

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

ĐINH NGỌC SANG

**NGHIÊN CỨU NÂNG CAO LỢI NHUẬN ĐIỆN GIÓ TRONG
THỊ TRƯỜNG ĐIỆN
NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỆN - 9520201**

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS. TS. TRƯƠNG VIỆT ANH

Người hướng dẫn khoa học 2: PGS. TS. DƯƠNG THANH LONG

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

TP. Hồ Chí Minh, tháng/2026

LỜI CAM ĐOAN

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

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

Tp. Hồ Chí Minh, ngày ... tháng ... năm 2026

(Ký tên và ghi rõ họ tên)

Đinh Ngọc Sang

CẢM TẠ

Xin trân trọng cảm ơn các thầy PGS. TS. Trương Việt Anh và thầy PGS. TS. Dương Thanh Long đã tạo điều kiện giúp đỡ hướng dẫn tận tình kiến thức nghiên cứu, định hướng và xây dựng tiền đề cũng như giúp đỡ giải quyết mọi khó khăn trở ngại trong quá trình nghiên cứu. Bên cạnh đó, trân trọng cảm ơn các thầy cô trong các hội đồng bảo vệ chuyên đề, đã chỉ ra và giúp phát hiện những khiếm khuyết để luận án được hoàn thiện tốt hơn.

Trong suốt thời gian nghiên cứu, không chỉ hiểu sâu hơn về lĩnh vực nghiên cứu của mình mà còn phát triển những kỹ năng và hiểu biết quan trọng chắc chắn sẽ định hình tương lai học tập và nghiên cứu của bản thân. Sự giúp đỡ tận tình của các thầy trong việc thúc đẩy sự phát triển trí tuệ đã có tác động sâu sắc đến bản thân là một người nghiên cứu sinh.

Quá trình cung cấp kiến thức vững chắc của các thầy đã giúp cho bản thân nhận được kết quả mở rộng nhận thức cùng với những suy nghĩ thấu đáo và sự sẵn sàng chia sẻ kiến thức và chuyên môn của các thầy đã là công cụ giúp người học phát triển trong học tập hiện tại và cả tương lai. Thời gian các thầy dành để thảo luận và diễn giải không nhiều nhưng đủ thấy được quan trọng thế nào cho các ý tưởng nghiên cứu, đánh giá công việc và đưa ra phản hồi tích cực.

Ấn tượng nhất đối với bản thân là khi nhận ra niềm đam mê của các thầy đối với lĩnh vực của mình và sự cống hiến của các thầy trong việc truyền niềm đam mê đó cho nghiên cứu sinh của mình. Sự giúp đỡ của các thầy không chỉ làm phong phú thêm kinh nghiệm học tập của tôi mà còn truyền cảm hứng cho tôi phấn đấu để đạt được sự xuất sắc và tiếp tục học tập và phát triển. Và chắc chắn rằng bản thân sẽ mang theo những bài học, những hiểu biết quý giá mà các thầy đã truyền đạt để truyền lại cho các thế hệ mai sau.

Xin các thầy nhận nơi đây lời cảm ơn chân thành nhất từ trái tim. Em thực sự biết ơn và mong các thầy luôn có nhiều sức khỏe để có nhiều cơ hội cho các thế hệ sinh viên, nghiên cứu sinh học hỏi nhiều hơn nữa từ các thầy.

Trân trọng,

TÓM TẮT

Trong những thập kỷ qua, NLTT, đặc biệt là ĐG và ĐMT, đã có những bước tiến đáng kể nhờ vào các cơ chế hỗ trợ mạnh mẽ nhằm đẩy nhanh quá trình chuyển đổi năng lượng bền vững. Tại Việt Nam, chính sách giá FIT ưu đãi đã đóng vai trò quan trọng trong việc thúc đẩy các dự án ĐG và ĐMT. Tuy nhiên, theo xu hướng phát triển tất yếu của thị trường điện, sự cạnh tranh ngày càng gia tăng đang dần thay thế các chính sách hỗ trợ trực tiếp. Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết đối với các nhà đầu tư trong việc đánh giá rủi ro tài chính một cách thận trọng, nhất là khi sự bất định của nguồn năng lượng tái tạo đặt ra nhiều thách thức về mặt kỹ thuật và kinh tế, ảnh hưởng đến sự ổn định HTĐ cũng như hiệu suất đầu tư. Trước bối cảnh này, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào các giải pháp cải tiến công nghệ và tối ưu tài chính nhằm nâng cao năng lực cạnh tranh của loại hình năng lượng mới này, bao gồm việc ứng dụng các phương pháp dự báo hiện đại và phát triển các thuật toán tối ưu, xây dựng chiến lược đầu tư tài chính. Tuy nhiên, các nghiên cứu đánh giá tổng quan gần đây cho thấy các giải pháp vẫn còn mở ngỏ và đòi hỏi nhiều nghiên cứu hơn, nhiều sáng kiến hơn để thúc đẩy quá trình chuyển đổi năng lượng bền vững trên quy mô toàn cầu.

Xuất phát từ thực trạng đó, nhằm mục tiêu tìm kiếm các giải pháp nâng cao hiệu quả đầu tư trong lĩnh vực ĐG, đề tài này đã nghiên cứu hai nội dung chính: xây dựng mô hình và đề xuất phương pháp. *Thứ nhất*, nghiên cứu mô hình xác suất bất định điện gió trên thị trường điện. Trong đó xây dựng các mô hình xác suất phức hợp thể hiện biến động không lường trước công suất phát điện gió; Thiết lập mô hình liên kết theo từng cơ chế phối hợp đấu thầu của nguồn điện gió trên thị trường điện ngày hôm sau, mỗi mô hình liên kết là một kịch bản phối hợp giữ nguồn điện gió với các nguồn điện gió khác, hoặc loại hình nguồn điện khác. Từ đó, đánh giá biến động doanh thu thực của chủ điện gió theo từng cơ chế đấu thầu dựa vào xác suất bất định điện gió, và đề xuất các mô hình liên kết đấu thầu hiệu quả cho các nhà đầu tư điện gió. *Thứ hai* là đề xuất phương pháp giải quyết bài toán nâng doanh thu điện gió trong các điều kiện mới. Mô hình đã xây dựng là một bước tiến để nâng hiệu quả đầu tư

điện gió. Tuy nhiên, khi liên kết nhiều nguồn điện trong mô hình thì bài toán đa biến có khối lượng tính toán tăng theo cấp số nhân trở nên không lồ khi xét đến xác suất bất định, vì vậy các phương pháp tối ưu trở nên khó khăn, đặc biệt khi nguồn điện xây dựng trong các HTĐ lớn. Trong đề tài này nghiên cứu đề xuất hai giải pháp: *Một là ứng dụng trí thông minh nhân tạo để cải tiến cơ bản thuật toán tối ưu metaheuristic.* Nghiên cứu tích hợp mạng nơ-ron LSTM vào cấu trúc hai thuật toán tối ưu GA và PSO nhằm nâng cao hiệu quả chiến lược chào giá điện gió trong thị trường điện cạnh tranh. Kết quả các đề xuất này không chỉ cải thiện tốc độ hội tụ mà còn tăng độ chính xác trong dự báo, đồng thời giảm thiểu nguy cơ bẫy mắc kẹt tại các cực trị cục bộ, qua đó đề xuất chiến lược đấu thầu điện gió trong mô hình liên kết nguồn điện để đạt được tối ưu doanh thu; *Hai là tăng cường trữ năng để mở rộng trang trại điện gió hiện hữu như là một giải pháp nâng hiệu quả trước mắt.* Nghiên cứu sử dụng bộ trữ năng kết hợp khai thác tối ưu máy biến áp truyền tải để tối đa hóa khả năng phát điện gió bán điện cho thị trường điện. Từ đó đánh giá hiệu quả tài chính cho thấy ưu tiên mở rộng các trang trại điện gió hiện có tối ưu hơn triển khai đầu tư dự án mới.

Nghiên cứu đã cho kết quả đạt được đóng góp cho công đồng khoa học ba điểm mới gồm: (i) Mô hình hóa xác suất bất định điện gió làm cơ sở để liên kết các nguồn điện đấu thầu trong thị trường điện cạnh tranh; (ii) Đề xuất kỹ thuật lai mới LSTM tích hợp vào quá trình tối ưu hóa của hai thuật toán GA và PSO; (iii) Tăng cường sử dụng bộ trữ năng và tối ưu máy biến áp truyền tải trong mô hình mở rộng trang trại điện gió mà không cần mở rộng truyền tải đầu nối. Nghiên cứu cũng góp phần vào công bố 12 công trình trên các tạp chí khoa học, trong đó có 03 bài báo khoa học Q1 và 01 bài Q2 trên các tạp chí ISI và Scopus (1 bài Q1 cho đóng góp điểm mới thứ nhất, 2 bài Q1 cho điểm mới thứ hai, và 1 bài Q2 cho điểm mới thứ ba). Ngoài ra, một sáng chế đã được chấp nhận đơn hợp lệ để đăng ký quyền sở hữu trí tuệ.

Tuy nhiên, nghiên cứu cũng cho thấy một số hạn chế cần tiếp tục mở rộng, cần thực nghiệm trên hệ thống điện lớn hơn và đa dạng chủng loại nguồn điện hơn (ví dụ như thủy điện); và cũng nên thực nghiệm trên thị trường điện Việt Nam.

MỤC LỤC

TRANG TỰA	TRANG
LỜI CAM ĐOAN	I
CẢM TẠ	II
TÓM TẮT	III
DANH SÁCH CÁC CHỮ VIẾT TẮT.....	VIII
DANH SÁCH CÁC HÌNH	IX
DANH SÁCH CÁC BẢNG.....	XI
MỞ ĐẦU.....	1
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN.....	6
1.1. Bối cảnh xu hướng phát triển năng lượng trên thế giới	7
1.1.1. Phát triển năng lượng đến 2024	7
1.1.2. Xu hướng đến 2050	9
1.1.3. Kết luận.....	10
1.2. Bối cảnh phát triển năng lượng trong nước	11
1.2.1. Tổng quan	11
1.2.2. Năng lượng gió Việt Nam đến 2020.....	12
1.2.3. Quy hoạch điện gió Việt Nam đến 2030	13
1.2.4. Kết quả quy hoạch điện gió	16
1.3. Những thách thức đối với điện gió trong giai đoạn phát triển tới.....	17
1.3.1. Tính bất định của điện gió	17
1.3.2. Thị trường điện tích hợp điện gió	17
1.3.3. Các thách thức	18
1.4. Những nghiên cứu liên quan gần đây	19
1.4.1. Nghiên cứu mô hình cải thiện hiệu quả điện gió	19
1.4.2. Các nghiên cứu nâng cao chính xác dự báo.....	20
1.4.3. Các nghiên cứu phương pháp tối ưu.....	21
1.5. Những đạt được và khoảng trống trong các nghiên cứu	22
1.5.1. Đạt được.....	22
1.5.2. Khoảng trống	23
1.6. Tính cấp thiết của đề tài	23
1.7. Mục tiêu và phương hướng nghiên cứu	24
CHƯƠNG 2: MÔ HÌNH BẤT ĐỊNH ĐIỆN GIÓ TRONG THỊ TRƯỜNG ĐIỆN .	26
2.1. Đặt vấn đề	27
2.1.1. Các mô hình xác suất bất định của điện gió	27
2.1.2. Mô hình chào thầu bán sản lượng điện gió trên thị trường điện	28

2.1.3. Các mô hình liên kết trang trại điện gió	29
2.1.4. Phạm vi và giới hạn nghiên cứu của chương.....	30
2.2. Lý thuyết cơ sở mô hình hóa.....	31
2.2.1. Mô hình xác suất công suất phát điện gió.....	31
2.2.2. Mô hình bất định của doanh thu điện gió trong thị trường điện.....	32
2.2.3. Mô hình hóa nguồn trữ năng.....	33
2.3. Cơ sở toán học.....	34
2.3.1. Hàm mục tiêu.....	34
2.3.2. Chi tiết doanh thu bán điện trực tiếp	35
2.3.3. Chi tiết nguồn thu bất định	36
2.3.4. Mô hình hóa điện gió trên thị trường điện.....	38
2.3.5. Lưu đồ chu trình khảo sát và đánh giá.....	41
2.3.6. Thực nghiệm	42
2.3.7. Nhận xét và đánh giá kết quả thực nghiệm.....	50
2.3.8. Kết luận.....	52
CHƯƠNG 3: PHƯƠNG PHÁP TỐI ƯU LAI AI-MH.....	54
3.1. Giới thiệu.....	55
3.1.1. Đặt vấn đề	55
3.1.2. Phạm vi và giới hạn nghiên cứu của chương.....	55
3.2. Lý thuyết mô hình toán học	56
3.2.1. Mô tả bài toán	56
3.2.2. Hàm mục tiêu.....	56
3.2.3. Các ràng buộc	61
3.3. Phương pháp tối ưu	63
3.3.1. Các thuật toán gốc.....	63
3.3.2. Thuật toán lai thông minh nhân tạo – metaheuristic đề xuất.....	67
3.4. Thực nghiệm	74
3.4.1. Xây dựng các kịch bản thử nghiệm	74
3.4.2. Dữ liệu đầu vào.....	74
3.4.3. Kết quả thử nghiệm.....	76
3.4.4. Thảo luận	79
3.5. Kết luận	83
3.5.1. Hiệu quả đạt được của các thuật toán lai	83
3.5.2. Kiểm tra độ tin cậy hiệu quả đầu tư mô hình tích hợp điện gió	84
3.5.3. Đóng góp của nghiên cứu trong chương.....	85

CHƯƠNG 4: ỨNG DỤNG ESS KẾT HỢP TỐI ƯU MBA TRUYỀN TẢI ĐỀ TĂNG HIỆU QUẢ MỞ RỘNG TRANG TRẠI ĐIỆN GIÓ.....	86
4.1. Giới thiệu.....	87
4.1.1. Vấn đề.....	87
4.1.2. Bài toán.....	88
4.1.3. Phạm vi và giới hạn nghiên cứu của chương.....	89
4.1.4. Phương pháp giải bài toán.....	90
4.2. Lý thuyết toán học.....	90
4.2.1. Hàm mục tiêu.....	90
4.2.2. Mô hình máy biến áp truyền tải.....	91
4.2.3. Mô hình nguồn trữ năng.....	94
4.2.4. Mô hình bất định điện gió trong thị trường điện.....	95
4.3. Các kịch bản nghiên cứu.....	95
4.4. Lưu đồ chu trình khảo sát và đánh giá.....	97
4.5. Thực nghiệm.....	97
4.5.1. Dữ liệu đầu vào.....	97
4.5.2. Giá bán điện trên thị trường.....	99
4.6. Kết quả thí nghiệm.....	99
4.6.1. Kịch bản 1.....	99
4.6.2. Kịch bản 2.....	100
4.6.3. Kịch bản 3.....	101
4.7. Nhận xét và đánh giá kết quả thực nghiệm.....	102
4.7.1. Xem xét khả năng thu hồi vốn NPV.....	102
4.7.2. Đánh giá suất hiệu quả đầu tư.....	104
4.8. Kết luận.....	105
CHƯƠNG 5: KẾT LUẬN.....	107
5.1. Nội dung đạt được mục tiêu.....	108
5.1.1. Kết quả nghiên cứu.....	108
5.1.2. Đối chiếu với mục tiêu nghiên cứu đặt ra.....	108
5.2. Tính mới và các đóng góp của nghiên cứu.....	109
5.3. Những khuyến nghị.....	109
5.3.1. Các hạn chế.....	109
5.3.2. Hướng mở rộng nghiên cứu.....	110
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	112
PHỤ LỤC 1: QUÁ TRÌNH TỐI ƯU HÓA CÁC THUẬT TOÁN LAI.....	121

DANH SÁCH CÁC CHỮ VIẾT TẮT

KÝ HIỆU	DIỄN GIẢI
AI	Trí thông minh nhân tạo (Artificial Intelligence)
ĐG	Điện gió
ĐMT	Điện mặt trời
ESS	Hệ thống nguồn trữ năng lượng điện (Energy Storage Systems)
FIT	Biểu giá điện cố định được hỗ trợ
GA	Thuật toán tối ưu tiên hóa (Genetic Algorithm)
GDP	Tổng sản phẩm quốc nội một quốc gia
HTĐ	Hệ thống điện
IEA	Cơ quan năng lượng quốc tế
IEC	Ủy ban kỹ thuật điện quốc tế, một tổ chức thường công bố các tiêu chuẩn kỹ thuật điện (International Electrotechnical Commission)
ISO	Tổ chức vận hành thị trường điện độc lập (Independent System Operator)
LSTM	Một thuật toán sử dụng mạng nơ ron thông minh (Long Short Term Memory)
MBA	Máy biến áp truyền tải, gọi chung là máy biến áp
MH	Các dạng tối ưu Meta-Heuristic
NLTT	Năng lượng tái tạo
OPF	Phân bố công suất tối ưu (Optimal Power Flow)
PSO	Thuật toán tối ưu bầy đàn (Particle Swarm Optimization)
SNG	Cộng đồng các quốc gia độc lập, nhóm một số quốc gia thuộc Liên xô trước đây
TTĐ	Thị trường điện

DANH SÁCH CÁC HÌNH

HÌNH	TRANG
Hình 1.1: Sử dụng năng lượng thế giới đến 2021 [17]	8
Hình 1.2: Báo cáo phát triển năng lượng đến 2024 [7].....	8
Hình 1.3: Dự báo cơ cấu năng lượng đến 2050 [6].....	9
Hình 1.4: Chiến lược phát triển NLTT đến 2030 [7].....	9
Hình 1.5: Tăng trưởng công suất đặt nguồn điện đến năm 2020 [8].	12
Hình 1.6: Tỷ lệ các loại nguồn điện đến 2020 [8].....	13
Hình 1.7: Tiềm năng điện gió Việt Nam [8]	14
Hình 1.8: Tăng trưởng điện gió trung bình hàng năm [8].....	15
Hình 2.1: Năm mô hình phương thức vận hành điện gió.....	29
Hình 2.2: Phân bố mật độ xác suất tốc độ gió tại hai vị trí khác nhau.....	31
Hình 2.3: Phân bố mật độ xác suất công suất điện gió	31
Hình 2.4: Các thành phần doanh thu và chi phí của điện gió trên thị trường điện ...	33
Hình 2.5: Mô hình một thị trường điện ngày	38
Hình 2.6: Mô hình một thị trường điện có liên kết 02 ĐG	40
Hình 2.7: Mô hình một thị trường điện có liên kết nhiệt điện	41
Hình 2.8: Mô hình một thị trường điện có liên kết gió – nhiệt – trữ năng.....	41
Hình 2.9: Lưu đồ cực đại lợi nhuận	42
Hình 2.10: Hệ thống điện chuẩn IEEE 30-bus.....	43
Hình 2.11: Doanh thu một tua-bin gió	44
Hình 2.12: Hàm phân bố mật độ xác suất Weibull tổ hợp điện gió tại Bus 5.....	45
Hình 2.13: Doanh thu điện gió tại Bus 5.....	45
Hình 2.14: Hàm phân bố mật độ xác suất tổ hợp của hai trang trại điện gió.....	47
Hình 2.15: Doanh thu tổ hợp hai trang trại điện gió	47
Hình 2.16: Tổng doanh thu của tổ hợp WPP và nhiệt điện bus 1	48
Hình 2.17: Tổng doanh thu của tổ hợp	49
Hình 2.18: Doanh thu và công suất đỉnh của điện gió theo các mô hình.....	51

Hình 3.1. Cấu trúc một đơn vị của LSTM	66
Hình 3.2. Cấu trúc mạng nơ ron LSTM	66
Hình 3.3. Chu trình dự đoán trong quá trình tiến hóa của chu trình MH	68
Hình 3.4. Nhiệm sắc thể điển hình 2 trang trại gió	69
Hình 3.5. Lưu đồ thuật toán LSTM-GA	71
Hình 3.6. Lưu đồ LSTM-PSO.....	73
Hình 3.7 Biểu đồ công suất gió ngày theo hai mùa	75
Hình 3.8. Phân bố doanh thu điện gió.....	77
Hình 3.9. Quá trình tiến hóa sau 20 vòng lặp GA và LSTM-GA	77
Hình 3.10. Quá trình hội tụ sau 25 vòng lặp PSO và LSTM-PSO	79
Hình 3.11. So sánh quá trình hội tụ GA và LSTM-GA	81
Hình 3.12. So sánh quá trình hội tụ PSO và LSTM-PSO	81
Hình 4.1: Hoàn thiện một dự án đầu tư điện gió.....	87
Hình 4.2 Biểu đồ năng lượng sạc và xả dự kiến.....	95
Hình 4.3: Lưu đồ chu trình.....	96
Hình 4.4 Biểu đồ công suất gió ngày theo hai mùa	97
Hình 4.5 Xác suất sản lượng điện gió mùa cao điểm.....	97
Hình 4.6. Biến thiên nhiệt độ máy biến áp ngày cao điểm	99
Hình 4.7 Biểu đồ công suất nguồn điện gió của Bus 5 mùa cao điểm.....	100
Hình 4.8 Biểu đồ năng lượng sạc và xả	101
Hình 4.9 Chỉ tiêu NPV các kịch bản	102
Hình 4.10 Suất hiệu quả đầu tư theo công suất.....	103
Hình 4.11 Hiệu quả trên giá vốn đầu tư ROI	103

DANH SÁCH CÁC BẢNG

BẢNG	TRANG
Bảng 2.1: Nguồn nhiệt điện	43
Bảng 2.2: Nguồn điện gió	43
Bảng 2.3: Doanh thu điện gió một tuabin	44
Bảng 2.4: So sánh công suất đỉnh và doanh thu.....	51
Bảng 3.1. Thông số cài đặt GA.....	75
Bảng 3.2. Thông số cài đặt PSO	75
Bảng 3.3. Thông số cài đặt và huấn luyện LSTM.....	75
Bảng 3.4. So sánh chỉ tiêu các kịch bản.....	80
Bảng 4.1. Giới hạn vận hành máy biến áp	92
Bảng 4.2. Dòng tiền dự án trong kịch bản xây mới ĐG	99
Bảng 4.3. Đối chiếu chỉ tiêu các kịch bản.....	105
Bảng 0.1. Kết quả thuật toán lai LSTM-GA	122
Bảng 0.2. Kết quả thuật toán lai LSTM-PSO	122

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Nghị quyết 70-NQ/TW ngày 20/8/2025 của Trung ương chỉ ra chiến lược năng lượng Việt Nam: “xây dựng thị trường năng lượng đồng bộ, cạnh tranh, minh bạch, đa dạng ...; áp dụng giá thị trường đối với mọi loại hình năng lượng”; và “ưu tiên khai thác sử dụng triệt để và hiệu quả các nguồn năng lượng tái tạo”. Vì vậy, việc chọn lựa đề tài sau khi đánh giá thực trạng là phù hợp với thực trạng chính sách phát triển năng lượng.

Trên thế giới, mối quan tâm cho kỷ nguyên tương lai vẫn đặt các thách thức bởi biến đổi khí hậu lên hàng đầu. Bão, lũ, hạn hán, trái đất nóng lên, ... là các hiện tượng bất thường gần đây đe dọa sinh thái và thiệt hại kinh tế, điển hình như mất mát tại miền Bắc Việt Nam trong năm 2024 bởi bão số 3 (Yagi). Trong khi đó, Liên Hợp Quốc đã báo cáo lượng khí thải CO₂ do nguyên liệu hóa thạch là tác nhân cơ bản tác động nhiệt độ bề mặt trái đất. Trong bối cảnh đó, việc chuyển đổi sang các nguồn NLTT trong đó có ĐG là cấp thiết và khả thi.

ĐG là một loại NLTT với khả năng phát triển mạnh trong tương lai theo báo cáo của các tổ chức năng lượng thế giới. Do không thải khí gây ô nhiễm trong quá trình hoạt động, nó giúp giảm tác động tiêu cực đến môi trường. Hiện nay, nhiều nước đang thúc đẩy mô hình tăng trưởng bền vững và chuyển đổi sang NLTT để dần cắt phụ thuộc sản phẩm hóa thạch. Điều này mở ra cơ hội tốt cho ĐG như là điều tất yếu, đặc biệt các khu vực có điều kiện gió thuận lợi tại Việt Nam.

Dù có nhiều lợi ích rõ ràng của điện gió nhưng tính bất định cao do biến động tốc độ gió khó lường và đột ngột, gắn liền chặt chẽ với điều kiện thời tiết nên sai số dự đoán rất cao. Trong khi đó xu hướng phát triển thị trường điện cạnh tranh trên thế giới đang chuyển biến đến một giai đoạn tự do và bình đẳng đối với tất cả các nhà cung cấp điện, trong đó có cả điện gió. Việc tự do cạnh tranh đó yêu cầu đấu thầu công bằng trên thị trường điện, điều này có nghĩa chủ điện gió không chỉ chào giá bán điện mà còn phải chào chính xác công suất phát điện trong tương lai, ví dụ như chào lịch trình phát điện theo giờ (hoặc nửa giờ) của ngày hôm sau trên thị trường

điện ngày hôm sau. Trong khi đó, bất định gây nên dự báo tốc độ gió có thể sai số tương đối cao làm cho công suất điện gió phát thực tế sai lệch lớn so với chào thầu trước đó. Điều này dẫn đến rủi ro thiệt hại cao cho chủ đầu tư điện gió khi bị phạt theo luật thị trường do thiếu hụt công suất phát điện như dự báo ban đầu. Thiệt hại do bất định này phụ thuộc vào từng thị trường điện cụ thể qua mức phạt, và thường khá cao đối với các thị trường điện có nhiều rủi ro.

Đề tài "Nghiên cứu nâng cao lợi nhuận điện gió trong thị trường điện" được chọn nghiên cứu không chỉ phản ánh tầm nhìn chiến lược trong việc cải thiện tác nhân cực đoan và góp phần hướng tới bền vững khi phát triển. Lĩnh vực này có tiềm năng to lớn mang lại giá trị thực tiễn và góp phần bảo vệ trái đất cho tương lai, đáp ứng mục tiêu net zero 2050 đã đặt ra.

“Nghiên cứu nâng cao lợi nhuận điện gió trong thị trường điện” đề cập đến phân tích khoa học nhằm tìm kiếm mô hình và biện pháp tăng doanh thu hoặc giảm thiệt hại để cải thiện hiệu quả kinh tế của các dự án điện gió bởi thách thức bất định khi tham gia vào cơ chế thị trường điện cạnh tranh. Trong đó, “nâng cao lợi nhuận” là mục tiêu gia tăng hiệu quả đầu tư giá trị tài chính của “điện gió” trong điều kiện xác suất bất định khi chúng tham gia đấu thầu bình đẳng trên "thị trường điện", một cơ chế giao dịch và định giá điện năng nơi các nhà sản xuất phải cạnh tranh và thích ứng với quy định của ngành. Toàn bộ khái niệm này cho thấy định hướng tiếp cận ở hai khía cạnh, vừa toán học trong xác suất sản lượng điện gió, vừa mở rộng sang yếu tố kinh tế - thị trường, nhằm tối ưu hóa lợi ích cho các nhà đầu tư và góp phần nâng cao hiệu quả chung của hệ thống điện.

2. Hai mục tiêu nghiên cứu

- Nghiên cứu đề xuất mô hình nâng doanh thu điện gió trong điều kiện mới, điều kiện tác động của bất định khi tham gia đấu thầu trên thị trường điện cạnh tranh trong tương lai.

- Nghiên cứu phương pháp giải quyết nâng doanh thu điện gió để tăng hiệu quả đầu tư tài chính của chúng trong các mô hình đề xuất.

3. Nhiệm vụ nghiên cứu

- Phân tích tính bất định của DG và thách thức bởi thị trường. Mô hình toán học dựa vào xác suất bất định tốc độ gió. Trên cơ sở đó, nghiên cứu xây dựng các mô hình liên kết nguồn điện gió và các nguồn điện truyền thống tham gia đấu thầu trên thị trường điện.

- Phân tích các phương pháp tối ưu và nghiên cứu đề xuất phương pháp giải bài toán nâng lợi nhuận điện gió trong các mô hình đã xây dựng trong bước trước.

- Ngoài ra, nghiên cứu ứng dụng trữ năng trong phương pháp nâng hiệu quả đầu tư điện gió.

- Thực nghiệm và kiểm tra các mô hình nghiên cứu trên hệ thống điện chuẩn IEEE để xem xét hiệu quả và khả thi.

4. Phạm vi nghiên cứu

Nghiên cứu tập trung vào tài chính để tăng doanh thu và hiệu quả đầu tư cho trang trại gió trong thị trường điện, sử dụng mô hình toán học và thuật toán tối ưu thử nghiệm trên hệ thống IEEE tiêu chuẩn. Phạm vi chính bao gồm xử lý bất định công suất điện gió, cơ chế phạt trên thị trường điện, kết hợp các nguồn trữ năng cùng nhiệt điện. Các giới hạn chính của nghiên cứu được tóm tắt như sau:

- Dữ liệu và mô hình hệ thống: sử dụng các công cụ được tích hợp trong Matpower/Matlab để thực nghiệm trên mô hình hệ thống điện chuẩn IEEE 30-bus. Mô hình điện gió xem xét phân bố xác suất Weibull trong quá trình thực nghiệm.

- Giả định thị trường điện: Dựa trên kịch bản thị trường ngày hôm sau kết hợp giao dịch giao ngay với giá điện chịu ảnh hưởng chủ yếu từ nguồn nhiệt điện chi phối. Loại thị trường này được chọn nghiên cứu phù hợp với mục tiêu cạnh tranh bình đẳng của xu hướng phát triển.

- Thuật toán và phương pháp: Giới hạn ở một số thuật toán phổ biến như LSTM và GA/PSO, kết quả nghiên cứu sẽ đánh giá khả năng ứng dụng rộng hơn.

- Phạm vi ứng dụng: Tập trung vào lợi nhuận kinh tế, trong đó chưa xét đến các yếu tố tương đồng các dự án đầu tư như tổn thất truyền tải, biến đổi khí hậu, biến động quy định pháp lý cũng như vận hành hệ thống.

Các giới hạn thực nghiệm cụ thể cho từng bài toán được trình bày chi tiết trong các chương tương ứng.

5. Các phương pháp nghiên cứu

- Thống kê, phân tích, đánh giá và chọn lọc.
- Mô hình hóa.
- Thực nghiệm.

6. Ý nghĩa khoa học, ý nghĩa thực tiễn

*** Về khoa học**

- Kiểm soát rủi ro đầu tư điện gió và tối ưu lợi ích khai thác năng lượng tái tạo: Nghiên cứu gây dựng cơ sở khoa học về cách tiếp cận mới về mô hình hóa xác suất bất định và tích hợp đa dạng nguồn điện để tăng hiệu quả đầu tư ĐG trong điều kiện mới, thời kỳ giảm ưu đãi chuyển sang cạnh tranh công bằng. Các mô hình tích hợp đa nguồn cũng như tổ hợp nguồn ĐG với truyền tải được đề xuất sẽ bổ sung vào kho tàng lý thuyết trong lĩnh vực quản lý NLTT.

- Phát triển các phương pháp tối ưu hóa tiên tiến dựa trên AI: Nghiên cứu khai thác tiềm năng kết hợp các thuật toán học sâu với metaheuristic để giải quyết các bài toán tối ưu phức tạp liên quan đến sự bất định của ĐG. Điều này không chỉ mở rộng ứng dụng của AI trong ngành năng lượng mà còn mở ra các hướng nghiên cứu đột phá cho lĩnh vực này.

- Khai thác nguồn ESS để tăng hiệu quả đầu tư điện gió: Việc tích hợp hệ thống ESS vào mô hình tối ưu mang lại phương thức cân bằng giữa cung và cầu điện trong điều kiện sản xuất không ổn định. Đây là một đóng góp có giá trị trong HTĐ thông minh và bền vững.

*** Về thực tiễn**

- Tăng đầu tư ĐG: Các mô hình vận hành và chiến lược đấu thầu được đề xuất giúp các nhà đầu tư và khai thác ĐG nâng lợi ích, kiểm soát rủi ro bởi bất định của sản lượng gió và giá điện trên thị trường.

- Ổn định HTĐ và tăng độ tin cậy vận hành: Việc tích hợp hệ thống ESS trong khi tối ưu giúp giảm ảnh hưởng bất lợi do bất ổn trong sản xuất ĐG, từ đó cải thiện chất lượng điện đến khách hàng.

- Hỗ trợ chính sách tận dụng NLTT: Cung cấp thông tin và đề xuất cụ thể, giúp các nhà quản lý xây dựng chính sách hỗ trợ hợp lý nhằm phát triển ĐG trong điều kiện TTĐ.

- Phát triển bền vững: Góp phần nâng sản lượng năng lượng sạch, ổn định dài lâu phù hợp xu hướng tăng dân.

- Cải thiện phát thải CO₂ và môi trường: Khai thác ĐG tối ưu, kết hợp với hệ thống ESS làm giảm dần việc sử dụng sản phẩm hóa thạch, qua đó dần giảm xả CO₂ vào môi trường sống.

7. Cấu trúc của Luận án

Luận án gồm 05 chương như sau:

- Chương 1 (Tổng quan): Phân tích đánh giá bối cảnh trong và ngoài nước để xác định tính cấp thiết và đề ra mục tiêu phương hướng nhiệm vụ nghiên cứu.

- Chương 2 (Xây dựng mô hình): Cơ sở lý thuyết, lý luận mô hình hóa bất định điện gió và xây dựng đánh giá các mô hình tích hợp nguồn điện trong thị trường điện cạnh tranh.

- Chương 3 (Phương pháp tối ưu): Nghiên cứu phương pháp lai LSTM với các thuật toán GA và PSO và đề ra cấu trúc tối ưu mới để nâng hiệu quả trong mô hình đầu tư ĐG.

- Chương 4 (Vận dụng ESS nâng hiệu suất ĐG): Một nghiên cứu sử dụng ESS kết hợp tối ưu MBA truyền tải để nâng hiệu quả đầu tư mô hình mở rộng trang trại điện gió hiện hữu mà không cần đền bù giải tỏa mở rộng lưới điện truyền tải đầu nối.

- Chương 5 (Kết luận): Những đạt được của luận án sau khi nghiên cứu, những đóng góp cho khoa học, và khuyến nghị phương hướng phát triển tiếp của đề tài.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN

1.1. Bối cảnh xu hướng phát triển năng lượng trên thế giới

1.1.1. Phát triển năng lượng đến 2024

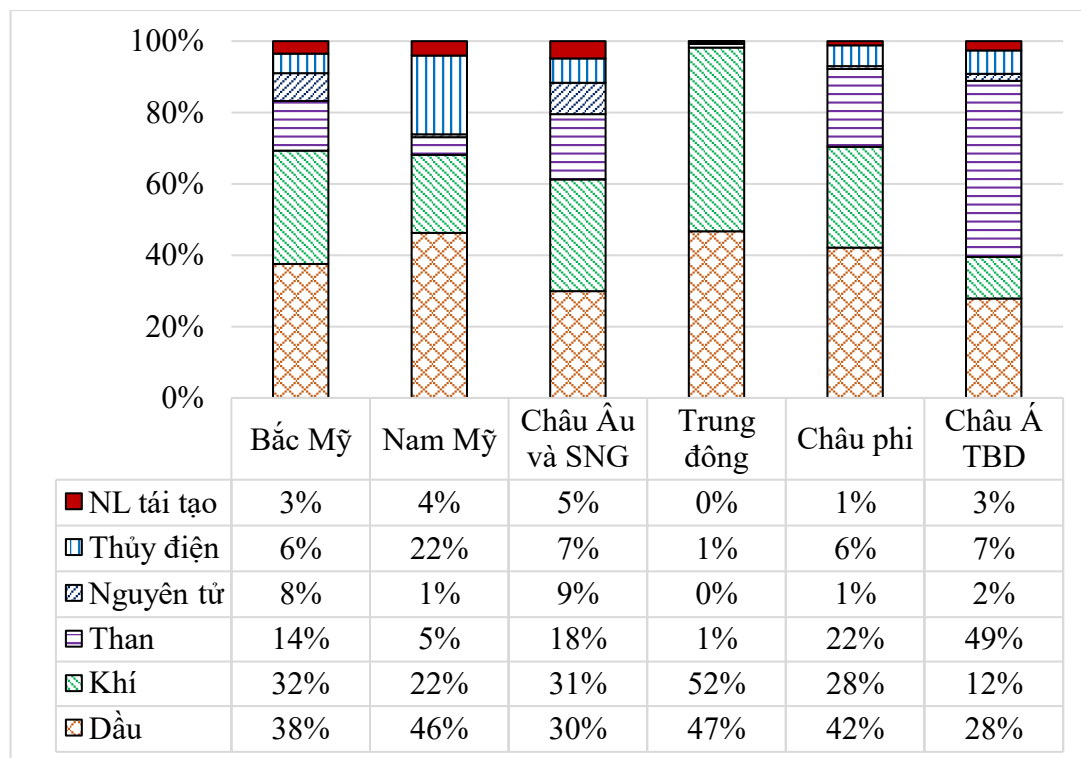
Biến động năng lượng Châu Âu 2020 khi nguồn cung khí đốt từ Nga bị cắt giảm đã ảnh hưởng nhiều đến đa số quốc gia trên toàn cầu, trong đó xã hội và kinh tế bị tác động đáng kể. Giá dầu khí đã tăng đột biến trong một thời gian trước khi được thế giới đề ra giải pháp kiềm chế. Điều đó cho thấy nhiều rủi ro khi phụ thuộc vào sản phẩm hóa thạch. Các nước đã đặt ra chương trình khai thác NLTT để dần thay thế sản phẩm hóa thạch, nhờ đó mức độ đóng góp tăng nhanh trên toàn thế giới và dự đoán xu hướng tương lai [1], đặc biệt là trang trại ĐG tầm trung và lớn [2]. Các số liệu phát triển được nêu trong tài liệu [3], sự phát triển đó ảnh hưởng thật sự đến môi trường như các tài liệu [4, 5] đã trình bày.

Hình 1.1 được IRENA báo cáo chi tiết trong [6] cho thấy sự phụ thuộc lớn vào sản phẩm hóa thạch trên toàn cầu và tiến triển NLTT còn khá hạn chế đến năm 2021. Các nguồn năng lượng sử dụng dầu khí chiếm tỷ trọng cao tại hầu hết các vùng Trung Đông, Bắc và Nam Mỹ. Trong khi đó, than vẫn là nguồn năng lượng chủ yếu ở khu vực Á châu và tiếp theo là dọc Thái Bình Dương.

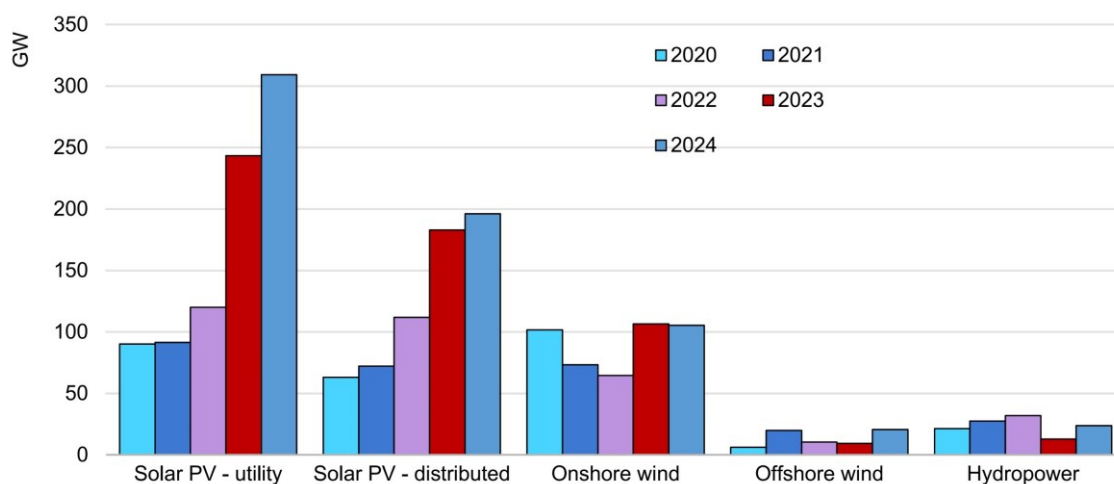
Tỷ lệ NLTT và thủy điện còn thấp ở đa số các khu vực, ngoại trừ Nam Mỹ, nơi thủy điện chiếm tỷ trọng đáng kể (22%). Đặc biệt, các quốc gia đang phát triển khu vực Châu Á và Châu Phi vẫn có mức sử dụng NLTT rất thấp. Tuy nhiên, Châu Âu và SNG đã đột phá trong việc chuyển đổi năng lượng, NLTT đạt khoảng 5% và năng lượng nguyên tử đạt 9%, cao hơn các vùng còn lại. Như vậy, khu vực này đang dẫn đầu trong nỗ lực cắt dần nhiên liệu hóa thạch.

Cập nhật đến 2024, báo cáo của cơ quan băng lượng quốc tế IEA trong [7], cho thấy NLTT đã đột phá hơn, bứt tốc kỷ lục trong năm 2023 với mức tăng 565 GW, cao hơn 60% so với năm 2022, đưa tổng công suất tái tạo toàn cầu lên 3.700 GW, chiếm 30% tổng sản lượng điện thế giới, Hình 1.2. Trung Quốc dẫn đầu với gần 2/3 tổng công suất mới, tiếp theo là Hoa Kỳ và EU nhờ các chính sách hỗ trợ mạnh mẽ, trong khi Ấn Độ là quốc gia tăng nhanh nhất, từ 15 GW (2023) lên 62 GW (2030).

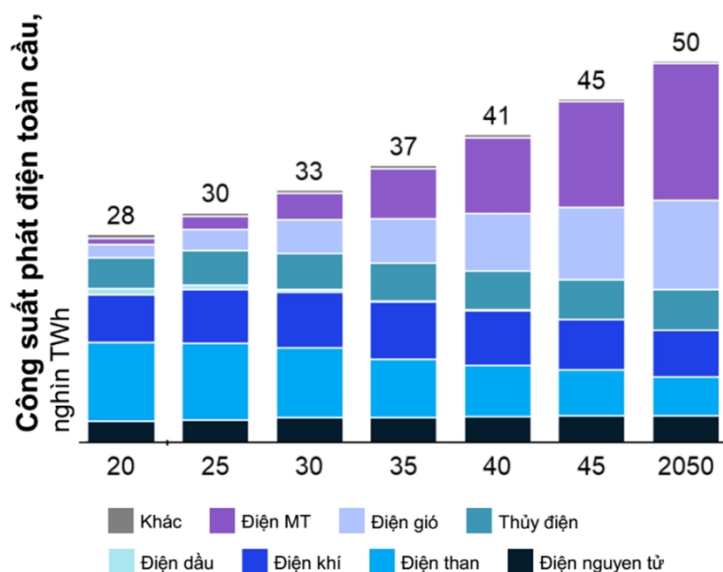
Trong số các loại năng lượng, ĐG phục hồi mạnh với dự báo tăng gấp bốn lần, đạt 970 GW vào cuối năm 2023, chiếm 26% tổng công suất điện tái tạo. Tuy nhiên, ĐG vẫn gặp nhiều thách thức bởi chi phí đầu tư cao (đặc biệt là ĐG ngoài khơi), tắc nghẽn lưới điện và chính sách chưa ổn định. Nhìn chung, NLTT, đặc biệt là ĐG và ĐMT, đang tăng trưởng mạnh nhưng để duy trì đà phát triển, cần có chiến lược cải thiện hạ tầng truyền tải và đẩy mạnh đầu tư, nâng tầm ESS, để phát triển bền vững.



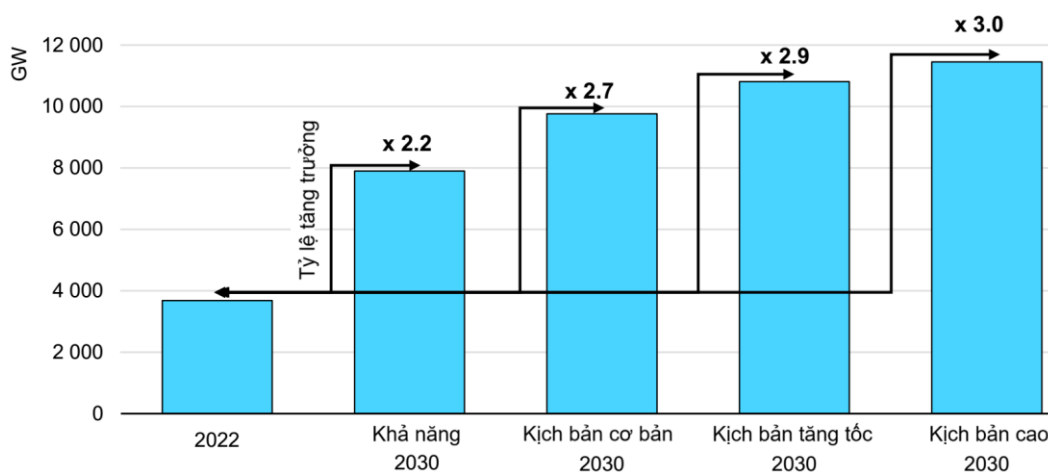
Hình 1.1: Sử dụng năng lượng thế giới đến 2021 [17]



Hình 1.2: Báo cáo phát triển năng lượng đến 2024 [7]



Hình 1.3: Dự báo cơ cấu năng lượng đến 2050 [6]



Hình 1.4: Chiến lược phát triển NLTT đến 2030 [7]

Nhìn chung, dữ liệu phản ánh sự phụ thuộc mạnh mẽ vào năng lượng hóa thạch trên toàn cầu chưa biến đổi lớn dù nó gây ô nhiễm và không bền vững. Đồng thời, việc chuyển đổi sang năng lượng sạch vẫn đang gặp nhiều khó khăn.

1.1.2. Xu hướng đến 2050

Biểu đồ Hình 1.3 phản ánh quá trình chuyển dịch năng lượng trên thế giới đến năm 2050, với sự gia tăng mạnh mẽ của NLTT và cắt giảm năng lượng hóa thạch theo tài liệu [6]. Đây là một đột phá lớn trong nỗ lực kiểm soát quá trình thay đổi khí hậu và duy trì ổn định năng lượng cho tương lai. Theo đó, cùng với tăng trưởng gấp

đôi tổng công suất phát điện lên đến 50 nghìn TWh vào năm 2050 thì ĐMT và ĐG là các dạng năng lượng tăng trưởng mạnh mẽ nhất, đặc biệt là giai đoạn 2040-2050. Các loại NLTT này dần thay thế cho điện than và dầu sẽ bị cắt giảm mạnh trong tương lai.

Như vậy, xu hướng rõ ràng trong việc thay đổi từ hóa thạch sang NLTT, với đột phá mạnh ĐMT và ĐG từ nay đến 2050. Vai trò của chúng trở thành trụ cột chính trong một khối năng lượng thống nhất toàn cầu như thể hiện trên biểu đồ, góp phần quan trọng kiểm soát tác động biến đổi khí hậu và nâng phát triển bền vững.

Theo dự báo của IEA trong báo cáo [7], đến năm 2030 cũng cho thấy toàn cầu dự kiến phát triển NLTT với kịch bản trung bình là 2,7 lần so với năm 2024, gần 10.000 GW, Hình 1.4. Trong đó công suất ĐG toàn cầu dự kiến khoảng 30% tổng công suất điện tái tạo. Tuy nhiên, tốc độ triển khai hiện tại vẫn gặp nhiều rào cản và cần các chiến lược thích hợp mạnh mẽ hơn.

1.1.3. Kết luận

Từ thống kê và dự báo quốc tế kết luận như sau:

- Thực trạng sử dụng năng lượng đến năm 2024, hóa thạch vẫn chiếm áp đảo trong cơ cấu năng lượng toàn cầu, chủ yếu tại Trung Đông, Nam và Bắc Mỹ. Bên cạnh đó, NLTT (bao gồm ĐG và ĐMT) chiếm tỷ lệ còn khá thấp ngoại trừ một số vùng như Đông Á, Châu Âu và Mỹ, nơi đã cố gắng trong chuyển đổi sang NLTT.

- Kế hoạch đến năm 2050, dự kiến tổng công suất phát điện toàn cầu tăng gần gấp đôi để đáp ứng nhu cầu tăng trưởng kinh tế và xã hội. Cùng với phát triển nhu cầu chung, NLTT được dự báo tăng trưởng mạnh mẽ, đặc biệt ĐG tăng gần 3 lần đến năm 2030 và 10 lần đến năm 2050, trở thành trụ cột chính trong cơ cấu năng lượng toàn cầu, thay thế dần các nguồn năng lượng hóa thạch.

- Tuy nhiên, để đạt được điều này cần nỗ lực từ nhiều phía, nhiều nguồn lực. Trong đó chiến lược thúc đẩy nhà đầu tư vào lĩnh vực NLTT, như ĐG, mang tầm quan trọng đáng kể.

1.2. Bối cảnh phát triển năng lượng trong nước

1.2.1. Tổng quan

Quyết tâm phát triển năng lượng đa dạng để đảm bảo an ninh được Trung ương chỉ ra trong Nghị quyết 70 ngày 20/8/2025 [8]. Trong đó chỉ tiêu NLTT đạt 25-30% năm 2030, và nhấn mạnh ưu tiên phát triển ĐG và NLMT, đặc biệt ĐG ngoài khơi. Về thị trường điện, tài liệu cũng đánh giá còn nhiều hạn chế và chính sách giá chưa phù hợp với thị trường. Vì vậy phải xây dựng chiến lược phát triển thị trường cạnh tranh, minh bạch, và áp dụng giá thị trường đối với mọi loại hình năng lượng.

Chiến lược phát triển ĐG tại Việt Nam đã được chú trọng từ những năm 2000 với hướng đến mục tiêu cam kết tại hội nghị quốc tế về biến đổi khí hậu lần 26, trung hòa carbon vào năm 2050. Chính phủ đã áp dụng nhiều chính sách thúc đẩy nghiên cứu và đầu tư vào NLTT để dần thay thế hóa thạch, vốn vẫn chi phối trong cơ cấu hiện nay. Trong đó, giá mua ĐG ưu đãi (FIT) được xem là chính sách hỗ trợ quan trọng nhất. Ngoài ra, Quy hoạch điện VIII cũng báo cáo các chính sách ưu đãi về thuế, khuyến khích đầu tư, và hỗ trợ phát triển hạ tầng cũng đã được triển khai, góp phần thúc đẩy sự tăng trưởng vượt bậc của ĐG trong thời gian gần đây và tạo đà cho đột phá trong tương lai [9].

Thể hiện cho định hướng phát triển năng lượng, Quy hoạch điện VIII đã được nghiên cứu, thiết lập và phê duyệt vào tháng 5/2023 [10], với kế hoạch chi tiết có hiệu lực từ tháng 4/2024 [11]. Quy hoạch này định hướng phát triển điện đến 2030, tầm nhìn 2050, đảm bảo nhu cầu phụ tải điện có đầy mạnh chuyển đổi NLTT. Trong đó, ĐG giữ vai trò chủ đạo, đóng góp lớn hiện thực hóa mục tiêu Net Zero 2050. Tuy nhiên, để đạt được các mục tiêu đã đề ra, chiến lược phát triển ĐG gặp nhiều khó khăn cần giải quyết:

- Tái cấu trúc lưới điện: Khai thác tốt ĐG đòi hỏi phải tái cấu trúc HTĐ đáp ứng truyền tải. Rào cản chính là hiệu quả truyền tải điện liên vùng bị ảnh hưởng bởi tính bất định của sản lượng ĐG trong thời gian thực. Đặc biệt, chi phí truyền tải từ miền Trung – khu vực có tiềm năng ĐG lớn nhưng nhu cầu tiêu thụ thấp – đến các

khu vực phụ tải lớn như miền Bắc và miền Nam là rất cao do khoảng cách đường truyền dài.

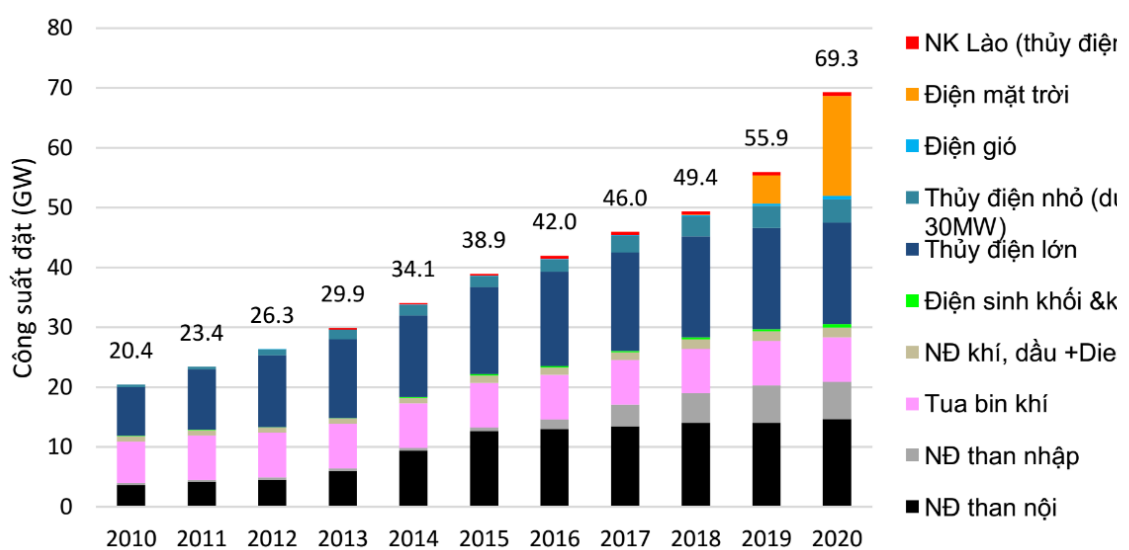
- Chuyển đổi chính sách và cạnh tranh thị trường: Sau khi chính sách giá FIT kết thúc, các dự án ĐG sẽ phải cạnh tranh sòng phẳng trên thị trường. Điều này gây khó khăn lớn khi các dự án ĐG cạnh tranh với các nguồn NLTT, bên cạnh còn đối đầu với các nguồn truyền thống với các ưu thế vốn đã tạo dựng được lòng tin nhờ chi phí ổn định và kinh nghiệm vận hành lâu dài.

Những thách thức này đòi hỏi phải có nhiều biện pháp đồng thời, từ nghiên cứu, quy hoạch, đến chính sách và công nghệ để tận dụng tối đa phát triển ĐG, hướng đến quá trình chuyển đổi NLTT và hạn chế khí nhà kính về lâu dài.

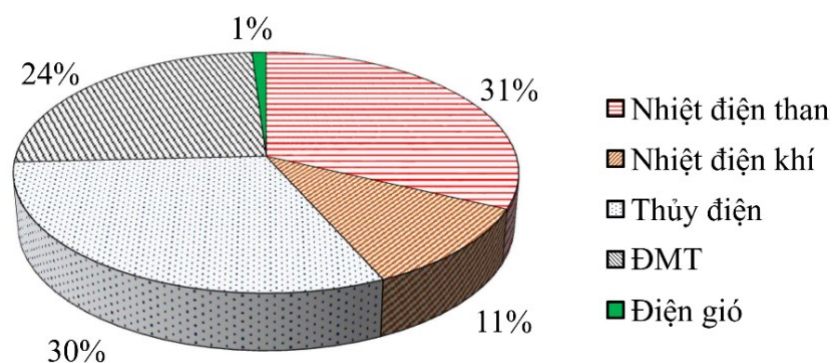
1.2.2. Năng lượng gió Việt Nam đến 2020

Theo báo cáo quy hoạch điện lực, ba vùng cơ bản được chia do diện tích trải dài theo hướng bắc đến nam trên 2000km. Hai vùng có nhu cầu phát triển phụ tải điện lớn với nhiều đô thị đó là vùng bắc bộ và nam bộ. Miền trung có không gian trải dài kết nối hai miền bắc và nam nhưng phụ tải điện tương đối thấp trong khi đó tiềm năng NLTT lại cao.

Biểu đồ Hình 1.5 thể hiện sự gia tăng công suất đặt phát điện Việt Nam trong giai đoạn 2010-2020, bao gồm các loại nhiệt điện, thủy điện, ĐG, ĐMT, điện sinh khối.



Hình 1.5: Tăng trưởng công suất đặt nguồn điện đến năm 2020 [8].



Hình 1.6: Tỷ lệ các loại nguồn điện đến 2020 [8]

Nhìn chung, Tổng công suất đặt gia tăng đều các năm, từ 20,4 GW năm 2010 lên 69,3 GW năm 2020, gấp hơn ba lần trong mười năm, điều này phản ánh tốc độ nhu cầu ngày càng tăng. Đặc biệt, vai trò của nhiệt điện chi phối trong cơ cấu nguồn điện, đóng góp lớn nhất vào tổng công suất đặt. Trong khi đó, sự nổi lên gần đây của các nguồn NLTT đáng được công nhận.

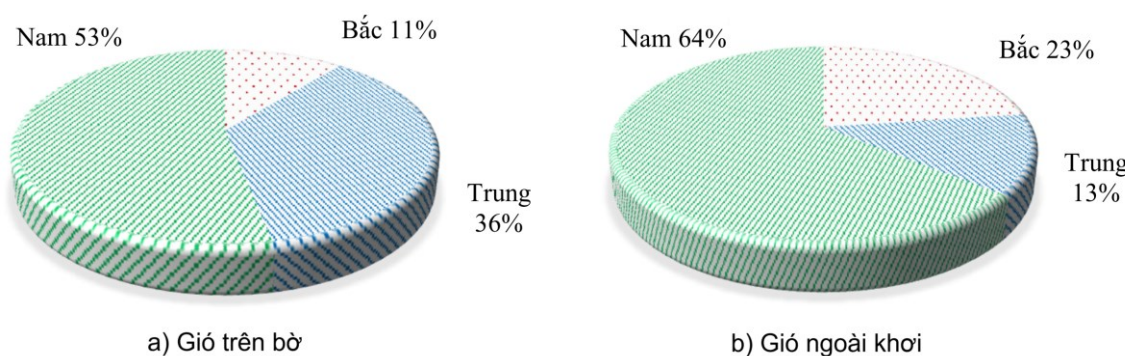
ĐMT được ghi nhận sự bùng nổ giai đoạn cuối thập niên 2010s. Năm 2020 nó trở thành nguồn NLTT có công suất lớn nhất, phản ánh hiệu quả của các biện pháp hỗ trợ thúc đẩy năng lượng mặt trời, như giá FIT ưu đãi. ĐG có tỷ lệ góp phần hạn chế so với tiềm năng và với ĐMT.

Như vậy đến năm 2020, năng lượng tiêu thụ nhiệt điện và thủy điện vẫn chủ yếu tại Việt Nam, trong khi đó năng lượng gió chiếm tỷ trọng khá khiêm tốn, dưới 1% như Hình 1.6 theo báo cáo [9]. Tuy nhiên, trong báo cáo chưa cập nhật khối lượng khá lớn các dự án ĐG chuẩn bị vận hành thời điểm 2024, khoảng trên 3000MW [11], tương ứng khoảng 5%.

1.2.3. Quy hoạch điện gió Việt Nam đến 2030

1.2.3.1. Trữ lượng

Hình 1.7, trích từ báo cáo quy hoạch điện VIII, thể hiện kết quả khảo sát sơ bộ trữ lượng nguồn năng lượng ĐG, trên 200 nghìn MW trên bờ và khoảng 600 nghìn MW ngoài khơi. ĐG ngoài khơi chiếm ưu thế nhờ bờ biển dài, hình (b). Sản lượng điện tập trung khu vực phía nam tỷ trọng đến trên 64%, kể đến là phía bắc với 23% và cuối cùng là miền trung với khoảng 13%. Đối với trữ lượng ĐG trên bờ, hình (a),



Hình 1.7: Ttiềm năng điện gió Việt Nam [8]

khu vực phía nam vẫn là vùng chiếm tỷ trọng sản lượng cao nhất đến 53%. Các vùng còn lại thấp hơn, nhưng khu vực miền trung nhìn hơn một tí so với vùng phía bắc nhờ khu vực cao nguyên có tốc độ gió cao hơn.

Xét trữ lượng theo tốc độ gió, trung bình khoảng 5.0-6.0m/s đối với ĐG trên bờ. Trên 50 sản lượng dự trữ khảo sát có tốc độ gió nhỏ hơn 5.5m/s, tốc độ này có hiệu suất đầu tư thấp, trong khi đó, trữ lượng còn lại tốc độ trung bình bằng hoặc cao hơn mang đến hiệu suất có thể đạt được hiệu quả đầu tư. Bên cạnh đó, tốc độ gió trung bình khoảng 7-8m/s cho ĐG ngoài khơi. Tuy nhiên, vùng tốc độ gió trung bình cao, trên 7m/s, tập trung khu vực miền trung và nam trung bộ với trữ lượng khoảng 200 nghìn MW, trong khi đó phần còn lại có tốc độ gió trung bình thấp hơn cần xem xét hiệu quả đầu tư cẩn trọng vì hiệu quả có thể thấp hơn.

1.2.3.2. Quy hoạch phát triển điện gió đến 2030

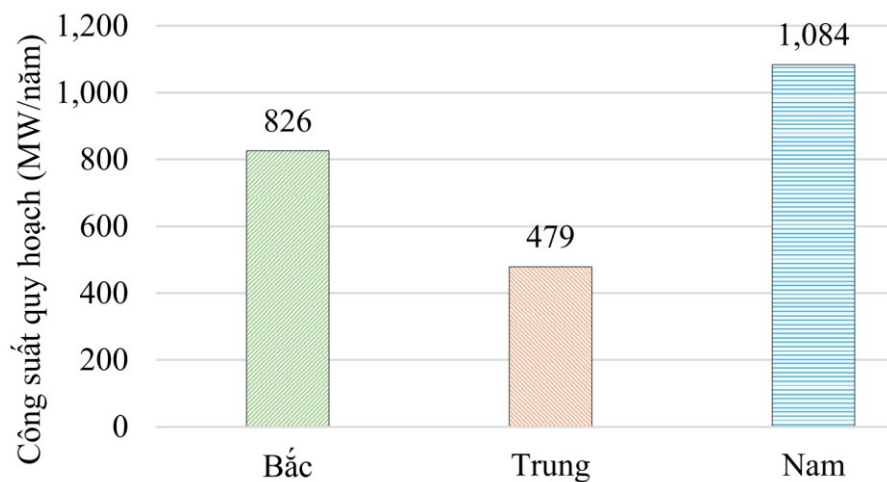
Đến 2030, dự báo nhu cầu điện tăng gấp khoảng 2.29 lần công suất cực đại so với 2020, đạt tương đương trên 92 nghìn MW, trong khi đó, quy hoạch phát triển nguồn điện các loại đạt khoảng 138 nghìn MW [9]. Trong đó, riêng ĐG phát triển với tốc độ rất nhanh, gần 24 nghìn MW trong giai đoạn quy hoạch như thể hiện trong *Bảng 1. 1*, tương ứng gia tăng tốc độ khoảng 28%/năm. *Hình 1.8* cho thấy vùng phía nam gia tăng cao nhất với 21%/năm, ngược lại miền trung tăng chậm nhất là 9%/năm, còn lại miền bắc tăng khoảng 16%/năm. Kết quả này tương ứng với công suất tăng thêm trung bình mỗi năm từng vùng bắc, trung và nam là 826MW/năm, 479MW/năm và 1,084MW/năm.

Bảng 1. 1. Quy hoạch điện gió đến năm 2030 [10]

S TT	Khu vực	Số tỉnh	Quy hoạch đến 2030			Kế hoạch vận hành 2030 (MW)	Còn lại (MW)
			MW	Ngoài khơi	Trên bờ		
	<i>Tổng</i>	37	23,896	17,896	6,000	10,103	13,793
1	Bắc	14	8,264	5,764	2,500	3,634	4,630
2	Trung	7	4,791	4,291	500	870	3,921
3	Nam	16	10,841	7,841	3,000	5,599	5,242

Thành phần công suất vận hành đến 2030 trong *Bảng 1. 1*, khoảng trên 10 nghìn MW, là khối lượng đã có quy hoạch khá chi tiết, và chủ yếu các dự án đầu tư ĐG trên bờ. 58% khối lượng ĐG còn lại đang trong giai đoạn xây dựng kế hoạch chi tiết và tìm kiếm nhà đầu tư. Trong số đó gần tương đương chia đều số lượng cho ĐG trên bờ và ngoài khơi, tương ứng khoảng gần 7.8 nghìn MW và 6 nghìn MW. Xét theo vùng miền, ĐG được phát triển khoảng 539MW chủ yếu các vùng trung và nam bộ, trong khi đó tiêu thụ điện tập trung ở hai miền nam và bắc bộ như *Hình 1.8*.

Với lượng quy hoạch ĐG như đã nêu, tỷ trọng ĐG đã được nâng lên trên 13% tổng công suất nguồn vào năm 2030, tương ứng gần 28 nghìn MW [11]. Tuy nhiên, khối lượng này cũng chỉ đạt khoảng 13% so với tiềm năng ĐG của Việt Nam. Theo



Hình 1.8: Tăng trưởng điện gió trung bình hàng năm [8]

đó, khu vực phía bắc khai thác nhiều nhất, kể đến là miền nam. Nguyên nhân là do phụ tải điện tập trung tại các vùng này.

1.2.4. Kết quả quy hoạch điện gió

Quy hoạch điện VIII đã cho thấy bức tranh toàn cảnh điện lực đến 2030, tầm nhìn 2050, với phát triển ĐG khá mạnh mẽ trong thời gian tới, và được đánh giá theo báo cáo [12, 13] như sau:

* Đạt được mức gia tăng ĐG trung bình 18%/năm là rất cao, cần nỗ lực của cả cộng đồng góp phần thúc đẩy đầu tư phát triển nguồn NLTT để tạo đạt được mục tiêu net zero 2050.

Cân bằng được sản lượng điện giữa các vùng miền, từ đó giúp giảm thiểu truyền tải năng lượng liên vùng. Khi đó giúp giảm yêu cầu tăng cường lưới truyền tải, đó là thách thức lớn trở ngại trong nhiều năm liền trước đây.

Cân bằng tỷ trọng nguồn NLTT với các nguồn nhiệt điện và thủy điện đảm bảo dự trữ năng lượng trong các trường hợp bất định của nguồn NLTT; giới hạn bất ổn vận hành truyền tải điện; và giữ vững an ninh năng lượng.

* Các khó khăn phải giải quyết liên quan đến yêu cầu một nguồn lực lớn nhiều mặt, tài chính, nhân lực, vật lực và công nghệ.

Giảm ưu đãi của chính phủ có thể gây rủi ro cao cho các chủ tài chính khi ĐG tham gia vào TTD, xu hướng đang tiến tới. Tính bất định của ĐG gây cho họ bất lợi trong TTD so với loại nguồn điện chủ động hơn (như nhiệt điện, thủy điện). Rủi ro này có thể dẫn đến hoang mang cho nhà đầu tư khi suất thu lợi bất định.

Sự cạnh tranh với các loại khác như nguyên tử hay NLTT mới nổi: sinh khối, hydro, cũng là một thách thức đáng chú ý với các chủ đầu tư ĐG quan tâm.

* Định hướng nghiên cứu các phương thức cải thiện, nâng hiệu suất đầu tư ĐG là một định hướng giảm rủi ro và nâng tin cậy cho chủ đầu tư NLTT khi chúng tham gia vào TTD.

Tối ưu truyền tải điện giữa các vùng miền cũng cần được nghiên cứu xây dựng phương thức vận hành. Xây dựng các loại nguồn trữ năng lượng điện để giảm

áp lực truyền tải, giảm rủi ro do tính bất định của chúng là cần thiết nghiên cứu phát triển.

1.3. Những thách thức đối với điện gió trong giai đoạn phát triển tới

1.3.1. Tính bất định của điện gió

Thiên nhiên mở ra cho chúng ta một cơ hội chuyển hóa năng lượng từ gió, nhưng biến động theo thời gian của tốc độ gió là không lường trước. Sự biến động đó là cho sản lượng phát điện gió của tua bin bất định theo, và nó gây ra hậu quả không hề nhỏ cho vận hành hệ thống điện, điển hình như mất ổn định tần số hoặc điện áp, quá tải cục bộ hệ thống điện [14]. Chính vì vậy, dự báo chính xác tốc độ gió được đặt lên hàng đầu nhằm giảm thiểu thiệt hại. Các phương pháp dự báo đã bắt đầu từ rất lâu và tiến bộ nhanh chóng gần đây nhờ trí thông minh nhân tạo. Tùy theo mục đích khác nhau, việc dự báo được phân ra theo thời gian cực ngắn, ngắn hạn, trung hạn và dài hạn [15], trong đó phục vụ cho thị trường điện ngày hôm sau thường được dự báo ngắn và trung hạn [16].

Sai số dự báo tốc độ gió là không thể tránh khỏi vì chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố tác động mặc dù đã giảm dần nhờ các phương pháp hiện đại gần đây như đã chỉ ra tại [14]. Những dự đoán cực ngắn có thể sai số khoảng 15% [17], nhưng các dự đoán ngắn hạn tính đến ngày thì sai số có thể trong tầm 10-30%, thậm chí có khi lên đến 50% và hơn với những thời điểm xảy ra hiện tượng thời tiết cực đoan, gió dạt [18]. Biến động khó lường đó không chỉ khó khăn cho việc vận hành điện gió trong một hệ thống điện mà còn là thách thức lớn cho quyết định chào thầu điện gió trên thị trường điện, đặc biệt với các điều kiện phạt hợp đồng sai lệch đầu thầu.

1.3.2. Thị trường điện tích hợp điện gió

Từng bước phát triển thị trường điện theo xu hướng từ độc quyền đến ngày càng tự do cạnh tranh. Các thị trường lâu đời trên thế giới đã phát triển phải kể đến là thị trường Châu Âu, Mỹ, Úc. Các thị trường này tích hợp nhiều phương thức giao dịch, trong đó cạnh tranh bán lẻ chiếm tỷ trọng đáng kể, điển hình là thị trường điện ngày hôm sau [19]. Mặc dù Việt Nam vẫn đang trong giai đoạn thị trường bán buôn

nhưng theo quy hoạch điện VIII điều chỉnh đang định hướng phát triển thị trường bán lẻ trong thời gian sắp tới hướng tới cạnh tranh [20].

Trong khi các chính sách ưu đãi cho nguồn năng lượng gió giảm dần trong thời gian qua, cạnh tranh bình đẳng giữa các loại hình nguồn trên thị trường, kể cả nguồn năng lượng gió, đã bắt đầu chuyển mình phát triển trên thị trường điện Châu Âu [21], thị trường điện Mỹ [19], đó là thị trường điện trong thời kỳ mới; và thị trường điện cạnh tranh tự do đấu thầu ngày hôm sau tích hợp nguồn năng lượng tái tạo là một lựa chọn điển hình [22]. Sự gia tăng tỷ trọng NLTT trong thị trường có thể làm thay đổi đáng kể cả cấu trúc thị trường lẫn gây ra biến động giá cả [23].

Không giống hợp đồng giá FIT hay song phương, công suất phát điện có thể thả nổi, khi đấu thầu cạnh tranh trên thị trường điện, người bán điện ngoài chào giá bán còn phải chào kế hoạch công suất phát điện chuẩn xác theo giờ của ngày kế tới (hoặc nửa giờ tùy theo thị trường). Việc chào sai công suất phát điện dẫn đến nguy cơ bị phạt nếu thiếu, hoặc xả bỏ nếu dư mà không có người mua [23].

Dự đoán trung và ngắn hạn là cách mà các chủ đầu tư điện gió xây dựng biểu đồ phát điện khi chào thầu. Bất định của các dự đoán này có xác suất sai số cao như đã nêu, dẫn đến nguy cơ rủi ro sai lệch công suất phát điện là điều khó tránh khỏi [24]. Hành vi của chủ điện gió khi đó là tìm cách giảm thiệt hại nhất có thể [25]. Tại thời điểm thiếu điện, chủ điện gió thường mua điện giá giao ngay khá cao trên thị trường để bồi thường cho khách hàng để giảm thiệt hại [26], hoặc chịu phạt hợp đồng với thiệt hại cao đáng kể.

1.3.3. Các thách thức

Như vậy, thách thức cơ bản đối với chủ đầu tư điện gió trong thời kỳ mới là bất định trong thị trường điện mà họ phải tìm kiếm giải pháp hạn chế thiệt hại và xây dựng chiến lược chào công suất điện gió hợp lý để giảm thiểu rủi ro bị phạt hợp đồng bởi bất định khi họ tham gia trên thị trường điện cạnh tranh. Cụ thể hơn,

(i) Tốc độ gió có tính biến động lớn theo thời tiết dẫn đến việc dự đoán sản lượng trở nên khó chuẩn xác. Trong khi đó, chênh lệch dự báo với thực tế gây mất cân bằng trong HTĐ, làm tăng chi phí và giảm hiệu quả.

(ii) Theo luật cân bằng năng lượng, bất kể thay đổi thất thường của một nguồn ảnh hưởng đến các đối tượng khác là không tránh khỏi, gây bất ổn thị trường. Bên cạnh đó, sự cạnh tranh ngày càng khốc liệt theo luật thị trường, yêu cầu chiến lược đấu thầu phải hiệu quả. Do tính khó dự đoán công suất phát điện của ĐG dẫn đến công tác quản lý và điều phối thị trường trở nên phức tạp, quy luật cần giải pháp cân bằng lợi ích giữa các bên tham gia.

(iii) Việc phát điện của ĐG trên HTĐ đòi hỏi xử lý khối lượng dữ liệu lớn với nhiều yếu tố ngẫu nhiên, làm tăng độ phức tạp tính toán, đặc biệt đối với hệ thống lớn hoặc yêu cầu thời gian thực. Nhiều thuật toán tối ưu thường gặp khó khăn bởi bản cục trị địa phương do biến động khó lường của điện gió. Vì vậy, cần phương pháp tối ưu tiên tiến hơn để nâng cao hiệu quả.

1.4. Những nghiên cứu liên quan gần đây

Với những thách thức như đã nêu, việc nghiên cứu các giải pháp nâng cao hiệu quả khai thác và tích hợp ĐG vào HTĐ trở thành một nhiệm vụ cấp bách. Nhiều nhà khoa học đã công bố những công trình nghiên cứu cải thiện như sau,

1.4.1. Nghiên cứu mô hình cải thiện hiệu quả điện gió

Ba nhóm nghiên cứu điển hình tập trung các khía cạnh như sau: Thứ nhất, mô hình kết hợp ESS trong HTĐ là đề xuất phổ biến cho giải pháp giảm thiểu biến động và nâng cao hiệu quả ĐG. Một phương pháp tối ưu hóa vận hành HTĐ được trình bày nhằm giảm thiểu tác động của biến động thị trường điện có tích hợp ĐG [27]. Hơn nữa, việc cải thiện lợi ích cho các bên tham gia thị trường thông qua tính linh hoạt của hệ thống, từ đó hạ giá và cân bằng khối lượng thị trường, được nhấn mạnh như một chiến lược hiệu quả [28]. Ngoài ra, việc tham gia thị trường điện được xem là giải pháp khả thi để hạn chế tổn thất kinh tế do mất cân bằng cung cầu năng lượng [29].

Thứ hai, phân tích kinh tế vận hành nguồn điện và phương thức hoạt động TTĐ, các nghiên cứu đã đề xuất các cơ chế sáng tạo để hỗ trợ các nhà máy ĐG. Một thị

trường dự trữ song phương được đề xuất, cho phép các nhà máy ĐG mua năng lượng lưu trữ để giảm rủi ro bị phạt, dựa trên lý thuyết trò chơi [30]. Tích hợp các cơ chế dự trữ điều tiết nhanh trong HTĐ được chứng minh là giải pháp hiệu quả để giảm thiệt hại doanh thu, đồng thời nâng cao độ ổn định và an toàn lưới điện [31]. Ngoài ra, việc kết hợp tham gia vào cả thị trường năng lượng và thị trường lưu trữ giúp các nhà máy ĐG hạn chế tổn thất tài chính do sai lệch giữa sản lượng dự báo và thực tế [32].

Cuối cùng, các mô hình phân tích tài chính kết hợp rủi ro và tổn thất điện cũng mang lại những đóng góp quan trọng. Một biện pháp giảm thiểu thiệt hại do bất định trong sản xuất ĐG đã được giới thiệu, tập trung vào việc quản lý rủi ro hiệu quả [33]. Một thị trường dự trữ song phương được đề xuất, cho phép các chủ ĐG mua năng lượng dự trữ để giảm nguy cơ bị phạt [34]. Hơn nữa, việc bổ sung nguồn dự trữ điều tiết nhanh được xác định là phương pháp tăng cường an ninh HTĐ [35]. Các khoản lỗ do dư thừa hoặc thiếu hụt năng lượng, gây ra bởi tiền phạt hoặc chi phí xử lý, đã được phân tích, cung cấp cơ sở để cải thiện quản lý tài chính cho các nhà máy ĐG [23].

1.4.2. Các nghiên cứu nâng cao chính xác dự báo

Dự báo là yếu tố được quan tâm nhiều thời gian qua để tối ưu hiệu quả vận hành và đầu tư trong thị trường điện cạnh tranh với bối cảnh biến động tự nhiên của tốc độ gió [36]. Về dự đoán tốc độ gió, nghiên cứu [37] phát triển mô hình lai kiến trúc mạng hồi quy sâu với LSTM, mang lại hiệu quả vượt trội về tốc độ và độ chính xác trong dự báo năng lượng gió. Tương tự, tài liệu [38] giới thiệu phương pháp dự báo lai thuật toán khử nhiễu phân rã, tối ưu Seagull, toán tử Cauchy, và LSTM để nâng cao cả độ chính xác và độ tin cậy. Tài liệu [39] tập trung vào quản lý bất ổn trong các trang trại điện gió thông qua dự báo tốc độ gió sử dụng AI đa biến, trong khi nghiên cứu [40] ứng dụng các phân bố xác suất Weibull và Lognormal để dự báo công suất ngắn hạn cho ĐG và ĐMT. Ngoài ra, nghiên cứu [41] phân tích chế độ biến đổi và áp dụng học máy cực trị biên để tối ưu hóa dự báo tốc độ gió đa mục tiêu. Đối với dự báo giá điện, tài liệu [3] sử dụng thuật toán AI để dự báo giá bán, hỗ trợ kiểm soát rủi ro đầu tư, trong khi nghiên cứu [42] áp dụng xác suất Markov để xây dựng chiến lược đấu thầu giá hiệu

qua. Tài liệu [43] đề xuất khung học sâu hai bước với kỹ thuật bù lỗi để dự báo giá điện ngắn hạn theo chu kỳ nửa giờ, phù hợp với yêu cầu vận hành thời gian thực.

Bên cạnh đó, để nâng cao hiệu quả các kỹ thuật lai kết hợp AI và phương pháp tối ưu hóa đã được nghiên cứu khá phổ biến. Nghiên cứu [44] sử dụng thuật toán meta-heuristic để điều chỉnh trọng số trong mạng học sâu, cải thiện đáng kể chất lượng dự báo. Tương tự, tài liệu [45] khai thác thuật toán GA để tăng độ chính xác của mô hình dự báo độ ẩm đất dựa trên mạng LSTM. Công trình [46] đề xuất thuật toán Cosine-Sine cải tiến để tối ưu hóa siêu tham số của mạng LSTM và GRU trong dự báo năng lượng, trong khi nghiên cứu [47] triển khai thuật toán tối ưu cá voi để điều chỉnh siêu tham số, hỗ trợ dự báo tải nhiệt độ với độ chính xác cao. Mô hình lai PSO-LSTM được áp dụng trong tài liệu [48] và [49] lần lượt cho dự báo độ ẩm đất và giá điện chi tiết, cho thấy hiệu quả trong xử lý các bài toán phức tạp. Ngoài ra, nghiên cứu [50] kết hợp mạng LSTM với mạng đối kháng tạo sinh tạo để dự báo sản lượng điện mặt trời dựa trên mô hình đám mây, mở ra hướng tiếp cận mới trong việc xử lý dữ liệu thời tiết biến động. Những tiến bộ này không chỉ cải thiện độ chính xác mà còn tăng khả năng ứng dụng thực tiễn trong quản lý năng lượng tái tạo.

1.4.3. Các nghiên cứu phương pháp tối ưu

Các nghiên cứu tối ưu hóa trong lĩnh vực NLTT đã đạt được những tiến bộ đáng kể, chuyển từ các phương pháp toán học truyền thống như lập trình tuyến tính [51], lập trình động [52], và lập trình phi tuyến [53] sang các kỹ thuật heuristic [54] và meta-heuristic tiên tiến [55]. Các thuật toán MH như PSO [56], GA [57], tìm kiếm tabu [58], tìm kiếm thích ứng ngẫu nhiên [59], và tối ưu đàn kiến [60] đã được triển khai rộng rãi để giải quyết các bài toán tối ưu hóa HTĐ, mang lại hiệu quả cao trong quản lý và vận hành. Đặc biệt, AI và học sâu đã tạo ra bước ngoặt trong dự báo sản lượng ĐG [61], với sự kết hợp giữa thuật toán tối ưu hóa và học sâu nhằm nâng cao độ chính xác và khắc phục hạn chế của từng phương pháp [62]. Chẳng hạn, thuật toán tối ưu hóa sói xám được sử dụng để tối ưu hệ thống kết hợp ĐG, ĐMT, lưu trữ hydro và pin nhiên liệu [63]; phiên bản cải tiến của PSO Salp tăng hiệu quả xác định điểm công suất cực đại cho tua-bin gió [64]; PSO hỗ trợ tối ưu đa mục tiêu cho hệ thống

tích hợp DMT, ĐG và ESS [65]; đồng thời, phương pháp tiến hóa Gradient điều chỉnh từ GA cải thiện hiệu suất hệ thống IoT [66]. Nhìn chung, sự phát triển của AI và các kỹ thuật tối ưu không chỉ nâng cao độ chính xác trong dự báo và vận hành HTĐ mà còn mở ra nhiều ứng dụng tiềm năng cho NLTT.

1.5. Những đạt được và khoảng trống trong các nghiên cứu

1.5.1. Đạt được

Các nghiên cứu nổi bật nhất trong lĩnh vực ĐG gần đây vẫn là dự báo, đã đạt được những tiến bộ quan trọng trong việc nâng cao độ chính xác và hiệu quả, đáp ứng nhu cầu quản lý năng lượng tái tạo trong thị trường điện cạnh tranh. Các phương pháp tiên tiến, trong đó chủ đạo là mô hình lai kết hợp mạng học sâu như LSTM đã cải thiện đáng kể khả năng dự báo sản lượng ĐG trong điều kiện tốc độ bất định. Các kỹ thuật sử dụng xác suất với học sâu đã hỗ trợ dự báo giá điện, xây dựng chiến lược đấu thầu hiệu quả, giúp giảm rủi ro đầu tư. Các ứng dụng thuật toán meta-heuristic, tối ưu hóa siêu tham số, kết hợp với AI đã nâng cao độ chính xác trong dự báo năng lượng và các yếu tố liên quan, mở rộng khả năng ứng dụng thực tiễn.

Bên cạnh đó, các nghiên cứu về phương pháp tối ưu cũng được nhiều quan tâm. Chuyển từ toán học truyền thống sang các kỹ thuật tối ưu meta-heuristic cải tiến đã mang lại nhiều ưu thế trong việc giải quyết các bài toán tối ưu hóa HTĐ. Bên cạnh đó, lai với AI, đặc biệt là học sâu đã nâng cao độ chính xác của các thuật toán dự báo, qua đó cải thiện hiệu suất vận hành hệ thống điện, và giải quyết thách thức bất định của NLTT. Tuy nhiên, các phương pháp lai cũng mới dừng lại theo hướng tối ưu kiến trúc và trọng số của các mạng AI để phục vụ vào bài toán dự báo đã nêu.

Ngoài ra, các nghiên cứu về mô hình đánh giá và vận hành khi tích hợp ĐG trong HTĐ cũng được nghiên cứu cải thiện hiệu quả bất định của điện gió. Trong đó chủ đạo là các nghiên cứu về mô hình kết hợp ESS giúp giảm tác động của biến động thị trường và cân bằng cung cầu; cơ chế thị trường dự trữ song phương và tích hợp nguồn điều tiết nhanh cũng đáng quan tâm giảm rủi ro phạt; và các mô hình phân tích tài chính khác cũng cung cấp các giải pháp quản lý hiệu quả bất định sản lượng ĐG.

1.5.2. Khoảng trống

Mô hình tích hợp năng lượng tái tạo vừa phát triển trên các thị trường điện lâu đời trong thời gian gần đây. Các cơ chế ưu đãi năng lượng xanh còn ăn sâu trong tâm thức của những nhà đầu tư nhưng xu hướng cạnh tranh là tất yếu. Trong khi đó, các nghiên cứu mô hình bất định điện gió còn rời rạc, chưa gắn liền tổng thể trong một hệ thống phức hợp vì tính phức tạp của nó, đặc biệt sự nhạy cảm biến động của thị trường điện khó lường khi cộng hưởng với ngẫu nhiên bất định của điện gió [67]. Hậu quả ảnh hưởng đến lợi ích các bên tham gia thị trường và cả xã hội, đặc biệt thiệt hại rõ ràng đến hiệu quả đầu tư lĩnh vực điện gió. Vì vậy tác động của bất định điện gió lên thị trường là một khoảng trống đáng kể cần nghiên cứu trong thời kỳ mới.

Bài toán biến động điện gió trong các phản ứng ngẫu nhiên thị trường điện liên quan đến xác suất và là một bài toán chịu tác động bởi nhiều tham số ngẫu nhiên có thể độc lập hoặc phụ thuộc lẫn nhau. Để giải bài toán phức tạp này vì vậy là khó khăn, từ các biến xác suất bất định điện gió, đến hành vi phản ứng của các thành phần bị tác động của thị trường điện, và tối ưu cho nhiều đối tượng. Các thuật toán tối ưu cho một mô hình phức tạp là một khoảng trống nữa cần cho các nghiên cứu phát triển.

Ngoài ra, trang trại điện gió đã và đang phát triển tại nhiều quốc gia kể từ khi còn nhiều chính sách ưu đãi. Nhưng khi giảm dần chế độ hỗ trợ, hiệu quả đầu tư cần được đánh giá lại. Nghiên cứu đánh giá mô hình tích hợp hệ thống trữ năng trong các trang trại hiện có để mở rộng so với phát triển đầu tư mới nhằm tìm hướng đi hiệu quả cho phát triển điện gió cũng nên được xem xét nghiên cứu.

1.6. Tính cấp thiết của đề tài

Thách thức do biến động khó lường của ĐG, cùng với yêu cầu cạnh tranh ngày càng cao trong TTĐ, đã làm suy giảm lợi nhuận và gia tăng rủi ro tài chính cho các nhà đầu tư. Vì vậy, cấp thiết nghiên cứu nhằm nâng cao hiệu suất khai thác ĐG trở nên cần thiết, không chỉ để củng cố lòng tin của giới đầu tư mà còn hỗ trợ thực hiện các cam kết giảm phát thải, thúc đẩy phát triển bền vững và nâng cao lợi ích kinh tế

- xã hội. Khoảng trống nghiên cứu đã mở ra sự cần thiết cho nghiên cứu này theo ba hướng cấp thiết như sau:

- Mô hình xác suất bất định điện gió trong thị trường điện. Trên cơ sở đó, các mô hình tích hợp nguồn điện gió với các nguồn điện truyền thống trong hoạt động đấu thầu trên thị trường điện cạnh tranh, mà điển hình nghiên cứu trên thị trường điện ngày hôm sau, để xem xét đánh giá hiệu quả đầu tư và tìm kiếm mô hình nâng cao doanh thu cho nguồn điện gió.

- Để giải quyết bài toán tăng doanh thu trong một môi trường phức tạp đã nêu, các phương pháp tối ưu được xem xét và nghiên cứu đề xuất phương pháp phù hợp là cần thiết. Trí thông minh nhân tạo đang được ứng dụng ngày càng rộng rãi, liên tục cải tiến. Từ khoảng trống nghiên cứu lai thông minh nhân tạo với meta-heuristic như đã trình bày, tiếp cận và phát triển thuật toán tối ưu meta-heuristic theo xu hướng tích hợp trí thông minh nhân tạo vào cấu trúc quy trình tối ưu để nâng chất lượng tối ưu trong bài toán tăng hiệu quả đầu tư điện gió.

- Ngoài ra, trong mô hình xác suất bất định điện gió trên thị trường điện, tích hợp hệ thống trữ năng theo xu hướng phát triển hiện nay cũng cần thiết nghiên cứu để tăng hiệu quả điện gió. Trước mắt, các giải pháp mở rộng trang trại điện gió hiện hữu cần thiết được xem xét đánh giá và đối chiếu hiệu quả so với việc đầu tư mới hoàn toàn một trang trại, với muôn vàn khó khăn trong đó nhiều dự án xây mới trở ngại khi gặp trở ngại đền bù giải tỏa cho hệ thống truyền tải đấu nối vào lưới điện quốc gia.

1.7. Mục tiêu và phương hướng nghiên cứu

Luận văn này có mục tiêu tăng doanh thu điện gió trong điều kiện bất định với thời kỳ phát triển mới, cạnh tranh tự do và công bằng trên thị trường điện. Qua nghiên cứu tổng quan, để đạt được mục tiêu đó cần phát huy hai nội dung cơ bản: xây dựng mô hình điện gió trong điều kiện mới, và phương pháp giải bài toán tăng doanh thu trong mô hình. Tổ chức triển khai phương hướng thực hiện 02 nội dung trên thành 03 trọng tâm tương ứng với 03 chương như sau:

(Chương 2): Xây dựng mô hình bất định DG trong TTD

Thời kỳ mới được kể đến ở đây là giai đoạn giảm bảo trợ và tăng cạnh tranh như đã trình bày, khi đó tính bất định của ĐG ảnh hưởng lớn đến doanh thu. Định hướng nghiên cứu mô hình theo các nội dung như sau:

- Mô hình hóa xác suất bất định ĐG theo phân bố mật độ xác suất tốc độ gió.
- Mô hình thị trường điện cạnh tranh bao gồm nguồn ĐG. Trong nghiên cứu chỉ xem xét một dạng thị trường điện ngày hôm sau kết hợp giao ngay.
- Mô hình các phương thức liên kết nguồn ĐG với các nguồn điện truyền thống, ở đây xem xét nguồn nhiệt điện.

(Chương 3): Phát triển phương pháp lai để tối ưu mô hình ĐG

Để giải bài toán tối ưu trong mô hình ĐG có tính chất bất định bị tác động bởi nhiều yếu tố khách quan, các thuật toán tối ưu truyền thống, GA hoặc PSO, được nghiên cứu cải tiến bằng cách tích hợp mạng AI để tăng tốc độ và tránh cực trị địa phương, là các yếu tố điểm lớn của thuật toán MH. Triển khai các nội dung chính như sau:

- Tìm hiểu các thuật toán GA và PSO truyền thống.
- Tìm hiểu kiến trúc LSTM trong các mạng AI.
- Nghiên cứu lai LSTM bên trong chu trình tối ưu của các thuật toán GA/PSO.
- Thực nghiệm giải bài toán tối ưu cho mô hình ĐG.

(Chương 4): Tăng sử dụng ESS kết hợp MBA truyền tải nâng hiệu suất mở rộng ĐG

Một nghiên cứu tăng cường sử dụng ESS để tăng hiệu quả trang trại điện gió hiện hữu như là một giải pháp tăng doanh thu ĐG trong giai đoạn đầu chuyển đổi sang thời kỳ mới. Cụ thể, nghiên cứu tận dụng hạ tầng hiện hữu để mở rộng trang trại điện gió bằng cách sử dụng ESS để cân bằng công suất gió đầu ra và tăng hiệu suất máy biến áp truyền tải. Nội dung cụ thể như sau:

- Xây dựng mô hình tích hợp ESS trong tổ hợp ĐG và MBA truyền tải.
- Cân bằng công suất ĐG và tối ưu vận hành MBA.
- Đánh giá chỉ tiêu tài chính các kịch bản XDM và mở rộng trang trại điện gió.

CHƯƠNG 2: MÔ HÌNH BẤT ĐỊNH ĐIỆN GIÁO TRONG THỊ TRƯỜNG ĐIỆN

2.1. Đặt vấn đề

Trước những thách thức về hiệu quả đầu tư do tính bất định của ĐG trong bối cảnh TTD cạnh tranh, việc nâng cao hiệu suất vận hành và khai thác nguồn tài nguyên trở nên đặc biệt quan trọng. Chương này đề xuất mô hình hóa xác suất bất định của điện gió trong một thị trường điện cạnh tranh, một hướng nghiên cứu mô hình đấu thầu trên thị trường điện ngày hôm sau và thị trường giao ngay theo các mô hình tích hợp các nhà máy ĐG với nguồn nhiệt điện và xét đến sự đóng góp của bộ ESS.

2.1.1. Các mô hình xác suất bất định của điện gió

Bất định tốc độ gió gây sai lệch lớn trong dự báo ngắn và trung hạn như đã trình bày phần trên, điều này dẫn đến công suất phát điện gió khó tránh sai số trên thị trường điện ngày hôm sau. Sai lệch giữa sản lượng điện dự báo để đấu thầu với thực tế phát điện đó gây mất cân đối cung cầu, ảnh hưởng đến đáng kể lợi nhuận của nhà đầu tư [25]. Vì các yếu tố tác động của thời tiết là ngẫu nhiên nên biến động độ sai lệch công suất phát điện gió là đại lượng ngẫu nhiên, vì vậy phương pháp toán học để mô phỏng đại lượng này là xác suất. Nhiều nghiên cứu trước đây đã sử dụng phương pháp xác suất này để mô hình hóa tính bất định của điện gió, phân tích biến động tốc độ gió so với dự báo.

Phụ thuộc vào hoàn cảnh ứng dụng khác nhau, nhiều phân bố xác suất đã được dùng mô hình bất định tốc độ gió để đánh giá sai số của các phương pháp dự báo [68]. Các dạng phân bố xác suất phổ biến phải kể đến là các phân bố Weibull, Rayleigh, Gama, Burr, hay phân bố chuẩn [69]. Đối với dự báo công suất điện gió ngắn và trung hạn, các nghiên cứu gần đây áp dụng phân bố Weibull hai tham số rộng rãi nhờ tính đơn giản, khả năng phản ánh thực tế và sai số dự báo ở mức chấp nhận được [70]. Vì vậy trong nghiên cứu này mô hình xác suất bất định bằng phân bố Weibull.

2.1.2. Mô hình chào thầu bán sản lượng điện gió trên thị trường điện

2.1.2.1. Nguyên lý chào thầu của chủ nguồn điện gió

Mô hình thị trường ngày hôm sau được khảo sát trong nghiên cứu này dựa trên cạnh tranh của tất cả các chủ sở hữu nguồn điện tham gia thị trường. Ngoài các quy định về xây dựng kế hoạch phát điện tổng thể để phục vụ an ninh và ổn định hệ thống điện, theo luật thị trường, mỗi nhà máy phát điện (bao gồm cả điện gió) sẽ chào thầu cho ngày hôm sau một cặp thông số: lịch trình công suất phát điện theo giờ và giá bán sản lượng điện tương ứng. Cơ quan quản lý thị trường sẽ xác định trúng thầu dựa trên quy luật cung cầu. Tại thời điểm giao hàng, nếu chủ nguồn điện gió dư công suất phát so với trúng thầu thì tiếp tục chào bán cho thị trường điện giao ngay. Ngược lại nếu thiếu công suất phát điện, chủ điện gió phải có nghĩa vụ mua sản lượng điện bị thiếu trên thị trường giao ngay để bù cho khách hàng, hoặc bị phạt hợp đồng nếu không mua đủ sản lượng cung cấp cho khách hàng.

2.1.2.2. Tương hỗ cung cấp điện giữa các nguồn điện

Theo tính năng vận hành, nguồn điện có hai loại: nguồn điện có khả năng chủ động và nguồn thụ động (hay bị động). Trong các loại nguồn chủ động, như nhiệt điện và thủy điện có hồ chứa, có thể linh hoạt điều chỉnh sản lượng điện để đáp ứng nhu cầu tiêu thụ, đảm bảo sự ổn định của hệ thống. Ngược lại, với nguồn bị động, trong đó có ĐG và ĐMT, phụ thuộc hoàn toàn vào điều kiện thời tiết, dẫn đến sản lượng biến động và khó kiểm soát. Sự bất định này đặt ra thách thức lớn đối với việc cân bằng cung - cầu và duy trì an ninh năng lượng.

Mặc dù không thể loại bỏ hoàn toàn tác động của sự biến động trong ĐG, các phương pháp điều phối nguồn điện hợp lý có thể giúp giảm thiểu ảnh hưởng tiêu cực. Chương này tập trung vào việc nghiên cứu các giải pháp tối ưu doanh thu bằng cách phối hợp hai chủng loại nguồn điện chủ và bị động để tăng tính ổn định của hệ thống. Đặc biệt, sự phối hợp giữa các trang trại ĐG, nhà máy nhiệt điện và hệ thống ESS sẽ được phân tích chi tiết nhằm đánh giá tiềm năng và hiệu quả của mô hình liên kết này trong việc cải thiện độ tin cậy của HTĐ.

2.1.3. Các mô hình liên kết trang trại điện gió

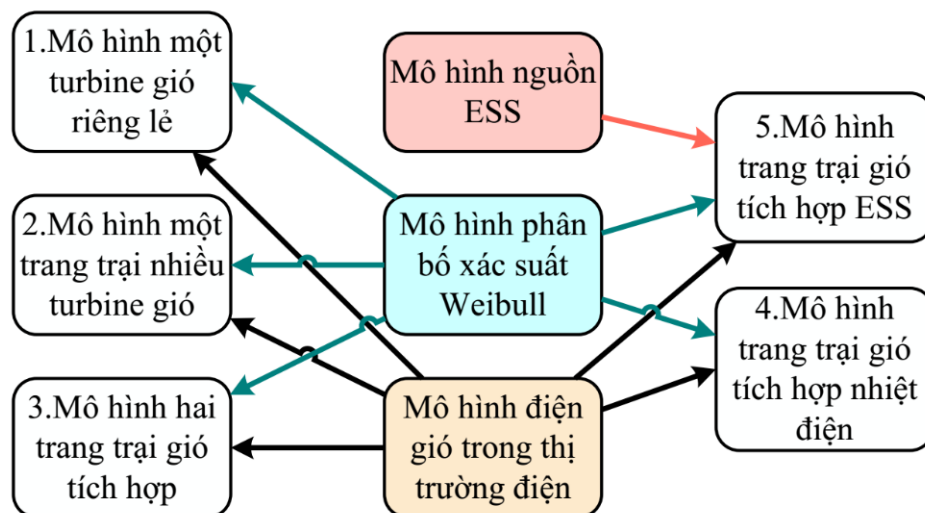
Do đó, sự biến động của ĐG là một yếu tố tất yếu khi tham gia TTĐ. Để nâng cao hiệu quả đấu thầu và đảm bảo lợi ích kinh tế - xã hội, cần có những nghiên cứu chuyên sâu, đặc biệt đối với các nhà máy ĐG. Trong bối cảnh TTĐ Việt Nam đang chuyển đổi từ giai đoạn bán buôn sang bán lẻ, việc tìm ra các mô hình giao dịch thương mại phù hợp trở nên quan trọng hơn bao giờ hết. Đặc biệt, việc kết hợp và vận hành nhiều loại hình năng lượng khác nhau không chỉ giúp giảm rủi ro do sự bất định mà còn tối ưu lợi nhuận cho nhà đầu tư và mang lại giá trị xã hội cao hơn. Đây là một lĩnh vực quan trọng mà các tổ chức tài chính trong ngành năng lượng cần tập trung nghiên cứu và phát triển.

Hình 2.1 minh họa năm mô hình đầu tư điển hình được phân tích và so sánh trong chương này, bao gồm:

1. Mô hình 1: Một tua-bin ĐG – mô hình cơ bản nhất, chủ yếu mang tính lý thuyết và ít được áp dụng thực tiễn, nhưng vẫn được sử dụng để tham chiếu (MH1TB).

2. Mô hình 2: Một trang trại ĐG – mô hình phổ biến, phù hợp cho các nhà đầu tư mới tham gia thị trường năng lượng (MH1ĐG).

3. Mô hình 3: Hệ thống kết hợp hai hoặc nhiều trang trại ĐG – hướng đi thích hợp cho các nhà đầu tư dài hạn nhằm tối đa hóa hiệu suất và lợi nhuận (MH2ĐG).



Hình 2.1: Năm mô hình phương thức vận hành điện gió

4. Mô hình 4: Trang trại ĐG kết hợp với nhà máy nhiệt điện – một phương thức cần được nghiên cứu để phát triển (MHĐG-N).

5. Mô hình 5: Trang trại ĐG kết hợp trữ năng và nguồn nhiệt điện – phương thức hoàn thiện, mang tính tương lai và có tiềm năng cao (MHĐG-T-N).

Phần này tập trung vào năm mô hình vận hành, bao gồm cả hoạt động độc lập và tích hợp giữa các nguồn điện khác nhau. Nghiên cứu phân tích chi tiết ảnh hưởng của tính bất định trong ĐG và phản ứng của từng mô hình trong TTĐ, đặc biệt đối với các tình huống dư thừa công suất dẫn đến xả bỏ ĐG hoặc yêu cầu bồi thường khi không đáp ứng tiêu chuẩn vận hành. Dựa trên các kết quả đánh giá, các chỉ số tài chính sẽ được áp dụng để xác định phương thức vận hành tối ưu, đồng thời đề xuất chiến lược đấu thầu hợp lý nhằm tối đa hóa hiệu quả kinh tế và giảm thiểu rủi ro đầu tư.

2.1.4. Phạm vi và giới hạn nghiên cứu của chương

Chương tập trung vào việc đề xuất các mô hình liên kết tài chính giữa các trang trại gió và các nguồn năng lượng khác nhằm tăng lợi nhuận trong thị trường điện cạnh tranh. Nghiên cứu phần này được giới hạn trong phạm vi sau:

- Giới hạn thử nghiệm: chỉ mô phỏng trên hệ thống điện chuẩn IEEE có các nguồn nhiệt điện chi phối và phân bố công suất tối ưu chi phí vận hành các nguồn điện để xác định công suất vận hành mỗi trạng thái. Thị trường điện ngày hôm sau chào giá theo giờ.

- Giả định mô hình xác suất gió: Sử dụng thông số Weibull hai tham số cụ thể được trích dẫn từ các công bố khoa học. Ngoài ra, trong nghiên cứu giả định kết quả dự đoán tốc độ gió đã công bố trong các nghiên cứu khoa học. Phân bố Weibull mô hình hóa xác suất sai lệch dự đoán dài hạn, không mô phỏng hành vi thị trường theo giờ.

2.2. Lý thuyết cơ sở mô hình hóa

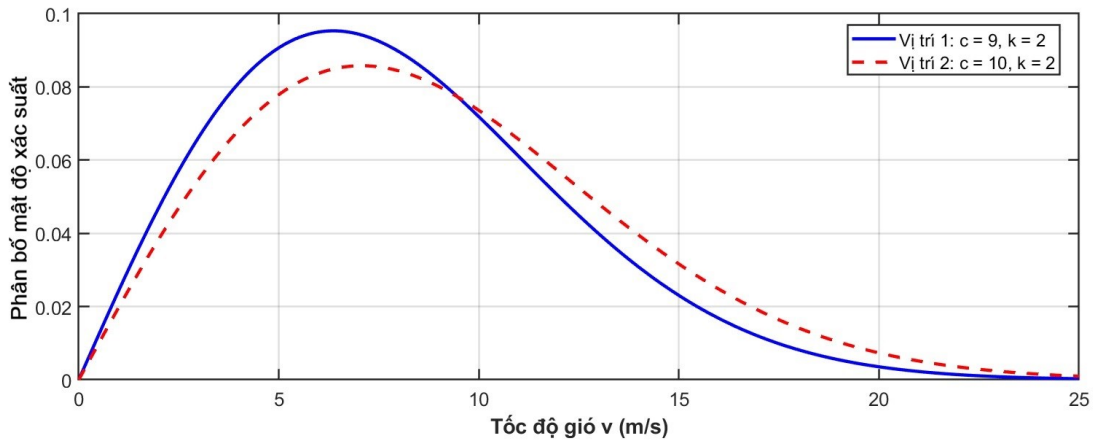
2.2.1. Mô hình xác suất công suất phát điện gió

2.2.1.1. Xác suất của một tua-bin gió

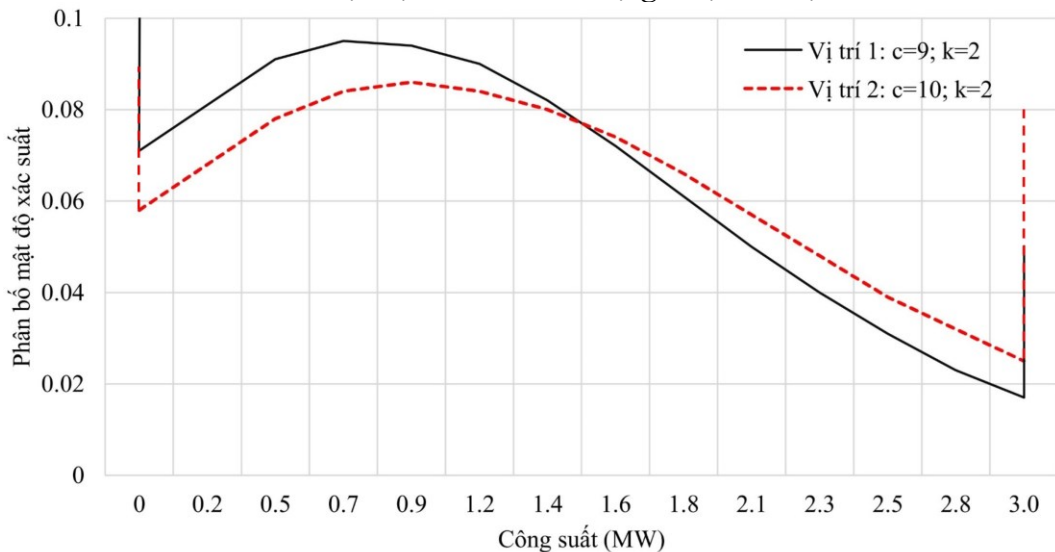
Phân bố mật độ xác suất tốc độ gió dựa trên Weibull tại một vị trí lắp đặt tua-bin gió mô tả sự bất định sản lượng điện sản xuất, có dạng được biểu diễn bởi biểu thức theo [71] như sau:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2-1)$$

Trong đó v là tốc độ gió; c và k là các tham số Weibull. k là hệ số xác định hình dạng và c là tham số tỷ lệ. Sự phân bố có các dạng khác nhau với các giá trị khác nhau của k và c . Hình 2.2 thể hiện ví dụ phân bố mật độ xác suất của tốc độ gió tại hai vị trí khác nhau tham khảo tại tài liệu [72] với các tham số $c=9$; $k=2$ và $c=10$; $k=2$.



Hình 2.2: Phân bố mật độ xác suất tốc độ gió tại hai vị trí khác nhau



Hình 2.3: Phân bố mật độ xác suất công suất điện gió

Sản lượng điện của tua-bin là kết quả của động học gió theo phân bố xác suất Weibull trên các cánh của nó và được mô tả theo biểu thức như sau [40],

$$P_w(v) = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \text{ and } v > v_{out} \\ P_{wr} \left(\frac{v - v_{in}}{v_r - v_{in}} \right), & v_{in} \leq v \leq v_r \\ P_{wr}, & v_r < v \leq v_{out} \end{cases} \quad (2-2)$$

Trong đó, v_{in} , v_r và v_{out} biểu thị tốc độ gió giới hạn cận dưới, định mức và tốc độ gió giới hạn cận trên của tua-bin. P_{wr} là công suất định mức của tua-bin gió.

Hình 2.3 thể hiện phân bố mật độ xác suất công suất của hai tua-bin gió giống hệt nhau ở hai vị trí: nguồn 1 với $c = 9$; $k = 2$ và nguồn 2 với $c = 10$; $k = 2$. Thông số tua-bin gió là $P_{wr} = 3\text{MW}$; $v_{in} = 3\text{m/s}$; $v_r = 16\text{m/s}$ và $v_{out} = 25\text{m/s}$. Theo đó, có hai vùng trong hình mà xác suất tăng đột ngột khi công suất điện của tua-bin bằng 0 và bằng công suất định mức. Đó là do khi tốc độ gió nhỏ hơn v_{in} hoặc lớn hơn v_{out} , tua-bin gió sẽ không hoạt động nên công suất bằng 0. Ngoài ra, khi tốc độ gió nằm trong khoảng từ v_r đến v_{out} thì công suất tua-bin gió đạt đỉnh cao nhất tương ứng với công suất định mức.

2.2.1.2. Xác suất tổ hợp

Khi có nhiều tua-bin gió hoặc nhiều trang trại gió cộng tác với nhau thành một liên kết thống nhất, phân bố mật độ xác suất cho một ĐG tổ hợp được xác định theo các nguyên tắc quy luật xác suất như sau:

$$f_{\Sigma w}(P_{\Sigma w}) = \prod_{i=1}^{N_w} f_{w,i}(P_{w,i}) \quad (2-3)$$

$$P_{\Sigma w} = \sum_{i=1}^{N_w} P_{w,i} \quad (2-4)$$

Với $f_{\Sigma w}$ và $P_{\Sigma w}$ là phân bố mật độ xác suất theo vận tốc gió và tổng công suất tổ hợp từ các tua-bin hoặc từ các trang trại gió tùy theo từng tình huống cụ thể.

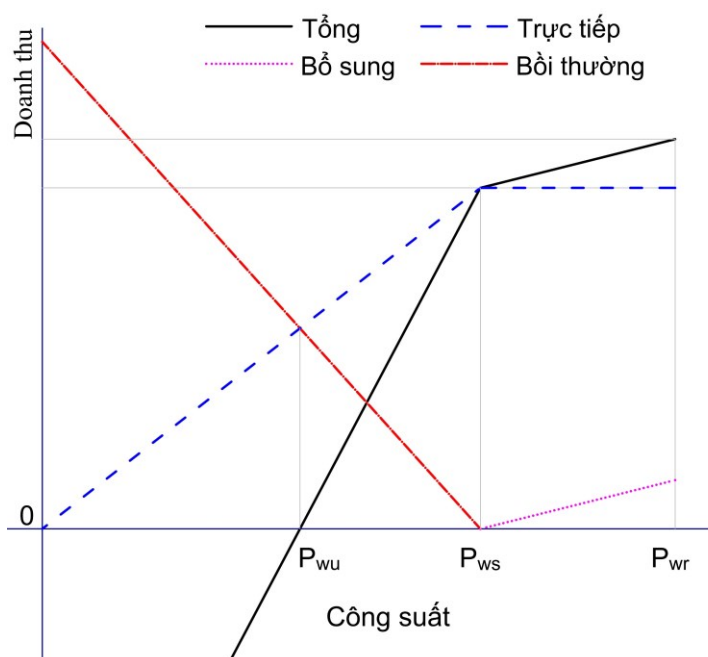
2.2.2. Mô hình bất định của doanh thu điện gió trong thị trường điện

Đa số các nghiên cứu gần đây hướng tới đấu thầu điện tái tạo trên thị trường điện ngày hôm sau [73, 74]. Với mô hình đấu thầu giá với chiến lược chào công suất

điện có thể mô tả trong các trường hợp theo hợp đồng như sau: Công suất phát điện P_{ws} , Công suất dư P_{wr} , và công suất thiếu hụt P_{wu} . Các đường cong trên Hình 2.4 thể hiện doanh thu tổng, doanh thu trực tiếp, thu nhập dư và chi phí phạt của một ĐG. Hình này cho thấy doanh thu trực tiếp và bất định tuyến tính, trong khi đó dòng tiền hầu như tăng không đáng kể trong trường hợp công suất ĐG vượt dự đoán nhưng lại giảm mạnh khi nhỏ hơn. Đặc biệt, chủ trang trại ĐG sẽ không có thu nhập mà phải trả phí khi P_w thấp hơn P_{wu} . Nguyên nhân là do giá bán sản lượng điện gió khi dư thường rất thấp vì bị động ít người mua, trong khi giá mua điện giao ngay khi thiếu lại rất cao.

2.2.3. Mô hình hóa nguồn trữ năng

Vốn đầu tư ESS hiện vẫn cao, nên thường chỉ được triển khai khi không có giải pháp thay thế. ESS đồng bộ với NLTT giúp giải quyết các vấn đề vận hành, đặc biệt là bù đắp thiếu hụt hoặc ESS dư thừa [75, 76]. Trong ĐG, ESS lưu trữ điện giá thấp hoặc không bán được, đồng thời bù đắp thiếu hụt, tránh phạt hợp đồng [72]. Ngoài ra, ESS còn bán điện ngược lại với giá cao, tạo lợi nhuận từ chênh lệch giá mua và giá bán. Giá mua thường rất thấp, trong khi giá bán gần bằng giá phạt ĐG, trong nghiên cứu này mô phỏng bằng khoản chi phí mà chủ điện gió phải trả khi mua điện của ESS, được thể hiện qua biểu thức (2-5).



Hình 2.4: Các thành phần doanh thu và chi phí của điện gió trên thị trường điện

$$C_e(P_e) = \lambda_e \cdot P_e + C_{e0,i} \quad (2-5)$$

Trong đó P_e là công suất ESS phải bù cho thiếu hụt của ĐG; λ_e là giá điện mà ĐG phải trả cho ESS, giá này thường cao nhưng thấp hơn giá phạt của ĐG; $C_{e0,i}$ là tất cả các chi phí cố định liên quan đến ESS.

2.3. Cơ sở toán học

2.3.1. Hàm mục tiêu

Mục tiêu đầu tư ĐG là mong muốn đạt được lợi ích cao nhất. Rõ ràng hơn, một trang trại ĐG bất định trên thị trường cần đấu giá giá điện bán và sản lượng điện để tối đa hóa doanh thu. Thực hiện yêu cầu này, nhà đầu tư cần bán năng lượng trực tiếp nhiều nhất với mức phạt tối thiểu. Vì vậy, hàm mục tiêu được xây dựng dựa trên cực đại doanh thu trừ chi phí phạt của trang trại gió theo biểu thức (2-6).

$$\text{maximize } \{F = R_w(P_w) - C_{Pw}(P_p)\} \quad (2-6)$$

Ở đây R_w là thu nhập của ĐG; C_{Pw} là chi phí ĐG phải trả cho các nguồn điện liên kết. Trong trường hợp không liên kết với nguồn điện nào khác thì giá trị này bằng không.

Trong bối cảnh TTĐ, doanh thu từ nguồn ĐG gồm hai thành phần chính: doanh thu trực tiếp (không xác suất) và doanh thu xác suất (gọi là bất định). Biểu thức (2-7) thể hiện tổng các doanh thu như trình bày. Trong đó, doanh thu trực tiếp được xác định dựa trên sản lượng điện đã được dự báo và đấu thầu trước, mang lại nguồn thu ổn định cho chủ sở hữu. Tuy nhiên, do tính bất định của ĐG, sự sai lệch giữa sản lượng điện thực tế và mức chào thầu thường dẫn đến các biến động doanh thu, gọi là doanh thu bất định.

$$R_w(P_w) = \sum R_{w,i} = \sum [R_{ws,i}(P_{ws,i}) + R_{wu,i}(\Delta P_{w,i})] \quad (2-7)$$

Trong đó, P_w là tổng công suất ĐG bán trên TTĐ; $R_{w,i}$, $R_{ws,i}$, $R_{wu,i}$ là doanh thu tổng, trực tiếp, và bất định của trang trại gió thứ i ; $P_{ws,i}$ và $\Delta P_{w,i} = P_{wav,i} - P_{ws,i}$ là công suất đấu thầu và độ lệch công suất so với thực tế $P_{wav,i}$ của ĐG.

Khi sản lượng điện thực tế cao hơn mức dự báo, phần điện dư có thể được bán lại trên thị trường, tạo ra doanh thu bổ sung. Tuy nhiên, do việc bán phát sinh đột xuất

và nhu cầu thị trường không ổn định, giá bán thường thấp hơn nhiều so với mức giá đã đấu thầu. Ngược lại, nếu sản lượng thực tế thấp hơn dự kiến, nhà đầu tư buộc phải mua điện với chi phí cao để bù đắp sự thiếu hụt. Trong trường hợp không thể bổ sung đủ lượng điện cần thiết, họ có nguy cơ chịu các khoản phạt do vi phạm cam kết cung cấp điện theo hợp đồng.

Những chi phí phát sinh từ việc cân bằng công suất, bao gồm cả chi phí mua điện bổ sung và tiền phạt hợp đồng, gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến hiệu quả tài chính của dự án. Do đó, việc xây dựng chiến lược vận hành và đấu thầu hợp lý là điều cần thiết nhằm giảm thiểu rủi ro do sự biến động trong sản xuất ĐG.

2.3.2. Chi tiết doanh thu bán điện trực tiếp

Doanh thu trực tiếp của trang trại ĐG thứ i được xác định tương ứng với giá chào và ĐG cung cấp trên thị trường, xác định theo,

$$R_{ws,i}(P_{ws,i}) = \lambda_{w,i}P_{ws,i} \quad (2-8)$$

Trong biểu thức (2-8), doanh thu đồng biến với sản lượng ĐG được bán theo kế hoạch đấu thầu, P_{ws} , và đơn giá bán điện trực tiếp, $\lambda_{w,i}$. Trong cơ chế định giá thị trường, giá này thường xác lập theo giá bán điện bình quân của loại nguồn chi phối, điển hình như TĐ Châu Âu nhiệt điện khí chủ yếu nên thường chi phối giá bán điện thị trường. Đối với nguồn nhiệt, chi phí sản xuất được tính bằng biểu thức sau:

$$C_T(P_{TG}) = \sum_{i=1}^{N_{TG}} (a_i + b_i P_{TG,i} + c_i P_{TG,i}^2) \quad (2-9)$$

$$\lambda_{TG,i} = b_i + c_i P_{TG,i} \quad (2-10)$$

Ở đây a_i , b_i , và c_i là các hệ số kỹ thuật của nhiệt điện; $P_{TG,i}$ là công suất phát điện của nhiệt điện; N_{TG} là số nguồn nhiệt điện; và $\lambda_{TG,i}$ là đơn giá bán điện của nguồn nhiệt điện tương ứng với chi phí của nó.

2.3.3. Chi tiết nguồn thu bất định

2.3.3.1. Xét điện gió độc lập

Nguồn thu này biểu diễn bằng các biểu thức dưới đây bằng ký hiệu R_{wu} , gồm hai phần thu (R_{RW}) và phạt (C_{PW}). Thu nhập có được nhờ bán điện khi dư so với chào thầu, còn phạt là bồi thường thiệt hại khi điện gió thiếu hụt so với chào thầu,

$$R_{wu,i}(\Delta P_{w,i}) = \begin{cases} R_{RW,i}(\Delta P_{w,i}), & \text{if } P_{wav,i} \geq P_{ws,i} \\ C_{PW,i}(\Delta P_{w,i}), & \text{if } P_{wav,i} \leq P_{ws,i} \end{cases} \quad (2-11)$$

$$\begin{aligned} R_{RW,i}(\Delta P_{w,i}) &= k_{R,i} \lambda_{w,i} (P_{wav,i} - P_{ws,i}) \\ &= k_{R,i} \lambda_{w,i} \int_{P_{ws,i}}^{P_{wr,i}} (p_{w,i} - P_{ws,i}) f_w(p_{w,i}) dp_{w,i} \end{aligned} \quad (2-12)$$

$$\begin{aligned} C_{PW,i}(\Delta P_{w,i}) &= k_{P,i} \lambda_{w,i} (P_{wav,i} - P_{ws,i}) \\ &= k_{P,i} \lambda_{w,i} \int_0^{P_{ws,i}} (p_{w,i} - P_{ws,i}) f_w(p_{w,i}) dp_{w,i} \end{aligned} \quad (2-13)$$

P_{wav} và P_{ws} lần lượt là công suất phát điện thực tế và công suất chào thầu của cùng một nhà máy ĐG. Hàm mật độ xác suất của công suất ĐG tại nhà máy được ký hiệu là $f_w(p_{w,i})$. Giá bán sản lượng ĐG trực tiếp được biểu thị bởi $\lambda_{w,i}$, trong khi đó, $k_{R,i}$ và $k_{P,i}$ lần lượt là hệ số giá điện thừa và hệ số giá điện phạt. Các hệ số này bị chi phối bởi những yếu tố ngẫu nhiên, phản ánh sự dao động tức thời của cung cầu trên TTĐ hoặc kết quả thương lượng giữa các bên liên quan.

Thông thường, hệ số giá điện dư thừa có xu hướng thấp, trong khi hệ số giá điện phạt lại ở mức rất cao, thậm chí có thể gấp nhiều lần so với giá bán trung bình. Điều này buộc các đơn vị tham gia thị trường phải tìm kiếm nguồn cung bổ sung để bù đắp sự thiếu hụt công suất. Tuy nhiên, giá điện mua bổ sung thường bị ảnh hưởng đáng kể bởi tình hình cung cầu, dẫn đến chi phí cao hơn nhiều so với mức giá bình quân. Trong nghiên cứu này, một phân tích sẽ được thực hiện với hệ số phạt dao động từ 1,0 đến trên 2,4 nhằm đánh giá tác động của các yếu tố này đến chiến lược đấu thầu và hiệu quả tài chính của các nhà máy ĐG.

2.3.3.2. Xét bù đắp của nguồn nhiệt điện

Việc ĐG chi trả chi phí cho nhiệt điện có thể được tính trong biểu thức sau đây,

$$C_{Tp}(P_{Tp}) = \lambda_T P_{Tp}; \quad P_p \in (0 \div P_{TR}) \quad (2-14)$$

P_{Tp} là sản lượng nhiệt điện bù đắp cho ĐG; λ_T là đơn giá liên kết nhiệt điện và ĐG. Đơn giá này đảm bảo bù đắp cho nhiệt điện do nâng công suất nhà máy để bù cho ĐG. Tuy nhiên, đơn giá này vẫn thấp hơn đơn giá phạt hoặc đơn giá giao ngay của TTD. Như vậy, sản lượng điện dự trữ của nhiệt điện tối đa có thể bù cho ĐG là,

$$P_{TR} = P_{Tr} - P_{Ts} \quad (2-15)$$

Với P_{Tr} và P_{Ts} là công suất cực đại và giá trị đấu thầu của nguồn nhiệt. Tương ứng quy trình phối hợp trong liên danh như vừa nêu, doanh thu bất định trong hàm mục tiêu thay đổi tương ứng 3 trạng thái như sau,

$$R_{wu}(P_p) = \begin{cases} R_w(P_p), & \text{if } P_p \geq 0 \\ C_{Tp}(P_{Tp}), & \text{if } P_{TR} \geq -P_p > 0 \\ C_{Pw}(P_p), & \text{if } -P_p > P_{TR} \end{cases} \quad (2-16)$$

$$P_p = P_{Tav} - P_{Ts}$$

$$\text{Khi } -P_p > P_{TR}, C_{Pw}(P_p) = C_{Pw}(\Delta P_p) + C_p(P_{TR})$$

$$\Delta P_p = P_p - P_{TR}$$

Với ΔP_p là độ lệch sản lượng ĐG thực tế so với chào thầu trên thị trường; R_w , C_{Tp} và C_{Pw} lần lượt là doanh thu nhờ bán điện vượt, chi phí bù đắp nhiệt điện và cuối cùng là phạt; P_{Tav} và P_{Ts} là công suất thực và giá trị chào thầu bình thường của các nguồn nhiệt trên thị trường.

2.3.3.3. Xét bổ sung nguồn trữ năng

Khi nguồn ESS tham gia phát điện trong liên kết, chi phí mà ĐG phải trả cho cả nhiệt điện và ESS khi đó được tính,

$$C_p(P_p) = C_{Tp}(P_{Tp}) + C_e(P_e) \quad (2-17)$$

$$0 \leq P_{Tp} \leq P_{TR} \text{ và } 0 \leq P_e \leq P_E$$

Và khi đó chi phí trong doanh thu bất định bổ sung thêm 1 trạng thái tương ứng với bù đắp của trụ năng khi thiếu hụt ĐG như sau,

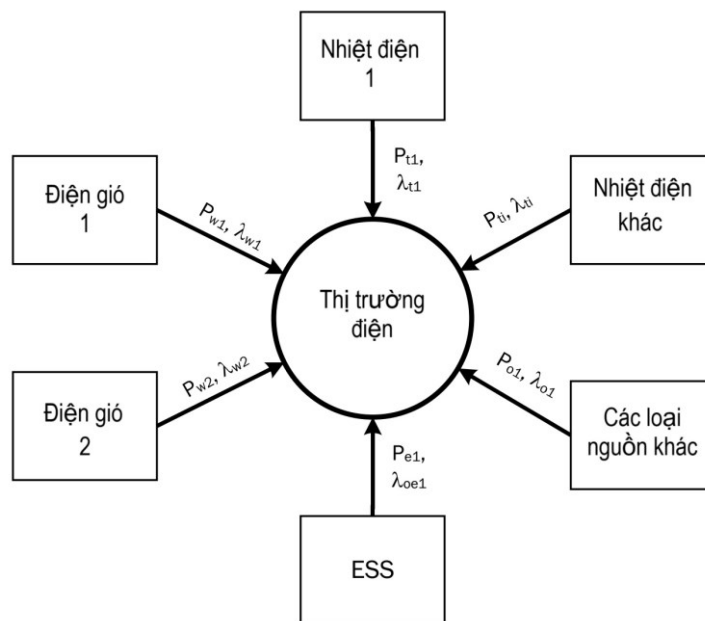
$$C_{wu}(P_p) = \begin{cases} R_w(P_p), & \text{if } P_p \geq 0 \\ C_{Tp}(P_{Tp}), & \text{if } P_{TR} \geq -P_p > 0 \\ C_{Tp}(P_{TR}) + C_e(P_e), & \text{if } P_E + P_{TR} \geq -P_p > P_{TR} \\ C_{Pw}(P_p), & \text{if } -P_p > P_E + P_{TR} \end{cases} \quad (2-18)$$

C_{Tp} và C_e là chi phí trả cho nhiệt điện và ESS tương ứng. Thành phần chi tiêu bổ sung phải được thanh toán cho chi phí ESS như được chỉ ra trong phương trình (2-18). Vì vậy, hai khoản thanh toán sẽ phát sinh khi sản lượng ĐG giảm xuống dưới mức đấu thầu. Đầu tiên, các máy phát nhiệt được ưu tiên vận hành. Kế đó, ESS được sử dụng để bổ sung cho phần công suất dư thừa của phần bù còn lại. Cuối cùng là phạt hợp đồng.

2.3.4. Mô hình hóa điện gió trên thị trường điện

2.3.4.1. Mô hình 1

Một TTĐ cơ bản với nhiều nguồn năng lượng khác nhau, như Hình 2.5, bao gồm cả năng lượng gió, nhiệt điện và ESS, Trong trường hợp này, mỗi nguồn ĐG là một tua-bin được đầu tư ở vị trí phù hợp. Tình huống này dường như không khả



Hình 2.5: Mô hình một thị trường điện ngày

thì vì khó mang lại hiệu quả tài chính nếu chỉ đầu tư một tua-bin nhưng là cơ sở phát triển các mô hình sau.

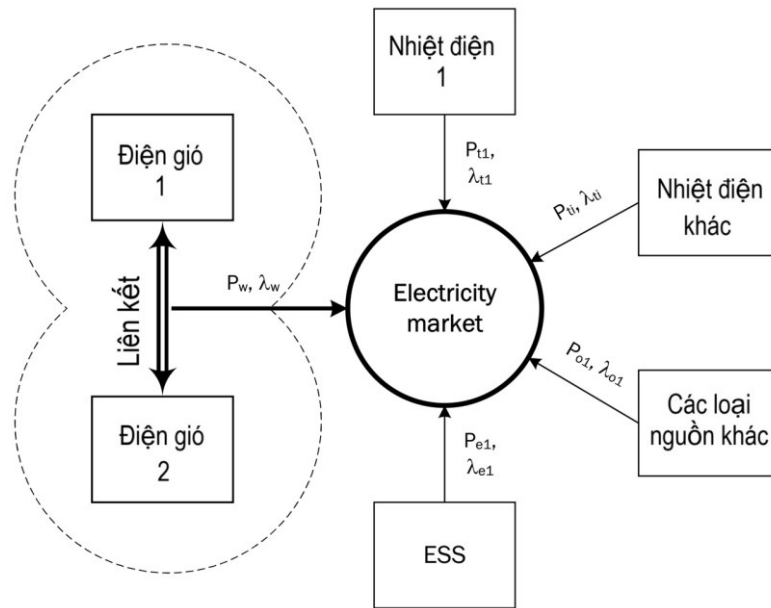
Hình minh họa cho thấy các nguồn điện hoạt động độc lập trong thị trường, mỗi nguồn điện đưa ra giá bán và sản lượng theo kế hoạch riêng. Đối với ĐG, giá bán và sản lượng được xác định dựa trên dự đoán của chủ sở hữu nhằm tối ưu lợi nhuận. Trong mô hình này, xác suất công suất điện chào thầu được tính toán dựa trên phân bố Weibull. Mô hình cũng bao gồm doanh thu trực tiếp và thu nhập bất định, được xác định theo các biểu thức đã trình bày ở phần trước.

2.3.4.2. Mô hình 2

Mô hình này, xét trên khía cạnh TTĐ, tương tự như mô hình một tua bin đã đề cập, nhưng thay thế một tua-bin gió đơn lẻ bằng một trang trại ĐG gồm nhiều tua-bin. Các trang trại ĐG vận hành độc lập trong TTĐ, với giá chào thầu và sản lượng điện được xác định riêng rẽ, không chịu sự chi phối từ các nguồn năng lượng khác. Trong mô hình này, xác suất của trang trại ĐG được xem là tổ hợp của các tua-bin gió, như đã trình bày trong phần mô hình toán học. Cụ thể, xác suất tổng thể được tính bằng tích các thành phần xác suất của từng tua-bin, trong khi công suất tổng được xác định bằng tổng công suất của các thành phần, biểu thức (2-3) và (2-4).

2.3.4.3. Mô hình 3

Mô hình này được minh họa trong Hình 2.6, mô tả sự liên kết giữa nhiều trang trại ĐG nhằm giảm thiểu rủi ro do tính bất định trong từng trang trại riêng lẻ. Thông qua việc tích hợp, các trang trại gió có thể hỗ trợ lẫn nhau trong trường hợp một trang trại gặp biến động sản lượng. Điều này giúp giảm rủi ro vận hành và chi phí liên quan đến việc bù đắp các trường hợp thiếu hụt điện cho cả hai trang trại, nâng cao hiệu quả kinh tế tổng thể. Xác suất Weibull của một tổ hợp ĐG tổng thể ảo trong mô hình này được xây dựng bằng cách kết hợp các hàm phân bố mật độ xác suất của từng trang trại ĐG, như đã được mô tả trong phần mô hình toán học trước đó, biểu thức (2-3) và



Hình 2.6: Mô hình một thị trường điện có liên kết 02 ĐG

(2-4). Việc tổ hợp này phản ánh sự tổng hợp công suất và xác suất vận hành của toàn bộ hệ thống, cho phép đánh giá chính xác hơn hiệu quả hoạt động của tổ hợp.

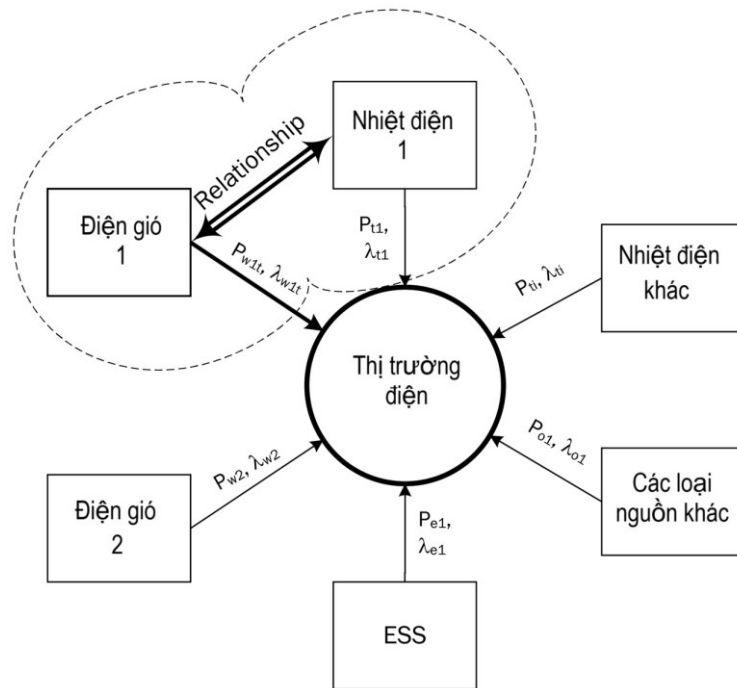
2.3.4.4. Mô hình 4

Mô hình liên kết giữa ĐG và nhiệt điện được thể hiện ở Hình 2.7. Với sự liên kết này, phần chi phí đền bù thiếu công suất của ĐG sẽ được ưu tiên bù đắp bởi nhà máy nhiệt điện liên kết cho đến khi hết khả năng của nó. Sau đó, nếu ĐG vẫn thiếu sản lượng cung cấp cho thị trường theo kế hoạch, phải tiến hành các biện pháp đền bù cần thiết hoặc chịu phạt hợp đồng.

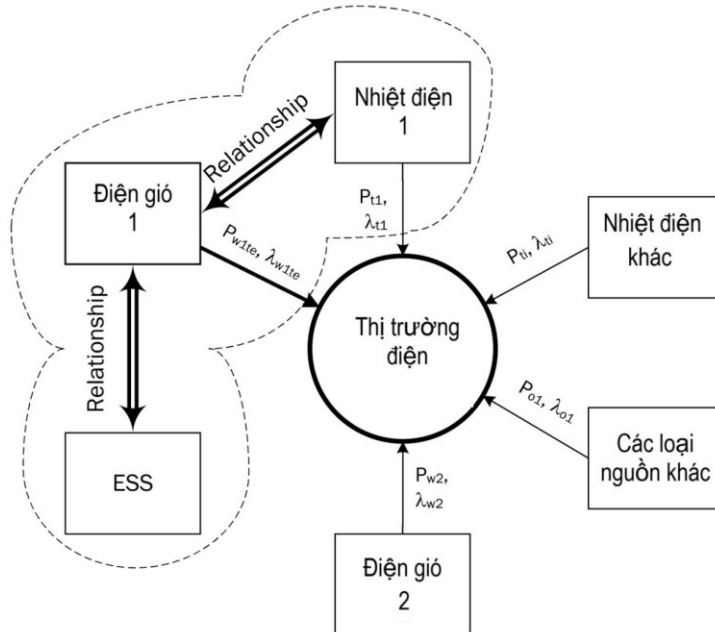
Vì xác suất đền bù của ĐG là yếu tố ngẫu nhiên, chủ đầu tư nhiệt điện không thể mạo hiểm dự phòng công suất lớn cho ĐG. Do đó, việc bù đắp thiếu hụt của ĐG bởi nhiệt điện cũng bị giới hạn, và điều này có thể gây thiệt hại cho ĐG.

2.3.4.5. Mô hình 5

Hình 2.8 thể hiện mô hình liên kết các nguồn với ESS để khai thác tối đa hiệu quả ĐG, mặc dù giới hạn của nhiệt điện vẫn còn bị ràng buộc và giá đầu tư ESS vẫn còn khá cao như đã trình bày. ESS có nhiệm vụ bù đắp cho thiếu hụt của ĐG sau khi nhiệt điện đã hỗ trợ tối đa.



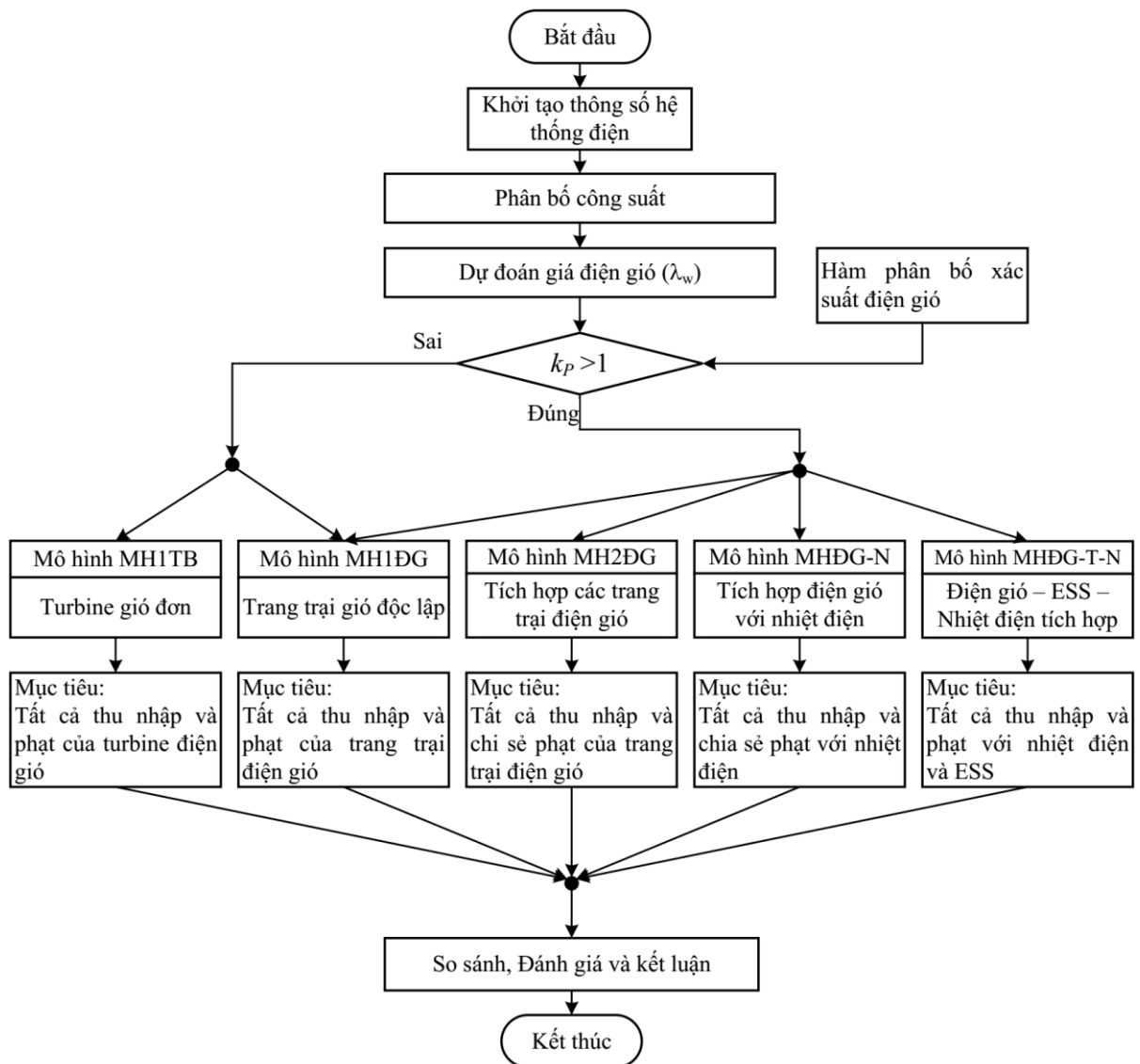
Hình 2.7: Mô hình một thị trường điện có liên kết nhiệt điện



Hình 2.8: Mô hình một thị trường điện có liên kết gió – nhiệt – trữ năng

2.3.5. Lưu đồ chu trình khảo sát và đánh giá

Lưu đồ được trình bày trên Hình 2.9

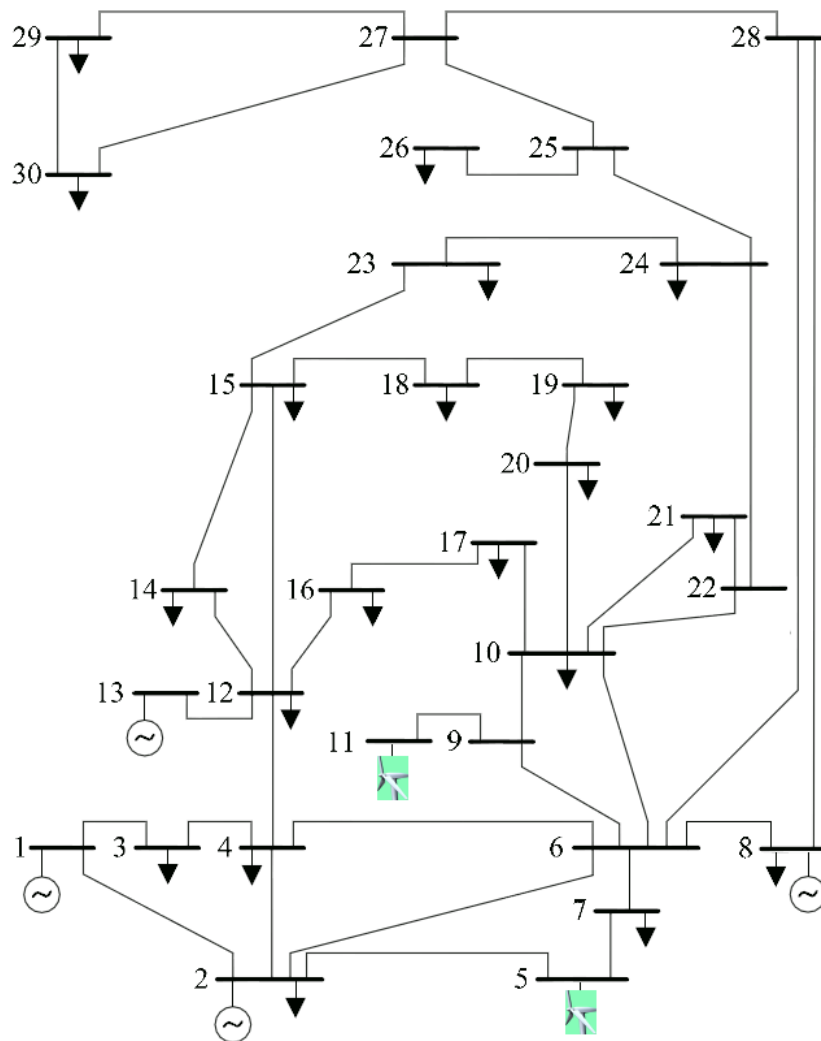


Hình 2.9: Lưu đồ cực đại lợi nhuận

2.3.6. Thực nghiệm

2.3.6.1. Dữ liệu đầu vào

HTĐ IEEE 30-bus như Hình 2.10 được sử dụng để thực nghiệm trong bài toán. Hệ thống này bao gồm 30 bus, 41 nhánh và 6 nguồn điện. Trong đó, có bốn nhà máy nhiệt điện đặt tại các bus 1, 2, 8 và 13, với các tham số trích dẫn theo tài liệu [77, 78] và được trình bày trong Bảng 2.1.



Hình 2.10: Hệ thống điện chuẩn IEEE 30-bus

Bảng 2.1: Nguồn nhiệt điện

Tham số chi phí	Tên nguồn	TG1	TG2	TG3	TG4
	Bus số	1	2	8	13
a		0	0	0	0
b		2	1,75	3,25	3
c		0,00375	0,0175	0,00834	0,025

Bảng 2.2: Nguồn điện gió

Bus số	Tham số Weibull	Tốc độ gió trung bình (m/s)	Số tua-bin	Công suất đỉnh (MW)
5	k=2; c=9	7,976	25	75
11	k=2; c=10	8.862	20	60

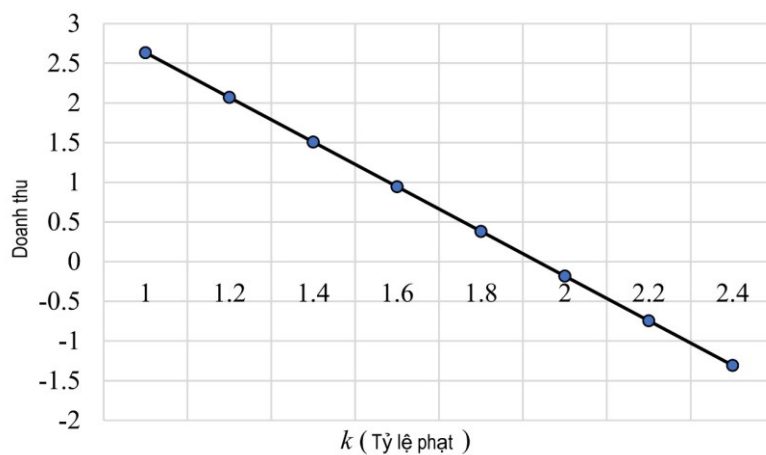
Ngoài ra, hai nguồn ĐG được giả định đặt tại bus 5 và 11, với số lượng tua-bin lần lượt là 25 và 20, mỗi tua-bin có công suất định mức 3 MW. Hai tham số Weibull là hình dạng, k , và tham số tỷ lệ, c , theo Bảng 2.2.

Về đơn giá bán điện trực tiếp của ĐG dựa trên giả định chi phối trên thị trường bởi nguồn nhiệt điện. Vì vậy, giá bán điện từ nguồn ĐG được xác định theo giá bình quân của các nguồn chi phối, nguồn nhiệt, thể hiện ở phương trình (2-9) và (2-10). Đối với đơn giá đề bù xác định theo hệ số bồi thường k_p trong khoảng 1.0-2.4.

2.3.6.2. Thực nghiệm trên mô hình 1

Một tua-bin gió 3MW được lắp đặt tại bus 5 của hệ thống. Phân bố Weibull được thể hiện theo ký hiệu Gen 1 trong Hình 2.3. Xác suất cao nhất được xác định ở mức 7m/s tương ứng với công suất đầu ra của tua-bin gần 0,7MW, như minh họa trong hình. Kết quả doanh thu của tua-bin xác định được nêu trong Bảng 2.3.

Với kết quả Bảng 2.3 được trình bày bằng biểu đồ Hình 2.11. Theo đó doanh thu tua-bin gió giảm liên tục khi hệ số tỷ lệ bồi thường tăng. Điều đó có thể hiểu là do sức tăng chi phí bồi thường cao hơn mức tăng thu nhập dẫn đến doanh thu tổng



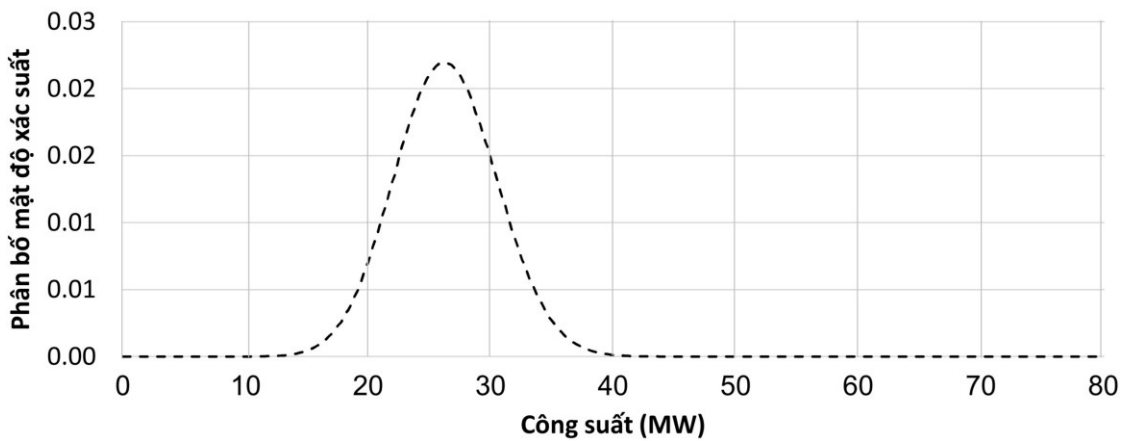
Hình 2.11: Doanh thu một tua-bin gió

thể giảm. Một số trường hợp doanh thu âm ở một tỷ lệ bồi thường nhất định, hàm ý tại đó chủ sở hữu ĐG không còn được hưởng lợi và như vậy không còn mong muốn đầu tư vào các dự án ĐG, điều này rõ hơn trong mô hình trang trại gió.

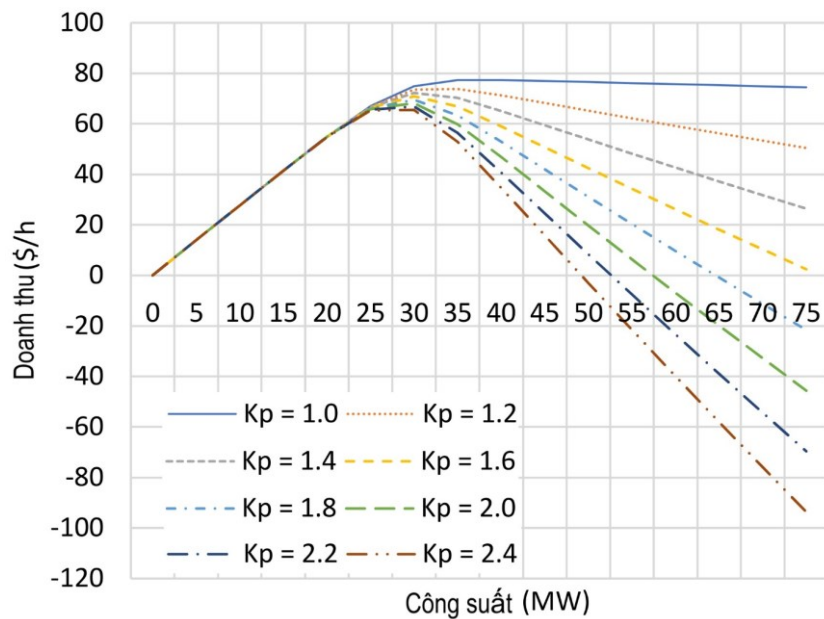
2.3.6.3. Thử nghiệm trong mô hình 2

Kịch bản này xem xét một trang trại gió hoàn chỉnh tại bus 5 của HTĐ. Hàm Weibull được tổ hợp từ 25 tua-bin của trang trại, tạo ra một phân bố mật độ xác suất tương đương thể hiện trong Hình 2.12, với đỉnh hơi dịch chuyển về phía công suất đầu ra thấp hơn, khoảng 30-32MW.

Doanh thu của trang trại ĐG, được minh họa trong Hình 2.13, cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa các vùng công suất. Dòng tiền tăng gần như tuyến tính khi sản lượng điện dưới 25 MW, nhưng giảm gần tuyến tính khi sản lượng vượt quá 40 MW. Đáng chú ý, doanh thu đạt đỉnh trong khoảng 30–40 MW, tại đó xuất hiện sự tác động của



Hình 2.12: Hàm phân bố mật độ xác suất Weibull tổ hợp điện gió tại Bus 5



Hình 2.13: Doanh thu điện gió tại Bus 5

các khoản bồi thường. Tỷ lệ đơn giá bồi thường ảnh hưởng trực tiếp đến giá trị đỉnh và mức giảm doanh thu ở phía sau đỉnh, khi công suất chào thầu vượt quá 40 MW.

Hình 2.13 cũng cho thấy, khu vực tăng trưởng doanh thu ít bị ảnh hưởng bởi hệ số giá bồi thường, trong khi khu vực giảm doanh thu lại phụ thuộc đáng kể vào hệ số này. Ví dụ, khi công suất chào thầu là 70 MW, doanh thu đạt khoảng 80 USD/h nếu giá bồi thường bằng giá trực tiếp. Tuy nhiên, khi hệ số bồi thường tăng lên 2.4, doanh thu giảm xuống mức âm, khoảng -80 USD/h.

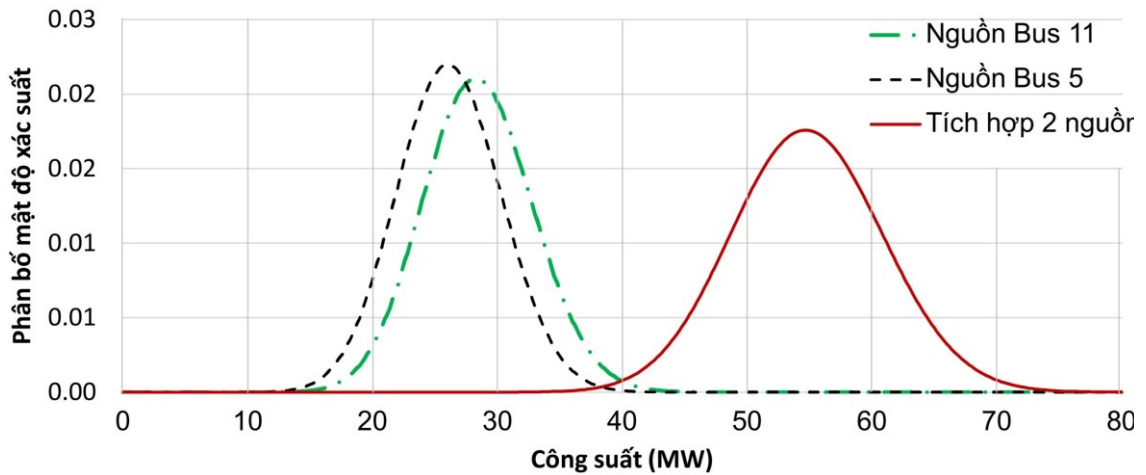
Đỉnh dòng tiền cũng thay đổi theo hệ số bồi thường, dù mức độ không lớn. Khi hệ số bồi thường ở mức tối thiểu (1.0), doanh thu cao nhất đạt được tại công suất 45 MW. Ngược lại, khi hệ số bồi thường tăng lên mức tối đa (2.4), đỉnh doanh thu giảm xuống và dịch chuyển về công suất 30 MW.

2.3.6.4. Thử nghiệm trong mô hình 3

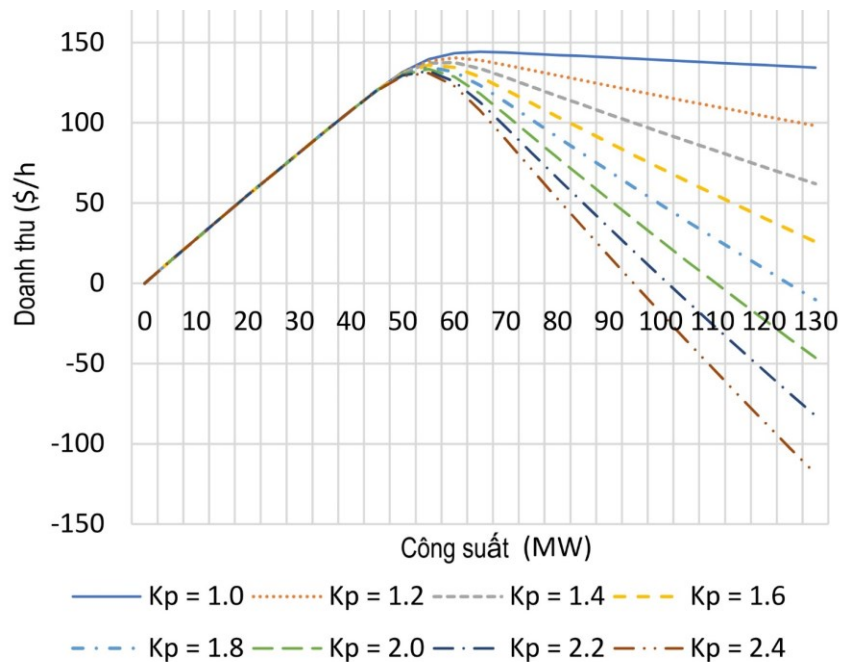
Trong mô hình một trang trại ĐG đã trình bày, hàm Weibull của từng trang trại ĐG được xây dựng từ hàm mật độ phân bố xác suất của các tua-bin. Đối với mô hình tổ hợp từ hai trang trại ĐG liên danh tại các bus 5 và 11, Hình 2.14 minh họa phân bố mật độ xác suất của từng trang trại riêng lẻ và của tổ hợp hai trang trại.

Quan sát cho thấy, hình dạng biên của đường cong phân bố mật độ xác suất tổ hợp về cơ bản không thay đổi. Tuy nhiên, đỉnh của đường cong thấp hơn và dịch chuyển theo chiều ngang về phía mức công suất cao hơn. Đặc điểm này phản ánh sự ảnh hưởng của tổ hợp công suất từ hai trang trại. Đáng chú ý, đồ thị xác suất tổ hợp xuất hiện các đường sọc đứng, do việc tích hợp công suất được xác định từ vận tốc gió rời rạc với các bước tính toán không đều, dẫn đến phân bố mật độ xác suất không liên tục.

Doanh thu từ hai nguồn năng lượng gió được thể hiện trên Hình 2.15, với các đường cong phản ánh mô hình tương tự như trường hợp một điện gió, nhưng đỉnh của các đường cong khác nhau tùy thuộc vào đặc điểm của hàm phân bố mật độ xác suất tổ hợp. Kết quả cho thấy doanh thu đạt giá trị tối đa tại một địa điểm mới khi công suất ĐG tích lũy nằm trong khoảng từ 55 đến 65 MW.



Hình 2.14: Hàm phân bố mật độ xác suất tổ hợp của hai trang trại điện gió



Hình 2.15: Doanh thu tổ hợp hai trang trại điện gió

Phân tích dòng tiền so sánh giữa hai mô hình 2 và 3 được minh họa trong Hình 2.13 và Hình 2.15, cho thấy rằng mô hình ĐG độc lập mang lại lợi ích cao hơn khi tỷ lệ đền bù thấp hơn 1.5. Tuy nhiên, khi tỷ lệ đền bù vượt ngưỡng 1.5, mô hình này bắt đầu chịu thiệt hại đáng kể. Doanh thu thấp hơn trong các trường hợp có tỷ lệ đền bù giảm được lý giải bởi sự chắc chắn được nâng lên hơn nhờ hỗ trợ tương hỗ giữa các nhà máy ĐG trong mô hình 3, làm giảm xác suất thiếu hụt sản lượng điện so với các nhà máy ĐG hoạt động độc lập.

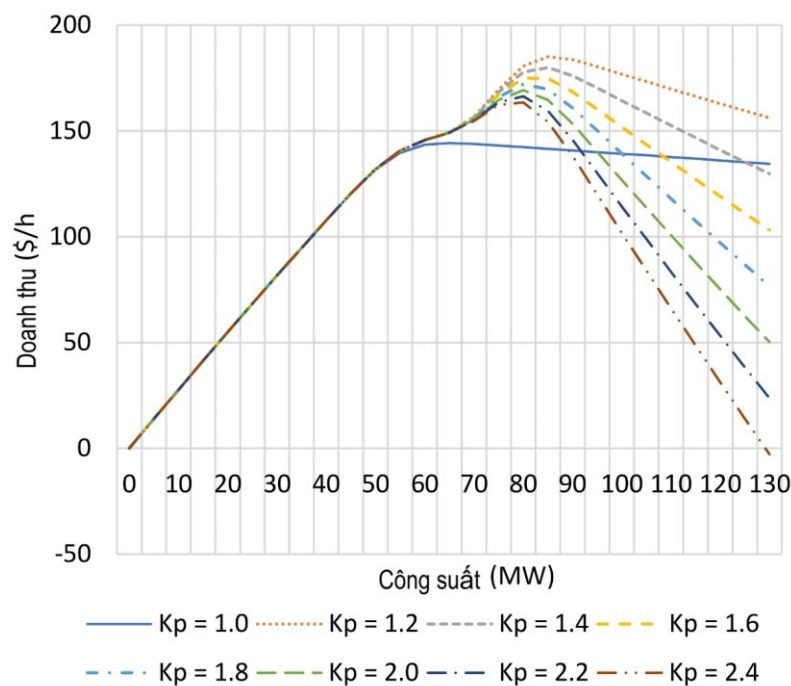
Như vậy, hiệu quả của việc liên kết các nhà máy ĐG phụ thuộc vào sự chênh lệch giá đáng kể trên TTĐ. Trong trường hợp này, tỷ lệ chênh lệch giá tối thiểu cần thiết để đảm bảo hiệu quả kinh tế của mô hình liên kết hai ĐG là lớn hơn 1.5.

2.3.6.5. Thử nghiệm trong mô hình 4

Giả sử mối quan hệ thương mại được thiết lập giữa nhà máy nhiệt điện tại Bus 1 và các trang trại ĐG như trong mô hình 3, trong đó nhà máy nhiệt điện có công suất định mức 200 MW và giá giao dịch với ĐG mang lại lợi nhuận 10%. Hình 2.16 trình bày doanh thu của từ ĐG sau khi liên kết với nhà máy nhiệt điện này.

Quan sát biểu đồ cho thấy hình dạng của các đường cong doanh thu không đồng nhất so với các mô hình trước. Cụ thể, các đường cong thể hiện sự biến động rõ rệt với các dao động nhỏ về phía tăng trưởng doanh thu. Tuy nhiên, mỗi mức phạt chỉ có một giá trị cực trị, và độ dốc đi xuống sau điểm cực trị tương tự như các mô hình trước đó.

Đáng lưu ý, khi tỷ lệ đền bù vượt mức chi phí sản xuất của các nhà máy nhiệt điện, doanh thu tối đa của ĐG có sự gia tăng đáng kể. Cụ thể, khi hệ số đền bù lớn



Hình 2.16: Tổng doanh thu của tổ hợp WPP và nhiệt điện bus 1

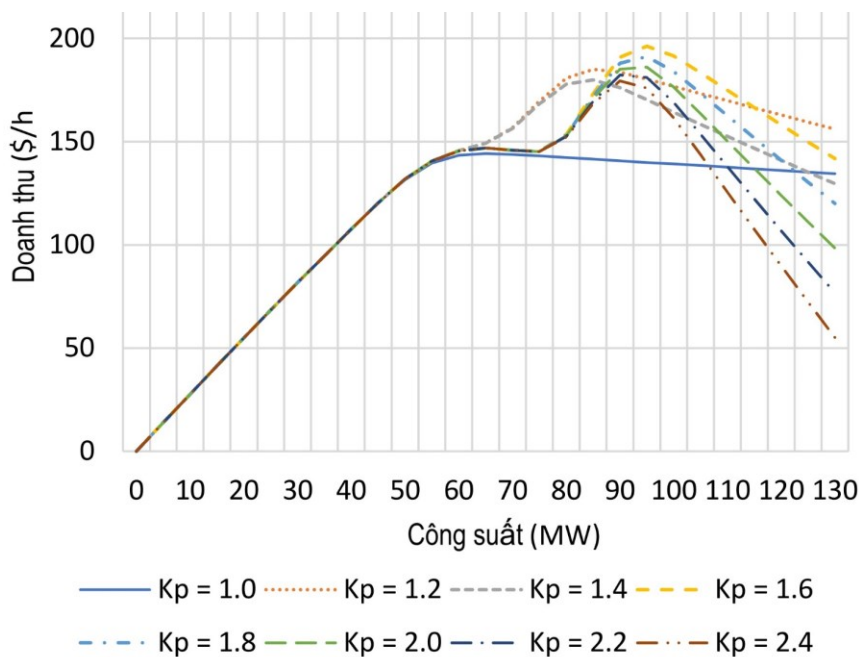
hơn 1.1, tổng doanh thu cao nhất tăng từ dưới 150 USD/h lên hơn 180 USD/h. Tuy nhiên, tương tự như các kịch bản trước, tỷ lệ đền bù càng cao có thể làm giảm mức trần doanh thu tối đa.

Mặt khác, công suất đấu thầu đỉnh của ĐG tăng 60 MW trong mô hình 3 lên gần 90 MW trong mô hình này, xem trong Hình 2.16. Sự gia tăng này phản ánh sự chắc chắn được nâng cao hơn do giảm chi phí thiếu điện nhờ vai trò hỗ trợ của nhà máy nhiệt điện trong liên danh. Điều này giúp củng cố niềm tin của các chủ ĐG trong quá trình đấu thầu, thúc đẩy họ đưa ra các giá thầu cao hơn trên TTĐ, từ đó dẫn đến sự tăng trưởng doanh thu.

2.3.6.6. Thử nghiệm trong mô hình 5

Giả sử một hệ thống ESS có công suất xả tối đa 10 MW, chẳng hạn như hệ thống pin lithium, và giả sử chi phí sản xuất điện cao hơn gấp 1,5 lần giá bán trung bình của thị trường. Kết quả doanh thu từ mô hình này cho thấy đường cong doanh thu được chia thành ba đoạn có dạng riêng biệt, như minh họa trong Hình 2.17:

1. Dạng thứ nhất: Khi đền bù không đáng kể, ví dụ tỷ lệ giá đền bù gần bằng 1.0, đường cong doanh thu không có sự khác biệt so với các mô hình độc lập.



Hình 2.17: Tổng doanh thu của tổ hợp

2. Dạng thứ hai: Khi hệ số đền bù nằm trong khoảng từ 1.2 đến 1.4, kết quả tương tự mô hình 4, nguồn nhiệt điện tham gia liên danh và hưởng lợi từ việc cung cấp sản lượng bù cho ĐG.

3. Dạng thứ ba: Khi hệ số đền bù vượt 1.5, cả nguồn nhiệt điện và ESS đều có cơ hội hưởng lợi từ việc cung cấp sản lượng điện bù cho ĐG trong trường hợp thiếu hụt.

Kết quả từ mô hình này cho thấy đỉnh doanh thu của ĐG tăng đáng kể, đạt khoảng 200 USD/h, so với 170 USD/h trong mô hình có thêm nhiệt điện và cao hơn nhiều so với các mô hình trước đó. Đồng thời, công suất chào thầu của ĐG cũng được khuyến khích tăng lên, đạt gần 100 MW, so với chỉ khoảng 85 MW trong mô hình liên kết nhiệt điện.

2.3.7. Nhận xét và đánh giá kết quả thực nghiệm

Đối với mô hình chỉ đầu tư một tua-bin gió, chưa cần khảo sát cũng có thể đánh giá mức độ không hiệu quả của dự án. Tuy nhiên, số liệu tính toán từ bài toán này cho thấy rõ doanh thu của dự án rất thấp và giảm rất nhanh khi mức phạt trên thị trường tăng, như thể hiện trong Bảng 2.3. Đặc biệt, kết quả còn xác định được một ngưỡng mà tại đó luôn lỗ do doanh thu âm, tức là càng bán điện càng lỗ. Do đó, khuyến nghị không nên đầu tư vào mô hình này là hoàn toàn hợp lý.

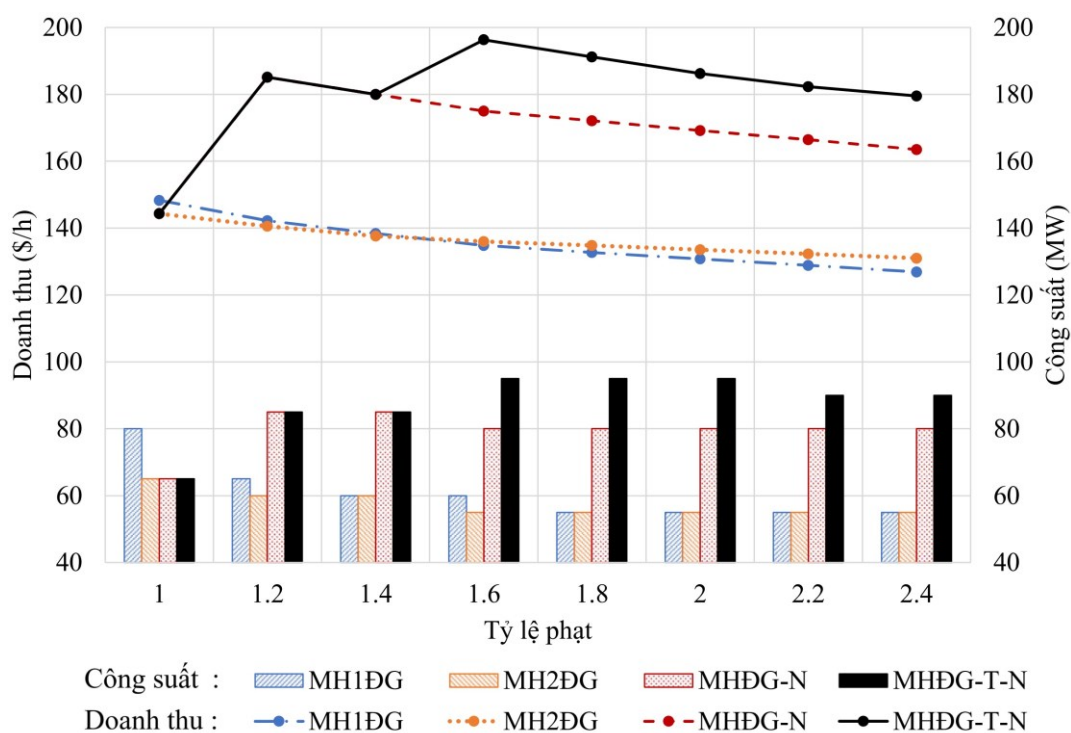
Dữ liệu so sánh kết quả thử nghiệm bốn mô hình còn lại được thể hiện trong Bảng 2.4. Kết quả mô phỏng cho thấy doanh thu tối ưu của các trang trại ĐG tăng dần qua từng mô hình, phản ánh rõ rệt lợi ích của việc tích hợp các nguồn điện. Đặc biệt, mô hình thứ năm, kết hợp ĐG với nhà máy nhiệt điện và ESS, mang lại tổng doanh thu cao nhất. Sự tích hợp này không chỉ giảm thiểu bất ổn liên quan đến nguồn gió mà còn giúp các trang trại ĐG chủ động hơn trong chiến lược đấu thầu trên TTĐ, nhờ khả năng điều chỉnh linh hoạt dựa trên giá thị trường. Doanh thu tối ưu của mô hình này đạt 196,3 USD/giờ, tăng 132% so với mô hình thứ hai - trang trại gió độc lập - vốn chỉ đạt 148,3 USD/giờ.

Bảng 2.4: So sánh công suất đỉnh và doanh thu

Tỷ lệ đền bù	Mô hình 2		Mô hình 3		Mô hình 4		Mô hình 5	
	CS đỉnh	Doanh thu	CS đỉnh	Doanh thu	CS đỉnh	Doanh thu	CS đỉnh	Doanh thu
1.0	80	148.3	65	144.3	65	144.3	65	144.3
1.2	65	142.2	60	140.6	85	185.1	85	185.1
1.4	60	138.4	60	137.6	85	180.0	85	180.0
1.6	60	134.8	55	136.0	80	175.0	95	196.3
1.8	55	132.7	55	134.8	80	172.1	95	191.2
2.0	55	130.8	55	133.5	80	169.2	95	186.2
2.2	55	128.9	55	132.3	80	166.4	90	182.3
2.4	55	126.9	55	131.0	80	163.5	90	179.5

Khi phân tích tác động của tỷ lệ giá bồi thường lên hành vi đấu thầu của các trang trại gió, kết quả cho thấy tỷ lệ phạt cao làm giảm doanh thu do rủi ro tài chính gia tăng, như minh họa trong Hình 2.18. Tuy nhiên, sự hợp tác giữa các nguồn điện trong mô hình tích hợp giúp giảm thiểu nguy cơ bồi thường bằng cách cung cấp hỗ trợ chủ động. Đáng chú ý, tồn tại một tỷ lệ giá bồi thường tối ưu, tại đó doanh thu đạt mức cao nhất, tương ứng với tỷ lệ 1.6 và doanh thu đỉnh gần 200 USD/giờ.

Không phải mọi phương án tích hợp đều mang lại hiệu quả cao. Chẳng hạn, khi mức phạt giảm xuống dưới 1,4 thì doanh thu của mô hình hai ĐG lại thấp hơn so



Hình 2.18: Doanh thu và công suất đỉnh của điện gió theo các mô hình

với một ĐG. Hơn nữa, sự phụ thuộc quá mức vào hệ thống tích hợp có thể dẫn đến tình trạng dư thừa công suất dự phòng, gây xung đột trong lịch trình vận hành và làm suy giảm tính ổn định của HTĐ. Điều này không chỉ tác động tiêu cực đến hiệu quả tài chính mà còn gia tăng rủi ro cho các bên tham gia trong lĩnh vực ĐG.

Trong tất cả các mô hình được xem xét, khi chi phí phạt thiếu điện gia tăng, khả năng bù đắp trở thành yếu tố then chốt quyết định hiệu quả kinh tế của các trang trại ĐG. Vì vậy, việc xác định chiến lược chào thầu phù hợp, bao gồm cả giá và sản lượng điện, cần được phân tích kỹ lưỡng nhằm đảm bảo vận hành tối ưu. Việc kết hợp linh hoạt giữa các nguồn năng lượng không chỉ giúp giảm nguy cơ bị phạt mà còn cải thiện hiệu suất sử dụng năng lượng tái tạo, mang lại lợi ích lâu dài cho cả nhà đầu tư và xã hội.

Nhưng trên thực tế, các trang trại ĐG thường có xu hướng ưu tiên lợi ích riêng, dẫn đến việc phải gia tăng đầu tư vào hệ thống ESS nhằm giảm thiểu rủi ro. Như đã đề cập, tích hợp ESS vào vận hành có thể nâng cao hiệu quả đấu thầu trên TTĐ. Đặc biệt, trong mô hình 5 có bổ sung trữ năng, công suất chào thầu có thể đạt tới 95 MW tại một số thời điểm, trong khi ở mô hình trang trại gió độc lập – không có ESS – con số này chỉ dừng lại ở mức 55 MW.

Ngoài lợi ích tài chính, việc mở rộng quy mô sử dụng năng lượng tái tạo còn mang lại tác động tích cực đối với xã hội, đặc biệt trong việc hạn chế sự phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch. Trong mô hình có trữ năng, tỷ lệ thâm nhập của ĐG vào hệ thống có thể tăng đến 173%, góp phần đáng kể vào việc giảm nhu cầu sử dụng nhiên liệu hóa thạch. Điều này không chỉ giúp cân bằng cơ cấu năng lượng mà còn thúc đẩy mục tiêu phát triển bền vững, đồng thời giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường trên phạm vi toàn cầu.

2.3.8. Kết luận

Mô hình xác suất bất định điện gió trên thị trường điện là cơ sở để xây dựng toán học khảo sát, phân tích và đánh giá doanh thu điện gió từng mô hình liên kết điện gió khác nhau nhằm mục đích tìm kiếm và đề xuất mô hình có doanh thu tốt nhất

cho chủ điện gió trong điều kiện tổn hại bởi bất định liên quan đến đấu thầu cạnh tranh trên thị trường điện. Kết quả cho thấy một liên kết điện gió với nhiệt điện mang lại doanh thu cao đáng kể nhờ tận dụng triệt để công suất dự phòng của nhiệt điện để bù đắp cho thiếu hụt của điện gió dẫn đến tránh bị phạt. Điều này cũng đúng khi có liên kết với nguồn trữ năng trong điều kiện tỷ lệ phạt của thị trường cao. Với kết quả nghiên cứu của chương này, có các đóng góp như sau:

- Mô hình xác suất bất định điện gió trong thị trường điện và đề xuất mô hình nâng doanh thu điện gió trong thị trường điện, mô hình tích hợp điện gió và nhiệt điện có thể kết hợp ESS. Mô hình tích hợp này tương đối phù hợp với các Genco tại Việt Nam.

- Tăng sản lượng phát điện gió tương ứng với mô hình đề xuất, tạo động lực cho sự phát triển bền vững của ngành năng lượng tái tạo, đồng thời mang lại lợi ích kinh tế - xã hội.

- Công bố 01 bài báo Q1 trong cộng đồng khoa học.

CHƯƠNG 3: PHƯƠNG PHÁP TỐI ƯU LAI AI-MH

3.1. Giới thiệu

3.1.1. Đặt vấn đề

Bài toán tối ưu không chỉ cần thiết cho kỹ thuật mà còn là cực kỳ quan trọng trong kinh tế. Nâng doanh thu điện gió là một bài toán tài chính trong đó tối ưu lợi ích điện gió đấu thầu trên thị trường khi hành vi chào thầu thay đổi công suất để đánh giá các kịch bản. Yếu tố bất định công suất phát điện gió, cùng với phản ứng biến động ngẫu nhiên của thị trường điện, và điều kiện vận hành tối ưu hệ thống điện tạo thành một tổ hợp đa biến phức tạp của bài toán tối ưu. Trong chương này nghiên cứu phát triển hai thuật toán metaheuristic kinh điển trong lĩnh vực năng lượng, đó là thuật toán GA và PSO, bằng cách vận dụng ưu thế dự đoán của trí thông minh nhân tạo, cụ thể là kiến trúc LSTM, nhằm tăng tốc độ hội tụ và tránh bẫy cực trị địa phương.

3.1.2. Phạm vi và giới hạn nghiên cứu của chương

Chương tập trung nghiên cứu cải tiến thuật toán bằng cách lai AI với MH để tối ưu hóa doanh thu không chắc chắn của trang trại gió trong thị trường điện. Các giới hạn nghiên cứu trong phạm vi như sau:

- Mô hình tính toán: hạn chế tính toán trong mô hình liên kết điện gió với nhiệt điện có phối hợp trữ năng (mô hình liên kết gió – nhiệt – trữ năng đã đề xuất trong chương 2), trong hoạt động đấu thầu cạnh tranh trên thị trường điện ngày hôm sau.

- Giới hạn thuật toán: Trọng tâm nghiên cứu trong phạm vi mạng LSTM được sử dụng để dự đoán các thuộc tính nổi bật của cá thể và tích hợp chúng vào quá trình tối ưu hóa trong thuật toán tối ưu GA, hoặc PSO.

- Thực nghiệm: sử dụng dữ liệu hệ thống điện chuẩn IEEE 30-bus; tham số và giá đầu tư ESS tham khảo gần đúng từ các nguồn công bố tại thời điểm thực nghiệm tương ứng với giả sử công nghệ pin lithium được thực nghiệm.

3.2. Lý thuyết mô hình toán học

3.2.1. Mô tả bài toán

Bài toán nhằm mục tiêu tối ưu doanh thu điện gió trong mô hình liên kết đã đề xuất trong chương trước. Dữ kiện đầu vào của bài toán gồm: tham số các nguồn điện, phân bố mật độ xác suất bất định của ĐG, tham số hệ thống điện để phân bố công suất và xác định giá bán điện thị trường. Kết quả bài toán là công suất đầu thầu ĐG tối ưu và công suất ESS tương ứng. Kết quả này được sử dụng để khuyến khích chủ điện gió đầu thầu với việc chào công suất phát điện theo một lịch trình để đạt được doanh thu tốt nhất.

Kết quả thực nghiệm sẽ kiểm tra 02 nội dung: (1) đánh giá kết quả tối hóa so với kết quả đã nghiên cứu trong Chương 2 [79]; và (2) đánh giá hiệu quả thuật toán lai so với các thuật toán tối hóa gốc và một số cải tiến gần đây [80].

3.2.2. Hàm mục tiêu

Mục tiêu của bài toán là tối đa hóa doanh thu ĐG trong mô hình 5 (liên kết với ĐG với nhiệt điện và nguồn trữ năng đã đề xuất chương 2). Hàm mục tiêu (2-6) được triển khai cho mô hình liên danh, phân tích dựa trên tính bất định doanh thu vẫn gồm thành hai thành phần được viết lại, và cực đại lợi ích ĐG biểu diễn như sau,

$$\max \{F = R_w + IC_w\} \quad (3-1)$$

R_w là doanh thu trực tiếp khi chào thầu, và IC_w là doanh thu bất định.

3.2.2.1. Doanh thu trực tiếp dựa vào công suất điện chào thầu

$$R_w = R_w^d(P_{ws}) + R_T^d(P_{Ts}) \quad (3-2)$$

Biểu thức doanh thu trực tiếp R_w [26], có hai thành phần, doanh thu ĐG R_w^d tương ứng với sản lượng điện chào thầu của ĐG P_{ws} , và doanh thu nhiệt điện trong liên danh R_T^d theo sản lượng điện chào thầu của chúng P_{Ts} . Doanh thu trực tiếp được xác định dựa trên mô hình TTĐ như [23] sau,

$$R_w^d = \lambda_w x P_{ws} \quad (3-3)$$

$$R_T^d = \lambda_T x P_{Ts} \quad (3-4)$$

Trong hai biểu thức trên, λ_w, λ_T là giá chào đầu thầu ĐG và nhiệt điện khi đầu thầu theo công suất chào là P_{ws}, P_{Ts} tương ứng. Khi cạnh tranh trên TTĐ, cả giá bán điện và công suất điện chào thầu từng nguồn điện phải dự đoán sao cho kết quả đầu thầu đạt tối đa lợi ích [3]. Với giá bán điện của ĐG được tính toán theo giá bán bình quân thị trường điện, và giá bình quân đó thường tỷ lệ với giá chào thầu của các nguồn điện chi phối trên thị trường [21]. Trong thực nghiệm của nghiên cứu này xét các nguồn nhiệt điện chi phối tương tự như thị trường Châu Âu.

3.2.2.2. Thu nhập bất định:

Là thu nhập phụ thuộc vào công suất phát điện tại thời điểm giao cho khách hàng. Khi công suất giao dư so với chào thầu thì mang lại doanh thu cho chủ nguồn điện nhưng khi công suất thiếu hụt thì mất chi phí bồi thường.

$$IC_w = R_w^u(\Delta P_w) - (C_E + C_T + C_P) \quad (3-5)$$

Thu nhập bất định (IC_w) phụ thuộc vào mức độ sai khác giữa công suất phát điện thực tế theo thời gian thực (P_{wav}) và công suất chào thầu (P_{ws}) tại một thời điểm phát điện, được ký hiệu là ΔP_w . Khi công suất ĐG dư thừa và bán được trên thị trường, thu nhập bất định này dương, tạo ra doanh thu R_w^u . Ngược lại, nếu sản lượng điện thấp hơn mức chào thầu, chủ đầu tư phải chịu chi phí bù đắp thiếu hụt. Chi phí này có thể phát sinh từ việc mua điện giao ngay từ nguồn nhiệt điện dự phòng (C_T) [40], sử dụng điện từ hệ thống lưu trữ (C_E) [25], hoặc bị phạt hợp đồng (C_P) [22]. Chi tiết các thành phần tham số tính theo các biểu thức sau:

$$C_E = \eta_E(\lambda_C - \lambda_B)P_E \quad (3-6)$$

$$C_T = R_T^d(P_{Ts}) + R_T^u(\Delta P_T) \quad (3-7)$$

$$C_P = \lambda_P \Delta P_P \quad (3-8)$$

$$\Delta P_w = P_{wav} - P_{ws} \quad (3-9)$$

Chi phí vận hành ESS phụ thuộc vào hiệu suất của cả hệ thống lưu trữ (η_E ở đây giả sử gồm cả hiệu suất sạc-xả và hiệu suất bộ chuyển đổi), công suất bán điện từ hệ thống lưu trữ (P_E), và chênh lệch giữa giá bán điện lưu trữ (λ_C ở đây giả sử nhỏ hơn đơn giá điện phạt hợp đồng và lớn hơn giá bán điện của nhiệt điện) với giá mua điện để sạc (λ_B ở đây giả sử là giá bán điện thấp nhất trên thị trường điện). Trong khi đó, chi phí vận hành nhà máy nhiệt điện liên quan đến doanh thu bán điện trực tiếp (R_T^d) và doanh thu bất định (R_T^u). Đối với chi phí phạt hợp đồng, mức chi trả được tính dựa trên giá phạt (λ_P) và sản lượng điện bị phạt (ΔP_P).

λ_{buy} là giá mua điện sạch, k_{P2}

Dựa trên mô hình liên kết gió – nhiệt – trữ năng trong TTD, tại mỗi thời điểm có thể xảy ra hai trường hợp: dư thừa hoặc thiếu hụt sản lượng ĐG so với mức chào thầu ban đầu. Công suất phát điện thực tế của ĐG được xác định theo công thức sau, [3]:

$$P_{wav}(t) = P_{ws}(t) + \wp(t) \quad (3-10)$$

$$\text{Với } \wp(t) = \wp_{in}(t) + \wp_{out}(t) = P_{wav}(t) - P_{ws}(t) = \Delta P_w \quad (3-11)$$

$$\text{và } \wp_{out}(t) = \Delta P_w - \wp_{in}(t) \quad (3-12)$$

$\wp = \Delta P_w$ là công suất sai lệch giữa phát thực tế so với công suất chào thầu điện gió, gồm hai thành phần: độ lệch trong phạm vi cho phép của luật thị trường \wp_{in} và độ lệch vượt ra ngoài phạm vi cho phép \wp_{out} . Theo luật thị trường, khi lệch công suất trong phạm vi cho phép thì không bị phạt và ISO sẽ tự điều tiết thị trường, còn khi độ lệch vượt ra khỏi giới hạn cho phép thì bị phạt, và như vậy \wp_{out} là nguyên nhân dẫn đến thu nhập bất định.

Trường hợp $\wp_{out} > 0$ dẫn đến dư sản lượng điện ĐG, phần dư đó được bán cho bất cứ người mua nào có nhu cầu trên thị trường với giá thỏa thuận giao ngay. Do sản lượng điện giao ngay bất định nên thường giá bán là rất thấp, thậm chí có thể không có người mua. Ngược lại với trường hợp $\wp_{out} < 0$, tức thiếu sản lượng điện, chủ ĐG

buộc phải mua điện giao ngay của các nguồn điện dự phòng trên TTĐ để đền bù cho khách hàng mua điện của mình; hoặc chấp nhận bị phạt hợp đồng nếu không thể mua được điện giao ngay. Việc mua điện của chủ ĐG trong trường hợp này là bất ngờ nên giá mua điện cũng thường cao hơn nhiều lần so với giá bán điện trung bình của TTĐ.

Thu nhập bất định được xác định theo phân bố xác suất và biến đổi từ (2-11) như sau:

$$R_w^u = \begin{cases} R_{RW}(\varphi_{out}), & \text{khi } \varphi_{out} \geq 0 \\ -C_{PW}(\varphi_{out}), & \text{khi } \varphi_{out} < 0 \end{cases} \quad (3-13)$$

$$R_{RW} = k_R \lambda_w \tau_{out} = k_R \lambda_w \sum_{(P_{ws} + \tau_{in})}^{P_{wr}} (p_w - P_{ws}) f_w(p_w) dp_w \quad (3-14)$$

$$C_{PW} = \begin{cases} C_{PT}, & \text{khi } |\varphi_{out}| < \Delta P_T \\ C_{PT} + C_{PE}, & \text{khi } \Delta P_T \leq |\varphi_{out}| < (\Delta P_T + P_E) \\ C_{PT} + C_{PE} + C_{P0}, & \text{khi } |\varphi_{out}| \geq (\Delta P_T + P_E) \end{cases} \quad (3-15)$$

ở đây hai thành phần doanh thu bán điện dư R_{RW} và chi phí đền bù điện thiếu C_{PW} được biểu diễn theo (3-14) và (3-15). Trong đó phụ thuộc vào xác suất phát điện của điện gió tại thời điểm giao ngay f_w . Hệ số tỷ lệ, k_R , đại diện cho mức giảm giá bán điện dư, thường thấp hơn giá chào thầu do xác suất người mua điện giao ngay thấp.

Ba thành phần chi phí phát sinh khi thiếu công suất điện gió tại thời điểm giao ngay được biểu diễn trong 3 biểu thức (2-16) đến (2-18) gồm: chi phí trả cho nhiệt điện C_{PT} phần công suất bù của nguồn nhiệt này; chi phí cho bộ trữ năng C_{PE} khi sử dụng ESS để bù thiếu hụt; và chi phí phạt C_{P0} khi xảy ra cả nhiệt điện và ESS không đủ công suất để bù thiếu hụt của điện gió.

$$C_{PT} = k_{P1} \lambda_w \varphi_{out} = \begin{cases} k_{P1} \lambda_w \sum_{(P_{ws} - \varphi_{in} - \Delta P_T)}^{(P_{ws} - \varphi_{in})} (P_{ws} - p_w) f_w(p_w) dp_w, & \text{khi } |\varphi_{out}| < \Delta P_T \\ k_{P1} \lambda_w \Delta P_T, & \text{khi } |\varphi_{out}| \geq \Delta P_T \end{cases} \quad (3-16)$$

$$\begin{aligned}
C_{PE} &= k_{P2} \lambda_w (\varphi_{out} - \Delta P_T) \\
&= \begin{cases} k_{P2} \lambda_w \sum_{(P_{ws} - \varphi_{in} - \Delta P_T)}^{(P_{ws} - \varphi_{in} - \Delta P_T - P_E)} (P_{ws} - p_w) f_w(p_w) dp_w, & \text{ khi } \Delta P_T < |\varphi_{out}| < (\Delta P_T + P_E) \\ k_{P2} \lambda_w P_E, & \text{ khi } |\varphi_{out}| \geq (\Delta P_T + P_E) \end{cases} \quad (3-17)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{P0} &= k_{P0} \lambda_w (\varphi_{out} - \Delta P_T - P_E) \\
&= k_{P0} \lambda_w \sum_0^{(P_{ws} - \varphi_{in} - \Delta P_T - P_E)} (P_{ws} - p_w) f_w(p_w) dp_w \quad (3-18)
\end{aligned}$$

$$R_T^u = \begin{cases} R_{PT}(\Delta P_T), & \text{ khi } \Delta P_T \geq 0 \\ -R_{RT}(\Delta P_T), & \text{ khi } \Delta P_T < 0 \end{cases} \quad (3-19)$$

Các hệ số, k_{Pi} , là tỷ lệ tăng giá điện bồi thường so với giá chào thầu và lớn hơn 1. Đối với nguồn nhiệt điện, doanh thu còn được bổ sung một khoản thu nhập R_T^u khi bán điện cho điện gió.

Hàm f_w trong các biểu thức trên là phân bố mật độ xác suất công suất ĐG, nó biểu diễn xác suất sai lệch dự đoán công suất trong thời gian tương lai, có thể ngày hôm sau hoặc tuần sau, tháng sau tùy theo TTĐ. Hàm phân bố Weibull hai tham số c và k được áp dụng cò thể tham khảo các tài liệu [79, 71].

3.2.2.3. Chỉ số giá điện trong thị trường điện

Mô hình TTĐ dựa trên việc khớp lệnh giữa cung và cầu theo công suất và đơn giá. Dữ liệu chào mua bán điện tương ứng với giá mua bán điện được chào ngày hôm sau (giả sử là thị trường ngày hôm sau) của những người mua điện (là các phụ tải điện hoặc những công ty phân phối điện), và người bán điện (chủ yếu là nguồn điện các loại) được tập trung tại trung tâm quản lý TTĐ (ISO). Mức điều chỉnh giá điện trong các tình huống dư sản lượng điện, hoặc thiếu sản lượng điện có thể xác định theo [81]. Giả sử giá bán sản lượng điện gió dựa trên giá bán điện của nguồn nhiệt điện như (2-10), khi đó tỷ số điều chỉnh giá điện thay đổi theo các biểu thức sau:

$$k_R = \frac{\lambda_{RW}}{\lambda_w} = \frac{b_g + c_g(P_{Tg} - \Delta P_w)}{b_g + c_g P_{Tg}} = \left(1 - \frac{c_g \Delta P_w}{\lambda_w}\right) = 1 - \beta \quad (3-20)$$

$$k_{P1} = \frac{\lambda_{Tg}}{\lambda_w} = 1 \quad (3-21)$$

$$\text{Ký hiệu } \beta = \frac{c_g \Delta P_w}{\lambda_w} = B(\Delta P_w) \quad (3-22)$$

Trong đó, các hệ số b và c là thành phần hệ số phi phí của nguồn nhiệt điện. Đối với nguồn trữ năng, giả sử đầu tư ESS không tính đến lợi ích, khi đó doanh thu chỉ để bù chi phí. Biến đổi từ các biểu thức (3-32) và (3-33) bên dưới có:

$$\begin{aligned} k_{P2} &= \frac{\lambda_{EW}}{\lambda_w} = \frac{1}{\lambda_w} \left[\frac{C_{Inv}}{N_e(1-\alpha)P_{ESS}} + C_o + \lambda_{buy} \right] \\ &= \frac{1}{\lambda_w} (UIC_{ESS} + C_o + \lambda_{buy}) \end{aligned} \quad (3-23)$$

Ký hiệu UIC_{ESS} ở đây biểu diễn một tỷ lệ suất đầu tư nguồn ESS. Phần phạt hợp đồng tùy thuộc vào luật thị trường, ở đây giả sử giá phạt được tính theo giá điện của nguồn nhiệt điện dự phòng có chi phí cao nhất. Tỷ lệ phạt khi đó là:

$$\begin{aligned} k_{P0} &= \frac{\lambda_{PW}}{\lambda_w} = \frac{b_g + c_g [P_{Tg} + \Delta P_w - \Delta P_T - (1-\alpha)P_{ESS}]}{b_g + c_g P_{Tg}} \\ &= \left(1 + \frac{c_g [\Delta P_w - \Delta P_T - (1-\alpha)P_{ESS}]}{\lambda_w} \right) = 1 + \gamma \end{aligned} \quad (3-24)$$

$$\text{Ký hiệu } \gamma = \frac{c_g [\Delta P_w - \Delta P_T - (1-\alpha)P_{ESS}]}{\lambda_w} = Y(\Delta P_w) \quad (3-25)$$

Vì ΔP_w là ngẫu nhiên nên β và γ là các giá trị ngẫu nhiên.

3.2.3. Các ràng buộc

3.2.3.1. Giới hạn vận hành của hệ thống điện

Các ràng buộc vận hành ổn định HTĐ truyền tải, ở đây chỉ đặt nặng các điều kiện xác lập với giới hạn biên như: cân bằng công suất cung cầu, giới công suất truyền tải, giới hạn vận hành điện áp nút vận hành tương tự nghiên cứu [82]. Đối với các ràng buộc vận hành khác ít ảnh hưởng đến bài toán doanh thu nguồn ĐG thì giả sử bỏ qua.

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j \in (\text{tập nút})} V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (3-26)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j \in (\text{tập nút})} V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (3-27)$$

$$V_{i \in (\text{tập nút})}^{\min} \leq V_{i \in (\text{tập nút})} \leq V_{i \in (\text{tập nút})}^{\max} \quad (3-28)$$

$$S_{i \in (\text{tập nhánh})} \leq S_{i \in (\text{tập nhánh})}^{\max} \quad (3-29)$$

Các thông số $P_{Gi}, Q_{Gi}, P_{Di}, Q_{Di}$ là công suất tác dụng và công suất phản kháng vận hành của nguồn điện và phụ tải tại nút i ; G_{ij}, B_{ij} là thành phần thực và ảo của tổng dẫn nhánh nối hai nút i - j ; S_i, S_i^{\max} là công suất biểu kiến vận hành và định mức của nhánh thứ i ; V_i là điện áp vận hành của nút i ; δ_{ij} là góc lệch pha của điện áp giữa hai nút i - j ; và V_i^{\min}, V_i^{\max} là điện áp tối thiểu và cực đại cho phép của nút i .

3.2.3.2. Giới hạn tua-bin gió

Vận hành tua-bin gió bị ràng buộc bởi giới hạn vận tốc gió dưới và trên như biểu thức:

$$v_{in} \leq v \leq v_{out}$$

$$\text{Công suất phát điện tương ứng } 0 \leq P \leq P_{\text{đm}} \quad (3-30)$$

Với v_{in} là giới hạn vận tốc khởi động của tua bin và v_{out} là giới hạn vận tốc gió cao, tốc độ gió vượt ra khỏi phạm vi giới hạn tua bin sẽ dừng hoạt động.

3.2.3.3. Giới hạn điều kiện đầu tư ESS

Trong khi giá đầu tư ban đầu của hệ thống ESS còn khá cao nên chỉ đầu tư khi có lợi hoặc yêu cầu cần thiết, đánh giá có thể biểu diễn như sau:

$$C_{ESS} \leq R_{ESS} \quad (3-31)$$

Ở đây C_{ESS} tổng chi phí và R_{ESS} là doanh thu đạt được. Trong nghiên cứu này xem hệ thống ESS là trọn bộ gồm cả pin và hệ thống chuyên đổi đầu nối lưới điện.

Công nghệ trữ năng pin lithium giả sử được sử dụng thực nghiệm trong bài viết này, các chi phí và doanh thu theo các biểu thức sau, [83]:

$$C_{ESS} = C_{Inv} + N_e C_o (1 - \alpha) P_{ESS} \quad (3-32)$$

$$R_{ESS} = N_e (k_{P2} \lambda_w - \lambda_{buy}) (1 - \alpha) P_{ESS} \quad (3-33)$$

Các chi phí đầu tư và vận hành ESS được ký hiệu là C_{Inv} và C_o . N_e là số lần xả sâu tương đương trong vòng đời ESS tương ứng với hệ số xả sâu α và công suất định mức của ESS là P_{ESS} .

3.3. Phương pháp tối ưu

3.3.1. Các thuật toán gốc

3.3.1.1. GA

Thuật toán tiến hóa tiếp tục là một phương pháp quan trọng trong việc giải quyết các bài toán tối ưu nhiều biến nhờ tính linh hoạt và khả năng tìm kiếm đa dạng của nó, tiêu biểu là GA [84]. Quá trình tiến hóa của thuật toán diễn ra qua nhiều thế hệ, trong đó hoạt động mỗi thế hệ (sau đây gọi là vòng lặp) bao gồm một hoặc nhiều quần thể và trải qua các giai đoạn chính như: lựa chọn, lai ghép và đột biến [85]. Mỗi cá thể trong quần thể được biểu diễn dưới dạng một chuỗi gen trong nhiễm sắc thể, tương ứng với các biến số của bài toán. Ban đầu, quần thể được khởi tạo ngẫu nhiên và sau đó được điều chỉnh dần qua từng vòng lặp để cải thiện kết quả tối ưu. Quá trình này được lặp lại cho đến khi đạt được mục tiêu, mỗi chu trình được mô tả qua các bước chính gồm: xây dựng cộng đồng, chọn lọc, lai hóa, đột biến. Mỗi hoạt động được biểu diễn điểu hình như sau:

- Chọn lọc để loại bỏ những cá thể kém chất lượng bằng các phương pháp như Tournament selection [86], Roulette Wheel selection [87], ví dụ mô tả toán học chọn lọc Roulette Wheel:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum f_i} \quad (3-34)$$

Với p_i là xác suất chọn cá thể thứ i , tương ứng f_i là hàm mục tiêu.

- Lai các gen cha mẹ để sinh ra các con với các kỹ thuật lai single-point và double-point [88], Uniform crossover [89], hoặc các phương pháp lai tạo khác. Ví dụ nhiệm sắc thể lai bằng phương pháp single-point có thể biểu diễn:

$$[x_{con}] = [x_1^{cha}, \dots, x_{j-1}^{cha}, x_j^{me}, \dots, x_n^{me},] \quad (3-35)$$

- Đột biến gen nhằm tăng tốc độ hội tụ, hoặc thoát ra khỏi vòng lặp có thể dẫn đến cực trị địa phương. Các kỹ thuật đột biến điển hình như Power mutation [90], Uniform mutation [91] có thể biểu diễn:

$$x_i^{đột\ biến} = rand(L_i, U_i) \quad (3-36)$$

Với rand là hàm phát sinh ngẫu nhiên và L_i, U_i tương ứng là giá trị cận dưới và trên của mỗi gen.

3.3.1.2. PSO

Thuật toán PSO, theo nghiên cứu [92], là một kỹ thuật tối ưu dựa trên sự mô phỏng hành vi di chuyển của các nhóm sinh vật như đàn chim hay đàn cá, với mục tiêu tìm ra vị trí tối ưu chung cho cả tập thể. Quá trình này bắt đầu bằng việc tạo ra một quần thể các cá thể ứng cử viên ngẫu nhiên, mỗi cá thể đại diện cho một điểm trong không gian tìm kiếm. Mỗi cá thể được đặc trưng bởi vị trí và vận tốc của nó, và trong mỗi vòng lặp, chúng cập nhật trạng thái dựa trên vị trí tốt nhất từng đạt được cũng như vị trí tối ưu toàn cục. Điều này giúp định hướng chuyển động của mỗi cá thể theo hướng có lợi hơn, góp phần cải thiện kết quả tối ưu theo thời gian [93].

Vận tốc của mỗi cá thể trong mỗi bước lặp được tính toán theo phương trình động học sau [94]:

$$V_{t+1}^i = \omega V_t^i + \varphi_1 R_{1t}^i (p_t^i - x_t^i) + \varphi_2 R_{2t}^i (g_t - x_t^i) \quad (3-37)$$

Trong đó, V_t^i là vận tốc hiện tại của cá thể i ; ω là hệ số quán tính, điều khiển mức độ biến đổi vận tốc. Hai thành phần tự nhận thức và tác động xã hội: φ_1 là hệ số học hỏi cá nhân và φ_2 là hệ số học hỏi xã hội, thường được khởi tạo với giá trị bằng 2 [92]. Các biến ngẫu nhiên R_{1t}^i và R_{2t}^i là các số ngẫu nhiên trong $[0,1]$, giúp tăng tính

ngẫu nhiên và tránh rơi vào cực trị cục bộ. Vector p_t^i là vị trí tốt nhất mà cá thể i từng đạt được, còn g_t là vị trí tốt nhất toàn cục. Cuối cùng, x_t^i là vị trí hiện tại của cá thể i , được cập nhật theo công thức sau [94]:

$$x_{t+1}^i = x_t^i + V_{t+1}^i \quad (3-38)$$

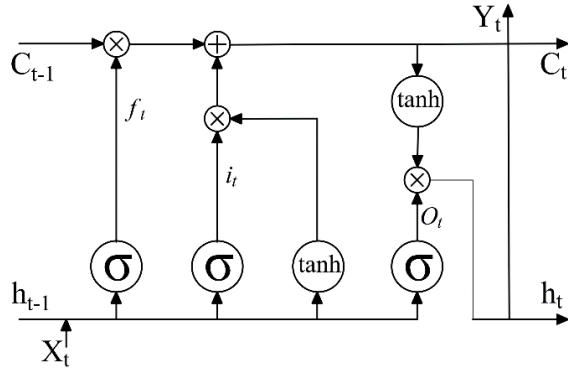
Ban đầu, vị trí và vận tốc của các cá thể được khởi tạo ngẫu nhiên, trong khi vị trí tốt nhất của mỗi cá thể được thiết lập bằng giá trị ban đầu của chính nó, tức là $p_0^i = x_0^i$.

Trong suốt quá trình tối ưu hóa, có thể áp dụng các cấu trúc liên kết như mô hình vòng hoặc mô hình sao nhằm nâng cao hiệu quả tìm kiếm [95, 96]. Ngoài ra, phương pháp bổ sung nhiễu loạn cũng được sử dụng để tăng tính đa dạng trong quần thể, bằng cách đưa vào các cá thể ngẫu nhiên mới nhằm tránh rơi vào cực trị cục bộ và mở rộng phạm vi tìm kiếm lời giải tối ưu [97].

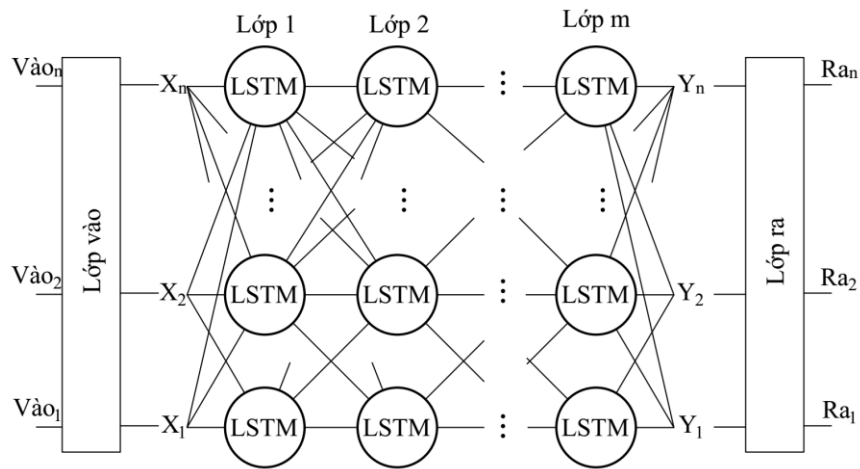
3.3.1.3. LSTM

LSTM là một phiên bản cải tiến của mạng nơ-ron hồi tiếp, được thiết kế nhằm xử lý dữ liệu theo chuỗi và khắc phục hạn chế về khả năng ghi nhớ trong quá trình lan truyền ngược. Mô hình này do Hochreiter và Schmidhuber [98] đề xuất, đặc biệt phù hợp cho các bài toán dự báo chuỗi thời gian, xử lý ngôn ngữ tự nhiên và những ứng dụng yêu cầu lưu giữ thông tin dài hạn. Cấu trúc của LSTM bao gồm nhiều đơn vị Cell kết nối với nhau như Hình 3.1, trong đó mỗi đơn vị chứa các công điều khiển giúp lọc, cập nhật và duy trì thông tin một cách có chọn lọc, từ đó nâng cao hiệu quả xử lý dữ liệu tuần tự.

Mô hình LSTM tối thiểu bao gồm ba thành phần chính: lớp đầu vào, lớp đầu ra và các lớp LSTM gồm nhiều đơn vị ẩn nằm giữa như minh họa trong Hình 3.2. Quá trình hoạt động của LSTM diễn ra theo sáu bước cơ bản. Đầu tiên, mô hình tiếp nhận thông tin đầu vào cùng trạng thái bộ nhớ và trạng thái ẩn từ bước trước. Tiếp theo, công quên quyết định loại bỏ hoặc giữ lại một phần thông tin từ bộ nhớ cũ, trong khi công nhập xác định dữ liệu mới cần được bổ sung. Sau đó, bộ nhớ được cập nhật bằng cách kết hợp thông tin hiện tại với dữ liệu đã được chọn lọc. Tiếp theo, công đầu ra điều



Hình 3.1. Cấu trúc một đơn vị của LSTM



Hình 3.2. Cấu trúc mạng nơ ron LSTM

chính trạng thái ẩn mới dựa trên dữ liệu lưu trữ, giúp mô hình xác định mối quan hệ giữa các bước trong chuỗi thời gian. Cuối cùng, trạng thái ẩn mới này được chuyển sang bước tiếp theo, tiếp tục quá trình học và dự báo. Các công thức toán học liên quan đến cơ chế hoạt động của LSTM được trình bày trong [99], như sau:

$$f_t = \sigma(W_f X_t + W_{Hf} h_{t-1} + b_f) \quad (3-39)$$

$$i_t = \sigma(W_i X_t + W_{Hi} h_{t-1} + b_i) \quad (3-40)$$

$$O_t = \sigma(W_o X_t + W_{Ho} h_{t-1} + b_o) \quad (3-41)$$

$$C_t = C_{t-1} \otimes f_t + i_t \otimes \tanh(W_c X_t + W_{Hc} h_{t-1} + b_c) \quad (3-42)$$

$$h_t = O_t \otimes \tanh(C_{t-1}) \quad (3-43)$$

Ma trận trọng số, các biến thiên vị được hiển thị dưới dạng $W(f, i, O, C)$ và $b(f, i, O, C)$ tương ứng. Ở đây, h_{t-1} biểu thị đơn vị ẩn trước đó là phép cộng phần tử

theo trọng số và C_t trở thành Cell hiện tại sau khi xử lý. Phép nhân theo phần tử giữa đơn vị đầu vào, đơn vị ô và đơn vị đầu ra của các lớp ẩn được biểu thị bằng \otimes . Các hàm biến đổi được biểu diễn bằng tanh và σ . Các phương trình (3-39) - (3-41) lần lượt biểu diễn các giá trị quên, đầu vào và đầu ra. Phương trình (3-42) và (3-43) hiển thị ô nhớ hiện tại và đơn vị ẩn ở bước thời gian t .

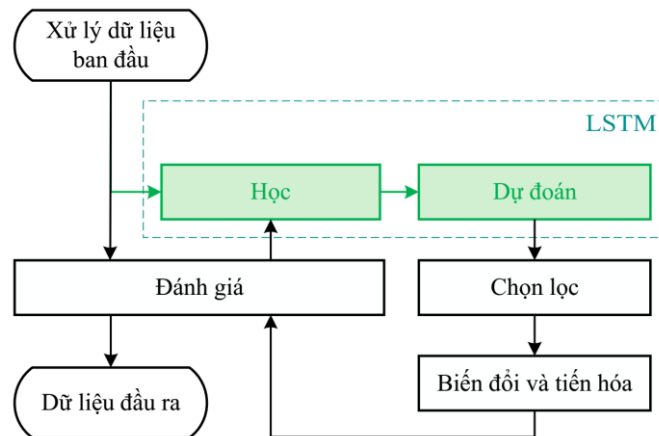
Do khả năng quản lý dòng thông tin hiệu quả, LSTM được xem là một trong những mô hình tiên tiến trong xử lý dữ liệu chuỗi thời gian. Trong các ứng dụng dự báo, LSTM có thể nắm bắt và mô hình hóa xu hướng biến đổi theo thời gian, góp phần nâng cao độ chính xác. Việc tối ưu quá trình huấn luyện kết hợp với các phương pháp hiện đại giúp LSTM cải thiện hiệu suất, đặc biệt trong các bài toán phức tạp với dữ liệu có mức độ biến động cao.

3.3.2. Thuật toán lai thông minh nhân tạo – metaheuristic đề xuất

3.3.2.1. Cấu trúc

Cấu trúc vận hành của hai thuật toán GA và PSO có điểm đặc trưng là mỗi cá thể hoạt động độc lập nhưng vẫn chịu sự chi phối bởi tiến trình tiến hóa chung. Quá trình này vừa mang tính cạnh tranh vừa có sự hợp tác, hướng đến mục tiêu tối ưu. Nhờ vậy, các vòng lặp sau thường có chất lượng gen cao hơn, tiệm cận nghiệm tối ưu hơn so với vòng lặp trước. Nói cách khác, sự phát triển của các cá thể không chỉ tiến bộ theo thời gian mà còn có thể đạt được mức hiệu quả vượt trội so với trạng thái ban đầu, tương tự như sự tiến bộ trong xã hội.

Dựa trên nguyên lý này, nếu trong một quần thể tồn tại một số cá thể mang những đặc tính vượt trội của tương lai, thì các cá thể này có thể đóng vai trò như một tác nhân thúc đẩy sự phát triển chung. Trong thuật toán GA, cá thể ưu việt này có khả năng đẩy nhanh quá trình tiến hóa, trong khi ở PSO, nó có thể giúp tăng tốc độ hội tụ và định hướng các cá thể khác đến nghiệm tối ưu một cách hiệu quả hơn. Kết quả là toàn bộ hệ thống có thể đạt được trạng thái tối ưu với tốc độ nhanh hơn và độ chính xác cao hơn.



Hình 3.3. Chu trình dự đoán trong quá trình tiến hóa của chu trình MH

Sử dụng khả năng dự đoán theo trục thời gian của LSTM, thuật toán đề xuất có thể dự đoán trước các đặc tính ưu việt tương lai và gán cho một số cá thể trong GA hoặc xác định tọa độ cá thể trong PSO. Những cá thể "hiện đại" này được hòa nhập vào cộng đồng hiện tại, đóng vai trò như những nhân tố dẫn dắt, giúp tăng tốc độ hội tụ, nâng cao hiệu quả tối ưu toàn cục và phát huy sự phát triển ổn định quá trình giải bài toán.

3.3.2.2. Nguyên lý lai hóa các thuật toán

Trong thuật toán tối ưu GA và PSO, quá trình tiến tới mục tiêu dựa trên tương tác cộng đồng phát huy các tố chất nổi bật của từng cá thể và kìm hãm các yếu tố bất lợi. Vì hoạt động cộng đồng nên sự dẫn dắt của các cá thể nổi trội đóng vai trò quan trọng trong việc vượt qua các chướng ngại vật và tăng tốc độ đi đến kết quả. Ý tưởng mới được đặt ra là bổ sung và hình thành các cá thể tương lai trong cộng đồng, các cá thể này thường giỏi, sẽ tương tác và góp phần dẫn dắt hướng đi cho cả cộng đồng. Bằng trí thông minh nhân tạo, nhiệm sắc thể của các cá thể tương lai trong thuật toán GA được dự đoán; hoặc tọa độ vị trí và tốc độ của các cá thể tương lai trong thuật toán PSO được dự đoán. Kết quả hình thành hai thuật toán tối ưu lai mới: LSTM-GA và LSTM-PSO.

3.3.2.3. Lai LSTM-GA

Hình 3.3 thể hiện một chu trình kết cấu lai LSTM-GA. Các biến đầu vào và ra tương tự thuật toán gốc, khác biệt ở điểm thuật toán deep learning được cấy vào bên trong thuật toán tiến hóa như là một bước biến đổi trong chu trình tiến hóa GA. Bước biến đổi được bổ sung này là kết quả dự đoán nhiễm sắc thể đã được tiến hóa hiện đại hơn bằng thuật toán LSTM với kiến trúc dự đoán hồi quy theo thời gian. Các cá thể mang nhiễm sắc thể mới tốt hơn đó được thâm nhập vào cộng đồng cư dân để hoạt động tiến hóa cùng với cộng đồng để mang lại sự tiến hóa tốt hơn. Quá trình này thể hiện qua năm bước được biểu diễn,

Gen 1	Gen 2	Gen 3	Gen 4
-------	-------	-------	-------

Hình 3.4. Nhiễm sắc thể điển hình 2 trang trại gió

Bước 1: Thiết lập hệ thống và định nghĩa tham số ban đầu

Tiến hành cấu hình các thông số của HTĐ, bao gồm đặc điểm của nguồn phát, tải tiêu thụ, cùng với cấu trúc lưới điện và tham số điều kiện vận hành các nút và đường dây truyền tải. Sử dụng mô hình Weibull để xác định phân bố xác suất của tốc độ gió tại các trang trại ĐG, từ đó xây dựng phân bố xác suất của công suất phát nhằm mô phỏng sự dao động và tính không ổn định của nguồn năng lượng gió.

Khởi tạo các tham số cho thuật toán GA, định nghĩa nhiễm sắc thể biểu diễn đặc trưng từng cặp hai gen cho từng nguồn điện gió, Hình 3.4 mô tả nhiễm sắc thể của 2 nguồn ĐG, cụ thể:

Gene 1: Mức chênh lệch công suất gió giữa dự đoán và chào thầu ĐG 1. Giới hạn công suất tối đa tương ứng công suất định mức của điện gió.

Gene 2: Công suất bộ ESS để bù đắp sự sai lệch của điện gió 1. Giới hạn công suất tối đa bằng lượng bù cho công suất định mức của điện gió.

Trang trại ĐG thứ 2 trong hình được biểu diễn bởi cặp (gen 3 và gen 4) tương ứng.

Khởi tạo tham số mạng LSTM, bao gồm cấu trúc các lớp đầu vào, đầu ra và số lớp ẩn LSTM trung gian; các tham số huấn luyện quan trọng cho quá trình dự đoán nhiệm sắc thể tương lai.

Bước 2: Khởi tạo quần thể ban đầu, ngẫu nhiên một quần thể được tạo.

Bước 3: Tính toán giá trị mục tiêu từng cá thể và đánh giá cá thể

Tiến hành phân bố công suất vận hành tối ưu trong HTĐ. Trên cơ sở đó xác định phân bố công suất các nguồn điện là cơ sở tính toán đơn giá điện bình quân và xác định bán điện của ĐG và tính giá trị hàm mục tiêu cho từng phần tử trong tập hợp giải pháp.

Bước 4: Huấn luyện LSTM và thực thi thuật toán GA.

Truyền dữ liệu quần thể cho LSTM huấn luyện: Đối với vòng lặp ban đầu, xử lý chuẩn hóa dữ liệu đầu vào và huấn luyện kiến trúc được thực hiện; Đối với các vòng lặp tiếp theo, cập nhật mô hình bằng dữ liệu mới.

Dự đoán nhiệm sắc thể của cá thể tương lai, có thể dự đoán thể hệ kế cận hoặc nhiều thế hệ tương lai.

Thực thi thuật toán GA gồm:

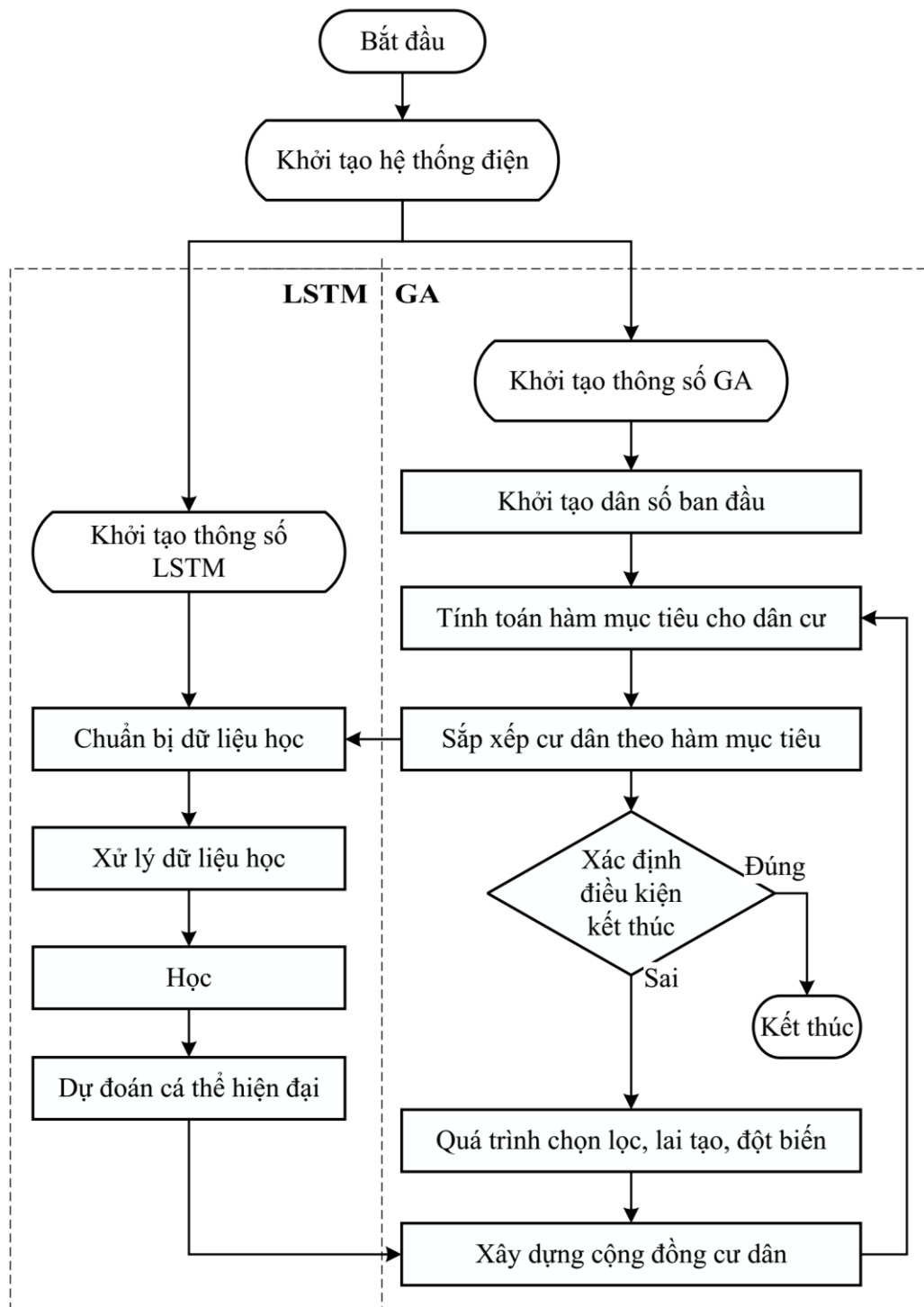
Cập nhật các cá thể đã dự đoán bằng LSTM vào trong quần thể hiện tại.

Hoạt động biến đổi và tiến hóa trong quần thể: chọn lọc, lai tạo và đột biến.

Bước 5: Xây dựng thế hệ mới tương ứng vòng lặp mới và đánh giá mục tiêu

Hình thành quần thể mới dựa trên các cá thể đã biến đổi, tiến hóa và dự đoán để hình thành một cộng đồng trong vòng lặp mới. Thế hệ cộng đồng trong vòng lặp mới này sau khi được kiểm tra điều kiện kết thúc nếu không đạt thì tiếp tục quay lại Bước 3.

Lưu đồ thuật toán lai LSTM-GA được minh họa trong *Hình 3.5*, trong đó quá trình xử lý dữ liệu đầu vào, huấn luyện và dự đoán tương lai bằng học sâu được tích



Hình 3.5. Lưu đồ thuật toán LSTM-GA

hợp trực tiếp vào cơ chế vận hành của GA. Thông tin về nhiệm sắc thể của các cá thể trong quần thể được sử dụng để đào tạo kiến trúc LSTM, giá trị độ lệch mục tiêu cá thể trong cộng đồng được gán cho hàm loss để nhằm nâng cao độ chính xác dự báo. Các cá thể sau khi được dự đoán bởi LSTM sẽ được đưa vào vòng lặp tiếp theo để thực hiện

quá trình lai ghép và đột biến. Phương pháp này góp phần nâng cao khả năng tìm kiếm nghiệm tối ưu toàn cục và rút ngắn số vòng lặp tiến hóa cần thiết.

3.3.2.4. Lai LSTM-PSO

Tương tự như lai với GA, mạng LSTM được nhúng trong chu trình PSO để dự đoán tương lai dịch chuyển các cá thể nổi bật để sử dụng chúng dẫn dắt cộng đồng nhanh chóng hướng đến mục tiêu. Chu trình của thuật toán lai thể hiện trên Hình 3.5 theo các bước:

Bước 1: Thiết lập hệ thống và định nghĩa tham số ban đầu – thông số HTĐ và các nguồn điện, trong đó có phân bố mật độ xác suất điện gió được thiết lập.

Cài đặt các tham số hoạt động cho PSO, diễn hình như số cá thể trong quần thể, quán tính, tỷ lệ tương tác,, và định nghĩa biến gắn liền với cá thể ($x_1, x_2, x_3, x_4, \dots$), mỗi cặp biến thể hiện thông số của một trang trại điện gió tương ứng:

x_1 : Mức chênh lệch công suất gió giữa dự đoán và chào thầu. Giới hạn công suất tối đa tương ứng công suất định mức của điện gió.

x_2 : Công suất bộ ESS để bù đắp sự sai lệch của điện gió. Giới hạn công suất tối đa bằng lượng bù cho công suất định mức của điện gió.

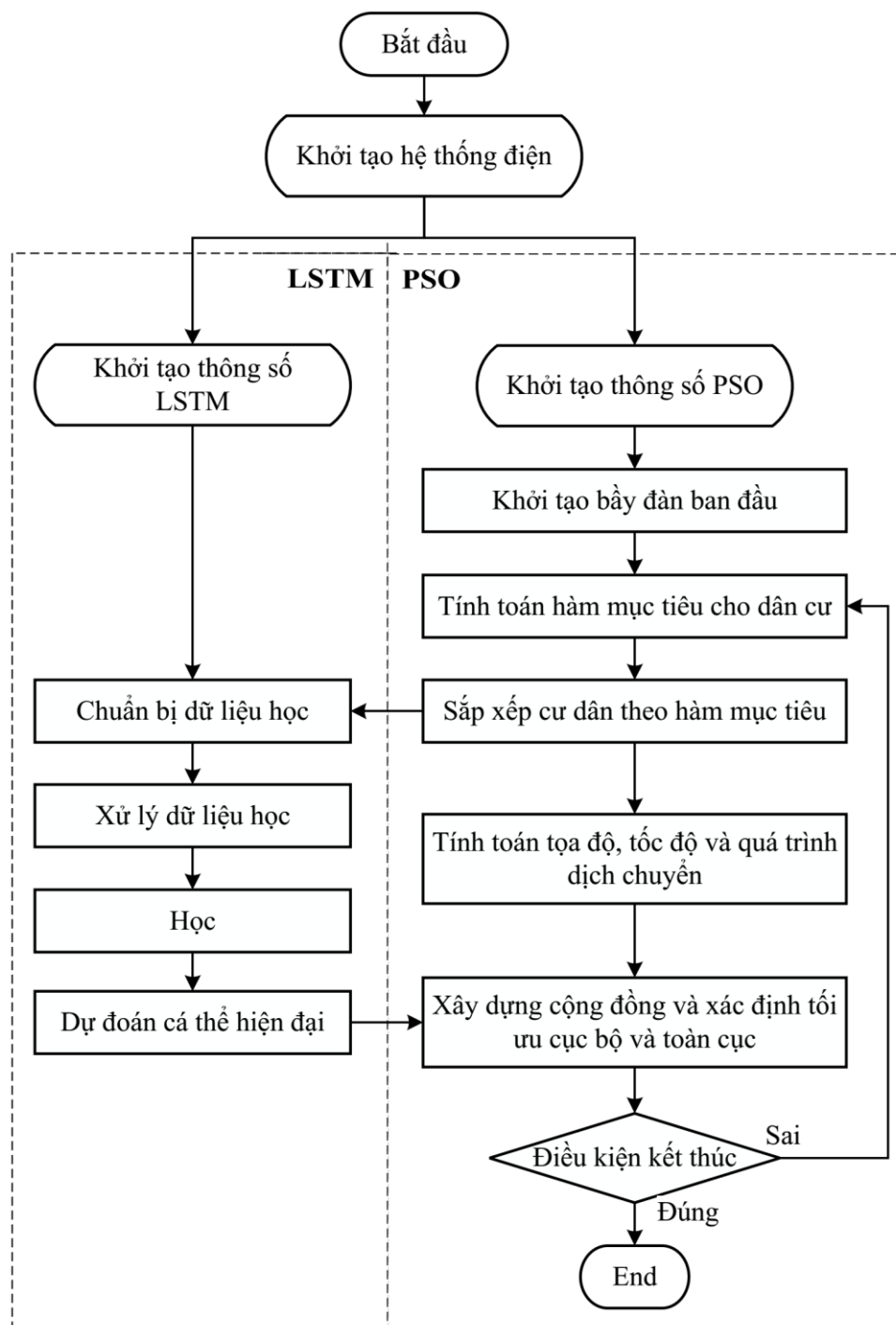
Khi có nhiều trang trại điện gió tham gia trong liên kết, từng cặp (x_1, x_2), (x_3, x_4), ... tương ứng tham số của từng trang trại điện gió.

Tiếp theo sau là khởi tạo tham số cấu trúc mạng LSTM, bao gồm số lớp đầu vào/đầu ra, số lớp ẩn, và thiết lập các tham số ban đầu.

Bước 2: Ngẫu nhiên khởi tạo một quần thể ban đầu

Bước 3: Tính toán hàm mục tiêu từng cá thể và sắp xếp vị trí

Phân bố công suất trên HTĐ để lấy dữ liệu xác định giá bán điện của các ĐG và tính toán giá trị hàm mục tiêu cho từng cá thể trong quần thể trong các phạm vi ràng buộc.



Hình 3.6. Lưu đồ LSTM-PSO

Bước 4: Huấn luyện mô hình LSTM và thực thi thuật toán PSO

Việc truyền dữ liệu cho LSTM và huấn luyện tương tự như thuật toán lai LSTM-GA, sau khi huấn luyện tiến tới dự đoán xu hướng dịch chuyển để xác định vị trí tương

lai của các cá thể nổi trội trong quần thể. Các thông số vị trí dự đoán này được gán cho các cá thể mới, gọi là cá thể tương lai.

Song song đó, quá trình dịch chuyển của các cá thể trong PSO được thực hiện theo đúng quy luật bày đàn đã được thiết lập.

Bước 5: Xây dựng cộng đồng mới và đánh giá lại mục tiêu

Cộng đồng mới được xác định gồm các cá thể đã dịch chuyển đến vị trí mới sau bước lặp kết hợp với các cá thể được dự đoán được bổ sung. Cộng đồng mới được kiểm tra điều kiện kết thúc, nếu không đạt thì tiếp tục quay lại Bước 3.

3.4. Thực nghiệm

3.4.1. Xây dựng các kịch bản thử nghiệm

Năm kịch bản được xem xét thử nghiệm cùng giải bài toán với dữ liệu đầu vào như nhau và so sánh đánh giá dựa vào sự khác biệt phương pháp giải bài toán, trong đó có 1 kịch bản giải bằng phương pháp toán học gần đúng khi công suất điện gió thay đổi rời rạc, 2 kịch bản bằng phương pháp tối ưu gốc, và 2 kịch bản tối ưu bằng phương pháp mới:

- Kịch bản 1: Rời rạc hóa công suất điện gió trong phương pháp tối ưu toán học.
- Kịch bản 2 (GA): tối ưu bằng thuật toán GA gốc.
- Kịch bản 3 (LSTM-GA): sử dụng thuật toán lai mới LSTM-GA.
- Kịch bản 4 (PSO): thuật toán tối ưu PSO gốc
- Kịch bản 5 (LSTM-PSO): thuật toán lai mới LSTM-PSO.

Ngoài ra, kết quả còn so sánh với kịch bản 6, là kịch bản tối ưu trong nghiên cứu công bố tại [79] bằng phương pháp số nguyên tuyến tính đã trình bày Chương 2.

3.4.2. Dữ liệu đầu vào

3.4.2.1. Hệ thống điện chuẩn IEEE 30-bus

Thông số và dữ kiện của HTĐ chuẩn IEEE 30-bus, nguồn ĐG, ESS đã được mô tả và cung cấp trong phần 2.3.6.1. Ngoài ra, các thông tin chi tiết như sau:

Bảng 3.1. Thông số cài đặt GA

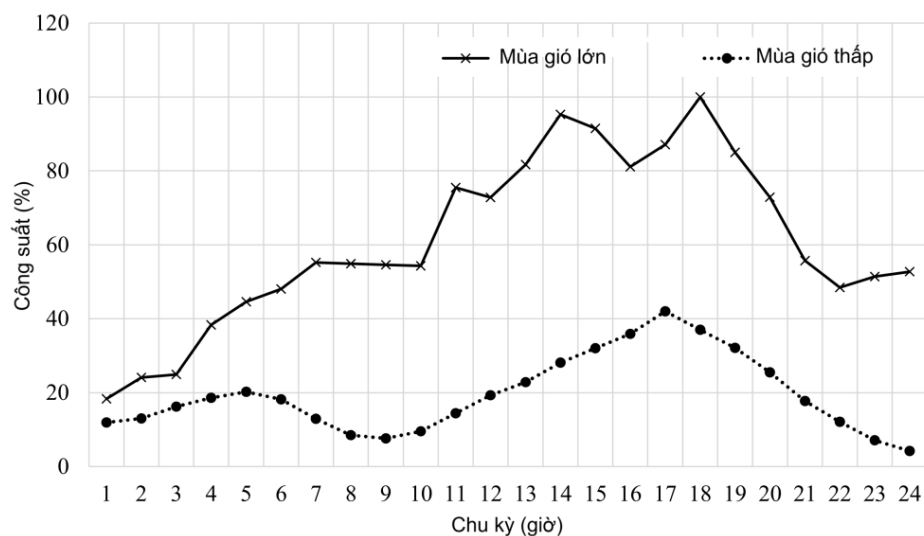
Thông số	GA gốc	GA trong lai hóa
Dân số	50	50
Tỷ lệ lai tạo	0.8	0.8
Tỷ lệ đột biến	0.1	0.1
Tỷ lệ dự đoán	Không áp dụng	0.05
Vòng lặp tối đa	20	20
Số hoạt động trong mỗi vòng lặp	3 hoạt động (chọn lựa, lai tạo, đột biến)	4 hoạt động (bổ sung hoạt động dự đoán)

Bảng 3.2. Thông số cài đặt PSO

Thông số	PSO gốc	PSO trong lai hóa
Dân số	100	100
Hệ số quán tính	0.1÷1.1	0.1÷1.1
Tỷ lệ tương tác cộng đồng	0.25	0.25
Tỷ lệ tự điều chỉnh so với tương tác cộng đồng	1.49	1.49
Tỷ lệ dự đoán	Không áp dụng	0.05
Vòng lặp tối đa	25	25
Các hoạt động trong mỗi vòng lặp	Tương tác và dịch chuyển	Ngoài tương tác dịch chuyển bổ sung thêm nhiều cá thể dự đoán

Bảng 3.3. Thông số cài đặt và huấn luyện LSTM

Kiến trúc		Huấn luyện	
Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
Lớp đầu vào	01	Số lần học tối đa	100
Lớp LSTM/đơn vị	2÷3/50÷120	Giới hạn gia tốc biến động trọng số	1
Lớp đầu ra	01	Tỷ lệ học ban đầu	0.001
Tỷ lệ loại nơ ron	0.2	Chu kỳ mỗi lần giảm số lần học	20
Số biến đầu vào	4	Số lượng mẫu mỗi nhóm dữ liệu học	20



Hình 3.7 Biểu đồ công suất gió ngày theo hai mùa

* Nguồn điện gió: Đầu tư tài chính nguồn ĐG tham khảo [100], suất đầu tư 750.000€/MW tương ứng với tuổi thọ 25 năm, chi phí O&M là 1,5%. Biểu đồ công suất phát ĐG ngày được dự đoán theo hai mùa cao điểm và thấp điểm được tham khảo trong tài liệu [3] như trên Hình 3.7.

* Bộ trữ năng ESS

Chọn lưu trữ là pin Lithium-ion để thí nghiệm, chi tiết như sau [101]: Tuổi thọ tối thiểu 10 năm. Suất đầu tư là 200 €/kWh và chi phí vận hành 3%, hiệu suất lưu trữ 90%, mỗi bước công suất thay đổi là 1MW [102].

3.4.2.2. Dữ liệu cài đặt cho thuật toán GA, PSO và kiến trúc LSTM

Cấu hình và các tham số của thuật toán GA, PSO được trình bày trong Bảng 3.1 và Bảng 3.2. Đối với kiến trúc học sâu LSTM, các tham số cấu hình và thông số phục vụ huấn luyện dự đoán được cho ở Bảng 3.3.

3.4.2.3. Công cụ thí nghiệm

Phần mềm Matlab được sử dụng để viết code và chạy thí nghiệm cùng với các công cụ ứng dụng cho HTĐ mã nguồn mở Matpower được truy cập tại [103]. Thực thi trên máy tính Windows 11, có cấu hình CPU Intel Core i7 1068G7, RAM 32Gb, RTX 3050.

3.4.3. Kết quả thử nghiệm

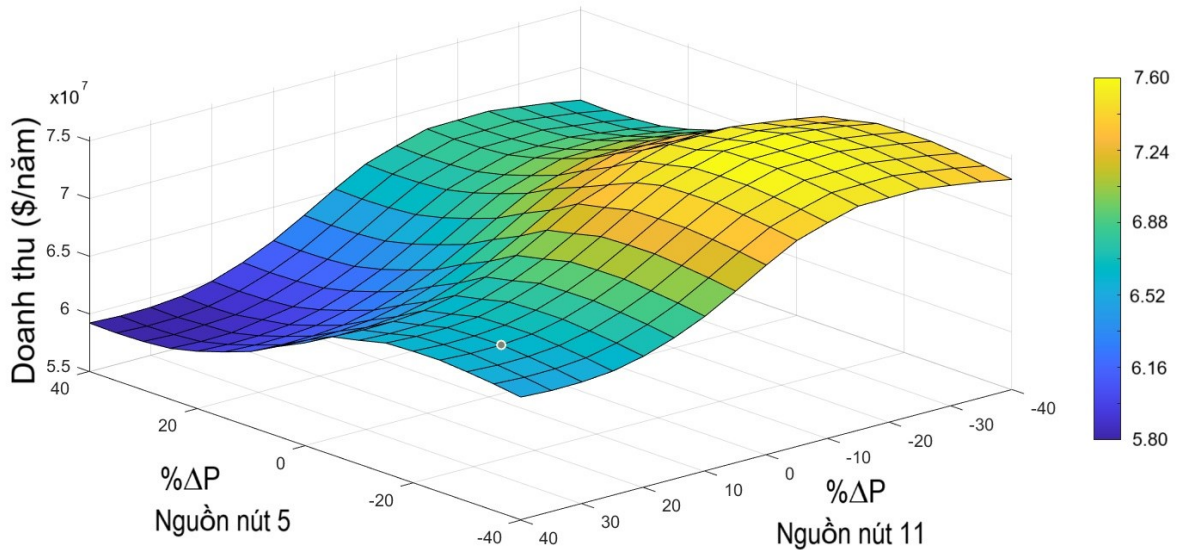
3.4.3.1. Kịch bản 1

Biến thiên rời rạc biến độ lệch công suất theo chiều tăng lên và giảm xuống, doanh thu trong kịch bản này cho kết quả trên [79]. Trong biểu đồ cho thấy doanh thu thay đổi một cách liên tục theo sự thay đổi của độ lệch công suất chào thầu điện gió so với công suất dự đoán (% ΔP), và đỉnh doanh thu luôn luôn lệch về phía âm của độ lệch công suất. Kết quả đạt đỉnh doanh thu nằm trong vùng % ΔP khoảng (-10% đến -30%) và đạt tối thiểu trong vùng (+10% đến +30%). Cực đại toàn cục của doanh thu đạt được 74 triệu \$/năm tại % $\Delta P_{bus5}=-25\%$, % $\Delta P_{bus11}=-20\%$, $P_{ESS5} = 5MW$, và $P_{ESS11} = 5MW$.

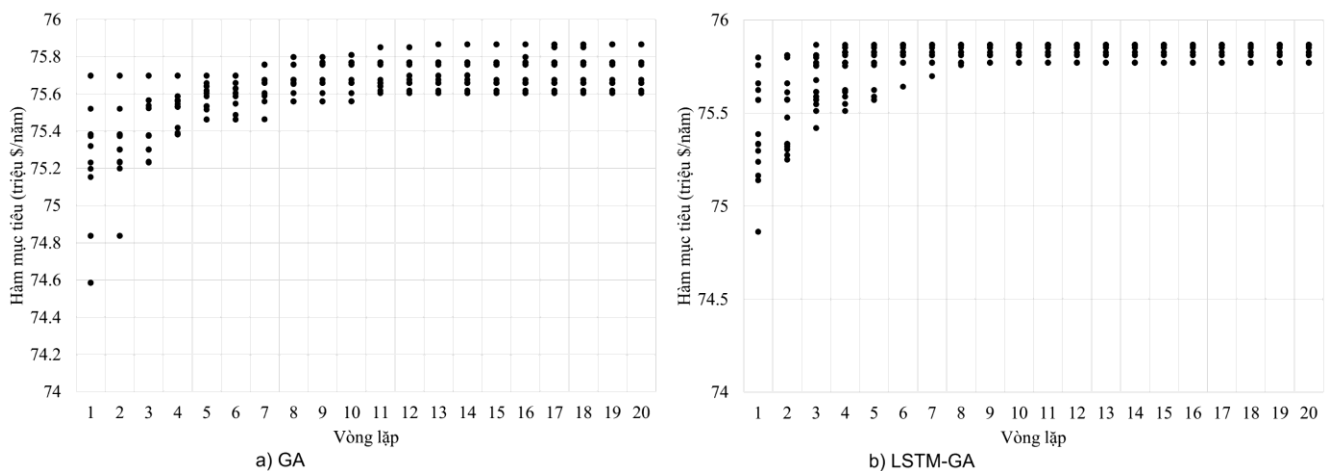
3.4.3.2. Kích bản GA và LSTM-GA

Thí nghiệm lần lượt 15 lần chạy liên tục GA và LSTM-GA cho kết quả các quỹ đạo hội tụ thể hiện trên Hình 3.9, trong đó hình (a) biểu diễn thuật toán GA và hình (b) biểu diễn LSTM-GA. Mỗi chấm biểu thị giá trị lợi ích tối ưu tại một lần lặp thực thi cụ thể. Kết quả quá trình của các lần thực thi có thể xem tại phụ lục 1. Nhận xét kết quả như trên hình như sau:

Các thuật toán được thực hiện 25 vòng lặp cho mỗi lần chạy có kết quả cho thấy ổn định mục tiêu từ vòng lặp 13 trở đi trong đa số các lần chạy, và ổn định từ vòng lặp



Hình 3.8. Phân bố doanh thu điện gió



Hình 3.9. Quá trình tiến hóa sau 20 vòng lặp GA và LSTM-GA

18 trở đi trong tất cả các vòng lặp. Vì vậy trong các hình biểu diễn chỉ thể hiện đến vòng lặp thứ 20.

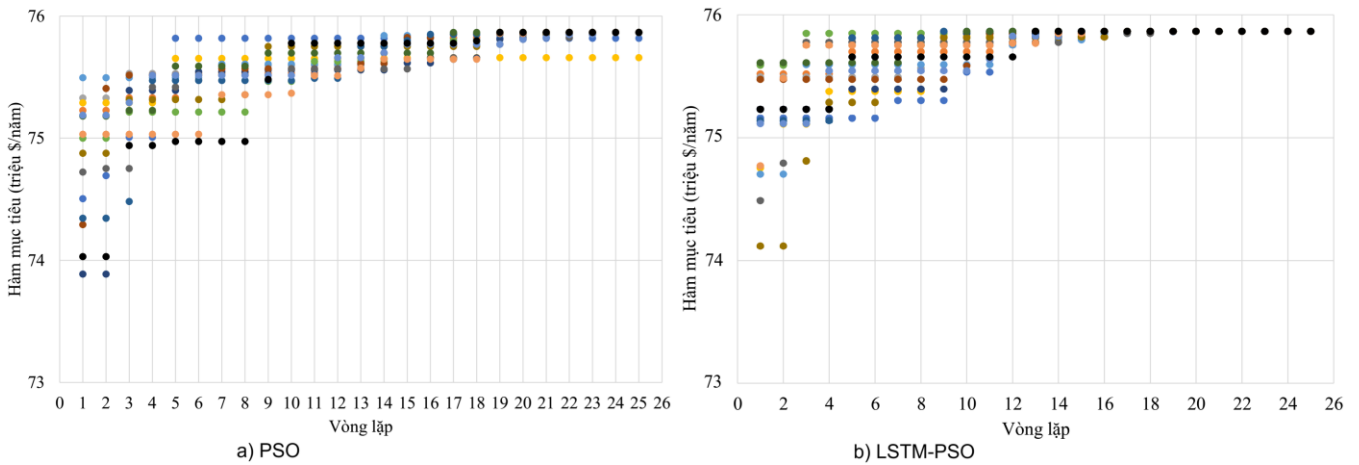
Hình (a): Kết quả của thuật toán GA thông thường cho thấy quá trình tối ưu đạt cực trị sau khoảng 10 đến 15 vòng lặp tiến hóa. Tuy nhiên, một số lần thực thi gặp phải hiện tượng mắc kẹt tại cực trị địa phương, dẫn đến sự phân tán đáng kể của nghiệm cuối cùng giữa các lần chạy. Nguyên nhân chủ yếu là do thuật toán không thể thoát khỏi các bẫy cực trị cục bộ, gây ra sự chênh lệch lớn giữa các nghiệm tối ưu thu được. Do đó, cần có các biện pháp cải tiến GA để tăng cường khả năng tránh cực trị địa phương và nâng cao độ ổn định của nghiệm tìm được.

Hình (b): Kết quả cải thiện khả năng hội tụ toàn cục đáng kể ở thuật toán LSTM-GA. Ở vòng lặp cuối cùng (vòng lặp thứ 20), các nghiệm tập trung chặt chẽ quanh một giá trị tối ưu, như vậy độ chính xác nâng lên so với thuật toán GA truyền thống. Ngoài ra, trong giai đoạn đầu của quá trình tiến hóa (từ vòng lặp 1 đến khoảng vòng lặp 10), các đường cong hội tụ có độ dốc lớn và mượt mà, đặc biệt là sau vòng lặp 4–5. Điều này cho thấy thuật toán LSTM-GA không chỉ đạt tốc độ hội tụ nhanh hơn, mà còn duy trì được sự ổn định trong quá trình tiến hóa, giúp cải thiện hiệu quả tối ưu so với GA truyền thống trong hình (a).

3.4.3.3. Kịch bản PSO và LSTM-GA

Tương tự, cũng thực thi 15 lần liên tục chạy trên các thuật toán PSO và LSTM-PSO. Kết quả quá trình hội tụ của bài toán được biểu diễn trên Hình 3.10 và nghiệm tiến tới tối ưu của từng lần thử nghiệm, xem số liệu tại PHỤ LỤC 1: Quá trình tối ưu hóa các thuật toán .

Hình (a): Kết quả phân tích cho thấy quá trình hội tụ diễn ra với mức độ biến động cao, trong đó xuất hiện một số giai đoạn có sự thay đổi đột ngột, gây ảnh hưởng đến tính ổn định của quá trình tối ưu. Thời gian hội tụ có thể kéo dài đến vòng lặp thứ 25, và trong một số trường hợp, thuật toán không đạt được giá trị cực trị toàn cục mà dừng lại tại một cực trị địa phương.



Hình 3.10. Quá trình hội tụ sau 25 vòng lặp PSO và LSTM-PSO

Hình (b): Điểm hội tụ của thuật toán LSTM-PSO nằm chủ yếu trong khoảng vòng lặp thứ 15 và tập trung rõ rệt tại vòng lặp thứ 17. Trong 5 vòng lặp đầu, sự phân bố của các điểm hội tụ tương tự như trong Hình (a), nhưng từ các vòng lặp tiếp theo, các giá trị dần hội tụ chặt chẽ hơn. Đặc biệt, từ vòng lặp thứ 18 trở đi, tất cả các lần thực thi đều hội tụ vào một điểm cực trị toàn cục, hầu như không gặp phải tình trạng kẹt trong cực trị địa phương như quan sát thấy ở Hình (a).

3.4.4. Thảo luận

3.4.4.1. Đánh giá hiệu quả đầu tư điện gió

Mô hình kết hợp ba dạng nguồn điện gió – nhiệt – trữ năng đã được đề xuất nhằm nâng cao hiệu quả đầu tư ĐG trong bối cảnh TTĐ cạnh tranh, đồng thời xem xét tác động của tính bất định từ nguồn năng lượng gió. Tính hiệu quả của mô hình này đã được phân tích trong Chương 2. Trong phần này, các thuật toán tối ưu tiên tiến được áp dụng để đánh giá mức độ cải thiện lợi ích kinh tế mà mô hình đề xuất mang lại.

Cụ thể, Bảng 3.4 trình bày kết quả thử nghiệm của sáu kịch bản khác nhau, bao gồm: Một kịch bản tham chiếu từ nghiên cứu trước [79]; Ba kịch bản sử dụng các phương pháp tối ưu truyền thống để so sánh; và hai kịch bản áp dụng thuật toán tối ưu lai mới đề xuất.

Kết quả phân tích cho thấy, trong bốn kịch bản áp dụng phương pháp tối ưu meta-heuristic, kịch bản 2 đến 5, doanh thu cao hơn so với 71 triệu USD/năm khi sử dụng phương pháp tối ưu tuyến tính trong kịch bản 6 và 74 triệu USD/năm đối với phương pháp toán học được rời rạch công suất điện gió trong kịch bản 1. Sự chênh lệch

Bảng 3.4. So sánh chỉ tiêu các kịch bản

Kịch bản		Rời rạc CS ĐG	GA	LSTM- GA	PSO	LSTM- PSO	[79] ¹
		1	2	3	4	5	6
Độ lệch %ΔP	Bus 5	-25%	(-15%)÷ (-28%)	(-15%)÷ (-18%)	(-15.6%)÷ (-16.5%)	(-15.7%)÷ (-16.5%)	-30%
	Bus 11	-20%	(-16%)÷ (-28%)	(-16%)÷ (-17%)	(-15.6%)÷ (-26%)	(-15.6%)÷ (-16.5%)	-30%
Công suất điện gió chào thầu cao nhất (MW)		104	97÷114	111÷114	100÷114	113÷114	95
Công suất ESS (MW)		10	18	19	16	16	10
Doanh thu (triệu \$/năm)		74	73.32÷ 75.90	75.75÷ 75.94	74.86÷ 75.94	75.84÷ 75.94	71

này có thể bắt nguồn từ việc các phương pháp toán học truyền thống thường dựa trên các giả định gần đúng, làm tăng sai số so với các phương pháp tối ưu hiện đại.

Tại điểm công suất ĐG tối ưu, tương ứng với độ lệch công suất chào thầu gọi là độ lệch tối ưu (%ΔP_{op}), thể hiện trên Bảng 3.4 cho thấy tất cả các giá trị khuyến khích đều âm, đồng thời phạm vi tối ưu dần thu hẹp theo thứ tự kịch bản 6 → 2 → 1 → 4 → 3 → 5. Trong đó, kịch bản 3 và 5, ứng với thuật toán LSTM-GA và LSTM-PSO, có giá trị %ΔP_{op} tập trung và sát với công suất ĐG dự đoán nhất, với độ lệch dao động trong khoảng -15% đến -18%.

Như vậy, các phương pháp tối ưu lai giúp chủ đầu tư ĐG tự tin hơn khi chào thầu với công suất tối ưu lớn hơn, cao hơn 20% so với kịch bản 6 đã được công bố trong [79] như đã nêu. Cụ thể, hai nguồn ĐG trong các kịch bản 3 và 5 được khuyến khích đấu thầu tới 114 MW, trong khi kịch bản 6 chỉ đạt mức 95 MW.

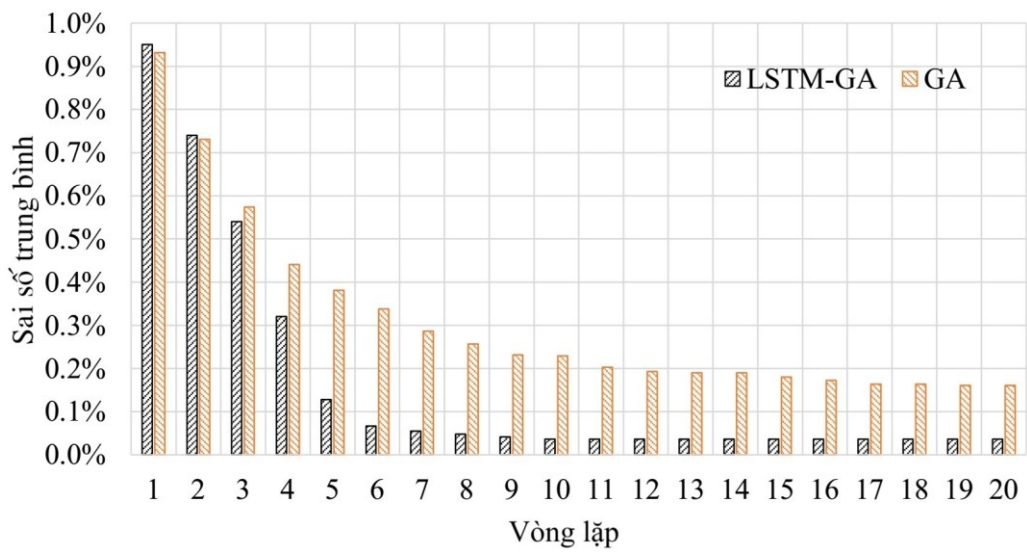
Do đó, trong mô hình liên kết ba dạng nguồn điện, phương pháp tối ưu lai được đề xuất đã cho thấy tiềm năng trong việc cải thiện hiệu suất khai thác ĐG, hỗ trợ quá trình chuyển đổi sang năng lượng bền vững và nâng cao giá trị kinh tế – xã hội.

3.4.4.2. Đánh giá các thuật toán lai

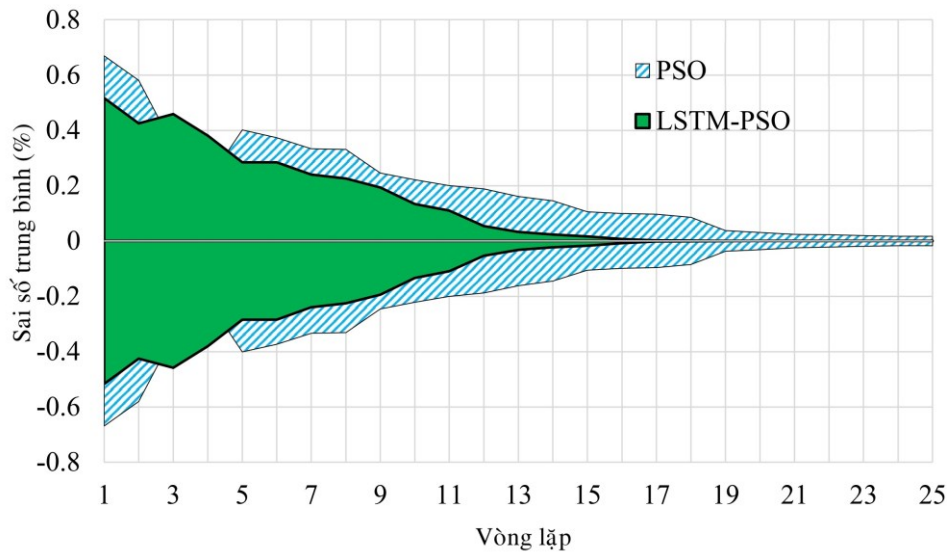
Hình 3.11 minh họa quá trình hội tụ của hai thuật toán: GA truyền thống và LSTM-GA lai, được thể hiện thông qua giá trị sai số cực trị trung bình qua từng vòng

lập. Kết quả cho thấy tốc độ hội tụ của thuật toán LSTM-GA được cải thiện đáng kể so với GA truyền thống.

Trong năm vòng lặp đầu tiên, sự tiến hóa của quần thể diễn ra tương đồng giữa hai thuật toán, cho thấy việc tích hợp LSTM chưa tác động đáng kể đến hiệu suất tối ưu hóa trong giai đoạn này. Điều này có thể được giải thích bởi quá trình huấn luyện ban đầu của mạng LSTM, khi dữ liệu huấn luyện vẫn còn phân tán và trọng số của mạng nơ-ron chưa hội tụ đến trạng thái tối ưu.



Hình 3.11. So sánh quá trình hội tụ GA và LSTM-GA



Hình 3.12. So sánh quá trình hội tụ PSO và LSTM-PSO

Tuy nhiên, từ vòng lặp thứ sáu trở đi, tốc độ cải thiện chất lượng quần thể của LSTM-GA bắt đầu vượt trội so với GA truyền thống. Đặc biệt, LSTM-GA đạt cực trị trong khoảng vòng lặp thứ 9–10, trong khi GA truyền thống cần đến 16–17 vòng lặp để đạt cực trị tương tự. Như vậy, thuật toán lai không chỉ giúp tăng tốc độ hội tụ, mà còn đảm bảo mức độ ổn định với sự biến động nhỏ hơn sau khi đạt cực trị, thường chỉ mất thêm 2–3 vòng lặp để hoàn toàn ổn định. Điều này giúp rút ngắn thời gian hội tụ từ 6 đến 8 vòng lặp so với GA truyền thống, như minh họa trong hình.

Ngoài ra, chất lượng hội tụ của LSTM-GA cũng cao hơn đáng kể. Ở vòng lặp cuối cùng, sai số tối ưu trong GA truyền thống vẫn dao động khoảng 0,2%, trong khi LSTM-GA chỉ sai lệch dưới 0,05%. Điều này cho thấy quần thể trong GA có mức phân tán cao hơn, làm tăng nguy cơ mắc kẹt trong cực trị địa phương. Ngược lại, LSTM-GA giúp quần thể hội tụ tập trung hơn, nâng cao xác suất đạt đến cực trị toàn cục, góp phần cải thiện hiệu quả tối ưu hóa của thuật toán.

Giống như các so sánh trên, Hình 3.12 mô tả quá trình hội tụ của hai phương pháp: PSO truyền thống và thuật toán lai LSTM-PSO. Kết quả cho thấy thuật toán lai có tốc độ hội tụ vượt trội, giúp nâng cao hiệu quả tối ưu so với PSO truyền thống.

Trong giai đoạn đầu, khoảng 10 vòng lặp đầu tiên, cả hai thuật toán có xu hướng tiến hóa quần thể tương đồng. Tốc độ cải thiện của các cá thể tăng lên một cách từ từ, với sự chênh lệch về sai số giữa hai phương pháp không đáng kể. Điều này cho thấy ảnh hưởng của LSTM trong giai đoạn khởi đầu vẫn còn hạn chế, tương tự như những quan sát trước đó với thuật toán LSTM-GA. Nguyên nhân chủ yếu do mạng LSTM chưa đạt trạng thái hội tụ trong quá trình huấn luyện ban đầu, dẫn đến khả năng dự báo và điều chỉnh quần thể chưa đem lại hiệu suất tối ưu đáng kể.

Nhưng từ giai đoạn tiếp theo, thuật toán lai cho thấy sự bứt phá rõ rệt với tốc độ hội tụ nhanh hơn đáng kể. Cụ thể, LSTM-PSO đạt cực trị chỉ sau khoảng 6 vòng lặp, trong khi PSO truyền thống cần hơn 10 vòng lặp để đạt được kết quả tương đương. Đáng chú ý, sai số cực trị của LSTM-PSO gần như bằng không, trong khi PSO truyền thống vẫn duy trì một mức sai số nhất định, cho thấy chất lượng hội tụ của thuật toán lai cao hơn.

Ngoài ra, kết quả cũng chỉ ra rằng LSTM-PSO có tính ổn định cao hơn giữa các lần thực thi khác nhau. Cụ thể, các giá trị cực trị đạt được trong thuật toán lai có mức độ tập trung cao, với sai số nhỏ và ít biến động giữa các lần chạy. Ngược lại, PSO truyền thống vẫn thể hiện sự phân tán của các giá trị cực trị, dù không quá lớn nhưng cũng phản ánh sự thiếu nhất quán trong kết quả tối ưu hóa. Điều này càng khẳng định rằng việc tích hợp LSTM vào PSO không chỉ tăng tốc độ hội tụ mà còn cải thiện độ chính xác và tính ổn định của kết quả tối ưu.

Như vậy, quá trình hội tụ của các thuật toán lai nói chung có thể được chia thành ba giai đoạn chính:

- Giai đoạn khởi đầu: Trong những vòng lặp đầu tiên (khoảng 5-10 vòng), do dữ liệu huấn luyện cho mạng LSTM còn hạn chế, thuật toán lai chưa thể phát huy hiệu quả tối ưu. Tốc độ cải thiện chất lượng cá thể trong quần thể tương đương với thuật toán gốc.

- Giai đoạn tăng tốc: Khi số vòng lặp tiếp tục tăng (khoảng 5-10 vòng tiếp theo), mạng LSTM dần hoàn thiện quá trình huấn luyện, giúp thuật toán lai tăng tốc hội tụ mạnh mẽ. Kết quả cho thấy số vòng lặp cần thiết để đạt cực trị có thể được rút ngắn từ 10-15 vòng, giúp tốc độ tối ưu nhanh hơn đáng kể so với các thuật toán truyền thống.

- Giai đoạn hội tụ ổn định: Ở các vòng lặp cuối, thuật toán đạt trạng thái hội tụ, nhưng thuật toán lai cho kết quả tập trung hơn và ít phân tán hơn, thể hiện khả năng vượt bẫy cực trị địa phương tốt hơn nhờ vào khả năng dự đoán và điều chỉnh thông minh của LSTM.

3.5. Kết luận

3.5.1. Hiệu quả đạt được của các thuật toán lai

Nghiên cứu này đánh dấu một bước tiến quan trọng trong tối ưu hóa thông minh, khi tích hợp thông minh nhân tạo vào cấu trúc của các thuật toán tối ưu meta-heuristic truyền thống cải thiện đáng kể tốc độ hội tụ, độ chính xác và khả năng tìm kiếm nghiệm tối ưu toàn cục. Các mô hình lai LSTM-GA và LSTM-PSO đã chứng minh hiệu suất vượt trội so với phiên bản ban đầu, không chỉ giảm số vòng lặp hội tụ

từ 6 đến 10 lần mà còn giảm sai số tối ưu một cách đáng kể, đồng thời tăng cường tính ổn định và độ tin cậy của kết quả. Chi tiết các đột phá chính có thể kể đến là:

1. Tăng tốc hội tụ: Trong khi GA và PSO truyền thống mất hơn 16-17 vòng lặp để đạt cực trị, thuật toán lai chỉ khoảng 6-10 vòng lặp, giúp tốc độ tối ưu nhanh hơn từ 40% đến 60%. Điều này mang lại bước đột phá trong tốc độ tính toán, cho phép áp dụng rộng rãi vào các hệ thống đòi hỏi khả năng xử lý tức thời.

2. Ổn định nghiệm: Không chỉ hội tụ nhanh hơn, thuật toán lai còn giảm đáng kể mức sai số tối ưu. Ở vòng lặp cuối, thuật toán GA và PSO truyền thống vẫn dao động với sai số lên đến 0,2%, trong khi LSTM-GA và LSTM-PSO chỉ còn dưới 0,05%. Điều này chứng tỏ một bước tiến vượt bậc về độ chính xác, đảm bảo quần thể không bị phân tán và giảm nguy cơ mắc kẹt trong bẫy cực trị địa phương.

3. Giảm bẫy cực trị địa phương: Với tính năng dự báo và thích nghi linh hoạt của LSTM, thuật toán lai có thể hướng quần thể đến các nghiệm toàn cục một cách hiệu quả hơn. Điều này nâng cao đáng kể chất lượng tối ưu hóa, đồng thời mở rộng tiềm năng ứng dụng trong các bài toán phức tạp, đặc biệt là tối ưu doanh thu ĐG trong môi trường TTĐ có tính bất định cao.

4. Với dữ liệu và cấu hình máy tính thực nghiệm, thời gian hoàn thành mỗi lần thực thi bài toán tối ưu trong vòng 3-4 phút, và gần như ít khác biệt giữa các thuật toán. Điều này dễ hiểu vì số vòng lặp tương đồng và quy mô HTĐ 30-bus khá nhỏ nên chưa phân hóa. Tuy nhiên, khi HTĐ lớn, sự khác biệt do thời gian phân bố công suất đóng góp lớn trong thời gian tính toán hàm mục tiêu mỗi cá thể, điều này dẫn đến thời gian tối ưu càng nhanh khi số vòng lặp để đạt được tối ưu càng sớm.

3.5.2. Kiểm tra độ tin cậy hiệu quả đầu tư mô hình tích hợp điện gió

Trong Chương 2 đã mô hình hóa xác suất bất định điện gió trong thị trường điện và đề xuất mô hình nâng doanh thu điện gió, mô hình tích hợp nguồn điện gió – nhiệt – trữ năng. Bằng cách ứng dụng các thuật toán tối ưu lai mới, kết quả thực nghiệm trong chương này đã chứng tỏ hiệu quả tối ưu doanh thu điện gió trong mô hình đề xuất.

Cụ thể mức lợi nhuận tối ưu có thể đạt đến đạt 75,9 triệu USD/năm, cao hơn kết quả các phương pháp toán học truyền thống đã thực nghiệm trước đó gồm kịch bản 6 (71 triệu USD/năm) và kịch bản 1 (74 triệu USD/năm). Điều này khẳng định rằng việc áp dụng các thuật toán tiên tiến giúp giảm sai số trong dự báo và nâng cao hiệu suất tài chính của các trang trại ĐG.

Ngoài ra, phân tích độ lệch công suất tối ưu chỉ ra rằng các phương pháp tối ưu kết hợp giúp giảm biên độ dao động công suất chào thầu. Cụ thể, đề xuất chủ điện gió có thể nâng mức công suất chào thầu lên đến 114 MW, cao hơn 20% so với mức 95 MW trong nghiên cứu trước đây. Điều này cho thấy rằng các thuật toán kết hợp không chỉ cải thiện độ chính xác trong dự báo công suất ĐG mà còn hỗ trợ tối ưu chiến lược đấu thầu, từ đó gia tăng lợi nhuận.

3.5.3. Đóng góp của nghiên cứu trong chương

- Đề xuất phương pháp tối ưu lai mới dựa trên cơ sở hai thuật toán metaheuristic truyền thống là GA và PSO, bằng cách tích hợp vào cấu trúc tối ưu một kiến trúc mạng nơ ron thông minh nhân tạo LSTM. Kết quả đạt được hai thuật toán lai LSTM-GA và LSTM-PSO.

- Thực nghiệm đã đạt được hiệu quả tối ưu trên bài toán nâng doanh thu điện gió trong mô hình liên kết nguồn điện gió đã nghiên cứu trước đó.

- Đóng góp 02 công bố trên tạp chí Q1 trong cộng đồng khoa học.

**CHƯƠNG 4: ỨNG DỤNG ESS KẾT HỢP TỐI ƯU MBA TRUYỀN TẢI ĐỂ
TĂNG HIỆU QUẢ MỞ RỘNG TRANG TRẠI ĐIỆN GIÓ**

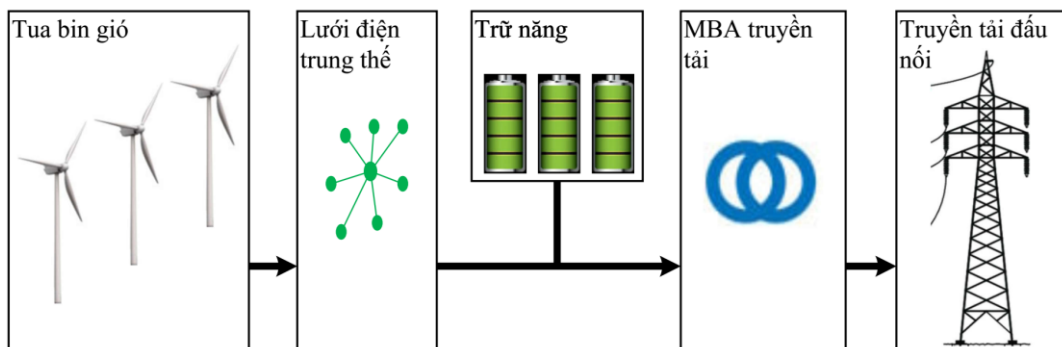
4.1. Giới thiệu

4.1.1. Vấn đề

Việc triển khai một trang trại ĐG đòi hỏi sự phân tích kỹ lưỡng trên nhiều khía cạnh, trong đó có bốn thành phần chính được minh họa trong *Hình 4.1*: (1a) hệ thống tua-bin gió, (1b) mạng lưới trung thế, (2) các máy biến áp truyền tải (sau đây gọi chung là máy biến áp), (3) hệ thống đường dây đấu nối, và (4) hệ thống ESS. Trong giai đoạn đầu phát triển ĐG, ESS chưa được ưu tiên tích hợp do các chính sách mua bán điện giá FIT chủ yếu khuyến khích khai thác tối đa công suất phát mà không cần điều tiết. Ngoài ra, chi phí đầu tư cho các máy biến áp và đường dây truyền tải thường không quá lớn, do đó hạ tầng truyền tải thường được thiết kế với hệ số dự phòng khá cao để đạt yêu cầu tiêu chuẩn và đảm bảo khả năng truyền tải công suất tối đa từ trang trại lên lưới điện.

Để tối đa hóa lợi nhuận, các nhà đầu tư có thể lựa chọn một trong hai hướng tiếp cận: (1) Phát triển một trang trại ĐG mới với đầy đủ hạ tầng, hoặc (2) Mở rộng một trang trại ĐG hiện có, tận dụng lợi thế từ hệ thống truyền tải sẵn có và áp dụng các giải pháp nâng hiệu quả.

Phương án (1) đi kèm với nhiều thách thức, bao gồm việc tìm kiếm địa điểm phù hợp và thực hiện các thủ tục pháp lý cần thiết để triển khai dự án. Ngoài yêu cầu về vốn đầu tư cao, quá trình xây dựng còn gặp khó khăn trong việc giải phóng mặt bằng, đặc biệt đối với hệ thống máy biến áp và đường dây truyền tải. Việc đấu nối vào lưới điện quốc gia thường phải đi qua các khu vực có địa hình phức tạp hoặc đô thị đông đúc, gây trở ngại lớn cho quá trình thực hiện.



Hình 4.1: Hoàn thiện một dự án đầu tư điện gió

Trong khi đó, phương án (2) có tính khả thi cao nhờ tận dụng cơ sở hạ tầng hiện có, giúp giảm đáng kể chi phí cũng như rút ngắn thời gian triển khai. Đặc biệt, việc không phải giải phóng mặt bằng cho hệ thống truyền tải giúp hạn chế các rủi ro pháp lý và kỹ thuật, khiến phương án mở rộng trở thành một lựa chọn hấp dẫn khi điều kiện phát triển bổ sung vẫn còn phù hợp.

Một số nghiên cứu gần đây trên thế giới tập trung vào việc nâng cao hiệu suất vận hành của máy biến áp trong các trang trại ĐG. Điển hình như tích hợp biến tần vào trạm biến áp để tối ưu chuyển đổi năng lượng gió [104]; cải tiến cơ chế vận hành máy biến áp nhằm nâng cao hiệu suất tua-bin gió [100]; cải thiện khả năng làm mát máy biến áp để nâng cao khả năng tải ĐG [105]; và tối ưu vận hành máy biến áp trong các cụm trang trại gió trên bờ và ngoài khơi [106].

Tuy nhiên, chưa có nghiên cứu đánh giá hiệu quả đầu tư mở rộng một trang trại ĐG mà không cần nâng cấp hệ thống truyền tải trong một tổng thể bất định điện gió trong tương lai tham gia thị trường điện cạnh tranh. Do đó, phần này đề xuất nghiên cứu đánh giá hiệu quả đầu tư các kịch bản từ xây mới đến mở rộng trang trại điện gió hiện hữu theo hai hướng tiếp cận:

(1) Tăng cường ESS để cắt đỉnh công suất truyền tải máy biến áp và ổn định công suất bất định của điện gió, tăng hiệu quả đấu thầu điện gió trên thị trường điện cạnh tranh.

(2) Tối ưu máy biến áp truyền tải bằng cách kiểm soát nhiệt độ và tuổi thọ dựa trên hàm phân bố mật độ xác suất biến đổi tốc độ gió theo biểu đồ ngày.

4.1.2. Bài toán

Bài toán xác định và đánh giá các chỉ tiêu tài chính, giá trị hiện tại ròng (NPV) và tỷ suất hoàn vốn (ROI), cho các mô hình xây dựng mới và mở rộng trang trại điện gió trong điều kiện bất định và tham đấu thầu trên thị trường điện. Công suất ESS được xem xét kết hợp tối ưu vận hành máy biến áp truyền tải để tăng hiệu quả năng lượng bất định của điện gió. Năng lượng giá trị thấp được hiểu là lượng điện gió bán

giá thấp trên thị trường hoặc đôi khi cắt bỏ do quá tải truyền tải hoặc không có người mua; còn năng lượng có giá bán cao là loại năng lượng có giá trị cao.

Do đặc điểm địa lý của các trang trại ĐG thường nằm ở khu vực hẻo lánh, việc triển khai hạ tầng truyền tải như đường dây và trạm đặt các biến áp gặp nhiều trở ngại, đặc biệt trong khâu giải phóng mặt bằng. Thay vì xây dựng một trang trại mới có quy mô tương đương, việc cải thiện hiệu suất vận hành máy biến áp hiện có bằng cách điều chỉnh theo biểu đồ công suất ĐG bất định sẽ mang lại hiệu quả kinh tế và kỹ thuật cao hơn.

Theo tiêu chuẩn IEC [107], hiệu suất vận hành máy biến áp cần được đánh giá dựa trên các yếu tố như mức tăng nhiệt độ, tuổi thọ và khả năng chịu tải. Việc tận dụng sản lượng ĐG dư thừa thông qua lưu trữ năng lượng và phát điện khi có nhu cầu không chỉ giúp tối ưu vận hành hệ thống mà còn nâng cao tính linh hoạt và giá trị kinh tế của nguồn ĐG trên TTD.

4.1.3. Phạm vi và giới hạn nghiên cứu của chương

Chương thể hiện tập trung lĩnh vực tài chính để chọn giải pháp đầu tư mới hay mở rộng trang trại gió khi xét đến bất định trong thị trường điện. Theo đó đề xuất phương pháp tăng hiệu quả điện gió bằng cách tối đa hóa dung lượng biến thế truyền tải và qua đó đề xuất tăng cường hệ thống trữ năng để kiểm soát công suất bất định. Mục tiêu là tăng các chỉ số tài chính đầu tư NPV và ROI. Các giới hạn trong nghiên cứu gồm:

- Kịch bản đầu tư: so sánh dựa trên kịch bản đầu tư mới hoặc mở rộng trang trại điện gió hiện có dựa trên kiểm soát lượng công suất điện gió biến thiên bất định công suất điện gió kết hợp hiệu suất máy biến áp truyền tải.

- Thực nghiệm: giả thiết bỏ qua các chi phí và tác động tương đồng của các kịch bản (như đền bù giải tỏa, môi trường, ...); điều kiện vận hành và tham số máy biến áp giả sử theo tiêu chuẩn IEC; hệ thống trữ năng sử dụng công nghệ pin lithium trong điều kiện vận hành ổn định lâu dài.

4.1.4. Phương pháp giải bài toán

Sử dụng phương pháp toán học thuần túy để giải bài toán tìm ra các chỉ tiêu tài chính của từng kịch bản làm cơ sở đánh giá hiệu quả đầu tư và đề xuất giải pháp có lợi ích tốt nhất.

4.2. Lý thuyết toán học

4.2.1. Hàm mục tiêu

Cực đại giá trị hiện tại thuần (NPV) của dòng tiền đầu tư, và hiệu suất đồng vốn đầu tư (ROI) là mục tiêu hiệu quả đầu tư dòng tiền (như đã trình bày), được mô tả trong biểu thức sau, trích từ [100],

$$\max NPV = \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+r)^i} - I_o \quad (4-1)$$

$$\text{Và } \max ROI = \frac{NPV}{I_o} \quad (4-2)$$

NPV, đơn vị là tiền tệ, là lợi nhuận ròng quy về thời điểm hiện tại, là một chỉ tiêu kinh tế nhằm đánh giá hiệu quả đầu tư và so sánh các dự án đầu tư. Trong khi đó, ROI tính trên %, là chỉ tiêu lợi ích trên mỗi đồng tiền đầu tư. i là khoảng thời gian xác định chỉ số của dòng tiền (năm); n là số kỳ hạn và r là chiết khấu/lãi suất, [%]. n tương ứng với tuổi thọ của trang trại gió và ở đây là 25 năm tương tự [105]. I_o là vốn đầu tư ban đầu tính đến chi phí hệ thống tua-bins gió, bao gồm tua-bin và trung thể liên kết, máy biến áp truyền tải. CF_i là dòng tiền tại thời điểm i . Các giá trị này được tính như sau,

$$I_o = C_{tw} + C_{tr} + C_{ESS} \quad (4-3)$$

$$CF_i = B_i - C_i + B_i^C \quad (4-4)$$

$$C_i = C_{tur,i}^{O\&M} + C_{tr,i}^{O\&M} + C_{ESS,i}^{O\&M} \quad (4-5)$$

$$B_i^C = \sum_{t=1}^T (P_t^{wav} \cdot C_{price}) \quad (4-6)$$

C_{tw} , C_{tr} , C_{ESS} là các tham số đầu vào biểu thị vốn đầu tư, chi phí lắp đặt tua-bin gió, máy biến áp và nguồn trữ năng (nếu có). B_i là lợi ích bán điện từ ĐG cung cấp, bao gồm doanh thu bán điện trực tiếp và thu nhập bất định. Các thành phần thu nhập đó gắn với hành vi đấu thầu của chủ sở hữu ĐG trong TTĐ. C_i là chi phí vận hành của nguồn ĐG và các thành phần liên quan trong mỗi năm. P_t^{wav} là công suất vận hành của trang trại gió; $C_{tur}^{O\&M}$, $C_{tr}^{O\&M}$, $C_{ESS}^{O\&M}$ là các chi phí O&M tua-bin gió, máy biến áp và nguồn ESS. Và thu nhập từ chứng nhận năng lượng xanh B_i^C , Ví dụ tham khảo tại Thụy Điển, giá của Chứng chỉ Xanh C_{price} thay đổi hàng năm, theo tài liệu [100] giá này cho năm 2019 là 0,305 [€/MWh].

4.2.2. Mô hình máy biến áp truyền tải

Công suất máy biến áp trung gian thường được lựa chọn định mức phụ thuộc vào lượng năng lượng điện phải truyền qua máy biến áp theo tiêu chuẩn IEC [107]. Mô hình khảo sát mức gia nhiệt độ dầu lớp trên cùng khi quá tải và nhiệt độ cuộn dây máy biến áp. Các phương trình phân bố nhiệt độ để đảm bảo rằng nhiệt độ tối hạn nằm trong giá trị ngưỡng được mô tả trong tiêu chuẩn IEC 60076–7. Đầu tiên, chi phí đầu tư máy biến áp:

$$C_{tr} = RI_{tr} \cdot P_{tr}^r \quad (4-7)$$

Chi phí này gần như tỷ lệ tuyến tính với công suất của máy biến áp. Trong đó, RI_{tr} là suất đầu tư và P_{tr}^r là công suất danh định. Số liệu này tham khảo [100].

Các ràng buộc điều kiện vận hành máy biến áp gồm có 03 tiêu chí như sau:

4.2.2.1. Giới hạn về công suất truyền tải tối đa

$$I_t^2 \cdot T_{size} \geq P_t^{wav}$$

$$\text{hay } T_{size} \geq \frac{P_t^{wav}}{I_t^2} \quad (4-8)$$

Biểu thức (4-8) [107], biểu diễn ràng buộc công suất MBA, theo đó CS biểu kiến chọn lựa MBA T_{size} không vượt giới hạn tỷ lệ công suất truyền qua nó, ở đây là công suất của ĐG. Ngoài ra, theo quy định quá tải ngắn hạn đảm bảo nhiệt độ máy biến áp trong phạm vi cho phép I_{cp} [107],

Bảng 4.1. Giới hạn vận hành máy biến áp

Thông số	Quá tải lặp lại chu kỳ	Quá tải đột xuất dài hạn	Quá tải ngắn hạn
Dòng điện cho phép [p.u]	1,5	1,5	1,8
Nhiệt độ cuộn dây cực đại [$^{\circ}\text{C}$]	120	140	160
Nhiệt độ lõi thép cực đại [$^{\circ}\text{C}$]	140	160	180
Nhiệt độ cực đại lớp trên cùng dầu cách điện [$^{\circ}\text{C}$]	105	115	115

$$I_t \leq I_{cp} \quad (4-9)$$

Ở đây, I_t là dòng điện vận hành máy biến áp tại thời điểm t , và I_{cp} là dòng điện cho phép vận hành tối đa của MBA như trong Bảng 4.1.

4.2.2.2. Giới hạn nhiệt độ máy biến áp tối đa

Giới hạn nhiệt độ tại các vị trí trong máy biến áp tác động lớn đến sự già đi của cách điện và vật liệu dẫn điện trong máy biến áp. Khi vận hành, kể cả quá tải dài hạn hoặc ngắn hạn, giới hạn nhiệt độ hot-spot và top-oil phải được đảm bảo,

$$\theta_t^{hst} \leq \theta_t^{hst,max} \quad (4-10)$$

$$\theta_t^{top} \leq \theta_t^{top,max} \quad (4-11)$$

Các thông số nhiệt độ hot-spot trên cuộn dây máy biến áp θ_t^{hst} và nhiệt độ top-oil của bề mặt trên cùng của dầu cách điện θ_t^{top} phụ thuộc vào công suất truyền tải qua máy biến áp. Các thông số $\theta_t^{hst,max}$ và $\theta_t^{top,max}$ là nhiệt độ tối đa cho phép của cuộn dây máy biến áp và mặt trên cùng của lớp dầu cách điện. Dữ liệu theo tiêu chuẩn IEC cho các máy biến áp có công suất trung bình hoặc lớn như thể hiện trong Bảng 4.1. Các chỉ số nhiệt độ dầu và cuộn dây phụ thuộc vào dòng điện qua máy biến áp biểu diễn như sau:

$$I_t^2 = P_1 \cdot \theta_t^{hst} - P_2 \cdot \theta_{t-1}^{top} - P_{3,t} \quad (4-12)$$

$$\theta_t^{hst} = \Delta\theta_{hr} \cdot I_t^2 + \theta_t^{top} \quad (4-13)$$

$$P_1 = \frac{1}{\frac{\Delta t \cdot R \cdot \Delta \theta_{or}}{(\tau_0 + \Delta t) \cdot (R + 1)} + \Delta \theta_{hr}} \quad (4-14)$$

$$P_2 = \frac{\tau_0}{\tau_0 + \Delta t} \cdot P_1 \quad (4-15)$$

$$P_{3,t} = P_2 \cdot \frac{\Delta t}{\tau_0} \left(\theta_{amb,t} + \frac{\Delta \theta_{or}}{R + 1} \right) \quad (4-16)$$

Trong đó, Δt là bước thời gian; R là tỷ lệ tổn hao; $\Delta \theta_{or}$ là độ tăng nhiệt độ của lớp dầu phía trên tại tổn thất định mức; τ_0 là hằng số thời gian dầu; $\Delta \theta_{hr}$ là gradient điểm nóng dầu trên cùng ở dòng điện định mức và θ_{amb} là nhiệt độ môi trường xung quanh.

4.2.2.3. Giới hạn tuổi thọ máy biến áp

Một trong các thông số quan trọng cho máy biến áp là độ suy giảm tuổi thọ máy biến áp (LOL), là tổng thời gian già đi của máy biến áp,

$$LOL = \sum_t^T V_t \quad (4-17)$$

Với, V là tốc độ già hóa, thường xác định theo chu kỳ T là 1 năm. Đối với loại cách điện thông thường trong máy biến áp, tốc độ này được tính theo IEC,

$$V = \frac{k}{k_r} = \frac{A}{A_r} e^{\frac{1}{R} \left(\frac{E_r}{\theta_{hr} + 273} - \frac{E}{\theta_t^{hst} + 273} \right)} \quad (4-18)$$

Trong đó A là hệ số trước hàm mũ, [1/h]; E là năng lượng kích hoạt, [kJ/mol]; R là hằng số khí, [kg/(Kmol)]; θ_t^{hst} là nhiệt độ điểm nóng, oC; chỉ số r biểu thị giá trị tham chiếu định mức.

Sau khi tính toán tốc độ lão hóa, có thể tính LOL theo tiêu chuẩn bằng cách sử dụng (4-15). Tiêu chuẩn quy định tổng thất tuổi thọ của máy biến áp tối đa $\frac{1}{2}$ hằng số thời gian nhiệt độ cuộn dây. Để đảm bảo rằng máy biến áp không bị hỏng trước khi trang trại gió ngừng hoạt động, giới hạn LOL theo tuổi thọ MBA LT_{MBA} so với tuổi thọ dự án điện gió LT_{Wind} :

$$LOL \leq \frac{LT_{MBA}}{LT_{Wind}} \cdot 8760 \quad (4-19)$$

4.2.3. Mô hình nguồn trữ năng

Giả sử dùng công nghệ lithium-ion cho ESS như [107] và [101]. Tính toán lợi ích ESS được xác định trên cơ sở giá bán điện xả và giá mua điện trữ như sau:

$$C_{ESS} = RI_{ESS} \cdot E_{ESS} \quad (4-20)$$

$$Rev_{ESS} = \sum_{t=1}^T (\lambda_{D,t} \cdot E_{D,t}) - \sum_{t=1}^T (\lambda_{R,t} \cdot E_{R,t}) \quad (4-21)$$

$$Cost_{ESS} = C_{ESS}^{O\&M} \quad (4-22)$$

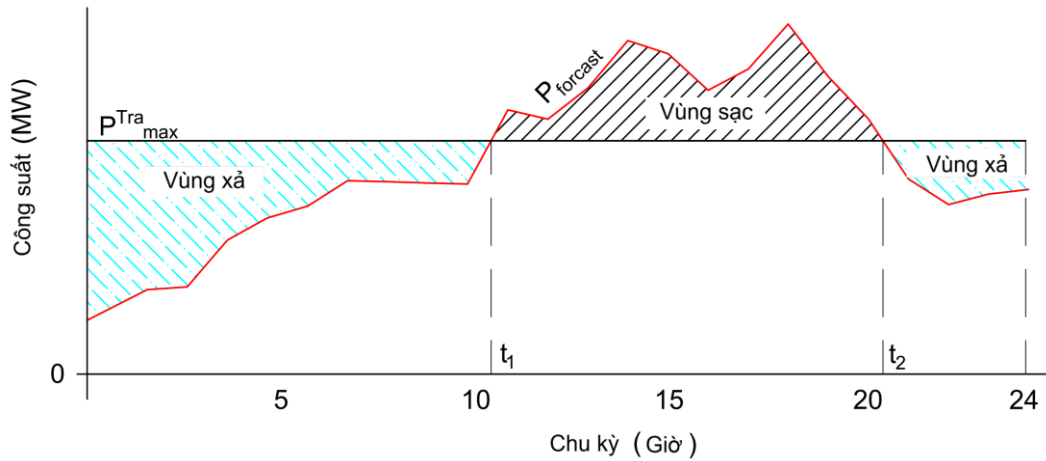
RI_{ESS} là suất đầu tư ESS. $\lambda_{D,t}$ và $\lambda_{R,t}$ là giá bán và giá mua điện, sản lượng bán $E_{D,t}$ và mua $E_{R,t}$. Theo sự phối hợp vận hành ESS và máy biến áp, việc thiết lập năng lượng sạc và xả của ESS cân bằng bởi hai quá trình: (i) Năng lượng trực tiếp: Đánh giá mức độ dư thừa và thiếu hụt năng lượng thông qua phân tích giới hạn truyền tải của máy biến áp, dựa trên dự báo công suất ĐG. Khi nguồn ĐG dư thừa, hệ thống tiến hành lưu trữ, ngược lại sẽ xả khi nguồn cung không đủ. (ii) Năng lượng bất định: Xác định sự biến động của ĐG theo mô hình xác suất, từ đó ước lượng mức công suất chênh lệch so với cam kết đấu thầu trên TTĐ.

4.2.3.1. Tính toán năng lượng trực tiếp

Ví dụ trên Hình 4.2 cho thấy khi giới hạn công suất truyền tải máy biến áp tăng thì quá trình sạc năng lượng giảm (diện tích Recharge trên sơ đồ giảm), và năng lượng xả bán điện của ESS tăng lên. Trong khi đó, lượng năng lượng truyền tải vượt quá hay dưới giới hạn máy biến áp phụ thuộc vào: khả năng tải lên của ĐG và giới hạn đỉnh của máy biến áp.

Khi công suất của máy biến áp được giữ nguyên, khả năng tải của nó bị chi phối bởi các yếu tố trạng thái và điều kiện vận hành. Hai thành phần năng lượng điện sạc cố định E_R^D và xả E_D^D của ESS được xác định như sau:

$$E_R^D = \int_{t_1}^{t_2} (P_{forecast}(t) - P_{max}^{Tra}) dt \quad (4-23)$$



Hình 4.2 Biểu đồ năng lượng sạc và xả dự kiến

$$E_D^D = \int_0^{t_1} (P_{max}^{Tra} - P_{forecast}(t)) dt + \int_{t_2}^{24} (P_{max}^{Tra} - P_{forecast}(t)) dt \quad (4-24)$$

4.2.3.2. Năng lượng bất định

Năng lượng sạc bất định E_R^U và xả bất định E_D^U phụ thuộc hai giá trị ngẫu nhiên: vận tốc gió bất định, khi thời tiết biến động bất ngờ dẫn đến công suất gió đầu ra vượt quá giới hạn gây ra quá tải máy biến áp; và xác suất công suất phát ĐG vượt quá các giá trị chào thầu, dẫn đến thừa năng lượng trên TTĐ.

$$E_R^U = \int_{t_1}^{t_2} \left(\int_{P_{max}^{Tra}}^{P^{WR}} (p_t^w - P_{max}^{Tra}) \cdot f_w(p_t^w) \cdot dp_t^w \right) dt + \int_{t_0}^{t_1} \left(\int_{P_{forecast}}^{P^{WR}} (p_t^w - P_{forecast}) \cdot f_w(p_t^w) \cdot dp_t^w \right) dt \quad (4-25)$$

$$E_D^U = \int_{t_0}^{t_1} \left(\int_{P_{forecast}}^{P^{WR}} (p_t^w - P_{forecast}) \cdot f_w(p_t^w) \cdot dp_t^w \right) dt \quad (4-26)$$

$(t_0 - t_1)$ và $(t_1 - t_2)$ là thời gian công suất gió dưới hoặc vượt giới hạn của máy biến áp.

4.2.4. Mô hình bất định điện gió trong thị trường điện

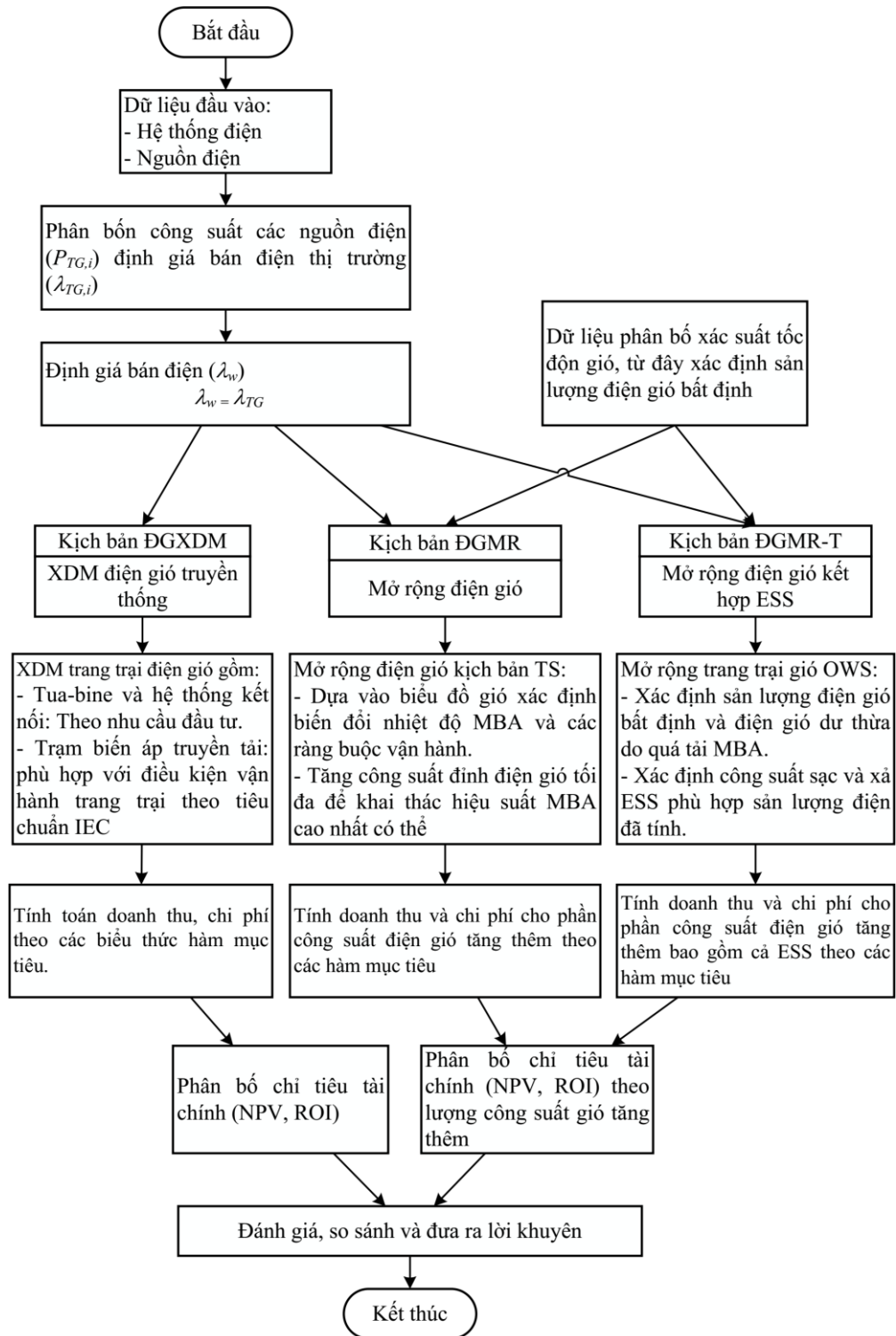
Mô hình toán học trang trại ĐG trong thị trường điện đã mô tả phần 2.2.

4.3. Các kịch bản nghiên cứu

- Kịch bản 1: đầu tư xây mới một dự án trang trại ĐG theo mô hình truyền thống.
- Kịch bản 2: Mở rộng trang trại ĐG đã được đầu tư trong kịch bản 1 nhưng không thay đổi hệ thống truyền tải đầu nối.

- Kịch bản 3: Mở rộng trang trại điện gió trong kịch bản 2 kết hợp xây dựng hệ thống trữ năng.

- Kịch bản 4: đầu tư trang trại ĐG tương tự kịch bản 1 nhưng tối ưu máy biến áp 63 MVA bằng cải tiến chế độ làm mát để nâng cao hiệu quả truyền tải ĐG [100].



Hình 4.3: Lưu đồ chu trình

4.4. Lưu đồ chu trình khảo sát và đánh giá

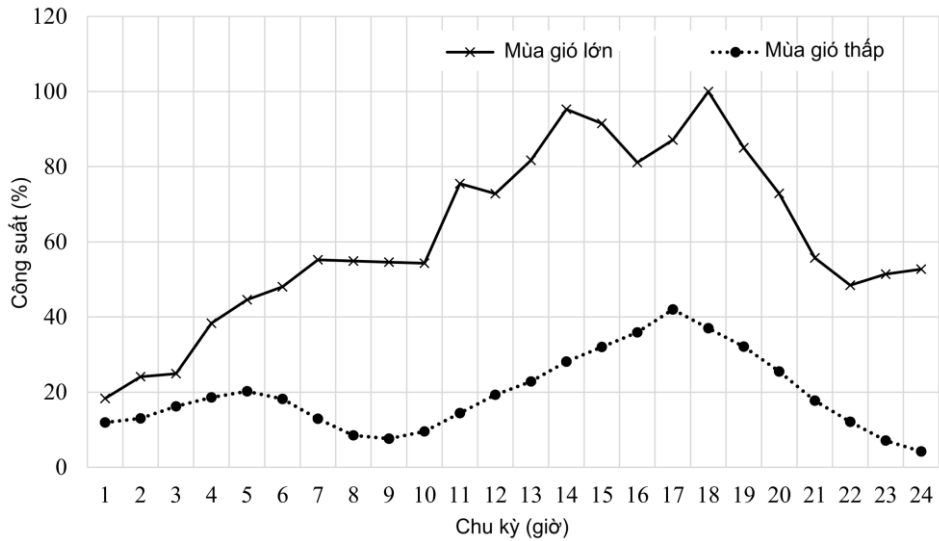
Phương pháp toán học được sử dụng để giải bài toán theo trình tự lưu đồ được thể hiện trên Hình 4.3.

4.5. Thực nghiệm

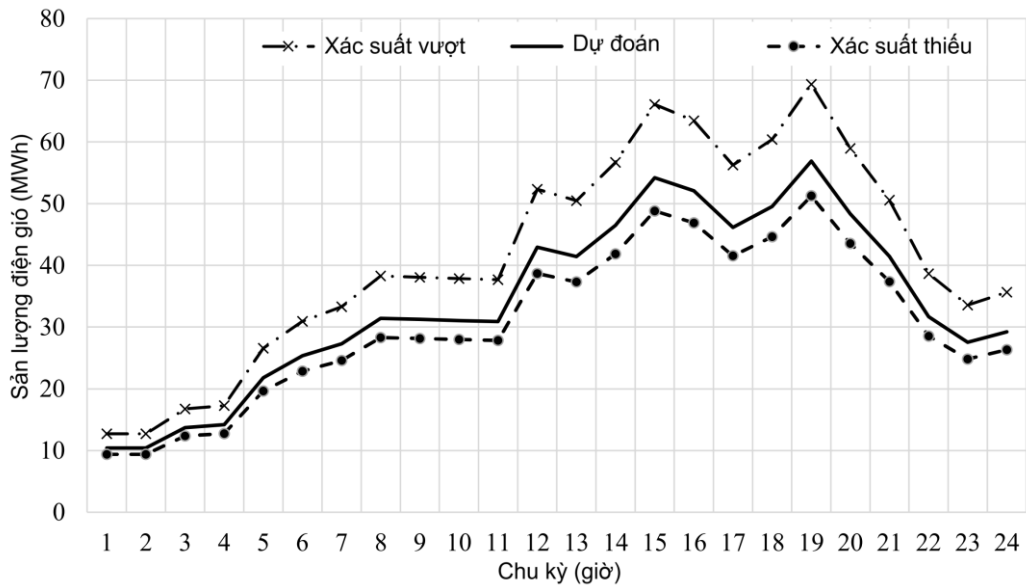
4.5.1. Dữ liệu đầu vào

4.5.1.1. Hệ thống điện chuẩn IEEE 30-Bus

Trong nghiên cứu này sử dụng HTĐ chuẩn IEEE 30-bus [108] để thực nghiệm, có 41 nhánh và 6 nguồn điện, dữ liệu chi tiết tham khảo tại [40], [109]. Trong đó có



Hình 4.4 Biểu đồ công suất gió ngày theo hai mùa



Hình 4.5 Xác suất sản lượng điện gió mùa cao điểm

hai nguồn điện được thay thế bởi trang trại ĐG tại bus 5 và 11. Thông số ĐG tham khảo tài liệu [40].

4.5.1.2. Nguồn điện gió

Đầu tư tài chính nguồn ĐG tham khảo [100], suất đầu tư 750.000€/MW tương ứng với tuổi thọ 25 năm, chi phí O&M là 1,5%. Biểu đồ công suất phát ĐG ngày được dự đoán theo hai mùa cao điểm và thấp điểm được tham khảo trong tài liệu [3] như trên Hình 4.4.

Phân bố mật độ xác suất bất định tốc độ gió tham khảo [71], sự bất định dẫn đến sản lượng điện của trang trại ĐG khác biệt so với dự đoán. Dựa vào phân bố Weibull xác định được kết quả giao động sản lượng ĐG cho nguồn điện tại bus 5 như sau,

Theo đó, sản lượng ĐG được chia ba thành phần: năng lượng dự đoán và hiện nay thường được chào thầu cung cấp, năng lượng xác suất vượt dự đoán và xác suất thấp hơn dự đoán. Thể hiện trên Hình 4.5.

4.5.1.3. ESS

Chọn lưu trữ là pin Lithium-ion để thí nghiệm, chi tiết như sau [101] và [102]:

- Tuổi thọ tối thiểu 10 năm.
- Suất đầu tư là 200 €/kWh và chi phí vận hành 3% tham khảo.
- Công suất mỗi Block 1MW.
- Hiệu suất lưu trữ 90%.

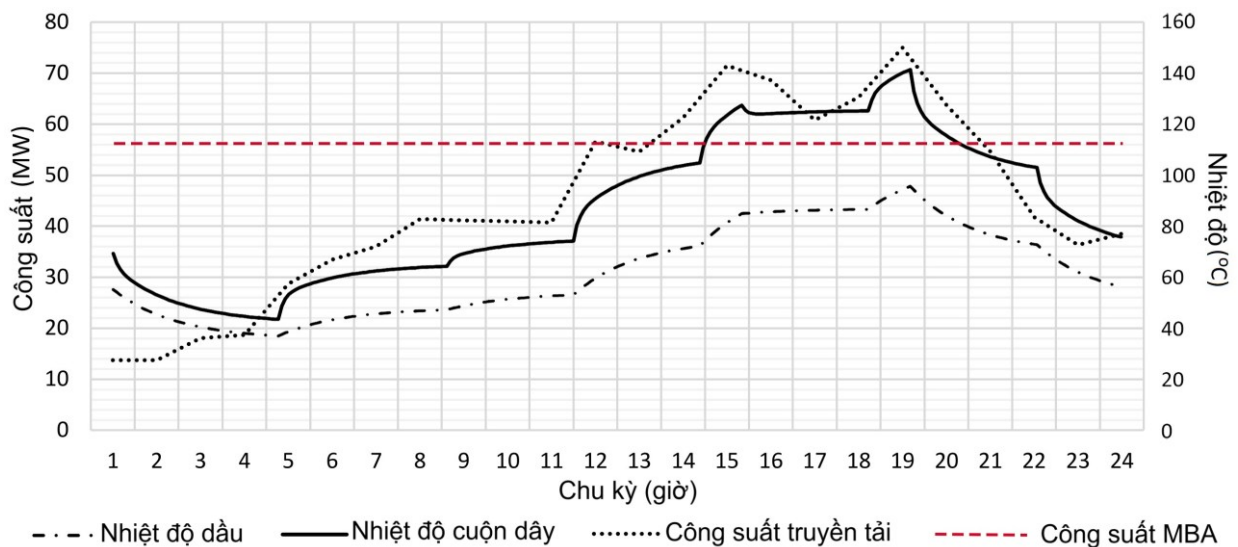
4.5.1.4. Máy biến áp

- Suất đầu tư 30.000€/MVA và chi phí vận hành 3% tham khảo [100].
- Máy biến áp loại cách điện dầu OF, các tham số theo [107].
- Tỷ số tổn hao: $R = 6$
- Mức chênh lệch nhiệt độ cuộn dây và lớp dầu trên cùng: $\Delta\theta_{or} = 49K$
- Mức gia tăng nhiệt độ từ điểm nóng nhất cuộn dây đến điểm nóng nhất của dầu: $\Delta\theta_{hr} = 29K$

- Hằng số thời gian cuộn dây: $\tau_w = 7$ phút
- Hằng số thời gian dầu: $\tau_o = 90$ phút
- Nhiệt độ môi trường $25,6^\circ\text{C}$

4.5.2. Giá bán điện trên thị trường

Giả sử nguồn nhiệt điện chi phối trong HTĐ chuẩn IEEE 30-bus nên giá bán điện bình quân đối với nhiệt điện đã tính trong tài liệu [79]. Theo đó, giá chào bán



Hình 4.6. Biến thiên nhiệt độ máy biến áp ngày cao điểm

điện trung bình thay đổi trong khoảng 26-31,7€/MWh.

4.6. Kết quả thí nghiệm

4.6.1. Kịch bản 1

Thiết kế chọn công suất máy biến áp truyền tải theo dữ liệu ban đầu nguồn ĐG tại bus 5 có công suất đỉnh 75MW. Theo tiêu chuẩn IEC [107], thiết kế với điều kiện ràng buộc vận hành máy biến áp, trong đó biểu đồ biến thiên nhiệt máy biến áp có kết quả như Hình 4.6. Kết quả công suất tối ưu máy biến áp tính toán được xác định là 57 MVA và chọn chuẩn 63 MVA. Dòng tiền quá trình đầu tư dự án tính được trong trường hợp này như Bảng 4.2

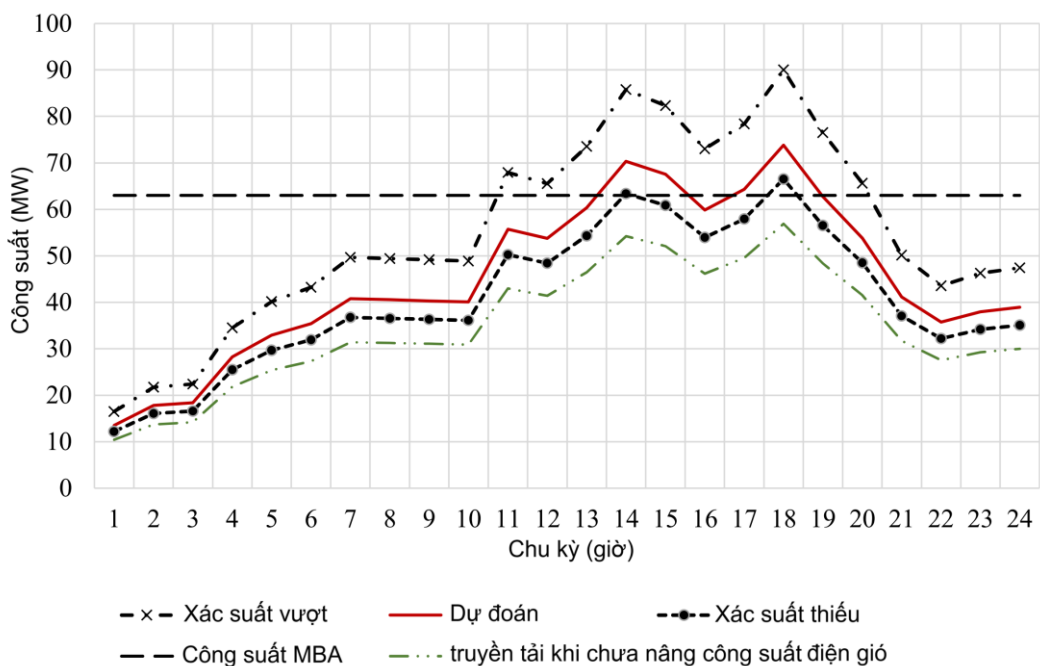
Bảng 4.2. Dòng tiền dự án trong kịch bản xây mới ĐG

Năm	0	1	2	...	20
Dòng tiền (ngàn €)	-58,140	4,271	4,271	4,271	4,271
NPV (ngàn €)	2,562				

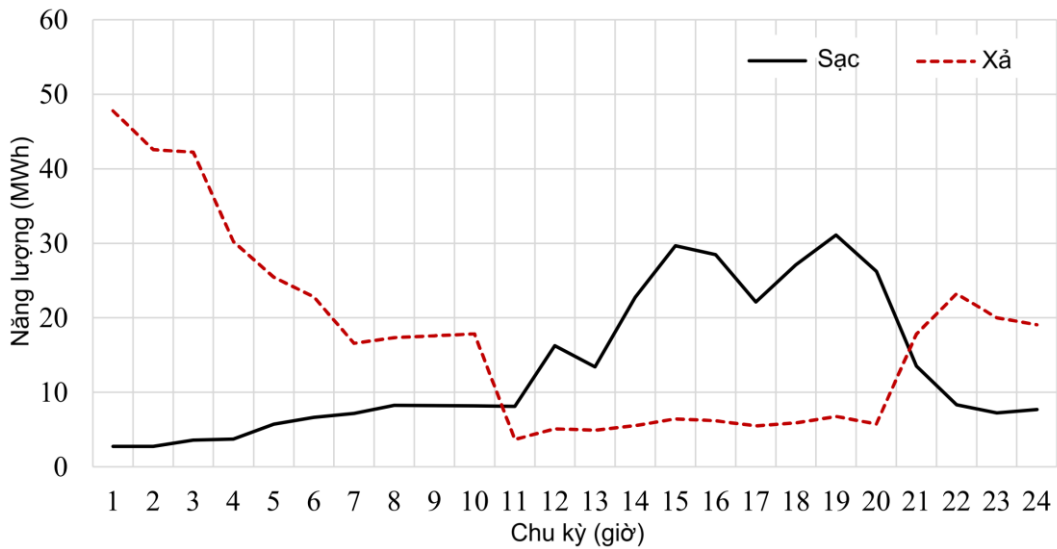
Các kết quả này với giả sử giá điện không đổi qua các năm, và giảm một nửa với giá bán điện vượt đấu thầu, giá phạt thiếu điện sẽ tăng gấp đôi. Kết quả NPV dương cho thấy hiệu quả đầu tư dự án theo thiết kế truyền thống của kịch bản xây mới ĐG. Tuy nhiên khi giá phạt thay đổi thì NPV có thể bị thay đổi theo.

4.6.2. Kịch bản 2

Công suất của trang trại ĐG bus 5 được nâng cấp mà không có sự điều chỉnh máy biến áp truyền tải và hệ thống đường dây. Mức gia tăng tối đa được xác định dựa trên giới hạn truyền tải của máy biến áp. Quá trình thiết kế bao gồm hai giai đoạn. Giai đoạn đầu tiên áp dụng phương pháp tối ưu toán học, như mô tả trong [107], để tính toán công suất cực đại mới của ĐG, có tính đến sự thay đổi nhiệt độ và các điều kiện vận hành của máy biến áp theo tiêu chuẩn IEC. Kết quả đạt được thể hiện trong **Hình 4.7** tương ứng với công suất đỉnh ĐG đỉnh mới là 90 MW, tăng 20% so với kịch bản xây mới ĐG trước đây. Sự gia tăng này dẫn đến tăng công suất đấu thầu cực đại, từ khoảng 57 MW lên 74 MW, tức tăng gần 30%. Tuy nhiên, hai khoảng thời gian trong ngày mà công suất gió vượt quá định mức của máy biến áp cần đánh giá. Bước 2: NPV được xác định tương tự kịch bản 1 nhưng dựa trên dữ liệu mở rộng trang trại gió.



Hình 4.7 Biểu đồ công suất nguồn điện gió của Bus 5 mùa cao điểm



Hình 4.8 Biểu đồ năng lượng sạc và xả

4.6.3. Kịch bản 3

Bổ sung nguồn ESS trong kịch bản mở rộng ĐG hiện hữu và xem xét đánh giá sản lượng ĐG bị thiệt hại do bị giới hạn công suất máy biến áp truyền tải và tính bất định của tốc độ gió. Tổng hợp năng lượng sản xuất từ ĐG cần thiết cho lưu trữ trong ngày cao điểm có thể thấy như trên Hình 4.8. Kết quả này được tính theo các biểu thức (4-23) đến (4-26). Doanh thu và chi phí tính theo (4-20) đến (4-22).

Hình cho thấy trong suốt 24h của ngày cao điểm hệ thống ESS có thể làm việc liên tục sạc và xả nhưng cơ bản chia thành hai khoảng thời gian trong ngày. Với công suất gió đỉnh 90MW và máy biến áp 63MVA, năng lượng sạc và xả tối ưu cho chế độ trực tiếp và bất định. Có thể chia thành hai khoảng thời gian chính. Khoảng thời gian từ 11 giờ sáng đến 9 giờ tối được ưu tiên cho quá trình sạc nhằm tận dụng tối đa lượng ĐG dư thừa. Ngoài khoảng thời gian này, việc phát điện được ưu tiên để đáp ứng nhu cầu của TTĐ khi cần thiết. Kết quả tổng hợp năng lượng sạc và xả trong chu kỳ dựa trên các thông số tính toán như sau:

Năng lượng điện sạc cố định $E_R^D=24$ MWh, xả $E_D^D = 319$ MWh; và năng lượng điện sạc bất định $E_R^U = 214 + 7 = 221$ MWh, xả bất định $E_D^U = 97$ MWh. Như vậy tổng năng lượng có thể sạc tối đa là $E_R=245$ MWh, xả tối đa là $E_D=416$ MWh; tương ứng công suất sạc trung bình tối thiểu $P_{ERmin}=10,2$ MW, và xả trung bình tối đa $P_{EDmean}=17,3$ MW.

Từ đó suy ra công suất xả trung bình yêu cầu là $7,1\text{MW}=(17,3-10,2)\text{MW}$, và chọn nguồn lưu trữ có công suất xả là 10MW , với độ xả sâu đến 20% .

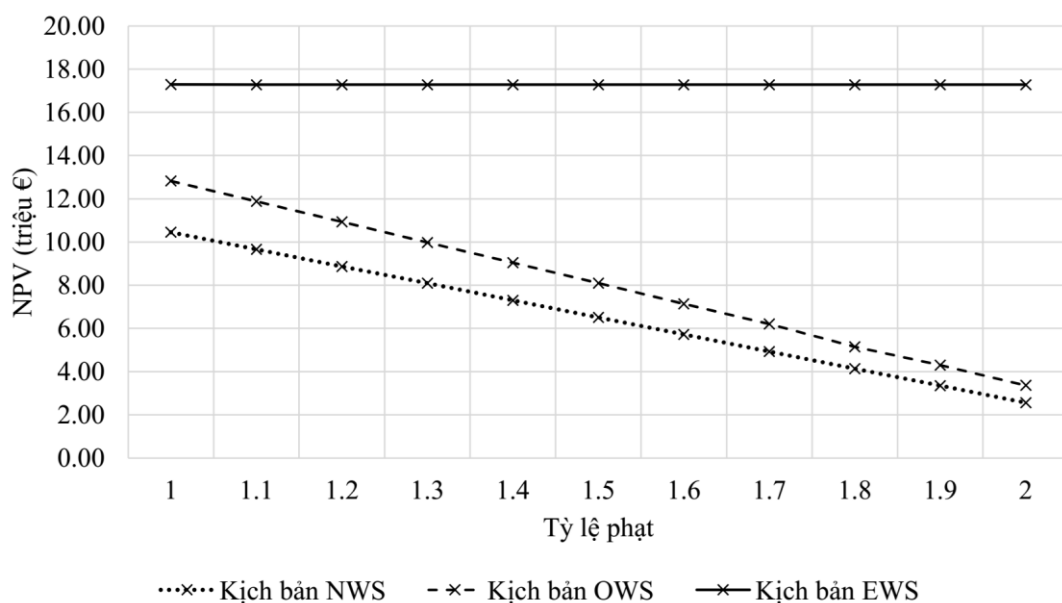
Ngoài ra, thời gian xả liên tục của ngày cao điểm là 14giờ/ngày , như thể hiện trên Hình 4.8. Vì vậy chọn bộ sạc có khả năng lưu trữ năng lượng 140MWh .

4.7. Nhận xét và đánh giá kết quả thực nghiệm

4.7.1. Xem xét khả năng thu hồi vốn NPV

Hình 4.9 mô tả kết quả chỉ tiêu NPV của ba kịch bản cho thấy tất cả các kịch bản có $\text{NPV} > 0$, nghĩa là dự án đầu tư có hiệu quả. Trong đó, kịch bản mở rộng nguồn ĐG tích hợp ESS dường như mang lại doanh thu cao nhất cho nhà đầu tư ĐG. Hơn nữa, NPV của kịch bản này gần như ít bị ảnh hưởng bởi tỷ số giá điện đền bù khi nguồn ĐG bị thiếu hụt công suất so với dự báo ban đầu do các nguyên nhân không mong muốn.

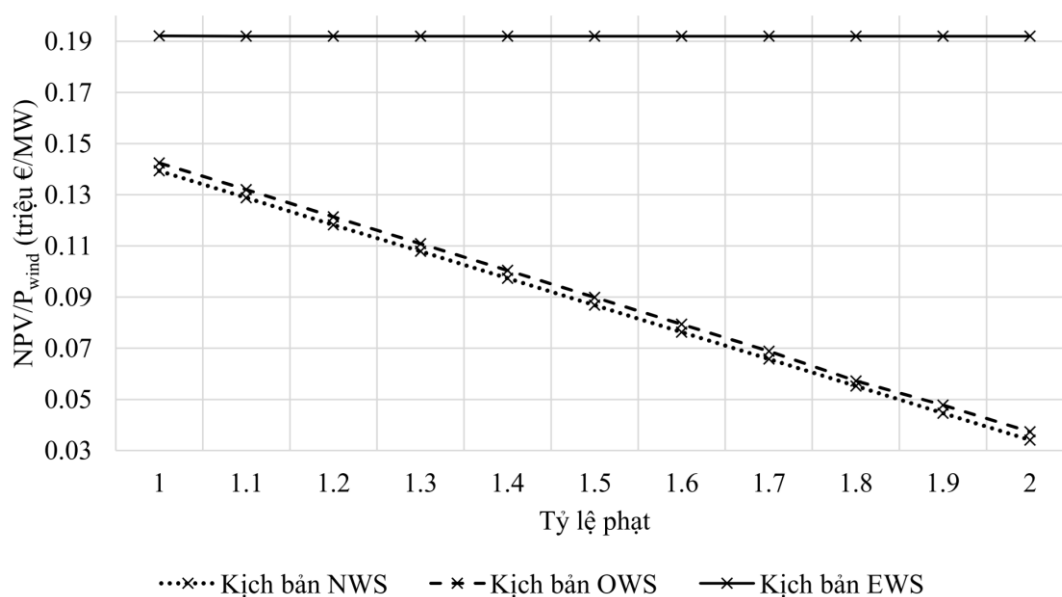
Thứ nhất, về lợi ích mang lại cho chủ đầu tư, đường NPV của kịch bản thứ hai khi mở rộng nguồn ĐG mà không đầu tư thêm trạm và các máy biến áp cao hơn kịch bản truyền thống. Điều này cho thấy lợi ích của chủ sở hữu được nâng cao hơn nhờ doanh thu phân công suất ĐG được mở rộng mang lại. Đối với kịch bản thứ ba, kịch bản có tích hợp ESS, NPV tăng đột biến so với các kịch bản còn lại, 65.1% không phải đền bù và 573% khi mức giá điện đền bù là 2. Nguyên nhân là do ngoài doanh



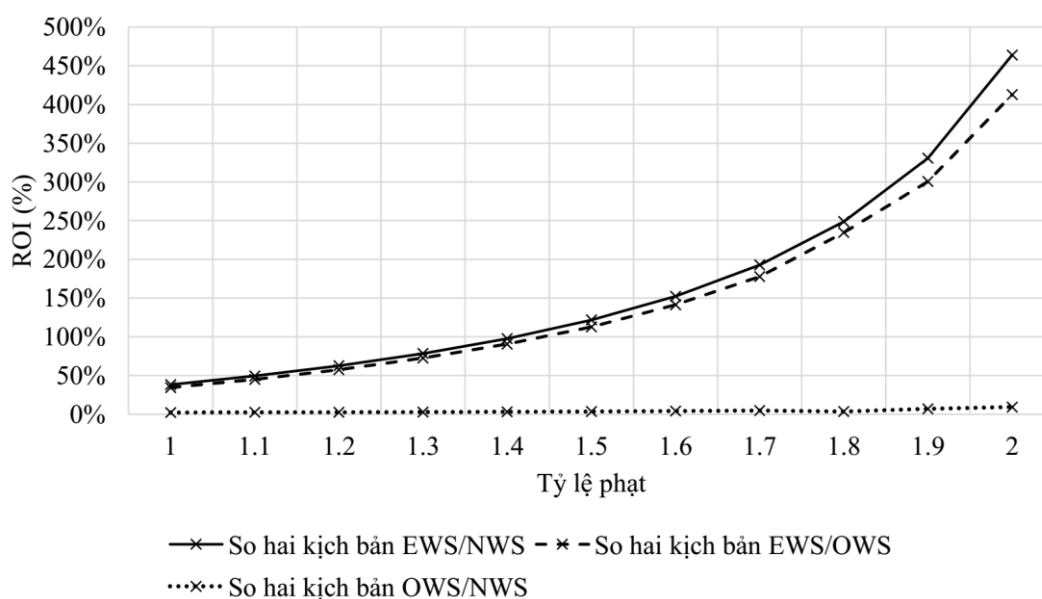
Hình 4.9 Chỉ tiêu NPV các kịch bản

thu từ việc mở rộng nguồn ĐG như kịch bản thứ hai, tài chính thu được lớn hơn nhờ ba nguồn lợi ích. Thứ nhất, sản lượng điện bị cắt bỏ do giới hạn máy biến áp được tích trữ để bán vào dịp khác. Thứ hai, bù cho khoản sản lượng điện bị thiếu hụt của nguồn ĐG, mà đáng ra họ phải mua điện với giá cao để đền bù cho TTĐ. Thứ ba, chênh lệch giữa giá mua và giá bán điện của ESS mang lại một lợi nhuận đáng kể.

Thứ hai, trong môi trường TTĐ cạnh tranh, việc bồi thường hợp đồng đường như không ai mong muốn nhưng đôi khi không tránh khỏi vì các yếu tố ngẫu nhiên



Hình 4.10 Suất hiệu quả đầu tư theo công suất



Hình 4.11 Hiệu quả trên giá vốn đầu tư ROI

không lường trước của các nhà cung cấp điện, đặc biệt là ĐG có yếu tố bất định. Vì vậy, NPV của dự án thường bị ảnh hưởng lớn bởi mức đơn giá bồi thường, như các kịch bản 1 và 2 trên hình. Tuy nhiên, trong trường hợp ở kịch bản 3, NPV thay đổi rất ít mặc cho giá đền bù thay đổi, ổn định quanh mức 17.28 triệu €. Điều này là hoàn toàn hợp lý, do sản lượng điện thay vì chủ ĐG phải đền bù, vì sai biệt so với dự đoán, thì nhờ ESS can thiệp dẫn đến tránh được hành vi bị xử phạt hoặc bồi thường hoặc phải mua điện giá cao để bù cho người mua. Cuối cùng, chủ sở hữu ĐG bớt đi gánh nặng tiêu tốn chi phí và các nguồn lực khi phải quan tâm quá mức vào sự thiệt hại bởi bất định trong dự báo tốc độ gió gây ra.

4.7.2. Đánh giá suất hiệu quả đầu tư

Với suất lợi ích trên mỗi MW ĐG đầu tư, đường tỷ lệ này trong kịch bản mở rộng cao hơn nghĩa là đầu tư mở rộng hiệu quả cao hơn xây một dự án ĐG, mặc dù trên hình nhận thấy mức chênh lệch hiệu quả đầu tư so với kịch bản xây mới là không đáng kể, Hình 4.10. Riêng kịch bản có hỗ trợ trữ năng, tỷ số này tăng đột biến, điều này cho thấy đầu tư mở rộng ĐG tích hợp ESS là giải pháp mang lại hiệu quả cao hơn với đầu tư mới dự án. Hơn thế nữa, hiệu suất đầu tư kịch bản mở rộng kết hợp trữ năng càng tăng cao khi mức giá đền bù thiếu hụt công suất của ĐG tăng cao. Điển hình khi hệ số đền bù này tăng đến 2.0, thì chỉ số hiệu quả đầu tư đầu tư ROI tăng lên gấp trên 4.5 lần (cụ thể ở đây là 464%) như Hình 4.11.

Để có đánh giá toàn diện hơn, nghiên cứu này tiến hành đối chiếu với kết quả trước đây, cụ thể là kịch bản 4, được trích dẫn từ [100] Trong kịch bản này, một máy biến áp có công suất danh định 63 MVA được đề xuất tối ưu hiệu suất truyền tải công suất ĐG.

Khi so sánh các chỉ tiêu tài chính và điều kiện đầu tư giữa bốn kịch bản thì kịch bản 4 thể hiện sự cải thiện đáng kể về mặt tài chính so với các kịch bản xây mới và mở rộng ĐG. Tuy nhiên, kịch bản có hệ thống trữ năng vẫn đạt hiệu suất vượt trội hơn hẳn, với chỉ số ROI cao hơn 24,8% so với kịch bản 4, *Bảng 4.3*. Do đó, việc đầu tư vào nguồn ĐG tích hợp cùng hệ thống ESS theo kịch bản bổ sung trữ năng được xem là phương án tối ưu, không chỉ mang lại lợi ích tài chính cho nhà đầu tư mà còn

Bảng 4.3. Đối chiếu chỉ tiêu các kịch bản

Kịch bản	1	2	3	4
Wind Power (MW)	75	90	90	75
Xét đến sự bất định	Yes	Yes	Yes	No
NPV (triệu €)	2.56	3.36	17.28	11.2
NPV/WP (ngàn €/MW)	34.1	37.3	192	149.3
ROI (%)	4.4	4.8	24.8	19.2

đóng góp tích cực cho xã hội. Tuy nhiên, việc triển khai kịch bản này cần được xem xét trong bối cảnh bất định thực tế, dựa trên phân bố Weibull và các ràng buộc kỹ thuật của máy biến áp, nhằm tránh phát sinh chi phí đầu tư bổ sung do yêu cầu mở rộng hệ thống truyền tải.

4.8. Kết luận

Nghiên cứu đã đề xuất một mô hình đầu tư tiềm năng trong lĩnh vực phát triển trang trại ĐG, nhấn mạnh vào việc tăng cường ứng dụng ESS kết hợp tối ưu máy biến áp truyền tải để mở rộng các trang trại hiện hữu có lợi hơn triển khai dự án mới. Mô hình mở rộng tích hợp ESS đề xuất mang lại lợi nhuận đầu tư hơn hẳn đầu tư mới, đặc biệt trong bối cảnh giảm dần các chính sách ưu đãi và áp lực cạnh tranh trên TTD. Kết quả chứng minh qua đánh giá đối chiếu các chỉ số tài chính NPV và ROI. Cụ thể mô hình giúp nâng tỷ suất lợi nhuận từ 4,4% trong dự án xây mới truyền thống lên 24,8%.

Hơn nữa, mô hình đề xuất mở rộng trang trại ĐG mà không yêu cầu xây dựng thêm trạm và các máy biến áp và như vậy không yêu cầu mở rộng hệ thống truyền tải đầu nối. Từ đó giảm thiểu biến động môi trường và an sinh xã hội cho việc xây dựng truyền tải, cắt giảm đáng kể chi phí đầu tư hạ tầng và nhân công trong khâu đánh giá tác động môi trường. Hơn nữa, vị trí nguồn điện không biến động nên ít bị ảnh hưởng bởi những thay đổi trong chính sách giá điện, đảm bảo hiệu quả tài chính bền vững trong điều kiện TTD biến động.

Với kết quả nghiên cứu đã góp phần các đóng góp như sau:

- Tăng cường hiệu quả ứng dụng ESS trong điều kiện bất định điện gió trên thị trường điện.

- Nâng hiệu quả đầu tư điện gió và mở ra một cơ hội phát triển nhanh trong tương lai gần.

- Đóng góp 01 bài báo Q2 được công bố trong cộng đồng khoa học và chấp nhận đơn đăng ký sáng chế hướng đến công nhận quyền sở hữu trí tuệ cho giải pháp tối ưu ESS trong trang trại điện gió.

CHƯƠNG 5: KẾT LUẬN

5.1. Nội dung đạt được mục tiêu

5.1.1. Kết quả nghiên cứu

Tóm tắt kết quả nghiên cứu từ ba chương (chương 2, 3 và 4) đã đạt được như sau:

- Mô hình hóa được xác suất bất định điện gió trong thị trường điện cạnh tranh, qua đánh giá đã đề xuất mô hình nâng doanh thu điện gió tham gia đấu thầu trên thị trường điện, đó là mô hình liên kết điện gió với nguồn nhiệt điện kết hợp trữ năng. Nội dung này được thể hiện trong Chương 2.

- Đề xuất phương pháp tối ưu lai mới dựa trên trí thông minh nhân tạo để giải bài toán tối ưu phức hợp đa biến, trong đó có xác suất bất định và biến động của thị trường điện khi có điện gió tham gia. Hai thuật toán lai LSTM-GA và LSTM-PSO được thực nghiệm đạt được những ưu thế nhất định trong bài toán vừa nêu. Nội dung này được trình bày chi tiết trong Chương 3.

- Cuối cùng là đề xuất một giải pháp tăng hiệu quả đầu tư điện gió khả thi trong tương lai gần. Giải pháp tăng ứng dụng ESS trong một mô hình tối ưu máy biến áp truyền tải để mở rộng trang trại điện gió đã được đề xuất có suất hiệu quả đầu tư tái chính cao hơn dự án xây dựng mới tương đương. Nội dung này trình bày trong Chương 4.

5.1.2. Đối chiếu với mục tiêu nghiên cứu đặt ra

Nghiên cứu tổng quan trong Chương 1 đã đề ra một mục tiêu tương ứng hai nội dung và triển khai ba trọng tâm nghiên cứu. Mục tiêu tìm giải pháp tăng lợi ích cho điện gió đã đạt được qua cả ba trọng tâm đạt được như sau:

- **Xây dựng mô hình xác suất bất định điện gió trên thị trường điện:** Đã xây dựng mô hình hoàn chỉnh và đề xuất mô hình nâng doanh thu điện gió trong điều kiện mới.

- **Đề xuất phương pháp lai giải quyết bài toán nâng doanh thu điện gió trong điều kiện mới:** Đã thử nghiệm trên bài toán mô hình điện gió và đề xuất các thuật toán tối ưu lai mới LSTM-GA và LSTM-PSO.

- **Tăng sử dụng ESS trong mô hình mở rộng trang trại điện gió:** thử nghiệm ứng dụng ESS kết hợp vận hành tối ưu MBA để tăng hiệu quả đầu tư mở rộng trang trại điện gió trong điều kiện bất định điện gió gắn liền với thị trường điện.

5.2. Tính mới và các đóng góp của nghiên cứu

Nghiên cứu này đóng góp các điểm mới chính như sau:

- Thứ nhất, nghiên cứu đã xây dựng và đề xuất các mô hình nhằm nâng cao hiệu quả đầu tư điện gió trong bối cảnh chịu nhiều biến động bất định, vốn khiến loại hình nguồn điện này kém lợi thế so với các nguồn điện truyền thống ổn định hơn trong thị trường điện cạnh tranh toàn diện.

- Thứ hai, nghiên cứu đề xuất một phương pháp giải quyết cho bài toán tối ưu phức hợp và có mức độ phức tạp cao do phải đồng thời xét đến xác suất biến động ngẫu nhiên của tốc độ gió và phản ứng bất định từ các đối tác tham gia thị trường điện; trong đó, một thuật toán tối ưu lai mới được phát triển với ưu thế vượt trội nhờ sự tích hợp trí tuệ nhân tạo vào cấu trúc thuật toán tối ưu truyền thống.

- Thứ ba, nghiên cứu đề xuất mô hình ứng dụng hệ thống lưu trữ năng nhằm gia tăng lợi ích đầu tư của các dự án điện gió trong trường hợp mở rộng quy mô trang trại, mà không cần đến việc tăng cường hệ thống truyền tải đầu nối.

Ngoài các đóng góp về nội dung nghiên cứu, 03 bài báo khoa học Q1 (1 bài cho chương 2 và 2 bài cho chương 3), 01 bài Q2 (cho chương 4), 01 bài Q4 và các bài hội nghị khoa học cũng như bài báo khoa học trong nước cũng là kết quả nghiên cứu đóng góp phát triển cộng đồng nghiên cứu khoa học trong và ngoài nước.

5.3. Những khuyến nghị

5.3.1. Các hạn chế

Dù đã có những đóng góp quan trọng, nghiên cứu vẫn còn một số hạn chế, đặc biệt trong việc ứng dụng thực tiễn và thử nghiệm trong hệ thống năng lượng ngày càng phức tạp. Cụ thể:

1. Giả định về đặc tính bất định của ĐG: Mô hình phân bố Weibull được sử dụng để mô phỏng tốc độ gió, tuy nhiên, vẫn còn nhiều mô hình phân bố khác phù

hợp từng điều kiện địa phương cụ thể. Mô hình nâng lợi nhuận điện gió bởi một đánh giá tổng thể xác suất bất định từ ngẫu nhiên của thiên nhiên đến hoạt động thị trường trong lĩnh vực tài chính trong thời kỳ mới, giảm ưu đãi và cạnh tranh, còn hạn chế nghiên cứu trên thế giới nên việc đối chiếu so sánh chưa được thực hiện.

2. Dữ liệu đầu vào về tốc độ gió: Nghiên cứu được thực hiện dựa trên nguồn dữ liệu có sẵn từ các công bố khoa học trước đây, song tốc độ gió có sự khác biệt đáng kể dựa trên vị trí và thời điểm, tùy thuộc vào đặc điểm địa lý riêng biệt, đòi hỏi tập dữ liệu thực nghiệm đa dạng hơn để nâng cao tính tổng quát của mô hình.

3. Bối cảnh TTĐ: Nghiên cứu giả định một thị trường cạnh tranh theo cơ chế ngày hôm sau phổ biến có tổ chức ISO quản lý, với công suất nhiệt điện chiếm tỉ trọng chi phối. Tuy nhiên, mức độ phát triển và cơ cấu vận hành của TTĐ tồn tại trên các thị trường khác nhau, điều này có thể tác động luật đấu thầu khác nhau.

4. Thuật toán mới: Mô hình thuật toán lai đề xuất đã thu được kết quả tối ưu đáng khích lệ trên quy mô thử nghiệm, nhưng đối với các bài toán tối ưu có cấu trúc đa dạng và rộng hơn, hiệu suất có thể tăng rõ rệt khi áp dụng tập dữ liệu huấn luyện mở rộng. Tuy vậy, các nghiên cứu hiện nay vẫn còn một số điểm chưa toàn diện cần tăng cường tổng quát hóa lớn hơn. Ngoài ra, tốc độ hội tụ được đánh giá bằng số vòng lặp, thời gian hội tụ của thuật toán lai có thể lâu hơn trong vài chu kỳ đầu tiến hóa do huấn luyện AI. Nhưng việc huấn luyện có thể thực hiện song song và các chu kỳ tiến hóa sau không phải học lại nên ít bị ảnh hưởng, và đặc biệt các bài toán lớn gần như ít bị ảnh hưởng bởi thời gian huấn luyện này.

5. Bài toán kinh tế chỉ mới xét đến doanh thu và chi phí mà chưa đánh giá toàn diện các lợi ích xã hội khác, hoặc các chính sách cụ thể từng TTĐ.

5.3.2. Hướng mở rộng nghiên cứu

- Nghiên cứu mở rộng trên các HTĐ quy mô lớn, bao gồm hệ thống truyền tải địa phương hoặc mạng lưới điện quốc gia như ở Việt Nam.

- Nghiên cứu mở rộng nghiên cứu cho các chủ đầu tư điện mặt trời và các loại nguồn điện có tính chất bất định khác.

- Phát triển nghiên cứu sử dụng các phương pháp phân bố xác suất đa dạng, áp dụng số liệu thực tế, xem xét điều kiện đặc thù của TTĐ, kèm theo lồng ghép các yếu tố chính sách và lợi ích kinh tế - xã hội liên quan.

- Các thuật toán AI và MH tương tự khác cũng có thể được nghiên cứu thực nghiệm hiệu quả lai tương tự, từ đó nghiên cứu mở rộng hơn phạm vi ứng dụng các thuật toán có thể hiệu quả hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. J. Hammons, "Integrating renewable energy sources into European grids," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 30, no. 8, pp. 462-475, 2008.
- [2] "Renewables 2021 - Global status report," International Energy Agency (IEA), Paris, France, 2021.
- [3] D. Cao, W. Hu, X. Xu, T. Dragičević, Q. Huang, Z. Liu, Z. Chen and F. Blabjerg, "Bidding strategy for trading wind energy and purchasing reserve of wind power producer – A DRL based approach," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 117, p. 105648, 2020.
- [4] N. Wang, J. Li, W. Hu, B. Zhang, Q. Huang and Z. Chen, "Optimal reactive power dispatch of a full-scale converter based wind farm considering loss minimization," *Renewable Energy*, vol. 139, pp. 292-301, 2019.
- [5] J. Li, N. Wang, D. Zhou, W. Hu, Q. Huang, Z. Chen and F. Blaabjerg, "Optimal reactive power dispatch of permanent magnet synchronous generator-based wind farm considering levelised production cost minimisation," *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 1-12, 2020.
- [6] "BP Energy Outlook 2021," BP p.l.c., London, UK, 2021.
- [7] "Renewables 2024: Analysis and forecast to 2030," International Energy Agency (IEA), France, 2024.
- [8] L. Tô, "Nghị quyết 70-NQ/TW (20/8/2025): Bảo đảm an ninh năng lượng quốc gia đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045," *Ban chấp hành Trung ương*, 2025.
- [9] "Vietnam's National Electricity Development Plan for the Period 2021-2030, Vision to 2050," Vietnam Energy Institute, Hanoi, Vietnam, 2023.
- [10] *Decision 500/QĐ-TTg: Approving the Vietnam's National Electricity Development Plan for the Period 2021-2030, Vision to 2050*, Hanoi, Vietnam: Prime Minister, 2023.
- [11] *Plan 262/QĐ-TTg: Implementing Vietnam's National Electricity Development Plan for the period 2021-2030, vision to 2050*, Hanoi, Vietnam: Prime Minister, 2024.
- [12] S. N. Dinh, L. T. Nguyen and A. V. Truong, "Nâng cao hiệu quả thiết kế đầu tư mở rộng điện gió trong điều kiện cạnh tranh thị trường điện có xét đến tính bất định," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 229, no. 14, pp. 280-288, 2024.
- [13] "Quy hoạch phát triển điện lực Việt Nam thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến 2050," Viện Năng Lượng, Hà Nội, 2023.
- [14] A. A. Eladl, S. Fawzy, E. E. Abd-Raboh, A. Elmitwally, G. Agundis-Tinajero, J. M. Guerrero and M. A. Hassan, "A comprehensive review on wind power

- spillage: Reasons, minimization techniques, real applications, challenges, and future trends," *Electric Power Systems Research*, vol. 226, p. 109915, 2024.
- [15] J. Zhang, M. Cui, B.-M. Hodge, A. Florita and J. Freedman, "Ramp forecasting performance from improved short-term wind power forecasting over multiple spatial and temporal scales," *Energy*, vol. 122, pp. 528-541, 2017.
- [16] E. A. Tuncar, Ş. Sağlam and B. Oral, "A review of short-term wind power generation forecasting methods in recent technological trends," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 197-209, 2024.
- [17] K. Kumar, P. Prabhakar, A. Verma, S. Saroha and K. Singh, "Advancements in wind power forecasting: A comprehensive review of artificial intelligence-based approaches," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 84, p. 8331–8360, 2025.
- [18] W. Dong, H. Sun, J. Tan, Z. Li, J. Zhang and Y. Y. Zhao, "Short-term regional wind power forecasting for small datasets with input data correction, hybrid neural network, and error analysis," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 7675-7692, 2021.
- [19] S. Bjarghov, M. Löschenbrand, A. U. N. I. Saif, R. A. Pedrero, C. Pfeiffer and S. K. Khadem, "Developments and Challenges in Local Electricity Markets: A Comprehensive Review," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 58910 - 58943, 2021.
- [20] T.-H. Le, P. Han, H.-C. Le and M.-T. Bui, "Electricity market development in Vietnam: Historical trends and future outlooks," *Utilities Policy*, vol. 81, p. 101510, 2023.
- [21] "Energy Prices and Costs in Europe: Report from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions," European Commission, Brussels, 2020.
- [22] O. Valarezo, T. Gómez, J. P. Chaves-Avila, L. Lind, M. Correa, D. U. Ziegler and R. Escobar, "Analysis of New Flexibility Market Models in Europe," *Energies*, vol. 14, no. 12, p. 3521, 2021.
- [23] P. Shinde and M. Amelin, "A Literature Review of Intraday Electricity Markets and Prices," *IEEE Milan PowerTech*, p. 18938508, 2019.
- [24] M. Haugen, H. Farahmand, S. Jaehnert and S.-E. Fleten, "Representation of uncertainty in market models for operational planning and forecasting in renewable power systems: a review," *Energy Systems*, 2023.
- [25] B. Li and M. Ghiasi, "A New Strategy for Economic Virtual Power Plant Utilization in Electricity Market Considering Energy Storage Effects and Ancillary Services," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 16, p. 2863–2874, 2021.
- [26] F. Peng, W. Zhang, W. Zhou, J. Tao, H. Sun, S. Hu, Q. Lyu, Y. Wang and X. Fan, "Review on bidding strategies for renewable energy power producers

- participating in electricity spot markets," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 58, p. 103329, 2023.
- [27] W. Hamanah, M. Abido and L. M. Alhems, "Optimum Sizing of Hybrid PV, Wind, Battery and Diesel System Using Lightning Search Algorithm," *Arabian Journal For Science And Engineering*, 2019.
- [28] J. Dobschinski, E. D. Pascalis, A. Wessel, L. v. Bremen, B. Lange, K. Rohrig, Y.-M. S. Drenan, I. Fraunhofer, O. ForWind and a. E. Germany, "The potential of advanced shortest-term forecasts and dynamic prediction intervals for reducing the wind power induced reserve requirements," *Scientific Proceedings of the European Wind Power Conference*, p. 177–182, 2010.
- [29] H. Holttinen, "Handling of wind power forecast errors in the Nordic power market," *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, p. 9475028, 2006.
- [30] T. Dai and W. Qiao, "Trading Wind Power in a Competitive Electricity Market Using Stochastic Programming and Game Theory," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 805-815, 2013.
- [31] J. Liang, S. Grijalva and R. G. Harley, "Increased Wind Revenue and System Security by Trading Wind Power in Energy and Regulation Reserve Markets," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2, no. 3, pp. 340-347, 2011.
- [32] E. Du, N. Zhang, C. Kang, B. Kroposki, H. Huang, M. Miao and Q. Xia, "Managing Wind Power Uncertainty Through Strategic Reserve Purchasing," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 2547-2559, 2017.
- [33] J. Matevosyan and L. Soder, "Minimization of imbalance cost trading wind power on the short term power market," *IEEE Russia Power Tech*, p. 9925004, 2005.
- [34] W. Hu and Z. Chen, "Stochastic optimal wind power bidding strategy in short-term electricity market," *International Review of Electrical Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 3380-3390, 1012.
- [35] P. Pinson, C. Chevallier and G. N. Kariniotakis, "Trading Wind Generation From Short-Term Probabilistic Forecasts of Wind Power," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 1148-1156, 2007.
- [36] Y. Yang, H. Lou, J. Wu, S. Zhang and S. Gao, "A survey on wind power forecasting with machine learning approaches," *Neural Computing and Applications*, vol. 36, p. 12753–12773, 2024.
- [37] Y. Z. Alharthi, H. Chiroma and L. A. Gabralla, "Enhanced framework embedded with data transformation and multi-objective feature selection algorithm for forecasting wind power," *scientific reports*, vol. 15, p. 16119, 2025.
- [38] Y. Zhang, X. Kong, J. Wang, H. Wang and X. Cheng, "Wind power forecasting system with data enhancement and algorithm improvement," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 196, p. 114349, 2024.

- [39] W. Jiang, B. Liu, Y. Liang, H. Gao, P. Lin, D. Zhang and G. Hu, "Applicability analysis of transformer to wind speed forecasting by a novel deep learning framework with multiple atmospheric variables," *Applied Energy*, vol. 353, p. 122155, 2024.
- [40] P. P. Biswas, P. N. Suganthan and G. A. J. Amaratunga, "Optimal power flow solutions incorporating stochastic wind and solar power," *Energy Conversion and Management*, vol. 148, pp. 1194-1207, 2017.
- [41] M. H. D. M. Ribeiro, R. G. d. Silva, S. R. Moreno, C. Canton, J. H. K. Larcher, S. F. Stefenon, V. C. Mariani and L. d. S. Coelho, "Variational mode decomposition and bagging extreme learning machine with multi-objective optimization for wind power forecasting," *Applied Intelligence*, vol. 54, p. 3119–3134, 2024.
- [42] G. Bathurst, J. Weatherill and G. Strbac, "Trading wind generation in short term energy markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 3, pp. 782-789, 2002.
- [43] G. Sujan, C. D. Ravinesh, C.-P. David and S.-S. Sancho, "Two-step deep learning framework with error compensation technique for short-term, half-hourly electricity price forecasting," *Applied Energy*, vol. 353, p. 122059, 2024.
- [44] A. Sagu, N. S. Gill, P. Gulia, P. K. Singh and W.-C. Hong, "Design of Metaheuristic Optimization Algorithms for Deep Learning Model for Secure IoT Environment," *Sustainability*, vol. 15, no. 3, p. 2204, 2023.
- [45] A. Kara, E. Pekel, E. Ozcetin and G. B. Yıldız, "Genetic algorithm optimized a deep learning method with attention mechanism for soil moisture prediction," *Neural Computing and Applications*, vol. 36, p. 1761–1772, 2024.
- [46] N. Bacanin, L. Jovanovic, M. Zivkovic, V. Kandasamy, M. Antonijevic, M. Deveci and I. Strumberger, "Multivariate energy forecasting via metaheuristic tuned long-short term memory and gated recurrent unit neural networks," *Information Sciences*, vol. 642, p. 119122, 2023.
- [47] X. Cui, J. Zhu, L. Jia, J. Wang and Y. Wu, "A novel heat load prediction model of district heating system based on hybrid whale optimization algorithm (WOA) and CNN-LSTM with attention mechanism," *Energy*, vol. 312, p. 133536, 2024.
- [48] Z. Wu, N. Cui, W. Zhang, C. Liu, X. Jin, D. Gong, L. Xing, L. Zhao, S. Wen and Y. Yang, "Estimating soil moisture content in citrus orchards using multi-temporal sentinel-1A data-based LSTM and PSO-LSTM models," *Journal of Hydrology*, vol. 637, p. 131336, 2024.
- [49] V. Gundu and S. P. Simon, "PSO–LSTM for short term forecast of heterogeneous time series electricity price signals," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 12, p. 2375–2385, 2021.

- [50] Y. Son, X. Zhang, Y. Yoon, J. Cho and S. Choi, "LSTM–GAN based cloud movement prediction in satellite images for PV forecast," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 14, p. 12373–12386, 2023.
- [51] R. Villasana, L. L. Garver and S. J. Salon, "Transmission network planning using linear programming," *IEEE Trans. Power App and Syst.*, vol. 104, no. 2, pp. 349-356, 1985.
- [52] Y. P. Dusonchet and A. H. El-Abiad, "Transmission planning using discrete dynamic optimization," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vols. PAS-92, pp. 1358-1371, 1973.
- [53] I. Sanchez, R. Romero, J. Mantovani and M. Rider, "Transmission-expansion planning using the DC model and nonlinear programming technique," *Proceedings of IEE -Gener. Transm. Distrib.*, vol. 152, no. 6, pp. 763-769, 2005.
- [54] A. Akter, E. I. Zafir, N. H. Dana, R. Joysoyal, S. K. Sarker, L. Li, S. M. Muyeen, S. K. Das and I. Kamwa, "A review on microgrid optimization with meta-heuristic techniques: Scopes, trends and recommendation," *Energy Strategy Reviews*, vol. 51, p. 101298, 2024.
- [55] H. V.-R. Gerard, T. B.-R. Maria, V. M. Alonso, A. Ivan, M. C.-D. Jorge, C. O.-B. José and G. A.-C. Juan, "A systematic review of metaheuristic algorithms in electric power systems optimization," *Applied Soft Computing*, vol. 150, p. 111047, 2024.
- [56] M. C. d. Rocha and J. Saraiva, "Transmission expansion planning – A multiyear PSO based approach considering load uncertainties," *Proceedings of PowerTech Conference, 2013 IEEE Grenoble*, pp. 1-6, 2013.
- [57] E. L. D. Silva, H. A. Gil and J. M. Areiza, "Transmission network expansion planning under an improved genetic algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 3, pp. 1168-1175, 2000.
- [58] R. A. Gallego, R. Romero and A. J. Monticelli, "Tabu search algorithm for network synthesis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 2, pp. 490-495, 2000.
- [59] S. Binato, G. C. Oliveira and J. L. Araújo, "A greedy randomized adaptive search procedure for transmission expansion planning," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, pp. 247-253, 2001.
- [60] N. Leeprechanon, P. Limsakul and S. Pothiya, "Optimal transmission expansion planning using ant colony optimization," *Journal of Sustainable Energy & Environment*, vol. 1, no. 2, pp. 71-76, 2010.
- [61] A. Entezari, A. Aslani, R. Zahedi and Y. Noorollahi, "Artificial intelligence and machine learning in energy systems: A bibliographic perspective," *Energy Strategy Reviews*, vol. 45, p. 101017, 2023.
- [62] E. Hosseini, A. M. Al-Ghaili, D. H. Kadir, S. S. Gunasekaran, A. N. Ahmed, N. Jamil, M. Deveci and R. A. Razali, "Meta-heuristics and deep learning for

- energy applications: Review and open research challenges (2018–2023)," *Energy Strategy Reviews*, vol. 53, p. 101409, 2024.
- [63] X. Zhang, H. Zhang, L. Zhang, L. Du, Q. Wang and D. Zhou, "Optimization of a wind-PV-hydrogen production coupling system considering economy, environment, and reliability," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 105, pp. 441-457, 2025.
- [64] M. Qais, H. Hasanien and S. Alghuwainem, "Enhanced salp swarm algorithm: Application to variable speed wind generators," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 80, pp. 82-96, 2019.
- [65] U. K. Nkalo, O. O. Inya, P. I. Obi, A. U. Bola and D. I. Ewean, "A modified multi-objective particle swarm optimization (M-MOPSO) for optimal sizing of a solar–wind–battery hybrid renewable energy system," *Solar Compass*, vol. 12, p. 100082, 2024.
- [66] E. Hosseini, L. Reinhardt and D. B. Rawat, "Optimizing Gradient Methods for IoT Applications," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 15, pp. 13694 - 13704, 2022.
- [67] Y. Wang, R. Zou, F. Liu, L. Zhang and Q. Liu, "A review of wind speed and wind power forecasting with deep neural networks," *Applied Energy*, vol. 304, p. 117766, 2021.
- [68] A. Saeed, C. Li, Z. Gan, Y. Xie and F. Liu, "A simple approach for short-term wind speed interval prediction based on independently recurrent neural networks and error probability distribution," *Energy*, vol. 238, no. Part C, p. 122012, 2022.
- [69] W. Mohammed, "Five different distributions and metaheuristics to model wind speed distribution," *Journal of Thermal Engineering*, vol. 7, no. 14, p. 1898–1920, 2021.
- [70] S. Jahan, N. Masseran and W. Z. W.Z., "Wind speed analysis using Weibull and lower upper truncated Weibull distribution in Bangladesh," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 5456-5465, 2024.
- [71] P. Wais, "A review of Weibull functions in wind sector," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 1099-1107, 2017.
- [72] R. Roy and H. T. Jadhav, "Optimal power flow solution of power system incorporating stochastic wind power using Gbest guided artificial bee colony algorithm," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 562-578, 2015.
- [73] Z. Ullah and M. Baseer, "Operational Planning and Design of Market-Based Virtual Power Plant with High Penetration of Renewable Energy Sources," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 11, no. 3, pp. 620-629, 2022.
- [74] F. Liu, X. Wang, Y. Xiao and Z. Bie, "Robust Pricing of Energy and Ancillary Services in Combined Electricity and Natural Gas Markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 1, pp. 603 - 616, 2022.

- [75] L. Hadjipaschalis, A. Poullikkas and V. Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 6-7, pp. 1513-1522, 2009.
- [76] B. Dunn, H. Kamath and J.-M. Tarascon, "Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices," *Science*, vol. 334, pp. 928-935, 2011.
- [77] O. Alsac and B. Stott, "Optimal Load Flow with Steady-State Security," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vols. PAS-93, no. 3, pp. 745-751, 1974.
- [78] R. Ferrero, S. Shahidehpour and V. Ramesh, "Transaction analysis in deregulated power systems using game theory," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 1340-1347, 1997.
- [79] V. A. Truong, N. S. Dinh and T. L. Duong, "Profit Maximization of Wind Power Plants in the Electricity Market Based on Linking Models Between Energy Sources," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 49, no. 8, p. 6275–6291, 2024.
- [80] P. Georgios and B. Pandelis, "Review and Comparison of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization in the Optimal Power Flow Problem," *Energies*, vol. 16, no. 3, p. 1152, 2023.
- [81] G. Bertrand and A. Papavasiliou, "An Analysis of Threshold Policies for Trading in Continuous Intraday Electricity Markets," *15th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, p. 18130454, 2018.
- [82] A. Abedi, M. R. Hesamzadeh and F. Romerio, "Adaptive robust vulnerability analysis of power systems under uncertainty: A multilevel OPF-based optimization approach," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 134, p. 107432, 2022.
- [83] M. Cao, Q. Xu, X. Qin and J. Cai, "Battery energy storage sizing based on a model predictive control strategy with operational constraints to smooth the wind power," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 115, pp. 1-10, 2020.
- [84] M. A. Elaziz, A. Dahou, L. Abualigah, L. Yu, M. Alshinwan, A. M. Khasawneh and S. Lu, "Advanced metaheuristic optimization techniques in applications of deep neural networks: a review," *Neural Computing and Applications*, vol. 33, p. 14079–14099, 2021.
- [85] S. Mirjalili, "Genetic Algorithm," *Evolutionary Algorithms and Neural Networks. Studies in Computational Intelligence*, vol. 780, p. 43–55, 2019.
- [86] B. L. Miller and D. E. Goldberg, "Genetic algorithms, tournament selection, and the effects of noise," *Complex Systems*, vol. 9, no. 3, p. 193–212., 1995.
- [87] R. Kumar, "Blending roulette wheel selection & rank selection in genetic algorithms," *International Journal of Machine Learning and Computing*, vol. 2, no. 4, p. 365, 2012.

- [88] M. Srinivas and L. M. Patnaik, "Genetic algorithms: A survey," *Computer*, vol. 27, no. 6, p. 17–26., 1994.
- [89] E. Semenkin and M. Semenkina, "Self-configuring genetic algorithm with modified uniform crossover operator," *International Conference in Swarm Intelligence*, p. 414–421, 2012.
- [90] K. Deep and M. Thakur, "A new mutation operator for real coded genetic algorithms," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 193, no. 1, p. 211–230., 2007.
- [91] M. Srinivas and L. M. Patnaik, "Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 24, no. 4, p. 656–667., 1994.
- [92] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," in *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, Perth, WA, Australia, 1995.
- [93] D. Freitas, L. G. Lopes and F. Morgado-Dias, "Particle Swarm Optimisation: A Historical Review Up to the Current Developments," *Entropy*, vol. 22, no. 3, p. 362, 2020.
- [94] M. R. Bonyadi and Z. Michalewicz, "Particle Swarm Optimization for Single Objective Continuous Space Problems: A Review," *Evolutionary Computation*, vol. 25, no. 1, pp. 1 - 54, 2017.
- [95] J. Kennedy, "Small worlds and mega-minds: effects of neighborhood topology on particle swarm performance," in *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, Washington, DC, USA, 1999.
- [96] M. Clerc, "The swarm and the queen: Towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization.," in *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, Washington, DC, USA, 1999.
- [97] R. Kundu, S. Das, R. Mukherjee and S. Debchoudhury, "An improved particle swarm optimizer with difference mean based perturbation," *Neurocomputing*, vol. 129, pp. 315-333, 2014.
- [98] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long Short-Term Memory," *Neural Computation*, vol. 9, no. 8, pp. 1735 - 1780, 1997.
- [99] F. Shahid, A. Zameer and M. Muneeb, "A novel genetic LSTM model for wind power forecast," *Energy*, vol. 223, p. 120069, 2021.
- [100] A. M. Gomez, K. Morozovska, T. Laneryd and P. Hilber, "Optimal sizing of the wind farm and wind farm transformer using MILP and dynamic transformer rating," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 107645, no. 136, p. 107645, 2022.
- [101] M. Hannan, S. Wali, P. Ker, M. A. Rahman, M. Mansor, V. K. Ramachandramurthy, K. Muttaqi, T. Mahlia and Z. Dong, "Battery energy-

- storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues," *Journal of Energy Storage*, vol. 42, p. 103023, 2021.
- [102] K. Mongird, V. V. Viswanathan, P. J. Balducci, M. J. E. Alam, V. Fotedar, V. S. Koritarov and B. Hadjerioua, "Energy Storage Technology and Cost Characterization Report," U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, 2019.
- [103] R. Zimmerman and C. Murillo-Sanchez, "Matpower," 20 1 2019. [Online]. Available: <https://matpower.org/dld/1244/?tmstv=1756871790>. [Accessed 10 1 2022].
- [104] C. Dhanamjayulu, P. Sanjeevikumar and S. Muyeen, "A structural overview on transformer and transformer-less multi level inverters for renewable energy applications," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 10299-10333, 2022.
- [105] M. Fantauzzi, D. Lauria, F. Mottola and D. Proto, "Estimating Wind Farm Transformers Rating through Lifetime Characterization Based on Stochastic Modeling of Wind Power," *Energies*, vol. 14, no. 1498, pp. 1-16, 2021.
- [106] S. H. H. Kazmi, T. Laneryd, K. Giannikas, S. F. Ahrenfeldt, T. H. O. Troels Stybe Sørensen a and J. Holbøll, "Cost optimized dynamic design of offshore windfarm transformers with reliability and contingency considerations," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 128, p. 106684, 2021.
- [107] "International Standards: Power transformers – Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers," *The International Electrotechnical Commission (IEC)*, Vols. IEC 60076-7, 2018.
- [108] L. T. Seguro J.V., "Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. J.V. Seguro, T.W. Lambert / J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 85 (2000) 75-84*, vol. 85, pp. 75-84, 2000.
- [109] D. Z. Ray and E. M.-S. Carlos, "MATPOWER Test Cases," 24 January 2018. [Online]. Available: https://matpower.org/docs/ref/matpower5.0/case_ieee30.html. [Accessed 25 July 2023].

PHỤ LỤC 1: QUÁ TRÌNH TỐI ƯU HÓA CÁC THUẬT TOÁN LAI

Bảng 0.1. Kết quả thuật toán lai LSTM-GA

Lần thực thi	Công suất ESS (MW)			Độ lệch % ΔP		Doanh thu (triệu \$/năm)
	bus 5	bus 11	Sum	bus 5	bus 11	
1	11	8	19	-15.9	-16.4	75.924
2	20	12	32	-17.2	-16.5	75.798
3	6	15	21	-18.2	-15.9	75.762
4	6	9	15	-15.8	-16	75.933
5	5	9	14	-15.7	-16.8	75.906
6	6	14	20	-17.3	-17.1	75.755
7	18	7	25	-18.4	-15.8	75.753
8	5	10	15	-15.8	-16.1	75.942
9	3	15	18	-15.7	-16.1	75.933
10	6	12	18	-15.9	-16	75.942
11	10	4	14	-18.3	-16.2	75.756
12	10	4	14	-18.3	-16.2	75.777
13	14	14	28	-16.4	-16.4	75.879
14	5	12	17	-16.1	-16.4	75.906
15	11	11	22	-16	-17.5	75.856
Trung bình	9	10	19	-16.7	-16.4	

Bảng 0.2. Kết quả thuật toán lai LSTM-PSO

Lần Thực thi	Doanh thu (triệu \$/năm)	Độ lệch % ΔP		Công suất ESS (MW)		
		Bus 5	Bus 11	Bus 5	Bus 11	Sum
1	75.935	-16.3	-15.8	8	0	8
2	75.872	-16.4	-16.4	9	10	19
3	75.944	-15.6	-16.4	15	6	21
4	75.926	-15.6	-16.2	11	15	26
5	75.908	-16.0	-16.4	3	5	8
6	75.926	-16.5	-15.7	11	5	16
7	75.844	-16.1	-15.9	5	8	13
8	75.872	-16.4	-16.4	20	3	23
9	75.935	-16.3	-15.8	9	11	20
10	75.908	-16.4	-16.0	5	6	11
11	75.899	-16.0	-16.5	6	11	17
12	75.935	-16.1	-16.0	12	4	16
13	75.917	-16.4	-15.9	7	7	14
14	75.926	-15.8	-16.0	3	4	7
15	75.872	-15.6	-15.6	17	3	20
Trung bình		-16.1	-16.1	9	7	16