

08

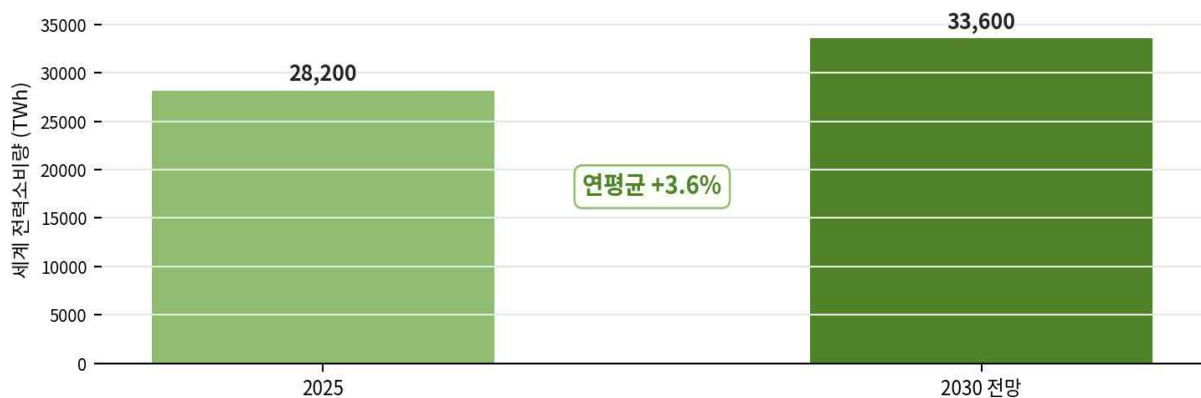
미래 전력수요 대응 배터리 ESS
기술 동향 및 시사점¹⁾

① 현재/미래 ESS 산업 및 정책 동향

□ AI·데이터센터·전기자동차 확대에 따른 미래 전력수요 변화와 ESS 필요성

- 2026년부터 2030년까지의 기간 동안 세계 전력수요는 연평균 3.6% 증가하여 지난 10년간의 평균 증가율보다 높은 수준을 기록할 것으로 전망
 - 건물 부문이 전체 추가 전력수요의 49%를 차지하고, 냉방 수요와 데이터센터, 히트펌프 확산이 건물 부문 증가분의 거의 절반을 차지할 것으로 예상
 - 수송 부문의 경우 전기자동차 보급 확대에 따른 충전 전력 수요가 지속적으로 증가하면서 세계 전력 수요 전체 증가분의 10% 이상을 차지할 것으로 예상

세계 전력수요는 5년간 5,400TWh 증가



[그림] 세계 전력소비량 전망(2025~2030)

※ 출처 : IEA(2026), Electricity 2026 – Demand

〈표〉 전력수요 급증에 따른 전력계통 변화와 ESS 역할

수요 요인	전력 계통 변화	ESS 대응 역할
AI·데이터센터	24시간 고밀도 부하, 전력품질·무정전 요구	UPS 연계, 피크관리, 마이크로그리드, 비상운전
전기차·충전허브	특정 시간대 급속충전 피크	충전부하 완화, V2G/V2B, 배전망 증설 지연
재생에너지	낮 시간 잉여와 일몰 후 급격한 부하 상승	에너지 시간 이동, 출력제어 완화, 램핑 대응
첨단제조·로봇	전압품질 민감도와 생산중단 비용 증가	순간전압 대응, 백업, 부하 최적화

※ 출처: IEA(2025), Energy and AI
IEA(2026), Electricity 2026

1) 비츠로일렉트릭 ICT사업부 황보승욱 상무(smhwangbo@vitzrotech.com)
본고는 저자의 개인적인 견해이며 국토교통부와 KAIA의 공식적인 의견은 아닙니다.

□ 전력 유연성 자원으로서 ESS 역할

- 초기의 배터리 프로젝트는 빠른 응답 속도가 요구되는 주파수 조정 등 계통 안정화를 위한 보조 서비스 시장에 주로 집중하는 형태로 추진되어 온 상황
 - 태양광 발전 비중이 높아지고 배터리 비용이 하락하면서, 수요전력을 낮 시간대에서 저녁 시간대 피크로 옮기는 에너지 이동이 주된 활용 용도로 전환
 - IEA는 에너지 이동을 주된 목적으로 하는 신규 배터리 프로젝트의 비중이 기존 약 40% 수준에서 향후 90% 이상까지 크게 확대될 것으로 전망

〈표〉 전력수요 증대와 이에 따른 ESS 역할

기능	응답·지속시간	핵심 가치	주요 제어계층
전력품질·순간 대응	ms~초 / 짧음	전압·주파수 안정, 민감부하 보호	PCS·BMS
주파수조정·예비력	초~분 / 15분~수시간	빠른 출력 증감, 예비력 대체	PCS·EMS
피크저감·부하이동	분~시간 / 1~6시간	전력요금·최대수요 절감	EMS·FEMS
재생에너지 시간 이동	시간 / 2~8시간+	출력제어 완화, 밤시간 피크 공급	EMS·시장운영
복원력·마이크로그리드	초~수일	정전 시 핵심부하 지속, 블랙스타트	GFM PCS·EMS
송배전 혼잡 완화	시간·계절	계통증설 지연	계통운영·EMS

※ 출처: IEA(2026), Battery storage is scaling up and taking on a larger system role; DOE FEMP(2025) Lithium-ion Battery Storage Technical Specifications

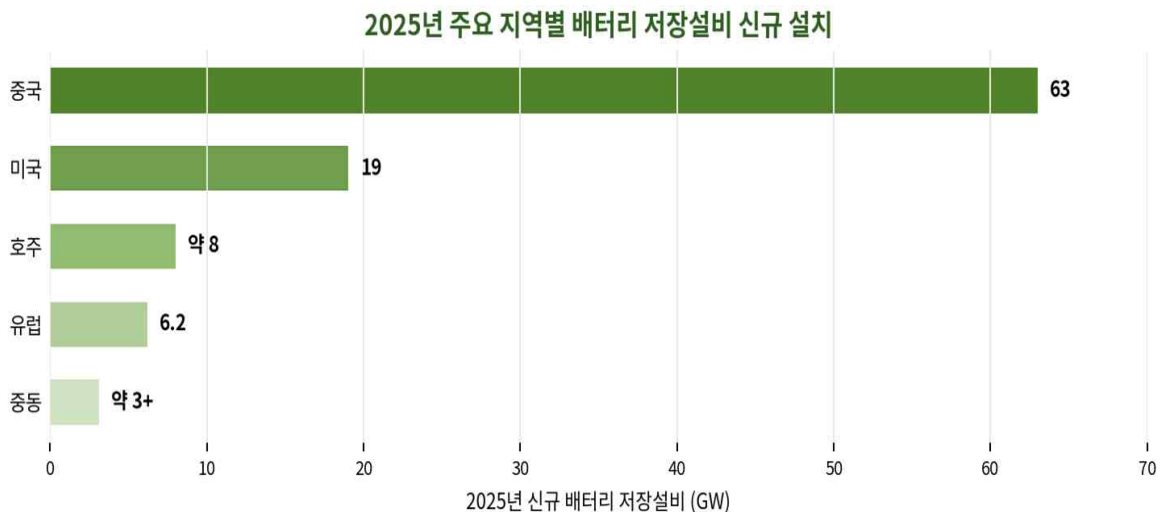
- ESS의 가치는 '설치용량×정격효율'이 아니라 위치·시간·가용성·운영전략이 결합된 실제 서비스 성과로 평가되며, '다목적 운전'이 사업성을 결정하는 구조
 - 에너지 차익거래, 용량, 보조서비스, 수요요금 절감 등 복수의 수익원을 조합해 운영함으로써 단일 수익원에 대한 의존도를 낮추는 방향으로 사업모델 구성
 - 복수의 서비스를 동시에 제공하기 위해서는 SOC 여유, 사이클 예산, PCS 과부하능력, 통신 지연 등 제약 요소를 사전에 함께 고려하여 설계할 필요
 - 빈번한 고출력 응답과 높은 방전율은 배터리 열화와 보조전력 소모를 늘릴 수 있어, 매출과 수명 극대화가 항상 일치하지 않는다는 점에 유의할 필요

□ 글로벌 배터리 저장시장 전환

- 2025년 세계 신규 배터리 저장설비 설치용량은 108GW를 기록하며 전년 대비 40% 증가하는 등 글로벌 시장 전반에서 빠른 성장세를 지속하는 추세
 - 설치용량은 2021년 대비 11배 규모로 성장했으며, 전체의 약 80%가 계통용으로 설치되었고 신규 설치의 약 90%를 LFP(리튬인산철) 배터리가 차지
 - ESS의 평균 방전시간은 대부분 약 2시간 수준에 머물러 있으나, 최근에는 4시간 이상의 장주기 방전 시간을 갖춘 프로젝트가 점차 증가하고 있는 상황

□ 국내외 정책·제도의 변화

- 국내 중앙 계약시장은 단순한 저장용량 확보보다 수명, 역률, 계통요건, 안전, 충방출 성능 등을 요구하는 '실운전 KPI' 중심 체계로 전환되는 추세
 - 중앙 계약시장에서 추진되는 육지 및 제주 지역 물량의 대부분은 2026년 12월 준공이 예정되어 있어 장기 운영 요건에 대한 대응 준비가 필요한 시점
 - 연간 383사이클 이상, 15년간 5,745사이클 이상과 보증수명 70%, 운전효율 65% 이상이 요구되어 열화·보조전력·가동률의 장기 관리가 필수
 - EMS 원격관제와 주파수 추종, AGC, 계통연계 유지성능 등의 요건을 요구하고 있으며 그리드포밍 기술 요건이 추가될 가능성도 함께 명시하고 있는 상황
 - 안전 측면에서는 KC-62619, KC-62477-1, NFPC 607, KEC 등 성능·화재·설비안전 관련 기준을 근거로 하는 요건 충족을 요구
 - 각국 정책상 발주·금융·보험은 '정격 효율'보다 15년간 에너지 인도량, 가용률, 성능저하, 안전·폐기 책임을 계약·입찰 지표로 요구하는 방향으로 진행



[그림] 2025년 주요 지역별 신규 배터리 저장설비

※ 출처 : IEA(2026), Battery storage is scaling up and taking on a larger system role

〈표〉 국내외 ESS 제도 및 정책 변화

구분	핵심 제도·방향	ESS 사업에 주는 신호
한국	ESS 중앙계약시장: 500MW/3,000MWh, 6시간, 2027년 준공	단순 저가보다 15년 수명·효율·계통요건·안전 증빙을 요구
EU	배터리 규정: 2027년 배터리 여권, 2031년 재생원료 최소비율	SOH(State of Health)·이력·재생원료 데이터가 제품·운영 경쟁력으로 전환
미국	DOE Energy Storage Grand Challenge 및 안전·보안·그리드포밍 R&D	다양한 저장기술과 실증·표준·사이버보안을 통합
국제 표준	IEEE 2686-2024: 고정형ESS BMS 설계·데이터·상호운용·보안	BMS가 설비 통합비용과 계통서비스 품질 좌우

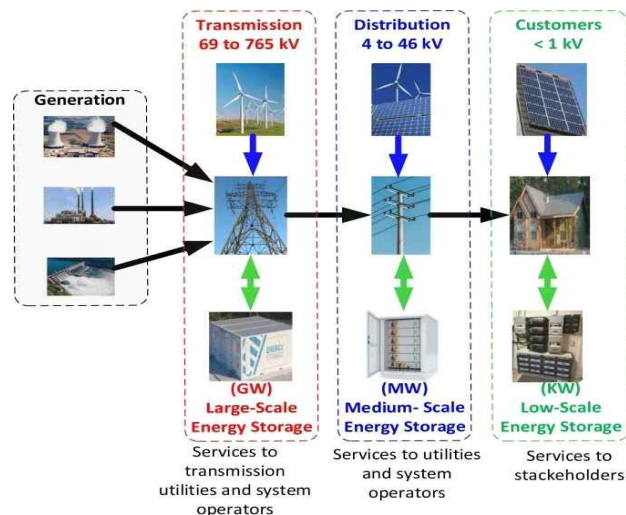
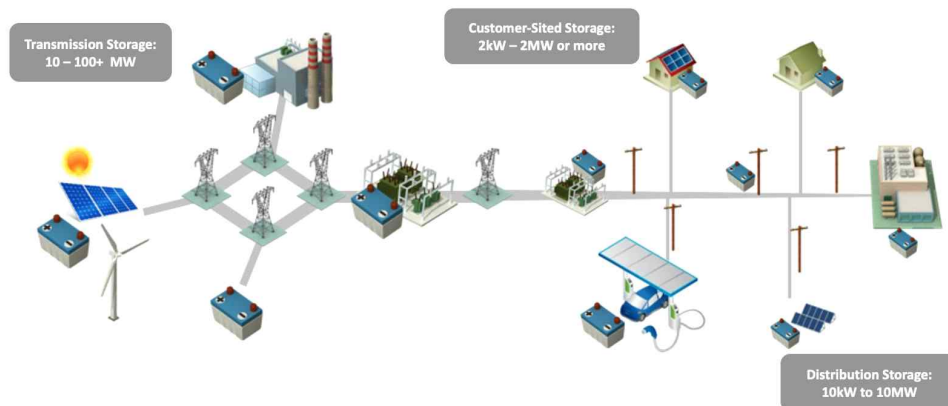
※ 출처 : KPX(2025), EU Regulation 2023/1542, DOE·Sandia(2025~2026)

② 규모·용도별 배터리 저장 솔루션

□ ESS 규모별 요구사항 및 성능분석

- 소형·중형·대형 ESS는 단순한 설치 용량 기준이 아니라 실제 운전 환경에서 요구되는 성능 수준을 기준으로 면밀히 구분하여 분석하는 접근이 필요한 상황
 - 가정용 수십 kWh급과 통신용 수백 kWh급 설비는 모두 소형에 해당하지만, 실제로는 운전 목적과 가용률 요구 수준에 따라 서로 다르게 분류할 필요
 - 물류센터와 데이터센터는 비슷한 MW급이라도 부하의 중단 허용도와 전력품질 기준이 크게 다르기 때문에 '설치 위치-서비스-방전시간-안전환경'의 4축으로 분류하는 것이 실용적
- ESS 용량선정의 기준은 정격출력(MW)과 저장용량(MWh)의 두 가지 지표로 결정되며, 각 지표별 산정 방식과 보정 요소를 구분하여 검토할 필요
 - 정격출력(MW)은 피크저감 또는 공급 핵심부하의 순간 최대값을 기준으로 선정해야 하며, PCS 과부하 능력·역률·온도에 따른 디레이팅을 반영
 - 저장용량(MWh)은 목표 출력과 지속시간의 곱을 기본으로 SOC 운전범위, 왕복효율, 열화 마진, 예비 SOC 등의 보정 요소를 모두 반영하여 선정
 - 동일한 10MW급 설비라도 1시간 지속형과 6시간 지속형은 활용 목적과 비용구조가 완전히 달라지므로 설계 단계에서부터 서로 다르게 구분하여 선정할 필요
- ESS 도입을 위한 선정 과정에서는 서비스 정의부터 수익성 평가에 이르기까지 아래와 같은 여섯 단계의 기술적 검토 순서에 따라 체계적으로 진행할 필요
 - ① 제공 서비스와 실패 시 영향에 대한 정의를 시작으로 ② 부하 및 발전 시계열 분석을 거쳐 ③ 필요한 출력과 지속시간을 산정하는 순서로 우선 검토
 - ④ 배터리·PCS·열관리·소방 설비 구성을 검토한 후 ⑤ 운영전략과 열화, 보증 조건을 점검하고 ⑥ 수익성과 인허가 요건을 평가하는 순서로 진행
- 소형·중형·대형 구분은 분석용 편의적 구분이며, 실제 설계는 계량기 전·후단(FTM·BTM), 접속위치, 서비스, 지속시간, 부하 중단 허용도를 고려
 - 동일한 MW급 ESS라도 수용가의 피크저감용 설비와 계통 주파수조정용 설비는 응답속도·가용률·통신·보호협조 및 성능보증 조건이 서로 다름
 - 따라서 ESS는 '설비 규모'보다 어디에 설치되어 어떤 부하로 운전되는지, 또는 어떤 계통서비스를 책임지는지에 따라 우선적으로 정의한 후 용량을 산정
- ESS는 설치 초기 정격용량이 아니라 보증기간이 만료되더라도 계통 접속점에서 제공할 수 있는 유효 출력·유효에너지를 기준으로 설계
 - 필요 설치용량은 '목표출력×지속시간'을 사용가능 SOC 범위, 방전 경로 효율, 수명 잔존용량으로 보정하고 비상운전용 예비에너지를 추가하여 산정
 - 개념적으로 설치용량은 목표출력×지속시간을 사용가능 SOC 범위와 방전효율, 수명 말 잔존용량의 곱으로 나눈 뒤 예비 에너지를 더한 값으로 표현 가능

- 왕복효율은 충전에 필요한 에너지와 운영비 산정에, 방전효율은 계통에 실제로 인도할 수 있는 에너지 산정에 각각 명확히 구분하여 적용하는 것이 필수적
- PCS는 유효전력뿐 아니라 무효전력과 역률, 과부하 운전 조건 및 설치환경에 따른 출력저하 요인까지도 종합적으로 반영하여 적정 용량을 선정할 필요
- 전압조정이나 계통안정화 서비스를 제공하는 경우 PCS 용량은 MW 단위가 아니라 $kVA = \sqrt{(\text{유효전력} + \text{무효전력})}$ 기준으로 산정하여 적정성을 검토할 필요
- 고온과 고도, 냉각성능에 따른 디레이팅 요소와 더불어 고장 발생 시에도 목표출력을 유지하기 위한 모듈 예비율 및 N+1 구성 방안도 함께 고려할 필요
- 하나의 ESS가 피크저감과 백업, 주파수조정 등 여러 서비스를 동시에 수행하는 경우에는 서비스 우선순위와 SOC 예약 기준을 사전에 명확히 정의할 필요
- 경제성 확보를 위한 운전으로 배터리를 방전한 직후 정전이 발생하면 백업용 에너지가 부족해질 수 있으므로 핵심 부하용 최소 SOC를 우선적으로 확보
- 운영전략은 수익 극대화뿐 아니라 열화비용과 보증조건, 핵심부하 신뢰도와 충돌하지 않도록 시간대별 SOC 운전 영역과 최대 사이클 횟수를 제한하여 수립



[그림] 계통 접속 위치별 ESS 규모와 주요 서비스

※ 출처 : EPRI(2022), Energy Storage 101 – Energy Storage Across the Grid

□ 소형 ESS: 분산형 부하와 모빌리티

- 가정·상업시설용 ESS는 전체 부하가 아니라 정전 시 반드시 유지해야 하는 핵심부하를 분리하고, 핵심부하의 최대전력·기동전류·요구 백업시간을 기준으로 용량을 선정
 - 대기시간이 긴 백업형 ESS는 사이클 열화보다 대기전력·셀 편차가 실제 가용용량을 좌우하므로 장기 SOH 진단과 정기적인 용량검증이 중요
 - 다수의 소형 ESS를 VPP로 통합할 경우 고객의 백업전력 확보를 우선하고, 통신장애 시 독립적으로 안전운전 할 수 있는 로컬 제어와 사이버보안이 필수

〈표〉 전기차의 용도 - 이동수단에서 양방향 저장자원으로 활용

방식	전력 흐름	주요 가치	선결과제
V1G	계통 → 차량	가격·혼잡을 반영한 스마트 충전	충전기·요금·스케줄 연동
V2H/V2B	차량 ↔ 주택·건물	정전 백업, 피크저감	양방향 충전기, 보호·섬운전
V2G	차량 ↔ 계통	주파수·용량·수요반응	집합제어, 배터리 열화보상, 시장참여

※ 출처 : DOE Electricity Advisory Committee(2025), EV storage opportunities

□ 중형 ESS: 건물·물류·데이터센터·산업단지

- 중간규모의 ESS(시설 부하용)는 FEMS와 결합하여 운영할 때 효과가 극대화되므로, 시설 에너지관리 체계와의 연계 운영 방안을 함께 검토할 필요
 - 시설 부하용 ESS는 생산과 영업, 냉동, 서버 운영 일정 등 각 시설별 운영 특성에 맞추어 다양한 기능을 폭넓게 활용할 수 있다는 것이 큰 특징
 - ESS 단독 제어는 현재 부하만 보고 충방전 운전에 활용되지만 FEMS와 결합하여 운영하면 태양광·연료전지·EV 충전·냉난방·생산계획·전력가격을 함께 예측해서 운영하는 것이 필수
 - 따라서 BMS-PCS-EMS-FEMS 각 계층 간 데이터의 시간해상도와 제어권한의 범위를 설계 단계에서부터 사전에 명확하게 정의해 두는 것이 필수적
- 데이터센터의 UPS를 단순한 비상 전원이 아니라 계통에 기여하는 '유연성 자원'으로 확장하여 활용하고자 하는 경우에 충족해야 하는 주요 전제 조건
 - 항상 비상용 SOC를 우선적으로 확보하고, 계통서비스 운전이 백업 신뢰도를 훼손하지 않도록 최소 SOC와 최대 사이클 횟수를 제한하여 운영할 필요
 - IT 부하와 냉각, UPS, 발전기, 계통의 상태 정보를 통합적으로 반영하여 전환 시퀀스와 복구 절차를 사전에 충분히 검증해 두는 것이 필요
 - 배터리 보증조건과 실제 시장운전 환경에서의 C-rate, 온도, DOD 수준이 서로 일치하는지 확인하고, 발생하는 열화비용을 서비스 수익에서 차감
 - 중형 ESS의 판단기준은 시설의 '평균 부하'가 아니라 중단 비용이 큰 핵심부하와 피크 원인을 분리해 설계해야 과대·과소투자를 피할 수 있음

□ 대형 ESS: 발전·송배전계통 연계

- 대규모 BESS는 계통안정화 기능을 수행하는 동시에 발전 및 수요 여건 변화에 따라 수립되는 계통 운영 계획에도 적극적으로 참여하는 방향으로 활용
 - 대형 BESS는 단기간 건설기간과 신속한 응답으로 재생에너지 확대 구간의 순부하 상승효과와 송전 혼잡, 예비력 부족에 대응할 수 있는 효과 기대
 - 그러나 규모가 커질수록 단일 셀 고장이 랙·컨테이너로 전이될 위험이 상존하기 때문에 계통연계 용량, 변전설비, 부지·소방·주민수용성, 장기 성능보증이 사업성을 좌우할 수 있음

□ 전력계통 안정화용 그리드포밍(GFM)

- 인버터 기반 전원의 비중이 높아지는 전력계통을 안정적으로 운영하기 위해서는 그리드포밍(GFM) 인버터가 담당하는 역할이 갈수록 중요해지고 있는 상황
 - 기존 그리드팔로잉 인버터와 달리 계통의 전압·주파수를 스스로 형성함으로써 인버터 기반 전원이 많은 계통에서도 안정성과 복원력을 제공할 수 있는 특징
 - 다만 GFM 기능의 구현은 PCS만의 문제가 아니라 배터리의 순간 출력과 SOC, 열적 한계, 보호 한계와 연동되어야 한다는 점이 필수적인 전제 조건
 - 대형 ESS의 판단기준은 MW·MWh 확대보다 계통 접속점에서 약속한 출력과 지속시간을 장기간 보증하고, 비정상 상황에서도 안전하게 실패하도록 설계하는 역량이 핵심
- 계통강도 저하 시 한계가 있는 GFL과 달리 GFM 인버터는 내부 전압 위상자를 유지해 동기화하고 전압·주파수 안정화에 필요한 유·무효전력을 자율 조정
 - 계통연계 운전에서는 GFM이 계통 전체의 전압과 주파수를 단독으로 결정하는 것이 아니라, 동기 발전기 및 다른 GFM 전원과 동기화하고 드롭제어 등을 통해 유효전력과 무효전력을 분담
 - 이에 따라 재생에너지·배터리 등 인버터 기반 전원이 증가하고 계통강도가 낮아지는 지역에서 전압 안정도, 주파수안정도 및 계통 복원력 확보에 기여
- GFM 성능은 PCS 제어 알고리즘만으로 결정되지 않으며 배터리의 SOC와 순간 출력, 열적 한계 및 PCS 전류 여유가 함께 확보되어야 구현이 가능
 - ESS가 최대출력으로 방전 중이거나 SOC 상·하한에 가까우면 주파수응답과 전압지원을 위한 추가 유·무효전력 여유가 부족현상 발생
 - 따라서 EMS는 에너지 거래 수익만 최적화할 것이 아니라 GFM 운전에 필요한 SOC 예약량과 PCS 출력·전류 여유를 실시간으로 확보 필요
 - BMS는 셀 온도·전압·SOH에 따라 실제 제공 가능한 SOP를 산정하고 이를 PCS·EMS에 전달하여 제어 명령이 배터리의 물리적 한계를 초과하지 않도록 구성
- GFM 기능과 블랙스타트 기능은 요구되는 성능 수준이 서로 다르므로 사업 추진 단계에서 두 기능을 명확히 구분하여 각각의 성능 요건을 정의할 필요
 - UNIFI V3는 전압지원·주파수지원·섬운전·블랙스타트의 4단계 GFM 성능 등급 제시, 장시간 섬운전은 Tier 3, 블랙스타트는 Tier 4로 구분
 - 블랙스타트를 구현하려면 GFM 제어 외에도 보조전원, 변압기 여자, 보호계전 정정, 부하 투입순서, 섬운전 전환 및 재동기화 절차가 함께 검증 필요

- 대형 ESS 사업에서는 'GFM 기능 탑재 여부'보다 실제 계통접속점에서 요구 성능을 만족하는지를 확인하는 시험·검증 절차의 중요성이 더욱 부각되는 상황
 - 시험조건은 계통강도 저하와 주파수 변화, 위상각 급변, 전압변동, 비대칭 고장, 계통분리 등 다양한 비정상 상황을 폭넓게 포함하도록 설정하는 것이 필요
 - 제조사가 제공한 EMT 모델을 실제 하드웨어 시험결과와 비교·검증하고, 전류 제한이나 SOC 한계에 도달할 때 제어모드가 어떻게 전환되는지도 확인
 - 향후 GFM 경쟁력은 단순한 소프트웨어 옵션보다 검증된 모델·시험성적·장기 성능보증을 포함하는 '입증 가능한 계통지원 성능'에 의해 결정될 전망

〈표〉 대형 ESS의 계통서비스와 BMS·PCS 기술요구

계통 기능	기술 요구	BMS·PCS 관점
에너지 시간 이동	2~8시간+, 높은 연간 사이클	가용에너지 예측, 열화 최적화, SOC 계획
주파수·AGC	초 단위 양방향 응답, 극성전환	SOP 한계·CC-CV 제약을 제어기에 반영
계통혼잡 완화	위치가치, 정해진 시간대 확실한 출력	가용률·예측오차·정비계획 관리
그리드포밍	전압·주파수 형성, 합성관성·무효전력	PCS 제어와 배터리 출력한계의 실시간 조정
블랙스타트	외부 전원 없이 기동·섬운전	예비SOC, 보조전원, 시퀀스 검증

※ 출처 : UNIFI Consortium(2026), UNIFI Specifications for Grid-Forming Inverter-Based Resources: Version 3
KPX(2025), 제1·2차 ESS 중앙계약시장 경쟁입찰 공고

□ 배터리 종류별 경쟁구도

- 배터리 기술은 셀 단가만으로 우열을 판단하기보다 요구 지속시간, 연간 사이클, 설치 환경, 안전성 및 시스템 수명주기비용을 함께 고려하여 선정
 - LFP는 가격·사이클수명·공급망 및 열적 안정성에서 현재 계통용 BESS의 주류이나, 에너지밀도가 낮아 설치 면적이 제한된 시설에서는 불리할 수 있음
 - NCM 배터리는 높은 에너지밀도가 장점이지만 열관리·소방 설계 요건과 니켈·코발트 공급망 및 원가 변동 위험을 설계 단계에서 함께 검토해야 하는 부담이 존재
 - 나트륨 이온전지는 원료 공급망 다변화 가능성이 있으나 에너지밀도와 장기 실증운전 자료 측면에서 추가 검증이 필요한 단계
 - 흐름전지는 출력부와 전해액 저장부를 별도로 증설할 수 있어 장시간·고사이클 운전에 유리하지만 낮은 에너지밀도, 펌프 등 보조설비와 시스템 효율을 고려
- 장주기 ESS는 단순히 방전시간만 늘린 대용량 리튬이온 ESS가 아니라, 저장시간 증가에 따른 에너지부 비용과 수명·교체비용을 함께 최적화한 시스템으로 접근
 - 미국 DOE는 통상 10시간 이상을 장주기 에너지 저장으로 분류하며, 수십~수백 시간 영역에서는 흐름전지·금속계 전지·열·기계·화학적 저장 기술까지 분류
 - 최종 기술선정은 초기 CAPEX보다 왕복효율, 보조전력, 교체주기, 가동률, 잔존가치 및 재활용비용을 포함한 LCOS와 LCC(Life Cycle Cost)를 기준으로 수행
- 용도별 관점에서 BESS 종류를 선정할 때에는 운영 시장의 지속시간과 설치 공간 제약, 우선 고려 성능이 서로 달라 조건을 구분하여 적용하는 것이 필요
 - 한 종류의 배터리가 모든 용도에 최적으로 사용될 수는 없기 때문에 서비스 특성과 운영 조건에 따라 다양한 기준을 종합적으로 적용하여 선정하는 것이 필수
 - 2~6시간 운영 시장에서는 비용·수명·공급망이 안정된 LFP가 주류이지만, 공간 제약이 큰 모빌리티·시설은 높은 에너지밀도를 고려하는 것이 필수

- 장주기 계통용 설비는 낮은 에너지 비용과 수명을 우선해야 하며, 실제 시스템의 안전·효율·교체 주기·설치 환경·재활용성을 종합적으로 비교하는 것이 필수
- 기술적 관점에서 BESS를 선정할 때에는 서비스 요구조건과 비용, 성능 보증, 공급망 및 순환이용 대응 등 네 가지 측면을 함께 종합 검토할 필요
- 제공하고자 하는 서비스의 지속시간과 응답속도, 연간 사이클 횟수와 DOD 수준, 설치 면적·온도·소방 조건 등 운전 환경 요건을 우선적으로 확인할 필요
- 초기 CAPEX뿐 아니라 교체·증설·보조전력·폐기·잔존가치까지 포함한 생애주기 관점의 LCC를 기준으로 산출하여 대안별 경제성을 비교하는 것이 필요
- 실증 운전 이력과 공급사 보증의 범위·제외 조건, 셀·시스템·현장 단계별 성능의 차이 등 실제 현장 운전 조건에서의 검증 자료를 함께 확인하는 것이 필요
- 핵심 광물·부품 공급망의 안정성과 재사용·재활용 가능성, 배터리 여권·이력 데이터 대응 여부 등 공급망 및 순환이용 관련 요건도 함께 점검할 필요
- 포트폴리오 관점에서 단주기 고출력 영역은 리튬이온이, 장주기 영역은 흐름 전지·기타 저장 기술이 보완하는 다 기술 구조가 계통 리스크를 낮출 수 있음

□ 폐배터리 재활용 기술 및 대응 방안

- 배터리는 차량 등에서의 사용이 종료된 이후에도 잔존성능에 따라 2차로 활용할 수 있는 방안을 도출하여 자원의 순환 활용을 확대해 나갈 필요가 있는 상황
- 전기차 등에서 사용이 완료된 배터리라 하더라도 잔존성능과 안전성이 충분한 수준으로 확인되는 경우에는 정지형 ESS 용도로 재사용하는 것이 가능한 상황
- 배터리 재사용 적합성을 판단하기 위해서는 사용 이력·SOH·내부저항·셀 편차·사고·침수·급속충전 빈도 등 검증 가능한 데이터가 필요
- 재사용 기준을 충족하지 못해 부적합으로 판정된 배터리는 재활용 공정을 통해 유기금속을 회수하여 다시 배터리 소재로 순환시키는 경로를 적용할 필요



원칙: 안전한 재사용 가능성을 먼저 확인하고, 부적합·수명종료 배터리는 재활용

[그림] 사용 후 배터리의 재사용·재제조·재활용 흐름

※ 출처 : IEA·EPO(2026), Battery Circularity: Innovation trends for a future source of critical material
EU(2023), Regulation (EU) 2023/1542

③ ESS 관리를 위한 BMS 및 EMS(에너지관리시스템)과 연계

□ 지능형 BMS의 구조와 핵심 기능

- 상위 EMS의 경제운전 지령은 항상 BMS가 제공하는 안전 및 출력 한계 범위 안에서 실행되어야 하므로 두 시스템 간 역할 관계를 명확히 설정할 필요
 - BMS는 전압과 전류, 온도 등 셀의 상태 정보를 실시간으로 측정하여 과충전과 과방전, 과열 등의 이상 상황을 사전에 차단하고 보호하는 핵심 시스템
 - 대형 ESS에서는 셀·모듈·랙·시스템의 상태를 통합하고 PCS·EMS가 사용할 수 있는 출력·에너지 한계를 실시간 제공하는 운영 플랫폼으로 확대
 - IEEE 2686-2024는 고정형 ESS에서 BMS를 배터리 보호와 수명관리를 담당하는 기능적으로 독립된 구성요소로 정의하고, BMS의 설계·구성·데이터 교환 및 다른 시스템과의 상호운용성을 권고
 - 다만 전력시장 참여와 충·방전 스케줄을 결정하는 EMS의 경제급전 기능은 해당 표준의 직접 적용 범위가 아니므로, BMS와 EMS의 역할 및 제어 권한을 분리하여 설계할 필요
- 계층형 BMS는 셀 센서에서 모듈 BMS와 랙 BMS, 시스템 BMS를 거쳐 PCS·EMS로 이어지는 구조로 구성되며 각 계층이 서로 다른 기능을 분담하는 것이 특징
 - 셀 센서는 전압과 온도를 계측하고, 모듈 BMS는 밸런싱과 보호를, 랙 BMS는 SOC·SOH 산정을, 시스템 BMS는 SOP·RUL 산정을 각각 담당하는 구조
 - 데이터는 계측에서 상태추정과 이상 진단, 보호 제어를 거쳐 충방전·열관리 최적화로 이어지며, 각 단계의 시간해상도와 지연 조건을 설계에 반영할 필요

계층형 BMS-PCS-EMS 연계 구조



데이터 흐름: 계측 → 상태추정 → 이상진단 → 보호제어 → 충방전·열관리 최적화

[그림] 계층형 BMS와 상위 제어시스템의 연계

※ 출처 : IEEE(2024), Recommended Practice for Battery Management Systems in Stationary Energy Storage Applications(IEEE 2686-2024)

- BMS 기반 ESS 상태추정과 인공지능을 활용한 이상 진단 기능은 설비의 안전한 운영과 수명 확보를 위해 반드시 탑재되어야 하는 필수 요소에 해당
 - 인공지능 모델 기반에서 ESS 이상 진단 기능을 분석하기 위해서는 물리·등가회로 모델 해석과 셀·온도·열화모드별 파라미터 식별이 필요
 - 데이터 기반 모델을 활용해서 복잡한 비선형 패턴을 학습할 수 있으나, 고장·열폭주 전조 데이터가 희소하고 현장 분포가 다를 수 있기 때문에 인공지능망 알고리즘을 활용한 진단 필요
 - 최근에는 하이브리드 모델로 물리 제약과 데이터 학습을 결합해 정확도를 높이는 연구가 진행되고 있어 향후 적용 가능성을 함께 검토할 필요가 있는 상황
- ESS의 이상 상태를 정확하게 진단하기 위해서는 단일 지표가 아닌 다양한 데이터를 융합하여 종합적으로 판단하는 접근 방식이 필요한 것으로 확인
 - ESS 간헐성을 분석하기 위해서는 전압과 편차 하나만으로는 미세단락이나 열폭주를 초기에 판단하기 어렵다는 한계가 존재하는 것으로 확인되고 있는 상황
 - ESS의 전압과 전류, 온도의 변화량 그리고 가스와 압력, 연기, 절연·냉각상태 관련 데이터를 함께 융합하여 종합적으로 판단하는 방식의 적용이 필요
 - 셀과 모듈, 랙의 공간적 패턴을 서로 비교하여 부정확한 진단을 줄 일 수 있는 방법에 대한 연구가 지속적으로 이루어질 필요가 있는 것으로 판단되는 상황
 - AI 결과는 '고장 확률'만 제시하기보다 어떤 센서와 변화가 판단에 기여했는지 운영자가 확인할 수 있도록 구성
 - AI 도입 조건은 정확도보다 먼저 데이터 시간동기, 센서 교정, 결측·이상치 처리, 모델 버전·학습이력, 안전기능과의 권한 분리를 표준화가 필요
- 대형 ESS의 BMS는 셀·모듈·랙·시스템으로 이어지는 계층형 구조를 적용하고, 하위 계층은 빠른 보호와 계측을, 상위 계층은 상태추정과 운전 한계 통합을 담당
 - 셀·모듈 BMS는 전압·온도·전류와 셀 편차를 감시하고 밸런싱 및 이상 상태를 판단하며, 랙 BMS는 접촉기·절연·냉각·랙 가용성을 관리
 - 시스템 계층의 BMS는 여러 랙의 상태를 종합하여 ESS 전체의 SOC와 SOH, SOP, SOE 및 충·방전 가능 범위를 PCS와 EMS 측에 제공하는 역할
 - 하위 보호기능은 상위 통신이나 클라우드 연결이 끊어져도 독립적으로 동작할 수 있도록 구성하여 통신 장애 상황에서의 안전성을 확보하는 것이 필요
- BMS는 EMS에 하나의 SOC 값만 전달하는 것이 아니라 현재 가능한 운전영역과 동적 성능한계를 Capability Envelope 형태로 제공하는 방식이 필요
 - 동적 성능한계 파라미터에는 최대 충전 출력과 최대 방전 출력, 가용에너지, 지속 가능시간, 온도 및 전압 제한, 추정값의 유효시간 등이 함께 포함되는 구조
 - EMS는 이를 초과하는 지령을 배터리 측에 내리지 않아야 하며, PCS는 최종적으로 BMS의 제한값과 내부 전류 및 열적 한계를 모두 확인한 후 충·방전 지령을 실행

- 통신 지연이나 데이터 품질 저하 시에는 마지막 정상값을 계속 사용하는 것이 아니라 사전에 정의된 출력축소·대기·안전정지 모드로 전환
- SOC·SOH·SOP·RUL은 센서에서 직접 측정되는 값이 아니라 모델로 추정된 값이므로 단일 수치와 함께 추정오차와 신뢰도를 관리할 필요
 - 센서 오차와 파라미터 변화, 열화모드 및 셀 간 불균형이 누적될 경우 동일한 SOC에서도 실제 가용 출력과 가용에너지가 서로 달라질 수 있다는 점에 유의
 - 따라서 BMS는 추정값의 신뢰구간과 모델 적용범위 이탈 여부 및 최근 보정 시점을 함께 기록하고, 불확실성이 커질수록 허용출력을 축소하는 방식의 적용이 필요
- AI 이상진단은 기존 안전 기능을 대체하는 기능이 아니라 조기경보와 정비 의사결정을 지원하는 보완적인 계층으로 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단
 - 과전압과 과전류, 과전류, 절연저하 등 즉시 차단이 필요한 안전 기능은 검증된 규칙 기반의 보호 로직으로 유지하여 신뢰성을 확보하는 것이 반드시 필요
 - AI는 미세단락과 냉각성능 저하에서 드리프트와 같이 여러 변수가 약하게 나타나는 전조를 탐지하고, 운영자에게 원인 후보와 영향 범위를 함께 제시하는 역할
 - 신규 모델은 먼저 실제 제어권한 없이 병행 분석하는 새도 모드에서 오탐과 미탐률을 검증한 후 단계적으로 운영에 적용해 나가는 방식이 바람직한 것으로 판단

〈표〉 ESS 운전·정비를 위한 핵심 상태추정 지표

지표	의미	운영 의사결정
SOC	사용가능 용량 대비 현재 저장된 에너지의 비율	충방전 가능시간·예비SOC
SOH	초기상태 대비 현재 배터리의 용량·출력·저항 등 건강상태	교체·중설·보증·잔존가치
SOP	현재 SOC·온도·전압·저항 조건에서 안전하게 충전하거나 방전할 수 있는 최대 출력	주파수응답·PCS 지령 제한
SOE	현재 실제로 사용할 수 있는 저장에너지	방전 종료시점·서비스 이행
RUL	설정된 성능·안전 한계에 도달하기까지 남은 시간 또는 사이클	정비·보증충당·LCC

※ 출처 : IEEE(2024), Recommended Practice for Battery Management Systems in Stationary Energy Storage Applications(IEEE 2686-2024)

□ ESS 시스템 효율적 구성과 손실을 줄이기 위한 디지털 트윈 기반 열화·운전 최적화

- 디지털 트윈은 실물 ESS의 운전패턴을 가상모델에 지속적으로 반영하여 현재의 상태를 실시간으로 추정하는 방식으로 운영에 활용될 수 있는 기반 기술
 - 배터리 전기·열·열화 모델, PCS 효율맵, HVAC, 시설부하, 전력가격을 연결하면 실제 설비를 위험하게 시험하지 않고도 충방전 전략과 고장 대응을 비교가 가능
 - BMS·PCS·HVAC·EMS의 시계열 데이터를 종합적으로 분석함으로써 ESS의 셀편차와 온도 분포, 정비 이력을 파악하고 이상 원인을 추적하는 것이 가능
- ESS 디지털 트윈은 실물 설비를 단순히 3차원 모델로 구현하거나 운전 상황을 모니터링하는 화면을 제공하는 수준의 개념과는 명확하게 구분되는 별도의 체계

- 물리 계층의 배터리·PCS·HVAC·센서와 통신 계층, 데이터 동기화 계층, 모델 보정 계층, 운영 의사 결정 계층의 역할을 명확하게 구분하여 설계하는 것이 필요
- 실물설비와 가상모델 간 갱신주기인 '트위닝 주기'는 대상 기능에 따라 달라야 하며, 안전이상 감시와 장기 열화예측을 동일한 시간주기로 처리해서는 안 됨
- 디지털 트윈의 정확도는 최초에 개발한 모델의 완성도보다 현장 운전 과정에서 모델을 얼마나 지속적으로 보정하고 검증하는가에 의해 좌우되는 구조적 특성
 - 셀·모듈 시험에서 식별한 파라미터를 그대로 대형 랙에 적용하면 배선저항, 냉각 불균일, 셀 편차 및 보조전력 때문에 오차가 커질 수 있다는 점에 유의
 - 실측값과 예측값의 잔차가 관리한계를 벗어나거나 학습되지 않은 새로운 운전 영역에 진입하면 모델의 재보정 또는 기존 안전 제어로의 전환하는 조치가 필요
 - 모델의 버전과 학습데이터, 파라미터 변경이력, 검증 결과 및 승인자를 체계적으로 기록하여 예측결과의 재현성과 책임 소재를 확보해 나가는 것이 필요
- 디지털 트윈에서 검토한 최적 운전 전략은 실물 ESS에 바로 적용하지 않고 시뮬레이션·새도 운전·제한된 실증 정상운전의 단계적 검증이 필요
 - 고장 예측 결과가 출력 디레이팅·락 격리·정비 명령으로 연결될 때는 BMS·EMS·운영자 간 승인 권한과 실패 시 복귀 조건을 사전에 명확히 정의할 필요
 - 디지털 트윈의 KPI는 모델 정확도만이 아니라 고장 조기 발견시간, 불필요한 정비 감소율, 가동률, 에너지 인도량 및 열화 비용 절감 효과로 종합 평가
- ESS 실증 단계에서는 실험실 모델의 현장 적용성과 학습 모델의 이전 가능성, 예측 결과의 운영 연계성 등 세 가지 사항을 반드시 확인할 필요가 존재
 - 실험실에서 도출한 셀 모델이 실제 랙의 열분포와 배선저항, HVAC 상태 그리고 EMS와의 통신지연 조건까지 반영하고 있는지 여부를 검증할 필요
 - 특정 제조사·기후·운전패턴으로 학습한 모델을 조건이 다른 설비에 그대로 적용할 경우 나타날 수 있는 성능저하 여부를 사전에 평가하는 것이 반드시 필요
 - 위험 예측 결과가 실제 디레이팅·격리·정비 조치로 연결되고, 이에 따른 권한과 책임 그리고 승인 절차까지 함께 연결되어 있는지를 점검하는 것이 필요
- ESS에 적용되는 디지털 트윈의 가치를 산정할 때에는 예측 정확도 자체보다 실제 운영 성과를 기준으로 평가하는 방안을 적용할 필요가 있는 것으로 판단
 - 디지털 트윈의 가치는 예측 정확도 자체보다 고장 회피시간, 계획 정비율, 에너지 인도량, HVAC 절감량으로 측정해야 하며, 모델 운영비와 데이터 품질관리 비용도 LCC에 포함
- AI 기반 BMS와 디지털 트윈 기술의 성능을 객관적으로 검증하기 위한 공용 시나리오와 벤치마크 데이터셋 구축 측면에서 도출되는 주요 R&D 시사점
 - 국토교통 시설의 실제 부하·온도·공간 조건을 반영한 공용 시나리오와 벤치마크 데이터셋이 있어야 AI BMS와 디지털 트윈을 객관적으로 비교하는 것이 가능

- ESS 시스템의 효율은 배터리 셀 단위가 아니라 계통 접속점 기준으로 구성되며, 각 기기에서 발생하는 손실 요소를 함께 파악할 필요가 있는 것으로 확인
- ESS 시스템의 성능은 배터리 셀 효율과 관계없이 전력 계통 접속점에서 측정한 PCS·변압기·배선·보호기기·HVAC·대기전력 손실로 인해 평가될 수 있음
- 따라서 ESS 성능 평가는 전력 계통 정격 조건에서 수행한 1회 시험 값과 실제 현장에서 나타나는 연간 실 운전 효율 사이에 차이가 발생할 수밖에 없는 구조
- 왕복 효율(RTE)은 방전 시 계통에 인도한 AC 에너지를 충전 시 계통에서 받은 AC 에너지로 나눈 뒤 100을 곱한 값으로 산정하는 것이 기본 원칙
- 다만 여기서 측정경계(POI, 변압기 전·후, 보조전력 포함 여부)를 사전에 명시하지 않으면 서로 다른 설비를 공정하게 비교할 수 없다는 점에 유의

〈표〉 ESS 시스템 손실 개선 방안

손실 영역	주요 원인	개선 수단	확인 데이터
배터리	내부저항, 충방전, 셀 편차, 열화	SOC·DOD·C-rate 최적화, 밸런싱	랙별DC 입출력·온도·SOH
PCS	스위칭·도통·저부하 손실	효율맵 기반 제어·운전점 선정	AC/DC 전력·역률·부하율
변압·배선	철손·동손·케이블·접점	용량 적정화, 접속저항 관리	POI·PCS단 계량 비교
열관리	냉각기·펌프·팬·히터	예측 냉각, 랙별 온도 균일화	HVAC 전력·온습도· ΔT
대기·제어	BMS·통신·소방·보조전원	절전모드·스케줄·기동전략	보조전력·대기시간

※ 출처 : DOE FEMP·NREL(2023), Battery Energy Storage System Evaluation Method KPX(2025)

- ESS의 실운전 효율을 체계적으로 관리하기 위해서는 계량 경계 고정과 상태별 손실 분리, 개선 효과 산정으로 이어지는 세 단계의 순서를 적용할 필요
- ① 첫 번째 단계에서는 효율 산정의 기준이 되는 계량 경계를 고정하고, 수집되는 데이터의 시간 동기화 정확도를 확보하는 작업을 우선적으로 수행할 필요
- ② 두 번째 단계에서는 충전과 방전, 대기, 정지 등 각 상태별로 발생하는 손실을 분리하여 어느 구간에서 손실이 발생하는지 원인을 분석하는 절차를 수행
- ③ 세 번째 단계에서는 효율 개선을 통해 늘어난 에너지 인도량과 이를 위해 추가로 투입되는 제어 비용을 함께 계산하여 실질적인 개선 효과를 확인할 필요
- 단, 주의할 점은 최고 RTE만 추구해 냉각을 줄이거나 SOC 여유를 축소하면 안전·수명·계통서비스 이행률이 악화될 수 있으므로 다목적 최적화가 필요

□ 배터리 효율·수명·안전·경제성 최적화 필요

- ESS의 왕복 효율은 측정 기간의 시작 시점과 종료 시점에서 SOE 또는 SOC가 서로 유사한 조건에 있을 때를 기준으로 산정하는 것이 원칙에 해당
- 시작 시점과 종료 시점의 저장에너지 차이가 큰 상태에서 단순히 방전에너지를 충전에너지로 나누면 실제 손실이 아닌 배터리 내부 저장에너지 변화가 포함
- 단기 성능시험에서는 동일한 시작·종료 SOC 조건을 적용하고, 장기 운전평가에서는 여러 완전 충·방전 사이클을 포함하거나 저장에너지 변화를 별도로 보정

- 서로 다른 설비의 효율을 비교할 때에는 각 수치가 어떤 측정 경계를 기준으로 산출된 값인지를 반드시 함께 명시하여야 공정한 비교가 가능한 것으로 확인
 - DC-DC 효율은 배터리 자체 특성을, PCS AC단 효율은 전력 변환 성능을, 계통접속점 AC-AC 효율은 변압기·배선·냉각·대기전력을 포함한 설비 전체 성능을 의미
 - 동일한 '왕복 효율'이라도 냉각기·히터·소방·통신 전력이 측정 경계 밖에 있으면 실제 사업자의 전력 구매량과 에너지 인도량을 과대평가할 수 있음
 - 충전과 방전이 짧은 시간 안에 반복되는 주파수 조정 설비는 낮은 시간해상도의 순 전력 데이터만 사용하면 내부 처리량과 손실이 상쇄되므로 양방향 에너지를 분리 계측 필요
- ESS의 운영전략은 현재 시점에서 확보 가능한 수익과 미래에 발생할 열화 비용을 함께 고려하여 전체 기간의 이익을 극대화하는 방향으로 수립할 필요
 - 전력 가격이 높을 때 최대출력으로 방전하면 단기적인 수익은 늘어나지만, 온도와 DOD, C-rate 관련 비용이 함께 증가하여 배터리 수명이 단축되는 구조
 - 따라서 EMS는 BMS가 추정된 가용에너지와 출력, 열화 비용을 종합적으로 고려하여 서비스 가치와 생애주기 가치를 함께 극대화할 수 있는 최적화 전략이 필요
 - 배터리 최적 운전의 KPI 요소로는 AC 기준의 왕복 효율과 가용률, 용량 유지율, 서비스 이행률, 열 안전 여유, 열화 비용, 알람 건전성 등으로 구성
- ESS를 운영하면서 최적화를 추진할 때에는 안전과 서비스, 수명, 시설 측면에서 각각 반드시 지켜야 하는 제약조건을 사전에 설정해 두는 것이 필요
 - 안전 제약은 배터리 셀과 랙 단위의 전압, 온도, 절연, 접촉기, 가스, 화재 상태와 관련된 요건으로 다른 어떠한 조건보다도 우선적으로 적용되는 사항
 - 서비스 제약은 예비 SOC와 응답시간, 지속시간, 무효전력, 복구시간 등에 대한 요건으로 계약 조건에서 정한 수준과 서로 일치하도록 관리하는 것이 필요
 - 수명 제약은 연간 사이클 횟수와 DOD, 평균 SOC, 고온 상태에서의 체류시간 등을 보증 조건에서 정한 허용 범위 안에서 벗어나지 않도록 관리하는 것이 필요
 - 시설 제약은 열관리 성능의 우선순위와 발전기, 태양광, 냉각설비, 충전기와의 인터록 등 시설 자체의 운영 조건을 함께 반영하여 설정하는 것이 필요
 - 향후 평가지표는 정격효율과 초기용량 중심에서 연간 에너지 인도량, 가용률, 서비스 이행률, 생애주기 비용을 기준으로 하는 KPI 체계로 전환될 필요

□ ESS-EMS 간의 운영을 위한 상호운용성·표준·사이버보안 확보 방안

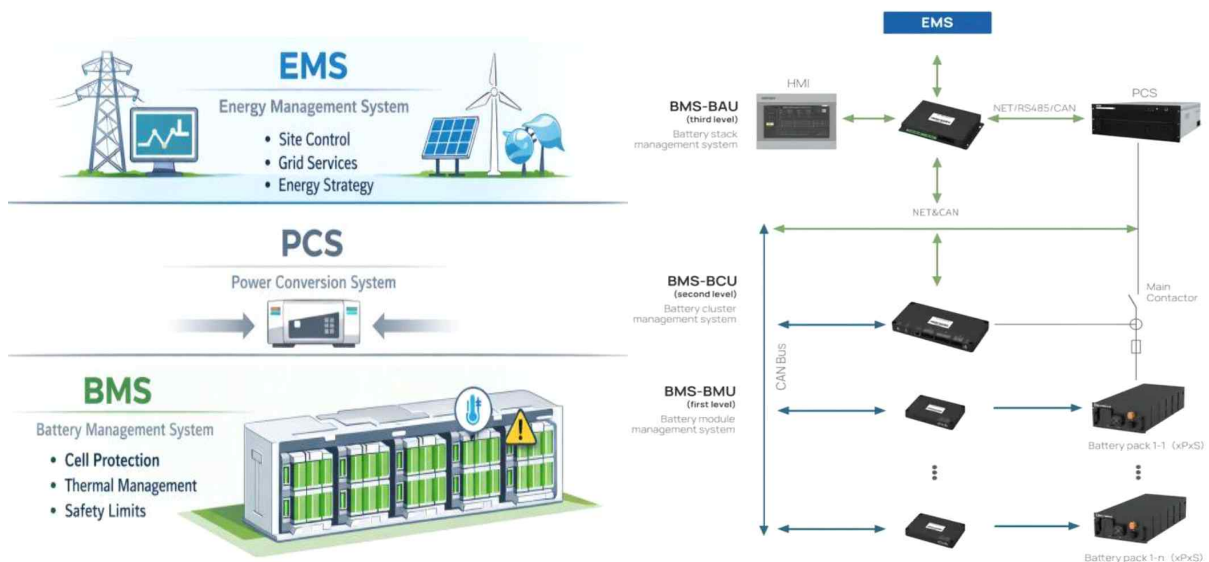
- ESS-EMS 간의 구성은 BMS·PCS·HVAC·소방·EMS·SCADA·클라우드가 서로 연결된 형태의 시스템으로 이루어져 상호운용성 확보가 중요
 - 제조사별로 데이터의 이름·주기·단위가 서로 다르면 여러 설비를 하나로 묶는 통합제어와 성능검증 과정에서 추가적인 비용이 증가하는 문제가 발생할 우려
 - 원격진단·펌웨어·공급망 연결은 사이버 공격의 경로가 될 수 있기 때문에 별도의 안전과 보안 요건을 종합적으로 고려한 시스템 설계가 반드시 필요한 상황

- 현재 제시되고 있는 최신 ESS 운영 표준과 가이드는 상호운용성과 사이버보안, 공급망 관측 사각지대 해소 등을 중심으로 방향이 설정되고 있는 상황
 - IEEE 2686 : BMS의 기능뿐 아니라 통신구조와 데이터모델, 상호운용성 및 사이버보안까지 함께 갖추도록 권고하고 있어 설계에 반영할 필요
 - INL 2026 : BESS 공급망 의존성과 계통 말단의 관측 사각지대를 지적하고, 운영을 방해하지 않는 수동 네트워크 모니터링 방식의 적용을 제안
 - 국내 기준 : KC 인증, NFPC 607, KEC, 계통연계 및 시장운영 규칙을 시스템 요구사항과 시험계획에 직접 연결하여 수립하는 방식이 필요
 - 데이터 접근권, 프로토콜, 사이버 패치, 로그 보존, 공급종료 후 지원, 사고 시 원시데이터 제공을 계약 단계에 명시해야 벤더 종속과 운영 사각지대 축소

〈표〉 ESS 상호운용성·사이버보안 위험 및 통제방안

위험 영역	대표 위험	설계/운영 통제	검증
데이터 모델	SOC·SOH·알람 정보 오류	공동 태그·단위·품질·시간동기	인터페이스 명세·데이터 사전
원격접속	사이버 해킹	운영권한, 세션기록	접속로그·권한검토
펌웨어·공급망	악성 업데이트·취약 부품	서명검증, 승인·롤백	해시·서명·변경이력
통신망	스캔·명령변조·서비스거부	분리·화이트리스트·수동모니터링	기준트래픽·탐지규칙
센서 신뢰	SOC 정보 오류	다중센서·물리모델 교차검증	주입시험·이상진단 결과

※ 출처 : IEEE(2024), Recommended Practice for Battery Management Systems in Stationary Energy Storage Applications(IEEE 2686-2024)
 INL(2026), Threat Hunt Guide for BESS Environments



[그림] ESS의 BMS-EMS-PCS-안전설비 통신 및 제어 연계구조

※ 출처 : DOE CESER·INL(2024), Battery Energy Storage Systems Report

4 시사점 및 향후 진행 방향

□ ESS 대형화·고밀도화에 따른 사고 영향범위 확대와 안전성 확보

- 앞선 분석을 종합하면, ESS는 단순히 전력을 저장하는 배터리 설비에서 계통과 시설의 전력수요를 실시간으로 조정하는 유연성 자원으로 발전
 - ESS의 기술 선정은 배터리 가격이나 에너지밀도만으로 결정할 수 없으며, 요구 출력·방전시간·연간 사이클·설치 환경·안전 조건 및 생애주기비용을 함께 고려해야 함
 - 실제 ESS의 성능은 배터리 셀뿐 아니라 BMS의 상태추정, PCS의 전력 변환과 계통지원, EMS·FEMS의 운전 최적화 및 냉각·소방·통신시스템의 통합성능에 의해 결정
 - 따라서 향후 ESS 경쟁력은 설비용량보다 계통접속점에서 검증된 가용률·효율·수명·안전성 및 서비스 이행 능력을 장기간 보증할 수 있는가에 의해 좌우될 전망
- 대형 ESS의 핵심 위험은 단순히 화재 발생 가능성이 커지는 것이 아니라, 하나의 셀에서 시작한 고장이 모듈·랙·컨테이너로 전파되면서 사고 영향범위가 확대될 수 있다는 점
 - 열폭주 과정에서 발생한 가연성 배출가스가 밀폐공간에 축적된 후 점화되면 화재와 별도로 폭연 위험이 발생할 수 있으므로, 열전이 방지와 가스 감지·배출·점화 방지를 구분하여 설계
 - 소화설비의 설치 여부만으로 안전성을 판단하지 않고, 감지·전기적 차단·열전이 억제·가스 관리·소화·잔존에너지 관리·재진입으로 이어지는 전체 사고대응 시나리오를 검증
 - 정상상태의 신규 배터리뿐 아니라 노화된 셀, 냉각 성능저하, 센서·통신 고장 및 일부 랙이 격리된 상태에서도 안전 기능이 유지되는지 확인할 필요
- 시설형 ESS는 배터리 자체에 대한 시험 결과와 실제 설치조건에서의 위험성 평가를 서로 연계하여 종합적으로 검토하는 접근 방식이 필요한 것으로 확인
 - 랙 배치와 천장 높이, HVAC 기류, 방화구획, 배출 위치 및 소방대 접근경로가 열과 가스의 이동 경로에 미치는 영향을 사전에 검토하는 것이 필요
 - 지하·옥내시설의 경우 침수·분진·충돌·냉동환경과 같은 복합위험이 배터리 고장과 결합하여 발생하는 복합사고 시나리오까지 함께 포함하여 검토하는 것이 필요
 - 사고 이후에는 잔압이 남아 있는 랙의 위치와 가스 농도, 재발화 가능성 및 안전한 재진입 조건을 현장 대응자에게 신속하게 전달할 수 있는 체계가 필요
- ESS 안전 기술의 최종 목표는 ‘화재가 절대 발생하지 않는다’는 선언이 아니라, 단일 고장이 대형 사고로 확대되지 않도록 사고의 발생 가능성과 결과의 심각도를 동시에 낮추는 것이 중요
 - 사고 전후의 원시데이터와 알람 기록, 제어 명령 및 펌웨어 변경이력을 일정 기간 보존하여 사고 원인 규명과 책임·보증 판단의 근거자료로 활용해 나갈 필요
 - 사고정보를 익명화하여 관련 기관 간에 공유하고, 이를 향후 시험기준·설계지침·운영 절차에 지속적으로 반영하는 안전 학습 체계를 구축해 나가는 것이 필요

□ 공급망·재사용·재활용 관점에서 배터리 분야 확대 방안

- ESS 순환 경제는 폐기 단계에서 시작되는 재활용 문제가 아니라 설계·조달·운영·해체 단계의 데이터를 서로 연결하는 생애주기 관리 차원의 문제로 접근할 필요
 - 재사용 여부는 잔존용량만으로 판단하지 않고 SOH, 내부저항, 셀 간 편차, 사고·과온 이력, 절연 상태 및 예상 RUL을 함께 종합적으로 평가하는 것이 필요
 - 이력정보가 불완전하면 셀 간 편차가 큰 배터리는 재사용에 따른 추가 안전 관리비용이 자원 절감 효과를 넘어설 수 있어, 재사용·재제조·소재 재활용 경로를 비교
- 습식제련·건식제련 기반 재활용 공정 회수율만 비교할 것이 아니라 에너지, 약품, 용수, 배출물, 전처리 및 회수물의 품질을 포함한 전 과정으로 평가
 - 직접 재활용은 양극재의 결정구조와 제조 가치를 보존할 가능성이 있지만, 배터리 화학계의 정확한 분류와 낮은 불순물 농도가 전제되어야 함
 - 배터리 설계단계에서 소재 표시, 분해 가능한 체결구조, 접착제 정보, 잔존전압 및 안전한 해체 절차를 제공하면 재활용 비용과 작업자 위험을 동시에 줄일 수 있음
- 배터리 이력 정보는 환경규제 대응 차원을 넘어 운영과 보증, 잔존가치 평가까지 함께 연결하는 사업 인프라로 활용해 나갈 필요가 있는 것으로 확인되는 상황
 - BMS의 운전 이력과 배터리 패스포트 정보를 서로 연계하되, 영업기밀과 사이버보안을 고려하여 데이터 항목별로 접근권한과 검증 책임을 명확하게 구분할 필요
 - 신뢰할 수 있는 이력정보가 확보되면 사용 후 배터리의 등급 판정과 거래가격 산정 및 최적 재활용 공정 선택의 불확실성을 낮출 수 있을 것으로 기대

□ 국토교통 분야 ESS 시스템 적용 시나리오

- 물류센터와 데이터센터, 철도, 공항·항만, 도로·터널, 공동주택 등 다양한 건물과 시설에 적용할 수 있는 ESS 실증절차를 제정하는 방안의 마련이 필요
 - ESS를 도입하기 전 최소 1년간의 부하와 전력품질, 정전, 기상 및 운영 데이터를 확보하여 시설별 특성을 파악하는 작업이 선행되어야 하는 것으로 확인
 - 전체 부하에서 안전 및 업무 연속성에 필수적인 부하를 명확하게 구분하고, 정전 발생 시 적용할 복구 순서를 사전에 정의해 두는 작업이 반드시 필요
 - 피크저감과 백업, DR, 재생에너지 연계는 순차 운전과 동시 운전 시 서로 다른 SOC 요구가 발생하므로 상호 충돌 여부를 사전에 검증하는 절차가 필요
 - 계통접속점(POI)과 PCS, 배터리, 보조전력의 계량 위치를 확정하고 각 데이터에 대한 책임 소재를 명확하게 정리해 두는 작업이 선행될 필요가 있는 상황
 - 다른 시설이나 제조사의 설비에도 적용할 수 있도록 데이터 모델과 API, 시험프로토콜을 공개형으로 설계하여 확장 가능성을 확보하는 것이 바람직한 방향
 - 적용 대상 부하와 요구 방전시간, 운영 특성에 따라 적합한 ESS를 선정하는 절차를 마련하여 시설별로 최적화된 구성을 도출해 나갈 필요가 있는 것으로 확인

- 국토교통 시설의 ESS 실증은 배터리 설치 자체가 아니라 해당 시설의 핵심 서비스가 정전·피크·전력 품질 교란 상황에서도 유지되는지를 검증하는 과정으로 설계
 - 물류센터는 처리량과 냉동 부하, 데이터센터는 IT 핵심 부하와 냉각, 철도는 신호·통신과 회생 전력, 공항·항만은 안전·보안·운영 연속성을 우선순위로 설정
 - 적용처별로 요구되는 출력, 지속시간, 전환시간, 허용 정전시간 및 복구 순서를 먼저 정의한 후 배터리 종류와 ESS 용량을 선정
- 기존 시설은 가능한 한 대표 계절과 운영주기를 포함한 부하·전력품질·정전 데이터를 확보하고, 신축 시설은 유사 시설 데이터와 설계부하·시뮬레이션을 결합
 - ‘최소 1년’이라는 고정 기간보다 냉·난방 피크, 물동량 변화, 휴일, 비상 운전 등 핵심 운전조건이 데이터에 포함되었는지가 중요
 - 실증 KPI에는 피크 저감뿐 아니라 핵심 부하 공급률, 백업 지속시간, 서비스 이행률, 가용률, 회피된 중단 비용, 열화 비용 및 탄소배출 변화를 포함

〈표〉 건물/시설 등 적용처에 따른 ESS 시스템 구성

적용처	우선 문제	ESS 시스템구성	핵심 실증지표
물류센터	자동화·냉동·충전 피크, 지붕 태양광 잉여	PV-ESS-EV-FEMS, 로봇 부하 예측	피크·자가소비·에너지/처리량·가용률
데이터센터	무정전·전력품질·고밀도 냉각	UPS-BESS-발전기-냉각-EMS	핵심부하 공급률·전환시간·백업시간 중심
철도	회생전력·역사 피크·재난운전	회생ESS-역사BEMS-충전·신호	회수에너지·전압안정·핵심운전시간
공항·항만	중단 비용·분산부하·전동장비	마이크로그리드-ESS-태양광·연료전지	섬운전·블랙스타트·부하우선순위
도로·터널	원격 핵심설비·정전·충전거점	분산전원-ESS-관제·충전기	통신·조명·환기 지속시간, 피크완화
공동주택	태양광 자가소비·공용부·EV 피크	PV-ESS-BEMS-V2G	세대·공용부 편익, 화재·소음 공간

※ 출처 : DOE Electricity Advisory Committee(2025), Critical Services·Facility Flexibility

□ 국토교통부 R&D 추진과제 및 결론

- 국토교통 분야 ESS R&D는 개별 배터리 기술개발보다 시설 적용에서 요구되는 안전성·운영성·상호 운용성·사업성을 동시에 검증하는 시스템 R&D로 추진
- 1) AI 기반 단계형 BMS 및 열폭주 조기진단 : 셀 단위에서 발생하는 이상 전조를 조기에 포착하여 사고의 확대를 방지하는 기술의 개발을 단계적으로 추진
 - 셀·모듈·랙의 전압·온도·가스·절연·냉각 데이터를 융합하고, 물리모델과 AI를 결합하여 미세단락·냉각성능 저하·셀 편차의 전조를 사전에 탐지하는 기술
 - AI 진단은 기존의 보호기능을 대체하지 않고 조기경보와 정비 의사결정을 지원하며, 오탐·미탐 비율과 모델의 불확실성을 함께 평가하는 체계로 구성할 필요

- 2) 실운전 효율·열화·가용률 기반 성능검증 : 장기간의 실측 데이터를 축적하여 성능보증과 금융 조달의 기반이 되는 검증 체계를 단계적으로 구축해 나갈 필요
 - 계통접속점 기준의 AC 왕복효율, 보조전력, 가용에너지, 출력지속시간, 용량 유지율 및 서비스 이행률을 장기간에 걸쳐 반복적으로 측정하는 체계를 구축
 - 실측데이터를 기반으로 성능보증·열화보증·O&M 보험조건을 표준화하여 신규 기술의 금융조달 가능성과 사업 전반의 신뢰성을 함께 향상시켜 나가는 것이 필요
 - 3) BMS·PCS·EMS·FEMS 통합운영과 계통지원 : 공동 데이터모델을 기반으로 복수서비스를 동시에 수행하는 통합 운영기술의 개발을 단계적으로 추진
 - 공통 데이터모델과 공개형 인터페이스를 구축하고, 피크 저감·백업·DR·재생에너지·EV 충전 등 복수 서비스의 SOC 충돌을 최적화
 - 각 시설의 계통조건과 시설조건에 따라 그리드포밍, 실운전, 블랙스타트 및 무효전력 지원 기능 중 필요한 항목을 선택적으로 검증하는 방식을 적용할 필요
 - 4) 사용 후 배터리 상태진단과 순환 경제 기술 : 잔존성을 정밀하게 진단하고 재사용부터 재활용까지 이어지는 순환 이용 체계의 구축을 단계적으로 추진
 - 시설 반입 전 단계에서 잔존용량·출력·내부저항·안전이력과 셀 편차를 평가하고, 재사용·재제조·재활용 경로를 등급화하는 기준을 체계적으로 마련할 필요
 - 배터리 이력정보와 해체·재활용 데이터를 서로 연계하여 재사용 ESS의 안전성 검증과 재생원료의 품질 확보를 동시에 달성할 수 있는 기반을 마련할 필요
 - 5) 시설형 ESS 디지털 트윈·실증 테스트베드 : 단계적 검증 체계와 공통 데이터 형식을 갖춘 개방형 실증 기반체계를 구축하여 성과를 지속적으로 확산 추진
 - 물류·데이터센터·철도·공항·도로 시설을 주요 대상으로 시뮬레이션-HIL/PHIL 시험·제한 운전·상용 운전의 단계적 검증 체계를 순차적으로 구축해 나갈 필요
 - 개별 실증결과를 공통 KPI와 시험프로토콜 및 데이터 형식으로 축적하여 다른 시설과 제조사에서도 재현 가능한 데이터 플랫폼 형태로 확산해 나갈 필요
- 위의 모든 연구과제에 사이버보안, 데이터 권한, 표준·인증, 사고대응 및 전문인력 양성을 공통 기반 요소로 반영하여 일관되게 적용해 나가는 것이 필요

□ 단계별 연구개발 추진 로드맵

- 1단계 : 적용 기반 및 시험기준 구축을 목표로 적용처별 요구사항을 정리하고 공동 데이터모델과 시험 프로토콜을 마련하는 기초 작업을 우선적으로 수행
 - 적용처별로 나타나는 부하와 정전, 전력품질, 안전 관련 요구사항과 핵심 부하의 우선순위를 사전에 명확하게 정의하는 작업을 최우선으로 수행할 필요
 - 서로 다른 설비를 연계할 수 있도록 공동 데이터모델과 계량경계, 성능 KPI, 사이버보안 및 안전 시험 프로토콜을 표준화된 형태로 개발해 나가는 것이 필요
 - 배터리·PCS·EMS·시설 부하를 하나로 연결한 디지털 트윈과 HIL 기반의 사전 검증 환경을 구축하여 실증 이전 단계의 위험을 사전에 낮추는 것이 필요

- 2단계 : 통합시스템 개발 및 다중시설 실증을 통해 서로 다른 유형의 시설에서 통합 운전 성능과 경제성을 함께 확인하는 단계로 진행할 필요가 있는 상황
 - 물류센터와 데이터센터, 철도, 공항 등에서 BMS-PCS-EMS-FEMS 통합 운전을 실증하여 시설 유형별 적용 가능성을 폭넓게 검증해 나가는 것이 필요
 - 정상운전 상황뿐 아니라 정전과 돌입전류, 일부 랙의 고장, 냉각 성능 저하 및 계통분리 상황까지 포함하여 다양한 조건에서의 대응 성능을 확인할 필요
 - 효율과 가용률, 열화, 안전, 서비스 이행을 및 회피된 시설 중단 비용을 장기간에 걸쳐 검증하여 실제 사업 여건에서의 성과를 정량적으로 확인할 필요
- 3단계 : 표준화·성능보증 및 사업화 확산을 목표로 실증에서 축적된 결과를 제도와 시장으로 연결하여 산업 전반에 파급되도록 추진해 나갈 필요
 - 실증결과를 기반으로 설계지침과 시험방법, 데이터 형식, 성능·열화 보증 및 보험평가 기준을 체계적으로 마련하여 제도적 기반을 확보해 나가는 것이 필요
 - 공공 조달과 민간투자에 활용할 수 있는 시설형 ESS 표준모델과 성능 기반 계약 방식을 개발하여 시장 확산의 실질적인 유인을 제공하는 것이 바람직한 방향
 - 실증데이터와 사고·운영 교훈을 관련 기관 간에 공유하여 다른 시설과 제조사에서도 확산·재현이 가능한 형태의 개방형 생태계를 구축해 나가는 것이 필요

□ 미래 발전방향 및 최종 결론

- 향후, ESS는 ‘더 큰 배터리’보다 용도에 맞게 저장 시간과 출력 특성을 선택하고, 시설·계통과 지능적으로 연계하며, 전체 수명주기를 안전하게 관리하는 방향으로 발전할 전망
 - 단시간·고출력 시장에서는 리튬이온 배터리가 중심을 유지하되, 4시간 이상 저장 수요가 증가함에 따라 나트륨이온·흐름 전지·열·기계·화학적 저장 등 다양한 기술을 적용 목적에 따라 조합
 - 배터리 가격하락만으로는 장기 경쟁력을 확보하기 어려우며, 실제 운전에서 검증된 가용률·성능보증·안전성·사이버보안·O&M 역량이 프로젝트의 금융성과 보험 가능성을 결정
 - EMS는 에너지 거래 수익뿐 아니라 열화 비용, 예비 SOC, 정전 위험 및 핵심 부하의 중단 비용을 함께 고려하는 다목적 최적화 플랫폼으로 발전
 - 배터리 이력과 운영 데이터는 수명관리, 성능보증, 사고분석, 재사용 및 재활용을 연결하는 핵심 디지털 자산으로 활용될 전망
- 국토교통 분야의 역할은 개별 ESS 기술을 반복 개발하는 데 있지 않고, 다양한 시설에서 기술의 연결성과 실효성을 검증하여 표준·인증·보험·조달로 이어지는 확산 기반을 마련하는 데 있음
 - 궁극적으로 시설형 ESS는 배터리 설비 판매 사업에서 벗어나 전력비 절감, 업무 연속성, 계통 유연성, 안전관리 및 순환 경제 가치를 장기간 보증하는 서비스 사업으로 전환 필요
 - 이에 따라 사업 평가지표도 초기 설치 용량 중심에서 연간 에너지 인도량과 가용률, 서비스 이행률, 생애주기 비용 중심으로 전환되어야 할 것으로 전망