

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA ĐIỆN



ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP
NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỆN
CHUYÊN NGÀNH: HỆ THỐNG ĐIỆN

ĐỀ TÀI:

**ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA NHÀ MÁY ĐIỆN ẢO
ĐỐI VỚI CÁC CHẾ ĐỘ VẬN HÀNH HỆ THỐNG ĐIỆN**

Người hướng dẫn:	PGS. TS. LÊ ĐÌNH DƯƠNG
Đồng hướng dẫn:	ThS. LƯƠNG PHÚ NHÂN
Sinh viên thực hiện 1:	VĂN NGỌC QUÝ
Mã số sinh viên:	105200209
Lớp:	20DCLC2
Sinh viên thực hiện 2:	TRẦN VĂN HAI
Mã số sinh viên:	105200228
Lớp:	20DCLC3
Sinh viên thực hiện 3:	NGUYỄN TRƯỜNG PHƯỚC
Mã số sinh viên:	105200241
Lớp:	20DCLC3

Đà Nẵng, 06/2025

TÓM TẮT

Sự phát triển nhanh chóng của các nguồn năng lượng tái tạo phân tán (Distributed Energy Resources – DERs), đặc biệt là điện mặt trời và điện gió, đã và đang đặt ra những thách thức lớn đối với tính ổn định và độ tin cậy của Hệ thống điện truyền thống. Trong bối cảnh đó, mô hình Nhà máy điện ảo (Virtual Power Plant – VPP) nổi lên như một giải pháp tiềm năng, cho phép tích hợp và điều phối hiệu quả các nguồn DERs, hệ thống lưu trữ năng lượng, cũng như các tải có khả năng điều chỉnh. Tuy nhiên, việc triển khai VPP cũng đặt ra những vấn đề mới liên quan đến tác động của nó đối với việc vận hành Hệ thống điện, nhất là trong điều kiện biến động cao của các nguồn tái tạo.

Báo cáo nghiên cứu này tập trung đánh giá toàn diện các chế độ vận hành của Hệ thống điện khi ứng dụng mô hình VPP. Thông qua việc sử dụng các công cụ, phần mềm mô phỏng và hỗ trợ như MATLAB/Simulink, PSS/E, Python và AutoCAD, nhóm nghiên cứu tiến hành phân tích hiệu quả vận hành và xác định ảnh hưởng của VPP đến các đặc tính kỹ thuật của hệ thống trong các kịch bản vận hành khác nhau, cùng với đó là lập kế hoạch tối ưu vận hành cho VPP trong tương lai nhằm giảm đáng kể gánh nặng tính toán thời gian thực, tránh các thuật toán phức tạp phải chạy liên tục trong môi trường có độ trễ thấp. Kết quả nghiên cứu nhằm đề xuất các quan điểm rõ ràng và có cơ sở về vai trò của VPP trong việc cải thiện khả năng tối ưu hóa vận hành, tăng cường độ ổn định, và nâng cao hiệu quả tích hợp nguồn tái tạo vào lưới điện.

Từ khóa: Nhà máy điện ảo (VPP), năng lượng tái tạo, điều khiển hệ thống, tối ưu hóa hệ thống điện, tích hợp lưới điện.

NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

STT	Họ và tên	Lớp	MSSV	Ngành
1	Văn Ngọc Quý	20DCLC2	105200209	Kỹ thuật điện
2	Trần Văn Hai	20DCLC3	105200228	Kỹ thuật điện
3	Nguyễn Trường Phước	20DCLC3	105200241	Kỹ thuật điện

1. Tên đề tài đồ án: “Đánh giá ảnh hưởng của nhà máy điện ảo đối với các chế độ vận hành hệ thống điện”.

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

3. Các số liệu ban đầu:

Số liệu lưới điện IEEE 39-BUS New England

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

Chương 1: Tổng quan về mô hình Nhà máy điện ảo

Chương 2: Mô phỏng nhà máy điện ảo và lập kế hoạch vận hành tối ưu trong các điều kiện

Chương 3: Giao thức kết nối lưới điện

Chương 4: Kịch bản vận hành và ảnh hưởng của Nhà máy điện ảo

Chương 5: Kết luận và đề xuất hướng phát triển

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

Bản vẽ, đồ thị được trình chiếu trên slide báo cáo.

6. Họ tên người hướng dẫn:

1	PGS. TS. Lê Đình Dương	Giảng viên, Khoa Điện, Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng	Hướng dẫn chính
2	ThS. Lương Phú Nhân	Chi nhánh Công ty TNHH MTV Vận hành hệ thống điện và thị trường điện Quốc gia - Trung tâm Điều độ Hệ thống điện miền Trung	Đồng hướng dẫn

7. Ngày giao nhiệm vụ đồ án: 24/02/2025

8. Ngày hoàn thành đồ án: 08/06/2025

Đà Nẵng, ngày tháng năm 2025

Phụ trách Bộ môn

Đồng hướng dẫn

Người hướng dẫn

TS. Lê Hồng Lâm

ThS. Lương Phú Nhân

PSG. TS. Lê Đình Dương

LỜI NÓI ĐẦU

Trong bối cảnh hiện nay, cùng với sự phát triển mạnh mẽ của các ngành công nghiệp, nhu cầu tiêu thụ điện năng không ngừng gia tăng, đặt ra yêu cầu cấp thiết về việc sản xuất và truyền tải điện một cách an toàn, hiệu quả và bền vững. Điều này đã và đang tạo nên những thách thức to lớn cho ngành Điện, đòi hỏi sự đổi mới, tiên phong trong công cuộc công nghiệp hoá – hiện đại hoá đất nước. Do đó, việc đào tạo nguồn nhân lực có trình độ chuyên môn cao, đáp ứng được yêu cầu ngày càng khắt khe của thực tiễn là nhiệm vụ trọng tâm và cấp bách.

Trước hết, chúng em xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến **PGS. TS. Lê Đình Dương**, người thầy đã tận tình hướng dẫn, định hướng nghiên cứu và luôn đồng hành cùng chúng em trong suốt quá trình thực hiện đề án tốt nghiệp. Những kiến thức quý báu, sự tận tâm và tinh thần trách nhiệm của Thầy là động lực to lớn giúp chúng em hoàn thành công trình này một cách hiệu quả nhất.

Đồng thời, chúng em xin gửi lời cảm ơn chân thành tới **ThS. Lương Phú Nhân** – Cán bộ doanh nghiệp đồng hướng dẫn (Chi nhánh Công ty TNHH MTV Vận hành HTĐ và TTĐ Quốc gia – Trung tâm Điều độ Hệ thống điện miền Trung), người đã hỗ trợ chúng em rất nhiều trong việc tiếp cận thực tiễn, góp phần làm rõ và bổ sung những khía cạnh quan trọng cho đề tài. Sự đồng hành và chia sẻ kinh nghiệm thực tế của Anh là một phần không thể thiếu trong quá trình hoàn thiện báo cáo này.

Cuối cùng, chúng em xin trân trọng cảm ơn **Hội đồng bảo vệ**, gồm các Thầy/Cô đã dành thời gian quý báu để đọc, nhận xét và phản biện báo cáo. Những ý kiến đóng góp thẳng thắn và mang tính xây dựng của quý Thầy/Cô là động lực để chúng em tiếp tục học hỏi, hoàn thiện bản thân và nâng cao chất lượng nghiên cứu.

Dù đã nỗ lực hết mình trong quá trình thực hiện, song do hạn chế về kiến thức và kinh nghiệm, báo cáo chắc chắn không tránh khỏi những thiếu sót. Chúng em rất mong nhận được những ý kiến đóng góp quý báu từ quý Thầy/Cô và các đồng nghiệp để tiếp tục học hỏi và rèn luyện, phục vụ tốt hơn cho công việc trong tương lai.

Nhóm sinh viên thực hiện

Văn Ngọc Quý - Trần Văn Hai - Nguyễn Trường Phước

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan rằng trong suốt quá trình thực hiện đề án tốt nghiệp, luôn nghiêm túc tuân thủ các quy định về liêm chính học thuật, cụ thể như sau:

- Không gian lận, bịa đặt, đạo văn hoặc tiếp tay cho người học khác vi phạm quy định học thuật.
- Trung thực trong việc trình bày, thể hiện các hoạt động học thuật cũng như kết quả nghiên cứu của bản thân.
- Không làm giả hoặc sửa chữa hồ sơ học thuật dưới bất kỳ hình thức nào.
- Không sử dụng các biện pháp không hợp pháp hoặc trái quy định nhằm tạo lợi thế cá nhân.
- Chủ động tìm hiểu và tuân thủ các quy định liên quan đến liêm chính học thuật và luật sở hữu trí tuệ.
- Luôn trích dẫn rõ ràng nguồn gốc khi sử dụng sản phẩm học thuật của người khác.

Chúng tôi xin cam đoan rằng tất cả số liệu và kết quả nghiên cứu trong đề án này là trung thực, do chính chúng tôi thực hiện, và chưa từng được sử dụng để bảo vệ bất kỳ học vị nào trước đó. Mọi sự hỗ trợ trong quá trình thực hiện đề án đã được ghi nhận, và các tài liệu tham khảo đều được trích dẫn rõ ràng, tuân thủ quy định và được phép công bố.

Nhóm sinh viên thực hiện

Văn Ngọc Quý - Trần Văn Hai - Nguyễn Trường Phước

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU	1
1. Bối cảnh toàn cầu và xu hướng chuyển dịch năng lượng	1
2. Hệ thống Điện Việt Nam và thách thức trong quá trình chuyển dịch	2
2.1. <i>Nhiệt điện than và tương lai năng lượng tại Việt Nam</i>	2
2.2. <i>Chính sách phát triển năng lượng tái tạo</i>	3
2.3. <i>Thách thức đối với việc tích hợp năng lượng tái tạo tại Việt Nam</i>	5
3. Lý do chọn đề tài	6
4. Mục tiêu và phương pháp nghiên cứu	7
5. Bố cục đề tài	8
Chương 1: TỔNG QUAN VỀ MÔ HÌNH NHÀ MÁY ĐIỆN ẢO	9
1.1. Giới thiệu	9
1.2. Cấu trúc của VPP	11
1.2.1. <i>Các nguồn năng lượng phân tán (DER)</i>	11
1.2.2. <i>Cơ sở hạ tầng truyền thông:</i>	11
1.2.3. <i>Hệ thống điều khiển trung tâm:</i>	12
1.2.4. <i>Giao diện thị trường:</i>	12
1.3. Nguyên lý hoạt động	12
1.4. Lợi ích và thách thức	13
1.4.1. <i>Lợi ích của VPP</i>	13
1.4.2. <i>Thách thức của VPP</i>	13
1.5. Ứng dụng	14
1.5.1. <i>Tiềm năng mang lại</i>	14
1.5.2. <i>Mô hình nhà máy điện ảo trên thế giới</i>	15
1.6. Tổng kết chương 1	17
Chương 2: MÔ PHỎNG NHÀ MÁY ĐIỆN ẢO VÀ LẬP KẾ HOẠCH VẬN HÀNH TỐI ƯU TRONG CÁC ĐIỀU KIỆN	18
2.1. Giới thiệu tổng quan về MATLAB/Simulink	18
2.2. Tổng quan mô hình VPP	19
2.3. Xây dựng mô hình	20
2.3.1. <i>Khởi lưới truyền tải</i>	21
2.3.2. <i>Bus bar (thanh góp)</i>	22
2.3.3. <i>Đường dây truyền tải</i>	23

2.3.4.	<i>Nhà máy thủy điện tích năng</i>	24
2.3.5.	<i>Tải hệ thống</i>	26
2.3.6.	<i>Wind Farm</i>	27
2.3.7.	<i>Hệ thống đo lường</i>	28
2.4.	Mô phỏng hoạt động tối ưu của VPP (MATLAB Optimization Toolbox)	30
2.4.1.	<i>Mô hình tối ưu hóa kết hợp điện gió – thủy điện tích năng</i>	30
2.4.2.	<i>Lợi ích của việc kết hợp tối ưu hóa vào mô hình VPP</i>	31
2.4.3.	<i>Mô hình toán học và các ràng buộc</i>	33
2.4.4.	<i>Cấu trúc chương trình MATLAB</i>	36
2.4.5.	<i>Lập kế hoạch mô phỏng tối ưu</i>	39
2.4.6.	<i>Kết quả mô hình VPP Simulink</i>	43
2.5.	Tổng kết chương 2	45
Chương 3: GIAO THỨC KẾT NỐI LƯỚI ĐIỆN		47
3.1.	Giới thiệu phần mềm PSS/E	47
3.2.	Lưới điện mô phỏng	47
3.2.1.	<i>Mô tả lưới điện</i>	47
3.2.2.	<i>Thông số lưới điện</i>	49
3.2.3.	<i>Bài toán phân bố công suất</i>	55
3.3.	Điểm kết nối	57
3.4.	Giao thức kết nối	59
3.5.	Xây dựng quy trình tạo tập tin snapshot từ dữ liệu thời gian thực trên PSS/E	62
3.6.	Tổng kết chương 3	72
Chương 4: KỊCH BẢN VẬN HÀNH VÀ ẢNH HƯỞNG CỦA NHÀ MÁY ĐIỆN ẢO		73
4.1.	Kịch bản xây dựng	73
4.1.1.	<i>Kịch bản vận hành số 1</i>	73
4.1.2.	<i>Kịch bản vận hành số 2</i>	75
4.2.	Cách thức hoạt động của VPP	76
4.3.	Kết quả	79
4.3.1.	<i>Kịch bản vận hành số 1</i>	79
4.3.2.	<i>Kịch bản vận hành số 2</i>	82
4.4.	Tổng kết chương 4	84
Chương 5: KẾT LUẬN VÀ ĐỀ XUẤT HƯỚNG PHÁT TRIỂN		90
5.1.	Kết quả đạt được	90

5.2.	Hạn chế về nghiên cứu.....	91
5.3.	Đề xuất hướng phát triển	91

DANH MỤC HÌNH

Hình 1: Đánh giá thống kê về năng lượng.....	3
Hình 1.1: Mô hình nhà máy điện ảo (VPP)	9
Hình 1.2: Mô hình nhà máy điện ảo Next Kraftwerke.....	15
Hình 2.1: Thiết kế mô hình VPP trong mô phỏng.....	20
Hình 2.2: Mô hình VPP trong Simulink.....	21
Hình 2.3: Khối lưới truyền tải.....	22
Hình 2.4: Bus Bar	23
Hình 2.5: Khối đường dây truyền tải	23
Hình 2.6: Nhà máy thủy điện tích năng	24
Hình 2.7: Mô hình nhà máy thủy điện tích năng bên trong khối.....	25
Hình 2.8: Tải hệ thống.....	26
Hình 2.9: Mô hình tải động bên trong khối	27
Hình 2.10: Trang trại gió.....	28
Hình 2.11: Khối đo lường	29
Hình 2.12: Khối đo lường bên trong.....	29
Hình 2.13: Lưu đồ thuật toán mô phỏng mô hình tối ưu hóa	37
Hình 2.14: Biểu đồ vận hành tối ưu của VPP trong điều kiện bình thường.....	40
Hình 2.15: Kết quả đáp ứng của mô hình VPP Simulink	43
Hình 2.16: Kết quả đáp ứng của thủy điện tích năng.....	44
Hình 3.1: Lưới điện IEEE 39-BUS	49
Hình 3.2: Kết quả tính trào lưu công suất trên lưới điện	57
Hình 3.3: Điểm đấu nối VPP (G11) trên lưới điện.....	58
Hình 3.4: Khu vực dễ bị ảnh hưởng trên lưới điện.....	59
Hình 3.5: Quy trình trao đổi dữ liệu của VPP và lưới điện.....	62
Hình 3.6: Đồ thị biến thiên tải	67
Hình 3.7: Đồ thị biến thiên nguồn	69
Hình 4.1: Thông số tại BUS 5 khi hoạt động bình thường	74
Hình 4.2: Thông số tại BUS 5 khi BUS 4 tăng đột ngột	74
Hình 4.3: Thông số tại BUS 11 khi hoạt động bình thường	75
Hình 4.4: Thông số tại BUS 11 khi gặp sự cố N-1.....	76
Hình 4.5: Quy trình vận hành và điều phối công suất trong hệ thống VPP.....	77
Hình 4.6: Thông số phụ tải BUS 4 trước và sau kịch bản vận hành	79

Hình 4.7: Trạng thái đường dây tại BUS 5 trước khi có VPP.....	80
Hình 4.8: Trạng thái đường dây tại BUS 5 sau khi có VPP.....	80
Hình 4.9: Kết quả phân bố công suất sau kịch bản vận hành 1.....	81
Hình 4.10: Trạng thái đường dây tại BUS 11 trước khi có VPP.....	82
Hình 4.11: Trạng thái đường dây tại BUS 11 sau khi có VPP.....	83
Hình 4.12: Kết quả phân bố công suất sau kịch bản vận hành sự cố 2.....	83
Hình 4.13: Hoạt động tối ưu của VPP trong 2 kịch bản vận hành sự cố.....	86
Hình 4.14: Kết quả đáp ứng sự cố của khối thủy điện tích năng.....	87
Hình 4.15: Kết quả đáp ứng sự cố của mô hình VPP Simulink.....	88

DANH MỤC BẢNG

<i>Bảng 1: Mục tiêu năng lượng tái tạo của Việt Nam (Dựa trên PDP8 và REDS).....</i>	<i>5</i>
<i>Bảng 2: Các thách thức và giải pháp tiềm năng cho việc tích hợp</i>	<i>6</i>
<i>Bảng 1.1: So sánh mô hình VPP tập trung và VPP phân tán.....</i>	<i>11</i>
<i>Bảng 2.1: Thông số khối lưới truyền tải</i>	<i>22</i>
<i>Bảng 2.2: Thông số khối Bus bar.....</i>	<i>23</i>
<i>Bảng 2.3: Thông số khối đường dây truyền tải.....</i>	<i>24</i>
<i>Bảng 2.4: Thông số khối máy đồng bộ.....</i>	<i>25</i>
<i>Bảng 2.5: Thông số khối hệ thống kích thích.....</i>	<i>26</i>
<i>Bảng 2.6: Tương quan giá biên cho ngày tiếp theo</i>	<i>39</i>
<i>Bảng 2.7: Công suất của trang trại gió ngày tiếp theo</i>	<i>39</i>
<i>Bảng 2.8: Công suất của tải nội bộ ngày tiếp theo.....</i>	<i>40</i>
<i>Bảng 2.9: Công suất của nhà máy thủy điện tích năng</i>	<i>43</i>
<i>Bảng 3.1: Các thành phần chính của Hệ thống IEEE 39-BUS</i>	<i>48</i>
<i>Bảng 3.2: Thông số máy phát</i>	<i>49</i>
<i>Bảng 3.3: Thông số phụ tải.....</i>	<i>50</i>
<i>Bảng 3.4: Thông số đường dây.....</i>	<i>51</i>
<i>Bảng 3.5: Thông số các nút</i>	<i>52</i>
<i>Bảng 3.6: Thông số máy biến áp.....</i>	<i>53</i>
<i>Bảng 3.7: Thông số máy biến áp 3 cuộn dây.....</i>	<i>54</i>
<i>Bảng 3.8: Các loại nút trong Hệ thống điện.....</i>	<i>55</i>
<i>Bảng 3.9: Chi tiết các bước script Load Flow.....</i>	<i>56</i>
<i>Bảng 3.10: Dữ liệu tải ban đầu.....</i>	<i>63</i>
<i>Bảng 3.11: Dữ liệu nguồn phát ban đầu.....</i>	<i>64</i>
<i>Bảng 3.12: Dữ liệu tải sau 48 chu kì</i>	<i>67</i>
<i>Bảng 3.13: Dữ liệu nguồn phát sau 48 chu kì</i>	<i>69</i>
<i>Bảng 4.1: Thống kê kết quả VPP hỗ trợ trong 48 chu kì.....</i>	<i>84</i>
<i>Bảng 4.2: Công suất của nhà máy thủy điện tích năng trong 2 kịch bản vận hành</i>	<i>87</i>

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

Kí hiệu/ viết tắt	Diễn giải
NLTT	Năng lượng tái tạo
VPP	Nhà máy điện ảo (Virtual Power Plant)
VREs	Năng lượng tái tạo có tính biến đổi (Variable Renewable Energy sources)
IBR	Tài nguyên năng lượng điện mà kết nối với lưới điện thông qua bộ nghịch lưu (Inverter-Based Resources)
PDP8	Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050 gọi tắt là Quy hoạch điện VIII (Vietnam's Eighth National Power Development Plan)
MoIT	Bộ Công Thương Việt Nam
REDS	Hệ thống năng lượng tái tạo và lưới điện thông minh (Renewable Energy and Smart Grid Systems)
DER	Nguồn năng lượng phân tán (Distributed Energy Resources)
PPA	Hợp đồng mua bán điện (Power Purchase Agreement)
HVAC	Hệ thống sưởi, thông gió và điều hòa không khí (Heating, Ventilation, and Air Conditioning)
CHP	Nhiệt điện kết hợp (Combined Heat and Power)
P2P	Mạng ngang hàng (Peer to peer)
PCC	Điểm kết nối chung (Common connection point)
EV	Xe điện (Electric Vehicle)
SOC	Trạng thái sạc (State of Charge)

MỞ ĐẦU

1. Bối cảnh toàn cầu và xu hướng chuyển dịch năng lượng

Toàn cầu đang chứng kiến một sự chuyển dịch mạnh mẽ hướng tới các nguồn năng lượng bền vững, chủ yếu do những lo ngại về biến đổi khí hậu và nhu cầu đảm bảo an ninh năng lượng. Sự gia tăng áp dụng các công nghệ năng lượng tái tạo (NLTT) như điện mặt trời và điện gió đã trở thành xu hướng chủ đạo nhờ chi phí ngày càng giảm và những lợi ích về môi trường mà chúng mang lại. Tuy nhiên, sự thay đổi căn bản từ hệ thống phát điện tập trung, dựa trên nhiên liệu hóa thạch có thể điều khiển sang các nguồn năng lượng tái tạo phân tán, có tính biến đổi, đang đặt ra những thách thức không nhỏ cho việc quản lý và vận hành lưới điện truyền thống. Sự chuyển đổi này không chỉ đơn thuần là thay thế các nguồn năng lượng mà còn là một cuộc cách mạng về cấu trúc và phương thức vận hành của toàn bộ hệ thống năng lượng, đòi hỏi sự thay đổi trong cách thức tiếp cận quản lý lưới điện hiện tại [1, 2].

Một trong những thách thức lớn nhất của việc tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo có tính biến đổi (VREs) là sự không ổn định và tính gián đoạn của năng lượng sơ cấp. Sản lượng điện từ năng lượng mặt trời chỉ có khi có bức xạ ánh sáng mặt trời, và điện gió phụ thuộc vào tốc độ gió, nhiệt độ, mật độ không khí và độ ẩm. Vì tính không thể dự đoán trước gây khó khăn cho các nhà vận hành lưới điện trong việc lập kế hoạch và quản lý dòng năng lượng một cách hiệu quả [3]. Các hệ thống lưới điện truyền thống vốn được thiết kế để hoạt động với các nguồn cung cấp điện có thể dự báo được, do đó, sự bất định của năng lượng tái tạo đòi hỏi các giải pháp quản lý tiên tiến và linh hoạt để duy trì sự cân bằng giữa cung và cầu điện năng trong thời gian thực [4, 5].

Việc duy trì sự cân bằng giữa sản xuất và tiêu thụ là yếu tố then chốt để đảm bảo sự ổn định của lưới điện. Bên cạnh đó, việc kiểm soát tần số và điện áp ổn định cũng rất cần thiết để đảm bảo khả năng cung cấp điện liên tục và an ninh hệ thống. Một yếu tố khác cần xem xét là quán tính của lưới điện [1]. Các nhà máy điện truyền thống với các tuabin và máy phát điện quay tạo ra quán tính, giúp hệ thống có khả năng chống lại các sự cố hoặc sự biến động đột ngột của nguồn hoặc tải. Tuy nhiên, kết nối với hệ thống qua các bộ biến đổi công suất (IBR - Inverter-Based Resources) như điện mặt trời, điện gió gần như không tạo ra quán tính. Sự thiếu quán tính này làm giảm khả năng đáp ứng của hệ thống điện khi có sự

mất cân bằng đột ngột của nguồn và tải, dẫn đến nguy cơ mất ổn định tần số và có thể gây mất điện diện rộng nếu không có sự giám sát và điều chỉnh kịp thời.

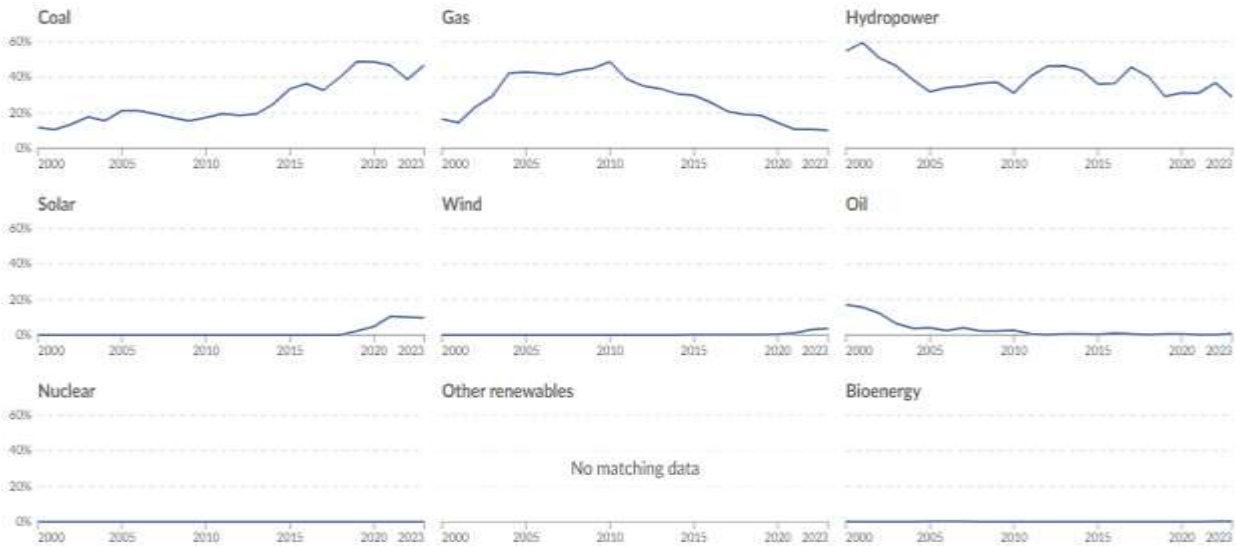
Tính không ổn định của các nguồn NLTT phụ thuộc vào điều kiện thời tiết, đòi hỏi phải có các nguồn điện dự phòng hoặc các giải pháp lưu trữ năng lượng để đảm bảo nguồn cung cấp điện ổn định khi công suất của NLTT bị biến động. Do đó, hệ thống điện cần phải sử dụng đa dạng các loại hình nguồn điện, kết hợp với các thiết bị lưu trữ để đảm bảo khả năng cung cấp điện an toàn, liên tục và tin cậy. Ngoài ra, việc các nguồn NLTT phát cao đột biến trong những ngày nguồn năng lượng sơ cấp cao (bức xạ mặt trời cao, gió mạnh...) có thể gây ra tình trạng quá tải cục bộ cho lưới điện. Để giảm tải cho hệ thống, có khả năng phải khống chế công suất phát của các nguồn điện này [1].

Việc duy trì tần số và điện áp ổn định trở nên phức tạp hơn khi có sự tham gia của các nguồn NLTT. Một số kích động trên hệ thống có thể gây ra mất ổn định tần số hoặc điện áp, dẫn đến nguy cơ mất điện hoặc hư hỏng thiết bị. Tần số lưới là một chỉ số phản ánh sự cân bằng giữa công suất phát của nguồn điện và công suất tiêu thụ của tải. Sự biến động nhanh của nguồn NLTT có thể phá vỡ sự cân bằng nguồn - tải, đòi hỏi phải điều chỉnh nhanh chóng từ các nguồn khác hoặc các hệ thống điều khiển tiên tiến [6].

2. Hệ thống Điện Việt Nam và thách thức trong quá trình chuyển dịch

2.1. Nhiệt điện than và tương lai năng lượng tại Việt Nam

Điện than đã và đang là nguồn cung cấp điện chủ yếu của Việt Nam, chiếm gần 50% tổng sản lượng điện trong những năm gần đây và đạt kỷ lục 64,6% vào tháng 4 năm 2024 [7]. Điều này cho thấy, bất chấp những nỗ lực mạnh mẽ hướng tới năng lượng tái tạo, than đá vẫn là một thành phần quan trọng trong cơ cấu năng lượng của Việt Nam, phản ánh những thách thức trong việc chuyển đổi từ một nguồn năng lượng đã được thiết lập và đáng tin cậy sang các nguồn năng lượng mới hơn trong bối cảnh nhu cầu ngày càng tăng cao. Xem xét các lựa chọn như đốt kèm sinh khối và amoniac trong các nhà máy nhiệt điện, cũng như triển khai các hệ thống thu giữ carbon. Việc thay thế nhiệt điện than ở Việt Nam là một nhiệm vụ phức tạp, liên quan đến các yếu tố kinh tế, xã hội và kỹ thuật, bao gồm việc quản lý các khoản đầu tư hiện có, đảm bảo độ tin cậy của lưới điện và giảm thiểu những tác động tiêu cực đến việc làm trong ngành than. Một quá trình chuyển đổi năng lượng công bằng đòi hỏi sự lập kế hoạch cẩn thận và sự tham gia của tất cả các bên liên quan để đảm bảo một sự thay đổi suôn sẻ và công bằng [7].



Hình 1: Đánh giá thống kê về năng lượng

2.2. Chính sách phát triển năng lượng tái tạo

Việt Nam thể hiện cam kết mạnh mẽ đối với quá trình chuyển đổi năng lượng toàn cầu và mục tiêu khử cacbon, bao gồm mục tiêu đạt phát thải ròng bằng không vào năm 2050. Chiến lược phát triển năng lượng tái tạo giai đoạn 2016-2030, tầm nhìn đến năm 2050 (REDS) đã đặt ra các mục tiêu trung và dài hạn rõ ràng cho việc triển khai năng lượng tái tạo. Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia lần thứ VIII (PDP8) đặt mục tiêu tăng đáng kể tỷ trọng năng lượng tái tạo trong cơ cấu năng lượng quốc gia, hướng tới trên 60% vào năm 2050. PDP8 thể hiện một sự thay đổi chính sách quan trọng hướng tới năng lượng tái tạo ở Việt Nam, ghi nhận tầm quan trọng của nó đối với cả sự bền vững môi trường và an ninh năng lượng. Kế hoạch đầy tham vọng này báo hiệu một cam kết dài hạn đối với việc chuyển đổi ngành năng lượng của Việt Nam, tạo ra cơ hội đầu tư và phát triển các công nghệ năng lượng tái tạo [8, 9].

Tuy nhiên, Bộ Công Thương (MoIT) đã đề xuất năm 2030, công suất điện gió trên bờ đạt 21.880 MW (Tổng tiềm năng kỹ thuật của Việt Nam khoảng 221.000 MW). Phát huy tối đa tiềm năng kỹ thuật điện gió ngoài khơi (khoảng 600.000 MW) để sản xuất điện và năng lượng mới.

Ước tính đến năm 2030, công suất điện gió ngoài khơi phục vụ cho nhu cầu điện trong nước đạt khoảng 6000 MW; quy mô có thể tăng thêm trong trường hợp công nghệ phát triển

nhanh, giá điện và chi phí truyền tải hợp lý. Định hướng đến năm 2050 đạt 70.000 – 91.500 MW.

Định hướng phát triển mạnh điện gió ngoài khơi kết hợp với các loại hình năng lượng tái tạo khác (điện mặt trời, điện gió trên bờ...) để sản xuất năng lượng mới (hydro, amoniac xanh...) phục vụ nhu cầu trong nước và xuất khẩu. Các nguồn điện năng lượng tái tạo sản xuất năng lượng mới phục vụ nhu cầu trong nước và xuất khẩu được ưu tiên/cho phép phát triển không giới hạn trên cơ sở bảo đảm an ninh quốc phòng, an ninh năng lượng và mang lại hiệu quả kinh tế cao, trở thành một ngành kinh tế mới của đất nước.

Ước tính công suất nguồn điện gió ngoài khơi để sản xuất năng lượng mới khoảng 15.000 MW đến năm 2035 và khoảng 240.000 MW đến năm 2050.

Về chuyển đổi năng lượng công bằng: Phát triển mạnh các nguồn năng lượng tái tạo phục vụ sản xuất điện, đạt tỷ lệ khoảng 30,9 - 39,2% vào năm 2030, hướng tới mục tiêu tỷ lệ năng lượng tái tạo 47% với điều kiện các cam kết theo Tuyên bố chính trị thiết lập Quan hệ đối tác chuyển đổi năng lượng công bằng (JETP) với Việt Nam được các đối tác quốc tế thực hiện đầy đủ, thực chất. Định hướng đến năm 2050 tỷ lệ năng lượng tái tạo lên đến 67,5 - 71,5%.

Cơ cấu nguồn điện đến năm 2023: Tổng công suất các nhà máy điện phục vụ nhu cầu trong nước 150.489 MW (không bao gồm xuất khẩu, điện mặt trời mái nhà hiện hữu, năng lượng tái tạo để sản xuất năng lượng mới), trong đó:

- Điện gió trên bờ 21.880 MW (14,5% tổng công suất các nhà máy điện).
- Điện gió ngoài khơi 6.000 MW (4,0%), trường hợp công nghệ tiên tiến nhanh, giá điện và chi phí truyền tải hợp lý thì phát triển quy mô cao hơn.

Bảng 1: Mục tiêu năng lượng tái tạo của Việt Nam (Dựa trên PDP8 và REDS)

Năm	Tỷ lệ NLTT trong Tổng Công suất Lắp đặt (PDP8)	Tỷ lệ Công suất Điện Tái tạo cho các Công ty Phát điện Lớn (REDS)	Mục tiêu Công suất Điện Mặt trời (ước tính)	Mục tiêu Công suất Điện Gió (ước tính, bao gồm cả trên bờ và ngoài khơi)
2020	-	3%	-	-
2030	Khoảng 30.9-39%	18.5%	-	27.880 MW (bao gồm cả trên bờ và ngoài khơi)
2050	67.5 - 71.5%	29.4%	-	70.000 - 91.500 MW (ngoài khơi)

2.3. Thách thức đối với việc tích hợp năng lượng tái tạo tại Việt Nam

Một trong những trở ngại chính cho việc tích hợp một lượng lớn năng lượng tái tạo có tính biến đổi là cơ sở hạ tầng lưới điện chưa bắt kịp sự bùng nổ của nguồn NLTT trong thời gian ngắn. Hệ thống lưới điện truyền tải và phân phối tại một số khu vực tập trung nguồn NLTT lớn chưa được nâng cấp, cải tạo hoặc xây dựng bổ sung do đó gây khó khăn cho việc giải tỏa công suất phát của loại hình nguồn này. Cơ sở hạ tầng lưới điện hiện tại ở Việt Nam chủ yếu được thiết kế cho phát điện tập trung và cần được hiện đại hóa và mở rộng đáng kể để có thể đáp ứng được sự gia tăng của các nguồn năng lượng tái tạo phân tán và có tính gián đoạn. Nếu không có những đầu tư đáng kể vào việc nâng cấp lưới điện, Việt Nam sẽ khó có thể tận dụng hết tiềm năng năng lượng tái tạo của mình và đảm bảo sự ổn định của lưới điện [10, 11].

Bảng 2: Các thách thức và giải pháp tiềm năng cho việc tích hợp

Thách Thức	Mô tả Thách Thức	Giải Pháp Tiềm Năng (bao gồm VPP)
Hạn chế về Cơ sở hạ tầng Lưới điện	Lưới điện lạc hậu và không đủ khả năng đáp ứng lượng lớn năng lượng tái tạo biến đổi.	Đầu tư nâng cấp và mở rộng lưới điện, triển khai lưới điện thông minh, sử dụng VPP để tối ưu hóa việc sử dụng các nguồn phân tán và giảm áp lực lên lưới truyền tải.
Thách Thức Tài chính	Chi phí đầu tư ban đầu cao, khó khăn trong việc tiếp cận nguồn vốn và quản lý nợ.	Cung cấp các ưu đãi tài chính, tạo điều kiện thuận lợi cho việc tiếp cận các nguồn vốn, phát triển các cơ chế tài chính sáng tạo.
Thiếu hụt Chuyên gia Kỹ thuật	Số lượng chuyên gia có kinh nghiệm trong lĩnh vực năng lượng tái tạo còn hạn chế.	Đầu tư vào các chương trình đào tạo và phát triển nguồn nhân lực, thu hút chuyên gia trong và ngoài nước.

3. Lý do chọn đề tài

Việc tích hợp ngày càng nhiều nguồn năng lượng tái tạo như điện mặt trời và điện gió vào hệ thống điện quốc gia đang đặt ra nhiều thách thức về mặt kỹ thuật và vận hành, đặc biệt trong bối cảnh lưới điện Việt Nam còn tồn tại nhiều hạn chế về khả năng linh hoạt. Trong bối cảnh đó, Nhà máy điện ảo (VPP) nổi lên như một giải pháp đầy tiềm năng nhằm hỗ trợ quá trình chuyển dịch năng lượng và hiện đại hóa hạ tầng lưới điện.

VPP cho phép tổng hợp và điều phối hiệu quả nhiều nguồn năng lượng phân tán (DERs) như hệ thống pin năng lượng mặt trời, tua-bin gió, pin lưu trữ, và phụ tải có thể điều khiển được. Thông qua việc kết nối và vận hành tập trung bằng công nghệ số, VPP có thể giúp khắc phục tính không ổn định vốn có của các nguồn năng lượng tái tạo, làm dịu sự biến động trong nguồn cung và nâng cao độ tin cậy cho hệ thống điện.

Bên cạnh đó, VPP còn có khả năng cung cấp nhiều dịch vụ phụ trợ quan trọng cho lưới điện như điều chỉnh tần số, ổn định điện áp và cân bằng cung – cầu theo thời gian thực. Những chức năng này ngày càng trở nên cấp thiết khi tỷ trọng của năng lượng tái tạo biến đổi trong cơ cấu nguồn điện tăng cao.

Không chỉ vậy, VPP còn mang lại lợi ích kinh tế và kỹ thuật thông qua việc tối ưu hóa việc sử dụng các nguồn năng lượng phân tán tại chỗ. Nhờ đó, có thể giảm sự phụ thuộc vào hệ thống truyền tải đường dài và hạn chế nhu cầu phải đầu tư mở rộng quy mô lưới điện truyền thống. Đây là hướng đi phù hợp với định hướng phát triển hệ thống điện thông minh, linh hoạt và bền vững mà Việt Nam đang theo đuổi.

Từ những lý do trên, đề tài nghiên cứu về nhà máy điện ảo (VPP) không chỉ có ý nghĩa khoa học mà còn mang tính ứng dụng thực tiễn cao, góp phần giải quyết các bài toán quan trọng trong quá trình phát triển năng lượng sạch tại Việt Nam.

Nhận thấy những tiềm năng đó nhóm quyết định thực hiện nghiên cứu và lấy tên đề tài: **“ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA NHÀ MÁY ĐIỆN ẢO ĐỐI VỚI CÁC CHẾ ĐỘ VẬN HÀNH HỆ THỐNG ĐIỆN”**

Các phương án nghiên cứu:

- Nghiên cứu các tài liệu sách báo, giáo trình, tạp chí, các trang web chuyên ngành Hệ thống Điện.
- Tìm hiểu phần mềm Matlab/Simulink nhằm hỗ trợ mô phỏng mô hình VPP
- Tìm hiểu phần mềm PSS/E để tính toán trào lưu công suất, theo dõi thông số lưới điện.
- Script Python được chọn làm ngôn ngữ chính để thực hiện giao thức liên kết
- Tạo ra những kịch bản sự cố trên lưới điện nhằm kiểm tra và đánh giá mức độ hỗ trợ của VPP đối với lưới điện được áp dụng.

4. Mục tiêu và phương pháp nghiên cứu

Mục tiêu tổng quát của đề án là mô phỏng hoạt động của một nhà máy điện ảo, đánh giá vai trò và ảnh hưởng của VPP đến các chế độ vận hành hệ thống điện. Cụ thể:

- Phân tích tổng quan lý thuyết về mô hình VPP: cấu trúc, nguyên lý hoạt động, lợi ích và thách thức.
- Xây dựng mô hình mô phỏng VPP sử dụng phần mềm MATLAB/Simulink và PSS/E.
- Lập kế hoạch vận hành cho Nhà máy Thủy điện tích năng.
- Tạo ra các kịch bản giả định liên quan đến sự cố, biến động tải và nguồn, nhằm đánh giá phản ứng của hệ thống có và không có VPP.
- Phân tích dữ liệu, rút ra các nhận xét định lượng và định tính về ảnh hưởng của VPP đến độ ổn định, khả năng điều tần, điều áp, và tối ưu hóa vận hành.

- Đề xuất giải pháp kỹ thuật và khuyến nghị chính sách nhằm triển khai hiệu quả mô hình VPP trong thực tế.

Phương pháp nghiên cứu bao gồm:

- Thu thập và tổng hợp tài liệu khoa học, tiêu chuẩn kỹ thuật, và kinh nghiệm quốc tế liên quan đến VPP.
- Thiết kế mô hình giả lập hệ thống điện có tích hợp VPP bằng MATLAB/Simulink.
- Thực hiện tính toán trào lưu công suất bằng PSS/E.
- Xây dựng các thuật toán điều độ đơn giản sử dụng Python để mô phỏng giao thức liên kết và điều khiển đồng bộ.

5. Bộ cục đề tài

Nội dung đề tài được chia làm 5 Chương

Chương 1: Tổng quan về mô hình Nhà máy điện ảo

Chương 2: Mô phỏng nhà máy điện ảo và lập kế hoạch vận hành tối ưu trong các điều kiện

Chương 3: Giao thức kết nối lưới điện

Chương 4: Kịch bản vận hành và ảnh hưởng của nhà máy điện ảo

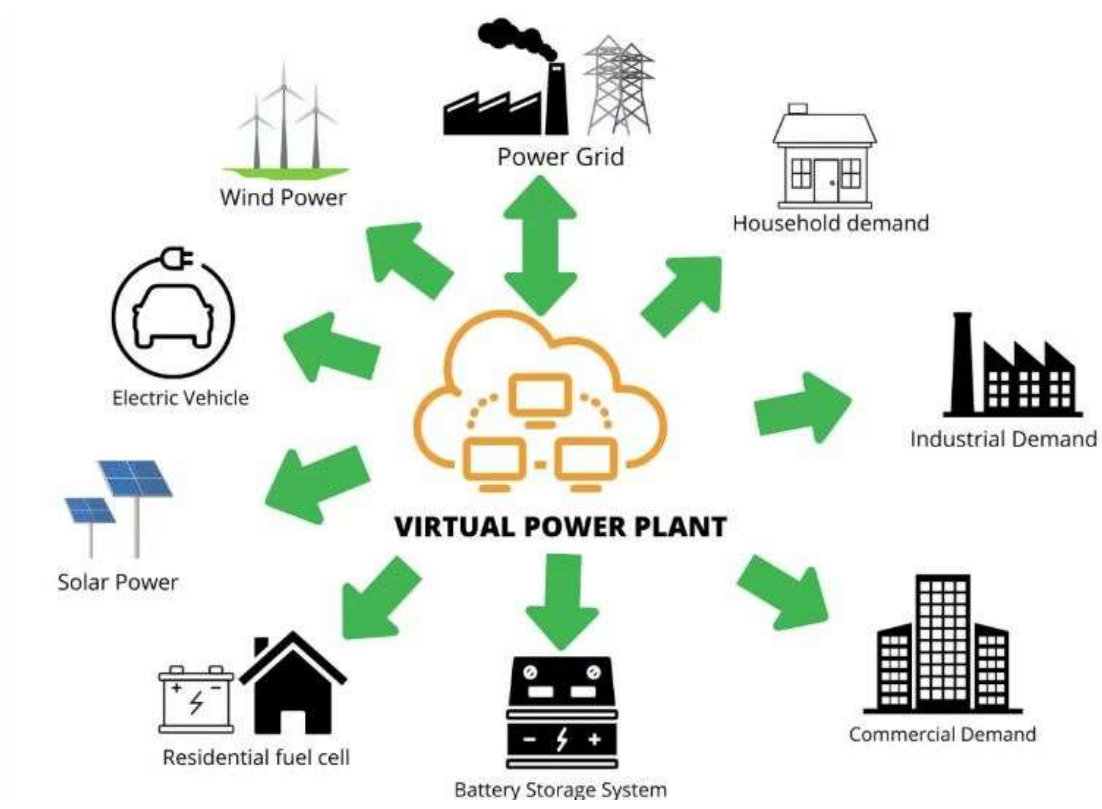
Chương 5: Kết luận và đề xuất hướng phát triển

Chương 1: TỔNG QUAN VỀ MÔ HÌNH NHÀ MÁY ĐIỆN ẢO

1.1. Giới thiệu

Nhà máy điện ảo (Virtual Power Plant - VPP) là một hệ thống điều phối phi tập trung, cho phép tích hợp và điều khiển tập trung các nguồn năng lượng phân tán (DERs) như điện mặt trời, điện gió, hệ thống lưu trữ năng lượng, máy phát diesel nhỏ và các phụ tải điều khiển được. VPP hoạt động như một nhà máy điện thực thụ, có khả năng cung cấp điện năng, điều tần, điều áp và các dịch vụ phụ trợ khác.

VPP giúp nâng cao độ linh hoạt của hệ thống điện, tối ưu hóa chi phí vận hành và hỗ trợ tích hợp hiệu quả nguồn năng lượng tái tạo vào lưới điện. Ngoài ra, VPP còn có thể tham gia thị trường điện cạnh tranh như một chủ thể độc lập, mang lại lợi ích kinh tế cho các đơn vị DER nhỏ lẻ.



Hình 1.1: Mô hình nhà máy điện ảo (VPP)

Nhà máy điện ảo (VPP) có thể được phân loại theo nhiều cấp độ hoặc mô hình tổ chức khác nhau, tùy thuộc vào mức độ phối hợp và tích hợp của các tài nguyên năng lượng phân

tán (DER). Ở cấp độ cơ bản, VPP có thể bao gồm các DER vận hành độc lập, phản hồi tín hiệu điều khiển cục bộ nhằm cung cấp các dịch vụ phụ trợ cho lưới điện. Tuy nhiên, ở cấp độ tích hợp cao hơn, các DER này được tập hợp và điều phối tập trung, cho phép chúng hoạt động như một thực thể thống nhất, có khả năng đáp ứng linh hoạt theo yêu cầu của hệ thống điện hoặc tham gia thị trường điện bán buôn với tư cách một nguồn cung duy nhất.

Có 2 dạng mô hình VPP điều phối chính bao gồm Mô hình điều phối tập trung (Centralized VPP) và Mô hình điều phối phân tán (Decentralized VPP) [15], trong đó:

- a. VPP điều phối tập trung là một mô hình trong hệ thống năng lượng thông minh, nơi các nguồn năng lượng phân tán (DERs) như điện mặt trời, điện gió, pin lưu trữ, máy phát điện diesel nhỏ, và thiết bị tiêu thụ điện linh hoạt...
 - được kết nối, giám sát và điều khiển tập trung thông qua một trung tâm điều phối.
 - Trung tâm điều phối được xem như là bộ não của nhà máy điện ảo với vai trò thu thập dữ liệu từ tất cả các nguồn DERs (sản lượng, trạng thái hoạt động, dự báo thời tiết...).
 - Tính toán phương án tối ưu cân bằng cung – cầu nội bộ, tối ưu hóa hiệu suất và cả chi phí vận hành.
 - Trung tâm gửi tín hiệu điều khiển xuống từng DER tương ứng.
- b. VPP điều phối phân tán là một mô hình hiện đại hơn, trong đó các nguồn năng lượng phân tán (DERs) có khả năng tự giám sát, phân tích và đưa ra quyết định điều khiển ở mức địa phương, thay vì hoàn toàn phụ thuộc vào một trung tâm điều phối như trong mô hình tập trung.
 - Mỗi DER hoặc cụm DER có thể tự điều chỉnh công suất phát, tiêu thụ hoặc lưu trữ dựa trên điều kiện cục bộ và mục tiêu chung.
 - Các DERs trao đổi thông tin với nhau thông qua mạng ngang hàng (peer-to-peer) nhằm phối hợp cung – cầu điện năng trong khu vực, tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng tái tạo và lưu trữ, có thể giao tiếp với lưới điện hoặc trung tâm nếu cần.
 - Làm tăng sự linh hoạt và khả năng chống chịu, đồng thời giảm phụ thuộc vào trung tâm điều khiển chính.

Bảng 1.1: So sánh mô hình VPP tập trung và VPP phân tán

Tiêu chí	VPP điều phối tập trung	VPP điều phối phân tán
Cơ chế điều khiển	Tập trung qua control center	Tự chủ, phi tập trung
Khả năng mở rộng	Hạn chế khi quy mô lớn	Cao
Chi phí triển khai	Thấp – phụ thuộc trung tâm	Cao ban đầu, về lâu dài tối ưu
Tính linh hoạt	Thấp ban đầu, cao khi mở rộng	Cao, từng nút tự điều chỉnh
Rủi ro sự cố Hệ thống	Cao nếu trung tâm gặp lỗi	Thấp hơn vì phân tán rủi ro

1.2. Cấu trúc của VPP

Một nhà máy điện ảo (VPP) bao gồm những thành phần thiết yếu phối hợp với nhau để có thể hoạt động một cách tốt nhất các chức năng của nó:

1.2.1. Các nguồn năng lượng phân tán (DER)

Đây là xương sống của VPP, bao gồm một loạt các công nghệ có khả năng sản xuất, lưu trữ hoặc quản lý điện năng.

- Các công nghệ về năng lượng tái tạo bao gồm hệ thống điện mặt trời mái nhà, mặt đất, tuabin gió, nhà máy thủy điện, nhà máy điện sinh khối và các đơn vị nhiệt điện kết hợp (CHP). Các hệ thống này cung cấp năng lượng cho lưới điện, mặc dù sản lượng của chúng có thể thay đổi tùy thuộc vào điều kiện thời tiết và thời gian trong ngày.
- Hệ thống lưu trữ năng lượng đóng một vai trò quan trọng bao gồm pin, xe điện (EV) có khả năng sạc hai chiều và các hệ thống lưu trữ nhiệt. Các thiết bị này có thể lưu trữ năng lượng dư thừa khi sản xuất cao hoặc nhu cầu thấp và giải phóng nó khi cần thiết, giúp cân bằng cung và cầu [12].
- Các nguồn linh hoạt về nhu cầu bao gồm các thiết bị thông minh, hệ thống HVAC và thiết bị công nghiệp mà mức tiêu thụ năng lượng có thể được điều chỉnh để đáp ứng các tín hiệu của lưới điện. Bằng cách giảm mức tiêu thụ trong thời gian cao điểm, các nguồn lực này giúp ổn định lưới điện.

1.2.2. Cơ sở hạ tầng truyền thông:

Khả năng giám sát, điều khiển và phối hợp các DER theo thời gian thực là rất quan trọng đối với hoạt động của VPP. Điều này đòi hỏi một cơ sở hạ tầng truyền thông tốt, đảm bảo giao thức an toàn và các thiết bị điều khiển từ xa. Giao tiếp hai chiều cho phép truyền

cả lệnh điều khiển và dữ liệu theo thời gian thực, tạo điều kiện cho phản ứng nhu cầu kịp thời, chính xác [13].

1.2.3. Hệ thống điều khiển trung tâm:

Hệ thống này đóng vai trò là bộ não của VPP, chịu trách nhiệm thu thập và phân tích dữ liệu từ các DER, dự báo sản lượng và nhu cầu năng lượng, tối ưu hóa việc điều phối tài nguyên và phản hồi các tín hiệu của lưới điện. Các thuật toán được sử dụng để nâng cao hiệu quả và hiệu quả của hoạt động VPP, cho phép dự đoán chính xác hơn và chiến lược điều phối tối ưu hóa [14].

1.2.4. Giao diện thị trường:

VPP tương tác với thị trường điện, bao gồm cả thị trường bán buôn và bán lẻ, cung cấp các dịch vụ phụ trợ. Các nhà tổng hợp đóng một vai trò quan trọng trong việc quản lý sự tham gia thị trường của VPP.

1.3. Nguyên lý hoạt động

Nhà máy điện ảo (VPP) là hệ thống tích hợp các nguồn năng lượng phân tán (DERs) như điện mặt trời, điện gió, hệ thống lưu trữ năng lượng (battery storage), máy phát điện nhỏ và các phụ tải có khả năng điều khiển được, thông qua nền tảng điều khiển và quản lý tập trung dựa trên công nghệ số. Mặc dù không có hình dạng vật lý như một nhà máy điện truyền thống, VPP hoạt động như một thực thể thống nhất trong hệ thống điện, có thể cung cấp điện năng và các dịch vụ phụ trợ cho lưới điện một cách chủ động và linh hoạt.

Nguyên lý hoạt động cốt lõi của VPP dựa trên khả năng giám sát, điều khiển và tối ưu hóa hoạt động của các DERs thông qua nền tảng phần mềm trung tâm sử dụng các thuật toán điều độ thông minh, dữ liệu thời gian thực và dự báo phụ tải cũng như sản lượng từ năng lượng tái tạo.

Ngoài việc cung cấp điện năng, VPP còn đảm nhiệm các dịch vụ điều độ lưới như điều chỉnh tần số, ổn định điện áp và điều phối công suất phản kháng. Nhờ có khả năng phản ứng nhanh và linh hoạt, VPP đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì độ ổn định của hệ thống điện hiện đại, đặc biệt khi tỷ trọng năng lượng tái tạo biến đổi ngày càng tăng. Hơn nữa, việc tận dụng các nguồn điện tại chỗ giúp giảm áp lực lên lưới truyền tải và hạn chế tổn thất điện năng.

VPP hoạt động như một trung tâm điều hành thông minh, có khả năng phối hợp và tối ưu hóa sự vận hành của nhiều nguồn điện nhỏ lẻ, qua đó góp phần nâng cao hiệu quả vận hành hệ thống điện, tăng cường khả năng tích hợp năng lượng tái tạo.

1.4. Lợi ích và thách thức

1.4.1. Lợi ích của VPP

- Tăng cường độ tin cậy và khả năng phục hồi của lưới điện: VPP giúp duy trì sự ổn định của lưới điện bằng cách cung cấp các dịch vụ như điều chỉnh tần số, hỗ trợ điện áp và dự phòng công suất.
- Cắt đỉnh phụ tải: VPP có thể huy động năng lượng từ các nguồn điện mặt trời, điện gió, và hệ thống lưu trữ năng lượng để cung cấp cho lưới điện trong giờ cao điểm. Điều này giúp tăng cường nguồn cung cấp điện và giảm sự phụ thuộc vào các nhà máy điện truyền thống.
- Tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng và giảm lãng phí: VPP quản lý và điều phối thông minh các nguồn năng lượng phân tán, cho phép tận dụng tối đa tiềm năng của NLTT và điều chỉnh việc cung cấp năng lượng theo nhu cầu thực tế.
- Giảm chi phí năng lượng: Bằng cách tối ưu hóa việc sử dụng các nguồn năng lượng có chi phí thấp hơn (ví dụ: mặt trời, gió) và giảm sự phụ thuộc vào các nhà máy điện đắt tiền trong thời gian cao điểm.
- Hỗ trợ tích hợp năng lượng tái tạo: VPP đóng một vai trò quan trọng trong việc tích hợp liền mạch các nguồn NLTT biến đổi (ví dụ: điện mặt trời, điện gió) vào lưới điện. Khả năng điều chỉnh công suất và cân bằng tải giúp giảm thiểu các vấn đề liên quan đến tính không liên tục của các nguồn này.
- Giảm thiểu khí thải và bảo vệ môi trường: Bằng cách ưu tiên sử dụng NLTT và tối ưu hóa hiệu quả sử dụng năng lượng, VPP giúp giảm sự phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch, từ đó giảm lượng khí thải gây hiệu ứng nhà kính và ô nhiễm môi trường.

1.4.2. Thách thức của VPP

- Vấn đề quy định và chính sách: Hiện tại, thiếu một khuôn khổ chính sách và quy định toàn diện được thiết kế đặc biệt để phù hợp với các đặc điểm riêng của VPP.
- Sự không chắc chắn của tài nguyên năng lượng tái tạo: Sản lượng điện từ các nguồn NLTT như gió và mặt trời có tính thay đổi theo thời gian, gây khó khăn cho việc dự báo chính xác và đảm bảo hoạt động ổn định.

- Quản lý và vận hành phức tạp: Việc quản lý và điều phối một số lượng lớn các DER phân tán đòi hỏi các hệ thống điều khiển và truyền thông phức tạp.
- Rào cản công nghệ và cơ sở hạ tầng: Việc triển khai VPP quy mô lớn đòi hỏi đầu tư đáng kể vào công nghệ và cơ sở hạ tầng, bao gồm phần mềm và phần cứng tiên tiến để quản lý dòng điện và đảm bảo sự ổn định của lưới điện.
- Vấn đề về độ tin cậy và tính ổn định: Mặc dù VPP có thể tăng cường độ tin cậy, nhưng việc dựa vào các DER phân tán có thể khiến VPP dễ bị ảnh hưởng bởi sự gián đoạn do thời tiết hoặc các yếu tố khác hơn so với các nhà máy điện truyền thống.

1.5. Ứng dụng

1.5.1. Tiềm năng mang lại

Nhà máy điện ảo (VPP) có nhiều ứng dụng tiềm năng trong hệ thống năng lượng hiện đại, giải quyết nhiều thách thức mà lưới điện phải đối mặt và thúc đẩy một tương lai năng lượng bền vững hơn:

- Cân bằng cung và cầu: Một trong những ứng dụng chính của VPP là khả năng cân bằng cung và cầu điện. Bằng cách tổng hợp các nguồn năng lượng phân tán và điều chỉnh mức tiêu thụ, VPP có thể giúp ổn định tần số và điện áp của lưới điện, đặc biệt trong thời gian nhu cầu cao điểm hoặc khi có sự biến động trong sản xuất năng lượng tái tạo.
- Tích hợp năng lượng tái tạo: VPP tạo điều kiện thuận lợi cho việc tích hợp ngày càng nhiều năng lượng tái tạo vào lưới điện. Chúng có thể quản lý tính không liên tục của điện mặt trời và điện gió bằng cách sử dụng các nguồn linh hoạt khác như pin và phản ứng nhu cầu để đảm bảo nguồn cung cấp điện ổn định.
- Cung cấp các dịch vụ phụ trợ: VPP có thể cung cấp nhiều dịch vụ phụ trợ cho lưới điện, chẳng hạn như điều chỉnh tần số, hỗ trợ điện áp và dự phòng quay.
- Nâng cao khả năng phục hồi của lưới điện: Tính chất phân tán của VPP làm cho chúng có khả năng phục hồi tốt hơn trước các sự kiện thời tiết khắc nghiệt hoặc các sự cố khác. Nếu một phần của lưới điện bị ảnh hưởng, các DER khác trong VPP vẫn có thể tiếp tục hoạt động bình thường.
- Hỗ trợ các mục tiêu giảm phát thải cacbon: Bằng cách tạo điều kiện thuận lợi cho việc sử dụng nhiều năng lượng tái tạo hơn và giảm sự phụ thuộc vào các nhà máy điện chạy bằng nhiên liệu hóa thạch, VPP góp phần vào các nỗ lực giảm phát thải cacbon ngành năng lượng.

1.5.2. Mô hình nhà máy điện ảo trên thế giới

Hiện nay, trên thế giới đã áp dụng nhiều mô hình nhà máy điện ảo (VPP) bao gồm lớn và nhỏ, tiêu biểu có thể kể đến mô hình Next Kraftwerke của Đức. Đây được xem là một trong những mô hình lớn nhất Châu Âu với hơn 10000 đơn vị năng lượng tham gia (gồm năng lượng mặt trời, gió, thủy điện nhỏ, pin lưu trữ...) với tổng công suất đạt hơn 10 GW. Mô hình Next Kraftwerke có trụ sở chính tại Cologne, hiện đã được mở rộng ra nhiều nước châu Âu như Bỉ, Hà Lan, Thụy Sĩ, Áo, Ba Lan... [14].



Hình 1.2: Mô hình nhà máy điện ảo Next Kraftwerke

Next Kraftwerke vận hành một nền tảng kỹ thuật số trung tâm gọi là Next Pool:

- Các đơn vị phát điện phân tán (DER) như điện gió, điện mặt trời, thủy điện nhỏ, ... được kết nối qua Internet.
- Dữ liệu từ các nguồn năng lượng này (sản lượng, tình trạng kỹ thuật, thời tiết, v.v.) được gửi về trung tâm điều khiển.
- Hệ thống AI và điều độ sẽ ra quyết định điều phối: tăng, giảm sản lượng, lưu trữ hoặc giải phóng điện năng.

Các thành phần chính gồm có:

- Nguồn phát điện phân tán, bao gồm điện mặt trời, điện gió, thủy điện nhỏ và pin lưu trữ, đây là các đơn vị sản xuất điện độc lập được tích hợp vào hệ thống.

- Các thiết bị tiêu thụ có thể điều khiển, chẳng hạn như thiết bị làm lạnh, máy bơm hoặc dây chuyền công nghiệp, cho phép điều chỉnh mức tiêu thụ điện theo tín hiệu điều độ nhằm cân bằng cung – cầu điện năng.
- Thiết bị truyền thông (gateway), giúp thu thập dữ liệu từ từng đơn vị và gửi về trung tâm điều khiển, đồng thời nhận các lệnh vận hành.
- Trung tâm điều khiển chính (Next Pool) nơi sử dụng trí tuệ nhân tạo và hệ thống giám sát theo thời gian thực để phân tích dữ liệu, dự đoán sản lượng tái tạo, và điều phối toàn bộ hệ thống một cách tối ưu.
- Toàn bộ VPP được kết nối với thị trường điện, nơi các đơn vị có thể mua bán điện trực tiếp hoặc cung cấp dịch vụ phụ trợ như cân bằng tải và điều tần.

Quy trình vận hành của mô hình Nhà máy điện ảo (VPP) do Next Kraftwerke triển khai được tổ chức theo hướng tự động hóa cao, dựa trên nền tảng điều phối kỹ thuật số tập trung và công nghệ phân tích dữ liệu tiên tiến. Trước hết, các đơn vị phát điện phân tán (DERs) và các tải tiêu thụ linh hoạt được tích hợp vào hệ thống thông qua các thiết bị truyền thông (gateway), cho phép thu thập dữ liệu thời gian thực liên quan đến công suất phát, trạng thái thiết bị và các yếu tố ngoại cảnh như điều kiện thời tiết. Dữ liệu này được truyền về trung tâm điều phối Next Pool, áp dụng các mô hình dự báo để xây dựng kế hoạch vận hành toàn hệ thống [14].

Dựa trên phân tích tổng hợp về khả năng cung cấp điện từ các nguồn tái tạo và nhu cầu phụ tải dự kiến, hệ thống sẽ thiết lập các chiến lược điều độ nhằm tối ưu hóa vận hành. Bao gồm phân bổ công suất phát, điều chỉnh mức tiêu thụ, sạc hoặc xả năng lượng lưu trữ, đồng thời chuẩn bị các nguồn công suất dự phòng để đảm bảo tính linh hoạt vận hành. Các tín hiệu điều khiển được gửi đến từng thành phần trong mạng lưới thông qua hệ thống truyền thông hai chiều, với khả năng phản ứng trong thời gian thực, cho phép hệ thống thích ứng nhanh chóng trước các biến động từ thị trường điện hoặc sự cố kỹ thuật trong lưới điện [14].

Bên cạnh đó, VPP còn đóng vai trò chủ thể tham gia trực tiếp vào các thị trường điện năng, bao gồm thị trường điện giao ngay (spot market), thị trường cân bằng tải (balancing market) và thị trường dịch vụ phụ trợ (ancillary services). Với tổng công suất huy động lớn và khả năng điều khiển linh hoạt, VPP có thể cung cấp các dịch vụ tương đương hoặc thậm chí vượt trội so với các nhà máy điện tập trung truyền thống, đồng thời góp phần quan trọng vào việc tích hợp năng lượng tái tạo vào hệ thống điện quốc gia một cách hiệu quả và bền vững [14].

1.6. Tổng kết chương 1

Được đánh giá là phù hợp và tiềm năng cao trong bối cảnh quốc gia này đang chuyển dịch mạnh mẽ sang phát triển năng lượng tái tạo và hướng tới hiện đại hóa hệ thống điện. Chúng ta hoàn toàn có thể ứng dụng mô hình VPP (như của Next Kraftwerke) tại Việt Nam.

Sở hữu nguồn năng lượng phân tán dồi dào với hàng chục nghìn hệ thống điện mặt trời áp mái, nhiều nhà máy điện gió và thủy điện, cùng với sự xuất hiện ngày càng phổ biến của các hệ thống lưu trữ năng lượng. Tuy nhiên, do hệ thống truyền tải điện còn hạn chế và thiếu công cụ điều độ linh hoạt, một phần đáng kể công suất tái tạo đã và đang bị cắt giảm. VPP, với khả năng điều phối tập trung các nguồn phát và tải tiêu thụ phân tán, có thể giúp giải quyết hiện tượng này bằng cách tối ưu hóa vận hành nội vùng và hạn chế phụ thuộc vào hạ tầng lưới truyền thống.

Bên cạnh đó, Việt Nam đang hướng đến vận hành thị trường điện cạnh tranh toàn phần theo lộ trình quy định, trong đó việc cho phép các đơn vị nhỏ lẻ tham gia thị trường thông qua hình thức tập hợp là xu hướng tất yếu. Mô hình VPP cho phép tập hợp nhiều đơn vị nhỏ thành một thực thể có khả năng giao dịch hiệu quả trên thị trường điện, từ đó thúc đẩy sự tham gia rộng rãi của các hộ tiêu dùng và nhà sản xuất điện độc lập.

Tiềm năng là thế, song cũng không ít khó khăn và thách thức đặt ra khi thực hiện. Do đó, để hiện thực hóa tiềm năng của VPP, cần có sự nỗ lực đồng bộ từ cả phía Nhà nước, doanh nghiệp và cộng đồng khoa học – công nghệ trong việc hoàn thiện chính sách, đầu tư công nghệ, đào tạo nguồn nhân lực và nâng cao nhận thức xã hội. Chỉ khi đó, VPP mới có thể phát huy trọn vẹn vai trò là một trong những giải pháp then chốt cho hệ thống điện bền vững, thông minh và linh hoạt của Việt Nam trong tương lai.

Chương 2: MÔ PHỎNG NHÀ MÁY ĐIỆN ẢO VÀ LẬP KẾ HOẠCH VẬN HÀNH TỐI ƯU TRONG CÁC ĐIỀU KIỆN

2.1. Giới thiệu tổng quan về MATLAB/Simulink

MATLAB/Simulink là một nền tảng mô phỏng và thiết kế hệ thống dựa trên mô hình (Model-Based Design) được phát triển bởi MathWorks. Simulink cung cấp một giao diện đồ họa trực quan để mô phỏng các hệ thống động học chẳng hạn như hệ thống điện, cơ, điều khiển, tín hiệu và năng lượng bằng cách sử dụng sơ đồ khối (block diagrams).

Các đặc điểm chính:

- Giao diện kéo-thả trực quan: Cho phép xây dựng hệ thống bằng các khối chức năng mô phỏng các thành phần vật lý.
- Khả năng mô phỏng thời gian thực: Dễ dàng kiểm tra và tối ưu mô hình trước khi triển khai thực tế.
- Tích hợp tốt với MATLAB: Có thể kết hợp xử lý số liệu, lập trình script và điều khiển mô hình bằng ngôn ngữ MATLAB.
- Thư viện khối đa dạng: Bao gồm các khối mô phỏng điện lực, cơ khí, điều khiển, truyền thông, và năng lượng tái tạo (trong các toolbox như Simscape, SimPowerSystems, Simulink Control Design...).

Mục đích của việc xây dựng mô hình VPP bằng Simulink:

- Mô phỏng hoạt động của VPP: Kiểm tra khả năng tích hợp, điều phối và vận hành các nguồn năng lượng phân tán trong điều kiện thực tế (thay đổi tải, nguồn, mất kết nối...).
- Thiết kế và kiểm tra chiến lược điều khiển: Như điều khiển phân tán, điều khiển trung tâm, tối ưu hóa chi phí, điều khiển theo thời gian thực...
- Đánh giá hiệu quả năng lượng và độ ổn định hệ thống: Qua các chỉ số như công suất phát, đáp ứng tần số, điện áp, dung lượng lưu trữ...
- Thử nghiệm các tình huống giả định: Mất nguồn, sự cố truyền tải, sự thay đổi giá điện, phản ứng với tín hiệu điều độ từ lưới điện...
- Hỗ trợ đào tạo và nghiên cứu: Là công cụ học tập và nghiên cứu hiệu quả cho sinh viên và kỹ sư ngành điện - năng lượng.

2.2. Tổng quan mô hình VPP

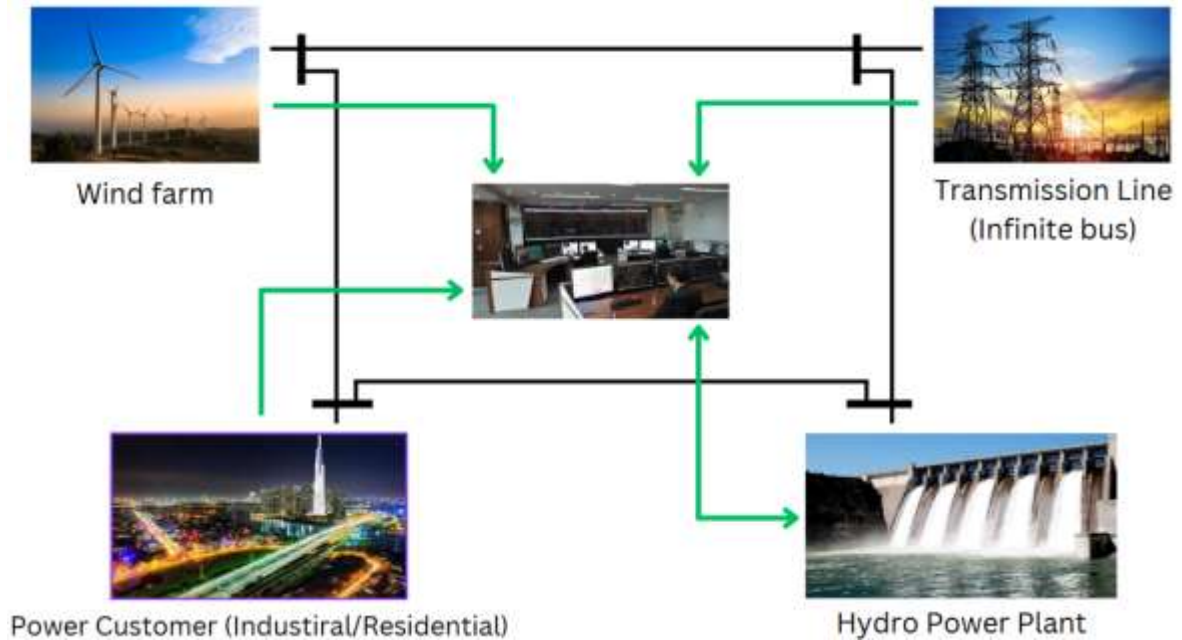
Mô hình nhà máy điện ảo VPP trong phạm vi nghiên cứu được xây dựng bao gồm:

- Tổ máy phát điện: Nhà máy thủy điện tích năng, trang trại gió.
- Đơn vị lưu trữ năng lượng.
- Phụ tải hệ thống.

Hồ chứa thủy điện được xem như là một đơn vị lưu trữ bởi vì nhà máy thủy điện tích năng có hồ chứa nước lớn, lượng nước trong hồ có thể được coi là một dạng lưu trữ năng lượng tiềm năng. Khi cần thiết, nước từ hồ được xả xuống để chạy turbine, tạo ra điện, khi thừa điện, nước có thể được bơm ngược lên hồ. Điều này cho phép nhà máy thủy điện điều chỉnh sản lượng điện một cách linh hoạt, giống như một hệ thống pin lưu trữ lớn.

Nghiên cứu tại Thụy Điển chỉ ra rằng nhà máy thủy điện có thể được sử dụng hiệu quả để bù đắp cho lượng công suất biến thiên của nguồn điện gió ở Thụy Điển. Năng lượng gió là nguồn năng lượng không ổn định, phụ thuộc vào điều kiện thời tiết. Khi công suất gió thay đổi đột ngột, có thể gây mất cân bằng trong hệ thống điện. Nhà máy thủy điện có thể nhanh chóng điều chỉnh công suất để bù đắp cho sự biến động của năng lượng gió.

Ví dụ, khi gió mạnh, nhà máy thủy điện tích năng có thể giảm công suất hoặc bơm nước lên hồ. Khi gió yếu, nhà máy có thể tăng công suất. Điều này cho thấy tiềm năng của việc sử dụng nhà máy thủy điện tích năng như một đơn vị lưu trữ năng lượng trong hệ thống điện có tỷ lệ năng lượng tái tạo cao.



Hình 2.1: Thiết kế mô hình VPP trong mô phỏng

Như vậy, hệ thống mô hình được xây dựng sẽ gồm 4 phần chính bao gồm:

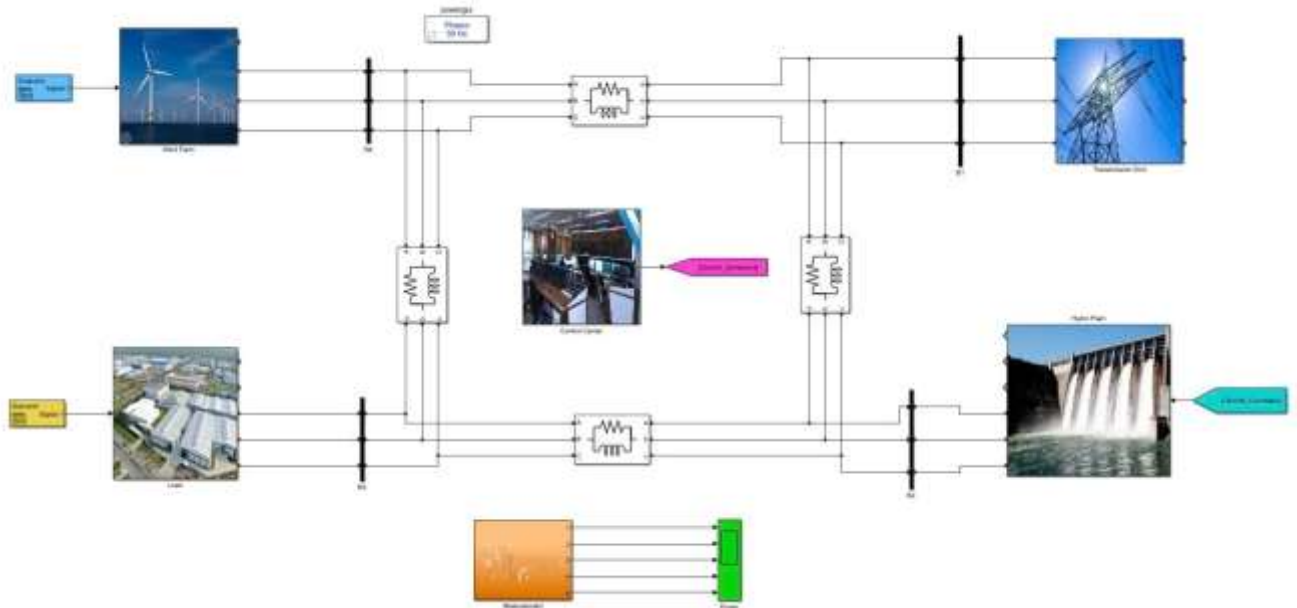
- Nút hệ thống: Đại diện cho điểm kết nối với lưới truyền tải điện quốc gia.
- Nhà máy thủy điện tích năng: Cung cấp và điều chỉnh sản lượng điện.
- Phụ tải hệ thống: Nhu cầu tiêu thụ điện của người dân và doanh nghiệp.
- Trang trại gió: Cung cấp năng lượng gió.

2.3. Xây dựng mô hình

Trong báo cáo này, phần mềm MATLAB/Simulink được sử dụng làm công cụ chính để mô phỏng và phân tích mô hình nhà máy điện ảo (VPP). MATLAB là một môi trường tính toán số mạnh mẽ, hỗ trợ xử lý dữ liệu, mô phỏng hệ thống và tối ưu hóa. Trong khi đó, Simulink là một nền tảng mô phỏng đồ họa tích hợp, cho phép thiết kế hệ thống động theo thời gian thực thông qua sơ đồ khối.

Simulink đặc biệt phù hợp cho việc mô hình hóa các hệ thống điện nhúng, hệ thống năng lượng tái tạo, hệ thống điều khiển và truyền thông. Với thư viện Simscape Electrical, phần mềm cung cấp đầy đủ các mô hình linh kiện như nguồn điện, biến tần, pin lưu trữ, tải, lưới điện... giúp xây dựng mô hình VPP sát với thực tế. Ngoài ra, khả năng mô phỏng thời gian thực và hỗ trợ tích hợp thuật toán điều khiển phân tán/tập trung cũng là điểm mạnh nổi bật trong nghiên cứu và phát triển các hệ thống năng lượng thông minh.

Việc sử dụng MATLAB/Simulink trong bài báo cáo không chỉ giúp trực quan hóa quá trình điều phối năng lượng mà còn cho phép thực hiện các phân tích đánh giá hiệu suất, tính ổn định và khả năng phản ứng của hệ thống VPP trong các điều kiện khác nhau.



Hình 2.2: Mô hình VPP trong Simulink

Mô hình VPP bao gồm:

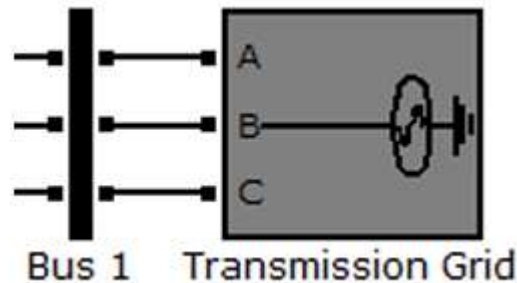
- Nhà máy thủy điện tích năng.
- Tải hệ thống.
- Trang trại gió.
- Các thành phần này được kết nối với nhau qua các đường dây truyền tải.

Đây là một hệ thống gồm 4 BUS được bố trí ở các góc của một hình vuông. Hệ thống này có dạng vòng (ring-shape), cho phép dòng điện đi qua tất cả các BUS qua chu trình khép kín. BUS 1 kết nối với lưới truyền tải, BUS 2 kết nối với nhà máy thủy điện tích năng, BUS 3 kết nối với tải hệ thống, BUS 4 kết nối với trang trại gió.

2.3.1. Khối lưới truyền tải

Lưới truyền tải được biểu diễn bởi một BUS vô hạn (infinite bus) được kết nối với nguồn không có điện trở và cảm kháng. Vì không có điện trở và cảm kháng, lưới truyền tải đại diện cho một hệ thống truyền tải lớn với điện áp không đổi tại điểm BUS. Điều kiện của công suất phản kháng trong VPP không ảnh hưởng đến điện áp tại BUS 1. Chức năng chính

của khối này là mô tả chính xác hành vi của đường dây truyền tải gồm mô phỏng thông số đường dây, phân tích thiết kế Hệ thống điện, ... [16]



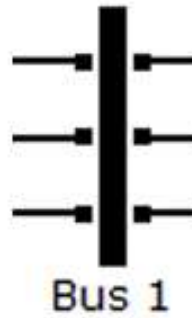
Hình 2.3: Khối lưới truyền tải

Bảng 2.1: Thông số khối lưới truyền tải

Tên thông số	Giá trị
Điện áp pha	33 kV
Tần số (Hz)	50
Điện trở nguồn (Ohms)	0
Cảm kháng nguồn (H)	0

2.3.2. Bus bar (thanh góp)

Thanh góp kết nối các đơn vị trong hệ thống với nhau thông qua đường dây truyền tải. Đồng thời, nó đo các giá trị điện áp và dòng điện tại mỗi bus bar và gửi các giá trị đo lường này tới hệ thống đo lường. Do các phiên bản mới của Simulink không cung cấp khối bus bar, nên khối bus bar được biểu diễn bằng khối "Three-Phase VI Measurement" trong Simulink [16].



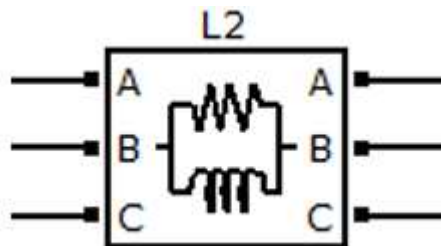
Hình 2.4: Bus Bar

Bảng 2.2: Thông số khối Bus bar

Tên thông số	Giá trị
Đo lường điện áp	Pha-đất
Đo lường dòng điện	Có

2.3.3. Đường dây truyền tải

Khối đường dây truyền tải được đặt giữa hai nút trong hệ thống điện để mô phỏng việc truyền công suất từ nguồn đến phụ tải, hoặc giữa hai trạm biến áp. Các đầu ra có thể được theo dõi bằng các thiết bị đo dòng, điện áp và công suất, như Voltage Measurement hoặc Powergui. Việc mô phỏng chính xác đường dây truyền tải đóng vai trò then chốt trong việc đánh giá hiện tượng quá tải, dao động điện áp, hoặc kiểm tra hiệu quả điều khiển của các giải pháp như nhà máy điện ảo (VPP) trong hệ thống điện hiện đại [16].

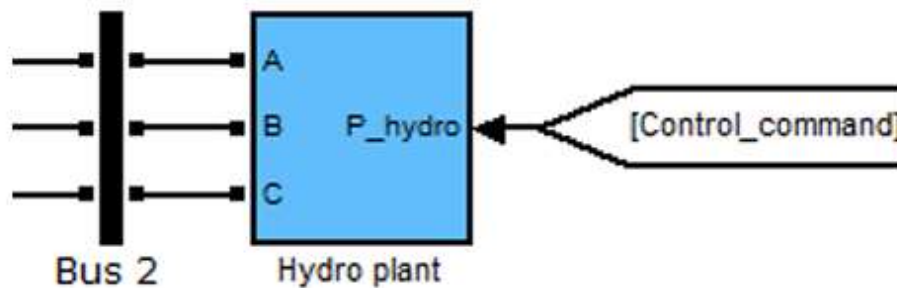


Hình 2.5: Khối đường dây truyền tải

Bảng 2.3: Thông số khối đường dây truyền tải

Tên thông số	Giá trị
Kiểu nhánh	RL
Điện trở (Ohms)	1
Cảm kháng (H)	1e-3

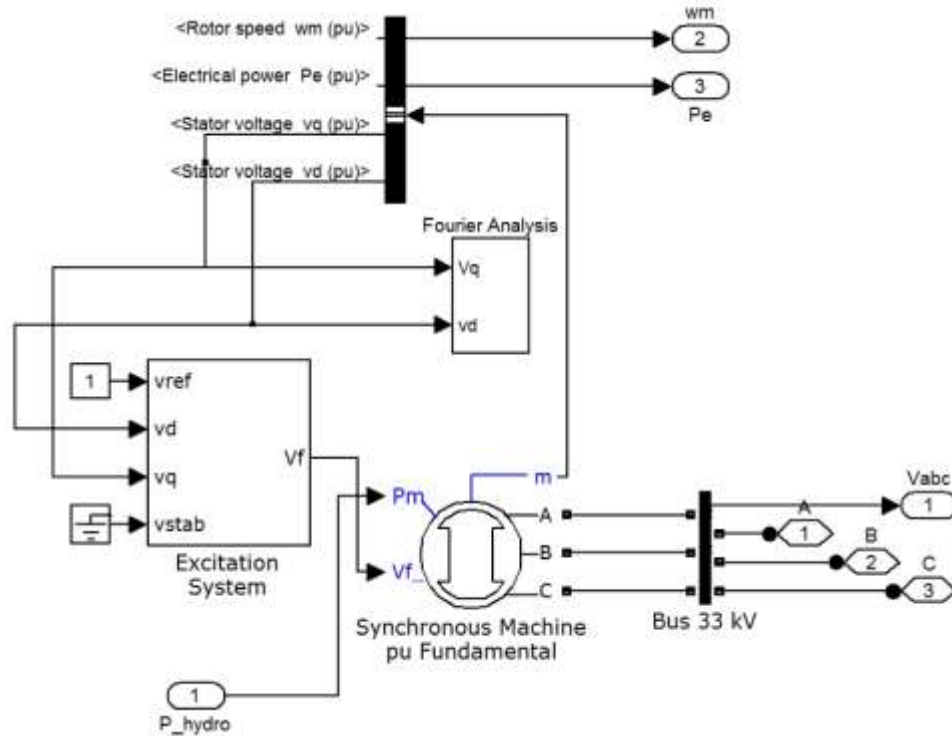
2.3.4. Nhà máy thủy điện tích năng



Hình 2.6: Nhà máy thủy điện tích năng

Nhà máy thủy điện tích năng nhận lệnh điều khiển từ hệ thống điều khiển thủy lực. Nó được biểu diễn bằng một máy đồng bộ.

Máy đồng bộ điều khiển điện áp tại các cực của nó thông qua hệ thống kích thích. Điện áp danh định tại các cực được đặt là 1 pu. Điện áp pha dọc (d-axis) và pha ngang (q-axis) được đo và gửi tới hệ thống kích thích. Không có bộ ổn định điện áp được sử dụng, nên cổng "vstab" được nối đất. Để đơn giản hóa việc điều khiển góc rotor, bộ điều khiển máy phát tự động (automatic generator controller) không được thêm vào ở đây. Công suất tác dụng đầu ra được điều khiển trực tiếp bằng lệnh gửi từ trung tâm điều khiển. Giá trị khởi tạo của máy đồng bộ đã được tối ưu hóa bằng cách sử dụng “Công cụ Khởi tạo Máy của Powergui” [16].



Hình 2.7: Mô hình nhà máy thủy điện tích năng bên trong khối

Bảng 2.4: Thông số khối máy đồng bộ

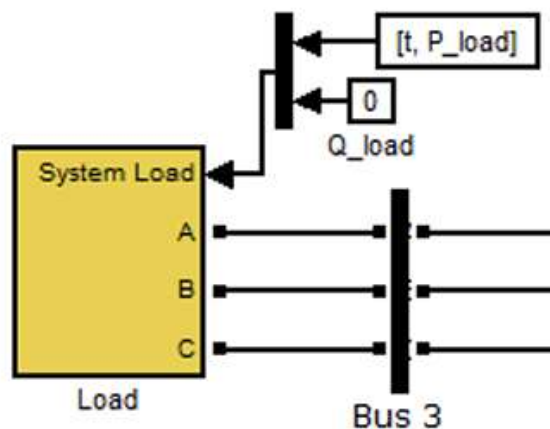
Tên thông số	Giá trị
Đầu vào cơ học	Công suất cơ học Pm
Loại rotor	Rotor cực lồi
Công suất định mức (VA), điện áp dây (Vrms), Tần số (Hz)	250E6, 33 kV, 50 Hz
Các thông số stator [Điện trở Rs, điện cảm Li, điện cảm từ hóa trực dọc Lmd, điện cảm từ hóa trực ngang Lmq] (pu)	0.00285, 0.114, 1.19, 0.36
Các thông số cuộn dây kích thích [Rf, Ldfd] (pu)	0.000579, 0.114
Các thông số bộ giảm chấn [Rkd, Llk, Rkq1, Llkq1] (pu)	0.0117, 0.182, 0.0197, 0.384
Hệ số quán tính, hệ số ma sát, số cặp cực [H(s), F(pu), p ()]	0.7, 0, 0.2

Bảng 2.5: Thông số khối hệ thống kích thích

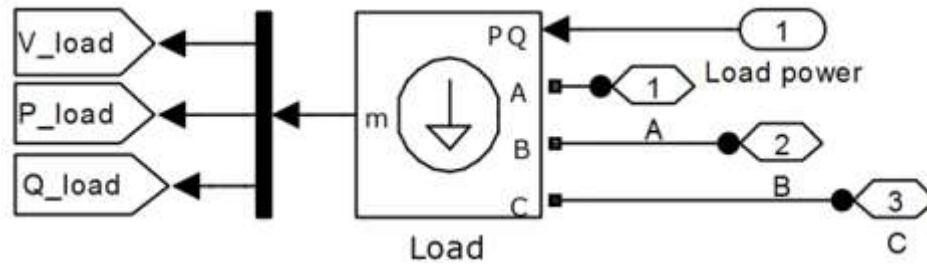
Tên thông số	Giá trị
Hằng số thời gian bộ lọc bậc thấp T_r (s)	0.02
Hệ số và hằng số thời gian bộ điều chỉnh [K_a (s), T_a (s)]	300, 0.001
Hệ số kích thích [K_e (s), T_e (s)]	1, 0
Hệ số giảm tăng cường [T_b (s), T_c (s)]]	0, 0
Hệ số và hằng số thời gian bộ giảm dao động [K_f (), T_f (s)]	0.001, 0.1
Giới hạn đầu ra bộ điều chỉnh [E_{fmin} , E_{fmax} (pu), K_p ()]	-11.5, 11.5, 0
Giá trị ban đầu của điện áp đầu cực và điện áp trường [V_{t0} (pu), V_{f0} (pu)]	1, 1.42611

2.3.5. Tải hệ thống

Tải hệ thống được biểu diễn bằng một khối tải động trong Simulink. Nhân ở góc trên bên phải chỉ ra rằng dữ liệu lịch sử thực tế được đọc từ một tệp *.mat cùng đường dẫn, với 48 điểm dữ liệu, đại diện cho 48 chu kì, 1 chu kì tương đương 30 phút trong một ngày (24 giờ). Công suất phản kháng được đặt là 0 Var trong nghiên cứu này [16].



Hình 2.8: Tải hệ thống

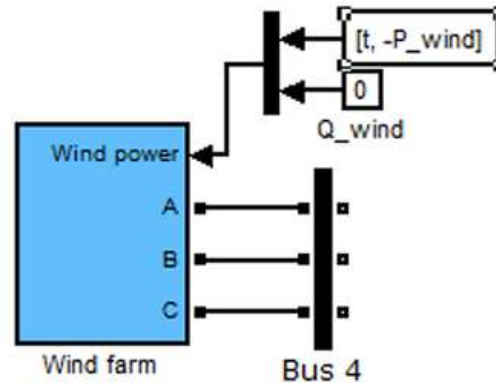


Hình 2.9: Mô hình tải động bên trong khối

Lệnh từ trung tâm điều khiển đi vào cổng PQ ở góc trên bên phải. Tải tiêu thụ công suất hoạt động dựa trên lệnh này. Khi tín hiệu có giá trị dương, tải tiêu thụ điện năng. Khi tín hiệu âm, tải phát điện. Trong trường hợp này, tải luôn có giá trị dương [16].

2.3.6. Wind Farm

Trang trại gió (Wind Farm) là một hệ thống gồm nhiều turbine gió được lắp đặt để khai thác năng lượng gió và chuyển đổi thành điện năng. Mỗi turbine gió hoạt động dựa trên nguyên lý: Khi gió thổi làm quay cánh quạt, cơ năng được truyền qua trục đến máy phát điện, tạo ra điện năng. Các turbine thường có công suất từ vài trăm kW đến vài MW, và hệ thống điện đầu ra được điều chỉnh thông qua bộ biến tần hoặc biến đổi để phù hợp với lưới điện. Trang trại gió được trang bị hệ thống giám sát và điều khiển giúp theo dõi tốc độ gió, hiệu suất phát điện và đảm bảo an toàn khi có gió mạnh vượt ngưỡng. Trong mô hình nhà máy điện ảo (VPP), trang trại gió đóng vai trò là một nguồn phát năng lượng tái tạo có công suất thay đổi theo điều kiện gió. Khi mô phỏng trong Simulink, trang trại gió có thể được tích hợp bằng các khối như Wind Turbine và sử dụng dữ liệu tốc độ gió làm đầu vào, từ đó đánh giá khả năng cung cấp điện cho hệ thống tải, pin lưu trữ hoặc hòa lưới điện mô phỏng [16].

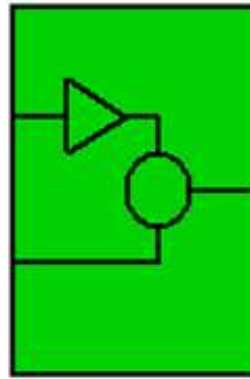


Hình 2.10: Trang trại gió

2.3.7. Hệ thống đo lường

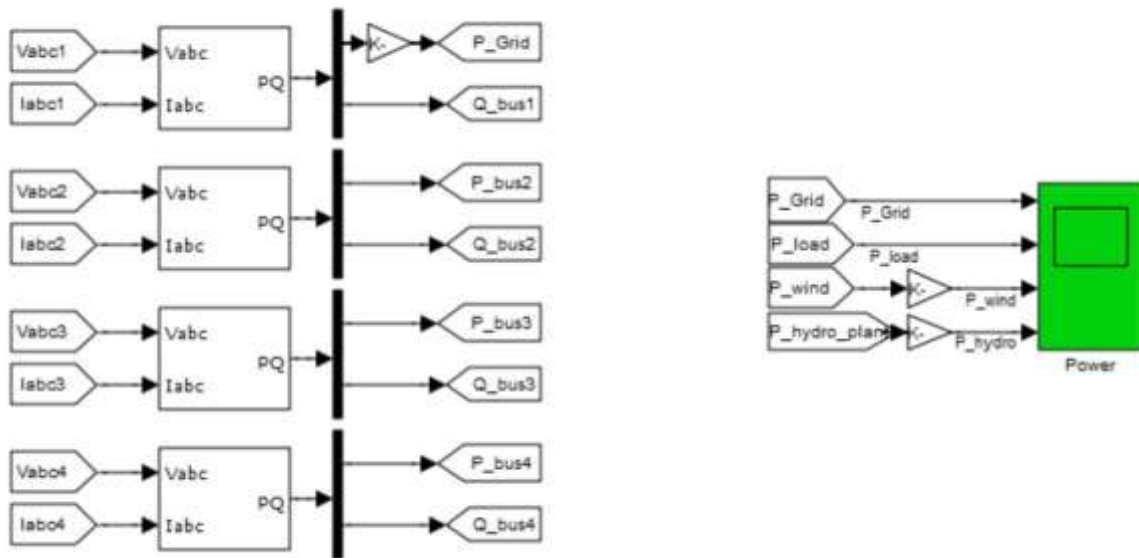
Khối đo lường đóng vai trò thu thập và xử lý các thông số điện quan trọng tại các thanh góp (bus bar), bao gồm dòng điện và điện áp. Các cảm biến đo lường dòng và áp được đặt tại các vị trí thích hợp trong mạng điện để ghi nhận giá trị tức thời của các đại lượng điện. Dữ liệu thu thập được sau đó được truyền đến khối tính toán công suất ba pha, cụ thể là khối Three-Phase Power Measurement (PQ), nhằm xác định công suất tác dụng (P) và công suất phản kháng (Q) tại từng điểm nút trong hệ thống.

Sau khi được xử lý, các giá trị đo lường này sẽ được chuyển tiếp đến hệ thống điều khiển, nơi dữ liệu được sử dụng để đưa ra các quyết định điều độ phù hợp hoặc kích hoạt các chức năng phản ứng như hỗ trợ từ nhà máy điện ảo (VPP). Đồng thời, hệ thống cũng sử dụng các khối hiển thị dạng sóng (Scope) để trình bày trực quan các tín hiệu dòng, áp, công suất và đáp ứng hệ thống theo thời gian thực. Ngoài ra, các dữ liệu hiển thị có thể được cấu hình để lưu trữ tự động dưới định dạng tệp *.mat thông qua tùy chọn lưu dữ liệu trong Scope, phục vụ mục đích phân tích hậu kỳ hoặc đánh giá hiệu quả vận hành hệ thống [16].



Measurements

Hình 2.11: Khối đo lường



Hình 2.12: Khối đo lường bên trong

- Công suất hoạt động và phản kháng đi qua các BUS gồm: BUS 1, BUS 2, BUS 3 và BUS 4.
- Công suất hoạt động qua lưới truyền tải.
- Công suất hoạt động tiêu thụ của tải hệ thống.
- Công suất hoạt động phát ra từ trang trại gió.
- Công suất hoạt động đầu ra từ nhà máy thủy điện tích năng.

Kết quả được hiển thị qua khối hiển thị bốn kênh.

2.4. Mô phỏng hoạt động tối ưu của VPP (MATLAB Optimization Toolbox)

Trong phần này, tập trung xây dựng mô hình tối ưu cho hệ thống kết hợp giữa năng lượng gió và thủy điện tích năng. Hệ thống được vận hành theo nguyên tắc:

- Khi giá điện cao, cả gió và thủy điện tích năng cùng phát để tối đa hóa lợi nhuận.
- Khi giá thấp, không bán điện mà dùng công suất gió để bơm nước lên hồ chứa cho thủy điện tích năng.
- Khi hồ đã được tích đầy, hệ thống sẵn sàng phát trở lại.

Ngoài ra, trong trường hợp lưới cần hỗ trợ công suất, hệ thống sẽ ưu tiên phát điện để hỗ trợ theo thứ tự lần lượt: Gió trước, thủy điện sau. Mô hình được giải bằng công cụ tối ưu hóa trong MATLAB và cho thấy hiệu quả vận hành phụ thuộc mạnh vào biến động giá và khả năng đáp ứng công suất kịp thời của từng nguồn.

2.4.1. Mô hình tối ưu hóa kết hợp điện gió – thủy điện tích năng

Trong quá trình vận hành một hệ thống điện ảo (VPP), việc điều phối các nguồn phát phân tán như điện gió và thủy điện tích năng không chỉ cần đảm bảo cung cấp điện liên tục mà còn phải đạt hiệu quả kinh tế cao nhất có thể. Trong thực tế, công suất gió biến động theo thời gian và thường không đồng bộ với thời điểm giá điện cao trên thị trường. Vì vậy, nếu không có chiến lược điều độ phù hợp, hệ thống có thể phải bán điện vào lúc giá thấp hoặc thậm chí không tận dụng được hết nguồn tài nguyên sẵn có.

Phần lớn các mô hình mô phỏng VPP trong Simulink thường tập trung vào hành vi động, mô phỏng thời gian thực và kiểm tra phản ứng của hệ thống với các sự kiện như sự cố hay thay đổi tải. Tuy nhiên, trong môi trường thị trường điện hiện đại, yếu tố tối ưu hóa lợi nhuận và cân bằng năng lượng cũng đóng vai trò sống còn, đặc biệt là khi các nguồn năng lượng tái tạo có đặc điểm biến thiên và không điều khiển được.

Việc bổ sung mô hình tối ưu hóa cho VPP giúp hệ thống giúp tự động phân phối công suất gió thành ba mục tiêu:

- Bán ra thị trường (khi giá cao).
- Dùng để bơm nước (khi giá thấp).
- Hỗ trợ tải nội bộ và tải hệ thống (nếu cần và được ưu tiên trước).

Cùng với đó, điều khiển thủy điện tích năng sao cho phát đúng lúc, không gây dư thừa công suất hoặc vi phạm giới hạn hồ chứa. Lựa chọn hành động tốt nhất tại mỗi giờ dựa trên dự báo công suất gió và giá điện trong 24 giờ tới.

2.4.2. Lợi ích của việc kết hợp tối ưu hóa vào mô hình VPP

a. Tối đa hóa lợi nhuận thị trường điện:

Trong bối cảnh thị trường điện đang dần chuyển đổi sang mô hình cạnh tranh với giá điện biến động theo thời gian thực, việc áp dụng các chiến lược tối ưu hóa vận hành hệ thống điện trở nên ngày càng quan trọng. Một trong những hướng đi hiệu quả là chiến lược “tối đa hóa lợi nhuận thị trường điện” thông qua việc lưu trữ năng lượng gió trong các khung giờ có giá điện thấp và chỉ bán ra khi giá điện tăng cao.

Chiến lược này giúp nâng cao biên lợi nhuận rõ rệt so với phương thức truyền thống là phát bao nhiêu bán bấy nhiêu. Khi lựa chọn thời điểm bán tối ưu, doanh thu bán điện tăng đáng kể nhờ tận dụng các khung giờ giá cao, đồng thời giúp giảm tải cho lưới điện trong giờ thấp điểm. Ngoài ra, chiến lược này còn phù hợp với định hướng phát triển năng lượng thông minh và linh hoạt.

Hiện nay, riêng tại Việt Nam đang có sự phân hóa theo thời gian và loại hình phát điện. Các nhà máy điện gió chủ yếu ký hợp đồng mua bán điện (PPA) với mức giá cố định. Tuy nhiên, với sự phát triển của thị trường bán buôn điện cạnh tranh, khả năng tham gia trực tiếp vào thị trường và chủ động điều chỉnh chiến lược bán điện theo giá thị trường sẽ là xu hướng tất yếu.

b. Đơn giản hóa điều khiển thực tế:

Trong mô hình kết hợp giữa điện gió và thủy điện tích năng, việc tối ưu hóa lịch vận hành trở thành yếu tố then chốt để đảm bảo hiệu quả kinh tế và sự ổn định cho hệ thống. Một trong những chiến lược được áp dụng phổ biến là lập kế hoạch vận hành tối ưu trước 48 chu kỳ (tương ứng 24h). Là các quyết định về nạp/xả thủy điện tích năng và phân bổ công suất gió được xác định từ trước dựa trên các dự báo về gió, giá điện và nhu cầu tiêu thụ.

Điều này mang đến những lợi ích rõ ràng có thể kể đến như:

- Giảm đáng kể gánh nặng tính toán thời gian thực, tránh các thuật toán phức tạp phải chạy liên tục trong môi trường có độ trễ thấp.
- Tăng độ tin cậy vận hành, vì hệ thống đã có sẵn kịch bản xử lý cho từng khung thời gian cụ thể.
- Tối ưu hiệu suất tích trữ/xả của thủy điện tích năng, vì đã cân nhắc kỹ lưỡng nước, công suất turbin/pump và ràng buộc lưới điện từ trước.
- Nâng cao khả năng phối hợp với nguồn gió, vốn có tính bất định cao, thông qua việc “đệm” bằng thủy điện tích năng để ổn định công suất đầu ra.

Việc tích hợp chặt chẽ giữa điện gió và thủy điện tích năng đòi hỏi đầu vào dự báo phải có độ chính xác cao, đặc biệt là dự báo công suất gió trong 24h tới, dự báo giá điện theo thị trường thời gian thực hoặc thị trường ngày tới cũng như phụ tải liên quan đến nhà máy điện tích hợp tự tiêu thụ.

c. Tác động chiến lược bảo vệ môi trường:

Ngoài các vấn đề liên quan đến phát thải khí nhà kính, tăng hiệu quả sử dụng NLTT, giảm áp lực hạ tầng giúp kéo dài tuổi thọ thiết bị, ... Nhóm tác giả đề cập thêm về vấn đề thiết thực và nhân văn trong quy hoạch và vận hành các công trình thủy điện tích năng đó là duy trì mực nước ổn định nhằm bảo vệ hệ sinh thái dưới lòng hồ. Đây cũng là một yếu tố quan trọng giúp cân bằng giữa phát triển năng lượng và bảo tồn môi trường tự nhiên.

Để giảm thiểu rủi ro này, việc áp dụng chiến lược duy trì mực nước tối thiểu (mực nước sinh thái hay còn gọi là dung tích chết) tại hồ chứa là rất quan trọng. Đây là mức nước đã được xác định thông qua đánh giá tác động môi trường và các mô hình sinh thái thủy, nhằm:

- Duy trì lớp nước đủ sâu để bảo vệ vùng sinh trưởng của sinh vật đáy và động vật thủy sinh.
- Đảm bảo nồng độ oxy hòa tan và nhiệt độ nước ổn định, tránh hiện tượng “sốc nhiệt” hoặc thiếu oxy khi mực nước thay đổi nhanh.
- Hạn chế hiện tượng phơi đáy hồ, vốn có thể dẫn đến chết sinh vật, phát sinh khí độc (H_2S , CH_4) và mất cân bằng hệ sinh thái.

Cần phân biệt rõ mực nước chết và dung tích chết trong trường hợp này, mực nước chết là mực độ cao so với mực nước biển đạt thấp nhất mà tại đó nước trong hồ không thể chảy ra tự nhiên qua cửa lấy nước hoặc cửa xả đáy để phục vụ mục đích phát điện hoặc cung cấp nước. Quy định phải công bố rõ mực nước chết trong hồ sơ cấp phép khai thác, sử dụng nước.

Việc hạ mực nước dưới mức nước chết phải có lý do chính đáng (ví dụ như hạn hán nghiêm trọng, cấp nước khẩn cấp) và phải được phê duyệt bởi cơ quan quản lý có thẩm quyền.

2.4.3. Mô hình toán học và các ràng buộc

Bài toán tối ưu hóa trên có thể được xây dựng như sau:

Mục tiêu:

$$\text{Max} \quad \sum_{i=1}^T (P_{wi} + P_{hi}) \cdot C_i$$

Ràng buộc:

$$P_{vi} = P_{wi} + P_{pi} + P_{w1i} \quad \text{với } i = 1, 2, \dots, 48 \quad (1)$$

$$P_{w1i} + P_{h1i} = P_t + P_{ht} \quad \text{với } i = 1, 2, \dots, 48 \quad (2)$$

$$E_{i+1} = E_i + t \cdot \left(\eta_p \cdot P_{pi} - \frac{P_{hi}}{\eta_h} \right) \quad \text{với } i = 1, 2, \dots, 48 \quad (3)$$

$$E_1 = E_1^{esp} \quad (4)$$

$$E_{49} = E_{49}^{esp} \quad (5)$$

$$0 \leq P_{pi} \leq P_p^{\max} \quad \text{với } i = 1, 2, \dots, 48 \quad (6)$$

$$0 \leq P_{hi} \leq P_h^{\max} \quad \text{với } i = 1, 2, \dots, 48 \quad (7)$$

$$P_{hi} \leq \eta_h \cdot \frac{E_i}{t} \quad \text{với } i = 1, 2, \dots, 48 \quad (8)$$

$$P_{hi} + P_{h1i} \leq n_h \cdot \frac{E_i}{t} \quad \text{với } i = 1, 2, \dots, 48 \quad (9)$$

$$P_{hi} + P_{h1i} \leq P_h^{\max} \quad \text{với } i = 1, 2, \dots, 48 \quad (10)$$

Trong đó:

- P_{wi} : Công suất gió bán ra thị trường tại giờ i [MW]
- P_{w1i} : Công suất gió phát hỗ trợ tải nội bộ (P_t) và Hệ thống (P_{ht})
- P_{hi} : Công suất thủy điện tích năng bán ra thị trường tại giờ i [MW]
- P_{h1i} : Công suất thủy điện tích năng phát hỗ trợ cho tải nội bộ (P_t) và Hệ thống (P_{ht}) khi công suất gió phát lên để hỗ trợ tải nội bộ (P_t) và Hệ thống (P_{ht}) không đủ
- C_i : Giá năng lượng tại giờ i [VNĐ/kWh]
- P_{vi} : Công suất gió dự báo tại giờ i [MW]
- P_{pi} : Công suất gió dùng để bơm vào hồ chứa thủy điện tại giờ i [MW]
- η_h : Hiệu suất phát điện thủy điện tích năng [%]

- η_p : Hiệu suất bơm [%]
- E : Mức năng lượng tối đa của hồ (quy ước chỉ sử dụng 90% thể tích tối đa của hồ)
- E_i : Mức năng lượng của hồ chứa thủy điện tích năng tại giờ i [MWh]
- E_{i+1} : Mức năng lượng của hồ chứa thủy điện tích năng tại giờ $(i + 1)$ [MWh]
- E_1^{esp} : Mức năng lượng ban đầu của hồ chứa [MWh]
- E_{49}^{esp} : Mức năng lượng tại thời điểm (chu kì) cuối ngày của hồ chứa [MWh]
- t : Thời gian

Giả thiết nhà máy thủy điện tích năng có các thông số như sau:

- Mức năng lượng tối đa của hồ chứa thủy điện tích năng:
$$E_{Max} = 1500 \text{ MWh}$$
- Mức năng lượng ban đầu và tại thời điểm cuối ngày của hồ chứa:
$$E_1^{esp} = E_{49}^{esp} = 600 \text{ MWh}$$
- Hiệu suất bơm của nhà máy thủy điện tích năng:
$$\eta_p = 83\%$$
- Hiệu suất phát của nhà máy thủy điện tích năng:
$$\eta_h = 93\%$$
- Giới hạn bơm công suất tối đa của nhà máy thủy điện tích năng:
$$P_p = 250 \text{ MW}$$
- Giới hạn phát công suất tối đa của nhà máy thủy điện tích năng:
$$P_h = 250 \text{ MW}$$

Hàm mục tiêu được xây dựng nhằm tối đa hóa lợi nhuận từ sự phối hợp vận hành giữa nguồn điện gió và thủy điện tích năng, trong đó tổng sản lượng bán ra thị trường bao gồm phần công suất thủy điện phát lên lưới và một phần công suất gió được đưa trực tiếp vào thị trường điện theo từng thời điểm.

- Ràng buộc (1) thể hiện cách phân phối công suất gió khả dụng theo hai hướng: Bán trực tiếp ra thị trường và sử dụng để bơm nước lên hồ chứa phục vụ vận hành thủy điện tích năng.
- Ràng buộc (2) đảm bảo tổng công suất phát từ nguồn gió hỗ trợ (P_{w1i}) và thủy điện tích năng hỗ trợ (P_{h1i}) cho tải nội bộ và hệ thống tại mỗi thời điểm phải bằng tổng phụ tải nội bộ (P_t) và phụ tải hệ thống (P_{ht}). Mục tiêu là duy trì cân bằng công suất trong hệ thống, đáp ứng đúng nhu cầu tiêu thụ tại mọi thời điểm.
- Ràng buộc (3) phản ánh sự biến động của mức năng lượng trong hồ chứa giữa hai thời điểm liên tiếp (giờ i và $i+1$), có tính đến phần nước được bơm lên và phần nước đã được sử dụng để phát điện.

- Các ràng buộc đẳng thức (4) và (5) quy định mức năng lượng ban đầu và mức năng lượng cuối ngày trong hồ chứa, nhằm đảm bảo kế hoạch vận hành ổn định cho chu kỳ.
- Các ràng buộc bất đẳng thức (6), (7), và (8) đặt giới hạn trên cho công suất phát và công suất bơm tại mỗi thời điểm, tương ứng với khả năng kỹ thuật của thiết bị.
- Ràng buộc (9) giới hạn tổng công suất phát thủy điện tích năng và công suất hỗ trợ kỹ thuật không vượt quá giới hạn kỹ thuật tối đa có thể xả nước trong mỗi giờ, trên cơ sở thể tích nước tương ứng với thời gian xả.
- Ràng buộc (10) đảm bảo rằng tổng công suất từ hai nguồn là thủy điện tích năng bán ra thị trường và thủy điện tích năng phát hỗ trợ cho tải nội bộ cũng như hệ thống không được vượt quá giới hạn phát tối đa cho phép của thủy điện tích năng.

Để giải bài toán, hàm **linprog** với thuật toán Interior Point Algorithm trong toolbox tối ưu hóa của MATLAB sẽ được sử dụng. Bài toán sau đó được định nghĩa là:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & -f^T X \\ \text{s.t.} \quad & AX \leq b \\ & A_{\text{eq}} X = b_{\text{eq}} \\ & l_b \leq X \leq u_b \end{aligned}$$

Trong đó:

$$X = [P_w; P_p; P_{w1}; P_{h1}; P_h; E]$$

Với:

$$P_w = [P_{w1}, P_{w2}, \dots, P_{w48}]^T \quad (48 \times 1)$$

$$P_p = [P_{p1}, P_{p2}, \dots, P_{p48}]^T \quad (48 \times 1)$$

$$P_{w1} = [P_{w1-1}, P_{w1-2}, \dots, P_{w1-48}]^T \quad (48 \times 1)$$

$$P_{h1} = [P_{h1-1}, P_{h1-2}, \dots, P_{h1-48}]^T \quad (48 \times 1)$$

$$P_h = [P_{h1}, P_{h2}, \dots, P_{h48}]^T \quad (48 \times 1)$$

$$E = [E_1, E_2, \dots, E_{49}]^T \quad (49 \times 1)$$

$$f^T = [C, \text{zeros}(1, 48), \text{zeros}(1, 48), \text{zeros}(1, 48), C, \text{zeros}(1, 49)]$$

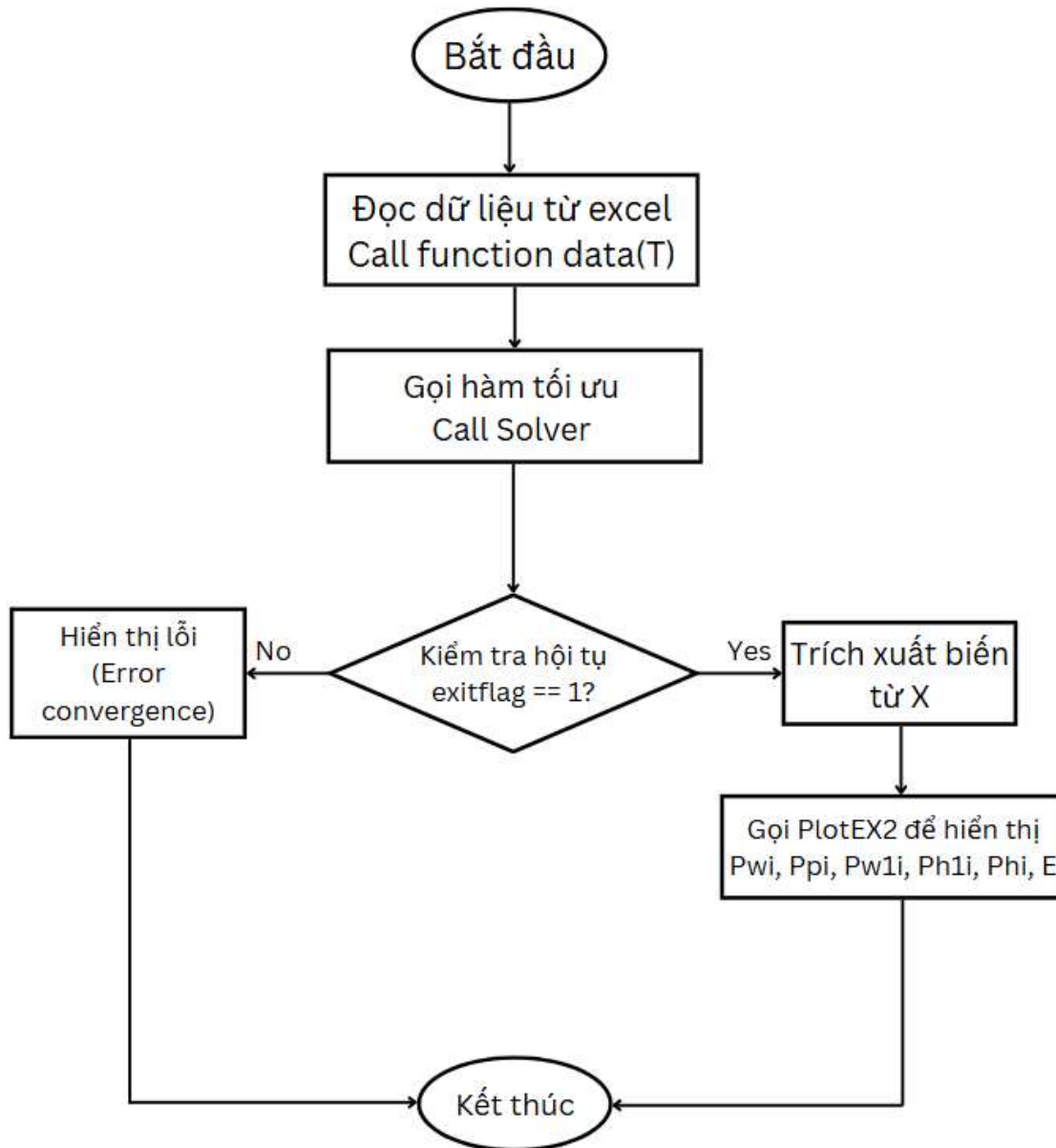
$$\text{Với: } C = [c_1, c_2, \dots, c_{48}]^T \quad (1 \times 48)$$

Sau đó, sản lượng tối ưu được tính toán là:

$$[x, fval, exitflag, output, lambda] = \text{linprog}[f, A, b, A_{eq}, b_{eq}, l_b, u_b, options]$$

2.4.4. Cấu trúc chương trình MATLAB

Lưu đồ thuật toán mô tả quy trình thực hiện mô phỏng và tối ưu hóa sự kết hợp giữa nguồn điện gió và thủy điện tích năng trong một khung thời gian cố định (ví dụ: 24 giờ). Thuật toán sử dụng mô hình hóa tuyến tính với hàm **linprog** trong MATLAB để giải quyết bài toán phân phối công suất tối ưu theo các ràng buộc năng lượng và vận hành.



Hình 2.13: Lưu đồ thuật toán mô phỏng mô hình tối ưu hóa

Giải thích các bước trong thuật toán:

- **Bắt đầu:** Đây là điểm khởi đầu của chương trình mô phỏng. Quá trình xử lý bắt đầu từ bước này.
- **Đọc dữ liệu từ Excel – Call function data(T):** Hàm “data.m” được gọi để đọc các thông tin cần thiết từ file Excel bao gồm:

Pv: Công suất gió dự báo theo từng giờ

Pt: Công suất yêu cầu của tải nội bộ.

Pht: Công suất yêu cầu của hệ thống (phụ tải hệ thống).

DATA6: Giá điện theo thời gian. Đây là bước tiền xử lý quan trọng giúp mô hình có đủ dữ liệu để tính toán.

- **Gọi hàm tối ưu – Call Solver:** Hàm “solverEX2.m” được gọi để xây dựng bài toán tối ưu hóa tuyến tính (LP) với đầu vào là các dữ liệu trên. Hàm này thực hiện:

Xây dựng hàm mục tiêu tối đa hóa lợi nhuận từ việc bán điện.

Thiết lập các ràng buộc cân bằng năng lượng, giới hạn công suất bơm/phát, giới hạn năng lượng hồ chứa, ...

Gọi solver ‘linprog’ để tìm nghiệm tối ưu (X), kết quả chứa các quyết định vận hành: Công suất phát, bơm, bán thị trường, trạng thái hồ.

- **Kiểm tra hội tụ – ‘exitflag == 1?’:** Sau khi giải xong bài toán, kiểm tra giá trị exitflag trả về từ linprog. Đây là một điều kiện rẽ nhánh quan trọng:

Nếu ‘exitflag == 1’: Bài toán hội tụ và tìm được nghiệm tối ưu.

Nếu không: Thuật toán thất bại do không hội tụ hoặc gặp lỗi ràng buộc.

- **Nếu không hội tụ – Hiện thị lỗi (Error convergence):** Trường hợp bài toán không hội tụ, chương trình sẽ thông báo lỗi và kết thúc xử lý. Đây là một bước xử lý ngoại lệ nhằm đảm bảo người dùng không dùng kết quả sai.

- **Nếu hội tụ – ‘Trích xuất biến từ X:** Trong trường hợp hội tụ, biến ‘X’ chứa các kết quả tối ưu sẽ được giải nén.

P_{wi} : Công suất gió bán ra thị trường.

P_{pi} : Công suất dùng để bơm nước lên hồ (tích năng).

P_{w1i} : Công suất hỗ trợ tải nội bộ.

P_{h1i} : Công suất thủy điện tích năng hỗ trợ tải hệ thống.

P_{hi} : Công suất thủy điện tích năng bán ra thị trường.

E_i : Mức năng lượng trong hồ tại mỗi thời điểm.

- **Hiện thị đồ thị kết quả – plotEX2(...):** Hàm plotEX2.m được gọi để trực quan hóa kết quả. Các thông tin hiển thị bao gồm:

Đồ thị giá điện và công suất gió đầu vào.

Biểu đồ dạng stacked bar chart thể hiện phân phối công suất giữa các khối chức năng (bơm, phát, hỗ trợ, ...).

Đường biến thiên của mức năng lượng hồ chứa theo thời gian.

- **Kết thúc:** Sau khi hiển thị kết quả, chương trình kết thúc.

Quy trình này giúp đảm bảo: Cân bằng giữa cung và cầu. Tối ưu hóa lợi nhuận từ nguồn năng lượng tái tạo. Giảm sự phụ thuộc vào hệ thống điện quốc gia bằng cơ chế vận hành thông minh.

2.4.5. Lập kế hoạch mô phỏng tối ưu

Giả định Giá chào bán 24 giờ (48 chu kỳ) cho ngày tiếp theo được lấy từ đơn vị vận hành thị trường điện.

Bảng 2.6: Tương quan giá biên cho ngày tiếp theo

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
683.37	1366.7	1332.9	1299.1	1297.7	1296.3	1298.4	1300.5	1328.4	1356.3	1398.7	1441.2
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
633.35	1266.7	1286.2	1305.7	1492.9	1680	1568.5	1456.9	1376.5	1296	1181.1	1066.2
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
535	1070	1360	1650	1666.3	1682.6	1682.6	1682.6	1682.6	1682.6	1682.6	1682.6
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
841.21	1682.4	1682.5	1682.6	1682.6	1682.6	1682.6	1682.6	1565.8	1448.9	1445.1	1441.2

**DVT giá tiền: VNĐ/kWh*

Giả định công suất của trang trại gió 24 giờ (48 chu kỳ) cho ngày tiếp theo.

Bảng 2.7: Công suất của trang trại gió ngày tiếp theo

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
300	270	220	350	250	400	500	170	200	250	300	250
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
350	500	555	400	300	250	380	500	170	350	365	450
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
400	500	450	310	250	200	180	230	290	400	500	410
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
425	500	400	420	200	175	215	350	415	375	400	375

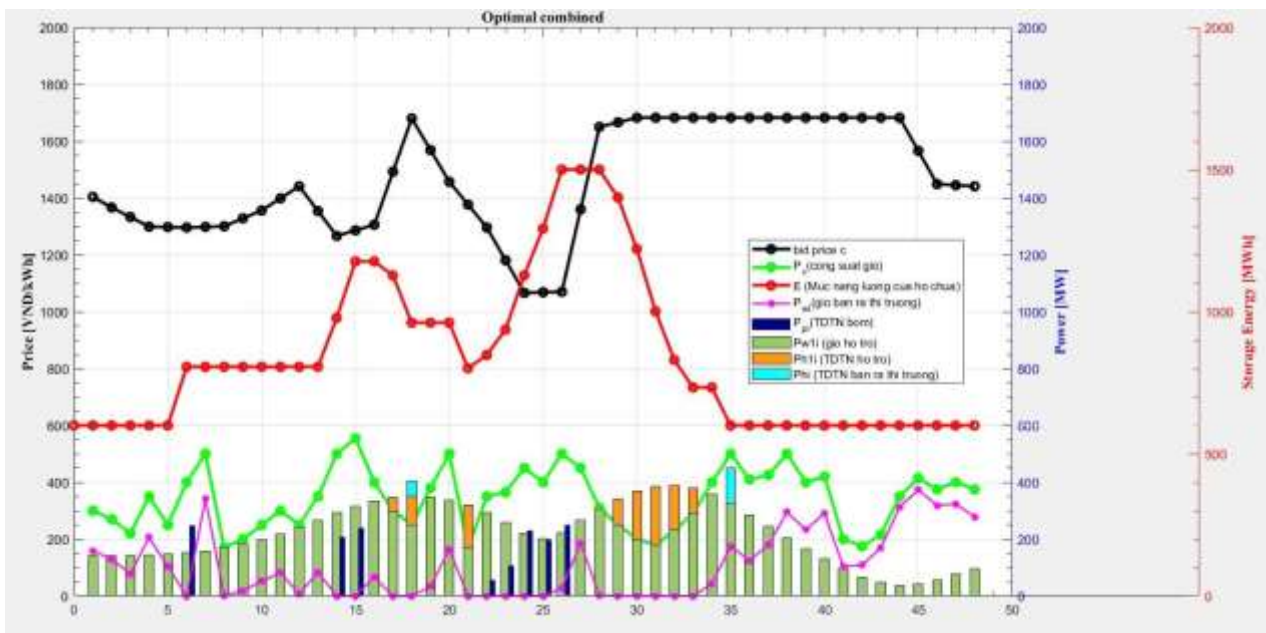
**Công suất: MW*

Giả định Công suất của tải nội bộ trong mô hình VPP với 24 giờ (48 chu kỳ) cho ngày tiếp theo.

Bảng 2.8: Công suất của tải nội bộ ngày tiếp theo

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
140.63	141.26	142.31	144.2	147.14	151.76	158.69	168.42	181.58	198.38	218.82	242.2
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
267.4	292.53	315.42	333.97	346.08	350.56	347.06	336.28	318.99	293.79	258.09	219.31
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
201.81	221.9	264.95	307.58	341.6	367.71	384.58	389.13	379.68	357.07	324.45	285.95
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
245.42	205.38	166.81	129.99	95.83	66.71	46.27	37.73	41.93	56.49	76.51	96.95

*Công suất: MW



Hình 2.14: Biểu đồ vận hành tối ưu của VPP trong điều kiện bình thường

Biểu đồ "Optimal combined" thể hiện sự biến thiên của các giá trị theo thời gian, với trục hoành là các khoảng thời gian từ 0 đến 48 và trục tung trái biểu thị giá bán điện (Price, VNĐ/kWh) từ 0 đến 100, trong khi trục tung phải biểu thị công suất và năng lượng (MW/MWh) từ 0 đến 1500.

- **Bid price** - Giá bán điện (đường màu đen với các chấm tròn).
- **P_v** - Công suất gió (đường màu xanh neon).

- E - Năng lượng còn lại trong hồ (đường màu đỏ).
- P_{wi} - Gió bán ra (đường màu tím).
- P_{hi} - Thủy điện tích năng bán ra (đường màu xanh ngọc).
- P_{pi} - Thủy điện tích năng bơm nước lên hồ chứa (đường màu xanh biển).
- P_{w1i} - Gió hỗ trợ lưới (đường màu xanh rêu).
- P_{h1i} - Thủy điện tích năng hỗ trợ lưới (đường màu vàng).

Mô tả chi tiết có thể hiểu như: Khi giá bán điện đạt mức cao, cả thủy điện tích năng và gió cùng tham gia bán điện để tối ưu hóa lợi nhuận, tận dụng điều kiện thị trường thuận lợi. Ngược lại, khi giá điện giảm xuống thấp, việc bán điện sẽ tạm dừng. Trong giai đoạn này, gió được chuyển sang sử dụng để bơm nước lên hồ chứa, hỗ trợ thủy điện tích năng, tích lũy năng lượng tiềm năng cho các chu kỳ sau. Sau khi bơm đủ nước và năng lượng trong hồ đạt mức cần thiết, hệ thống sẽ tiếp tục quay lại chế độ bán điện từ cả hai nguồn khi điều kiện giá cả cho phép hoặc chỉ gió bất kể giá bán ra thấp hay cao.

Tuy nhiên, trong trường hợp lưới điện cần hỗ trợ công suất khẩn cấp, hệ thống ưu tiên phát điện hỗ trợ theo thứ tự: gió trước, sau đó đến thủy điện tích năng. Cách vận hành này đảm bảo sự linh hoạt và hiệu quả, với gió đóng vai trò nguồn năng lượng đáp ứng nhanh chóng nếu đang sẵn có, trong khi thủy điện tích năng đóng vai trò dự trữ ổn định. Sự đồng bộ này giúp hệ thống tận dụng tối đa nguồn lực, cân bằng cung cầu điện năng và duy trì độ tin cậy cho lưới, thể hiện rõ vai trò phối hợp chặt chẽ giữa các nguồn năng lượng tái tạo trong một hệ thống tích hợp.

Ví dụ tại thời điểm 7 trên đồ thị:

- Giá bán điện: Khoảng 1300 VNĐ/kWh, cho thấy đây là thời điểm giá trung bình, có thể cân đối để bán điện.
- Công suất gió: Khoảng trên 500 MW, sẵn sàng để sử dụng.
- Năng lượng còn lại trong hồ: Xấp xỉ 800 MWh.
- Gió bán ra: Có cột giá trị cao, khoảng 360-380 MW, phản ánh thấy bán điện tích cực.
- Thủy điện tích năng bán ra: Gần 0 MW.
- Thủy điện tích năng bơm nước lên hồ chứa: 0 MW, phản ánh việc sử dụng thủy điện tích năng lúc này không tối ưu về giá cả.
- Gió hỗ trợ tải nội bộ và thủy điện tích năng hỗ trợ tải nội bộ: Gió vào khoảng 190 MW và thủy điện gần bằng 0 MW, không có nhu cầu hỗ trợ lưới tại thời điểm này.

Ở thời điểm 7, hệ thống bán điện do được giá, chuyển gió sang hỗ trợ tải nội bộ và phần còn lại bán lên lưới. Nếu lưới cần hỗ trợ công suất, gió sẽ được ưu tiên phát trước để đáp ứng nhanh chóng.

Tại thời điểm 25 trên đồ thị:

- Giá bán điện: Khoảng 1030-1080 VNĐ/kWh, cho thấy đây là thời điểm giá cao, phù hợp để bán điện.
- Công suất gió: 410 MW, đóng góp đáng kể vào việc bơm nước lên hồ chứa thủy điện tích năng.
- Năng lượng còn lại trong hồ: Xấp xỉ 1300 MWh, chứng tỏ thủy điện tích năng đủ khả năng vận hành phát công suất.
- Gió bán ra: Có cột giá trị xấp xỉ 0 MW, phản ánh việc gió không tham gia bán điện.
- Thủy điện bán ra: 0 MW, chứng tỏ thủy điện tích năng đang trong quá trình bơm nước, không tham gia bán điện.
- Thủy điện tích năng bơm nước lên hồ chứa: Khoảng 200 MW, vì lúc này giá đang thấp nên ưu tiên tích trữ đợi thời điểm giá biên cao hơn.
- Gió hỗ trợ tải nội bộ và Thủy điện hỗ trợ tải nội bộ: Gió gần xấp xỉ 210 MW hỗ trợ tải nội bộ, thủy điện tích năng không tham gia hỗ trợ.

Ở thời điểm 25, hệ thống tận dụng gió để tích nước thủy điện tích năng do giá bán điện thấp, tối ưu hóa lợi nhuận tại thời điểm sau. Nếu giá tăng sau đó, gió có thể chuyển sang vừa bơm nước để tích năng và vừa bán kinh tế, và nếu lưới cần hỗ trợ, gió sẽ được ưu tiên phát trước.

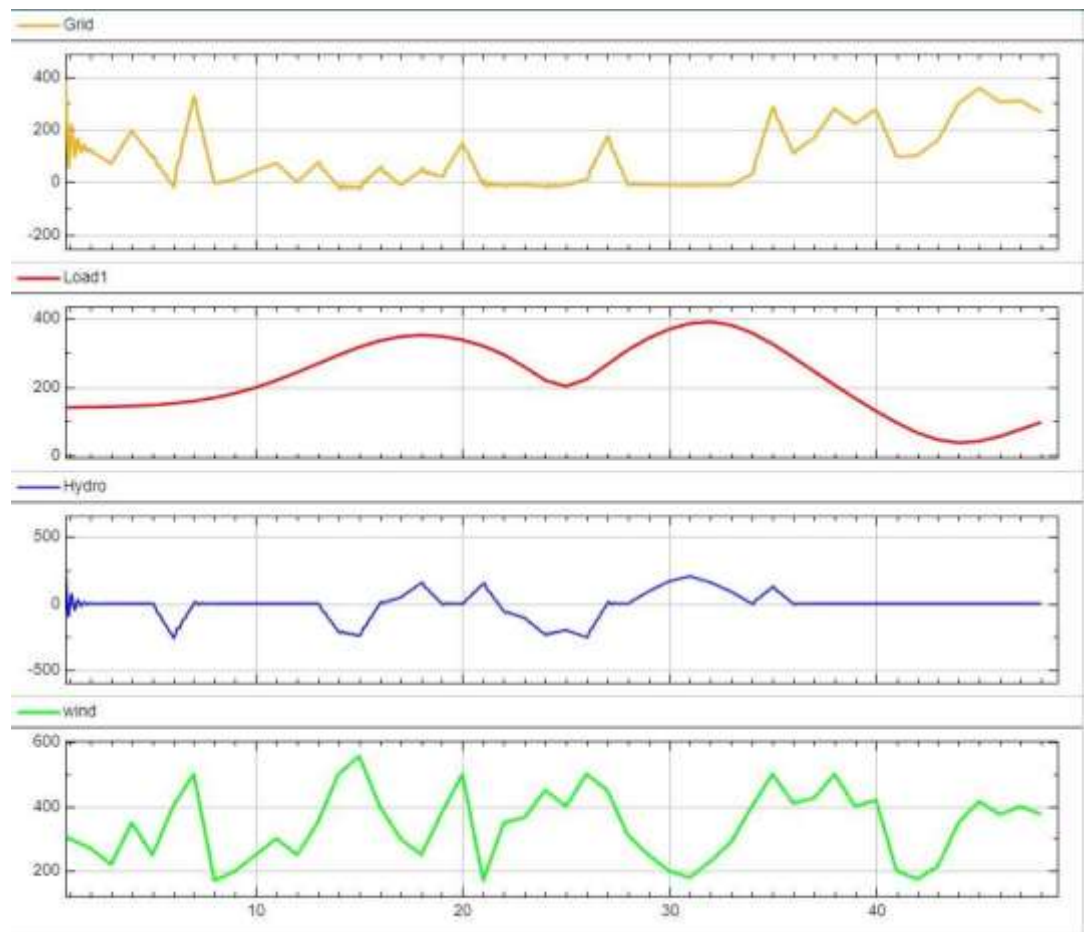
Sau khi thực hiện bài toán tối ưu hóa lợi nhuận vận hành VPP với nguồn năng lượng tái tạo, ta thu được biểu đồ công suất tối ưu của nhà máy thủy điện tích năng trong 48 chu kỳ thời gian. Giá trị công suất âm biểu thị quá trình nhà máy tiêu thụ công suất để bơm nước lên hồ chứa (chế độ lưu trữ năng lượng), trong khi giá trị công suất dương thể hiện nhà máy đang phát điện để hỗ trợ phụ tải hoặc bán lên lưới.

Bảng 2.9: Công suất của nhà máy thủy điện tích năng

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	0	0	0	-248.24	0	0	0	0	0	0
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0	-207.47	-239.58	0	46.08	154.56	0	0	148.99	-56.21	-106.91	-230.69
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
-198.19	-250	0	0	91.6	167.71	204.58	159.13	89.68	0	124.3	0
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

*Công suất: MW

2.4.6. Kết quả mô hình VPP Simulink

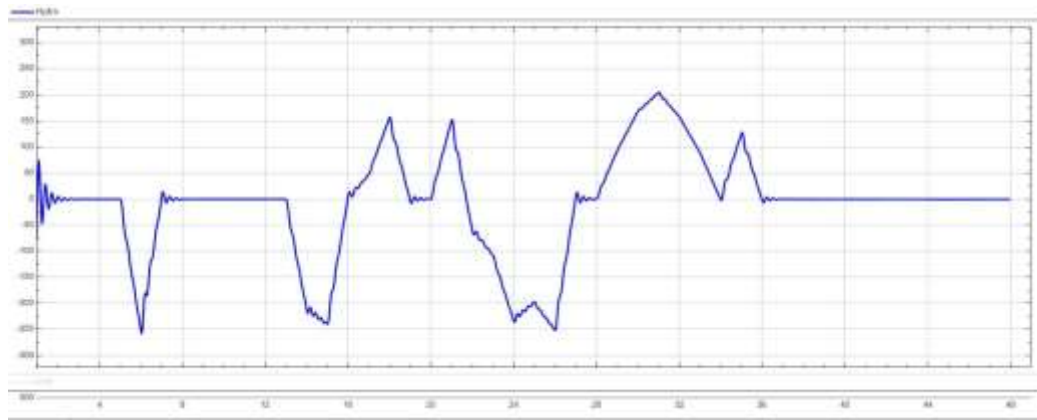


Hình 2.15: Kết quả đáp ứng của mô hình VPP Simulink

(Trục dọc của biểu đồ thể hiện công suất (MW), trục ngang đại diện thời gian 48 chu kì)

Hình 2.15 minh họa kết quả đáp ứng công suất của các thành phần trong hệ thống Nhà máy điện ảo (VPP), sau khi thực hiện mô phỏng vận hành theo kết quả từ bài toán tối ưu hóa lợi nhuận vận hành VPP với nguồn năng lượng tái tạo. Trong đó:

- Biểu đồ đầu tiên (Grid) thể hiện công suất bán ra của VPP đối với lưới hệ thống, tức là phần công suất còn dư sau khi các nguồn nội bộ trong VPP (gió + thủy điện tích năng) đã đáp ứng cho tải.
- Biểu đồ thứ hai là phụ tải nội bộ (Load1), thể hiện đặc tính của tải công nghiệp với 2 đỉnh được mô phỏng biến thiên theo thực tế. Đồ thị thể hiện công suất tăng cao vào khoảng thời gian 8-10h và 18-20h phản ánh giai đoạn sản xuất cao điểm, giảm nhẹ vào khoảng giữa ngày từ 11-14h có thể do thời gian nghỉ trưa và tiếp tục giảm dần sau 21h thể hiện hoạt động sản xuất giảm vào ban đêm.
- Biểu đồ thứ ba mô tả đáp ứng công suất từ thủy điện tích năng (Hydro), bao gồm cả chế độ phát điện và bơm tích năng, thể hiện qua các giá trị dương và âm tương ứng.
- Công suất gió (Wind) ở biểu đồ cuối biến thiên ngẫu nhiên theo thời gian, phản ánh rõ tính không ổn định đặc trưng của nguồn năng lượng tái tạo này.



Hình 2.16: Kết quả đáp ứng của thủy điện tích năng

(Trục dọc của biểu đồ thể hiện công suất (MW), trục ngang đại diện thời gian 48 chu kì)

2.5. Tổng kết chương 2

Xây dựng mô hình VPP bằng MATLAB/Simulink: Nền tảng MATLAB/Simulink đã được sử dụng làm công cụ chính để mô phỏng và phân tích mô hình VPP. Simulink cung cấp giao diện đồ họa trực quan với sơ đồ khối và thư viện khối đa dạng, đặc biệt là Simscape Electrical, giúp mô hình hóa các thành phần vật lý như nguồn điện, tải, lưới điện. Mục đích của việc xây dựng mô hình này là để mô phỏng hoạt động của VPP, thiết kế và kiểm tra chiến lược điều khiển, đánh giá hiệu quả và độ ổn định, thử nghiệm các tình huống giả định, cũng như hỗ trợ đào tạo và nghiên cứu.

Mô hình VPP được thiết kế bao gồm tổ máy phát điện (nhà máy thủy điện tích năng, trang trại gió), đơn vị lưu trữ năng lượng (hồ chứa thủy điện), và phụ tải hệ thống. Hệ thống mô hình cụ thể có dạng vòng (ring-shape) gồm 4 BUS: BUS 1 kết nối lưới truyền tải (biểu diễn bằng BUS hệ thống), BUS 2 kết nối nhà máy thủy điện tích năng (biểu diễn bằng máy đồng bộ), BUS 3 kết nối tải hệ thống, và BUS 4 kết nối trang trại gió (nguồn năng lượng tái tạo biến thiên). Các thành phần này được kết nối qua các đường dây truyền tải, và hệ thống đo lường (sử dụng khối "Three-Phase VI Measurement" và "Three-Phase Power Measurement") được tích hợp để thu thập dữ liệu dòng, áp, công suất tại các thanh góp, hiển thị kết quả qua khối Scope và có thể lưu trữ để phân tích.

Mô phỏng hoạt động tối ưu của VPP: Bên cạnh mô phỏng hành vi động trong Simulink, nghiên cứu còn tập trung vào việc lập kế hoạch vận hành tối ưu cho hệ thống kết hợp năng lượng gió và thủy điện tích năng nhằm tối đa hóa lợi nhuận. Nguyên tắc vận hành tối ưu là bán điện khi giá cao (cả gió và thủy điện), dùng công suất gió để bơm nước lên hồ chứa khi giá thấp, và ưu tiên phát điện hỗ trợ lưới theo thứ tự gió trước, thủy điện tích năng sau khi cần. Việc tích hợp tối ưu hóa này giúp tối đa hóa lợi nhuận trên thị trường điện, đơn giản hóa điều khiển thực tế bằng cách lập kế hoạch trước (48 chu kỳ/24h) dựa trên dự báo, giảm gánh nặng tính toán thời gian thực và tăng độ tin cậy. Nó cũng có tác động chiến lược bảo vệ môi trường thông qua việc duy trì mực nước ổn định trong hồ chứa. Bài toán tối ưu hóa được xây dựng như một bài toán tối ưu hóa tuyến tính (LP) với mục tiêu tối đa hóa tổng lợi nhuận từ việc bán công suất gió và thủy điện, chịu ràng buộc về cân bằng công suất gió, giới hạn công suất phát/bơm thủy điện, biến thiên mức năng lượng hồ chứa, và quy định mức năng lượng ban đầu/cuối kỳ.

Bài toán được giải bằng hàm linprog với thuật toán điểm nội trong MATLAB Optimization Toolbox. Quy trình giải thuật được mô tả bằng lưu đồ, bao gồm các bước đọc dữ liệu đầu vào (gió dự báo, tải, giá điện), gọi hàm giải tối ưu, kiểm tra kết quả, trích xuất

biến quyết định (công suất bán ra, bơm, hồ trợ, mức hồ), và hiển thị kết quả dưới dạng đồ thị. Dữ liệu giá chào bán thực tế từ đơn vị vận hành thị trường điện được sử dụng cho việc lập kế hoạch mô phỏng. Kết quả từ thuật toán tối ưu cho thấy cách phân phối công suất giữa các mục tiêu (bán, bơm, hồ trợ) tùy theo giá điện và công suất gió. Kết quả mô hình Simulink sau đó minh họa đáp ứng công suất của các thành phần VPP dựa trên dữ liệu từ thuật toán tối ưu.

Chương 3: GIAO THỨC KẾT NỐI LƯỚI ĐIỆN

3.1. Giới thiệu phần mềm PSS/E

PSS/E (Power System Simulator for Engineering) là một phần mềm mô phỏng hệ thống điện công suất lớn, do tập đoàn Siemens PTI của Đức phát triển, được sử dụng rộng rãi trên toàn thế giới trong lĩnh vực phân tích và quy hoạch hệ thống điện truyền tải. PSS/E cung cấp một môi trường phù hợp cho việc mô phỏng trạng thái ổn định, phân tích quá độ và động lực học hệ thống, cũng như đánh giá độ tin cậy và hiệu quả vận hành của lưới điện.

Với khả năng mô hình hóa chi tiết các thành phần trong hệ thống điện như máy phát, đường dây, máy biến áp, thiết bị bù và chức năng điều khiển, PSS/E cho phép người dùng thực hiện các bài toán quan trọng như:

- Phân tích công suất tác dụng và phản kháng (Power flow analysis)
- Tính toán ngắn mạch (Short-circuit analysis)
- Nghiên cứu ổn định điện áp và tần số (Stability studies)
- Mô phỏng động học (dynamic simulation) để đánh giá đáp ứng của hệ thống đối với các nhiễu loạn lớn.

PSS/E còn hỗ trợ tích hợp với ngôn ngữ nền lập trình Python, cho phép tự động hóa quy trình tính toán, xây dựng mô hình kịch bản và phân tích hàng loạt, từ đó tăng cường hiệu quả và tính lặp lại trong các nghiên cứu quy hoạch hoặc điều độ hệ thống điện.

Với độ chính xác cao, khả năng xử lý hệ thống có quy mô lớn và được cập nhật thường xuyên theo tiêu chuẩn quốc tế (như IEEE, IEC), PSS/E đã trở thành công cụ tiêu chuẩn trong các tổ chức, công ty vận hành lưới điện, viện nghiên cứu, trường đại học, và các đơn vị tư vấn kỹ thuật điện trên toàn cầu.

3.2. Lưới điện mô phỏng

3.2.1. Mô tả lưới điện

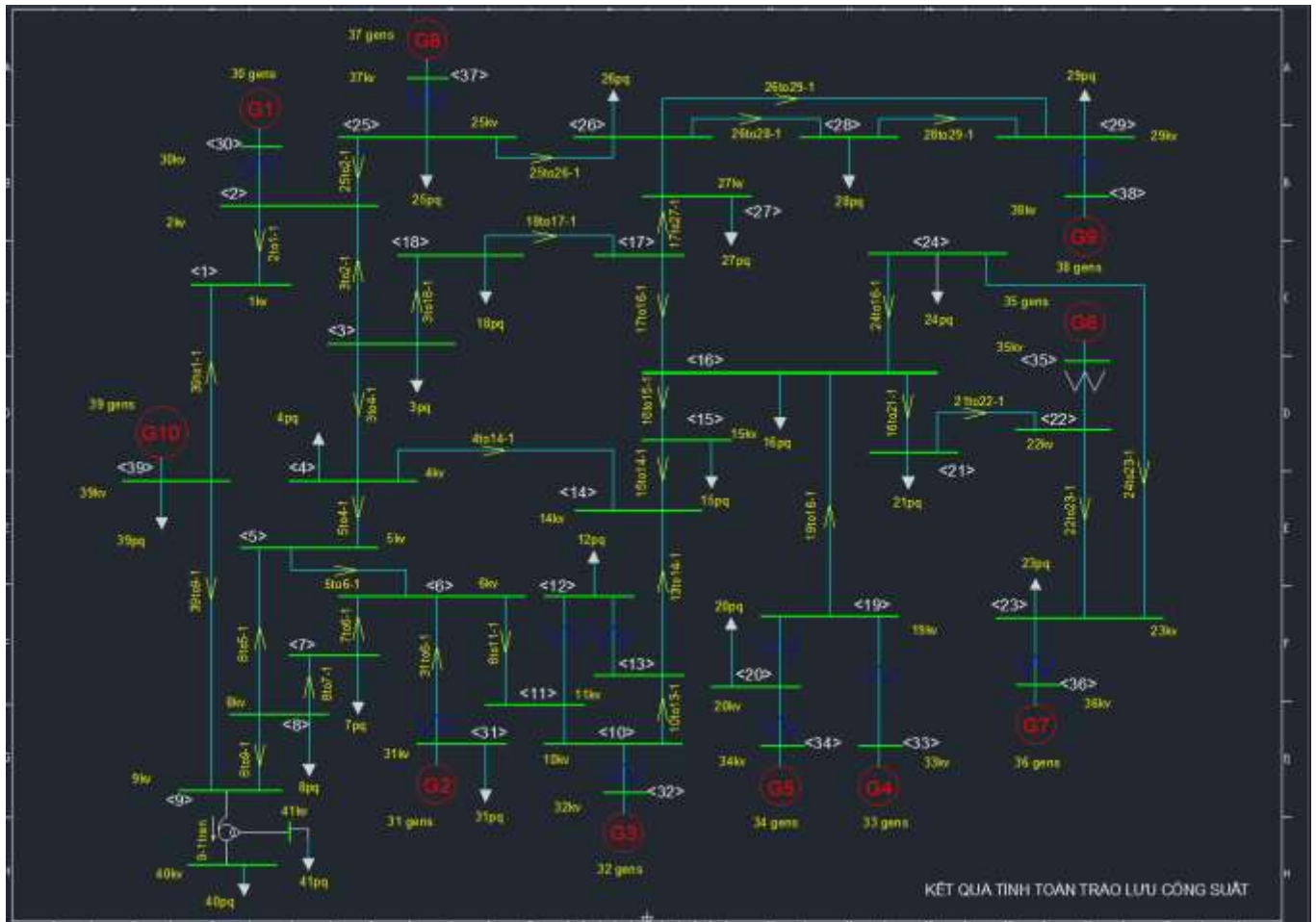
Hệ thống IEEE 39-BUS là một mô hình mạng lưới điện chuẩn được công nhận rộng rãi và sử dụng rộng rãi trong phân tích và nghiên cứu hệ thống điện. Hệ thống này mô phỏng một phần của mạng lưới điện truyền tải ở khu vực New England của Hoa Kỳ. Mô hình này đóng vai trò là một trường hợp thử nghiệm chuẩn của IEEE, cho phép các nhà nghiên cứu và kỹ sư mô hình hóa và phân tích mạng lưới điện 39-BUS ba pha. Các hệ thống BUS IEEE nói chung được các nhà nghiên cứu sử dụng để triển khai các ý tưởng và khái niệm mới trong lĩnh vực hệ thống điện.

Hệ thống IEEE 39-BUS mô phỏng một mạng lưới điện gồm 39 thanh cái (busbar), 10 máy phát điện, 12 máy biến áp và 34 đường dây truyền tải. Thông thường, hệ thống bao gồm 19 tải.

Hệ thống này được sử dụng rộng rãi như một chuẩn mực để các nhà nghiên cứu kiểm tra và đánh giá các ý tưởng và khái niệm mới trong lĩnh vực hệ thống điện. Đóng vai trò là một trường hợp thử nghiệm tiêu chuẩn cho việc nghiên cứu các biện pháp kiểm soát ổn định và các phân tích khác liên quan đến hệ thống điện. Một điểm quan trọng cần lưu ý là máy phát điện số 1 trong mô hình này đại diện cho sự tổng hợp của một số lượng lớn các máy phát điện thực tế.

Bảng 3.1: Các thành phần chính của Hệ thống IEEE 39-BUS

Thành phần	Số lượng
Thanh cái (BUS)	39
Máy phát điện	10
Máy biến áp	12
Đường dây truyền tải	34
Phụ tải	21



Hình 3.1: Lưới điện IEEE 39-BUS

3.2.2. Thông số lưới điện

Bảng 3.2: Thông số máy phát

Bus Name	VSched (pu)	PGen (MW)	PMax (MW)	PMin (MW)	QGen (Mvar)	QMax (Mvar)	QMin (Mvar)	R Source (pu)
GEN 1	1.0475	240	300	0	172.1312	300	0	0
GEN 2	0.982	428	535	0	244.5652	300	0	0
GEN 3	0.9831	496	620	0	226.6075	300	0	0
GEN 4	0.9972	404.6	500	0	122.9239	300	0	0
GEN 5	1.0123	284.2	400	0	171.7913	300	0	0
GEN 6	1.0493	364	520	0	228.0776	300	0	0
GEN 7	1.0635	336	448	0	111.1199	300	0	0

GEN 8	1.0278	409.64	532	0	25.5121	300	0	0
GEN 9	1.0265	665.28	864	0	-32.3763	300	0	0
GEN 10	1.03	781	1100	0	142.3618	300	0	0

Bảng 3.3: Thông số phụ tải

BUS	Bus Name	In Service	Pload (MW)	Qload (Mvar)
3	BUS 3	1	241.5	2.4
4	BUS 4	1	375	184
7	BUS 7	1	175.35	84
8	BUS 8	1	391.5	176
12	BUS 12	1	5.625	88
15	BUS 15	1	240	153
16	BUS 16	1	246.75	32.3
18	BUS 18	1	118.5	30
20	BUS 20	1	471	103
21	BUS 21	1	205.5	115
23	BUS 23	1	185.625	84.6
24	BUS 24	1	231.45	-92
25	BUS 25	1	168	47.2
26	BUS 26	1	104.25	17
27	BUS 27	1	210.75	75.5
28	BUS 28	1	154.5	27.6
29	BUS 29	1	212.625	26.9
31	GEN 2	1	6.9	4.6
39	GEN 10	1	828	250
40	BUS 40	1	82.5	25
41	BUS 41	1	26.25	7

(BUS 40 và BUS 41 được bổ sung nhằm miêu tả MBA 3 cuộn dây)

Bảng 3.4: Thông số đường dây

From Bus Name	To Bus Name	Line R (pu)	Line X (pu)	Charging B (pu)	In Service	Rate A	Rate B	Rate C
BUS 1	BUS 2	0.0035	0.0411	0.6987	1	350	380	400
BUS 1	GEN 10	0.001	0.025	0.75	1	350	380	400
BUS 2	BUS 3	0.0013	0.0151	0.2572	1	550	580	600
BUS 2	BUS 25	0.007	0.0086	0.146	1	400	450	500
BUS 3	BUS 4	0.0013	0.0213	0.2214	1	400	450	500
BUS 3	BUS 18	0.0011	0.0133	0.2138	1	350	380	400
BUS 4	BUS 5	0.0008	0.0128	0.1342	1	350	380	400
BUS 4	BUS 14	0.0008	0.0129	0.1382	1	350	380	400
BUS 5	BUS 6	0.0002	0.0026	0.0434	1	550	600	650
BUS 5	BUS 8	0.0008	0.0112	0.1476	1	450	480	500
BUS 6	BUS 7	0.0006	0.0092	0.113	1	500	550	600
BUS 6	BUS 11	0.0007	0.0082	0.1389	1	400	450	500
BUS 7	BUS 8	0.0004	0.0046	0.078	1	350	380	400
BUS 8	BUS 9	0.0023	0.0363	0.3804	1	350	380	400
BUS 9	GEN 10	0.001	0.025	1.2	1	400	450	500
BUS 10	BUS 11	0.0004	0.0043	0.0729	1	400	450	500
BUS 10	BUS 13	0.0004	0.0043	0.0729	1	350	380	400
BUS 13	BUS 14	0.0009	0.0101	0.1723	1	400	450	480
BUS 14	BUS 15	0.0018	0.0217	0.366	1	400	450	400
BUS 15	BUS 16	0.0009	0.0094	0.171	1	580	660	650
BUS 16	BUS 17	0.0007	0.0089	0.1342	1	500	550	600
BUS 16	BUS 19	0.0016	0.0195	0.304	1	600	650	700
BUS 16	BUS 21	0.0008	0.0235	0.2548	1	400	450	450
BUS 16	BUS 24	0.0003	0.0059	0.068	1	400	450	400
BUS 17	BUS 18	0.0007	0.0082	0.1319	1	400	450	500
BUS 17	BUS 27	0.0013	0.0173	0.3216	1	400	450	450
BUS 21	BUS 22	0.0008	0.014	0.2565	1	650	680	700
BUS 22	BUS 23	0.0006	0.0096	0.1846	1	350	380	400
BUS 23	BUS 24	0.0022	0.035	0.361	1	450	500	550
BUS 25	BUS 26	0.0032	0.0323	0.513	1	450	500	500
BUS 26	BUS 27	0.0014	0.0147	0.2396	1	500	550	600
BUS 26	BUS 28	0.0043	0.0474	0.7802	1	350	380	400
BUS 26	BUS 29	0.0057	0.0625	1.029	1	350	400	450
BUS 28	BUS 29	0.0014	0.0151	0.249	1	480	530	550

Bảng 3.5: Thông số các nút

Bus	Bus Name	Base kV	Area Num	Code	Voltage (pu)	Angle (deg)	Vmax (pu)	Vmin (pu)
1	BUS 1	345	1	1	1.0448	-12.52	1.1	0.9
2	BUS 2	345	1	1	1.0441	-8.98	1.1	0.9
3	BUS 3	345	1	1	1.0243	-11.59	1.1	0.9
4	BUS 4	345	2	1	0.9978	-12.29	1.1	0.9
5	BUS 5	345	2	1	0.999	-11.12	1.1	0.9
6	BUS 6	345	2	1	1.0016	-10.34	1.1	0.9
7	BUS 7	345	2	1	0.99	-12.84	1.1	0.9
8	BUS 8	345	2	1	0.9887	-13.48	1.1	0.9
9	BUS 9	345	2	1	1.018	-15.41	1.1	0.9
10	BUS 10	345	2	1	1.0125	-7.91	1.1	0.9
11	BUS 11	345	2	1	1.008	-8.74	1.1	0.9
12	BUS 12	138	2	1	0.9889	-8.73	1.1	0.9
13	BUS 13	345	2	1	1.0089	-8.62	1.1	0.9
14	BUS 14	345	2	1	1.006	-10.29	1.1	0.9
15	BUS 15	345	2	1	1.0098	-10.53	1.1	0.9
16	BUS 16	345	1	1	1.0264	-9.04	1.1	0.9
17	BUS 17	345	1	1	1.0256	-10.21	1.1	0.9
18	BUS 18	345	1	1	1.0238	-11.17	1.1	0.9
19	BUS 19	345	1	1	1.0479	-3.85	1.1	0.9
20	BUS 20	230	1	1	0.9901	-4.85	1.1	0.9
21	BUS 21	345	1	1	1.0277	-5.3	1.1	0.9
22	BUS 22	345	1	1	1.0476	-1.11	1.1	0.9
23	BUS 23	345	1	1	1.0423	-1.5	1.1	0.9
24	BUS 24	345	1	1	1.0321	-8.79	1.1	0.9
25	BUS 25	345	1	1	1.0518	-7.47	1.1	0.9
26	BUS 26	345	1	1	1.0327	-8.46	1.1	0.9
27	BUS 27	345	1	1	1.0235	-10.46	1.1	0.9
28	BUS 28	345	1	1	1.0132	-4.69	1.1	0.9
29	BUS 29	345	1	1	1.0082	-1.69	1.1	0.9
30	GEN 1	16.5	1	2	1.0475	-6.55	1.1	0.9
31	GEN 2	16.5	2	3	0.982	0	1.1	0.9
32	GEN 3	16.5	2	2	0.9831	0.12	1.1	0.9

33	GEN 4	16.5	1	2	0.9972	1.37	1.1	0.9
34	GEN 5	16.5	1	2	1.0123	0.35	1.1	0.9
35	GEN 6	16.5	1	2	1.0493	3.86	1.1	0.9
36	GEN 7	16.5	1	2	1.0635	6.36	1.1	0.9
37	GEN 8	16.5	1	2	1.0278	-0.66	1.1	0.9
38	GEN 9	16.5	1	2	1.0265	5.69	1.1	0.9
39	GEN 10	345	1	2	1.03	-14.64	1.1	0.9
40	BUS 40	123	1	1	1.0076	-17.7	1.1	0.9
41	BUS 41	35	1	1	1.0039	-18.76	1.1	0.9

Bảng 3.6: Thông số máy biến áp

From Bus	To Bus	Name	Tap Positions	Winding I/O Code	Impedance I/O Code	Admittance I/O Code	Specified R (pu or watts)	Specified X (pu)
BUS 2	GEN 1	MBA1	33	Turns ratio (pu on bus base kV)	Zpu (system base)	Y pu (system base)	0	0.0181
BUS 6	GEN 2	MBA2	33	Turns ratio (pu on bus base kV)	Zpu (system base)	Y pu (system base)	0	0.025
BUS 10	GEN 3	MBA3	33	Turns ratio (pu on bus base kV)	Zpu (system base)	Y pu (system base)	0	0.02
BUS 11	BUS 12	MBA4	33	Turns ratio (pu on bus base kV)	Zpu (system base)	Y pu (system base)	0.0016	0.0435
BUS 12	BUS 13	MBA5	33	Turns ratio (pu on bus base kV)	Zpu (system base)	Y pu (system base)	0.0016	0.0435
BUS 19	BUS 20	MBA6	33	Turns ratio (pu on bus base kV)	Zpu (system base)	Y pu (system base)	0.0007	0.0138

BUS 19	GEN 4	MBA7	33	Turns ratio (pu on bus base kV)	Zpu (system base)	Y pu (system base)	0.0007	0.0142
BUS 20	GEN 5	MBA8	33	Turns ratio (pu on bus base kV)	Zpu (system base)	Y pu (system base)	0.0009	0.018
BUS 22	GEN 6	MBA9	33	Turns ratio (pu on bus base kV)	Zpu (system base)	Y pu (system base)	0	0.0143
BUS 23	GEN 7	MBA10	33	Turns ratio (pu on bus base kV)	Zpu (system base)	Y pu (system base)	0.0005	0.0272
BUS 25	GEN 8	MBA11	33	Turns ratio (pu on bus base kV)	Zpu (system base)	Y pu (system base)	0.0006	0.0232
BUS 29	GEN 9	MBA12	33	Turns ratio (pu on bus base kV)	Zpu (system base)	Y pu (system base)	0.0008	0.0156

Bảng 3.7: Thông số máy biến áp 3 cuộn dây

From Bus	To Bus	Last Bus	Name	W1-2 R (pu or watts)	W1-2 X (pu)	W2-3 R (pu or watts)	W2-3 X (pu)	W3-1 R (pu or watts)
BUS 9	BUS 40	BUS 41	AT1	0.000310	0.027780	0.000110	0.044440	0.000110

- Các thông số của nút (được thể hiện ở Sheet Bus): Trong đó thể hiện đầy đủ các thông tin về nút cần mô phỏng như: Tên, điện áp, góc pha của từng nút, dung dẫn...
- Các thông số của đường dây (được thể hiện ở Sheet Branch): Giá trị điện trở, điện kháng, dung dẫn, chiều dài...
- Các thông số của máy phát (Plant, Machine): Công suất phát hiện tại và giới hạn công suất phát của máy phát (lớn nhất và nhỏ nhất của công suất tác dụng và công suất phản kháng), điện trở và điện kháng của máy phát; Điện áp đầu cực cần điều chỉnh...
- Các thông số của phụ tải (Load): Công suất tác dụng và công suất phản kháng của phụ tải...

- Các thông số máy biến áp 2 cuộn dây (2 Winding): Điện trở và điện kháng cuộn dây, hệ số điều chỉnh điện áp và công suất đặt của máy biến áp.
- Các thông số máy biến áp ba cuộn dây (3 Winding): Điện trở, điện kháng giữa các cuộn dây, điện áp định mức của mỗi cuộn, hệ số điều chỉnh.

3.2.3. Bài toán phân bố công suất

Phân bố công suất là bài toán quan trọng trong quy hoạch, thiết kế phát triển Hệ thống điện, qua đó xác định chế độ vận hành tốt nhất của Hệ thống điện.

Trong PSS/E, hệ thống điện được mô hình hóa dưới dạng:

- Các nút (BUS): nơi nối tải, nguồn, thiết bị bù, ...
- Các phần tử liên kết (branches): đường dây, máy biến áp, thiết bị điều khiển, ...
- Các thành phần nguồn/tải: mô hình máy phát (PV bus), tải (PQ bus), BUS Slack...

Phần mềm cho phép xây dựng sơ đồ một cách chi tiết, nhập dữ liệu về trở kháng, công suất định mức, ràng buộc vận hành và cấu hình vận hành hệ thống.

Bảng 3.8: Các loại nút trong Hệ thống điện

Nút	Công suất thực (P)	Công suất phản kháng (Q)	Biên độ điện áp	Góc điện áp
Nút cân bằng (Slack)	Biến thiên	Biến thiên	Hằng số	Hằng số
Nút máy phát (Generator, PU)	Hằng số	Biến thiên	Hằng số	Biến thiên
Tải (PQ)	Hằng số	Hằng số	Biến thiên	Biến thiên

Sử dụng phương pháp Newton–Raphson được xem là lựa chọn tối ưu để giải bài toán phân bố công suất (load flow) trong các hệ thống điện khi sử dụng phần mềm vì Newton Raphson có tốc độ hội tụ bậc hai, nghĩa là sai số giảm rất nhanh sau mỗi bước lặp. Nếu so với các phương pháp như Gauss Seidel (hội tụ tuyến tính), Newton Raphson thường cần ít lần lặp hơn, nhất là trong hệ thống lớn và phức tạp. Phương pháp này đạt được độ chính xác cao bằng cách tuyến tính hóa gần đúng hệ tại mỗi bước lặp. Tuy nhiên khi sử dụng phương pháp này cần có điều kiện khởi tạo tốt vì sẽ rất khó hội tụ nếu giá trị ban đầu quá xa so với nghiệm thật, điều này có thể khắc phục bằng cách thay đổi các điểm khởi tạo hợp lý.

Sau khi thực hiện phân tích bài toán Load flow, PSS/E sẽ cung cấp những kết quả chi tiết như điện áp (biên độ, góc) tại các nút, dòng điện, tổn thất công suất trên từng phần tử, tình trạng quá tải đường dây, khả năng đáp ứng của máy phát và thiết bị điều chỉnh điện áp.

Kết quả sẽ được xuất ra dưới dạng báo cáo dạng *.out hoặc tích hợp với script Python để trích xuất dữ liệu tự động phục vụ phân tích hoặc trực quan hóa.

Cấu trúc mã Python chạy Load Flow trong PSS/E

```
import os, sys
import redirect
import psspy

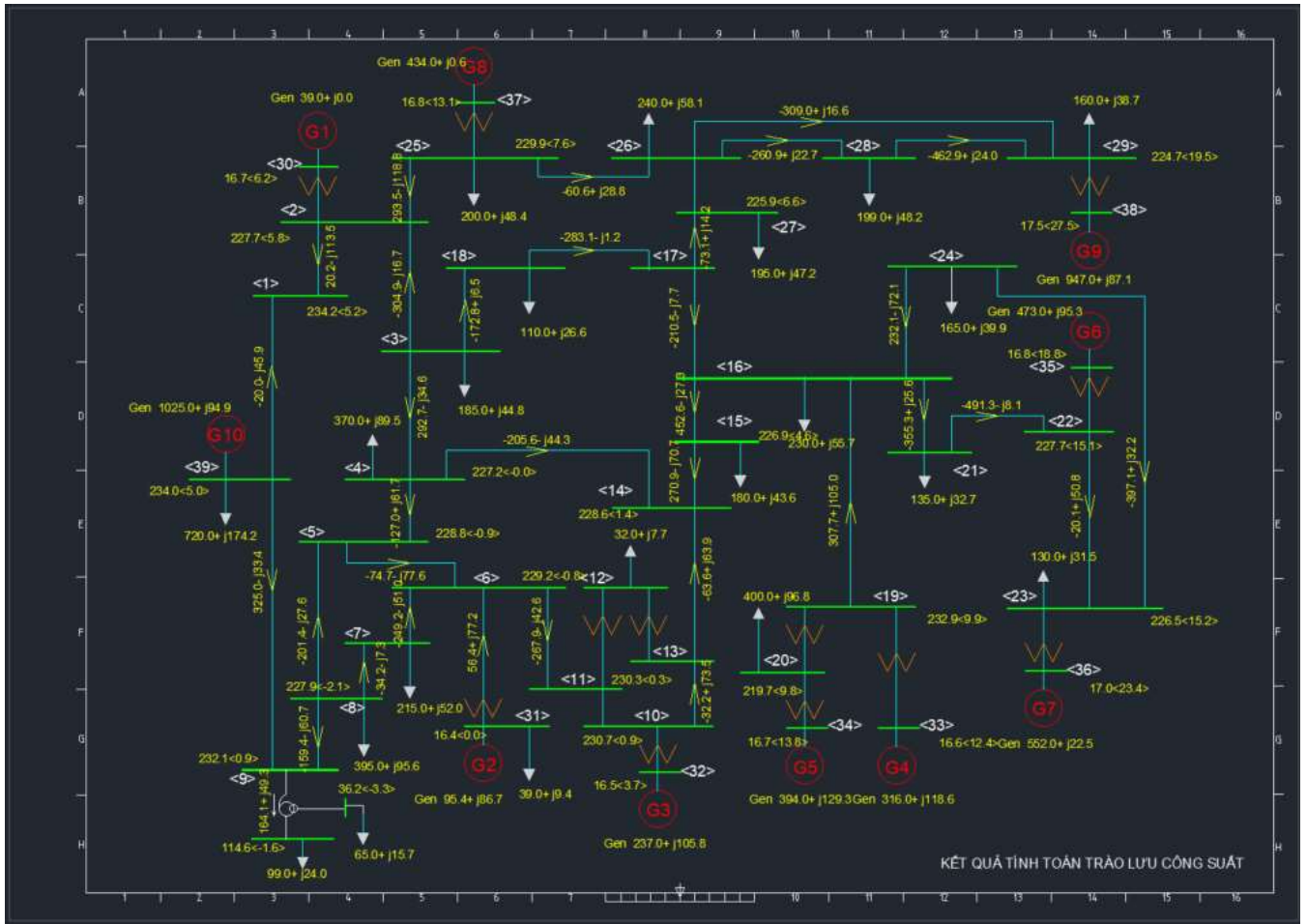
redirect.psse2py()

# Load case
psspy.case(r"C:\psse33\projects\sample_case.sav")

# Run load flow
ierr = psspy.fns1([0, 0, 0, 1, 1, 0, 99, 0])
if ierr == 0:
    print("Load flow completed successfully.")
else:
    print("Error in load flow. Code:", ierr)
```

Bảng 3.9: Chi tiết các bước script Load Flow

Lệnh	Chức năng
psspy.case()	Tải sơ đồ lưới từ file .sav (PSS®E saved case)
psspy.fns1()	Giải bài toán load flow theo cấu hình hiện tại



Hình 3.2: Kết quả tính trào lưu công suất trên lưới điện

3.3. Điểm kết nối

Nhà máy điện ảo (VPP) có thể được tích hợp vào hệ thống điện bằng cách vận hành như một nguồn phát điện hợp nhất, kết nối tại một điểm đấu nối chung (PCC). VPP là một hệ thống tổng hợp các nguồn năng lượng phân tán bao gồm: điện gió, hệ thống lưu trữ năng lượng và các tải có thể điều khiển được (demand response), được điều phối và quản lý tập trung thông qua nền tảng điều khiển thông minh.

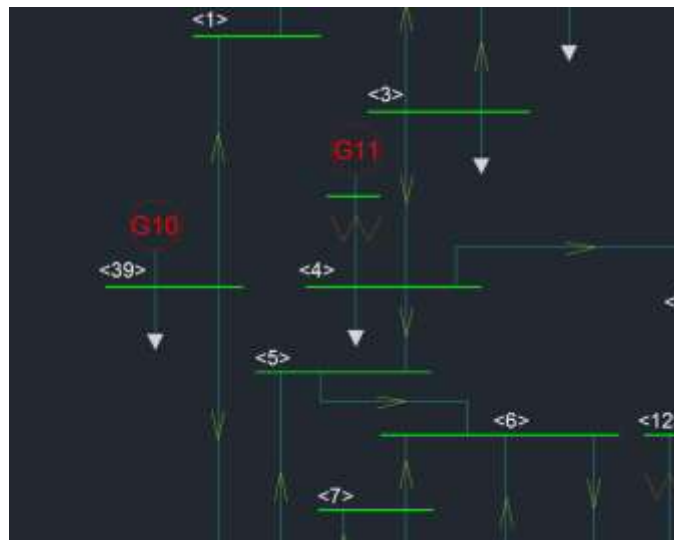
Việc kết nối VPP theo mô hình hợp nhất này mang lại nhiều lợi ích kỹ thuật, bao gồm: đơn giản hóa công tác điều độ, tăng cường độ tin cậy vận hành, giảm tổn thất truyền tải, và đặc biệt là hỗ trợ hiệu quả cho việc tích hợp năng lượng tái tạo vào lưới điện.

Để đảm bảo vận hành ổn định và đồng bộ với lưới điện, VPP cần tuân thủ các yêu cầu kỹ thuật tại điểm PCC như: đồng bộ tần số và điện áp, đáp ứng các chỉ tiêu chất lượng điện năng, và khả năng cung cấp công suất tác dụng và phản kháng theo yêu cầu của lưới. Ngoài

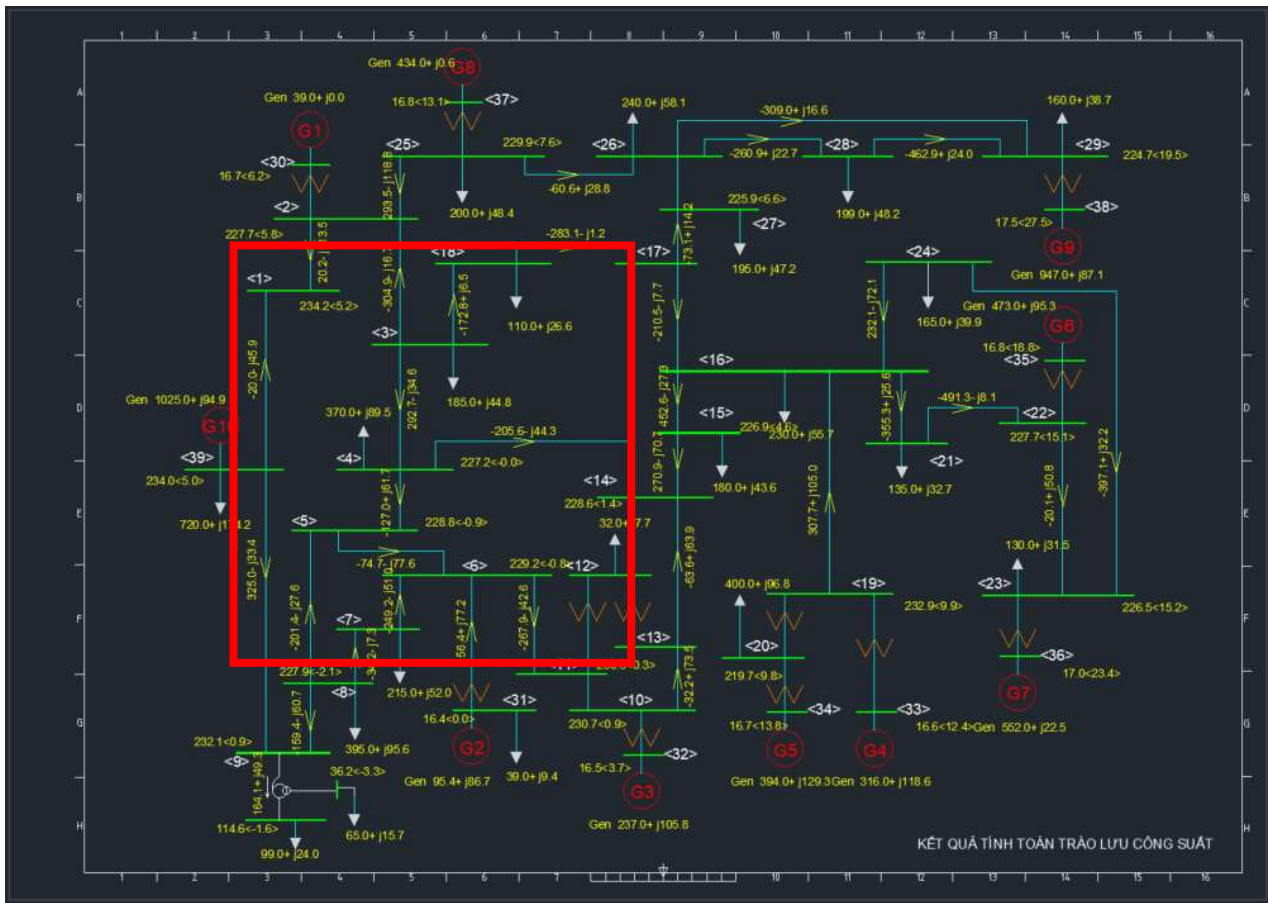
ra, hệ thống cần tích hợp các thuật toán điều khiển và tối ưu hóa thời gian thực, nhằm khai thác linh hoạt các nguồn năng lượng phân tán trong điều kiện vận hành thay đổi.

Những lưu ý kỹ thuật khi lựa chọn PCC:

- Khả năng tiếp nhận công suất: PCC phải có khả năng tiếp nhận công suất tối đa mà VPP có thể phát ra mà không gây ra hiện tượng quá tải đường dây, quá điện áp, hoặc làm suy giảm chất lượng điện năng.
- Khả năng điều khiển và bảo vệ: Vị trí PCC phải đảm bảo dễ dàng tích hợp các thiết bị bảo vệ, có thể đo đếm và giám sát từ trung tâm điều độ. Nếu cần thiết, phải có khả năng cô lập nhanh chóng khi có sự cố.
- Khoảng cách đến phụ tải hoặc điểm giao nhận: Nên ưu tiên các PCC gần trung tâm phụ tải hoặc tại các tuyến đường dây đã có sẵn hạ tầng kỹ thuật, giúp giảm tổn thất công suất và chi phí đầu tư.
- Tương thích với cấu trúc lưới: PCC cần được lựa chọn phù hợp với cấp điện áp quy định theo yêu cầu (thường là trung hoặc cao thế) và không làm ảnh hưởng đến cấu trúc phân phối điện hiện hữu.



Hình 3.3: Điểm đầu nối VPP (G11) trên lưới điện



Hình 3.4: Khu vực dễ bị ảnh hưởng trên lưới điện

3.4. Giao thức kết nối

Mục tiêu của việc liên kết mô hình Nhà máy điện ảo (VPP) xây dựng trong môi trường MATLAB/Simulink với hệ thống lưới điện mô phỏng trên phần mềm PSS/E thông qua một script Python là nhằm thiết lập một nền tảng đồng mô phỏng (co-simulation) có khả năng vận hành thời gian thực. Việc tích hợp này cho phép hai môi trường mô phỏng khi một bên tập trung vào điều khiển năng lượng phân tán (VPP), bên còn lại là mô hình phân tích và tính toán công suất của hệ thống điện (PSS/E) có thể trao đổi dữ liệu, tương tác và phản hồi theo thời gian thực thông qua giao tiếp hai chiều.

Python đóng vai trò cầu nối trung gian, thực hiện các tác vụ như truy xuất dữ liệu từ PSS/E (ví dụ: giá trị công suất, dòng điện, điện áp tại các BUS), truyền dữ liệu đầu vào đến mô hình điều khiển trong MATLAB/Simulink, sau đó gửi lại tín hiệu điều khiển từ VPP để tác động đến mô hình lưới điện. Cách tiếp cận này cho phép nghiên cứu khả năng phản ứng

động của VPP đối với các tình huống trong lưới điện như quá tải, sự cố N-1, hoặc dao động công suất từ nguồn năng lượng tái tạo.

Thông qua cấu trúc mô phỏng phân tán này, nghiên cứu có thể đánh giá hiệu quả của các chiến lược điều khiển linh hoạt, tăng cường khả năng ổn định và tối ưu hóa vận hành hệ thống điện. Đồng thời, việc sử dụng Python với hệ sinh thái mạnh trong xử lý dữ liệu và tự động hóa giúp tăng khả năng mở rộng mô hình, tích hợp các thuật toán học máy, tối ưu hóa hoặc dự báo nâng cao, phù hợp với định hướng phát triển hệ thống điện hiện đại, thông minh và linh hoạt hơn.

Script Python kết nối đồng bộ:

```
import psse33 # Chạy PSS/E 33
import psspy
import numpy as np

# Đọc dữ liệu từ file CSV
data = np.loadtxt("output_data.csv", delimiter=",")

# Giả sử cần thay đổi giá trị tải tại BUS 4 theo dữ liệu từ
MATLAB
time_series = data[:, 0] # Cột thời gian
load_values = data[:, 1] # Công suất tải từ Simulink

for t, load in zip(time_series, load_values):
    psspy.load_data_3(4, realar1=load) # Cập nhật công suất
tải

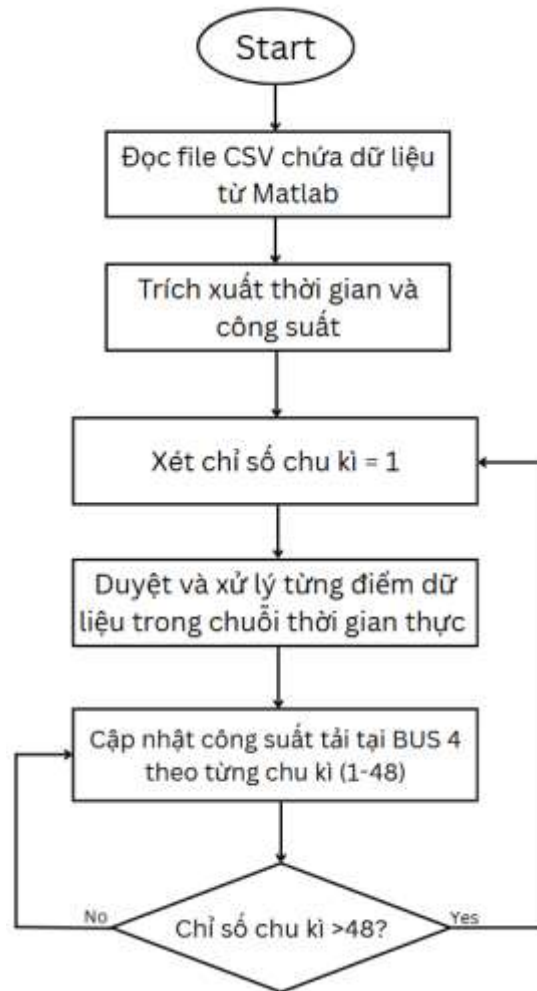
print("Dữ liệu từ MATLAB đã được nhập vào PSS/E")
```

Công suất phát của nhà máy GEN11 trong mô hình PSS/E được điều khiển dựa trên đầu ra từ mô hình Nhà máy điện ảo (VPP) được xây dựng trong MATLAB. Cụ thể, các giá trị công suất tính toán từ mô hình VPP sẽ được xuất ra dưới dạng tệp dữ liệu (.csv hoặc .xlsx), sau đó được Python xử lý và truyền vào PSS/E để cập nhật giá trị công suất tương ứng cho máy phát GEN11. Cơ chế này cho phép hệ thống điều khiển vận hành linh hoạt và tự động hóa, đảm bảo sự tương tác thời gian thực giữa mô hình điều khiển phân tán và mô

hình hệ thống điện truyền thống. Qua đó, khả năng phản ứng và điều độ công suất của VPP được thể hiện rõ ràng trong bối cảnh vận hành thực tế của lưới điện.

Dưới đây là phân tích chi tiết từng bước của quá trình điều khiển:

- **Bắt đầu (Start):** Thuật toán khởi động, chuẩn bị cho quá trình xử lý dữ liệu.
- **Đọc file CSV chứa dữ liệu từ Matlab:** Thuật toán bắt đầu bằng việc đọc file CSV chứa dữ liệu của hệ thống điện, được tạo ra từ phần mềm Matlab. File CSV này có thể bao gồm các thông số như công suất, điện áp, dòng điện, hoặc các thông số khác của hệ thống điện.
- **Trích xuất thông tin và công suất:** Sau khi đọc file, thuật toán trích xuất các thông tin cần thiết (ví dụ: công suất phát, công suất tiêu thụ, thông số thanh cái) và công suất tại các điểm trong hệ thống điện. Đây là bước chuẩn bị dữ liệu để phân tích.
- **Xét chỉ số chu kỳ = 1:** Bước này khởi tạo chỉ số chu kỳ ban đầu, được đặt bằng 1. Chỉ số này đóng vai trò như một con trỏ để lần lượt duyệt qua từng điểm dữ liệu từ chu kỳ 1 đến chu kỳ 48. Sau mỗi vòng lặp, chỉ số này sẽ được tăng lên 1 đơn vị.
- **Duyệt và xử lý từng điểm dữ liệu trong chuỗi thời gian thực:** Thuật toán duyệt qua từng điểm dữ liệu trong chuỗi thời gian thực (real-time data). Điều này có nghĩa là dữ liệu được xử lý theo thời gian, ví dụ: công suất tại từng thời điểm trong ngày hoặc trong một khoảng thời gian nhất định.
- **Cập nhật công suất tải tại BUS 4 theo từng chu kỳ (1-48):** Tại bước này, chương trình sử dụng hàm API `psspy.load_data_3(4, realar1=load)` của PSSE để cập nhật công suất thực vào BUS số 4. Việc cập nhật được thực hiện đúng theo chu kỳ tương ứng, bảo đảm dữ liệu được đồng bộ hoá giữa MATLAB và mô hình PSSE theo thời gian thực.
- **Chỉ số chu kỳ > 48?:** Sau khi cập nhật công suất cho một chu kỳ, chương trình sẽ kiểm tra xem chu kỳ hiện tại đã vượt quá 48 hay chưa. Nếu chưa, hệ thống quay lại bước "Xét chỉ số chu kỳ = 1" để lặp lại quá trình. Nếu đã vượt quá chu kỳ 48, hệ thống sẽ thiết lập lại chỉ số chu kỳ về 1, từ đó tạo thành một vòng lặp vận hành liên tục. Điều này cho phép mô phỏng quá trình điều độ thời gian thực không ngắt quãng trong mô hình VPP.



Hình 3.5: Lưu đồ trao đổi dữ liệu của VPP và lưới điện

3.5. Xây dựng quy trình tạo tập tin snapshot từ dữ liệu thời gian thực trên PSS/E

3.5.1. Mục đích

Quy trình ứng dụng Python kết hợp với phần mềm PSS/E để xây dựng các tập tin snapshot (định dạng .sav) đại diện cho trạng thái vận hành của hệ thống điện theo từng khoảng thời gian trong ngày. Cụ thể, một ngày được chia thành 48 chu kỳ, mỗi chu kỳ tương ứng với 30 phút. Tại mỗi thời điểm, dữ liệu tại công suất tiêu thụ của phụ tải và công suất phát của nguồn được cập nhật từ dữ liệu thời gian thực, sau đó hệ thống được lưu thành một file trạng thái riêng biệt. Mục tiêu chính là xây dựng một tập hợp các file snapshot giúp mô phỏng, giám sát và đánh giá hiệu suất vận hành hệ thống điện trong các điều kiện thời gian thực khác nhau. Những file này sẽ được sử dụng để đồng bộ và làm đầu vào cho mô hình VPP (Virtual Power Plant) được xây dựng trong MATLAB/Simulink, từ đó phục vụ cho

các nghiên cứu và thử nghiệm chiến lược điều độ, điều khiển phân tán, và tối ưu vận hành hệ thống tích hợp nguồn năng lượng tái tạo.

3.5.2. Dữ liệu sử dụng

- File hệ thống điện gốc: 39nut.sav
- Dữ liệu thời gian thực: daily_profile.csv
- Phần mềm: PSSE + Python (thư viện psspy)

3.5.3. Cấu trúc dữ liệu

- File daily_profile.csv có dữ liệu ban đầu:

Bảng 3.10: Dữ liệu tải ban đầu

BUS_id	P_load (MW)	Q_load (Mvar)
3	241.5	2.4000
4	375	184.0000
7	175.35	84.0000
8	391.5	176.0000
12	5.625	88.0000
15	240	153.0000
16	246.75	32.3000
18	118.5	30.0000
20	471	103.0000
21	205.5	115.0000
23	185.625	84.6000
24	231.45	-92.0000
25	168	47.2000
26	104.25	17.0000
27	210.75	75.5000
28	154.5	27.6000
29	212.625	26.9000
31	6.9	4.6000
39	828	250.0000
40	82.5	25.0000

41	26.25	7.0000
Tổng	4681.575	1441.1

Bảng 3.11: Dữ liệu nguồn phát ban đầu

Gen_id	P_max (MW)	P_Gen (MW)	Q_Gen (Mvar)
1	300	240	172.1312
2	535	428	244.5652
3	620	496	226.6075
4	500	404.6	122.9239
5	400	284.2	171.7913
6	520	364	228.0776
7	448	336	111.1199
8	532	409.64	25.5121
9	864	665.28	-32.3763
10	1100	781	142.3618
Tổng	5831	4408.72	1412.7142

3.5.4. Quy trình thực hiện

Quy trình tạo các file snapshot bắt đầu bằng việc khởi tạo môi trường PSSE thông qua giao diện lập trình Python. Dữ liệu đầu vào được đọc từ file `daily_profile.csv` và tổ chức thành một cấu trúc DataFrame để dễ dàng truy xuất theo từng chu kỳ thời gian. Với mỗi chu kỳ kéo dài 30 phút (tổng cộng 48 chu kỳ trong một ngày), hệ thống sẽ tải lại trạng thái ban đầu từ file `39nut.sav`. Sau đó, các thông số vận hành như công suất tải (P, Q) và phát (P, Q) sẽ được cập nhật theo dữ liệu tương ứng tại chu kỳ đó. Khi quá trình cập nhật hoàn tất, trạng thái hệ thống được lưu thành một file snapshot có tên tương ứng với số chu kỳ, ví dụ: `snapshot_00.sav`, `snapshot_01.sav`, ..., `snapshot_47.sav`.

Đoạn mã dưới đây thể hiện quá trình lặp qua các chu kỳ để đọc dữ liệu, cập nhật hệ thống và lưu file snapshot tương ứng:

Đoạn mã thể hiện quá trình lặp

```
for cycle in range(48):
    psspy.case("39nut.sav")           # Mở lại file hệ thống
    update_network_data(cycle, df_data) # Cập nhật dữ liệu
    psspy.save(f"snapshot_{cycle:02d}.sav") # Lưu snapshot chu kì
```

Trong đó, hàm `update_network_data` sẽ chịu trách nhiệm đọc các hàng dữ liệu thuộc chu kỳ `cycle` và gửi lệnh cập nhật các thông số tương ứng trên hệ thống PSSE.

```
import os
import pandas as pd
import psspy
import redirect

base_case = r"C:\psse_project\39nut.sav"
csv_path = r"C:\psse_project\daily_profile.csv"
output_dir = r"C:\psse_snapshots"

if not os.path.exists(output_dir):
    os.makedirs(output_dir)

psspy.psseinit(10000)
redirect.psse2py()

df_data = pd.read_csv(csv_path)

def update_network_data(cycle_num, df):
    df_cycle = df[df['cycle'] == cycle_num]

    for _, row in df_cycle.iterrows():
        bus = int(row['bus_id'])

        # Cập nhật phụ tải nếu có
        if not pd.isna(row['load_p']) and not pd.isna(row['load_q']):
            ierr = psspy.load_chng_4(bus, [0, 0, 0, 0], [], [row['load_p'],
row['load_q'], 0.0, 0.0])
            if ierr != 0:
                print(f"[!] Lỗi cập nhật phụ tải tại bus {bus} - chu kỳ
{cycle_num}")
```

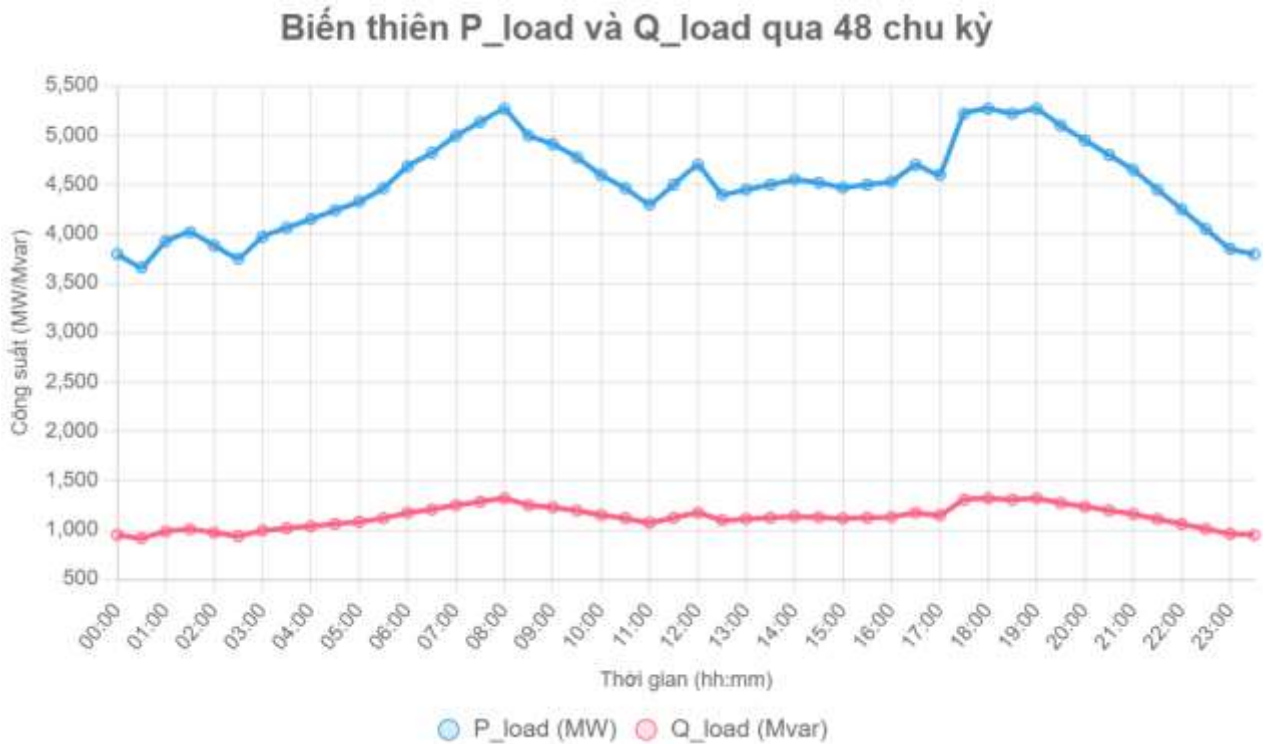
```
# Cập nhật phát điện nếu có
if not pd.isna(row['gen_id']) and not pd.isna(row['gen_p']):
    gen_id = str(row['gen_id']).strip()
    ierr = psspy.machine_chng_2(bus, gen_id, [0, 0, 0, 0, 0, 0],
                                [row['gen_p'], row['gen_q'], 0.0,
9999.0, 1.0, 0.0])
    if ierr != 0:
        print(f"[!] Lỗi cập nhật máy phát tại bus {bus}, id {gen_id}
- chu kỳ {cycle_num}")

for cycle in range(48):
    print(f"\n--- Chu kỳ {cycle + 1}/48 ---")
    psspy.case(base_case)
    update_network_data(cycle, df_data)
    out_file = os.path.join(output_dir, f"snapshot_{cycle:02d}.sav")
    ierr = psspy.save(out_file)

    if ierr == 0:
        print(f"[✓] Đã lưu: {out_file}")
    else:
        print(f"[X] Lỗi khi lưu snapshot tại chu kỳ {cycle}: mã lỗi {ierr}")
```

Sau khi thực hiện đầy đủ quy trình trên, hệ thống sẽ tạo ra 48 file snapshot ở định dạng .sav, mỗi file đại diện cho một thời điểm vận hành cách nhau 30 phút. Các file này không chỉ hỗ trợ công tác giám sát, kiểm tra trạng thái hệ thống mà còn đặc biệt hữu ích trong việc kết nối và đồng bộ với mô hình VPP xây dựng trên MATLAB/Simulink. Qua đó, người nghiên cứu có thể thực hiện các phân tích kỹ thuật, đánh giá khả năng điều khiển, tối ưu hóa nguồn phân tán và nâng cao hiệu quả quản lý năng lượng trong hệ thống điện hiện đại.

Dữ liệu File daily_profile.csv sau 48 chu kỳ (24h):



Hình 3.6: Đồ thị biến thiên tải

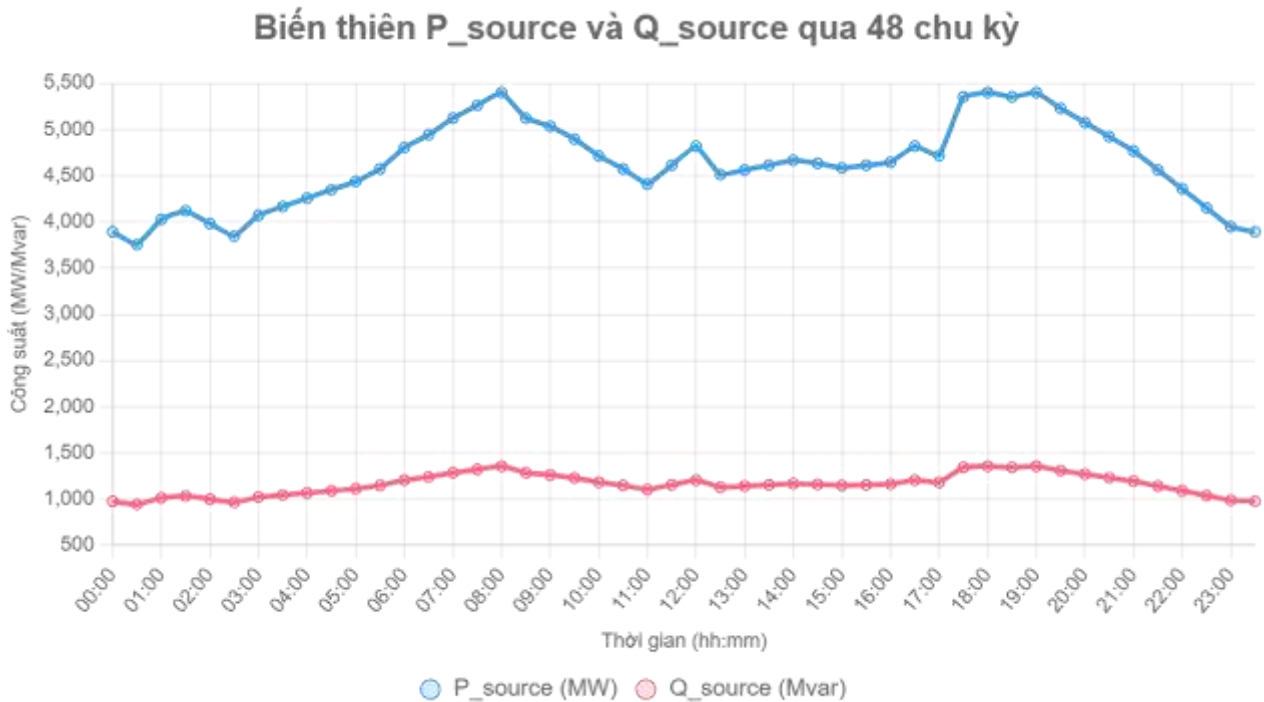
Bảng 3.12: Dữ liệu tải sau 48 chu kỳ

Cycle	Time Range	ΣP_{load} (MW)	ΣQ_{load} (MVar)
1	00:00–00:30	3796	952.213
2	00:30–01:00	3660	918.605
3	01:00–01:30	3927	986.62
4	01:30–02:00	4018	1008.225
5	02:00–02:30	3883	973.418
6	02:30–03:00	3750	939.81
7	03:00–03:30	3972	995.823
8	03:30–04:00	4063	1018.428
9	04:00–04:30	4151	1039.833
10	04:30–05:00	4240	1062.238
11	05:00–05:30	4329	1084.643
12	05:30–06:00	4464	1120.25

Đề tài: Đánh giá ảnh hưởng của nhà máy điện ảo đối với các chế độ vận hành hệ thống điện

13	06:00–06:30	4687	1175.263
14	06:30–07:00	4821	1208.87
15	07:00–07:30	4997	1252.88
16	07:30–08:00	5134	1287.288
17	08:00–08:30	5268	1321.695
18	08:30–09:00	4997	1252.88
19	09:00–09:30	4910	1230.475
20	09:30–10:00	4776	1197.868
21	10:00–10:30	4597	1152.858
22	10:30–11:00	4464	1120.25
23	11:00–11:30	4275	1096.845
24	11:30–12:00	4485	1074.44
25	12:00–12:30	4690	1062.238
26	12:30–13:00	4404	1051.834
27	13:00–13:30	4451	1039.833
28	13:30–14:00	4506	1028.623
29	14:00–14:30	4563	1018.428
30	14:30–15:00	4518	1008.225
31	15:00–15:30	4462	995.823
32	15:30–16:00	4497	986.62
33	16:00–16:30	4530	973.418
34	16:30–17:00	4722	961.815
35	17:00–17:30	4620	950.213
36	17:30–18:00	5210	1230.475
37	18:00–18:30	5264	1287.288
38	18:30–19:00	5218	1321.695
39	19:00–19:30	5267	1252.88
40	19:30–20:00	5110	1230.475
41	20:00–20:30	4976	1197.868
42	20:30–21:00	4787	1175.263
43	21:00–21:30	4647	1152.858
44	21:30–22:00	4464	1120.25

45	22:00–22:30	4206	1028.623
46	22:30–23:00	4002	995.823
47	23:00–23:30	3883	973.418
48	23:30–24:00	3796	950.213



Hình 3.7: Đồ thị biến thiên nguồn

Bảng 3.13: Dữ liệu nguồn phát sau 48 chu kỳ

Cycle	Time range	$\sum P$ (MW)	$\sum Q$ (MVar)
1	00:00–00:30	3893	974.7
2	00:30–01:00	3754	942.0
3	01:00–01:30	4028	1012.0
4	01:30–02:00	4122	1034.1
5	02:00–02:30	3983	998.4
6	02:30–03:00	3846	963.9
7	03:00–03:30	4073	1021.2
8	03:30–04:00	4167	1044.4

Đề tài: Đánh giá ảnh hưởng của nhà máy điện ảo đối với các chế độ vận hành hệ thống điện

9	04:00–04:30	4258	1066.7
10	04:30–05:00	4349	1089.0
11	05:00–05:30	4439	1111.5
12	05:30–06:00	4575	1148.2
13	06:00–06:30	4806	1205.3
14	06:30–07:00	4944	1240.0
15	07:00–07:30	5124	1284.5
16	07:30–08:00	5263	1319.9
17	08:00–08:30	5402	1355.6
18	08:30–09:00	5124	1284.5
19	09:00–09:30	5036	1261.2
20	09:30–10:00	4898	1228.5
21	10:00–10:30	4715	1181.9
22	10:30–11:00	4575	1148.2
23	11:00–11:30	4410	1102.6
24	11:30–12:00	4615	1153.8
25	12:00–12:30	4921	1205.1
26	12:30–13:00	4513	1128.2
27	13:00–13:30	4564	1141.0
28	13:30–14:00	4615	1153.8
29	14:00–14:30	4667	1166.7
30	14:30–15:00	4636	1159.0
31	15:00–15:30	4585	1146.2
32	15:30–16:00	4615	1153.8
33	16:00–16:30	4646	1161.5
34	16:30–17:00	4821	1205.1
35	17:00–17:30	4718	1179.5
36	17:30–18:00	5355	1342.2
37	18:00–18:30	5402	1355.6
38	18:30–19:00	5355	1342.2
39	19:00–19:30	5402	1355.6
40	19:30–20:00	5231	1307.7

41	20:00–20:30	5077	1269.2
42	20:30–21:00	4923	1230.8
43	21:00–21:30	4769	1192.3
44	21:30–22:00	4564	1141.0
45	22:00–22:30	4359	1089.7
46	22:30–23:00	4154	1038.5
47	23:00–23:30	3949	987.2
48	23:30–24:00	3893	974.7

Quản lý nguồn đòi hỏi sự linh hoạt để đáp ứng nhu cầu tải biến thiên, đặc biệt trong các khung giờ cao điểm (7:00–9:00 và 17:30–20:00). Dữ liệu sử dụng với 48 chu kỳ (mỗi chu kỳ 30 phút), để xây dựng profile tải và đề xuất kế hoạch nguồn.

- Thu thập dữ liệu: Dữ liệu tải ban đầu bao gồm giá trị tổng $P_{load} = 4464\text{MW}$ và $Q_{load} = 1120.25\text{ MVar}$ phân bổ trên 21 bus. Profile biến thiên được điều chỉnh, với mức tăng 15–18% (18:00–20:00 ổn định 5110–5267 MW) và giảm 10–20% ở giờ thấp điểm.
- Tính toán nhu cầu nguồn để bổ sung tổn thất 3% trên đường dây

$$P_{source} = \frac{P_{load}}{0.97} ; Q_{source} = \frac{Q_{load}}{0.97}$$

Kế hoạch nguồn phản ánh biến thiên tải, với % công suất phát cao trong cao điểm (90.34% tại 8:00 - 8:30 và 90.33% tại 19:00–19:30), cho thấy khai thác tối ưu nguồn lực.

Việc VPP được mô hình hóa như một nguồn phát điện thứ 11, được tích hợp vào hệ thống điện hiện có bao gồm 10 nguồn phát truyền thống được thiết lập để tham gia vận hành trong các tình huống hệ thống chịu áp lực lớn, chẳng hạn khi xảy ra sự cố hoặc khi phụ tải tăng cao dẫn đến các nguồn hiện hữu vận hành vượt trên ngưỡng 90% công suất định mức. Trong những kịch bản này, vai trò của VPP là hỗ trợ duy trì cân bằng cung – cầu điện năng, giảm tải cho các nguồn truyền thống và góp phần ổn định hệ thống.

Trong nghiên cứu, VPP được cài đặt sẽ tham gia vào Hệ thống điện khi nguồn phát hoạt động từ khoảng 85 - 90% công suất với tùy thời gian cao điểm hoặc thấp điểm. Việc này không chỉ giúp nâng cao tính linh hoạt và khả năng thích ứng của hệ thống điện trước

các biến động tải và sự cố, mà còn kéo dài tuổi thọ thiết bị và tối ưu hóa vận hành tổng thể của hệ thống điện.

3.6. Tổng kết chương 3

Việc kết nối Nhà máy điện ảo (VPP) với lưới điện đòi hỏi sự kết hợp chặt chẽ giữa phân tích kỹ thuật hệ thống điện và cấu hình đấu nối hợp lý. Trước khi kết nối, cần thực hiện tính toán trào lưu công suất (load flow analysis) nhằm đánh giá ảnh hưởng của VPP lên lưới, bao gồm khả năng cấp công suất tác dụng và phản kháng, biến thiên điện áp tại các nút, và mức độ tải của các đường dây lân cận. Kết quả từ bài toán trào lưu là cơ sở để lựa chọn điểm đấu nối chung (PCC) sao cho đảm bảo ổn định vận hành và giảm thiểu tổn thất truyền tải.

Xác định chính xác vị trí PCC không chỉ giúp tối ưu hóa chi phí đầu tư và vận hành mà còn đảm bảo tích hợp an toàn, ổn định của VPP vào lưới điện. Quy trình này đòi hỏi phải có mô phỏng kỹ thuật chi tiết và tuân thủ các tiêu chuẩn kỹ thuật, đồng thời cần phối hợp với các bên liên quan như đơn vị phân phối, điều độ hệ thống và chủ đầu tư VPP.

Việc thiết lập luồng dữ liệu tương tác hai chiều giữa PSS/E và MATLAB thông qua Python đã tạo nên một kiến trúc đồng mô phỏng hiệu quả, kết hợp khả năng mô hình hóa chính xác của PSS/E với tính linh hoạt và khả năng phát triển thuật toán điều khiển nâng cao trong MATLAB. Python đóng vai trò trung gian, đảm bảo trao đổi dữ liệu liên tục, chính xác và theo thời gian thực giữa hai hệ thống. Cơ chế này không chỉ đáp ứng yêu cầu mô phỏng động phức tạp của hệ thống điện hiện đại mà còn mở rộng tiềm năng tích hợp các chiến lược điều khiển thông minh như tối ưu hóa công suất, phản ứng phụ tải, hoặc ứng dụng học máy trong điều hành lưới điện.

Đặc biệt, trong nghiên cứu này, hệ thống đồng mô phỏng được thiết kế để tạo ra 48 bộ dữ liệu công suất tác dụng (P) và công suất phản kháng (Q) tương ứng với 48 khoảng thời gian trong một ngày, với chu kỳ cập nhật 30 phút. Các tệp dữ liệu này phản ánh biến thiên phụ tải và điều kiện vận hành thực tế theo thời gian, đóng vai trò làm đầu vào cho thuật toán điều phối nguồn và tối ưu hóa vận hành VPP. Cách tiếp cận này giúp mô phỏng chính xác hơn hành vi động của lưới điện phân tán trong suốt một chu kỳ 24 giờ, đồng thời tăng tính thực tiễn và hiệu quả của giải pháp điều khiển đề xuất.

Chương 4: KỊCH BẢN VẬN HÀNH VÀ ẢNH HƯỞNG CỦA NHÀ MÁY ĐIỆN ẢO

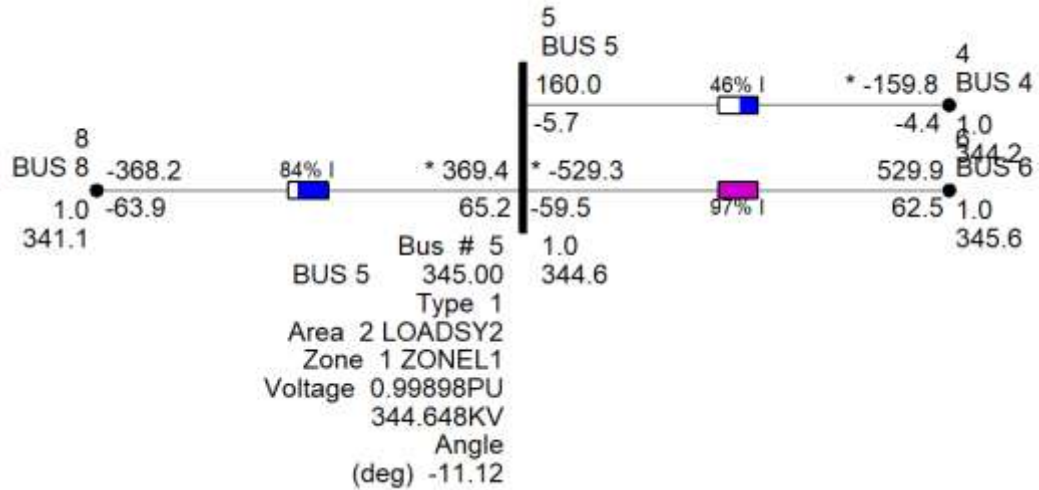
4.1. Kịch bản xây dựng

4.1.1. Kịch bản vận hành số 1

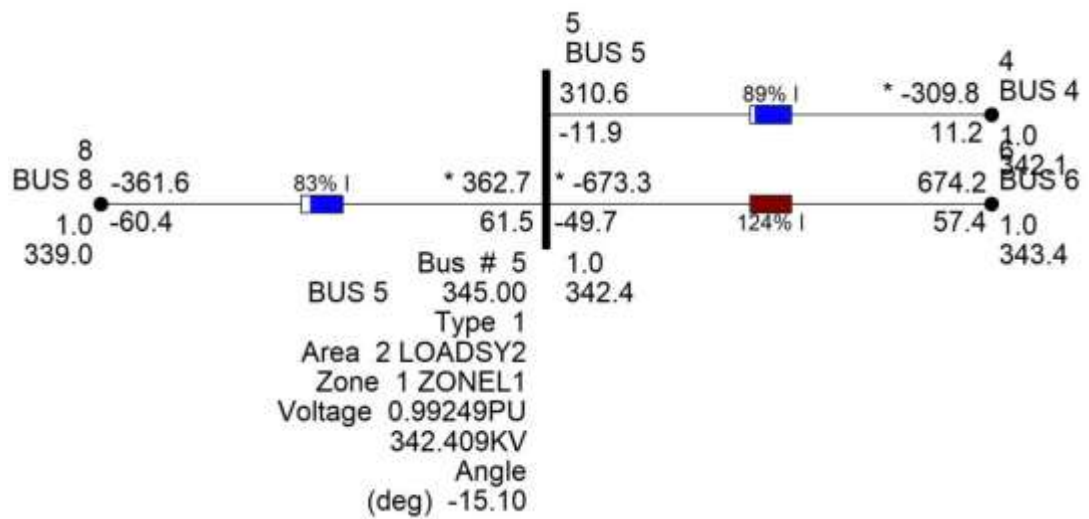
Kịch bản 1 mô tả tình huống tải tại nút BUS 4 trong hệ thống điện tăng cao đột ngột bắt đầu vào lúc 11 giờ trưa và kéo dài trong vòng 2.5 giờ. Nguyên nhân chính được cho là do sự thay đổi bất ngờ trong quy trình sản xuất tại các nhà máy trong khu công nghiệp. Cụ thể, vào thời điểm này, một số nhà máy có thể đã tiến hành khởi động các động cơ công suất lớn nhằm phục vụ cho giai đoạn sản xuất cao điểm trong ngày. Việc khởi động đồng thời nhiều thiết bị tiêu thụ điện năng lớn có thể gây ra hiện tượng tăng đột biến phụ tải trong hệ thống.

Ngoài ra, cũng không loại trừ khả năng các nhà máy trong khu công nghiệp đang mở rộng quy mô sản xuất, làm việc theo nhiều ca hơn so với thông thường để đáp ứng nhu cầu thị trường. Điều này khiến mức tiêu thụ điện năng tại BUS 4 tăng cao hơn bình thường trong thời gian ngắn.

Hệ quả của việc phụ tải tăng nhanh chóng tại BUS 4 là dòng công suất từ các nguồn điện trong hệ thống được huy động mạnh mẽ để cung cấp cho khu vực này. Điều này làm phát sinh hiện tượng quá tải trên một số nhánh đường dây, đặc biệt là đường dây từ BUS 5 đến BUS 6, vốn là khu vực nhạy cảm có phụ tải cao. Nếu không có các biện pháp điều chỉnh kịp thời, tình trạng quá tải kéo dài có thể ảnh hưởng đến độ ổn định và an toàn vận hành của toàn bộ hệ thống điện.



Hình 4.1: Thông số tại BUS 5 khi hoạt động bình thường



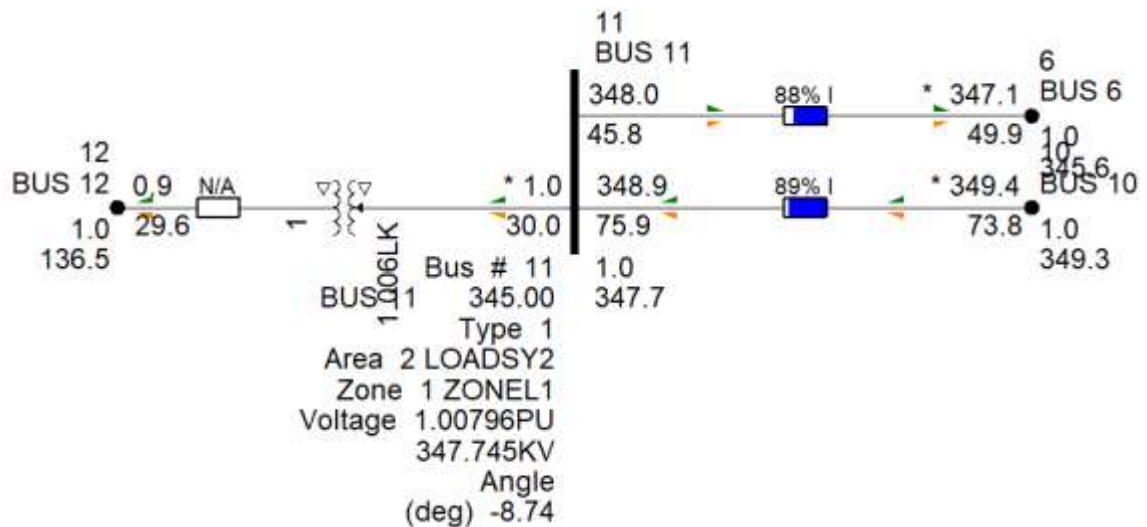
Hình 4.2: Thông số tại BUS 5 khi BUS 4 tăng đột ngột

4.1.2. Kịch bản vận hành số 2

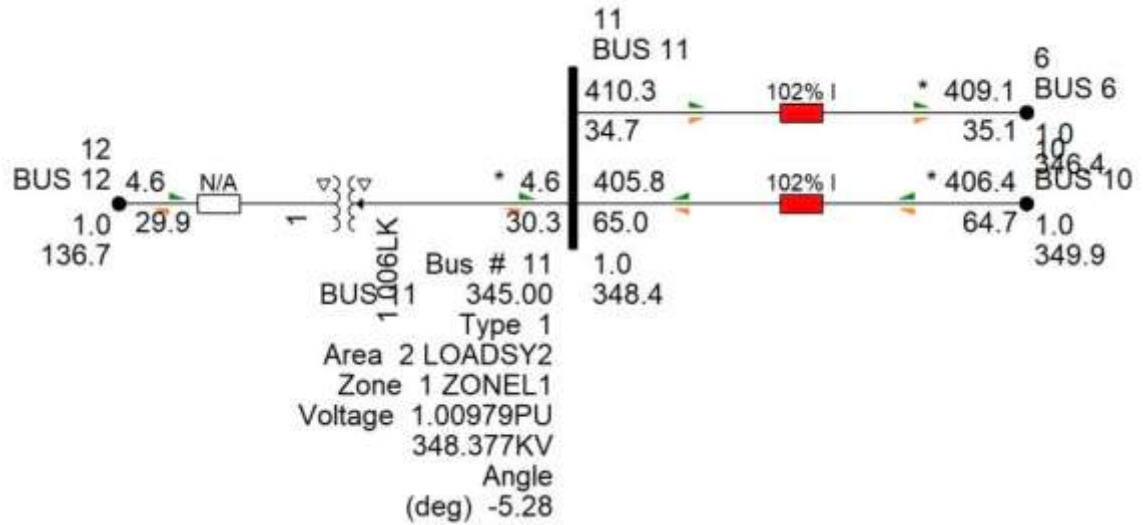
Kịch bản 2 mô tả một tình huống sự cố N-1 xảy ra vào lúc 17 giờ 30 phút, thời điểm bắt đầu giờ cao điểm buổi tối khi nhu cầu sử dụng điện bắt đầu gia tăng. Trong kịch bản này, một trong các đường dây truyền tải chính nối từ BUS 18 đến BUS 3 gặp sự cố và bị loại khỏi vận hành, có thể do hư hỏng thiết bị, tác động từ yếu tố môi trường hoặc sự cố kỹ thuật bất ngờ.

Việc mất đi một đường dây quan trọng trong lưới điện vào thời điểm phụ tải đang tăng khiến cho công suất truyền tải bị dồn lên các nhánh đường dây còn lại. Các tuyến truyền tải thay thế phải gánh thêm dòng công suất lớn hơn bình thường, dẫn đến nguy cơ quá tải cục bộ tại nhiều điểm trong hệ thống, đặc biệt là trên các đường dây lân cận với tuyến bị sự cố.

Trong tình huống này, hệ thống điện cần có phản ứng nhanh chóng để đảm bảo ổn định và tránh lan truyền sự cố. Do đó, VPP với khả năng phản ứng linh hoạt, sẽ được huy động để tham gia hỗ trợ công suất.



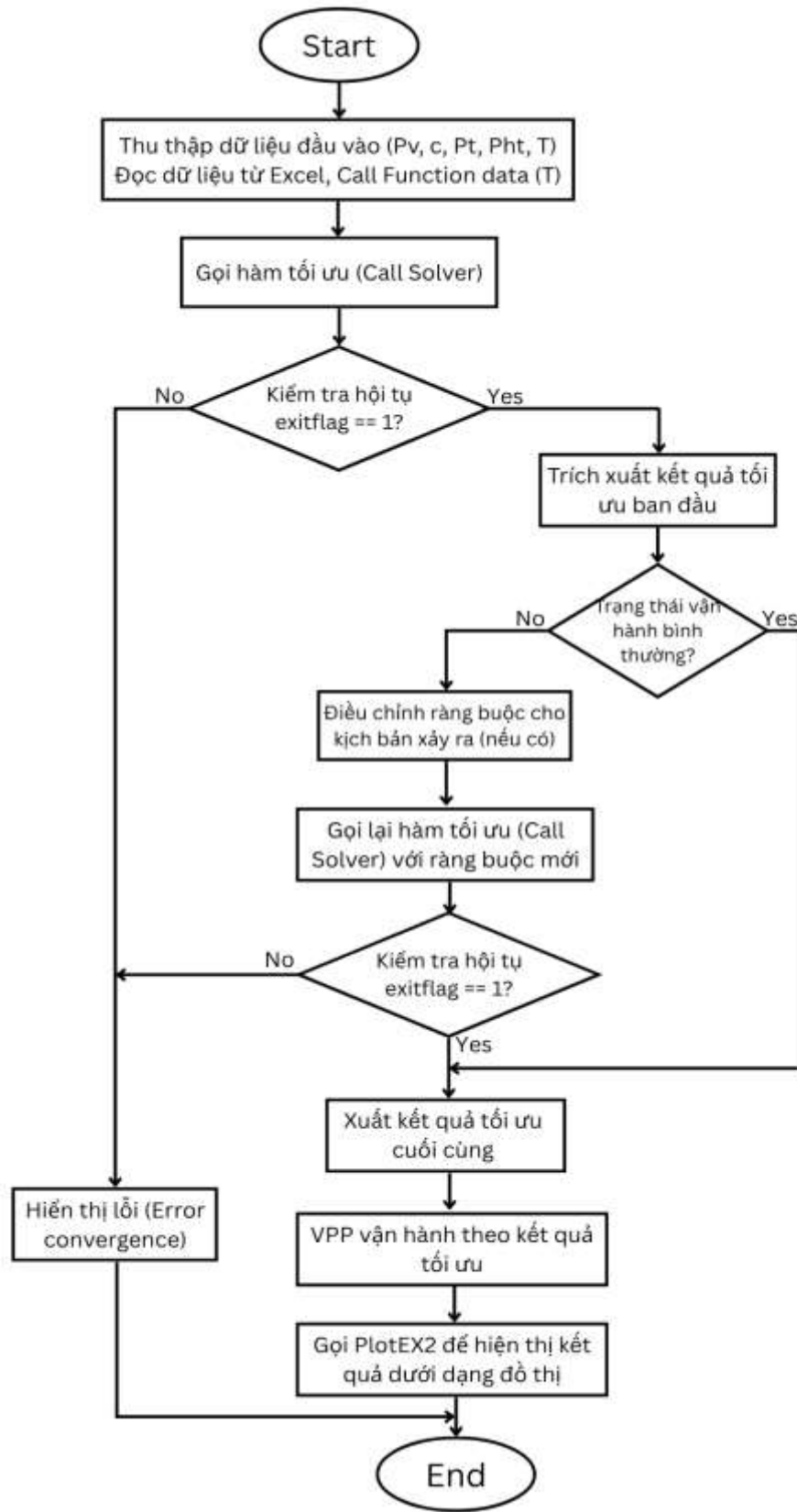
Hình 4.3: Thông số tại BUS 11 khi hoạt động bình thường



Hình 4.4: Thông số tại BUS 11 khi gặp sự cố N-1

4.2. Cách thức hoạt động của VPP

Lưu đồ thuật toán trên mô tả quy trình điều khiển công suất của Nhà máy điện ảo (VPP), trong đó cơ chế điều khiển được xây dựng dựa trên việc so sánh giữa công suất phát từ trang trại gió (Wind Farm) và nhu cầu phụ tải (Load). Đồng thời, thuật toán cũng xét đến trạng thái hoạt động của Wind Farm trong từng khoảng thời gian cụ thể, nhằm đưa ra quyết định phân phối công suất hợp lý từ các nguồn DER trong VPP để đảm bảo cân bằng cung cầu trong hệ thống.



Hình 4.5: Lưu đồ vận hành và điều phối công suất trong hệ thống VPP

Start: Bắt đầu thuật toán.

Thu thập dữ liệu đầu vào

- Gồm các tham số: P_v , c , P_t , P_{ht} , T
- Đọc dữ liệu từ file Excel thông qua Call Function với biến thời gian T .

Gọi hàm tối ưu (Call Solver): Gọi trình giải toán tối ưu để thực hiện bài toán tối ưu hóa.

Kiểm tra hội tụ của bài toán

- Nếu $exitflag == 1$ (hội tụ): tiếp tục trích xuất biến quyết định từ kết quả tối ưu X .
- Nếu không hội tụ: hiển thị lỗi (Error convergence) và kết thúc.

Trạng thái vận hành hệ thống bình thường?

- Kiểm tra xem trạng thái vận hành hệ thống bình thường hay có xảy ra kịch bản vận hành nào không?
- Nếu hợp lệ (YES): tiếp tục xuất kết quả, hệ thống sẽ tiếp tục vận hành bình thường
- Nếu không hợp lệ (NO): hệ thống kiểm tra các tín hiệu vận hành nhằm phát hiện liệu trạng thái hiện tại có thuộc một kịch bản bất thường hay không?

Điều chỉnh các ràng buộc cho kịch bản xảy ra (nếu có)

- Kịch bản 1: Tải tăng cao bất thường tại chu kì (23-27)
- Kịch bản 2: Sự cố N-1 diễn ra tại chu kì (36-38)

Điều chỉnh ràng buộc tối ưu: Khi một kịch bản vận hành xảy ra, các ràng buộc trong bài toán tối ưu sẽ được điều chỉnh phù hợp với điều kiện thực tế của hệ thống tại thời điểm đó.

Gọi lại hàm tối ưu (Call Solver) với ràng buộc: Sau khi điều chỉnh ràng buộc theo các kịch bản vận hành bất thường, hệ thống tiến hành gọi lại hàm Solver để giải lại bài toán tối ưu. Mục tiêu là cập nhật phương án điều độ phù hợp với điều kiện thực tế đã thay đổi, đảm bảo kết quả tối ưu phản ánh đúng trạng thái hệ thống tại thời điểm tính toán.

Xuất kết quả tối ưu cuối cùng: Sau khi thuật toán tối ưu (linprog), các biến quyết định như công suất phát từ nguồn gió (P_w , P_{w1}), công suất bơm (P_p), công suất phát từ thủy điện (P_{h1} , P_h) và mức năng lượng trong hồ chứa (E) sẽ được xuất ra làm kết quả đầu ra của thuật toán. Các giá trị này là cơ sở để thực hiện chiến lược vận hành tối ưu.

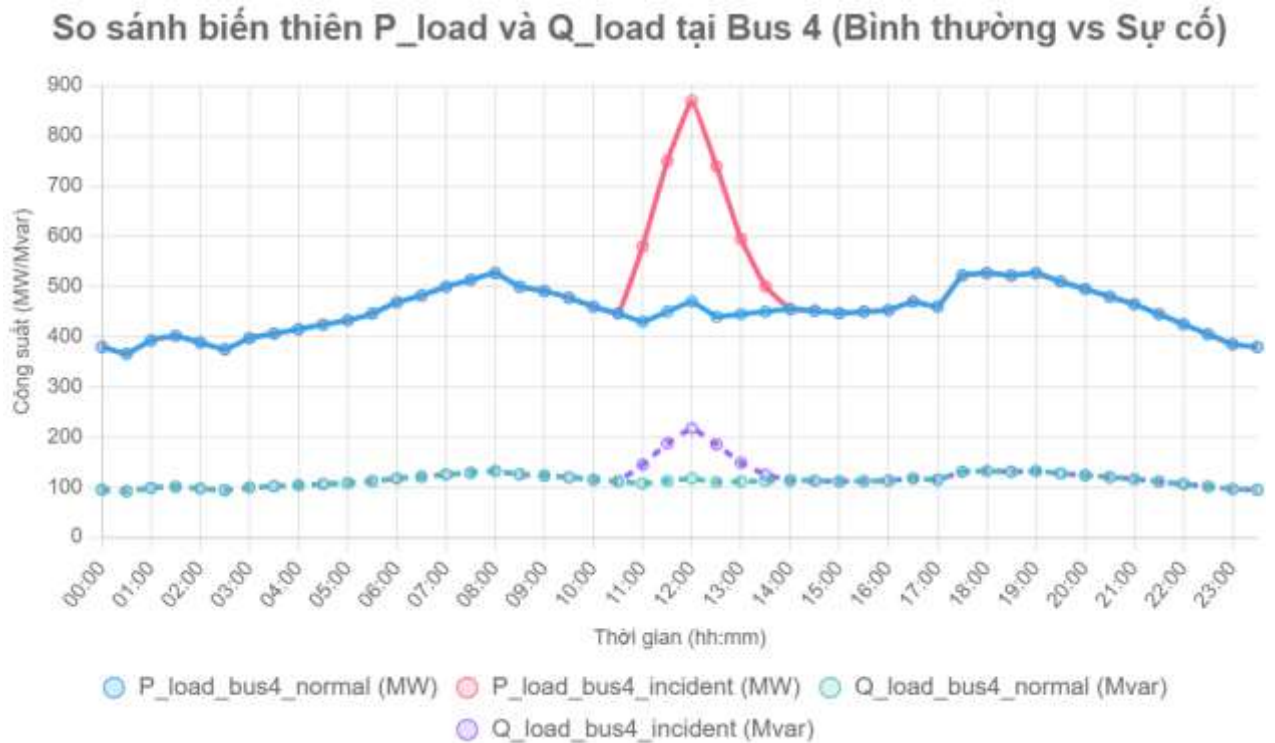
VPP vận hành theo kết quả tối ưu: Dựa trên kết quả tính toán, VPP sẽ vận hành theo chiến lược đã tối ưu hóa, đảm bảo thỏa mãn nhu cầu phụ tải, cân bằng công suất hệ thống và tối đa hóa lợi nhuận vận hành. Việc vận hành bao gồm cả phát điện, bơm tích năng và hỗ trợ phụ tải nội bộ lẫn hệ thống.

Hiển thị kết quả dưới dạng đồ thị: Gọi hàm PlotEX2 để biểu diễn kết quả trực quan.

Kết thúc (End): Sau khi thực hiện các bước trên, thuật toán kết thúc.

4.3. Kết quả

4.3.1. Kịch bản vận hành số 1

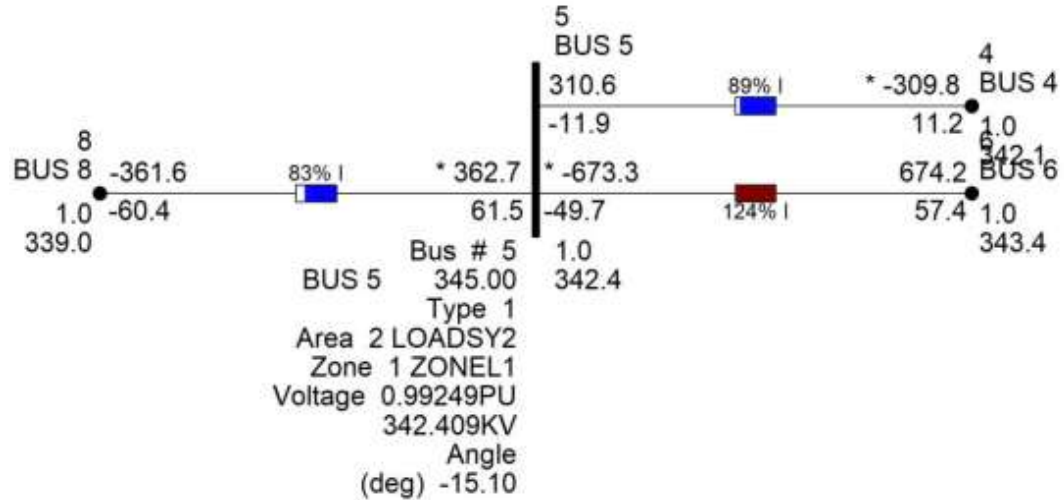


Hình 4.6: Thông số phụ tải BUS 4 trước và sau kịch bản vận hành 1

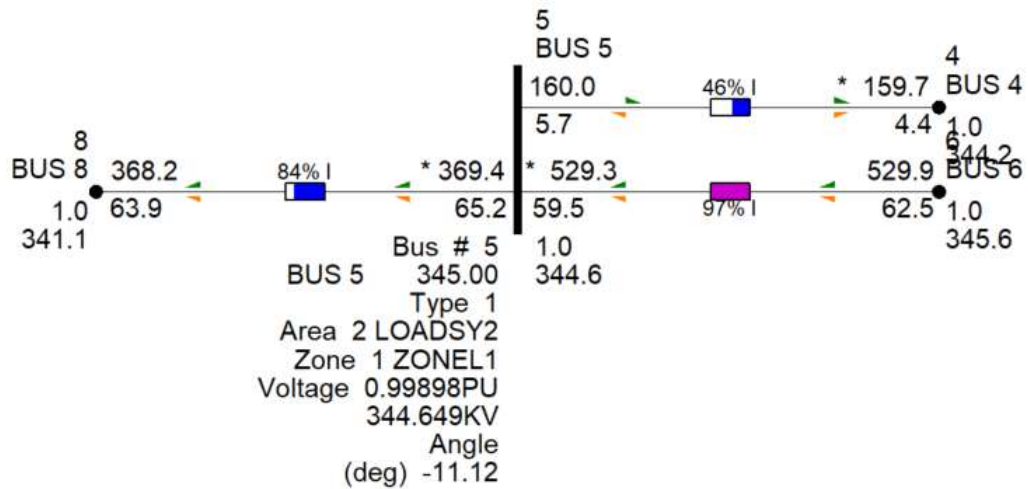
Theo như biểu đồ biến thiên phụ tải tại BUS 4, ta nhận thấy công suất giao động bất ổn định từ thời điểm 11 giờ 30 phút (chu kì 23), cụ thể tải tăng 150 MW vào thời điểm 11 giờ 30 phút, tiếp tục tăng lên 300 MW vào thời điểm 12 giờ và đạt đỉnh tăng 400 MW vào lúc 12 giờ 30 phút. Từ 13 giờ tải tăng 280 MW, 160 MW vào lúc 13 giờ 30 phút, và 50MW vào lúc 14 giờ. Kịch bản này kéo dài trong vòng 2.5 giờ.

Khi Nhà máy điện ảo (VPP) được kết nối vào lưới để hỗ trợ vận hành, hệ thống sẽ thực hiện điều chỉnh công suất phát nhằm góp phần duy trì sự ổn định cho lưới điện. Cụ thể, trong kịch bản đầu tiên, khi hệ thống lưới tăng công suất đột ngột với mức tăng cao nhất là 400 MW tại giờ thứ 13 và công suất nhà máy hoạt động cao nhất đạt 90.87%. Vì ngưỡng phát tối ưu của nhà máy dao động từ 70% đến 85% cùng với việc cài đặt cho phép VPP tham gia vào lưới khi phải chịu tải lớn hơn 85%. Theo như biến thiên thì lúc này VPP cần hỗ trợ thêm khoảng 5.87% xấp xỉ tương đương với 282.48 MW. Việc này giúp đảm bảo vận hành ổn định, không xảy ra tình trạng quá tải hay sự cố mất cân bằng cung và cầu.

Tuy nhiên, do giới hạn công suất phát tối đa của nhà máy thủy điện tích năng là 250 MW, VPP chỉ có thể hỗ trợ trong phạm vi công suất khả dụng. Điều này bảo đảm rằng việc điều chỉnh công suất luôn nằm trong ngưỡng vận hành an toàn và hiệu quả, tránh gây áp lực quá mức lên các nguồn phát hoặc thiết bị kết nối.



Hình 4.7: Trạng thái đường dây tại BUS 5 trước khi có VPP



Hình 4.8: Trạng thái đường dây tại BUS 5 sau khi có VPP



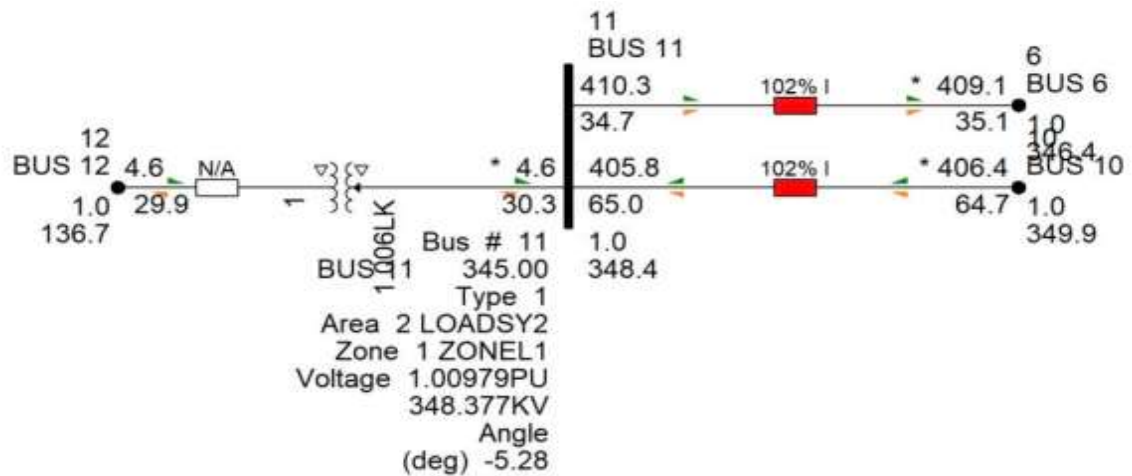
Hình 4.9: Kết quả phân bố công suất sau kịch bản vận hành 1

4.3.2. Kịch bản vận hành số 2

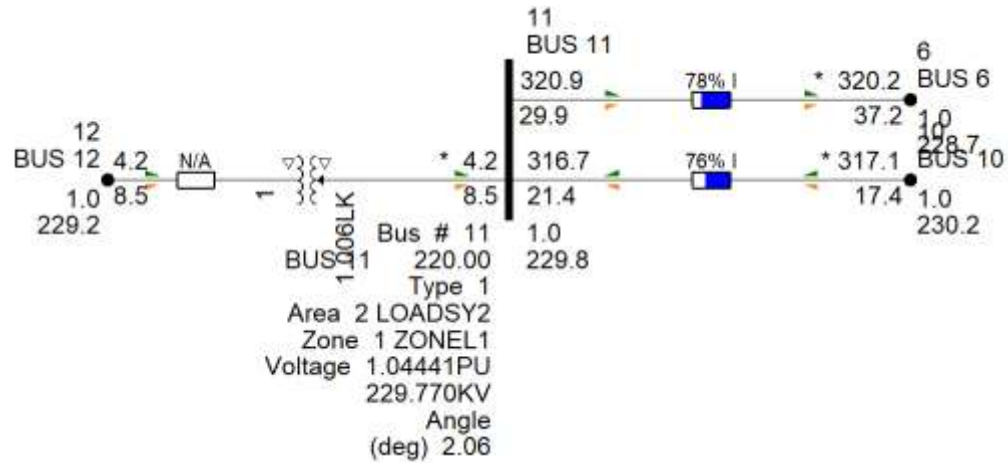
Trong quá trình vận hành hệ thống điện, một sự cố N-1 đã xảy ra khi đường dây truyền tải nối giữa BUS 18 và BUS 3 bất ngờ bị mất kết nối. Đây là một trong những tuyến truyền tải chính đảm nhiệm vai trò vận chuyển công suất từ khu vực phát điện đến trung tâm phụ tải. Việc mất một phần tử quan trọng như vậy không làm thay đổi tổng công suất tiêu thụ của hệ thống, tuy nhiên, dòng công suất buộc phải tái phân phối qua các nhánh còn lại, khiến một số đường dây khác trong khu vực bị quá tải cục bộ.

Cụ thể, hai tuyến đường dây từ BUS 11 đến BUS 6 và từ BUS 11 đến BUS 10 đã ghi nhận mức dòng vượt quá giới hạn cho phép, gây rủi ro đến an toàn vận hành hệ thống. Để ứng phó kịp thời, Nhà máy điện ảo (VPP) đã được huy động, cung cấp công suất phân tán tại các vị trí chiến lược trong hệ thống. Trong thời gian 1.5 giờ (tương đương 3 chu kỳ điều độ từ 17 giờ 30 phút đến 19 giờ cùng ngày), VPP đã lần lượt phát công suất 79.92 MW, 107.3 MW và 86.88 MW, giúp giảm tải cho các nhánh đang quá tải, đồng thời hỗ trợ duy trì điện áp ổn định tại các nút tải.

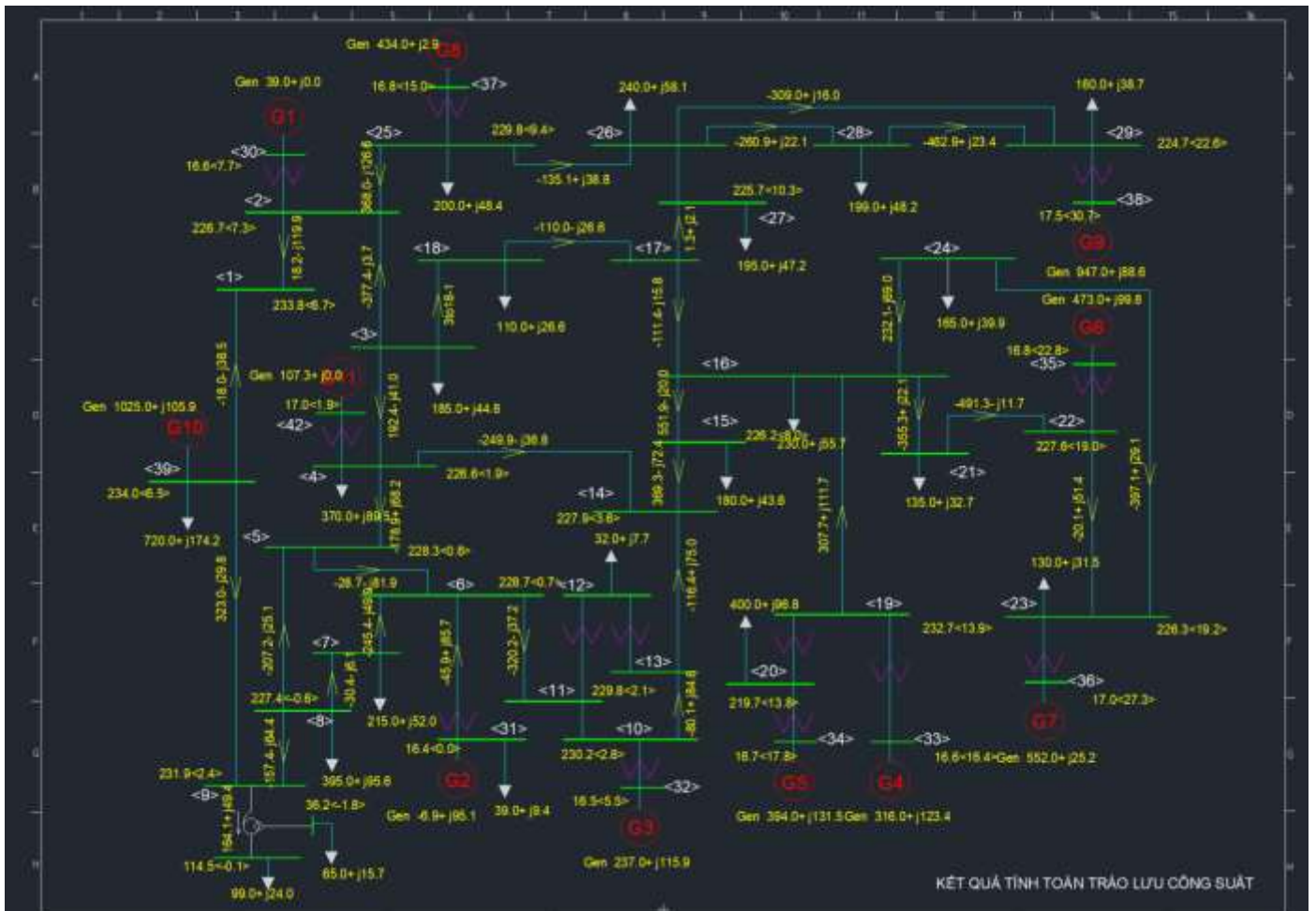
Nhờ sự can thiệp kịp thời này, hệ thống đã được tái cân bằng, ngăn chặn nguy cơ lan rộng sự cố và đảm bảo quá trình vận hành trở lại trạng thái ổn định.



Hình 4.10: Trạng thái đường dây tại BUS 11 trước khi có VPP



Hình 4.11: Trạng thái đường dây tại BUS 11 sau khi có VPP



Hình 4.12: Kết quả phân bố công suất sau kịch bản vận hành sự cố 2

4.4. Tổng kết chương 4

Hai kịch bản mô phỏng đã được xây dựng nhằm đánh giá khả năng phản ứng và điều phối công suất của Nhà máy điện ảo (VPP) trong các tình huống bất thường trên lưới điện:

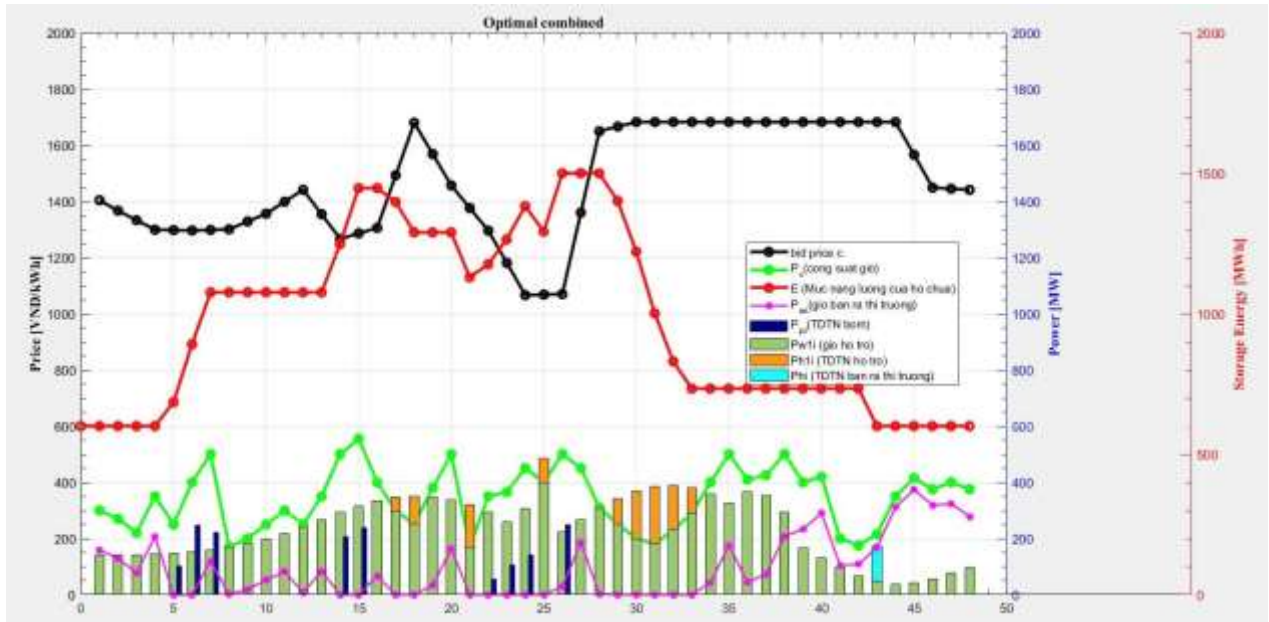
- Kịch bản vận hành số 1 mô phỏng tình huống phụ tải tăng đột ngột vào giữa trưa, gây áp lực lên các nhánh truyền tải. VPP đã linh hoạt điều chỉnh công suất phát để đảm bảo cân bằng công suất, giảm thiểu nguy cơ quá tải và duy trì ổn định hệ thống.
- Kịch bản vận hành số 2 mô tả sự cố mất một đường dây (N-1) vào 17h30 dẫn đến tình trạng quá tải cục bộ tại các nhánh còn lại. VPP được huy động để hỗ trợ công suất, qua đó giúp phân phối lại dòng công suất, giảm tải cho các phần tử bị ảnh hưởng và ngăn chặn lan truyền sự cố.

Bảng 4.1: Thống kê kết quả VPP hỗ trợ trong 48 chu kỳ

Cycle	Time Range	Công suất tăng (MW)	Bù công suất (MW)	Tải tiêu thụ (%)	Chênh lệch so với quy định (%)
1	00:00–00:30	0	0	65.10%	0.00%
2	00:30–01:00	0	0	62.77%	0.00%
3	01:00–01:30	0	0	67.35%	0.00%
4	01:30–02:00	0	0	68.91%	0.00%
5	02:00–02:30	0	0	66.59%	0.00%
6	02:30–03:00	0	0	64.31%	0.00%
7	03:00–03:30	0	0	68.12%	0.00%
8	03:30–04:00	0	0	69.68%	0.00%
9	04:00–04:30	0	0	71.19%	0.00%
10	04:30–05:00	0	0	72.71%	0.00%
11	05:00–05:30	0	0	74.24%	0.00%
12	05:30–06:00	0	0	76.56%	0.00%
13	06:00–06:30	0	0	80.38%	0.00%
14	06:30–07:00	0	0	82.68%	0.00%
15	07:00–07:30	0	0	85.70%	0.00%
16	07:30–08:00	0	0	88.05%	0.00%
17	08:00–08:30	0	0	90.34%	0.34%
18	08:30–09:00	0	0	85.70%	0.00%
19	09:00–09:30	0	0	84.21%	0.00%
20	09:30–10:00	0	0	81.91%	0.00%

Đề tài: Đánh giá ảnh hưởng của nhà máy điện ảo đối với các chế độ vận hành hệ thống điện

21	10:00–10:30	0	0	78.84%	0.00%
22	10:30–11:00	0	0	76.56%	0.00%
23	11:00–11:30	150	0	76.29%	0.00%
24	11:30–12:00	300	88.16	86.52%	1.52%
25	12:00–12:30	400	282.48	90.87%	5.87%
26	12:30–13:00	280	0	81.07%	0.00%
27	13:00–13:30	160	0	79.52%	0.00%
28	13:30–14:00	50	0	78.55%	0.00%
29	14:00–14:30	0	0	69.68%	0.00%
30	14:30–15:00	0	0	68.91%	0.00%
31	15:00–15:30	0	0	68.12%	0.00%
32	15:30–16:00	0	0	67.35%	0.00%
33	16:00–16:30	0	0	66.59%	0.00%
34	16:30–17:00	0	0	65.82%	0.00%
35	17:00–17:30	0	0	79.23%	0.00%
36	17:30–18:00	0	79.92	89.35%	0.00%
37	18:00–18:30	0	107.3	90.28%	0.28%
38	18:30–19:00	0	86.88	89.49%	0.00%
39	19:00–19:30	0	0	90.33%	0.33%
40	19:30–20:00	0	0	87.64%	0.00%
41	20:00–20:30	0	0	85.34%	0.00%
42	20:30–21:00	0	0	82.10%	0.00%
43	21:00–21:30	0	0	79.69%	0.00%
44	21:30–22:00	0	0	76.56%	0.00%
45	22:00–22:30	0	0	72.13%	0.00%
46	22:30–23:00	0	0	68.63%	0.00%
47	23:00–23:30	0	0	66.59%	0.00%
48	23:30–24:00	0	0	65.10%	0.00%



Hình 4.13: Hoạt động tối ưu của VPP trong 2 kịch bản vận hành

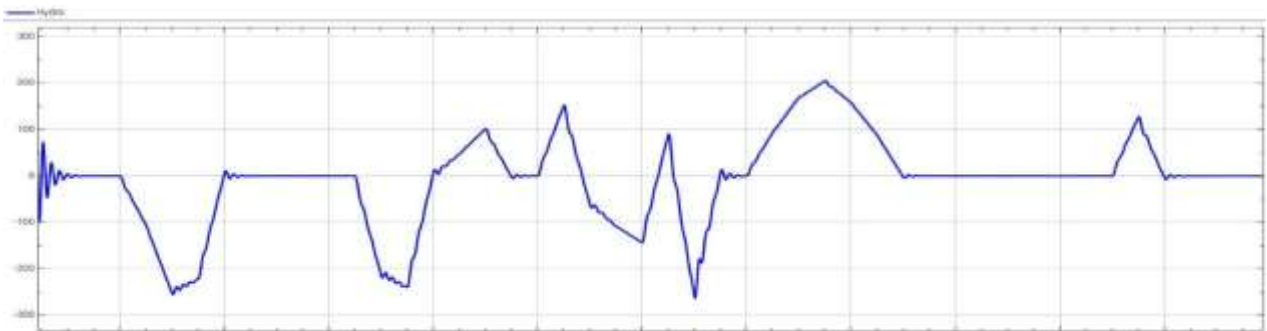
Các kết quả thu được từ hai kịch bản cho thấy VPP có khả năng phản ứng nhanh, điều phối linh hoạt và hiệu quả trong nhiều tình huống vận hành khác nhau. VPP không chỉ đóng vai trò hỗ trợ kỹ thuật trong việc ổn định lưới điện, mà còn thể hiện tiềm năng trở thành một giải pháp quan trọng trong việc tích hợp an toàn và hiệu quả các nguồn năng lượng tái tạo vào hệ thống điện hiện đại.

Sau khi thực hiện bài toán tối ưu hóa lợi nhuận vận hành VPP với nguồn năng lượng tái tạo trong kịch bản vận hành tăng tải cao (chu kỳ 24-25) và sự cố N-1 (chu kỳ 37-39), ta thu được biểu đồ công suất tối ưu của nhà máy thủy điện tích năng trong 48 chu kỳ thời gian. Giá trị công suất âm biểu thị quá trình nhà máy tiêu thụ công suất để bơm nước lên hồ chứa (chế độ lưu trữ năng lượng), trong khi giá trị công suất dương thể hiện nhà máy đang phát điện để hỗ trợ phụ tải hoặc bán lên lưới.

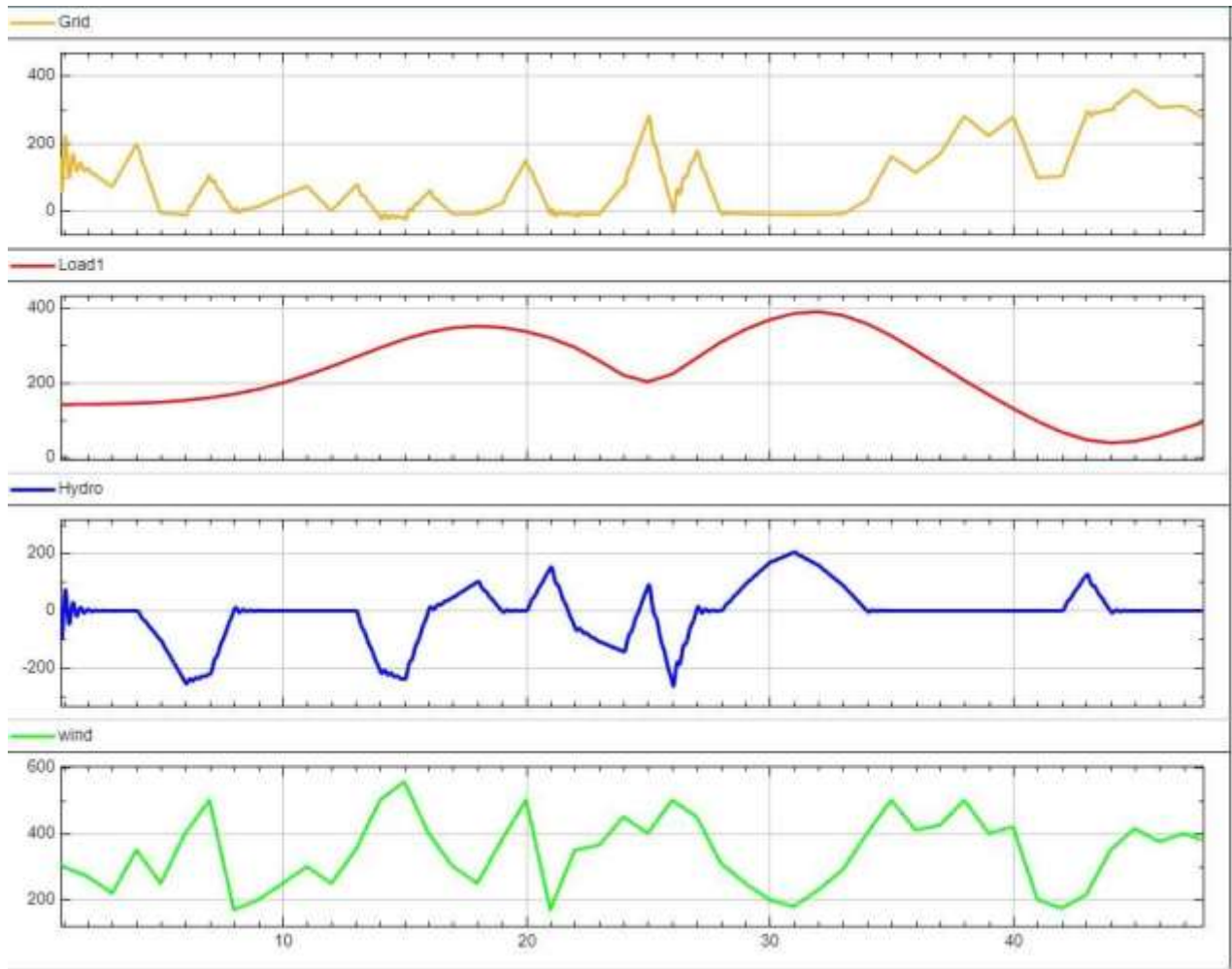
Bảng 4.2: Công suất của nhà máy thủy điện tích năng trong 2 kịch bản vận hành

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	0	0	-102.86	-248.24	-222.73	0	0	0	0	0
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0	-207.47	-239.58	0	46.08	100.56	0	0	148.99	-56.21	-106.91	-142.53
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
84.29	-250	0	0	91.6	167.71	204.58	159.13	89.68	0	0	0
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
0	0	0	0	0	0	124.3	0	0	0	0	0

**Công suất: MW*



Hình 4.14: Kết quả đáp ứng sự cố của khối thủy điện tích năng
(Trục dọc của biểu đồ thể hiện công suất (MW), trục ngang đại diện thời gian 48 chu kì)



Hình 4.15: Kết quả đáp ứng sự cố của mô hình VPP Simulink

(Trục dọc của biểu đồ thể hiện công suất (MW), trục ngang đại diện thời gian 48 chu kì)

Hình 4.15 thể hiện đáp ứng công suất của hệ thống VPP trong điều kiện có sự cố. So với trường hợp vận hành bình thường, hệ thống ghi nhận các biến động rõ rệt:

- Trong điều kiện có sự cố, công suất dư để bán lên lưới (P_{Grid}) tại một vài thời điểm giảm rõ rệt so với điều kiện bình thường, nguyên nhân là do lượng công suất giảm đi đó được sử dụng để hỗ trợ cho phụ tải vào các thời điểm sự cố xảy ra (chu kỳ 23-24, 36-38)
- Phụ tải nội bộ (Load1) vẫn giữ dạng biến thiên theo chu kỳ tương tự, cho thấy sự cố không ảnh hưởng đến đặc tính phụ tải.

- Thủy điện tích năng (Hydro) xuất hiện các xung dao động lớn và chuyển trạng thái nhanh giữa phát điện và bơm tích năng, thể hiện vai trò điều chỉnh linh hoạt hơn nhằm duy trì cân bằng công suất.
- Nguồn gió (Wind) giữ nguyên đặc tính biến thiên ngẫu nhiên, tuy nhiên ảnh hưởng từ sự cố dẫn đến vai trò hỗ trợ từ thủy điện tích năng và lưới trở nên nổi bật hơn.

Chương 5: KẾT LUẬN VÀ ĐỀ XUẤT HƯỚNG PHÁT TRIỂN

5.1. Kết quả đạt được

Trong khuôn khổ đề tài, nhóm nghiên cứu đã thiết kế và xây dựng thành công mô hình Nhà máy điện ảo (Virtual Power Plant – VPP) trên nền tảng Simulink/MATLAB, tích hợp các thành phần thiết yếu bao gồm:

Thủy điện tích năng, trang trại điện gió (Wind Farm) và tải nội bộ. Các thành phần này được mô hình hóa và kết nối chặt chẽ trong một hệ thống điều khiển trung tâm, nhằm tái hiện cấu trúc vận hành tổng thể của một VPP trong môi trường điện hiện đại.

Mô hình được vận hành theo chiến lược tối ưu hóa kinh tế, với hàm mục tiêu hướng đến tối đa hóa lợi ích vận hành (maximize total benefits) trong khi vẫn đảm bảo tuân thủ nghiêm ngặt các ràng buộc kỹ thuật.

Các ràng buộc bao gồm: điều kiện cân bằng công suất (power balance) giữa nguồn và tải tại mỗi thời điểm, giới hạn công suất cực đại/cực tiểu của thủy điện tích năng khi phát công suất/bơm nước lên hồ chứa, cũng như các ràng buộc liên quan đến trạng thái năng lượng và khả năng đáp ứng tức thời của thủy điện tích năng. Bằng cách kết hợp giữa các khối mô hình vật lý (physical modeling) và khối tối ưu hóa trong môi trường Simulink, mô hình VPP này cho phép đánh giá hiệu quả điều phối nguồn phân tán trong các kịch bản vận hành khác nhau, đồng thời tạo nền tảng cho việc phát triển các chiến lược điều độ nâng cao trong tương lai.

Nhóm đã kết hợp mô hình VPP với lưới điện tiêu chuẩn IEEE 39-BUS trong phần mềm PSS/E, thực hiện tính toán trào lưu công suất (load flow) để kiểm tra khả năng vận hành của hệ thống trong các điều kiện thực tế khác nhau, từ chế độ bình thường đến các tình huống sự cố và thay đổi phụ tải đột ngột.

Mô hình cho thấy khả năng điều phối hợp lý giữa nguồn gió và thủy điện tích năng, giúp nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng tái tạo, đồng thời đảm bảo sự ổn định trong quá trình vận hành. Trong các kịch bản sự cố N-1, VPP thể hiện khả năng phản ứng nhanh chóng, giúp ổn định điện áp, giảm thiểu tổn thất và hỗ trợ giảm tải tại các đường dây bị quá tải.

Thông qua các kết quả đạt được, đề tài không chỉ góp phần làm rõ tính khả thi và lợi ích kỹ thuật – kinh tế của mô hình VPP, mà còn cung cấp cơ sở thực tiễn quan trọng cho

việc ứng dụng Nhà máy điện ảo vào lưới điện Việt Nam, trong bối cảnh chuyển dịch năng lượng và gia tăng tỷ trọng các nguồn năng lượng tái tạo.

Sự kết hợp giữa các công cụ Simulink – Optimization Toolbox – PSS/E – Python đã cho phép mô hình hóa hiệu quả cả hai mặt: kỹ thuật vận hành và tối ưu hóa kinh tế, tạo cơ sở cho việc đưa ra các quyết định điều độ có cơ sở và phù hợp với thực tế.

Hoàn thành mục tiêu tự động hóa toàn bộ quá trình liên kết dữ liệu giữa Simulink – PSS/E bằng ngôn ngữ lập trình Python, hướng đến khả năng mô phỏng vận hành đồng bộ thời gian thực, tương tự như cơ chế tại các trung tâm điều độ.

5.2. Hạn chế về nghiên cứu

Mặc dù đạt được những kết quả tích cực, do thời gian thực hiện đề án còn hạn chế đề tài vẫn còn một số nội dung cần được tiếp tục nghiên cứu và cải thiện trong thời gian đến:

- Tích hợp hệ thống lưu trữ năng lượng bằng pin (Battery Energy Storage System – BESS), một thành phần có khả năng phản ứng tức thời, hỗ trợ hiệu quả hơn cho điều tần và điều áp trong các kịch bản bất định.
- Xây dựng chiến lược điều độ vận hành vẫn ở mức cao và linh hoạt hơn, trong đó có xét đến các yếu tố ngoại sinh quan trọng như biến động thị trường điện, dữ liệu dự báo thời tiết hoặc tín hiệu giá điện thời gian thực, vốn là các thành phần thiết yếu trong điều hành VPP thương mại.

5.3. Đề xuất hướng phát triển

Trong thời gian tới, VPP có thể phát triển theo hướng mở rộng quy mô và nâng cao khả năng tích hợp với nhiều loại nguồn năng lượng tái tạo hơn. Một số đề xuất và định hướng chính trong tương lai bao gồm:

Tích hợp thêm các nguồn năng lượng tái tạo:

- Hiện tại, VPP chủ yếu sử dụng năng lượng gió và thủy điện tích năng. Trong tương lai, việc bổ sung các nguồn năng lượng khác như điện mặt trời, sinh khối hoặc địa nhiệt có thể giúp tăng cường tính linh hoạt và khả năng đáp ứng của hệ thống.
- Việc phát triển các mô hình dự báo công suất phát từ các nguồn tái tạo sẽ giúp cải thiện độ chính xác trong điều phối VPP.

Ứng dụng hệ thống lưu trữ năng lượng:

- Để giảm thiểu sự dao động công suất, VPP cần được tích hợp với các hệ thống lưu trữ năng lượng như BESS, siêu tụ điện.

- Hệ thống lưu trữ không chỉ giúp cân bằng cung cầu mà còn hỗ trợ điều chỉnh tần số và điện áp, nâng cao độ tin cậy của lưới điện.

Tích hợp trí tuệ nhân tạo (AI) và các thuật toán điều khiển tiên tiến:

- Việc ứng dụng AI trong quản lý và vận hành VPP sẽ giúp tối ưu hóa việc điều phối nguồn điện theo thời gian thực.
- Các thuật toán học máy có thể dự báo nhu cầu tiêu thụ điện và điều chỉnh công suất phát phù hợp, giúp giảm chi phí vận hành và tăng hiệu suất hệ thống.

Kết nối với lưới điện thông minh (Smart Grid):

- Trong tương lai, VPP có thể trở thành một phần quan trọng trong mô hình lưới điện thông minh, giúp cải thiện khả năng phản ứng nhanh với các biến động của hệ thống.
- Việc kết nối VPP với các hệ thống tự động hóa và quản lý năng lượng sẽ giúp nâng cao khả năng tự điều chỉnh và phối hợp giữa các nguồn điện phân tán.

Nghiên cứu và phát triển chính sách hỗ trợ:

- Sự phát triển của VPP cần có sự hỗ trợ từ các chính sách về thị trường điện, cơ chế giá điện linh hoạt và các quy định kỹ thuật liên quan.
- Việc xây dựng khung pháp lý phù hợp sẽ khuyến khích đầu tư vào công nghệ VPP, đồng thời đảm bảo tính cạnh tranh và hiệu quả trong vận hành lưới điện.

Mở rộng mô hình VPP để tham gia thị trường dịch vụ phụ trợ, đánh giá hiệu quả kinh tế – kỹ thuật trong bối cảnh thị trường điện cạnh tranh.

Nhìn chung, VPP đóng vai trò quan trọng trong quá trình chuyển đổi năng lượng và hiện đại hóa hệ thống điện. Với những cải tiến trong công nghệ và chính sách hỗ trợ, VPP sẽ ngày càng trở thành giải pháp quan trọng để nâng cao tính bền vững, linh hoạt và hiệu quả của lưới điện trong tương lai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] P. TEAM, 28 2 2024. [Online]. Available: <https://pvcase.com/blog/renewable-energy-and-grid-stability-modern-infrastructure-challenges-and-solutions/>.
- [2] P. C. ENGINEERS, "PCENG," [Online]. Available: <https://www.pceng.com.au/challenges-of-integrating-distributed-and-renewable-energy-resources-with-the-grid>.
- [3] DIVERSEGY Commerical Energy Advisory, 10 3 2025. [Online]. Available: <https://diversegy.com/variable-renewable-energy/>.
- [4] A. N. G. & E. A. -. ANGEA. [Online]. Available: <https://angeassociation.com/location/vietnam/>. [Accessed 2025 1 23].
- [5] Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), "Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)," [Online]. Available: <https://www.pnnl.gov/explainer-articles/renewable-integration>. [Accessed 2 8 2025].
- [6] K. R. A. C. D. I. G. J. T. A. F.-L. Emmanuel Ejuh Che, "The Impact of Integrating Variable Renewable Energy Sources into Grid-Connected Power Systems: Challenges, Mitigation Strategies, and Prospects," *MPDI*, no. 689, 2025.
- [7] C. Turvill, "EEPOWER," 25 8 2023. [Online]. Available: <https://eepower.com/tech-insights/intermittent-and-volatile-renewable-energy-challenges-grid-stability/#>.
- [8] A. J. L. C. K. A. Thanh Nhan Koh, "CMS Law - tax - future," 22 2 2024. [Online]. Available: <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-renewable-energy/vietnam>.
- [9] M. J. A. Thu Nguyen, "WORLD RESOURCES INSTITUTE," 1 11 2024. [Online]. Available: <https://www.wri.org/insights/vietnam-direct-power-purchase-agreement>. [Accessed 28 12 2024].
- [10] K. L. Hoàng, "Renewable Energy Development in Vietnam - Current Situation and Solutions," *ResearchGate*, 2024.

- [11] M. Vu, "Vietnam Investment Review," 7 11 2024. [Online]. Available: <https://vir.com.vn/implementation-woes-hinder-clean-energy-projects-117428.html>.
- [12] N. T. T. Ngân, "Viet Nam Solar," 1 11 2023. [Online]. Available: <https://vietnamsolar.vn/nha-may-dien-ao/>.
- [13] V. N. T. X. A. Lê Kim Anh, "VIETNAM ENERGY," 26 8 2013. [Online]. Available: <https://nangluongvietnam.vn/cong-nghe-dieu-khien-nha-may-dien-ao-6259.html>.
- [14] NEXT KRAFTWERKER, "NEXT KRAFTWERKER," [Online]. Available: <https://www.next-kraftwerke.com/vpp>. [Accessed 18 4 2025].
- [15] C. J. X. W. Gao Zhang, "Comprehensive review on structure and operation of virtual power plant in electrical system," *The Institution of Engineering and Technology*, no. 10.1049/iet-gtd.2018.5880 , 2018.
- [16] C. ZHENWEI, "Virtual Power Plant Simulation and Control Scheme Design," no. XR-EE-ICS 2012:1513, 2012.