

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
ĐẠI HỌC BÁCH KHOA ĐÀ NẴNG

ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP CAPSTONE PROJECT

NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỆN
CHUYÊN NGÀNH: HỆ THỐNG ĐIỆN

ĐỀ TÀI:

*Nghiên cứu các giải pháp ứng dụng BESS nâng
cao ổn định lưới điện có SCR thấp khi tích hợp
năng lượng tái tạo*

Người hướng dẫn : PGS.TS. NGUYỄN HỮU HIẾU

ThS. TRẦN VIỆT THÀNH

Sinh viên thực hiện : Hoàng Cao Minh Hoàng

Số thẻ sinh viên : 105200127

Lớp: 20D2

Sinh viên thực hiện: Nguyễn Trí Đông

Số thẻ sinh viên: 105200119

Lớp: 20D2

ĐÀ NẴNG – 2025

TÓM TẮT

Tên đề tài: Nghiên cứu các giải pháp ứng dụng BESS nâng cao ổn định lưới điện có SCR thấp khi tích hợp năng lượng tái tạo

Sinh viên thực hiện 1: Hoàng Cao Minh Hoàng

Số thẻ sinh viên: 105200127 Lớp: 20D2

Sinh viên thực hiện 2: Nguyễn Trí Đông

Số thẻ sinh viên: 105200119 Lớp: 20D2

Đề án này tập trung giải quyết một trong những thách thức lớn nhất của hệ thống điện hiện đại: đảm bảo ổn định lưới điện khi tích hợp tỷ lệ cao các nguồn năng lượng tái tạo (NLTT). Sự gia tăng của các nguồn NLTT như điện mặt trời và điện gió, vốn là các nguồn dựa trên biến tần (IBR), làm suy giảm quán tính hệ thống và Tỷ số ngắn mạch (SCR), gây khó khăn cho việc điều khiển tần số và điện áp, đặc biệt tại các khu vực lưới điện yếu. Trong bối cảnh đó, Hệ thống lưu trữ năng lượng pin (BESS) nổi lên như một giải pháp công nghệ then chốt và hiệu quả. Đề tài được thực hiện nhằm nghiên cứu, phân tích và mô phỏng các giải pháp ứng dụng BESS để nâng cao độ ổn định cho lưới điện có SCR thấp.

NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

Họ tên sinh viên: Hoàng Cao Minh Hoàng

Số thẻ sinh viên: 105200127

Họ tên sinh viên: Nguyễn Trí Đông

Số thẻ sinh viên: 105200119

Lớp: 20D2

Khoa: Điện

Ngành: Kỹ thuật điện

- Tên đề tài đồ án: Nghiên cứu các giải pháp ứng dụng BESS nâng cao ổn định lưới điện có SCR thấp khi tích hợp năng lượng tái tạo
- Đề tài thuộc diện: ☐ Có ký kết thỏa thuận sở hữu trí tuệ đối với kết quả thực hiện
- Các số liệu và dữ liệu ban đầu:
Các số liệu về đường dây, máy biến áp, công suất phụ tải được cung cấp bởi ThS. Trần Viết Thành, Công ty tư vấn điện 4
- Nội dung các phần thuyết minh và tính toán:

STT	Họ và tên sinh viên	Nội dung
1	HOÀNG CAO MINH HOÀNG	-Tìm Hiểu lý thuyết về tỷ số ngắn mạch -Tìm hiểu hệ thống lưu trữ năng lượng BESS -Xây dựng mô hình hệ thống lưu trữ BESS trong hệ thống điện
2	NGUYỄN TRÍ ĐÔNG	-Mô phỏng và đánh giá ảnh hưởng của hệ thống điện khi có hệ thống BESS -Đánh giá hiệu quả của hệ thống BESS

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

.....
.....

- Họ tên người hướng dẫn:

-PGS.TS. Nguyễn Hữu Hiếu, Trường Đại học Bách khoa

-ThS. Trần Viết Thành, Công ty Tư vấn Điện 4

- Ngày giao nhiệm vụ đồ án: 20/02/2025

- Ngày hoàn thành đồ án: 10/6/2025

Đà Nẵng, ngày tháng năm 2025

Trưởng Bộ môn

Người hướng dẫn

LỜI NÓI ĐẦU

Với sự đồng ý của Khoa Điện, Trường Đại học Bách khoa Đà Nẵng, nhóm chúng em đã được thực hiện nghiên cứu đề tài: "Nghiên cứu các giải pháp ứng dụng BESS nâng cao ổn định lưới điện có SCR thấp khi tích hợp năng lượng tái tạo". Đây là một lĩnh vực mang tính thời sự, phức tạp và có ý nghĩa thực tiễn cao trong bối cảnh chuyển dịch năng lượng đang diễn ra mạnh mẽ tại Việt Nam và trên thế giới.

Để hoàn thành đồ án này, chúng em đã nhận được sự chỉ bảo, hướng dẫn tận tình và quý báu từ các thầy hướng dẫn là PGS.TS. Nguyễn Hữu Hiếu và ThS. Trần Viết Thành. Qua thời gian làm việc với các thầy, chúng em không chỉ được củng cố về kiến thức chuyên môn sâu rộng mà còn học hỏi được phương pháp nghiên cứu khoa học, tư duy phân tích hệ thống và tác phong làm việc nghiêm túc, chín chu. Chúng em xin được bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc nhất đến sự giúp đỡ tận tâm đó của các thầy.

Chúng em cũng xin chân thành cảm ơn các thầy, cô giáo trong Khoa Điện đã truyền đạt cho chúng em những kiến thức nền tảng vững chắc trong suốt những năm học vừa qua. Xin cảm ơn gia đình và bạn bè đã luôn ở bên cạnh động viên, hỗ trợ chúng em trong suốt quá trình thực hiện đồ án.

Quá trình thực hiện đồ án đã giúp chúng em hiểu rằng, để giải quyết một vấn đề kỹ thuật phức tạp của hệ thống điện, kiến thức học được ở nhà trường là chưa đủ, mà còn đòi hỏi sự tìm tòi, nghiên cứu tài liệu, kỹ năng sử dụng công cụ mô phỏng chuyên dụng và khả năng phân tích các kết quả một cách khách quan.

Thời gian 5 năm học tại trường Đại học đã kết thúc, và việc hoàn thành đồ án tốt nghiệp này là một cột mốc quan trọng. Tất cả những kiến thức và kinh nghiệm quý báu tích lũy được, đặc biệt là qua quá trình thực hiện đồ án, đã tạo cho chúng em sự tự tin để có thể bắt đầu công việc của một kỹ sư Hệ thống điện trong tương lai. Những thành quả này có được là nhờ sự hướng dẫn và chỉ bảo tận tình của các thầy giáo.

Một lần nữa, chúng em xin chân thành cảm ơn!

CAM ĐOAN LIÊM CHÍNH HỌC THUẬT

Chúng em xin chân thành cảm ơn sự hướng dẫn tận tình từ PGS.TS. Nguyễn Hữu Hiếu cùng sự hỗ trợ từ ThS. Trần Việt Thành, bạn bè và gia đình đã giúp chúng em hoàn thành đồ án này.

Các số liệu, kết quả được trình bày trong đồ án này là hoàn toàn trung thực, khách quan và chưa từng được công bố trong bất kỳ một công trình nào khác. Tất cả các tài liệu tham khảo, thông tin trích dẫn và mọi sự giúp đỡ trong quá trình thực hiện đồ án đều đã được ghi nhận, cảm ơn và chỉ rõ nguồn gốc đầy đủ, minh bạch.

Chúng em xin chịu hoàn toàn trách nhiệm trước Nhà trường và Khoa về tính xác thực, tính nguyên bản và nội dung của công trình nghiên cứu này.

Mặc dù đã rất cố gắng, đồ án không thể tránh khỏi thiếu sót. Kính mong nhận được ý kiến đóng góp quý báu để hoàn thiện.

Xin chân thành cảm ơn.

Đà Nẵng, ngày ... tháng ... năm 2025

Sinh viên thực hiện

Sinh viên thực hiện

Hoàng Cao Minh Hoàng

Nguyễn Trí Đông

MỤC LỤC

TÓM TẮT.....	I
NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP.....	II
LỜI NÓI ĐẦU.....	III
CAM ĐOAN LIÊM CHÍNH HỌC THUẬT.....	IV
MỤC LỤC.....	V
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ.....	VII
DANH MỤC CÁC BẢNG.....	VIII
DANH MỤC CÁC KÍ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT.....	IX
MỞ ĐẦU.....	1
CHƯƠNG 1.....	3
CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ TỶ SỐ NGẮN MẠCH (SCR).....	3
1.1. Khái niệm về tỉ số ngắn mạch SCR.....	3
1.2. Định nghĩa tỉ số ngắn mạch SCR.....	4
1.3. Các phương pháp tính toán SCR.....	5
1.4. Tầm quan trọng của SCR đối với sự ổn định của hệ thống điện.....	5
1.5. Giới hạn giá trị SCR.....	8
1.6. Các yếu tố ảnh hưởng đến SCR.....	8
CHƯƠNG 2.....	10
HỆ THỐNG LƯU TRỮ NĂNG LƯỢNG PIN.....	10
2.1. Tổng quan về hệ thống lưu trữ năng lượng BESS.....	10
2.1.1. Trên thế giới.....	10
2.1.2. Tại Việt Nam.....	11
2.2. Mô hình hệ thống BESS.....	12
2.2.1. Hiệu quả của BESS trong việc nâng cao ổn định tần số.....	16
2.2.1.1. Hiệu quả của BESS trong Điều chỉnh Tần số Sơ cấp.....	18

2.2.2. Phản ứng của BESS với điều khiển Droop khi hệ thống thiếu hụt/dư thừa công suất	19
2.2.3. Mô hình phản hồi Trạng thái sạc – State of Charge Feedback Model	22
2.2.3.1. Phản ứng của BESS khi Trạng thái sạc (SOC) thấp	24
2.2.3.2. Phản ứng của BESS khi Trạng thái sạc (SOC) cao	26
2.2.4. Mô hình Pin	27
2.2.5. Mô hình tối ưu hệ thống BESS.....	30
2.2.5.1. Ràng buộc công suất của BESS.....	30
2.2.5.2. Ràng buộc về tỉ lệ cắt giảm công suất mong đợi	32
CHƯƠNG 3	34
KẾT QUẢ MÔ PHỎNG	34
3.1. Lựa chọn hệ thống điện điển hình để mô phỏng.....	34
3.2. Mô hình và kịch bản mô phỏng	34
3.3. Kết quả tính toán	41
3.3.1 Xác định vị trí lắp đặt BESS	41
3.3.2. Kịch bản 1 : Suy giảm đột ngột công suất phát của các nhà máy điện mặt trời.....	42
3.3.3. Kịch bản 2: Sự cố tách đột ngột một phần phụ tải lớn khỏi lưới điện	49
CHƯƠNG 4.....	53
THẢO LUẬN VÀ ĐÁNH GIÁ	53
4.1. Đánh giá hiệu quả của BESS trong việc nâng cao ổn định hệ thống.....	53
4.2. So sánh hiệu quả của các cấu hình BESS	54
4.3. Thách thức và hạn chế.....	54
4.4. Đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo	55
KẾT LUẬN	57
TÀI LIỆU THAM KHẢO	58

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 1.1 Ví dụ về Kết quả Tỷ lệ Ngắn mạch trong Khu vực Đa Mạng lưới – Các Vấn đề Ổn định Chưa Được Nghiên Cứu hoặc Vấn đề Phối hợp Mô hình tại Các Khu vực Ranh giới	7
Hình 2.1. Chi phí dự án và tổng dung lượng BESS trên toàn cầu giai đoạn 2010 – 2023	10
Hình 2.2. Các loại dịch vụ được hệ thống lưu trữ điện năng cung cấp	13
Hình 2.3. Sơ đồ minh họa hệ thống lưu trữ pin và đấu nối lưới.....	13
Hình 2.4. Các ứng dụng của hệ thống pin tùy vào cấp điện áp và loại hình ứng dụng.	15
Hình 2.5. Các cấp độ điều khiển trong hệ thống BESS.....	17
Hình 2.6. Dịch vụ hỗ trợ tần số	18
Hình 2.7 Khung điều khiển BESS trong DigSilent	19
Hình 2.8. P-Q Control	20
Hình 2.9. Frequency Controller	20
Hình 2.10. Mối quan hệ giữa công suất và tần số	21
Hình 2.11. Charge Control_charging and FRT	23
Hình 2.12. Sơ đồ khối mô hình phản hồi trạng thái sạc	23
Hình 2.13. Chu kỳ sạc so với DoD của pin Li-ion	29
Hình 3.1. Công suất ngắn mạch của các nhà máy năng lượng tái tạo.....	41
Hình 3.2. Công suất phát của nhà máy điện mặt trời PV1 bị giảm đột ngột.....	42
Hình 3.3. Đáp ứng tần số hệ thống trong các trường hợp tại kịch bản 1	43
Hình 3.4. Đáp ứng tần số hệ thống trong các trường hợp tại kịch bản 2	44
Hình 3.5. Công suất BESS bơm vào hệ thống	46
Hình 3.6. Đáp ứng tần số hệ thống trong các trường hợp tại trường hợp 3	46
Hình 3.7. Dao động điện áp trên các thanh cái tại trường hợp 1 kịch bản 1	48
Hình 3.8. Dao động điện áp trên các thanh cái tại trường hợp 3 kịch bản 1	49
Hình 3.9. Đáp ứng tần số hệ thống trong các trường hợp tại kịch bản 2	50
Hình 3.10. Trạng thái của BESS	51
Hình 3.11. Dao động điện áp trên các thanh cái tại trường hợp 1 kịch bản 2	51
Hình 3.12. Dao động điện áp trên các thanh cái tại trường hợp 3 kịch bản 2	52

DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 1.1 Mức độ ổn định hệ thống điện theo giá trị SCR	8
Bảng 2.1. Một số hệ thống BESS công suất vừa được lắp đặt tại Việt Nam	11
Bảng 2.2. Ưu điểm của Pin Lithium-ion	29
Bảng 3.1. Dữ liệu tổ máy phát và công suất trong hệ thống điện 39 Bus đã cải tạo.....	35
Bảng 3.2. Nhu cầu phụ tải	37
Bảng 3.3. Dữ liệu đường dây dựa trên 100 MVA và 50 Hz	38
Bảng 3.4. Dữ liệu máy biến áp dựa trên 100 MVA	39
Bảng 3.5. Dữ liệu máy biến áp trong mô hình PowerFactory	40
Bảng 3.6 Tỷ lệ SCR tại các bus có nhà máy NLTT	41

DANH MỤC CÁC KÍ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Tên đầy đủ (Tiếng Việt)	Tên đầy đủ (Tiếng Anh)
BESS	Hệ thống lưu trữ năng lượng pin	Battery Energy Storage System
NLTT	Năng lượng tái tạo	Renewable Energy
SCR	Tỷ số ngắn mạch	Short Circuit Ratio
IBR	Nguồn Dựa Trên Biến Tần	Inverter-Based Resources
DG	Nguồn phân tán	Distributed Generation
WPP	Nhà máy điện gió	Wind Power Plants
PV	Điện mặt trời	Photovoltaic
SOC	Trạng thái sạc	State of Charge
BMS	Hệ thống quản lý pin	Battery Management System
EMS	Hệ thống quản lý năng lượng	Energy Management System
PCS	Bộ biến đổi công suất	Power Conversion System
TMS	Hệ thống quản lý nhiệt	Thermal Management System
FRT	Khả năng chịu đựng sự cố	Fault Ride-Through
PFC	Điều chỉnh tần số sơ cấp	Primary Frequency Control
DoD	Độ xả sâu	Depth of Discharge
RoCoF	Tốc độ thay đổi tần số	Rate of Change of Frequency

MỞ ĐẦU

❖ Mục đích thực hiện đề tài

Sự phát triển mạnh mẽ của năng lượng tái tạo (NLTT) trên toàn cầu và tại Việt Nam là một giải pháp then chốt cho các vấn đề về biến đổi khí hậu và an ninh năng lượng. Tuy nhiên, việc tích hợp NLTT với tỷ lệ ngày càng cao vào lưới điện quốc gia đã và đang đặt ra nhiều thách thức đáng kể cho việc vận hành và đảm bảo ổn định hệ thống. Các nguồn NLTT, khác với nhà máy điện truyền thống, gây ra các vấn đề như suy giảm quán tính hệ thống, khó khăn trong điều tần và điều áp.

Các giải pháp truyền thống như cắt giảm sản lượng NLTT không mang lại hiệu quả kinh tế lâu dài, trong khi việc đầu tư vào hạ tầng truyền tải mới lại tốn kém và mất nhiều thời gian. Trong bối cảnh đó, Hệ thống lưu trữ năng lượng pin (BESS) nổi lên như một giải pháp hiệu quả để khắc phục những thách thức này. Xuất phát từ thực tiễn cấp thiết đó, đề tài "Nghiên cứu các giải pháp ứng dụng BESS nâng cao ổn định lưới điện có SCR thấp khi tích hợp năng lượng tái tạo" được thực hiện.

❖ Mục tiêu của đề tài

Đề tài hướng tới đạt được các mục tiêu như sau:

Nghiên cứu lý thuyết và tác động của NLTT: Nghiên cứu sâu sắc cơ sở lý thuyết về SCR và tầm quan trọng của nó đối với ổn định hệ thống điện. Phân tích các tác động tiêu cực của việc tích hợp NLTT quy mô lớn đến SCR và các vấn đề ổn định liên quan như ổn định điện áp, tần số và quá độ.

Nghiên cứu về BESS: Tổng quan về công nghệ BESS, nguyên lý hoạt động, cấu trúc và khả năng cung cấp các dịch vụ phụ trợ cho lưới điện.

Đánh giá và đề xuất giải pháp: Đánh giá vai trò của BESS trong việc cải thiện các chỉ số ổn định và đề xuất các thuật toán điều khiển phù hợp để khai thác tối đa hiệu quả của hệ thống.

❖ Phạm vi và đối tượng nghiên cứu :

Phạm vi nghiên cứu : Xác định vị trí lắp đặt của BESS

Đối tượng nghiên cứu: Đối tượng chính là các giải pháp ứng dụng BESS để nâng cao

ổn định lưới điện có SCR thấp khi tích hợp NLTT , được mô phỏng trên hệ thống điện thử nghiệm IEEE 39-bus đã được cải tiến.

❖ Phương pháp nghiên cứu

Để đạt được các mục tiêu trên, đề tài sử dụng các phương pháp nghiên cứu sau:

Mô phỏng và đánh giá: Xây dựng mô hình hệ thống điện thử nghiệm IEEE 39-bus đã được cải tiến trên phần mềm chuyên dụng DIgSILENT PowerFactory để thể hiện một lưới điện có đặc điểm SCR thấp và tích hợp NLTT. Sau đó, tiến hành mô phỏng các kịch bản sự cố khác nhau để đánh giá hiệu quả của các giải pháp ứng dụng BESS đã đề xuất.

❖ Cấu trúc đồ án tốt nghiệp

Nội dung của đồ án được trình bày qua các chương sau:

- NHẬN XÉT CỦA NGƯỜI HƯỚNG DẪN
- NHẬN XÉT CỦA NGƯỜI PHẢN BIỆN
- NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP
- LỜI NÓI ĐẦU
- CAM ĐOAN
- MỤC LỤC
- DANH SÁCH CÁC BẢNG, HÌNH VẼ
- DANH SÁCH CÁC KÝ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT
- MỞ ĐẦU
- **CHƯƠNG 1: CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ TỶ SỐ NGẮN MẠCH (SCR)**
- **CHƯƠNG 2: HỆ THỐNG LƯU TRỮ NĂNG LƯỢNG PIN**
- **CHƯƠNG 3: KẾT QUẢ MÔ PHỎNG**
- **CHƯƠNG 4: THẢO LUẬN VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ**
- KẾT LUẬN
- TÀI LIỆU THAM KHẢO

CHƯƠNG 1

CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ TỶ SỐ NGẮN MẠCH (SCR)

1.1. Khái niệm về tỉ số ngắn mạch SCR

Trong các hệ thống điện truyền thống, phần lớn công suất được sản xuất bởi các nhà máy điện sử dụng máy phát đồng bộ. Đặc trưng vốn có của máy phát đồng bộ là khả năng cung cấp một lượng lớn dòng điện ngắn mạch khi xảy ra sự cố trên lưới. Dòng ngắn mạch này, cùng với quán tính quay của các khối rotor, đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì sự ổn định của hệ thống về cả tần số và điện áp. Một hệ thống điện với nhiều máy phát đồng bộ lớn và mạng lưới truyền tải dày đặc thường được coi là "mạnh" hoặc "cứng", ít bị ảnh hưởng bởi các biến động công suất nhỏ.

Tuy nhiên, với xu hướng phát triển năng lượng tái tạo (NLTT) và tích hợp các nguồn phân tán (Distributed Generation - DG) vào lưới điện, cấu trúc và đặc tính vận hành của hệ thống đang thay đổi đáng kể. Các nguồn NLTT như điện gió (Wind Power Plants - WPP) và điện mặt trời (Photovoltaic - PV) thường được kết nối với lưới điện thông qua các bộ biến đổi điện tử công suất, được gọi chung là các Nguồn Dựa Trên Biến Tần (Inverter-Based Resources - IBRs). Không giống như máy phát đồng bộ, IBRs có quán tính quay thực tế bằng không hoặc rất thấp (trong trường hợp tuabin gió có quán tính cơ học nhưng được tách khỏi lưới AC bởi bộ biến đổi) và khả năng cung cấp dòng ngắn mạch của chúng bị hạn chế nghiêm ngặt bởi thiết kế và thuật toán điều khiển của bộ biến đổi để bảo vệ các linh kiện bán dẫn. Thông thường, dòng ngắn mạch tối đa mà một IBR có thể cung cấp chỉ giới hạn ở mức 1.0 - 1.2 lần dòng điện định mức, thấp hơn nhiều so với khả năng của máy phát đồng bộ (có thể lên tới 5 - 10 lần dòng định mức).

Sự thay thế dần các máy phát đồng bộ bằng IBRs làm giảm tổng quán tính của hệ thống và đặc biệt là làm giảm khả năng cung cấp dòng ngắn mạch tại nhiều điểm trên lưới. Trong bối cảnh này, **Tỷ số Ngắn mạch (SCR)** trở thành một chỉ số ngày càng quan trọng để đánh giá "độ mạnh" cục bộ của lưới điện tại điểm đấu nối của các nguồn phát. SCR cung cấp một thước đo định lượng về khả năng của lưới điện trong việc duy trì điện áp ổn định tại điểm đó khi có sự thay đổi công suất từ nguồn phát,

1.2. Định nghĩa tỉ số ngắn mạch SCR

Tỷ số Ngắn mạch (SCR) tại một điểm kết nối trong hệ thống điện được định nghĩa là tỷ số giữa công suất ngắn mạch ba pha tại điểm đó (trước khi đầu nối nguồn phát mới) và công suất định mức của nguồn phát điện mới được kết nối. Công suất ngắn mạch ba pha (ký hiệu SSC) là một đại lượng đặc trưng cho khả năng chịu tải và độ cứng của lưới điện tại một điểm nhất định.

Công thức tính SCR được biểu diễn như sau:

$$SCR = \frac{S_{SC}}{P_R}$$

Trong đó:

- S_{SC} : Công suất ngắn mạch ba pha tại điểm kết nối (đơn vị thường dùng: MVA). Công suất ngắn mạch tại một điểm phản ánh khả năng của hệ thống cung cấp dòng điện sự cố đến điểm đó. Giá trị này phụ thuộc vào tổng trở tương đương của hệ thống nhìn từ điểm kết nối. Lưới điện càng "mạnh" (tổng trở tương đương càng nhỏ) thì SSC càng lớn.
- P_R : Công suất định mức của nguồn phát điện mới được kết nối (đơn vị thường dùng: MW). Đối với các nguồn NLTT như điện gió và điện mặt trời, P_R thường là công suất tác dụng định mức của nhà máy.

Giải thích mối liên hệ với tổng trở lưới:

Công suất ngắn mạch SSC tại một điểm có thể được tính toán dựa trên điện áp định mức tại điểm đó (V_{DM}) và tổng trở tương đương của hệ thống nhìn từ điểm đó (Z_{TD}). Bỏ qua điện trở và chỉ xét điện kháng (X_{TD}), công suất ngắn mạch có thể xấp xỉ bằng:

$$S_{SC} \approx \frac{V_{DM}^2}{X_{TD}}$$

Khi đó, công thức SCR có thể được viết lại như sau:

$$SCR = \frac{V_{DM}^2 / X_{TD}}{P_R}$$

Từ công thức này, ta thấy SCR tỷ lệ nghịch với điện kháng tương đương của lưới điện tại điểm đầu nối. Lưới điện "yếu" có tổng trở tương đương lớn (điện kháng lớn), dẫn đến SSC nhỏ và SCR thấp. Ngược lại, lưới điện "mạnh" có tổng trở tương đương nhỏ (điện kháng nhỏ), dẫn đến S_{SC} lớn và SCR cao.

SCR là một đại lượng không thứ nguyên. Giá trị SCR cung cấp cái nhìn định lượng về mức độ "mạnh" hay "yếu" của lưới điện tại điểm đấu nối so với quy mô của nguồn phát mới.

1.3. Các phương pháp tính toán SCR

Việc tính toán SCR có thể được thực hiện thông qua nhiều phương pháp khác nhau, tùy thuộc vào độ phức tạp của hệ thống và mục đích phân tích:

Phương pháp tính toán thủ công/giải tích: Đối với các hệ thống đơn giản, SCR có thể được tính toán bằng cách xác định tổng trở Thevenin tại điểm kết nối. Phương pháp này phù hợp cho việc phân tích sơ bộ nhưng trở nên phức tạp đối với các lưới điện lớn và phức tạp với nhiều thành phần.

Phương pháp dựa trên mô phỏng phần mềm: Việc sử dụng các phần mềm chuyên dụng để phân tích hệ thống điện như DIgSILENT PowerFactory, PSS/E, ETAP hoặc PSCAD/EMTDC là phương pháp phổ biến và mang lại độ chính xác cao nhất trong việc tính toán SCR cho các hệ thống thực tế. Các phần mềm này cho phép xây dựng mô hình chi tiết của lưới điện và thực hiện phân tích ngắn mạch ba pha tại bất kỳ vị trí nào để xác định giá trị dòng ngắn mạch đối xứng (SCC), từ đó tính toán được tỉ lệ ngắn mạch (SCR)

Phương pháp dựa trên đo lường: Trong một số trường hợp, SCC tại một điểm có thể được ước tính dựa trên dữ liệu đo lường dòng điện và điện áp trong các điều kiện vận hành cụ thể hoặc khi xảy ra sự cố. Tuy nhiên, phương pháp này thường kém chính xác hơn và phụ thuộc vào chất lượng dữ liệu đo lường.

1.4. Tầm quan trọng của SCR đối với sự ổn định của hệ thống điện

SCR là một chỉ số kỹ thuật thiết yếu, ảnh hưởng sâu sắc đến nhiều khía cạnh ổn định và vận hành của hệ thống điện, đặc biệt khi tích hợp các IBRs:

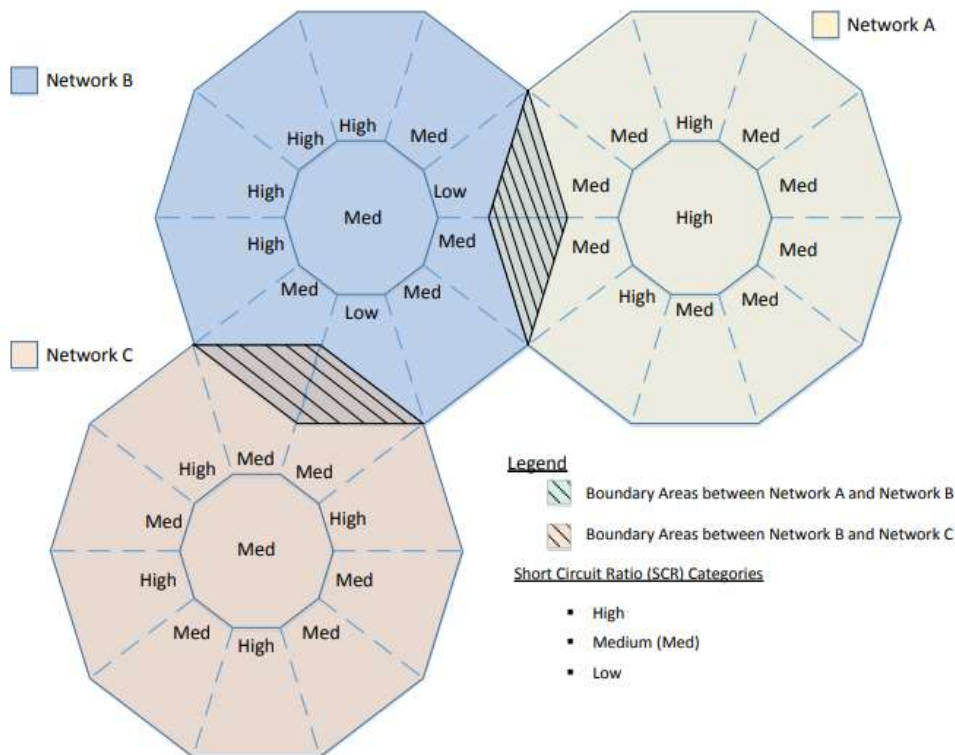
- Ổn định điện áp (Voltage Stability): Đây là vai trò quan trọng nhất của SCR. SCR phản ánh trực tiếp độ nhạy cảm của điện áp tại một bus đối với sự thay đổi công suất tác dụng và phản kháng.
 - SCR cao: Lưới điện "mạnh". Điện áp tại bus ít bị ảnh hưởng khi nguồn phát thay đổi công suất. Hệ thống có khả năng duy trì điện áp trong giới hạn cho phép tốt hơn, ngay cả sau các nhiễu loạn lớn.

- SCR thấp: Lưới điện "yếu". Điện áp tại bus rất nhạy cảm với sự thay đổi công suất. Các biến động công suất nhỏ từ nguồn phát cũng có thể gây ra dao động điện áp lớn. Lưới yếu dễ gặp các vấn đề sụt/tăng áp cục bộ, khó khăn trong điều khiển điện áp, và có nguy cơ mất ổn định điện áp nghiêm trọng sau các sự cố.
- Tương tác giữa lưới điện và IBRs: Hoạt động ổn định của các IBRs phụ thuộc nhiều vào điều kiện lưới điện tại điểm đầu nối. Bộ điều khiển của IBRs cần thông tin chính xác về điện áp, tần số và góc pha của lưới để đồng bộ và điều khiển công suất.
 - Trong lưới yếu (SCR thấp), điện áp và tần số có thể bị méo mó hoặc dao động bất thường, gây khó khăn cho các thuật toán đồng bộ và điều khiển của IBRs. Điều này có thể dẫn đến hoạt động không ổn định, phát sinh hài, hoặc thậm chí là IBR bị ngắt kết nối khỏi lưới.
 - Một số thuật toán điều khiển IBR truyền thống được thiết kế cho lưới mạnh có thể hoạt động kém hiệu quả hoặc không ổn định trong lưới yếu.
- Đáp ứng tần số (Frequency Response) và Ổn định Quá độ (Transient Stability): Mặc dù SCR chủ yếu liên quan đến điện áp, nó có thể ảnh hưởng gián tiếp đến các khía cạnh ổn định khác.
 - Trong hệ thống có quán tính tổng thể giảm do thay thế máy phát đồng bộ bằng IBRs, một lưới điện yếu (SCR thấp) có thể biểu hiện độ vồng/vọt tần số lớn hơn và thời gian phục hồi lâu hơn sau các sự cố mất cân bằng công suất (ví dụ: mất nguồn lớn, tăng/giảm phụ tải đột ngột).
 - SCR thấp cũng có thể làm phức tạp các hiện tượng dao động công suất và điện áp trong quá trình quá độ sau sự cố, ảnh hưởng đến khả năng phục hồi ổn định của hệ thống.
- Khả năng chịu đựng sự cố ngắn mạch và hoạt động của hệ thống bảo vệ: SCR cao thường tương ứng với khả năng cung cấp dòng ngắn mạch lớn. Dòng ngắn mạch đủ lớn là cần thiết cho hoạt động chính xác và nhanh chóng của các thiết bị bảo vệ (rơ le, máy cắt).
 - Trong lưới yếu (SCR thấp), dòng ngắn mạch có thể thấp hơn ngưỡng hoạt động của rơ le bảo vệ, dẫn đến rơ le không tác động hoặc tác động chậm, làm kéo dài thời gian sự cố và tăng nguy cơ hư hỏng thiết bị hoặc mất ổn

định hệ thống trên diện rộng.

- Tạo điều kiện tích hợp NLTT: Duy trì SCR nằm trong khoảng cho phép tại điểm đầu nối là yếu tố quan trọng để các nhà máy NLTT (đặc biệt là quy mô lớn) hoạt động ổn định và tuân thủ các quy định lưới điện (Grid Codes). Các quy định lưới điện ngày càng yêu cầu các nhà máy NLTT phải có khả năng hỗ trợ lưới (ví dụ: khả năng chịu đựng sự cố - Fault Ride-Through - FRT, khả năng điều khiển điện áp). Khả năng thực hiện các chức năng này của IBRs phụ thuộc nhiều vào SCR tại điểm đầu nối.

Hình 1.1 là một sơ đồ mô tả kết quả SCR cho ba mạng lưới, trong đó các khu vực kết nối của chúng được thể hiện bằng các vùng chồng lấn trong sơ đồ. Các danh mục SCR cho từng phần trong một mạng lưới xuất hiện trong các vùng hình thang hoặc hình thập giác. Điểm SCR bên trong là điểm số mạng lưới nội bộ. Các khu vực của Mạng A có SCR cao, ngoại trừ một phần. Mạng B có sự pha trộn giữa điểm SCR thấp và cao. Các khu vực của Mạng C đều có SCR cao.



Hình 1.1 Ví dụ về Kết quả Tỷ lệ Ngắn mạch trong Khu vực Đa Mạng lưới – Các Vấn đề Ổn định Chưa Được Nghiên Cứu hoặc Vấn đề Phối hợp Mô hình tại Các Khu vực Ranh giới. Các điểm SCR thấp của Mạng B không khớp với điểm số tại khu vực liên kết với Mạng A. Sự không đồng nhất của điểm SCR có thể là kết quả của một vấn đề ổn định chưa

được nghiên cứu hoặc có thể do vấn đề phối hợp và mô hình hóa giữa các khu vực. Tương tự, điều này cũng có thể áp dụng khi so sánh khu vực liên kết của Mạng B với Mạng C.

1.5. Giới hạn giá trị SCR

Không có một ngưỡng SCR tối thiểu được tiêu chuẩn hóa chung cho tất cả các hệ thống điện trên thế giới, vì giá trị này phụ thuộc vào nhiều yếu tố như cấu trúc lưới, công nghệ nguồn phát, yêu cầu về độ tin cậy, và chiến lược vận hành. Tuy nhiên, dựa trên kinh nghiệm thực tế và các nghiên cứu, có thể đưa ra phân loại mức độ mạnh yếu của lưới điện dựa trên SCR tại điểm đầu nối như sau:

SCR	Đánh giá
$SCR > 3$	Hệ thống mạnh, vận hành ổn định
$1.5 < SCR < 3$	Hệ thống có thể chấp nhận được nhưng có nguy cơ mất ổn định trong một số điều kiện
$SCR < 1.5$	Hệ thống yếu, dễ bị mất ổn định cần có biện pháp cải thiện

Bảng 1.1 Mức độ ổn định hệ thống điện theo giá trị SCR

Trong bối cảnh gia tăng NLTT, nhiều điểm đầu nối trên lưới điện, đặc biệt là ở các khu vực xa trung tâm phụ tải hoặc có mật độ NLTT cao, đang có xu hướng giảm SCR xuống dưới 1.5. Điều này đặt ra những thách thức lớn cho công tác quy hoạch, vận hành và điều khiển hệ thống điện.

Theo một số tài liệu, lưới điện được coi là "lưới lớn" (lưới mạnh) khi $SCR > 20$, và được xem là "lưới nhỏ" (lưới yếu) khi $SCR < 20$.

1.6. Các yếu tố ảnh hưởng đến SCR

SCR có thể thay đổi theo thời gian do nhiều yếu tố tác động đến độ mạnh của hệ thống tại một điểm kết nối. Loại nguồn điện trong hệ thống là một yếu tố quan trọng, khi có nhiều máy phát điện đồng bộ, SCR sẽ cao hơn do chúng cung cấp công suất ngắn

mạch lớn, trong khi các nguồn phát sử dụng inverter thường làm giảm công suất SCR do hạn chế về khả năng cung cấp công suất ngắn mạch. Hệ thống truyền tải cũng ảnh hưởng đáng kể, nếu đường dây có khả năng chịu tải cao, SCR sẽ tăng và ngược lại, Ngoài ra, việc bảo trì và vận hành hệ thống, chẳng hạn như một số nhà máy điện hoặc đường dây truyền tải ngừng hoạt động để bảo trì, có thể khiến SCR giảm đáng kể. Việc bổ sung hoặc loại bỏ các máy phát điện cũng ảnh hưởng đến SCR, khi một nhà máy điện đồng bộ bị loại bỏ hoặc một nhà máy năng lượng tái tạo được thêm vào, SCR tại khu vực đó có thể thay đổi theo xu hướng giảm xuống làm tăng nguy cơ mất ổn định hệ thống

Các yếu tố chính :

- Nguồn điện
- Tổng trở hệ thống truyền tải và phân phối
- Máy phát điện đồng bộ và các đặc tính của nó
- Đóng góp dòng ngắn mạch hạn chế của IBR
- Các công cụ bù công suất phản kháng (tụ điện, STATCOM)
- Tải hệ thống

Các đợt bảo trì truyền tải và phát điện là một ví dụ về những thay đổi tạm thời trong mạng lưới, các đợt bảo trì này có thể làm suy yếu điểm liên kết mạng (SCR). Nhiều thay đổi trong cùng một khu vực địa lý (cùng 1 thanh cái) có thể làm suy yếu lưới điện. Việc nghiên cứu các loại thay đổi mạng lưới này nên được thực hiện trong giai đoạn nghiên cứu kết nối liên mạng của một dự án hoặc có thể được xem xét trong các nghiên cứu quy hoạch tiếp theo khi có mạng lưới trải qua nhiều thay đổi hệ thống trong một khoảng thời gian. Vì các phương pháp phân tích và công cụ hiện có chưa phù hợp để nghiên cứu rủi ro quy mô lớn của nhiều nhà máy trên khu vực rộng lớn, nên kết quả phân tích chi tiết của một số nhà máy cần được mở rộng sang khu vực lớn hơn bằng phương pháp thực tiễn hơn.

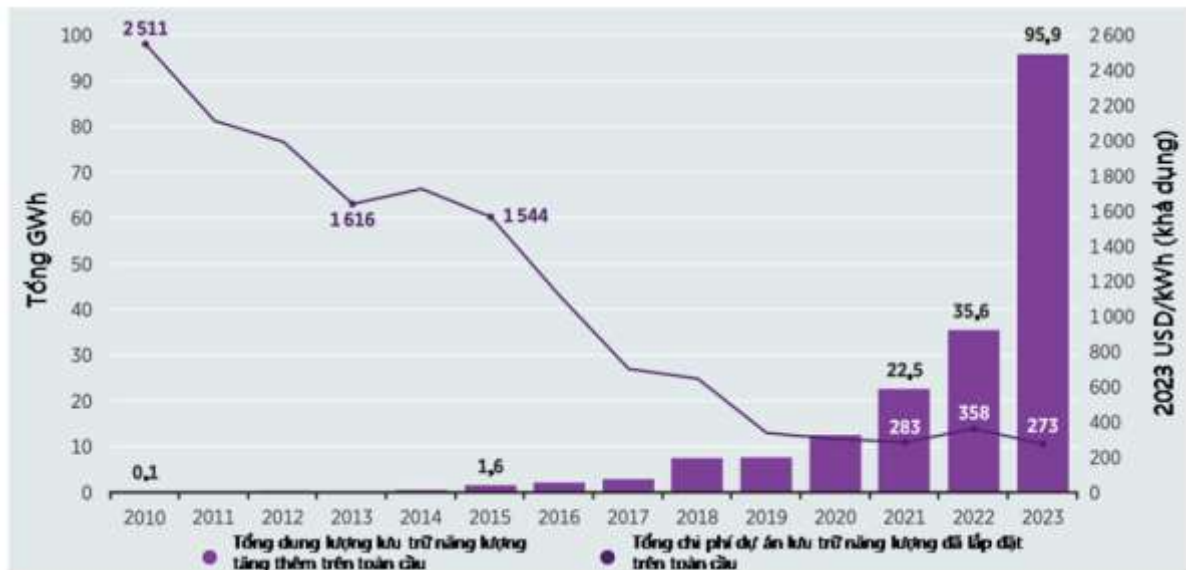
CHƯƠNG 2

HỆ THỐNG LƯU TRỮ NĂNG LƯỢNG PIN

2.1. Tổng quan về hệ thống lưu trữ năng lượng BESS

2.1.1. Trên thế giới

Theo báo cáo chuyên sâu từ Cơ quan Năng lượng Tái tạo Quốc tế (IRENA), quy mô triển khai hệ thống BESS trên toàn cầu đã có sự gia tăng vượt bậc. Cụ thể, tổng công suất lắp đặt mới hàng năm của hệ thống BESS đã nhảy vọt từ mức chỉ 0,1 GWh vào năm 2010 lên tới con số ấn tượng là 95,9 GWh vào năm 2023 (Tham khảo Hình 2.1). Sự tăng trưởng này đặc biệt bùng nổ trong giai đoạn gần đây. Chỉ tính riêng trong năm 2023, công suất BESS tăng thêm trên toàn cầu đã đạt mức cao kỷ lục, gần gấp ba lần so với lượng công suất được bổ sung trong năm 2022. Đóng góp chính vào sự tăng trưởng mạnh mẽ này đến từ hai thị trường lớn là Trung Quốc và Hoa Kỳ, chiếm lần lượt gần một nửa và khoảng một phần tư tổng công suất lắp đặt mới toàn cầu trong năm 2023.



Hình 2.1. Chi phí dự án và tổng dung lượng BESS trên toàn cầu giai đoạn 2010 – 2023

Song hành với sự gia tăng về quy mô triển khai là sự sụt giảm đáng kể về chi phí đầu tư cho các dự án lưu trữ điện năng. Trong giai đoạn từ năm 2010 đến năm 2023, chi phí đầu tư trung bình cho mỗi kilowatt giờ (kWh) công suất lưu trữ đã giảm tới 89%, xuống còn khoảng 273 USD/kWh. Xu hướng giảm chi phí này là yếu tố then chốt thúc đẩy khả năng tiếp cận và triển khai BESS trên diện rộng, làm cho công nghệ lưu trữ năng lượng

trở nên kinh tế và khả thi hơn cho nhiều ứng dụng khác nhau trên lưới điện.

Sự kết hợp giữa tăng trưởng công suất lắp đặt vượt bậc và giảm chi phí sâu sắc cho thấy BESS đang trở thành một trụ cột quan trọng trong hệ thống năng lượng tương lai, hỗ trợ mạnh mẽ cho mục tiêu chống biến đổi khí hậu và đảm bảo an ninh năng lượng. Những số liệu do IRENA cung cấp đã minh chứng rõ ràng cho động lực phát triển mạnh mẽ và tiềm năng to lớn của thị trường lưu trữ năng lượng pin toàn cầu trong thập kỷ vừa qua.

2.1.2. Tại Việt Nam

Theo xu hướng tích hợp năng lượng tái tạo, Việt Nam đã bắt đầu triển khai ứng dụng hệ thống BESS từ 2019. Tuy vậy, do chưa có hệ thống chính sách và quy định hoàn thiện cho việc phát triển BESS, các hệ thống BESS tại Việt Nam chủ yếu là các hệ thống sau công tơ (công tơ điện) và nằm trong phân khúc công suất nhỏ (<100 kW) lắp tại các hộ gia đình có gắn điện mặt trời mái nhà. Ngoài ra, một số ít các hệ thống có công suất vừa (từ vài trăm kW) cũng đã được lắp đặt sau công tơ hoặc lưới điện nhỏ tách lưới, ví dụ như các hệ thống tại PECC2, đảo Bạch Long Vĩ và Trung tâm dữ liệu của điện lực TP.HCM và hệ thống BESS sau công tơ do Vinfast vừa lắp đặt năm 2024

Vị trí, Thời gian vận hành	Loại pin, Công suất, dung lượng	Phân loại	Nguồn năng lượng tại chỗ tích hợp và công suất	Ứng dụng chủ yếu
PECC2 Innovation Hub, 2021	Li-ion, 750 kW, 2.557 kWh	Sau công tơ	Điện mặt trời áp mái: 420 kWp	Tối ưu tiêu thụ năng lượng
Đảo Bạch Long Vĩ, 2021	Li-ion, 630 kW, 2.000 kWh	Lưới điện nhỏ	Điện mặt trời: 504 kWp; Tuabin gió: 1 MW	Bảo đảm cung cấp điện liên tục cho lưới điện nhỏ tách lưới
EVNHCMC, 2023	Li-ion, 312 kW, 432 kWh	Sau công tơ	Điện mặt trời áp mái: 137 kWp	Đảm bảo cung cấp điện liên tục cho phụ tải thiết yếu
Vinpearl Nha Trang, 2024	LFP, 1.850 kW, 3.700 kWh	Sau công tơ	Không tích hợp	Mua bán năng lượng

Bảng 2.1. Một số hệ thống BESS công suất vừa được lắp đặt tại Việt Nam

Theo Quy hoạch điện VIII, Việt Nam hướng tới việc chuyển dịch năng lượng mạnh mẽ

từ nhiên liệu hóa thạch sang các nguồn năng lượng mới, năng lượng tái tạo, đáng chú ý là điện gió và điện mặt trời. Đến năm 2030, tổng công suất năng lượng tái tạo biến đổi (điện gió và điện mặt trời) sẽ chiếm 32,8% tổng công suất nguồn phục vụ nhu cầu trong nước và chiếm hơn 54,6% so với phụ tải cực đại được dự báo.

Trong khi đó, Việt Nam hiện chưa có hệ thống lưu trữ quy mô lớn nào trên lưới điện phục vụ mục đích bảo đảm công suất hoặc cân bằng năng lượng. Việc lắp đặt các nguồn lưu trữ năng lượng, trong đó có BESS và thủy điện tích năng, là cần thiết để duy trì tính ổn định của hệ thống điện trong tương lai, góp phần giải quyết các thách thức nói trên, đặc biệt là các thách thức trong vận hành hệ thống điện truyền tải. Theo đó, Quy hoạch điện VIII cũng đã đặt kế hoạch đến 2030 Việt Nam có 2.400 MW thủy điện tích năng và 300 MW BESS trước công tơ đi vào vận hành.

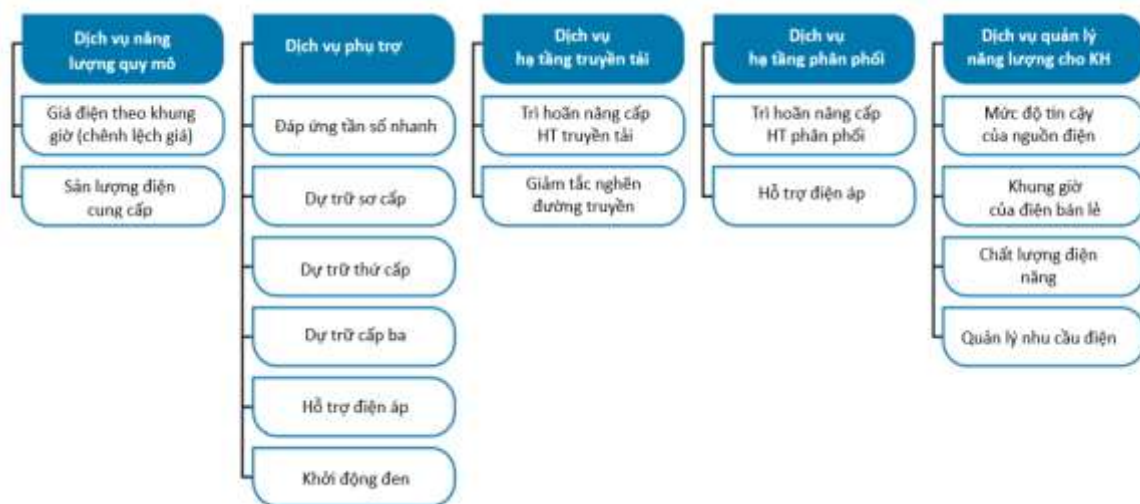
Ngoài nhu cầu lắp đặt BESS công suất lớn trên lưới điện quốc gia và BESS tích hợp tại chỗ nguồn năng lượng tái tạo nhằm đảm bảo ổn định lưới điện và tận dụng hiệu quả nguồn năng lượng tái tạo quy mô lớn, thị trường BESS sau công tơ tại Việt Nam cũng đang có động lực phát triển mạnh mẽ nhờ sự phát triển của các hệ thống năng lượng mặt trời mái nhà. Với cơ chế khuyến khích điện mặt trời mái nhà tự sản xuất, tự tiêu thụ trong Nghị định số 135/2024/NĐ-CP được ban hành ngày 22/10/2024, các nguồn điện mặt trời mái nhà sẽ được phát triển nhanh chóng bởi các hộ dân và các doanh nghiệp nhằm tiết kiệm chi phí điện năng và phục vụ mục tiêu chuyển đổi xanh. Việc này cũng sẽ dẫn đến nhu cầu lắp đặt BESS sau công tơ nhằm nâng cao hơn nữa hiệu quả sử dụng năng lượng mặt trời

2.2. Mô hình hệ thống BESS

Trong bối cảnh tỷ trọng năng lượng tái tạo (NLTT) như điện gió và điện mặt trời ngày càng tăng trong hệ thống điện, lưới điện hiện đại đang đối mặt với những thách thức đáng kể về nguồn cung cấp điện không ổn định và không chắc chắn. Sự biến động khó lường của NLTT đòi hỏi hệ thống phải có khả năng linh hoạt ứng phó để duy trì sự cân bằng và ổn định. Điều này đã thúc đẩy ngành điện nhận thấy vai trò ngày càng lớn mạnh của các công nghệ lưu trữ điện năng. Hệ thống lưu trữ năng lượng pin (Battery Energy Storage System - BESS) nổi lên như một giải pháp hiệu quả để giải quyết vấn đề này nhờ khả năng phản ứng nhanh và linh hoạt. BESS là một hệ thống tích hợp, có khả năng lưu trữ năng lượng điện dư thừa dưới dạng hóa năng trong các khối pin và

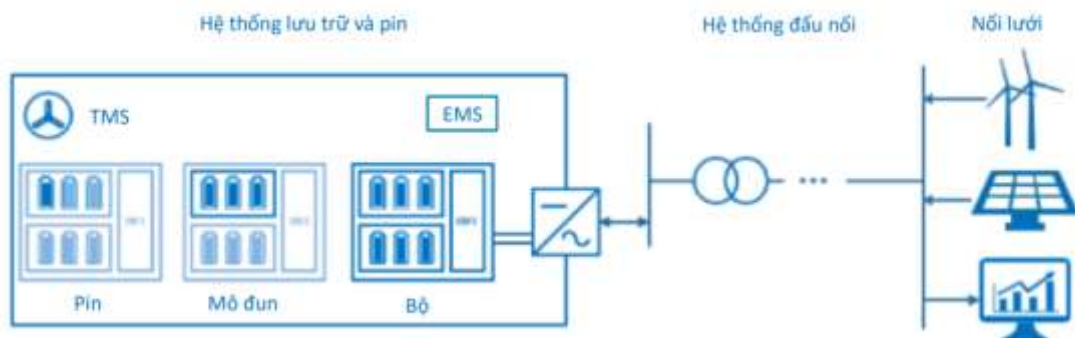
chuyển đổi ngược lại thành điện năng để cung cấp cho lưới điện khi cần thiết.

Có nhiều công nghệ lưu trữ điện năng khác nhau đang được nghiên cứu và triển khai, bao gồm pin tích năng điện hóa (như pin lithium-ion, pin dòng oxy hóa khử, pin axit chì, pin sodium sulphur nhiệt độ cao, pin sodium nickel chloride), pin nhiên liệu, siêu tụ điện, bánh đà, và các giải pháp chuyển đổi năng lượng sang hydrogen và ammonia. Sự đa dạng công nghệ này mang đến nhiều lựa chọn phù hợp với các nhu cầu lưu trữ khác nhau về thời gian và công suất. Tiềm năng ứng dụng của các công nghệ lưu trữ năng lượng trong hệ thống điện rất đa dạng, từ việc hỗ trợ các lưới phân phối điện yếu đến cung cấp các dịch vụ năng lượng quy mô lớn hoặc các giải pháp ngoài lưới. Khả năng cung cấp đa dạng dịch vụ này là yếu tố then chốt giúp lưới điện tích hợp hiệu quả hơn NLTT. Hình 2.2 dưới đây minh họa các loại dịch vụ được hệ thống lưu trữ điện năng cung cấp:



Hình 2.2. Các loại dịch vụ được hệ thống lưu trữ điện năng cung cấp

Sơ đồ tổng quan về hệ thống pin và đấu nối lưới được trình bày trong Hình 2.3. Một hệ thống BESS điển hình bao gồm nhiều thành phần chính hoạt động phối hợp với nhau:

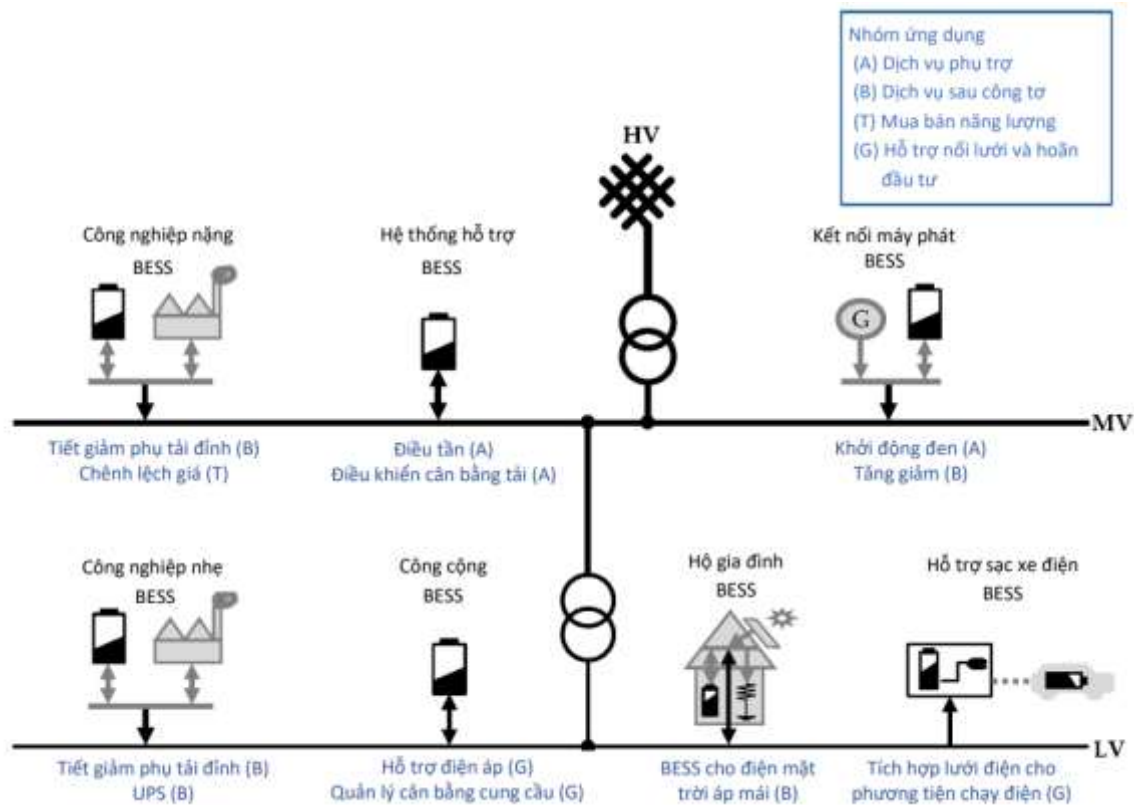


Hình 2.3. Sơ đồ minh họa hệ thống lưu trữ pin và đấu nối lưới

Các thành phần cốt lõi của BESS bao gồm:

- **Hệ thống lưu trữ và pin (Battery Storage and Battery):** Đây là nơi năng lượng được lưu trữ. Nó bao gồm các cell pin được nhóm lại thành mô-đun (Modules) và sau đó là các khối pin lớn hơn (Bộ - Packs/Stacks).
- **Hệ thống quản lý pin (Battery Management System - BMS):** BMS (không được hiển thị rõ ràng dưới dạng một khối riêng trong Hình 2.3 nhưng là một phần không thể thiếu của hệ thống pin) có nhiệm vụ giám sát các thông số quan trọng của pin như điện áp, dòng điện, nhiệt độ, và trạng thái sạc (SOC). BMS đảm bảo an toàn, tối ưu hóa hiệu suất và kéo dài tuổi thọ của pin.
- **Hệ thống quản lý năng lượng (Energy Management System - EMS):** EMS điều chỉnh việc trao đổi năng lượng giữa hệ thống pin và lưới điện. Nó quyết định khi nào hệ thống nên sạc hoặc xả pin dựa trên các tín hiệu điều khiển, điều kiện lưới điện và chiến lược vận hành.
- **Bộ biến đổi công suất (Power Conversion System - PCS):** PCS chuyển đổi dòng điện một chiều (DC) từ pin thành dòng điện xoay chiều (AC) để cung cấp cho lưới (chế độ xả) và ngược lại, chuyển đổi AC từ lưới thành DC để sạc pin (chế độ sạc).
- **Hệ thống đấu nối (Connection System):** Bao gồm máy biến áp (nếu cần) và các thiết bị đóng cắt, bảo vệ để kết nối an toàn hệ thống BESS với lưới điện ở cấp điện áp phù hợp.

Như đã đề cập ở phần trên, hệ thống pin lưu trữ năng lượng (BESS) có thể có nhiều ứng dụng, do đó có thể được lắp đặt ở các cấp điện áp khác nhau (Hình 2.4). Có nhiều loại cấu trúc hệ thống BESS, với những khác biệt nhỏ tùy thuộc vào từng ứng dụng. Trong bối cảnh không nối lưới và lưới nhỏ, chi phí nối lưới có thể giảm một phần hoặc toàn bộ.



Hình 2.4. Các ứng dụng của hệ thống pin tùy vào cấp điện áp và loại hình ứng dụng

Các tòa nhà của gia đình hoặc hộ công nghiệp có thể lắp đặt pin phía sau đồng hồ đo để điều chỉnh đường cong phụ tải và tích hợp với sản lượng điện phân tán như điện mặt trời mái nhà hoặc công nghiệp. Các lợi ích chính gồm tiết kiệm tiền điện ở mức giá bán lẻ, giảm tiền điện cao điểm, cải thiện độ tin cậy và chất lượng điện năng. Công nghệ pin có thể thúc đẩy điện tự dùng và mang lại nguồn dự phòng cho lưới điện địa phương, tránh quá tải và trì hoãn các yêu cầu đầu tư và cải tạo. Trong trường hợp có dòng hai hướng đến đi từ lưới (gia đình), BESS có thể tăng chất lượng điện của nguồn phát phân tán góp phần ổn định điện áp. Trong thị trường phát triển, các chức năng này có thể không chỉ phản ánh các yêu cầu theo quy định mà còn giúp triển khai các dịch vụ hệ thống được trả tiền.

Phần tiếp theo của chương này sẽ đi sâu vào nguyên lý hoạt động, cấu tạo và các đặc tính kỹ thuật của pin Lithium-ion, loại pin chủ đạo trong các hệ thống BESS quy mô lưới hiện nay.

2.2.1. Hiệu quả của BESS trong việc nâng cao ổn định tần số

Tần số danh định của lưới điện (ví dụ 50 Hz ở Châu Âu và Việt Nam, 60 Hz ở Bắc Mỹ) là một thông số vận hành quan trọng. Việc duy trì tần số trong một phạm vi hẹp quanh giá trị danh định là điều cần thiết để đảm bảo:

- An toàn vận hành của thiết bị: Nhiều thiết bị điện, đặc biệt là các động cơ và máy phát điện đồng bộ, được thiết kế để hoạt động tối ưu ở tần số danh định. Biến động tần số lớn có thể gây hư hỏng hoặc giảm tuổi thọ thiết bị.
- Chất lượng điện năng: Tần số ổn định là một yếu tố của chất lượng điện năng, ảnh hưởng đến hoạt động của các thiết bị nhạy cảm.
- Ổn định hệ thống: Biến động tần số lớn và kéo dài có thể dẫn đến mất ổn định hệ thống, thậm chí gây ra sự cố lan rộng hoặc sụp đổ lưới điện

Sự mất cân bằng giữa công suất phát và phụ tải là nguyên nhân chính gây ra biến động tần số. Khi phụ tải lớn hơn công suất phát, tần số giảm và ngược lại.

Điều chỉnh tần số trong hệ thống điện thường được chia thành nhiều cấp độ với các khung thời gian và mục tiêu khác nhau:

❖ Cấp Điều khiển Sơ cấp (Primary Control):

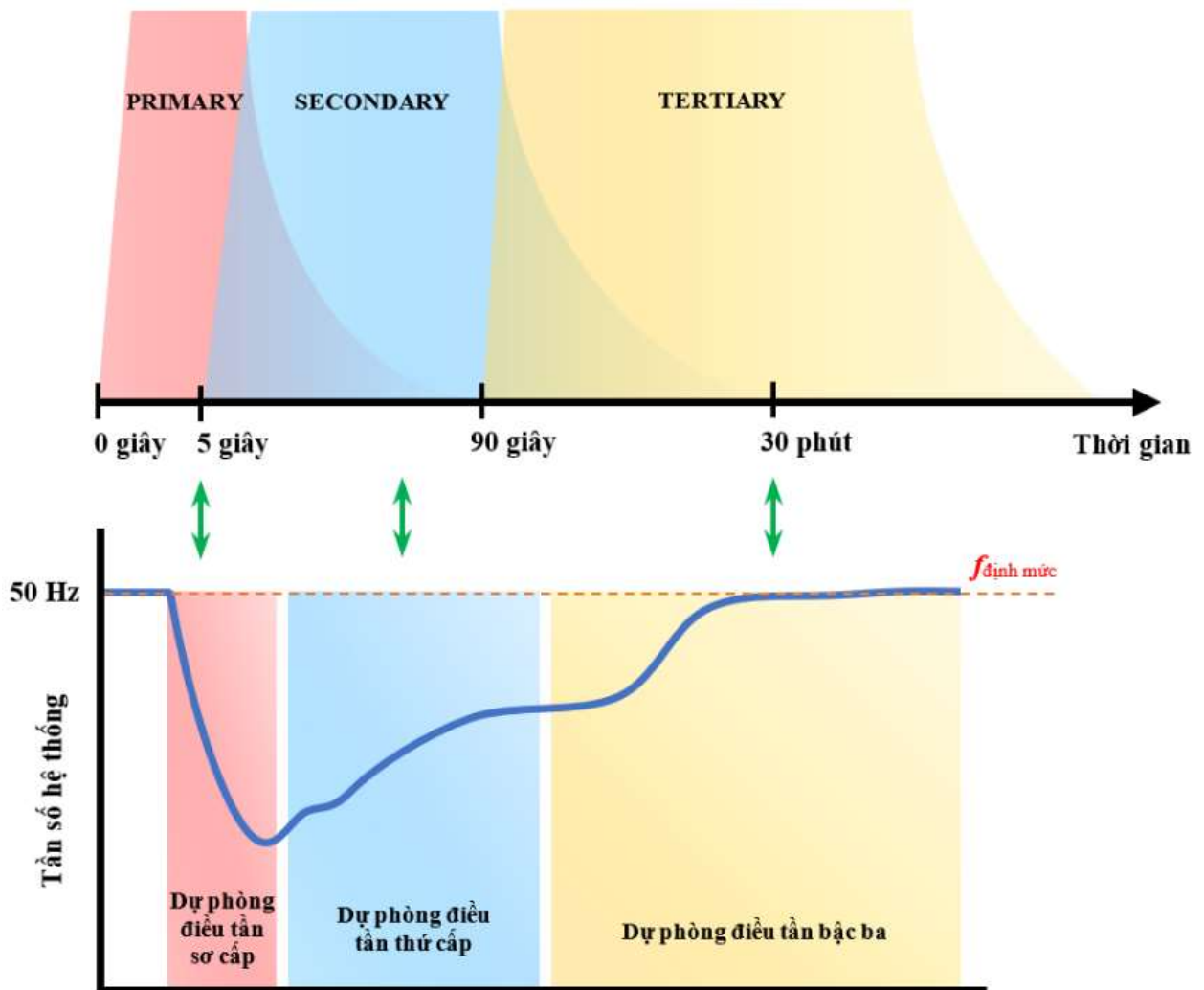
- Mục tiêu: Phản ứng cực nhanh với các biến động tần số tức thời trên lưới (trong thang thời gian mili giây đến giây). Nhằm ngay lập tức điều chỉnh công suất để đối phó khi cung cầu mất cân bằng, tránh tình trạng tần số giảm sâu hoặc tăng vọt.
- Chức năng của BESS: Với khả năng phản ứng gần như tức thời và độ chính xác cao, BESS điều chỉnh công suất phát hoặc hấp thụ (tăng/giảm công suất) trong vòng mili giây đến giây dựa trên giá trị tần số đo được, góp phần nhanh chóng đưa tần số hệ thống trở lại mức danh định.

❖ Cấp Điều khiển Thứ cấp (Secondary Control):

- Mục tiêu: Thực hiện các hiệu chỉnh cần thiết để phục hồi hoàn toàn tần số về giá trị định mức sau khi cấp điều khiển sơ cấp đã phản ứng ban đầu. Hoạt động trong khung thời gian dài hơn (vài phút).
- Chức năng của BESS: Trong giai đoạn này, BESS có thể giảm dần mức độ tham gia để bảo toàn dung lượng năng lượng tích trữ, nhường vai trò duy trì ổn định tần số cho các nguồn có khả năng hoạt động liên tục trong trung hạn.

❖ Cấp Điều khiển Bậc ba (Tertiary Control):

- Mục tiêu: Tập trung vào việc tối ưu hóa hoạt động của toàn hệ thống trong dài hạn (từ vài giờ đến vài ngày). Bao gồm điều chỉnh chiến lược vận hành tổng thể, cân bằng phụ tải, lên lịch trình hoạt động, giảm thiểu lượng năng lượng bị cắt giảm và tối đa hóa việc tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo.
- Chức năng của BESS: Ở cấp độ này, vai trò của BESS là thiết lập lịch trình sạc và xả tối ưu dựa trên các dự báo về tình trạng lưới điện, nhu cầu phụ tải và giá điện thị trường, nhằm hỗ trợ tối ưu hóa vận hành hệ thống trong dài hạn.



Hình 2.5. Các cấp độ điều khiển trong hệ thống BESS

2.2.1.1. Hiệu quả của BESS trong Điều chỉnh Tần số Sơ cấp

Điều chỉnh tần số sơ cấp (PFC) là tuyến phòng thủ đầu tiên của hệ thống điện khi xảy ra mất cân bằng công suất. Mục tiêu của PFC là nhanh chóng ngăn chặn sự thay đổi tần số và ổn định nó ở một giá trị mới. BESS với các đặc tính ưu việt của mình đã chứng tỏ là một công cụ hiệu quả để tăng cường PFC.

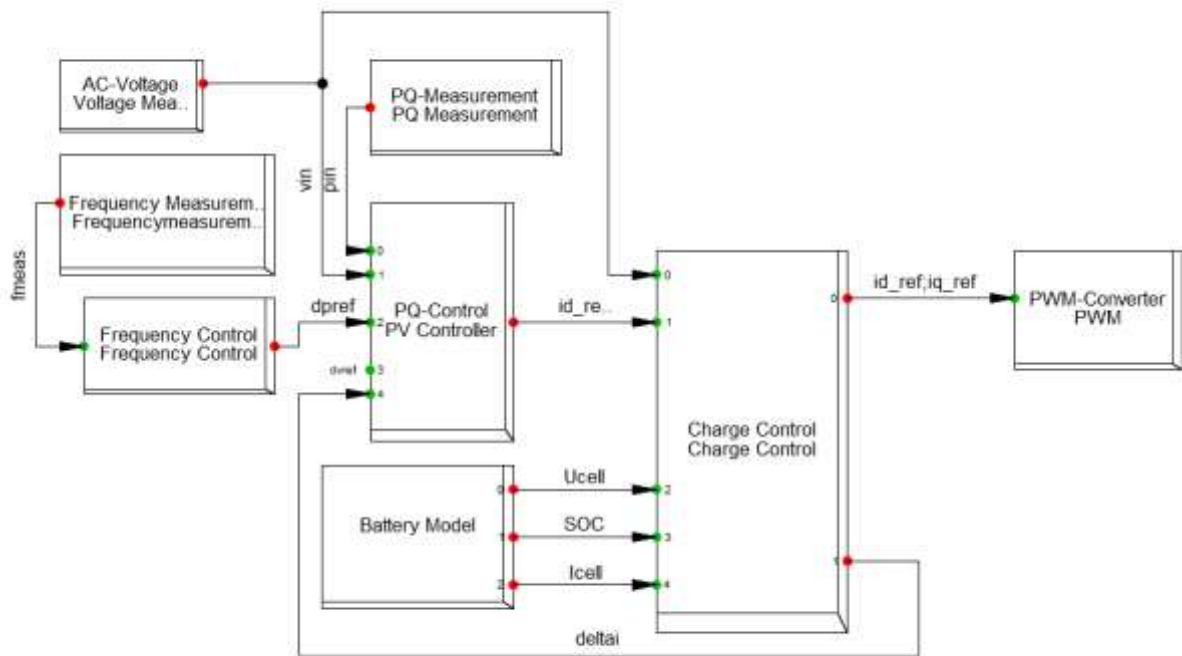
Một trong những lợi thế lớn nhất của BESS so với các máy phát truyền thống trong PFC là khả năng đáp ứng cực kỳ nhanh. Các hệ thống BESS có thể cung cấp hoặc hấp thụ toàn bộ công suất định mức của mình trong vòng vài trăm mili giây đến vài giây sau khi nhận được tín hiệu điều khiển hoặc phát hiện độ lệch tần số

Index	Reserve	Resource	Activating Time	Sustaining Time
Frequency control reserve	700	AGC + ESS	5 min	30 min
Primary	1000	G/F + ESS	10 s	5 min
Restoration reserve	1400	AGC	10 min	30 min
Secondary	1400	Manual dispatch	30 min	-
Tertiary				
Total	4500			

Hình 2.6. Dịch vụ hỗ trợ tần số

Khả năng này vượt trội so với các máy phát nhiệt điện hoặc thủy điện, vốn có những giới hạn về tốc độ thay đổi công suất do các yếu tố cơ khí và nhiệt động. Sự đáp ứng nhanh này đặc biệt quan trọng trong các hệ thống có quán tính thấp, nơi mà RoCoF sau sự cố có thể rất lớn. BESS có thể nhanh chóng bơm công suất vào lưới khi tần số giảm (ví dụ, do mất một nguồn phát lớn) hoặc hấp thụ công suất dư thừa khi tần số tăng (ví dụ, do mất một phụ tải lớn), qua đó làm giảm độ dốc của sự thay đổi tần số và hạn chế độ lệch tần số cực đại.

2.2.2. Phản ứng của BESS với điều khiển Droop khi hệ thống thiếu hụt/dư thừa công suất

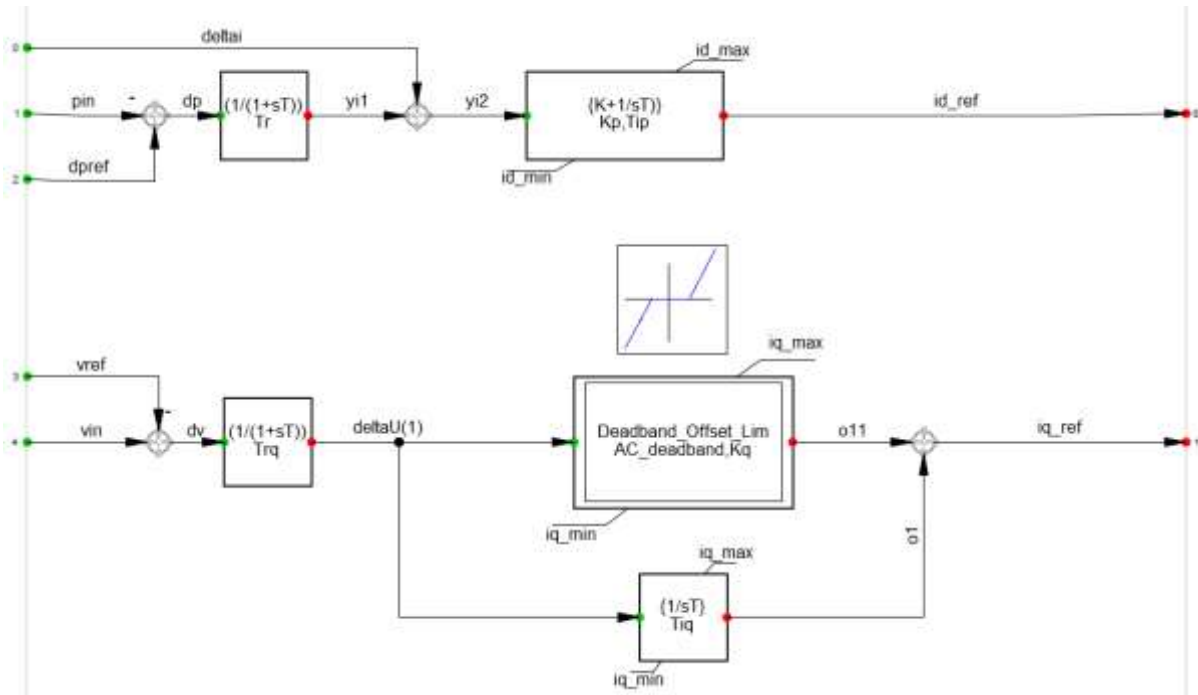


Hình 2.7 Khung điều khiển BESS trong DigSilent

Bộ điều khiển BESS thực hiện các chức năng quan trọng nhằm duy trì sự ổn định của hệ thống điện, bao gồm điều chỉnh công suất tác dụng (P) để hỗ trợ điều tần, điều chỉnh công suất phản kháng (Q) để kiểm soát điện áp, quản lý trạng thái sạc (SOC) để bảo vệ pin và giới hạn tổng công suất để tránh quá tải bộ biến đổi.

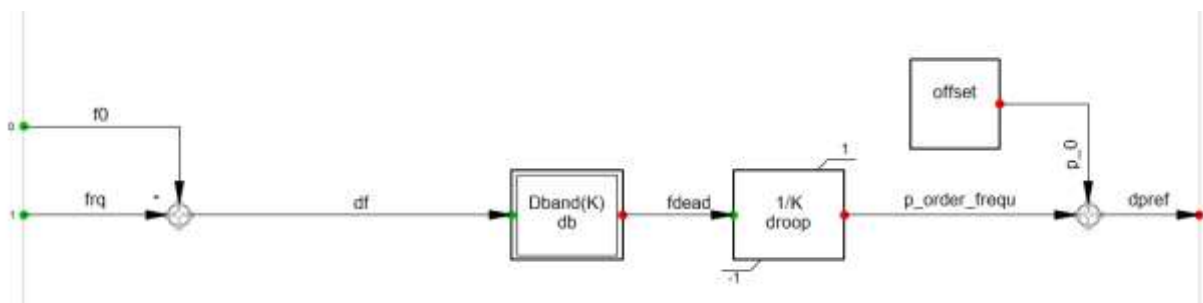
Điều khiển công suất P-Q (P-Q Control): BESS được điều khiển để phát hoặc hấp thụ một lượng công suất tác dụng (P) và công suất phản kháng (Q) theo điểm đặt. Chế độ này thường được sử dụng để quản lý năng lượng, điều chỉnh điện áp hoặc hỗ trợ công suất theo lệnh từ trung tâm điều độ. Bộ điều khiển tần số trong PowerFactory được thiết kế dưới dạng **bộ điều khiển tỷ lệ (Proportional Controller - P Controller)** với một vùng chết nhỏ để tránh phản ứng không cần thiết với các dao động tần số nhỏ.

Sơ đồ trên mô tả mô hình điều khiển của hệ thống lưu trữ năng lượng BESS.



Hình 2.8. P-Q Control

Sơ đồ trên mô tả bộ điều khiển công suất tác dụng (P) và công suất phản kháng (Q) trong hệ thống lưu trữ năng lượng BESS. Bộ điều khiển này giúp BESS đáp ứng yêu cầu công suất của hệ thống điện bằng cách điều chỉnh dòng điện phản ứng.



Hình 2.9. Frequency Controller

Điều khiển điện áp-tần số (Droop Control): BESS hoạt động như một nguồn điện áp, điều khiển điện áp và tần số tại điểm đầu nối. Chế độ này thường được sử dụng trong các hệ thống để cung cấp quán tính ảo và điều tần/điều áp sơ cấp. Điều khiển Droop là một dạng của V-f Control, trong đó công suất tác dụng được điều chỉnh theo độ lệch tần số và công suất phản kháng được điều chỉnh theo độ lệch điện áp.

Điều khiển tần số và điện áp Droop là một thuật toán điều khiển được sử dụng để phân chia công suất giữa các nguồn phân tán. Thuật toán này đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì sự ổn định của hệ thống và đảm bảo công suất đầu ra của các đơn vị luôn cân bằng.

Trong hệ thống điều khiển tần số, BESS có thể sử dụng thuật toán Droop control. Bộ điều khiển tần số thường được thiết kế dưới dạng bộ điều khiển tỷ lệ (P Controller) với một vùng chết nhỏ để tránh phản ứng không cần thiết với các dao động tần số nhỏ. Công suất đầu ra của BESS trong phương pháp điều khiển Droop dựa trên tốc độ có thể được xác định bằng công thức:

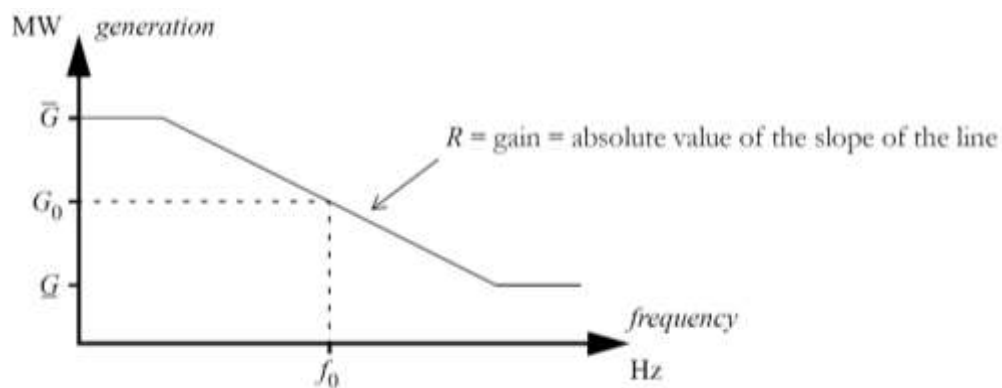
$$\Delta P_{bat}(t) = \pm \Delta f(t) \frac{\Delta f_{max}}{P_{max, bat}}$$

Giá trị dương nghĩa là BESS phát công suất, giá trị âm nghĩa là BESS hấp thụ công suất. Trong đó:

- $\Delta P_{bat}(t)$: Lượng thay đổi công suất tác dụng của BESS (MW).
- $\Delta f(t)$: Độ lệch tần số tại thời điểm t (Hz), $\Delta f(t) = f(t) - f_{định mức}$.
- $P_{max, bat}$: Công suất định mức tối đa của BESS (MW).
- Δf_{max} : Độ lệch tần số tối đa mà tại đó BESS sẽ phát hoặc hấp thụ công suất tối đa (Hz).
- Tỷ số $\frac{\Delta f_{max}}{P_{max, bat}}$ (hoặc K_{droop}) chính là hệ số droop (MW/Hz), thể hiện độ nhạy của đáp ứng công suất BESS theo tần số.

Theo quy định của tiêu chuẩn EN 50160, độ lệch tần số tối đa được phép so với tần số định mức là 1%, còn độ lệch điện áp cho phép so với điện áp định mức nằm trong khoảng $\pm 10\%$.

Công suất BESS cần thiết để điều chỉnh tần số có thể được tính toán dựa trên hệ số điều chỉnh tần số (độ nhạy công suất theo tần số) R và hệ số droop của bộ điều tốc



Hình 2.10. Mối quan hệ giữa công suất và tần số

Công suất BESS cần thiết được tính theo công thức :

$$P_{\max, \text{bat}} = G_f \times R \times f$$

Trong đó :

- $P_{\max, \text{bat}}$: Công suất yêu cầu của hệ thống lưu trữ (MW)
- R : Hệ số tần số hay độ nhạy công suất theo tần số ($\frac{\text{MW}}{\text{Hz}}$)
- G_f : Hệ số droop của governor (%)
- f : Tần số hệ thống (50Hz)

Với :

$$\Delta G = R \times \Delta f$$

Trong đó :

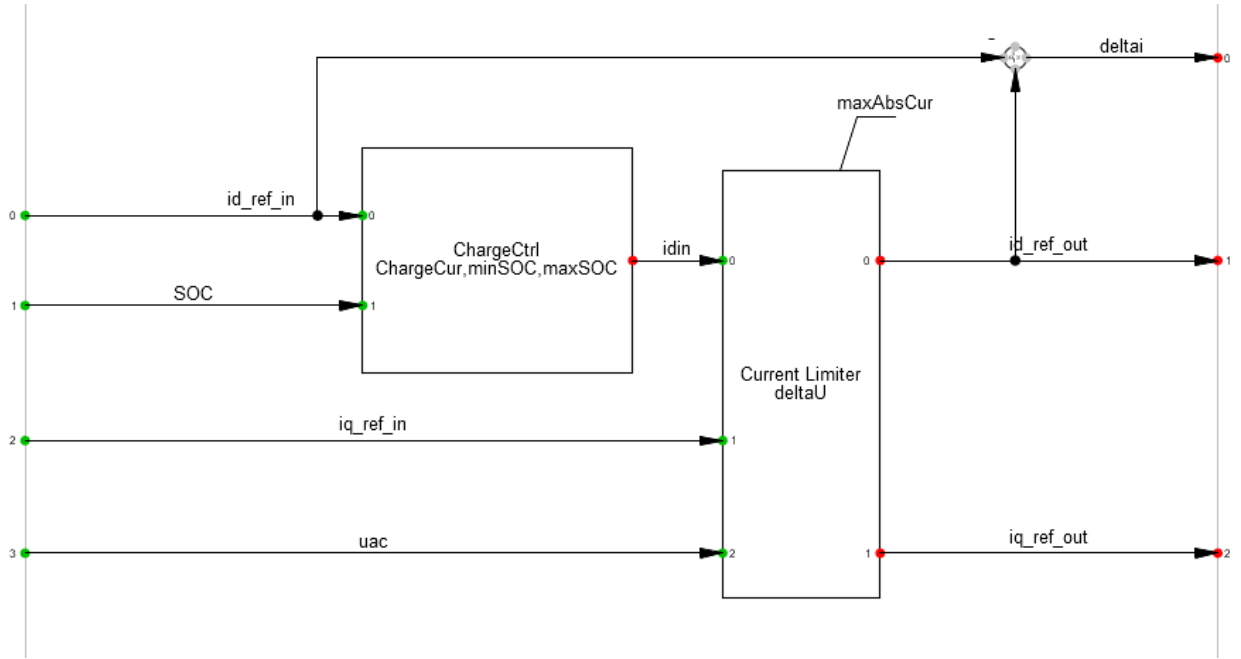
- ΔG là sự thay đổi công suất (MW).
- R là hệ số điều chỉnh tần số (MW/Hz).
- Δf là độ lệch tần số so với giá trị mong muốn (Hz).

Nên ta có :

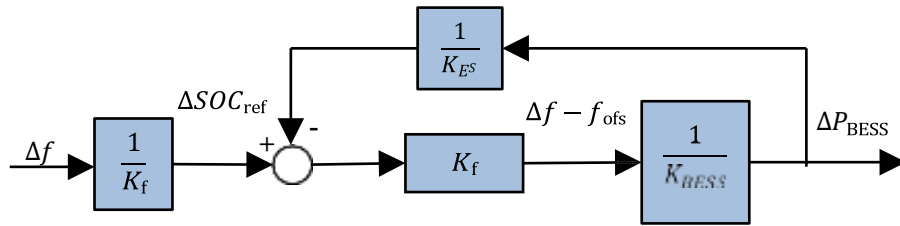
$$P_{\max, \text{bat}} = G_f \times \frac{\Delta G}{\Delta f} \times f$$

2.2.3. Mô hình phản hồi Trạng thái sạc – *State of Charge Feedback Model*

Khối điều khiển trạng thái sạc (SOC) trong hệ thống BESS chịu trách nhiệm quản lý quá trình sạc và xả của pin nhằm mục đích bảo vệ pin và duy trì SOC trong một phạm vi hoạt động an toàn và mong muốn. Chức năng này ngăn chặn việc sạc quá mức khi SOC cao và xả quá mức khi SOC thấp. Khối điều khiển SOC tương tác với khối điều khiển công suất tác dụng để giới hạn quá trình sạc và xả dựa trên trạng thái SOC hiện tại.



Hình 2.11. Charge Control_charging and FRT



Hình 2.12. Sơ đồ khối mô hình phản hồi trạng thái sạc

Mô hình phản hồi trạng thái sạc có thể được biểu diễn thông qua độ lệch trạng thái sạc (ΔSOC_{ref}) so với giá trị trung bình (50%) hoặc giá trị tham chiếu (SOC_{ref}) dựa trên độ lệch tần số (Δf).

Độ lệch Trạng thái sạc được cho bởi công thức :

$$\Delta SOC_{ref} = SOC_{ref}(t) - SOC_{50\%} = \frac{f(t) - f_n}{K_f} = \Delta f(t)/K_f$$

Trong đó :

- f_n : Tần số định mức
- f : Tần số hệ thống
- $SOC_{50\%}$: Giá trị trung bình của trạng thái sạc (50%)
- SOC_{ref} : Giá trị tham chiếu của trạng thái sạc
- ΔSOC_{ref} : Độ lệch của trạng thái sạc so với

Mức độ tích trữ năng lượng của BESS, hay còn gọi là Trạng thái sạc (SOC), phải luôn

được duy trì trong một phạm vi giới hạn trên (SOC_{max}) và dưới (SOC_{min}) đã được thiết lập để bảo vệ pin và đảm bảo hoạt động ổn định của hệ thống.

Công thức tính toán trạng thái sạc của BESS tại thời điểm t dựa trên trạng thái sạc tại thời điểm trước đó ($t-1$) và công suất sạc/xả là:

$$SOC_t = SOC_{t-1} + \frac{\eta_{ch} P_{ch,t} - \frac{P_{dis,t}}{\eta_{dis}} \Delta t}{EBESS}$$

Trong đó:

- SOC_t: Trạng thái sạc của BESS ở thời điểm t
- SOC_{t-1}: Trạng thái sạc của BESS ở thời điểm $t-1$
- η_{ch}, η_{dis} : Hệ số chuyển đổi năng lượng của BESS trong quá trình sạc/xả
- $P_{ch,t}, P_{dis,t}$: Công suất sạc/xả của BESS tại thời điểm t
- Δt : Khoảng thời gian
- EBESS: Tổng dung lượng năng lượng của BESS.

2.2.3.1. Phản ứng của BESS khi Trạng thái sạc (SOC) thấp

Khi SOC của BESS giảm xuống gần mức tối thiểu cho phép (SOC_{min}), khả năng cung cấp năng lượng (xả pin) của nó sẽ bị hạn chế đáng kể. Đây là một cơ chế bảo vệ quan trọng để ngăn ngừa tình trạng xả quá sâu (deep discharge), vốn có thể gây ra những hư hỏng không thể phục hồi cho cấu trúc hóa học bên trong pin, làm giảm dung lượng và rút ngắn tuổi thọ của pin.

Hạn chế công suất xả

Khi SOC tiến gần đến SOC_{min}, Hệ thống Quản lý Pin (Battery Management System - BMS) và bộ điều khiển BESS sẽ kích hoạt cơ chế giảm dần công suất xả cho phép. Điều này có nghĩa là, ngay cả khi lưới điện đang thiếu hụt công suất nghiêm trọng và tần số giảm sâu, BESS cũng không thể phát hết công suất định mức của mình.

- Nguyên lý: Việc giảm công suất xả giúp giảm tốc độ tiêu hao năng lượng còn lại trong pin, cho phép BESS duy trì hoạt động hỗ trợ ở mức độ thấp hơn trong thời gian dài hơn một chút, hoặc ít nhất là tránh việc bị ngắt đột ngột do chạm ngưỡng SOC_{min}.
- Đặc tính giảm công suất: Đường cong giảm công suất (derating curve) có thể khác nhau tùy thuộc vào công nghệ pin và cài đặt của nhà sản xuất. Thông thường,

khi SOC giảm xuống dưới một ngưỡng cảnh báo nhất định

Ưu tiên và kích hoạt chế độ sạc

Khi SOC ở mức thấp, ưu tiên hàng đầu của BESS là tìm cách nạp lại năng lượng để phục hồi SOC về vùng hoạt động an toàn và hiệu quả hơn.

- Phản ứng với tần số cao: Nếu trong quá trình SOC đang thấp mà tần số lưới điện tăng lên (do dư thừa công suất), BESS sẽ ngay lập tức tận dụng cơ hội này để chuyển sang chế độ sạc, hấp thụ công suất từ lưới. Lúc này, chức năng điều tần (hấp thụ công suất khi tần số cao) trùng với nhu cầu phục hồi SOC.
- Ngừng cung cấp dịch vụ điều tần (nếu cần): Trong trường hợp SOC quá thấp và không có điều kiện thuận lợi để sạc từ lưới thông qua đáp ứng tần số, BESS có thể tạm thời ngừng cung cấp dịch vụ điều tần (hoặc giảm đáng kể khả năng đáp ứng) để bảo vệ pin. Quyết định này thường được đưa ra bởi Hệ thống Quản lý Năng lượng (Energy Management System - EMS) dựa trên các ưu tiên đã được cài đặt.
- Yêu cầu sạc chủ động: Nếu BESS không thể tự phục hồi SOC thông qua các đáp ứng tự nhiên với lưới, EMS có thể gửi yêu cầu sạc chủ động. Điều này có thể bao gồm:
 - Mua điện từ lưới: BESS có thể được lập trình để mua điện từ lưới trong những khoảng thời gian giá thấp hoặc theo một lịch trình định trước để sạc lại.
 - Sử dụng nguồn năng lượng tại chỗ (nếu có): Nếu BESS được tích hợp với các nguồn NLTT (ví dụ, trong một nhà máy điện hybrid), nó có thể ưu tiên sử dụng năng lượng từ các nguồn này để sạc.
 - Điều chỉnh điểm đặt SOC mục tiêu trong điều khiển droop: Một số hệ thống có thể tạm thời điều chỉnh điểm đặt SOC mục tiêu trong thuật toán điều khiển droop để ưu tiên sạc. Ví dụ, thay vì giữ SOC quanh 50%, điểm đặt có thể tạm thời nâng lên để khuyến khích sạc.

Tác động đến hiệu quả điều tần

Khi SOC thấp, hiệu quả của BESS trong việc hỗ trợ lưới khi tần số giảm sẽ bị suy giảm nghiêm trọng:

- Giảm khả năng đáp ứng công suất: Lượng công suất mà BESS có thể cung cấp

bị hạn chế, làm giảm khả năng bù đắp thiếu hụt công suất trên lưới.

- Giảm thời gian hỗ trợ: Ngay cả khi có thể phát một phần công suất, thời gian BESS có thể duy trì việc phát công suất đó cũng sẽ ngắn hơn nhiều.
- Nguy cơ không đáp ứng được yêu cầu dịch vụ: Nếu một sự kiện tần số thấp kéo dài xảy ra khi SOC của BESS đã cạn kiệt, BESS sẽ không thể hoàn thành vai trò của mình, ảnh hưởng đến độ tin cậy của dịch vụ điều tần mà nó cam kết cung cấp.

Do đó, việc tránh để SOC giảm xuống quá thấp là một mục tiêu quan trọng trong chiến lược vận hành BESS.

2.2.3.2. Phản ứng của BESS khi Trạng thái sạc (SOC) cao

Tương tự như khi SOC thấp, khi SOC của BESS tăng lên gần mức tối đa cho phép (SOCmax), khả năng hấp thụ năng lượng (sạc pin) của nó sẽ bị hạn chế. Đây là cơ chế bảo vệ chống sạc quá đầy (overcharge), một tình trạng có thể gây ra tăng nhiệt độ, tăng áp suất bên trong pin, và cuối cùng là suy giảm tuổi thọ hoặc thậm chí các vấn đề an toàn nghiêm trọng như cháy nổ

Hạn chế công suất sạc

Khi SOC tiến gần đến SOCmax, BMS và bộ điều khiển BESS sẽ giảm dần công suất sạc cho phép. Ngay cả khi lưới điện đang dư thừa công suất lớn và tần số tăng cao, BESS cũng không thể hấp thụ hết công suất định mức của mình.

- Nguyên lý: Giảm công suất sạc giúp kiểm soát dòng điện đi vào pin, tránh việc các cell pin bị "nhồi" quá nhiều năng lượng một cách đột ngột, đặc biệt khi chúng đã gần đầy. Điều này giúp duy trì sự đồng đều về điện áp và nhiệt độ giữa các cell, bảo vệ pin khỏi các ứng suất không cần thiết.
- Đặc tính giảm công suất: Tương tự như phía xả, đường cong giảm công suất sạc khi SOC cao cũng có thể khác nhau. Khi SOC vượt qua một ngưỡng cảnh báo, công suất sạc tối đa sẽ bắt đầu giảm cho đến khi bằng không tại SOCmax.

Ưu tiên và kích hoạt chế độ xả

Khi SOC ở mức cao, BESS sẽ ưu tiên các hoạt động giúp giảm SOC về vùng an toàn và tối ưu hơn.

- Phản ứng với tần số thấp: Nếu trong quá trình SOC đang cao mà tần số lưới điện giảm xuống (do thiếu hụt công suất), BESS sẽ ngay lập tức chuyển sang chế độ

xả, bơm công suất vào lưới. Lúc này, chức năng điều tần (bơm công suất khi tần số thấp) cũng đồng thời giúp giảm SOC.

- Ngừng hấp thụ công suất (nếu cần): Nếu SOC quá cao và không có điều kiện thuận lợi để xả, BESS có thể tạm thời ngừng hấp thụ công suất từ lưới, ngay cả khi tần số đang cao, để bảo vệ pin.
- Yêu cầu xả chủ động: EMS có thể kích hoạt chế độ xả chủ động để đưa SOC về mức mong muốn. Điều này có thể bao gồm:
 - Bán điện lên lưới: Nếu giá thị trường thuận lợi hoặc theo một lịch trình đã định, BESS có thể phát điện lên lưới.
 - Cung cấp cho phụ tải nội bộ (nếu có): Trong các ứng dụng hybrid hoặc microgrid, năng lượng từ BESS có thể được sử dụng để cung cấp cho các phụ tải ưu tiên.
 - Điều chỉnh điểm đặt SOC mục tiêu trong điều khiển droop: Tương tự như trường hợp SOC thấp, điểm đặt SOC mục tiêu có thể tạm thời hạ xuống để khuyến khích xả.

Tác động đến hiệu quả điều tần

Khi SOC cao, hiệu quả của BESS trong việc hỗ trợ lưới khi tần số tăng sẽ bị suy giảm:

- Giảm khả năng hấp thụ công suất: Lượng công suất dư thừa mà BESS có thể hấp thụ bị hạn chế, làm giảm khả năng đối phó với tình trạng thừa nguồn trên lưới.
- Giảm thời gian hỗ trợ: Thời gian BESS có thể duy trì việc hấp thụ công suất cũng sẽ ngắn hơn.
- Nguy cơ không đáp ứng được yêu cầu dịch vụ: Nếu một sự kiện tần số cao kéo dài xảy ra khi SOC của BESS đã gần đầy, BESS sẽ không thể tiếp tục hấp thụ công suất, ảnh hưởng đến khả năng điều tần của nó.

2.2.4. Mô hình Pin

Có nhiều công nghệ pin khác nhau đang được nghiên cứu và ứng dụng trong các hệ thống BESS quy mô lớn, mỗi loại có những đặc điểm, ưu nhược điểm và ứng dụng phù hợp riêng:

Pin Lithium-ion (Li-ion): Hiện là công nghệ pin phổ biến nhất cho BESS quy mô lưới nhờ mật độ năng lượng và công suất cao, hiệu suất chuyển đổi tốt (~ 85-95%), tuổi thọ

chu kỳ dài và tốc độ phản ứng nhanh. Các loại hóa học Li-ion phổ biến bao gồm NMC (Nickel Manganese Cobalt), LFP (Lithium Iron Phosphate), NCA (Nickel Cobalt Aluminum). Li-ion phù hợp cho cả các ứng dụng năng lượng (lưu trữ dài hạn) và công suất (đáp ứng nhanh). Tuy nhiên, chi phí đầu tư ban đầu có thể cao và cần hệ thống quản lý nhiệt độ phức tạp.

Pin Natri-Lưu huỳnh (NaS): Là công nghệ pin nhiệt độ cao (hoạt động ở $\sim 300-350^{\circ}\text{C}$), có mật độ năng lượng cao và tuổi thọ dài. NaS pin thường được sử dụng cho các ứng dụng lưu trữ năng lượng dài hạn (4-8 giờ) và hỗ trợ lưới điện. Tuy nhiên, chúng cần hệ thống gia nhiệt, có rủi ro an toàn liên quan đến nhiệt độ cao và vật liệu ăn mòn.

Pin dòng chảy (Flow Batteries): Lưu trữ năng lượng trong các thùng chứa chất lỏng điện giải bên ngoài ngăn pin. Dung lượng năng lượng và công suất có thể được mở rộng độc lập. Pin dòng chảy có tuổi thọ rất dài (số chu kỳ sạc/xả lớn), khả năng chịu quá tải tốt và không bị suy giảm dung lượng theo thời gian không hoạt động. Chúng phù hợp cho các ứng dụng lưu trữ năng lượng dài hạn (nhiều giờ đến nhiều ngày). Tuy nhiên, mật độ năng lượng thấp hơn Li-ion và hiệu suất chuyển đổi thường thấp hơn một chút. Các loại phổ biến bao gồm Vanadium Redox Flow Battery (VRFB) và Zinc-Bromine Flow Battery (ZnBr).

Pin Chì-Acid cải tiến (Advanced Lead-Acid): Là công nghệ pin lâu đời nhưng đã được cải tiến để tăng tuổi thọ chu kỳ và hiệu suất. Chi phí đầu tư ban đầu thấp hơn so với Li-ion. Phù hợp cho các ứng dụng lưu trữ năng lượng ngắn/trung hạn và dự phòng. Tuy nhiên, mật độ năng lượng thấp hơn, tuổi thọ chu kỳ ngắn hơn Li-ion và nhạy cảm với chế độ xả sâu.

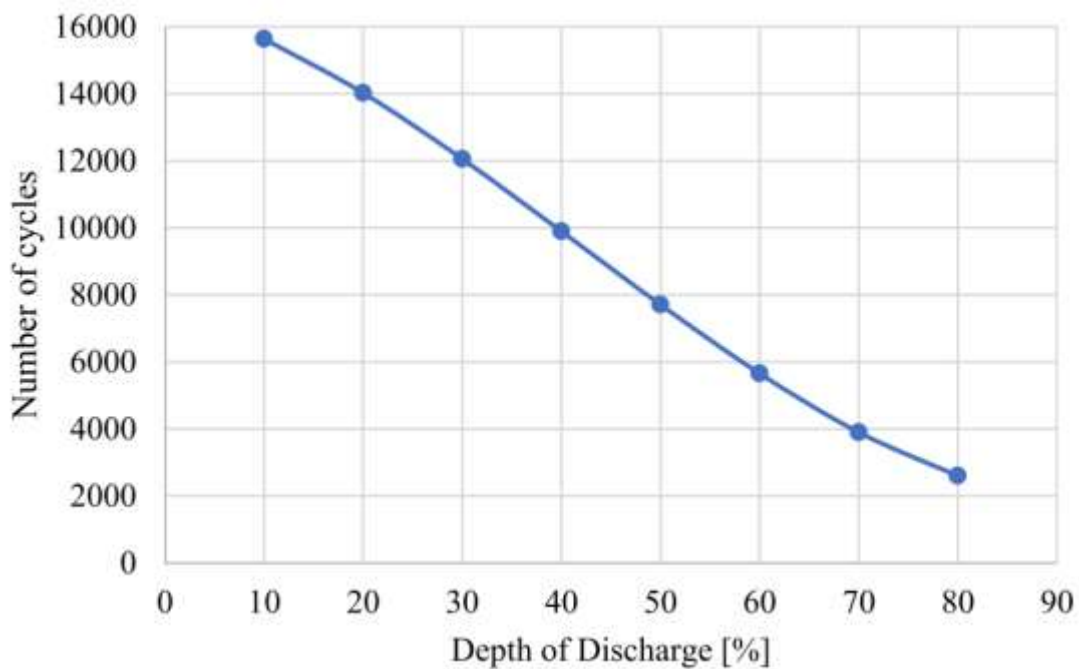
Việc lựa chọn công nghệ pin phù hợp cho một ứng dụng BESS cụ thể phụ thuộc vào nhiều yếu tố như yêu cầu về công suất, dung lượng, thời gian đáp ứng, tuổi thọ, hiệu suất, chi phí đầu tư và chi phí vận hành.

Pin Li-ion là lựa chọn hàng đầu cho hệ thống BESS nhờ sở hữu mật độ năng lượng cao, cho phép lưu trữ lượng lớn điện năng trong một không gian nhỏ. Chúng còn có tuổi thọ dài, giúp giảm tần suất thay thế và chi phí vận hành. Thêm vào đó, chi phí hợp lý của pin Li-ion khiến chúng trở thành giải pháp kinh tế cho nhiều ứng dụng lưu trữ năng lượng khác nhau. Nhờ những ưu điểm này, pin Li-ion được ứng dụng rộng rãi từ thiết bị di động đến các hệ thống lưu trữ điện lưới quy mô lớn.

Lý do chính cho sự ưu tiên này đến từ các đặc điểm nổi bật của pin Li-ion:

Mật độ năng lượng cao	Cho phép lưu trữ lượng lớn điện năng trong một không gian nhỏ gọn, giúp tối ưu hóa diện tích lắp đặt hệ thống BESS.
Tuổi thọ dài	Bao gồm tuổi thọ chu kỳ (số lần sạc/xả) và tuổi thọ tương đối cao. Điều này làm giảm tần suất thay thế pin và chi phí liên quan trong vòng đời dự án.
Chi phí hợp lý	Mặc dù có thể cao hơn ban đầu, chi phí pin Li-ion đang dần trở nên hợp lý và cạnh tranh cho các ứng dụng quy mô lớn nhờ sự phát triển công nghệ và quy mô sản xuất.
Hiệu suất chuyển đổi cao	Giúp giảm thiểu tổn thất năng lượng trong quá trình sạc và xả, nâng cao hiệu quả hoạt động tổng thể của hệ thống BESS.
Khả năng phản ứng nhanh	Cho phép BESS đáp ứng nhanh chóng với các thay đổi của lưới điện, rất cần thiết cho các dịch vụ hỗ trợ lưới đòi hỏi tốc độ cao như ổn định tần số.

Bảng 2.2. Ưu điểm của Pin Lithium-ion



Hình 2.13. Chu kỳ sạc so với DoD của pin Li-ion

Hình 2.13. giới thiệu đường cong Woehler, một công cụ quan trọng để hiểu về tuổi thọ của pin. Đường cong này biểu thị mối tương quan giữa số chu kỳ sạc/xả tối đa mà pin

có thể thực hiện và Độ xả sâu (DoD). Độ xả sâu là phần trăm dung lượng pin đã được sử dụng.

Dựa trên mối quan hệ này, tuổi thọ của pin (tính bằng năm) có thể được ước tính bằng công thức sau:

$$BB_{life}(y) = \min \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^8 \frac{NC_i}{NCF_i}}; BB_{fl} \right]$$

Trong đó :

- BB_{fl} : Tuổi thọ tối đa của pin khi không hoạt động
- NC_i : Số chu kỳ sạc trong mỗi vùng DoD
- NCF_i : Số chu kỳ sạc dẫn đến pin hỏng trong mỗi vùng DoD

Công thức này tính toán tuổi thọ dự kiến của pin bằng cách xem xét tổng số chu kỳ sạc/xả mà pin đã thực hiện ở các mức độ xả khác nhau, so sánh với khả năng chịu đựng của pin ở các mức độ đó. Giá trị tuổi thọ cuối cùng được lấy là giá trị nhỏ hơn giữa kết quả tính toán và tuổi thọ cơ bản của pin.

2.2.5. Mô hình tối ưu hệ thống BESS

2.2.5.1. Ràng buộc công suất của BESS

Hoạt động của Hệ thống lưu trữ năng lượng pin (BESS) luôn phải tuân thủ các giới hạn về tốc độ sạc và xả năng lượng nhằm đảm bảo hiệu suất, an toàn và kéo dài tuổi thọ của hệ thống pin. Các ràng buộc này chủ yếu liên quan đến công suất hoạt động và trạng thái vận hành của BESS.

Một trong những ràng buộc cơ bản nhất là công suất hoạt động tức thời của BESS tại bất kỳ thời điểm nào không được vượt quá công suất định mức của nó. Điều này được thể hiện qua các bất đẳng thức sau cho công suất sạc và công suất xả tại thời điểm t:

$$0 \leq P_{ch,t} \leq Y_{ch,t} \cdot P_{BESS}$$

$$0 \leq P_{dis,t} \leq Y_{dis,t} \cdot P_{BESS}$$

Trong đó:

- $P_{ch,t}$ là công suất sạc của BESS tại thời điểm t .
- $P_{dis,t}$ là công suất xả của BESS tại thời điểm t .
- P_{BESS} là công suất định mức tối đa của toàn bộ hệ thống BESS.
- $Y_{ch,t}$ là biến trạng thái sạc tại thời điểm t . $Y_{ch,t}=1$ nếu BESS đang sạc, và $Y_{ch,t}=0$ nếu không sạc.
- $Y_{dis,t}$ là biến trạng thái xả tại thời điểm t . $Y_{dis,t}=1$ nếu BESS đang xả, và $Y_{dis,t}=0$ nếu không xả.

Các bất đẳng thức trên chỉ ra rằng công suất sạc ($P_{ch,t}$) và công suất xả ($P_{dis,t}$) thực tế phải nằm trong khoảng từ 0 đến công suất định mức P_{BESS} , tùy thuộc vào việc hệ thống có đang ở trạng thái sạc hay xả hay không.

Hơn nữa, tại một thời điểm bất kỳ, BESS chỉ có thể ở một trong ba trạng thái: đang sạc, đang xả hoặc không hoạt động. Điều này có nghĩa là hệ thống không thể sạc và xả cùng lúc. Ràng buộc về trạng thái hoạt động này được biểu diễn bằng bất đẳng thức:

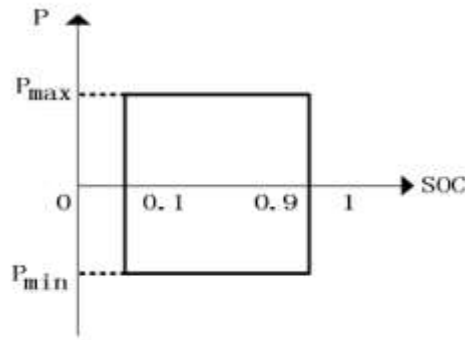
$$Y_{ch,t} + Y_{dis,t} \leq 1$$

Nếu $Y_{ch,t}=1$, thì $Y_{dis,t}$ bắt buộc phải bằng 0 (đang sạc, không xả). Nếu $Y_{dis,t}=1$, thì $Y_{ch,t}$ bắt buộc phải bằng 0 (đang xả, không sạc). Nếu cả $Y_{ch,t}$ và $Y_{dis,t}$ đều bằng 0, thì BESS không hoạt động sạc hay xả tại thời điểm đó.

Ngoài ra, mức độ tích trữ năng lượng của BESS, hay còn gọi là **Trạng thái sạc (SOC)**, phải được duy trì trong một phạm vi giới hạn trên và dưới đã được thiết lập. Điều này giúp bảo vệ pin và đảm bảo hoạt động ổn định của hệ thống. Thêm vào đó, để đảm bảo tính lặp lại và liên tục trong quá trình vận hành, giá trị SOC khi bắt đầu và kết thúc mỗi chu kỳ sạc và xả của BESS cần phải tương đồng.

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}$$

Trong đó SOC_t là trạng thái sạc tại thời điểm t , SOC_{min} và SOC_{max} là các giới hạn dưới và trên cho phép (ví dụ: 10% và 90% để bảo vệ pin).



Hình 2.14. Giới hạn công suất sạc/xả pin

Sự thay đổi SOC theo thời gian được tính toán dựa trên công suất sạc/xả và hiệu suất:

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \frac{[\eta_{ch}P_{ch,t} - P_{dis,t}/\eta_{dis}]\Delta t}{E_{BESS}}$$

Trong đó :

- $SOC(t)$: Trạng thái sạc của BESS ở thời điểm t
- η_{ch}, η_{dis} : Hệ số chuyển đổi năng lượng của BESS trong quá trình sạc/ xả
- SOC_{min}, SOC_{max} : Giới hạn trên và giới hạn dưới của BESS cho SOC

E_{BESS} là tổng dung lượng năng lượng của BESS (Wh hoặc kWh), η_{ch}, η_{dis} là hiệu suất sạc và xả, và Δt là khoảng thời gian. Đối với các ứng dụng chu kỳ (ví dụ: dịch vụ điều tần), SOC khi bắt đầu và kết thúc chu kỳ có thể được ràng buộc để đảm bảo khả năng sẵn sàng cho chu kỳ tiếp theo:

$$SOC(t_0) = SOC(t_{end})$$

2.2.5.2. Ràng buộc về tỉ lệ cắt giảm công suất mong đợi

Trong quá trình vận hành hệ thống có BESS (nhất là khi tích hợp với nguồn năng lượng tái tạo như điện mặt trời hay điện gió), có thể xảy ra tình huống cắt giảm công suất phát (curtailment) để đảm bảo cân bằng công suất và ổn định lưới điện.

Tuy nhiên, việc cắt giảm quá nhiều công suất phát ra từ các nguồn tái tạo sẽ dẫn đến lãng phí năng lượng và giảm hiệu quả khai thác hệ thống.

Tỷ lệ cắt giảm công suất sau khi tối ưu không được lớn hơn tỷ lệ cắt giảm công suất mong đợi

$$S \leq S_0$$

Trong đó :

- S : Tỷ lệ công suất bị cắt giảm sau khi hệ thống đã tối ưu
- S_0 : Ngưỡng tối đa được cho phép cho tỷ lệ công suất bị cắt giảm mong đợi

Việc ràng buộc giúp đảm bảo rằng BESS vận hành hiệu quả, hỗ trợ hệ thống hấp thụ tối đa công suất từ nguồn năng lượng tái tạo mà không gây ra tổn thất không cần thiết do cắt giảm

CHƯƠNG 3

KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

3.1. Lựa chọn hệ thống điện điển hình để mô phỏng

Để đánh giá hiệu quả của hệ thống lưu trữ năng lượng pin (BESS) trong việc nâng cao ổn định lưới điện có SCR thấp khi tích hợp năng lượng tái tạo, chúng tôi lựa chọn hệ thống điện thử nghiệm IEEE 39-Bus làm mô hình cơ sở để thực hiện mô phỏng. Hệ thống IEEE 39-Bus, còn được gọi là hệ thống New England, là một mô hình chuẩn trong nghiên cứu hệ thống điện, bao gồm 10 máy phát, 39 thanh cái (bus), 46 đường dây truyền tải và 12 máy biến áp. Hệ thống này đủ phức tạp để đại diện cho một phần lưới điện truyền tải thực tế và đã được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu về ổn định, điều khiển và quy hoạch hệ thống điện.

3.2. Mô hình và kịch bản mô phỏng

Để nghiên cứu tác động của việc tích hợp NLTT và vai trò của BESS trong lưới điện có SCR thấp, chúng tôi đã thực hiện các cải tạo trên hệ thống IEEE 39-Bus gốc. Cụ thể, một số máy phát đồng bộ truyền thống đã được thay thế bằng các nhà máy điện năng lượng tái tạo dựa trên bộ biến đổi (điện gió và điện mặt trời) và hệ thống BESS được tích hợp tại các bus có SCR tương đối thấp. Việc lựa chọn các bus để tích hợp NLTT và BESS dựa trên phân tích SCR của hệ thống gốc và mục tiêu nghiên cứu. Chương này sẽ đi sâu vào quá trình thiết lập mô hình, các thông số đầu vào, kết quả phân tích tần số hệ thống trong các kịch bản khác nhau, và việc tính toán công suất cũng như dung lượng cần thiết của BESS để cải thiện độ ổn định tần số tại một số nút có SCR yếu trong hệ thống thông qua 2 kịch bản như sau :

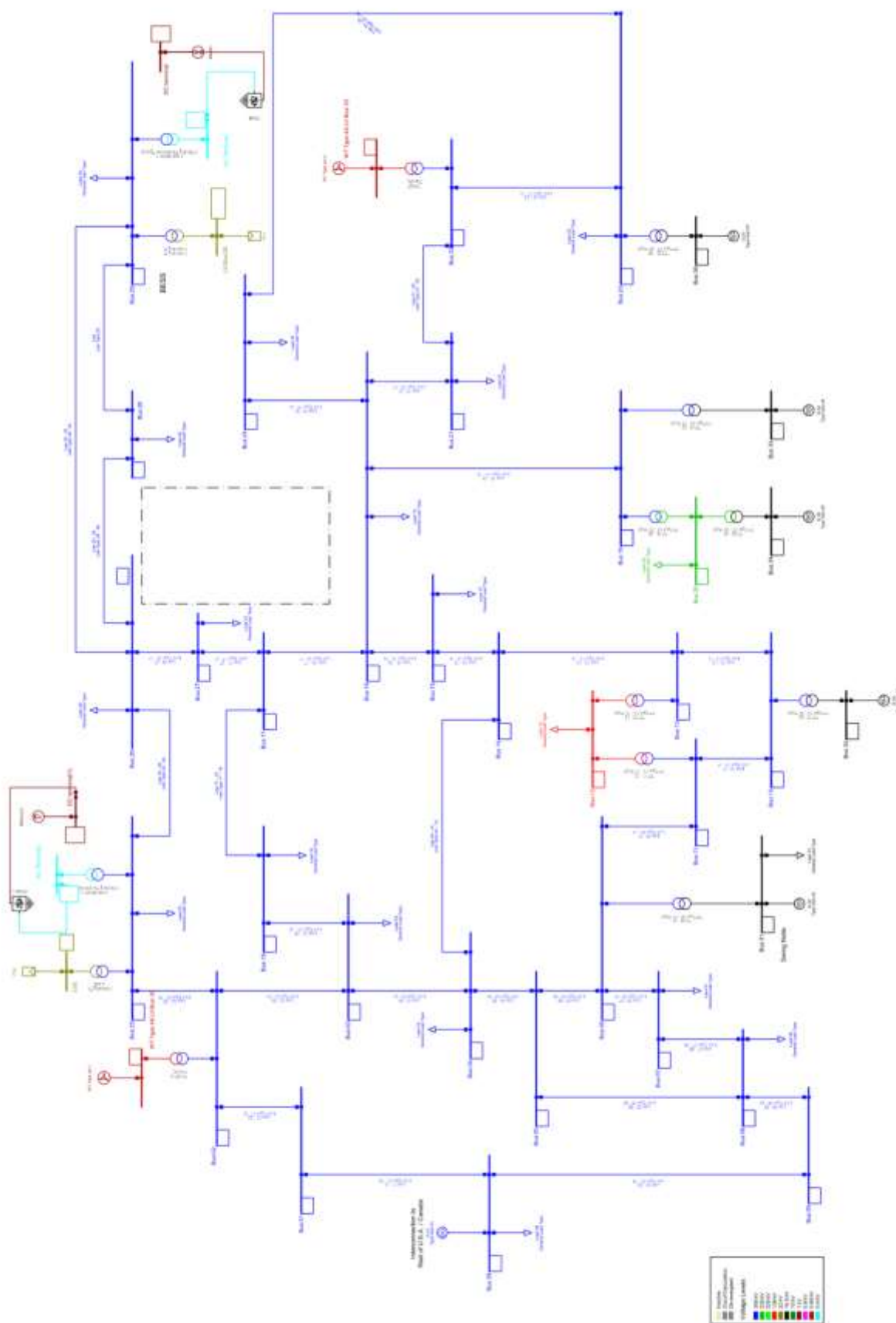
- **Kịch bản 1 :** Sự suy giảm đột ngột công suất của các nhà máy PV1
- **Kịch bản 2 :** Sự cố tách đột ngột một phần phụ tải lớn khỏi lưới điện (Load 29
Trong mỗi kịch bản tính toán, tiến hành xem xét khả năng tham gia điều tần hệ thống điện trong mỗi trường hợp vận hành khác nhau
- Trường hợp 1 : BESS không tham gia điều tần hệ thống điện
- Trường hợp 2 : BESS tham gia điều tần hệ thống điện (BESS tập trung ở Bus 29)
- Trường hợp 3 : BESS tham gia điều tần hệ thống điện (phân bố BESS ở Bus 29 và BUS 25)

Theo đó lưới điện 39 Bus được cải tạo để phù hợp với bài toán như sau :

- Thay đổi tổ máy phát G6 tại Bus 22 thành nhà máy điện gió WT2 công suất 480MW
- Thay đổi tổ máy phát G8 tại Bus 25 thành nhà máy điện mặt trời PV2 công suất 600MW
- Thay đổi tổ máy phát G9 tại Bus 29 thành nhà máy điện mặt trời PV1 công suất 600MW
- Thay đổi tổ máy phát G10 tại Bus 02 thành nhà máy điện gió WT1 công suất 550MW

BUS	Tổ máy phát	
	Tên	P(MW)
Bus 39	G1	1000
Bus 06	G2	0
Bus 10	G3	650
Bus 20	G4	632
Bus 22	G5	508
Bus 23	G7	560
Bus 02	WT1	550
Bus 25	PV2	600
Bus 29	PV1	600
Bus 22	WT2	480
Total		5580
Tỉ lệ % NLTT trong hệ thống		40%

Bảng 3.1. Dữ liệu tổ máy phát và công suất trong hệ thống điện 39 Bus đã cải tạo



Load	Bus	P in MW	Q in Mvar
Load 03	Bus 03	322.0	2.4
Load 04	Bus 04	300.0	184.0
Load 07	Bus 07	233.8	84.0
Load 08	Bus 08	322.0	176.0
Load 12	Bus 12	17.5	88.0
Load 15	Bus 15	320.0	153.0
Load 16	Bus 16	329.0	32.3
Load 18	Bus 18	158.0	30.0
Load 20	Bus 20	628.0	103.0
Load 21	Bus 21	274.0	115.0
Load 23	Bus 23	247.5	84.6
Load 24	Bus 24	308.6	-92.2
Load 25	Bus 25	224.0	47.2
Load 26	Bus 26	139.0	17.0
Load 27	Bus 27	281.0	75.5
Load 28	Bus 28	206.0	27.6
Load 29	Bus 29	130	26.9
Load 31	Bus 31	9.2	4.6
Load 39	Bus 39	1104.0	250.0

Bảng 3.2. Nhu cầu phụ tải

Line	From	To	Length in km	R*in Ω /km	X*in Ω /km	C*in μ F/km
Line 01-02	Bus 01	Bus 02	163.06425	0.02554745	0.300	0.0095491
Line 01-39	Bus 01	Bus 39	99.18750	0.01200000	0.300	0.0168514
Line 02-03	Bus 02	Bus 03	59.90925	0.02582781	0.300	0.0095677
Line 02-25	Bus 02	Bus 25	34.12050	0.24418605	0.300	0.0095360
Line 03-04	Bus 03	Bus 04	84.50775	0.01830986	0.300	0.0058386
Line 03-18	Bus 03	Bus 18	52.76775	0.02481203	0.300	0.0090296

Line 04-05	Bus 04	Bus 05	50.78400	0.01875000	0.300	0.0058892
Line 04-14	Bus 04	Bus 14	51.18075	0.01860465	0.300	0.0060177
Line 05-06	Bus 05	Bus 06	10.31550	0.02307692	0.300	0.0093763
Line 05-08	Bus 05	Bus 08	44.43600	0.02142857	0.300	0.0074026
Line 06-07	Bus 06	Bus 07	36.50100	0.01956522	0.300	0.0068993
Line 06-11	Bus 06	Bus 11	32.53350	0.02560976	0.300	0.0095149
Line 07-08	Bus 07	Bus 08	18.25050	0.02608696	0.300	0.0095247
Line 08-09	Bus 08	Bus 09	144.02025	0.01900826	0.300	0.0058864
Line 09-39	Bus 09	Bus 39	99.18750	0.01200000	0.300	0.0269622
Line 10-11	Bus 10	Bus 11	17.06025	0.02790698	0.300	0.0095230
Line 10-13	Bus 10	Bus 13	17.06025	0.02790698	0.300	0.0095230
Line 13-14	Bus 13	Bus 14	40.07175	0.02673267	0.300	0.0095825
Line 14-15	Bus 14	Bus 15	86.09475	0.02488479	0.300	0.0094740
Line 15-16	Bus 15	Bus 16	37.29450	0.02872340	0.300	0.0102184
Line 16-17	Bus 16	Bus 17	35.31075	0.02359551	0.300	0.0084699
Line 16-19	Bus 16	Bus 19	77.36625	0.02461538	0.300	0.0087569
Line 16-21	Bus 16	Bus 21	53.56125	0.01777778	0.300	0.0106018
Line 16-24	Bus 16	Bus 24	23.40825	0.01525424	0.300	0.0064740
Line 17-18	Bus 17	Bus 18	32.53350	0.02560976	0.300	0.0090353
Line 17-27	Bus 17	Bus 27	68.63775	0.02254335	0.300	0.0104420
Line 21-22	Bus 21	Bus 22	55.54500	0.01714286	0.300	0.0102914
Line 22-23	Bus 22	Bus 23	38.08800	0.01875000	0.300	0.0108013
Line 23-24	Bus 23	Bus 24	138.86250	0.01885714	0.300	0.0057937
Line 25-26	Bus 25	Bus 26	128.15025	0.02972136	0.300	0.0089213
Line 26-27	Bus 26	Bus 27	58.32225	0.02857143	0.300	0.0091555
Line 26-28	Bus 26	Bus 28	188.05950	0.02721519	0.300	0.0092457
Line 26-29	Bus 26	Bus 29	247.96875	0.02736000	0.300	0.0092480
Line 28-29	Bus 28	Bus 29	59.90925	0.02781457	0.300	0.0092627

Bảng 3.3. Dữ liệu đường dây dựa trên 100 MVA và 50 Hz

From Bus	To Bus	R in p.u.	X in p.u.	Transformer Tap Magnitude in p.u.	Transformer Tap Angle in deg
12	11	0.0016	0.0435	1.0060	0.00
12	13	0.0016	0.0435	1.0060	0.00
6	31	0.0000	0.0250	1.0700	0.00
10	32	0.0000	0.0200	1.0700	0.00
19	33	0.0007	0.0142	1.0700	0.00
20	34	0.0009	0.0180	1.0090	0.00
22	35	0.0000	0.0143	1.0250	0.00
23	36	0.0005	0.0272	1.0000	0.00
25	37	0.0006	0.0232	1.0250	0.00
2	30	0.0000	0.0181	1.0250	0.00
29	38	0.0008	0.0156	1.0250	0.00
19	20	0.0007	0.0138	1.0600	0.00

Bảng 3.4. Dữ liệu máy biến áp dựa trên 100 MVA

Transfor	From Bus	To Bus	Sr in MV A	Ur HV in kV	Ur LV in kV	R in p.u.	X in p.u.	Zin p.u.	Ukin %	ukrin %
Trf 12-11	Bus 12	Bus 11	300	345	138	0.0048	0.1305	0.1306	13.058	0.48
Trf 12-13	Bus 12	Bus 13	300	345	138	0.0048	0.1305	0.1306	13.058	0.48
Trf 06-31	Bus 06	Bus 31	700	345	16.5	0.0000	0.1750	0.1750	17.500	0.00
Trf 10-32	Bus 10	Bus 32	800	345	16.5	0.0000	0.1600	0.1600	16.000	0.00
Trf 19-33	Bus 19	Bus 33	800	345	16.5	0.0056	0.1136	0.1137	11.373	0.56
Trf 20-34	Bus 20	Bus 34	2x300	230	16.5	0.0054	0.1080	0.1081	10.813	0.54
Trf 22-35	Bus 22	Bus 35	800	345	16.5	0.0000	0.1144	0.1144	11.440	0.00
Trf 23-36	Bus 23	Bus 36	700	345	16.5	0.0035	0.1904	0.1904	19.043	0.35
Trf 25-37	Bus 25	Bus 37	700	345	16.5	0.0042	0.1624	0.1625	6.2454	0.42
Trf 02-30	Bus 02	Bus 30	1000	345	16.5	0.0000	0.1810	0.1810	18.100	0.00
Trf 29-38	Bus 29	Bus 38	1000	345	16.5	0.0080	0.1560	0.1562	15.620	0.80
Trf 19-20	Bus 19	Bus 20	1000	345	230	0.0070	0.1380	0.1382	13.817	0.70

Bảng 3.5. Dữ liệu máy biến áp trong mô hình PowerFactory

3.3. Kết quả tính toán

3.3.1 Xác định vị trí lắp đặt BESS

Dựa trên thông tin được cung cấp, việc cân nhắc vị trí lắp đặt Hệ thống lưu trữ năng lượng pin (BESS) tại các nút (bus) yếu trong hệ thống điện, được đặc trưng bởi Tỷ số ngắn mạch (SCR) thấp, là một vấn đề kỹ thuật quan trọng và phức tạp. Chỉ số SCR cung cấp một thước đo định lượng về độ mạnh của một nút trong hệ thống; SCR thấp cho thấy nút đó có tổng trở tương đương lớn hơn nhìn từ nút đó ra hệ thống, làm cho điện áp tại nút này nhạy cảm hơn với sự thay đổi công suất.

LV-Bus 38	22.00	0.00	0.00	1.10	1653.86 MVA	43.40 kA	-85.23	109.51 kA	43.40
2-Winding Trans Bus 29					1653.86 MVA	43.40 kA	94.77	109.51 kA	
PV1					0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	
LV2	22.00	0.00	0.00	1.10	2856.87 MVA	74.97 kA	-84.50	186.42 kA	74.97
2-Winding Trans Bus 25					2856.87 MVA	74.97 kA	95.50	186.42 kA	
PV2					0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	
WT Type 4A LV-Bus	0.69	0.00	0.00	1.05	3830.56 MVA	3205.18 kA	-85.30	8095.22 kA	3205.18
Trf WT (1) Bus 02					3830.56 MVA	3205.18 kA	94.70	8095.22 kA	
WT Type 4A-1					0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	
WT Type 4A LV-Bus	0.69	0.00	0.00	1.05	3207.04 MVA	2683.46 kA	-85.72	6842.04 kA	2683.46
Trf WT Bus 22					3207.04 MVA	2683.46 kA	94.28	6842.04 kA	
WT Type 4A-2					0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	

Hình 3.1. Công suất ngắn mạch của các nhà máy năng lượng tái tạo

Dựa trên kết quả mô phỏng chế độ bình thường về công suất ngắn mạch (S) của các nhà máy điện năng lượng tái tạo và công suất tác dụng (P) đã được thiết lập, tỉ lệ ngắn mạch (SCR) tại các nút đầu nối quan trọng được tính toán theo công thức $SCR = S/P$ và được thể hiện trong Bảng 3.6. Các giá trị SCR này cung cấp thông tin về độ mạnh của lưới điện tại các vị trí đầu nối của các nguồn năng lượng tái tạo, cho thấy khả năng duy trì ổn định điện áp và tần số của hệ thống khi có sự thay đổi công suất từ các nguồn này.

Bus	P (MW)	S (SCMVA)	SCR
22	480	3207.04	6.6813
25	600	2856.67	4.7611
29	600	1653.86	2.7564
02	550	3830.56	6.9647

Bảng 3.6 Tỉ lệ SCR tại các bus có nhà máy NLTT

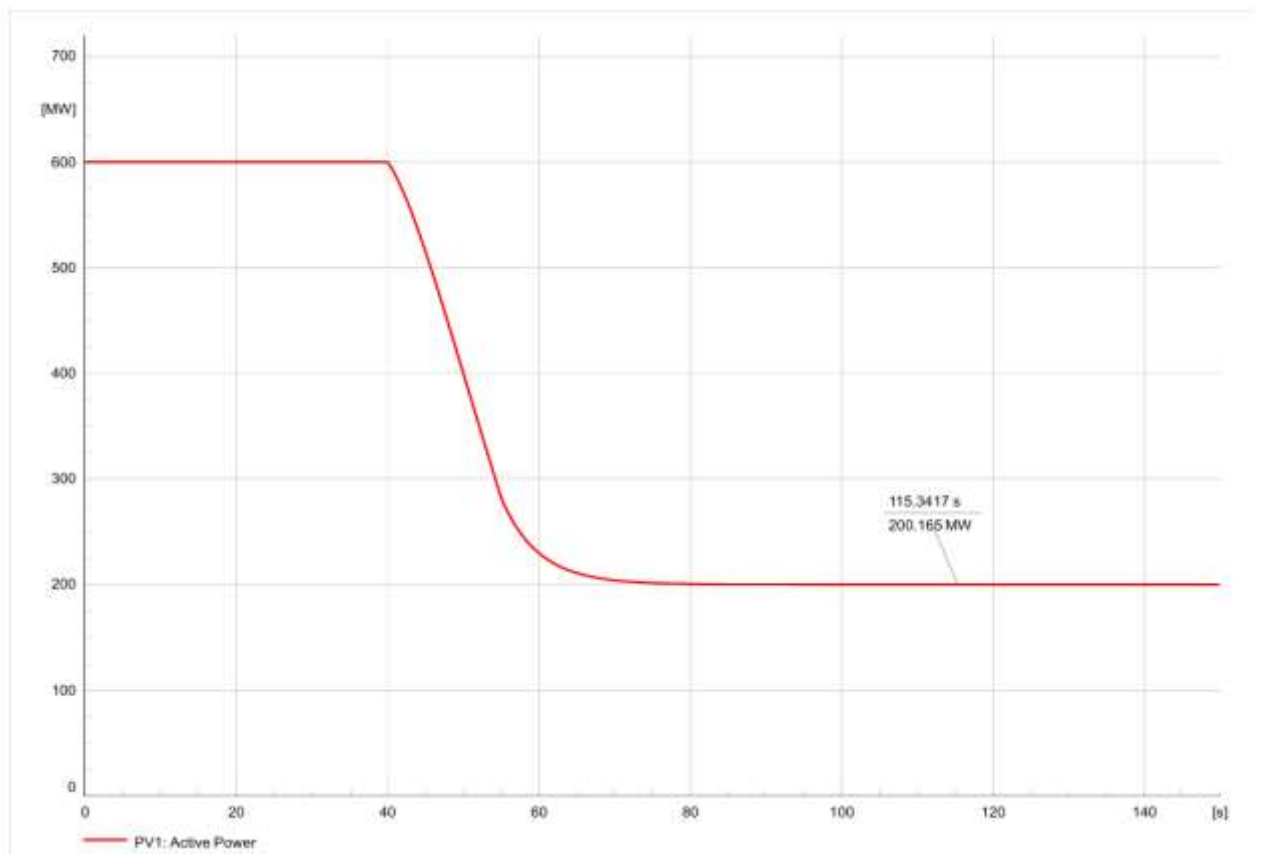
Việc lắp đặt BESS tại một bus yếu như bus 29 có thể mang lại lợi ích hoặc thách thức

cho việc điều chỉnh tần số. Việc đặt BESS tại một bus yếu có SCR thấp có thể khuếch đại các dao động điện áp do việc bơm hoặc hấp thụ công suất nhanh chóng của BESS để điều chỉnh tần số. Điều này có khả năng dẫn đến các vấn đề về ổn định điện áp tại bus đó hoặc khu vực lân cận. Việc điều khiển cẩn thận công suất phản kháng của BESS có thể là cần thiết để giảm thiểu các tác động này.

3.3.2. Kịch bản 1 : Suy giảm đột ngột công suất phát của các nhà máy điện mặt trời

Các nhà máy năng lượng tái tạo chịu ảnh hưởng nhiều bởi thời tiết, đặc biệt là các nhà máy điện mặt trời dễ dàng sụt giảm công suất và sản lượng đột ngột do suy giảm bức xạ mặt trời khi thời tiết thay đổi

Tại kịch bản 1, bài báo cáo mô phỏng với nhà máy điện mặt trời PV bị giảm bức xạ mặt trời, nhằm kiểm tra khả năng đáp ứng của hệ thống trong các tình huống vận hành khác nhau

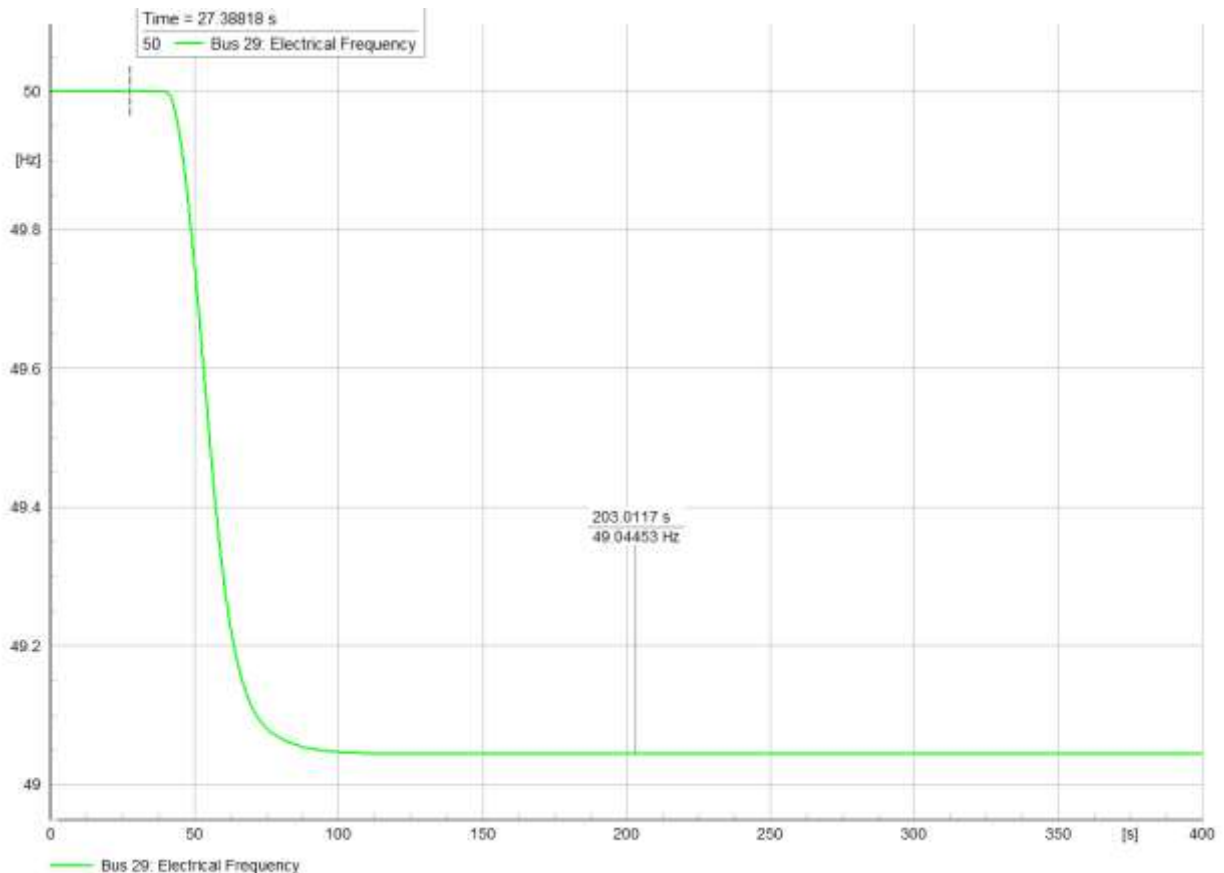


Hình 3.2. Công suất phát của nhà máy điện mặt trời PV1 bị giảm đột ngột

Công suất phát điện của nhà máy điện mặt trời đã ghi nhận một sự suy giảm đáng kể và nhanh chóng, xuất phát từ sự biến động của bức xạ mặt trời. Cụ thể, từ mức công suất

hoạt động ổn định ban đầu đạt xấp xỉ 600MW, sản lượng điện của nhà máy đã sụt giảm mạnh mẽ xuống còn khoảng 200MW. Sự sụt giảm công suất này xảy ra trong một khoảng thời gian tương đối ngắn, phản ánh tác động tức thời của điều kiện thời tiết như mây đen che phủ dày đặc hoặc sự xuất hiện đột ngột của các trận mưa dông làm giảm lượng ánh sáng mặt trời chiếu trực tiếp lên các tấm pin.

Trường hợp 1 : Không có BESS tham gia vào hệ thống



Hình 3.3. Đáp ứng tần số hệ thống trong các trường hợp tại kịch bản 1

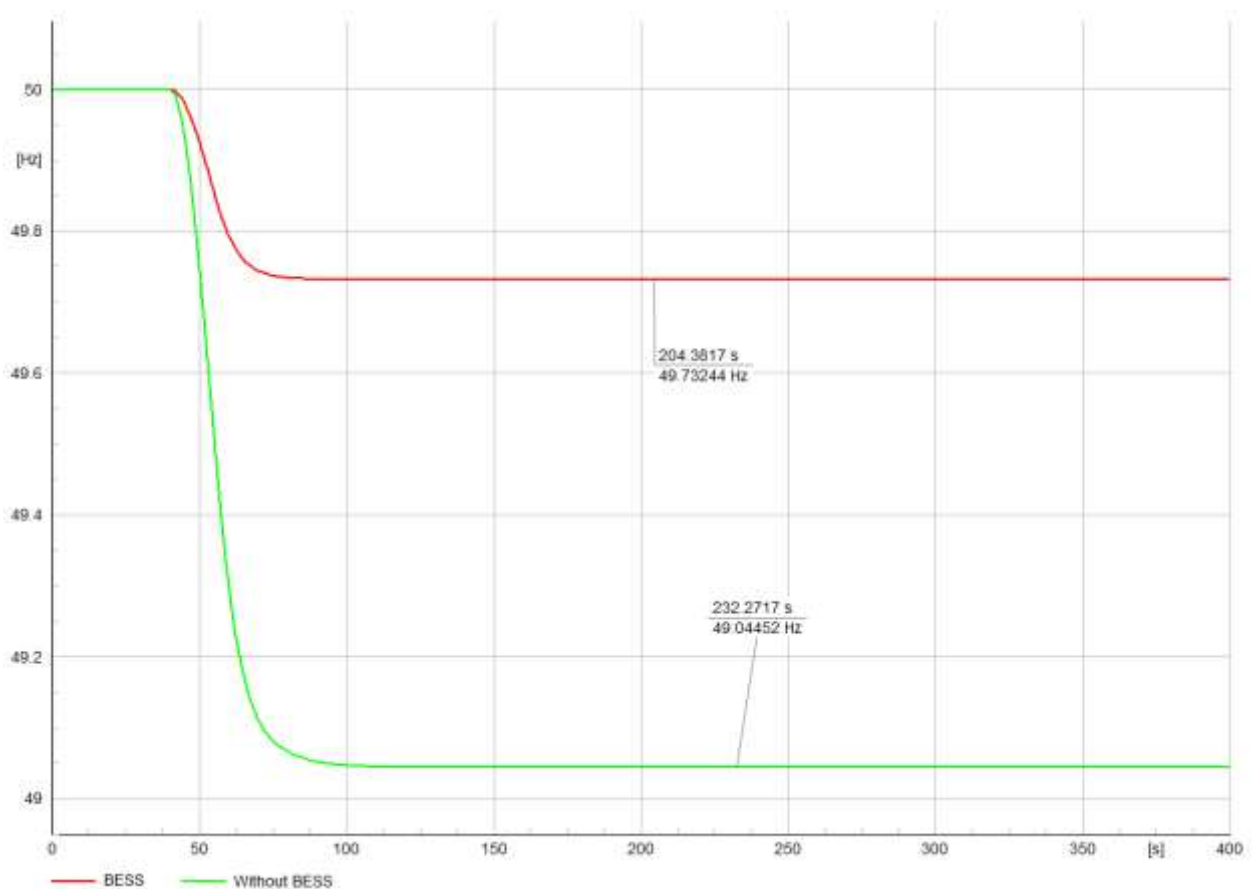
Nhận xét :

Trường hợp 1 : Khi không có BESS tham gia vào hệ thống

- Tại thời điểm khoảng 40 giây, một sự cố xảy ra đã gây ra sự sụt giảm nhanh chóng và đáng kể của tần số hệ thống.
- Tần số giảm xuống mức thấp nhất đạt xấp xỉ 49.05 Hz vào khoảng giây thứ 100 của quá trình mô phỏng.
- Các nhà máy khác trong lưới tham gia hỗ trợ từ xa giúp hệ thống phục hồi về trạng thái ổn định
- Sau khi đạt giá trị cực tiểu, tần số hệ thống bắt đầu có xu hướng phục hồi chậm hơn.

- Quan sát này chỉ ra rằng khi không có sự hỗ trợ từ BESS, hệ thống có khả năng tự phục hồi một phần sau sự cố gây mất cân bằng công suất, nhưng quá trình phục hồi diễn ra chậm và tần số có thể ổn định ở mức dưới 50 Hz trong một khoảng thời gian dài, dù mức tần số thấp nhất (xấp xỉ 49.05 Hz) vẫn nằm trong giới hạn tần số cho phép phát liên tục nhằm duy trì sự vận hành của nhà máy, theo thông tư 25/TT-BCT cho sự cố đơn lẻ ($f_{min} = 49Hz < f < f_{max} = 51Hz$)

Trường hợp 2 : BESS tập trung ở bus 29



Hình 3.4. Đáp ứng tần số hệ thống trong các trường hợp 2

Nhận xét :

Đồ thị minh họa sự cải thiện rõ rệt trong đáp ứng tần số của hệ thống khi có hệ thống lưu trữ năng lượng pin (BESS) tham gia điều tần tại Bus 29, so sánh với trường hợp không có BESS.

- Sau khi sự cố xảy ra vào khoảng giây thứ 50, tần số hệ thống khi có BESS (đường màu đỏ) chỉ giảm một lượng nhỏ, đạt mức thấp nhất xấp xỉ 49.75 Hz. Mức giảm này ít hơn đáng kể so với mức giảm sâu xuống khoảng 49.05 Hz khi không có

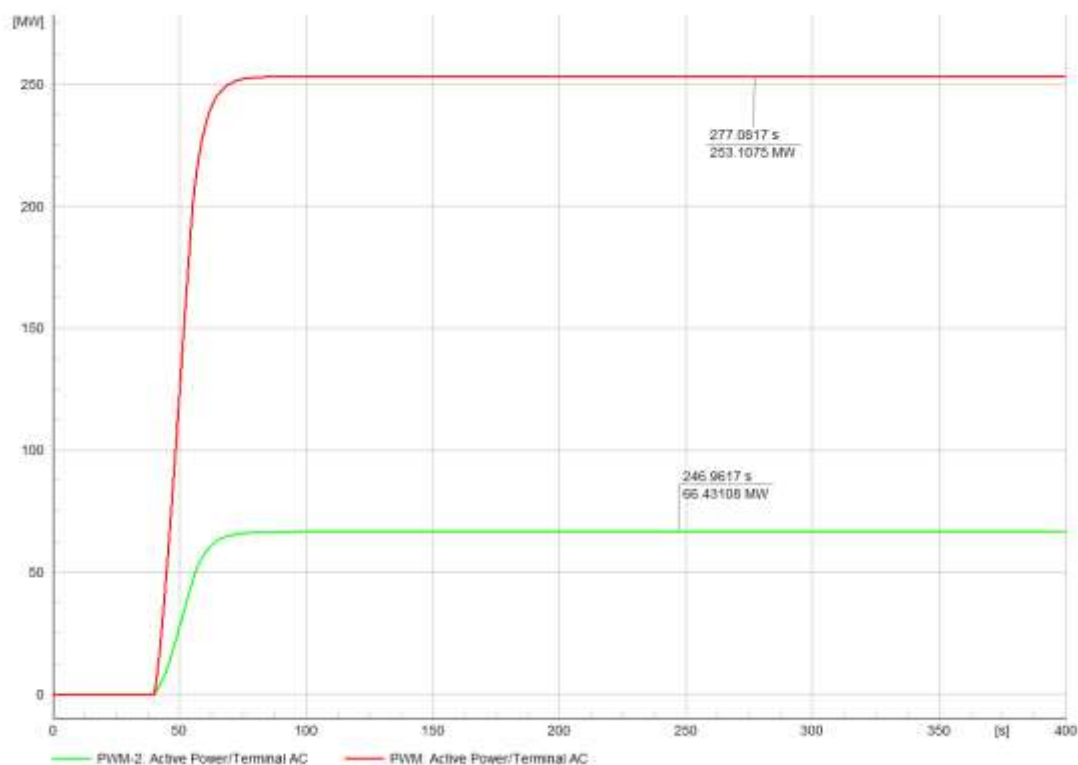
BESS (đường màu xanh lá cây).

- Quá trình phục hồi tần số khi có BESS diễn ra rất nhanh chóng. Tần số nhanh chóng tăng trở lại và ổn định ở mức cao hơn đáng kể so với trường hợp không có BESS.
- Trong suốt thời gian còn lại của mô phỏng, tần số hệ thống khi có BESS duy trì ổn định ở mức xấp xỉ 49.75 Hz, gần với tần số danh định 50 Hz hơn nhiều so với mức ổn định khoảng 49.2 Hz khi không có BESS.

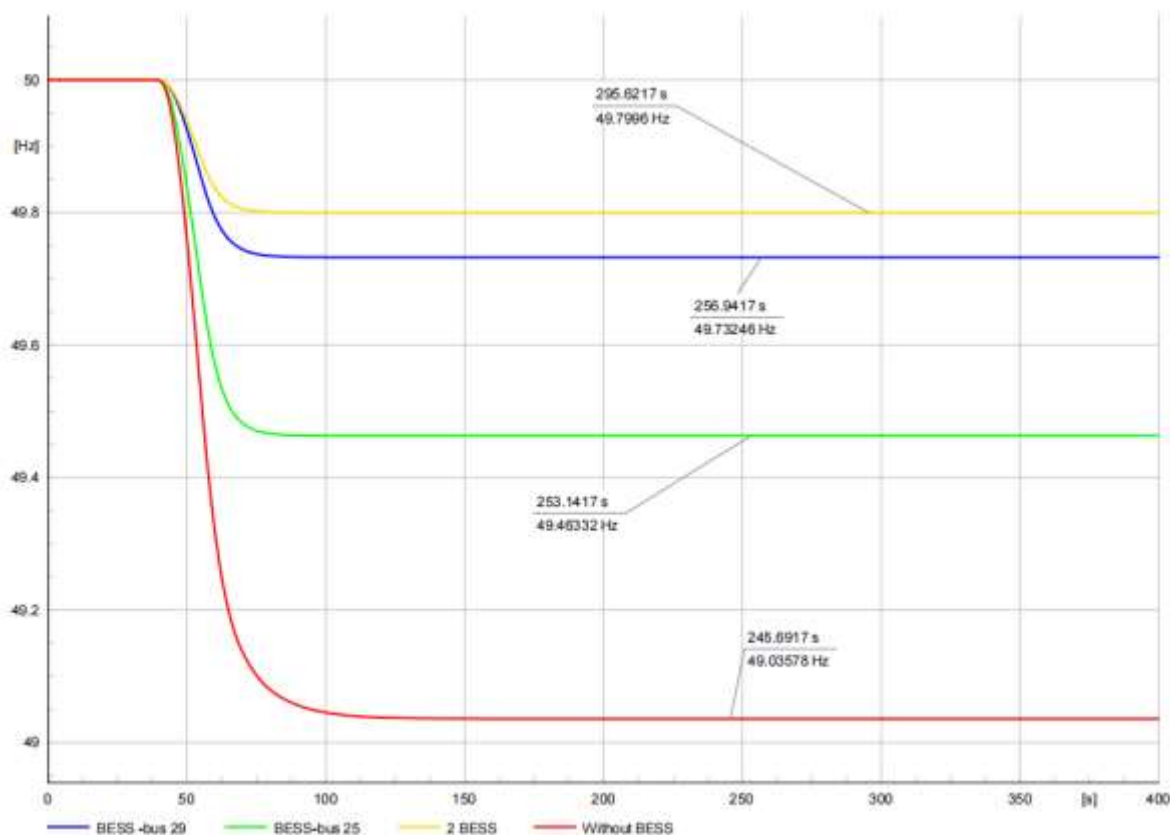
Kết quả này cho thấy việc triển khai BESS tại Bus 29 đã phát huy hiệu quả cao trong việc hạn chế mức độ suy giảm tần số ban đầu và cải thiện tốc độ cũng như mức độ phục hồi tần số của hệ thống sau sự cố, góp phần tăng cường đáng kể sự ổn định tần số tại điểm kết nối.

Trường hợp 3: BESS phân bố tại Bus 29 và Bus 25

Trường hợp này khảo sát đáp ứng của hệ thống điện khi tổng công suất của hệ thống lưu trữ năng lượng pin (BESS) được phân bổ lắp đặt tại hai vị trí khác nhau trong lưới: Bus 29 và Bus 25. Mục tiêu là đánh giá hiệu quả của cấu hình BESS phân tán này trong việc hỗ trợ ổn định hệ thống sau sự cố, đặc biệt là khả năng điều chỉnh tần số, so với các trường hợp BESS tập trung hoặc không có BESS đã phân tích trước đó. Việc phân bổ BESS tại các bus khác nhau, dựa trên các tiêu chí như Tỷ số ngắn mạch (SCR) hay vị trí của các nguồn năng lượng tái tạo, được kỳ vọng sẽ mang lại lợi ích ổn định lưới toàn diện hơn.



Hình 3.5. Công suất BESS bơm vào hệ thống



Hình 3.6. Đáp ứng tần số hệ thống trong các trường hợp tại trường hợp 3

Nhân xét :

Đồ thị cho thấy tác động rõ rệt của Hệ thống lưu trữ năng lượng bằng pin (BESS) đối với việc ổn định tần số lưới điện sau sự cố lúc $t=50s$.

Không có BESS (Đường màu đỏ): Tần số sụt giảm nghiêm trọng nhất xuống ~ 49.04 Hz, cho thấy lưới điện rất dễ bị tổn thương khi không có các thiết bị phản ứng nhanh.

Có BESS đơn lẻ (Đường xanh lá & xanh dương):

Việc lắp đặt BESS cải thiện đáng kể sự ổn định.

Vị trí là yếu tố then chốt: Đặt BESS tại thanh cái 29 (xanh dương) hiệu quả hơn hẳn so với tại thanh cái 25 (xanh lá), giúp tần số ổn định ở mức cao hơn nhiều (~ 49.73 Hz so với ~ 49.46 Hz).

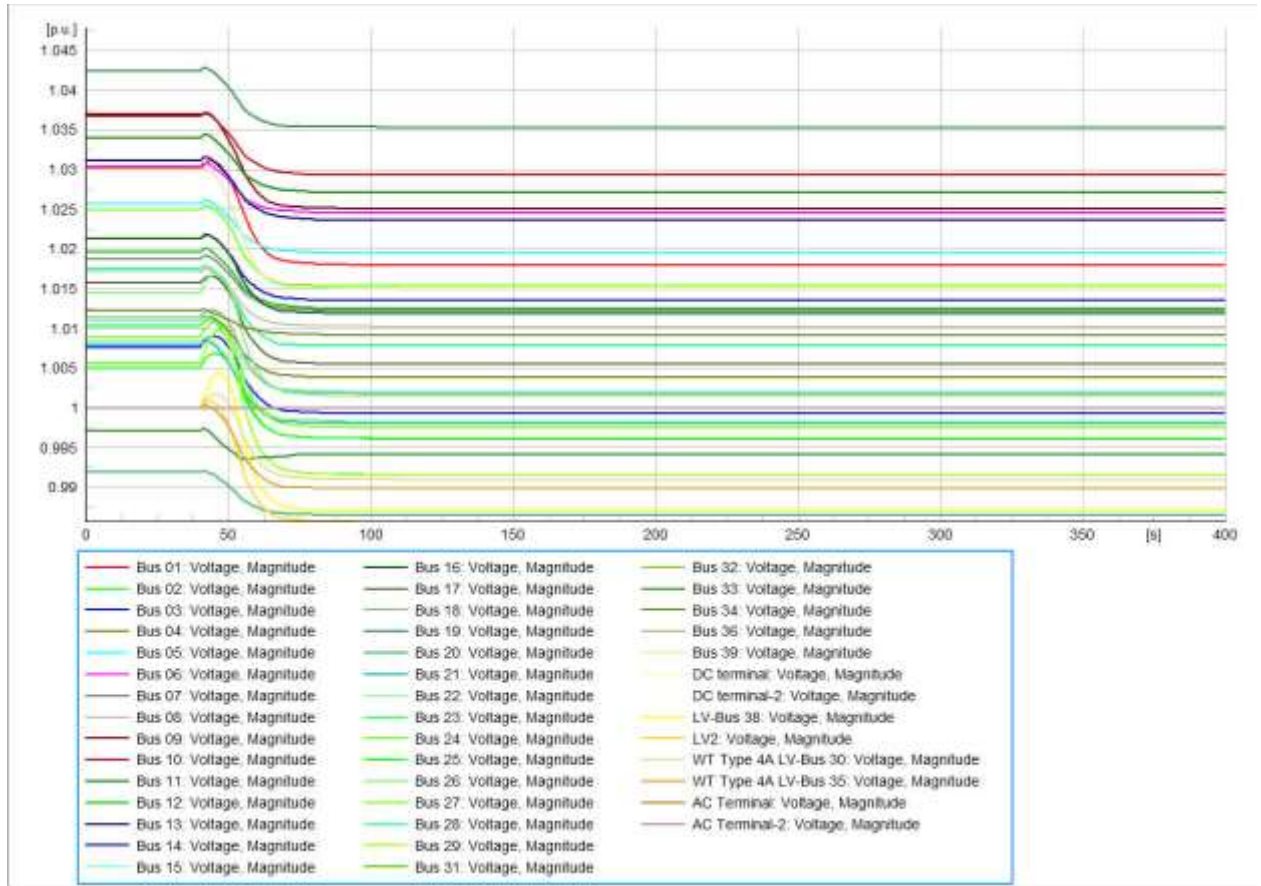
BESS phân tán (Đường màu vàng):

Đây là giải pháp tối ưu nhất.

Việc đặt BESS tại cả hai vị trí (bus 25 và 29) giúp hạn chế tối đa độ sụt giảm tần số và duy trì tần số ổn định ở mức cao nhất là ~ 49.80 Hz, rất gần mức danh định.

Kết luận:

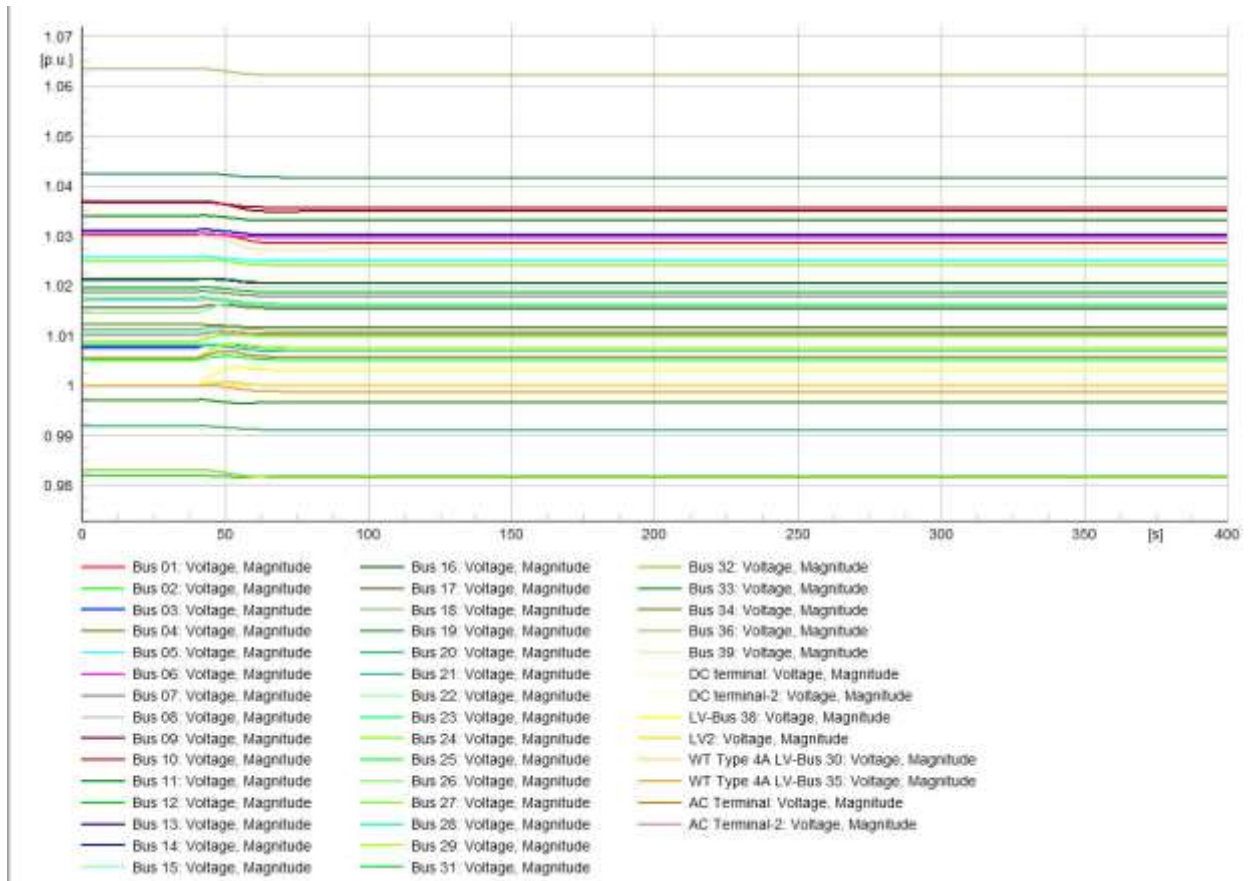
BESS là giải pháp cực kỳ hiệu quả để cải thiện ổn định tần số. Việc lắp đặt BESS phân tán tại các vị trí chiến lược trên lưới mang lại hiệu quả cao nhất, giúp hệ thống vận hành an toàn và tin cậy.



Hình 3.7. Dao động điện áp trên các thanh cái tại trường hợp 1 kịch bản 1

Biểu đồ cho thấy rõ ràng điện áp tại nhiều điểm trong lưới bị sụt giảm đáng kể và xuất hiện các dao động mạnh sau thời điểm xảy ra sự cố.

Điều này cho thấy sự khó khăn của lưới điện trong việc duy trì ổn định điện áp khi đối mặt với mất cân bằng công suất đột ngột mà không có thiết bị có khả năng phản ứng nhanh như BESS.



Hình 3.8. Dao động điện áp trên các thanh cái tại trường hợp 3 kịch bản 1

- So với trường hợp không có BESS, sự ổn định điện áp đã được cải thiện rõ rệt.
- Các sụt giảm và dao động điện áp trên các thanh cái sau khi sự cố xảy ra đã giảm đáng kể.
- Điện áp phục hồi nhanh hơn và duy trì mức ổn định tốt hơn.
- Điều này cho thấy BESS đóng vai trò hiệu quả trong việc giúp lưới điện xử lý các nhiễu loạn công suất đột ngột và duy trì điện áp ổn định.

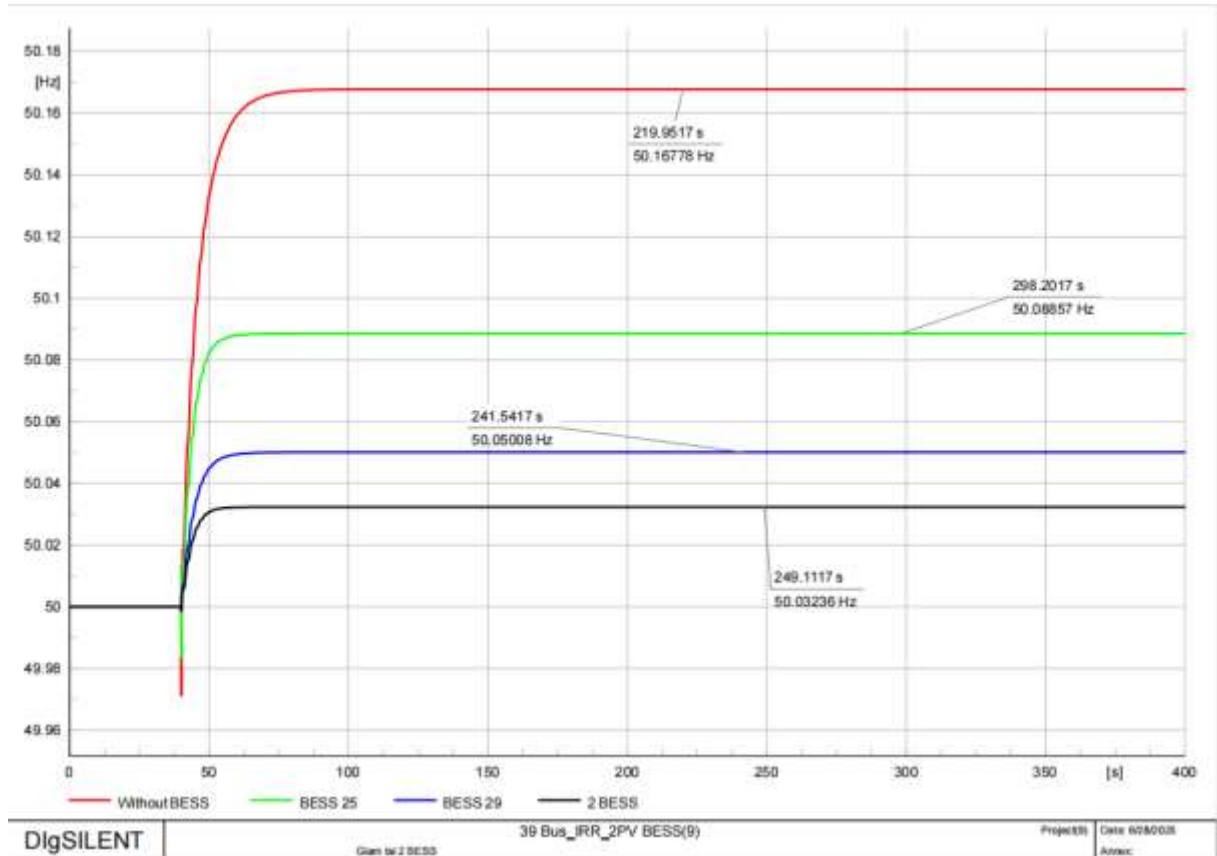
3.3.3. Kịch bản 2: Sự cố tách đột ngột một phần phụ tải lớn khỏi lưới điện

Trong phần này, chúng ta sẽ đi sâu vào phân tích một kịch bản sự cố đặc trưng và quan trọng trong hệ thống điện: sự cố mất đột ngột một phần phụ tải lớn (Load 29). Sự kiện này xảy ra khi một lượng đáng kể nhu cầu tiêu thụ điện bất ngờ bị ngắt kết nối khỏi lưới. Điều này dẫn đến việc tần số hệ thống có xu hướng tăng lên nhanh chóng.

Để đối phó với tình huống tăng tần số này, hệ thống lưu trữ năng lượng pin (BESS) đóng một vai trò then chốt. BESS sẽ hoạt động ở chế độ hấp thụ công suất dư thừa từ lưới,

thực hiện quá trình sạc. Hoạt động linh hoạt này giúp cân bằng lại công suất và kiểm soát tốc độ tăng, cũng như mức tăng cuối cùng của tần số, đưa tần số trở lại phạm vi hoạt động an toàn.

BESS được đặt tại các vị trí chiến lược là Bus 25 và Bus 29. Việc lựa chọn phân tích cấu hình phân tán này dựa trên nhận định rằng đây là phương án tối ưu hơn



Hình 3.9. Đáp ứng tần số hệ thống trong các trường hợp tại kịch bản 2

Khi mất tải, tần số lưới điện tăng lên do thừa công suất. BESS hoạt động bằng cách hấp thụ năng lượng thừa để ổn định tần số.

1. Không có BESS (Đường màu đỏ): Tần số tăng vọt không kiểm soát lên mức cao nhất là ~50.17 Hz.
2. Có BESS đơn lẻ (Xanh lá & Xanh nước): BESS giúp hạn chế hiệu quả đà tăng của tần số. Đặt tại bus 29 (Xanh nước) cho kết quả tốt hơn (~50.05 Hz) so với tại bus 25 (Xanh lá) (~50.09 Hz).
3. BESS phân tán (Đường màu đen): Đây là giải pháp tối ưu nhất. Tần số được kiểm soát gần như hoàn hảo, ổn định ở mức ~50.03 Hz, rất gần với giá trị danh định.

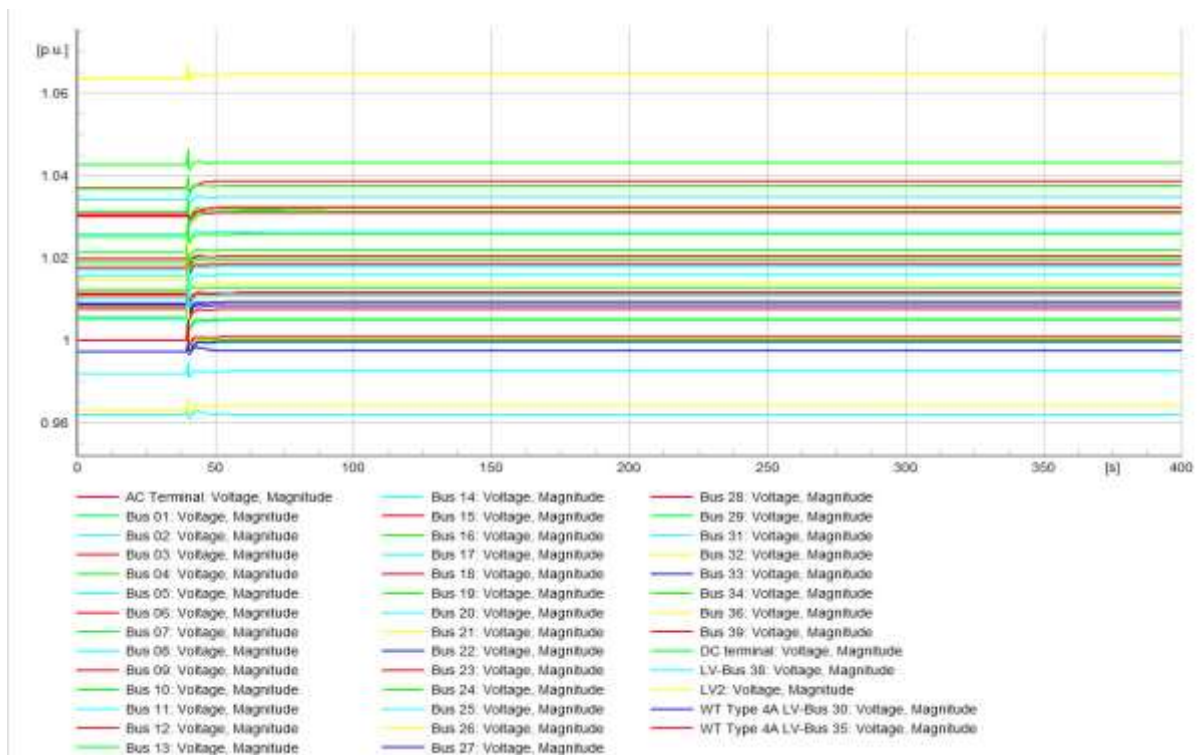
Kết luận: Việc lắp đặt BESS phân tán tại các vị trí chiến lược (đường màu đen) là giải

pháp toàn diện và hiệu quả nhất để giữ lưới điện ổn định trước các sự cố.

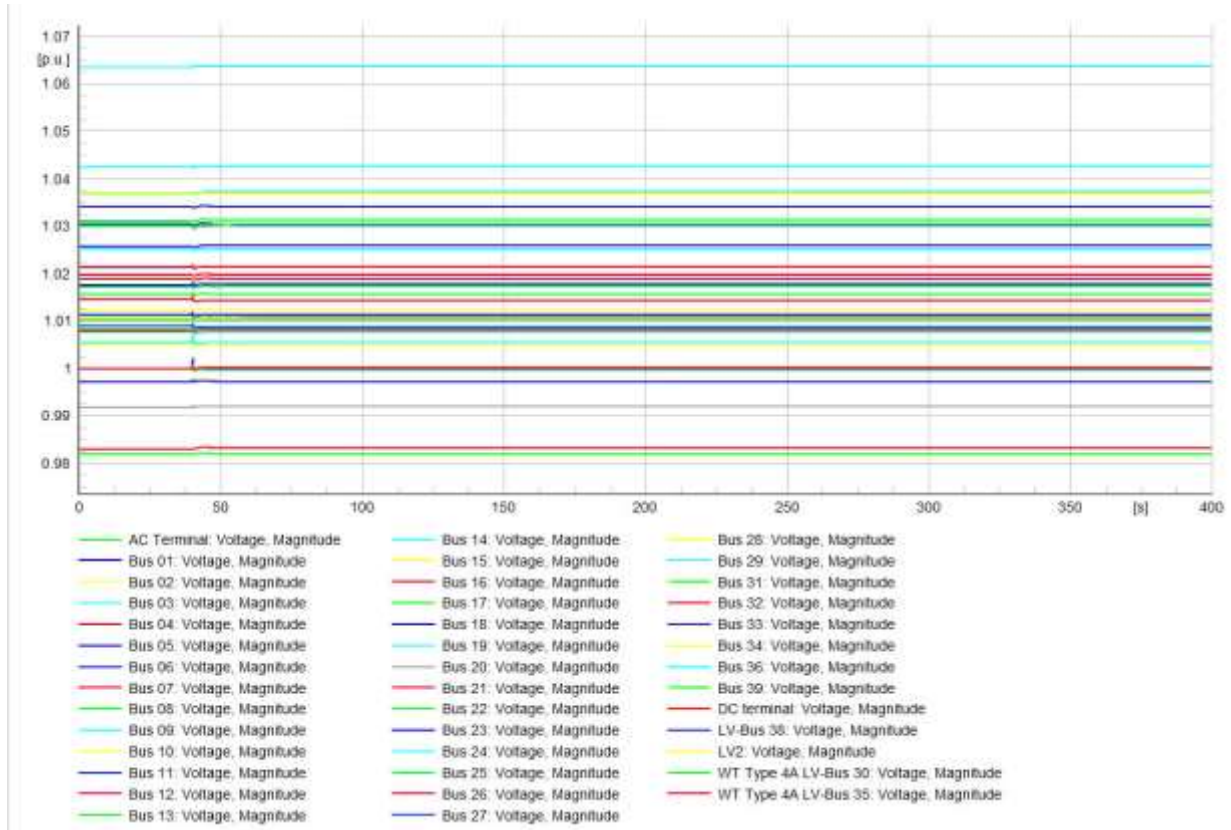


Hình 3.10. Trạng thái của BESS

Đồ thị cho thấy hai đơn vị BESS đã phản ứng nhanh chóng sau sự cố bằng cách hấp thụ công suất từ lưới điện (thể hiện qua giá trị âm).



Hình 3.11. Dao động điện áp trên các thanh cái tại trường hợp 1 kịch bản 2



Hình 3.12. Dao động điện áp trên các thanh cái tại trường hợp 3 kịch bản 2

- Khi có sự tham gia của BESS, biểu đồ cho thấy sự cố mất tải cũng gây ra hiện tượng tăng điện áp, nhưng mức tăng này rõ ràng là nhỏ hơn đáng kể so với trường hợp không có BESS. Các dao động điện áp cũng ít nghiêm trọng hơn và hệ thống có vẻ ổn định điện áp nhanh chóng hơn ở mức gần với giá trị ban đầu hơn.
- So sánh và nhận xét: Việc so sánh hai biểu đồ cho thấy BESS đóng vai trò cực kỳ hiệu quả trong việc duy trì ổn định điện áp khi xảy ra sự cố mất tải. Bằng cách hấp thụ công suất dư thừa từ lưới (chế độ sạc), BESS đã giúp hạn chế đáng kể mức tăng điện áp quá mức và giảm thiểu dao động, giữ cho điện áp hệ thống nằm trong phạm vi cho phép tốt hơn. Điều này làm tăng độ tin cậy và khả năng vận hành an toàn của lưới điện khi có các biến động lớn về phụ tải.

CHƯƠNG 4

THẢO LUẬN VÀ ĐÁNH GIÁ

Dựa trên kết quả mô phỏng từ các kịch bản sự cố đã phân tích, Chương này sẽ thảo luận sâu hơn về vai trò và hiệu quả của BESS trong việc nâng cao ổn định lưới điện có SCR thấp khi tích hợp NLTT, đồng thời đánh giá các thách thức và đề xuất hướng phát triển tiếp theo.

4.1. Đánh giá hiệu quả của BESS trong việc nâng cao ổn định hệ thống

Kết quả mô phỏng đã chứng minh rõ ràng hiệu quả của hệ thống lưu trữ năng lượng pin (BESS) trong việc cải thiện đáng kể đáp ứng động lực của lưới điện khi xảy ra các nhiễu loạn liên quan đến sự biến động của nguồn năng lượng tái tạo và phụ tải.

- Cải thiện đáp ứng tần số: Trong cả hai kịch bản sự cố (suy giảm công suất phát và mất phụ tải đột ngột), sự tham gia của BESS vào dịch vụ điều tần đã giúp hạn chế đáng kể biên độ sụt giảm hoặc gia tăng tần số ban đầu. BESS, với khả năng phản ứng công suất rất nhanh (thường trong vòng mili giây), có thể bù đắp hoặc hấp thụ công suất mất cân bằng trước khi các máy phát đồng bộ truyền thống có thể phản ứng đầy đủ. Điều này làm giảm tốc độ thay đổi tần số (RoCoF) và độ vồng/vọt tần số, giữ cho tần số hệ thống nằm trong phạm vi an toàn và giảm thiểu nguy cơ cắt tải hoặc cắt nguồn do vi phạm ngưỡng tần số.
- Hỗ trợ ổn định điện áp: Mặc dù tập trung chính vào điều tần, kết quả mô phỏng cũng cho thấy BESS đóng vai trò tích cực trong việc hỗ trợ ổn định điện áp. Bằng cách điều khiển công suất tác dụng sạc/xả và khả năng điều khiển công suất phản kháng (nếu được cấu hình), BESS giúp giảm thiểu biến động điện áp trên các thanh cái khi xảy ra sự cố. Điều này đặc biệt quan trọng tại các bus có SCR thấp, nơi điện áp nhạy cảm hơn với sự thay đổi công suất.
- Tăng cường khả năng chống chịu của hệ thống: Việc tích hợp BESS giúp hệ thống điện trở nên "cứng" hơn và có khả năng chống chịu tốt hơn trước các nhiễu loạn. BESS cung cấp một nguồn/tải linh hoạt có thể phản ứng nhanh chóng để duy trì cân bằng công suất và điện áp, giảm bớt áp lực lên các thành phần khác của hệ thống và hỗ trợ quá trình phục hồi sau sự cố.
- Hỗ trợ tích hợp NLTT: BESS là công nghệ hỗ trợ đắc lực cho việc tích hợp quy

mô lớn các nguồn NLTT biến đổi. Bằng cách làm giảm tác động tiêu cực của sự biến động sản lượng NLTT lên lưới điện (thông qua điều tần, điều áp, quản lý năng lượng), BESS giúp hệ thống có thể hấp thụ tỷ lệ NLTT cao hơn mà vẫn đảm bảo vận hành an toàn và tin cậy, giảm thiểu tình trạng phải cắt giảm công suất phát từ các nguồn năng lượng sạch này.

4.2. So sánh hiệu quả của các cấu hình BESS

Kết quả mô phỏng đã cung cấp cái nhìn ban đầu về hiệu quả của các cấu hình BESS khác nhau:

- BESS tập trung vs. BESS phân tán: Mô phỏng Kịch bản 1 cho thấy BESS phân tán tại nhiều bus (Bus 29 và Bus 25) mang lại hiệu quả điều tần tốt hơn so với BESS tập trung tại một bus (Bus 29). Điều này có thể được giải thích bởi khả năng của BESS phân tán trong việc cung cấp hỗ trợ ổn định cục bộ tại nhiều điểm khác nhau trong lưới, đặc biệt là gần các nguồn gây nhiễu loạn (như nhà máy PV biến đổi) hoặc tại các bus yếu. BESS phân tán cũng có thể giúp giảm tải cho các đường dây truyền tải nội bộ và cải thiện phân bố dòng chảy công suất.
- Ảnh hưởng của vị trí lắp đặt: Vị trí lắp đặt BESS cần được xem xét cẩn thận dựa trên đặc điểm của lưới điện, vị trí của các nguồn NLTT và phụ tải lớn, và mục tiêu hỗ trợ lưới điện. Việc đặt BESS tại các bus có SCR thấp hoặc gần các nguồn biến đổi cao có thể mang lại lợi ích đáng kể trong việc cải thiện ổn định cục bộ và tổng thể. Tuy nhiên, cần phân tích kỹ lưỡng để tránh các tương tác không mong muốn giữa BESS và lưới điện tại điểm đấu nối yếu.

4.3. Thách thức và hạn chế

Mặc dù BESS mang lại nhiều lợi ích, việc tích hợp BESS quy mô lớn vào lưới điện cũng đặt ra một số thách thức và hạn chế cần được giải quyết:

- Chi phí đầu tư: Chi phí đầu tư ban đầu cho hệ thống BESS, đặc biệt là pin Li-ion, vẫn còn tương đối cao, mặc dù đã giảm đáng kể trong những năm gần đây. Điều này có thể là rào cản cho việc triển khai BESS trên diện rộng.
- Tuổi thọ và suy giảm hiệu suất pin: Pin có tuổi thọ hữu hạn (tính bằng số chu kỳ hoặc thời gian) và hiệu suất suy giảm theo thời gian và chế độ sử dụng. Việc quản lý tuổi thọ pin và chi phí thay thế là những yếu tố quan trọng cần xem xét trong phân tích kinh tế - kỹ thuật.

- Độ phức tạp của hệ thống điều khiển: Hệ thống điều khiển BESS, đặc biệt là trong kiến trúc phân cấp và khi cung cấp nhiều dịch vụ đồng thời, rất phức tạp. Cần có các thuật toán điều khiển tiên tiến và phối hợp hiệu quả giữa các cấp độ điều khiển để đảm bảo BESS hoạt động tối ưu và không gây ra các vấn đề ổn định mới.
- Tác động đến hệ thống bảo vệ: Khả năng đóng góp dòng ngắn mạch của BESS (đặc biệt là IBR-based BESS) khác với máy phát đồng bộ, có thể ảnh hưởng đến hoạt động của hệ thống bảo vệ lưới điện. Cần nghiên cứu và điều chỉnh các cài đặt role bảo vệ để đảm bảo hoạt động tin cậy khi có BESS.
- Yêu cầu về dung lượng và công suất: Việc xác định công suất và dung lượng BESS tối ưu cho các dịch vụ lưới là một bài toán phức tạp, đòi hỏi phân tích kỹ lưỡng các yêu cầu kỹ thuật và kinh tế. Việc lựa chọn không phù hợp có thể dẫn đến hiệu quả kém hoặc chi phí không cần thiết.

4.4. Đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo

Để tiếp tục phát triển và ứng dụng hiệu quả BESS trong hệ thống điện Việt Nam, một số hướng nghiên cứu tiếp theo có thể được đề xuất:

- Nghiên cứu tối ưu hóa kích thước và vị trí BESS: Phát triển các mô hình và thuật toán tối ưu hóa để xác định công suất và dung lượng BESS cần thiết, cũng như vị trí lắp đặt tối ưu, xem xét đồng thời nhiều mục tiêu (ổn định lưới, kinh tế, giảm cắt giảm NLTT) và ràng buộc vận hành.
- Nghiên cứu các thuật toán điều khiển BESS nâng cao: Đi sâu nghiên cứu và phát triển các thuật toán điều khiển BESS tiên tiến như điều khiển máy đồng bộ ảo (VSM) để cung cấp quán tính ảo và khả năng giảm xóc, điều khiển phối hợp BESS với các nguồn NLTT khác, và điều khiển thích nghi để đối phó với sự thay đổi cấu hình lưới và đặc tính pin.
- Nghiên cứu tác động của BESS đến hệ thống bảo vệ: Phân tích chi tiết tác động của BESS đến hoạt động của các role bảo vệ và đề xuất các giải pháp điều chỉnh hoặc nâng cấp hệ thống bảo vệ để đảm bảo hoạt động tin cậy trong lưới điện có tích hợp BESS.
- Nghiên cứu mô hình kinh tế và cơ chế thị trường cho BESS: Phân tích các mô hình kinh doanh và cơ chế thị trường phù hợp để khuyến khích đầu tư và vận

hành BESS hiệu quả, bao gồm cả việc tham gia thị trường năng lượng và thị trường dịch vụ phụ trợ.

- Nghiên cứu tích hợp BESS vào hệ thống quản lý năng lượng lưới điện thông minh (Smart Grid EMS): Phát triển các giải pháp tích hợp BESS vào các hệ thống EMS hiện có để tối ưu hóa vận hành toàn hệ thống, bao gồm cả việc phối hợp với các công nghệ lưới điện thông minh khác.
- Nghiên cứu ứng dụng BESS trong các hệ thống microgrid và lưới điện yếu: Đi sâu nghiên cứu vai trò của BESS trong việc nâng cao ổn định và độ tin cậy của các hệ thống microgrid và các khu vực lưới điện đặc biệt yếu.

KẾT LUẬN

Đồ án đã tập trung nghiên cứu các giải pháp ứng dụng Hệ thống lưu trữ năng lượng pin (BESS) nhằm nâng cao ổn định lưới điện có tỷ số ngắn mạch (SCR) thấp khi tích hợp năng lượng tái tạo. Dựa trên cơ sở lý thuyết về SCR, nguyên lý hoạt động và mô hình điều khiển BESS, đồ án đã xây dựng mô hình hệ thống điện thử nghiệm trên phần mềm DIgSILENT PowerFactory và tiến hành mô phỏng các kịch bản sự cố điển hình.

Kết quả mô phỏng từ các kịch bản suy giảm công suất phát của nhà máy điện mặt trời và sự cố mất phụ tải đột ngột đã chứng minh hiệu quả rõ rệt của BESS trong việc cải thiện đáp ứng tần số và điện áp của hệ thống. BESS, với khả năng phản ứng nhanh và linh hoạt, đã giúp hạn chế đáng kể biên độ dao động tần số và điện áp, rút ngắn thời gian phục hồi của hệ thống sau sự cố. Đặc biệt, kết quả mô phỏng cũng cho thấy cấu hình BESS phân tán tại nhiều bus có thể mang lại hiệu quả ổn định toàn diện hơn so với BESS tập trung tại một điểm.

Đồ án đã làm nổi bật vai trò quan trọng của BESS như một công cụ hữu hiệu để đối phó với các thách thức về ổn định hệ thống điện trong bối cảnh gia tăng tỷ trọng năng lượng tái tạo, đặc biệt là tại các khu vực lưới điện yếu. Việc tích hợp BESS không chỉ giúp nâng cao khả năng chống chịu của hệ thống trước các nhiễu loạn mà còn hỗ trợ hiệu quả việc hấp thụ và sử dụng nguồn năng lượng sạch.

Tuy nhiên, việc triển khai BESS quy mô lớn vẫn còn đối mặt với các thách thức về chi phí, quản lý tuổi thọ pin và độ phức tạp của hệ thống điều khiển. Các nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào việc tối ưu hóa kích thước, vị trí và chiến lược điều khiển BESS, cũng như giải quyết các vấn đề liên quan đến hệ thống bảo vệ và cơ chế thị trường để thúc đẩy ứng dụng BESS một cách hiệu quả và bền vững trong tương lai.

Đồ án đã đạt được các mục tiêu đề ra, góp phần cung cấp cái nhìn sâu sắc hơn về tiềm năng của BESS trong việc nâng cao ổn định hệ thống điện và mở ra hướng nghiên cứu cho các vấn đề phức tạp hơn trong lĩnh vực này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Dae Kyeong Kim, Susumu Yoneoka, Ali Zain Banatwala, và Yu-Tack Kim, "Handbook on Battery Energy Storage System", Asian Development Bank, 2018.
- [2] JAE WOONG SHIM, GREGOR VERBIČ, HEEJIN KIM, và KYEON HUR, "On Droop Control of Energy-Constrained Battery Energy Storage Systems for Grid Frequency Regulation", IEEE Access, Vol. 7, trang 166353-166364, ngày xuất bản 14 tháng 11 năm 2019.
- [3] Zeyad Assi OBAID, Liana M. CIPCIGAN, Lahieb ABRAHIM, và Mazin T. MUHSSIN, "Frequency control of future power systems: reviewing and evaluating challenges and new control methods", J. Mod. Power Syst. Clean Energy, xuất bản trực tuyến 28 tháng 8 năm 2018.
- [4] Francisco M. Gonzalez-Longatt và Samir M. Alhejaj, "Enabling Inertial Response in Utility-Scale Battery Energy Storage System", 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia), Melbourne, Australia, 28 Nov. - 1 Dec. 2016
- [5] Lars Abrahamsson, "Frequency Control, Lectures 5-6 in EG2050 System Planning", KTH Royal Institute of Technology, 2013.
- [6] NCS. Trần Viết Thành, "Chuyên Đề 3: Ứng dụng Các Giải Pháp Và Mô Hình Điều Khiển Của Thiết Bị Tích Trữ Điện Năng Nhằm Nâng Cao Ổn Định Hệ Thống Điện", Đại Học Đà Nẵng, 2025.
- [7] Ujjwal Datta, Akhtar Kalam, và Juan Shi, "Battery Energy Storage System for Aggregated Inertia-Droop Control and a Novel Frequency Dependent State-of-Charge Recovery", Energies, Vol. 13, Số 8, 2020, xuất bản 18 tháng 4 năm 2020.
- [8] Phan Đình Chung, Lưu Ngọc An, "So sánh khả năng kết nối lưới yếu của các loại turbine gió / comparison of wind turbines' ability in weak-grid connection", Tạp Chí Khoa Học Và Công Nghệ Đại Học Đà Nẵng, số 5(114) 2017-quyển 1, issn: 1859-1531
- [9] Mihai Sanduleac, Lucian Toma, Mircea Eremia, Valentin A. Boicea, Dorian Sidea, và Alexandru Mandis đã trình bày về "Primary frequency control in a power system

with battery energy storage systems".

- [10] T. V. Thanh, L. V. Dai, D. T. Viet, L. C. Quyen, và N. T. Hieu, "A Solution to Enhance Operational Effectiveness of the Renewable Energy Sources and Power System Transmission Lines in Vietnam," trong *2022 6th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*, 2022, tr. 693-699.
- [11] M. S. Rashid, S. Gheorghe, và L. Toma, "Analysis of the influence of Renewable Energy Sources on the power system operation," *EMERG*, tập VIII, số 2, tr. 78-93, 2022.
- [12] G. Bhatt và S. Affijulla, "Analysis of Large Scale PV Penetration Impact on IEEE 39-Bus Power System," trong *2017 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2017.
- [13] D. Remon, A. M. Cantarellas, J. M. Mauricio, và P. Rodriguez, "Power System Stability Analysis under Increasing Penetration of Photovoltaic Power Plants with Synchronous Power Controllers," *IET Renewable Power Generation*, tập 11, số 6, tr. 733-741, 2017.
- [14] R. Bayindir, S. Demirbas, E. Irmak, U. Cetinkaya, A. Ova, và M. Yesil, "Effects of Renewable Energy Sources on the Power System," trong *2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, 2016, tr. 388-393.
- [15] M. S. Alam, F. S. Al-Ismail, A. Salem, và M. A. Abido, "High-Level Penetration of Renewable Energy Sources Into Grid Utility: Challenges and Solutions," *IEEE Access*, tập 8, tr. 190277-190299, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3031481.
- [16] O. Smith, O. Cattell, E. Farcot, R. D. O'Dea, và K. I. Hopcraft, "The effect of renewable energy incorporation on power grid stability and resilience," *Science Advances*, tập 8, số 9, 2022, doi: 10.1126/sciadv.abj6734.
- [17] B. Qin, M. Wang, G. Zhang, và Z. Zhang, "Impact of renewable energy penetration rate on power system frequency stability," *Energy Reports*, tập 8, tr. 997-1003, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.05.261.
- [18] DIgSILENT GmbH, "Battery Energy Storing Systems (BESS) - Application Example," Gomaringen, Germany, 2010.