉnh và trì hoãn việc nâng cấp thiết bị hay đường dây.

Để lắp đặt BESS thì cần phải có chi phí đầu tư, vận hành và bảo trì. Hai yếu tố này được mô tả như sau.

- Chi phí đầu tư lắp đặt BESS: Chi phí này liên quan đến công suất cực đại và năng lượng lưu trữ tối đa. Chi phí đầu tư được thể hiện như công thức (4.8).

$$C_{\text{BESS}} = C_P * P_{\text{max}} + C_w * W_{\text{max}} \quad (4.8)$$

Trong đó:  $P_{\text{max}}$  là công suất cực đại (kW),  $W_{\text{max}}$  là năng lượng cực đại (kWh),  $C_p$  (\$/kW) và  $C_w$  (\$/kWh) lần lượt là chi phí của  $P_{\text{max}}$  và  $W_{\text{max}}$ .

- Chi phí vận hành và bảo trì: Chi phí hàng năm của BESS gồm có thành phần cố định có liên quan đến  $P_{\text{dm}}$  và thành phần thay đổi phụ thuộc vào năng lượng xả ra hàng năm. Công thức (4.9) biểu diễn mối quan hệ của hai thành phần này.

$$C_{\text{OM}} = C_{\text{Mf}} * P_{\text{dm}} + C_{\text{Mv}} * W_{\text{annual}} \quad (4.9)$$

Trong đó:  $C_{\text{Mf}}$  là thành phần cố định (\$/kW/năm);  $C_{\text{Mv}}$  là thành phần thay đổi (\$/kWh);  $W_{\text{annual}}$  là năng lượng xả hàng năm của BESS (kWh/năm).

BESS là rất cần thiết cho hệ thống điện trong quá trình tham gia thị trường điện cạnh tranh trong thời gian tới. Đứng trên quan điểm đối với nhà đầu tư thì BESS giúp tránh bị phạt hợp đồng do sự cố mất điện, chênh lệch giá năng lượng, ổn định công suất phát của RES thông qua sự dịch chuyển thời gian sử dụng năng lượng. Ngoài ra, BESS cũng giúp trì hoãn đầu tư hoặc nâng cấp hệ thống, cân bằng năng lượng trong hệ thống điện. Với các yếu tố trên, vấn đề sử dụng và khai thác hiệu quả BESS trong quá trình tham gia trên LĐPP là rất quan trọng và ở đây không xem xét đến các chi phí đầu tư, lắp đặt và bảo dưỡng.

Trong [102], nhóm tác giả đề nghị tối ưu BESS để vận hành nhằm cực tiểu tổn thất năng lượng bằng cách so sánh ở một số vị trí có thể sẽ lắp đặt trong hệ thống. Trong [103], nhóm tác giả đưa ra kỹ thuật tối ưu BESS và hệ thống tụ điện để giảm thiểu tổn thất năng lượng. Cả hai nghiên cứu [102], [103] chỉ đề cập đến tác dụng của

việc lắp đặt tối ưu BESS để giảm thiểu tổn thất năng lượng mà không xét chi phí mua điện. Trong [104], nhóm tác giả đưa ra phương pháp xác định công suất và vị trí thông qua quá trình sạc và xả hàng ngày của BESS dựa trên hàm chi phí. Trong [105], nhóm tác giả đưa ra kỹ thuật tối ưu BESS nhằm giảm chi phí tổn thất năng lượng. Trong [106], nhóm tác giả chỉ đưa ra một kỹ thuật tối ưu BESS trong LĐPP để san đỉnh của đồ thị phụ tải, quản lý hệ thống và cân bằng tải. Các nhóm tác giả của nghiên cứu trên chỉ đề cập vào việc cực tiểu tổn thất năng lượng khi lắp đặt BESS. Vấn đề giảm tổn thất năng lượng khi có BESS tham gia vào hệ thống là rất nhỏ bởi vì công suất sạc và xả là cố định ở trong một khoảng thời gian.

Tùy thuộc vào mục tiêu lắp đặt BESS cần phải xem xét tối ưu công suất và vị trí để khai thác lợi ích từ BESS. Khi BESS được kết nối vào LĐPP thích hợp thì sẽ phát huy tối đa các lợi ích của nó. Nếu không, BESS sẽ tác động xấu đáng kể đến các lợi ích kinh tế cũng như kỹ thuật của LĐPP [73]. Do đó, việc xác định công suất và vị trí lắp đặt BESS trong LĐPP là một yếu tố cần phải xem xét cẩn trọng. Việc giảm tổn thất công suất hay tổn thất năng lượng bằng cách sử dụng BESS tích hợp vào LĐPP là rất bé bởi vì năng lượng sạc và xả là cố định trong một khoảng thời gian. Tối ưu lắp đặt BESS trong LĐPP sẽ giúp tiết kiệm chi phí là một trong những giải pháp hữu hiệu thông qua chênh lệch giá năng lượng. Ngoài ra, BESS cũng được khai thác hiệu quả với DG có công suất phát không ổn định được kết nối vào LĐPP. Hiện nay, việc mở rộng sự thâm nhập BESS vào LĐPP với các mục tiêu chính sau:

- BESS là một công cụ hữu hiệu để giảm chi phí năng lượng và điều chỉnh các vi phạm ràng buộc kỹ thuật.
- BESS là một thành phần để cải thiện hiệu suất của RES bằng cách dịch chuyển thời gian sử dụng năng lượng và làm ổn định công suất đầu ra của các nguồn năng lượng tái tạo.

Trong phạm vi nghiên cứu của luận án, vấn đề nghiên cứu lắp đặt BESS chỉ tập trung việc khai thác lợi ích thu được từ việc lắp đặt BESS trong hệ thống trên quan điểm khai thác các lợi ích của nhà đầu tư và không xét đến chi phí đầu tư, lắp đặt cũng như bảo trì bảo dưỡng BESS. Do đó, nghiên cứu tối ưu vị trí và công suất vận hành

của BESS trong 24 giờ để giảm chi phí năng lượng là rất cần thiết. Trong đó, khoảng 24 giờ được chia thành giờ cao điểm có giá điện cao, giờ tiêu chuẩn có giá điện bình thường và giờ thấp điểm với giá điện thấp nhất. Mục tiêu của bài toán là giảm giá mua năng lượng từ hệ thống và giảm chi phí tổn thất năng lượng. Ngoài ra, bài toán cũng góp phần giảm phụ tải ở các giờ cao điểm và ngược lại sẽ tăng giờ thấp điểm để sử dụng nhưng phải đáp ứng các ràng buộc kỹ thuật. Để giải quyết vấn đề, thuật toán Cuckoo Search Algorithm (CSA) được sử dụng lần đầu tiên cho bài toán tối ưu vị trí và dung lượng của BESS tham gia vào LĐPP. Các thuật toán Genetic Algorithm (GA) [107], Path Finding Algorithm (PFA) [108] và Sunflower Optimizatio (SFO) [109] cũng được triển khai để so sánh.

## 4.2. Mô tả bài toán

Nhằm đáp ứng nhu cầu điện cao trong giờ cao điểm thì các nguồn phát khác nhau phải hoạt động để cung cấp điện năng theo nhu cầu. Thậm chí, một số nguồn điện có giá năng lượng cao cũng phải được kích hoạt. Vấn đề này sẽ gây ra hiệu quả không cao trong quá trình điều tiết và vận hành hệ thống phân phối. Chính vì vậy, BESS một giải pháp phù hợp vì nó có thể nạp lúc thấp điểm và xả ra lúc cao điểm. Việc khai thác chênh lệch giá điện để có được chi phí năng lượng thấp thì vị trí BESS thích hợp nó sẽ giảm được tổn thất năng lượng của hệ thống.

Hàm mục tiêu trong tối ưu công suất vận hành và vị trí BESS trong mỗi khoảng của 24 giờ được xác định như công thức (4.10):

$$OF(S) = \sum_{i=1}^{24} (P_{s,i} + P_{loss,i}) C_i \quad (4.10)$$

Trong đó:  $P_{s,i}$  là công suất được mua từ hệ thống ở khoảng thời gian thứ  $i$ ,  $P_{loss,i}$  là tổn thất công suất ở khoảng thời gian thứ  $i$  và  $C_i$  là giá điện ở khoảng thứ  $i$ .

Trong hàm mục tiêu ở công thức (4.10) cho thấy có 2 thành phần chính:

- Thành phần thứ nhất là chi phí mua năng lượng ở mỗi thời điểm khác nhau sẽ khác nhau về giá năng lượng. Với thành phần thứ nhất cho thấy việc dịch chuyển thời

gian sử dụng công suất của BESS mang lại lợi nhuận từ chênh lệch giá năng lượng ở các thời điểm.

- Thành phần thứ hai là chi phí tổn thất công suất ở mỗi thời điểm tùy thuộc vào công suất và vị trí lắp đặt của BESS. Thành phần này là thành phần tổn thất công suất có giá trị nhỏ so với công suất ở mỗi thời điểm. Tuy nhiên, giá trị này cũng cho thấy hiệu quả của việc BESS tham gia vào hệ thống cũng làm giảm tổn thất công suất trong hệ thống.

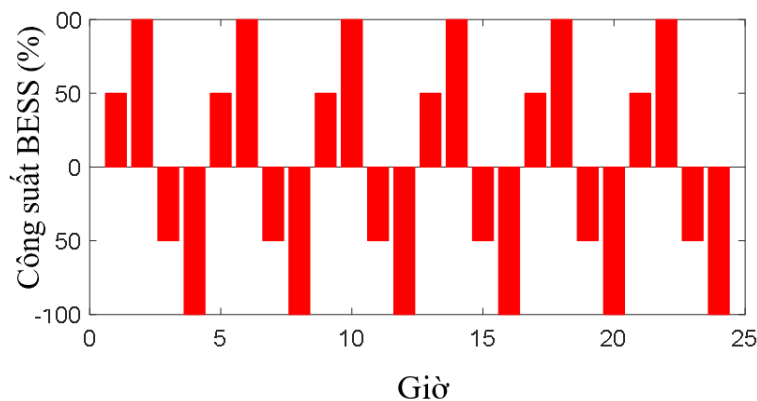
S được xem là giải pháp cho vị trí và công suất vận hành của BESS, được thể hiện như công thức (4.11):

$$K = [ x_1, x_2, \dots, x_{25} ] \quad (4.11)$$

Ở đây, biến đầu tiên  $x_1$  sẽ đại diện cho vị trí và các biến còn lại từ  $x_2$  đến  $x_{25}$  là đại diện cho công suất vận hành của BESS. Với các biến này là  $P_{dm}$  của BESS (tính theo giá trị %) và công suất của BESS trong mỗi khoảng thì dung lượng lưu trữ tương ứng với S và được tính như công thức (4.12).

$$BESS_{capacity}(S) = \max(| \text{cumulative\_sum}(x_2, \dots, x_{25}) |) \quad (4.12)$$

Với cumulative \_ sum là một hàm được trả về một chuỗi các tổng một phần trong vector  $[ x_2, \dots, x_{25} ]$ .



**Hình 4.3.** Các giá trị trong một giải pháp điển hình của BESS

Trong Hình 4.3, giá trị của K gồm có {+50; +100; -50; -100; +50; +100; -50; -100; +50; +100; -50; -100; +50; +100; -50; -100; +50; +100; -50; -100; +50; +100; -50; -100; +50; +100;}

-50; -100}. Với giả định  $P_{dm}$  của BESS là 1 MW, dấu âm sẽ đại diện năng lượng xả và dấu dương đại diện năng lượng sạc. Như vậy, để vận hành ở trường hợp này thì dung lượng lưu trữ phải đạt là 150%  $P_{dm}$  tức là 1,5 MWh.

Để hiệu quả, thì năng lượng trong thời gian 24 giờ khảo sát là bằng không, tức là tổng điện năng tích lũy bằng không trong 24 giờ khảo sát. Điều này để đảm bảo cho BESS tiếp tục hoạt động sạc và xả của ngày hôm sau. Do đó, bài toán tối ưu công suất vận hành và vị trí của BESS cần thỏa mãn điều kiện ràng buộc ở công thức (4.13). Với  $P_{BESS,i}$  là tổng điện năng tích lũy của BESS trong thời gian khảo sát  $i$ .

$$\sum_{i=1}^{24} P_{BESS,i} = 0 \quad (4.13)$$

Để đảm bảo thỏa mãn với ràng buộc này, sẽ đưa vào hàm mục tiêu để phản ánh các ràng buộc ảnh hưởng đến của vectơ nghiệm với hệ số phạt ( $p$ ) tương ứng. Chẳng hạn, ở vectơ nghiệm trong Hình 4.3 có tổng công suất tích lũy trong mỗi khoảng bằng không thì giá trị  $p$  bằng không. Ngược lại, nếu nó khác không thì sẽ thêm giá trị  $p$  phù hợp mức độ vi phạm của ràng buộc.

Ngoài ra, lắp đặt BESS không được tác động xấu đến ràng buộc về dòng điện và điện áp của hệ thống. Các ràng buộc trong công thức (4.14) cần phải xem xét.

$$\begin{cases} I_j < I_{j,rate} & ; j = 1, 2, \dots, n_{branch} \\ V_i > V_{low} \text{ và } V_i < V_{high} & ; i = 1, 2, \dots, n_{bus} \end{cases} \quad (4.14)$$

Ở đây:  $I_j$  và  $I_{j,rate}$  lần lượt là giá trị dòng điện hiện tại và định mức của nhánh thứ  $j$  (A);  $V_i$  là điện áp tại nút thứ  $i$  (kV);  $V_{low}$  và  $V_{high}$  lần lượt là giới hạn điện áp ngưỡng dưới và ngưỡng trên;  $n_{bus}$  và  $n_{branch}$  lần lượt là số nút và nhánh.

Hàm thích nghi được đưa ra từ hàm mục tiêu với các điều kiện ràng buộc được biểu diễn ở công thức (4.15).

$$f = OF + p \cdot \left[ \max (V_{low} - V_{min}, 0) + \max (V_{max} - V_{high}, 0) \right. \\ \left. + \max (KI_{max} - KI_{rate}) + \left| \sum_{i=1}^{24} P_{BESS,i} \right| \right] \quad (4.15)$$

Với  $V_{min}$  và  $V_{max}$  lần lượt là điện áp ngưỡng dưới và điện áp ngưỡng trên;  $KI_{max}$  và  $KI_{rate}$  lần lượt là hệ số mang tải tối đa và giới hạn;  $p$  là hệ số phạt.

### 4.3. Tối ưu công suất và vị trí của BESS

Với mỗi giải pháp thì sẽ có biến đại diện cho vị trí và các biến còn lại đại diện cho công suất vận hành trong từng khoảng thời gian hoạt động của BESS. Ở đây, số lượng được giả định là một BESS và thời gian thực hiện khảo sát là trong 24 giờ. Vì vậy, trong mỗi giải pháp được thể hiện như (4.12). Các biến  $x_2$  đến  $x_{25}$  thể hiện cho  $P_{dm}$  (%) của BESS và các biến này đều là số nguyên. Trong quá trình tìm giải pháp tối ưu cho công suất vận hành và vị trí của BESS sử dụng thuật toán CSA như sau:

+ Bước 1: Khởi tạo.

Để bắt đầu với CSA, một tập hợp giải pháp sẽ tạo ra ngẫu nhiên như sau:

$$S_i = \text{round} \left( x_{low} + \text{rand} \left( x_{high} - x_{low} \right) \right); i = 1, 2, \dots, n \quad (4.16)$$

Trong đó,  $n$  là kích thước của tập hợp giải pháp;  $x_{low}$  và  $x_{high}$  là giới hạn dưới và giới hạn trên của các biến. Đối với biến đại diện cho vị trí của BESS thì giới hạn dưới là 2 và giới hạn trên là nút lớn nhất trong hệ thống. Với các biến đại diện cho công suất vận hành có giới hạn là  $[-100; 100]$ . Ở đây, giá trị dương sẽ đại diện cho quá trình sạc và ngược lại thì sẽ đại diện cho quá trình xả. Hàm thích nghi như công thức (4.15) và giải pháp tốt nhất ( $S_{gbest}$ ) sẽ được tìm ra từ tập hợp giải pháp và đánh giá bằng giá trị phù hợp.

+ Bước 2: Cập nhật tập hợp giải pháp.

Để thực hiện phương pháp dựa trên kỹ thuật Lévy để cập nhật tập hợp giải pháp. Tập hợp mới được tạo ra như ở công thức (4.17) nhằm khám phá không gian tìm kiếm với hệ số phân phối ( $\varphi$ ) trong  $[0, 2]$ .

$$S_i^{new} = \text{round} (S_i + (S_i - S_{gbest}) \text{Levy}(\varphi)); i = 1, 2, \dots, n \quad (4.17)$$

Thông qua hàm thích nghi như ở công thức (4.16), dân số mới được đánh giá. So sánh giải pháp hiện tại với giải pháp mới và thay thế nếu như hàm thích nghi mới tốt hơn. Cuối cùng,  $S_{gbest}$  sẽ cập nhật mới lại.

+ Bước 3: Cập nhật quần thể giải pháp.

Dựa trên cơ chế phát hiện trứng không nằm trong không gian tìm kiếm và sẽ cập nhật lại. Tập hợp mới sẽ tạo ra nhằm khai thác không gian tìm kiếm như công thức (4.18).

$$S_i^{new} = \text{round} (S_i + \text{rand}(0,1)(S_j - S_k) \oplus M(i,:)); i = 1, 2, \dots, n \quad (4.18)$$

Ở đây,  $S_j$  và  $S_k$  lần lượt là giải pháp được chọn ngẫu nhiên;  $\oplus$  là biểu tượng của phép nhân từng phần tử trong ma trận;  $M(i,:)$  là hàng thứ  $i$  trong ma trận  $M$ , với  $M = \text{rand}(n, 25) > Pa$ ;  $Pa$  là yếu tố đột biến, với  $Pa$  thường được chọn 0,25 [110].

Tiếp theo, thông qua hàm thích nghi như ở công thức (4.15) dân số mới sẽ được đánh giá. So sánh giải pháp hiện tại với giải pháp mới và thay thế nếu như hàm thích nghi mới tốt hơn. Cuối cùng,  $S_{gbest}$  sẽ cập nhật mới lại một lần nữa.

Bước 4: Kiểm tra.

Trong bước 2 và bước 3 được thực hiện liên tục để cập nhật đến khi số lần lặp đạt giá trị lớn nhất ( $iter_{max}$ ) đã được đặt trước. Lúc này,  $S_{gbest}$  là kết quả bài toán.

#### 4.4. Kết quả kiểm tra

Để thực hiện tối ưu công suất và vị trí của BESS sử dụng phần mềm Matlab 2016a. LĐPP 18 nút và LĐPP 33 nút được kiểm tra về việc tìm kiếm tối ưu công suất vận hành và vị trí của BESS sử dụng CSA. Giả thiết rằng, có ba loại tải là công nghiệp, dân dụng và thương mại. Trong đó, mỗi loại sẽ chiếm một tỷ lệ nhất định. Ngoài ra, tỷ lệ này cũng khác nhau đối với từng nút. Khi đó, tải tại mỗi nút được tính như công thức (4.19) [71], [111].



$$\begin{cases} P_{j,i} = \sum_{k=1}^3 P_{j,\text{peak}} \cdot R_{j,k} R_{P_{k,i}} \\ Q_{j,i} = \sum_{k=1}^3 Q_{j,\text{peak}} \cdot R_{j,k} R_{Q_{k,i}} \end{cases} \quad (4.19)$$

Trong đó,  $P_{j,i}$  và  $Q_{j,i}$  là công suất nút  $j$  tại khoảng thời gian  $i$  với  $j = 1, 2, \dots, n_{\text{bus}}$  và  $i = 1, 2, \dots, 24$ .  $P_{j,\text{peak}}$  và  $Q_{j,\text{peak}}$  công suất cực đại của tải thứ  $j$ .  $R_{j,k}$  là hệ số của loại tải  $k$  tại nút  $j$  với  $k = 1, 2, 3$  tương ứng với ba loại tải.  $R_{P_{k,i}}$  và  $R_{Q_{k,i}}$  lần lượt là hệ số tải loại  $k$  sử dụng tại khoảng thời gian  $j$ .

Bảng 4.2 thể hiện ba khung giờ tương ứng với ba mức giá điện của Việt Nam [112]. Ở đây, tương ứng ở mỗi khung giờ cao điểm, khung giờ bình thường và khung giờ thấp điểm thì tương ứng với giá điện cao, giá điện bình thường và giá điện thấp.

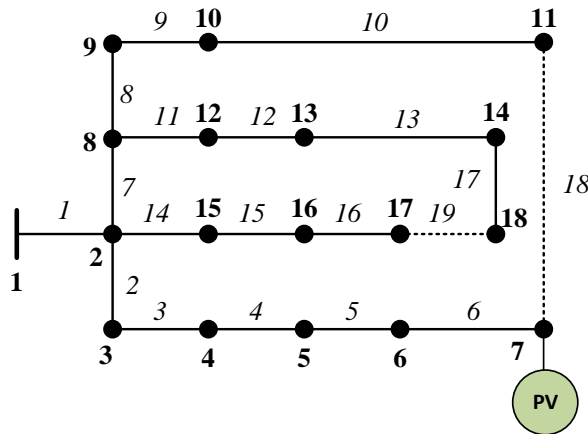
**Bảng 4. 2.** Khung giờ và giá điện

Khung giờ	Khung giờ cao điểm	Khung giờ bình thường	Khung giờ thấp điểm
Thời gian	9 giờ - 11 giờ 17 giờ - 20 giờ	4 giờ - 9 giờ 11 giờ - 17 giờ 20 giờ - 22 giờ	22 giờ - 4 giờ
Giá điện (\$/kWh)	0,12890	0,070	0,04540

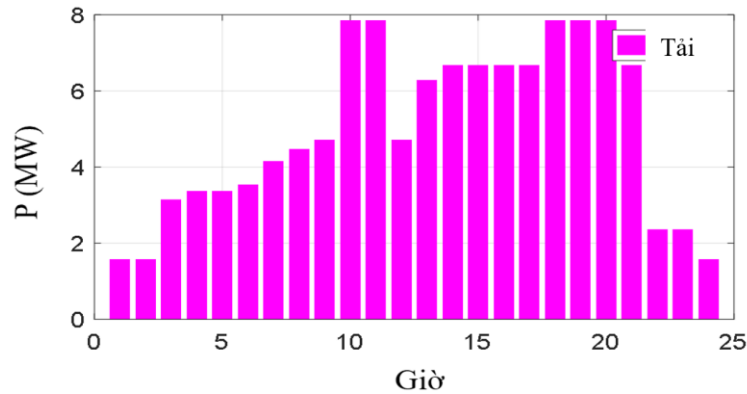
Giả định thời gian xả và sạc là bằng nhau ( $t= 1$  giờ) và công suất định mức giả định là 1 MW. Hệ số phạt  $p$  được chọn với giá trị là 10.000. Thời gian biểu và giá mua điện năng như ở Bảng 4.2. Phương pháp đề nghị sử dụng thuật toán CSA và được so sánh với các thuật toán GA, SFO và PFA để thể hiện độ tin cậy của thuật toán CSA cho bài toán tối ưu công suất vận hành và vị trí BESS trên LĐPP 18 nút và LĐPP 33 nút. Trong đó, GA dựa trên một ý tưởng về thuyết tiến hóa [107] được ứng dụng thành công trong nhiều bài toán kỹ thuật, SFO là thuật toán mới dựa trên ý tưởng chuyển động của hoa hướng dương về phía mặt trời [109] và PFA lấy ý tưởng về sự di chuyển và phân cấp lãnh đạo của bầy động vật để tìm kiếm thức ăn [108]. Ở các bài toán tối ưu với các mục tiêu khác nhau thì thuật toán SFO và PFA đã cho thấy hiệu quả khi so sánh với các thuật toán khác [71], [109].

#### 4.4.1. LDPP 18 nút

Hệ thống 18 nút với điện áp là 10 kV, sơ đồ đơn tuyến như ở Hình 4.4. Các dữ liệu của nút ở Phụ lục 1 và dữ liệu của đường dây ở Phụ lục 2 được tham khảo tài liệu [113]. Tỷ lệ loại phụ tải và tỷ lệ sử dụng của từng loại phụ tải tại mỗi khoảng thời gian trong ngày được ở Phụ lục 3 và Phụ lục 4. Tổng tải của LDPP trong giai đoạn khảo sát được thể hiện ở Hình 4.5, với PV nối vào vị trí là nút 7 có công suất phát như Hình 4.6. Với giá của PV được giả định như giá điện của Bảng 4.2 và vị trí công suất được giả định là đặt ở vị trí như Hình 4.4.

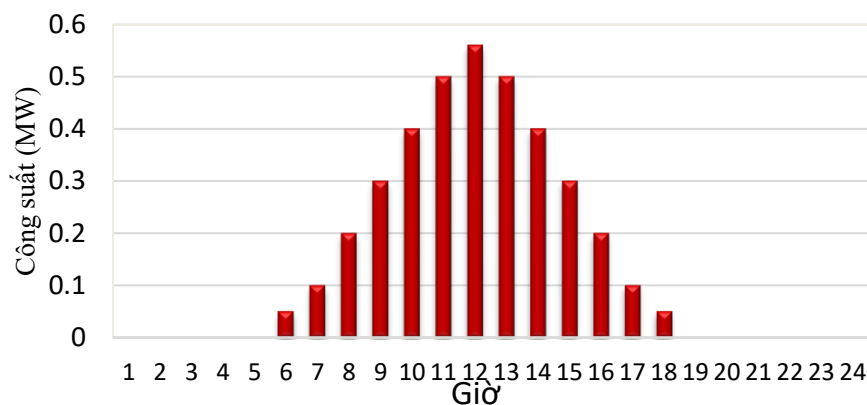


**Hình 4. 4.** LDPP 18 nút có PV tham gia vào hệ thống



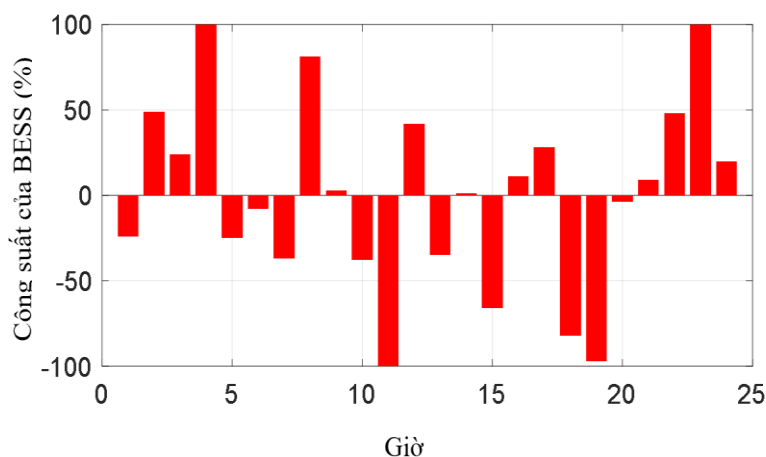
**Hình 4. 5.** Tải của LDPP 18 nút

Để tối ưu công suất và vị trí trong mỗi giờ của BESS, các tham số của CSA bao gồm  $n$  và  $iter_{max}$  được chọn tương ứng là 20 và 50, thực hiện trong 30 lần chạy và giải pháp tốt nhất thu được trong các lần chạy được coi là giải pháp tối ưu. Các tham số kiểm soát bao gồm quy mô dân số và số lần lặp lại của GA, SFO và PFA được chọn giống với CSA.



**Hình 4. 6.** Công suất phát của PV

Sau khi thực hiện tìm kiếm tối ưu cho công suất vận hành và vị trí bằng phương pháp CSA thì vị trí BESS là nút 15 và công suất vận hành 24 giờ của BESS theo % công suất định mức là  $\{-24; 49; 24; 100; -25; -8; -37; 81; 3; -38; -100; 42; -35; 1; -66; 11; 28; -82; -97; -4; 9; 48; 100; 20\}$ . Hình 4.7 cho thấy công suất vận hành của BESS ở mỗi giờ là nằm trong giới hạn cho phép và tổng điện năng trong khoảng 24 giờ bằng không. Điều này cho thấy BESS có thể thực hiện vận hành cho ngày tiếp theo với tổng điện năng trong thời gian khảo sát là bằng không.

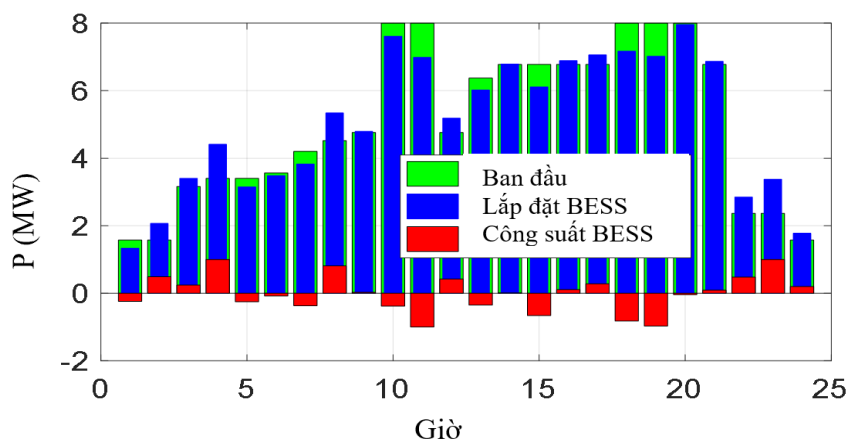


**Hình 4. 7.** Công suất vận hành của BESS - LDPP 18 nút

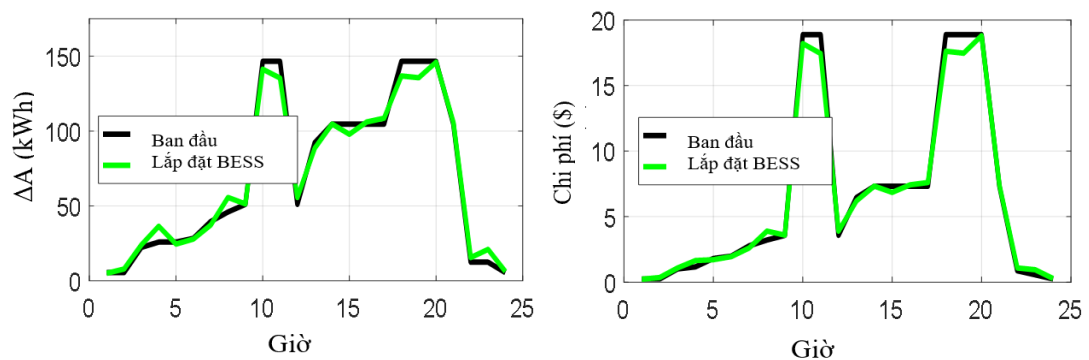
Để xác định khả năng lưu trữ của BESS, điều đầu tiên là tính tổng điện năng tích lũy trong 24 giờ. Lúc này, giá trị tuyệt đối của phần tử lớn nhất chính là phần dung lượng. Vì vậy, tổng điện năng tích lũy trong 24 giờ là  $\{-24; 25; 49; 149; 124; 116; 79; 160; 163; 125; 25; 67; 32; 33; -33; -22; 6; -76; -173; -177; -168; -120; -20; 0\}$ . Giá trị lớn nhất là 177 tương ứng dung lượng là 1,77 MWh và đây chính là dung lượng BESS cần thiết để vận hành. Kết quả từ phương pháp CSA cho LDPP 18 nút

như Bảng 4.3. Với kết quả này, cho thấy chi phí mua điện được giảm từ 10523,5441 đô la (\$) xuống còn 10265,2634 \$. Khi có BESS tham gia vào LĐPP 18 nút thì chi phí mua điện năng giảm được 258,2807 \$ tương ứng mức giảm 2,45% trong ngày.

Hình 4.8 thể hiện công suất được mua trước khi có BESS và sau khi có BESS của hệ thống. Trong giờ cao điểm BESS xả năng lượng đã lưu trữ để cấp cho hệ thống. Ở đây, ở thời gian thứ 10 và thứ 11 (thời gian từ 9 đến 11 giờ) và khoảng thời gian thứ 18; thứ 19 và thứ 20 (thời gian từ 17 đến 20 giờ) với công suất BESS cung cấp tương ứng là 38%; 100%; 82%; 97 và 4% của công suất định mức. Ở các giờ thấp điểm và bình thường, BESS sẽ được sạc để lưu trữ. Chẳng hạn, ở các khoảng thời gian thứ 2; thứ 3; thứ 4; thứ 23 và thứ 24 thì BESS được sạc lần lượt bằng 49%; 24%; 100%; 100% và 20% công suất định mức. Như vậy có thể thấy, việc lắp đặt BESS cũng đã góp phần giảm đỉnh tải trong giờ cao điểm.



**Hình 4. 8.** Công suất mua của LĐPP 18 nút khi có hoặc không có BESS

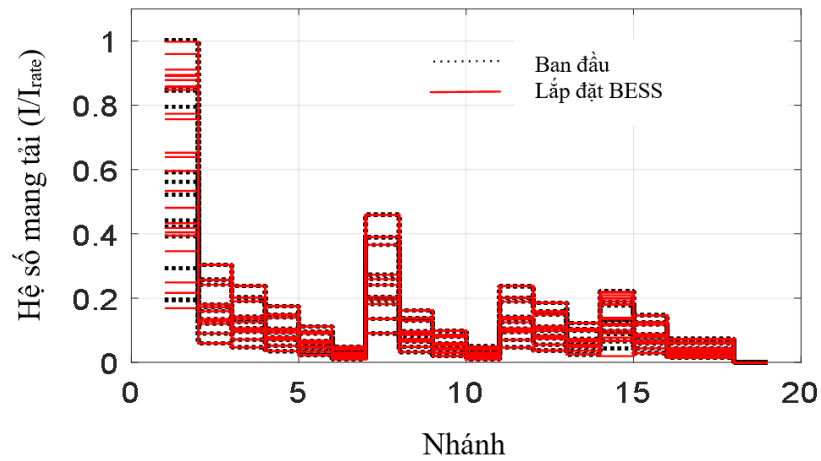


**Hình 4. 9.** Giá trị của tổn thất năng lượng và chi phí tổn thất năng lượng khi có BESS - LĐPP 18 nút

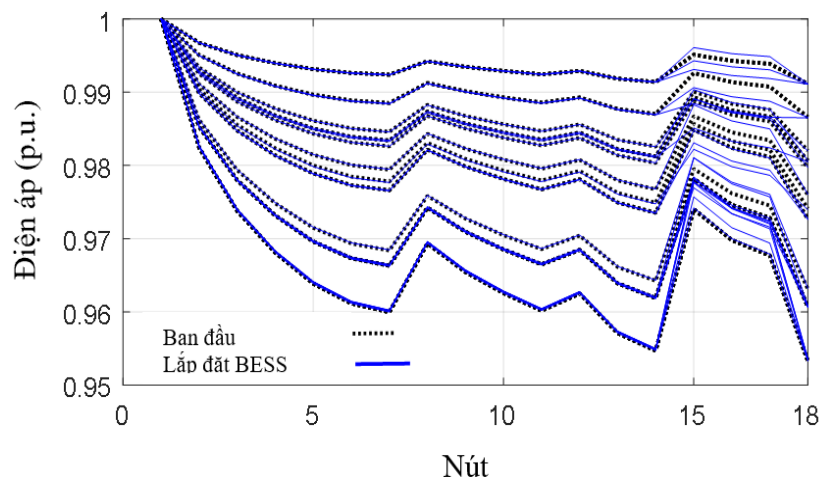
**Bảng 4. 3.** Kết quả sau khi lắp đặt BESS đối với LDPP 18 nút

Trạng thái	Giá trị hàm thích nghi	Chi phí mua điện (\$)	Chi phí tiết kiệm (\$)	$\Delta A$ (kWh)	Chi phí $\Delta A$ (\$)
Ban đầu	10682,3856	10523,5441	-	1679,4449	158,8308
Lắp đặt BESS	10420,9595	10265,2634	258,2807	1674,7208	155,6961

Ngoài ra, kết quả trong Bảng 4.3 và Hình 4.9 đã thể hiện tổn thất năng lượng và chi phí tổn thất năng lượng ở các khung giờ cao điểm được giảm khi có BESS tham gia vào hệ thống. Hình 4.10 và Hình 4.11 cũng thể hiện rằng, lắp đặt BESS không gây tác động xấu đến dòng điện và cấu hình điện áp của hệ thống.



**Hình 4. 10.** Dòng điện nhánh khi có BESS - LDPP 18 nút



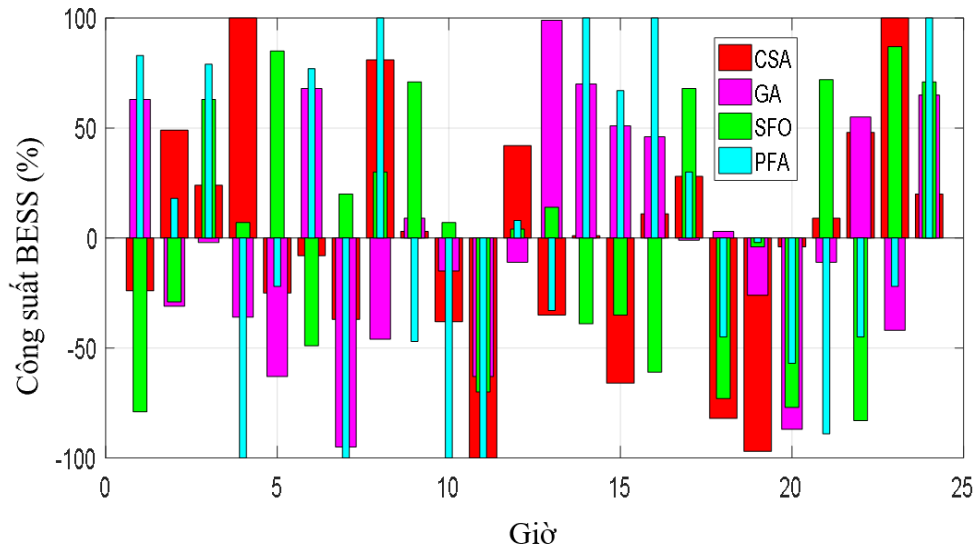
**Hình 4. 11.** Điện áp nút khi có BESS - LDPP 18 nút

So sánh giữa phương pháp CSA với GA, SFO và PFA thì kết quả tốt nhất trong 30 lần chạy độc lập của phương pháp CSA, GA, SFO và PFA như Bảng 4.4. Trong khi phương pháp GA có được dung lượng và vị trí của BESS là 2,22 MWh tại nút thứ 9. Còn đối với phương pháp SFO thì dung lượng và vị trí của BESS đạt được là 1,58 MWh tại nút thứ 3 và đối với phương pháp PFA thì dung lượng và vị trí của BESS là 1,8 MW tại nút thứ 18. Công suất vận hành của BESS (trong 24 giờ) sau khi thực hiện phương pháp CSA, GA, SFO và PFA như Hình 4.12.

**Bảng 4. 4.** Các kết quả tính toán của CSA, GA, SFO và PFA - LDPP 18 nút

Phương pháp	Vị trí (nút)	Dung lượng (MWh)	Giá trị hàm thích nghi	Chi phí mua điện (\$)	Chi phí tiết kiệm (\$)	$\Delta A$ (kWh)	Chi phí $\Delta A$ (\$)
Ban đầu	-	-	10693,0598	10523,5441	-	1679,4449	158,8308
CSA	15	1,77	10420,9595	10265,2634	258,2807	1674,7208	155,6961
GA	9	2,22	10570,5415	10407,4480	116,0961	1705,2337	157,5186
SFO	3	1,58	10532,4499	10364,9542	158,5899	1689,2404	157,4761
PFA	18	1,8	10461,2865	10304,1091	219,435	1783,7335	157,1775

Từ Bảng 4.4, cho thấy rằng chi phí điện năng mua được bằng phương pháp CSA là nhỏ nhất so với chi phí của phương pháp GA, SFO và PFA. Phương pháp lắp đặt BESS mà CSA đạt được có tổng chi phí mua điện là 10265,2634 \$ trong khi phương pháp GA, SFO và PFA thu được tương ứng là 10407,4480 \$; 10364,9542 \$ và 10304,1091 \$. So với hệ thống ban đầu, phương pháp đề nghị CSA giúp tiết kiệm 258,2807 \$ trong khi số tiền tiết kiệm được của các phương pháp GA, SFO và PFA lần lượt là 116,961 \$; 158,5899 \$ và 219,435 \$. Tương tự, chi phí tổn thất năng lượng của phương pháp từ CSA là 155,6961 \$ là thấp nhất so với các phương pháp từ GA, SFO và PFA lần lượt là 157,5186 \$; 157,4761 \$ và 157,1775 \$.

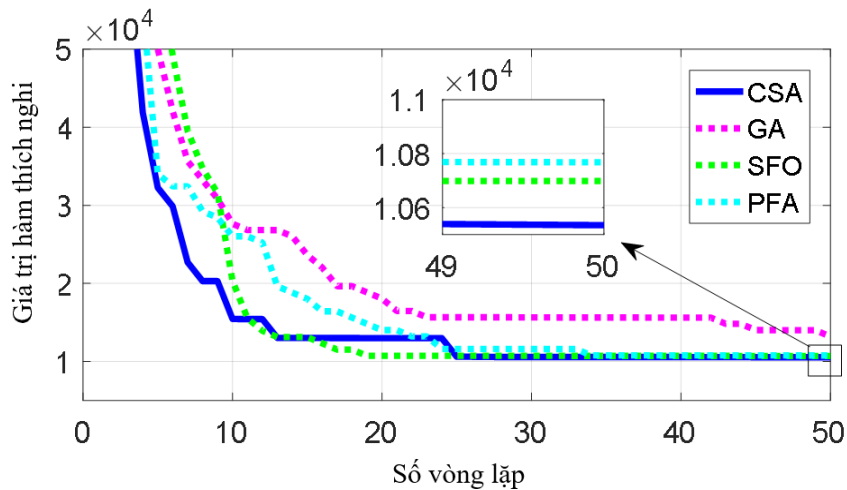


**Hình 4. 12.** Công suất vận hành BESS với CSA, GA, SFO và PFA - LDPP 18 nút

**Bảng 4. 5.** Hiệu quả của CSA, GA, SFO và PFA khi có BESS cho LDPP 18 nút

Phương pháp	CSA	GA	SFO	PFA
Giá trị thích nghi cực tiểu	10420,9595	10570,5415	10532,4499	10461,2865
Giá trị thích nghi trung bình	10534,7008	13186,7217	10698,2309	10767,8222
Giá trị thích nghi cực đại	10624,4975	34809,9839	11028,3392	11175,5319
Độ lệch chuẩn	58,6329	7307,463	111,2877	152,4096
Số lần hội tụ trung bình	123,3688	28,5333	27,6667	40,1667
Thời gian (s)	106,6542	54,951	56,0792	57,5677

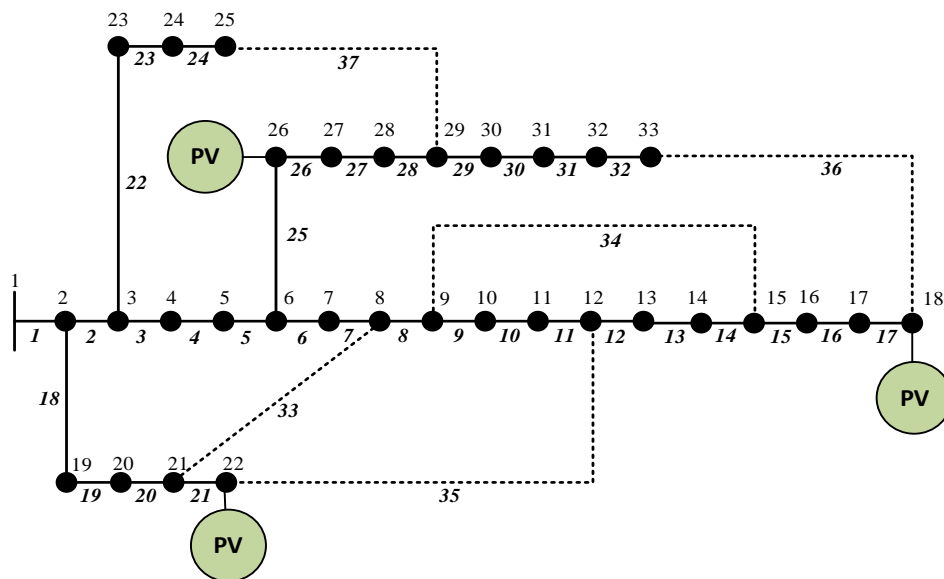
Hiệu quả của phương pháp CSA, GA, SFO và PFA cho LDPP 18 nút trong 30 lần chạy như ở Bảng 4.5. Từ kết quả, cho thấy rằng mặc dù thời gian tính toán và số lần lặp hội tụ của phương pháp CSA là cao hơn phương pháp GA, SFO và PFA. Tuy nhiên giá trị tối đa, tối thiểu, trung bình và độ lệch chuẩn của phương pháp CSA nhỏ hơn các giá trị của phương pháp GA, SFO và PFA. Đặc tính hội tụ trung bình trong 30 lần chạy của các giải pháp như ở Hình 4.13. Từ hình vẽ cho thấy phương pháp CSA có xu hướng hội tụ về giá trị nhỏ hơn phương pháp GA, SFO và PFA. Vì vậy, phương pháp CSA đáng tin cậy và hiệu quả hơn phương pháp GA, SFO và PFA cho việc tối ưu lắp đặt BESS trên LDPP.



**Hình 4. 13.** Đường cong hội tụ của PFA, SFO, GA và CSA - LĐPP 18 nút

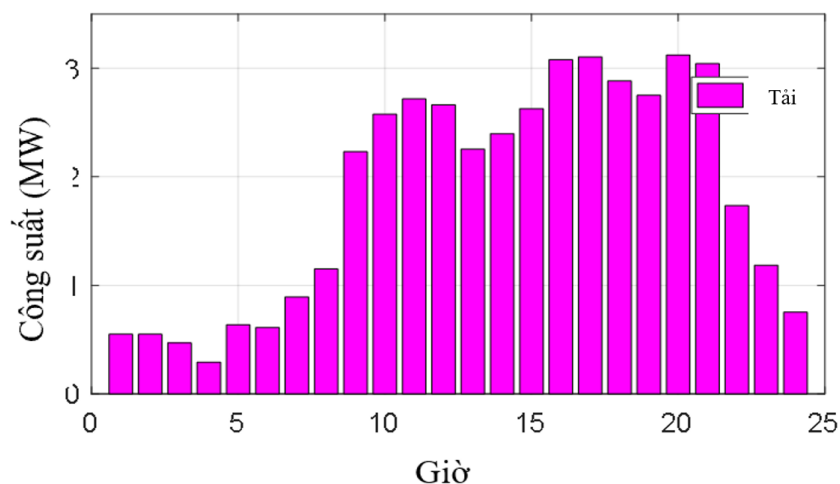
#### 4.4.2. LĐPP 33 nút

LĐPP 33 nút được trình bày như trong Hình 4.14 có mức điện áp là 12,66 kV. Các thông số tải các nút ở Phụ lục 5 và đường dây ở Phụ lục 6 của LĐPP được tham khảo từ tài liệu [59]. Tỷ lệ loại tải trong Phụ lục 7 và tỷ lệ sử dụng của mỗi loại tải trong Phụ lục 8 [71]. Tổng tải của hệ thống trong giai đoạn khảo sát được thể hiện trong Hình 4.15. Đối với hệ thống này, các tham số CSA, GA, SFO và PFA gồm  $n$  và  $iter_{max}$  được chọn tương ứng là 20 và 100. Các DG được kết nối vào LĐPP là 3 PV, vị trí kết nối là nút 18, nút 22 và nút 26 như Hình 4.14.



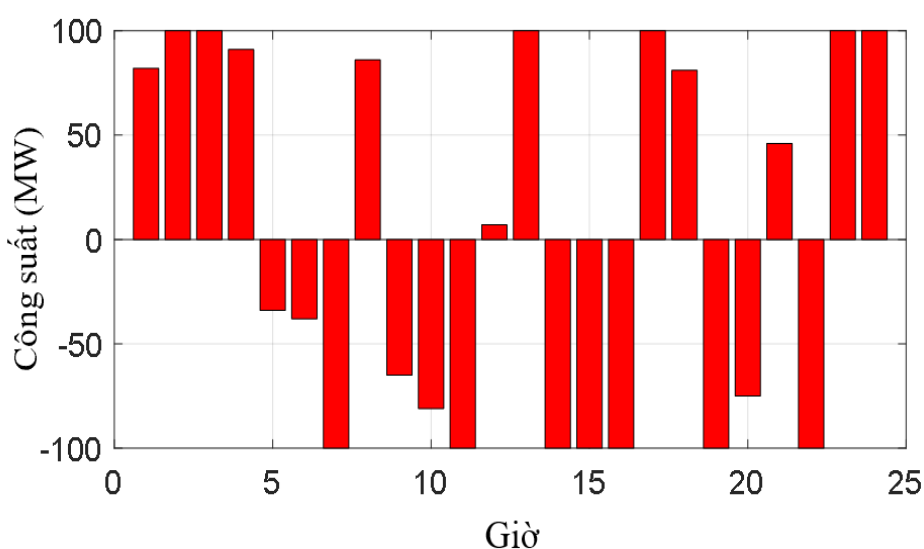
**Hình 4. 14.** LĐPP 33 nút có 3 PV tham gia vào hệ thống





**Hình 4. 15.** Tải của LDPP 33 nút

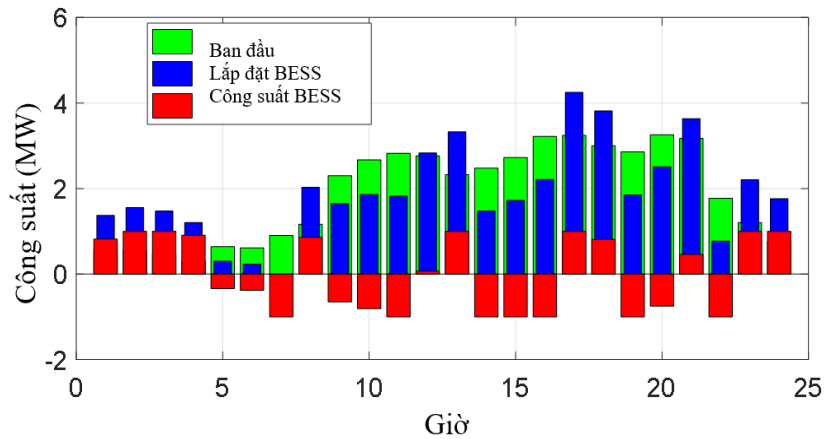
Đối với LDPP 33 nút, khi phương pháp CSA tối ưu BESS thì vị trí là nút 2 và công suất vận hành trong 24 giờ theo % công suất định mức là {82; 100; 100; 91; -34; -38; -100; 86; -65; -81; -100; 7; 100; -100; -100; -100; 100; 81; -100; -75; 46; -100; 100; 100}. Công suất sạc và xả của BESS như Hình 4.16, công suất vận hành nằm trong định mức và tổng điện năng trong 24 giờ là bằng không. Điều này cho thấy BESS có thể thực hiện vận hành cho ngày tiếp theo. BESS có tổng điện năng tích lũy là {82; 182; 282; 373; 339; 301; 201; 287; 222; 141; 41; 48; 148; 48; -52; -152; -52; 29; -71; -146; -100; -200; -100; 0}. Giá trị lớn nhất là 373,0 tương ứng với dung lượng lưu trữ là 3,73 MWh và đây chính là dung lượng cần thiết của BESS.



**Hình 4. 16.** Công suất vận hành của BESS - LDPP 33 nút

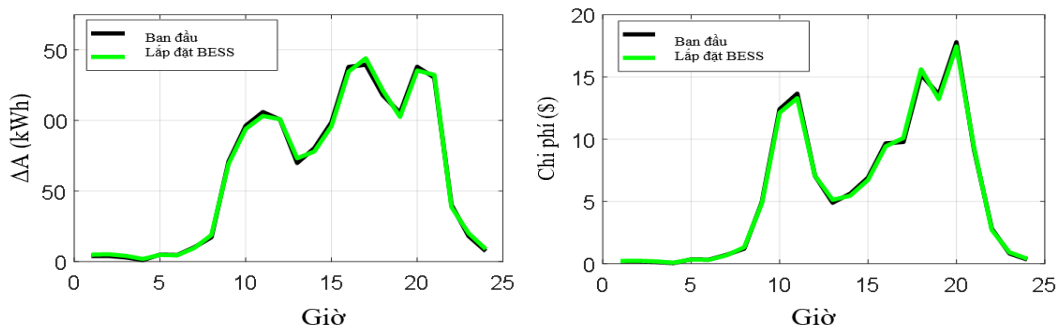
**Bảng 4. 6.** Kết quả sau khi lắp đặt BESS đối với LDPP 33 nút

Trạng thái	Giá trị hàm thích nghi	Chi phí mua điện (\$)	Chi phí tiết kiệm (\$)	$\Delta A$ (kWh)	Chi phí $\Delta A$ (\$)
Ban đầu	4117,2242	3971,4943	-	1506,884	137,777
Lắp đặt BESS	3813,0712	3667,8305	303,6638	1506,4889	137,1419



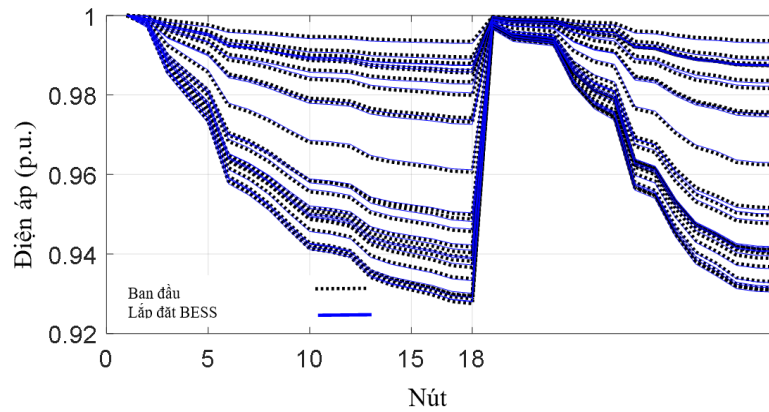
**Hình 4. 17.** Công suất mua của LDPP 33 nút khi có hoặc không có BESS

Kết quả từ phương pháp CSA cho LDPP 33 nút ở Bảng 4.6. Kết quả cho thấy chi phí mua điện năng đã giảm 303,6638 \$ (giảm 7,65%) trong 24 giờ. Hình 4.17 thể hiện công suất được mua trước khi có BESS và sau khi có BESS trong hệ thống. Trong giờ cao điểm BESS xả năng lượng đã lưu trữ để cấp cho hệ thống. Ở đây, từ 9 giờ đến 11 giờ và từ 18 giờ đến 20 giờ công suất của BESS cung cấp cho hệ thống lần lượt là 81%; 100%; 100% và 75% công suất định mức của BESS. Ở các giờ thấp điểm và tiêu chuẩn, BESS sẽ được sạc để lưu trữ. Như vậy, lắp đặt BESS ngoài việc giảm chi phí mua điện năng, BESS cũng góp phần giảm đỉnh tải trong giờ cao điểm và giảm tổn thất năng lượng của hệ thống khi có BESS như Hình 4.18.

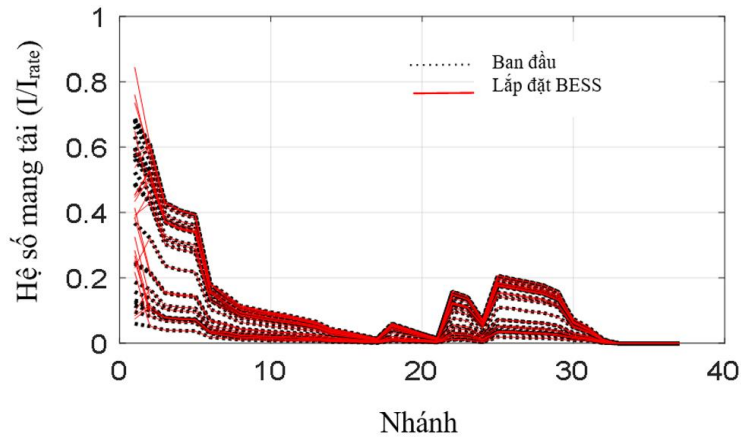


**Hình 4. 18.** Giá trị tổn thất năng lượng và chi phí tổn thất năng lượng khi có BESS - LDPP 33 nút

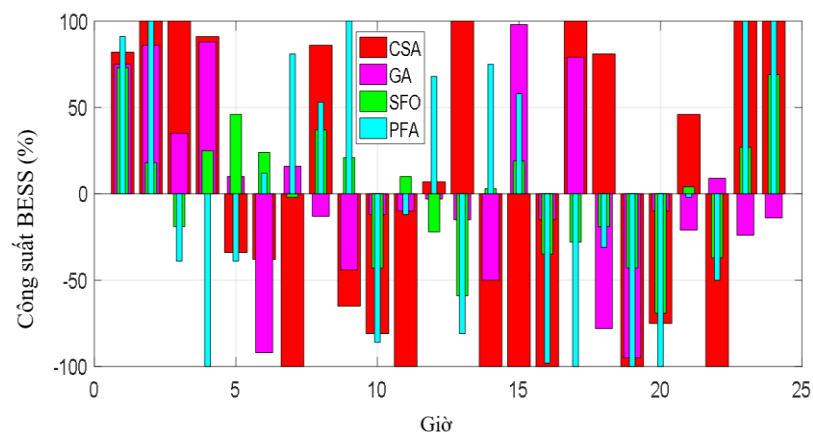
Hình 4.18 cũng cho thấy với dung lượng và vị trí tối ưu của BESS đã làm giảm tổn thất năng lượng cũng như chi phí tổn thất năng lượng của hệ thống. Hình 4.19 và Hình 4.20 đã cho thấy khi lắp đặt BESS thì nó không tác động xấu đến dòng điện và điện áp của hệ thống.



**Hình 4.19.** Điện áp nút khi có BESS - LDPP 33 nút



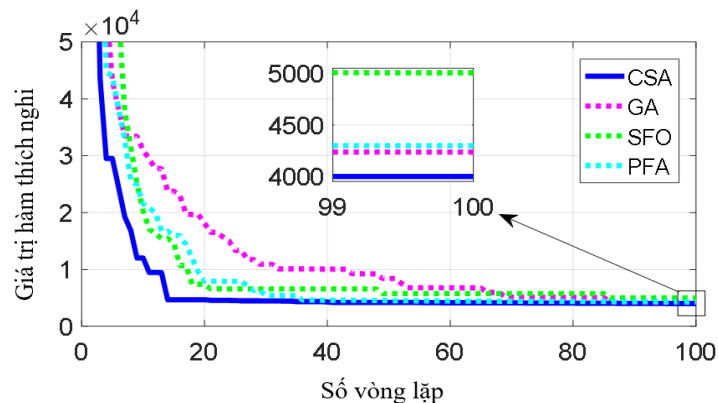
**Hình 4.20.** Dòng điện nhánh khi có BESS- LDPP 33 nút



**Hình 4.21.** Công suất vận hành BESS với CSA, GA, SFO và PFA - LDPP 33 nút

**Bảng 4. 7.** Các kết quả tính toán của CSA, GA, SFO và PFA - LĐPP 33 nút

Phương pháp	Vị trí (nút)	Dung lượng (MWh)	Giá trị thích nghi	Chi phí mua điện (\$)	Chi phí tiết kiệm (\$)	$\Delta A$ (kWh)	Chi phí $\Delta A$ (\$)
Ban đầu	-	-	4117,2242	3971,4943	-	1506,884	137,777
CSA	2	3,73	3813,0712	3667,8305	303,6638	1506,4889	137,1419
GA	3	2,94	3943,8311	3787,6752	183,8191	1505,0175	135,1959
SFO	10	2,23	3945,0977	3815,5320	155,9623	1452,1091	125,8681
PFA	3	2,81	3845,8422	3711,6225	259,8718	1506,5038	133,5666



**Hình 4. 22.** Đường cong hội tụ của PFA, SFO, GA và CSA - LĐPP 33 nút

Hiệu quả của phương pháp CSA, GA, SFO và PFA khi có BESS cho LĐPP 33 nút có 3 PV, như Bảng 4.8. Tương tự như LĐPP 18 nút, mặc dù thời gian tính toán và số lần lặp hội tụ trung bình của phương pháp CSA cao hơn so với phương pháp GA, SFO và PFA. Tuy nhiên các giá trị tối đa, trung bình, tối thiểu và độ lệch chuẩn của hàm thích nghi của phương pháp CSA nhỏ hơn các giá trị của phương pháp GA, SFO và PFA, như Hình 4.22.

Phương pháp CSA có kết quả tốt nhất trong 30 lần chạy độc lập so với các phương pháp từ GA, SFO và PFA như Bảng 4.7. Trong khi phương pháp GA, SFO và PFA có được dung lượng và vị trí của BESS lần lượt là 2,94 MWh tại nút thứ 3;

2,23 MWh tại nút thứ 10 và 2,81 MWh tại nút thứ 3. Chi tiết về công suất vận hành của BESS của các phương pháp như Hình 4.21. Các kết quả tính toán của phương pháp CSA, GA, SFO và PFA cho LDPP 33 nút như Bảng 4.7. Kết quả của phương pháp CSA đã cho thấy, BESS giúp giảm chi phí mua điện từ ban đầu là 3971,4943 \$ xuống còn 3667,8305 \$ tương ứng với chi phí mua năng lượng được tiết kiệm là 303,6638 \$. Trong khi phương pháp GA, SFO và PFA số tiền tiết kiệm được là 183,8191 \$; 155,9623 \$ và 259,8718 \$ là thấp hơn lần lượt là 119,8447 \$; 147,7015 \$ và 43,792 \$ so với CSA. Đối với LDPP 33 nút, mặc dù chi phí tổn thất năng lượng của phương pháp CSA là 137,1419 \$ thấp hơn so LDPP không có BESS là 137,777 \$ và cao hơn so với phương pháp GA, SFO và PFA tương ứng là 135,1959\$, 125,8681\$ và 133,5666 \$. Tuy nhiên, kết quả rõ ràng là chi phí tiết kiệm của phương pháp CSA vượt trội hơn phương pháp GA, SFO và PFA. Bảng 4.8 cũng cho thấy hiệu quả của phương pháp CSA tốt hơn so với các phương pháp GA, SFO và PFA khi có BESS cho LDPP 33 nút.

**Bảng 4. 8.** Hiệu quả của CSA, GA, SFO và PFA khi có BESS cho LDPP 33 nút

Phương pháp	CSA	GA	SFO	PFA
Thích nghi cực tiểu	3813,0712	3943,8311	3945,0977	3845,8422
Thích nghi trung bình	3998,0242	4235,0721	5005,2403	4297,219
Thích nghi cực đại	4189,6828	4793,4513	29803,6606	5885,5111
Độ lệch chuẩn	70,4216	228,6883	4685,2723	485,7155
Số lần hội tụ trung bình	55,1	63,7667	65,5333	86,6333
Thời gian (s)	237,4453	122,6167	122,6141	127,1943

#### 4.5. Kết luận chương 4

Chương 4 trình bày bài toán mở rộng LDPP thông qua lắp đặt BESS. Để tối ưu công suất và vị trí BESS cần xem xét tối ưu công suất vận hành trong 24 giờ và vị trí lắp đặt với mục tiêu là giảm chi phí mua điện và chi phí tổn thất năng lượng. Mở

rộng công suất BESS tham gia vào LDPP để vận hành LDPP nhằm giảm chi phí năng lượng, làm mịn công suất của RES và cải thiện các yếu tố kỹ thuật. Hai LDPP được kiểm tra là LDPP 18 nút và LDPP 33 nút đã cho thấy sau khi tối ưu việc lắp đặt BESS, chi phí mua điện giảm 2,45% và 7,65% cho LDPP 18 nút và LDPP 33 nút. BESS không những làm giảm chi phí điện năng mà còn giảm đỉnh tải, giảm tổn thất năng lượng. Ngoài ra, kết quả của phương pháp đề nghị cho thấy phương pháp CSA là hữu hiệu hơn phương pháp GA, SFO và PFA cho bài toán tối ưu BESS trên LDPP. Bài toán đề nghị tối ưu lắp đặt BESS trên LDPP đã được nghiên cứu, thực hiện và công bố trong công trình số [4] và công trình số [6].

# CHƯƠNG 5

## KẾT LUẬN

### 5.1. Kết luận

Nội dung luận án “Mở rộng nguồn điện phân tán và bộ dự trữ năng lượng trên lưới điện phân phối” đã nghiên cứu, phân tích và đề nghị bài toán mở rộng LĐPP, mở rộng công suất của nguồn điện phân tán (DG) và mở rộng công suất vận hành của bộ dự trữ năng lượng (ESS) để nâng cao hiệu quả hoạt động LĐPP. Luận án đề xuất ba bài toán mới và một bài toán áp dụng cho LĐPP Việt Nam, các bài toán như sau:

Bài toán 1: Mở rộng LĐPP thông qua xác định vị trí và công suất tối ưu của DG có xét tái cấu hình lưới điện phân phối (DNR). Luận án đưa ra một bài toán mới để giải quyết vấn đề tối ưu vị trí và công suất của DG thông qua hai giai đoạn. Giai đoạn I - Tối ưu lắp đặt DG trong LĐPP kín và Giai đoạn II - Tối ưu khóa mở để lưới điện vận hành hở. Bài toán đề nghị thực hiện tối ưu lắp đặt DG có xét đến DNR với hàm mục tiêu là cực tiểu tổn thất công suất. Bài toán đề nghị là bài toán mới trong tối ưu lắp đặt DG có xét DNR bên cạnh các bài toán tối ưu bài toán đồng thời vị trí, công suất và DNR (đồng thời) và bài toán tối ưu vị trí và sau đó tối ưu công suất và DNR (VT-CS và DNR). Bài toán đề nghị có ưu điểm là đưa ra lời giải tối ưu toàn cục. Bài toán đề nghị cho thấy số biến giảm cho mỗi giai đoạn của thuật toán tối ưu bằng cách chia ra hai giai đoạn. Ngoài ra, bài toán đề nghị hai giai đoạn cũng cho thấy phù hợp với việc lắp đặt DG trong dài hạn được ưu tiên trước và việc DNR là ngắn hạn thực hiện sau. LĐPP 33 nút và 69 nút được kiểm tra và cho thấy tính hiệu quả bài toán đề nghị. Bài toán đề nghị sử dụng thuật toán RRA và so sánh với COA và GA đã cho kết quả tương tự nhau. Ngoài ra, bài toán hai giai đoạn cũng được so sánh với bài toán đồng thời và bài toán tối ưu vị trí trước và sau đó tối ưu công suất và DNR để cho thấy tính hiệu quả của nó. Khi tối ưu cho LĐPP 33 nút với bài toán hai giai đoạn bằng RRA; đồng thời (RRA), đồng thời (CSA); VT-CS và DNR (FWA) và VT-CS và DNR (HSA) với mức giảm % tổn thất công suất lần lượt là 73%; 74,92%; 73,75%; 70%; 66,89% và 63,95%. Tương tự, LĐPP 69 nút là 82,52%; 84,35%; 83,54%; 82,55% và 82,08%. Các kết quả mô phỏng của bài toán đề nghị cho thấy tổn thất công

suất toàn hệ thống tương tự với bài toán đồng thời và tốt hơn so với bài toán VT- CS và DNR. Kết quả cũng cho thấy các thuật toán RRA, COA và GA là hiệu quả để tối ưu lắp đặt DG cho LĐPP có DNR. Bài toán đề nghị đã được thực hiện và công bố trong công trình [1], [5] và công trình liên quan [7].

Bài toán 2: Xác định cấu hình LĐPP khi mở rộng công suất của pin quang điện (PV). Luận án đề nghị thuật toán trao đổi nhánh với công suất nhánh trung bình (CSNTB) cải tiến nhằm xác định cấu hình vận hành LĐPP khi PV được mở rộng công suất với mục tiêu cực tiểu tổn thất năng lượng. Ưu điểm của bài toán đề nghị là đơn giản, dễ thực hiện và chính xác trong việc xác định cấu hình của LĐPP. LĐPP 18 nút được thử nghiệm cho bài toán sử dụng CSNTB cải tiến và đã cho thấy được hiệu quả khi LĐPP có PV. LĐPP 33 nút được áp dụng thử nghiệm cho phương pháp sử dụng kỹ thuật trao đổi nhánh và CSNTB cải tiến. Tổn thất năng lượng của phương pháp đề nghị là 2075,51 kWh, phương pháp sử dụng đồ thị tải là 2243,98 kWh và phương pháp EP là 2334,28 kWh. Kết quả cho thấy phương pháp đề nghị là đơn giản, nhanh chóng xác định được cấu hình lưới và có độ chính xác cao khi so sánh với bài toán khác. Bài toán đề nghị được nghiên cứu, thực hiện và công bố ở công trình [2] và công trình liên quan [10].

Bài toán 3: Áp dụng mở rộng LĐPP Chư Prông - Gia Lai của Việt Nam. LĐPP Chư Prông được áp dụng để mở rộng thông qua lắp đặt DG nhằm tối đa công suất tham gia của DG và cực tiểu tổn thất công suất của hệ thống. Bài toán đề nghị ba giai đoạn lắp đặt DG tương ứng với ba vị trí và công suất khả thi cho phép lắp đặt vào LĐPP Chư Prông. Thuật toán COA và RRA được sử dụng hiệu quả cho bài toán 1 và tiếp tục được áp dụng để thử nghiệm cho vấn đề lắp đặt ba DG cho LĐPP Chư Prông. Kết quả với thuật toán COA cho kết quả tổng công suất của DG tham gia vào LĐPP là 4,406 MW tốt hơn so với thuật toán RRA là 3,389 MW và tổn thất công suất của COA là 43,116 thấp hơn so với RRA là 45,426 kW. Từ kết quả ba DG đã được tối ưu, đề xuất một kế hoạch lắp đặt mở rộng DG cho LĐPP Chư Prông qua ba giai đoạn. LĐPP Chư Prông lắp đặt DG ở giai đoạn 1 công suất là 0,6609 MW (nút 221) có tổn thất công suất từ 81,566 kW giảm xuống còn 77,26 kW (giảm 5,28%). Giai đoạn 2, lắp đặt thêm DG với công suất là 1,4898 MW (nút 164), tổn thất công suất giảm còn



63,3393 kW (giảm 18,02%). Giai đoạn 3 lắp đặt thêm DG với công suất là 2,2554 MW (nút 48) tổn thất công suất còn 43,1161 kW (giảm 31,93%). Điện áp các nút và dòng điện các nhánh nằm trong phạm vi cho phép. Bài toán mở rộng LĐPP Chư Prông với mục tiêu tối đa công suất và cực tiểu tổn thất công suất được nghiên cứu và công bố trong công trình [3] và công trình liên quan [8], [9].

Bài toán 4: Mở rộng LĐPP thông qua lắp đặt pin dự trữ năng lượng (BESS) để giảm chi phí mua điện. Luận án đề nghị bài toán xác định vị trí và công suất của BESS trên LĐPP nhằm giảm chi phí mua điện cũng như giảm chi phí tổn thất năng lượng. Bài toán đề nghị có điểm mới là đề nghị hàm mục tiêu cực tiểu chi phí năng lượng và áp dụng thuật toán CSA lần đầu tiên cho vấn đề tối ưu vị trí và công suất vận hành của BESS. Việc tối ưu BESS vào LĐPP không những giảm chi phí mua điện, mà còn giảm tổn thất năng lượng và các lợi ích khác. Phương pháp đề nghị thử nghiệm ở LĐPP 18 nút cho thấy chi phí giảm 258,2807 \$ (giảm 2,45%). LĐPP 33 nút, chi phí mua điện giảm 303,6638 \$ (giảm 7,65%). Ngoài ra, tổn thất năng lượng cũng được giảm xuống. Thuật toán CSA cho thấy hiệu quả hơn so với GA, SFO và PFA. Bài toán đề nghị đã được nghiên cứu, thực hiện và công bố trong công trình số [4] và [6].

## **5.2. Hướng nghiên cứu tiếp theo**

Luận án đã phân tích và đề xuất các bài toán mở rộng LĐPP. Tuy nhiên, luận án vẫn còn một số hạn chế là chưa xem xét hết các bài toán mở rộng khác. Nghiên cứu sinh tiếp tục nghiên cứu các bài toán khác như:

- Bài toán mở rộng LĐPP thông qua lắp đặt ESS với hàm đa mục tiêu (mục tiêu kinh tế kết hợp mục tiêu nâng cao các chỉ số vận hành của LĐPP);
- Bài toán mở rộng LĐPP với sự thâm nhập của tua bin gió (WT) và pin quang điện (PV) kết hợp với bộ dự trữ năng lượng (ESS);
- Bài toán tối ưu ESS có xét đến các chi phí đầu tư, chi phí lắp đặt và chi phí vận hành của BESS trên LĐPP.



## BÀI BÁO ĐÃ CÔNG BỐ

- [1]. Anh Viet Truong, **Trieu Ngoc Ton**, Thuan Thanh Nguyen and Thanh Long Duong, ‘Two states for optimal position and capacity of distributed generators considering network reconfiguration for power loss minimization based on runner root algorithm’, *Energies*, vol. 12, no. 1, p. 106, 2019 (SCIE – Q2, IF = 3.343).
- [2]. Anh Viet Truong, **Trieu Ngoc Ton**, Thanh Long Duong, and Phan-Tu Vu, ‘Reconfigure the Distribution Network With Photovoltaic Connection to Minimize Energy Loss Based on Average Branch Power and an Advanced Branch Exchange Algorithm’, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 104572–104581, 2021, doi: 10.1109/access.2021.3098902 (SCIE – Q1, IF = 3.557).
- [3]. **Trieu Ngoc Ton**, Thuan Thanh Nguyen, Viet Anh Truong, and Tu Phan Vu, ‘Optimal Location and Size of Distributed Generators in an Electric Distribution System based on a Novel Metaheuristic Algorithm’, *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 10, no. 1, pp. 5325–5329, 2020, doi: 10.48084/etasr.3372 (ESCI).
- [4]. **Trieu Ngoc Ton**, Thuan Thanh Nguyen, Viet Anh Truong, and Phan-Tu Vu, ‘Optimal location and operation of battery energy storage system in the distribution system for reducing energy cost in 24-hour period’, *Int Trans Electr Energ Syst*, Vol. e12861, No. February, pp. 1–17, 2021 (SCIE – Q2, IF = 2.860).
- [5]. **Tôn Ngọc Triều**, Trương Việt Anh, Vũ Phan Tú, ‘Áp dụng phương pháp Backward / Forward cải tiến trong bài toán tối ưu lưới điện phân phối có kết nối nguồn điện phân tán’, *Tạp chí phát triển KH&CN*, vol. 2, no. 2, 2019 (ĐH Quốc gia Tp. Hồ Chí Minh).
- [6]. **Tôn Ngọc Triều**, Nguyễn Tùng Linh, Trương Việt Anh và Phạm Văn Lói, “Nâng cao công suất của hệ thống pin lưu trữ trên lưới điện phân phối có kết nối năng lượng mặt trời nhằm giảm chi phí,” *TNU J. Sci. Technol.*, vol. 226, no. 16, pp. 11–19, 2021 (ĐH Thái Nguyên).

## CÁC CÔNG BỐ LIÊN QUAN

- [7]. Nguyễn Tùng Linh, Nguyễn Thanh Thuận, **Tôn Ngọc Triều**, Trương Việt Anh, Nguyễn Anh Xuân, ‘Tối ưu vị trí và công suất nguồn điện phân tán có xét đến tái hình cấu hình lưới điện phân phối’, *Tạp chí phát triển KH&CN*, vol. 20, no. K7, pp. 5–14, 2017 (ĐH Quốc gia Tp. HCM).
- [8]. Thuan Thanh Nguyen, **Trieu Ngoc Ton**, Thang Trung Nguyen, Thanh-Phuc Nguyen, and Ngoc Au Nguyen, ‘Optimization of location and size of distributed generations for maximizing their capacity and minimizing power loss of distribution system based on cuckoo search algorithm’, *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 1769–1776, 2021, doi: 10.11591/eei.v10i4.2278 (SCOPUS – Q3, IF = 1.87).
- [9]. **Tôn Ngọc Triều**, Nguyễn Tùng Linh, Trương Việt Anh, Hoàng Ngọc Tuyền, ‘Tối ưu vị trí và công suất nguồn điện phân tán cho hệ thống điện phân phối hình tia không cân bằng sử dụng whale optimization algorithm’, *Tạp Chí Khoa Học Và Công Nghệ Năng Lượng - Trường Đại Học Điện Lực*, vol. 27, pp. 1–13, 2021 (Trường ĐH Điện lực).
- [10]. N. T. Thuan, **T. N. Trieu**, T. V. Anh, and D. T. Long, ‘Service restoration in radial distribution system using continuous genetic algorithm’, *Proceeding 2016 Int. Conf. advanced Technol. Sustain. Dev. ICATSD2016*, pp. 619–628, 2016 (Conference).

# TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] C. L. T. Borges and V. F. Martins, “Multistage expansion planning for active distribution networks under demand and Distributed Generation uncertainties,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 36, no. 1, pp. 107–116, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2011.10.031.
- [2] R. Payasi, A. Singh, and D. Singh, “Review of distributed generation planning: objectives, constraints, and algorithms,” *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 3, pp. 133–153, 2011, doi: 10.4314/ijest.v3i3.68430.
- [3] N. Dharavat, S. K. Sudabattula, and S. Velamuri, “Review on the Integration of Distributed Generations (Solar, Wind) and Electric Vehicles Connected to the Distribution System to Minimize Power Loss and Voltage Profile Enhancement,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2455, no. October, 2022, doi: 10.1063/5.0100957.
- [4] H. Zhang and C. Sun, “Cost-effective iron-based aqueous redox flow batteries for large-scale energy storage application: A review,” *J. Power Sources*, vol. 493, no. May, 2021, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.229445.
- [5] L. Gédéon and F. Guillemot, “Huy động tối đa nguồn tài chính để phát triển ngành năng lượng,” *L’Asie du Sud-Est 2014 bilan, enjeux Perspect.*, pp. 369–399, 2018, doi: 10.4000/books.irasec.2494.
- [6] J. Rockhold, *Kế hoạch Năng lượng sản xuất tại Việt Nam - Bài toán về việc sử dụng tập trung các nguồn lực trong nước của Việt Nam để kích thích đầu tư vào sản xuất năng lượng sạch, an toàn và chi phí hợp lý*. 2019.
- [7] M. A. Hannan *et al.*, “Battery energy-storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues,” *J. Energy Storage*, vol. 42, no. July, p. 103023, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.103023.
- [8] Asian Development Bank, *Handbook on Battery Energy Storage System*, no. December. 2018.
- [9] H. A. Behabtu *et al.*, “A review of energy storage technologies’ application potentials in renewable energy sources grid integration,” *Sustain.*, vol. 12, no. 24, pp. 1–20, 2020, doi: 10.3390/su122410511.
- [10] A. K. M. A. Habib, M. K. Hasan, M. Mahmud, S. M. A. Motakabber, M. I. Ibrahimya, and S. Islam, “A review: Energy storage system and balancing circuits for electric vehicle application,” *IET Power Electron.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–13, 2021, doi: 10.1049/pel2.12013.
- [11] D. Bogdanov *et al.*, “Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability,” *Energy*, vol. 227, p. 120467, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120467.
- [12] C. K. Das, O. Bass, G. Kothapalli, T. S. Mahmoud, and D. Habibi, “Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, no. November 2016, pp. 1205–1230, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.068.
- [13] G. J. May, A. Davidson, and B. Monahov, “Lead batteries for utility energy storage: A review,” *J. Energy Storage*, vol. 15, pp. 145–157, 2018, doi: 10.1016/j.est. 2017. 11.008.
- [14] M. Pesaran H.A, P. D. Huy, and V. K. Ramachandaramurthy, “A review of the

- optimal allocation of distributed generation: Objectives, constraints, methods, and algorithms,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, no. September 2015, pp. 293–312, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.10.071.
- [15] E. S. Ali, S. M. Abd Elazim, and A. Y. Abdelaziz, “Optimal allocation and sizing of renewable distributed generation using ant lion optimization algorithm,” *Electr. Eng.*, 2016, doi: 10.1007/s00202-016-0477-z.
- [16] T. T. Nguyen, T. T. Ngoc, T. T. Nguyen, T. Nguyen, and N. Au, “Optimization of location and size of distributed generations for maximizing their capacity and minimizing power loss of distribution system based on cuckoo search algorithm,” *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 1769–1776, 2021, doi: 10.11591/eei.v10i4.2278.
- [17] R. C. Dugan, T. E. McDermott, and G. J. Ball, “Distribution planning for distributed generation,” *Pap. Electr. Power Conf.*, p. C4, 2000, doi: 10.1109/REPCON.2000.848048.
- [18] A. A. Bayod-Rújula, “Future development of the electricity systems with distributed generation,” *Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 377–383, 2009, doi: 10.1016/j.energy.2008.12.008.
- [19] R. H. A. Zubo, G. Mokryani, H. S. Rajamani, J. Aghaei, T. Niknam, and P. Pillai, “Operation and planning of distribution networks with integration of renewable distributed generators considering uncertainties: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, no. September, pp. 1177–1198, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.10.036.
- [20] W. Lip, J. Shiun, W. Shin, H. Hashim, and C. Tin, “Review of distributed generation (DG) system planning and optimisation techniques: Comparison of numerical and mathematical modelling methods,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 531–573, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.063.
- [21] W. El-Khattam, K. Bhattacharya, Y. Hegazy, and M. M. A. Salama, “Optimal investment planning for distributed generation in a competitive electricity market,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1674–1684, 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.831699.
- [22] B. Singh and J. Sharma, “A review on distributed generation planning,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, no. December 2015, pp. 529–544, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.034.
- [23] R. Viral and D. K. Khatod, “Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 7, pp. 5146–5165, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.05.020.
- [24] N. S. Rau and Y. H. Wan, “Optimum Location of Resources in Distributed Planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 4, pp. 2014–2020, 1994, doi: 10.1109/59.331463.
- [25] S. H. Lee and J. W. Park, “Optimal placement and sizing of multiple dgs in a practical distribution system by considering power loss,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 5, pp. 2262–2270, 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2260117.
- [26] P. S. Georgilakis and N. D. Hatziargyriou, “in Power Distribution Networks : Models , Methods , and Future Research,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3420–3428, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2237043.
- [27] H. Chen, T. Ngoc, W. Yang, C. Tan, and Y. Li, “Progress in electrical energy storage system : A critical review,” *Prog. Nat. Sci.*, vol. 19, no. 3, pp. 291–312, 2009, doi: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014.

- [28] M. Winfield, S. Shokrzadeh, and A. Jones, "Energy policy regime change and advanced energy storage: A comparative analysis," *Energy Policy*, vol. 115, no. January, pp. 572–583, 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2018.01.029.
- [29] E. Hossain, H. M. R. Faruque, M. S. H. Sunny, N. Mohammad, and N. Nawar, "A comprehensive review on energy storage systems: Types, comparison, current scenario, applications, barriers, and potential solutions, policies, and future prospects," *Energies*, vol. 13, no. 14. 2020, doi: 10.3390/en13143651.
- [30] D. Mu, J. Jiang, and C. Zhang, "Online semiparametric identification of lithium-ion batteries using the wavelet-based partially linear battery model," *Energies*, vol. 6, no. 5, pp. 2583–2604, 2013, doi: 10.3390/en6052583.
- [31] S. Koochi-Fayegh and M. A. Rosen, "A review of energy storage types, applications and recent developments," *J. Energy Storage*, vol. 27, no. July 2019, p. 101047, 2020, doi: 10.1016/j.est.2019.101047.
- [32] Y. Yang, S. Bremner, C. Menictas, and M. Kay, "Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, no. June 2017, pp. 109–125, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.047.
- [33] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 511–536, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.09.081.
- [34] A. K. Rohit and S. Rangnekar, "An overview of energy storage and its importance in Indian renewable energy sector: Part II – energy storage applications, benefits and market potential," *J. Energy Storage*, vol. 13, no. October 2017, pp. 447–456, 2017, doi: 10.1016/j.est.2017.07.012.
- [35] K. S. Sambaiah and T. Jayabarathi, "Loss minimization techniques for optimal operation and planning of distribution systems: A review of different methodologies," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 30, no. 2, pp. 1–48, 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12230.
- [36] T. Gözel and M. H. Hocaoglu, "An analytical method for the sizing and siting of distributed generators in radial systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 6, pp. 912–918, 2009, doi: 10.1016/j.epsr.2008.12.007.
- [37] S. Kansal, V. Kumar, and B. Tyagi, "Hybrid approach for optimal placement of multiple DGs of multiple types in distribution networks," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 75, no. September, pp. 226–235, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.09.002.
- [38] A. Keane and M. O'Malley, "Optimal allocation of embedded generation on distribution networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 3, pp. 1640–1646, 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2005.852115.
- [39] A. A. Abou El-Ela, S. M. Allam, and M. M. Shatla, "Maximal optimal benefits of distributed generation using genetic algorithms," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 7, pp. 869–877, 2010, doi: 10.1016/j.epsr.2009.12.021.
- [40] W. Zhang, F. Li, and L. M. Tolbert, "Review of reactive power planning: Objectives, constraints, and algorithms," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 2177–2186, 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2007.907452.
- [41] P. J. Paar C, "Understanding cryptography: a textbook for students and practitioners." p. 875906, 2002.
- [42] Y. M. Atwa and E. F. El-Saadany, "Probabilistic approach for optimal allocation of

- wind-based distributed generation in distribution systems,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 5, no. 1, pp. 79–88, 2011, doi: 10.1049/iet-rpg.2009.0011.
- [43] M. Gandomkar, M. Vakilian, and M. Ehsan, “A genetic-based tabu search algorithm for optimal DG allocation in distribution networks,” *Electr. Power Components Syst.*, vol. 33, no. 12, pp. 1351–1362, 2005, doi: 10.1080/15325000590964254.
- [44] M. H. Moradi and M. Abedini, “A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 34, no. 1, pp. 66–74, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2011.08.023.
- [45] A. Zangeneh, S. Jadid, and A. Rahimi-Kian, “Promotion strategy of clean technologies in distributed generation expansion planning,” *Renew. Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2765–2773, 2009, doi: 10.1016/j.renene.2009.06.018.
- [46] V. Vahidinasab *et al.*, “Overview of Electric Energy Distribution Networks Expansion Planning,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 34750–34769, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2973455.
- [47] P. S. Georgilakis and N. D. Hatziargyriou, “A review of power distribution planning in the modern power systems era: Models, methods and future research,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 121, pp. 89–100, 2015, doi: 10.1016/j.eprsr.2014.12.010.
- [48] V. F. Martins and C. L. T. Borges, “Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2164–2172, 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2122347.
- [49] D. Rama Prabha and T. Jayabarathi, “Optimal placement and sizing of multiple distributed generating units in distribution networks by invasive weed optimization algorithm,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 7, no. 2, pp. 683–694, 2016, doi: 10.1016/j.asej.2015.05.014.
- [50] A. Silvestri, A. Berizzi, and S. Buonanno, “Distributed generation planning using genetic algorithms,” *PowerTech Budapest 99. Abstr. Rec. (Cat. No.99EX376)*, p. 257, 1999, doi: 10.1109/PTC.1999.826689.
- [51] A. Mohamed Imran, M. Kowsalya, and D. P. Kothari, “A novel integration technique for optimal network reconfiguration and distributed generation placement in power distribution networks,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 461–472, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.06.011.
- [52] T. T. Nguyen, A. V. Truong, and T. A. Phung, “A novel method based on adaptive cuckoo search for optimal network reconfiguration and distributed generation allocation in distribution network,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 78, pp. 801–815, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.12.030.
- [53] T. T. Nguyen and A. V. Truong, “Distribution network reconfiguration for power loss minimization and voltage profile improvement using cuckoo search algorithm,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 68, pp. 233–242, 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.12.075.
- [54] A. Bayat, A. Bagheri, and R. Noroozian, “Optimal siting and sizing of distributed generation accompanied by reconfiguration of distribution networks for maximum loss reduction by using a new UVDA-based heuristic method,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 77, pp. 360–371, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.11.039.
- [55] A. B. Damholt, H. Kofod, and A. M. J. Buchan, “Immunocytochemical evidence for



- a paracrine interaction between GIP and GLP-1-producing cells in canine small intestine,” *Cell Tissue Res.*, vol. 298, no. 2, pp. 287–293, 1999, doi: 10.1007/s004419900093.
- [56] A. Mohamed Imran and M. Kowsalya, “A new power system reconfiguration scheme for power loss minimization and voltage profile enhancement using Fireworks Algorithm,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 62, pp. 312–322, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.04.034.
- [57] B. Arandian, R. Hooshmand, and E. Gholipour, “Decreasing activity cost of a distribution system company by reconfiguration and power generation control of DGs based on shuffled frog leaping algorithm,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 61, pp. 48–55, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.03.001.
- [58] M. P. P. and N. D. H. G.J. Peponis, “Distribution network reconfiguration to minimize resistive line losses,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 10, no. No. 3, 1995, doi: 10.1109/APT.1993.673869.
- [59] 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. 1401–1407, 1989, doi: 10.1109/61.25627.
- [60] K. Taleski and D. Rajicid, “Distribution Network Reconfiguration For Energy Loss Reduction,” vol. 12, no. 1, pp. 398–406, 1997.
- [61] G. Merlin; Back, “Search for a minimal - loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system,” in *Of the Fith Power System Conference*, 1975, vol. 1, pp. 1–18, doi: 10.1107/97809553602060000108.
- [62] S. S. H. L. S. Civanlar, J.J. Grainger, H. Yin, “Distribution feeder reconfiguration for loss reduction,” vol. 3, no. 3, pp. 1217–1223, 1988.
- [63] R. Taleski, “Energy summation method for energy loss computation in radial distribution networks,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 2, pp. 1104–1111, 1996, doi: 10.1109/59.496201.
- [64] H. D. De Macedo Braz and B. A. De Souza, “Distribution network reconfiguration using genetic algorithms with sequential encoding: Subtractive and additive approaches,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 582–593, 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2059051.
- [65] M. Sedighzadeh, M. Esmaili, and M. M. Mahmoodi, “Reconfiguration of distribution systems to improve reliability and reduce power losses using imperialist competitive algorithm,” *Iran. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 13, no. 3, pp. 287–302, 2017, doi: 10.22068/IJEEE.13.3.6.
- [66] T. Nagata and H. Sasaki, “An efficient algorithm for distribution network restoration,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 1, no. SUMMER, pp. 54–59, 2001, doi: 10.1109/pess.2001.969982.
- [67] A. S. Bouhouras and D. P. Labridis, “Influence of load alterations to optimal network configuration for loss reduction,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 86, pp. 17–27, 2012, doi: 10.1016/j.epwr.2011.11.023.
- [68] T. Niknam, A. Kavousi Fard, and A. Baziar, “Multi-objective stochastic distribution feeder reconfiguration problem considering hydrogen and thermal energy production by fuel cell power plants,” *Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 563–573, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.02.023.
- [69] V. Farahani, B. Vahidi, and H. A. Abyaneh, “Reconfiguration and capacitor

- placement simultaneously for energy loss reduction based on an improved reconfiguration method,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 587–595, 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2167688.
- [70] K. G. Ing, H. Mokhlis, H. A. Illias, M. M. Aman, and J. J. Jamian, “Gravitational Search Algorithm and Selection Approach for Optimal Distribution Network Configuration Based on Daily Photovoltaic and Loading Variation,” *J. Appl. Math.*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/894758.
- [71] T. T. Nguyen, T. T. Nguyen, L. T. Duong, and V. A. Truong, “An effective method to solve the problem of electric distribution network reconfiguration considering distributed generations for energy loss reduction,” *Neural Comput. Appl.*, vol. 2, 2020, doi: 10.1007/s00521-020-05092-2.
- [72] M. R. Sheibani, G. R. Yousefi, M. A. Latify, and S. H. Dolatabadi, “Energy storage system expansion planning in power systems: A review,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 12, no. 11, pp. 1203–1221, 2018, doi: 10.1049/iet-rpg.2018.0089.
- [73] H. Ebrahimian, S. Barmayoon, and M. Mohammadi, “The price prediction for the energy market based on a new method,” *Econ. Res. Istraživanja*, vol. 31, no. 1, pp. 1–25, 2018, doi: 10.1080/1331677X.2018.1429291.
- [74] Y. Zhu, C. Liu, K. Sun, D. Shi, and Z. Wang, “Optimization of battery energy storage to improve power system oscillation damping,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 3, pp. 1015–1024, 2019, doi: 10.1109/TSTE.2018.2858262.
- [75] V. Kalkhambkar, R. Kumar, and R. Bhakar, “Energy loss minimization through peak shaving using energy storage,” *Perspect. Sci.*, vol. 8, pp. 162–165, 2016, doi: 10.1016/j.pisc.2016.04.022.
- [76] L. A. Wong, V. K. Ramachandaramurthy, S. L. Walker, P. Taylor, and M. J. Sanjari, “Optimal placement and sizing of battery energy storage system for losses reduction using whale optimization algorithm,” *J. Energy Storage*, vol. 26, no. May, p. 100892, 2019, doi: 10.1016/j.est.2019.100892.
- [77] K. M. Jagtap and D. K. Khatod, “Loss allocation in radial distribution networks with various distributed generation and load models,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 75, pp. 173–186, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.07.042.
- [78] T. T. Nguyen, T. T. Nguyen, A. V. Truong, Q. T. Nguyen, and T. A. Phung, “Multi-objective electric distribution network reconfiguration solution using runner-root algorithm,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 52, pp. 93–108, 2017, doi: 10.1016/j.asoc.2016.12.018.
- [79] R. S. Rao, K. Ravindra, K. Satish, and S. V. L. Narasimham, “Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 1–9, 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2197227.
- [80] P. S. Georgilakis and N. D. Hatziargyriou, “Optimal distributed generation placement in power distribution networks: Models, methods, and future research,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3420–3428, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2237043.
- [81] T. N. Ton, T. T. Nguyen, A. V. Truong, and T. P. Vu, “Optimal Location and Size of Distributed Generators in an Electric Distribution System based on a Novel Metaheuristic Algorithm,” *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 10, no. 1, pp. 5325–5329, 2020, doi: 10.48084/etasr.3372.

- [82] A. M. Imran, M. Kowsalya, and D. P. Kothari, "A novel integration technique for optimal network reconfiguration and distributed generation placement in power distribution networks," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 461–472, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.06.011.
- [83] R. S. Rao, K. Ravindra, K. Satish, and S. V. L. Narasimham, "Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 317–325, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2197227.
- [84] T. T. Nguyen, A. V. Truong, and T. A. Phung, "A novel method based on adaptive cuckoo search for optimal network reconfiguration and distributed generation allocation in distribution network," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 78, pp. 801–815, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.12.030.
- [85] M. Subramaniyan, S. Subramaniyan, M. Veeraswamy, and V. R. Jawalkar, "Optimal reconfiguration/distributed generation integration in distribution system using adaptive weighted improved discrete particle swarm optimization," *COMPEL - Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 38, no. 1, pp. 247–262, 2019, doi: 10.1108/COMPEL-08-2017-0344.
- [86] L. A. Gallego Pareja, J. M. López-Lezama, and O. G. Carmona, "A Mixed-Integer Linear Programming Model for the Simultaneous Optimal Distribution Network Reconfiguration and Optimal Placement of Distributed Generation," *Energies*, vol. 15, no. 9, 2022, doi: 10.3390/en15093063.
- [87] A. V. Truong, T. N. Ton, T. T. Nguyen, and T. L. Duong, "Two states for optimal position and capacity of distributed generators considering network reconfiguration for power loss minimization based on runner root algorithm," *Energies*, vol. 12, no. 1, 2019, doi: 10.3390/en12010106.
- [88] T. N. Ton, T. T. Nguyen, V. A. Truong, and T. P. Vu, "Optimal Location and Size of Distributed Generators in an Electric Distribution System Based on a Novel Metaheuristic Algorithm," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 10, no. 1, pp. 5325–5329, 2020.
- [89] N. T. Linh, N. T. Thuận, and T. N. Triều, "Tối ưu vị trí và công suất nguồn điện phân tán có xét đến tái hình cấu hình lưới điện phân phối," *Tạp chí phát triển KH&CN*, vol. 20, no. K7, pp. 5–14, 2017.
- [90] R. S. Rao, K. Ravindra, K. Satish, and S. V. L. Narasimham, "Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 1–9, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2197227.
- [91] Nguyễn Thanh Thuận, *Tái cấu hình lưới điện phân phối sử dụng các giải thuật tìm kiếm tối ưu*. Luận án Tiến sĩ - Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM, 2019.
- [92] H.-D. Chiang and R. Jean-Jumeau, "Optimal network reconfigurations in distribution systems: part 2: Solution algorithms and numerical results," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 5, no. 3, pp. 1568–1574, 1990, doi: 10.1109/61.58002.
- [93] T. Aziz, Z. Lin, M. Waseem, and S. Liu, "Review on optimization methodologies in transmission network reconfiguration of power systems for grid resilience," no. May 2020, pp. 1–38, 2021, doi: 10.1002/2050-7038.12704.
- [94] A. Open, A. Journal, Q. Hao, Z. Gao, X. Bai, and M. Cao, "Two-level reconfiguration algorithm of branch exchange and variable neighbourhood search for active

- distribution network,” vol. 2583, 2018, doi: 10.1080/21642583.2018.1536898.
- [95] G. Lincy, M. Ponnaivaikko, and L. Anselm, “Economic of Distributed Photovoltaic Generation Installed in a Typical Distribution System,” *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 13, no. 7, pp. 4796–4801, 2018, [Online]. Available: [https://www.ripublication.com/ijaer18/ijaerv13n7\\_26.pdf](https://www.ripublication.com/ijaer18/ijaerv13n7_26.pdf).
- [96] K. Malmedal and P. K. Sen, “A better understanding of load and loss factors,” *IEEE Ind. Appl. Soc.*, pp. 1–6, 2008, doi: 10.1109/08IAS.2008.376.
- [97] L. S. Pierezan, J. and Coelho, “Coyote Optimization Algorithm: A new metaheuristic for global optimization problems,” in *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Rio de Janeiro, Brazil*, 2018, pp. 2633–2640.
- [98] D. Rangel-Martinez, K. D. P. Nigam, and L. A. Ricardez-Sandoval, “Machine learning on sustainable energy: A review and outlook on renewable energy systems, catalysis, smart grid and energy storage,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 174, pp. 414–441, 2021, doi: 10.1016/j.cherd.2021.08.013.
- [99] Y. Li, M. Vilathgamuwa, S. S. Choi, T. W. Farrell, N. T. Tran, and J. Teague, “Development of a degradation-conscious physics-based lithium-ion battery model for use in power system planning studies,” *Appl. Energy*, vol. 248, no. August, pp. 512–525, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.04.143.
- [100] Y. Levron and D. Shmilovitz, “Power systems’ optimal peak-shaving applying secondary storage,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 89, pp. 80–84, 2012, doi: 10.1016/j.epsr.2012.02.007.
- [101] R. C. Leou, “An economic analysis model for the energy storage system applied to a distribution substation,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 34, no. 1, pp. 132–137, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2011.09.016.
- [102] M. Farrokhifar, S. Grillo, and E. Tironi, “Loss minimization in medium voltage distribution grids by optimal management of energy storage devices,” *2013 IEEE Grenoble Conf. PowerTech, POWERTECH 2013*, no. Mv, pp. 1–5, 2013, doi: 10.1109/PTC.2013.6652316.
- [103] L. F. Grisales-Noreña, O. D. Montoya, and W. Gil-González, “Integration of energy storage systems in AC distribution networks: Optimal location, selecting, and operation approach based on genetic algorithms,” *J. Energy Storage*, vol. 25, no. March, p. 100891, 2019, doi: 10.1016/j.est.2019.100891.
- [104] M. R. Jannesar, A. Sedighi, M. Savaghebi, and J. M. Guerrero, “Optimal placement, sizing, and daily charge/discharge of battery energy storage in low voltage distribution network with high photovoltaic penetration,” *Appl. Energy*, vol. 226, pp. 957–966, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.06.036.
- [105] M. Farsadi, T. Sattarpour, and A. Y. Nejadi, “Optimal placement and operation of BESS in a distribution network considering the net present value of energy losses cost,” *ELECO 2015 - 9th Int. Conf. Electr. Electron. Eng.*, pp. 434–439, 2016, doi: 10.1109/ELECO.2015.7394582.
- [106] C. J. Bennett, R. A. Stewart, and J. W. Lu, “Development of a three-phase battery energy storage scheduling and operation system for low voltage distribution networks,” *Appl. Energy*, vol. 146, pp. 122–134, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.02.012.
- [107] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. MIT press, 1992.

- [108] H. Yapici and N. Cetinkaya, “A new meta-heuristic optimizer: Pathfinder algorithm,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 78, pp. 545–568, 2019, doi: 10.1016/j.asoc.2019.03.012.
- [109] G. F. Gomes, S. S. da Cunha, and A. C. Ancelotti, “A sunflower optimization (SFO) algorithm applied to damage identification on laminated composite plates,” *Eng. Comput.*, vol. 35, no. 2, pp. 619–626, 2019, doi: 10.1007/s00366-018-0620-8.
- [110] X. S. Yang and S. Deb, “Cuckoo search via Lévy flights,” in *2009 World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, NABIC 2009 - Proceedings*, 2009, pp. 210–214, doi: 10.1109/NABIC.2009.5393690.
- [111] Y. Huping, P. Yunyan, and X. Ning, “Gradual Approaching Method for Distribution Network Dynamic Reconfiguration,” pp. 257–260, 2008, doi: 10.1109/PEITS.2008.104.
- [112] Tôn Ngọc Triều, Nguyễn Tùng Linh, Trương Việt Anh, and và Phạm Văn Lới, “Nâng cao công suất của hệ thống pin lưu trữ trên lưới điện phân phối có kết nối năng lượng mặt trời nhằm giảm chi phí,” *TNU J. Sci. Technol.*, vol. 226, no. 16, pp. 11–19, 2021.
- [113] T. N. Ton, T. T. Nguyen, V. A. Truong, and P.-T. Vu, “Optimal location and operation of battery energy storage system in the distribution system for reducing energy cost in 24-hour period,” *Int Trans Electr Energ Syst*, vol. e12861, no. February, pp. 1–17, 2021.

# PHỤ LỤC

Phụ lục 1. Thông số phụ tải LDPP 18 nút

Nút	P (MW)	Q (MVAR)	Nút	P (MW)	Q (MVAR)	Nút	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0	7	0,4	0,15	13	0,5	0,2
2	0	0	8	0,45	0,15	14	0,4	0,15
3	0,5	0,2	9	0,5	0,2	15	0,6	0,2
4	0,5	0,2	10	0,4	0,15	16	0,6	0,2
5	0,5	0,2	11	0,4	0,15	17	0,6	0,2
6	0,5	0,2	12	0,4	0,15	18	0,6	0,2

Phụ lục 2. Thông số đường dây LDPP 18 nút

Từ nút	Đến nút	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$x_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l$ (km)	Từ nút	Đến nút	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$x_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l$ (km)
1	2	0	0,55	1	8	12	0,3	0,12	1
2	3	0,3	0,12	1	12	13	0,3	0,12	1
3	4	0,25	0,1	1	13	14	0,2	0,08	1
4	5	0,25	0,1	1	2	15	0,4	0,16	1
5	6	0,25	0,1	1	15	16	0,3	0,12	1
6	7	0,25	0,1	1	16	17	0,3	0,12	1
2	8	0,3	0,12	1	14	18	0,2	0,08	1
8	9	0,25	0,1	1	7	11	0,25	0,1	1
9	10	0,3	0,12	1	17	18	0,3	0,12	1
10	11	0,5	0,2	1					

Phụ lục 3. Tỷ lệ loại tải thương mại, dân dụng và công nghiệp - LDPP 18 nút

Nút	R1	R2	R3	Nút	R1	R2	R3	Nút	R1	R2	R3
1	0	0	0	7	0	1	0	13	0	1	0
2	0	0	0	8	0	1	0	14	0	1	0
3	1	0	0	9	0	1	0	15	1	0	0
4	1	0	0	10	0	1	0	16	1	0	0
5	1	0	0	11	0	1	0	17	1	0	0
6	1	0	0	12	0	1	0	18	0	1	0

Phụ lục 4. Tỷ lệ các loại tải thương mại, dân dụng và công nghiệp - LĐPP 18 nút

Giờ	R <sub>P1</sub>	R <sub>Q1</sub>	R <sub>P2</sub>	R <sub>Q2</sub>	R <sub>P3</sub>	R <sub>Q3</sub>	Giờ	R <sub>P1</sub>	R <sub>Q1</sub>	R <sub>P2</sub>	R <sub>Q2</sub>	R <sub>P3</sub>	R <sub>Q3</sub>
1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,0	0,0	13	0,80	0,80	0,80	0,80	0,0	0,0
2	0,20	0,20	0,20	0,20	0,0	0,0	14	0,85	0,85	0,85	0,85	0,0	0,0
3	0,40	0,40	0,40	0,40	0,0	0,0	15	0,85	0,85	0,85	0,85	0,0	0,0
4	0,43	0,43	0,43	0,43	0,0	0,0	16	0,85	0,85	0,85	0,85	0,0	0,0
5	0,43	0,43	0,43	0,43	0,0	0,0	17	0,85	0,85	0,85	0,85	0,0	0,0
6	0,45	0,45	0,45	0,45	0,0	0,0	18	1,00	1,00	1,00	1,00	0,0	0,0
7	0,53	0,53	0,53	0,53	0,0	0,0	19	1,00	1,00	1,00	1,00	0,0	0,0
8	0,57	0,57	0,57	0,57	0,0	0,0	20	1,00	1,00	1,00	1,00	0,0	0,0
9	0,60	0,60	0,60	0,60	0,0	0,0	21	0,85	0,85	0,85	0,85	0,0	0,0
10	1,00	1,00	1,00	1,00	0,0	0,0	22	0,30	0,30	0,30	0,30	0,0	0,0
11	1,00	1,00	1,00	1,00	0,0	0,0	23	0,30	0,30	0,30	0,30	0,0	0,0
12	0,60	0,60	0,60	0,60	0,0	0,0	24	0,20	0,20	0,20	0,20	0,0	0,0

Phụ lục 5. Thông số phụ tải LĐPP 33 nút

Nút	P (MW)	Q (MVAR)	Nút	P (MW)	Q (MVAR)	Nút	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0	12	0,06	0,035	23	0,09	0,05
2	0,1	0,06	13	0,06	0,035	24	0,42	0,2
3	0,09	0,04	14	0,12	0,08	25	0,42	0,2
4	0,12	0,08	15	0,06	0,01	26	0,06	0,025
5	0,06	0,03	16	0,06	0,02	27	0,06	0,025
6	0,06	0,02	17	0,06	0,02	28	0,06	0,02
7	0,2	0,1	18	0,09	0,04	29	0,12	0,07
8	0,2	0,1	19	0,09	0,04	30	0,2	0,6
9	0,06	0,02	20	0,09	0,04	31	0,15	0,07
10	0,06	0,02	21	0,09	0,04	32	0,21	0,1
11	0,045	0,03	22	0,09	0,04	33	0,06	0,04

Phụ lục 6. Thông số đường dây LDPP 33 nút

Từ nút	Đến nút	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$x_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l$ (km)	$I$ (A)	Từ nút	Đến nút	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$x_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l$ (km)	$I$ (A)
1	2	0,0922	0,047	1	255	0	21	0,4095	0,4784	1	255
2	3	0,493	0,2512	1	255	21	22	0,7089	0,9373	1	255
3	4	0,3661	0,1864	1	255	3	23	0,4512	0,3084	1	255
4	5	0,3811	0,1941	1	255	23	24	0,898	0,7091	1	255
5	6	0,819	0,707	1	255	24	25	0,8959	0,7071	1	255
6	7	0,1872	0,6188	1	255	6	26	0,2031	0,1034	1	255
7	8	0,7115	0,2351	1	255	26	27	0,2842	0,1447	1	255
8	9	1,0299	0,74	1	255	27	28	1,0589	0,9338	1	255
9	10	1,044	0,74	1	255	28	29	0,8043	0,7006	1	255
10	11	0,1967	0,0651	1	255	29	30	0,5074	0,2585	1	255
11	12	0,3744	0,1298	1	255	30	31	0,9745	0,9629	1	255
12	13	1,468	1,1549	1	255	31	32	0,3105	0,3619	1	255
13	14	0,5416	0,7129	1	255	32	33	0,3411	0,5302	1	255
14	15	0,5909	0,526	1	255	21	8	2	2	1	255
15	16	0,7462	0,5449	1	255	9	15	2	2	1	255
16	17	1,2889	1,721	1	255	12	22	2	2	1	255
17	18	0,732	0,5739	1	255	18	33	0,5	0,5	1	255
2	19	0,164	0,1565	1	255	25	29	0,5	0,5	1	255
19	20	1,5042	1,3555	1	255						



Phụ lục 7. Tỷ lệ loại tải thương mại, dân dụng và công nghiệp - LDPP 33 nút

Nút	R1	R2	R3	Nút	R1	R2	R3	Nút	R1	R2	R3
1	0,0	0,0	0,0	12	0,5	0,5	0,0	23	0,5	0,4	0,1
2	0,2	0,5	0,3	13	0,6	0,4	0,0	24	0,4	0,5	0,1
3	0,5	0,3	0,2	14	0,4	0,4	0,2	25	0,6	0,4	0,0
4	0,5	0,2	0,3	15	0,5	0,1	0,4	26	0,7	0,3	0,0
5	0,6	0,1	0,3	16	0,2	0,7	0,1	27	0,1	0,0	0,9
6	0,4	0,4	0,2	17	0,3	0,3	0,4	28	0,6	0,3	0,1
7	0,6	0,0	0,4	18	0,4	0,5	0,1	29	0,4	0,1	0,5
8	0,3	0,3	0,4	19	0,5	0,2	0,3	30	0,7	0,2	0,1
9	0,4	0,6	0,0	20	0,7	0,3	0,0	31	0,4	0,4	0,2
10	0,3	0,0	0,7	21	0,5	0,3	0,2	32	0,2	0,1	0,7
11	0,6	0,2	0,2	22	0,3	0,0	0,7	33	0,3	0,7	0,0

Phụ lục 8. Tỷ lệ các loại tải thương mại, dân dụng và công nghiệp - LDPP 33 nút

Giờ	RP1	RQ1	RP2	RQ2	RP3	RQ3	Giờ	RP1	RQ1	RP2	RQ2	RP3	RQ3
1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	13	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5
2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	14	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6
3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4	0,4	15	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8	0,8
4	0,1	0,1	0,0	0,0	0,2	0,2	16	0,6	0,6	1,0	1,0	0,8	0,8
5	0,4	0,4	0,0	0,0	0,2	0,2	17	0,7	0,7	1,0	1,0	0,7	0,7
6	0,3	0,3	0,0	0,0	0,3	0,3	18	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7
7	0,4	0,4	0,1	0,1	0,3	0,3	19	0,9	0,9	0,6	0,6	0,8	0,8
8	0,4	0,4	0,2	0,2	0,4	0,4	20	1,0	1,0	0,7	0,7	0,9	0,9
9	0,3	0,3	0,7	0,7	0,8	0,8	21	1,0	1,0	0,6	0,6	1,0	1,0
10	0,3	0,3	0,8	0,8	1,0	1,0	22	0,6	0,6	0,2	0,2	0,8	0,8
11	0,5	0,5	0,8	0,8	0,9	0,9	23	0,5	0,5	0,1	0,1	0,5	0,5
12	0,6	0,6	0,7	0,7	0,9	0,9	24	0,2	0,2	0,1	0,1	0,4	0,4

Phụ lục 9. Thông số phụ tải LDPP 69 nút

Nút	P (MW)	Q (MVAR)	Nút	P (MW)	Q (MVAR)	Nút	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0	24	0,028	0,02	47	0	0
2	0	0	25	0	0	48	0,079	0,0564
3	0	0	26	0,014	0,01	49	0,3847	0,2745
4	0	0	27	0,014	0,01	50	0,3847	0,2745
5	0	0	28	0,026	0,0186	51	0,0405	0,0283
6	0,0026	0,0022	29	0,026	0,0186	52	0,0036	0,0027
7	0,04	0,03	30	0	0	53	0,00435	0,0035
8	0,075	0,054	31	0	0	54	0,0264	0,019
9	0,03	0,022	32	0	0	55	0,024	0,0172
10	0,028	0,019	33	0,014	0,01	56	0	0
11	0,145	0,104	34	0,0195	0,014	7	0	0
12	0,145	0,104	35	0,006	0,004	8	0	0
13	0,008	0,005	36	0,026	0,01855	59	0,1	0,072
14	0,008	0,0055	37	0,026	0,01855	60	0	0
15	0	0	38	0	0	61	1,244	0,888
16	0,0455	0,03	39	0,024	0,017	62	0,032	0,023
17	0,06	0,035	40	0,024	0,017	63	0	0
18	0,06	0,035	41	0,0012	0,001	64	0,227	0,162
19	0	0	42	0	0	65	0,059	0,042
20	0,001	0,0006	43	0,006	0,0043	66	0,018	0,013
21	0,114	0,081	44	0	0	67	0,018	0,013
22	0,005	0,0035	45	0,03922	0,0263	68	0,028	0,02
23	0	0	46	0,03922	0,0263	69	0,028	0,02

Phụ lục 10. Thông số đường dây LĐPP 69 nút

Từ nút	Đến nút	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$x_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l$ (km)	Từ nút	Đến nút	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$x_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l$ (km)
1	2	0,0005	0,0012	1	37	38	0,1053	0,123	1
2	3	0,0005	0,0012	1	38	39	0,0304	0,0355	1
3	4	0,0015	0,0036	1	39	40	0,0018	0,0021	1
4	5	0,0251	0,0294	1	40	41	0,7283	0,8509	1
5	6	0,366	0,1864	1	41	42	0,31	0,3623	1
6	7	0,3811	0,1941	1	42	43	0,041	0,0478	1
7	8	0,0922	0,047	1	43	44	0,0092	0,0116	1
8	9	0,0493	0,0251	1	44	45	0,1089	0,1373	1
9	10	0,819	0,2707	1	45	46	0,0009	0,0012	1
10	11	0,1872	0,0619	1	4	47	0,0034	0,0084	1
11	12	0,7114	0,2351	1	47	48	0,0851	0,2083	1
12	13	1,03	0,34	1	48	49	0,2898	0,7091	1
13	14	1,044	0,345	1	49	50	0,0822	0,2011	1
14	15	1,008	0,3496	1	8	51	0,0928	0,0473	1
15	16	0,1966	0,065	1	51	52	0,3319	0,1114	1
16	17	0,3744	0,1238	1	9	53	0,174	0,0886	1
17	18	0,0047	0,0016	1	53	54	0,203	0,1034	1
18	19	0,3276	0,1083	1	54	55	0,2842	0,1447	1
19	20	0,2106	0,069	1	55	56	0,2813	0,1433	1
20	21	0,3416	0,1129	1	56	57	1,59	0,5337	1
21	22	0,014	0,0046	1	57	58	0,7837	0,263	1
22	23	0,1591	0,0526	1	58	59	0,3042	0,1006	1
23	24	0,3463	0,1145	1	59	60	0,3861	0,1172	1
24	25	0,7488	0,2475	1	60	61	0,5075	0,2585	1
25	26	0,3089	0,1021	1	61	62	0,0974	0,0496	1
26	27	0,1732	0,0572	1	62	63	0,145	0,0738	1

Từ nút	Đến nút	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$x_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l$ (km)	Từ nút	Đến nút	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$x_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l$ (km)
3	28	0,0044	0,0108	1	63	64	0,7105	0,3619	1
28	29	0,064	0,1565	1	64	65	1,041	0,5302	1
29	30	0,3978	0,1315	1	11	66	0,2012	0,0611	1
30	31	0,0702	0,0232	1	66	67	0,0047	0,0014	1
31	32	0,351	0,116	1	12	68	0,7394	0,2444	1
32	33	0,839	0,2816	1	68	69	0,0047	0,0016	1
33	34	1,708	0,5646	1	11	43	0,5	0,5	1
34	35	1,474	0,4873	1	13	21	0,5	0,5	1
3	36	0,0044	0,0108	1	15	46	1	0,5	1
36	37	0,064	0,1565	1	50	59	2	1	1

Phụ lục 11. Thông số phụ tải LDPP Chư Prông

Nút	P (MW)	Q (MVAR)	Nút	P (MW)	Q (MVAR)	Nút	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0	87	0,1275	0,033	173	0,0435	0,0024
2	0,0359	0,0094	88	0,0629	0,0164	174	0,053	0,0261
3	0,0159	0,004	89	0,0359	0,0094	175	0,116	0,1594
4	0	0	90	0,0179	0,0047	176	0,1586	0,2179
5	0,0206	0,0053	91	0,0319	0,008	177	0,0695	0,0038
6	0,0239	0,0062	92	0	0	178	0,0543	0,003
7	0,0319	0,0083	93	0,0239	0,006	179	0,0348	0,0019
8	0,0139	0,0036	94	0,0359	0,0094	180	0,0869	0,0048
9	0,0359	0,0093	95	0,0159	0,0043	181	0,0695	0,0038
10	0,0359	0,0094	96	0,0642	0,0167	182	0	0
11	0,0359	0,0094	97	0,0528	0,013	183	0	0
12	0,0994	0,026	98	0,0176	0,0043	184	0,0254	0,025
13	0,0179	0,0047	99	0,1836	0,0479	185	0,0634	0,0623
14	0	0	100	0,0176	0,0047	186	0,0254	0,025

Nút	P (MW)	Q (MVAR)	Nút	P (MW)	Q (MVAR)	Nút	P (MW)	Q (MVAR)
15	0	0	101	0,0176	0,0047	187	0,0406	0,0399
16	0,0638	0,0164	102	0,006	0,0015	188	0,0406	0,0399
17	0	0	103	0,0161	0,0035	189	0,0406	0,0399
18	0	0	104	0,0322	0,0071	190	0,0127	0,0125
19	0	0	105	0,0322	0,0071	191	0,0254	0,025
20	0	0	106	0,01	0,0023	192	0	-0,6
21	0	0	107	0,072	0,0165	193	0	0
22	0,0896	0,0234	108	0,0579	0,0132	194	0,0197	0,0194
23	0,0279	0,0073	109	0,0889	0,0206	195	0,007	0,0069
24	0,0042	0,0011	110	0,1127	0,0256	196	0	-0,3
25	0	0	111	0,051	0,016	197	0	0
26	0	0	112	0,0492	0,0244	198	0	0
27	0,0359	0,0094	113	0	0	199	0,0703	0,0694
28	0,057	0,0147	114	0,0322	0,0071	200	0,0361	0,0355
29	0	0	115	0,0508	0,0115	201	0,0254	0,0249
30	0,0319	0,008	116	0	0	202	0	0
31	0,0048	0,0012	117	0,1271	0,0285	203	0	0
32	0,0383	0,01	118	0,038	0,0142	204	0	0
33	0	0	119	0,1271	0,0291	205	0,0225	0,0222
34	0,0644	0,0144	120	0	0	206	0,081	0,08
35	0,0767	0,0175	121	0,0161	0,0036	207	0	0
36	0	0	122	0,0271	0,0062	208	0	0
37	0,0576	0,0129	123	0	0	209	0	0
38	0,0576	0,0129	124	0,0161	0,0036	210	0	0
39	0,1004	0,0229	125	0,007	0,0016	211	0	0
40	0,0048	0,0011	126	0,0322	0,0063	212	0,0204	0,0006
41	0	0	127	0,0571	0,0137	213	0	0
42	0,0995	0,0229	128	0,0504	0,0115	214	0,0113	0,0004

Nút	P (MW)	Q (MVAR)	Nút	P (MW)	Q (MVAR)	Nút	P (MW)	Q (MVAR)
43	0,0271	-0,294	129	0,0576	0,0129	215	0,0056	0,0002
44	0	0	130	0,0898	0,0203	216	0	0
45	0,0322	0,0071	131	0	0	217	0,0204	0,0006
46	0,0424	0,0088	132	0,1575	0,0359	218	0	0
47	0,0644	0,0144	133	0	0	219	0,0167	0,0006
48	0	0	134	0,0322	0,0071	220	0,0112	0,0004
49	0,358	0,118	135	0,0576	0,0129	221	0,0112	0,0004
50	0,0579	0,0132	136	0	0	222	0	0
51	0	0	137	0,019	0,001	223	0	0
52	0,0579	0,0132	138	0	0	224	0	0
53	0,007	0,0016	139	0,0348	0,0019	225	0	0
54	0,007	0,0016	140	0,0285	0,0094	226	0,0567	0,0022
55	0,004	0,0009	141	0,0092	0,0005	227	0,0326	0,0013
56	0,0241	0,0055	142	0	0	228	0,0181	0,0007
57	0,0449	0,01	143	0,0679	0,0037	229	0,0634	0,0025
58	0,0372	0,009	144	0	0	230	0	0
59	0,1127	0,0256	145	0,0869	0,0048	231	0	0
60	0,0449	0,01	146	0	0	232	0,0181	0,0007
61	0	0	147	0,0189	0,0011	233	0,0204	0,0008
62	0,0067	0,0043	148	0,0391	0,0022	234	0	0
63	0,0117	0,0027	149	0,0354	0,0293	235	0,0524	0,002
64	0	0	150	0	0	236	0	0
65	0,0202	0,0053	151	0,0217	0,0012	237	0,0453	0,0018
66	0,0202	0,0053	152	0,0435	0,0024	238	0	0
67	0,0202	0,0053	153	0	0	239	0,0071	0,0003
68	0,0202	0,0053	154	0	0	240	0,0079	0,0003
69	0,0202	0,0053	155	0,0342	0,0019	241	0,0634	0,0025
70	0,0202	0,0053	156	0,0304	0,0017	242	0,0579	0,0022

Nút	P (MW)	Q (MVAR)	Nút	P (MW)	Q (MVAR)	Nút	P (MW)	Q (MVAR)
71	0,0092	0,0038	157	0,0678	0,0037	243	0	0
72	0,0092	0,0038	158	0,0391	0,0022	244	0	0
73	0,0092	0,0038	159	0,0391	0,0022	245	0,0076	0,0003
74	0,0092	0,0038	160	0,2178	0,0231	246	0,0724	0,0028
75	0,0092	0,0038	161	0,0782	0,0043	247	0,004	0,0002
76	0,114	0,037	162	0,0348	0,0019	248	0,0045	0,0002
77	0,114	0,037	163	0,0678	0,0037	249	0,0362	0,0014
78	0,006	0,0015	164	0,045	0,01	250	0,0362	0,0014
79	0,0383	0,01	165	0	0	251	0,0453	0,0018
80	0	0	166	0,0543	0,003	252	0,0068	0,0003
81	0,0638	0,0164	167	0,0196	0,0011	253	0,0204	0,0008
82	0,0154	0,0041	168	0,019	0,001	254	0,0225	0,0222
83	0,0139	0,0036	169	0,0348	0,0019	255	0	0
84	0,1145	0,0297	170	0,0142	0,0008	256	0,1578	0,1555
85	0,1145	0,0297	171	0	0	257	0,1578	0,155
86	0,0095	0,0031	172	0	0			

Phụ lục 12. Thông số đường dây LĐPP Chư Prông

Từ nút	Đến nút	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$x_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l$ (km)	$I$ (A)	Từ nút	Đến nút	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$x_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l$ (km)	$I$ (A)
1	2	0,2039	0,3351	0,7	450	134	135	0,4218	0,3606	2,04	265
2	3	0,154	0,3287	0,375	450	4	65	0,4218	0,3606	0,88	265
3	4	0,154	0,3287	1,222	450	65	66	0,4218	0,3606	1,84	265
4	5	0,154	0,3287	0,852	450	66	67	0,4218	0,3606	0,88	265
5	6	0,154	0,3287	0,581	450	67	68	0,4218	0,3606	0,56	265
6	7	0,154	0,3287	0,34	450	68	69	0,4218	0,3606	1,2	265
7	8	0,4218	0,3606	0,96	450	69	70	0,4218	0,3606	3,68	265
8	9	0,154	0,3287	0,4	450	70	71	0,4218	0,3606	2,36	265
9	10	0,154	0,3287	0,5	450	71	72	0,4218	0,3606	7,56	265

Từ nút	Đến nút	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$x_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l$ (km)	$I$ (A)	Từ nút	Đến nút	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$x_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l$ (km)	$I$ (A)
10	11	0,154	0,3287	0,875	450	72	73	0,4218	0,3606	3,38	265
11	12	0,154	0,3287	0,56	450	73	74	0,4218	0,3606	2,36	265
12	13	0,4218	0,3606	1,28	450	74	75	0,4218	0,3606	3,15	265
13	14	0,4218	0,3606	1,26	450	136	137	0,4218	0,3606	0,32	265
14	15	0,4218	0,3606	0,001	450	137	138	0,4218	0,3606	0,48	265
15	16	0,4218	0,3606	0,24	265	138	139	0,4218	0,3606	0,72	265
16	17	0,4218	0,3606	0,08	265	139	140	0,4218	0,3606	0,88	265
17	18	0,4218	0,3606	0,4	265	140	141	0,4218	0,3606	0,32	265
17	76	0,4218	0,3606	1,28	265	141	142	0,4218	0,3606	0,4	265
76	77	0,4218	0,3606	3,76	265	142	143	0,4218	0,3606	0,96	265
18	78	0,5951	0,3714	0,964	210	143	144	0,4218	0,3606	0,24	265
18	19	0,4218	0,3606	0,08	265	144	145	0,4218	0,3606	1,6	265
19	79	0,5951	0,3714	0,49	210	145	146	0,4218	0,3606	0,96	265
19	20	0,4218	0,3606	0,56	265	146	147	0,4218	0,3606	0,8	265
20	80	0,4218	0,3606	0,001	265	147	148	0,4218	0,3606	0,8	265
20	21	0,4218	0,3606	0,001	265	148	149	0,4218	0,3606	1,12	265
21	22	0,4218	0,3606	0,08	265	149	150	0,4218	0,3606	0,24	265
22	23	0,4218	0,3606	1,04	265	150	151	0,4218	0,3606	0,48	265
23	24	0,4218	0,3606	0,4	265	151	152	0,4218	0,3606	0,16	265
24	25	0,4218	0,3606	0,32	265	152	153	0,4218	0,3606	0,08	265
25	27	0,4218	0,3606	0,16	265	153	154	0,4218	0,3606	1,92	265
25	81	0,4218	0,3606	0,587	265	138	155	0,4218	0,3606	1,8	265
25	26	0,4218	0,3606	0,32	265	142	156	0,4218	0,3606	0,259	265
26	82	0,5951	0,3714	0,7	210	156	157	0,4218	0,3606	0,6	265
82	83	0,5951	0,3714	1,52	210	142	158	0,4218	0,3606	0,447	265
83	84	0,5951	0,3714	0,8	210	158	159	0,4218	0,3606	0,8	265
84	85	0,5951	0,3714	2,3	210	144	160	0,4218	0,3606	0,24	265
26	28	0,4218	0,3606	1,2	265	144	161	0,4218	0,3606	1,896	265
28	29	0,4218	0,3606	0,16	265	161	162	0,4218	0,3606	0,94	265
29	86	0,5951	0,3714	0,656	210	162	163	0,4218	0,3606	0,569	265



Từ nút	Đến nút	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$x_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l$ (km)	$I$ (A)	Từ nút	Đến nút	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$x_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l$ (km)	$I$ (A)
86	87	0,5951	0,3714	0,84	210	146	164	0,4218	0,3606	0,16	265
29	30	0,4218	0,3606	0,8	265	164	165	0,4218	0,3606	0,08	265
30	31	0,4218	0,3606	1,84	265	165	166	0,4218	0,3606	0,56	265
31	32	0,4218	0,3606	1,04	265	166	167	0,4218	0,3606	0,48	265
32	33	0,4218	0,3606	1,04	265	167	168	0,4218	0,3606	0,64	265
33	88	0,5951	0,3714	1,66	210	168	169	0,4218	0,3606	0,64	265
88	89	0,5951	0,3714	0,22	210	169	170	0,4218	0,3606	0,48	265
89	90	0,5951	0,3714	0,9	210	170	171	0,4218	0,3606	0,48	265
90	91	0,5951	0,3714	0,9	210	171	172	0,4218	0,3606	1,15	265
91	92	0,5951	0,3714	1	210	172	173	0,4218	0,3606	0,42	265
92	93	0,5951	0,3714	0,244	210	173	174	0,4218	0,3606	3,834	265
93	94	0,5951	0,3714	1,06	210	168	175	0,4218	0,3606	0,46	265
94	95	0,5951	0,3714	0,65	210	175	176	0,4218	0,3606	1,13	265
95	96	0,5951	0,3714	0,16	210	171	177	0,5951	0,3714	1	210
96	97	0,5951	0,3714	0,89	210	172	178	0,4218	0,3606	0,47	265
97	98	0,5951	0,3714	0,244	210	172	179	0,4218	0,3606	0,71	265
98	99	0,5951	0,3714	1,63	210	150	180	0,4218	0,3606	1,19	265
92	100	0,5951	0,3714	0,59	210	153	181	0,4218	0,3606	0,955	265
100	101	0,5951	0,3714	0,161	265	182	183	0,154	0,3287	0,001	520
101	102	0,5951	0,3714	1,29	210	183	184	0,154	0,3287	0,62	520
34	35	0,4218	0,3606	0,64	265	184	185	0,154	0,3287	0,725	520
35	36	0,4218	0,3606	0,16	265	185	186	0,154	0,3287	2,17	520
36	37	0,4218	0,3606	0,08	265	186	187	0,154	0,3287	0,93	520
37	38	0,4218	0,3606	0,08	265	187	188	0,154	0,3287	0,41	520
38	39	0,4218	0,3606	0,16	265	188	189	0,154	0,3287	0,72	520
39	40	0,4218	0,3606	0,24	265	189	190	0,154	0,3287	0,103	520
40	41	0,4218	0,3606	0,72	265	190	191	0,154	0,3287	0,41	520
41	103	0,5951	0,3714	1,28	210	191	192	0,154	0,3287	0,41	520
103	104	0,5951	0,3714	0,085	210	192	193	0,154	0,3287	1,14	520
104	105	0,5951	0,3714	0,085	210	193	194	0,154	0,3287	0,41	520

Từ nút	Đến nút	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$x_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l$ (km)	$I$ (A)	Từ nút	Đến nút	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$x_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l$ (km)	$I$ (A)
105	106	0,5951	0,3714	0,08	265	194	195	0,154	0,3287	0,72	520
106	107	0,5951	0,3714	1,128	265	195	196	0,154	0,3287	1,66	520
106	108	0,4218	0,3606	0,93	210	196	197	0,154	0,3287	2,07	520
41	42	0,4218	0,3606	1,04	265	197	198	0,154	0,3287	0,001	520
42	43	0,4218	0,3606	0,48	265	198	199	0,154	0,3287	0,93	520
43	44	0,4218	0,3606	0,48	265	199	200	0,154	0,3287	0,3	520
44	109	0,4218	0,3606	1,3	265	200	201	0,154	0,3287	0,725	520
109	110	0,4218	0,3606	1,674	265	201	202	0,154	0,3287	1,45	520
44	45	0,4218	0,3606	0,56	265	202	203	0,154	0,3287	0,93	520
45	46	0,4218	0,3606	0,32	265	203	204	0,154	0,3287	0,001	520
46	47	0,4218	0,3606	0,24	265	193	205	0,5951	0,3714	0,971	210
47	48	0,4218	0,3606	0,32	265	205	206	0,5951	0,3714	0,529	210
48	111	0,4218	0,3606	1,3	265	197	254	0,5951	0,3714	0,5	210
111	112	0,4218	0,3606	0,24	265	254	255	0,5951	0,3714	0,001	210
112	113	0,4218	0,3606	0,64	265	202	256	0,4218	0,3606	0,32	265
113	114	0,4218	0,3606	0,56	265	256	257	0,4218	0,3606	0,08	265
114	115	0,4218	0,3606	0,24	265	196	207	0,4218	0,3606	0,001	265
115	116	0,4218	0,3606	0,4	265	207	208	0,4218	0,3606	0,001	265
116	120	0,4218	0,3606	0,322	265	208	209	0,4218	0,3606	0,001	265
120	121	0,5951	0,3714	0,6	210	209	210	0,4218	0,3606	0,001	265
121	122	0,5951	0,3714	0,105	265	210	211	0,4218	0,3606	0,24	265
116	117	0,4218	0,3606	1,44	265	211	212	0,4218	0,3606	0,72	265
117	118	0,4218	0,3606	0,252	265	212	213	0,4218	0,3606	0,4	265
118	119	0,4218	0,3606	0,421	265	213	214	0,4218	0,3606	0,56	265
113	123	0,4218	0,3606	0,56	265	214	215	0,4218	0,3606	0,8	265
123	124	0,4218	0,3606	0,275	265	215	216	0,4218	0,3606	0,001	265
124	125	0,4218	0,3606	0,3	265	216	217	0,4218	0,3606	2,088	265
123	126	0,4218	0,3606	0,905	265	217	218	0,4218	0,3606	0,181	265
48	49	0,4218	0,3606	0,4	265	218	219	0,4218	0,3606	0,544	265
49	50	0,4218	0,3606	0,4	265	219	220	0,4218	0,3606	0,81	265

Từ nút	Đến nút	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$x_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l$ (km)	$I$ (A)	Từ nút	Đến nút	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$x_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l$ (km)	$I$ (A)
50	51	0,4218	0,3606	0,32	265	220	221	0,4218	0,3606	1,084	265
51	127	0,4218	0,3606	1	265	221	222	0,4218	0,3606	0,001	265
51	52	0,4218	0,3606	0,08	265	222	223	0,4218	0,3606	0,16	265
52	53	0,4218	0,3606	0,72	265	223	224	0,4218	0,3606	0,001	520
53	54	0,4218	0,3606	0,08	265	224	225	0,4218	0,3606	0,001	520
54	55	0,4218	0,3606	0,4	265	211	226	0,4218	0,3606	0,16	265
55	128	0,4218	0,3606	0,32	265	226	227	0,4218	0,3606	0,64	265
128	129	0,4218	0,3606	0,88	265	227	228	0,4218	0,3606	0,64	265
55	130	0,5951	0,3714	0,13	210	228	229	0,4218	0,3606	1,512	265
55	56	0,4218	0,3606	0,72	265	211	230	0,4218	0,3606	0,08	265
56	57	0,4218	0,3606	0,08	265	230	231	0,4218	0,3606	0,001	265
57	58	0,4218	0,3606	0,08	265	231	232	0,4218	0,3606	0,24	265
58	59	0,4218	0,3606	0,64	265	232	233	0,4218	0,3606	0,24	265
59	60	0,4218	0,3606	0,08	265	233	234	0,4218	0,3606	0,16	265
60	61	0,4218	0,3606	0,08	265	234	235	0,4218	0,3606	1,2	265
61	131	0,4218	0,3606	0,75	265	235	236	0,4218	0,3606	0,08	265
131	132	0,4218	0,3606	0,86	210	236	237	0,4218	0,3606	0,72	265
61	62	0,4218	0,3606	0,08	265	237	238	0,4218	0,3606	0,001	265
62	63	0,4218	0,3606	0,08	265	234	239	0,4218	0,3606	1,34	265
63	64	0,4218	0,3606	0,24	265	236	240	0,4218	0,3606	1,006	265
64	133	0,4218	0,3606	0,001	265	240	241	0,4218	0,3606	0,7	265
133	134	0,4218	0,3606	0,65	265	213	242	0,4218	0,3606	1,2	265