

TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA ĐIỆN

ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP
CHUYÊN NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỆN

ĐỀ TÀI:

**Sử dụng thuật toán tối ưu Heuristic để xác định
vị trí tối ưu của nguồn năng lượng phân tán vào lưới
điện phân phối**

Giảng viên hướng dẫn: **PGS. TS. PHAN ĐÌNH CHUNG**

Sinh viên thực hiện : **PHẠM MINH CÔNG - 105200117 – 20D2**

NGUYỄN CÔNG MINH – 105200134 – 20D2

Đà Nẵng – 2025

NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

Họ tên sinh viên: Phạm Minh Công

Số thẻ sinh viên: 105200117

Lớp: 20D2

Khoa: Điện

Ngành: Kỹ thuật điện

Họ tên sinh viên: Nguyễn Công Minh

Số thẻ sinh viên: 105200134

Lớp: 20D2

Khoa: Điện

Ngành: Kỹ thuật điện

Tên đề tài đồ án: “Sử dụng thuật toán tối ưu Heuristic để xác định vị trí tối ưu của nguồn năng lượng phân tán vào lưới điện phân phối”

1. Đề tài thuộc diện: ☐ Có ký kết thỏa thuận sở hữu trí tuệ đối với kết quả thực hiện

2. Các số liệu và dữ liệu ban đầu:

- Dữ liệu một số turbine gió thương mại trong thực tế.
- Dữ liệu gió giả định tại 33 nút, 69 nút và 85 nút.
- Thông số lưới điện tiêu chuẩn IEEE 33 nút, 69 nút và 85 nút.
- Phần mềm Matlab.

3. Nội dung các phần thuyết minh và tính toán:

Chương 1: Giới thiệu về lưới điện phân phối và điện gió

Chương 2: Các giải pháp giảm tổn thất công suất trong lưới điện phân phối

Chương 3: Ứng dụng thuật toán GAO trong tối ưu kết nối turbine gió vào lưới điện phân phối nhằm giảm tổn thất công suất

4. Các bản vẽ, đồ thị (ghi rõ các loại và kích thước bản vẽ):

5. Họ tên người hướng dẫn: **PGS.TS. Phan Đình Chung**

6. Ngày giao nhiệm vụ đồ án: 19./02/2025

7. Ngày hoàn thành đồ án: 16/06/2025

Trưởng Bộ môn Hệ thống Điện

Đà Nẵng, ngày tháng năm 2025

Người hướng dẫn

PGS.TS. Phan Đình Chung

LỜI NÓI ĐẦU

.....

Trong bối cảnh hiện nay, với những thách thức của biến đổi khí hậu ngày càng lớn, đòi hỏi chúng ta phải nhanh chóng có sự chuyển đổi các nguồn năng lượng để giảm những tác động xấu đến môi trường. Bên cạnh đó công nghiệp hoá hiện đại hoá đất nước cũng đang diễn ra mạnh mẽ, nhu cầu năng lượng ngày càng tăng đặt ra những thách thức về yêu cầu cung ứng điện. Tuy nhiên, các nguồn năng lượng truyền thống đang bộc lộ những hạn chế của mình, đối với nguồn thủy điện đã không còn nhiều vị trí để xây dựng các nhà máy thủy điện mới; nhiệt điện than đang ngày càng cắt giảm công suất vì gây ra lượng phát thải lớn ra môi trường trong quá trình phát điện,... Chính vì thế, để giải quyết vấn đề này các nguồn năng lượng tái tạo đang có xu hướng lắp đặt phân tán ngày càng nhiều vào lưới điện, trong đó điển hình là nguồn điện gió và điện mặt trời. Đặc biệt với điện gió, các nghiên cứu hiện nay chủ yếu tìm ra công suất yêu cầu và vị trí đặt của nguồn, nhưng không tìm được chính xác số lượng và loại turbine trong thực tế của nguồn điện gió, điều này gây khó khăn trong việc áp dụng vào thực tế.

Hiểu được vấn đề này, là sinh viên Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng, chúng em mong muốn đóng góp sức mình để giải quyết vấn đề đó. Nên chúng em đã quyết định thực hiện Đồ án tốt nghiệp với đề tài “**Sử dụng thuật toán tối ưu Heuristic để xác định vị trí tối ưu của nguồn năng lượng phân tán vào lưới điện phân phối**” dưới sự hướng dẫn của thầy **PGS.TS. Phan Đình Chung**. Đề tài được thực hiện dựa trên dữ liệu đầu vào gồm: thông số lưới điện, loại turbine gió thực tế, dữ liệu gió tại các nút trong lưới điện phân phối, và được tính toán mô phỏng theo cơ chế hoạt động của thuật toán tối ưu Green Anaconda Optimization (GAO). Mục tiêu là tìm ra số lượng và loại turbine chính xác, nhằm dễ dàng áp dụng trong thực tế, đồng thời giảm được tổn thất công suất. Đồ án được trình bày gồm 3 chương

Chương 1: Giới thiệu về lưới điện phân phối và điện gió.

Chương 2: Các giải pháp giảm tổn thất công suất trong lưới điện phân phối.

Chương 3: Ứng dụng thuật toán GAO trong tối ưu kết nối turbine gió vào lưới điện phân phối nhằm giảm tổn thất công suất.

Sau hơn 3 tháng nghiên cứu và tham khảo, cùng những kiến thức nền tảng được tiếp thu qua quá trình học tập tại trường và sự hướng dẫn tận tình của thầy PGS.TS. Phan Đình Chung, chúng em đã hoàn thành đồ án tốt nghiệp này. Đồng thời, đây cũng là nhiệm vụ cuối cùng của chúng em để kết thúc chương trình đào tạo hệ Kỹ sư ngành Kỹ thuật điện tại trường. Qua bản đồ án này chúng em xin gửi lời cảm ơn đến chân thành nhất đến thầy PGS.TS. Phan Đình Chung vì đã giúp chúng em hoàn thành tốt nhiệm vụ này, chúng em cũng xin gửi lời cảm ơn chân thành đến Quý thầy cô khoa Điện, cùng các thầy cô khác trong trường đã tâm huyết dạy bảo chúng em trong suốt hành trình 5 năm học tập tại trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng vừa qua. Chúng em tin rằng đây sẽ là hành trang kiến thức vững chắc để chúng em sẵn sàng gia nhập vào thị trường lao động.

Trong quá trình thực hiện đồ án, với trình độ kiến thức chuyên môn và kinh nghiệm còn hạn chế, mặc dù chúng em đã rất nỗ lực tuy nhiên sẽ không tránh khỏi những thiếu sót. Do đó, chúng em kính mong nhận được sự chỉ bảo thêm của thầy, cô và có đóng góp của bạn bè để giúp chúng em được hoàn thiện hơn.

Chúng em xin chân thành cảm ơn!

CAM ĐOAN

Chúng em xin cam đoan rằng toàn bộ nội dung trình bày trong đồ án tốt nghiệp này là kết quả nghiên cứu, học tập và làm việc nghiêm túc của chính chúng em. Các số liệu, hình ảnh, bảng biểu và kết quả trong đồ án đều được trích dẫn rõ ràng nguồn gốc (nếu có), tuân thủ đúng quy định về đạo đức học thuật và không sao chép bất kỳ phần nội dung nào từ các tài liệu, đồ án khác một cách trái phép.

Chúng em hoàn toàn chịu trách nhiệm trước nhà trường và pháp luật về tính trung thực và liêm chính của nội dung trong đồ án này.

Đà Nẵng, ngày 16 tháng 06 năm 2025

Sinh viên thực hiện

Sinh viên thực hiện

Phạm Minh Công

Nguyễn Công Minh

TÓM TẮT

Trong bối cảnh phát triển bền vững và chuyển dịch sang năng lượng tái tạo, việc tích hợp các nguồn phát phân tán như điện gió vào lưới điện phân phối đang trở thành xu hướng tất yếu. Tuy nhiên, lựa chọn vị trí và công suất phù hợp của các tuabin gió để đạt hiệu quả vận hành tối ưu là một bài toán phức tạp, đòi hỏi các phương pháp tính toán hiện đại.

Đề án này trình bày phương pháp xác định vị trí và công suất tối ưu của turbine gió trong lưới điện phân phối nhằm giảm tổn thất công suất, sử dụng thuật toán Green Anaconda Optimization (GAO) – một thuật toán meta-heuristic mới được đề xuất năm 2023. Quá trình đánh giá các phương án tối ưu được thực hiện thông qua phân tích dòng công suất bằng thuật toán Forward/Backward Sweep (FBS) trên các lưới mẫu tiêu chuẩn IEEE 33, 69 và 85 nút.

Kết quả mô phỏng cho thấy, thuật toán GAO có khả năng hội tụ tốt và cho kết quả tối ưu vượt trội so với một số phương pháp truyền thống, giúp giảm đáng kể tổn thất công suất và cải thiện chất lượng điện áp tại các nút trong lưới. Qua đó, đề án chứng minh tiềm năng ứng dụng của GAO trong lĩnh vực quy hoạch và vận hành hệ thống điện phân phối hiện đại có tích hợp nguồn năng lượng tái tạo.

MỤC LỤC

Nhiệm vụ đồ án	
Lời nói đầu và cảm ơn	i
Lời cam đoan liêm chính học thuật	iii
Tóm tắt	iv
Danh mục bảng biểu, hình vẽ và sơ đồ	vii

Chương 1: GIỚI THIỆU VỀ LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI VÀ1

ĐIỆN GIÓ1

1.1. Tổng quan về lưới điện phân phối.1	1
1.1.1. Khái niệm hệ thống điện và lưới điện phân phối.1	1
1.1.2. Cấu trúc lưới điện phân phối2	2
1.1.3. Tối ưu hiệu quả kinh tế trong đầu tư và vận hành.....3	3
1.1.4. Khả năng tích hợp hiệu quả các nguồn năng lượng phân tán (DG)4	4
1.2. Giới thiệu về điện gió.....5	5
1.2.1. Nguyên lý hoạt động, cấu tạo và điều chỉnh công suất phát của turbine gió5	5
1.2.2. Ưu và nhược điểm của điện gió9	9

Chương 2: CÁC GIẢI PHÁP GIẢM TỔN THẤT CÔNG SUẤT TRONG LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI..... 11

2.1. Tổng quan về tổn thất công suất trong lưới phân phối 11	11
2.2. Các giải pháp giảm tổn thất công suất trong lưới phân phối 11	11
2.2.1. Tái cấu trúc mạng lưới và cân bằng phụ tải11	11
2.2.2. Bù công suất phản kháng.....12	12
2.2.3. Điều chỉnh điện áp và tối ưu chế độ vận hành12	12
2.2.4. Ứng dụng hệ thống tự động hóa lưới điện phân phối13	13
2.2.5. Tích hợp các nguồn phân tán vào lưới điện phân phối14	14
2.3. Bài toán tối ưu tích hợp nguồn điện gió vào lưới điện phân phối17	17
2.3.1. Mô tả bài toán.....17	17

2.3.2. Hàm mục tiêu	18
2.3.3. Các ràng buộc	18
2.4. Các phương pháp giải bài toán tối ưu	19
2.4.1. Giới thiệu chung về phương pháp heuristic và meta-heuristic.....	19
2.4.2. Thuật toán Green Anaconda Optimization (GAO)	20
2.4.3. Sử dụng thuật toán Forward/Backward Sweep (FBS) để phân tích dòng công suất trong lưới phân phối	22
Chương 3: ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN GAO TRONG TỐI ƯU KẾT NỐI TURBINE GIÓ VÀO LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI NHẪM GIẢM TỔN THẤT CÔNG SUẤT.....	25
3.1. Lựa chọn turbine gió	25
3.1.1. Mối quan hệ giữa công suất phát và tốc độ gió.....	25
3.1.2. Lựa chọn turbine tối ưu theo dữ liệu gió.....	27
3.2. Ứng dụng GAO giải quyết bài toán tối ưu kết nối turbine gió	28
3.2.1. Các biến quyết định.....	28
3.2.2. Hàm mục tiêu và ràng buộc.....	29
3.2.3. Xây dựng thuật toán	30
3.3. Dữ liệu mô phỏng và kết quả	35
3.3.1. Mô phỏng thực nghiệm trên sơ đồ lưới điện tiêu chuẩn IEEE 33 nút. ..	37
3.3.2. Mô phỏng thực nghiệm trên sơ đồ lưới điện tiêu chuẩn IEEE 69 nút ..	41
3.3.3. Mô phỏng thực nghiệm trên sơ đồ lưới điện tiêu chuẩn IEEE 85 nút ...	45
KẾT LUẬN	50
TÀI LIỆU THAM KHẢO	
PHỤ LỤC	

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1: Thông số của một số turbine thực tế	35
Bảng 2: Kết quả tính toán tối ưu kết nối turbine gió vào lưới.....	38
Bảng 3: So sánh với các nghiên cứu khác	40
Bảng 4: Kết quả tính toán tối ưu kết nối turbine gió vào lưới IEEE 69 nút.....	43
Bảng 5: Kết quả tính toán tối ưu kết nối turbine gió vào lưới.....	47

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1: Sơ đồ cấu trúc cơ bản của hệ thống điện.....	1
Hình 1.2: (a) Sơ đồ lưới điện hình tia; (b) Sơ đồ lưới điện kín vận hành hở	3
Hình 1.3: Cấu tạo turbine điện gió trục ngang.	6
Hình 2.1: Tích hợp nguồn phân tán vào lưới điện phân phối.....	15
Hình 2.2: Nguyên lý làm việc của thuật toán Forward/Backward sweep	15
Hình 3.1: Đường cong công suất lý tưởng của turbine gió	25
Hình 3.2: Lưu đồ thuật toán GAO áp dụng tối ưu kết nối turbine gió	32
vào lưới phân phối	32
Hình 3.3: Lưới điện 33 nút (a) Sơ đồ lưới điện (b) Dữ liệu về gió tại 33 nút	37
Hình 3.4: Điện áp của các nút trước và sau khi tối ưu kết nối turbine gió vào lưới	39
Hình 3.5: Lưới điện 69 nút (a) Sơ đồ lưới điện (b) Dữ liệu gió 69 nút dạng biểu đồ ...	42
Hình 3.6: Điện áp các nút trước và sau khi tối ưu kết nối turbine gió vào lưới.....	44
Hình 3.7: Biểu đồ hội tụ nghiệm của thuật toán.....	45
Hình 3.8: Lưới điện 85 nút (a) Sơ đồ lưới điện 85 nút (b) liệu tốc độ gió 85 nút thể hiện ở dạng biểu đồ.	46
Hình 3.9: Điện áp các nút trước và sau khi tối ưu kết nối turbine gió vào lưới.....	48
Hình 3.10: Biểu đồ hội tụ nghiệm của thuật toán.....	48

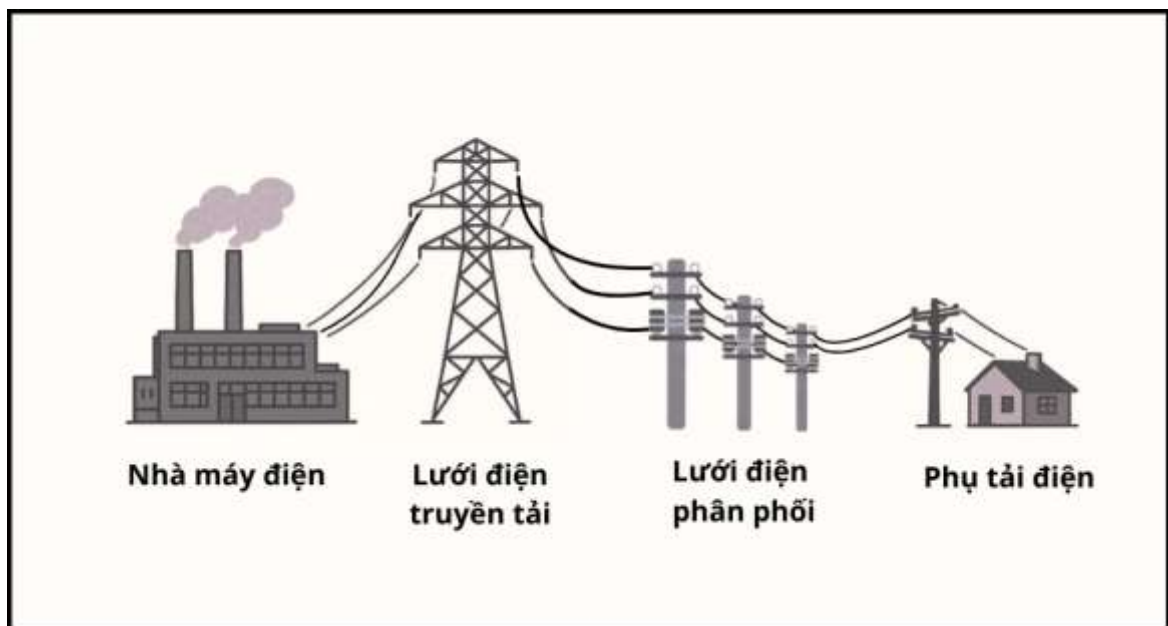
Chương 1: GIỚI THIỆU VỀ LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI VÀ ĐIỆN GIÓ

1.1. Tổng quan về lưới điện phân phối.

1.1.1. Khái niệm hệ thống điện và lưới điện phân phối.

Hệ thống điện là một tổ hợp các thành phần kỹ thuật có chức năng sản xuất, truyền tải, phân phối và tiêu thụ điện năng nhằm phục vụ nhu cầu phát triển kinh tế - xã hội. Về mặt cấu trúc, hệ thống điện quốc gia bao gồm bốn cấp chính: nhà máy phát điện, lưới truyền tải, lưới phân phối và phụ tải điện, như Hình 1.1. Mỗi cấp đảm nhận một vai trò riêng biệt nhưng có mối liên hệ chặt chẽ và tương tác qua lại nhằm đảm bảo tính ổn định, liên tục và chất lượng trong việc cung cấp điện năng [1].

Trong đó, lưới điện phân phối là một bộ phận trong hệ thống điện, có vai trò đặc biệt quan trọng trong việc đưa điện năng từ lưới truyền tải hoặc từ các trạm biến áp phân phối đến trực tiếp các hộ tiêu thụ, như: hộ gia đình, cơ quan, xí nghiệp và các khu công nghiệp. Đây là cấp điện gần nhất với người dùng cuối, nên ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng điện áp, độ tin cậy cung cấp điện và hiệu quả vận hành toàn hệ thống [1]. Theo thông tư 39/2015/TT-BCT “Quy định hệ thống điện phân phối” [2], định nghĩa Lưới điện phân phối (LĐPP) là phần lưới điện bao gồm các đường dây và trạm điện có cấp điện áp đến 110 kV.



Hình 1.1: Sơ đồ cấu trúc cơ bản của hệ thống điện [29]

Lưới điện phân phối gồm 2 phần [2]:

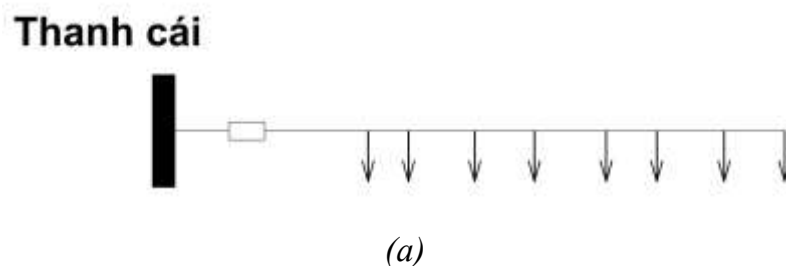
+ **Lưới trung áp:** Vận hành ở các cấp điện áp như 6 kV, 10 kV, 15 kV, 22 kV và 35kV. Mạng lưới này cấp điện cho các trạm biến áp trung/hạ áp và trực tiếp cung cấp cho một số phụ tải trung áp như nhà máy, khu công nghiệp. Hiện nay LĐPP tại Việt Nam hướng đến sử dụng chủ yếu cấp điện áp 22kV (theo quyết định số: 57/2000/QĐ-BCN của Bộ Công nghiệp).

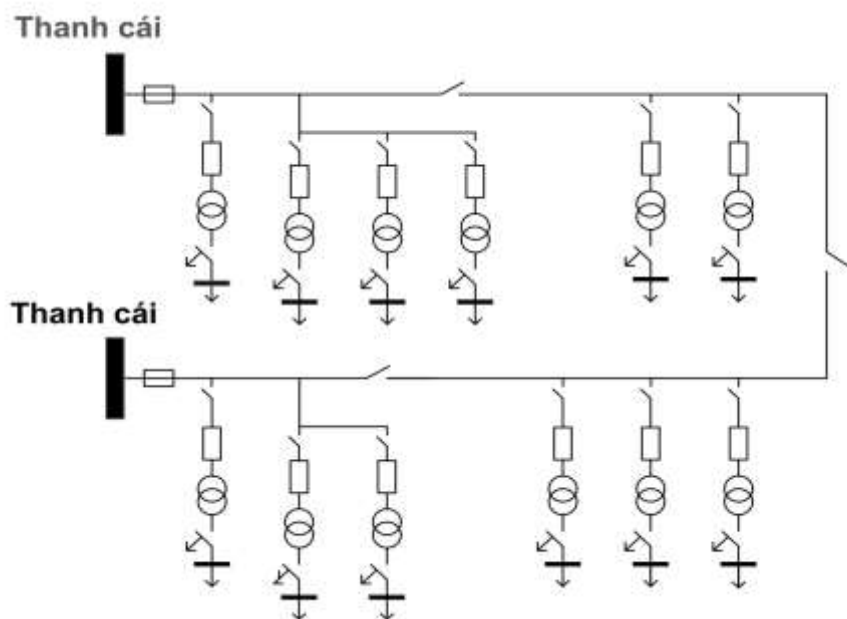
+ **Lưới hạ áp:** Cung cấp điện ở mức điện áp 380/220V, chủ yếu phục vụ các phụ tải dân dụng, thương mại và một số phụ tải công nghiệp nhỏ.

Cùng với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ, hệ thống điện hiện đại đang có xu hướng chuyển dịch từ cấu trúc hệ thống tập trung truyền thống sang hệ thống phân tán. Trong đó, các nguồn năng lượng phân tán như điện mặt trời, điện gió, thủy điện nhỏ, hoặc các hệ thống sử dụng động cơ diesel... được lắp đặt phân tán trong lưới điện phân phối để tăng cường tính linh hoạt, nhằm giảm tổn thất truyền tải và hỗ trợ nâng cao chất lượng điện.

1.1.2. Cấu trúc lưới điện phân phối

Lưới điện phân phối có cấu trúc đa dạng và phức tạp do sự tăng trưởng nhanh chóng các phụ tải phát triển. LĐPP có thể có cấu trúc mạch vòng, nhiều nguồn cung cấp hoặc hình tia. Đặc biệt ở thành phố lớn do mật độ phụ tải cao nên lưới điện phân phối càng phức tạp. Một số sơ đồ cấu trúc lưới điện phân phối như Hình 1.2 [1]. Trong điều kiện vận hành bình thường, chế độ vận hành của lưới điện là hở. Các sơ đồ mạng lưới phổ biến hiện nay gồm dạng hình tia (như Hình 1.2a) hoặc hình tia có bổ sung nguồn dự phòng. Những kiểu kết nối này có lợi thế là dễ quản lý, đơn giản trong vận hành và thuận tiện khi cần phục hồi cung cấp điện sau sự cố. Tuy LĐPP được vận hành hở nhưng để nâng cao độ tin cậy cung cấp điện, giữa các đường dây thường có các khoá điện thường mở có khả năng kết nối đến các đường dây khác giúp truyền tải hay chuyển đổi nguồn cung cấp điện cho phụ tải khi có sự cố (như Hình 1.2b).





(b)

Hình 1.2: (a) Sơ đồ lưới điện hình tia; (b) Sơ đồ lưới điện kín vận hành hở

1.1.3. Tối ưu hiệu quả kinh tế trong đầu tư và vận hành

Bên cạnh các tiêu chí về kỹ thuật, lưới điện phân phối cần được thiết kế vận hành sao cho vẫn đảm bảo được yêu cầu kỹ thuật và đồng thời đem lại hiệu quả kinh tế cao nhất. Tối ưu kinh tế ở đây, không chỉ nói đến giảm chi phí đầu tư ban đầu mà còn bao gồm việc giảm thiểu đến mức tối đa chi phí vận hành – bảo dưỡng thiết bị, giảm tổn thất điện năng và tăng tuổi thọ các thiết bị điện.

Việc tính toán kỹ lưỡng về mặt kỹ thuật và xây dựng đầu tư lưới điện ban đầu đóng vai trò quan trọng trong hiệu quả vận hành lâu dài mà lưới điện mang lại. Bởi vì lưới điện mang tính đồng bộ trong toàn hệ thống, việc sửa đổi thay thế trở nên rất khó khăn. Ngày nay, với sự phát triển công nghệ vượt bậc các thiết bị điện được sản xuất đang ngày càng trở nên tiên tiến và đem lại hiệu quả cao.

Một trong những chỉ tiêu quan trọng khi nhắc đến tối ưu chi phí đó là “giảm tổn thất điện năng”. Giảm tổn thất điện năng được xét đến từ lúc tính toán đầu tư lưới điện ban đầu cho đến khi lưới điện đã được đưa vào vận hành. Ở giai đoạn đầu tư ban đầu, việc tính toán giảm tổn thất điện năng có thể kể đến là việc tính toán mua sắm lựa chọn thiết bị điện, khi mua sắm thiết bị công nghệ cao có hiệu suất hoạt động tốt có thể giảm được tổn thất điện năng trong hệ thống. Tuy nhiên, thiết bị luôn có ngưỡng giới hạn nhất định nên người đã dần nghiên cứu sâu hơn trong việc tối ưu vận hành lưới điện trong những năm gần đây. Để thuận tiện cho việc nghiên cứu, ngành điện đã đưa ra các bài toán quản lý vận hành lưới điện phân phối như sau:

- Bài toán tối ưu hoá cấu trúc LĐPP;
- Bài toán bù công suất phản kháng trong LĐPP ;
- Bài toán điều khiển phương thức vận hành lưới điện phân phối;
- Bài toán tính toán độ tin cậy cung cấp điện;
- Bài toán đánh giá tổn thất điện năng.

1.1.4. Khả năng tích hợp hiệu quả các nguồn năng lượng phân tán (DG)

Dưới tác động ngày càng rõ nét của biến đổi khí hậu toàn cầu, việc phụ thuộc vào các nguồn năng lượng truyền thống và tập trung như nhiệt điện than hay thủy điện đang bộc lộ nhiều hạn chế, đặc biệt về tính bền vững và tác động tiêu cực đến môi trường. Đối với nhiệt điện chạy bằng than/dầu, việc sử dụng nguyên liệu là các nguồn năng lượng hoá thạch đang dần cạn kiệt theo thời gian trở nên không còn khả thi trong tương lai. Hơn nữa trong quá trình vận hành, nhiệt điện than cũng phát một lượng lớn khí CO₂ vào môi trường dẫn đến biến đổi khí hậu càng trở nên trầm trọng hơn. Đối với thủy điện, bị phụ thuộc vào thời tiết và lượng mưa cũng gặp nhiều trở ngại khi trái đất ngày càng nóng lên. Mặc dù với những ưu điểm lớn của thủy điện như giá điện thấp, vận hành ổn định nhưng bên cạnh đó nhược điểm lớn của thủy điện lại là có ít địa hình có thể phù hợp để xây dựng nhà máy thủy điện mới. Hơn nữa với thời gian xây dựng các nguồn phát tập trung truyền thống rất dài trong khi nhu cầu phát triển phụ tải không ngừng tăng cao, nên bài toán đảm bảo cung cấp điện cho phụ tải đang ngày càng trở nên khó khăn.

Trong bối cảnh đó, việc tích hợp các nguồn năng lượng phân tán (Distributed Generation – DGs) vào lưới điện đang là lựa chọn phù hợp. Với nhiều lợi ích mà nó mang lại như: giảm áp lực lên lưới điện truyền tải, giảm phụ thuộc và các nguồn điện truyền thống, chuyển dịch sang các nguồn năng lượng xanh giúp mang lại nhiều lợi ích về môi trường,... Trong đó, lưới điện phân phối đang là lựa chọn hàng đầu cho việc chọn lựa lưới điện để tích hợp DGs. Có thể kể đến bởi những lý do sau:

- Vị trí gần với phụ tải: DGs thường có công suất trung bình và nhỏ, phù hợp đặt gần với các khu dân cư, nhà máy công nghiệp,.. nơi diễn ra nhu cầu tiêu thụ điện năng nhiều nhất.

- Phù hợp với tính công suất nhỏ và phân tán của DGs

- Dễ dàng kết hợp với các mô hình năng lượng mới và lưu trữ năng lượng.

- Giảm chi phí đầu tư đường dây truyền tải đến các vùng sâu, vùng xa.

Bên cạnh những ưu điểm trên, việc tích hợp các nguồn DGs vào lưới điện phân phối cũng gặp không ít khó khăn như: quá điện áp tại các phụ tải, dòng công suất trên

nhánh bị thay đổi, hệ thống role hoạt động sai,...[3]. Do vậy, đòi hỏi LĐPP cần phải đủ khả năng để tích hợp DGs và vận hành hiệu quả.

1.2. Giới thiệu về điện gió

Năng lượng gió là nguồn tài nguyên vô tận trong tự nhiên và đã được con người khai thác, ứng dụng hiệu quả trong nhiều lĩnh vực. Một trong những ứng dụng tiêu biểu của năng lượng gió có thể kể đến là sử dụng để phát điện.

Trong lịch sử, Turbine gió phát điện đầu tiên trên thế giới đã ra đời từ năm 1887, được phát minh bởi Charles F. Brush, tại Cleveland, Ohio, Mỹ. Sau hơn 100 năm nghiên cứu và phát triển, nguồn điện gió ngày nay đã đóng vai trò quan trọng trong việc cung cấp điện tại nhiều quốc gia trên thế giới, trong đó có Việt Nam. Với những ưu điểm như tiềm năng khai thác công suất lớn, là nguồn năng lượng sạch, ít gây hại đến môi trường,...chính vì thế nên điện gió đang là một trong những lựa chọn hàng đầu trong bối cảnh biến đổi khí hậu toàn cầu như hiện nay.

1.2.1. Nguyên lý hoạt động, cấu tạo và điều chỉnh công suất phát của turbine gió

1.2.1.1. Nguyên lý hoạt động và cấu tạo

a) Nguyên lý hoạt động

Nguyên lý hoạt động của turbine điện gió có thể hiểu đơn giản bằng cách thực hiện qua hai giai đoạn như sau: Giai đoạn 1- biến đổi năng lượng gió thành cơ năng trên trục thông qua các cánh quạt; Giai đoạn 2 - biến đổi cơ năng trên trục thành điện năng bằng cách sử dụng máy phát điện [4].

Tại giai đoạn 1- biến đổi năng lượng gió thành cơ năng trên trục thông qua các cánh quạt: Với turbine được quay bằng sức gió, turbine này sử dụng các cánh quạt được thiết kế tối ưu theo tiêu chuẩn khí động học để đón được nhiều gió nhất, khi gió thổi đạt tốc độ yêu cầu sẽ làm di chuyển cánh quạt và quay trục cánh quạt nên tạo ra cơ năng trên trục.

Tại giai đoạn 2 - biến đổi cơ năng trên trục thành điện năng thông qua máy phát điện: trục cánh quạt sẽ được nối với thiết bị trung gian để tăng tốc độ quay (VD: hộp số) và nối đến roto của máy phát điện, lúc này roto máy phát quay với tốc độ cao làm biến đổi cơ năng trên trục thành điện năng.

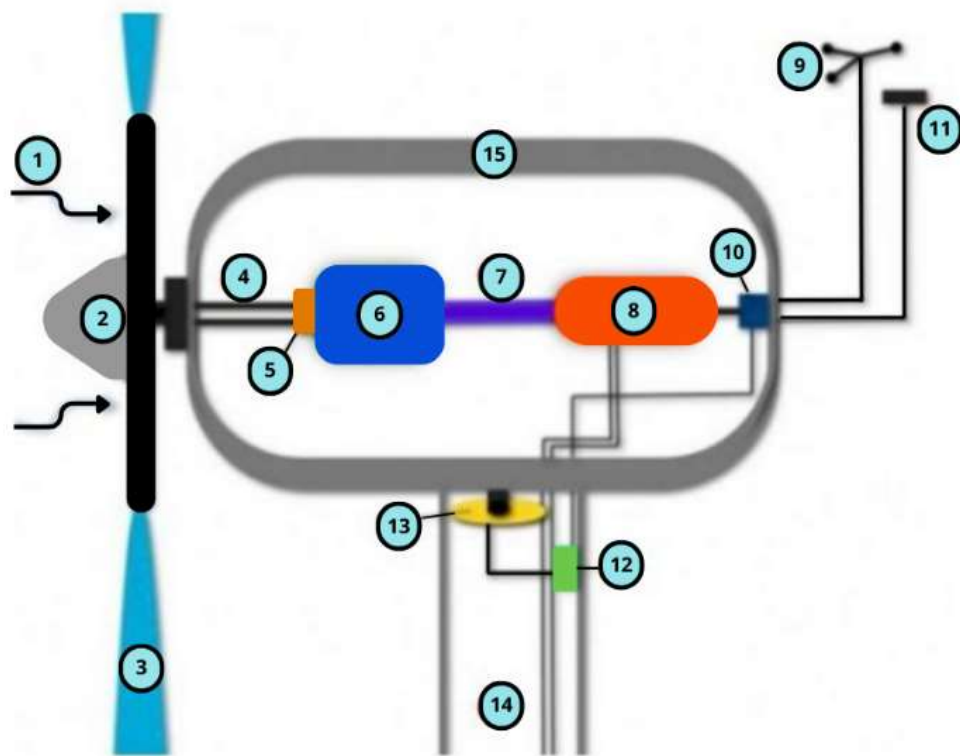
Mặc dù nguyên lý hoạt động cơ bản của turbine gió khá đơn giản, nhưng để có thể tận dụng được hiệu quả trong thực tế turbine gió vẫn là một hệ thống phức tạp cần nhiều kiến thức chuyên sâu trong nhiều lĩnh vực, có thể kể đến như: Khí động học, cơ khí, điện, xây dựng và cần có sự phối hợp chặt chẽ với nhau để mang lại hiệu quả cao [4].

Bởi vì, để thiết kế tối ưu các cánh quạt cần có kiến thức về khí động học, trong khi trục truyền động và thân cột là kiến thức về cơ khí và xây dựng, để vận hành và điều khiển cùng các hệ thống bảo vệ của turbine gió thì cần đến kiến thức về điện và các hệ thống điều khiển. Hiện nay, nhằm khai thác được tối ưu nguồn năng lượng gió người ta thiết kế turbine gió ngày càng cao lớn, trên thực tế đã có turbine gió cao đến 300m.

b) Cấu tạo turbine điện gió

Như đã giới thiệu ở phần trên, turbine gió biến đổi năng lượng gió thành cơ năng trên trục, qua thiết bị trung gian để tăng tốc độ quay và đưa vào máy phát điện, sau đó máy phát sẽ thực hiện nhiệm vụ biến đổi cơ năng thành điện năng. Có nhiều loại turbine điện gió đã được nghiên cứu trong những năm qua, tuy nhiên loại turbine được ứng dụng phổ biến nhất hiện nay là loại turbine gió trục ngang. Với nhiều ưu điểm như: có thể thiết kế được công suất lớn, hiệu quả tốt ở tốc độ gió cao,... nên turbine gió trục ngang đang là lựa chọn hàng đầu.

Cấu tạo cơ bản của turbine gió trục ngang được thể hiện như Hình 1.3.



Hình 1.3: Cấu tạo turbine điện gió trục ngang.

- (1) **Hướng gió vào:** để turbine vận hành tối ưu hiệu suất nhất thì hướng gió vào cần vuông góc với cánh quạt.
- (2) **Mũi của turbine:** được thiết kế theo khí động học tối ưu hiệu suất

- (3) **Các cánh quạt của turbine được gắn vào mũ và roto:** có chức năng đón gió và tạo chuyển động quay để thu năng lượng gió. Được thiết kế dựa theo khí động học và phù hợp với điều kiện tự nhiên cụ thể như: áp suất, nhiệt độ, tốc độ gió. Đường kính cánh quạt sẽ thay đổi theo công suất của turbine được thiết kế. Hiện nay hầu hết các cánh quạt của turbine đều có khả năng xoay góc cánh quạt để đón được nhiều gió hơn.
- (4) **Trục chính của turbine:** có nhiệm vụ truyền động từ trục cánh quạt đến hộp số của turbine. Có thể gọi là trục roto tốc độ thấp vì khi gió thổi cánh quạt gió quay với tốc độ thấp nhưng có lực momen lớn.
- (5) **Phanh:** có nhiệm vụ dừng trục quay của turbine, được lắp đặt để bảo vệ turbine khi tốc độ gió cao và dừng theo yêu cầu của người vận hành. Được kết nối với hệ thống điều khiển.
- (6) **Hộp số:** roto thường quay với tốc độ thấp khoảng 30-60 vòng/phút trong khi tốc độ yêu cầu để phát điện là 1200-1800 vòng/phút nên cần sử dụng hộp số để nâng tốc độ quay của roto đạt tốc độ yêu cầu. Cấu tạo của hộp số gồm nhiều bánh răng khác nhau kết nối trước trục tốc độ thấp và tốc độ cao của turbine. Phần lớn các turbine điện gió hiện nay đều có sử dụng hộp số.
- (7) **Trục turbine tốc độ cao:** có nhiệm vụ kết nối hộp số với máy phát điện. Giúp nhận cơ năng từ hộp số sau khi đã được tăng tốc từ trục tốc độ thấp của roto sau đó truyền cơ năng tốc độ cao đến máy phát điện.
- (8) **Máy phát điện:** nhằm thực hiện chức năng chuyển cơ năng trên trục truyền động thành điện năng. Có thể kể đến ba hệ thống máy phát điện gió đang được sử dụng thông dụng hiện nay. Loại thứ nhất là máy phát điện có hệ thống tốc độ không đổi, loại này dùng máy phát cảm ứng roto lồng sóc (SCIG) và nối trực tiếp với lưới điện. Loại thứ 2 là máy phát có hệ thống tốc độ thay đổi sử dụng máy phát cảm ứng roto dây quấn (DFIG), trong đó có bộ chuyển đổi công suất nối với cuộn dây roto để điều chỉnh tần số và cuộn dây stato nối trực tiếp với lưới điện. Loại thứ 3 là máy phát có hệ thống tốc độ thay đổi sử dụng máy phát đồng bộ (DDSG) với hệ thống chuyển đổi công suất tuần hoàn nối giữa máy phát và lưới, đồng thời máy phát được cách ly hoàn toàn với lưới điện - nghĩa là máy phát không kết nối trực tiếp với lưới mà thông qua bộ chuyển đổi.
- (9) **Anemometer:** dùng để đo tốc độ gió tại vị trí lắp đặt và truyền dữ liệu tốc độ gió đến bộ điều khiển. Hỗ trợ cho bộ điều khiển có dữ liệu để thực hiện các biện pháp điều khiển hoạt động của turbine phù hợp theo tốc độ gió.

- (10) **Bộ điều khiển (controller):** được sử dụng để điều khiển khởi động, vận hành hoặc dừng turbine dựa vào dữ liệu gió được truyền đến từ máy đo gió. Khi tốc độ gió quá cao turbine sẽ điều khiển phanh hãm để dừng động cơ.
- (11) **Cánh gió:** để đo hướng gió nhằm tìm hướng có tốc độ gió cao để turbine hoạt động phát điện hoặc chuyển sang hướng ít gió để giảm tốc độ gió vào cánh quạt để bảo vệ turbine. Cánh gió được kết nối với bộ truyền động quay để điều chỉnh turbine theo đúng hướng gió.
- (12) **Bộ truyền động quay:** nằm trong cơ cấu tiếp nhận dữ liệu từ cánh gió để hướng dẫn xoay turbine theo hướng gió
- (13) **Động cơ quay:** là thiết bị vật lý để đưa turbine quay theo hướng gió theo hướng dẫn của bộ truyền động quay
- (14) **Tháp turbine:** để nâng đỡ và giữ turbine ở trên cao, chứa các hệ thống dây dẫn điện và các hệ thống điều khiển từ máy phát đến trạm biến áp.
- (15) **Vỏ turbine:** để bảo vệ các thiết bị bên trong turbine dưới tác động của điều kiện môi trường và các tác nhân từ bên ngoài.

1.2.1.2. Công suất phát và phạm vi điều chỉnh hệ số công suất

Công suất điện đầu ra của turbine gió gần bằng công suất cơ thu được từ gió, sau khi trừ đi các tổn hao trong máy phát và hệ thống truyền động. Các turbine gió hiện đại có công suất định mức dao động từ vài trăm kW đến hàng chục MW. Ví dụ, giai đoạn 2 của Nhà máy điện gió Bạc Liêu (Việt Nam) sử dụng 62 turbine, mỗi turbine có công suất 1,6 MW, tổng công suất lắp đặt đạt 99,2 MW và sản lượng điện hàng năm khoảng 320 triệu kWh [5].

Khi vận tốc gió đạt ngưỡng định mức (thường từ 12–15 m/s), turbine sẽ vận hành ở công suất tối đa. Nếu vận tốc gió tiếp tục tăng, hệ thống điều khiển sẽ điều chỉnh góc nghiêng cánh (pitch control) hoặc giảm tốc độ quay để duy trì công suất ổn định, đảm bảo an toàn cho thiết bị.

Hệ số công suất ($\cos\varphi=P/S$, với S là công suất biểu kiến và P là công suất tác dụng) phản ánh khả năng điều tiết công suất phản kháng của máy phát. Nhờ sử dụng bộ biến tần linh hoạt, hệ thống turbine gió có thể hoạt động ở chế độ phát công suất phản kháng hoặc tiêu thụ công suất phản kháng để đáp ứng yêu cầu của lưới điện [6]. Đối với turbine gió sử dụng bộ biến tần (PMSG hoặc DFIG) tùy thuộc vào dung lượng bộ biến tần mà hệ số công suất 0,7–1,0 [27]. Khả năng điều chỉnh hệ số công suất rộng giúp các nhà máy điện gió không chỉ cung cấp công suất tác dụng mà còn hỗ trợ ổn định hệ thống điện, đặc biệt trong bối cảnh tích hợp ngày càng nhiều nguồn năng lượng tái tạo vào lưới.

1.2.2. Ưu và nhược điểm của điện gió

1.2.2.1. Ưu điểm

Một trong những ưu điểm lớn nhất của điện gió là tính chất không phát thải khí nhà kính trong quá trình vận hành. Khác với các nhà máy nhiệt điện đốt than hoặc khí, nhà máy điện gió không tạo ra CO₂, NO_x, SO₂ hay bụi mịn – những tác nhân gây ô nhiễm môi trường và ảnh hưởng tiêu cực đến sức khỏe con người. Chính vì vậy, phát triển điện gió không chỉ góp phần giảm ô nhiễm không khí, mà còn giúp hạn chế tác động tiêu cực của biến đổi khí hậu.

Gió là nguồn năng lượng tái tạo vĩnh viễn. Không giống như nhiên liệu hóa thạch (than, dầu, khí đốt), nguồn gió sẽ không bị cạn kiệt theo thời gian. Miễn là Trái Đất tồn tại và chịu ảnh hưởng từ năng lượng Mặt Trời, gió vẫn sẽ được tạo ra. Điều này đảm bảo tính ổn định dài hạn và bền vững trong việc khai thác và sử dụng.

Một khi các turbine gió đã được lắp đặt và đi vào hoạt động, chi phí vận hành và bảo trì tương đối thấp so với các nhà máy nhiệt điện hoặc thủy điện. Không có chi phí nhiên liệu, không cần hệ thống làm mát phức tạp, và ít bộ phận chuyển động hơn giúp hệ thống hoạt động ổn định và lâu dài.

Điện gió có thể tận dụng được các khu vực đất đai không hiệu quả trong nông nghiệp, như vùng cao nguyên, đồi trọc, ven biển hoặc các khu vực xa dân cư. Ngoài ra, có thể kết hợp mô hình điện gió – nông nghiệp, tức là trồng cây dưới turbine, giúp sử dụng đất hiệu quả hơn.

Ngành công nghiệp điện gió góp phần tạo công ăn việc làm tại chỗ, từ khâu khảo sát, lắp đặt đến vận hành, bảo dưỡng [8]. Bên cạnh đó, việc phát triển điện gió cũng tạo điều kiện thúc đẩy các ngành công nghiệp cơ khí chế tạo, điện – điện tử và tự động hóa, đặc biệt là trong bối cảnh chuyển đổi năng lượng hiện nay.

1.2.2.2. Nhược điểm

Mặc dù là nguồn năng lượng tái tạo, nhưng gió lại là yếu tố không ổn định. Vào những thời điểm lặng gió hoặc tốc độ gió dưới mức khởi động, turbine sẽ không thể phát điện, dẫn đến sản lượng điện không ổn định và gây khó khăn cho việc điều độ lưới điện. Do đó, cần có hệ thống dự báo gió chính xác hoặc kết hợp điện gió với hệ thống lưu trữ năng lượng (battery, pumped hydro,...) để đảm bảo ổn định cung cấp điện. Một trong những rào cản lớn nhất là chi phí đầu tư ban đầu tương đối cao. Ngoài chi phí mua turbine, còn có chi phí khảo sát gió, xây dựng móng, vận chuyển, lắp đặt, và kết nối với lưới điện. Bên cạnh đó, với các dự án ở vùng núi hoặc ngoài khơi, chi phí này càng lớn do địa hình phức tạp và yêu cầu công nghệ cao.

Turbine gió có chiều cao lớn và thường lắp đặt thành cụm, gây ảnh hưởng đến mỹ quan đô thị hoặc cảnh quan tự nhiên. Ngoài ra, khi vận hành, turbine tạo ra tiếng ồn do ma sát giữa cánh quạt và không khí, có thể ảnh hưởng đến cuộc sống của người dân nếu đặt gần khu dân cư. Một số nghiên cứu cho thấy turbine gió có thể gây nguy hiểm cho chim di cư hoặc loài dơi, đặc biệt là tại các khu vực gần rừng, sông hồ hoặc đường di cư của động vật [7]. Tuy nhiên, tác động này có thể giảm đáng kể nếu dự án được thiết kế và quy hoạch hợp lý, có sự phối hợp với các chuyên gia sinh học và môi trường.

Để đảm bảo hiệu quả khai thác và hạn chế hiện tượng nhiễu động gió giữa các turbine, cần có khoảng cách tối thiểu giữa các trụ, dẫn đến yêu cầu về diện tích mặt bằng khá lớn. Điều này gây khó khăn nếu khu vực có quỹ đất hạn chế hoặc mật độ dân cư cao.

Chương 2: CÁC GIẢI PHÁP GIẢM TỶ SỐ TỶ TỶ CÔNG SUẤT TRONG LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI

2.1. Tổng quan về tổn thất công suất trong lưới phân phối

Trong hệ thống điện, tổn thất công suất là lượng công suất bị hao hụt trong quá trình truyền tải và phân phối điện năng từ nguồn phát đến phụ tải. Đặc biệt trong lưới điện phân phối – nơi mà điện năng được truyền tải từ các trạm biến áp phân phối đến khách hàng sử dụng điện – tổn thất công suất thường chiếm tỷ trọng đáng kể. Nguyên nhân chủ yếu gây tổn thất công suất trong lưới phân phối là do điện trở của đường dây truyền tải điện, tổn thất năng lượng tại các máy biến áp, sự mất cân bằng pha và đặc biệt là sự tồn tại của công suất phản kháng. Công suất phản kháng tuy không sinh công nhưng vì có dòng công suất phản kháng chạy trong hệ thống, làm tăng tổng công suất truyền tải qua đường dây và thiết bị, từ đó làm gia tăng tổn thất công suất.

Tổn thất này không chỉ gây lãng phí năng lượng mà còn làm giảm hiệu quả vận hành hệ thống, tăng chi phí phát điện và ảnh hưởng đến chất lượng điện năng cung cấp. Do đó, việc đánh giá và áp dụng các biện pháp nhằm giảm tổn thất công suất trong lưới điện phân phối là vấn đề cấp thiết, góp phần nâng cao hiệu quả kinh tế – kỹ thuật và độ tin cậy của hệ thống điện.

2.2. Các giải pháp giảm tổn thất công suất trong lưới phân phối

Việc giảm tổn thất công suất trong lưới điện phân phối là một trong những nhiệm vụ quan trọng nhằm nâng cao hiệu quả vận hành và độ tin cậy của hệ thống điện. Một số giải pháp phổ biến như sau:

2.2.1. Tái cấu trúc mạng lưới và cân bằng phụ tải

Trong hệ thống lưới điện phân phối, tái cấu trúc mạng lưới (thông qua việc điều chỉnh trạng thái đóng/mở của các thiết bị đóng cắt phân đoạn) là một phương pháp hiệu quả nhằm giảm thiểu tổn thất công suất và phân bố đồng đều phụ tải giữa các đường dây. Theo nghiên cứu của Baran và Wu [9], lưới điện phân phối thường vận hành theo cấu trúc mạch nhánh và có thể được tối ưu hóa bằng cách điều chỉnh các thiết bị đóng cắt phân đoạn để đạt được hai mục tiêu chính: (1) giảm tổn thất công suất toàn hệ thống và (2) hạn chế tình trạng quá tải cục bộ.

Quá trình tái cấu trúc giúp điều chỉnh đường đi của dòng điện từ nguồn đến phụ tải một cách tối ưu, từ đó làm giảm cường độ dòng điện trên các nhánh và giảm tổn

thất I^2R . Bên cạnh đó, việc tái cấu trúc hợp lý còn góp phần nâng cao độ tin cậy của hệ thống và cải thiện chất lượng điện áp tại các vị trí xa nguồn.

Ngoài tái cấu trúc mạng lưới, việc cân bằng phụ tải giữa các pha và giữa các đường dây trung thế (feeder) cũng đóng vai trò quan trọng trong việc giảm tổn thất. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng sự mất cân bằng phụ tải dẫn đến sự gia tăng dòng điện trung tính và độ lệch pha, làm tăng tổn thất công suất trên từng pha. Ví dụ, một phân tích trên hệ thống điện ba pha cho thấy: "Mức độ mất cân bằng phụ tải càng cao thì tổn thất công suất càng lớn. Do đó, việc tái cấu trúc lưới điện phân phối để đảm bảo cân bằng phụ tải là một giải pháp được khuyến nghị nhằm giảm thiểu tổn thất toàn hệ thống" [10]. Như vậy, việc phân bố lại phụ tải sao cho các pha có cùng hệ số công suất và tải trọng tương đương sẽ giúp giảm đáng kể dòng điện dư thừa, từ đó giảm thiểu tổn thất trên đường dây.

2.2.2. Bù công suất phản kháng

Bù công suất phản kháng là một giải pháp kỹ thuật quan trọng nhằm nâng cao hệ số công suất và giảm thiểu tổn thất trong hệ thống điện phân phối. Khi phụ tải hoạt động với hệ số công suất thấp (tiêu thụ nhiều công suất phản kháng), dòng điện tổng trong đường dây và máy biến áp sẽ tăng lên đáng kể, dẫn đến gia tăng tổn thất công suất theo hiệu ứng I^2R .

Để khắc phục vấn đề này, các thiết bị bù công suất phản kháng như tụ bù ngang (lắp đặt tại trạm biến áp hoặc trên đường dây) hoặc hệ thống bù động (SVC, STATCOM) có thể được triển khai để cung cấp công suất phản kháng ngay tại vị trí phụ tải. Giải pháp này mang lại ba lợi ích chính: (1) giảm dòng điện phản kháng trên lưới điện, (2) cải thiện hệ số công suất tổng, và (3) giảm tổn thất công suất truyền tải.

Nghiên cứu của Công ty Điện lực TP.HCM (2018) đã chứng minh: "Việc lắp đặt tụ bù ngang giúp giảm 15-20% tổn thất công suất trong lưới điện phân phối, đồng thời cải thiện chất lượng điện áp và tăng khả năng mang tải của hệ thống" [11]. Đặc biệt, khi triển khai bù công suất phản kháng ở cấp hạ thế, hiệu quả giảm tổn thất càng rõ rệt do giảm được dòng điện truyền tải trên toàn bộ hệ thống phân phối [12].

2.2.3. Điều chỉnh điện áp và tối ưu chế độ vận hành

Điều chỉnh điện áp hợp lý là một trong những giải pháp kỹ thuật quan trọng nhất để giảm tổn thất trong hệ thống phân phối điện. Nguyên lý cơ bản của phương pháp này dựa trên mối quan hệ giữa điện áp và dòng điện trong truyền tải điện năng: khi điện áp vận hành được nâng cao (trong phạm vi cho phép của tiêu chuẩn chất lượng điện), cường độ dòng điện cần thiết để truyền tải cùng một lượng công suất sẽ giảm xuống, dẫn đến giảm đáng kể tổn thất công suất do hiệu ứng I^2R trên đường dây. Nghiên cứu của Cơ

quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ (EPA) đã khẳng định: "Việc duy trì điện áp ở mức cao hơn cho phép giảm cường độ dòng điện, từ đó giảm thiểu tổn thất trên đường dây truyền tải" [13].

Để thực hiện hiệu quả giải pháp này, các thiết bị điều chỉnh điện áp như máy biến áp có bộ điều chỉnh điện áp dưới tải (OLTC), bộ ổn áp phân phối (Voltage Regulator) và các trạm tăng áp cố định thường được triển khai nhằm duy trì điện áp tại các nút phân phối ở mức tối ưu. Bên cạnh đó, giải pháp tối ưu hóa phối hợp điện áp và công suất phản kháng (Volt/VAR Optimization - VVO) đã được áp dụng tại nhiều quốc gia trên thế giới, đóng vai trò ngày càng quan trọng trong vận hành hệ thống điện hiện đại. Hệ thống VVO sử dụng các thuật toán điều khiển tự động để liên tục điều chỉnh bước phân áp của máy biến áp, đóng ngắt các tụ bù và điều khiển các bộ ổn áp nhằm duy trì điện áp và hệ số công suất ở trạng thái tối ưu toàn hệ thống.

2.2.4. Ứng dụng hệ thống tự động hóa lưới điện phân phối

Hệ thống tự động hóa lưới điện phân phối bao gồm các thành phần như SCADA (Hệ thống giám sát và điều khiển thu thập dữ liệu), DMS (Hệ thống quản lý lưới phân phối), thiết bị đóng cắt thông minh, cảm biến và hệ thống đo đếm từ xa, cho phép giám sát và điều khiển lưới điện gần như theo thời gian thực. Nhờ đó, quá trình vận hành được tối ưu hóa, góp phần giảm thiểu đáng kể tổn thất công suất – tổn thất điện năng. Hệ thống tự động hóa lưới điện phân phối hỗ trợ giảm tổn thất thông qua các cơ chế chính bao gồm:

- **Giám sát và điều khiển tối ưu:** SCADA và DMS thu thập dữ liệu về dòng điện, điện áp và trạng thái thiết bị, đồng thời điều khiển từ xa các bộ chỉnh áp tự động (LTC), tụ bù và thiết bị đóng cắt phân đoạn. Điều này cho phép tái cấu trúc lưới điện tự động để cân bằng tải và giảm thiểu các luồng công suất dư thừa. Ví dụ, việc DMS tự động điều chỉnh điện áp và công suất phản kháng đã giúp Công ty Điện lực Con Edison (Mỹ) giảm tổn thất trên hệ thống 4 kV khoảng 2,3% trong giờ cao điểm, tương ứng với tiết kiệm gần 4.500 MWh mỗi năm [14]. Những cải tiến này cũng góp phần nâng cao hệ số công suất và tăng khả năng truyền tải của trạm biến áp (do giảm công suất phản kháng), từ đó giảm tổn thất điện năng trên toàn hệ thống.
- **Phát hiện và xử lý sự cố nhanh chóng nhờ thiết bị đóng cắt thông minh và cảm biến:** Các thiết bị đóng cắt thông minh như recloser và RMU (Ring Main Unit) được trang bị cảm biến dòng/áp có khả năng phát hiện và cô lập sự cố (như rò rỉ điện, ngắn mạch) mà không cần thao tác thủ công. Nhờ đó, đoạn lưới gặp sự cố sẽ được tách ra khỏi hệ thống ngay lập tức, hạn chế tối đa tổn thất

điện năng do dòng sự cố kéo dài. Bên cạnh đó, các thiết bị này hỗ trợ chuyển mạch tự động để phân phối lại tải trong trường hợp cần thiết, giúp cân bằng dòng điện giữa các nhánh và giảm tổn thất do quá tải cục bộ.

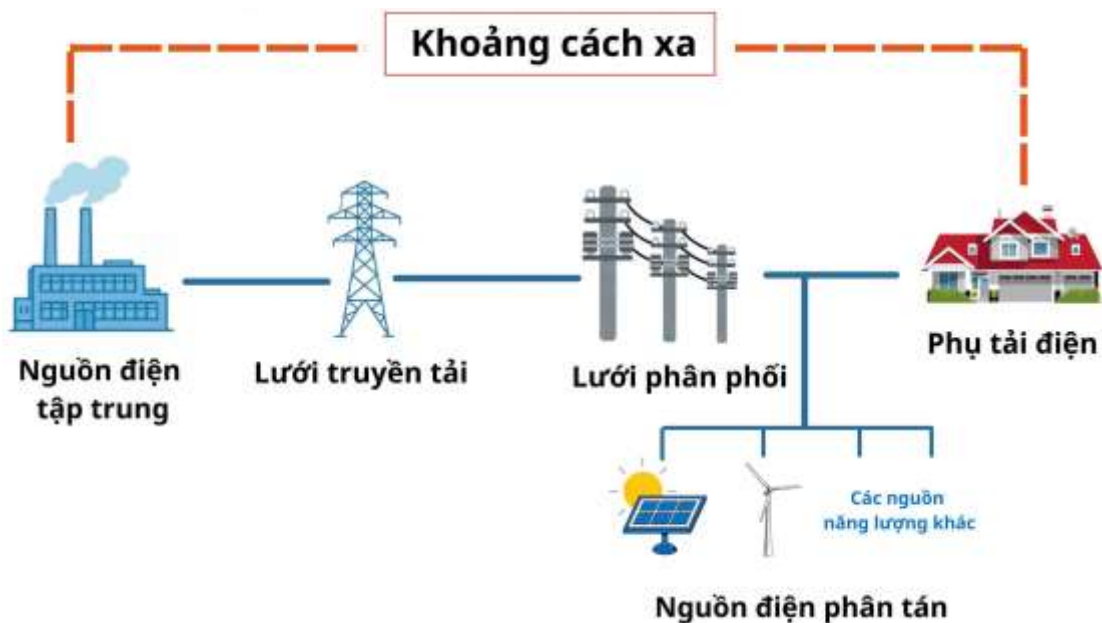
- **Điều chỉnh điện áp và quản lý công suất phản kháng:** Hệ thống LTC (Load Tap Changer) và tự bù tự động, kết hợp với SCADA/DMS, duy trì điện áp ở mức tối ưu (thường ở giới hạn thấp nhất cho phép). Khi điện áp giảm, dòng tải cũng giảm theo, dẫn đến giảm tổn thất trên đường dây và máy biến áp. Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng giảm điện áp lưới khoảng vài phần trăm có thể tiết kiệm từ 1–3% năng lượng cung cấp trên các mạch phân phối [15]. Cơ chế này, thường được gọi là Conservation Voltage Reduction (CVR), được coi là một giải pháp hiệu quả để tiết kiệm năng lượng cho cả nhà máy điện và lưới phân phối.
- **Giảm tổn thất phi kỹ thuật nhờ hệ thống đo đếm từ xa (AMI):** Hệ thống AMI (Advanced Metering Infrastructure) cung cấp dữ liệu tiêu thụ điện theo thời gian thực ở cấp điện áp thấp, đồng thời tự động ghi nhận và truyền số liệu về điện năng tiêu thụ cùng các chỉ số chất lượng điện. Khả năng giám sát liên tục này giúp phát hiện nhanh các bất thường như mất cân bằng pha, công suất bất thường hoặc can thiệp trái phép. Kết quả là tổn thất phi kỹ thuật (bao gồm gian lận và trộm điện) được giảm đáng kể.

Tự động hóa lưới điện phân phối đóng vai trò quan trọng trong việc tối ưu hóa phân phối công suất, cân bằng tải, điều chỉnh điện áp và xử lý sự cố nhanh chóng, góp phần giảm cả tổn thất kỹ thuật lẫn phi kỹ thuật. Thực tế triển khai tại Việt Nam cho thấy hiệu quả rõ rệt: Tập đoàn Điện lực Việt Nam (EVN) báo cáo tỷ lệ tổn thất điện năng toàn hệ thống giảm từ 8,85% (năm 2012) xuống còn 6,24% (năm 2022) nhờ áp dụng đồng bộ các giải pháp lưới thông minh [16].

2.2.5. Tích hợp các nguồn phân tán vào lưới điện phân phối

2.2.5.1. Lợi ích của việc tích hợp nguồn phân tán vào lưới điện phân phối

Nguồn điện phân tán (DG) là các nguồn phát điện quy mô nhỏ hoặc vừa, được đặt gần phụ tải. Theo Tập đoàn Điện lực Việt Nam (EVN) [17], DG bao gồm nhiều công nghệ như turbine gió, pin mặt trời, sinh khối, hệ thống đồng phát nhiệt – điện, pin nhiên liệu, thậm chí cả xe điện (EV) ở chế độ đảo ngược công suất. Mặc dù hiệu suất kinh tế của DG thường thấp hơn các nhà máy điện tập trung, mô hình này giúp tăng tính dự phòng và độ tin cậy nhờ giảm phụ thuộc vào lưới truyền tải [17].



Hình 2.1: Tích hợp nguồn phân tán vào lưới điện phân phối

Khi DG được đặt gần phụ tải theo như Hình 2.1, công suất tiêu thụ được cấp tại chỗ, từ đó làm giảm công suất truyền tải trên đường dây, kéo theo giảm dòng điện và tổn thất công suất theo biểu thức I^2R . Điều này đồng thời giúp giảm tải cho đường dây và máy biến áp, nâng cao hiệu suất vận hành của lưới điện phân phối. Ngoài ra, hầu hết các nguồn DG như turbine gió và pin mặt trời đều tích hợp biến tần và thiết bị điện tử công suất, cho phép cung cấp công suất phản kháng và hỗ trợ ổn định điện áp tại khu vực cục bộ. DG cũng góp phần nâng cao chất lượng điện áp tại các nút có điện áp thấp và cải thiện hệ số công suất, qua đó giảm tổn thất do công suất phản kháng ngược. Trong trường hợp sự cố xảy ra ở lưới truyền tải, DG có thể vận hành độc lập hoặc hỗ trợ cấp điện, nâng cao tính linh hoạt và độ tin cậy của hệ thống. Đồng thời, DG còn đóng vai trò là nguồn dự phòng cục bộ cho các phụ tải quan trọng như bệnh viện, trung tâm dữ liệu hoặc cơ sở hạ tầng chiến lược.

Việc tích hợp DG đang trở thành xu hướng tất yếu trong chuyển dịch năng lượng, thúc đẩy phát triển năng lượng tái tạo và giảm áp lực cho lưới điện truyền thống. Nhiều nghiên cứu đã chứng minh rằng hiệu quả của DG phụ thuộc lớn vào việc lựa chọn vị trí và công suất tối ưu, nhằm giảm tổn thất công suất và cải thiện chất lượng điện áp. Các thuật toán tối ưu như GA, COA, PSO,... được ứng dụng rộng rãi trong bài toán này [18].

Trên thế giới, nhiều quốc gia đã ban hành chính sách hỗ trợ phát triển DG. Tại Việt Nam, xu hướng phát triển DG cũng đang được chú trọng. Tuy phần lớn các dự án điện gió hiện nay là quy mô lớn và kết nối lưới truyền tải, nhưng Chính phủ đang từng bước khuyến khích phát triển các nguồn phân tán như điện mặt trời mái nhà và hệ thống lưu trữ năng lượng. Trong Quy hoạch điện VIII [19], các nguồn DER – bao gồm điện mặt

trời quy mô lớn, PV mái nhà và hệ thống pin lưu trữ – đã được đưa vào kế hoạch phát triển. Bên cạnh đó, theo EVN, tiềm năng phát triển DG ở Việt Nam là rất lớn: nghiên cứu của AWS TrueWind cho thấy có khoảng 128.000 km² diện tích có tốc độ gió trên 7 m/s, với tổng tiềm năng công suất gió khoảng 110.000 MW, cùng với mức bức xạ mặt trời trung bình khá cao [20]. Do đó, việc khai thác DG là hướng đi hợp lý nhằm nâng cao độ tin cậy cung cấp điện và mở rộng khả năng tiếp cận điện năng đến các vùng sâu, vùng xa.

2.2.5.2. Thách thức khi tích hợp nguồn phân tán vào lưới phân phối

- **Quá điện áp và sụt áp**

Khi công suất phát từ DG vượt quá nhu cầu tải tại điểm đấu nối, dòng điện có thể đảo chiều (từ lưới phân phối trở về lưới trung áp), dẫn đến hiện tượng quá điện áp. Ngược lại, trong điều kiện tải cao hoặc DG đặt xa nguồn cấp, điện áp tại các điểm cuối lưới có thể giảm xuống dưới mức cho phép. Các nghiên cứu chỉ ra rằng: Sự tích hợp nhiều DG với tổng công suất lớn có thể làm tăng điện áp vượt ngưỡng quy định (ví dụ: tiêu chuẩn ANSI quy định $\pm 5\%$ ở cấp phân phối). Trong điều kiện tải cực đại, hiện tượng sụt áp có thể xảy ra ở hầu hết các vị trí đặt DG.

- **Dao động điện áp**

Sự biến thiên công suất của các nguồn DG, đặc biệt là điện gió, gây ra dao động điện áp ngắn hạn. Các nghiên cứu mô phỏng cho thấy: Điện áp tại các nút gần nguồn chính thường ổn định, trong khi các nút gần DG có thể dao động đáng kể (khoảng 0,04–0,05 pu), vượt giới hạn cho phép. Dao động điện áp làm tăng hao mòn thiết bị và yêu cầu vận hành thường xuyên các thiết bị điều chỉnh điện áp (như SVR, tụ bù).

- **Sóng hài**

Các thiết bị điện tử công suất trong DG (ví dụ: bộ nghịch lưu trong tuabin gió) là nguồn phát sinh sóng hài. Mặc dù kỹ thuật điều chế PWM hiện đại giúp giảm tổng méo hài (THD < 5%), các thành phần hài bậc cao vẫn có thể gây ảnh hưởng đến lưới điện.

- **Hiện tượng nhấp nháy (Flicker)**

Sự dao động nhanh của công suất phát từ DG (đặc biệt là điện gió) có thể gây ra hiện tượng nhấp nháy, ảnh hưởng đến chất lượng chiếu sáng.

Như vậy, bên cạnh nhiều lợi ích mang lại việc triển khai DG cũng đối mặt với một số thách thức. Thứ nhất là tính không ổn định của nguồn tái tạo như gió, mặt trời, đòi hỏi các giải pháp thiết kế và điều khiển tối ưu. Thứ hai là yêu cầu nâng cấp hệ thống bảo vệ và điều khiển của lưới phân phối, bao gồm bảo vệ hai chiều, hệ thống SCADA và điều khiển phân tán. Thứ ba là chi phí đầu tư và hiệu quả tài chính: do quy mô nhỏ và hiệu suất thấp hơn so với nguồn tập trung, các dự án DG thường cần được hỗ trợ thông qua các chính sách như cơ chế giá điện ưu đãi hoặc giá bán điện minh bạch nhằm đảm bảo tính khả thi về tài chính.

2.3. Bài toán tối ưu tích hợp nguồn điện gió vào lưới điện phân phối

2.3.1. Mô tả bài toán

Bài toán tối ưu tích hợp turbine gió vào lưới điện phân phối nhằm xác định cách bố trí và điều chỉnh các nguồn gió phân tán sao cho nâng cao hiệu quả vận hành của lưới. Nội dung cơ bản là chọn vị trí, quy mô và số lượng turbine gió trong mạng lưới phân phối sao cho vừa đáp ứng nhu cầu phụ tải, vừa tối ưu các chỉ tiêu về tổn thất, điện áp, chi phí, độ tin cậy,... Nhiều nghiên cứu xem đây là bài toán lập kế hoạch phân tán trong lưới phân phối. Các biến quyết định phổ biến thường bao gồm:

- Vị trí lắp đặt turbine gió: lựa chọn bus hoặc vị trí nút trong lưới để gắn nguồn gió.
- Công suất định mức (kích thước) của mỗi nguồn gió hoặc tổng công suất gió cần bố trí.
- Số lượng turbine gió hoặc số nguồn gió được phép đặt (có thể là số cá thể turbine hoặc nhóm công suất) khi mỗi turbine có công suất nhất định.
- Trong một số mô hình còn coi các tham số điều khiển đi kèm như hệ số công suất của nguồn gió như là một biến quyết định.

2.3.2. Hàm mục tiêu

Các bài toán tối ưu tích hợp nguồn gió thường được xây dựng với một hoặc nhiều hàm mục tiêu phản ánh hiệu quả vận hành và kinh tế của hệ thống. Một số hàm mục tiêu thông dụng bao gồm:

- Tối thiểu tổn thất công suất - Tổn thất điện năng – Giảm tổn thất công suất truyền tải trong lưới nhờ bố trí nguồn gió gần phụ tải. Nhiều nghiên cứu đặt mục tiêu giảm thiểu tổng tổn thất là ưu tiên hàng đầu.
- Cải thiện chất lượng điện áp – Nâng cao độ ổn định điện áp và đưa điện áp tại các bus về gần mức danh định (ví dụ duy trì trong khoảng 0.95–1.05 pu). Việc tích hợp hợp lý nguồn gió (có thể kèm điều chỉnh phản kháng) giúp giảm dao động và tăng ổn định hệ thống.
- Tối ưu chi phí – Tối thiểu tổng chi phí đầu tư và vận hành liên quan đến nguồn gió và lưới (bao gồm chi phí đầu tư turbine, chi phí vận hành, chi phí mua điện bù đắp, v.v.). Ví dụ, mục tiêu có thể là giảm tổng chi phí điện năng hoặc tăng lợi nhuận mạng lưới nhờ khai thác nguồn gió.
- Cải thiện độ tin cậy và khả năng cung cấp điện – Tăng độ tin cậy vận hành lưới, giảm chỉ số gián đoạn (SAIFI/SAIDI) bằng cách bổ sung nguồn dự phòng phân tán. Nhiều nghiên cứu đặt mục tiêu giảm thiểu rủi ro mất điện hoặc nâng cao tính bền vững khi có sự cố.
- Đa mục tiêu – Trong thực tế, các tiêu chí trên thường mâu thuẫn lẫn nhau. Do đó, bài toán được đặt dưới dạng tối ưu đa mục tiêu, hoặc kết hợp chúng trong một hàm mục tiêu hỗn hợp (ví dụ hàm mục tiêu tổng hợp có trọng số). Ví dụ, một số nghiên cứu kết hợp tối thiểu hóa tổn thất và chi phí trong khi cải thiện độ tin cậy của hệ thống.

2.3.3. Các ràng buộc

Bài toán tối ưu tích hợp nguồn gió phải thỏa mãn các ràng buộc vật lý và kỹ thuật của lưới điện phân phối. Các ràng buộc chính thường bao gồm:

- Phương trình cân bằng công suất – Đảm bảo tổng công suất phát (cả công suất gió và các nguồn khác) tại mỗi nút bằng tổng phụ tải cộng với tổn thất. Nói cách khác, bài toán phải tuân thủ phương trình cân bằng P-Q theo từng nút.
- Giới hạn điện áp tại các bus – Điện áp pha tại mỗi bus phải nằm trong dải cho phép (ví dụ từ 0.95 đến 1.05 pu so với điện áp danh định) để đảm bảo chất lượng điện áp. Việc tích hợp nguồn gió không được làm điện áp vượt ngưỡng cho phép nhằm tránh hư hỏng thiết bị và đảm bảo ổn định lưới.

- Giới hạn dòng điện – Dòng điện qua mỗi nhánh và mỗi máy biến áp không được vượt quá giá trị định mức của thiết bị, nhằm tránh quá tải và quá nhiệt.
- Giới hạn công suất phát của nguồn gió – Mỗi turbine gió có giới hạn công suất tác dụng và giới hạn công suất phản kháng cho phép. Tương tự, tổng công suất gió không vượt quá mức lắp đặt hoặc mức cho phép về phong trào công suất gió.
- Giới hạn số lượng nguồn gió – Trong một số mô hình quy hoạch, có ràng buộc về số lượng tối đa turbine gió (hoặc số điểm kết nối gió) cho phép do hạn chế về kinh tế, địa hình hoặc quy hoạch lưới. Ví dụ, chỉ được phép lắp tối đa một số turbine nhất định để không phá vỡ kết cấu kỹ thuật lưới.
- Ràng buộc cấu trúc mạng – Đối với lưới phân phối thường yêu cầu duy trì cấu trúc cây (radial) hoặc giới hạn về sơ đồ đóng/ngắt công tắc. Nếu bài toán cho phép tái cấu hình lưới, phải đảm bảo lưới vẫn nối thông và không tạo vòng kín trái phép.

2.4. Các phương pháp giải bài toán tối ưu

2.4.1. Giới thiệu chung về phương pháp heuristic và meta-heuristic

Trong các bài toán tối ưu tích hợp nguồn phân tán, các phương pháp tối ưu truyền thống dựa trên giải thuật xác định (deterministic) thường gặp nhiều hạn chế khi hàm mục tiêu có tính phi tuyến, không lồi hoặc chứa nhiều cực trị cục bộ. Các thuật toán dựa trên gradient (gradient-based) đòi hỏi thông tin về đạo hàm bậc nhất hoặc bậc hai và phụ thuộc nhiều vào điểm khởi tạo ban đầu. Đối với các bài toán phức tạp (đa cực trị, nhiều biến số hoặc không liên tục), các phương pháp này dễ bị kẹt tại các cực tiểu cục bộ và khó đạt được nghiệm tối ưu toàn cục.

Do đó, các thuật toán heuristic và meta-heuristic (các giải thuật ngẫu nhiên lấy cảm hứng từ tự nhiên hoặc xã hội) thường được ưu tiên áp dụng do khả năng xử lý các hàm mục tiêu phức tạp, không yêu cầu thông tin đạo hàm và phù hợp với không gian tìm kiếm đa chiều. Các thuật toán meta-heuristic hoạt động dựa trên nguyên tắc quần thể (population-based), bắt đầu bằng việc khởi tạo ngẫu nhiên một tập nghiệm khả thi và sau đó cải thiện dần các nghiệm này thông qua nhiều vòng lặp. Trong mỗi vòng lặp, các cá thể (nghiệm) được cập nhật theo các quy tắc ngẫu nhiên như phối ghép, di chuyển bầy đàn hoặc đột biến nhằm tối ưu giá trị hàm mục tiêu.

Một đặc điểm chung của các thuật toán meta-heuristic là sự kết hợp giữa hai cơ chế: khám phá toàn cục (exploration) và khai thác cục bộ (exploitation). Trong đó:

- Khám phá toàn cục giúp thuật toán tìm kiếm rộng rãi trong không gian nghiệm để xác định các vùng có tiềm năng.

- Khai thác cục bộ tập trung tinh chỉnh các nghiệm xung quanh các vùng đã được xác định.

Việc cân bằng giữa hai cơ chế này giúp thuật toán tránh bị kẹt tại cực tiểu cục bộ và tiến gần đến nghiệm tối ưu toàn cục. Một số thuật toán meta-heuristic phổ biến trong tối ưu nguồn phân tán bao gồm:

- Thuật toán tối ưu bầy đàn (Particle Swarm Optimization - PSO): Mô phỏng hành vi di chuyển của đàn chim hoặc cá. Mỗi cá thể (hạt) có vị trí và vận tốc riêng trong không gian tìm kiếm, được cập nhật dựa trên kinh nghiệm tốt nhất của cá thể và toàn bộ quần thể. PSO có tốc độ hội tụ nhanh và dễ triển khai.
- Thuật toán di truyền (Genetic Algorithm - GA): Mô phỏng quá trình tiến hóa tự nhiên, trong đó các nghiệm được mã hóa thành nhiễm sắc thể và trải qua các phép lai ghép (crossover) và đột biến (mutation) để tạo ra thế hệ mới. GA phù hợp với các bài toán rời rạc và đa mục tiêu.
- Thuật toán tối ưu đàn kiến (Ant Colony Optimization - ACO): Mô phỏng hành vi tìm đường của đàn kiến. Các nghiệm được đánh giá thông qua "pheromone", với mức độ phụ thuộc vào chất lượng nghiệm. ACO phù hợp với các bài toán tổ hợp như tối ưu lộ trình hoặc phân bố nguồn điện.

Trong những năm gần đây, một thuật toán mới có tên Green Anaconda Optimization (GAO) do Dehghani và cộng sự đề xuất (2023) [21], đã cho thấy những ưu điểm nổi bật trong việc cân bằng tốt giữa khám phá và khai thác, tránh kẹt tại cực tiểu cục bộ và đạt hiệu suất cao trên các hàm benchmark cũng như được ứng dụng để giải quyết tốt các bài toán tối ưu phức tạp. Thuật toán GAO cũng được lựa chọn trong đề án này bởi các lý do sau:

- GAO là thuật toán mới, chưa từng được áp dụng rộng rãi trong bài toán tối ưu tích hợp turbine gió, nên mang tính mới mẻ, có khả năng mở rộng nghiên cứu.
- Cấu trúc thuật toán đơn giản, dễ triển khai và tùy biến theo bài toán thực tế.
- Kết quả thực nghiệm trên các bài toán chuẩn cho thấy hiệu suất cao, đặc biệt trong các bài toán phi tuyến nhiều cực trị như tích hợp nguồn phân tán.

2.4.2. Thuật toán *Green Anaconda Optimization (GAO)*

Thuật toán Green Anaconda Optimization (GAO) là một thuật toán tối ưu hóa ngẫu nhiên dựa trên nguyên lý meta-heuristic, được đề xuất bởi Dehghani và cộng sự (2023) [21]. Thuật toán này mô phỏng hai hành vi đặc trưng của loài trăn xanh Nam Mỹ (*Eunectes murinus*) trong tự nhiên: (1) quá trình giao phối, trong đó trăn đực xác định

vị trí trần cái thông qua tín hiệu pheromone, và (2) chiến lược bắt mục tiêu. Hai hành vi này được chuyển hóa thành hai giai đoạn chính trong thuật toán GAO:

- Giai đoạn 1 (Mùa giao phối – Khám phá toàn cục): Mô phỏng quá trình tìm kiếm bạn tình, các cá thể (nghiệm) trong quần thể được cập nhật dựa trên các nghiệm tốt hơn, tương tự như cách trần đực di chuyển theo tín hiệu pheromone của trần cái. Một hàm mật độ pheromone được định nghĩa dựa trên giá trị hàm mục tiêu, giúp xác suất lựa chọn nghiệm tốt hơn cao hơn. Vị trí mới của cá thể được tính toán bằng cách kết hợp ngẫu nhiên giữa vị trí hiện tại và vị trí của nghiệm "trần cái" được chọn. Nếu vị trí mới cải thiện giá trị mục tiêu, cá thể sẽ di chuyển đến vị trí đó; ngược lại, nó giữ nguyên vị trí ban đầu. Cơ chế này cho phép thuật toán khám phá hiệu quả không gian tìm kiếm toàn cục.
- Giai đoạn 2 (Chiến lược bắt mục tiêu – Khai thác cục bộ - Exploitation): Mô phỏng hành vi phục kích con mồi, thuật toán tạo ra các nghiệm mới ngẫu nhiên trong vùng lân cận của nghiệm hiện tại. Nếu nghiệm mới tốt hơn, nó được chấp nhận. Do bước di chuyển nhỏ, giai đoạn này giúp tinh chỉnh nghiệm xung quanh các vùng triển vọng đã được khám phá, nâng cao độ chính xác của giải pháp.

Quy trình thực hiện thuật toán GAO:

1. Khởi tạo: Thiết lập thông số bài toán (biến quyết định, hàm mục tiêu, ràng buộc) và tham số GAO (kích thước quần thể N , số vòng lặp tối đa T). Khởi tạo ngẫu nhiên N nghiệm trong miền tìm kiếm.
2. Đánh giá: Tính giá trị hàm mục tiêu cho từng nghiệm, xác định nghiệm tốt nhất ban đầu.
3. Vòng lặp chính ($i = 1 \rightarrow T$):
 - Giai đoạn 1: Với mỗi cá thể, xác định tập nghiệm "trần cái" (các nghiệm tốt hơn), tính mật độ pheromone, chọn ngẫu nhiên một nghiệm và cập nhật vị trí.
 - Giai đoạn 2: Sinh nghiệm mới quanh vị trí hiện tại và cập nhật nếu cải thiện giá trị mục tiêu.
 - Cập nhật nghiệm tốt nhất toàn quần thể sau mỗi giai đoạn.
4. Kết thúc: Trả về nghiệm tốt nhất sau T vòng lặp.

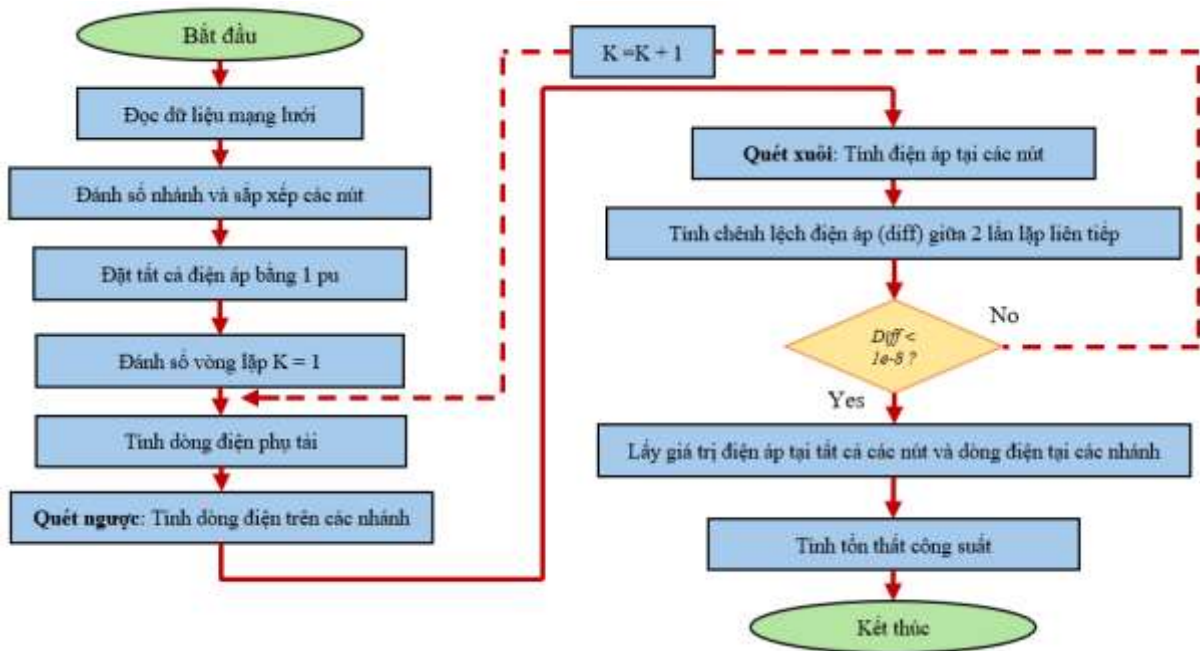
Kết quả thử nghiệm trên các hàm benchmark (CEC 2017, CEC 2019) [21] cho thấy GAO cân bằng tốt giữa khám phá và khai thác, giúp tránh kẹt tại cực trị cục bộ. Đặc biệt, GAO thể hiện hiệu suất vượt trội trên các bài toán đa cực trị và ứng dụng thực tế

(CEC 2011) [21], chứng tỏ tiềm năng áp dụng cho các bài toán tối ưu phức tạp như tích hợp turbine gió hoặc quy hoạch nguồn phân tán.

2.4.3. Sử dụng thuật toán Forward/Backward Sweep (FBS) để phân tích dòng công suất trong lưới phân phối

Thuật toán Forward/Backward Sweep (FBS) là một phương pháp lặp hiệu quả để phân tích dòng công suất trong lưới điện phân phối, đặc biệt phù hợp với lưới hình tia [22]. Thuật toán này sử dụng hai bước chính: quét ngược (backward sweep) để tính dòng điện nhánh và quét xuôi (forward sweep) để cập nhật điện áp nút, dựa trên các định luật Kirchhoff (KCL và KVL) [22].

Lưới phân phối thường có tỉ số R/X cao, cấu trúc phi lưới và tải không cân bằng, khiến các phương pháp truyền thống như Newton-Raphson khó hội tụ hoặc kém hiệu quả [9]. Trong khi đó, FBS tận dụng cấu trúc hình tia của lưới, không yêu cầu ma trận Jacobian phức tạp, giúp quá trình tính toán đơn giản và hội tụ nhanh hơn [22].



Hình 2.2: Nguyên lý làm việc của thuật toán Forward/Backward sweep

Nguyên lý hoạt động của FBS được trình bày theo Hình 2.2:

1. Bước quét ngược (Backward sweep):

- Khởi tạo: Giả thiết điện áp ban đầu tại các nút bằng giá trị điện áp danh định (ví dụ: 1.0 pu).

- Quá trình tính toán: Bắt đầu từ các nút lá (leaf nodes), dòng điện trên các nhánh được tính toán dựa trên định luật Kirchhoff về dòng điện (KCL), trong đó tổng dòng điện các nhánh đi ra bằng dòng điện tại nhánh nối về nút mẹ. Quá trình này xác định độ lớn và góc pha của dòng điện trên từng nhánh, thực hiện tuần tự từ các nút cuối về nút gốc của lưới điện [22].
2. Bước quét xuôi (Forward sweep):
- Cập nhật điện áp: Sử dụng kết quả dòng nhánh từ bước quét ngược, điện áp tại các nút được tính toán lại theo thứ tự từ nguồn cấp (substation) đến các nút lá. Phương pháp này áp dụng định luật Kirchhoff về điện áp (KVL), trong đó điện áp tại nút tiếp theo bằng điện áp tại nút trước trừ đi độ sụt áp trên nhánh tương ứng [22].
3. Kiểm tra điều kiện hội tụ:
- Sau mỗi vòng lặp, sai số giữa giá trị điện áp (hoặc công suất) của hai lần lặp liên tiếp được so sánh với ngưỡng hội tụ xác định ($1e-8$ chính là ngưỡng hội tụ tolerance rất nhỏ)
 - Nếu sai số nhỏ hơn ngưỡng cho phép, thuật toán dừng và cho kết quả dòng điện và điện áp cân bằng của hệ thống. Ngược lại, quá trình lặp tiếp tục từ bước quét ngược cho đến khi đạt điều kiện hội tụ.

Ứng dụng thuật toán FBS trong mô hình tối ưu tích hợp turbine gió

Trong đồ án này, mô hình lưới điện phân phối dạng hình tia được mô phỏng trên MATLAB dựa trên dữ liệu tiêu chuẩn (IEEE 33 bus, 69 bus, 85 bus). Khi áp dụng thuật toán GAO để xác định vị trí và công suất tối ưu của các turbine gió tích hợp vào lưới, quá trình đánh giá hàm mục tiêu đòi hỏi phải thực hiện phân bố dòng công suất (PF), xác định tổn thất công suất nhiều lần với các tổ hợp vị trí – công suất khác nhau.

Thuật toán FBS được sử dụng trong bước đánh giá này nhờ những ưu điểm sau:

- Phù hợp với cấu trúc lưới điện hình tia

FBS tận dụng hiệu quả cấu trúc dạng cây của lưới điện phân phối, không yêu cầu xây dựng ma trận Jacobian phức tạp như các phương pháp truyền thống. Thuật toán có độ ổn định cao và dễ triển khai ngay cả với các hệ thống lưới phân phối quy mô lớn, nhiều nhánh.

- Tốc độ hội tụ nhanh và độ ổn định cao

Nhiều nghiên cứu thực nghiệm đã chứng minh FBS hội tụ nhanh và ổn định trên các lưới điện hình tia, đặc biệt trong điều kiện hệ thống cân bằng hoặc có dao động nhỏ

[22]. Tính chất tính toán tuần tự của FBS đảm bảo độ chính xác trong từng bước đánh giá hàm mục tiêu của GAO, tránh sai lệch do lỗi số học.

- Hiệu quả tính toán trong các bài toán lặp

Trong thuật toán GAO, hàm mục tiêu (như tổn thất công suất hoặc độ lệch điện áp) cần được tính toán lặp lại cho hàng nghìn tổ hợp vị trí và công suất khác nhau. FBS có ưu thế vượt trội về tốc độ tính toán và độ đơn giản trong triển khai, giúp tối ưu hóa thời gian chạy thuật toán mà vẫn đảm bảo độ chính xác [22].

- Được kiểm chứng trong các ứng dụng thực tế

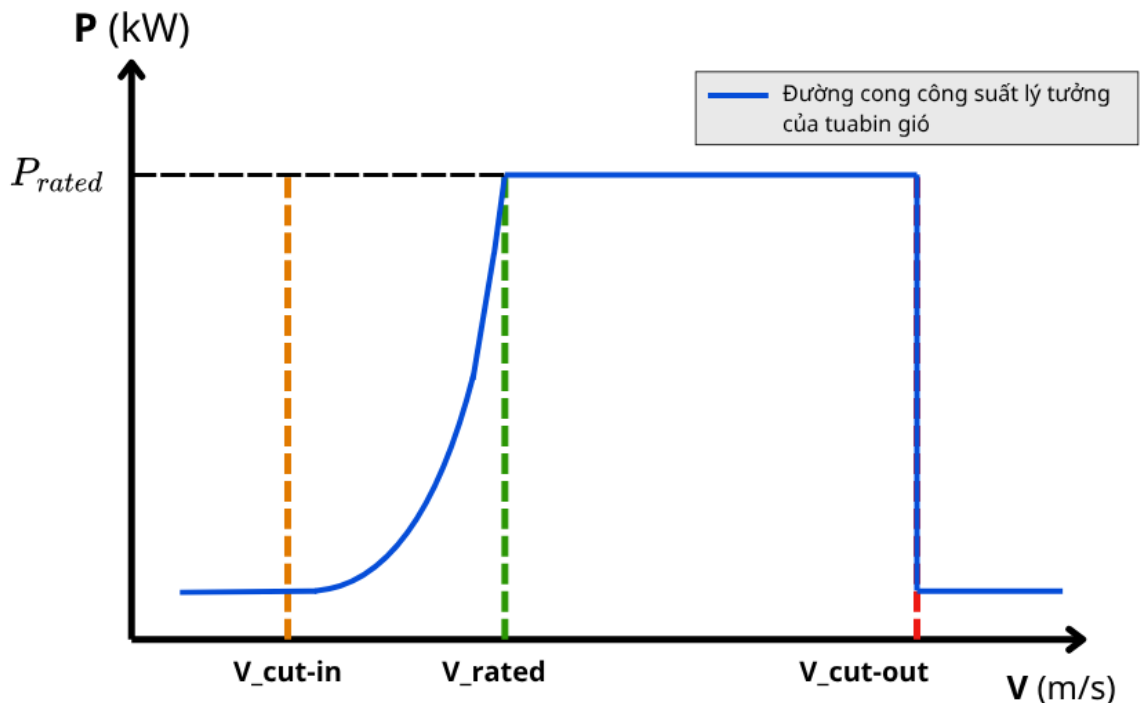
FBS đã được áp dụng thành công trong nhiều nghiên cứu về phân tích động lực học lưới điện phân phối tích hợp nguồn tái tạo [22].

Chương 3: ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN GAO TRONG TỐI ƯU KẾT NỐI TURBINE GIÓ VÀO LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI NHẪM GIẢM TỔN THẤT CÔNG SUẤT

3.1. Lựa chọn turbine gió

3.1.1. Mối quan hệ giữa công suất phát và tốc độ gió

Với đặc tính thay đổi liên tục của tốc độ gió và không ổn định, nên trên thực tế turbine không hoạt động ở tất cả điều kiện gió mà chỉ hoạt động trong dải tốc độ gió nhất định. Cụ thể, turbine bắt đầu hoạt động khi tốc độ gió thực tế đạt giá trị tối thiểu gọi là tốc độ khởi động của turbine (**$V_{\text{cut-in}}$**) và ngừng hoạt động khi tốc độ gió vượt mức tốc độ cắt thoát của turbine (**$V_{\text{cut-out}}$**). Trong khoảng giữa hai giá trị này, công suất đầu ra của turbine sẽ thay đổi phụ thuộc vào tốc độ gió hiện tại. Mối quan hệ này được mô tả bằng đường cong công suất lý tưởng như Hình 3.1, thể hiện sự phụ thuộc giữa công suất phát **$P(V)$** và tốc độ gió **V** [23]. Đường cong này giúp xác định hiệu suất làm việc của turbine được theo từng tốc độ gió khác nhau.



Hình 3.1: Đường cong công suất lý tưởng của turbine gió

Từ đường cong công suất lý tưởng của turbine (Hình 3.1) ta có thể biểu diễn dưới dạng toán học theo hàm phi tuyến $P(V)$, như sau [28]:

$$P(V) = \begin{cases} 0 & V < V_{cut_in} \\ P_{rated} \left(\frac{V - V_{cut_in}}{V_{rated} - V_{cut_in}} \right)^3 & V_{cut_in} \leq V < V_{rated} \\ P_{rated} & V_{rated} \leq V < V_{cut_out} \\ 0 & V \geq V_{cut_out} \end{cases} \quad (3.1)$$

Trong đó:

- $P(V)$: công suất phát tại tốc độ gió V (kW);
- P_{rated} : công suất định mức của turbine (kW);
- V_{cut_in} : tốc độ gió khởi động (m/s);
- V_{rated} : tốc độ gió định mức (m/s);
- V_{cut_out} tốc độ gió cắt thoát (m/s).

Khi tốc độ gió thực tế bé hơn tốc độ khởi động ($V < V_{cut_in}$) hoặc lớn hơn tốc độ cắt thoát ($V > V_{cut_out}$) của turbine thì turbine sẽ không phát điện nên công suất $P(V) = 0$. Khi tốc độ gió nằm trong khoảng tốc độ khởi động đến tốc độ định mức ($V_{cut_in} \leq V < V_{rated}$) thì công suất sẽ thay đổi theo hàm bậc ba của tốc độ gió và tăng dần khi V tiến đến tốc độ định mức V_{rated} . Khi $V_{rated} \leq V < V_{cut_out}$: Công suất đạt giá trị không đổi ở giá trị định mức P_{rated} .

Do tốc độ gió thay đổi liên tục theo thời gian, việc sử dụng giá trị tức thời không phản ánh chính xác sản lượng điện thực tế. Vì vậy, cần tính công suất phát trung bình của turbine P_{W_avg} dựa trên phân bố xác suất của tốc độ gió.

Tốc độ gió tại một vị trí cụ thể thường không cố định mà biến đổi ngẫu nhiên theo thời gian. Để mô hình hóa sự biến thiên này một cách hợp lý, người ta thường sử dụng phân bố Weibull hai tham số [23], với hàm mật độ xác suất (PDF) được biểu diễn như sau:

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right] \quad [23] \quad (3.2)$$

Trong đó:

- k : hệ số hình dạng (shape parameter);
- c : hệ số tỷ lệ (scale parameter);
- V : tốc độ gió (m/s).

Cụ thể, khi k cố định, hệ số c càng lớn thì tốc độ gió trung bình càng cao, cho thấy vùng đó có tiềm năng phát điện gió tốt hơn.

Từ phân bố này, công suất phát trung bình của turbine tại một vị trí được tính thông qua kỳ vọng toán học trên miền tốc độ gió có thể khai thác, tức là từ V_{cut_in} đến V_{cut_out} :

$$P_{W_avg} = \int_{V_{cut_in}}^{V_{cut_out}} P(V) \cdot f(V) dv \quad (3.3)$$

Trong đó:

- $P(V)$ là công suất phát tại tốc độ gió V , được xác định bởi đường cong công suất lý tưởng, đã trình bày tại công thức (3.1);
- $f(V)$ là mật độ xác suất theo phân bố Weibull, được trình bày tại công thức (3.2).

⇒ Giá trị P_{W_avg} cho biết sản lượng điện trung bình mà turbine có thể cung cấp tại vị trí cụ thể với phân bố gió đặc trưng bởi (k, c) .

3.1.2. Lựa chọn turbine tối ưu theo dữ liệu gió

Mỗi loại turbine gió thương mại có thông số kỹ thuật riêng biệt (bao gồm P_{rated} , V_{cut_in} , V_{rated} , V_{cut_out}) dẫn đến hiệu suất vận hành khác nhau trên cùng một phân bố gió, do vậy ta cần tính toán để lựa chọn turbine phù hợp nhất tại mỗi vị trí nhằm đảm bảo hiệu quả về Kinh tế - Kỹ thuật.

Giả sử chi phí phát điện của tất cả turbine gió mỗi kW là bằng nhau. Để lựa chọn loại turbine tối ưu cho mỗi vị trí, nghiên cứu này đề xuất lựa chọn bằng cách tính toán so sánh tỷ lệ giữa công suất trung bình P_{W_avg} và công suất định mức P_{rated} trên mỗi loại turbine, được gọi là tỷ suất hiệu quả vận hành:

$$\eta = \frac{P_{W_avg}}{P_{rated}} \quad (3.4)$$

Giá trị η càng cao cho thấy loại turbine đó phù hợp hơn với đặc điểm gió tại vị trí khảo sát, từ đó khai thác được tối đa khả năng phát điện của thiết bị. Với cùng một vị trí, nghiên cứu sẽ tính toán η cho tất cả các loại turbine trong danh sách và lựa chọn loại turbine có η lớn nhất.

Quy trình lựa chọn loại turbine tại từng nút được mô tả như sau:

1. Thu thập dữ liệu phân bố gió (k, c) tại các nút (vị trí).
2. Với mỗi loại turbine, tính công suất trung bình P_{W_avg} bằng phương pháp tích phân theo (3.3).
3. Tính hiệu suất η theo (3.4).
4. Chọn loại turbine có η lớn nhất → dùng làm đầu vào cho thuật toán tối ưu.

Cách tiếp cận này đảm bảo mỗi turbine được lựa chọn không chỉ dựa trên công suất danh định, mà còn dựa trên khả năng khai thác hiệu quả nguồn gió sẵn có – điều này góp phần giảm tổn thất công suất và nâng cao tính kinh tế của hệ thống.

3.2. Ứng dụng GAO giải quyết bài toán tối ưu kết nối turbine gió

Bài toán tối ưu hóa tích hợp turbine gió trong lưới điện phân phối là một bài toán phi tuyến, nhiều ràng buộc và có tính tổ hợp cao. Mục tiêu là lựa chọn vị trí lắp đặt, số lượng, chủng loại và hệ số công suất của các turbine sao cho tổn thất công suất hoặc tổn thất điện năng toàn lưới được giảm xuống mức tối thiểu, đồng thời đảm bảo các điều kiện vận hành an toàn và ổn định của hệ thống.

3.2.1. Các biến quyết định

Các biến quyết định trong bài toán tối ưu hoá bao gồm:

- **Vị trí lắp đặt turbine** : Được biểu diễn bằng chỉ số $l_j \in l_0$ với l_0 là tập hợp các nút có khả năng tích hợp turbine gió (DG). Việc lựa chọn đúng vị trí giúp giảm tổn thất công suất và cải thiện điện áp nút.
- **Loại turbine tại mỗi nút**: Được đặc trưng bởi công suất định mức P_{rated} , tốc độ gió cắt vào V_{cut_in} và tốc độ gió cắt ra V_{cut_out} . Mỗi loại turbine sẽ có chỉ số định danh riêng (kí hiệu là P_r), và được chọn từ danh sách turbine thương mại.
- **Số lượng turbine tại mỗi vị trí**: Biến n_j là số nguyên không âm, đại diện cho số lượng turbine loại P_r được lắp đặt tại nút j . Biến này ảnh hưởng trực tiếp đến tổng công suất phát và chi phí đầu tư. Ví dụ, nếu tại nút l_j chọn loại turbine có công suất định mức 250 kW và $n_j = 2$, điều này có nghĩa là tổng công suất lắp đặt tại nút này là $2 \times 250 = 500$ kW.
- **Hệ số công suất**: Là giá trị thể hiện mức độ bù công suất phản kháng của turbine gió tại nút l_j , thường nằm trong khoảng $0.7 \leq pf_j \leq 1.00$ [7].

Các biến này được mã hóa thành vector nghiệm trong thuật toán tối ưu. Một nghiệm điển hình sẽ có dạng:

$$x = [l_1, n_1, P_{r1}, Pf_1, l_2, n_2, P_{r2}, Pf_2, \dots, l_j, n_j, P_{rj}, Pf_j, \dots, l_{n_{DG}}, n_{n_{DG}}, P_{r_{n_{DG}}}, Pf_{n_{DG}}]$$

Trong đó:

- Với $j=1,2,\dots, n_{DG}$ ($j, n_{DG} \in N$);
- n_{DG} là số vị trí lắp đặt turbine gió (được xác định trong quá trình thực hiện bài toán);
- l_j là vị trí (nút) được chọn để lắp đặt turbine;

- n_j là số lượng turbine loại P_{rj} ;
- P_{rj} là mã định danh loại turbine (có công suất định mức cụ thể);
- Pf_j là hệ số công suất tại nút l_j .

Vector này đại diện cho một tổ hợp lắp đặt cụ thể, được đánh giá thông qua hàm mục tiêu và kiểm tra ràng buộc để xác định độ thích nghi (fitness).

3.2.2. Hàm mục tiêu và ràng buộc

Mục tiêu chính của bài toán tối ưu kết nối turbine gió vào lưới điện phân phối là tối thiểu hóa tổn thất công suất/ tổn thất điện năng nhưng vẫn phải đảm bảo điều kiện vận hành an toàn của lưới điện bao gồm điện áp tại các nút luôn nằm trong giới hạn cho phép đồng thời tất cả các đoạn đường dây không bị quá tải. Do vậy, bài toán tối ưu được phát biểu như sau:

Hàm mục tiêu:

$$\Delta P_{\text{loss}} = \sum_{l=1}^N I_l^2 R_l = f(l_o, n_o, P_{ro}, pf_o) \rightarrow \min \quad (3.5)$$

Trong đó:

- I_l, R_l lần lượt là dòng điện và điện trở trên nhánh thứ l ;
- l_o, n_o, P_{ro}, pf_o lần lượt là véc tơ chứa các vị trí lắp đặt, số lượng, công suất định mức, hệ số công suất của turbine và các biến này luôn bị giới hạn giữa giá trị min và max;

Các ràng buộc:

1. Ràng buộc điện áp tại các nút:

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad , \quad \forall i \in \{1, \dots, N_{bus}\} \quad (3.6)$$

U_i là điện áp tại nút thứ i bất kỳ trong lưới điện và $U_{\min}, U_{\max}$ là các giá trị giới hạn của nó. N_{bus} là số nút trong hệ thống.

2. Ràng buộc dòng điện nhánh:

$$I_l \leq I_{l,\max} \quad , \quad \forall l \in \{1, \dots, N_{line}\} \quad (3.7)$$

N_{line} là số nhánh đường dây trong hệ thống

3. Tổng công suất lắp đặt không vượt quá giới hạn kỹ thuật toàn hệ thống:

$$n_o^T P_{ro} \leq P_{yc} \quad (3.8)$$

P_{yc} là tổng công suất của turbine gió được phép lắp đặt trong lưới điện.

4. Ràng buộc hệ số công suất:

$$pf_{\min} \leq pf_o \leq 1 \quad (3.9)$$

5. Ràng buộc vị trí lắp đặt (chỉ được chọn từ tập các nút cho phép):

$$l_{o,min} \leq l_o \leq l_{o,max} \quad (3.10)$$

6. Ràng buộc số lượng turbine tại mỗi vị trí:

$$0 \leq n_o \leq n_{o,min} \quad (3.11)$$

7. Ràng buộc công suất định mức của turbine (phụ thuộc vào loại được chọn).

$$P_{r,min} \leq P_{ro} \leq P_{r,max} \quad (3.12)$$

3.2.3. Xây dựng thuật toán

Thuật toán GAO được biết đến với khả năng tìm kiếm toàn cục và tránh rơi vào cực trị cục bộ nhờ cơ chế mô phỏng hành vi sinh học tìm kiếm bạn tình trong mùa giao phối của loài trăn xanh Nam Mỹ. Trong thuật toán tối ưu GAO, các cá thể trăn xanh được xem như các nghiệm ứng cử viên trong quần thể. Từ góc độ toán học, mỗi cá thể trăn xanh đại diện cho một nghiệm của bài toán tối ưu, trong đó vị trí của nó trong không gian tìm kiếm sẽ xác định giá trị của các biến quyết định. Do đó, mỗi cá thể trăn xanh có thể được mô hình hóa dưới dạng một vector, và quần thể của các cá thể này có thể được biểu diễn bằng một ma trận. Quá trình tìm kiếm giải pháp tối ưu được thực hiện dựa trên việc xác định vị trí tối ưu nhất của các cá thể trăn xanh trong quần thể. Khác với nhiều thuật toán tối ưu hóa khác, thuật toán GAO không yêu cầu các thông số điều chỉnh phức tạp trong quá trình tính toán. Các thông số khởi tạo ban đầu bao gồm: Số lượng cá thể trong quần thể (N), chiều của bài toán tối ưu (m) bao gồm các biến, số vòng lặp tối đa (T), giới hạn dưới của các biến (Lb), giới hạn trên của các biến (Ub). 1 cá thể trăn xanh được định nghĩa là véc tơ x có m biến (toạ độ). Chi tiết thuật toán này được mô tả trong [21].

Mục tiêu chính của chúng ta là xây dựng thuật toán để xác định **vị trí, số lượng (bao gồm chủng loại tương ứng) và hệ số công suất tối ưu của turbine gió** trong lưới điện phân phối nhằm giảm tổn thất công suất/điện năng đến mức tối thiểu. Đồng thời đảm bảo các yêu cầu ràng buộc của hệ thống điện được thỏa mãn.

3.2.3.1. Các dữ liệu đầu vào của bài toán

- **Dữ liệu lưới điện:** cấu trúc sơ đồ, thông số đường dây, phụ tải, điện trở tại các nhánh.
- **Tập hợp các nút có khả năng lắp đặt DG:** ký hiệu là N_{bus}
- **Thông số gió tại từng nút trong N_{bus} :** hệ số Weibull k, c .

- **Danh sách các turbine thương mại:** mỗi loại turbine đặc trưng bởi công suất định mức P_{rated} , tốc độ gió cắt vào V_{cut_in} và tốc độ gió cắt ra V_{cut_out} và hiệu suất.

3.2.3.2. Vector nghiệm

Mỗi Vector nghiệm x bao gồm các biến quyết định (như đã trình bày ở mục 3.2.1).

Giả sử có n_{DG} vị trí cần lắp đặt turbine gió, thì mỗi nghiệm sẽ được mã hoá có dạng;

$$x = [l_o^T \quad n_o^T \quad pf_o^T] \quad (3.13)$$

Trong đó:

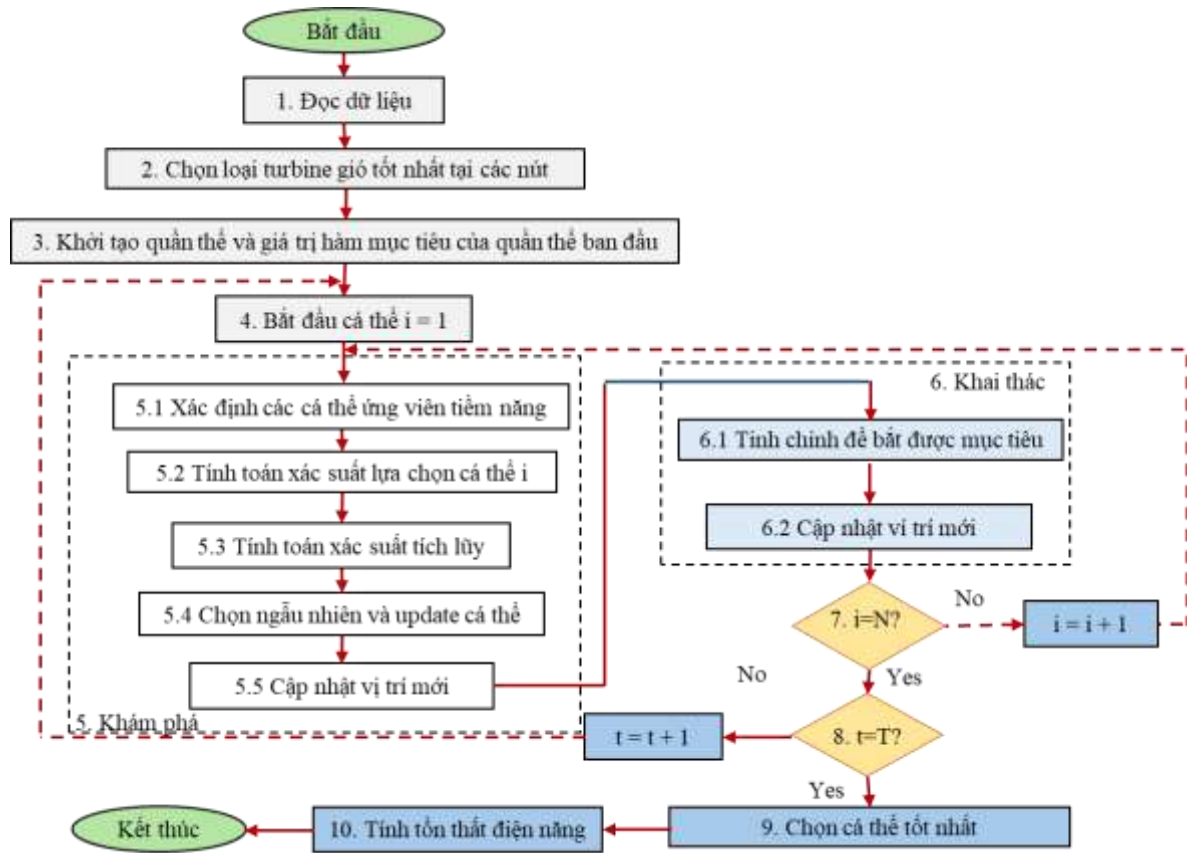
- $l_o = [l_1, l_2, \dots, l_j, \dots, l_{n_{DG}}]$: là vị trí (nút) lắp đặt turbine, $l_o \leq N_{bus}$
- $n_o = [n_1, n_2, \dots, n_j, \dots, n_{n_{DG}}]$: số lượng turbine tại mỗi nút. Mỗi giá trị n_j luôn dương và mặc định đi kèm loại turbine (vì mỗi loại đã quy định công suất).
- $pf_o = [pf_1, pf_2, \dots, pf_j, \dots, pf_{n_{DG}}]$: hệ số công suất tại mỗi nút.

3.2.3.3. Quy trình tổng quát của thuật toán

Thuật toán đề xuất sử dụng GAO để tìm nghiệm tối ưu. GAO là thuật toán tiến hóa mới dựa trên hành vi di chuyển và săn mồi loài trăn xanh Nam Mỹ, cho khả năng khám phá tốt không gian tìm kiếm, và tránh rơi vào cực trị địa phương.

1. **Khởi tạo quần thể ban đầu với N cá thể:** Tạo ngẫu nhiên các vector x theo giới hạn của từng biến. Với mỗi vector x là một cá thể trong quần thể.
2. **Tính toán hàm mục tiêu:** Với mỗi cá thể được đưa vào hàm mục tiêu và sử dụng phương pháp Back/Forward Sweep [22] để tính tổn thất công suất ΔP_{loss} .
3. **Kiểm tra ràng buộc:** Kiểm tra các điều kiện ràng buộc về điện áp, dòng nhánh, tổng công suất lắp đặt, hệ số công suất, v.v. Nếu nghiệm vi phạm, áp dụng cơ chế chỉnh sửa.
4. **Cập nhật vị trí cá thể theo GAO:** Áp dụng các bước cập nhật vị trí theo cơ chế di chuyển của trăn trong GAO.
5. **Lặp lại** đến khi đạt số vòng lặp tối đa hoặc đạt độ hội tụ mong muốn.
6. **Trả về nghiệm tốt nhất** (fitness) tìm được.

3.2.3.4. Lưu đồ thuật toán GAO đề xuất



Hình 3.2: Lưu đồ thuật toán GAO áp dụng tối ưu kết nối turbine gió vào lưới phân phối

Ở đây, tùy thuộc vào số nút cần lắp đặt turbine, n_{DG} , mà vector x có $m = 3n_{DG}$ biến như (12). Thuật toán đề xuất như Hình 3.2 và được mô tả như sau

$$x = [l_o^T \quad n_o^T \quad pf_o^T] \quad (3.14)$$

Bước 1. Đọc dữ liệu

Ở bước này, chương trình sẽ đọc dữ liệu về lưới gồm thông số đường dây, phụ tải, điện áp, dữ liệu gió tại các nút của lưới điện, và các loại turbine gió trong thực tế.

Bước 2. Chọn loại turbine gió tốt nhất tại các nút

Xác định loại turbine gió tốt nhất tại các nút dựa theo quy trình ở phần 3.2.2

Bước 3. Khởi tạo quần thể và giá trị hàm mục tiêu của quần thể ban đầu

Quần thể ban đầu có N cá thể, cá thể thứ i bất kỳ được xác định như (3.14). Ma trận X có kích thước $N \times m$ được biểu diễn như (3.15)

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{1,1} & \dots & X_{1,d} & \dots & X_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{i,1} & \dots & X_{i,d} & \dots & X_{i,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{N,1} & \dots & X_{N,d} & \dots & X_{N,m} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

trong đó: $x_{i,d}$ là toạ độ thứ d của cá thể thứ i được xác định dựa vào (3.16) cột số ngẫu nhiên trong khoảng $[0,1]$,

$$x_{i,d} = Lb_d + r_{i,d} \times (Ub_d - Lb_d) \quad (3.16)$$

với $r_{i,d}$ là số ngẫu nhiên trong khoảng $[0,1]$, Ub_d và Lb_d là giới hạn trên và dưới của các biến. Chú ý do l_o , n_o chỉ chứa các số nguyên cho nên chúng ta phải làm tròn l_o , n_o và đảm bảo (3.9)-(3.11).

Để xác định giá trị hàm mục tiêu, chúng ta cập nhật dữ liệu của lưới gồm công suất tác dụng và công suất phản kháng trung bình của các turbine dựa vào x_i . Sau đó, chạy bài toán phân bố công suất để xác định tổn thất công suất ứng với cá thể x_i . Chú ý, khi chạy bài toán phân bố công suất, nếu cá thể x_i nào mà làm 1 trong các ràng buộc (3.6)-(3.8) không thoả mãn thì tổn thất được đặt giá trị vô cùng lớn để cá thể đó không được chọn. Như vậy, chúng ta xác định được vector chứa giá trị hàm mục tiêu (3.17).

$$\mathbf{Fitness} = [F(x_1) \dots F(x_i) \dots F(x_N)]^T \quad (3.17)$$

Bắt đầu vòng lặp thứ t, với $t=1$

Bước 4. Bắt đầu cá thể đầu tiên $i=1$

Bước 5. Giai đoạn khám phá

Bước 5.1. Xác định danh sách cá thể ứng viên tiềm năng

Các cá thể x_k có giá trị hàm mục tiêu tốt hơn giá trị hàm mục tiêu của các cá thể x_i được coi là các cá thể tiềm năng. Tập hợp các cá thể tiềm năng được xác định như sau

$$CFL_i = \{ x_k \mid F(x_k) < F(x_i) \} \quad (3.18)$$

Giả sử CFL_i có N_i cá thể và giá trị hàm mục tiêu tương ứng các cá thể này là CFF_i

Bước 5.2. Tính toán xác suất lựa chọn cá thể i

Xác suất lựa chọn P_j cho cá thể x_j trong danh sách các ứng viên tiềm năng CFL_i được tính toán như (3.19)

$$P_j = \frac{CFF(x_j) - CFF_{min}}{\sum_{k=1}^{N_i} (CFF(x_k) - CFF_{min})} \quad (3.19)$$

trong đó, $CFF_{\min}$ là giá trị hàm mục tiêu nhỏ nhất trong danh sách cá thể ứng viên tìm năng CFL_i .

Bước 5.3. Tính toán xác suất tích lũy

Xác suất tích lũy C_j của cá thể thứ j trong CFL_i được tính theo công thức (3.20)

$$C_j = \sum_{k=1}^j P_k / C_{Ni} \quad (3.20)$$

Bước 5.4. Chọn ngẫu nhiên và update cá thể

Chọn ngẫu nhiên 1 cá thể thứ j trong danh sách các cá thể tìm năng CFL_i sao cho

$$SF_i = CFL_i: C_{j-1} \leq rand \leq C_j \quad (3.21)$$

Cập nhật vị trí mới của cá thể x_i

$$x'_i = x_i + rand \times (SF_i - x_i) \quad (3.22)$$

Chúng ta phải làm tròn các tọa độ ứng với l_o, n_o trong x'_i và đảm bảo x'_i phải nằm trong giới hạn Ub và Lb .

Bước 5.5. Cập nhật vị trí mới

Sau khi di chuyển đến vị trí mới x'_i , chạy bài toán phân bố công suất để xác định giá trị hàm mục tiêu (tổn thất công suất). Nếu giá trị hàm mục tiêu tại vị trí mới x'_i tốt hơn giá trị hiện tại, vị trí và giá trị hàm mục tiêu của cá thể x_i sẽ được cập nhật như sau

$$\text{Nếu } F(x'_i) < F(x_i) \text{ thì } \begin{cases} x_i = x'_i \\ Fitness(i) = F(x'_i) \end{cases} \quad (3.23)$$

Bước 6: Giai đoạn khai thác

Bước 6.1. Tinh chỉnh để bắt được mục tiêu

Vị trí mới của cá thể x_i được xác định như (3.24)

$$x''_i = x_i + (1 - 2 \times rand) \times \frac{Ub - Lb}{t} \quad (3.24)$$

Sau khi tính được vị trí mới của cá thể, chúng ta phải làm tròn các tọa độ ứng với l_o, n_o trong x''_i và đảm bảo x''_i phải nằm trong giới hạn Ub và Lb .

Bước 6.2. Cập nhật vị trí mới

Chạy bài toán phân bố công suất để xác định giá trị hàm mục tiêu tương ứng với vị trí mới x''_i . Nếu giá trị hàm mục tiêu tại vị trí mới tốt hơn giá trị hiện tại thì vị trí và giá trị hàm mục tiêu của cá thể thứ i sẽ được cập nhật như (3.25)

$$\text{Nếu } F(x''_i) < F(x_i) \text{ thì } \begin{cases} x_i = x''_i \\ Fitness(i) = F(x''_i) \end{cases} \quad (3.25)$$

Bước 7. Kiểm tra tất cả các cá thể đã được khám phá và khai thác xong chưa $i=N$, nếu chưa thì tăng $i=i+1$ và quay lại bước 5

Bước 8. Kiểm tra số vòng lặp đã đủ chưa $t=T$, nếu chưa thì tăng $t=t+1$ và quay lại bước 4

Bước 9. Chọn cá thể cho hàm mục tiêu bé nhất

Bước 10. Tính tổn thất điện năng

$$\Delta E = \sum_{s=1}^{N_s} \Delta P_s \times 8760 \times \wp_s \quad (3.26)$$

Trong đó, ΔP_s là tổn thất công suất trong lưới tương ứng với tổ hợp thứ s của tốc độ gió tại các nút trong lưới, N_s là số lượng phần tử trong tổ hợp tốc độ gió, và $\wp_s$ là xác suất để có tổ hợp tốc độ gió đó, xác suất này được tính từ (3.2).

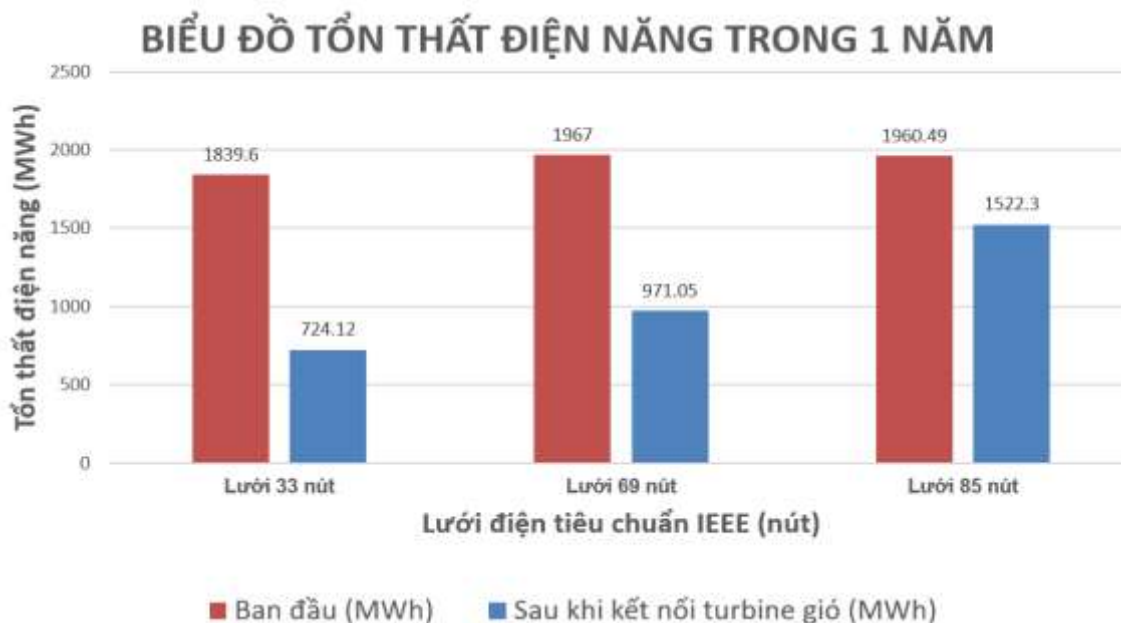
3.3. Dữ liệu mô phỏng và kết quả

Trong mục này, ta thực hiện mô phỏng kết quả dựa trên dữ liệu ba lưới điện phân phối tiêu chuẩn IEEE lần lượt là: 33 Nút, 69 Nút, 85 Nút. Mục tiêu của mô phỏng là đánh giá hiệu quả của việc tích hợp turbine gió vào lưới điện phân phối thực nghiệm thông qua thuật toán GAO (Green Anaconda Optimization). Các thông số kỹ thuật của turbine gió được lấy từ cơ sở dữ liệu thực tế và được trình bày chi tiết trong **Bảng 1**. Dữ liệu gió tại từng nút trong lưới được mô hình hóa bằng phân bố Weibull, các tham số k , c được trình bày trong **Phụ lục A**. Các thông số kết cấu của lưới điện (công suất tải, điện áp, trở kháng đường dây...) được trình bày trong **Phụ lục B**.

Bảng 1: Thông số của một số turbine thực tế

Công suất định mức (kW)	100	250	275	300	330	500	660	750	850	900
Tốc độ gió định mức (m/s)	10	8,5	12	11,5	13	8,5	14	11,5	12	8,5
Tốc độ cut-in (m/s)	3	3	4	3	3,5	3	4	3	3,5	3
Tốc độ cut-out (m/s)	25	25	30	25	28	25	25	25	25	25

=> Ta tiến hành thực hiện mô phỏng trên phần mềm MATLAB R2024a. Kết quả tổng quan về tổn thất điện năng của các lưới điện thử nghiệm được thể hiện như Hình 3.3.



Hình 3.3: Biểu đồ tổn thất điện năng trước và sau khi kết nối turbine gió trong 1 năm

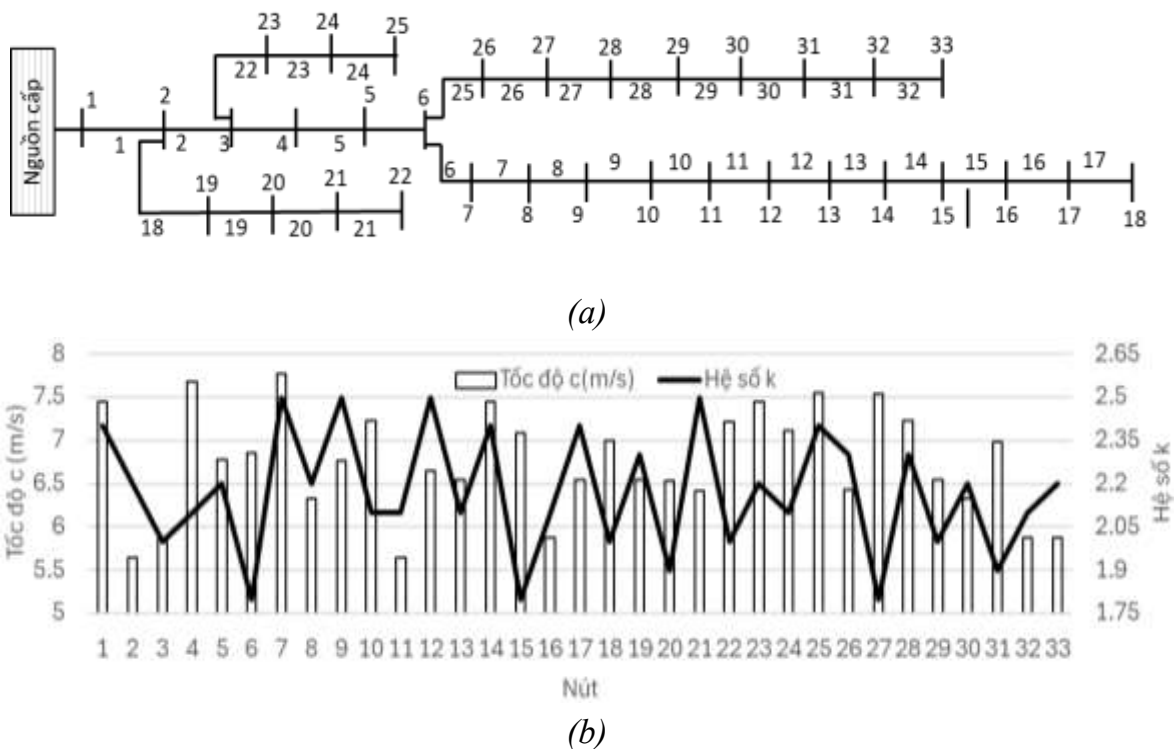
Biểu đồ trên thể hiện tổng tổn thất điện năng trong một năm (đơn vị MWh) tại ba hệ thống lưới điện phân phối tiêu chuẩn IEEE 33 nút, 69 nút và 85 nút, trước và sau khi tích hợp các turbine gió được tối ưu vị trí và công suất bằng thuật toán GAO. Với trục tung là giá trị tổn thất điện năng đơn vị là MWh, trục hoành thể hiện các lưới điện. Dễ dàng nhận thấy rằng, ở cả ba hệ thống lưới điện, việc kết nối các turbine gió đã giúp giảm đáng kể lượng điện năng bị tổn thất hàng năm. Cụ thể:

- Đối với lưới IEEE 33 nút, tổn thất ban đầu là 1839,6 MWh, sau khi kết nối các turbine gió giảm xuống còn 724,12 MWh, tương ứng mức giảm 60,65%.
- Đối với lưới IEEE 69 nút, tổn thất điện năng giảm từ 1967 MWh xuống còn 971,05 MWh, tương ứng với mức giảm 50,63%.
- Đối với lưới IEEE 85 nút, tổn thất điện năng sau khi tối ưu giảm từ 1960,49 MWh còn 1522,3 MWh, đạt mức giảm 22,37%.

Từ kết quả tổng quan trên, có thể thấy rằng phương pháp tích hợp turbine gió vào lưới điện phân phối đã mang lại hiệu quả rõ rệt trong việc giảm tổn thất điện năng hàng năm. Tuy nhiên, để hiểu rõ hơn về cơ chế hoạt động và mức độ đóng góp cụ thể của từng turbine tại các vị trí khác nhau, việc phân tích chi tiết kết quả mô phỏng trên từng sơ đồ lưới được thể hiện ở các mục tiếp theo sau đây.

3.3.1. Mô phỏng thực nghiệm trên sơ đồ lưới điện tiêu chuẩn IEEE 33 nút.

Để đánh giá thuật toán đề xuất ở trên chúng ta sử dụng lưới điện phân phối mẫu IEEE 33 nút [24] như Hình 3.3a. Dữ liệu các nút, đường dây được thể hiện tại Bảng B.1a và Bảng B.1b tại phụ lục B. Ở lưới này, điện áp định mức 12,66 kV và tổng công suất phụ tải $3,72 + j2,3$ MVA với kết cấu lưới như Hình 3.3a. Lưới này có tổn thất công suất 210kW và nút 18 là nút có điện áp thấp nhất, khoảng 0,913pu. Ở đây, giả sử thời gian sử dụng công suất cực đại trong lưới trong 1 năm là 8760 giờ như vậy, tổn thất điện năng trong 1 năm là 1839,6 MWh. Giả sử rằng chúng ta thu thập được dữ liệu về tốc độ gió tại các nút trong lưới như Hình 3.3b với số liệu cụ thể được thể hiện tại Bảng A.1 phụ lục A, số lượng nút cho phép lắp đặt turbine gió là 3. Thông số của một vài turbine gió thực tế với dải công suất từ 100 kW đến 900 kW có thể kết nối vào lưới phân phối như Bảng 1. Giá trị điện áp nhỏ nhất cho phép được xác định dựa vào điện áp tại nút 18 ở trường hợp chưa có turbine gió được nối vào, giá trị điện áp lớn nhất cho phép là 1,05 pu. Các turbine có hệ số công suất nhỏ nhất là 0,7.



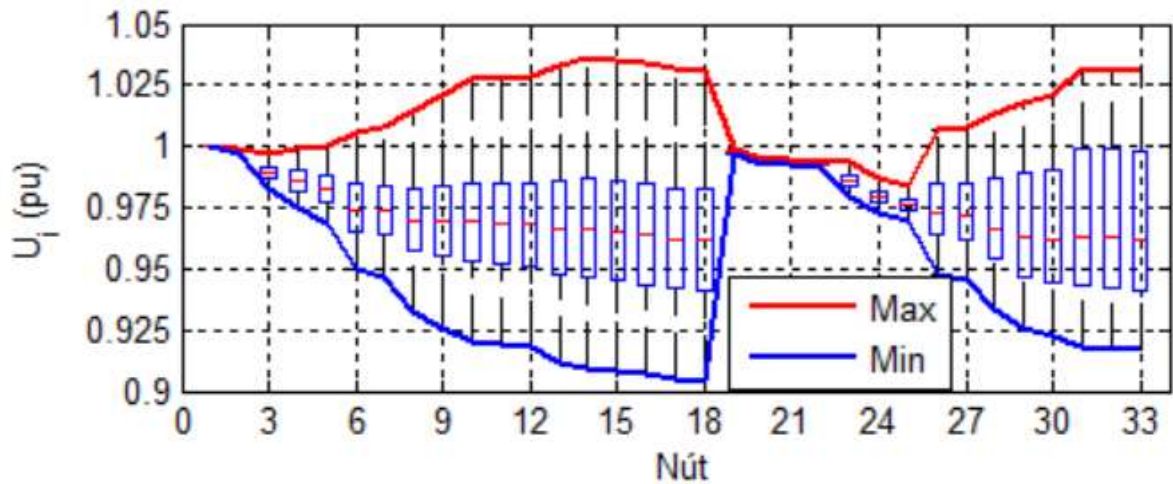
Hình 3.3: Lưới điện IEEE 33 nút: (a) Sơ đồ lưới điện; (b) Dữ liệu gió 33 nút dạng biểu đồ.

Với dữ liệu trên, khi chạy thuật toán ở Hình 3.3a, kết quả như Bảng 2 và Hình 3.4. Từ Bảng 2, chúng ta thấy chúng ta chỉ cần lắp đặt turbine gió tại nút 14, 10 và nút 31. Nút 14 được kiến nghị lắp 3 turbine loại 250kW, nút 10 chỉ cần 1 turbine loại 500kW, trong khi nút 31 cần lắp 3 turbine loại 500kW. Hệ số công suất của các turbine ở nút này đều ở mức 0,7. Với các turbine này và dữ liệu gió như Hình 3.3b, tổn thất điện năng trong lưới 724,12 MWh.

Bảng 2: Kết quả tính toán tối ưu kết nối turbine gió vào lưới

STT	Vị trí	Số lượng turbine	Hệ số công suất pf	P_r (kW)	Tổn thất điện năng ΔE (MWh)
1	14	3	0,7	250	724,12
2	10	1	0,7	500	
3	31	3	0,7	500	

Hình 3.4 thể hiện điện áp tại các nút trước và sau khi tối ưu kết nối turbine gió vào lưới. Với trục tung thể hiện giá trị điện áp theo đơn vị per unit (pu), trục hoành thể hiện các nút trong lưới điện. Đường màu xanh dương (Min) là đường thể hiện đồ thị điện áp của các nút trong lưới điện trước khi tích hợp turbine gió vào, ta dễ dàng nhìn thấy được có những nơi điện áp sụt đến 0,913 pu cho thấy lưới điện đang có sụt áp nghiêm trọng tại một số vị trí nút. Đường màu đỏ (Max) thể hiện đồ thị điện áp tại các nút trong lưới điện sau khi tích hợp turbine gió vào lưới và tại thời điểm mà tất cả các turbine gió được lắp đặt đều phát công suất định mức, cho thấy điện áp đã được cải đáng kể, tất cả các giá trị điện áp đều nằm trong khoảng $0,975 \text{ pu} < U < 1,03 \text{ pu}$ nằm trong ngưỡng điện áp vận hành ổn định. Phần ở giữa đường màu xanh dương và đỏ chính là ngưỡng điện áp thay đổi khi tốc độ gió thay đổi tại các vị trí lắp đặt turbine gió. Còn lại các hình hộp chính là trung vị điện áp, thể hiện giá trị điện áp thường xuất hiện khi tốc độ gió thay đổi, ta dễ dàng thấy được trung vị nằm trong phạm vi 0,95 pu đến 1 pu. Như vậy, so với trường hợp chưa có các turbine gió nối vào lưới điện, điện áp tại tất cả các nút đều được cải thiện đáng kể ngoại trừ trường hợp turbine gió bị cắt ra khỏi lưới do tốc độ gió vượt ra khỏi phạm vi hoạt động cho phép của turbine, tổn thất điện năng trong 1 năm trên lưới đã giảm đi đáng kể 60,64 %. Tuy nhiên, điện áp tại các nút sẽ bị giao động tùy thuộc vào trạng thái công suất phát hoặc phụ thuộc vào tốc độ gió.



Hình 3.4: Điện áp của các nút trước và sau khi tối ưu kết nối turbine gió vào lưới

Để có thể so sánh với các nghiên cứu khác, ở đây tác giả sẽ lựa chọn các nghiên cứu có hàm mục tiêu tương tự (giảm tổn thất công suất hoặc giảm tổn thất điện năng) và sử dụng kết quả của nghiên cứu đó để lựa chọn số lượng turbine tương ứng, sau đó tính tổn thất điện năng dựa vào turbine đã chọn và dữ liệu gió tại nút đó. Trong đó công suất tính toán của turbine gió chính bằng công suất định mức của turbine gió được lắp đặt nhân với số lượng turbine. Đối với các thuật toán được so sánh, tác giả sử dụng công suất tính toán của từng thuật toán để tính được số lượng turbine gió cần lắp tại các vị trí, trong đó số lượng turbine được tính và làm tròn theo bội số của công suất định mức của turbine dựa trên dữ liệu tốc độ gió tại mỗi vị trí lắp đặt. Kết quả so sánh như ở Bảng 3. Chú ý, trong bảng này, các cột có ký hiệu “*” là dữ liệu được tính toán lại dựa vào kết quả trong tài liệu tham khảo đó. Lưu ý cách so sánh này chỉ mang tính tham khảo, vì kết quả các thuật toán đề xuất đã được tính toán lại theo yêu cầu của thuật toán đề xuất nên có thể không hoàn toàn chính xác.

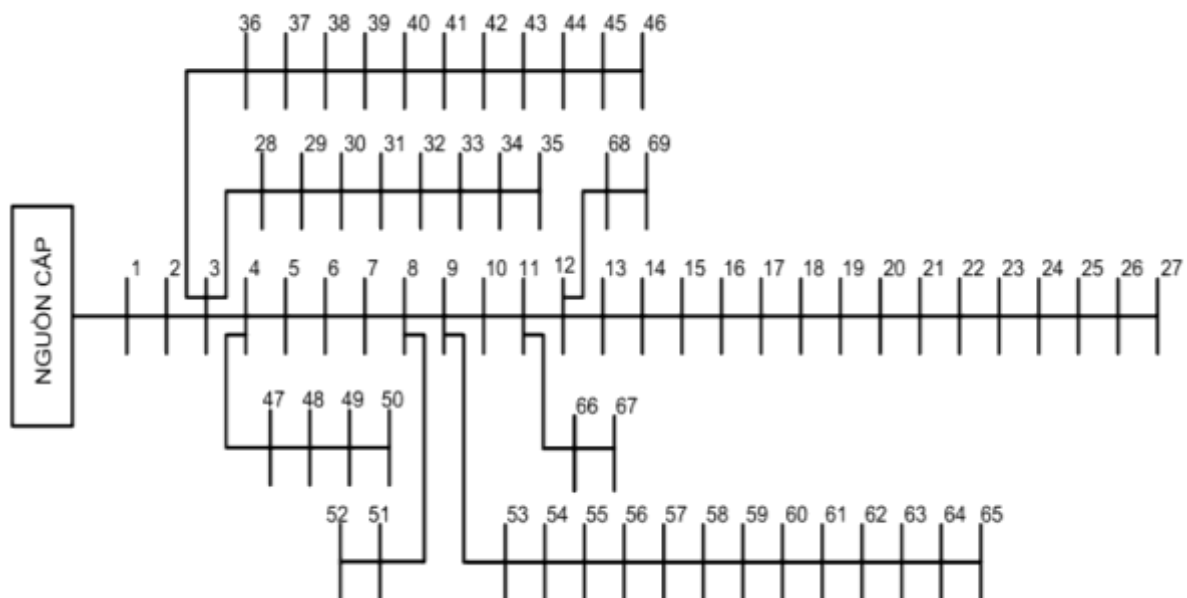
Bảng 3: So sánh với các nghiên cứu khác

Thuật toán	Vị trí	Công suất tính toán (kW)	pf	$n \times P_r^*$ (kW)	ΔE^* (MWh)	$U_{i,max}@i^*$ (pu)	$\tilde{U}_{i,min}@i^*$ (pu)
[24]	14	739,0424	0,88246	3x250	755,	1,0168	0,9494
	24	1048,879	7	5x250	57	@14	@18
	30	1156,84	0,83921 0,8	5x250			
PSO [7]	24	1080	0,9007	5x250	763,	1,0167	0,9493
	14	752	0,9062	3x250	62	@14	@18
	30	1053	0,7179	5x250			
DSCA-SOCP [25]	13	794	0,9049	4x250	793,	1,0336	0,9545
	24	1070	0,9003	5x250	56	@13	@18
	30	1029,7	0,7134	5x250			
Thuật toán đề xuất	10	500	0,7	1x500	724,	1,0454	0,9645
	14	750	0,7	3x250	12	@14	@18
	31	1500	0,7	3x500			

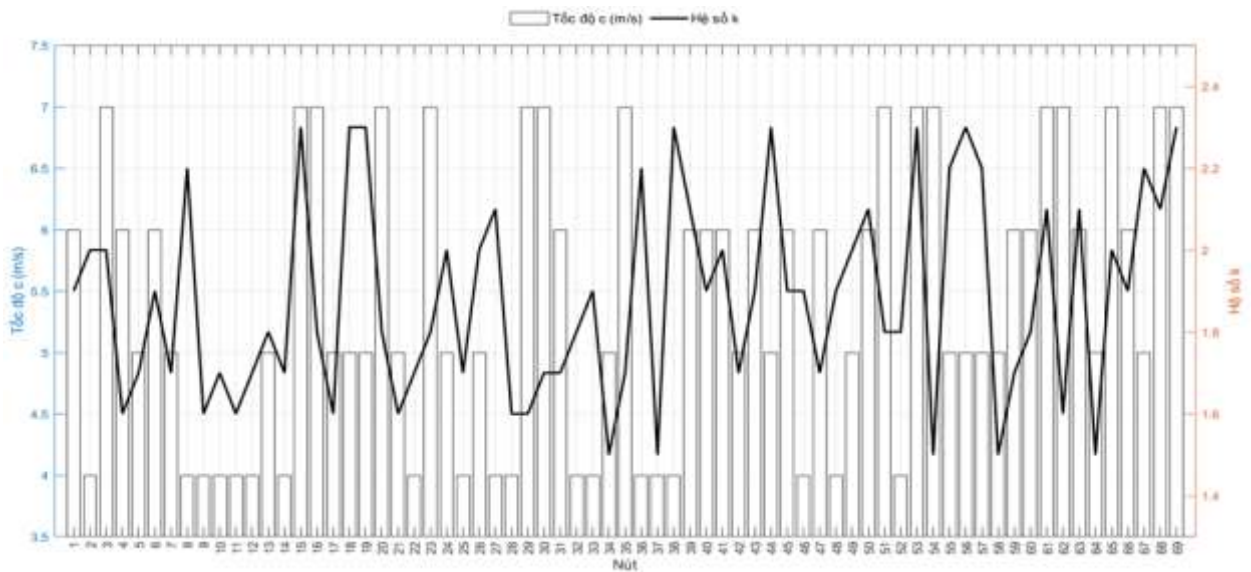
Bảng 3 cho thấy, với các thuật toán đề xuất ở tài liệu [24] và [7], tổng công suất định mức của turbine gió cần lắp đặt ít nhất là 3250 kW nhưng tổn thất điện năng (ΔE) cao hơn 755 MWh trong khi đó với thuật toán đề xuất của chúng tôi, ta chỉ cần lắp đặt 2750 kW turbine điện gió nhưng tổn thất điện năng được giảm đến còn 724 MWh. Như vậy, về hiệu quả của thuật toán được đề xuất tốt hơn so với các tài liệu tham chiếu. Liên quan đến điện áp tại các nút, điện áp nhỏ nhất ($U_{i,min}$) xuất hiện ở nút 18 khi tắt cả các wind turbine bị cắt ra khỏi lưới, điện áp lớn nhất ($U_{i,max}$) trong quá trình vận hành với thuật toán đề xuất là 1,0454 pu ở nút 14, giá trị này có cao hơn so với các thuật toán khác nhưng vẫn đảm bảo nằm trong giới hạn cho phép, giá trị trung vị của điện áp tại các nút ($\tilde{U}_{i,min}$) trong quá trình vận hành ở nút 18 đạt nhỏ nhất ở tất cả các thuật toán, giá trị này ở thuật toán đề xuất có cao hơn 1 chút so với các thuật toán khác. Như vậy, về mục đích của nghiên cứu thuật toán của chúng tôi đạt được tổn thất điện năng thấp hơn các thuật toán khác.

3.3.2. Mô phỏng thực nghiệm trên sơ đồ lưới điện tiêu chuẩn IEEE 69 nút

Để đánh giá hiệu quả của thuật toán tối ưu đề xuất, tiếp theo ta chọn hệ thống lưới điện phân phối mẫu IEEE 69 nút [26] như Hình 3.5a và dữ liệu các nút, đường dây được thể hiện tại Bảng B.2a và Bảng B.2b tại phụ lục B làm đối tượng nghiên cứu.. Đây là một lưới phân phối điển hình với điện áp định mức 12,66 kV và tổng công suất phụ tải khoảng **3,802 + j2,7 MVA**. Trong trạng thái ban đầu, khi chưa tích hợp nguồn điện gió, tổn thất công suất trên lưới là 224,54 kW, và nút có điện áp thấp nhất là nút 65 với giá trị điện áp chỉ khoảng 0,91 pu. Nếu giả định thời gian sử dụng công suất cực đại trong năm là 8760 giờ, tổn thất điện năng hàng năm có thể lên tới 1967 MWh. Để tích hợp điện gió, dữ liệu tốc độ gió tại từng nút trong lưới được thể hiện như Hình 3.5b và Bảng A.2, phụ lục A. Trong quá trình tối ưu, số lượng vị trí được phép lắp đặt turbine gió là ba, và các turbine có công suất dao động từ 100 kW đến 900 kW được thể hiện trong Bảng 1. Điều kiện ràng buộc về điện áp được đặt ra với giá trị nhỏ nhất là điện áp tại nút 65 trong trường hợp cơ sở và lớn nhất là 1,05 pu. Các turbine được chọn phải có hệ số công suất tối thiểu là 0,7 để đảm bảo tiêu chuẩn kỹ thuật.



(a)



(b)

Hình 3.5: Lưới điện IEEE 69 nút: (a) Sơ đồ lưới điện; (b) Dữ liệu gió 69 nút dạng biểu đồ

Dựa trên cơ sở dữ liệu đã được thiết lập, ta tiếp tục đánh giá hiệu quả của thuật toán trên lưới điện phân phối tiêu chuẩn IEEE 69 nút. Kết quả mô phỏng được trình bày chi tiết trong Bảng 4 cho thấy thuật toán GAO đã xác định được cấu hình tích hợp nguồn gió mang lại hiệu quả tối ưu trong việc giảm tổn thất điện năng cho toàn hệ thống. Cụ thể, ba vị trí được lựa chọn để lắp đặt turbine gió là các nút 51, 61 và 62. Tại các vị trí này, số lượng turbine cần lắp đặt lần lượt là: 1 turbine tại nút 51, 3 turbine tại nút 61 và 1 turbine tại nút 62. Đáng chú ý, cả ba vị trí đều sử dụng cùng một loại turbine có công suất định mức là 500 kW. Các turbine được chọn tại ba nút đều đáp ứng yêu cầu kỹ thuật về hệ số công suất (power factor) với giá trị đều lớn hơn 0.7 – là giới hạn tối thiểu đặt ra trong ràng buộc kỹ thuật của bài toán. Cụ thể, hệ số công suất tại các nút 51, 61 và 62 lần lượt là 0.88, 0.78 và 0.85. Điều này không những đảm bảo khả năng phát công suất tác dụng hiệu quả, mà còn hỗ trợ phần nào cho nhu cầu công suất phản kháng trong vận hành ổn định lưới điện phân phối.

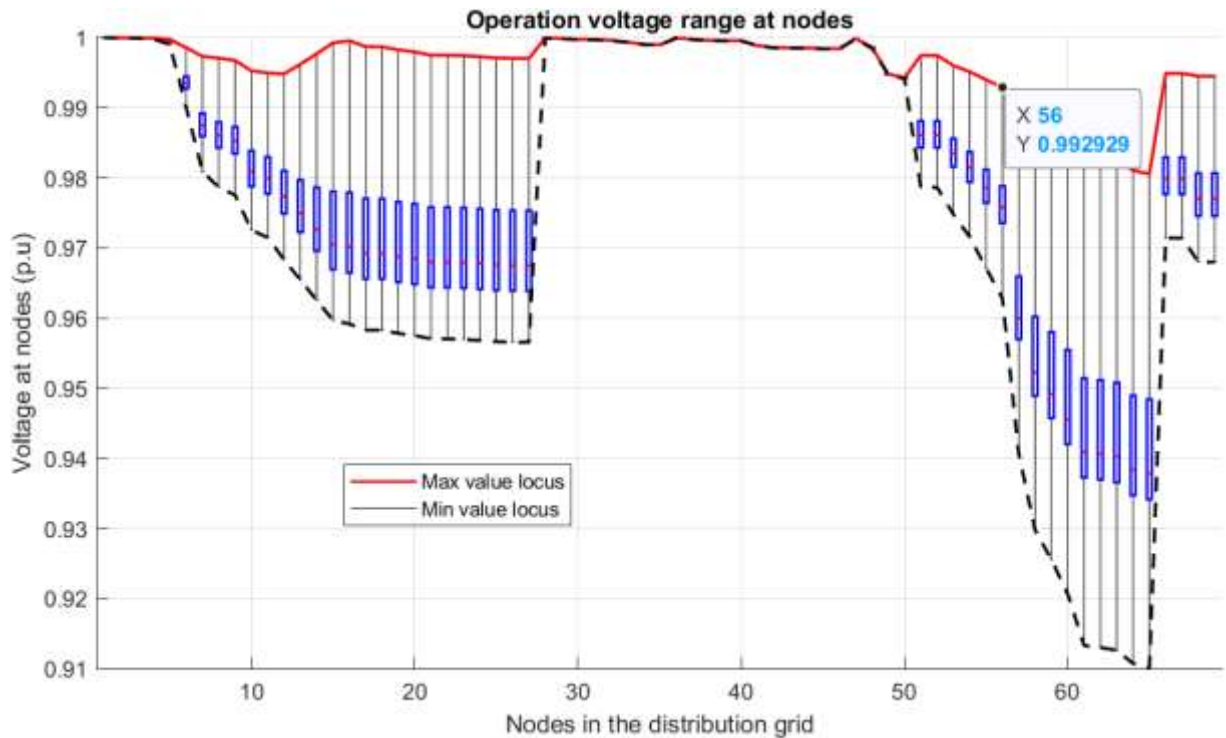
Về hiệu quả tổng thể, kết quả mô phỏng cho thấy tổn thất điện năng trong hệ thống đã giảm một cách đáng kể sau khi tích hợp các turbine gió. Nếu như trong điều kiện ban đầu khi chưa có turbine kết nối vào lưới, tổng tổn thất điện năng hàng năm lên tới 1967MWh, thì sau khi thực hiện tối ưu với GAO và tích hợp các turbine tại ba nút nêu trên, tổn thất điện năng đã được giảm xuống chỉ còn 971,05 MWh/năm. Điều này tương ứng với mức giảm khoảng 50.63%, chứng minh hiệu quả rõ rệt của việc tích hợp năng lượng gió phân tán kết hợp với tối ưu hóa bằng các thuật toán metaheuristic hiện đại.

Bảng 4: Kết quả tính toán tối ưu kết nối turbine gió vào lưới IEEE 69 nút.

STT	Vị trí	Số lượng turbine	Hệ số công suất pf	P_r (kW)	Tổn thất điện năng ΔE (MWh)
1	51	1	0,88	500	971,05
2	61	3	0,78	500	
3	62	1	0.85	500	

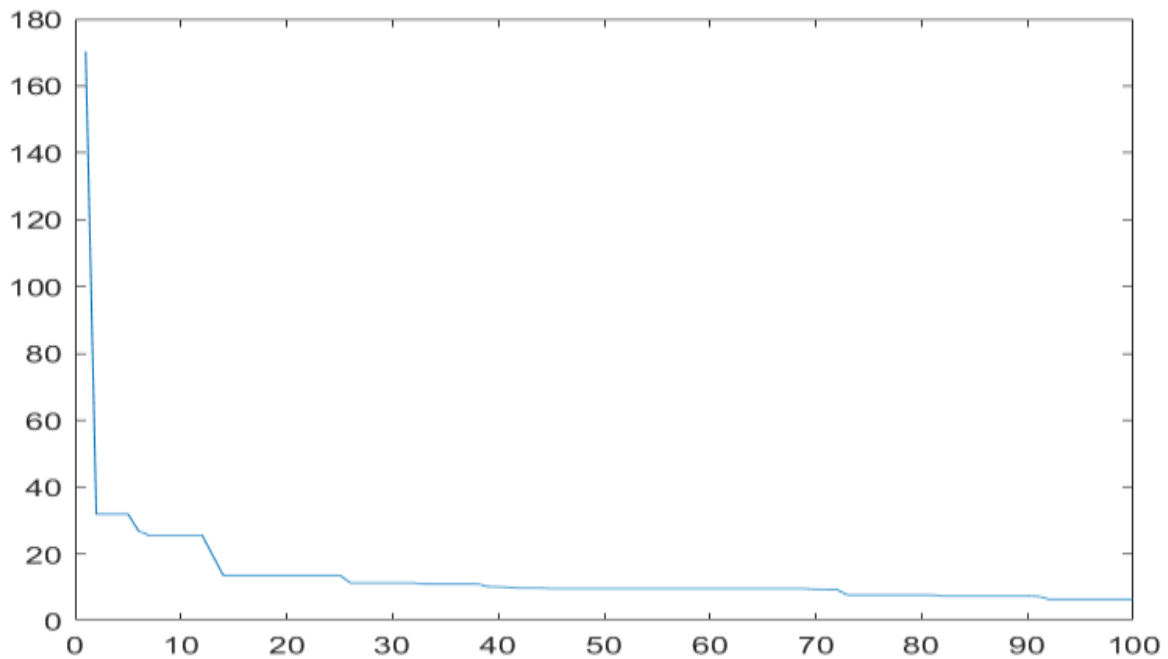
Mặt khác hình 3.6 thể hiện điện áp tại các nút trước và sau khi tối ưu kết nối turbine gió vào lưới. Với trục tung thể hiện giá trị điện áp theo đơn vị per unit (pu), trục hoành thể hiện các nút trong lưới điện. Đường màu xanh dương (Min) là đường thể hiện đồ thị điện áp của các nút trong lưới điện trước khi tích hợp turbine gió vào, ta dễ dàng nhìn thấy được có những nơi điện áp sụt đến 0,91 pu cho thấy lưới điện đang có sụt áp nghiêm trọng tại một số vị trí nút. Đường màu đỏ (Max) thể hiện đồ thị điện áp tại các nút trong lưới điện sau khi tích hợp turbine gió vào lưới và tại thời điểm mà tất cả các turbine gió được lắp đặt đều phát công suất định mức, cho thấy điện áp đã được cải đáng kể, tất cả các giá trị điện áp đều nằm trong khoảng $0,98 \text{ pu} < U < 1,0 \text{ pu}$ nằm trong ngưỡng điện áp vận hành ổn định. Phần ở giữa đường màu xanh dương và đỏ chính là ngưỡng điện áp thay đổi khi tốc độ gió thay đổi tại các vị trí lắp đặt turbine gió. Còn lại các hình hộp chính là trung vị điện áp, thể hiện giá trị điện áp thường xuất hiện khi tốc độ gió thay đổi, ta dễ dàng thấy được phần lớn các giá trị điện áp tập trung trong khoảng từ 0,95 pu đến 1 pu, chỉ có một số ít nút nằm trong khoảng 0,935 – 0,95 pu, cho thấy mức độ cải thiện điện áp rõ rệt so với trường hợp chưa có nguồn phân tán. Sự dao động điện áp cũng phụ thuộc vào trạng thái công suất phát thực tế của các turbine, vốn thay đổi theo tốc độ gió tại từng thời điểm. Tuy nhiên, nhìn chung việc tích hợp nguồn điện gió vào lưới đã giúp cải thiện chất lượng điện áp và giảm tổn thất điện năng đáng kể, mức giảm tổn thất lên đến 50.63%, góp phần nâng cao hiệu quả vận hành của lưới điện phân phối.

Điều này chứng tỏ rằng, nghiên cứu không chỉ mang lại hiệu quả cao ở lưới 33 bus mà với lưới có số nút nhiều như 69 bus cũng mang lại hiệu quả rõ rệt.



Hình 3.6: Điện áp các nút trước và sau khi tối ưu kết nối turbine gió vào lưới

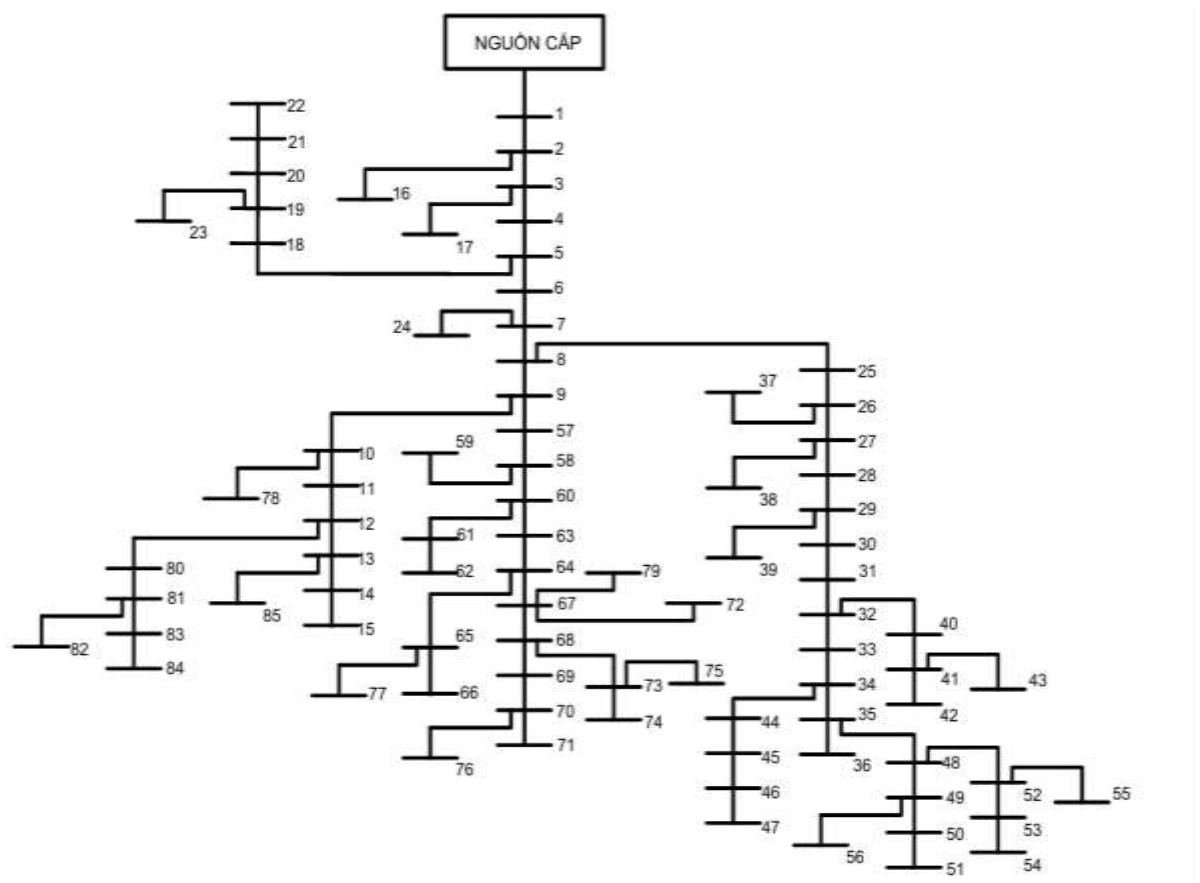
Với số cá lượng cá thể được thiết lập là $N=80$, và số vòng lặp tối đa $T = 100$ sau khi thực hiện mô phỏng với thời gian 45 giây ta được kết quả và biểu đồ hội tụ của thuật toán GAO được thể hiện trong Hình 3.7; với trục tung thể hiện tổn thất công suất tác dụng (kW) và trục hoành thể hiện số vòng lặp T . Cho thấy quá trình tối ưu diễn ra hiệu quả. Giá trị tổn thất công suất ban đầu là 224,54kW đã giảm xuống giá trị bé hơn 180kW trong 2 vòng lặp đầu tiên, sau đó tiếp tục giảm sâu xuống giá trị tổn thất chỉ còn chưa đến 40kW chỉ trong 3 vòng lặp tiếp theo. Từ đó, giá trị hàm mục tiêu giảm nhẹ và tiến đến giá trị tổn thất 6.5393kW tại vòng lặp 100, chứng minh tính ổn định và khả năng hội tụ của thuật toán. Ngoài ra, không quan sát thấy dao động bất thường, cho thấy thuật toán không bị rơi vào bẫy cục bộ và có khả năng khám phá tốt không gian tìm kiếm.



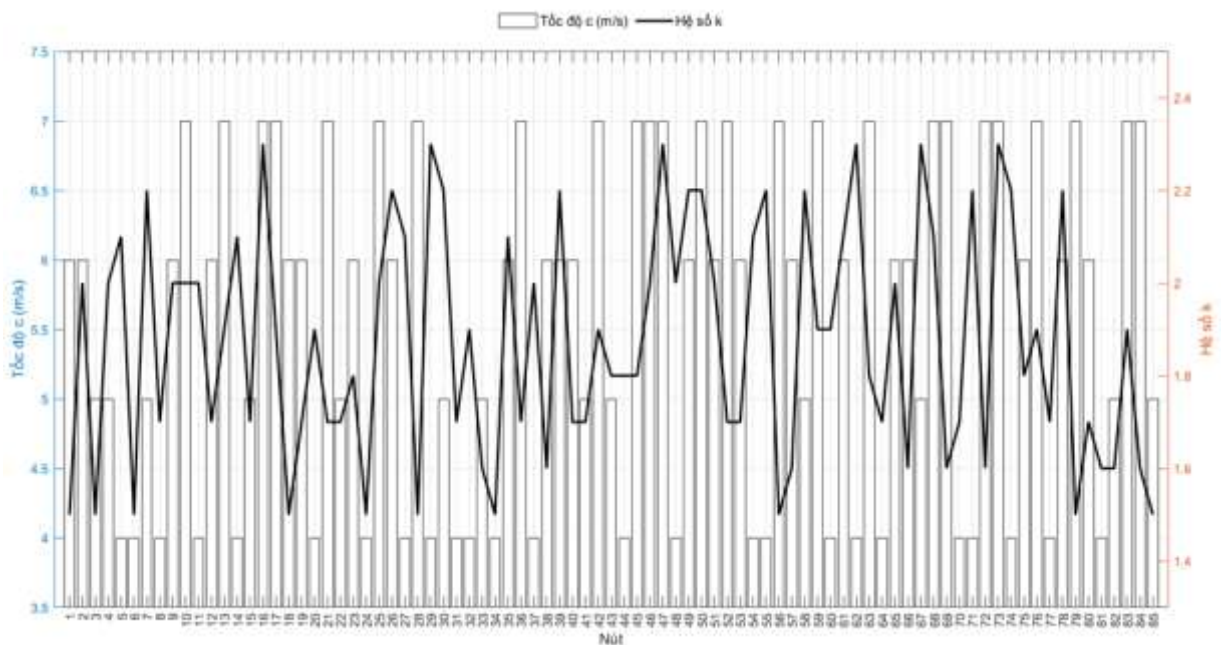
Hình 3.7: Biểu đồ hội tụ nghiệm của thuật toán

3.3.3. Mô phỏng thực nghiệm trên sơ đồ lưới điện tiêu chuẩn IEEE 85 nút

Để đánh giá hiệu quả cho lưới điện với số lượng nút lớn, tiếp theo ta thực hiện trên hệ thống có lưới điện phân phối mẫu IEEE 85 nút [26] như Hình 3.8a và dữ liệu các nút, đường dây được thể hiện tại Bảng B.3a và Bảng B.3b tại phụ lục B được sử dụng làm đối tượng nghiên cứu. Đây là một lưới phân phối điển hình với điện áp định mức 12,66 kV và tổng công suất phụ tải khoảng **2,57 + j2,62 MVA**. Trong trạng thái ban đầu, khi chưa tích hợp nguồn điện gió, tổn thất công suất trên lưới là **223,8 kW**, và nút có điện áp thấp nhất là nút 54 với giá trị điện áp chỉ khoảng 0,907 pu. Nếu giả định thời gian sử dụng công suất cực đại trong năm là 8760 giờ, tổn thất điện năng hàng năm có thể lên tới **1960,49 MWh**. Để tích hợp điện gió, dữ liệu tốc độ gió tại từng nút trong lưới được thể hiện như Hình 3.8b và Bảng A.3, phụ lục A. Trong quá trình tối ưu, số lượng vị trí được phép lắp đặt turbine gió là 3, và các turbine có công suất dao động từ 100 kW đến 900 kW được thể hiện trong Bảng 1. Điều kiện ràng buộc về điện áp được đặt ra với giá trị nhỏ nhất là điện áp tại nút 54 trong trường hợp cơ sở và lớn nhất là 1,05 pu. Các turbine được chọn phải có hệ số công suất tối thiểu là 0,7 để đảm bảo tiêu chuẩn kỹ thuật.



(a)



(b)

Hình 3.8: Lưới điện IEEE 85 nút: (a) Sơ đồ lưới điện; (b) Dữ liệu gió 85 nút dạng biểu đồ

Dựa trên dữ liệu đã thiết lập, khi thực hiện thuật GAO toán tối ưu tích hợp nguồn điện gió vào lưới IEEE 85 nút, kết quả đạt được được thể hiện cụ thể trong Bảng 5. Kết quả cho thấy, cần lắp đặt các turbine gió tại ba nút: nút 31, nút 48 và nút 63 để đạt hiệu quả tối ưu. Cụ thể, tại nút 31 và nút 48 được đề xuất lắp đặt số lượng turbine là 1 turbine và loại turbine cần lắp đặt có công suất lần lượt là 500 kW và 250kW. Trong khi nút 63 có số lượng turbine cần lắp là 2 và loại turbine cần lắp đặt tại nút 63 có công suất là 500 kW. Các turbine này đều có hệ số công suất lớn hơn 0.7, với hệ số công suất là 0.85, 0.81 và 0.77 lần lượt tại nút 31, nút 48 và nút 63, đảm bảo tiêu chuẩn kỹ thuật đề ra. Kết quả tổn thất điện năng trong hệ thống sau khi tích hợp điện gió cũng giảm rõ rệt, so với mức ban đầu là 1967 MWh sau khi tích hợp turbine tổn thất điện năng trong hệ thống đã giảm xuống còn 1522,3 MWh/năm với mức giảm 22,35%.

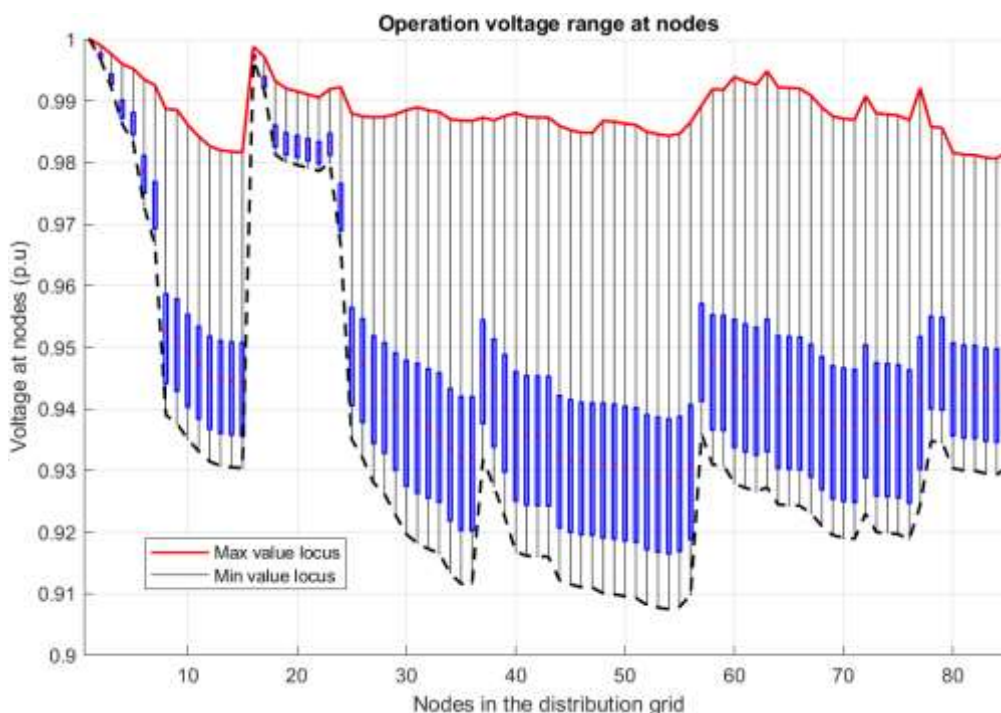
Bảng 5: Kết quả tính toán tối ưu kết nối turbine gió vào lưới

STT	Vị trí	Số lượng turbine	Hệ số công suất pf	P_r (kW)	Tổn thất điện năng ΔE (MWh)
1	31	1	0,75	500	1522,3
2	48	1	0,81	250	
3	63	2	0,77	500	

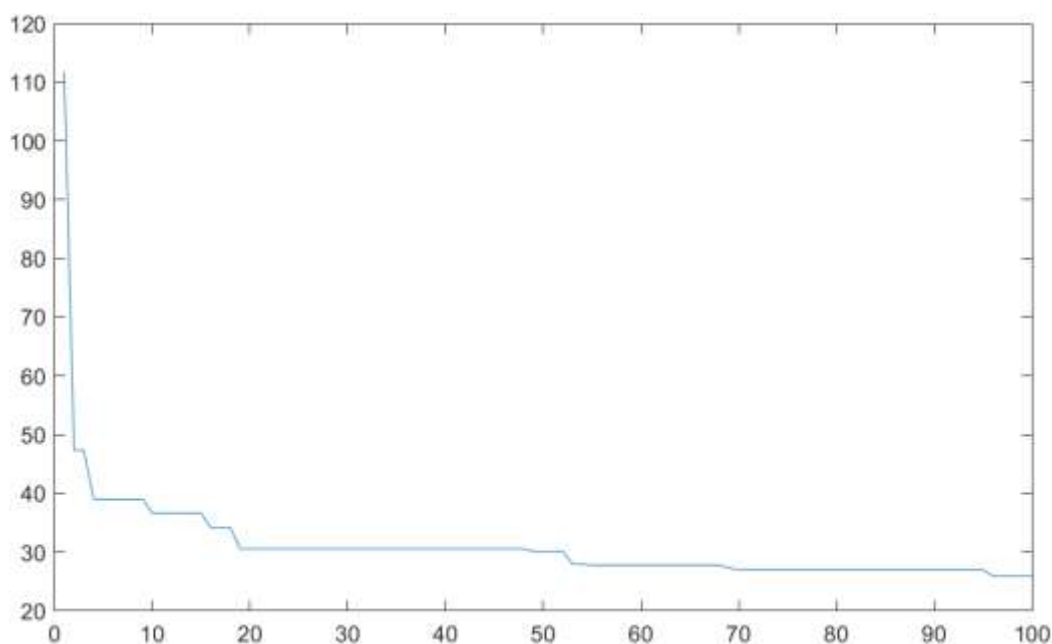
Mặt khác hình 3.9 thể hiện điện áp tại các nút trước và sau khi tối ưu kết nối turbine gió vào lưới. Với trục tung thể hiện giá trị điện áp theo đơn vị per unit (pu), trục hoành thể hiện các nút trong lưới điện. Đường màu xanh dương (Min) là đường thể hiện đồ thị điện áp của các nút trong lưới điện trước khi tích hợp turbine gió vào, ta dễ dàng nhìn thấy được có những nơi điện áp sụt đến 0,907 pu cho thấy lưới điện đang có sụt áp nghiêm trọng tại một số vị trí nút. Đường màu đỏ (Max) thể hiện đồ thị điện áp tại các nút trong lưới điện sau khi tích hợp turbine gió vào lưới và tại thời điểm mà tất cả các turbine gió được lắp đặt đều phát công suất định mức, cho thấy điện áp đã được cải đáng kể, tất cả các giá trị điện áp đều nằm trong khoảng $0,98 \text{ pu} < U < 1,0 \text{ pu}$ nằm trong ngưỡng điện áp vận hành ổn định. Phần ở giữa đường màu xanh dương và đỏ chính là ngưỡng điện áp thay đổi khi tốc độ gió thay đổi tại các vị trí lắp đặt turbine gió. Còn lại các hình hộp chính là trung vị điện áp, thể hiện giá trị điện áp thường xuất hiện khi tốc độ gió thay đổi, ta dễ dàng thấy được phần lớn các giá trị điện áp tập nằm trong phạm vi 0,93 pu đến 1 pu. Như vậy, so với trường hợp chưa có các turbine gió nối vào lưới điện, điện áp tại tất cả các nút đều đã được cải thiện. Mặc dù chưa đạt được trung vị nằm

trong khoảng 0.95 trở lên, tuy nhiên với dữ liệu lưới điện rộng lớn, số lượng nút lắp đặt ít và số lượng turbine chỉ từ 1-2 thì với kết quả này thuật toán đã mang lại hiệu quả đáng kể. Chúng ta có thể tăng số lượng nút lắp đặt để mang lại hiệu quả tốt hơn.

Như vậy với dữ liệu lưới 85 nút, nghiên cứu đã chứng minh được sự hiệu quả của mình. Với số lượng turbine lắp đặt ít nhưng mang lại hiệu quả cao.



Hình 3.9: Điện áp các nút trước và sau khi tối ưu kết nối turbine gió vào lưới



Hình 3.10: Biểu đồ hội tụ nghiệm của thuật toán

Với số cá lượng cá thể được thiết lập là $N=100$, và số vòng lặp tối đa $T = 100$ biểu đồ hội tụ của thuật toán GAO được thể hiện trong Hình 3.10; với trục tung thể hiện tổn thất công suất tác dụng (kW) và trục hoành thể hiện số vòng lặp. Cho thấy quá trình tối ưu diễn ra hiệu quả. Giá trị tổn thất công suất ban đầu là 223,8 kW đã giảm xuống giá trị bé hơn 120kW trong 2 vòng lặp đầu tiên, sau đó tiếp tục giảm sâu xuống giá trị tổn thất chỉ còn chưa đến 40kW chỉ trong 3 vòng lặp tiếp theo. Từ đó, giá trị hàm mục tiêu giảm nhẹ và tiến đến giá trị tổn thất 25.961kW tại vòng lặp 100, chứng minh tính ổn định và khả năng hội tụ của thuật toán. Ngoài ra, không quan sát thấy dao động bất thường, cho thấy thuật toán không bị rơi vào bẫy cục bộ và có khả năng khám phá tốt không gian tìm kiếm.

KẾT LUẬN

Đồ án này đã đề xuất thuật toán để tối ưu hóa tích hợp turbine gió vào lưới điện phân phối bằng cách phát triển thuật toán Green Anaconda Optimizer (GAO). Thuật toán đã xem xét đến dữ liệu về gió trong quá khứ tại các nút để xác định vị trí lắp đặt, loại turbine gió tốt nhất, số lượng turbine nhằm giảm tổn thất công suất/ tổn thất điện năng trong lưới điện phân phối. Được thử nghiệm trên 3 lưới điện mẫu theo tiêu chuẩn IEEE lần lượt là 33 nút, 69 nút và 85 nút, thuật toán đã đề xuất được vị trí, số lượng chủng loại turbine và hệ số công suất turbine cần lắp đặt để đạt kết quả tổn thất điện năng nhỏ nhất mà vẫn đảm bảo điều kiện làm việc cho phép của lưới điện. Bên cạnh đó, các giá trị điện áp tại các nút trong lưới điện mô phỏng đều được cải thiện đáng kể. Dù số biến đầu vào ít hơn so với các thuật toán khác, nhưng GAO vẫn cho thấy khả năng khám phá tốt và tránh hội tụ sớm vào nghiệm cục bộ, thể hiện qua biểu đồ hội tụ. Với cùng 1 lưới điện 33 nút và cùng dữ liệu tốc độ gió trong quá khứ, các kết quả cho thấy thuật toán trong nghiên cứu này có thể giảm tổn thất điện năng nhiều hơn các thuật toán khác.

Việc xác định được chính xác loại turbine cần lắp đặt từ các thông số các turbine trên thực tế, điều này cho thấy mô hình và thuật toán có thể áp dụng hiệu quả cho các hệ thống phân phối thực tế, đặc biệt trong bối cảnh tích hợp nguồn năng lượng tái tạo vào lưới điện hiện nay.

Từ kết quả đồ án này, ta có thể mở rộng bằng cách xem xét tích hợp hệ thống lưu trữ năng lượng nhằm nâng cao tính ổn định và khả năng điều phối công suất của hệ thống. Bên cạnh đó, việc đưa yếu tố giá điện vào mô hình, bao gồm giá bán điện lưới và giá bán điện từ các turbine gió, sẽ giúp đánh giá hiệu quả kinh tế toàn diện và tăng tính ứng dụng thực tiễn của giải pháp đề xuất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] PGS.TS. Trần Bách, “Giáo trình lưới điện”, NXB Giáo Dục, 2007.
- [2] Bộ Công Thương, *Thông tư số 39/2015/TT-BCT: Quy định hệ thống điện phân phối*, ban hành ngày 18 tháng 11 năm 2015.
- [3] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, "Integration of distributed generation in power systems: Challenges and solutions," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 5, pp. 1294–1306, 2006.
- [4] D. M. Hùng, “Nghiên cứu sự ổn định của nhà máy điện gió IMPSA Ninh Thuận”, Luận văn Thạc sĩ Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng, 2014.
- [5] "Nhà máy điện gió Bạc Liêu," Wikipedia. [Online]. Available: https://vi.wikipedia.org/wiki/Nhà_máy_điện_gió_Bạc_Liêu.
- [6] Strong Power Electric, "Wind Power: Why Do Reactive Power Compensation?," *StrongPowerElectric.com*. [Online]. Available: <https://strongpowerelectric.com/wind-power-why-do-reactive-power-compensation/>.
- [7] I. A. Moses, L. L. Kiprono, and S. M. Talai, "Optimal placement and sizing of distributed generation (DG) units in electrical power.
- [8] “Environmental impact of wind power,” *Wikipedia: The Free Encyclopedia*, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Environmental_impact_of_wind_power. [Accessed: May 20, 2025].
- [9] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1407, Apr. 1989, doi: [10.1109/61.25627](https://doi.org/10.1109/61.25627).
- [10] S. K. Goswami and S. K. Basu, "A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 7, no. 3, pp. 1484–1491, Jul. 1992, doi: [10.1109/61.141868](https://doi.org/10.1109/61.141868).
- [11] Công ty Điện lực TP. Hồ Chí Minh, *Nghiên cứu giải pháp giảm tổn thất điện năng trong lưới điện phân phối*. Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam: Báo cáo kỹ thuật, 2018.
- [12] A. P. Sakis Meliopoulos, *Power System Reactive Power Optimization*. Atlanta, GA, USA: Georgia Tech, 2015.

- [13] U.S. Environmental Protection Agency, *Energy Efficiency in Electricity Distribution*. Washington, DC, USA: EPA, 2018.
- [14] U.S. Department of Energy, “Summary Report on the Benefits of Distribution Automation,” Sept. 2016. [Online]. Available: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/11/f34/Distribution%20Automation%20Summary%20Report_09-29-16.pdf
- [15] H. M. Farhadi and M. A. Abdi, “Impact of Voltage Reduction on Energy Efficiency in Distribution Networks,” in *Proc. IEEE PES General Meeting*, 2020, pp. 1–5.
- [16] Energy Transition Partnership (ETP), “Current Status and Strategy for Improving Distribution Systems in Vietnam,” Apr. 2024. [Online]. Available: <https://www.energytransitionpartnership.org/wp-content/uploads/2024/04/D2-Current-status-1.pdf>
- [17] Tập đoàn Điện lực Việt Nam (EVN), “Mô hình phát điện phân tán - Hướng đi phù hợp với ngành Điện Việt Nam,” 2023. [Online]. Available: <https://evn.com.vn/d6/news/Mo-hinh-phat-dien-phan-tan-Huong-di-phu-hop-voi-nganh-Dien-Viet-Nam-6-8-13103.aspx>.
- [18] H. T. Nguyen, D. Q. Truong, and L. H. Nguyen, “Optimal location and sizing of distributed generation units in distribution networks using particle swarm optimization,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 78, pp. 401–408, 2016, doi: [10.1016/j.ijepes.2015.11.091](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.091).
- [19] Bộ Công Thương, *Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021–2030, tầm nhìn đến năm 2050 (Quy hoạch điện VIII)*. Hà Nội, Việt Nam: Bộ Công Thương, 2023.
- [20] AWS TrueWind, *Wind Energy Resource Atlas of Southeast Asia*. Washington, DC, USA: World Bank, 2001.
- [21] M. Dehghani, Š. Hubálovský, and P. Trojovský, “Green Anaconda Optimization: A New Bio-Inspired Metaheuristic Algorithm for Solving Optimization Problems,” *Biomimetics*, vol. 8, no. 1, p. 121, 2023, doi: [10.3390/biomimetics8010121](https://doi.org/10.3390/biomimetics8010121).
- [22] A. K. Sharma and B. B. Lathi, “Backward/Forward sweep based load flow algorithms for radial distribution systems: A comparative study,” *International Journal of Computer Applications (IJCA) – Proceedings on International Conference on Advances in Engineering and Technology (ICAET)*, no. 5, pp. 1–5, 2017. [Online]. Available: <https://research.ijcaonline.org/icaet2017/number5/ICAET2017124.pdf> [12]
- G. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*, 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2012.

- [23] Hồ Phạm Huy Ánh, “Kỹ thuật hệ thống năng lượng tái tạo,” NXB Đại Học Quốc Gia, 2013.
- [24] G. Memarzadeh, M. Arabzadeh, and F. Keynia, "A new optimal allocation of DGs in distribution networks by using Coot bird optimization method," *Energy Inform.*, vol. 6, no. 30, 2023.
- [25] O. D. Montoya, A. Molina-Cabrera, H. R. Chamorro, L. Alvarado-Barrios, E. Rivas-Trujillo, “A Hybrid Approach Based on SOCP and the Discrete Version of the SCA for Optimal Placement and Sizing DGs in AC Distribution Networks,” *Electron.*, vol. 10, no. 1, pp. 26, 2021.
- [26] O. D. Montoya, E. Rivas-Trujillo and D. A. Giral-Ramírez “Selection and Location of Fixed-Step Capacitor Banks in Distribution Grids for Minimization of Annual Operating Costs: A Two-Stage Approach”
- [27] P. D. Chung, “Evaluation of Reactive Power Support Capability of Wind Turbines,” *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 10, no. 1, pp. 5211–5216, Feb. 2020. doi: 10.48084/etasr.3260.
- [28] Y. Zhang, J. Wang, A. Berizzi, and X. Cao, “Life cycle planning of battery energy storage system in off-grid wind–solar–diesel microgrid,” **IET Generation, Transmission & Distribution**, vol. 13, no. 22, pp. 5053–5060, Oct. 2018. doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5521.
- [29] Đậu Đức Nam và Nguyễn Thị Kim Chi, Báo cáo ngành điện: Chuyển dịch cơ cấu năng lượng và tự do hóa trong ngành điện, Công ty Cổ phần Chứng khoán FPT, tháng 04 năm 2024.

PHỤ LỤC

Phụ lục A: Dữ liệu gió tại các nút lưới

Bảng A.1: Dữ liệu gió tại 33 nút

Nút	k	c	Nút	k	c
1	2.2	7.0006	18	2.0	3.9976
2	2.1	4.0	19	1.6	3.9515
3	1.9	3.9925	20	2.0	4.997
4	1.6	5.9272	21	1.7	6.9487
5	1.7	3.9707	22	2.3	5.9985
6	1.9	6.9869	23	1.8	4.9798
7	1.7	3.9707	24	1.5	5.8867
8	1.7	4.9633	25	2.3	3.999
9	2.1	4.0	26	1.6	5.9272
10	1.7	5.956	27	1.8	5.9758
11	1.5	3.9245	28	1.8	6.9718
12	1.9	4.9906	29	1.9	6.9869
13	1.7	6.9487	30	1.5	3.9245
14	2.2	5.0004	31	1.6	4.9394
15	2.0	3.9976	32	2.1	5.0
16	1.6	6.9151	33	2.1	4.0
17	2.2	7.0006			

Bảng A.2: Dữ liệu gió lưới 69 nút

Nút	c	k	Nút	c	k
1	6	1.9	37	4	1.5
2	4	2	38	6	2.3
3	7	2	39	6	2.1
4	6	1.6	40	6	1.9
5	5	1.7	41	5	2
6	6	1.9	42	6	1.7
7	5	1.7	43	5	1.9
8	4	2.2	44	6	2.3
9	4	1.6	45	5	1.9
10	4	1.7	46	4	1.9
11	4	1.6	47	6	1.7
12	4	1.7	48	4	1.9
13	5	1.8	49	5	2
14	4	1.7	50	6	2.1
15	7	2.3	51	7	1.8
16	7	1.8	52	4	1.8
17	5	1.6	53	7	2.3
18	5	2.3	54	7	1.5
19	5	2.3	55	5	2.2
20	7	1.8	56	5	2.3
21	5	1.6	57	5	2.2
22	4	1.7	58	6	1.5
23	7	1.8	59	6	1.7
24	5	2	60	7	1.8
25	4	1.7	61	7	2.1
26	5	2	62	6	1.6
27	4	2.1	63	5	2.1
28	4	1.6	64	7	1.5
29	7	1.6	65	6	2
30	7	1.7	66	5	1.9
31	6	1.7	67	7	2.2
32	4	1.8	68	7	2.1
33	4	1.9	69	7	2.3
34	5	1.5			
35	7	1.7			
36	4	2.2			

Bảng A.3: Dữ liệu gió lưới 85 nút

Nút	c	k	Nút	c	k	Nút	c	k
1	6	1.5	30	5	2.2	59	7	1.9
2	6	2	31	4	1.7	60	4	1.9
3	5	1.5	32	4	1.9	61	6	2.1
4	5	2	33	5	1.6	62	4	2.3
5	4	2.1	34	4	1.5	63	7	1.8
6	4	1.5	35	6	2.1	64	4	1.7
7	5	2.2	36	7	1.7	65	6	2
8	4	1.7	37	4	2	66	6	1.6
9	6	2	38	6	1.6	67	5	2.3
10	7	2	39	6	2.2	68	7	2.1
11	4	2	40	6	1.7	69	7	1.6
12	6	1.7	41	5	1.7	70	4	1.7
13	7	1.9	42	7	1.9	71	4	2.2
14	4	2.1	43	5	1.8	72	7	1.6
15	5	1.7	44	4	1.8	73	7	2.3
16	7	2.3	45	7	1.8	74	4	2.2
17	7	1.9	46	7	2	75	6	1.8
18	6	1.5	47	7	2.3	76	7	1.9
19	6	1.7	48	4	2	77	4	1.7
20	4	1.9	49	6	2.2	78	6	2.2
21	7	1.7	50	7	2.2	79	7	1.5
22	5	1.7	51	6	2	80	6	1.7
23	6	1.8	52	7	1.7	81	4	1.6
24	4	1.5	53	6	1.7	82	5	1.6
25	7	2	54	4	2.1	83	7	1.9
26	6	2.2	55	4	2.2	84	7	1.6
27	4	2.1	56	7	1.5	85	5	1.5
28	7	1.5	57	6	1.6			
29	4	2.3	58	5	2.2			

Phụ lục B: Thông số lưới điện

Bảng B.1: Dữ liệu lưới tiêu chuẩn IEEE-33bus: (a) Phụ tải; (b) Đường dây

(a)		
Nút	P (kW)	Q (kVAr)
1	0	0
2	100	60
3	90	40
4	120	80
5	60	30
6	60	20
7	200	100
8	200	100
9	60	20
10	60	20
11	45	30
12	60	35
13	60	35
14	120	80
15	60	10
16	60	20
17	60	20
18	90	40
19	90	40
20	90	40
21	90	40
22	90	40
23	90	50
24	420	200
25	420	200
26	60	25
27	60	25
28	60	20
29	120	70
30	200	600
31	150	70
32	210	100
33	60	40

(b)				
STT	From	To	R	X
1	1	2	0.0922	0.047
2	2	3	0.493	0.2511
3	3	4	0.366	0.1864
4	4	5	0.3811	0.1941
4	5	6	0.819	0.707
6	6	7	0.1872	0.6188
7	7	8	0.7114	0.2351
8	8	9	1.03	0.74
9	9	10	1.044	0.74
10	10	11	0.1966	0.065
11	11	12	0.3744	0.1238
12	12	13	1.468	1.155
13	13	14	0.5416	0.7129
14	14	15	0.591	0.526
15	15	16	0.7463	0.545
16	16	17	1.289	1.721
17	17	18	0.732	0.574
18	2	19	0.164	0.1565
19	19	20	1.5042	1.3554
20	20	21	0.4095	0.4784
21	21	22	0.7089	0.9373
22	3	23	0.4512	0.3083
23	23	24	0.898	0.7091
24	24	25	0.896	0.7011
25	6	26	0.203	0.1034
26	26	27	0.2842	0.1447
27	27	28	1.059	0.9337
28	28	29	0.8042	0.7006
29	29	30	0.5075	0.2585
30	30	31	0.9744	0.963
31	31	32	0.3105	0.3619
32	32	33	0.341	0.5302

Bảng B.2: Dữ liệu lưới tiêu chuẩn IEEE-69bus: (a) Phụ tải; (b) Đường dây

(a)

Nút	P (kW)	Q (kVAr)	Nút	P (kW)	Q (kVAr)
1	0	0	37	26	18.55
2	0	0	38	0	0
3	0	0	39	24	17
4	0	0	40	24	17
5	0	0	41	1.2	1
6	2.6	2.2	42	0	0
7	40.4	30	43	6	4.3
8	75	54	44	0	0
9	30	22	45	39.22	26.3
10	28	19	46	39.22	26.3
11	145	104	47	0	0
12	145	104	48	79	56.4
13	8	5	49	384.7	274.5
14	8	5.5	50	384.7	274.5
15	0	0	51	40.5	28.3
16	45.5	30	52	3.6	2.7
17	60	35	53	4.35	3.5
18	60	35	54	26.4	19
19	0	0	55	24	17.2
20	1	0.6	56	0	0
21	114	81	57	0	0
22	5	3.5	58	0	0
23	0	0	59	100	72
24	28	20	60	0	0
25	0	0	61	1244	888
26	14	10	62	32	23
27	14	10	63	0	0
28	26	18.6	64	227	162
29	26	18.6	65	59	42
30	0	0	66	18	13
31	0	0	67	18	13
32	0	0	68	28	20
33	14	10	69	28	20
34	19.5	14			
35	6	4			
36	26	18.55			

(b)

STT	From	To	R	X
1	1	2	0.0005	0.0012
2	2	3	0.0005	0.0012
3	3	4	0.0015	0.0036
4	4	5	0.0251	0.0294
5	5	6	0.366	0.1864
6	6	7	0.381	0.1941
7	7	8	0.0922	0.047
8	8	9	0.0493	0.0251
9	9	10	0.819	0.2707
10	10	11	0.1872	0.0619
11	11	12	0.7114	0.2351
12	12	13	1.03	0.34
13	13	14	1.044	0.345
14	14	15	1.058	0.3496
15	15	16	0.1966	0.065
16	16	17	0.3744	0.1238
17	17	18	0.0047	0.0016
18	18	19	0.3276	0.1083
19	19	20	0.2106	0.069
20	20	21	0.3416	0.1129
21	21	22	0.014	0.0046
22	22	23	0.1591	0.0526
23	23	24	0.346	0.1145
24	24	25	0.7488	0.2475
25	25	26	0.3089	0.1021
26	26	27	0.1732	0.0572
27	3	28	0.0044	0.0108
28	28	29	0.064	0.1565
29	29	30	0.3978	0.1315
30	30	31	0.0702	0.0232
31	31	32	0.351	0.116
32	32	33	0.839	0.2816
33	33	34	1.708	0.5646
34	34	35	1.474	0.4873

STT	From	To	R	X
35	3	36	0.0044	0.0108
36	36	37	0.064	0.1565
37	37	38	0.1053	0.123
38	38	39	0.0304	0.0355
39	39	40	0.0018	0.0021
40	40	41	0.7283	0.8509
41	41	42	0.31	0.3623
42	42	43	0.041	0.0475
43	43	44	0.0092	0.0116
44	44	45	0.1089	0.1373
45	45	46	0.0009	0.0012
46	4	47	0.0034	0.0084
47	47	48	0.0851	0.2083
48	48	49	0.2898	0.7091
49	49	50	0.0822	0.2011
50	8	51	0.0928	0.0473
51	51	52	0.3319	0.1114
52	9	53	0.174	0.0886
53	53	54	0.203	0.1034
54	54	55	0.2842	0.1447
55	55	56	0.2813	0.1433
56	56	57	1.59	0.5337
57	57	58	0.7837	0.263
58	58	59	0.3042	0.1006
59	59	60	0.3861	0.1172
60	60	61	0.5075	0.2585
61	61	62	0.0974	0.0496
62	62	63	0.145	0.0738
63	63	64	0.7105	0.3619
64	64	65	1.041	0.5302
65	11	66	0.2012	0.0611
66	66	67	0.0047	0.0014
67	12	68	0.7394	0.2444
68	68	69	0.0047	0.0016

Bảng B.3: Dữ liệu lưới tiêu chuẩn IEEE-85bus: (a) Phụ tải; (b) Đường dây

(a)

Bus	P (kW)	Q (kVAr)	Bus	P (kW)	Q (kVAr)	Bus	P (kW)	Q (kVAr)
1	0	0	30	35.28	35.99	59	56	57.13
2	0	0	31	35.28	35.99	60	56	57.13
3	0	0	32	0	0	61	56	57.13
4	56	57.13	33	14	14.28	62	56	57.13
5	0	0	34	0	0	63	14	14.28
6	35.28	35.99	35	0	0	64	0	0
7	0	0	36	35.28	35.99	65	0	0
8	35.28	35.99	37	56	57.13	66	56	57.13
9	0	0	38	56	57.13	67	0	0
10	0	0	39	56	57.13	68	0	0
11	56	57.13	40	35.28	35.99	69	56	57.13
12	0	0	41	0	0	70	0	0
13	0	0	42	35.28	35.99	71	35.28	35.99
14	35.28	35.99	43	35.28	35.99	72	56	57.13
15	35.28	35.99	44	35.28	35.99	73	0	0
16	35.28	35.99	45	35.28	35.99	74	56	57.13
17	112	114.26	46	35.28	35.99	75	35.28	35.99
18	56	57.13	47	14	14.28	76	56	57.13
19	56	57.13	48	0	0	77	14	14.28
20	35.28	35.99	49	0	0	78	56	57.13
21	35.28	35.99	50	36.28	37.01	79	35.28	35.99
22	35.28	35.99	51	56	57.13	80	56	57.13
23	56	57.13	52	0	0	81	0	0
24	35.28	35.99	53	35.28	35.99	82	56	57.13
25	35.28	35.99	54	56	57.13	83	35.28	35.99
26	56	57.13	55	56	57.13	84	14	14.28
27	0	0	56	14	14.28	85	35.28	35.99
28	56	57.13	57	56	57.13			
29	0	0	58	0	0			

(b)

STT	From	To	R	X
1	1	2	0.108	0.075
2	2	3	0.163	0.112
3	3	4	0.217	0.149
4	4	5	0.108	0.074
5	5	6	0.435	0.298
6	6	7	0.272	0.186
7	7	8	1.197	0.82
8	8	9	0.108	0.074
9	9	10	0.598	0.41
10	10	11	0.544	0.373
11	11	12	0.544	0.373
12	12	13	0.598	0.41
13	13	14	0.272	0.186
14	14	15	0.326	0.223
15	2	16	0.728	0.302
16	3	17	0.455	0.189
17	5	18	0.82	0.34
18	18	19	0.637	0.264
19	19	20	0.455	0.189
20	20	21	0.819	0.34
21	21	22	1.548	0.642
22	19	23	0.182	0.075
23	7	24	0.91	0.378
24	8	25	0.455	0.189
25	25	26	0.364	0.151
26	26	27	0.546	0.226
27	27	28	0.273	0.113
28	28	29	0.546	0.226
29	29	30	0.546	0.226
30	30	31	0.273	0.113

STT	From	To	R	X
31	31	32	0.182	0.075
32	32	33	0.182	0.075
33	33	34	0.819	0.34
34	34	35	0.637	0.264
35	35	36	0.182	0.075
36	26	37	0.364	0.151
37	27	38	1.002	0.416
38	29	39	0.546	0.226
39	32	40	0.455	0.189
40	40	41	1.002	0.416
41	41	42	0.273	0.113
42	41	43	0.455	0.189
43	34	44	1.002	0.416
44	44	45	0.911	0.378
45	45	46	0.911	0.378
46	46	47	0.546	0.226
47	35	48	0.637	0.264
48	48	49	0.182	0.075
49	49	50	0.364	0.151
50	50	51	0.455	0.189
51	48	52	1.366	0.567
52	52	53	0.455	0.189
53	53	54	0.546	0.226
54	52	55	0.546	0.226
55	49	56	0.546	0.226
56	9	57	0.273	0.113
57	57	58	0.819	0.34
58	58	59	0.182	0.075
59	58	60	0.546	0.226
60	60	61	0.728	0.302

STT	From	To	R	X
61	61	62	1.002	0.415
62	60	63	0.182	0.075
63	63	64	0.728	0.302
64	64	65	0.182	0.075
65	65	66	0.182	0.075
66	64	67	0.455	0.189
67	67	68	0.91	0.378
68	68	69	1.092	0.453
69	69	70	0.455	0.189
70	70	71	0.546	0.226
71	67	72	0.182	0.075
72	68	73	1.184	0.491

STT	From	To	R	X
73	73	74	0.273	0.113
74	73	75	1.002	0.416
75	70	76	0.546	0.226
76	65	77	0.091	0.037
77	10	78	0.637	0.264
78	67	79	0.546	0.226
79	12	80	0.728	0.302
80	80	81	0.364	0.151
81	81	82	0.091	0.037
82	81	83	1.092	0.453
83	83	84	1.002	0.416
84	13	85	0.819	0.34