



TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT



ĐẠI HỌC KINH TẾ QUỐC DÂN

HỘI THẢO KHOA HỌC QUỐC GIA

Quản lý, khai thác và sử dụng hiệu quả bền vững
Tài nguyên trong nền kinh tế hội nhập

HUMG NEU

HỘI THẢO KHOA HỌC QUỐC GIA

Quản lý, khai thác và sử dụng hiệu quả bền vững tài nguyên trong nền kinh tế hội nhập

2025



LẦN THỨ 2

2025



NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI

NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI
Số 8 Tầng Bạt Hổ, phường Cửa Nam, TP. Hà Nội
ĐT: 024.39424620 - 39423346 * Fax: 024.38224784
Website: www.nxbgtvt.vn * Email: nxbgvtvt@fpt.vn

CHỊU TRÁCH NHIỆM XUẤT BẢN, NỘI DUNG:
Giám đốc - Tổng Biên tập: Nguyễn Minh Nhật

BIÊN TẬP: **Dương Hồng Hạnh**
THIẾT KẾ: **Phương Linh**

Đối tác liên kết: Trường Đại học Mỏ - Địa chất
Địa chỉ: Số 18 phố Viên, phường Đông Ngạc, TP. Hà Nội

In 500 cuốn khổ 20 x 29cm, tại Công ty cổ phần in và thương mại Ngọc Hưng
Địa chỉ: 296 đường Phúc Diễn, TDP số 1, phường Xuân Phương, TP. Hà Nội.
Số xác nhận đăng ký xuất bản: 5367-2025/CXBIPH/2-112/GTVT.
Mã số sách tiêu chuẩn quốc tế - ISBN: 978-604-76-3277-0.
Quyết định xuất bản số: 119 LK/QĐ-XBGT ngày 24/12/2025.
In xong và nộp lưu chiểu quý 1 năm 2026.



HỘI THẢO KHOA HỌC QUỐC GIA

QUẢN LÝ, KHAI THÁC VÀ SỬ DỤNG HIỆU QUẢ BỀN VỮNG
TÀI NGUYÊN TRONG NỀN KINH TẾ HỘI NHẬP
LẦN THỨ 2

Hà Nội, 12/2025

NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI



TUYÊN TẬP HỘI THẢO KHOA HỌC QUỐC GIA
QUẢN LÝ, KHAI THÁC VÀ SỬ DỤNG HIỆU QUẢ BỀN VỮNG TÀI NGUYÊN
TRONG NỀN KINH TẾ HỘI NHẬP – LẦN THỨ 2



BAN KHOA HỌC

1. GS.TS Trần Thanh Hải, HUMG
2. PGS.TS Nguyễn Thế Vinh, HUMG
3. PGS.TS Lê Quang Duyên, HUMG
4. PGS.TS Đỗ Ngọc Anh, HUMG
5. PGS.TS Ngô Thị Phương Thảo, NEU
6. TS. Nguyễn Thị Lan Anh, NEU
7. PGS.TS Lê Minh Thống, HUMG
8. PGS.TS Đỗ Văn Bình, HUMG
9. PGS.TS Lê Đức Tình, HUMG
10. PGS.TS Lê Ngọc Ánh, HUMG
11. TS. Tô Xuân Bản, HUMG

BAN BIÊN TẬP

1. PGS.TS Tống Thị Thanh Hương, HUMG
2. TS Nguyễn Khắc Long, HUMG
3. TS Nguyễn Tiến Hưng, HUMG
4. PGS.TS Nguyễn Anh Tuấn, HUMG
5. PGS.TS Nguyễn Văn Thịnh, HUMG
6. PGS.TS Lê Ngọc Ánh, HUMG
7. TS. Công Ngọc Thắng, HUMG
8. TS. Trần Danh Hùng, HUMG
9. TS. Nguyễn Tiến Hùng, HUMG
10. TS. Nguyễn Thanh Lâm, NEU
11. TS. Nguyễn Trần Tuấn, NEU
12. TS. Nguyễn Thị Lan Anh, NEU
13. TS. Phan Thị Hồng, HUMG
14. TS. Phạm Trung Kiên, HUMG
15. ThS. Nguyễn Văn Thành, HUMG
16. ThS. Trương Văn Từ, HUMG
17. ThS. Nguyễn Duy Mười, HUMG
18. ThS. Bùi Thị Ngân, HUMG
19. ThS. Nguyễn Thanh Tuấn, HUMG



TUYỂN TẬP HỘI THẢO KHOA HỌC QUỐC GIA
QUẢN LÝ, KHAI THÁC VÀ SỬ DỤNG HIỆU QUẢ BỀN VỮNG TÀI NGUYÊN
TRONG NỀN KINH TẾ HỘI NHẬP – LẦN THỨ 2



Mục lục

The erosion and accretion at Day River mouth, Vietnam. <i>Ban Xuan To¹</i>	1
Mô hình hệ sinh thái số hóa toàn diện cho ngành than Việt Nam – Từ sản xuất đến tiêu thụ, <i>Nguyen Duc Thang^{1,*}, Nguyen Thi Huong¹</i>	15
Tối ưu hóa nứt vỉa thủy lực cho giếng khí-condensate trong điều kiện áp suất cao nhiệt độ cao (HPHT), <i>Trương Văn Từ^{1,*}, Nguyễn Khắc Long¹</i>	23
Ứng dụng công nghệ số vào việc nghiên cứu và sản xuất năng lượng xanh và năng lượng tái tạo, <i>Nguyễn Thị Hải Yến¹</i>	31
Tác động của năng lượng xanh và chuyển đổi số đến năng lực cạnh tranh quốc gia: Phân tích dữ liệu bảng giai đoạn 2010 – 2024, <i>Nghiêm Xuân Khoát¹, Dang Thị Minh Hien²</i>	37
Phát triển du lịch địa chất tại các công viên địa chất toàn cầu ở Việt Nam: Thực trạng và giải pháp, <i>Lê Minh Thống^{1,*}</i>	46
Chuyển đổi số trong quản lý và giám sát hoạt động khoáng sản bằng công nghệ WebGis, áp dụng cho tỉnh Lai Châu, <i>Trương Xuân Bình^{1,*}, Phạm An Cường¹, Nguyễn Thị Hải Yến¹, Phạm Văn Đồng¹</i>	52
Phân vùng triển vọng dầu khí theo phương pháp gradient chuẩn hóa toàn phần tài liệu trọng lực khu vực biển Đông Nam Việt Nam, <i>Trần Tuấn Dương^{1,2,*}, Nguyễn Phương Nam¹</i>	60
Hiệu quả của phương pháp địa vật lý lỗ khoan trong đánh giá, thăm dò quặng urani vùng trũng Nông Sơn, phục vụ phát triển điện hạt nhân ở Việt Nam, <i>Nguyễn Văn Tuyên^{1,*}, Lê Khánh Phồn², Trần Danh Hùng³</i>	72
Công nghệ BESS trong hệ thống năng lượng tái tạo: đánh giá tổng quan về kinh tế, kỹ thuật và một số bài học kinh nghiệm từ thế giới, <i>Lê Xuân Thành^{1,*}</i>	82
Quản lý nguồn tài nguyên đất xây dựng và nước dưới đất phục vụ phát triển công trình ngầm đô thị Hà Nội, <i>Nguyễn Thị Nụ^{1,*}, Bùi Trường Sơn¹</i>	91
Tài nguyên và phát triển bền vững: Vai trò của chính sách công trong nền kinh tế thị trường định hướng xã hội chủ nghĩa, <i>Võ Thị Hồng Hạnh^{1,*}</i>	99
Tổng quan về sự tham gia của cộng đồng trong thực hiện Hiệp định đối tác tự nguyện Việt Nam – Liên minh Châu Âu về thực thi Luật lâm nghiệp, quản trị rừng và thương mại lâm sản, <i>Nguyễn Thị Thu Giang¹, Ngô Thị Phương Thảo², Nguyễn Hữu Dũng²</i>	105
Giải pháp kiểm soát bụi trong khai thác khoáng sản tại Việt Nam – Hiện trạng, thách thức và hướng phát triển bền vững, <i>Nguyễn Văn Thành^{1,*}, Nguyễn Trần Tuấn¹, Doãn Thị Trâm¹, Tô Hữu Toàn¹, Lê Văn Nam¹</i>	114
Công nghệ đốt rác phát điện (WTE) ở Việt Nam : Thực trạng, thách thức và bài học kinh nghiệm từ khu vực và thế giới, <i>Lê Xuân Thành¹</i>	120
Nội hàm và cấu trúc của tài nguyên dữ liệu tài nguyên: Nền tảng cho chuyển dịch tư duy trong khai thác và quản lý tài nguyên, <i>Nguyễn Văn Hải^{1,*}</i>	131
Năng lượng tái tạo cho phát triển kinh tế và xu hướng chuyển dịch năng lượng ở Việt Nam, <i>Nguyễn Văn Thịnh^{1,*}, Lê Đức Vinh¹</i>	140
Năng lượng xanh trong chiến lược phát triển bền vững: Từ xu thế quốc tế đến thực tiễn Việt Nam, <i>Trình Quốc Hưng^{1,*}</i>	149
Nghiên cứu nâng cao độ tin cậy của thiết bị hoàn thiện giếng khí tại mỏ Thiên Ưng thông qua thiết kế ống khai thác và lựa chọn vật liệu tích hợp, <i>Lê Đức Vinh¹, Trương Văn Từ^{1,*}, Nguyễn Khắc Long¹</i>	153
Nghiên cứu giải pháp tháo nước, tháo khí Mêtan trong các mỏ than hầm lò vùng Quảng Ninh nhằm đảm bảo an toàn lao động và môi trường sinh thái, <i>Nguyễn Trần Tuấn^{1,*}</i>	160
Chuyển đổi số trong quản lý tài nguyên tại Việt Nam, <i>Trần Đăng Khoa^{1,*}</i>	167
Kinh tế số và chuyển đổi số trong quản trị tài nguyên: Mô hình tác động đến hiệu quả sử dụng tài nguyên công, <i>Nghiêm Xuân Khoát[*]</i>	175



TUYỂN TẬP HỘI THẢO KHOA HỌC QUỐC GIA
QUẢN LÝ, KHAI THÁC VÀ SỬ DỤNG HIỆU QUẢ BỀN VỮNG TÀI NGUYÊN
TRONG NỀN KINH TẾ HỘI NHẬP – LẦN THỨ 2



Quản lý và sử dụng hợp lý Puzzolan Đắc Nông phục vụ xây dựng công trình, <i>Bùi Trường Sơn^{1,*}, Vũ Bá Thao²</i>	186
Tích hợp các yếu tố môi trường, xã hội và quản trị - ESG trong quản lý toà nhà trên thế giới và bài học cho Việt Nam, <i>Nguyễn Thị Tùng Phương^{1,*}, Mai Công Quyền²</i>	191
Kinh nghiệm phát triển thị trường bất động sản gắn với thúc đẩy phát triển kinh tế bền vững: trường hợp Úc và Hàn Quốc, <i>Nguyễn Thị Lan Anh^{1,*}, Dương Văn Bảy¹, Nguyễn Thị Hồng Vân¹</i>	200
Thích ứng với Thẻ Vàng IUU của Liên minh châu Âu: Sinh kế hộ gia đình thủy sản và chiến lược ứng phó của Hàn Quốc và Philippines, <i>Nguyễn Thị Lan Anh^{1,*}, Mai Công Quyền²</i>	205
Tổng quan về chính sách liên quan đến tích tụ, tập trung đất nông nghiệp tại Việt Nam, <i>Trần Mai Hương^{1,*}, Nguyễn Thắng Trung¹</i>	209
Hợp tác năng lượng Việt nam – Nga: động thái biến đổi và lựa chọn chiến lược, <i>Ngô Thị Phương Thảo^{1,*}</i>	219
Tích tụ và tập trung đất cho sản xuất nông nghiệp bền vững ở vùng Đồng bằng sông Hồng, <i>Trần Mai Hương^{1,*}</i>	227
Ảnh hưởng của diễn biến giá dầu thô quốc tế và các yếu tố nội sinh của thị trường dầu thô Việt Nam, <i>Nguyễn Duy Khánh^{1,*}, Lê Thị Lan Anh¹, Đỗ Đức Anh¹, Phan Thị Quỳnh Anh¹, Nguyễn Ngọc Linh¹</i>	237
Các yếu tố tác động đến ý định mua nông sản của người tiêu dùng thông qua livestream tại Việt Nam, <i>Đỗ Thanh An¹, Nghiêm Bá Khánh Linh¹, Nguyễn Thị Minh Ngọc¹, Phạm Mai Hương^{1,*}</i>	245
Chính sách giá điện năng lượng tái tạo: bối cảnh hiện tại và đề xuất cho Việt Nam, <i>Nguyễn Như Trang^{1,*}, Đặng Phi Trường², Hoàng Mạnh Hùng³</i>	255
Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến hành vi tham gia bảo vệ rừng của cộng đồng dân cư tại phường Tô Hiệu, tỉnh Sơn La, <i>Phương Lê Ngọc Linh^{1,*}</i>	262
Tâm lý trong hoạt động đầu tư bất động sản của nhà đầu tư cá nhân tại Việt Nam, <i>Hoàng Thị Thủy Quỳnh^{1,*}, Bùi Phương Linh¹, Trịnh Phương Uyên¹, Triệu Thu Trang¹, Phạm Nguyễn Mai Anh¹</i>	268
Chuyển dịch cơ cấu kinh tế tỉnh Bình Dương theo hướng tăng trưởng xanh – thực trạng và giải pháp, <i>Võ Thị Hòa Loan^{1,*}</i>	275
Công nghệ đốt kèm amoniac trong các nhà máy điện than: Hiện trạng, thách thức và triển vọng giảm phát thải CO ₂ , <i>Lê Quang Duyên^{1,*}, Nguyễn Văn Thành¹, Nguyễn Quốc Nam²</i>	281
Wood - Based Phase Change Materials: A Sustainable Solution for Energy Efficiency and Resource Management, <i>Le Duc Tho¹, Nguyen Thi Thanh Bao², Tran Ngoc Tuan¹, Nguyen Khac Long¹, Nguyen Van Thanh¹, Truong Van Tu¹, Le Quang Duyen¹, Tong Thi Thanh Huong^{1,*}</i>	294



TUYỂN TẬP HỘI THẢO KHOA HỌC QUỐC GIA
QUẢN LÝ, KHAI THÁC VÀ SỬ DỤNG HIỆU QUẢ BỀN VỮNG TÀI NGUYÊN
TRONG NỀN KINH TẾ HỘI NHẬP – LẦN THỨ 2



Công nghệ BESS trong hệ thống năng lượng tái tạo: đánh giá tổng quan về kinh tế, kỹ thuật và một số bài học kinh nghiệm từ thế giới

Lê Xuân Thành ^{1*}

¹Trường Đại học Mỏ - Địa chất, 18 phố Viên, Đức Thắng, Hà Nội

TÓM TẮT

Hệ thống lưu trữ năng lượng bằng pin (Battery Energy Storage System – BESS) đang được xem là một trong những công nghệ cốt lõi trong tiến trình chuyển dịch năng lượng toàn cầu, đặc biệt trong bối cảnh tỷ trọng nguồn điện năng lượng tái tạo ngày càng gia tăng. Trong lưới điện có tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo, BESS đóng vai trò quan trọng trong việc cân bằng phụ tải, điều tiết tần số, giảm hiện tượng cắt giảm công suất nguồn tái tạo (curtailment) và nâng cao tính linh hoạt của lưới điện. Sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ pin lithium-ion, đặc biệt là cell LFP, cùng với sự giảm giá thành đáng kể đã giúp BESS trở nên khả thi hơn về mặt kinh tế và kỹ thuật. Tuy nhiên, việc triển khai BESS ở quy mô lớn vẫn đối mặt với nhiều thách thức. Về mặt kỹ thuật, các rủi ro liên quan đến an toàn cháy nổ (thermal runaway), quản lý tuổi thọ pin (degradation), và tích hợp điều khiển lưới (grid-forming control) là những vấn đề trọng yếu cần được xử lý một cách hệ thống. Song song đó, thực tế vận hành cũng chỉ ra rằng thiếu cơ chế định giá và thị trường năng lượng phụ trợ rõ ràng khiến cho việc đầu tư, lắp đặt hệ thống BESS gặp rào cản về hoàn vốn và khả năng mở rộng. Bài báo thông qua đánh giá tổng quan về BESS, phân tích những rào cản kỹ thuật, kinh tế có liên quan đã đề cập đến các khía cạnh của triển khai BESS hiệu quả trong bối cảnh Việt Nam. Những đề xuất về cách tiếp cận tổng thể kết hợp giữa kỹ thuật, quản lý và chính sách đã được thực thi. Về mặt kỹ thuật, cần lựa chọn công nghệ cell phù hợp với điều kiện vận hành nhiệt đới ẩm, tối ưu cấu hình hệ thống làm mát và an toàn cháy nổ, cũng như ứng dụng các hệ thống quản lý tiên tiến (BMS/EMS) có khả năng điều khiển thông minh dựa trên mô hình suy giảm tuổi thọ (degradation-aware dispatch). Bên cạnh đó, bài báo cũng đã khuyến nghị về việc sớm hoàn thiện hành lang pháp lý, cơ chế đấu nối và thị trường điện để định giá đúng vai trò của các dịch vụ mà BESS cung cấp – từ điều tần, điều áp, đến lưu trữ năng lượng cho cân bằng phụ tải.

Từ khóa: “BESS, năng lượng tái tạo, tiêu chuẩn cho BESS”

1. Tổng quan về BESS và xu hướng phát triển trong những năm gần đây

Cùng với những nghiên cứu về tối ưu hóa hoạt động của các nguồn năng lượng tái tạo [18,19, 20], hệ thống lưu trữ năng lượng bằng pin (Battery Energy Storage Systems — BESS) ứng dụng trong lưới điện có nguồn năng lượng tái tạo đã chuyển từ giai đoạn công nghệ thử nghiệm sang phạm vi thương mại và quy mô lưới trong vòng một thập kỷ qua. BESS hiện được triển khai để đáp ứng nhiều chức năng: cân bằng phụ tải ngắn hạn, điều tiết tần số, hỗ trợ công suất phản kháng/ổn định điện áp, giảm cắt giảm nguồn tái tạo (curtailment), nâng cao khả năng đảo ngược lưới và cung cấp dịch vụ thị trường (ancillary services). Tổng quan quốc tế cho thấy lưu trữ bằng pin đang dẫn dắt phân tăng trưởng lưu trữ lưới quy mô nhỏ-trung bình, với công suất lắp đặt tăng nhanh kể từ 2018 và kỳ vọng tiếp tục tăng đến 2030 theo các kịch bản của IEA/IRENA [1][2][3][4].

Theo IEC 62933 một hệ thống BESS [16] gồm những phần chính sau:

- * Hệ thống Pin lưu trữ (ESS - Battery System): có chức năng lưu trữ và giải phóng năng lượng dưới dạng dòng điện một chiều (DC). Hiện tại công nghệ pin phổ biến nhất cho ứng dụng quy mô lớn Lithium Sắt Phosphate (LFP) hoặc NCA (Nikel Cadimium Aliminum Oxide). Đây là 2 chủng loại có tính an toàn cao và tuổi thọ chu kỳ dài.

- * Hệ thống Chuyển đổi năng lượng (PCS - Power Conversion System): chức năng chính là chuyển đổi năng lượng hai chiều giữa DC (từ pin) và AC (của lưới điện), đồng thời điều khiển chính xác công suất P và Q.

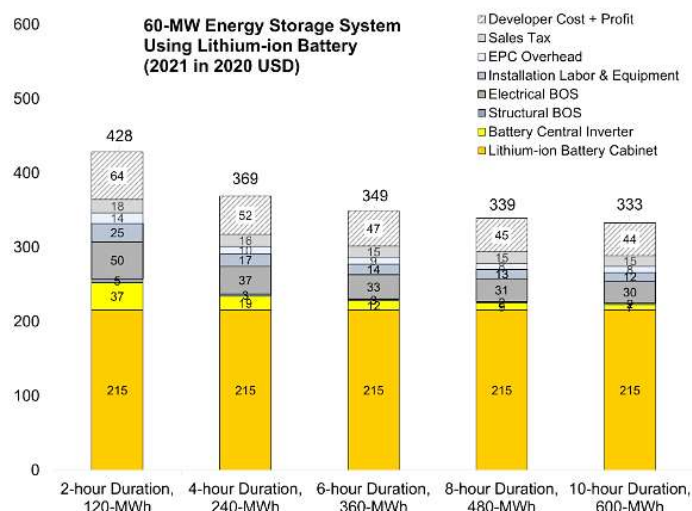
- * Hệ thống BMS-Quản lý Pin (BMS - Battery Management System): giám sát, bảo vệ, cân bằng và tối ưu hóa hoạt động của từng cell pin với mục tiêu đảm bảo an toàn và kéo dài tối đa tuổi thọ pin.

- * Hệ thống Quản lý năng lượng (EMS - Energy Management System): điều khiển tổng thể, thực thi các chiến lược vận hành (dịch chuyển phụ tải, điều tần, hỗ trợ điện áp,...) và giao tiếp với trung tâm điều độ lưới điện.

- * Các thiết bị phụ trợ: Bao gồm hệ thống quản lý nhiệt (Thermal management system-TMS), hệ thống phòng cháy chữa cháy, máy biến áp, tủ đóng cắt và cơ sở hạ tầng liên quan, đảm bảo hệ thống vận hành an toàn và hiệu quả.

** Tác giả liên hệ*

Email: lexuanthanh@humg.edu.vn



Hình 1: Biểu đồ diễn biến giá thành hệ thống BESS năm 2021 [5]

Bảng 1: So sánh những thông số của các loại pin đã từng được sử dụng cho công nghệ BESS

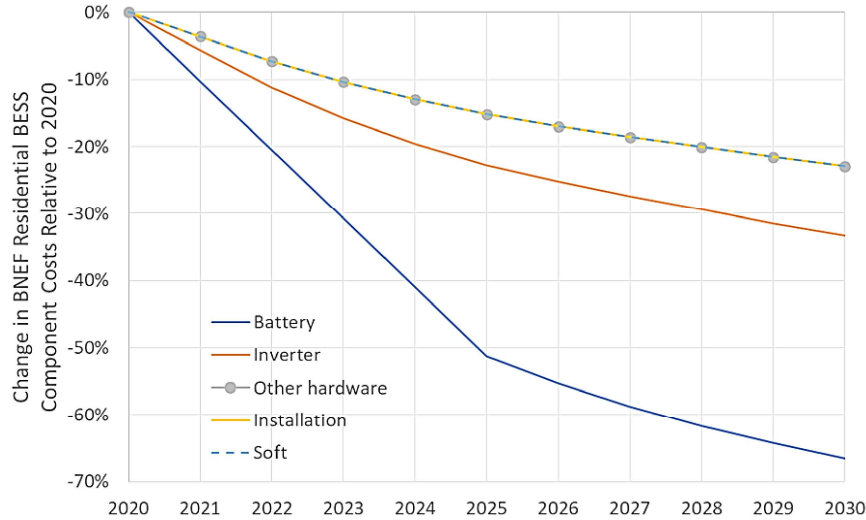
Battery Type	Lead-Acid	Ni-Cd	Ni-MH	Zn-Br	Fe-Cr	lithium-ion	Na S	NaNiCl	VRFB	ZBFB
Energy Density (Wh/L)	50–80 [29]	60–150 [29]	40–80 [32]	65–75 [20]	20–35 [33]	200–400 [29]	140–300 [29]	160–275 [29]	25–33 [29]	55–65 [29]
Power Density (W/L)	10–400 [29]	80–600 [29]	250–1000 [34]	60–110 [20]	70–100 [33]	1500–10,000 [29]	140–300 [29]	150–270 [29]	1–2 [29]	1–25 [29]
Cell Nominal Voltage (V)	2 [29]	1.3 [29]	1.2 [32]	1.67 [33]	1.18 [33]	4.3 [29]	2.08 [29]	2.85–3.1 [35]	1.4 [29]	1.8 [29]
Round Trip Efficiency	82% [29]	83% [29]	70% [29]	70–80% [29]	97.4% [29]	95% [29]	80% [29]	84% [29]	70% [29]	70% [29]
Depth of Discharge	50% [29]	85% [29]	100% [29]	100% [29]	100% [29]	95% [29]	100% [29]	100% [29]	100% [29]	100% [29]
Operating Temperature	–20–60 [33]	–40–60 [33]	–20–60 [33]	–20–60 [33]	–40–60 [33]	–20–60 [33]	300–350 [36]	–70–100 [37]	10–40 [38]	20–50 [39]
Charge Efficiency	79% [33]	70% [33]	70% [33]	73% [33]	97.4% [33]	100% [33]	90% [41]	80–95% [33]	97% [40]	70–80% [42]
Energy Efficiency	70% [33]	69–90% [33]	75% [33]	80% [33]	66% [33]	80% [33]	90% [41]	95% [33]	72.3% [40]	82% [42]
Voltage Efficiency	80% [33]	75% [33]	70% [33]	80% [33]	82% [33]	98% [33]	87% [41]	80.9% [33]	74.5% [40]	83% [42]
Life Cycle	1500 [29]	2500 [29]	800–1200 [32]	200–400 [20]	300 [43]	10,000 [29]	5000 [29]	3000 [29]	13,000 [29]	10,000 [29]
Estimated Cost (USD/kWh)	105–475 [29]	400 [29]	100–500 [32]	170–580 [20]	290 [43]	200–1260 [29]	263–735 [29]	315–488 [29]	315–1050 [29]	525–1680 [29]

Trong vòng hơn 1 thập kỷ vừa qua, nhiều chủng loại pin đã được ứng dụng cho hệ thống BESS (bảng 1) [6]. Những thông số ở bảng cho thấy hai chủng loại pin là Lithium Sắt Phosphate (LFP) hoặc NCA (Nikel Cadimium Alimunum Oxide).

Về mặt giá thành BESS (đặc biệt cell LFP), như đã thấy trên hình 1, xu hướng giảm giá diễn ra rất mạnh góp phần thúc đẩy tính kinh tế cho ứng dụng BESS trong hỗ trợ tích hợp năng lượng tái tạo; NREL mô tả rõ xu hướng giảm chi phí và cải thiện các tham số hiệu năng trong bộ ATB 2021–2022 [5][15]. Xu thế giảm giá được khẳng định một lần nữa (tính đến năm 2030) khi tính đến giá thành của pin và biến tần, mức độ giảm lên đến gần 70%. Theo các tổng kết gần đây, việc thiết kế BESS hiệu quả đòi hỏi tích hợp đa chiều giữa phần cứng (cell chemistry, hệ làm mát, cấu trúc module/rack) và phần mềm (BMS, chiến lược sạc-xả, dự báo SoC/SOH) [6][9]. (SoC và SOH là thông số cốt lõi trong BMS/EMS: SoC để điều khiển vận hành tức thời, SOH để lập kế hoạch bảo trì, tối ưu hóa chiến lược vận hành và tính toán chi phí hao mòn). Các nghiên cứu gần đây tập trung mạnh vào chiến lược quản lý năng lượng (EMS/EMS-BESS) nhằm tối ưu hóa việc phân phối công suất sạc-xả, đồng thời cân bằng mục tiêu hiệu suất ngắn hạn và tuổi thọ dài hạn của pin. [6] Đây cũng là các tiền đề bắt buộc để có được EMS thông minh, mô hình hóa

degradation chính xác và BMS cấp tiến và hướng tới BESS hoạt động hiệu quả, an toàn và kinh tế trong hệ thống điện có tỷ lệ năng lượng tái tạo cao.

* Các nghiên cứu của các quốc gia tiên tiến về BESS đều cho rằng EMS hiện đại đóng vai trò trung tâm trong việc thực hiện các chiến lược *degradation-aware dispatch* — tức là điều khiển sạc-xả có tính toán suy giảm (SOH) để kéo dài vòng đời pin. [6][9]. Trong vận hành BESS có đến 1850 nghiên cứu và công bố có liên quan đến SOH, các nghiên cứu đều tập trung sâu vào khía cạnh mô hình hóa hao mòn (degradation modeling). Các phương pháp ước lượng SOH/SOC dựa và học máy (machine learning-ML) (hybrid physics+ML) kết hợp với mô hình vật lý để đạt được độ chính xác cần thiết cho ứng dụng lưới. [6][7].



Hình 2: Thay đổi tương quan về giá thành các phần/linh kiện khi lắp đặt BESS (so với năm 2020) [15]

* Đối với hệ thống BMS (Battery Management System) hiện nay không chỉ cần thực hiện cell balancing và giám sát nhiệt độ mà hệ thống này còn cần đảm nhiệm chức năng ước lượng SOH, dự báo RUL và đưa ra chiến lược bảo vệ chủ động. [9][6]. Theo [9] một cell điển hình 64 Wh tương đương với 300 kWh hệ thống có khoảng ~2400 full DOD cycles tương ứng (từ phép quy đổi 300 kWh / 0.064 kWh) [9]. (Một full DoD (Depth-of-Discharge) cycle hiểu là một chu trình sạc-xả mà trong đó pin được xả hết theo độ sâu phóng điện quy ước 100% DoD (ví dụ từ 100% SoC xuống 0% SoC) và sau đó được nạp lại trở về 100% SoC). Trong thực tế vận hành, phần lớn các hệ BESS không chạy theo chu trình full-DoD liên tục mà thực hiện nhiều chu trình partial-DoD (xả một phần-ví dụ xả 20% rồi nạp lại). Người ta thường quy đổi các partial cycles thành EFC-chu trình xả toàn phần tương đương (equivalent full cycles-EFC-tính theo công thức 1) bằng tổng DoD tích lũy chia cho 100%) Một số công nghệ mới sử dụng vanadium redox-flow batteries (RFB) có tuổi thọ > 10,000 cycles, nên được xem xét ưu tiên cho các ứng dụng yêu cầu tuổi thọ cao. Nghiên cứu mô phỏng tối ưu hoá tải sạc cho thấy nếu hạn chế tốc độ tăng SEI (solid-electrolyte interphase) để giữ dung lượng khả dụng dưới ngưỡng thì tuổi thọ pin có thể tăng ~11.1% và tổng năng lượng tích lũy trong đời tăng ~9.6% [9]

$$EFC = \frac{\sum_i DoD_i}{100\%} \quad (1)$$

Theo công thức (1) Với 2 chu trình sạc-xả 50% tương đương 1 full DoD, giá trị EFC có ý nghĩa rất quan trọng trong việc tính toán năng lượng thông qua hệ số năng lượng toàn trình (energy throughput). Cụ thể:

$$LeT (kWh) = UC (kWh) \times EFC \quad (2)$$

Trong đó LeT-(Life time Energy Throughput): Năng lượng toàn trình theo tuổi thọ pin;
UC-Usable Capacity Dung lượng khả dụng (kWh)

Một minh họa điển hình, một hệ BESS có UC=300kWh và EFC=24000 thì Năng lượng toàn trình theo tuổi thọ pin sẽ là:

$$LeT = 300 \times 24000 = 7.200.000 \text{ kWh} = 7,2GWh$$

* Về chỉ tiêu vận hành, BMS hiện đại cần cung cấp ước lượng SOC/SOH với sai số rất nhỏ (thường đặt mục tiêu <±5% cho SOC trong ứng dụng lưới) để EMS thực hiện dispatch an toàn — điều này đòi hỏi mô hình hóa chính xác và đo lường nhiều thông số [6][9]. Các giải pháp kỹ thuật được khuyến nghị bao gồm degradation-aware dispatch, tức EMS tối ưu hoá theo mục tiêu hàm chi phí bao gồm chi phí hao mòn (capex replacement) chứ không chỉ tối đa hóa lợi nhuận ngắn hạn [6][8]

* Liên quan đến an toàn vận hành thermal runaway vẫn chiếm vị trí trung tâm; do đó BMS phải tích hợp cả tín hiệu khí, cảm biến nhiệt độ, và logic cách ly module khi phát hiện dấu hiệu bất thường. [6][10]

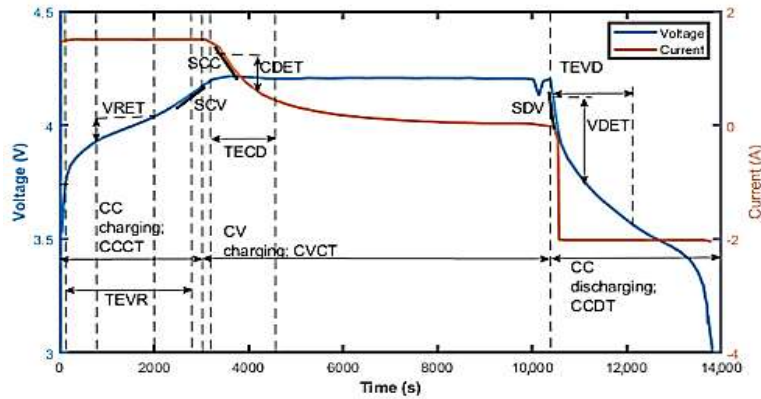
* Kinh nghiệm vận hành của các quốc gia tiên tiến cũng khuyến nghị cần phát triển bộ chỉ số sức khỏe (Health Indicators) chuẩn hóa để so sánh và đưa vào EMS/BMS, đồng thời tích hợp chúng vào mô hình kinh tế vòng đời (LCOE/LCOES). [6][7]. Các chỉ số sức khỏe của pin (Health Indicators – HIs) là những đại lượng đặc trưng được sử dụng nhằm định lượng mức độ suy giảm và lão hóa của pin trong quá trình vận hành. Các thông số này đóng vai trò then chốt trong việc ước lượng trạng thái sức khỏe tổng thể (State of Health – SOH) của pin, qua đó phản ánh khả năng làm việc thực tế so với thiết kế ban đầu. Theo phân loại tổng quát, các chỉ số HIs được chia thành hai nhóm chính:

Các HIs đo trực tiếp (Measured HIs) – được xác định từ các tín hiệu đo đặc thực nghiệm, bao gồm nhóm dựa trên điện áp và nhóm dựa trên dòng điện.

- Các HIs tính toán (Calculated HIs) – được suy luận thông qua các mô hình toán học, mô phỏng hoặc xử lý dữ liệu, thường liên quan đến nhiệt độ, điện trở nội, dung lượng còn lại, hoặc tốc độ phản ứng điện hóa.
- Trong đó, nhóm HIs đo trực tiếp dựa trên điện áp và dòng điện đóng vai trò nền tảng, vì chúng có thể được trích xuất từ các chu trình nạp – phóng của pin thông thường mà không cần can thiệp sâu vào cấu trúc vật lý bên trong.

Hình 3 [6] minh họa đồ thị biến thiên của điện áp và dòng điện của pin trong suốt một chu kỳ làm việc, bao gồm:

- Giai đoạn phóng điện từ trạng thái đầy sang trạng thái cạn,
- Giai đoạn nạp điện bằng dòng không đổi (Constant Current – CC),
- Tiếp theo là nạp điện áp không đổi (Constant Voltage – CV),
- Và cuối cùng là tái phóng điện bằng dòng không đổi.



Hình 3: Đường cong hỗ trợ trích xuất chỉ số sức khỏe của pin [6]

Từ hình 3 có thể trích xuất các chỉ số HIs dựa trên điện áp và dòng điện thuộc nhóm HIs đo trực tiếp, bao gồm các thông số như thời gian nạp dòng không đổi (CCCT), thời gian nạp điện áp không đổi (CVCT), thời gian giảm dòng bằng nhau (TECD), độ dốc của điện áp nạp/phóng (SCV, SDV), cùng nhiều chỉ số khác có liên hệ mật thiết đến sự biến đổi của cấu trúc điện hóa trong tế bào pin.

Những chỉ số này, khi được theo dõi liên tục và phân tích bằng các phương pháp học máy hoặc mô hình thống kê, cho phép dự báo chính xác quá trình suy giảm hiệu suất và tuổi thọ còn lại của pin, góp phần tối ưu hóa chiến lược vận hành, bảo dưỡng và thay thế trong các hệ thống lưu trữ năng lượng hiện đại.

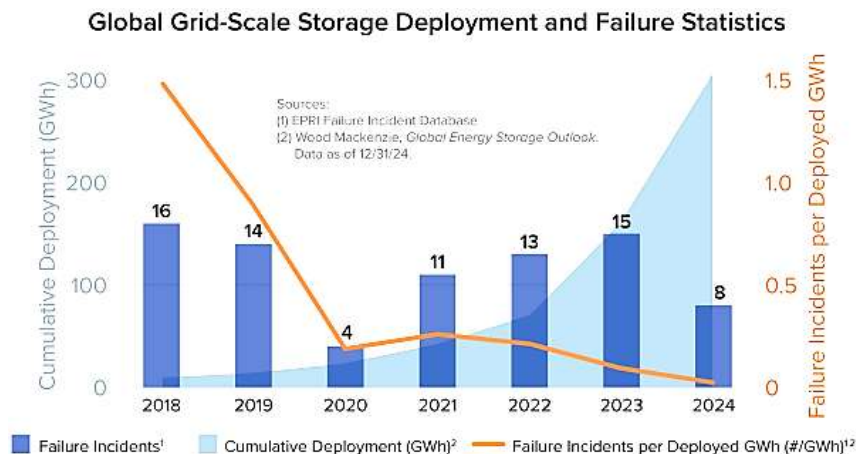
- CCCT (Constant-Current Charge Time) – Thời gian nạp dòng điện không đổi: Khoảng thời gian tiến hành nạp ở chế độ dòng điện không đổi kể từ trạng thái đã phóng điện, được minh họa trong Hình 5.
- CVCT (Constant-Voltage Charge Time) – Thời gian nạp điện áp không đổi: Khoảng thời gian nạp ở chế độ điện áp không đổi sau giai đoạn nạp dòng điện không đổi, được thể hiện trong Hình 5.
- TECD (Time of Equal Current Drop) – Thời gian sụt dòng bằng nhau: Khoảng thời gian mà dòng nạp giảm cùng một giá trị trong nhiều chu kỳ nạp ở chế độ điện áp không đổi.
- TEVR (Time of Equal Voltage Rise) – Thời gian tăng điện áp bằng nhau: Khoảng thời gian mà điện áp nạp tăng cùng một giá trị trong nhiều chu kỳ nạp ở chế độ dòng điện không đổi.
- VRET (Voltage Rise of Equal Time) – Mức tăng điện áp trong cùng khoảng thời gian: Mức tăng điện áp trong cùng một khoảng thời gian cho nhiều chu kỳ nạp ở chế độ dòng điện không đổi.
- CDET (Current Drop of Equal Time) – Mức giảm dòng điện trong cùng khoảng thời gian: Mức giảm dòng điện trong cùng một khoảng thời gian cho nhiều chu kỳ nạp ở chế độ điện áp không đổi.
- CCDT (Constant-Current Discharge Time) – Thời gian phóng điện dòng điện không đổi: Khoảng thời gian phóng điện ở chế độ dòng điện không đổi, kể từ trạng thái đầy điện cho đến khi đạt trạng thái phóng điện.

- VDET (Voltage Drop of Equal Time) – Mức giảm điện áp trong cùng khoảng thời gian: Mức giảm điện áp trong cùng một khoảng thời gian cho nhiều chu kỳ phóng điện ở chế độ dòng điện không đổi.
- TEVD (Time of Equal Voltage Drop) – Thời gian giảm điện áp bằng nhau: Khoảng thời gian mà điện áp phóng điện giảm cùng một giá trị trong nhiều chu kỳ phóng điện ở chế độ dòng điện không đổi.

2. Những rào cản kỹ thuật và kinh tế khi quản lý, lắp đặt và vận hành BESS

2.1 Rào cản kỹ thuật

a) An toàn & cháy nổ (thermal runaway): Rủi ro thermal runaway, lan truyền cháy giữa các module, và phát thải khí độc là vấn đề hàng đầu (hình 4). Nguồn báo cáo và phân tích sự cố (EPRI, ACS, các case lớn) chỉ ra rằng cả thiết kế cell, hệ thống thông gió/giải nhiệt, và chính sách bảo vệ phải được chuẩn hóa để giảm nguy cơ sự cố nghiêm trọng [10][11][12][13].



Hình 4: Xác suất sự cố của hệ thống BESS toàn cầu [12]

b) Hao mòn & quản lý tuổi thọ (degradation): BESS bị ảnh hưởng mạnh bởi lịch sử sạc-xả, nhiệt độ môi trường và tốc độ dòng sạc (C-rate). Việc thiếu mô hình SOH chính xác dẫn tới kế hoạch vận hành sub-optimal và chi phí thay thế cao. Do đó BMS và EMS cần tích hợp chiến lược dự báo SOH/SOC để cân bằng mục tiêu hiệu năng – tuổi thọ [6][14].

c) Tương tác hệ thống & điều khiển (grid integration): BESS phải triển khai các chiến lược điều khiển đáp ứng nhanh theo tần số, đồng thời tránh tương tác bất lợi với biến tần, đặc biệt cần tính toán và xem xét khả năng ảnh hưởng của các vi phạm sóng hài đến tính tác động chính xác của bảo vệ rơ le [17]. Lưới có tỷ lệ RES cao làm cho thiết kế điều khiển phức tạp hơn [2][8].

d) Chuỗi cung ứng & nguyên vật liệu: Áp lực lên khoáng chất (Li, Ni, Co, Cu) và chuỗi tinh luyện gây ra rủi ro cung ứng và giá thành biến động; IEA & IRENA cảnh báo tính bền vững chuỗi cung ứng và nhu cầu tái chế là yếu tố then chốt cho triển khai quy mô [1][4].

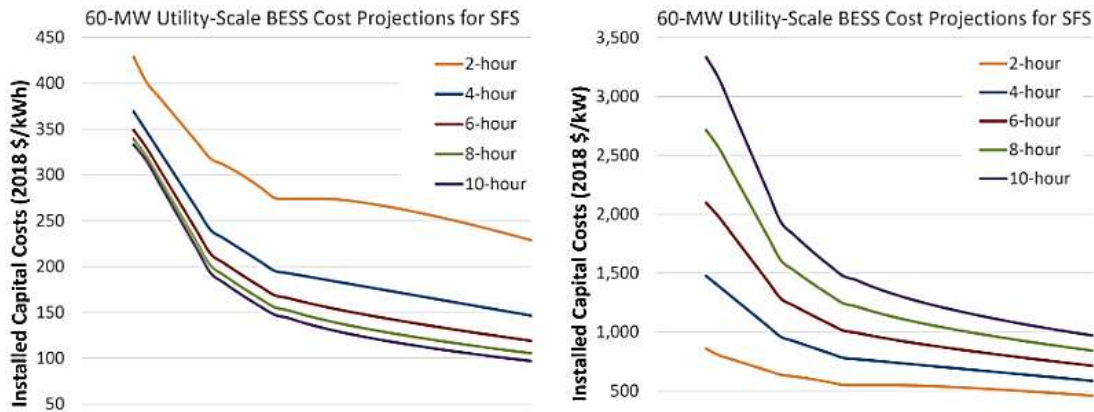
2.2 Rào cản kinh tế

a) Chi phí đầu tư ban đầu (CAPEX): Theo các báo cáo kỹ thuật cập nhật của NREL [5] và U.S. Department of Energy (DOE) [11], mặc dù chi phí pin lithium-ion đã giảm khoảng 80% trong giai đoạn 2015–2023, chi phí đầu tư ban đầu (CAPEX) cho các dự án BESS quy mô lưới vẫn ở mức đáng kể. Cụ thể, CAPEX trung bình cho hệ thống utility-scale BESS 4 giờ lưu trữ hiện dao động từ 340–410 USD/kWh, trong đó riêng phần cell chiếm khoảng 55–60%, còn lại phân bổ cho PCS, hệ thống BMS, BOS (Balance of System) và chi phí an toàn, cứu hỏa. Đối với các hệ thống công nghiệp hoặc khu dân cư yêu cầu tiêu chuẩn an toàn cao (NFPA-855, UL9540A), chi phí có thể tăng lên 500–600 USD/kWh do bổ sung các lớp cách ly và hệ thống phát hiện cháy sớm [11]. Báo cáo ATB-2022 của NREL cũng dự báo CAPEX có thể giảm trung bình 7–10%/năm nhờ quy mô hóa sản xuất và cải thiện chuỗi cung ứng toàn cầu, song chi phí BOS và hệ thống an toàn vẫn là rào cản lớn. Như vậy, trong khi chi phí pin giảm mạnh tạo điều kiện kinh tế thuận lợi hơn, tổng CAPEX của dự án BESS vẫn cao do yêu cầu kỹ thuật, an toàn và hạ tầng hỗ trợ đồng bộ, đặc biệt trong môi trường lưới điện phức tạp hoặc có mật độ dân cư lớn [5][11].

b) Cơ chế thu phí/định giá dịch vụ (market design): Theo các phân tích của IEA [2] và Frontiers in Energy Research [8], thiếu cơ chế định giá đầy đủ cho các dịch vụ phụ trợ đang là một trong những rào cản lớn nhất đối với sự phát triển của các dự án BESS quy mô lưới. Cụ thể, trong hơn 60% các thị trường điện hiện nay, chưa có cơ chế thanh toán rõ ràng cho các dịch vụ như “khôi phục nhanh tần số”-Fast Frequency Response (FFR), “ưu tiên đồng điện”- Primary Reserve hoặc Synthetic Inertia, vốn là các chức năng kỹ thuật mà BESS có thể cung cấp hiệu quả hơn hẳn các nguồn truyền thống. Báo cáo IEA 2023 cho thấy, ở châu Âu và Bắc Mỹ, doanh thu từ dịch vụ phụ trợ chỉ chiếm khoảng 10–15% tổng dòng tiền của

dự án BESS, trong khi tỷ lệ này cần đạt ít nhất 25–30% mới đủ để đảm bảo hoàn vốn trong vòng 8–10 năm. Tương tự, nghiên cứu tổng quan của Prakash et al. [8] chỉ ra rằng tại các quốc gia Đông Nam Á, thời gian hoàn vốn trung bình của hệ thống lưu trữ năng lượng vượt quá 13 năm khi không có khung thị trường cho các dịch vụ điều tần nhanh. Hệ quả là, dù tiềm năng kỹ thuật lớn, động lực đầu tư BESS vẫn bị suy giảm đáng kể, đặc biệt ở những hệ thống điện chưa tự do hóa hoặc chưa có cơ chế định giá linh hoạt theo dịch vụ phụ trợ mà BESS có thể cung cấp.

c) Chi phí vận hành & chi phí vòng đời (LCOE/LCOES): Chi phí thay thế cell và chi phí bảo trì là các thành tố quan trọng làm thay đổi lợi ích kinh tế thực tế của dự án BESS; đặc biệt, hao mòn sớm do chiến lược vận hành không tối ưu có thể làm tăng tần suất thay thế mô-đun, từ đó đẩy CAPEX hiệu dụng và OPEX lên cao. Báo cáo ATB của NREL nêu rõ CAPEX trung bình utility-scale vẫn ở mức hàng trăm USD/kWh, trong khi các phân tích kỹ thuật (DOE, EPRI) cho thấy chi phí thay thế cell và chi phí an toàn có thể làm tăng tổng CAPEX thực tế tới mức đáng kể nếu không tính toán vòng đời đầy đủ [5][11][14]. Theo các nghiên cứu về tối ưu hóa vận hành, việc áp dụng degradation-aware dispatch (tức EMS tối ưu hóa sạc–xả với ràng buộc/chi phí hao mòn) có thể giảm tổng chi phí vòng đời (LCOES) từ khoảng 12–18% so với chiến lược chỉ tối đa hóa lợi nhuận ngắn hạn [6]. Một tính toán cụ thể làm ví dụ cho thấy: một hệ BESS có CAPEX thực (all-in) là 400 USD/kWh, UC = 1 kWh, và tuổi thọ tương đương toàn kỳ = 4.000 EFC, khi đó tổng năng lượng throughput ≈ 4.000 kWh; kết quả là degradation cost per kWh ≈ 0.10 USD/kWh ($400 / 4.000$). Nếu vận hành không tối ưu giảm cycle life xuống còn 3.000 EFC, degradation cost tăng lên ≈ 0.133 USD/kWh, tức tăng $\sim 33\%$ chi phí hao mòn riêng phần, làm giảm biên lợi nhuận dự án. Những con số này chỉ mang tính minh họa nhưng phản ánh cơ chế toán học thực tế: mỗi đơn vị giảm về tuổi thọ tương đương với tăng chi phí trên mỗi kWh được lưu trữ.



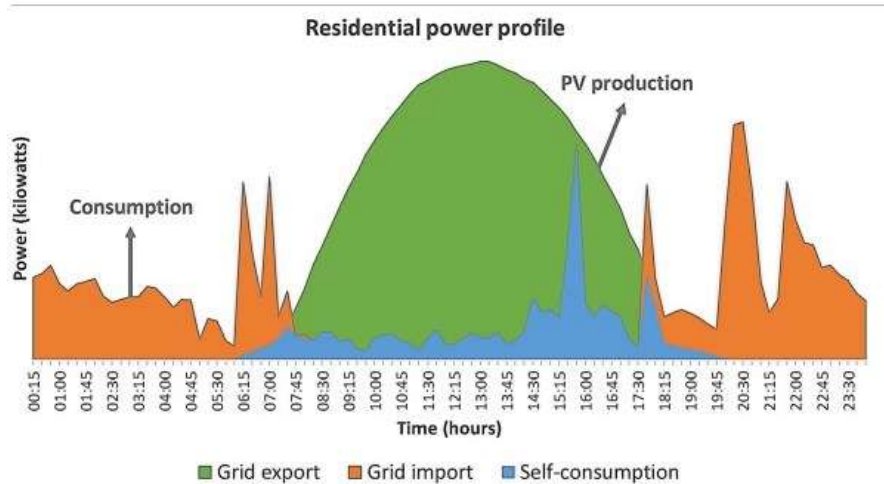
Hình 5: Dự báo chi phí hệ thống BESS theo kích bản trung bình tính trên năng lượng lưu trữ (\$/kWh-trái) và chi phí trên đơn vị công suất phát (\$/kW-phải)

Do đó, với diễn biến mô tả trên hình 5, mô hình kinh tế cho BESS cần tích hợp trực tiếp một thành phần hao mòn (degradation cost) và đầu vào SOH dự báo từ BMS/EMS. Việc này được thực hiện bằng cách kết hợp mô-hình SOH/SOC, dữ liệu lịch sử cycling, and energy throughput vào hàm mục tiêu tối ưu hóa (ví dụ: $\min \{ \text{energy procurement cost} + \text{replacement cost} + \text{maintenance cost} \}$). Bằng cách so sánh kịch bản vận hành (price-based dispatch vs. degradation-aware dispatch), nhà vận hành có thể cân đối được trade-off giữa doanh thu ngắn hạn và giảm chi phí thay thế dài hạn, từ đó đưa ra chiến lược kinh tế bền vững hơn.

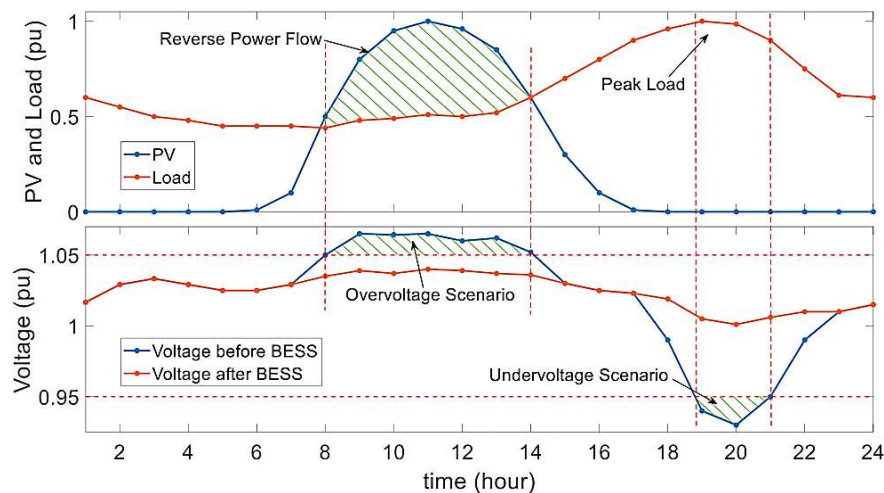
3. Ưu điểm nổi bật của BESS khi dùng cho lưới có nguồn năng lượng tái tạo

Khi lắp đặt hệ thống BESS cho lưới điện có nguồn năng lượng tái tạo, chất lượng điện năng được cải thiện một cách rõ rệt. Hình 6 mô tả khả năng bù áp và công suất ưu việt khi có BESS trong lưới.

Hình 6 [7] cho thấy việc tiêu thụ năng lượng được tạo ra từ các nguồn phát điện tại chỗ (ví dụ: hệ thống quang điện mặt trời – PV) hay còn gọi là mức tự tiêu thụ năng lượng (Energy Self-Consumption), có thể được cải thiện đáng kể nhờ vào hoạt động của hệ thống lưu trữ năng lượng bằng pin (BESS). Ở hình 6, khi đỉnh sản lượng điện từ PV và đỉnh phụ tải tiêu thụ không trùng nhau. Cụ thể, nhu cầu phụ tải thường đạt mức cao nhất vào buổi sáng sớm và chiều tối, trong khi sản lượng PV lại đạt đỉnh vào giữa trưa. Sự lệch pha giữa hai đường cong này dẫn đến hiện tượng một lượng lớn điện năng mặt trời được phát ngược lên lưới phân phối hạ áp (LV DN) vào khoảng thời gian giữa ngày [7]. Về bản chất, mạng lưới điện hạ áp trong trường hợp này đóng vai trò như một kho lưu trữ năng lượng ảo (Virtual Energy Storage) cho các chủ sở hữu hệ thống PV.



Hình 6: Hiệu quả bù áp trên lưới có tích hợp nguồn năng lượng mặt trời (PV)



Hình 7: Hiệu quả cải thiện profile điện áp rõ rệt của BESS [8]

Hiện tượng trên gây ra tác động đáng kể đến quá trình vận hành hệ thống điện, đặc biệt là nguy cơ quá tải cục bộ do dòng công suất đảo ngược tăng cao trong các khoảng thời gian không đồng bộ giữa phát và tải. Hệ quả là tổn thất công suất trên lưới tăng, đồng thời sự ổn định điện áp và tần số của hệ thống bị ảnh hưởng. Trong bối cảnh đó, BESS đóng vai trò then chốt như một bộ đệm điều hòa năng lượng, cho phép dịch chuyển (shifting) lượng điện PV dư thừa từ thời điểm thừa phát sang thời điểm phụ tải cao, nhờ đó tối ưu hóa hiệu suất vận hành toàn hệ thống điện.

Ngoài ra, việc tích hợp BESS giúp giảm áp lực lên lưới phân phối, hạn chế dòng công suất đảo chiều, đồng thời tăng tỷ lệ tự tiêu thụ nội bộ của hộ dùng điện – yếu tố đặc biệt quan trọng trong xu thế phát triển vi lưới (microgrid) và mô hình điện năng phân tán (DERs). Về lâu dài, việc triển khai đồng bộ PV – BESS còn giúp giảm nhu cầu đầu tư mở rộng hạ tầng lưới, tăng độ tin cậy cung cấp điện, và thúc đẩy quá trình chuyển dịch năng lượng bền vững, đặc biệt tại các khu vực có bức xạ mặt trời cao nhưng phụ tải phân bố không đồng đều.

BESS có khả năng hoạt động như cả phụ tải và nguồn phát điện, đồng thời có thể chuyển đổi chế độ hoạt động (nạp hoặc xả) gần như tức thời tùy theo yêu cầu điều hành hệ thống. Nhờ đặc tính này, BESS có thể được sử dụng để hấp thụ phần năng lượng tái tạo dư thừa trong các giờ cao điểm phát điện – ví dụ như giữa trưa trong các hệ thống điện mặt trời – nhằm giảm thiểu hiện tượng quá điện áp tại các nút mạng trong lưới phân phối [8].

Tương tự, trong các giờ cao điểm phụ tải buổi tối, BESS có thể xả năng lượng đã lưu trữ để bổ sung công suất cho hệ thống, qua đó giảm nguy cơ sụt áp (under-voltage) tại các nút xa nguồn hoặc các khu vực có tổn thất điện áp cao. Hình 4 minh họa một trường hợp điển hình của việc ứng dụng BESS nhằm khắc phục đồng thời hai vấn đề: quá điện áp và sụt áp. Theo đó, trong khoảng thời gian 08:00 đến 14:00, công suất phát từ các tấm quang điện (PV) vượt xa nhu cầu phụ tải, dẫn đến dòng công suất đảo chiều lớn tại trạm biến áp phân phối, gây ra hiện tượng quá điện áp cục bộ. Ngược lại, trong giai đoạn 19:00 đến 21:00, khi phụ tải tăng cao đột biến còn công suất phát từ PV giảm về gần bằng 0, hệ thống lại đối mặt với nguy cơ sụt áp nghiêm trọng.

Để khắc phục hai tình huống này, BESS được điều khiển nạp và xả linh hoạt: nạp (charge) trong giai đoạn thừa phát để hấp thụ năng lượng dư thừa và xả (discharge) trong giai đoạn thiếu công suất để bổ sung điện năng và ổn định điện áp. Kết quả là, điện áp trên lưới được duy trì trong giới hạn cho phép, giảm dao động điện áp theo thời gian, đồng thời cải thiện chất lượng điện năng và hiệu quả vận hành.

Về mặt điều hành kỹ thuật, việc tích hợp BESS trong các lưới phân phối tích cực còn giúp giảm áp lực cho máy biến áp và thiết bị đóng cắt, tối ưu hóa hệ số công suất, và hạn chế dao động công suất phản kháng. Ở góc độ kinh tế, việc khai thác linh hoạt BESS giúp tận dụng tối đa nguồn năng lượng tái tạo, giảm chi phí mua điện từ lưới, đồng thời gia tăng tuổi thọ thiết bị điện nhờ giảm biên độ biến thiên điện áp. Chính nhờ khả năng thích ứng nhanh và điều khiển chính xác, BESS ngày càng trở thành một thành phần không thể thiếu trong các chiến lược vận hành và tối ưu hóa lưới điện hiện đại hướng tới mục tiêu ổn định, bền vững và thông minh.

5. Kết luận và khuyến nghị về cấu hình BESS

Dựa trên phân tích các tài liệu tổng hợp và thực nghiệm, một số khuyến nghị về cấu hình và giải pháp kỹ thuật nhằm tối đa hóa lợi ích và giảm rủi ro cho BESS trong hệ thống có nhiều nguồn năng lượng tái tạo, đó là:

* *Lựa chọn công nghệ cell & kiến trúc hệ thống:*

- Ưu tiên LFP (Li-FePO₄) cho ứng dụng cố định lưới (utility-scale, C&I) khi cần tuổi thọ cao và an toàn tốt; cân nhắc áp dụng NMC cho mật độ năng lượng cao hơn nhưng với rủi ro nhiệt và chi phí cao hơn [5][6].
- Thiết kế module → rack → container tách biệt với hệ thống làm mát chủ động (air/liquid cooling) đồng thời trang bị hệ thống phát hiện sớm (temperature, gas sensors) nhằm giảm khả năng lan truyền nhiệt gây cháy nổ [10][13].

* *Hệ thống quản lý & điều khiển (BMS + EMS + PCS)*

- BMS cần thực hiện quản lý cell-level (balancing, passivation detection), SOH estimation và phát cảnh báo sớm; EMS phối hợp chức năng dispatch-for-value (chi phí thị trường + độ hao mòn) để tối ưu lịch vận hành theo LCOE/LCOES [6][9][14].
- Hệ thống PCS (power conversion system) phải hỗ trợ chế độ tái khôi phục lưới (grid-forming) đồng thời có khả năng điều khiển tốc độ đáp ứng nhanh để khôi phục tần số/ứng phó sự cố.

* *An toàn & quy hoạch không gian lắp đặt:* Áp dụng tiêu chuẩn quốc tế (NFPA-855, UL9540A test protocols, EPRI lessons) trong thiết kế, khảo sát vị trí lắp đặt và phương án chữa cháy/thoát hiểm; xây dựng kế hoạch chữa cháy tại chỗ và phối hợp với cơ quan phòng cháy chữa cháy địa phương [10][12][13].

* *Mô hình kinh tế & tích hợp thị trường:* Sử dụng mô phỏng tối ưu hóa LCOE/LCOES kết hợp mô hình già lập xác định tuổi thọ (degradation model) để tìm kích thước và chiến lược vận hành tối ưu; [2][5][8].

* *Thử nghiệm & giám sát:* Triển khai thử nghiệm với giám sát sâu (SCADA + PMU), lưu trữ dữ liệu vận hành để tinh chỉnh BMS/EMS, và cập nhật chiến lược vận hành dựa trên số liệu thực địa [14][15].

Tài liệu tham khảo

- [1] International Energy Agency (IEA), “Batteries and secure energy transitions,” *Special report*, Apr. 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>.
- [2] International Energy Agency (IEA), “Energy storage: Grid-scale storage,” (web page, data & analysis), 2023–2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/electricity/grid-scale-storage>.
- [3] International Energy Agency (IEA), “Global installed energy storage capacity by scenario, 2023 and 2030” (data chart), Apr. 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-installed-energy-storage-capacity-by-scenario-2023-and-2030>.
- [4] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Energy storage” (web page: technology overview & reports). [Online]. Available: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Energy-Storage>.
- [5] National Renewable Energy Laboratory (NREL), “Annual Technology Baseline (ATB) — Utility-Scale Battery Storage (2022),” Jul. 2022. [Online]. Available: https://atb.nrel.gov/electricity/2022/utility-scale_battery_storage.
- [6] S. Nazaralizadeh, P. Banerjee, A. K. Srivastava and P. Famouri, “Battery Energy Storage Systems: A Review of Energy Management Systems and Health Metrics,” *Energies*, vol. 17, no. 5, art. 1250, Mar. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en17051250>.
- [7] N. Chatzigeorgiou, “A review on battery energy storage systems: applications, developments and research trends,” *Energy Reports / ScienceDirect*, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X2400776X>.
- [8] K. Prakash, S. Nair and S. Jayakumar, “A review of battery energy storage systems for ancillary services in distribution grids,” *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, Oct. 2022. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2022.971704/full>.
- [9] M. T. Lawder, B. Suthar, P. W. C. Northrop, S. De, C. M. Hoff et al., “Battery energy storage system (BESS) and battery management system (BMS) for grid-scale applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 6, pp. 1014–1030, Jun. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2317451>.

- [10] J. A. Jeevarajan and co-authors, “*Battery Hazards for Large Energy Storage Systems*,” ACS Energy Letters, 2022. [Online]. Available: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsenerylett.2c01400>.
- [11] U.S. Department of Energy (DOE), “*Battery Energy Storage Systems Report – Supply Chain and Safety*” (Open report), Jan. 2025. [Online]. Available: https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-01/BESSIE_supply-chain-battery-report_111124_OPENRELEASE_SJ_1.pdf.
- [12] Electric Power Research Institute (EPRI), “*BESS Failure Incident Database*” (wiki / database for incidents & lessons), 2024–2025. [Online]. Available: https://storagewiki.epri.com/index.php/BESS_Failure_Incident_Database.
- [13] Clean Energy Council / CleanPower (ACP), “*Energy Storage Leading on Safety — Fact Sheet*,” Dec. 2023. https://cleanpower.org/wp-content/uploads/gateway/2023/12/ACP_Energy-Storage-Leading-on-Safety_FactSheet.pdf.
- [14] Sandia National Laboratories, “*Energy Storage Handbook — Chapter 15: Energy Storage Management Systems*,” 2022 (technical chapter/pdf). https://www.sandia.gov/app/uploads/sites/163/2023/01/ESHB2020_Ch15_ESMS_Nguyen.pdf.
- [15] NREL, “*Residential and Utility-Scale Battery Storage Technology Data (ATB)*,” 2021–2022 pages providing cost & performance trends. [Online]. Available: https://atb.nrel.gov/electricity/2021/utility-scale_battery_storage and https://atb.nrel.gov/electricity/2022/residential_battery_storage.
- [16] IEC 62933 standard, <https://webstore.iec.ch/en/publication/64642>
- [17] Ho Viet Bun, Le Xuan Thanh, “*Impact of power harmonics on precise and discriminative tripping of the relay system for earthing protection in underground 6 kV grids of Quang Ninh underground mines*”, International conference Empowering Science and Mathematics for Global Competitiveness, Jakarta, 2019. <https://doi.org/10.1201/9780429461903-5>
- [18] Nhu Y Do, Xuan Thanh Le, *Improvements to the operation of wind power generators in Vietnam: Nâng cao hiệu quả hoạt động của nguồn điện gió trong hệ thống điện Việt Nam*, Journal of Vietnamese Environment, Vol 8 No 3, 2016. <https://doi.org/10.13141/jve.vol8.no3.pp173-178>
- [19] Le Xuan Thanh, “*Matlab application on ecotechnic analysis of Vietnam wind power project*”, Journal of Vietnamese Environment, Vol 8 No 2, 2016. <https://doi.org/10.13141/jve.vol8.no2.pp141-145>
- [20] Cong Cuong Nguyen, Le Xuan Thanh, “*Renewable Energy in Vietnam: Figures and Future Scope for Net-Zero Target*” Journal of Inżynieria Mineralna, <https://doi.org/10.29227/IM-2025-02-41>.

ABSTRACT

BESS Technology in Renewable Energy Systems: A Comprehensive Assessment of Economic and Technical Aspects and Key Lessons Learned from Global Experience

Le Xuan Thanh^{1*}

¹Hanoi university of mining and geology

Battery Energy Storage System (BESS) is considered one of the essential technologies in the global energy transition, especially in the context of increasing proportion of renewable energy sources. In the grid integrating renewable energy sources, BESS plays an important role in load balancing, frequency regulation, reduction of renewable power curtailment and improvement of grid flexibility. The strong development of lithium-ion battery technology, especially LFP cells, along with significant cost reductions have made BESS more economically and technically feasible. However, large-scale deployment of BESS still faces many challenges. Technically, risks related to thermal runaway, battery degradation, and grid-forming control are key issues that need to be systematically addressed. At the same time, operational reality also shows that the lack of a clear pricing mechanism and ancillary energy market makes the investment and installation of BESS systems face barriers in terms of capital recovery and scalability. The article, through an overview of BESS and analysis of related technical and economic barriers, has mentioned aspects of effective BESS deployment in the context of Vietnam. Proposals for a comprehensive approach combining engineering, management and policy have been implemented. Technically, it is necessary to choose cell technology suitable for humid tropical operating conditions, optimize the configuration of cooling systems and fire safety, as well as apply advanced management systems (BMS/EMS) with intelligent control capabilities based on the degradation-aware dispatch model. In addition, the article also recommended the early completion of the legal corridor, connection mechanism and electricity market to properly price the role of the services provided by BESS - from frequency regulation, voltage regulation, to energy storage for load balancing.

Keywords: “BESS, Renewable energy, standards for BESS”.

for thermal management of buildings,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 129, article 105690. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105690

Hanif, F., Imran, M., Zhang, Y., Jia, Z., Lu, X., Lu, R., & Tang, B. (2023). Form-Stable Phase Change Material with Wood-Based Materials as Support. *Polymers*, 15(4), 942, <https://doi.org/10.3390/polym15040942>

Hu, J., and Yu, X. (2019). “Thermo and light-responsive building envelope: Energy analysis under different climate conditions,” *Solar Energy* 193, 866-877. DOI: 10.1016/j.solener.2019.10.021

Lachheb, M., Younsi, Z., Naji, H., Karkri, M., and Ben Nasrallah, S. (2017). “Thermal behaviour of a hybrid PCM/plaster: A numerical and experimental investigation,” *Applied Thermal Engineering* 111, 49-59. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.09.083

Liang, B., Lu, X., Li, R., Tu, W., Yang, Z., and Yuan, T. (2019). “Solvent-free preparation of bio-based polyethylene glycol/wood flour composites as novel shape-stabilized phase change materials for solar thermal energy storage,” *Solar Energy Materials and Solar Cells* 200, article 110037. DOI: 10.1016/j.solmat.2019.110037

Mathis, D., Blanchet, P., Landry, V., and Lagière, P. (2019). “Thermal characterization of bio-based phase changing materials in decorative wood-based panels for thermal energy storage,” *Green Energy and Environment* 4(1), 56-65. DOI: 10.1016/j.gee.2018.05.004

Nam, J., Yun, B. Y., Choi, J. Y., and Kim, S. (2022). “Potential of wood as thermal energy storage materials: Different characteristics depending on the hierarchical structure and components,” *International Journal of Energy Research* 46(11), 14926-14945. DOI: 10.1002/er.8195

Nazari, M., Jebrane, M., and Terziev, N. (2020). “Bio-based phase change materials incorporated in lignocellulose matrix for energy storage in buildings – A review,” *Energies* 13, article 3065, <https://doi.org/10.3390/en13123065>

Rodríguez, G. E., Bustos Ávila, C., & Cloutier, A. (2023). Use of Phase Change Materials in Wood and Wood-Based Composites for Thermal Energy Storage: A Review. *BioResources*, 18(4), 7643-7682. DOI: 10.15376/biores.18.4.Rodriguez

Solgi, E., Hamedani, Z., Fernando, R., and Mohammad, B. (2019). “A parametric study of phase change material characteristics when coupled with thermal insulation for different Australian climatic zones,” *Building and Environment* 163(106317). DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106317

Vennapusa, J. R., Konala, A., Dixit, P., and Chattopadhyay, S. (2020). “Caprylic acid based PCM composite with potential for thermal buffering and packaging applications,” *Materials Chemistry and Physics* 253, article 123453. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123453

Xiao-Mei Yang, Tao Shi, Xiaodong Wang, Huan Liu, De-Yi Wang, Guang-Zhong Yin, (2025), Typical Applications and Flame-Retardant Strategies for Organic Phase-Change Materials, Carbon Energy 7:e70079 DOI: <https://doi.org/10.1002/cey2.70079>

Yang, L., Huang, J., and Zhou, F. (2020). “Thermophysical properties and applications of nano-enhanced PCMs: An update review,” *Energy Conversion and Management* 214, article 112876. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112876

Wan, Y., Chen, Y., Cui, Z., Ding, H., Gao, S., Han, Z., and Gao, J. (2019). “A promising form-stable phase change material prepared using cost effective pinecone biochar as the matrix of palmitic acid for thermal energy storage,” *Scientific Reports* 9, article 11535. DOI: 10.1038/s41598-019-47877-z.