ขับเคลื่อนการเปลี่ยนแปลงระบบไฟฟ้าของประเทศไทย: ปลดล็อกศักยภาพของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS)

รายงานฉบับสมบูรณ์ สรุปข้อค้นพบสำคัญจากการสัมมนาและการประชุมเชิงปฏิบัติการ พร้อมข้อเสนอแนะสำหรับการวางแผนระบบไฟฟ้าของประเทศไทย

โครงการ Partnerships to Accelerate the Global Energy Transition (PACT) ประเทศไทย (Thailand Component)

พฤศจิกายน 2568

giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

จัดพิมพ์โดย

องค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศของเยอรมัน (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH)

สำนักงานจดทะเบียน:

บอนน์ เอชบอร์น กรุงเทพมหานคร

193/63 อาคารเลครัชดาออฟฟิศคอมเพล็กซ์ (ชั้น 16)

ถนนรัชดาภิเษกตัดใหม่

คลองเตย กรุงเทพฯ 10110 ประเทศไทย

โทรศัพท์: +66 2 661 9273

อีเมล: giz-thailand@giz.de

ชื่อโครงการ

โครงการ Partnerships to Accelerate the Global Energy Transition (PACT) ประเทศไทย

ผู้เขียน

ดร.เอคเคอฮาร์ด เทรอสเตอร์ บริษัท Energynautics

บรรณาธิการ

ชาติชนิส เกษมวงศ์ GIZ

ปริญญ์ เผษะปะบุตร GIZ

ลาร์ส อัลเลอร์ไฮลิเกน GIZ

แหล่งที่มาของรูปภาพ: iStock.com/YoungNH

กิตติกรรมประกาศ

เราขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งสำหรับการสนับสนุนจากบริการ Leveraged Partnerships ของ GET.transform ซึ่งช่วยให้การให้บริการด้านคำปรึกษาแก่โครงการความร่วมมือด้านเทคนิคอื่น ๆ ที่ดำเนินการโดย GIZ เป็นไปได้ ความร่วมมือครั้งนี้ช่วยขยายขอบเขตการทำงานและศักยภาพของ GET.transform ในการบูรณาการและขยายผลแนวทางการเปลี่ยนแปลงระบบไฟฟ้า แพร่หลายมากยิ่งขึ้น สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติม: www.get-transform.eu

หมายเหตุเกี่ยวกับภาษาและการแปล

ต้นฉบับของรายงานฉบับนี้จัดทำขึ้นด้วยภาษาอังกฤษ ส่วนฉบับภาษาไทยนี้เป็นการแปลเพื่อให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในประเทศเข้าถึงได้สะดวกยิ่งขึ้น ทั้งนี้อาจมีความแตกต่างบางประการในการใช้ถ้อยคำระหว่างสองภาษา หากมีข้อสงสัย โปรดอ้างอิงจากต้นฉบับภาษาอังกฤษเป็นหลัก

สารบัญ

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร 1

1 บทนำและภูมิหลังเชิงบริบท 4

2 ส่วนประกอบทางเทคนิคและผังการจัดวางของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ (BESS) 7

3 แนวโน้มด้านต้นทุนและโครงสร้างห่วงโซ่คุณค่าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) 9

4 กรณีการใช้งาน ข้อพิจารณาด้านตลาด และรูปแบบธุรกิจ 12

4.1 กรณีการใช้งาน 12

4.2 สภาพตลาดในยุโรปและเศรษฐกิจเกิดใหม่ 13

4.3 การซ้อนรายได้ หรือการสร้างรายได้จากหลายช่องทาง (Revenue Stacking) 15

4.4 รูปแบบธุรกิจ (Business Models) 16

4.5 โครงสร้างสัญญา (Contract Structures) 18

4.6 การประยุกต์ใช้งานระบบ BESS ที่เกี่ยวข้องในประเทศไทย 19

5 การวิเคราะห์ความปลอดภัยของระบบ BESS: ความผิดพลาดและกลยุทธ์การลดความเสี่ยง 22

6 มาตรฐานและข้อกำหนดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) 26

7 หัวข้อในอนาคตและความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี 29

8 ข้อเสนอแนะ 30

8.1 เสถียรภาพของระบบและการสนับสนุนโครงข่ายไฟฟ้า: ความถี่ การสร้างโครงข่าย (Grid-Forming) ความแออัด และการกู้คืนระบบไฟฟ้าหลังจากเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง (Black Start) 30

8.2 รูปแบบธุรกิจที่ปรับใช้ตามความต้องการ (Tailored Business Models) และแนวทาง การจัดซื้อจัดจ้าง 31

8.3 การเปลี่ยนช่วงเวลาการใช้พลังงาน (Energy Shifting) และระบบไฮบริดพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (hybrid PV+BESS) 32

8.4 **ร่าง**แผนที่นำทางที่สอดคล้องกับแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ พ.ศ. 2567-2580 (PDP24-aligned Roadmap) และแนวโน้มด้านความสามารถในการแข่งขัน 33

8.4.1 ร่างแผนที่นำทางที่สอดคล้องกับแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ พ.ศ. 2567-2580 (PDP24-aligned Roadmap) 33

8.4.2 แนวโน้มด้านความสามารถในการแข่งขัน 34

9 บทสรุปและแนวโน้มในอนาคต 36

เอกสารอ้างอิง 38

สารบัญรูป

รูปที่ 1: การติดตั้งระบบแบตเตอรี่ทั่วโลกจำแนกตามส่วนแบ่งตลาด (%) ระหว่างปี พ.ศ. 2563 ถึง 2567 4

รูปที่ 2: การติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ทั่วโลก จำแนกตามกำลังการผลิต (power capacity) (สีน้ำเงิน) และความจุพลังงาน (energy capacity) (สีเขียว) ระหว่างปี พ.ศ. 2563 ถึง 2567 5

รูปที่ 3: ภาพรวมของการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่พบมากที่สุด 23 ประเภท จำแนกตามตำแหน่งการใช้งานภายในระบบไฟฟ้า 6

รูปที่ 4: ส่วนประกอบทางเทคนิคหลัก 10 ประการของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่แบบตู้คอนเทนเนอร์ (Containerized BESS) 7

รูปที่ 5: ผังแสดงส่วนประกอบหลักของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) อย่างง่าย 7

รูปที่ 6: ราคาของเซลล์และโมดูลแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนระหว่างปี พ.ศ. 2556 ถึง 2567 9

รูปที่ 7: ต้นทุนของตู้แบตเตอรี่รวมกับระบบแปลงพลังงาน (PCS) ระหว่างปี พ.ศ. 2562 ถึง 2567 9

รูปที่ 8: สัดส่วนต้นทุนโดยประมาณของขอบเขตการสร้างระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่แบบตู้คอนเทนเนอร์ (Containerized BESS) 10

รูปที่ 9: ต้นทุนการกักเก็บพลังงานเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน (LCOS) สำหรับโครงการขนาด 100 เมกะวัตต์ที่มีระยะเวลาการจ่ายไฟฟ้า 1, 2 และ 4 ชั่วโมง และได้รับเงินอุดหนุนภายใต้กฎหมายลดอัตราเงินเฟ้อ (Inflation Reduction Act: IRA) (ด้านซ้าย) และต้นทุนกำลังการผลิตเฉลี่ยต่อปี (ACC) สำหรับโครงการขนาด 100 เมกะวัตต์ที่มีระยะเวลาการจ่ายไฟฟ้า 1, 2 และ 4 ชั่วโมง และได้รับเงินอุดหนุนภายใต้กฎหมาย IRA (ด้านขวา) 11

รูปที่ 10: ความเหมาะสมของการใช้งานระบบ BESS ขนาดใหญ่ระดับโครงข่ายจำแนกตามประเทศ 13

รูปที่ 11: การแสดงแนวคิดของการซ้อนรายได้ (Revenue Stacking) ของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) 15

รูปที่ 12: กลยุทธ์การซ้อนรายได้ (Revenue Stacking) สำหรับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) 16

รูปที่ 13: รูปแบบทั่วไปของการเป็นเจ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) โดยบุคคลที่สาม 19

รูปที่ 14: สถิติการติดตั้งและความผิดพลาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในระดับโครงข่ายทั่วโลก 22

รูปที่ 15: การเกิดเหตุการณ์ความผิดพลาดของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน (Li-ion) จำแนกตามปีที่มีการใช้งาน 23

รูปที่ 16: แนวโน้มสำหรับสาเหตุที่แท้จริง (ด้านบน) และองค์ประกอบที่ล้มเหลว (ด้านล่าง) 24

รูปที่ 17: มาตรฐานและข้อกำหนดสำหรับการปฏิบัติงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) 26

รูปที่ 18: ตัวอย่างระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) พร้อมรหัสและมาตรฐานที่สำคัญ 28

รูปที่ 19: แผนที่นำทางสำหรับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS Roadmap) ที่สอดคล้องกับร่างแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ พ.ศ. 2567-2580 (PDP24) 34

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1: เกณฑ์ด้านตลาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ในสหราชอาณาจักร เยอรมนี และอิตาลี 14

ตารางที่ 2: การเปรียบเทียบรูปแบบธุรกิจของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ขนาดใหญ่ที่ใช้กับระบบไฟฟ้าในระดับโครงข่าย 17

ตารางที่ 3: สถานการณ์จำลองในอนาคตเกี่ยวกับความสามารถในการแข่งขันของระบบไฮบริดพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (hybrid PV+BESS) 35

รายการอักษรย่อ

อักษรย่อ	ความหมาย
ACC	ต้นทุนกำลังการผลิตเฉลี่ยต่อปี (Annualised Cost of Capacity: ACC)
BESS	ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System: BESS)
BMS	ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System: BMS)
BOOT	สัญญาสร้าง-เป็นเจ้าของ-ดำเนินงาน-โอน ซึ่งเป็นรูปแบบสัญญาและการร่วมลงทุนในโครงการสาธารณูปโภคหรือโครงสร้างพื้นฐานระหว่างภาครัฐและเอกชน (Build Own Operate Transfer: BOOT)
BOS	ส่วนประกอบสมดุลของระบบ ซึ่งหมายถึงส่วนประกอบทั้งหมดในระบบผลิตพลังงาน (โดยเฉพาะโซลาร์เซลล์) ยกเว้นตัวอุปกรณ์หลักซึ่งทำให้ระบบทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ (Balance of System: BOS)
CAPEX	ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Capital Expenditure: CAPEX)
CAISO	องค์กร California Independent System Operator (CAISO) เป็นองค์กรอิสระที่ไม่แสวงหาผลกำไรที่ทำหน้าที่ควบคุมระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ของรัฐแคลิฟอร์เนีย และดำเนินการตลาดค้าส่งพลังงานของรัฐ
CCGT	โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม (Combined-Cycle Gas Turbine: CCGT)
EGAT	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) (Electricity Generating Authority of Thailand: EGAT)
ENTEC	ศูนย์เทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ (National Energy Technology Centre: ENTEC)
EMS	ระบบบริหารจัดการพลังงาน (Energy Management System: EMS)
EPC	งานวิศวกรรม งานจัดซื้อ และงานก่อสร้าง (Engineering, Procurement and Construction: EPC)
EPPO	สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) (Energy Policy and Planning Office: EPPO)
ERC	คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) (Energy Regulatory Commission: ERC)
ESB	รูปแบบโครงสร้างกิจการไฟฟ้าที่มีผู้รับซื้อไฟฟ้าเพียงรายเดียว (Enhanced Single Buyer: ESB)
Ft	ค่าไฟฟ้าผันแปร (Fuel Adjustment Tariff: Ft)
GWh	กิกะวัตต์ชั่วโมง (Gigawatt-hour: GWh)
IBR	แหล่งจ่ายพลังงานแบบใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter-Based Resources: IBR)
IPP	ผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายใหญ่ (Independent Power Producer: IPP)
IAC	การบูรณาการ การประกอบ และการก่อสร้าง (Integration, Assembly & Construction: IAC)
ITC	เครดิตภาษีการลงทุน (Investment Tax Credit: ITC)
kW / kWh	กิโลวัตต์ / กิโลวัตต์ชั่วโมง (Kilowatt (kW) / Kilowatt-hour (kWh))
LCOS	ต้นทุนการกักเก็บพลังงานเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน (Levelised Cost of Storage: LCOS)
LCOE	ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยปรับเฉลี่ย (Levelised Cost of Energy: LCOE)
LNG	ก๊าซธรรมชาติเหลว (Liquefied Natural Gas: LNG)
MEA	การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) (Metropolitan Electricity Authority: MEA)
MW / MWh	เมกะวัตต์ / เมกะวัตต์ชั่วโมง (Megawatt (MW) / Megawatt-hour (MWh))
NMC / LFP	นิกเกิล-แมงกานีส-โคบอลต์ / ลิเธียม-ไอรอนฟอสเฟต (Nickel Manganese Cobalt: NMC / Lithium Iron Phosphate: LFP)
OCGT	กังหันก๊าซแบบวงจรเปิด (Open-Cycle Gas Turbine: OCGT)
PACT	โครงการ Partnerships to Accelerate the Global Energy Transition (PACT)
PEA	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) (Provincial Electricity Authority: PEA)
PHS	ระบบกักเก็บพลังงานด้วยพลังน้ำแบบสูบกลับ (Pumped Hydro Storage: PHS)
PDP24	แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ พ.ศ. 2567-2580 (Power Development Plan 2024: PDP24)
PCS	ระบบแปลงพลังงาน (Power Conversion System: PCS)
PPA	สัญญาซื้อขายไฟฟ้า (Power Purchase Agreement: PPA)
RoCoF	อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ (Rate of Change of Frequency: RoCoF)
SOC / SOH	สถานะการชาร์จ (อัดประจุไฟฟ้า) / สภาพแบตเตอรี่ (State of Charge: SOC / State of Health: SOH)
VRE	พลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนสูง (Variable Renewable Energy: VRE)

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

ภาคพลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยกำลังก้าวเข้าสู่ทศวรรษแห่งการเปลี่ยนแปลงครั้งสำคัญ ในขณะที่ประเทศเดินหน้าตามร่างแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ พ.ศ. 2567-2580 (draft Power Development Plan 2024: PDP24) และเป้าหมายด้านพลังงานสะอาด ความสามารถในการบูรณาการพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนสูง (Variable Renewable Energy: VRE) ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น จะขึ้นอยู่กับการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage Systems: BESS) ที่เสถียร ยืดหยุ่น และคุ้มค่าด้านต้นทุนมาใช้ รายงานฉบับนี้นำเสนอการประเมินอย่างครอบคลุมเกี่ยวกับเทคโนโลยี BESS ต้นทุน การใช้งาน ความปลอดภัย และรูปแบบธุรกิจ พร้อมข้อเสนอแนะที่ปรับให้เหมาะสมกับบริบทด้านกฎระเบียบและระบบของประเทศไทย โดยอ้างอิงจากประสบการณ์ระดับโลก การปรึกษาหารือกับผู้เชี่ยวชาญ และผลลัพธ์จากการประชุมเชิงปฏิบัติการกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่ดำเนินการภายใต้โครงการ Partnerships to Accelerate the Global Energy Transition (PACT) และได้รับการสนับสนุนจากบริการ Leveraged Partnerships ของ GET.transform

บทบาทของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ในการเปลี่ยนผ่านระบบไฟฟ้าของประเทศไทย

การกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ไม่ใช่เทคโนโลยีส่วนเสริมอีกต่อไป หากแต่ได้กลายเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยขับเคลื่อนระบบพลังงานสะอาดที่มั่นคงและเข้าถึงได้ในราคาที่เหมาะสมทั่วโลก สำหรับประเทศไทย ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) สามารถมีบทบาทสำคัญในการรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า สนับสนุนการควบคุมความถี่และแรงดันไฟฟ้า บริหารจัดการความแออัดของระบบ และรองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดในช่วงค่ำเมื่อสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนเพิ่มขึ้น ความต้องการที่เพิ่มขึ้นสำหรับความเฉื่อยสังเคราะห์ (synthetic inertia) และความสามารถในการสร้างแรงดันและความถี่ของระบบ (grid-forming capabilities) เน้นย้ำถึงความสำคัญ ของการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ขนาดใหญ่ที่ใช้รองรับระบบไฟฟ้าในระดับโครงข่าย (utility-scale BESS) ในตำแหน่งที่เหมาะสมเชิงยุทธศาสตร์เพื่อรักษาความมั่นคงของระบบไฟฟ้าในขณะที่ เดินหน้าสู่การลดการปล่อยคาร์บอน

ยุทธศาสตร์ของประเทศไทยมุ่งไปที่เส้นทางการติดตั้งสองรูปแบบ ได้แก่ (1) ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ที่ติดตั้งในโครงข่ายและรับคำสั่งเดินเครื่องผลิตและจ่ายไฟฟ้าจากส่วนกลาง โดยตั้งอยู่ที่สถานีไฟฟ้าย่อย และ (2) ระบบไฮบริดพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (hybrid PV+BESS systems) ที่ติดตั้งอยู่ในพื้นที่เดียวกันกับโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน แม้ว่าโครงการแบบลูกผสมหรือไฮบริด (hybrid projects) จะเหมาะกับการทำให้กำลังการผลิตจากพลังงานหมุนเวียนมีความเสถียรขึ้น แต่ความยืดหยุ่นของระบบยังคงมีข้อจำกัดจากศักยภาพในการผลิตไฟฟ้า ในทางตรงกันข้าม BESS ที่ติดตั้งในโครงข่าย ซึ่งเป็นกรรมสิทธิ์ของและดำเนินการโดยผู้ดำเนินการระบบ สามารถให้บริการหลายประเภทควบคู่กัน (multiple stacked services) เพิ่มประสิทธิภาพการสั่งเดินเครื่องและจ่ายไฟฟ้า (dispatch) และลดคอขวดของระบบส่งไฟฟ้า (transmission bottlenecks) แนวทางนี้สอดคล้องกับโครงสร้างตลาดที่มีผู้รับซื้อไฟฟ้าเพียงรายเดียว (Enhanced Single Buyer: ESB) และกรอบกฎระเบียบในปัจจุบันของประเทศไทย ซึ่งการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) และการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ยังคงมีบทบาทหลักในการดูแลความมั่นคงของระบบไฟฟ้า

บริบทด้านเทคนิคและทางเศรษฐศาสตร์

รายงานฉบับนี้ได้ทบทวนแนวโน้มด้านต้นทุนและตลาดระดับโลก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยปัจจุบันมีต้นทุนเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 115 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง สำหรับเซลล์ลิเธียมไอออน ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี การประหยัดจากขนาด (economies of scale) และระดับความพร้อม

และประสิทธิภาพของห่วงโซ่อุปทาน (supply-chain maturity) เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน โดยมีเทคโนโลยีเคมีใหม่ ๆ เช่น แบตเตอรี่โซเดียมไอออน (sodium-ion batteries) และแบตเตอรี่โซลิดสเตต (solid-state batteries) ที่เริ่มปรากฏขึ้นเพื่อรองรับการใช้งานเฉพาะด้าน นอกจากนี้ ประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยก็ดีขึ้นอย่างมากเช่นกัน ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากมาตรฐานสากลที่เข้มงวดขึ้นและระบบตรวจสอบขั้นสูง

สำหรับประเทศไทย การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ชี้ให้เห็นว่า ระบบ BESS สามารถช่วยลดต้นทุนการดำเนินงานของระบบไฟฟ้า และลดความอ่อนไหวของอัตราค่าไฟฟ้าต่อความผันผวนของราคาก๊าซธรรมชาติเหลว (Liquefied Natural Gas: LNG) โดยการเปลี่ยนพลังงานส่วนเกินจากแสงอาทิตย์ในช่วงกลางวันไปใช้ในช่วงค่ำที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด เมื่อเวลาผ่านไป ระบบ hybrid PV+BESS จะสามารถแข่งขันด้านต้นทุนกับการผลิตไฟฟ้าด้วยก๊าซธรรมชาติสำหรับช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดได้ ซึ่งจะเปิดทางสู่ระบบไฟฟ้าที่ปล่อยคาร์บอนต่ำและมีต้นทุนต่ำอย่างยั่งยืน

ข้อเสนอแนะและแผนที่นำทาง (Recommendations and Roadmap)

รายงานฉบับนี้ได้เสนอแผนที่นำทางแบบเป็นขั้นตอน (phased roadmap) ซึ่งสอดคล้องกับร่างแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ พ.ศ. 2567-2580 (draft- PDP24) โดยมีเป้าหมายเพื่อเสริมสร้างขีดความสามารถด้านเทคนิค บริหารจัดการความเสี่ยง และขยายการลงทุนอย่างต่อเนื่อง

- **ระยะที่ 1 (พ.ศ. 2569–2571): การวางรากฐาน**

  จัดทำข้อกำหนดทางเทคนิคขั้นสุดท้ายสำหรับระบบ BESS ที่ติดตั้งในเครือข่าย ซึ่งครอบคลุมความสามารถในการสร้างโครงข่าย (grid-forming capability) การสื่อสาร การป้องกันระบบ ความปลอดภัยจากอัคคีภัย และระดับความพร้อมใช้งานของแบตเตอรี่ตามสถานะประจุไฟฟ้า (state-of-charge (SOC) readiness) ดำเนินการวิเคราะห์ความรุนแรงของระบบ (system-severity analysis) เพื่อระบุและจัดอันดับสถานีไฟฟ้าย่อย และแนวสายส่งตามระดับความเฉื่อย ระดับความผิดพลาด ความแออัด และความต้องการในการกู้คืน (restoration) จัดซื้อและติดตั้งระบบนำร่องระบบแรกที่เป็นกรรมสิทธิ์ของหน่วยงานสาธารณูปโภคภายใต้รูปแบบสัญญางานวิศวกรรม งานจัดซื้อ และงานก่อสร้าง (Engineering, Procurement and Construction: EPC) และสัญญาบริการระยะยาว (Long-Term Service Agreement: LTSA) พร้อมกระบวนการตรวจวัด ทวนสอบและชำระบัญชี ที่เป็นมาตรฐาน

- **ระยะที่ 2 (พ.ศ. 2572–2575): การขยายการติดตั้งและการทดสอบตลาด**

  ขยายการติดตั้งไปยังระบบแบบไฮบริด (hybrid) และระบบที่สั่งการจากส่วนกลาง (รับคำสั่งเดินเครื่องผลิตและจ่ายไฟฟ้าจากส่วนกลาง) (centrally dispatched systems) พร้อมทั้งเริ่มการประมูลนำร่องสำหรับการมีส่วนร่วมของบุคคลที่สาม ภายใต้สัญญาที่กำหนดไว้อย่างชัดเจนและอิงตามประสิทธิภาพการดำเนินงาน พัฒนาแบบฟอร์มมาตรฐาน (standardized templates) สำหรับสัญญา การชำระบัญชี และการประเมินผลกระทบต่ออัตราค่าไฟฟ้า เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีต้นทุนรวมของระบบต่ำที่สุด และคุ้มครองผู้ใช้ไฟฟ้าภายใต้กรอบอัตราค่าไฟฟ้าเดียว (single-tariff framework)

- **ระยะที่ 3 (พ.ศ. 2576–2580): การขยายการลงทุนและเพิ่มประสิทธิภาพ**

  ขยายการลงทุนในพื้นที่หรือรูปแบบที่พิสูจน์แล้วว่ามีความคุณค่าสูงที่สุด ปรับปรุงสัญญาณการจัดซื้อจัดจ้างแบบอ้างอิงตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ให้แม่นยำยิ่งขึ้น และปรับเป้าหมายของแผน PDP ตามหลักฐานเชิงปฏิบัติการ

เตรียมความพร้อมสำหรับการพัฒนาตลาดอย่างค่อยเป็นค่อยไปให้ไปสู่การประมูลแข่งขัน และเปิดให้สินทรัพย์ด้านการกักเก็บพลังงานเข้ามามีส่วนร่วมในการให้บริการของระบบไฟฟ้า

แนวทางการดำเนินงานแบบเป็นขั้นตอนนี้ช่วยลดความเสี่ยงในการลงทุน เสริมสร้างประสบการณ์ของสถาบัน และเปิดโอกาสให้มีการปรับเปลี่ยนนโยบายอย่างยืดหยุ่นตามพัฒนาการของเทคโนโลยีและต้นทุนที่ลดลง

แนวโน้มในอนาคตและคุณค่าในเชิงยุทธศาสตร์

การดำเนินการตามแผนที่นำทางนี้จะช่วยให้ประเทศไทยสามารถรักษาเสถียรภาพของอัตราค่าไฟฟ้า ลดการพึ่งพาเชื้อเพลิง และเพิ่มการบูรณาการพลังงานหมุนเวียนเข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้มากขึ้น ในขณะที่ยังคงสามารถรักษาเสถียรภาพของโครงข่ายไฟฟ้า การลงทุนในสินทรัพย์ BESS ที่มีความสำคัญต่อระบบตั้งแต่ระยะแรก จะเป็นรากฐานสำหรับการมีส่วนร่วมของภาคเอกชนในอนาคตภายใต้กรอบทางเทคนิคและสัญญาที่ชัดเจน

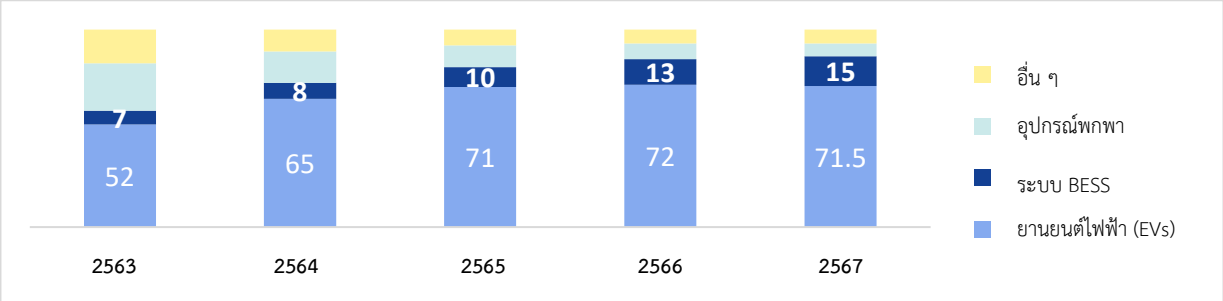
นอกเหนือจากประโยชน์ต่อระบบไฟฟ้า การขยายการติดตั้งระบบ BESS ในประเทศไทยยังสามารถส่งเสริมการพัฒนาอุตสาหกรรมภายในประเทศ การเติบโตของทักษะแรงงาน และบทบาทความเป็นผู้นำในระดับภูมิภาคด้านการบูรณาการพลังงานสะอาด ดังนั้น ข้อเสนอแนะในรายงานฉบับนี้จึงไม่ได้เป็นแค่เพียงเส้นทางเชิงเทคนิคเท่านั้น แต่ยังเป็นโอกาสเชิงยุทธศาสตร์ในการเร่งการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาดของประเทศไทย เพื่อสร้างระบบไฟฟ้า มีความยืดหยุ่น ทันสมัย และเข้าถึงได้ในราคาที่เหมาะสมสำหรับหลายทศวรรษข้างหน้า

1 บทนำและภูมิหลังเชิงบริบท

การจัดทำยุทธศาสตร์สำหรับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ของประเทศไทย จำเป็นต้องเริ่มจากการระบุถึงประโยชน์ของระบบ BESS โดยการเสริมสร้างขีดความสามารถเชิงลึกในด้านการดำเนินการ ในด้านเศรษฐศาสตร์ ความปลอดภัย และข้อพิจารณาด้านกฎระเบียบที่เกี่ยวข้องกับการนำระบบ BESS มาใช้ในประเทศไทย ทั้งนี้ ได้มีการจัดการประชุมเชิงปฏิบัติการหลายครั้ง โดยความร่วมมือกับโครงการ Partnerships to Accelerate the Global Energy Transition (PACT) และโดยได้รับการสนับสนุนจากบริการ Leveraged Partnerships ของ GET.transform โดยได้เชิญผู้แทนจากหน่วยงานด้านพลังงานของไทยเข้าร่วม ได้แก่ สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) และศูนย์เทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ (ENTEC) เพื่อแลกเปลี่ยนมุมมองเกี่ยวกับบทบาทที่เปลี่ยนแปลงไปของระบบ BESS ในการเสริมสร้างความยืดหยุ่นและความมั่นคงของระบบไฟฟ้า การประชุมเชิงปฏิบัติการเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นเวทีแลกเปลี่ยนความรู้เพื่อเผยแพร่แนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดระดับสากล และสร้างความเข้าใจร่วมกันระหว่างผู้มีส่วนได้ส่วนเสียให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคและพัฒนาการของตลาดในระดับโลกภายใต้สภาพแวดล้อมของระบบโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศไทย

ประสบการณ์จากนานาชาติที่ถ่ายทอดระหว่างการประชุมเชิงปฏิบัติการได้เน้นย้ำถึงความสำคัญของการบูรณาการด้านนโยบาย มาตรฐานทางเทคนิค และรูปแบบการลงทุนที่อิงตามประสิทธิภาพการดำเนินงาน เพื่อส่งเสริมตลาด BESS ที่ยั่งยืน รายงานฉบับนี้ จึงรวบรวมข้อค้นพบจากการแลกเปลี่ยนด้านเทคนิคเหล่านี้ เพื่อนำเสนอการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างและแนวทางเชิงยุทธศาสตร์ที่ปรับให้เหมาะสมกับกรอบการเปลี่ยนผ่านพลังงานของประเทศไทยที่กำลังดำเนินอยู่

ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ได้กลายเป็นเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานที่มีบทบาทสำคัญ ช่วยให้สามารถรองรับสัดส่วนพลังงานหมุนเวียน (VRE) ได้สูงขึ้น ลดการถูกจำกัดกำลังการผลิตไฟฟ้า (curtailment) และเพิ่มความยืดหยุ่นของระบบไฟฟ้า โดยในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา โครงสร้างการใช้งานแบตเตอรี่ทั่วโลกเมื่อพิจารณาตามส่วนแบ่งตลาดได้เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 1 ทั้งนี้เห็นได้ชัดว่าสัดส่วนของ BESS ต่อการใช้งานแบตเตอรี่ทั้งหมดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าจากร้อยละ 7 ในปี พ.ศ. 2563 เป็นร้อยละ 15 ในปี พ.ศ. 2567 ในขณะที่ยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) ยังคงครองตลาดแบตเตอรี่ด้วยส่วนแบ่งประมาณร้อยละ 72 ทั้งนี้ จากสัดส่วนร้อยละ 15 ของ BESS นั้น ระบบขนาดใหญ่ที่ใช้กับระบบไฟฟ้าในระดับโครงข่าย (utility-scale) คิดเป็นกว่าร้อยละ 85 ของตลาด BESS ในปี พ.ศ. 2567 โดยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 62 ในปี พ.ศ. 2566 และมีแนวโน้มจะแซงระบบกักเก็บพลังงานด้วยพลังน้ำแบบสูบกลับ (Pumped Hydro Storage: PHS) ในด้านกำลังผลิตที่ประมาณ 180 กิกะวัตต์ในปี พ.ศ. 2568

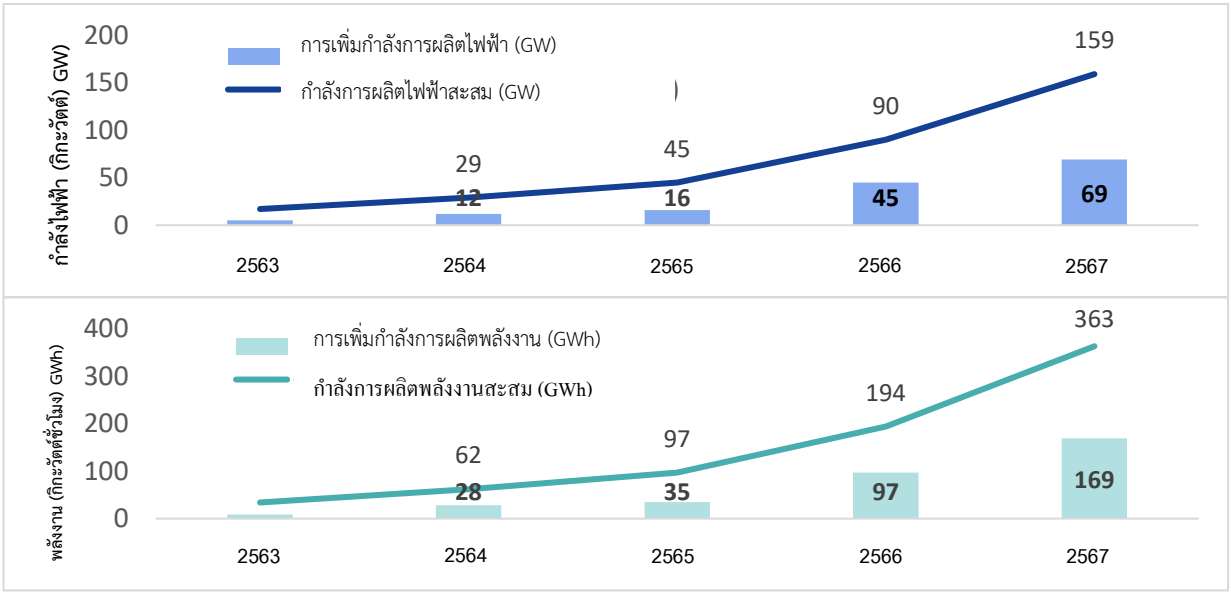


รูปที่ 1: การติดตั้งระบบแบตเตอรี่ทั่วโลกจำแนกตามส่วนแบ่งตลาด (%) ระหว่างปี พ.ศ. 2563 ถึง 2567

(ที่มา: Volta Foundation Battery Report 2024)

รูปที่ 2 ด้านล่างแสดงการเติบโตของการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ทั่วโลกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2563 เป็นต้นมา ทั้งในด้านกำลังผลิต (power capacity) และความจุพลังงาน (energy capacity) โดยในปี พ.ศ. 2567 มีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของกำลังผลิตของระบบกักเก็บพลังงานทั่วโลกที่ร้อยละ 76 และความจุพลังงานเพิ่มขึ้นร้อยละ 87 การติดตั้งใหม่ยังคงเพิ่มขึ้นสูงกว่าที่คาดการณ์ไว้ โดยมีการติดตั้งเพิ่มเป็น 69 กิกะวัตต์ หรือ 169 กิกะวัตต์ชั่วโมง ส่งผลให้ยอดสะสมของ BESS ทั่วโลกในปี พ.ศ. 2567 เพิ่มขึ้นเป็น 159 กิกะวัตต์ หรือ 363 กิกะวัตต์ชั่วโมง ระบบ BESS ที่รองรับการใช้งานในระดับโครงข่าย (grid-scale BESS) เป็นเทคโนโลยีพลังงานที่เติบโตเร็วที่สุดในปี พ.ศ. 2566 ด้วยอัตราการเติบโตร้อยละ 68 เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาเดียวกันของปีก่อน (yoy) โดยแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนคิดเป็นมากกว่าร้อยละ 98 ของการติดตั้ง BESS ขนาดใหญ่ที่ใช้ในระดับโครงข่ายในปี พ.ศ. 2567 ปัจจัยสำคัญที่ผลักดันการเติบโตนี้ได้แก่ ต้นทุนแบตเตอรี่ที่ลดลง นโยบายสนับสนุนจากภาครัฐ และการเพิ่มขึ้นของแรงจูงใจทางการเงินสำหรับ BESS

แม้ว่าจะมีเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่หลายประเภท แต่จนถึงปัจจุบันมีเพียงแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเท่านั้นที่พัฒนามาถึงขั้นที่สามารถใช้งานเชิงพาณิชย์ได้อย่างกว้างขวาง แบตเตอรี่นี้มีข้อได้เปรียบพื้นฐานเหนือกว่าเคมีแบตเตอรี่รุ่นเก่า (เช่น ตะกั่วกรด) และเทคโนโลยีทางเลือกอื่น ด้วยความหนาแน่นพลังงานและประสิทธิภาพที่สูงกว่ามาก และอายุการใช้งานรอบการชาร์จที่ยาวนานกว่า แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีหลายประเภท และยังคงพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากงานวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มความหนาแน่นพลังงาน ลดเวลาในการชาร์จ เพิ่มความปลอดภัย และยืดอายุการใช้งาน ในขณะเดียวกันก็ลดต้นทุนลง เคมีหลักของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้แก่ ลิเธียม-ไอรอนฟอสเฟต (LFP) และ นิกเกิล-แมงกานีส-โคบอลต์ (NMC) โดย LFP ได้แซงหน้า NMC ในปี พ.ศ. 2564 โดยได้กลายเป็นเคมีแบตเตอรี่หลักสำหรับ BESS เนื่องจากมีความปลอดภัยมากกว่าและอายุการใช้งานรอบการชาร์จที่นานกว่า



รูปที่ 2: การติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ทั่วโลก จำแนกตามกำลังการผลิต (power capacity) (สีน้ำเงิน) และความจุพลังงาน (energy capacity) (สีเขียว) ระหว่างปี พ.ศ. 2563 ถึง 2567

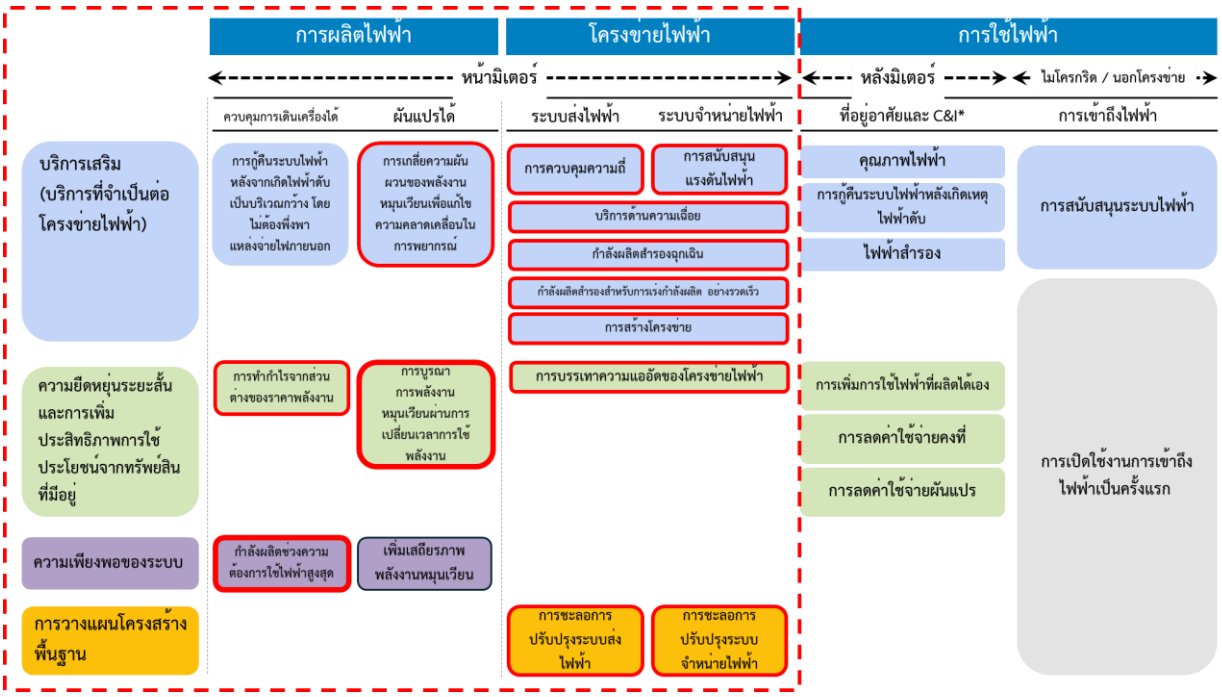
(ที่มา: *ESS News*, *Volta Foundation Battery Report 2024*)

แบตเตอรี่ลิเธียม-ไอรอนฟอสเฟต (Lithium-Iron-Phosphate: LFP) คิดเป็นสัดส่วนมากกว่าร้อยละ 80 ของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่แบบติดตั้งอยู่กับที่ (stationary BESS) ในปี พ.ศ. 2567 ปัจจุบัน ระบบ BESS แบบลิเทียมไอออนเป็นเทคโนโลยีที่มีความคุ้มค่าด้านต้นทุนมากที่สุดสำหรับการปรับสมดุลอุปสงค์–อุปทานในช่วงเวลาตั้งแต่ไม่กี่วินาทีจนถึงประมาณ 1 ชั่วโมง รวมถึงการทำกำไรจากส่วนต่างราคาไฟฟ้า (energy arbitrage) เช่น การซื้อไฟฟ้า/ชาร์จในช่วงที่ราคาต่ำ และขายไฟฟ้า/ดีสชาร์จ (คายประจุ) ในช่วงที่ราคาสูง ปัจจุบันลิเทียมไอออนคุ้มค่าด้านต้นทุนเฉพาะสำหรับระยะเวลาการกักเก็บที่

ต่ำกว่า 6–8 ชั่วโมง ในขณะที่เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานประเภทอื่น เช่น แบตเตอรี่รีดอกซ์โฟลว์ (redox flow) หรือแบตเตอรี่เหล็ก-อากาศ (iron-air) เหมาะสำหรับการกักเก็บพลังงานระยะยาวนานหลายวันถึงหลายสัปดาห์

แม้ว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะเป็นเทคโนโลยี BESS ที่ครองตลาดในปัจจุบัน แต่การพัฒนาในด้านต้นทุน ความปลอดภัย และประสิทธิภาพของเคมีแบตเตอรี่และเทคโนโลยีคู่แข่ง อาจเข้ามาแย่งตำแหน่งความเป็นผู้นำของลิเทียมได้ ตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่โซเดียมไอออน (Na) กำลังเริ่มได้รับความสนใจมากขึ้นในฐานะเคมีแบตเตอรี่เกิดใหม่ ซึ่งแม้จะมีความหนาแน่นพลังงานต่ำกว่า แต่มีข้อดีคือไม่ต้องพึ่งพาวัสดุหายาก

การกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีความหลากหลายสูง และสามารถให้บริการได้มากกว่า 20 รูปแบบตามตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้า โดยครอบคลุมตั้งแต่การผลิตไฟฟ้า ระบบโครงข่ายไฟฟ้า (ระบบส่งและจำหน่าย) ไปจนถึงการบริโภคพลังงาน ดังที่แสดงในรูปที่ 3 ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้า การใช้งานแบบหน้ามิเตอร์ (front-of-the-meter) หรือการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานขนาดใหญ่ระดับโครงข่าย เป็นจุดเน้นหลักของการติดตั้งในช่วงที่ผ่านมา (แสดงด้วยเส้นประสีแดง) โดยการใช้งานหลักของระบบ BESS ขนาดใหญ่ระดับโครงข่ายถูกเน้นด้วยกรอบสีแดง เนื่องจากมีการบูรณาการพลังงานหมุนเวียนที่เพิ่มขึ้น แต่ขนาดตลาดบริการเสริม (ancillary services) ยังมีขนาดเล็ก การเปลี่ยนช่วงเวลาการใช้พลังงาน (energy shifting) และการจัดหากำลังผลิตในช่วงความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (peak capacity) จึงกลายมาเป็นการใช้งานหลักของระบบ BESS ขนาดใหญ่ระดับโครงข่ายตั้งแต่ปี พ.ศ. 2563 โดยมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 85 ของกำลังผลิตที่ติดตั้งเพิ่มในปี พ.ศ. 2566

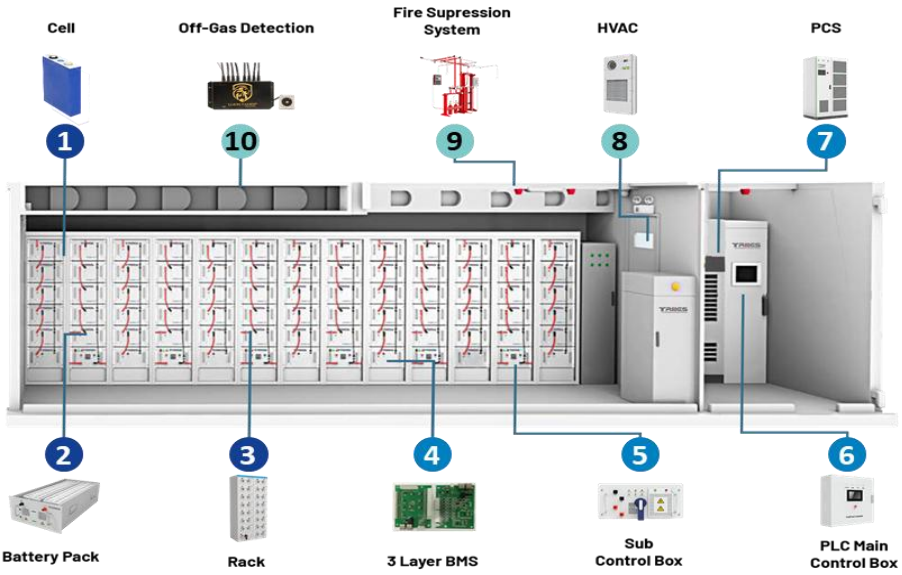


รูปที่ 3: ภาพรวมของการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่พบมากที่สุด 23 ประเภท จำแนกตามตำแหน่งการใช้งานภายในระบบไฟฟ้า

(ที่มา: *IEA - Batteries and Secure Energy Transitions*)

2 ส่วนประกอบทางเทคนิคและผังการจัดวางของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ (BESS)

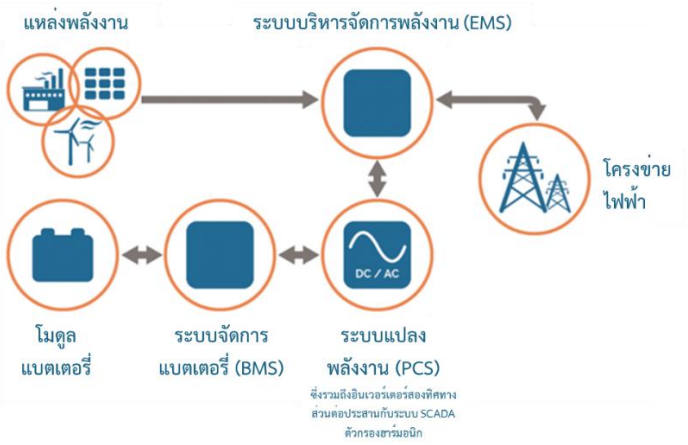
การออกแบบและคุณลักษณะเฉพาะภายในตู้คอนเทนเนอร์ของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) อาจแตกต่างกันไปตามการเลือกของผู้ผลิตแต่ละราย วัตถุประสงค์ในการใช้งาน และข้อกำหนดด้านกฎระเบียบ ส่วนประกอบทางเทคนิคหลักแสดงในรูปที่ 4 ได้แก่ 1. เซลล์แบตเตอรี่ (หน่วยกักเก็บพลังงานที่เล็กที่สุด) 2. แพ็ก/โมดูลแบตเตอรี่ (กลุ่มของเซลล์แบตเตอรี่) 3. แร็ก (กลุ่มของแพ็กหรือโมดูลแบตเตอรี่) 4. ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System: BMS) 5. กล่องควบคุมย่อย (sub-control box) สำหรับควบคุมแพ็ก/โมดูลแต่ละชุด 6. กล่องควบคุมหลัก หรือระบบบริหารจัดการพลังงาน (Energy Management System: EMS) 7. ระบบแปลงพลังงาน (Power Conversion System: PCS) 8. ระบบปรับอากาศและระบายอากาศ (Heating, Ventilation-and Air-Conditioning: HVAC)) 9. ระบบดับเพลิง (ระงับเพลิงหรือการลุกไหม้จากภาวะความร้อนวิกฤต) 10. เครื่องตรวจจับก๊าซรั่ว (off-gas detector) (ตรวจจับการปล่อยก๊าซ)



รูปที่ 4: ส่วนประกอบทางเทคนิคหลัก 10 ประการของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่แบบตู้คอนเทนเนอร์ (Containerized BESS)

(ที่มา: *Accure*, *Power Sonic*, *Troes Corp*)

ส่วนประกอบหลักของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ได้แก่ โมดูลแบตเตอรี่ ระบบจัดการแบตเตอรี่ (BMS) ระบบแปลงพลังงาน (PCS) และระบบบริหารจัดการพลังงาน (EMS) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 5 โดยคำอธิบายและหน้าที่ของแต่ละส่วนจะอธิบายเพิ่มเติมด้านล่าง



รูปที่ 5: ผังแสดงส่วนประกอบหลักของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) อย่างง่าย

(ที่มา: *TLS*)

ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System: BMS) เป็นระบบย่อยที่ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ ในการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิ กระแสไฟฟ้า และสถานะการชาร์จ (SOC) อย่างต่อเนื่อง ทั้งในระดับเซลล์ แพ็ก และแร็ก หน้าที่เฉพาะของ BMS ได้แก่ การตรวจสอบเซลล์ การปรับสมดุลเซลล์ การป้องกันและบังคับใช้ความปลอดภัย การจัดการความร้อน การประเมินสถานะ การจัดการการไหลของพลังงาน (power-flow management) การสื่อสาร การบันทึกข้อผิดพลาด (fault logging) และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกเพื่อการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ (embedded data analytics for predictive maintenance) สถาปัตยกรรมของ BMS มี 4 รูปแบบ ได้แก่ แบบรวมศูนย์ (centralized) แบบ โมดูลาร์ (modular) แบบหลัก/รอง (primary/subordinate) และแบบกระจายศูนย์ (distributed) แต่ละรูปแบบมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับเกณฑ์ต่าง ๆ เช่น ความสามารถในการขยายระบบ (scalability) ความซ้ำซ้อน (redundancy) ความซับซ้อนในการแก้ไขปัญหา (troubleshooting complexity) การบูรณาการ (integration) และต้นทุน (cost) วิธีการปรับสมดุลที่ใช้กันมากที่สุดใน BMS คือการปรับสมดุลแบบแอคทีฟ (active balancing) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นประเภทย่อยตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น แบบใช้ตัวเก็บประจุ (capacitor-based) แบบใช้ตัวเหนี่ยวนำ (inductor-based) และแบบใช้ตัวแปลงไฟฟ้า (converter-based)

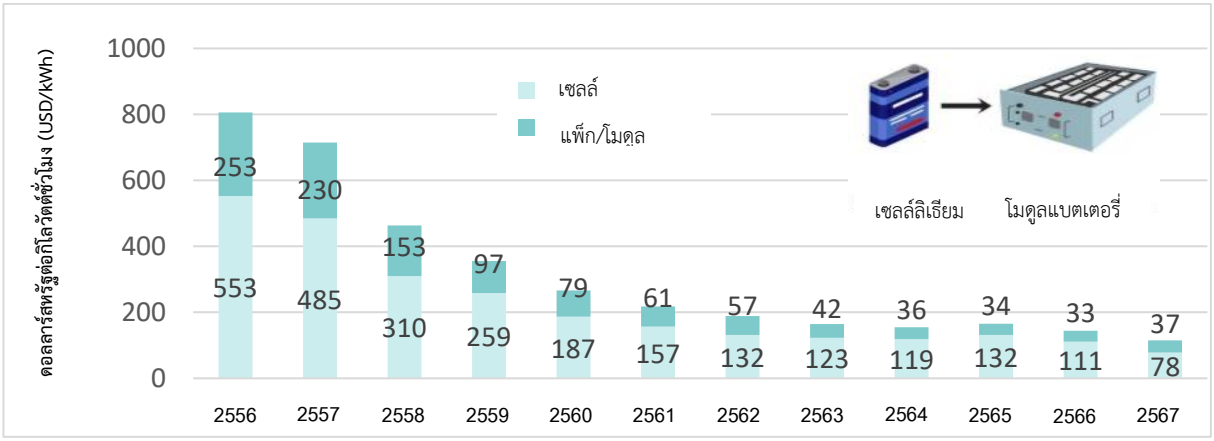
ระบบแปลงพลังงาน (Power Conversion System: PCS) เป็นอินเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานระหว่างกระแสตรง (DC) กับกระแสสลับ (AC) ทั้งในทิศทาง DC/AC และ AC/DC โดยประสานการทำงานให้สอดคล้องกับแรงดันและความถี่ของระบบโครงข่ายไฟฟ้า จ่ายหรือป้อนกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเข้าสู่ระบบ กรองหรือกำจัดคลื่นฮาร์มอนิกที่ไม่พึงประสงค์ออกไปจากระบบไฟฟ้า เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของรหัสระบบโครงข่าย (grid codes) ควบคุมอุณหภูมิรอยต่อของอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ และสามารถทำงานในโหมด grid-forming เพื่อสร้างความเฉื่อยสังเคราะห์ (synthetic inertia) ให้กับระบบไฟฟ้า

ระบบบริหารจัดการพลังงาน (Energy Management System: EMS) เป็นซอฟต์แวร์หลักของระบบ BESS ซึ่งประสานการทำงานของระบบย่อยทั้งหมด และปรับการทำงานของแบตเตอรี่ให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและรายได้ให้อยู่ในระดับสูงสุด ระบบ EMS ทำหน้าที่กำหนดตารางการชาร์จและการคายประจุ ช้การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความน่าจะเป็น (stochastic optimisation) โดยอ้างอิงพยากรณ์สภาพอากาศและความต้องการใช้ไฟฟ้า (การคาดการณ์ภาระไฟฟ้า) จัดการรายได้จากหลายแหล่งพร้อมกัน บังคับใช้ข้อกำหนดของรหัสระบบโครงข่าย และบันทึกข้อมูลการปฏิบัติงานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา (diagnostics) นอกจากนี้ EMS ยังมีระบบเสนอราคาที่ทำงานอัตโนมัติ ซึ่งถือเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเข้าร่วมตลาดพลังงานและตลาดบริการเสริมในยุคปัจจุบัน

3 แนวโน้มด้านต้นทุนและโครงสร้างห่วงโซ่คุณค่าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS)

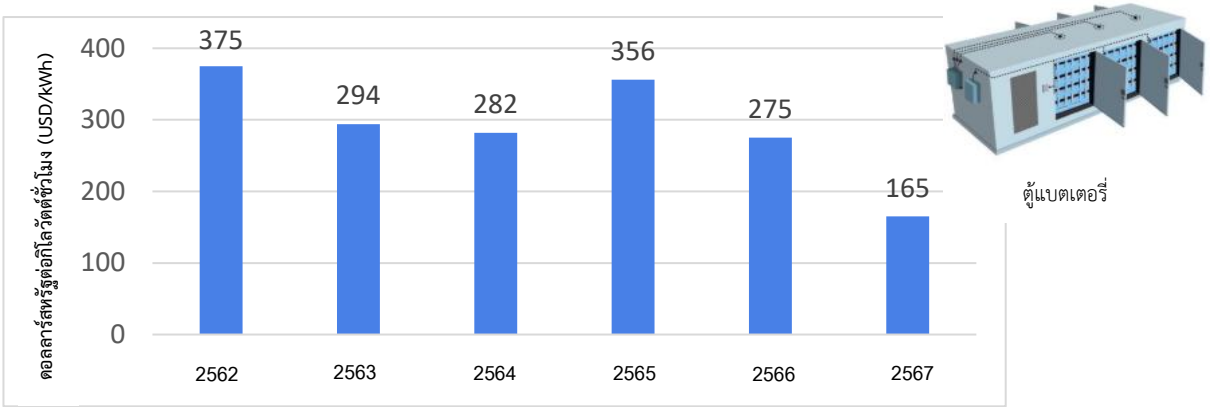
ตลาดระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ทั่วโลกเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยมีแรงขับเคลื่อนหลักจากต้นทุนที่ลดลง ห่วงโซ่อุปทานที่มีความพร้อมมากขึ้น และปริมาณการติดตั้งที่เพิ่มสูงขึ้น ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ต้นทุนลดลง ได้แก่ กำลังการผลิตส่วนเกิน (manufacturing overcapacity) การประหยัดจากขนาด (economies of scale) ต้นทุนวัตถุดิบที่ต่ำ การนำแบตเตอรี่ LFP ที่มีต้นทุนต่ำกว่ามาใช้ และการชะลอตัวของการเติบโตของยอดขายยานยนต์ไฟฟ้า (EV)
ข้อมูลจากหน่วยวิจัยเชิงกลยุทธ์บลูมเบิร์ก หรือ Bloomberg New Energy Finance (BloombergNEF), Wood Mackenzie และองค์การพลังงานระหว่างประเทศ (International Energy Agency: IEA) ระบุว่า ต้นทุนของแพ็กแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนลดลงมากกว่าร้อยละ 89 ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 โดยในปี พ.ศ. 2567 ราคาเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักอยู่ที่ประมาณ 115 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (USD/kWh) ซึ่งเป็นระดับต่ำสุดเป็นประวัติการณ์ ส่งผลให้ต้นทุนรวมของตู้แบตเตอรี่ (battery enclosures) รวมกับระบบแปลงพลังงาน (PCS) ลดลงอย่างมาก โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 165 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ในปี พ.ศ. 2567 (ไม่รวมต้นทุน EPC และการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า)

นอกจากนี้ ในประเทศจีน ต้นทุนของตู้ BESS รวมกับ PCS มีราคาเฉลี่ยอยู่ที่ 66 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง แนวโน้มด้านต้นทุนดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 6 และรูปที่ 7 สำหรับเซลล์และโมดูลแบตเตอรี่ รวมถึงตู้แบตเตอรี่รวมกับ PCS ตามลำดับ



รูปที่ 6: ราคาของเซลล์และโมดูลแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนระหว่างปี พ.ศ. 2556 ถึง 2567

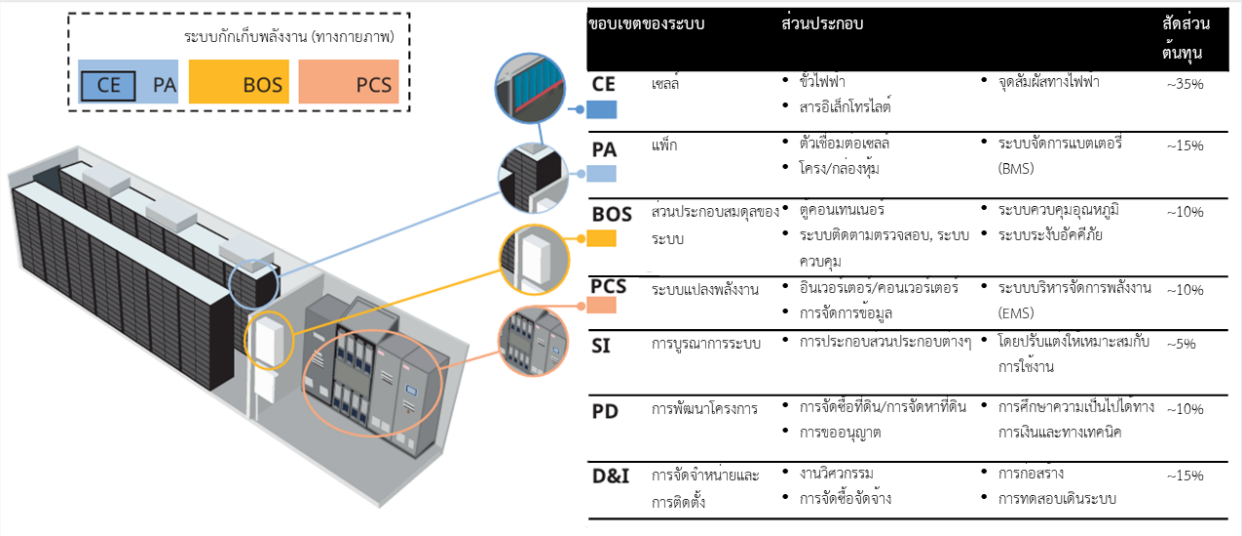
(ที่มา: *BNEF*)



รูปที่ 7: ต้นทุนของตู้แบตเตอรี่รวมกับระบบแปลงพลังงาน (PCS) ระหว่างปี พ.ศ. 2562 ถึง 2567

(ที่มา: *BNEF*)

โครงสร้างต้นทุนโดยประมาณแสดงไว้ในรูปที่ 8 โดยระบุถึงสัดส่วนต้นทุนหลัก ได้แก่ เซลล์และแพ็กแบตเตอรี่ (ประมาณร้อยละ 50) ส่วนประกอบสมดุลของระบบ (Balance of-System: BOS) (ประมาณร้อยละ 10) ระบบแปลงพลังงาน (PCS) (ประมาณร้อยละ 10) การบูรณาการระบบ (ประมาณร้อยละ 5) การพัฒนาโครงการ (ประมาณร้อยละ 10) และการจัดจำหน่ายและการติดตั้ง (ประมาณร้อยละ 15) ต้นทุนในส่วนของการพัฒนาโครงการและการจัดจำหน่ายและการติดตั้งขึ้นอยู่กับสถานที่ตั้งเป็นหลัก และอาจแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละโครงการ ในบรรดาต้นทุนเหล่านี้ การประหยัดจากขนาด (economies of scale) โดยเฉพาะในส่วนของ PCS และ BOS ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการลดต้นทุนได้สูงสุด ซึ่งช่วยเสริม ความสามารถในการแข่งขันของระบบแบบโมดูลในตู้คอนเทนเนอร์ การบรรจบกันของห่วงโซ่อุปทานในรูปแบบตู้คอนเทนเนอร์ขนส่งขนาด 20 ฟุต ที่ส่งมอบพลังงานได้มากกว่า 5 เมกะวัตต์ชั่วโมง ยังทำให้ระบบโลจิสติกส์มีประสิทธิภาพมากขึ้น เพิ่มความหนาแน่นในการกักเก็บ และช่วยให้การติดตั้งในพื้นที่ทำได้ง่ายยิ่งขึ้น



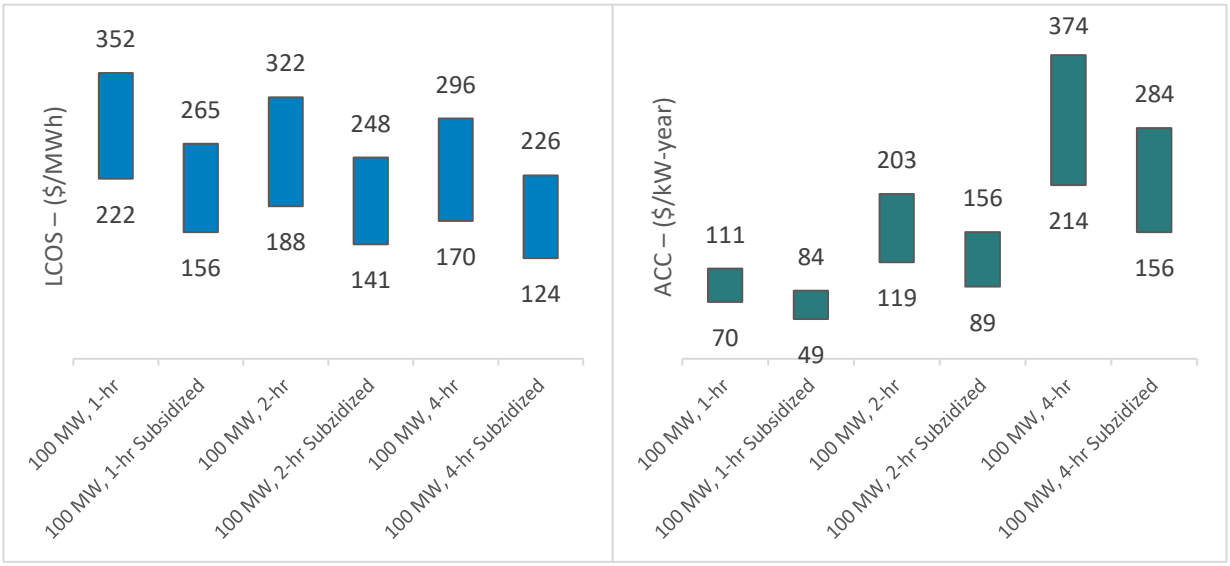
ขอบเขตของระบบ		ส่วนประกอบ		สัดส่วนต้นทุน
CE	เซลล์	• ขั้วไฟฟ้า • สารอิเล็กโทรไลต์	• จุดสัมผัสทางไฟฟ้า	~35%
PA	แพ็ก	• ตัวเชื่อมต่อเซลล์ • โครง/กล่องหุ้ม	• ระบบจัดการแบตเตอรี่ (BMS)	~15%
BOS	ส่วนประกอบสมดุลของระบบ	• ตู้คอนเทนเนอร์ • ระบบติดตามตรวจสอบ, ระบบควบคุม	• ระบบควบคุมอุณหภูมิ • ระบบระงับอัคคีภัย	~10%
PCS	ระบบแปลงพลังงาน	• อินเวอร์เตอร์/คอนเวอร์เตอร์ • การจัดการข้อมูล	• ระบบบริหารจัดการพลังงาน (EMS)	~10%
SI	การบูรณาการระบบ	• การประกอบส่วนประกอบต่างๆ	• โดยปรับแต่งให้เหมาะสมกับการใช้งาน	~5%
PD	การพัฒนาโครงการ	• การจัดซื้อที่ดิน/การจัดหาที่ดิน • การขออนุญาต	• การศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงินและทางเทคนิค	~10%
D&I	การจัดจำหน่ายและการติดตั้ง	• งานวิศวกรรม • การจัดซื้อจัดจ้าง	• การก่อสร้าง • การทดสอบเดินระบบ	~15%

รูปที่ 8: สัดส่วนต้นทุนโดยประมาณของขอบเขตการสร้างระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่แบบตู้คอนเทนเนอร์ (Containerized BESS)
(ที่มา: Monetizing Energy Storage)

โครงสร้างต้นทุนข้างต้นสะท้อนเพียงต้นทุนการลงทุนเท่านั้น และไม่สามารถใช้กำหนดความเป็นไปได้เชิงพาณิชย์ของโครงการระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ซึ่งจำเป็นต้องมีการประเมินต้นทุนตลอดอายุการใช้งานควบคู่ไปด้วย

ต้นทุนการกักเก็บพลังงานเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน (Levelised Cost of Storage: LCOS) เป็นตัวชี้วัดสำคัญในการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ โดยคำนวณจากการนำต้นทุนที่เกิดขึ้นตลอดอายุโครงการมาหารด้วยปริมาณไฟฟ้าที่ส่งมอบได้ทั้งหมด (ดอลลาร์สหรัฐต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง) ค่า LCOS มีความอ่อนไหวต่อหลายปัจจัย เช่น อายุการใช้งาน จำนวนรอบการใช้งาน ประสิทธิภาพการกักเก็บและจ่ายไฟฟ้า (round-trip efficiency) และความจุพลังงาน ค่า LCOS แตกต่างกันอย่างมากตามลักษณะการใช้งาน โดยงานด้านควบคุมความถี่ (frequency regulation) และงานผลิตไฟฟ้าช่วงพีก หรือช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (peaking applications) มักให้ผลตอบแทนที่สูงกว่าการทำกำไรจากส่วนต่างราคาไฟฟ้า (arbitrage) หรือ การชะลอการลงทุนด้านกำลังผลิต (capacity deferral) โดยเฉพาะในตลาดที่ยังไม่พัฒนาเต็มที่ ซึ่งมีรายได้จากบริการเสริมของระบบไฟฟ้า (ancillary services) ที่จำกัด อีกหนึ่งวิธีในการประเมินต้นทุนตลอดอายุการใช้งานคือ ต้นทุนกำลังการผลิตเฉลี่ยต่อปี (Annuitized Capacity Cost: ACC) ซึ่งมีหลักการคล้ายกับ LCOS แต่จะนำต้นทุนตลอดอายุโครงการมาหารด้วยความสามารถในการจ่ายไฟฟ้า (power capacity) และอายุการใช้งาน (ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์ต่อปี)

รูปที่ 9 แสดงข้อมูล LCOS และ ACC ของโครงการขนาด 100 เมกะวัตต์ในสหรัฐอเมริกา ทั้งในกรณีที่ได้รับและไม่ได้รับเงินสนับสนุนจากกฎหมายลดอัตราเงินเฟ้อ (Inflation Reduction Act: IRA)



รูปที่ 9: ต้นทุนการกักเก็บพลังงานเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน (LCOS) สำหรับโครงการขนาด 100 เมกะวัตต์ที่มีระยะเวลาการจ่ายไฟฟ้า 1, 2 และ 4 ชั่วโมง และได้รับเงินอุดหนุนภายใต้กฎหมายลดอัตราเงินเฟ้อ (Inflation Reduction Act: IRA) (ด้านซ้าย) และต้นทุนกำลังการผลิตเฉลี่ยต่อปี (ACC) สำหรับโครงการขนาด 100 เมกะวัตต์ที่มีระยะเวลาการจ่ายไฟฟ้า 1, 2 และ 4 ชั่วโมง และได้รับเงินอุดหนุนภายใต้กฎหมาย IRA (ด้านขวา)

(ที่มา: *Lazard 9.0*)

แบบจำลองการลงทุนชี้ให้เห็นว่า ความคุ้มค่าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) มีความเชื่อมโยง อย่างใกล้ชิดกับการลดต้นทุนเงินลงทุน (capital cost) สิทธิประโยชน์ทางภาษี และการชำระค่าความสามารถในการผลิต (capacity payments) ตัวอย่างเช่น ในสหรัฐอเมริกา กฎหมาย IRA ได้เปิดโอกาสให้โครงการ BESS แบบติดตั้งเดี่ยว (standalone BESS projects) สามารถรับสิทธิประโยชน์จากเครดิตภาษีการลงทุน (Investment Tax Credit: ITC) ได้สูงถึงร้อยละ 30 ซึ่งช่วยเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการอย่างมีนัยสำคัญ

4 กรณีการใช้งาน ข้อพิจารณาด้านตลาด และรูปแบบธุรกิจ

ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 กรณีการใช้งานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) มีความหลากหลายอย่างมาก และสามารถทำหน้าที่ได้หลายบทบาทในระบบไฟฟ้า การเปลี่ยนผ่านด้านพลังงานทำให้ระบบไฟฟ้าเคลื่อนจากรูปแบบดั้งเดิมที่พึ่งพาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส (synchronous generators) ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน ไปสู่ระบบรูปแบบใหม่ที่มีสัดส่วนที่สูงขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนสูง (VRE) การเพิ่มขึ้นของสัดส่วน VRE ก่อให้เกิดความท้าทายใหม่ในระบบไฟฟ้า เช่น ความเฉื่อย (inertia) ที่ลดลง ความผันผวนของแรงดันไฟฟ้าที่มากขึ้น และความแออัดของโครงข่ายไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ความท้าทายเหล่านี้และปัจจัยอื่น ๆ ทำให้เกิดความจำเป็นต้องติดตั้ง BESS เพิ่มขึ้น เพื่อช่วยสร้างสมดุลในระบบและลดผลกระทบจากอุปกรณ์แปลงไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ (inverter-based impacts)

4.1 กรณีการใช้งาน

กรณีการใช้งานบางประการที่ BESS สามารถตอบโจทย์ความท้าทายดังกล่าว มีดังต่อไปนี้

1. **การควบคุมความถี่ (Frequency Regulation)**
    - ระบบ BESS สามารถดูดซับหรือจ่ายพลังงานไฟฟ้าในเวลาเพียงไม่กี่วินาที เพื่อแก้ไขความเบี่ยงเบนจากความถี่มาตรฐานของโครงข่าย ทำให้สามารถเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนสูง (VRE) ได้โดยไม่กระทบต่อเสถียรภาพของระบบ
2. **การสร้างโครงข่าย / การให้บริการความเฉื่อย (Grid Forming / Inertia Services)**
    - ความสามารถในการตอบสนองที่รวดเร็วและควบคุมได้อย่างแม่นยำของอินเวอร์เตอร์ ทำให้ BESS สามารถจำลองพฤติกรรมของความเฉื่อย (inertia) ได้
    - ระบบ BESS ที่ทำงานในโหมดสร้างโครงข่าย (grid forming) สามารถให้ “ความเฉื่อยสังเคราะห์” (synthetic inertia) ช่วยลดอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบไฟฟ้า (Rate-of-Change-of-Frequency: RoCoF) และช่วยรักษาเสถียรภาพของความถี่
    - อินเวอร์เตอร์ของ BESS ที่ทำงานในโหมดสร้างโครงข่าย (grid forming) สามารถสร้างและควบคุมรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC voltage waveforms) ได้ด้วยตนเอง ทำให้สามารถเดินเครื่องได้โดยไม่ต้องพึ่งพาการอ้างอิงสัญญาณความถี่และแรงดันจากโครงข่ายไฟฟ้าภายนอก
3. **การบรรเทาความแออัดของโครงข่าย (Congestion Relief)**
    - ระบบ BESS ที่ติดตั้งในจุดคอขวดของระบบไฟฟ้า ช่วยดูดซับความแออัดในพื้นที่ ชะลอหรือหลีกเลี่ยงการปรับปรุงโครงข่าย และลดต้นทุนที่เกิดจากความแออัดของระบบ
4. **การทำกำไรจากส่วนต่างราคาไฟฟ้า (arbitrage) / การเปลี่ยนช่วงเวลาใช้พลังงาน (Energy Arbitrage / Shifting)**
    - ระบบ BESS จะชาร์จพลังงานในช่วงที่ราคาต่ำ และปล่อยพลังงาน (คายประจุ) ในช่วงที่ราคาสูง เพื่อเก็บส่วนต่างของราคา (difference margin) และช่วยทำให้รูปแบบภาระไฟฟ้า (load curve) ราบเรียบขึ้น

5. **การเปลี่ยนกำลังการผลิตช่วงพีค (Peak Capacity Shifting)**

- ระบบ BESS จัดเก็บพลังงานส่วนเกินในช่วงกลางวัน และจ่ายไฟฟ้าในช่วงพีคหรือช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดในช่วงค่ำ ซึ่งช่วยลดภาระไฟฟ้าสูงสุด และชะลอหรือหลีกเลี่ยงการลงทุนขยายโรงไฟฟ้าหรือปรับปรุงโครงข่ายที่มีต้นทุนสูง

4.2 สภาพตลาดในยุโรปและเศรษฐกิจเกิดใหม่

ประเภทของกรณีการใช้งาน BESS ขึ้นอยู่กับการมีอยู่ของตลาดที่ดึงดูดเพียงพอ ซึ่งสร้างโอกาสสำคัญในการพัฒนารูปแบบธุรกิจที่มีความคุ้มค่า ตลาดที่ดึงดูดต้องอาศัยการมีกรอบกฎระเบียบที่ชัดเจน โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าและราคาที่เอื้อประโยชน์ การเข้าถึงตลาดที่เปิดกว้าง รวมถึงกระบวนการขออนุญาตและการเชื่อมต่อโครงข่ายที่มีประสิทธิภาพ เกณฑ์ทั้งสี่ประการนี้แตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ รวมถึงในแต่ละตลาดภายในประเทศเดียวกัน รูปที่ 10 แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของการใช้งานระบบ BESS ขนาดใหญ่ระดับโครงข่ายในประเทศสำคัญต่าง ๆ โดยพิจารณาตามประเภทการใช้งาน ในขณะที่ตารางที่ 1 มุ่งเน้นไปที่เกณฑ์ด้านตลาดของตลาดสามแห่งที่มีความน่าดึงดูดที่สุดในยุโรป ได้แก่ สหราชอาณาจักร เยอรมนี และอิตาลี

	ประเภทการใช้งาน			
	การทำกำไรจากส่วนต่างของราคาในตลาดค้าส่ง	บริการเสริม	กำลังการผลิต	การบรรเทาความแออัดของโครงข่ายไฟฟ้าและ/หรือการชะลอการปรับปรุงโครงข่ายไฟฟ้า
ออสเตรเลีย	🟢	🟢	🟡	🔴
แคนาดา	🟡	🟡	🟡	🟡
จีน	🟡	🟡	🔴	🔴
เยอรมัน	🟢	🟢	🟢	🟢
อินเดีย	🟢	🟡	🟢	🟡
อิตาลี	🟢	🟡	🟢	🟡
ญี่ปุ่น	🟢	🟢	🟢	🔴
สาธารณรัฐเกาหลี	🔴	🔴	🟢	🔴
สหราชอาณาจักร	🟢	🟢	🟢	🟢
สหรัฐอเมริกา	🟢	🟢	🟡	🟡

สถานะคุณสมบัติของการใช้งานแบตเตอรี่:

🟢 มีคุณสมบัติตามกฎหมาย

🟡 มีคุณสมบัติเฉพาะในบางเขตพื้นที่ที่ได้รับอนุญาต หรือในโครงการนำร่อง หรือสำหรับบริการบางประเภทเท่านั้น

🔴 ไม่มีคุณสมบัติหรือไม่สามารถใช้งานในประเภทนั้น ๆ ได้

รูปที่ 10: ความเหมาะสมของการใช้งานระบบ BESS ขนาดใหญ่ระดับโครงข่ายจำแนกตามประเทศ

(ที่มา: *IEA - Batteries and Secure Energy Transitions*)

ตารางที่ 1: เกณฑ์ด้านตลาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ในสหราชอาณาจักร เยอรมนี และอิตาลี

(ที่มา: GOV.UK, Baker Mckenzie, Timera Energy, Bundesnetzagentur, Lexology)

	สหราชอาณาจักร	เยอรมนี	อิตาลี
กรอบกฎระเบียบ	การกำหนดแบ่งแยกประเภททางกฎหมายที่ชัดเจนสำหรับสินทรัพย์ด้านระบบกักเก็บพลังงาน ช่วยให้กระบวนการขออนุญาตและการเข้าสู่ตลาดเป็นไปอย่างราบรื่นยิ่งขึ้น	นโยบายที่เข้มแข็งและการปรับปรุงรหัสระบบโครงข่าย (grid codes) ช่วยสนับสนุนการมีส่วนร่วมของ BESS ในการให้บริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า (ancillary services) และในการดำเนินงานในตลาดไฟฟ้า	การปฏิรูปล่าสุดช่วยส่งเสริมการบูรณาการระบบกักเก็บพลังงานผ่านแรงจูงใจที่ออกแบบมาโดยเฉพาะและโครงการนำร่อง
โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าและราคา	ความพยายามในการยกเลิกหรือปรับลดการคิดค่าบริการโครงข่ายซ้ำซ้อน (double charging) ช่วยลดต้นทุน	โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าแบบก้าวหน้า (progressive tariff schemes) จะให้รางวัลต่อการดำเนินงานแบบพลวัต (เช่น การปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการใช้ไฟฟ้า (load shifting) และการควบคุมความถี่ (frequency regulation)) และช่วยส่งสัญญาณตลาดได้ดียิ่งขึ้น (สะท้อนต้นทุนจริงได้ชัดเจนยิ่งขึ้น)	
การเข้าถึงตลาด	ผู้ให้บริการระบบ BESS สามารถเข้าถึงบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า (ancillary services) และตลาดกำลังผลิต (capacity markets) ได้ง่ายขึ้น	กลไกตลาดที่ได้รับการปรับปรุงช่วยให้ระบบ BESS สามารถมีบทบาทในการรักษาสมดุลของโครงข่ายไฟฟ้าและการทำกำไรจากส่วนต่างราคาพลังงาน (energy arbitrage) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ	มีความสำเร็จในการบูรณาการระบบ BESS เข้ากับกระบวนการจัดซื้อจัดจ้างแบบมีการแข่งขัน และตลาดความยืดหยุ่นในระดับท้องถิ่น (local flexibility markets)
กระบวนการขออนุญาตและการเชื่อมต่อโครงข่าย	กระบวนการเชื่อมต่อโครงข่ายและการขออนุญาตที่มีประสิทธิภาพมากกว่าในตลาดเกิดใหม่หลายประเทศ ช่วยลดความล่าช้าและความไม่แน่นอนของโครงการ		

ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) กำลังเริ่มมีบทบาทมากขึ้นในประเทศเศรษฐกิจเกิดใหม่ ซึ่งการนำมา ใช้งานกำลังเร่งตัวขึ้นจากแรงจูงใจด้านนโยบายและกระแสการลงทุน ประสบการณ์จากประเทศฟิลิปปินส์ชี้ให้เห็นว่า กรอบการให้บริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า (ancillary service frameworks) และตลาดสำรองไฟฟ้า (reserve market) ช่วยเอื้อให้โครงการกักเก็บพลังงานสามารถสร้างรายได้ที่สถาบันการเงินยอมรับ (bankable revenues) การจัดซื้อบริการควบคุมความถี่ผ่านข้อตกลงจัดซื้อบริการเสริม (Ancillary Services Procurement Agreement: ASPA) และตลาดสำรองไฟฟ้า เปิดช่องทางที่ชัดเจนให้แบตเตอรี่ได้รับค่าตอบแทนตามความแม่นยำในการตอบสนองและความพร้อมให้บริการ (ngcp.ph) แอฟริกาใต้กำลังก้าวขึ้นมาเป็นผู้นำของทวีปแอฟริกาในด้านระบบกักเก็บพลังงานขนาดใหญ่ระดับโครงข่าย (utility-scale BESS) โดยปัจจัยขับเคลื่อนหลักคือความต้องการของ Eskom ในการใช้ระบบกักเก็บพลังงานที่ตอบสนองได้รวดเร็วเพื่อลดปัญหาไฟดับแบบหมุนเวียน (load shedding) ในช่วงความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด และเพื่อสนับสนุนการบูรณาการพลังงานหมุนเวียนที่ผันผวนสูง (VRE) เพื่อรักษาเสถียรภาพของโครงข่ายไฟฟ้า โครงการของ Eskom ในแอฟริกาใต้ แสดงให้เห็นถึงการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานในหลายพื้นที่โครงการ เพื่อลดภาระไฟฟ้าในช่วงความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (peak shaving) และสนับสนุนโครงข่ายในจุดโครงข่ายที่มีข้อจำกัด โดยระยะที่ 1 และระยะที่ 2 มีขนาดรวม 343 เมกะวัตต์ (MW) และ 1,440 เมกะวัตต์ชั่วโมง (MWh) (eskom.co.za, Energy-Storage.News). การเติบโตของระบบ BESS ในอินเดียขับเคลื่อนโดยความจำเป็นเร่งด่วนในการบูรณาการพลังงานหมุนเวียน 500 กิกะวัตต์ (GW) ภายในปี พ.ศ. 2573 เพื่อให้มั่นใจในเสถียรภาพของโครงข่ายไฟฟ้าและสามารถจัดการความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (peak demand) นอกจากนี้ การประมูลส่วนกลางของอินเดียสำหรับโครงการขนาด 1,000 MW และ 2,000 MWh ยังเป็นต้นแบบสำหรับสัญญาระยะยาวที่ช่วยลดความผันผวนของรายได้และเปิดโอกาสให้มีต้นทุนทางการเงินที่ต่ำลง โดยผลการประมูลล่าสุดสะท้อนถึงความสามารถในการแข่งขันที่ดีขึ้น

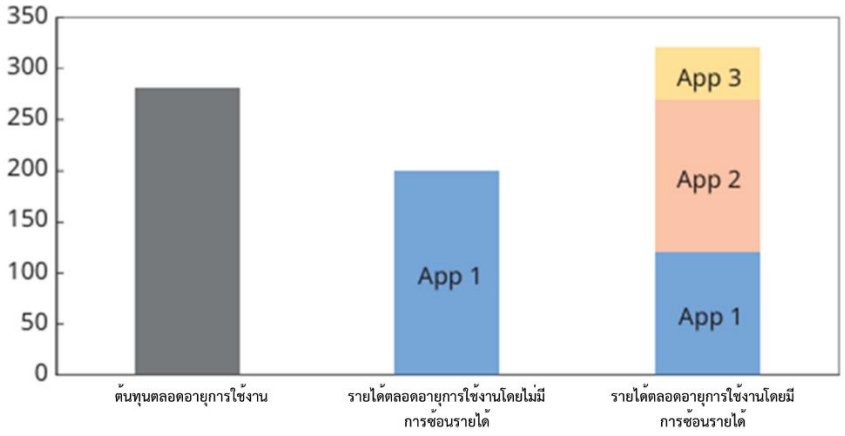
(seci.co.in, SolarQuarter) โครงการนำร่องในเวียดนามแสดงให้เห็นเส้นทางจากการปรับปรุงขนาดเล็กไปสู่ระดับโครงการขนาดใหญ่ โดยการลดการจำกัดกำลังการผลิต (curtailment mitigation) และการสนับสนุนในช่วงความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดถือเป็นความสำคัญอันดับแรก ๆ (energyalliance.org, sia.net.tw)

กรณีศึกษาเหล่านี้เกี่ยวข้องกับประเทศไทย เนื่องจากมีการรวมการจัดซื้อจัดจ้างภายใต้ข้อกำหนดของรัฐสำหรับบริการระบบเข้ากับการเปิดรับความเสี่ยงทางการค้าที่จำกัด ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่คล้ายคลึงกันสำหรับการออกแบบตลาดและการเป็นเจ้าของสาธารณูปโภค รวมถึงโครงสร้างการผลิตไฟฟ้าที่เน้นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนเป็นหลัก

4.3 การซ้อนรายได้ หรือการสร้างรายได้จากหลายช่องทาง (Revenue Stacking)

ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) สามารถสร้างมูลค่าผ่านการให้บริการในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งในตลาดค้าส่ง ค้าปลีก ตลาดบริการเสริม และตลาดกำลังการผลิต การสร้างรายได้จากระบบ BESS ขึ้นอยู่กับการออกแบบตลาดในแต่ละพื้นที่ แรงจูงใจจากนโยบาย และการปรับปรุงประสิทธิภาพการดำเนินงาน ในตลาดที่พัฒนาแล้วซึ่งมีกฎระเบียบเอื้ออำนวย สามารถนำรูปแบบการซ้อนรายได้หรือการสร้างรายได้จากหลายช่องทาง (‘revenue stacking’) มาใช้ได้ โดยเป็นการให้บริการหลายประเภทตามที่แสดงในรูปที่ 11 เช่น การควบคุมความถี่ (frequency regulation) การทำกำไรจากส่วนต่างราคาพลังงาน (energy arbitrage) และการจัดหากำลังผลิต (capacity provision) จากสินทรัพย์เดียวเพื่อลดความเสี่ยงจากการพึ่งพาสัญญาระยะยาวเพียงประเภทเดียว

รูปแบบแบบไฮบริดเหล่านี้ถูกออกแบบมาเพื่อเพิ่มความสามารถในการสร้างรายได้ที่สถาบันการเงินยอมรับ (project bankability) และลดความผันผวนในกระแสรายได้ทางใดทางหนึ่ง อย่างไรก็ดี การซ้อนรายได้ต้องใช้ระบบบริหารจัดการพลังงาน (EMS) ที่ซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากเพิ่มความซับซ้อนของกรณีธุรกิจและทำให้การคาดการณ์รายได้ไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ ความถี่ในการสั่งเดินเครื่องและจ่ายไฟฟ้า (dispatch) ที่เพิ่มขึ้นจากการซ้อนรายได้ อาจเร่งให้สินทรัพย์เสื่อมสภาพเร็วขึ้น

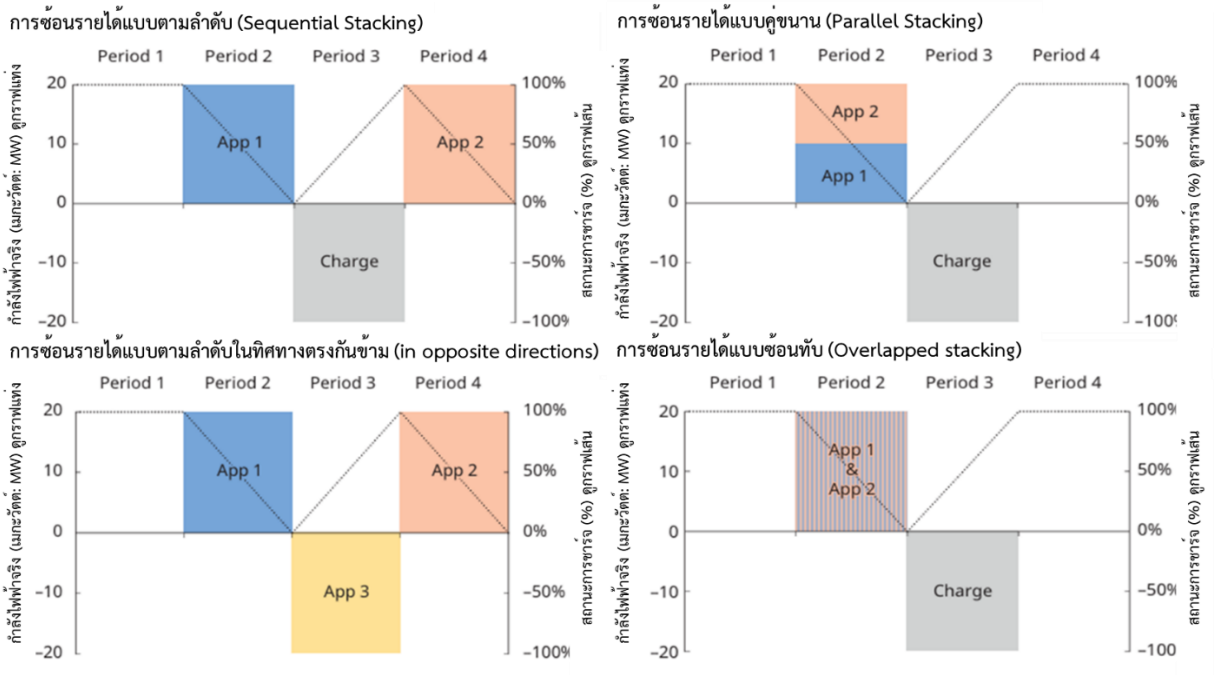


รูปที่ 11: การแสดงแนวคิดของการซ้อนรายได้ (Revenue Stacking) ของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS)
(ที่มา: *Monetizing Energy Storage*)

กลยุทธ์การซ้อนรายได้ (Revenue Stacking) จำนวน 4 รูปแบบ แสดงไว้ในรูปที่ 12 ดังนี้

- **การซ้อนรายได้แบบตามลำดับ (Sequential Stacking)**
  ใช้กำลังการผลิตเดียวกันในการให้บริการแต่ละประเภทในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

- **การซ้อนรายได้แบบตามลำดับในทิศทางตรงกันข้าม (Sequential Stacking in Opposite Directions)** คล้ายกับการซ้อนรายได้แบบตามลำดับ แต่ครอบคลุมทั้งช่วงเวลาการชาร์จและการคายประจุ
- **การซ้อนรายได้แบบคู่ขนาน (Parallel Stacking)** แบ่งกำลังการผลิตออกเป็นส่วนย่อย เพื่อให้บริการแต่ละประเภทพร้อมกันในเวลาเดียวกัน
- **การซ้อนรายได้แบบพลวัตหรือแบบซ้อนทับ (Dynamic/Overlapped Stacking)** ใช้กำลังการผลิตเดียวกันในการให้บริการหลายประเภทในเวลาเดียวกัน



รูปที่ 12: กลยุทธ์การซ้อนรายได้ (Revenue Stacking) สำหรับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS)

(ที่มา: *Monetizing Energy Storage*)

มีลักษณะสำคัญบางประการที่ควรพิจารณาก่อนให้บริการแบบ revenue stacking ซึ่งรวมถึงความสามารถทางเทคโนโลยี อายุการใช้งานและการเสื่อมสภาพของระบบ ระยะเวลาของสัญญา กฎระเบียบ อิทธิพลของคู่สัญญา และระดับการเชื่อมต่อกับโครงข่าย

ภายใต้โครงสร้างภาคพลังงานของไทยที่มีผู้รับซื้อไฟฟ้าเพียงรายเดียว (ESB) การว่าจ้างผู้พัฒนาเพื่อให้บริการฟังก์ชันของระบบ BESS อย่างครบถ้วนในอัตราค่าไฟที่เหมาะสมอาจเป็นเรื่องท้าทาย แนวทางหนึ่งที่สามารถดำเนินการได้คือการจัดประมูลนำร่องขนาดเล็กสำหรับระบบ BESS ขนาดใหญ่ที่ใช้กับระบบไฟฟ้าในระดับโครงข่าย โดยกำหนดข้อกำหนดการให้บริการและตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่ชัดเจน เพื่อสำรวจความสนใจของตลาดและระดับราคาก่อนการขยายผลในวงกว้าง

4.4 รูปแบบธุรกิจ (Business Models)

ในบริบทของการซ้อนรายได้ (revenue stacking) การให้บริการระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) สามารถดำเนินการผ่านรูปแบบธุรกิจที่หลากหลาย ตั้งแต่รูปแบบที่ขับเคลื่อนด้วยสัญญา (contract-driven) ซึ่งบุคคลที่สามเป็นผู้ให้บริการแก่หน่วยงานสาธารณูปโภคที่ไม่ได้เป็นเจ้าของระบบ BESS ไปจนถึงรูปแบบที่ขับเคลื่อนด้วยตลาด (merchant-driven)

ซึ่งผู้พัฒนาโครงการเสนอราคาผ่านตลาดพลังงานระดับประเทศ โดยแข่งขันกับโครงการ BESS อื่น ๆ อีกรูปแบบหนึ่งคือ BESS ที่เป็นกรรมสิทธิ์ของหน่วยงานสาธารณูปโภค (utility-owned) ซึ่งผู้ดำเนินการระบบหรือหน่วยงานสาธารณูปโภคเป็นผู้ลงทุนเป็นเจ้าของ และดำเนินการระบบ BESS ด้วยตนเอง ช่วยให้มีความยืดหยุ่นในการปฏิบัติการเต็มรูปแบบเพื่อสนับสนุนความต้องการของระบบ การตัดสินใจเลือกใช้รูปแบบธุรกิจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น เป้าหมายทางการเงิน ความสามารถในการรับความเสี่ยง กฎระเบียบของตลาด สภาพตลาด สถานที่ตั้ง กลยุทธ์การดำเนินงาน และขนาดของโครงการ อย่างไรก็ดี ในปี พ.ศ. 2567 โครงการ BESS ส่วนใหญ่ใช้รูปแบบธุรกิจแบบผสมผสานระหว่างรูปแบบที่ขับเคลื่อนด้วยสัญญาและด้วยตลาด โดยให้บริการหลายประเภทในระบบเดียว (revenue stacking) ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบแตกต่างระหว่างรูปแบบธุรกิจทั้งสามดังกล่าว

ตารางที่ 2: การเปรียบเทียบรูปแบบธุรกิจของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ขนาดใหญ่ที่ใช้กับระบบไฟฟ้าในระดับโครงข่าย (ปรับแก้ไขจาก *Volta Foundation Battery Report 2024*)

กลไก	ขับเคลื่อนด้วยสัญญา (contract-driven) (บุคคลที่สาม)	เป็นกรรมสิทธิ์ของหน่วยงานสาธารณูปโภค (ผู้ดำเนินการระบบ)	ขับเคลื่อนด้วยตลาด (merchant-driven) (ผู้พัฒนาโครงการ)
ความมั่นคงของรายได้	รายได้ที่คาดการณ์ได้: ข้อตกลงการให้บริการระยะยาวด้วยอัตราคงที่	สูง: คืนทุนผ่านอัตราค่าไฟฟ้าหรือการจัดสรรงบประมาณภายใน	รายได้ผันแปร: รายได้ขึ้นอยู่กับความผันผวนของตลาด
การเปิดรับความเสี่ยงในตลาด	การเปิดรับความเสี่ยงต่อความผันผวนของราคาที่จำกัด	การเปิดรับความเสี่ยงต่ำ: การจ่ายไฟถูกกำหนดโดยความต้องการของระบบมากกว่าราคา	เปิดรับเต็มที่ต่อความผันผวนของตลาดและราคา
ระดับความเสี่ยง	ความเสี่ยงต่ำ: มีการรับประกันการจ่ายเงิน	ความเสี่ยงต่ำ: ความเสี่ยงด้านสินทรัพย์/ประสิทธิภาพอยู่กับสาธารณูปโภค	ความเสี่ยงสูง: เนื่องจากความผันผวนของตลาดไม่สามารถคาดการณ์ได้
ศักยภาพในการทำกำไร	ผลตอบแทนสม่ำเสมอแต่ต่ำกว่า	มูลค่าที่เกิดจากการหลีกเลี่ยงต้นทุนและเสถียรภาพของระบบ (ไม่เน้นกำไร)	มีโอกาสทำกำไรสูงในช่วงที่ตลาดเอื้ออำนวย
กระแสรายได้หลัก	การจ้างผลิต/การใช้กำลังการผลิต (tolling) (การชำระเงินแบบคงที่) กำลังผลิต การป้องกันความเสี่ยงด้านพลังงาน	การหลีกเลี่ยงความแออัด/การสั่งจ่ายไฟฟ้าซ้ำ (redispatch) เสถียรภาพและความยืดหยุ่น บริการเสริมความมั่นคงของระบบ	ตลาดพลังงาน การประมูลกำลังการผลิต, บริการเสริมความมั่นคงของระบบ
ข้อมูลนักลงทุน	นักลงทุนที่ระมัดระวังความเสี่ยง เน้นความมั่นคง	สาธารณูปโภค/ผู้ดำเนินการระบบ เน้นความมั่นคง ความยืดหยุ่น และมาตรฐาน	นักลงทุนที่รับความเสี่ยงได้สูงและมุ่งหวังผลตอบแทนที่มากกว่า

เนื่องจากประเทศไทยยังไม่มีตลาดพลังงานระดับชาติ รูปแบบธุรกิจที่ขับเคลื่อนด้วยตลาด (merchant-driven model) จึงยังไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรง อย่างไรก็ดี รูปแบบที่ขับเคลื่อนด้วยสัญญา (contract-driven) และรูปแบบที่เป็นกรรมสิทธิ์ของหน่วยงานสาธารณูปโภค (utility-owned) สามารถมีบทบาทสำคัญ โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนาตลาดเช่นในประเทศไทย เมื่อโครงสร้างตลาดยังไม่พัฒนาเต็มที่ การที่สินทรัพย์ BESS อยู่ภายใต้การควบคุมโดยตรงของหน่วยงานสาธารณูปโภคหรือผู้ดำเนินการระบบ จะช่วยให้สามารถสั่งจ่ายพลังงานได้อย่างทันท่วงทีและยืดหยุ่น เพื่อรับมือกับเหตุฉุกเฉินของระบบ เช่น ปัญหาเสถียรภาพหรือความแออัดของระบบส่งไฟฟ้า โดยไม่ต้องรอขั้นตอนการจัดซื้อจัดจ้าง การพึ่งพาการจัดซื้อบริการเสริมจากภาคเอกชนเพียงอย่างเดียว อาจไม่สามารถรับประกันการให้บริการที่จำเป็นทั้งหมดได้อย่างต่อเนื่อง ในขณะที่การรักษาสัดส่วนของระบบ BESS ที่เป็นกรรมสิทธิ์ของหน่วยงานสาธารณูปโภคจะช่วยรับประกันว่าบริการด้านความมั่นคงของระบบที่จำเป็นจะมีความพร้อมใช้งานอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ นอกจากนี้ การลงทุนและดำเนินการโดยตรงจากหน่วยงานสาธารณูปโภค ยังช่วยกำหนดมาตรฐานระดับประเทศในด้านเทคนิค แนวทาง

ปฏิบัติในการดำเนินงาน และโครงสร้างต้นทุน ซึ่งสามารถเสริมสร้างกรอบกฎระเบียบ และส่งเสริมการมีส่วนร่วมของภาคเอกชนในระยะยาวเมื่อระบบตลาดเติบโตและพัฒนาเต็มที่แล้ว ดังนั้น รูปแบบธุรกิจแบบขับเคลื่อนด้วยสัญญาและแบบเป็นกรรมสิทธิ์ของหน่วยงานสาธารณูปโภค จึงสามารถสร้างสมดุลระหว่างการส่งเสริมบทบาทของภาคเอกชน กับภารกิจหลักของหน่วยงานสาธารณูปโภคในการรักษาความมั่นคงโดยรวมของระบบไฟฟ้า และการดำเนินงานสินทรัพย์ BESS อย่างยืดหยุ่นตามความต้องการของระบบโครงข่ายไฟฟ้า

4.5 โครงสร้างสัญญา (Contract Structures)

โครงสร้างสัญญาหมายถึงการออกแบบทางพาณิชย์และทางกฎหมายที่เฉพาะเจาะจงซึ่งใช้ในการจัดซื้อกำลังการผลิตและบริการของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) โดยจะกำหนดว่าใครเป็นเจ้าของและดำเนินการสินทรัพย์ ใครมีสิทธิในการสั่งการจ่ายพลังงาน ตำแหน่งที่ตั้งของระบบ BESS บริการใดที่ถูกจัดซื้อ วิธีการจัดหาและวัดปริมาณพลังงานสำหรับการชาร์จ วิธีการชำระเงิน (กำลังการผลิต/ความพร้อมใช้งาน โบนัส/บทลงโทษด้านประสิทธิภาพ) และวิธีการแบ่งปันความเสี่ยงและความรับผิดชอบ รูปแบบธุรกิจที่ขับเคลื่อนด้วยสัญญานี้โดยทั่วไปจะดำเนินการตามกระบวนการประมูลแข่งขันโดยหน่วยงานสาธารณูปโภคเพื่อหาผู้พัฒนาภายนอกที่เป็นบุคคลที่สาม (third-party developers) รูปแบบ BESS ที่มีผู้พัฒนาเป็นบุคคลที่สาม (third-party BESS model) จะเกี่ยวข้องกับผู้พัฒนา BESS ซึ่งหน่วยงานสาธารณูปโภคจะเข้าทำสัญญาระยะยาวสำหรับกำลังการกักเก็บหรือบริการที่เกี่ยวข้อง หน่วยงานสาธารณูปโภคมีหน้าที่รับผิดชอบในการจ่ายค่าบริการแบบคงที่หรือผันแปรให้กับบุคคลที่สาม และกำหนดตารางเวลาการสั่งจ่ายพลังงานจาก BESS ตามความต้องการในการดำเนินงาน ผู้พัฒนาโครงการภายนอกมีหน้าที่รับผิดชอบในการจัดซื้อ จัดสร้าง และงานติดตั้งอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง การดำเนินงานและการบำรุงรักษา BESS ตลอดอายุการใช้งานนับตั้งแต่วันเริ่มดำเนินการเชิงพาณิชย์หรือวันที่เริ่มใช้งาน (date of commissioning) และการดำเนินงาน BESS ตามกำหนดการสั่งจ่ายพลังงานที่หน่วยงานสาธารณูปโภคกำหนด กระแสรายได้สำหรับรูปแบบการเป็นเจ้าของโดยบุคคลที่สามจะขึ้นอยู่กับประเภทของสัญญา แม้จะมีความแตกต่างกันหลากหลายในรายละเอียดของข้อตกลงสัญญา แต่โครงสร้างต่อไปนี้เป็นโครงสร้างที่นิยมใช้กันมากที่สุด

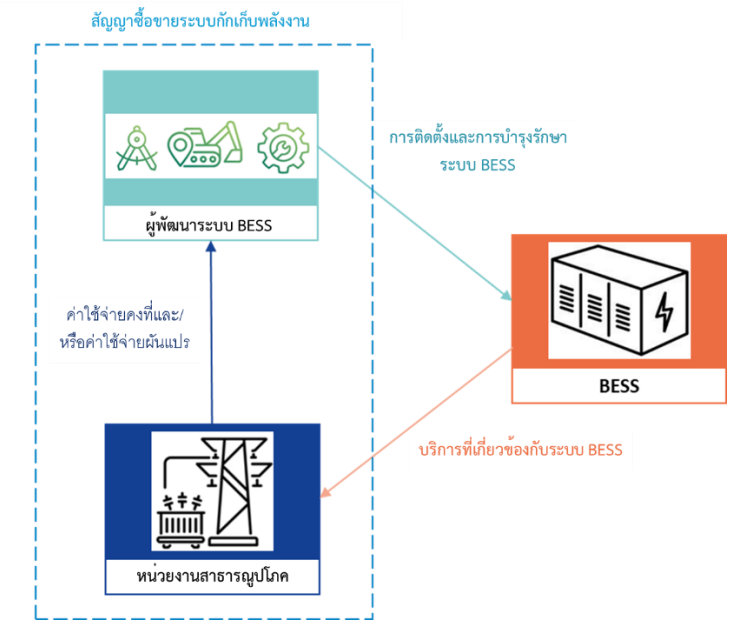
1. **สัญญาจ้างผลิต/สัญญาใช้กำลังการผลิต (Tolling Agreement)**
    - ก. ผู้พัฒนาเป็นผู้รับผิดชอบในการพัฒนา ดำเนินงาน บำรุงรักษา และเป็นเจ้าของระบบ BESS
    - ข. หน่วยงานสาธารณูปโภคจะต้องจ่ายค่าธรรมเนียมกำลังการผลิตแบบคงที่ (fixed capacity charge) ให้แก่ผู้พัฒนาสำหรับสิทธิในการใช้กำลังการผลิตของแบตเตอรี่ และจ่ายค่าธรรมเนียมการดำเนินงานแบบผันแปร (variable operating charge) สำหรับการสั่งจ่ายพลังงาน
    - ค. ผู้พัฒนาไม่ต้องรับผิดชอบค่าใช้จ่ายของพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้า (input)/ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการชาร์จ
2. **สัญญาแบบอิงกำลังการผลิต (Capacity-based Agreement)**
    - ก. จะมีการขายเพียงกำลังการผลิตและคุณลักษณะด้านกำลังการผลิตของ BESS ให้กับหน่วยงานสาธารณูปโภคเท่านั้น
    - ข. หน่วยงานสาธารณูปโภคจะต้องจ่ายค่าธรรมเนียมกำลังการผลิตรายเดือน (monthly capacity charge) ให้กับผู้พัฒนา แต่ไม่ต้องจ่ายค่าธรรมเนียมแบบผันแปรหรือค่าพลังงาน (variable or energy charge) และได้รับการรับประกันว่ากำลังการผลิตจะพร้อมใช้งานเมื่อจำเป็น

ค. ผู้พัฒนาเป็นผู้รับผิดชอบในการขายพลังงานและค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องทั้งหมด รวมถึงต้นทุนพลังงานที่จำเป็นซึ่งจัดหามาจากหน่วยงานสาธารณูปโภค

3. **สัญญาสร้าง-เป็นเจ้าของ-ดำเนินงาน-โอน (Build-Own-Operate-Transfer: BOOT Agreement)**
   ก. ผู้พัฒนามีหน้าที่รับผิดชอบในการพัฒนา เป็นเจ้าของ ดำเนินงาน และบำรุงรักษาระบบ BESS ซึ่งคล้ายกับสัญญาจ้างผลิต (tolling agreement)
   ข. อย่างไรก็ดี ความแตกต่างจากสัญญาจ้างผลิตคือ เมื่อโครงการเริ่มดำเนินการเชิงพาณิชย์แล้ว ผู้พัฒนาจะขายโครงการนี้ให้กับหน่วยงานสาธารณูปโภค
   ค. รูปแบบนี้ช่วยให้หน่วยงานสาธารณูปโภคได้กรรมสิทธิ์ในระยะยาว แต่ไม่ต้องแบกรับความเสี่ยงที่มีอยู่ในการพัฒนาและก่อสร้างโครงการ

4. **สัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบผสม (Hybrid Power Purchase Agreement: PPA)**
   ก. ผู้พัฒนาติดตั้งและดำเนินงานระบบพลังงานหมุนเวียน (RE) ร่วมกับระบบ BESS (โดยทั่วไปจะอยู่ในพื้นที่เดียวกัน)
   ข. ผู้พัฒนาควบคุมการคายประจุ/การชาร์จของระบบ BESS โดยต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขของสัญญาซื้อขายไฟฟ้า (PPA) แต่สามารถใช้พลังงานส่วนเกินหรือส่วนขาดดุลเพื่อให้บริการอื่น ๆ ได้
   ค. มีการซ้อนรายได้ (revenue stacking) จากสัญญา PPA กับหน่วยงานสาธารณูปโภค และรายได้จากตลาดพลังงาน

แผนภาพโครงร่างอย่างง่ายของรูปแบบการเป็นเจ้าของโดยบุคคลที่สาม (third-party ownership) แสดงไว้ในรูปที่ 13 ด้านล่าง



รูปที่ 13: รูปแบบทั่วไปของการเป็นเจ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) โดยบุคคลที่สาม
(ที่มา: Energynautics GmbH)

4.6 การประยุกต์ใช้งานระบบ BESS ที่เกี่ยวข้องในประเทศไทย

การประยุกต์ใช้งานที่มีศักยภาพของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ในประเทศไทยนั้นครอบคลุมกว้างขวางเกินกว่าบริการโครงข่ายไฟฟ้าทั่วไป ในระบบไฟฟ้าของไทย ระบบ BESS สามารถให้บริการควบคุมความถี่และแรงดันไฟฟ้า กำลังผลิต

สำรองปฐมภูมิ (primary reserves) การจัดการความแออัดของโครงข่าย การทำกำไรจากส่วนต่างราคาพลังงาน (energy arbitrage) และการลดภาระไฟฟ้าในช่วงความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (peak shaving) ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรองรับสัดส่วนพลังงานแสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น บทบาทที่สำคัญอย่างยิ่งคือการดำเนินงานในโหมดสร้างโครงข่าย (grid-forming operation) ซึ่งแหล่งจ่ายพลังงานแบบใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter-Based Resources: IBR) จะให้ค่าความเฉื่อยเสมือน (synthetic inertia) และการรองรับแรงดันไฟฟ้าแบบทันทีทันใด หน้าที่เหล่านี้ถือเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการจัดการกับค่าความเฉื่อยที่ลดลงและเสถียรภาพของระบบภายใต้แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ พ.ศ. 2567-2580 (PDP24) ที่มุ่งขยายพลังงานหมุนเวียน

ระบบไฟฟ้าของประเทศไทยยังคงมีการประสานงานแบบรวมศูนย์ โดยมีโครงสร้างผู้ซื้อรายเดียว (single buyer) และใช้อัตราค่าไฟที่อยู่ภายใต้การกำกับดูแลของคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ. หรือ ERC) กกพ. ได้เปิดตัว 'ERC Sandbox' เมื่อปี พ.ศ. 2562 ซึ่งทำหน้าที่เป็นโครงการพิสูจน์แนวคิด (proof-of-concept program) ที่จัดเตรียมสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุมเพื่อให้บริษัทต่าง ๆ สามารถทดสอบและนำร่องนวัตกรรมภายใต้กรอบกฎระเบียบที่ยืดหยุ่นชั่วคราว โดยอยู่ภายใต้การกำกับดูแลของ กกพ. โครงการ ERC Sandbox ครอบคลุมถึงโครงการที่ไม่แสวงหากำไรเชิงพาณิชย์ และมุ่งเน้นไปที่สาขานวัตกรรมดังต่อไปนี้ ได้แก่ แพลตฟอร์มการซื้อขายใบรับรองพลังงานหมุนเวียน (REC trading platforms) สมาร์ทกริด (smart grids) รูปแบบใหม่ของสัญญาซื้อขายไฟฟ้า (PPAs) ที่เป็นนวัตกรรม (เช่น สัญญาซื้อขายไฟฟ้าเสมือน (Virtual PPA) และสัญญารับซื้อไฟฟ้าผ่านตัวแทน (Sleeved PPA)) นวัตกรรมสีเขียว (green innovation) และกฎระเบียบสีเขียว (green regulation) ภายใต้กรอบการดำเนินการนี้ กฟผ. กำลังดำเนินการทดสอบฟังก์ชันเพิ่มเติมของ BESS ณ สถานีไฟฟ้าย่อยของตน โดยขอบเขตการทดสอบเป็นไปในเชิงเทคนิคเท่านั้น

การดำเนินการจนถึงปัจจุบันรวมถึงโครงการนำร่องระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ขนาดโครงข่ายไฟฟ้าแบบติดตั้งเดี่ยว (standalone) ที่สถานีไฟฟ้าย่อยบำเหน็จณรงค์ (ขนาด 16 เมกะวัตต์/16 เมกะวัตต์ชั่วโมง) และสถานีไฟฟ้าย่อยชัยบาดาล (ขนาด 21 เมกะวัตต์/21 เมกะวัตต์ชั่วโมง) ของ กฟผ. โครงการเหล่านี้มีเป้าหมายเพื่อการจัดการพลังงานหมุนเวียนและการบรรเทาความแออัดของระบบส่งไฟฟ้า และตั้งอยู่ที่สถานีไฟฟ้าย่อยแทนที่จะอยู่ร่วมกับโรงไฟฟ้า ในขณะเดียวกัน บริการรักษาความมั่นคงของระบบปัจจุบันดำเนินการโดยการไฟฟ้าสามแห่ง ได้แก่ กฟผ. กฟภ. และ กฟน. จนถึงขณะนี้ยังไม่มีการจัดประมูล BESS เกิดขึ้นสืบเนื่องมาจากโครงสร้างตลาดในปัจจุบัน (ยังไม่มีตลาดบริการเสริม) ตัวอย่างของการขับเคลื่อนด้วยสัญญาภายใต้การกำกับดูแลของ กฟภ. ได้แก่ โครงการ BESS ที่สถานีไฟฟ้าย่อยเกาะสมุยของ กฟภ. ซึ่งดำเนินการโดย PEA ENCOM เพื่อชะลอการขยายสายเคเบิลใต้น้ำในขณะที่รองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดที่เพิ่มขึ้น

สำหรับระบบไฮบริดพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (hybrid PV+BESS) โครงการแบบมีความมั่นคงบางส่วน (partial-firm) ที่เปิดตัวโดย กกพ. เป็นโครงการนำร่องที่ออกแบบมาเพื่อทดสอบวิธีการลดความผันผวนของพลังงานหมุนเวียน โดยหน่วย BESS ที่ติดตั้งภายใต้โครงการนี้มีขนาดค่อนข้างเล็กเมื่อเทียบกับปริมาณพลังงานตามสัญญาในแต่ละวัน และความยืดหยุ่นด้านการเดินระบบถูกจำกัดด้วยสัญญา ทำให้ผู้ดำเนินการระบบต้องใช้เครื่องมืออื่นเพื่อจัดการกับความผันผวนส่วนที่เหลือ ในอนาคต ประเทศไทยมีแผนที่จะขยายการติดตั้งระบบ BESS ระดับโครงข่าย (grid-scale) ที่สถานีไฟฟ้าย่อย เพื่อบริหารจัดการความผันผวนแบบรวมศูนย์ ในระยะเริ่มต้นนี้ วิธีการที่รักษาความยืดหยุ่นสูงสุดของผู้ดำเนินการระบบในการสั่งจ่ายพลังงานจาก BESS จะได้รับความสำคัญเป็นอันดับแรก ด้วยโครงสร้างที่มีผู้รับซื้อไฟฟ้าเพียงรายเดียว (ESB) ของประเทศไทย และการไม่มีตลาดบริการเสริม (ancillary services market) ทำให้การประยุกต์ใช้ BESS ในระยะใกล้จะเป็นไปเพื่อสนับสนุนความมั่นคงของระบบและการดำเนินงานโครงข่ายไฟฟ้าโดยตรง การใช้งานที่ได้รับความสำคัญเป็นอันดับแรก ได้แก่ การตอบสนองความถี่อย่างรวดเร็วและการรักษาระดับความถี่ การควบคุมแรงดันไฟฟ้าและการรองรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ การจัดการความแออัดของโครงข่าย และการลดภาระไฟฟ้าในช่วงความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (peak shaving) ในช่วงค่ำ พร้อมกับการเปลี่ยนช่วงเวลาการใช้พลังงาน (energy shifting) ในระดับจำกัดเพื่อผนวกรวม

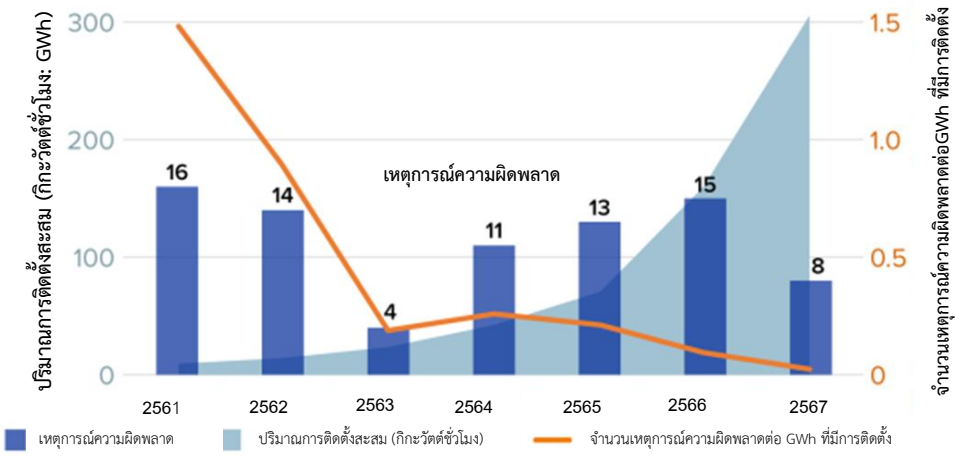
พลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบ ดังนั้น การส่งมอบบริการเหล่านี้จึงควรอาศัยสินทรัพย์ที่เป็นกรรมสิทธิ์ของผู้ดำเนินการระบบซึ่งตั้งอยู่ที่สถานีไฟฟ้าย่อย หรือการจัดเตรียมบริการที่มีการกำกับดูแลร่วมกับหน่วยงานสาธารณูปโภคของภาครัฐและหน่วยงานในสังกัด อย่างไรก็ดี แม้ว่าโครงการนำร่อง hybrid PV+BESS แบบมีความมั่นคงบางส่วนจะยังคงเป็นการทดลองนำร่องด้วยแบตเตอรี่ขนาดเล็กและมีความยืดหยุ่นในการดำเนินงานที่จำกัด แต่การมุ่งเป้าไปที่แบตเตอรี่ขนาดใหญ่สามารถส่งมอบข้อได้เปรียบในการดำเนินงานเพิ่มเติม เช่น การใช้ประโยชน์จากการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ ผลผลิตพลังงานหมุนเวียนที่มั่นคง การลดการถูกจำกัดกำลังการผลิตไฟฟ้า (curtailment) และการตอบสนองความถี่อย่างรวดเร็ว จุดเน้นหลักจึงเปลี่ยนไปที่ระบบ BESS ขนาดโครงข่ายซึ่งติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ช่วยบรรเทาข้อจำกัดของระบบ และอาจมอบความสามารถในการสร้างโครงข่ายได้ เนื่องจากปัจจุบันเป็นเรื่องยากสำหรับหน่วยงานสาธารณูปโภคของไทยที่จะทำสัญญากับผู้พัฒนาเพื่อให้ส่งมอบฟังก์ชัน BESS ที่มีประโยชน์ในในอัตราค่าไฟฟ้าที่สมเหตุสมผล การประมูลนำร่องขนาดเล็กสำหรับระบบ BESS ขนาดใหญ่ที่ใช้กับระบบไฟฟ้าในระดับโครงข่าย ซึ่งมีข้อกำหนดทางเทคนิคและตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่ชัดเจน อาจนำมาใช้เพื่อสำรวจความสนใจของตลาดและระดับราคา ข้อค้นพบดังกล่าวจะช่วยให้ข้อมูลสำหรับการออกแบบอัตราค่าไฟฟ้า กฎเกณฑ์การจัดซื้อจัดจ้าง และการขยายขนาดการกักเก็บพลังงานที่มีการสั่งจ่ายแบบรวมศูนย์ในอนาคต แนวทางนี้สอดคล้องกับแนวทางปฏิบัติในปัจจุบันที่ กฟผ. กฟภ. และ กฟน. ยังคงรักษาการควบคุมการดำเนินงานเพื่อให้บริการรักษาความมั่นคงของระบบโดยไม่ต้องพึ่งพาตลาดเชิงพาณิชย์

5 การวิเคราะห์ความปลอดภัยของระบบ BESS: ความผิดพลาดและกลยุทธ์การลดความเสี่ยง

ความปลอดภัยของแบตเตอรี่ยังคงเป็นหนึ่งในประเด็นที่สำคัญที่สุดในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ขนาดใหญ่ เหตุการณ์ในอดีต เช่น ปฏิกิริยาลูกโซ่แบบเร่งตัวเองที่ทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ (โดยเฉพาะลิเธียมไอออน) เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องจนไม่สามารถควบคุมได้ หรือภาวะความร้อนวิกฤต (thermal runaway) การลุกลามของไฟ และการสะสมของก๊าซ ได้กระตุ้นให้เกิดการพัฒนามาตรฐานด้านความปลอดภัย ระเบียบปฏิบัติด้านการบูรณาการระบบ และแนวทางปฏิบัติด้านการประเมินความเสี่ยง

ฐานข้อมูลเหตุการณ์ความผิดพลาดของสถาบันวิจัยด้านพลังงานไฟฟ้าของสหรัฐอเมริกา (Electric Power Research Institute: EPRI) มีสถิติหลายประการที่แสดงให้เห็นว่า ความปลอดภัยของ BESS แบบลิเธียมไอออน (Li-ion) ดีขึ้นอย่างมากในช่วงหลายปีที่ผ่านมา โดยมีเหตุการณ์ทั้งหมด 81 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างปี พ.ศ. 2561-2567 สำหรับระบบ BESS แบบลิเธียมไอออน เหตุการณ์ (incident) ถูกจัดประเภทว่าเป็นเหตุการณ์ใด ๆ ที่เกิดจากความผิดพลาดของระบบหรือชิ้นส่วนของ BESS ซึ่งทำให้ความเสี่ยงด้านความปลอดภัยเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปจะเป็นความเสี่ยงด้านความร้อน เช่น ไฟไหม้หรือการระเบิดในระบบลิเธียมไอออน สถิติการติดตั้ง BESS ในระดับโครงข่ายทั่วโลกและสถิติความผิดพลาดแสดงใน

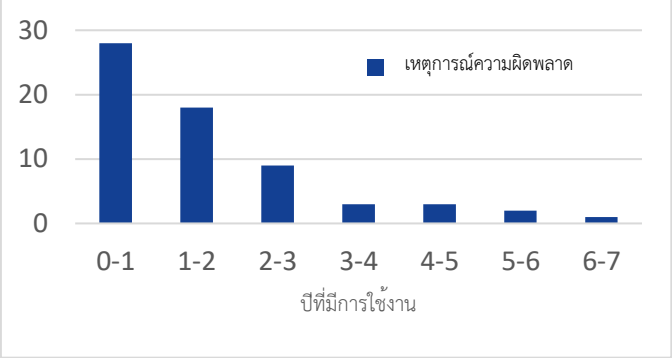
รูปที่ 14 โดยอัตราความผิดพลาดรวม ซึ่งคำนวณจากจำนวนเหตุการณ์ความผิดพลาดหารด้วยปริมาณการติดตั้งสะสม (หน่วยเป็น GWh) ลดลงถึงร้อยละ 98 ระหว่างปี พ.ศ. 2561-2567 (เส้นสีส้ม) การลดลงอย่างรวดเร็วนี้เป็นผลจากบทเรียนที่ได้รับจากความผิดพลาดในช่วงแรก ซึ่งถูกนำไปผนวกรวมไว้ในการออกแบบล่าสุดและแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุด



รูปที่ 14: สถิติการติดตั้งและความผิดพลาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในระดับโครงข่ายทั่วโลก

(ที่มา: *EPRI Failure Incident Database*)

จากการทบทวนเหตุการณ์ความผิดพลาดโดยละเอียด พบข้อมูลเชิงลึกหลายประการจากเหตุการณ์ทั้งหมด 81 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 มีเพียง 26 เหตุการณ์เท่านั้นที่สามารถระบุสาเหตุที่แท้จริง (root causes) ได้ ในขณะที่อีก 55 เหตุการณ์ไม่สามารถระบุสาเหตุได้ ความโปร่งใสที่จำกัดเกี่ยวกับสาเหตุของความผิดพลาดนี้เกิดจากผู้รับจ้างผลิต (Original Equipment Manufacturers: OEMs) และผู้ผสานรวมระบบ BESS ไม่ต้องการเปิดเผยข้อมูลเกี่ยวกับเหตุการณ์เหล่านี้ ทำให้รายงานจำนวนมากไม่ถูกเปิดเผยต่อสาธารณะ นอกจากนี้ ความซับซ้อนทางกฎหมายยังเป็นอุปสรรคต่อการเปิดเผยข้อมูลของเจ้าของสถานที่หรือผู้ผลิตเกี่ยวกับสาเหตุของความผิดพลาด รูปที่ 15 ด้านล่างแสดงให้เห็นว่าความผิดพลาดส่วนใหญ่ (ร้อยละ 72) เกิดขึ้นระหว่างการก่อสร้าง การทดสอบเดินระบบ (commissioning) หรือภายในสองปีแรกของการเดินระบบ



รูปที่ 15: การเกิดเหตุการณ์ความผิดพลาดของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน (Li-ion) จำแนกตามปีที่มีการใช้งาน

(ที่มา: *EPRI Failure Incident Database*)

เหตุการณ์ความผิดพลาด 26 เหตุการณ์ที่ทราบสาเหตุ สามารถจัดประเภทตามสาเหตุที่แท้จริง (root causes) และองค์ประกอบที่ล้มเหลว (failed elements) โดยสาเหตุที่แท้จริงสามารถแบ่งออกเป็นความผิดพลาดสี่ประเภทดังนี้

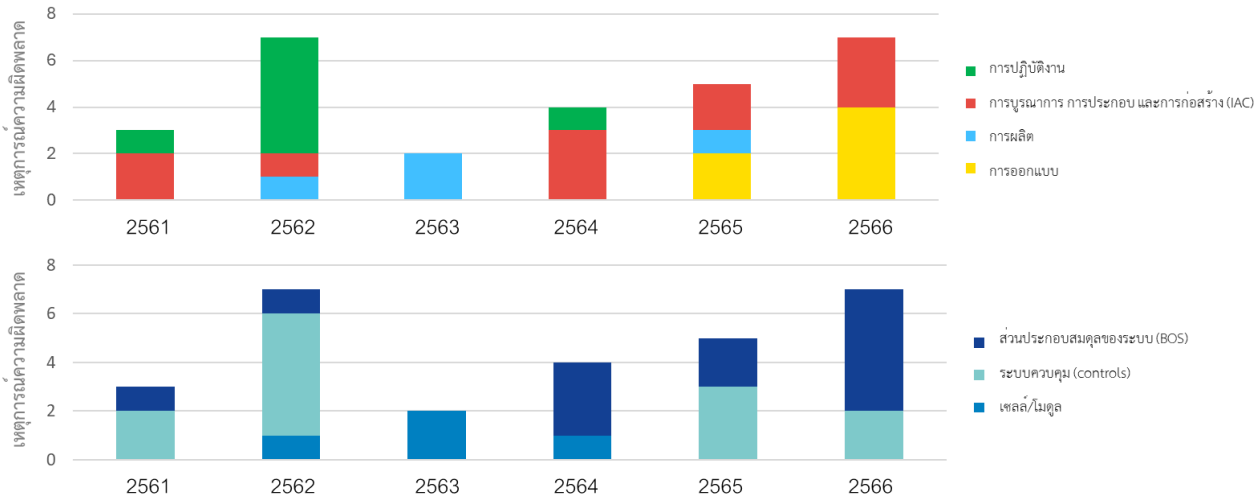
- **การออกแบบ (Design):** ความผิดพลาดที่เกิดจากสถาปัตยกรรม การจัดวาง หรือการทำงานที่ได้วางแผนไว้ขององค์ประกอบแต่ละส่วน หรือของระบบกักเก็บพลังงานทั้งระบบ
- **การผลิต (Manufacturing):** ความผิดพลาดที่เกิดจากข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต เช่น การมีวัสดุแปลกปลอมปนเปื้อนในเซลล์แบตเตอรี่ การขึ้นรูปไม่ตรงตามขอบเขตทางกายภาพที่กำหนด หรือชิ้นส่วนที่ขาดหายหรือประกอบขึ้นอย่างผิดพลาด
- **การบูรณาการ การประกอบ และการก่อสร้าง (Integration, Assembly & Construction: IAC):** ความผิดพลาดที่เกิดจากการบูรณาการที่ไม่เหมาะสม ความไม่เข้ากันของชิ้นส่วน การติดตั้งองค์ประกอบของระบบกักเก็บพลังงานที่ผิดพลาด หรือกระบวนการทดสอบเดินระบบ (commissioning) ที่ไม่เพียงพอ
- **การปฏิบัติงาน (Operation):** ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรมการชาร์จ การคายประจุ และการพักระบบที่เกินขอบเขตที่ออกแบบไว้ขององค์ประกอบกักเก็บพลังงาน หรือของระบบโดยรวม

องค์ประกอบที่ล้มเหลว (failed elements) แบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังที่อธิบายไว้ด้านล่าง

- **เซลล์/โมดูล (Cells/Modules):** ความผิดพลาดที่มีต้นกำเนิดจากเซลล์หรือโมดูลแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นหน่วยการทำงานพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงาน
- **ระบบควบคุม (Controls):** ความผิดพลาดในระบบตรวจจับ (sensing) วงจรตรรกะ (logic circuits) และระบบสื่อสาร ซึ่งรวมถึงระบบจัดการแบตเตอรี่ (BMS) ระบบบริหารจัดการพลังงาน (EMS) ตัวควบคุมโรงไฟฟ้า (plant controllers) และระบบย่อยอื่น ๆ
- **ส่วนประกอบสมดุลของระบบ (Balance of System: BOS):** ความผิดพลาดในองค์ประกอบอื่น ๆ ของระบบ BESS ซึ่งรวมถึงบัสบาร์ (busbars) สายเคเบิล (cabling) ตู้บรรจุ (enclosures) ระบบแปลงพลังงาน (PCS) หม้อแปลงไฟฟ้า (transformers) ระบบดับเพลิง (fire suppression systems) ระบบปรับอากาศและระบายอากาศ (HVAC) หรือระบบระบายความร้อนด้วยของเหลว

รูปที่ 16 แสดงการวิเคราะห์แนวโน้มโดยละเอียดของสาเหตุที่แท้จริง (ด้านบน) และองค์ประกอบที่ล้มเหลว (ด้านล่าง) โดยมี 2 เหตุการณ์ที่จัดอยู่ในกลุ่มที่มีสาเหตุที่แท้จริงร่วมกัน 2 ประเภท (การออกแบบ และ IAC) ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการนับ

จำนวนรวมของสาเหตุที่แท้จริงจาก 26 เป็น 28 เหตุการณ์ การบูรณาการ การประกอบ และการก่อสร้าง (IAC) เป็นสาเหตุที่แท้จริงของความผิดพลาดที่พบบ่อยที่สุด ในขณะที่ส่วนประกอบสมดุลของระบบ (BOS) และระบบควบคุม (controls) เป็นส่วนที่พบมากที่สุดภายใต้องค์ประกอบที่ล้มเหลว ความผิดพลาดหลายกรณีที่จัดอยู่ในประเภทระบบควบคุม (controls) เกิดจากปัญหาด้านการปฏิบัติการที่มุ่งจำกัดสถานะการชาร์จ (SOC) อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของเซลล์แบตเตอรี่



รูปที่ 16: แนวโน้มสำหรับสาเหตุที่แท้จริง (ด้านบน) และองค์ประกอบที่ล้มเหลว (ด้านล่าง)
(ที่มา: *EPRI Failure Incident Database*)

ความผิดพลาดส่วนใหญ่ที่เกิดจากการปฏิบัติงาน (operational failures) เกิดขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2561-2562 เมื่อระบบ BESS หลายแห่งในเกาหลีใต้ประสบเหตุเพลิงไหม้ เนื่องจากระดับสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ (SOC) สูงเกินกว่าขีดจำกัดที่แนะนำ (มากกว่าร้อยละ 90) ความผิดพลาดส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับการบูรณาการ (integration-related failures) เกิดจากคุณภาพของการสร้างส่วนประกอบสมดุลของระบบ (BOS) ที่อ่อนแอ และความผิดพลาดบางประการเกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการทดสอบเดินระบบ (commissioning phase) ในขณะที่ระบบการตรวจสอบและการสื่อสารยังออฟไลน์อยู่ ทำให้การรั่วหรือความผิดพลาดลุกลามกลายเป็นเพลิงไหม้ได้ ความผิดพลาดส่วนใหญ่ที่เกิดจากการออกแบบเกี่ยวข้องกับ BOS เช่นกัน โดยในปี พ.ศ. 2566 พบว่า ร้อยละ 75 เกิดจากการรั่วซึมของน้ำเข้าสู่ตู้บรรจุ

กลยุทธ์การป้องกันมุ่งเน้นไปที่การตรวจจับความผิดปกติหลายระดับ (multi-level fault detection) การใช้โครงสร้างตู้ที่ทนไฟ (fire-retardant enclosures) ระบบระบายก๊าซ (gas extraction systems) และการแยกความร้อนของแร็กแบตเตอรี่ (thermal isolation of battery racks) ความก้าวหน้าในการออกแบบ BMS ระดับโมดูลและการนำการวิเคราะห์เชิงคาดการณ์มาใช้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการลดความเสี่ยงและเพิ่มประสิทธิภาพของเวลาในการตอบสนองเหตุการณ์ การติดตั้งช่องระบายแรงดัน (deflagration vents) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและก๊าซที่ปล่อยออกมา ตลอดจนจุดเชื่อมต่อสำหรับปิดระบบฉุกเฉินจากภายนอก ถือเป็นข้อกำหนดขั้นต่ำสำหรับการติดตั้งในระดับเชิงพาณิชย์ทั้งหมด มาตรการบรรเทาสาเหตุที่แท้จริง (root causes) ทั่วไป (รวมถึงแต่ไม่จำกัดเพียงเท่านี้) มีดังนี้

การออกแบบ (Design):

- บังคับใช้การปฏิบัติตามประมวลกฎหมาย/ข้อบังคับ/มาตรฐานล่าสุด ซึ่งได้นำบทเรียนที่ได้รับจากความผิดพลาดในอดีตมารวมไว้ด้วย

- ดำเนินการประเมินอันตรายเฉพาะไซต์งาน (site specific hazard assessments) เพื่อพิจารณาความเสี่ยงและความผิดพลาดทั้งหมด
- ผสานระบบตรวจจับและติดตามที่มีความแข็งแกร่ง เพื่อแจ้งเตือนล่วงหน้าเมื่อเกิดความผิดพลาดด้านการออกแบบ

การผลิต (Manufacturing):

- เพิ่มการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิต
- ขอรับการรับรองจากผู้จัดจำหน่าย
- รับประกันข้อกำหนดทางเทคนิคของระบบที่มีความแข็งแกร่ง
- จัดให้มีการทดสอบการยอมรับจากโรงงาน (Factory Acceptance Testing: FAT)

การบูรณาการ การประกอบ และการก่อสร้าง (Integration, Assembly and Construction: IAC):

- บรรจุหลักสูตรฝึกอบรมบุคลากรและการตรวจสอบคุณภาพระหว่างขั้นตอนการว่าจ้างและติดตั้ง
- ดำเนินการวิเคราะห์ความผิดพลาดในระดับระบบ โดยเฉพาะในส่วนที่เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ

การปฏิบัติงาน (Operation):

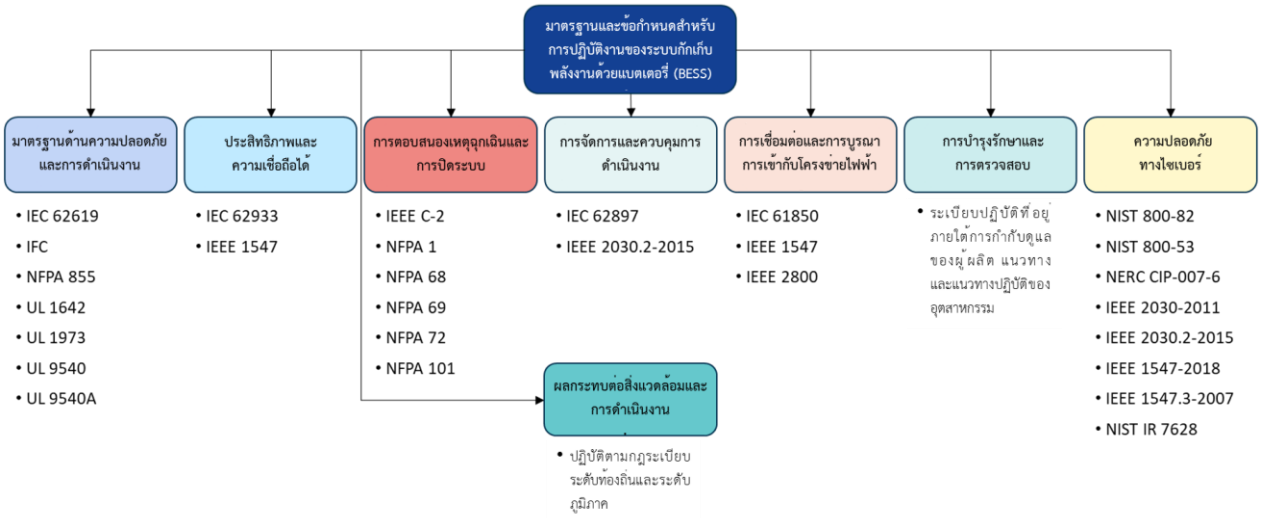
- ทำให้มั่นใจว่ามีการตรวจสอบแบตเตอรี่และการวิเคราะห์ข้อมูลเสริมการทำงานของระบบจัดการแบตเตอรี่ (BMS) โดยสร้างแนวโน้มและการวิเคราะห์เชิงคาดการณ์เพื่อระบุความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ตั้งแต่เนิ่น ๆ

สภาหัวหน้าเจ้าหน้าที่ดับเพลิงแห่งชาติของสหราชอาณาจักร (National Fire Chiefs Council: NFCC) และสำนักงานดับเพลิงและกู้ภัยรัฐนิวเซาท์เวลส์ของออสเตรเลีย (Fire and Rescue NSW: FRNSW) ได้จัดทำข้อกำหนด ด้านความปลอดภัยเกี่ยวกับระยะห่างและการจัดวางระบบ BESS ดังนี้

- NFCC แนะนำให้โครงการ BESS **เว้นระยะห่างอย่างน้อย 25 เมตรจากอาคารที่มีผู้พักอาศัย เพื่อลดความเสี่ยง** จากเหตุการณ์ความร้อนสูง (thermal events) และเพื่อให้การเข้าถึงของเจ้าหน้าที่ฉุกเฉินเป็นไปได้โดยสะดวก
- สำหรับระยะห่างระหว่างตู้คอนเทนเนอร์ BESS แนวทางของ FRNSW ระบุว่า หน่วย BESS ต้องแบ่งเป็นคลัสเตอร์ โดยคลัสเตอร์**แต่ละชุดต้องมีความยาวไม่เกิน 50 เมตรในแต่ละด้าน**
- **ต้องเว้นระยะห่างอย่างน้อย 1 เมตรระหว่างตู้คอนเทนเนอร์** โดยเฉพาะด้านที่มีแผงควบคุมการเข้าถึง (access panels) หรือช่องระบายอากาศ
- สำหรับหน่วย**ที่มีขนาดเกิน 50 kWh หรือมีระยะห่างน้อยกว่า 1 เมตร** จำเป็นต้องทำ**การทดสอบ UL9540A** เพื่อประเมินความเสี่ยงของการลุกลามของไฟ
- ในด้านการจัดวางภายในไซต์งาน (site layout) **หน่วย BESS ควรอยู่ห่างจากขอบเขตพื้นที่ อาคาร หรือแหล่งกำเนิดไฟอื่น ๆ อย่างน้อย 6 เมตร** เพื่อป้องกันการลุกลามของไฟ

เป็นสิ่งสำคัญที่จะเน้นย้ำว่า ข้อกำหนดเหล่านี้ใช้เป็นเพียง**แนวทาง (guidelines)** เท่านั้น และควรทำ**การประเมินความเสี่ยงเฉพาะไซต์งาน (site-specific risk assessment)** ทุกครั้ง เพื่อกำหนดระยะปลอดภัยและระเบียบปฏิบัติที่เหมาะสม การประเมินความเสี่ยงเฉพาะไซต์งานอาจรวมถึงการติดตั้งกำแพงกันไฟเมื่อไม่สามารถเว้นระยะตามมาตรฐานได้ การปฏิบัติตามข้อกำหนดด้านความปลอดภัย เช่น NFPA 855 (ของสหรัฐอเมริกา) เพื่อให้ครอบคลุมมาตรการความปลอดภัยทั้งหมด และการจัดให้มีเส้นทางการเข้าถึงที่ชัดเจนสำหรับเจ้าหน้าที่ดับเพลิงและบริการฉุกเฉินรอบพื้นที่ติดตั้ง BESS

6 มาตรฐานและข้อกำหนดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS)



รูปที่ 17: มาตรฐานและข้อกำหนดสำหรับการปฏิบัติงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS)

(ที่มา: *Sandia Energy Storage Safety*, *Underwriters Laboratories Standards & Engagement*)

ในระดับโลก มาตรฐานและข้อกำหนดต่าง ๆ กำลังกลายเป็นรากฐานสำคัญในการรับประกันความปลอดภัยและประสิทธิภาพของโครงการ BESS โดยมาตรฐานเหล่านี้ครอบคลุมแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบ การทดสอบ การจำกัดการลุกลามของภาวะความร้อนวิกฤต (thermal runaway) การตรวจจับไฟ และระเบียบปฏิบัติในการตอบสนองเหตุฉุกเฉิน รูปที่ 17 แสดงรายการรหัสมาตรฐานและข้อกำหนดหลักที่แบ่งตามหมวดหมู่ (ยกมาเป็นตัวอย่างเพียงบางส่วน) โดยมีคำอธิบายสั้น ๆ ของรหัสที่ใช้บ่อยที่สุดดังนี้

มาตรฐานด้านความปลอดภัยและการดำเนินงาน (Safety & Operation Standards)

- **IEC 62619:** กำหนดการทดสอบความปลอดภัยสำหรับเซลล์และโมดูลแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนภายใต้สภาวะผิดปกติ เช่น การชาร์จเกิน การลัดวงจร และความเค้นจากความร้อน
- **NFPA 855:** กำหนดข้อกำหนดด้านตำแหน่งติดตั้ง ระยะห่างระหว่างตู้ การตรวจจับ/ระงับอัคคีภัย และการวางแผนตอบสนองเหตุฉุกเฉินสำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งอยู่กับที่ (stationary)
- **UL 9540A:** กำหนดให้มีการทดสอบภาวะความร้อนวิกฤต (thermal runaway) ในระดับเซลล์ โมดูล และระบบเพื่อประเมินความเสี่ยงในการลุกลามของไฟ และใช้ข้อมูลนั้นในการออกแบบระยะห่างหรือฉนวนกันไฟ

ประสิทธิภาพและความเชื่อถือได้ (Performance & Reliability)

- **IEC 62933:** กำหนดข้อกำหนดด้านประสิทธิภาพและวิธีการทดสอบสำหรับระบบแบตเตอรี่แบบติดตั้งอยู่กับที่ (ความจุ ประสิทธิภาพ และอายุการใช้งาน)
- **IEEE 1547:** กำหนดข้อกำหนดด้านการทำงานต่อเนื่องของอินเวอร์เตอร์เมื่อเกิดเหตุขัดข้อง (inverter ride-through) การป้องกันการสร้างเกาะจ่ายไฟแยกจากโครงข่ายหลัก (anti-islanding) และการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้า/ความถี่ (voltage/frequency response) เพื่อให้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) สามารถทำงานได้อย่างน่าเชื่อถือเมื่อเชื่อมต่อกับระบบจ่ายไฟฟ้า

- **IEEE 2800:** กำหนดข้อกำหนดทางเทคนิคขั้นต่ำสำหรับการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายพลังงานแบบใช้อินเวอร์เตอร์ (IBRs) ขนาดใหญ่เข้ากับระบบส่งไฟฟ้า (ซึ่งรวมถึงการทำงานต่อเนื่องขณะเกิดความบกพร่องในระบบ (fault ride-through) และการสนับสนุนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (reactive power support))

การตอบสนองเหตุฉุกเฉินและการปิดระบบ (Emergency Response & Shutdown)

- **IEEE C-2:** จัดทำแนวทางสำหรับระเบียบปฏิบัติด้านการตัดพลังงานอย่างรวดเร็ว (rapid de-energization protocols) และขั้นตอนการปิดระบบอย่างปลอดภัย (safe shutdown procedures) ภายใต้สภาพแวดล้อมของสถานีไฟฟ้าย่อยและพื้นที่จัดเก็บพลังงาน (substation and storage environments)
- **NFPA 1 & NFPA 101:** กำหนดข้อกำหนดของเกณฑ์มาตรฐานอาคารและการป้องกันอัคคีภัยที่เกี่ยวข้องกับทางออกฉุกเฉิน (egress) กำแพงกันไฟ (fire barriers) และความปลอดภัยของผู้ใช้อาคาร (occupancy safety) เมื่อมีการติดตั้งระบบ BESS และระหว่างที่เกิดเหตุการณ์เกี่ยวกับความร้อนหรือไฟฟ้าขัดข้อง
- **NFPA 68:** ระบุวิธีการออกแบบแผงระบายแรงดัน (vent panels) และท่อระบายอากาศ (ducts) ภายในตู้คอนเทนเนอร์ BESS เพื่อระบายแรงดันออกอย่างปลอดภัยในกรณีที่เซลล์แบตเตอรี่เกิดภาวะความร้อนวิกฤต (thermal runaway)
- **NFPA 69:** ให้แนวทางในการป้องกันการระเบิดแบบ deflagration ในห้องแบตเตอรี่ โดยการควบคุมแหล่งกำเนิดประกายไฟ (ignition sources) การระบายอากาศ (ventilation) และการตรวจจับก๊าซ (gas detection)
- **NFPA 70:** กำหนดวิธีการเดินสายไฟ ข้อกำหนดในการตัดการเชื่อมต่อ และป้ายเตือนความปลอดภัยเฉพาะสำหรับการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน เพื่อให้เจ้าหน้าที่ฉุกเฉินเข้าถึงได้อย่างปลอดภัย
- **NFPA 72:** กำหนดข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์แจ้งเตือน แผงควบคุม และระบบติดตาม เพื่อแจ้งเตือนเจ้าหน้าที่ฉุกเฉินเมื่อเกิดเหตุอัคคีภัยหรือเหตุการณ์ก๊าซในระบบ BESS

การจัดการและควบคุมการปฏิบัติงาน (Operation Management & Control)

- **IEC 62897:** กำหนดข้อกำหนดสำหรับระบบบริหารจัดการพลังงาน (EMS) ในระบบไมโครกริด รวมถึงการพยากรณ์ การวางกำหนดการ (scheduling) และการควบคุมแบบกำกับดูแลระบบ BESS
- **IEEE 2030.2-2015:** แนะนำแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดสำหรับการตรวจสอบและควบคุมทรัพยากรพลังงานแบบกระจายศูนย์ (distributed energy resources) เพื่อให้มั่นใจว่าระบบ BESS สามารถปฏิบัติตามสัญญาณการสั่งการจ่ายไฟฟ้า (dispatch signals) และแบ่งปันข้อมูลสถานะสุขภาพของระบบ (health data) กับระบบ SCADA ของหน่วยงานสาธารณูปโภค

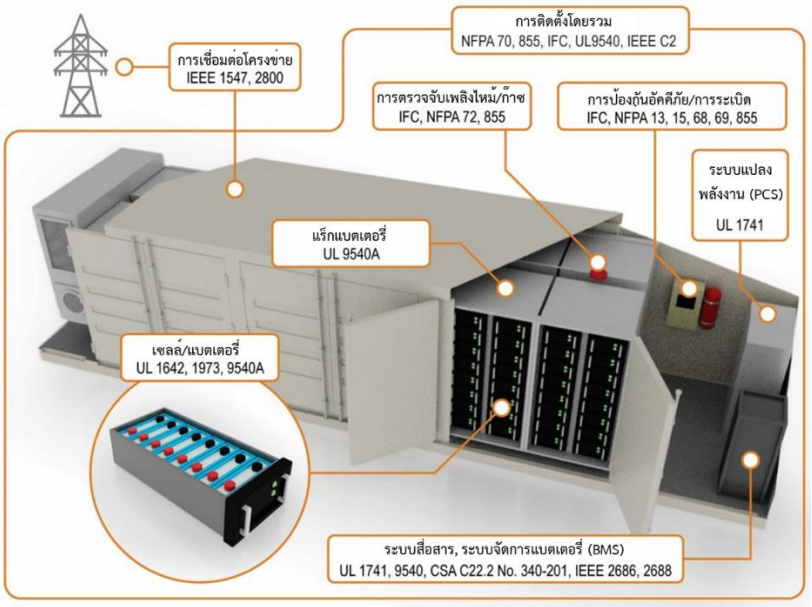
การเชื่อมต่อและการบูรณาการเข้ากับโครงข่ายไฟฟ้า (Interconnection & Grid Integration)

- **IEC 61850:** เป็นมาตรฐานสำหรับการสื่อสารภายในสถานีไฟฟ้าย่อย (ซึ่งรวมถึงโหนดเชิงตรรกะ (logical nodes) และการรับส่งข้อความ (messaging)) เพื่อให้มั่นใจว่า อุปกรณ์ป้องกันและควบคุมระบบ BESS สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างราบรื่นไร้รอยต่อ
- **IEEE 1547:** กำหนดข้อกำหนดระดับการเชื่อมต่อโครงข่าย (interconnection–level requirements) เช่น ความสามารถในการทำงานต่อเนื่องขณะเกิดความบกพร่องในระบบ (fault-ride-through) และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ

(reactive power) เพื่อให้มั่นใจว่าระบบ BESS สามารถเชื่อมต่อและทำงานประสานกับระบบจ่ายไฟฟ้า (distribution grid) ได้อย่างปลอดภัย

- **IEEE 2800:** กำหนดข้อกำหนดทางเทคนิคขั้นต่ำสำหรับการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายพลังงานแบบใช้อินเวอร์เตอร์ (IBRs) ขนาดใหญ่เข้ากับระบบส่งไฟฟ้า (ซึ่งรวมถึงการทำงานต่อเนื่องขณะเกิดความบกพร่องในระบบ (fault ride-through) และการสนับสนุนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (reactive power support))

รูปที่ 18 แสดงภาพประกอบตัวอย่างของตำแหน่งการนำรหัสและมาตรฐานต่าง ๆ ไปใช้งานภายในตู้คอนเทนเนอร์ BESS



รูปที่ 18: ตัวอย่างระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) พร้อมรหัสและมาตรฐานที่สำคัญ

(ที่มา: *Sandia Energy Storage Safety*)

7 หัวข้อในอนาคตและความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี

แนวโน้มที่กำลังเกิดขึ้นใหม่ในภาคส่วนการกักเก็บพลังงานสะท้อนให้เห็นถึงการเปลี่ยนผ่านไปสู่เทคโนโลยีแบตเตอรี่ รุ่นถัดไป การดำเนินงานที่ขับเคลื่อนด้วยระบบดิจิทัล และการบูรณาการเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) การพัฒนาเหล่านี้พร้อมที่จะขยายบทบาทของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ให้มากกว่าบริการด้านโครงข่ายไฟฟ้าแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นการปลดล็อกการใช้งานใหม่ๆ ในหลากหลายด้าน ทั้งการลดคาร์บอนในภาคอุตสาหกรรม ระบบขนส่งที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า (electric mobility) และโครงสร้างพื้นฐานของศูนย์ข้อมูล (data centre infrastructure)

ด้วยการเติบโตของปัญญาประดิษฐ์ (AI) และการใช้ไฟฟ้าปริมาณมากของศูนย์ข้อมูล บริษัทเทคโนโลยีรายใหญ่ เช่น Google, Apple และ Meta กำลังผลักดันความต้องการใช้ระบบ BESS เพื่อลดคาร์บอนฟุตพรินต์ของตน และได้ให้คำมั่นว่าจะใช้พลังงานที่ปล่อยคาร์บอนเป็นศูนย์ (carbon-free energy) ภายในปี พ.ศ. 2573 นอกจากนี้ ความต้องการแหล่งจ่ายไฟอย่างต่อเนื่องของศูนย์ข้อมูล รวมถึงพันธกรณีที่เพิ่มขึ้นในการบรรลุความเป็นกลางทางคาร์บอน (carbon neutrality) ทำให้ศูนย์ข้อมูลกลายเป็นพันธมิตรที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับระบบ BESS ไม่ว่าจะเป็นแบบเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าโดยตรง (grid-connected) หรือแบบติดตั้งอยู่หลังมิเตอร์ (behind-the-meter)

เทคโนโลยีแบตเตอรี่ใหม่กำลังเปลี่ยนจากการใช้สารอิเล็กโทรไลต์ชนิดของเหลวและเจล แบตเตอรี่แบบสถานะของแข็ง (Solid-State Batteries: SSB) และแบบกึ่งสถานะของแข็ง (Semi-Solid-State Batteries: SSSB) กำลังกลายเป็นเทคโนโลยีรุ่นถัดไป โดยมีการประกาศหลายครั้งซึ่งตั้งเป้าเตรียมความพร้อมเชิงพาณิชย์สำหรับช่วงประมาณปี พ.ศ. 2570 ถึง 2571 (Reuters) ทั้ง SSB และ SSSB เปลี่ยนมาใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็งแทนของเหลวเพื่อกำจัดความเสี่ยงในการเกิดเพลิงไหม้ ยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ให้ยาวนานขึ้น และให้ความหนาแน่นของพลังงานที่สูงขึ้น (สูงถึง 300–360 วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม (Watt-hour per kilogram หรือ Wh/kg) สำหรับ SSSB) พร้อมความปลอดภัยที่ดีขึ้น

นอกจากนี้ เคมีแบตเตอรี่ชนิดใหม่ เช่น แบตเตอรี่โซเดียมไอออน (Sodium-ion หรือ Na-ion) กำลังได้รับความสนใจในฐานะคู่แข่งทางเทคโนโลยีของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน เนื่องจากใช้วัสดุที่มีอยู่มากในธรรมชาติ มีสมรรถนะทางความร้อนที่ดี และมีความเสี่ยงด้านห่วงโซ่อุปทานต่ำ เทคโนโลยีโซเดียมไอออนกำลังเร่งตัวขึ้น โดยมีการประกาศติดตั้งระดับโครงข่ายครั้งแรกในปี พ.ศ. 2568 และเปิดตัวผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์สำหรับการใช้งานแบบติดตั้งอยู่กับที่ (Energy-Storage.News) แม้ว่าปัจจุบันระบบโซเดียมไอออนจะมีความหนาแน่นพลังงานต่ำกว่าแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน แต่ต้นทุนที่คาดว่าจะลดลงและข้อได้เปรียบด้านความปลอดภัย ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานแบบติดตั้งอยู่กับที่และการใช้งานที่ต้องการการชาร์จและคายประจุบ่อยครั้ง (high-cycling applications)

ประเด็นสำคัญอีกประการหนึ่งคือการนำแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า (EV) กลับมาใช้ซ้ำเป็นครั้งที่สอง (second-life) การนำโมดูล EV มาใช้ซ้ำเพื่อการกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งอยู่กับที่มีศักยภาพสูงในด้านประสิทธิภาพด้านต้นทุนและประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม การปรับเปลี่ยนชุดแบตเตอรี่ EV ที่ปลดระวางแล้วมาใช้สำหรับการจัดเก็บพลังงานแบบติดตั้งอยู่กับที่ สามารถช่วยลดต้นทุนด้านค่าใช้จ่ายในการลงทุน (capital expenditure costs) ได้ถึงร้อยละ 30–50 ในขณะที่ยังคงใช้ประโยชน์จากความจุแบตเตอรี่ที่คงเหลืออยู่ได้ถึงร้อยละ 70–80 อย่างไรก็ดี ยังคงมีความท้าทายเกี่ยวกับข้อกำหนดด้านการรับประกัน การบูรณาการระบบการประเมินลักษณะการเสื่อมสภาพ และระเบียบวิธีการทดสอบที่เป็นมาตรฐาน

8 ข้อเสนอแนะ

8.1 เสถียรภาพของระบบและการสนับสนุนโครงข่ายไฟฟ้า: ความถี่ การสร้างโครงข่าย (Grid-Forming) ความแออัด และการกู้คืนระบบไฟฟ้าหลังจากเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง (Black Start)

ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ที่ตอบสนองอย่างรวดเร็ว สามารถควบคุมความถี่ได้เร็วกว่ากังหันก๊าซแบบดั้งเดิมอย่างมาก ส่งผลให้เสถียรภาพของโครงข่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันก็ช่วยปลดปล่อยโรงไฟฟ้าพลังความร้อน (thermal units) ให้สามารถใช้ผลิตพลังงานเต็มที่หรือหยุดเพื่อบำรุงรักษา การจำลองและการศึกษาภาคสนามได้แสดงให้เห็นว่าแบตเตอรี่ที่มีขนาดเหมาะสมและติดตั้งระบบแปลงกำลังไฟฟ้าขั้นสูง (advanced power-conversion systems) สามารถปฏิบัติตามข้อกำหนดการตอบสนองต่อความถี่ที่เข้มงวด และสามารถกู้คืนความถี่ระบุ/ความถี่พิกัด (nominal frequency) ได้ภายในไม่กี่วินาทีแรกหลังเกิดเหตุการณ์รบกวน โดยกรณีศึกษาในสาธารณรัฐโดมินิกันและอิตาลีรายงานว่าสามารถลดค่าความเบี่ยงเบนของความถี่ลงได้ถึงร้อยละ 30–50 เมื่อใช้ระบบ BESS แทนกำลังผลิตสำรองหมุนเวียนแบบดั้งเดิม (conventional spinning reserve) (ScienceDirect, ScienceDirect) ข้อมูลจากองค์กร California Independent System Operator (CAISO) ยืนยันเพิ่มเติมว่า ปัจจุบันแบตเตอรี่สามารถรองรับสัดส่วนที่สำคัญของกำลังการผลิตสำรองทั้งสำหรับการเพิ่ม (regulation-up) และลด (regulation-down) โดยมีความแม่นยำในการตอบสนองที่เหนือกว่าโรงไฟฟ้าพลังความร้อนอย่างต่อเนื่อง (CAISO) ยิ่งไปกว่านั้น ในประเทศเยอรมนี กำลังผลิตสำรองปฐมภูมิ (primary reserve) ส่วนใหญ่ได้มาจากการใช้ระบบ BESS เพื่อรักษาเสถียรภาพความเบี่ยงเบนของความถี่โครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งเป็นการให้บริการที่จำเป็นอย่างยิ่งแก่ผู้ดำเนินการระบบส่ง (Transmission System Operator: TSO) (Gridcog) หากมีการจำลองบริการนี้ในประเทศไทย จะช่วยลดความจำเป็นในการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม (combined cycle) หรือโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซแบบวงจรเปิด (open cycle) ที่กำลังการผลิตบางส่วนเพื่อรักษากำลังผลิตสำรองฉุกเฉินเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะช่วยลดทั้งการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและการปล่อยมลพิษจากการเริ่มเดินเครื่อง จึงแนะนำให้มีการศึกษาอย่างละเอียดเพื่อกำหนดศักยภาพในการประหยัดเชื้อเพลิงอย่างแม่นยำ และประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบ BESS

เนื่องจากคาดการณ์ว่าการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์ (inverter-based generation) จะเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของกระแสลัดวงจร (short-circuit strength) และค่าความเฉื่อยของระบบ (inertia) จึงจะลดลง นอกจากนี้ พื้นที่ที่มีระดับกระแสลัดวงจรต่ำ หรือมีการปลดระวางหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบซิงโครนัส (synchronous units) จะยิ่งทำให้ความเฉื่อยของระบบลดลงอีก และถือเป็นพื้นที่เป้าหมายที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการนำระบบ BESS แบบสร้างโครงข่าย (grid-forming BESS) มาใช้งานในระยะเริ่มต้น อินเวอร์เตอร์แบบ grid-forming สามารถช่วยสนับสนุนเสถียรภาพของโครงข่ายไฟฟ้าได้โดยการทำให้เกิดกระแสลัดวงจรและความเฉื่อยโดยธรรมชาติ (inherent short circuit current and inertia) ดังนั้น กฎระเบียบต่างๆ จึงควรบังคับให้ระบบ BESS ขนาดใหญ่ที่ใช้กับระบบไฟฟ้าในระดับโครงข่ายจำเป็นต้องมีความสามารถในการสร้างโครงข่าย

การคัดเลือกตำแหน่งนำร่อง (pilot siting) ควรตั้งอยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์ความรุนแรงของระบบ (system severity analysis) มากกว่าการพิจารณาเพียงกรณีการใช้งานเดียว การวิเคราะห์นี้ควรจัดอันดับสถานีไฟฟ้าย่อยและแนวสายส่งโดยใช้ตัวชี้วัดที่วัดผลได้ เช่น ระดับกระแสลัดวงจร (fault level) การขาดแคลนความเฉื่อย (inertia shortfall) ส่วนเบี่ยงเบนของแรงดันไฟฟ้า (voltage excursions) ชั่วโมงความแออัด (congestion hours) การลดการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน (renewable curtailment) เวลาในการกู้คืนระบบหลังไฟดับ (restoration time after outages) และช่องว่างด้านความปลอดภัยแบบ N-1 ตำแหน่งที่มีความรุนแรงในอันดับต้น ๆ จะกลายเป็นพื้นที่เป้าหมายสำหรับการดำเนินโครงการนำร่อง

เพื่อแก้ไขปัญหาหลัก ณ ตำแหน่งนั้น ๆ ไม่ว่าจะเป็นการรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ความแข็งแรงของระบบ การกู้คืนระบบไฟฟ้าหลังจากเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง โดยไม่ต้องพึ่งพาแหล่งจ่ายไฟภายนอก (black start) หรือการบรรเทาความแออัดของโครงข่ายไฟฟ้า

นอกจากนี้ เมื่อกำลังการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (PV capacity) เพิ่มขึ้น การจัดการความแออัด ณ สถานีไฟฟ้าย่อยที่มีข้อจำกัดจึงกลายเป็นเรื่องสำคัญ เพื่อดูดซับพลังงานส่วนเกินในช่วงกลางวัน และคายประจุพลังงานเมื่อมีกำลังการผลิตว่าง ซึ่งจะช่วยชะลอการลงทุนปรับปรุงโครงข่ายไฟฟ้าออกไปได้ อุปกรณ์เสริมประสิทธิภาพโครงข่ายไฟฟ้า (grid boosters) ที่กำลังได้รับการพัฒนาในประเทศเยอรมนี ถือเป็นตัวอย่างที่นำไปใช้ได้จริงว่า BESS ถูกนำมาใช้เพื่อจัดการความแออัดและเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายไฟฟ้าได้อย่างไร (Consentec)

8.2 รูปแบบธุรกิจที่ปรับใช้ตามความต้องการ (Tailored Business Models) และแนวทางการจัดซื้อจัดจ้าง

สำหรับโครงการระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ขนาดใหญ่ระดับโครงข่ายที่ให้บริการด้านความมั่นคงของระบบไฟฟ้า การเป็นเจ้าของและดำเนินการโดยตรงโดยผู้ดำเนินการระบบหรือหน่วยงานสาธารณูปโภคจะให้ความยืดหยุ่นสูงสุดในการปรับใช้ BESS เพื่อปกป้องระบบไฟฟ้า การส่งมอบโครงการควรเป็นไปตามสัญญาแบบ EPC (งานวิศวกรรม งานจัดซื้อ และงานก่อสร้าง) พร้อมด้วยสัญญาบริการระยะยาว (LTSA) และการรับประกันประสิทธิภาพ ในกรณีที่มีการพิจารณาให้ภาคเอกชนเข้ามาร่วมลงทุน สามารถใช้โครงสร้างแบบ BOOT (สร้าง-เป็นเจ้าของ-ดำเนินงาน-โอน) และสัญญาที่อิงตามความพร้อมใช้งาน (availability-based contracts) สำหรับบริการที่มีการกำหนดขอบเขตอย่างชัดเจน

ในขณะที่การมีส่วนร่วมของภาคเอกชนสามารถกระตุ้นให้เกิดการแข่งขันและนวัตกรรมได้ แต่ต้องประเมินผลกระทบต่ออัตราค่าไฟฟ้าอย่างรอบคอบ การจัดซื้อจัดจ้างควรรวมการทดสอบผลกระทบต่ออัตราค่าไฟฟ้าภายใต้โครงสร้างผู้รับซื้อเพียงรายเดียว (ESB) และระบบอัตราค่าไฟฟ้าเดียวทั่วประเทศ โดยการประเมินควรอยู่บนพื้นฐานของต้นทุนรวมของระบบที่ต่ำที่สุด (least-total-system-cost) และมีมาตรการป้องกันไม่ให้ภาระค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา (Operation and Maintenance: O&M) และค่าใช้จ่ายทางการเงินที่ไม่จำเป็นถูกผลักไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าปลายทาง เอกสารจัดซื้อจัดจ้างควรกำหนดกฎเกณฑ์ที่ชัดเจนเสมอเกี่ยวกับสิทธิในการสั่งจ่ายไฟฟ้า (dispatch rights) ขอบเขตการวัดค่า (metering boundaries) การจัดการเมื่อมีการลดการผลิตไฟฟ้า (curtailment treatment) ช่วงเวลาความพร้อมของสถานะการชาร์จ (state-of-charge readiness windows) และการจัดเตรียมการแบ่งปันต้นทุน (cost-sharing arrangements)

โครงสร้างสัญญาซึ่งกำหนดวิธีการใช้กำลังการผลิตและบริการของ BESS ควรสนับสนุนผู้ใช้งานกลุ่มแรก เช่น ศูนย์ข้อมูล (data centres) ที่เข้าร่วมโครงการนำร่องด้านการเข้าถึงโดยบุคคลที่สาม (third-party access pilot) ภายใต้โครงการนำร่องนี้ ศูนย์ข้อมูลจะเป็นผู้จัดหาไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนเอง และรับภาระค่าปรับความไม่สมดุล (imbalance penalties) ที่ต้องจ่ายให้แก่ผู้ดำเนินการระบบ (กฟผ.) ในกรณีที่การส่งมอบพลังงานไฟฟ้าเบี่ยงเบนไปจากกำหนดการที่วางไว้ ระบบ BESS สามารถช่วยลดค่าปรับเหล่านี้ได้โดยการเกลี่ยความผันผวนของพลังงานหมุนเวียนให้ราบรื่นขึ้น และให้การสนับสนุนด้านความถี่และแรงดันไฟฟ้า รูปแบบที่เหมาะสม ได้แก่ การติดตั้ง BESS ในพื้นที่ใช้งาน (on-site) หรือที่สถานีไฟฟ้าย่อย (substation-sited) โดยมีช่วงเวลาการจ่ายไฟฟ้าที่แน่นอนในช่วงค่ำ (firm evening blocks) และมีการกำหนดเวลาการตอบสนองที่ชัดเจน หรือการจัดเตรียมสัญญาแบบจ้างผลิต (tolling arrangements) ที่ให้สิทธิการสั่งจ่ายพลังงานแก่ผู้ดำเนินการระบบ สัญญาควรมี

การระบุอย่างชัดเจนและครอบคลุมรายละเอียดที่สำคัญ เช่น ความเสี่ยงจากความไม่สมดุล (imbalance risk) เกณฑ์พื้นฐานด้านประสิทธิภาพและการทวนสอบ (performance baselines and verification) ความพร้อมใช้งาน (availability) อัตราการเปลี่ยนโหลดหรือเร่งกำลังการผลิต (ramp rate) และข้อกำหนดด้านสถานะการชาร์จ เพื่อให้มั่นใจว่า BESS พร้อมใช้งานเมื่อจำเป็น

8.3 การเปลี่ยนช่วงเวลาการใช้พลังงาน (Energy Shifting) และระบบไฮบริดพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (hybrid PV+BESS)

ระบบไฟฟ้าของประเทศไทยยังคงพึ่งพาก๊าซธรรมชาติเป็นหลัก โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) รายงานว่าโรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่ใช้ก๊าซธรรมชาติผลิตไฟฟ้าเกือบร้อยละ 60 ของไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2568 ในขณะที่ถ่านหินและไฟฟ้าที่นำเข้าคิดเป็นส่วนใหญ่ของแหล่งพลังงานที่เหลือ (EGAT) เนื่องจากราคาซื้อขายไฟฟ้าส่วนเพิ่ม (marginal price) ในระบบไฟฟ้าของไทยอิงตามต้นทุนของโรงไฟฟ้าส่วนเพิ่ม (โรงไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยก๊าซธรรมชาติ) ทำให้ต้นทุนส่วนเพิ่มของระบบ (system marginal cost) มีความอ่อนไหวต่อราคา LNG ในตลาดโลก ในขณะที่ค่าไฟฟ้าขายปลีกจะถูกปรับผ่านกลไกค่าไฟฟ้าผันแปร (Fuel Adjustment Tariff หรือ Ft) เป็นรอบทุก ๆ สี่เดือน (Global Energy Monitor) ด้วยการชาร์จพลังงานในช่วงเวลาที่มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า (เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ส่วนเกินช่วงกลางวัน) และคายประจุในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดในช่วงค่ำ ระบบ BESS ขนาดใหญ่ที่ใช้กับระบบไฟฟ้าในระดับโครงข่ายสามารถเข้ามาแทนที่โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซที่มีต้นทุนสูงและต้องเร่งกำลังผลิตอย่างรวดเร็ว (ramping gas units) พร้อมทั้งช่วยปรับให้กราฟเส้นโค้งของความต้องการใช้ไฟฟ้าของระบบมีความราบเรียบสม่ำเสมอมากขึ้น ประสบการณ์จากรัฐแคลิฟอร์เนียแสดงให้เห็นว่า แบตเตอรี่ขนาด 4 ชั่วโมงได้รับการสั่งจ่ายพลังงานเพื่อให้บริการด้านการเร่งกำลังผลิตอย่างยืดหยุ่น (flexible-ramping) และบริการค้ากำไรจากส่วนต่างของราคาไฟฟ้า (arbitrage services) ซึ่งช่วยกดราคาสูงสุดในช่วงที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด และลดการเดินเครื่องแบบสลับกับการหยุดการทำงานของกังหันก๊าซ (gas-turbine cycling) รายงานการกักเก็บพลังงานของ CAISO ประจำปี ค.ศ. 2024 (พ.ศ. 2567) ระบุว่าการลดลงที่เห็นได้ชัดของความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงค่ำนั้นเป็นผลมาจากแบตเตอรี่ที่เปิดใช้งานอยู่ซึ่งมีขนาดกำลังผลิตรวม 10 GW (CAISO) การนำระบบที่เทียบเคียงกันนี้มาปรับใช้ในประเทศไทย คาดว่าจะช่วยลดต้นทุนของระบบไฟฟ้า และลดความอ่อนไหวของอัตราค่าไฟฟ้าต่อการพุ่งสูงขึ้นของราคา LNG ได้

ควรแยกแยะรูปแบบการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) ออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ระบบไฮบริดพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (hybrid PV+BESS) และระบบ BESS แบบติดตั้งเดี่ยว (standalone BESS) ในรูปแบบไฮบริด ระบบ BESS จะถูกติดตั้งที่โรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเพื่อช่วยเกลี่ยกำลังการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้านั้น ๆ ให้ราบเรียบขึ้น และให้รูปแบบการผลิตที่คาดการณ์ได้แม่นยำยิ่งขึ้น โรงไฟฟ้าไฮบริดสามารถกำหนดตารางการผลิตผ่านสัญญาซื้อขายไฟฟ้าแบบมีภาระผูกพันบางส่วน (partial-firming PPAs) เพื่อเฉลี่ยพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนเกินช่วงกลางวันไปตอบสนองความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดในช่วงค่ำ ซึ่งจะช่วยลดการใช้งานโรงไฟฟ้าก๊าซที่มีต้นทุนสูงที่สุดในช่วงที่ต้องเร่งกำลังผลิตในช่วงค่ำ และจำกัดจำนวนรอบการเริ่มเดินเครื่องและหยุดเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน (thermal start-stop cycles) ลงได้

ในรูปแบบรวมศูนย์ (centralised model) ระบบ BESS แบบติดตั้งเดี่ยว (standalone BESS) จะถูกวางตำแหน่งไว้ในจุดยุทธศาสตร์ของโครงข่ายไฟฟ้า โดยไม่ขึ้นกับโรงไฟฟ้าต้นกำลัง การสั่งจ่ายพลังงานจะถูกกำกับโดยผู้ดำเนินการระบบเพื่อตอบสนองความต้องการของระบบในภาพรวมซึ่งครอบคลุมแหล่งพลังงานหมุนเวียนหลายแหล่ง รวมถึงการเร่งกำลังผลิต

ช่วงค่ำ การตอบสนองต่อความถี่ การสนับสนุนแรงดันไฟฟ้า การบรรเทาความแออัดของโครงข่าย และความพร้อมในการกู้คืนระบบไฟฟ้าหลังจากเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง โดยไม่ต้องพึ่งพาแหล่งจ่ายไฟภายนอก (black-start readiness) เพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นในการดำเนินงานสูงสุดภายใต้โครงสร้างผู้รับซื้อเพียงรายเดียว (ESB) ของประเทศไทย แนวทางแบบรวมศูนย์ (centralized approach) จะช่วยให้ผู้ดำเนินการระบบสามารถใช้ประโยชน์จากสินทรัพย์ BESS ได้ดีขึ้น และปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบโดยรวมให้ดีขึ้น ดังนั้น ในระยะสั้นจึงควรให้ความสำคัญกับการติดตั้ง BESS ในจุดยุทธศาสตร์ของโครงข่ายไฟฟ้า (grid-sited BESS) ที่สามารถสั่งจ่ายพลังงานได้แบบรวมศูนย์ ซึ่งจะช่วยลดความไร้ประสิทธิภาพของระบบ และสนับสนุนเสถียรภาพของอัตราค่าไฟฟ้าผ่านกลไกค่าไฟฟ้าผันแปร (Ft) สำหรับระยะกลาง โรงไฟฟ้าไฮบริดที่มีระบบ BESS ขนาดใหญ่ (ตั้งแต่ 4 ชั่วโมงขึ้นไป) สามารถนำมาใช้เพื่อสนับสนุนโครงข่ายไฟฟ้าได้เพิ่มเติมผ่านการใช้ประโยชน์จากโครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่ (จุดเชื่อมต่อโครงข่าย) ให้ดียิ่งขึ้น การลดการเผาไหม้เชื้อเพลิงราคาแพง และลดรอบการเริ่มเดินเครื่องและหยุดเดินเครื่องของหน่วยผลิตไฟฟ้าที่มีต้นทุนสูงสุด อีกทั้งยังมอบความยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย

8.4 ร่างแผนที่นำทางที่สอดคล้องกับแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ พ.ศ. 2567-2580 (PDP24-aligned Roadmap) และแนวโน้มด้านความสามารถในการแข่งขัน

8.4.1 ร่างแผนที่นำทางที่สอดคล้องกับแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ พ.ศ. 2567-2580 (PDP24-aligned Roadmap)

ร่างแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ พ.ศ. 2567-2580 (PDP24) ฉบับปัจจุบัน ได้ยกระดับบทบาทของพลังงานหมุนเวียนและตระหนักถึงความจำเป็นของความยืดหยุ่นในระบบ แผนร่าง PDP24 คาดการณ์ว่าจะมีการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) สูงถึง 10 GW ควบคู่ไปกับกำลังผลิตจากพลังงานหมุนเวียนใหม่อีก 35 GW ภายในปี พ.ศ. 2580 และมีโครงการไฮบริดอีกเกือบ 1 GW ที่ได้รับการอนุมัติและลงนามในสัญญาแล้วตั้งแต่ปี พ.ศ. 2565 (Asian Insiders)

แผนที่นำทางสำหรับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS Roadmap) ต่อไปนี้สอดคล้องกับร่างแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ พ.ศ. 2567-2580 (PDP24) ของประเทศไทย และตั้งสมมติฐานว่าโครงสร้างภาคส่วนพลังงานไฟฟ้าแบบมีผู้รับซื้อเพียงรายเดียว (ESB) ของประเทศจะยังคงดำเนินต่อไปในอนาคตอันใกล้ กรอบเวลาในแผนที่นำทางนี้เป็นเพียงข้อเสนอสำหรับการดำเนินการหลัก ๆ และอิงตามหมุดหมาย (milestones) ที่ได้รับการตรวจสอบแล้ว (เช่น ข้อกำหนดทางเทคนิค การอนุมัติ และความพร้อมในการชำระเงิน) มากกว่าที่จะขึ้นอยู่กับการปฏิรูปที่ยังไม่ได้เกิดขึ้น แผนที่นำทางดังกล่าวมีโครงสร้างแบ่งออกเป็นสามระยะ (phases) ซึ่งสะท้อนถึงระดับความพร้อมของเทคโนโลยี กฎเกณฑ์ของตลาด และขีดความสามารถในการจัดซื้อจัดจ้าง

ระยะที่ 1 พ.ศ. 2569-2571

- สิ่งที่มีความสำคัญอันดับแรก ๆ คือการวางรากฐานด้านเทคนิคและกฎระเบียบ ควบคู่ไปกับการส่งมอบกำลังการผลิตที่ตรงเป้าหมาย ณ จุดวิกฤตที่สุดภายใต้โครงสร้างผู้รับซื้อเพียงรายเดียว (ESB) ทั้งนี้ ควรดำเนินการวิเคราะห์ระบบเพื่อจัดอันดับสถานีไฟฟ้าย่อยและแนวสายส่งตามตัวชี้วัดความรุนแรง จากนั้นจึงจัดทำโครงการนำร่องในตำแหน่งที่ได้รับการจัดอันดับสูงสุด
- การส่งมอบโครงการจะดำเนินการผ่านการเป็นเจ้าของโดยหน่วยงานสาธารณูปโภค (utility ownership) ผ่านสัญญา EPC ที่มีการกำกับดูแล (regulated EPC) พร้อมด้วยสัญญาบริการระยะยาว (LTSA) และการรับประกันประสิทธิภาพ การจัดซื้อจัดจ้างแต่ละครั้งจะต้องผ่านการทดสอบต้นทุนรวมของระบบที่ต่ำที่สุด (least-total-system-cost) และการทดสอบผลกระทบต่อค่าไฟฟ้าผันแปร (Ft) เพื่อรักษาความสามารถในการจ่ายค่าไฟฟ้าภายใต้โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าเดียวทั่วประเทศ
- ในขณะเดียวกัน ควรมีการจัดประมูลนำร่องขนาดเล็กสำหรับระบบ BESS ที่สั่งการจากส่วนกลาง (centrally dispatched BESS) พร้อมข้อกำหนดทางเทคนิคที่เฉพาะเจาะจง เพื่อใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานสำหรับราคาและความสามารถของระบบ

ระยะที่ 2 พ.ศ. 2571-2575

- มีการขยายกำลังการผลิตเพิ่มเติม ณ จุดวิกฤตที่ได้รับการจัดอันดับสูงสุด เมื่อมีการบูรณาการพลังงานหมุนเวียนเข้าสู่ระบบมากขึ้น โดยแนวทางหลักยังคงเป็นการใช้ระบบ BESS ที่สั่งการจากส่วนกลาง (centrally dispatched BESS) (สัญญา EPC+LTSA) ซึ่งให้บริการตามที่กำหนด
- การประมูลสำหรับระบบ BESS แบบติดตั้งเดี่ยว (standalone BESS) หรือแบบไฮบริด (hybrid PV+BESS) ควรจัดขึ้นเพื่อทดสอบช่วงเวลาการสั่งจ่ายพลังงานในช่วงค่ำ กฎเกณฑ์เกี่ยวกับการชาร์จและการลดกำลังการผลิตไฟฟ้า และการจ่ายเงินตามประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน เพื่อสำรวจความสนใจของตลาดและสร้างเกณฑ์มาตรฐานด้านต้นทุนของผู้พัฒนา และเมื่อต้นแบบของโครงการนำร่องถูกนำมาใช้ในทางปฏิบัติ เอกสารที่เป็นมาตรฐานจะถูกเผยแพร่เพื่อการใช้งานในอนาคต
- มีการจัดทำชุดเครื่องมือทางการเงิน (financing toolkit) สำหรับรัฐวิสาหกิจและผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ เพื่ออำนวยความสะดวกในการก่อสร้างโครงการให้สำเร็จ พร้อมกับมีรายได้ที่ตกลงตามสัญญา

ระยะที่ 3 พ.ศ. 2576-2580

- เมื่อมีการกำหนดคุณสมบัติทางเทคนิคและกระบวนการมาตรฐานแล้ว สามารถขยายการส่งมอบระบบ BESS ได้ในพื้นที่ที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าสามารถลดต้นทุนและความเสี่ยงของระบบได้ มีการนำสัญญาณแบ่งโซนสำหรับการบรรเทาความแออัดมาใช้กับระบบไฮบริด และระบบ BESS ที่ติดตั้งในโครงข่ายไฟฟ้า (network-sited BESS) ในพื้นที่ที่มีการลดกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงและมีข้อจำกัดมาก ในขณะที่อัตราการขยายจะถูกปรับเพื่อให้เป็นไปตามตัวชี้วัดด้านความยืดหยุ่น เช่น การครอบคลุมความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดสุทธิในช่วงค่ำ และการคาดการณ์การสูญเสียโหลด
- เมื่อมีการจัดตั้งกลไกการซื้อขายและการชำระราคาอย่างเป็นทางการแล้ว การประมูลแข่งขันก็จะสามารถขยายขอบเขตออกไปได้ตามความเหมาะสม ประเทศไทยควรพิจารณาการปรับไปสู่ตลาดเปิดที่ระบบ BESS สามารถสร้างขึ้นได้โดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการประมูลหรือการจัดหาเงินทุนโดยอาศัยรายได้จากการทำกำไรจากส่วนต่างของราคาไฟฟ้า (arbitrage revenues)
- การปรับปรุงแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ (PDP) จะผนวกรวมต้นทุนที่สังเกตได้และประสิทธิภาพการดำเนินงานที่เกิดขึ้นจริงเข้าไว้ด้วย ในขณะที่การจัดอันดับความรุนแรงและการทดสอบผลกระทบต่อค่า Ft จะได้รับการทบทวนและปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้แผนที่นำทางยังคงสอดคล้องกับความต้องการของระบบไฟฟ้าของประเทศไทยที่เปลี่ยนแปลงไป และบรรลุวัตถุประสงค์ด้านอัตราค่าไฟฟ้า

รูปที่ 19: แผนที่นำทางสำหรับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS Roadmap) ที่สอดคล้องกับร่างแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ พ.ศ. 2567-2580 (PDP24)

(ที่มา: Energynautics GmbH)

8.4.2 แนวโน้มด้านความสามารถในการแข่งขัน

ในขณะที่ต้นทุนของพลังงานแสงอาทิตย์ (PV) และแบตเตอรี่ลดลง ต้นทุนสัมพัทธ์ของการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซในช่วงเวลาความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดอาจเพิ่มสูงขึ้นได้ การวิเคราะห์ล่าสุดจากหน่วยวิจัยเชิงกลยุทธ์บลูมเบิร์ก (BloombergNEF) สำหรับประเทศไทยระบุว่า พลังงานแสงอาทิตย์ ลม และแบตเตอรี่ สามารถลดการพึ่งพาการนำเข้า LNG ได้อย่างเป็นรูปธรรม ข้อมูลนี้เป็นพื้นฐานของสถานการณ์จำลองที่นำเสนอในที่นี้ และสนับสนุนการจัดซื้อพลังงานหมุนเวียนแบบมีภาระผูกพันเป็นระยะ

(phased procurement of firm renewable supply) ตัวชี้วัดต่อไปนี้ในตารางที่ 3 เป็นกรอบการคัดกรองอย่างง่ายสำหรับนักวางแผนและนักลงทุน โดยควรนำไปใช้ร่วมกับการทดสอบความอ่อนไหว (sensitivity tests) ต่อราคาเชื้อเพลิง อัตราคิดลด (discount rates) และการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์

ตารางที่ 3: สถานการณ์จำลองในอนาคตเกี่ยวกับความสามารถในการแข่งขันของระบบไฮบริดพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (hybrid PV+BESS)

(ที่มา: *BNEF*)

สถานการณ์จำลอง (Scenario)	ตัวชี้วัดหลัก	นัยสำคัญ (หรือผลกระทบที่ตามมา)
ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยปรับเฉลี่ย (LCOE) ของระบบ hybrid PV+BESS < LCOE ของการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซ	ความเท่าเทียมกันหรือความได้เปรียบด้านต้นทุน	การลงทุนในกำลังการผลิตใหม่มักจะเลือกใช้ระบบ hybrid PV+BESS มากกว่าโรงไฟฟ้าก๊าซ
LCOE ของระบบ PV < ต้นทุนเชื้อเพลิงก๊าซ	ศักยภาพในการเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิง	พลังงานแสงอาทิตย์ (PV) เริ่มเข้าแทนที่การผลิตไฟฟ้าจากก๊าซในช่วงเวลาความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดช่วงกลางวัน
LCOE ของระบบ hybrid PV+BESS < ต้นทุนเชื้อเพลิงก๊าซ	ตัวเลือกด้านพลังงานหมุนเวียนที่พร้อมใช้งานตลอด 24 ชั่วโมง 7 วัน หรือตลอดเวลา (24/7)	โรงไฟฟ้าก๊าซจะดำเนินการเป็นหลักในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดขีด (extreme peaks) หรือในช่วงที่ระบบไฟฟ้าขัดข้อง (outages) เท่านั้น
โรงไฟฟ้าก๊าซไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (ไม่ทำกำไร) เมื่อมีอัตราการใช้งานต่ำและต้นทุนเชื้อเพลิงสูง	ความเสี่ยงที่จะกลายเป็นสินทรัพย์ที่สูญค่าในอนาคต (stranded asset risk)	จำเป็นต้องมีกลยุทธ์การเปลี่ยนผ่านสำหรับโรงไฟฟ้าที่ได้รับผลกระทบ (จากภาวะที่ไม่คุ้มทุน)

ในช่วงไม่กี่ปีข้างหน้านี้ กรอบการทำงานนี้บ่งบอกถึงโอกาสหลายประการ ในทางปฏิบัติ กำลังการผลิตไฟฟ้าในช่วงค่ำสามารถจัดหาได้จากระบบ hybrid PV+BESS แทนที่จะเป็นการสร้างโรงไฟฟ้าก๊าซแห่งใหม่ เมื่อบรรลุความเท่าเทียมกันด้านราคา (price parity) โรงไฟฟ้าก๊าซที่มีอยู่เดิมบางแห่งสามารถเปลี่ยนไปให้บริการตามฤดูกาลหรือเป็นโรงไฟฟ้าสำรองได้ และการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานในโครงข่ายไฟฟ้า (network-sited storage) ในพื้นที่ที่มีการลดกำลังการผลิตไฟฟ้าสูง สามารถเพิ่มกำลังการผลิตที่มีประสิทธิภาพและลดต้นทุนจากความแออัดของระบบ การส่งมอบโครงการจะต้องอาศัยเอกสารจัดซื้อจัดจ้างที่ชัดเจน ซึ่งจะกำหนดสิทธิในการสั่งจ่ายไฟฟ้า (dispatch rights) ช่วงเวลาการจ่ายไฟฟ้าในช่วงค่ำ (evening blocks) การจัดการเมื่อมีการลดการผลิตไฟฟ้า (curtailment treatment) พลังงานสำหรับการชาร์จ (charging energy) และการเสริมสร้างศักยภาพบุคลากรในด้านการควบคุมการสร้างโครงข่าย (grid-forming controls) รหัสความปลอดภัย (safety codes) การทดสอบการเดินระบบ (commissioning) และการชำระเงินตามสัญญาโดยใช้ข้อมูลที่ผ่านการทวนสอบแล้ว (verified data)

9 บทสรุปและแนวโน้มในอนาคต

ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ใช้ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ (solar PV) กำลังค่อยๆ กลายเป็นเครื่องมือที่นำมาใช้ได้จริงสำหรับการลดต้นทุนระบบไฟฟ้าของประเทศไทย การจัดการความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดในช่วงค่ำ และการสนับสนุนเสถียรภาพในขณะที่สัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียนเพิ่มสูงขึ้น รายงานฉบับนี้มุ่งเน้นไปที่ระบบกักเก็บพลังงานขนาดใหญ่ที่ใช้กับระบบไฟฟ้าในระดับโครงข่าย และสะท้อนถึงโครงสร้างผู้รับซื้อเพียงรายเดียว (ESB) ของประเทศไทย ซึ่งบริการด้านความมั่นคงของระบบไฟฟ้าจะดำเนินการโดย กฟผ. กฟภ. และ กฟน. ในบริบทนี้ การใช้งานที่มีคุณค่าสูงสุดในระยะใกล้ ได้แก่ การตอบสนองต่อความถี่อย่างรวดเร็วและการควบคุมความถี่ การควบคุมแรงดันไฟฟ้า การจัดการความแออัดของโครงข่าย และความพร้อมสำหรับการกู้คืนระบบไฟฟ้าหลังจากเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง โดยไม่ต้องพึ่งพาแหล่งจ่ายไฟภายนอก (black start readiness) ความสามารถในการสร้างโครงข่าย (grid-forming capability) จะมีความสำคัญ เมื่อการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้น และความแข็งแรงของกระแสลัดวงจร (short-circuit strength) ลดลง

รูปแบบการใช้งานที่เกี่ยวข้องมีอยู่สองรูปแบบ ได้แก่ ระบบ hybrid PV+BESS ซึ่งสามารถช่วยปรับแต่งรูปแบบการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าได้ แต่ถูกจำกัดอยู่กับระบบพลังงานแสงอาทิตย์เฉพาะแห่ง ทำให้มีความยืดหยุ่นน้อยกว่า ดังนั้น จุดเน้นหลักในระยะสั้นควรอยู่ที่ระบบกักเก็บพลังงานที่ติดตั้ง ณ สถานีไฟฟ้าย่อย (network-sited storage at substations) ซึ่งสามารถสั่งจ่ายพลังงานแบบรวมศูนย์ได้ การเป็นเจ้าของโดยหน่วยงานสาธารณูปโภค (utility ownership) พร้อมกับการส่งมอบภายใต้รูปแบบสัญญา EPC (งานวิศวกรรม งานจัดซื้อ และงานก่อสร้าง) และสัญญาบริการระยะยาว (LTSA) จะทำให้ผู้ดำเนินการระบบมีอำนาจควบคุมเต็มที่ในการจัดการบริการที่หลากหลาย (stack services) และตอบสนองต่อความต้องการที่เกิดขึ้นแบบเรียลไทม์ได้ ในกรณีที่มีการพิจารณาการมีส่วนร่วมของภาคเอกชน ขอบเขตงานควรถูกกำหนดอย่างรัดกุม (tightly scoped) อิงตามประสิทธิภาพ (performance-based) และทดสอบในขนาดเล็กก่อน การทดลองภายใต้โครงการ ERC Sandbox ให้หลักฐานทางเทคนิคที่มีประโยชน์เพื่อนำไปต่อยอดได้ ประเทศจาเมกานำเสนอตัวอย่างสำหรับโครงสร้างผู้รับซื้อเพียงรายเดียว (ESB) โดยที่การไฟฟ้าจาเมกา (Jamaica's Public Service) ได้เริ่มว่าจ้างระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดที่เป็นเจ้าของโดยการไฟฟ้าเอง ณ สถานีไฟฟ้าย่อย Hunts Bay เพื่อสนับสนุนความถี่อย่างรวดเร็ว ปัจจุบันการไฟฟ้าจาเมกากำลังจัดซื้อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 115 เมกะวัตต์ พร้อมระบบ BESS ขนาด 171.5 เมกะวัตต์ เพื่อทดแทนโรงไฟฟ้า Hunts Bay เดิมที่เสื่อมสภาพ กรณีนี้แสดงให้เห็นเส้นทางที่คล้ายคลึงกันจากการทดลองนำร่องที่มีการกำกับดูแล ไปสู่การจัดหากำลังการผลิตขนาดใหญ่ขึ้นที่สั่งการจ่ายพลังงานแบบรวมศูนย์ (Jamaica Gleaner)

รูปแบบธุรกิจและการจัดซื้อจัดจ้างควรมีความสอดคล้องกับการออกแบบตลาดในปัจจุบัน ขณะเดียวกันก็ต้องเตรียมพร้อมสำหรับการปฏิรูปที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต สัญญาที่อิงตามประสิทธิภาพ (performance-based contracts) จำเป็นต้องมีคำจำกัดความที่ชัดเจนสำหรับการส่งมอบพลังงานในช่วงค่ำ ความแม่นยำในการตอบสนอง ความพร้อมใช้งาน และความพร้อมของสถานะการชาร์จ (state-of-charge readiness) ควบคู่ไปกับขอบเขตการวัดค่า (metering boundaries) ข้อจำกัดรอบการชาร์จ-คายประจุ (cycling limits) และการชำระเงินที่โปร่งใส การจัดซื้อจัดจ้างทั้งหมดควรผ่านการทดสอบต้นทุนรวมของระบบที่ต่ำที่สุด (least-total-system-cost) และการทดสอบผลกระทบต่อค่าไฟฟ้าผันแปร (Ft impact) เพื่อปกป้องผู้ใช้ไฟฟ้าปลายทางภายใต้โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าเดียวทั่วประเทศ โดยมีข้อแนะนำให้มีการประมูลนำร่องที่มีข้อกำหนดทางเทคนิคที่ชัดเจนเพื่อสำรวจความสนใจของตลาดและการค้นหาระดับราคาที่เหมาะสม ในขณะที่ต้นทุนของพลังงานแสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง ทั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดและแบบสั่งการจากส่วนกลางสามารถช่วยลด

การใช้เชื้อเพลิงจากโรงไฟฟ้าก๊าซที่มีต้นทุนสูงที่สุด ลดการสั่งจ่ายไฟฟ้าซ้ำ (redispatch) และลดการลดการผลิตไฟฟ้า และปรับปรุงเสถียรภาพของอัตราค่าไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้นได้

แผนที่นำทางนี้จัดลำดับการดำเนินการให้สอดคล้องกับร่างแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ พ.ศ. 2567-2580 (draft-PDP24) และจัดลำดับการส่งมอบออกเป็นสามระยะ ได้แก่ ระยะที่ 1 กำหนดมาตรฐานและดำเนินโครงการนำร่องที่ตรงเป้าหมาย ระยะที่ 2 ขยายขนาดกำลังการผลิตทั้งแบบไฮบริดและแบบติดตั้งในโครงข่ายไฟฟ้า (network-sited capacity) พร้อมทั้งเริ่มกระบวนการประมูล และระยะที่ 3 ขยายการติดตั้งในพื้นที่ที่พิสูจน์แล้วว่ามีคุณค่าสูงสุด ขยายการประมูลแข่งขันให้กว้างขึ้น และอาจเปลี่ยนไปสู่การสร้างตลาดเปิดที่ระบบ BESS สามารถเข้าร่วมได้โดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการประมูล

ขั้นตอนต่อไปจะเกี่ยวข้องกับสามระยะสำคัญ ระยะแรก จำเป็นต้องวางรากฐานโดยการสรุปข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับระบบ BESS ที่ติดตั้งในโครงข่ายไฟฟ้า ข้อกำหนดเหล่านี้ควรครอบคลุมประเด็นสำคัญต่าง ๆ เช่น ความสามารถในการสร้างโครงข่าย (grid-forming capabilities) ระบบป้องกัน การสื่อสาร ความปลอดภัยจากอัคคีภัย ความพร้อมของสถานะการชาร์จ (state-of-charge readiness) และความแม่นยำในการตอบสนอง ควบคู่ไปกับการดำเนินการนี้ ควรดำเนินการวิเคราะห์ความรุนแรงของระบบให้เสร็จสิ้น เพื่อจัดทำรายชื่อสถานีไฟฟ้าย่อยและแนวสายส่งตามลำดับความสำคัญ

ลำดับถัดไป การส่งมอบควรเริ่มต้นที่จุดวิกฤตที่สุด ซึ่งเกี่ยวข้องกับการจัดซื้อจัดจ้างและการทดสอบการเดินระบบ BESS ระยะที่ 1 ที่หน่วยงานสาธารณูปโภคเป็นเจ้าของ (utility-owned) ในตำแหน่งที่ตั้งที่ได้รับการจัดอันดับความสำคัญสูงสุดผ่านสัญญาแบบ EPC (งานวิศวกรรม งานจัดซื้อ และงานก่อสร้าง) ซึ่งรวมถึงสัญญาบริการระยะยาว (LTSA) การดำเนินการควรปฏิบัติตามขั้นตอนการตรวจวัดและทวนสอบที่เป็นมาตรฐาน (standardised measurement and verification procedures) สร้างความมั่นใจในกระบวนการชำระเงินที่โปร่งใส และรวมถึงการตรวจสอบต้นทุนรวมของระบบที่ต่ำที่สุด (least total system cost) และผลกระทบต่อค่าไฟฟ้าผันแปร (Ft impact)

สุดท้าย ความพยายามควรมุ่งเน้นไปที่การเปิดใช้งานเพื่อขยายขนาดโครงการ (scale-up) ซึ่งรวมถึงการสรุปสัญญาที่อิงตามประสิทธิภาพและแบบฟอร์มการชำระเงิน (settlement templates) ให้เสร็จสิ้น การเตรียมชุดเอกสารสำหรับการประมูลนำร่องที่มีขอบเขตทางเทคนิคที่ชัดเจน และการพัฒนาชุดเครื่องมือทางการเงิน (financing toolkit) เพื่ออำนวยความสะดวกในการขยายโครงการอย่างรวดเร็วตั้งแต่ปี พ.ศ. 2572 (ค.ศ. 2029) เป็นต้นไป

เอกสารอ้างอิง

Accure Blog - *The Key Components of Battery Energy Storage Systems (BESS)*. (n.d.). https://www.accure.net/blogs/battery-energy-storage-system-components

Ahmedm. (2025, September 4). *Energy Storage | UL Standards & Engagement*. UL Standards & Engagement. https://ulse.org/focus-areas/community-safety/energy-storage/

Asian Insiders. (2024, July 16). Thailand needs more battery energy storage systems to meet clean energy targets. https://asianinsiders.com/2024/07/16/thailand-battery-energy-storage-systems-future/

BloombergNEF. (2024, December 10). Lithium-ion battery pack prices see largest drop since 2017, falling to $115 per kilowatt-hour. https://about.bnef.com/insights/commodities/lithium-ion-battery-pack-prices-see-largest-drop-since-2017-falling-to-115-per-kilowatt-hour-bloombergnef/

BloombergNEF. (2025, July 11). *Solar, wind and batteries could enable Thailand to reduce reliance on LNG imports*. https://about.bnef.com/insights/clean-energy/solar-wind-and-batteries-could-enable-thailand-to-reduce-reliance-on-lng-imports/

California Independent System Operator. (2025, May 29). 2024 special report on battery storage. https://www.caiso.com/documents/2024-special-report-on-battery-storage-may-29-2025.pdf

Codes & Standards Draft. (n.d.). Energy Storage Safety. https://www.sandia.gov/energystoragesafety/codes-and-standards/

Colthorpe, A. (2025, February 5). *Behind the numbers: BNEF finds 40% year-on-year drop in BESS costs*. Energy-Storage.News. https://www.energy-storage.news/behind-the-numbers-bnef-finds-40-year-on-year-drop-in-bess-costs/

Grid Boosters as innovative solution to optimize power grids – How Storage as Transmission Assets increase the utilization of transmission lines in EHV grids - consentec. (2024, August 5). Consentec. https://consentec.de/en/publikation/grid-boosters-as-innovative-solution-to-optimize-power-grids-how-storage-as-transmission-assets-increase-the-utilization-of-transmission-lines-in-ehv-grids/

Cruz De Jesús, E., Martínez-Ramos, J. L., Marano-Marcolini, A., & Gómez-Expósito, A. (2025). Economic assessment of battery energy storage systems for frequency regulation reserve provision: A case study of the Dominican Republic. Energy for Sustainable Development, 88, 101749. https://doi.org/10.1016/j.esd.2025.101749

Electric Power Research Institute, TWAICE, & Pacific Northwest National Laboratory. (2024). Insights from EPRI's Battery Energy Storage Systems (BESS) Failure Incident Database. https://restservice.epri.com/publicdownload/000000003002030360/0/Product

Electricity Generating Authority of Thailand. (2025, July). Share of electricity generation by energy source in EGAT's system. https://www.egat.co.th/home/en/statistics-fuel-usage/

Energy Storage News. (2023, June 2). South Africa's Eskom confirms contract awards for 1,440 MWh battery storage. https://www.energy-storage.news/south-africas-eskom-confirms-contract-awards-for-1440mwh-battery-storage/

Energy Storage News. (2024). BESS failure incident rate dropped 97% between 2018 and 2023. https://www.energy-storage.news/battery-storage-failure-incident-rate-dropped-97-between-2018-and-2023/

Eskom. (2022). Eskom unveils a first-of-its-kind largest battery storage project in the African continent. https://www.eskom.co.za/eskom-unveils-a-first-of-its-kind-largest-battery-storage-project-in-the-african-continent/

Eskom. (2023, November 8). Eskom BESS rollout brochure [PDF]. https://www.eskom.co.za/distribution/wp-content/uploads/2023/11/BESS-eskom-brochure-Mobile-friendly.pdf

Global Energy Alliance for People and Planet. (2024, August 2). Pioneering innovation with Vietnam's BESS pilot project. https://energyalliance.org/pioneering-innovation-with-vietnams-bess-pilot-project/

Global Energy Monitor. (2024, May). Southeast Asia's energy crossroads: The cost of gas expansion versus the promise of renewables. https://globalenergymonitor.org/wp-content/uploads/2024/05/GEM_SEAsiaGasReport_2024.pdf

Gupta, M. (2024, September 16). *JSW Neo Energy and Reliance Power win 1,000 MW SECI Battery Storage Project with Record-Low Tariffs Auction*. SolarQuarter. https://solarquarter.com/2024/09/16/jsw-neo-energy-and-reliance-power-win-1000-mw-seci-battery-storage-project-with-record-low-tariffs-auction/

Hoffmann-Ostenhof, L. (n.d.). *The commercial opportunities for Utility-Scale batteries in Germany*. https://www.gridcog.com/blog/the-commercial-opportunities-for-utility-scale-batteries-in-germany

International Energy Agency. (2023). Batteries and Secure Energy Transitions. IEA. https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions

Japan's Idemitsu to build lithium sulphide plant to help support Toyota's EV plans. (2025, February 27). Reuters. https://www.reuters.com/business/energy/japans-idemitsu-build-lithium-sulphide-plant-help-support-toyotas-ev-plans-2025-02-27/

JPS spending US$300m on renewable energy expansion. (2025, May 9). Business | Jamaica Gleaner. https://jamaica-gleaner.com/article/business/20250509/jps-spending-us300m-renewable-energy-expansion

Lazard. (2024, June). Lazard's LCOE+ (including LCOS), June 2024 [Report]. https://www.lazard.com/media/xemfey0k/lazards-lcoeplus-june-2024-_vf.pdf

Maccioni, M., Lamedica, R., Lauria, S., Ruvio, A., Palone, F., & Rebolini, M. (2016). Application of a LiFePO4 battery energy storage system to primary frequency control: Simulations and experimental results. Energies, 9(11), 887. https://doi.org/10.3390/en9110887

Mercom India. (2024, November 7). IndiGrid, Kintech, H.G. Infra win NVVN's 500 MW/1 GWh battery storage auction. https://www.mercomindia.com/nvvn-1-gwh-battery-storage-auction

Murray, C. (2024, November 27). *BYD launches sodium-ion grid-scale BESS product*. Energy-Storage.News. https://www.energy-storage.news/byd-launches-sodium-ion-grid-scale-bess-product/

Nathan.Dang. (2025, June 11). *Current status of BESS applications in the Vietnamese Electricity grid - **東南亞影響力聯盟**. **東南亞影響力聯盟***. https://sia.net.tw/en/vietnam-battery-energy-storage-system/

National Grid Corporation of the Philippines. (2024, March 13). Customer Bulletin 2024-12: Ancillary services [PDF]. https://www.ngcp.ph/Attachment-Uploads/2024-12%20CB_Ancillary%20Services-2024-03-13-14-54-23.pdf

National Grid Corporation of the Philippines. (2025). 2025–2034 Ancillary Service Agreement Procurement Plan (ASAPP) [PDF]. https://www.ngcp.ph/Attachment-Uploads/csp/2025-2034%20ASAPP_rev.pdf

Nian, V., Jindal, G., & Li, H. (2019). A feasibility study on integrating large-scale battery energy storage systems with combined cycle power generation – Setting the bottom line. *Energy*, *185*, 396–408. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.028

Rayner, T. (2025, July 24). *Worldwide battery storage installations up 54% in first half of 2025, June sets monthly record - Energy Storage*. Energy Storage. https://www.ess-news.com/2025/07/15/worldwide-bess-installations-up-54-in-first-half-of-2025-june-sets-monthly-record/

Renewables Now. (2022, July 28). Eskom selects contractors for 343-MW BESS project. https://renewablesnow.com/news/eskom-selects-contractors-for-343-mw-bess-project-793353/

Reuters. (2024, September 16). Thailand's PTT signs five-year LNG deal with Oman LNG. https://www.reuters.com/markets/deals/thailands-ptt-signs-5-year-lng-deal-with-oman-lng-2024-09-16/

Reuters. (2025, April 16). Thailand plans to import more U.S. LNG over next five years, says minister. https://www.reuters.com/business/energy/thailand-plans-import-more-us-lng-over-next-5-years-says-minister-2025-04-16/

Schmidt, O., & Staffell, I. (2023). *Monetizing energy storage: A Toolkit to Assess Future Cost and Value*. https://academic.oup.com/book/55104

Solar Energy Corporation of India. (2024, June 26). Request for Selection (RfS) – 1,000 MW/2,000 MWh standalone BESS (ESS-2) [PDF]. https://www.seci.co.in/Upload/Tender/SECI000160-7915545-RfS-ESS-2-final_upload.pdf

Spendiff-Smith, M. (2023, August 8). *Battery energy storage system components*. Power Sonic. https://www.power-sonic.com/blog/battery-energy-storage-system-components/

Troes. (2025, August 6). What is Battery Energy Storage? Inside the System Structure. *TROES Corp.* https://troescorp.com/what-is-battery-energy-storage/

Understanding the role and specifications of Battery Management System (BMS) in BESS containers. (n.d.). TLS Offshore Containers & TLS Energy. https://www.tls-containers.com/tls-blog/understanding-the-role-and-specifications-of-battery-management-system-bms-in-bess-containers

Volta Foundation. (2024). Battery Report 2024 (Rev. 2025030101). https://volta.foundation/battery-report-2024

Zecchino, A., Gerini, F., Zuo, Y., Cherkaoui, R., Paolone, M., & Vagnoni, E. (2021). Local effects of grid-forming converters providing frequency regulation to bulk power grids. arXiv preprint arXiv:2110.05392. https://arxiv.org/abs/2110.05392

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Sitz der Gesellschaft
Bonn und Eschborn

Friedrich-Ebert-Allee 32 + 36
53113 Bonn, Deutschland
T +49 228 44 60-0
F +49 228 44 60-17 66

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn, Deutschland
T +49 61 96 79-0
F +49 61 96 79-11 15

E info@giz.de
I www.giz.de