



한·독 에너지 파트너십  
Energiepartnerschaft  
DEUTSCHLAND - KOREA

# 한국과 독일의 배터리 에너지 저장 시스템

양자 에너지 파트너십의 일환으로 독일 연방 경제기후행동부 발주



출판 정보  
발간주체:  
한-독 에너지 파트너십 팀

집행기관:  
adelphi consult GmbH  
Alt-Moabit 91  
10559 Berlin  
T +49 (30) 8900068-0  
F +49 (30) 8900068-10  
office@adelphi.de  
www.adelphi.de

작성자:  
Lena Grimm; Binz, Sophia; Joonhyung Ahn, Mervin Hummel, Jana Narita

인용 시:  
Grimm, Lena; Sophia Binz, Joonhyung Ahn, Mervin Hummel, Jana Narita (2025): Battery Energy Storage Systems in Korea and Germany. Current Status and Prospects. Berlin: adelphi consult GmbH

버전:  
05/2025

모든 권리 보유.  
본 출판물의 모든 사용은 adelphi consult GmbH 의 승인을 받아야 합니다.

본 출판물은 다운로드 가능한 PDF 파일로만 제공됩니다.

#### Energy partners:



#### Implementing organisations:



# 한국과 독일의 배터리 에너지 저장 시스템 현황 및 전망

# 목차

<b>1</b>	<b>서론</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>배터리 에너지 저장 시스템 개요</b> .....	<b>9</b>
2.1	BESS의 정의와 종류.....	9
2.2	대규모 BESS의 사용 사례.....	10
<b>3</b>	<b>독일 BESS의 현황과 전망</b> .....	<b>11</b>
3.1	독일 BESS 현황.....	11
3.2	BESS 정책 도구 및 전략 개요.....	13
3.3	이해관계자 개요.....	14
3.4	독일 BESS의 잠재력.....	17
3.5	도전과제.....	18
<b>4</b>	<b>한국 BESS의 현황과 전망</b> .....	<b>22</b>
4.1	국내 BESS 현황.....	22
4.2	BESS 정책 도구 및 전략 개요.....	23
4.3	이해관계자 개요.....	25
4.4	한국 BESS의 잠재력.....	25
4.5	도전과제.....	28
<b>5</b>	<b>비교 분석</b> .....	<b>30</b>
5.1	일반적인 맥락과 전기 시스템.....	30
5.2	운용 현황 및 잠재력.....	30
5.3	BESS 정책 목표 및 지원.....	31
5.4	도전과제.....	31
<b>6</b>	<b>한-독 협력을 위한 결론 및 제언</b> .....	<b>33</b>
6.1	결론.....	33
6.2	한-독 협력을 위한 권고사항.....	33

## 약어 리스트

B.KWK	German Federal Association Combined Heat and Power
BDEW	German Association of the Energy and Water Industries
BEE	German Association for Renewable Energy
BESS	Battery Energy Storage System
BKZ	Grid Construction Cost
BMWK	German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action
BNetzA	German Federal Network Agency
BVES	German Federal Association for Energy Storage Systems
BWS Solar	German Federal Association Solar Industry
CAES	Compressed Air Energy Storage
CFE	Carbon Free Energy
CHP	Combined Heat and Power
DFG	German Research Foundation
DoD	Depth of Discharge
DR	Demand Response
DSM	Demand Side Management
DSO	Distribution System Operator
DSR	Demand Side Response
EBA	European Battery Alliance
EEG	Renewable Energy Sources Act
ERDF	European Regional Development Fund
ESS	Energy Storage System
EV	Electric Vehicle
FCR	Frequency Containment Reserve
HVDC	High Voltage Direct Current
IEA	International Energy Agency
IPCEI	Important Projects of Common European Interest
IPP	Independent Power Producer
KEPCO	Korea Electric Power Corporation
KfW	German National Development Bank
KPX	Korean Power Exchange
LDES	Long-Duration Energy Storage
LFP	Lithium Iron Phosphate
LMP	Locational Marginal Pricing
MOTIE	Korean Ministry of Trade, Industry and Energy
MVDC	Medium Voltage Direct Current
NDC	Nationally Determined Contribution (to the Paris Agreement)
NMC	Nickel Manganese Cobalt
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PHS	Pumped Hydro Storage
PPA	Power Purchasing Agreement
PV	Photovoltaics
RE	Renewable Energy
REC	Renewable Energy Certificate
RPS	Renewable Portfolio Standard
SI	System Integrators
TCTF	Temporary Crisis and Transition Framework
TRL	Technology Readiness Level
TSO	Transmission System Operator
VRE	Variable Renewable Energy
VRFB	Vanadium Redox Flow Battery

## 요약

전기의 저장은 전기의 시간 지연 사용을 가능하게 함으로써 현대의 탈탄소 에너지 시스템에서 중요한 역할을 할 수 있다. 특히 풍력 및 태양광과 같은 간헐적인 에너지를 전력망에 통합하는 경우, 해당 기능은 계통 안정성을 보장하는 데 중요하다. 특히, 대규모 배터리 에너지 저장 시스템(BESS)은 높은 효율과 유연성으로 주목을 받고 있다. 지리적 제약을 가진 양수 발전과 달리, BESS는 전략적 위치(예: 산업 현장)에 설치할 수 있다. 또한, 광범위한 분야를 지원하고 다른 저장 옵션에 비해 왕복 효율이 높다.

해당 분야에 집중함으로써 두 나라 모두 에너지 전환을 강화하고 재생 에너지의 보다 비용 효율적이고 지속 가능한 통합을 보장할 수 있다.

독일과 한국은 각각 2045년과 2050년까지 기후 중립을 목표로 하고 있다. 해당 목표 달성을 위해 양국은 전력 시스템에서 재생에너지 비중을 크게 늘릴 계획이다. 양국 모두 전력 시스템 전환에서 BESS의 중요한 역할을 인식하고 있으며, BESS 보급 확대에 전념하고 있다. 본 연구는 한국과 독일의 대규모 BESS의 현황과 미래 잠재력을 분석한다. 본 보고서는 양국의 BESS 기술 현황을 개괄적으로 살펴보고, 신속한 도입을 저해하는 과제들을 파악하였다. 또한 BESS 보급을 더욱 촉진하기 위한 한-독 협력 방안을 제시하고 있다.

독일과 한국은 BESS(배터리 에너지 저장 시스템)가 기후 중립 목표 달성을 위해 필요하다는 데 뜻을 같이하며, 2036년까지 한국은 단기 및 중기 용량 24.4GW, 독일은 2037년까지 24GW 규모의 BESS를 구축할 계획을 갖고 있다. 현재 한국은 독일보다 BESS 구축 수준이 더 높으며, 배터리 셀 생산 분야에서 세계적인 선두주자로 자리매김했다. 그러나 독일은 최근 몇 년간 차익 거래를 위한 수익성 있는 시장 환경과 탈-화석 연료 에너지 전환 등 여러 가지 이유로 대규모 BESS 수요가 급증했다. 반면, 한국은 2017년 이후 일련의 화재 사고와 관련 안전 문제로 수요가 감소했다. 양국은 BESS 구축 규모 확대와 국내 생산 확대를 적극적으로 추진하고 있으며, 연구 프로그램, 수요 대책, 재정적 인센티브 등 구체적인 전략과 정책을 발표했다.

분석 결과, 다양한 기술, 규제 및 시장 과제가 양국의 BESS 구축을 저해하고 있는 것으로 나타났다. 한국과 독일은 모두 공급망의 취약성에 직면해 있으며, 배터리 수명의 제약이나 높은 초기 투자 비용과 같은 기술적 어려움을 공유하고 있다. 투자 취약성 또한 존재하지만, 전력 시장 구조의 차이로 인해 해당 어려움의 성격은 서로 다르다. 또한, 양국의 BESS 구축은 각국의 전력 시장 및 BESS 참여 기회에 따른 세부 사항에 차이가 있음에도 불구하고, 기존의 규제 및 정책 체계에 의해 제약을 받고 있다. 해당 과제를 해결하는 것은 재생에너지 및 청정에너지 기반 탈탄소 에너지 시스템으로의 전환에 필수적이다.

독일과 한국 간의 협력은 이러한 노력을 지원할 수 있으며, 다음 주제에 대해 협력을 권고하고자 한다.

- BESS의 전력망 통합
- BESS의 안전한 운영 및 표준화
- BESS 공급망 및 국내 생산의 자생력

# 1 서론

전기 저장은 오늘날 현대 에너지 시스템에서 이미 중요한 역할을 하고 있다. 저장 시스템은 전기의 시간 지연 사용을 가능하게 하며, 이는 풍력이나 태양광과 같은 간헐적인 에너지원을 전력망에 통합하는 데 필수적이다. 따라서 전 세계적으로 합의된 온실가스 감축 목표를 달성하는 데 중요하다. 특히 대규모 배터리 에너지 저장 시스템(BESS)은 단기적으로 전력 수급 균형을 맞춰 전력망에 필요한 안정성을 제공하는 데 매우 적합하다.

순배출 제로 경제로 전환하기 위해서는 전력 생산에서의 재생에너지원의 의존도가 증가할 필요가 있다. 독일은 2030년까지 재생에너지 소비량 80%를 목표로 하고 있으며, 2045년까지 순배출 제로 달성이라는 장기 비전을 가지고 있다. 전력 부문에서 독일은 2035년까지 거의 기후 중립을 달성하는 것을 목표로 한다. 대한민국(이하 한국)은 2030년까지 재생에너지 발전량 21.9%(현재 9%)를 달성할 계획이며, 2050년까지 순배출 제로 목표를 설정했다. (산업통상자원부 2025).

순배출 제로 목표를 달성하기 위해 양국은 전력 시스템뿐만 아니라 산업, 운송, 건물 등 다른 경제 부문의 탈탄소화를 추진해야 한다. 이를 통해 여러 공정의 전기화가 이루어지고, 결과적으로 친환경 전기에 대한 수요 증가가 예상된다. 추산에 따르면 이러한 탈탄소화 경로를 통해 독일에서는 2030년에 약 600 테라와트시(TWh)의 친환경 전기가 필요한데, 이는 현재(2024년) 254.9TWh에 비해 크게 증가할 것으로 예상된다. (연방기후경제행동부 2023b; Bundesnetzagentur 2025a). 비교해보면, 한국의 현재 재생에너지 발전량은 56.7TWh이다. 한국이 2030년 국가결정기여(NDC) 목표와 2050년 탄소 중립 목표를 준수한다면, 2030년 예상 총 전력 수요는 612.4TWh에 이를 것으로 예상된다. (Berkeley Lab 2023).

육상 및 해상 풍력, 태양광 발전과 같은 간헐적인 재생에너지원과 관련하여, 에너지 시스템은 이러한 에너지원의 점유 비중 증가에 맞춰 유연성을 강화해야 한다. Cebulla et al.의 연구진에 따르면, 유연성이란 "잔여 부하(전력 부하에서 사용 가능한 재생에너지를 뺀 값)의 균형을 맞추는 능력"이다. (2018, 449). 해당 적용력의 필요성은 독일과 한국 모두 전력망에 더 많은 재생에너지를 통합하고자 하는 노력에 있어 매우 중요하다. (U.S. Energy Information Administration 2023).

에너지 저장 시스템(ESS)의 도움으로 인해, 전력망 내의 높은 간헐적 에너지 비중으로 인해 발생하는 몇 가지 문제를 해결할 수 있다. ESS는 전력의 시간 지연 사용을 가능하게 한다. ESS는 수요가 낮을 때 에너지를 저장하고 피크 시간대에 방출함으로써 전력망의 수급 균형을 지원한다. 따라서 ESS는 수요 변동을 완화하고 비용이 많이 드는 예비 발전의 필요성을 줄일 수 있다. (Frey et al. 2021). 이는 전기 가격뿐만 아니라 시스템 자체의 안정성을 확보하는 동시에 경제적 효율성을 향상시킨다. 또한, 고속 반응 ESS(예: 리튬 이온 배터리)는 전력 공급 및 수요 변동을 신속하게 보상하여 전력망 주파수 유지에 도움을 준다. 이를 통해 전기 장비에 손상을 줄 수 있는 스파이크(spike), 서지(surge) 또는 정전과 같은 장애를 방지하고 전압 안정성, 주파수 안정성 등 전력 품질 향상에 기여한다. 또한, 태양광 및 풍력 발전소는 직접 발전이 불가능한

경우에도 전력망 운영자의 급전 요청에 대응할 수 있도록 지원하여 전력 감축을 최소화하고 재생 에너지 활용을 극대화한다. 또한, 전력망의 전략적 위치에 ESS를 배치하면 전력회사가 전력망 자체를 확장하는 것보다 더 낮은 비용으로 증가하는 전력 수요에 대응할 수 있다. (U.S. Energy Information Administration 2023). 따라서 에너지 저장은 전력망 확장에 대한 압력을 줄여 에너지 전환을 원활하고 효율적으로 진행할 수 있도록 한다. 이는 특히 전력망 확장에 대한 사회적 반대가 있는 지역에서 매우 중요한 역할을 한다. (Fraunhofer ISI 2020).

현재의 전기 저장 시스템은 발전과 소비 사이의 단기적인 지연을 관리하는 데 매우 적합하다. 장기간, 그리고 계절에 따라 전력 공급과 수요의 균형을 맞추는 데 필요한 장기 저장의 경우, 현재의 첨단 솔루션은 전기를 수소와 같은 다른 형태의 에너지로 변환한 후 다시 변환하는 방식을 사용한다. (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 2023b).

많은 이점에도 불구하고 ESS의 도입은 독일과 한국 모두에서 어려움에 직면해 있다. 그 중 하나는 시장 환경에 따른 다양한 상환 및 높은 초기 투자 비용이다. ESS의 경제적 타당성의 경우, 대부분 충전 및 방전 기간의 가격 차이에 따라 달라지기 때문에 ESS는 최대 수요 기간과 낮은 수요 기간의 가격 대비가를 때만 수익성이 나온다. 또 다른 요인은 제한된 저장 용량 및 기간, 열 관리와 같은 기술적 한계이다. (Deguenon et al. 2023; Hannan et al. 2020). 유틸리티 규모의 ESS 기술 개발은 아직 초기 단계이다. 펌프 수력 저장 형태의 최초의 그리드 규모 ESS가 19세기 후반 스위스에 설치되었지만, 전 세계 저장 용량의 대부분은 2016년 이후 BESS, 더 구체적으로는 리튬 이온 배터리 형태로 설치되어왔다. (Mul 2025). 이는 특히 ESS 관련 기술 발전에 있어 시간이 얼마나 적게 흘렀는지, 그리고 얼마나 큰 잠재력이 있는지를 보여준다. (Thimet and Mavromatidis 2023). 이 요인은 투자 비용 문제와 밀접하게 연관되어 있다. 투자자들이 에너지 저장을 위한 배터리 기술이 경제적으로 실행 가능하고 건전한 투자 기회라고 판단해야만 ESS 시장은 적절하게 성장할 수 있다. 이는 결국 기존 규제 장벽에 달려 있다. 투자 위험을 줄여야 하며, 가능한 경우 세금과 같은 경제적 부담을 줄이는 유리한 규제 체계가 권장된다. (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 2023b; Deguenon et al. 2023)

독일에서는 총 설치 전력 저장 용량의 상당 부분을 양수 발전(24GWh/6GW)이 담당하고 있으며, 배터리 저장 용량은 18GWh(2025년 1월 기준)에 달한다. 해당 용량은 15GWh 가정용 배터리 저장 시스템, 2.2GWh 대규모 시스템, 그리고 약 750MWh 산업용 배터리 저장 시스템으로 구성되어 있다. (Figgenger et al. 2025; Federal Ministry for Economic

**Affairs and Climate Action 2023b)** 이는 현재 독일에서 양수 발전과 가정용 시스템이 주도적인 역할을 하고 있음을 보여준다. 그러나 독일의 양수 발전 용량 증가 잠재력은 지리적 제약으로 인해 제한적이다. 따라서 본 연구는 BESS(에너지저장시스템)의 도입에 초점을 맞추고 있다.

한국의 상황은 약간 다르다. 한국은 2023년 말 기준 총 9.1GW/48GWh의 에너지 저장 시스템을 설치 및 운영 중이다. 이 중 리튬이온 배터리 ESS는 4.4GW/10.4GWh를 차지하며, 주로 주파수 조정, 재생에너지 연계, 대규모 소비자 수요 관리에 사용된다. (Ministry of Trade, Industry and Energy and Korean Energy Economics Institute 2023) 가정용 ESS 구축은 현재 시범 사업의 일환으로 진행 중이다. 나머지 저장 용량은 4.7GW/37.6GWh 규모의 양수 발전(PHS)을 통해 공급된다. (Statista 2023b)

대규모 BESS는 높은 효율성과 유연성으로 인해 주목받고 있다. 지리적 제약이 있는 양수 발전과 달리, BESS는 변전소와 같은 전략적 위치 근처에 광범위하게 배치될 수 있다. (Gür 2018) 또한, 대규모 PV 시설 및 풍력 발전소에서 생산되는 전기의 보다 나은 시장 통합, 송전 시스템 운영자 및 배전 시스템 운영자를 위한 그리드 운영 관리를 지원하는 '계통 부스터(grid

booster)', 대규모 산업 현장에서 에너지 관리를 최적화하기 위한 노력 등 새로운 활용 분야가 계속해서 등장하고 있다. (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 2023b) 또한 BESS는 펌프 수력 저장(PHS) 및 압축 공기 에너지 저장에 비해 더 높은 왕복 효율을 보인다. (Deguenon et al. 2023)

넷제로 경제로의 전환에 필수적인 하는 전력망의 시스템 안정성과 유연성을 확보하기 위해 대규모 배터리 저장 시스템은 한국과 독일 모두에서 중요한 역할을 하며 상당한 잠재력을 가지고 있다. 그러나 각국의 전력망에 가장 효과적으로 서비스를 제공하기 위한 배터리 에너지 저장 시스템의 최적 위치 선정 등 많은 의문점이 여전히 남아 있다. 따라서 본 연구에서는 한국과 독일의 대규모 배터리 저장 시스템의 현황, 잠재력, 그리고 과제를 분석하고 있으며, 다음과 같이 진행되었다. 먼저 배터리 저장 시스템, 기존 기술 및 활용 사례에 대한 간략한 개요를 살펴보고, 이어서 한국과 독일의 BESS 구축 현황, 잠재력, 정책, 과제, 그리고 이해관계자를 심층적으로 살펴보았다. 또한, 각 국가의 대규모 BESS 사례 연구를 하나씩 제시하며, 마지막으로, 양국의 비교 분석을 통해 독일과 한국의 미래 협력 방안을 기술하고 있다.



## 2 배터리 에너지 저장 시스템 개요

배터리 에너지 저장 시스템(BESS)은 다른 유형의 대규모 에너지 저장 시스템에 비해 높은 전력 용량, 계통 신호에 대한 빠른 응답 속도, 모듈형 구축에 적합한 용량 등 여러 장점을 가지고 있어 뛰어난 확장성을 제공한다. BESS에는 리튬 이온 전지, 납축전지, 나트륨-니켈-염화물 전지, 산화환원흐름 전지 등 네 가지 일반적인 배터리 기술이 사용된다. 이러한 배터리 기술은 송전망과 배전망 모두에서 다양한 용도로 활용될 수 있으며, 보조 전력, 피크 용량, 산업용 에너지 공급 등이 여기에 포함된다.

### 2.1 BESS의 정의와 종류

#### 2.1.1 정의

정의는 맥락, 특정 그리드 요구 사항 및 시스템 목적에 따라 다를 수 있지만 '대규모 배터리 저장 시스템'이라는 용어는 일반적으로 특정 시스템에 따라 최소 1MW의 전력 용량에서 최대 100MW가 넘는 배터리 에너지 저장 시스템을 말한다. (U.S. Energy Information Administration 2023; Kyon Energy 2025) 대규모 배터리 저장 시스템은 공급과 수요의 균형을 맞추고, 그리드를 안정화하고, 재생 에너지를 통합하고, 백업 전력을 제공하는 목적을 달성할 수 있다. 이러한 시스템은 다른 유형의 ESS에 비해 빠른 응답 시간이라는 장점을 제공한다. 바로, 즉 밀리초 이내에 계통 신호에 응답할 수 있으므로 빠른 응답 서비스에 적합하다. 또, 확장성이 장점인데, 종종 모듈 방식으로 배열되고, 높은 전력 용량, 몇 시간(예: 리튬 이온 배터리의 경우 최대 4시간), 최대 하루(예: 산화환원 흐름 배터리) 동안 전력을 공급할 수 있으며, 높은 왕복 효율, 즉 에너지 저장 및 방출 효율이 높다는 것을 의미한다. (Prakash et al. 2022; Figgner et al. 2023) 또한, 특히 펌프 수력 저장과 비교했을 때 유연하고 분산적으로 사용할 수 있으며, 이를 위해서는 특정 지리적 전제 조건이 필요하다. (Bundesverband Energiespeicher Systeme 2023)

#### 2.1.2 Types of large-scale BESS

대규모 배터리 저장 시설에서 사용할 수 있는 배터리에는 여러 유형이 있다.

다양한 배터리 기술을 비교할 때 고려해야 할 몇 가지 특성이 있다. 그 중에는 배터리에서 사용할 수 있는 전기량을 정의하는 저장 용량, 배터리가 제공할 수 있는 전력량을 나타내는 전력 속도, 서론에서 설명한 바와 같이 방전 중 배터리가 제공하는 에너지와 충전 사이클 동안 제공되는 에너지의 비율을 나타내는 왕복 효율이 있다. 다른 특성으로는 배터리에서 방전되는 에너지의 비율을 나타내는 방전 심도(DoD)와 배터리가 수명 동안 제공할 수 있는 충전 및 방전 사이클 횟수를 나타내는 배터리 수명 등이 있다. (Prakash et al. 2022)

또한, 배터리 생산 과정에서 발생할 수 있는 안전 및 환경 고려 사항, 배터리 작동 가능 온도 범위, 그리고 총 투자 비용 등의 측면도 고려할 수 있다.

가장 일반적인 배터리 유형과 그 장단점은 다음과 같다.

**리튬 이온 배터리:** 대규모 BESS에 사용되는 가장 일반적인 배터리 기술은 리튬 이온(Li-ion) 배터리이다. (Mongrid et al. 2019) 리튬 이온 배터리는 1970년대 후반에 처음 발명되었으며 가정용 배터리 에너지 저장 시스템뿐만 아니라 전기 자동차(EV) 배터리와 스마트폰 및 노트북과 같은 가전제품 크기 배터리에도 일반적으로 사용된다. (Liu 2019) 리튬 이온 배터리는 고출력 속도, 높은 방전 심도, 높은 왕복 효율 및 긴 수명과 같은 광범위한 유익한 특성을 특징으로 한다. 또한 리튬 이온 배터리는 광범위한 작동 온도, 재활용 가능한 리튬 산화물 및 일반적으로 좋은 성능을 보인다. (Prakash et al. 2022) 동시에 이 기술은 리튬, 코발트 및 니켈과 같은 독성 물질로 인한 환경 및 안전 문제를 포함하여 단점이 있다. 해당 물질은 물과 토양 오염을 유발하고 인간과 야생 동물의 건강을 위협하며 종종 지속 불가능한 채굴 관행을 수반한다. 과거에는 이 기술이 비교적 높은 비용을 특징으로 했지만, 리튬 이온 배터리 셀의 평균 가격은 2022년 킬로와트시당 166달러에서 2024년 12월 115달러로 급격히 떨어졌다. (Zheng 2023; Clark 2025; Statista 2025) 게다가 리튬 이온 배터리의 주요 안전 위험은 열 폭주인데, 이는 과열로 인해 화재나 폭발이 발생하는 과정을 말한다. (Dai and Panahi 2025) 동시에 리튬 이온 배터리 내부에 사용된 재료의 회수 및 재활용을 위한 솔루션은 적고 아직 널리 적용되지 않았지만, (Prakash et al. 2022; Ritchie 2024), 현재 유럽의 재활용 용량은 기존 시설의 여러 확장 프로젝트와 새로운 재활용 공장에 대한 발표로 증가하고 있다. (Stephan 2024)

**납축전지:** 납축전지는 우수한 저장 용량과 빠른 응답 속도를 갖춘 잘 개발된 기술로 알려져 있다. 리튬 이온 배터리에 비해 자가 방전율이 낮고 투자 비용도 상대적으로 저렴하다. 그러나 배터리에 함유된 황산은 부식성이 강하여 접촉 시 화상이나 부상을 유발할 수 있어 환경 및 안전 문제와 같은 몇 가지 단점이 있다. 또한, 납은 신경 손상을 포함한 심각한 건강 문제를 유발할 수 있다. 부적절한 폐기 또는 재활용은 산과 납을 환경으로 방출하여 오염을 유발하고 건강 위험을 증가시킬 수 있다. 또한, 방전 심도가 낮고 부피가 크며, 사이클 용량이 낮다는 단점이 있다. 즉, 성능과 용량을 유지하면서 반복적인 충방전 사이클을 수행할 수 있다는 것을 의미한다. (Prakash et al. 2022; May et al. 2018)

**염화니켈나트륨 전지:** 염화니켈나트륨 전지는 높은 에너지 밀도를 가지고 있어 다른 유형의 배터리보다 더 적은 공간에 더 많은 에너지를 저장할 수 있으며, 긴 수명을 자랑한다. 또한 리튬 이온 전지에 비해 방전 시간이 길고, 응답 속도가 빠르며, 투자 비용이 낮은 것으로 알려져 있다. 나트륨은 풍부한 자원이기 때문에 배터리 생산에 최적의 소재이다. 반면, 운영 및 유지 보수 비용이 높고 자가 방전율이 높기 때문에 에너지 밀도, 사이클

수명 및 안전성 향상을 위한 연구 개발이 진행 중이다. (Prakash et al. 2022; Lan et al. 2023)

**바나듐-레독스-흐름 배터리:** 레독스-흐름 배터리는 특히 대규모 에너지 저장에 유망한 배터리 유형이다. 이 배터리는 확장성이 뛰어나고, 에너지가 셀 스택 외부의 액체 형태로 저장되므로 사이클 수명이 길며, 안전성이 향상되었다. 또한, 빠른 반응성을 갖추고 환경적 위험을 최소화하였다. 그러나 레독스-흐름 배터리는 다른 유형의 배터리보다 에너지 밀도와 왕복 효율이 낮다. 또한, 상대적으로 높은 기술적 복잡성으로 인해 투자 비용이 높다. (WattLogic 2021; Olabi et al. 2023)

**고체 전지:** 고체 전지는 기존 리튬 이온 배터리의 액체 전해질을 고체 전해질로 대체하는 첨단 에너지 저장 장치로, 열 불안정성, 제한된 에너지 밀도, 안전 문제와 같은 주요 과제를 해결한다. 이 배터리는 충전 및 방전 시 고체 전해질을 통해 리튬 이온을 이동시켜 작동한다. 고체 전해질은 안정적인 이온 전도체이자 기계적 분리막 역할을 하여 단락을 방지하고 셀을 더욱 단단하게 채울 수 있도록 한다. 고체 전해질에는 세라믹, 황화물, 폴리머와 같은 재료가 사용되며, 전도성과 내구성 측면에서 상충 관계를 보인다. (Lozanova 2025)

대규모 ESS 에 사용될 수 있지만 아직 연구 중이거나 다른 이유로 널리 사용되지 않는 다른 유형의 배터리로는 니켈-카드뮴, 나트륨-황, 아연-브롬 흐름, 나트륨-이온 배터리가 있다.

## 2.2 대규모 BESS 의 사용 사례

대규모 BESS 는 다양한 용도에 적용될 수 있으며, 각기 다른 종류의 배터리가 서로 다른 응용 분야/서비스에 적합하게 설계될 수 있다. (Eichhammer et al. 2020) 일반적으로 BESS 는 송전망과 배전망 모두에서 다음 서비스 중 하나 이상을 위해 사용될 수 있다. 전력 품질 및 무정전 전력 공급을 위한 계통 지원, 최대 전력 수요 충족, 재생 에너지원과 분산형 에너지원 통합의 이점 향상, 배전망 확장 또는 재구성 관련 비용 절감 등이다. (Prakash et al. 2022) 또한, 대규모 BESS 는 재생 에너지와 함께 계량기 앞에 설치되거나, 발전 후 전기를 직접 저장하는 기존 발전소, 송전/배전망, 그리고 에너지 수요를 조절하기 위한 산업 및 주거용 계량기 뒤에 설치될 수 있다. (PWC 2024)

다음에서는 대규모 배터리 저장 시설의 가장 중요한 활용 사례를 설명하여 포괄적인 개요를 제공한다.

첫째, 대규모 BESS 는 배전망과 송전망 모두에서 보조 서비스로 사용될 수 있다. 보조 서비스란 안정적인 계통을 유지하면서 발전기에서 소비자에게 전력을 송전하는 서비스를 의미한다. 이에 는 공급과 수요의 균형을 유지하기 위해 공급되거나 흡수되는 단시간 전기 공급뿐만 아니라, 계통 보안으로 직결되는 전압 안정성 확보, 주파수 조정 및 예비력 공급도 포함된다.

또한, 대규모 BESS 는 **최대 용량 확보**, 즉 시스템의 최대 수요를 충족할 수 있는 충분한 용량을 제공하는 데 도움이 될 수 있다. 더 나아가, BESS 는 **에너지 전환**을 허용해야 한다. 즉, 에너지 저장 장치를 저비용으로 충전하고 수요가 공급을 초과할 때 방출할 수 있다. 배터리는 잉여 재생 에너지 또는 배터리와 결합하여 급전 가능한 자산을 사용하여 충전될 수 있다. 대규모 BESS 를 통해 **기존 전력망 인프라를 최적화**함으로써, 전력회사는 기존 전력망 확장 투자를 연기하거나 아예 하지 않아도 된다.

마지막으로, 대형 배터리 시스템을 **산업용 에너지 공급**에 활용하여 산업체의 전기 소비를 더욱 유연하게 할 수 있다. 전력망과 마찬가지로, 산업체는 BESS 를 백업 전력으로 활용하거나, 피크 시간대에 저장된 전력을 사용하여 비용을 관리함으로써 높은 전기 요금을 피할 수 있다. 이러한 방식을 피크 셰이빙(**peak shaving**)이라고 부른다. 또한, 산업체는 전력 공급을 위해 재생 에너지 단지를 건설하기도 한다. 이 경우, 대규모 BESS 는 전력망과 마찬가지로 간헐적인 발전량을 평준화하는 데에도 동일한 이점을 제공할 수 있다. (Prakash et al. 2022; Figgener et al. 2023; DIN et al. 2021)

대규모 배터리의 경우, 보조 서비스, 용량 시장 참여, 에너지 생산량 변동(즉, 시장 가격이 낮은 기간에 전기를 저장하고 가격이 높은 기간에 전기를 방출하는 것, 즉 차익거래라고도 함)과 같은 활용 사례에 대한 사업적 타당성이 존재한다. 수소 전해조나 기존 발전소처럼 한계 가격과 절대 시장 가격 수준에 초점을 맞추는 다른 유연성 옵션과 달리, BESS 의 핵심 요소는 구매 시점과 판매 시점의 시장 가격 간 예상 가격 차이이다. 더욱이, BESS 의 경제적 타당성은 충전-방전 사이클 횟수에 따라 달라진다. BESS 가 사이클을 더 자주 완료할수록 경제적으로 더 유리해진다. (Tennet 2024).

### 3 독일 BESS 의 현황과 전망

독일은 에너지 전환 전략의 핵심 요소로서 대규모 배터리 에너지 저장 시스템 구축을 빠르게 추진하고 있다. 현재 설치 용량은 약 1.7GW 이지만, 독일 연방전력망청(Federal Network Agency)의 예측에 따르면 2045년까지 43~54GW 로 증설이 필요하다. 정부의 구체적인 구축 목표는 없지만, 이러한 시스템은 독일의 2045년 넷제로 목표 달성에 필수적인 요소로 점차 인식되고 있다. BESS 부문이 다양한 규제 및 기술적 과제를 헤쳐나가는 가운데에서도 현재 시장 상황과 재생에너지 통합 수요 증가로 인해 상당한 규모의 BESS 확장을 위한 유리한 환경이 조성되고 있다.

#### 3.1 독일 BESS 현황

2025년 1월 현재, 독일의 대규모 배터리 저장 용량은 2.2GWh 에 도달했으며, 총 전력은 1.7GW 이다. 2022년 12월 총 설치 저장 용량이 863MWh/787MW 였던 것과 비교하면, 독일의 용량은 단 2년 만에 두 배로 증가하여 BESS 에 대한 관심이 높아지고 있음을 보여준다. (Figgenger et al. 2025) 현재 독일에서 운영 중인 5대 BESS 프로젝트는 표 1에 나와있다. 이 표는 프로젝트가 모두 보조 서비스, 특히 주파수 억제 예비력(FCR)에 사용되고 있음을 보여준다. 일반적으로 독일의 대규모 배터리 저장 시스템은 보조 서비스, 재생 에너지 통합, 산업 에너지 공급 및 차익 거래나 그리드 부스터 프로젝트와 같은 다중 용도 운영에 주로 사용된다. 2019년까지 대규모 저장 시스템은 주로 FCR 제공을 위해 구축되었기 때문에 보조 서비스용 BESS 가 독일 시장을 장악하고 있다. 그 다음은 그리드 부스터 목적, 재생 에너지 통합, 다목적 운영 및 산업용 에너지 공급 순이다. (Figgenger et al. 2023)

독일의 대규모 BESS 수요는 전력화 및 재생에너지 통합 증가로 인해 크게 증가할 것으로 예상되며, 이는 전력망 보안 및 안정성 강화를 요구한다. 배터리는 이미 독일 저장 시장에서 우위를 점하고 있으며, 2023년 대규모 저장 기술 매출의 75.3%를 차지한다. (Bundesverband Energiespeicher Systeme 2024) Figgenger 외 연구진(2023)은 2027년까지 대규모 배터리 저장 용량이 최대 3.9GWh 까지 증가할 것으로 전망한다. 독일 연방태양광산업협회 (BWS Solar, eng. Federal Association Solar Industry)는 2026년까지 최대 8.6GWh 까지 증가할 것으로 예상하고 있다. (Bundesverband Solarwirtschaft e.V. 2024). 이러한 성장 궤적은 독일 송전

시스템 운영사(TSO)인 Amprion, TransnetBW, 50Hertz 의 보고에서도 입증된다. 해당 TSO 들은 2022년 이후 BESS 에 대한 계통 연결 요청이 급증했으며, 특히 2023년에서 2024년까지 더욱 심화되었다고 보고했다. (Johannsen 2024c) 독일 연방 전력망 기관(BNetzA)은 앞으로 2037년까지 약 24GW 의 대규모 전력 저장이 필요하고 2045년까지는 43.3~54.5GW 가 필요할 것으로 전망했다. (Bundesnetzagentur 2024a)

계획되어 있는 대규모 BESS 와 기존 BESS 의 위치는 그림 1에 나와 있다. 이는 리튬 이온 배터리가 독일 BESS 시장을 주도할 것이며, 현재도 주도하고 있음을 분명히 보여준다. (Thimet and Mavromatidis 2023; Bundesverband Energiespeicher Systeme 2024) Figgenger 외 연구진(2023)의 시장 분석에 따르면, 2016년부터 2019년까지 대규모 배터리 부문에서 기술적으로 더욱 다채로운 설치가 이루어졌지만, 2019년 이후 3년 연속 리튬 이온 배터리가 "거의 독점적으로" 설치되었다. 2위와 3위는 레독스 흐름 전지였으며, 그 뒤를 이어 다양한 종류의 고체

표 1: 총 용량 기준 독일 내 설치된 BESS 프로젝트 상위 5개 (based on Bundesnetzagentur (2025))

프로젝트명	전력/용량(MW/MWh)	위치	운영사	용례	배터리 종류	접속일시
Battery storage Werne 2	140/ 150	Hamm, NRW	RWE Generation SE	주파수 억제 예비율(FCR), 차익거래	리튬 배터리	28.12.2024
Battery storage Neurath	80/ 84	Grevenbroich, NRW	RWE Generation SE	FCR, 차익거래	리튬 배터리	06.01.2025
Battery storage Werne	72/ 72	Werne, NRW	RWE Supply & Trading GmbH	FCR, 차익거래	리튬 배터리	15.12.2022
SMAREG4 Wartburg Speicher Eisenach	60/ 67	Eisenach, Thüringen	SMAREG4 GmbH & Co. KG	F FCR, 차익거래	리튬 배터리	30.11.2022
Big Battery Lausitz	53/ 50	Spremberg, Brandenburg	Lausitz Energie Kraftwerke AG	FCR, 차익거래	리튬 배터리	19.11.2020

전지가 뒤따랐다. (Fraunhofer ISI 2020) 이렇게 타 기술들이 존재하고 독일과 다른 곳에 설치된 것으로 보이지만, 최근 연구에 따르면 이러한 기술들은 "덜 성숙했으며 가까운 미래에 리튬 이온 배터리보다 성능이 떨어질 가능성이 높다"는 데 동의하는 것으로 보인다. (Thimet and Mavromatidis 2023)

현재 독일에서 건설 중인 대규모 BESS 프로젝트의 몇 가지 예로는 RWE가 2030년까지 3GW 규모의 배터리 저장 전력을 계획하고 있는 것이 있다. 또한 오스트리아 에너지 회사 VERBUND는 2030년까지 총 1GW 규모의 대규모 배터리 저장 시설을 개발하고 있으며, 해당 용량의 일부는 2023년 초부터 바이에른주에서 이미 가동 중이다. 한편, LEAG는 라우지츠(Lausitz) 지역의 오래된 석탄 화력 발전소 부지 중 하나에 약 750MW의 예상 전력을 가진 대규모 저장 시설을 개발하고 있다. (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 2023b) E.ON, Amprion, LWE Verteilnetz는 현재 바이에른에 총 250MW 규모의 분산형 "Netzbooster"를 계획하고 있다. 송전망에 직접 연결되는 다른 중앙 집중형 프로젝트와 달리, 이 그리드 부스터는 슈바벤 지역 LEW 배전망에 있는 기존 변전소 5곳에 분산 설치될 예정이다. 이러한 모듈식 접근 방식은 연결 비용을 절감하고, 그리드 부스터의 가용성을 높이며, 각 지역의 경관에 미치는 영향을 최소화한다. (Amprion 2024; Tennet 2024)

독일에서 BESS 프로젝트가 급증하는 이유 중 하나는 2023년에 완료된 원자력 발전에서의 철수와 서독 석탄 지역(Rheinisches Revier)에서 늦어도 2030년까지, 동독 석탄 지역(Lausitz)에서 늦어도 2038년까지 완료될 석탄 화력 발전의 지속적인 단계적 폐지 때문이다. (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 2023b) 화석 연료 및 원자력 발전의 감소와 재생 에너지원의 증가로 에너지 저장 솔루션에 대한 수요는 전례 없는 수준에 도달했다. 동시에, 폐쇄된 원자력 및 석탄 발전소 부지는 이미 필요한 전력망 연결이 구축되어 있고, 기존 산업 부지를 재활용하는 것이 새로운 산업 부지를 조성하는 것보다 관료적 간접비용이 적기 때문에 대규모 배터리 설비를 구축할 수 있는 훌륭한 기회를 제공한다. (Fraunhofer ISE 2022)

또한, 현물시장 가격 변동으로 인해 대규모 BESS에 대한 수요가 급증했다. 독일 전력 시스템에서 재생에너지, 특히 태양광 발전의 비중이 증가함에 따라 가격 변동성이 더욱 커진 것이다. 재생에너지 공급 과잉으로 인해 당일 전력 시장에서 마이너스 가격이 발생하기도 했다. 특히 현물시장 가격 변동성은 BESS와 즉시 또는 단기 납품을 위한 전력 차익거래(당일 시장 또는 일중 시장)를 가능하게 한다. 업계 전문가에 따르면, 현재 배터리 저장 시스템 시장 환경은 매우 매력적이며, 설치된 시스템 유형 및 용도에 따라 15~20%의 수익률을 기대할 수 있다. (Johannsen 2024b)

독일 연방교육연구부는 독일에 기술적으로 주권적이고 경쟁력 있으며 지속 가능한 배터리 밸류 체인(value chain)을 구축하는 것을 목표로 한다. (Federal Ministry of Education and Research 2023) 따라서 국가적 밸류 체인 구축을 촉진하기

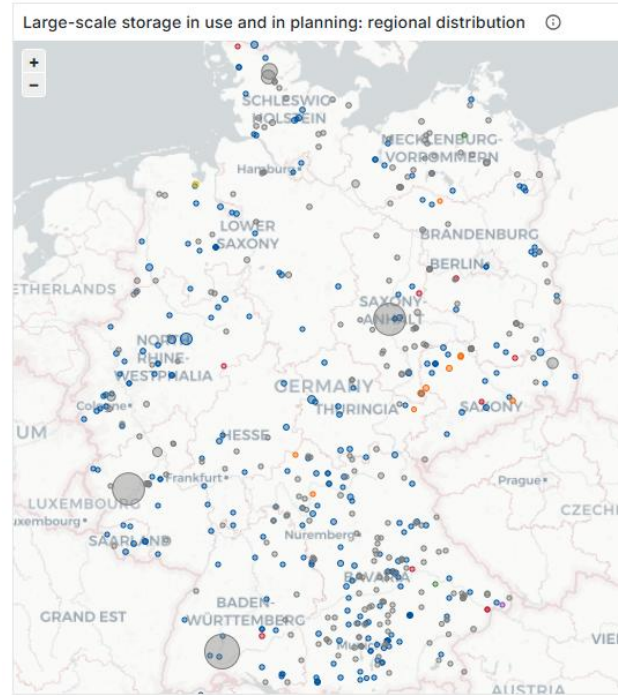


Figure 1: Regional Distribution of planned and existing large-Scale BESS in Germany (Source: Figgenger et al. (2025))

위해 2007년부터 실질적인 연구 자금 지원 사업이 시행되어 왔다. (섹션 3.2.1 참조) 2030년까지 독일의 배터리 생산 역량에 대한 민간 및 공공 투자 총액은 185억 유로(약 27.8조 원)이다.<sup>1</sup> (Deutscher Bundestag 2024)

독일에서는 대규모 BESS 설비 증가와 함께 모든 유형의 배터리 셀에 대한 전체 배터리 가치 사슬의 생산 용량<sup>2</sup>이 확대되고 있다. 예를 들어, BASF는 2023년 중반에 배터리 소재 생산 및 재활용을 위한 신규 시설을 개장했으며, Tesvolt는 2025년에 신규 시설을 개장하여 연간 최대 8만 개의 배터리 저장 시스템을 구축할 수 있도록 생산 용량을 확대하고 있다. (dpa 2024; BASF 2023; MDR 2024)

2023년 독일 배터리 산업 매출은 94억 유로(약 14조 1천억 원)였으며, 이 중 76%는 국내에서, 24%는 해외에서 발생했다. 같은 해 독일은 2023년 총 203억 유로(약 30조 5천억 원) 상당의 리튬이온 배터리를 수입했는데, 이 중 42%는 중국(85억 유로 또는 12조 8천억 원), 3%는 한국(6억 유로 또는 약 9억 220만 원), 나머지 52%는 유럽 인접국 및 기타 아시아 국가에서 수입했다. (Verband der Elektro- und

<sup>1</sup> 모든 통화는 1 EUR = 1503.8 KRW(2025년 5월 2일 기준)의 환율로 환산되었다.

<sup>2</sup> 다음 수치는 BESS 가치 사슬에 대한 데이터가 아직 제공되지 않아 배터리 산업 전반을 나타낸다. 따라서 이 수치에는 전기 자동차용 배터리 산업의 성장에 대한 데이터도 포함되어 있다.

Digitalindustrie 2024; Statistisches Bundesamt 2024; Statistisches Bundesamt and ZVEI 2024) GWh 로 측정했을 때, 독일은 2024 년 354GWh 를 생산하며 유럽 연합에서 가장 많은 배터리 생산국이었다. 또한, 셀 생산 용량 또한 독일에서 462GWh 증가할 것으로 예상되며, 이는 현재 에너지 용량의 두 배 이상이다. 유럽 배터리 산업의 현황을 집중적으로 다루는 간행물인 Battery Atlas 2024 에 따르면, 독일은 배터리 가치 사슬 전반에 걸쳐 많은 기업들의 집중 거점이며, 배터리 생산 시스템 개발에 있어 선구적인 역할을 하고 있다. (RWTH Aachen University 2024)

### 3.2 BESS 정책 도구 및 전략 개요

#### 3.2.1 목표

2021 년 독일은 기후 변화법을 개정하여 2045 년까지 온실가스 중립 목표를 포함시켰다. 전력 부문의 경우 2030 년 총 전력의 최소 80%가 약 600TWh 에 해당하는 재생 에너지로 공급될 예정이며, 이를 달성하기 위해 2030 년까지 해상 풍력 에너지의 발전 용량을 30GW 로, 육상 풍력 에너지는 115GW 로, PV 는 215GW 로 늘릴 계획을 갖고 있다. (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 2023b) 화석 연료에서 재생에너지원으로서의 에너지 전환은 전력 부문의 수요와 제약에 영향을 미친다. 화석 에너지원을 재생에너지원으로 대체함으로써 독일의 전력 생산은 분산화되고 있다. 또한, 다른 에너지원, 공급자, 사용자가 시장에 진입함에 따라 새로운 구조, 과제, 그리고 문제가 발생할 것이다. (예: 개인 주택에서의 태양광의 국지적 발전) 에너지 효율 및 에너지 절약 조치가 도입되는 한편, 감축이 어려운 산업 공정의 전기화 또는 이동성 증가로 인해 전력 소비가 증가할 수도 있으며, 해당 변화는 전력 공급에 영향을 미칠 것이다. 재생에너지 기반 전력 부문에서는 이제 어디서나 전력을 생산할 수 있지만, 재생에너지 공급의 변동성으로 인해 언제든지 생산할 수는 없다. (Schulz and Bundesverband Energiespeicher Systeme 2025)

이러한 일시적인 가용성과 유연성 부족은 배터리 저장과 같은 에너지 저장 옵션을 통해 해결할 수 있다. 독일 정부는 원하는 수준의 전력망 유연성을 확보하고 독일의 배출 감축 목표 달성에 필요한 재생에너지를 통합하기 위해 배터리 에너지 저장 시스템 도입을 촉진하고자 한다. 독일 연방 정부는 독일 내 대규모 BESS 의 전력 용량에 대한 구체적인 도입 목표를 설정하지 않았지만, 2023 년부터 시행될 전력 저장 전략에서 해당 기술의 전반적인 필요성을 강조하며 기술 확장에 대한 의지를 보이고 있다. 이러한 도입을 촉진하기 위해 연방 경제기후행동부(BMWK)는 2024 년 전력 저장 전략에서 가능한 한 빨리 시행할 전략적 목표를 설정했다. 여기에는 전력망 구축 지원 및 BESS 통합 촉진, 전력망 사용자 문제 해결, 에너지 시스템 내 전력 저장의 유연성 옵션으로서의 잠재력 평가, 인허가, 관료적 절차 또는 전력망 통합 관련 문제 해결이 포함된다. 전체 목표가 담긴 목록은 다음의 에너지 저장 전략을 참조하면 된다. ([링크](#))

#### 3.2.2 정책도구

독일에서 배터리 에너지 저장 시스템 구축을 촉진하기 위해 다음과 같은 정책이 시행되었다. 해당 정책은 배터리 연구, 생산 역량 강화, 그리고 배터리 저장 시스템 구축 지원의 세 가지 주요 지원 분야로 구분할 수 있다. 해당 정책 수단들은 유틸리티

규모의 배터리 저장 프로젝트 개발에 유리한 환경을 조성하는데 기여한다.

#### 배터리 연구

2007 년부터 독일 연방교육연구부(BMBF)는 배터리 연구에 자금을 지원해 왔다. 2018 년, BMBF 는 'Forschungsfabrik Batterie(배터리 연구 공장)'라는 포괄적 개념 하에 배터리 연구를 위한 자금 지원 조치와 연구 프로그램을 통합했다. 이 포괄적 개념은 배터리 연구를 활성화하고, 독일 내 경쟁력 있는 대규모 배터리 셀 생산 개발을 지원하며, 연구 결과의 실용화 속도를 높이는 것을 목표로 한다. 이 포괄적 개념은 다양한 조치와 함께 미션 지향적이고 개방적인 주제 접근 방식을 결합한다. 배터리 연구 공장이라는 포괄적 개념의 모든 부분이 협력하여 연구 결과를 가치 창출의 다음 단계로 끌어올려야 한다. (Federal Ministry of Education and Research 2022, 2025) 해당 목표를 실현하기 위해 BMBF 의 배터리 연구 투자는 2018 년 7,900 만 유로(약 1 억 1,880 만 원)에서 2023 년 1 억 4,500 만 유로(약 2 억 1,800 만 원)로 증가했다. (Deutscher Bundestag 2024)

또한, BMBF 는 기관 연구 지원 프로그램의 일환으로 배터리 연구에 추가 자금을 지원한다. 이는 BMBF 가 독립적으로 자금을 지원하는 연구 기관 및 단체, 연방 주 또는 기타 파트너 기관을 지원하는 것이 포함된다. 프라운호퍼 협회(Fraunhofer-Gesellschaft)와 라이프니츠-헬름홀츠 협회(Leibniz-Helmholtz Association)는 배터리 연구 분야와 특히 밀접한 관련이 있다. 또한, 독일 연구 재단(DFG)과 막스 플랑크 연구소 또한 전기화학 에너지 저장 연구에 기여하고 있다. (Batterie 2020 2025a)

대규모(배터리) 에너지 시스템의 목표 개발은 2011 년 BMBF 와 BMWK 가 연방 정부의 제 6 차 에너지 연구 프로그램에 따른 '에너지 저장 이니셔티브'의 일환으로 처음 지원했다. (Batterie 2020 2025b) 이는 2024 년 6 월에 발효된 제 8 차 에너지 연구 프로그램에도 포함되어 있다. 여기에는 전력 시스템을 위한 고정형 에너지 저장 시스템에 대한 특별한 초점이 포함된다. (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 2023a)

#### 배터리 저장 롤아웃

독일 연방 정부는 이해관계자들이 대규모 배터리 저장 프로젝트에 투자하고 참여하도록 장려하기 위해 다양한 정책 조치를 시행해 왔다. 가장 주목할 만한 것은 BESS 설치를 지원하고 운영 비용을 절감하는 법률 조항이며, 다음과 같다.

우선, 2023 년 3 월, 지역계획법 개정 및 기타 조항을 통해 '전력 저장 시설 설치에 대한 최우선 공익'을 법적으로 명시했다. 해당 개정안은 신속한 승인 절차 처리 등 전력 저장 프로젝트에 특혜를 부여하여 재생에너지와 동일한 수준의 관련성을 부여하기 위해 마련되었다. (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 2023b)

둘째, 규제 프레임워크 Energiewirtschaftsgesetz(EnWG, 에너지 산업법)의 섹션 118(6)과 독일의 대규모 에너지 저장 시설을 규정하는 계통 요금 조례의 섹션 19(2) 및 (4)는 BESS 에 대한 상당한 조항을 수반한다. 이러한 조항은 저장 과정에서 손실된 전기량에 대한 요금을 포함하여 그리드 사용 요금 청구의 경우, 저장 시설을 대부분 또는 전부 면제하고 있다.

해당 규제 접근 방식은 운영 비용을 줄여 대규모 저장 솔루션의 배포 및 통합을 장려하는 것을 목표로 한다. 이러한 맥락에서 저장 시설에 대한 그리드 사용 요금의 향후 규제는 유럽 사법 재판소의 규제 기관의 독립성에 대한 판결에 따라 Bundesnetzagentur(BNetzA, 독일 연방 네트워크 기관)의 전속 관할권에 속한다는 점에 유의하는 것이 중요하다. 또한 고정형 배터리 저장 시설(BESS 포함)은 저장 장치에서 방출된 전기를 그리드에 공급하는 경우 전기 요금이 면제된다. 이는 전기의무법 제 5 조(4)항에 규정되어 있다. (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 2023b) 그러나 이러한 전력망 요금 면제는 현재 2029 년까지만 유효하다. 따라서 여러 단체들은 BESS 에 대한 세금의 영구 폐지를 요구하고 있다. 그들은 이 면제가 폐지될 경우 기존 BESS 가 더 이상 경제적으로 운영되지 못할 수 있다고 주장한다. (Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V. 2024; Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft 2024 확인)

셋째, ESS 는 재생에너지법(EEG, Renewable Energy Sources Act) 제 3 조 1 항에 따라 충전 중 재생에너지만을 소비하는 경우 재생에너지 설비로 분류된다. 이 경우, 재생에너지에 제공되는 재정 지원은 저장 시스템에서 생산된 전기까지 확장된다. 여기에는 태양광(PV)과 저장 시스템이 결합된 경우, 재생에너지가 PV 설비에서 전력망으로 직접 흐르지 않고 저장 시스템을 통해 흐르는 경우가 포함된다.

2021 년부터 재생에너지 지원(예: 태양광 또는 풍력)과 결합된 ESS 는 EEG 제 39 조에 명시된 반기별 '혁신 입찰'에도 참여할 수 있다. EEG 에 따르면, 혁신 경매는 '전력망 또는 시스템에 특히 유용하고 기술 중립적인 경쟁 과정에서 효율성이 입증된 기술 솔루션을 홍보'하기 위한 것이다. 실제로 이는 주로 그리드 인프라를 더 효율적으로 활용하고, 태양광 및 풍력 발전의 최대 부하를 흡수하며, 전력망을 안정화하기 위해 재생에너지와 함께 저장 시스템을 사용하는 것을 의미한다. 입찰에 참여하려면 프로젝트의 총 에너지 용량이 최소 1MWh 이상이어야 하며, 보조금을 받는 시스템은 그리드(EEG)가 아닌 보조금을 받는 재생에너지원에서 전기를 공급받아야 한다. 2021 년 혁신 입찰이 처음 도입되었을 때 낙찰가는 고정 시장 프리미엄을 받았다. 그러나 2022 년 12 월부터 변동 시장 프리미엄이 적용되었다. 이 프리미엄은 이제 전기의 시장 가치가 경매에서 설정된 특정 가격, 즉 EPEX 전력 거래소의 월 평균 가격을 기준으로 한 가격 미만으로 떨어질 때만 부여된다. (NEXT Kraftwerke 2025) 2024 년 9 월에 실시된 가장 최근 입찰에서는 총 587MW 규모의 50 개 재생에너지 및 저장 프로젝트가 낙찰되었다. 입찰 규모는 583MW 였다. 총 154 건의 입찰이 접수되어 총 1,856MW 를 기록했으며, 입찰 금액은 초과 신청되었다. 독일 연방전력망청(FNA)은 요금 범위가 kWh 당 €0.0674 에서 €0.0745 까지였으며, 평균 가격은 kWh 당 €0.0709 였다고 보고했다. 입찰 최고가는 kWh 당 €0.0918 로 책정되었다. (Bundesnetzagentur 2024b)

연방 정부가 대규모 BESS 설치 또는 운영을 위해 제공하는 다른 유형의 공적 재정 지원은 현재 제공되지 않고 있다. 과거에는 가정용 소형 배터리 설비를 대상으로 한 여러 사업이 성공적으로 진행된 바 있다. 예를 들어, 국가개발은행인 KfW(Kreditanstalt für Wiederaufbau)는 연방경제에너지부(현 BMWK)와 협력하여 2016 년 소규모 에너지 저장 시스템 구매자를 위한 저금리 보조금 제도를 도입하여 저장 기술에 대한 조기 투자를 촉진했다. 해당 사업은

2024 년까지 독일의 가정용 저장 용량이 약 14GWh 증가하는 데 기여했다. (Prakash et al. 2022; Stöcker 2024) 리튬 이온 배터리 비용이 2022 년 이후 크게 감소했으며 안정적으로 유지될 것으로 예상됨에 따라 대규모 시스템에 대한 유사한 계획은 계획되어 있지 않다. (Fraunhofer ISI 2020) 골드만삭스 리서치는 배터리 팩의 경우 2023 년부터 2030 년까지 연평균 11% 감소할 것으로 추산하고 있다. (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 2023b)

연방 자금 지원이 부족한 상황에서 은행과 투자자들은 에너지 저장 프로젝트를 위한 신용 제도를 개발하고 있다. (PV Magazin 2024c) 또한, 일부 연방 주는 고정형 배터리 에너지 저장 시스템에 대한 재정 지원을 제공한다. 예를 들어, 작센안할트주(Saxony-Anhalt)는 유럽 지역 개발 기금(ERDF)의 지원을 받아 총 2,200 만 유로(약 3,310 만 원) 규모의 자금 지원 프로그램을 발표했다. 이 자금은 재생에너지원에서 생산된 전력을 위한 30 킬로와트시(kWh) 이상의 에너지 용량을 갖춘 고정형 전기화학 저장 시스템에 대한 기업의 투자에 사용되며, 여기에는 필요한 배터리 관리 시스템 및 저장 인버터가 포함된다. (Ministry of Science, Energy, Climate Protection and Environment of the State of Saxony-Anhalt 2024) 산업 협회는 또한 혁신 경매에서 수행된 것처럼 재생 에너지 생산 사이트와 결합된 BESS 뿐만 아니라 소비자 지역의 전기 저장 시스템이나 최종 소비자에게 직접 설치된 전기 저장 시스템에 대한 일반적인 자금 지원을 요구한다. (Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V. 2024)

### 국가의 생산 능력

BMWK 는 2020 년부터 배터리 셀 제조 및 전체 배터리 가치 사슬의 생산 능력 확대를 적극적으로 지원해 왔으며, 2020 년대 중반까지 독일 내 배터리 셀의 산업 규모 생산을 구축하는 것을 목표로 하고 있다. 이에 따라 독일 연방 정부는 독일 산업의 입지 강화를 위해 배터리 가치 사슬 전반에 걸친 혁신 노력을 지원하기 위해 약 15 억 유로를 지원했다. (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 2025)

해당 이니셔티브는 배터리 관련 두 가지 주요 유럽 공동 관심사(IPCEI), 즉 "유럽 배터리 혁신"(EuBatIn)과 "유럽 배터리 연합"(EBA)의 주도로 추진되고 있다. 이 프로젝트들은 유럽 배터리 산업의 경쟁력과 지속가능성을 강화하는 것을 목표로 한다. 해당 노력은 독일 각 주에서 구조적 변화를 겪고 있는 지역과 초기 직업 훈련에 중점을 둔 배터리 분야 근로자를 위한 교육 및 재교육 프로그램으로 보완된다.

또한 BMWK 는 새로운 배터리 규정(연방 경제 및 기후 대책부 2023b)에 따라 구현될 디지털 배터리 여권의 기반을 마련하는 Battery Pass 프로젝트와 같은 이니셔티브를 통해 배터리 셀 제조의 디지털화와 지속 가능성을 발전시키고 있다. (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 2023b)

### 3.3 이해관계자 개요

다음의 이해관계자 지도(그림 2)는 BESS 가치 사슬 전반에 걸쳐 활동하는 독일 기관 및 기업에 대한 개요를 제공한다. 지도에서 볼 수 있듯이 독일의 BESS 시장은 매우 다각화되어 있으며, 배터리 에너지 저장 시스템의 개발, 생산, 규제 및 운영에는

다양한 주체가 참여하고 있다. 그리고 아래에 해당 주체에 대한 요약이 나와있다.

이 지도는 모든 주체를 완벽하게 보여주는 것은 아니며, 저자들이 독립적으로 현장 조사를 통해 선정한 것이다. 또한, 생산 측면에서는 주체들이 대규모 배터리 에너지 저장 시스템의 생산 및 조립뿐만 아니라 가정용 소형 BESS, 가전제품용 배터리 셀, 또는 전기 자동차용 배터리 셀 팩 등을 생산하는 경우가 많다는 점에 유의해야 한다. 해당 제품들을 구분하는 것은 어려운 경우가 많다. 특히 전기차용 배터리에 중점을 두는 경우가 많기 때문이다.

관련된 **정부 주체**로는 전력망 규제를 담당하는 연방 네트워크 기관, 전기 저장 시스템 구축을 주도하는 부처인 연방 경제 및 기후 변화 대책부, BESS 에 대한 연구 프로젝트에 대한 지침과 자금을 제공하는 연방 교육 연구부가 있다.

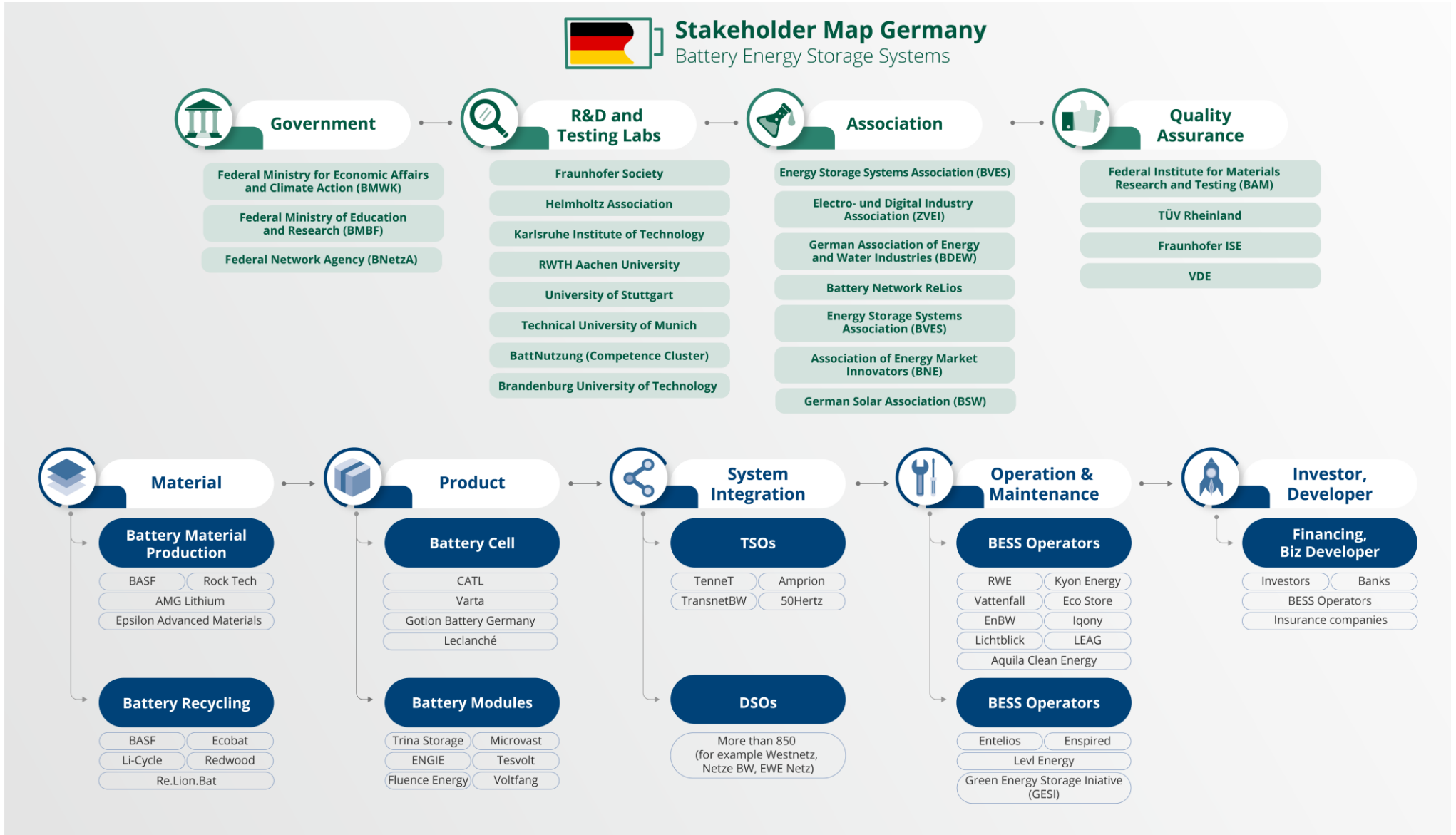


그림 2: 독일 BESS 생태계의 이해관계자 맵 (출처: 자체 일러스트레이션)



프라운호퍼 ISE 나 KIT 배터리

기술연구소(Batterietechnikum)와 같은 연구 기관 및 대학은 수년간 배터리 기술 전문 연구 그룹을 운영해 왔으며, 독일의 기술 발전에 기여해 왔다.

**산업 협회:** 연방 에너지 저장 시스템 협회(BVES, 독일 연방 에너지 저장 시스템 협회)와 같은 배터리 및 산업 협회는 회원들의 이익을 결집하고, 지식 교환을 촉진하며, 정부 및 규제 기관에 대한 옹호 활동을 수행한다. 저장 기술은 다양한 산업에서 활용될 수 있기 때문에, 새로운 협회뿐만 아니라 연방 에너지 및 수자원 산업 협회(BDEW, 독일 연방 에너지 및 수자원 산업 협회)와 같은 기존/기존 협회들도 활발하게 참여하고 있다.

**BESS 생산업체:** 원자재 조달, 소재 생산, 배터리 셀 제조, 시스템 조립 및 관리부터 폐배터리 재활용까지 전체 가치 사슬에 걸쳐 참여하는 주체들이 포함된다. 독일 배터리 시장의 가치 사슬은 아직 개발 중이며 현재 확장 중이기 때문에 참여 주체는 매우 다양하다. Voltfang 이나 VoltStorage 와 같은 소규모 기업과 스타트업부터 중국 CATL 이나 미국 FLUENCE 와 같은 대규모의 탄탄한 기업까지 다양하다. 또한, 폭스바겐과 같은 자동차 산업과 같은 다른 분야의 기업들도 배터리 생산 시장에 진출하고 있지만, 대개는 특정 제품 요구에 맞는 배터리를 생산하기 위한 목적으로 진출하고 있다.

**BESS 품질 보증:** TÜV 라인란트(TÜV Rheinland)와 프라운호퍼 ISE(Fraunhofer ISE)와 같은 표준화 및 시험 기관은 BESS 의 품질과 안전성을 보장하며, 이는 리튬 이온 배터리와 관련된 위험을 고려할 때 매우 중요하다.

**BESS 운영사:** 독일에서는 대규모 배터리 에너지 저장 시스템(BESS) 운영에 다양한 주체가 관여한다. 지정된 사용 사례에 따라 배전 시스템 운영사(예: LWL 또는 Westnetz GmbH), 민간 프로젝트 개발사(예: Energisto), 에너지 공급업체(예: RWE 또는 Lichtblick) 등 다양하다. BESS 의 직접 운영에는 관여하지 않지만, TenneT, Amprion, 50hertz, TransnetBW 등 4 개 TSO 는 BESS 를 전력망에서 활용할 수 있도록 지원한다.

**기타:** BESS 프로젝트에 자금을 지원하는 KfW 및 유럽 연합과 같은 금융 기관과 필요한 전력망 인프라 구축을 담당하는 기관 등 추가적인 이해관계자가 있다.

독일 및 유럽 리튬 이온 배터리 산업에 참여하는 다양한 주체에 대한 보다 포괄적인 개요는 RWTH Aachen 에서 발행하는 Battery Atlas 2024 에서 확인할 수 있다. 단, 산화환원 흐름 전지와 같은 다른 유형의 배터리는 포함되지 않았으며, 나열된 모든 주체가 배터리 에너지 저장 시스템의 가치 사슬과 관련이 있는 것은 아니다. Battery Atlas 2024 는 다음 링크에서 확인할 수 있다. [링크](#)

### 3.4 독일 BESS 의 잠재력

독일의 대규모 BESS 에 필요한 전력 용량 추정치는 다양하다. 프라운호퍼 ISE 연구소는 동적 계통 안정성을 확보하기 위해 2030 년과 2045 년까지 각각 약 100GWhel 과 180GWhel 의 배터리 저장 용량(모든 용량)이 필요하다는 결론을 내렸다. (Fraunhofer ISE 2022) 취리히 연방공과대학교(ETH Zürich) 연구진은 독일 전력 시스템 전환에서 에너지 저장

시스템의 역할을 조사했다. 연구진의 추정에 따르면 2050 년 독일에는 최대 140GWh 의 에너지가 필요하며, 특히 2030 년 이후 에너지 저장 시스템이 에너지 전환을 실현하는 데 중요한 역할을 할 것이라고 강조했다. (Thimet and Mavromatidis 2023) BNetzA 의 송전 시스템 운영자 데이터를 기반으로 한 그리드 개발 계획은 중간적 입장을 취하고 있다. 2037 년까지 91GW, 2045 년까지 168GW 의 전력 용량을 예측하고 있으며, 고정형 대규모 BESS 는 2037 년까지 24GW, 2045 년까지 45~55GW 를 기여할 것으로 예상된다. (Bundesnetzagentur 2024a)

독일 에너지 저장 협회(BVES)는 구체적인 수치를 제시하지는 않았지만, 현물 시장 가격의 급격한 변동에 따른 수요 증가와 예상되는 매출 마진 증가로 인해 향후 몇 년 동안 독일 내 대규모 배터리 저장 용량이 크게 성장할 것으로 예상된다. BVES 는 또한 기존 전력망 연결을 활용하고, 지역 내 수요도가 높으며, 긴 인허가 절차를 생략할 수 있는 '계량기 뒤(behind-the-meter)' 저장 솔루션의 상당한 잠재력을 보고 있다. (National Renewable Energy Laboratory 2019; Bundesverband Energiespeicher Systeme 2024) 또한, 독일의 전력망 요금 개편과 이산화탄소 가격 상승은 업체가 현장 에너지 관리 목적으로 대규모 배터리 시스템을 구축하는 데 필요한 인센티브를 제공할 수 있다. (Schulz and Bundesverband Energiespeicher Systeme 2025)

기존의 추정치에 따라 독일에 대규모 BESS 를 배치하면 100% 재생 가능 전력 시스템으로의 전환을 크게 가속화하고, 2045 년까지 탄소 순 배출량을 달성할 수 있는 잠재력이 있으며, 그 이유는 다음과 같다.

무엇보다도 BESS 는 광범위한 보조 및 송전 관련 서비스(예: 무효 전력 공급 및 냉시동 기능)를 제공함으로써 독일 전력망에 더 큰 유연성을 제공할 수 있다. 기존 화력 발전소와 달리 BESS 는 빠르게 충전 및 방전할 수 있어 계통에 음극 및 양극 자극을 모두 제공한다. 따라서 BESS 는 1 차 주파수 응답(Primary Frequency Response) 및 조정 옵션과 같은 단기 신뢰성 서비스에 특히 적합하다. (National Renewable Energy Laboratory 2019) 현재 BESS 는 주로 1 차 밸런싱 전력에 사용되지만, 독일에서는 현재 주로 양수 발전 시설에서

공급되는 2 차 밸런싱 전력에도 사용될 수 있다.<sup>31</sup> 지리적 제한으로 인해 펌프 저장의 잠재력이 제한되므로 이는 향후 필요할 경우 더 큰 유연성을 제공하는 데 도움이 될 수 있다. (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 2023b) BESS 는 기존의 유연성 옵션을 대체할 경우 외국 화석 연료 수입에 대한 의존도를 줄일 수 있으며, 이는 독일의 에너지 정책 목표에 부합하다.

둘째, BESS 는 재생에너지 비중을 80~90% 이상으로 높여 재생에너지 생산의 변동성을 해소할 수 있다. (Thimet and Mavromatidis 2023; Fraunhofer IWES et al. 2014) 특히 태양광 발전의 경우, 시장 시뮬레이션 결과 대규모 BESS 가 일일 변동을 효과적으로 해소하여 태양광 발전의 시장 가치를 4~11%까지 높이고 추가 용량 확장을 유도할 수 있는 것으로 나타났다. (Tennet 2024; Johannsen 2024b) 또한, BESS 는 독일 북부 해상풍력 발전단지과 같은 지역 또는 지방 전력망 병목 현상을 해소할 수 있다. BESS 는 잉여 전력을 저장함으로써 재생에너지 감축을 방지하고, 지역 전력망 안정성을 높이며, 높은 재생에너지 비중의 전력망 통합을 가능하게 한다. 그러나 이를 위해서는 BESS 의 적절한 지리적 할당이 필요하다. (Fraunhofer IWES et al. 2014)

셋째, 다른 유연성 옵션과 달리 BESS 는 여러 시스템 서비스를 동시에 제공할 수 있지만, 일부 서비스는 상호 배타적이다. 예를 들어, BESS 는 전력망에 전력을 공급하여 피크 수요의 균형을 맞추고, 이를 통해 연중 특정 시간대에 신규 송전을 연기할 수 있다. 또한, 수요가 낮은 시기에는 예비 서비스도 제공할 수 있다. 이러한 "가치 추적" 방식은 규제 지원을 받을 경우, 특히 블랙스타트 용량과 같이 거의 필요하지 않은 서비스의 경우, 개발업체의 전력망 안정성과 수익성을 향상시킨다. (National Renewable Energy Laboratory 2019) 그러나 현행 규정은 이러한 방식을 완전히 허용하지 않으며 (Bundesverband Erneuerbare Energien 2024), 제공된 서비스에 대한 BESS 프로젝트의 이중 보상을 방지하기 위해 적절한 규정을 신중하게 마련해야 한다.

넷째, BESS 는 에너지 시스템의 전환을 더 빠르고 비용 효율적으로 달성하는 데 도움을 줄 수 있다. Thimet 과 Mavromatidis(2023)의 연구에 따르면, BESS 설치 시스템에 유연성을 제공하여 전력망 확장 투자를 지연시킬 수 있다. 전력망 투자는 종종 대중의 저항에 직면하고 건설 지연을 경험하기 때문에, BESS 는 특히 단기적으로 시의적절하고 비용 효율적인 대안을 제공할 수 있다. 그러나 Fraunhofer IWES 는 이러한 효과가 전력망 확장이 지연될 때에만 적용된다고 주장한다. (Fraunhofer IWES et al. 2014) 더욱이, 분산형 전력망 부스터로서 BESS 는 값비싼 재분배 조치의 필요성을 줄여 매년 수십억 유로를 절약할 수 있다. (Amprion 2024)

이러한 장점에도 불구하고, 수요측 관리(DSM) 및 열병합 발전(CHP) 솔루션과 같은 다른 유연성 옵션의 도입 증가는 독일 전력망에서 대규모 BESS 에 대한 수요를 감소시킬 수 있다. 따라서 전력망의 현재 상태를 고려한 지속적인 평가가 필수적이다.

### 3.5 도전과제

독일의 대규모 BESS 확장은 기술, 시장, 규제, 그리고 외부적 과제로 분류할 수 있는 몇 가지 중요한 과제에 직면해 있다. 이러한 기존 과제 구분은 다양한 장애물을 통합하고 이해하는 데 도움을 주기 위한 것이다. 이러한 어려움이 규제를 통해 완화될 수 있다는 것을 의미하는 것은 아니다. 오히려 정반대로, 아래 나열된 과제 중 상당수는 규제 조정을 통해 해결할 수 있다.

#### 3.5.1 규제 과제

규제 관련 문제는 독일의 대규모 BESS 구축에 상당한 영향을 미친다. 가장 시급한 과제는 다음과 같다.

##### 에너지 저장의 법적 정의:

에너지산업법(Energiewirtschaftsgesetz, EnWG) 제 3 조 제 15d 항은 에너지 저장 시스템을 전기 저장 시에는 최종 소비자, 방전 시에는 생산자로 분류한다. 이는 생산자, 소비자, 그리고 유연성 제공자 간의 공정한 경쟁 환경을 보장하기 위한 것이다. (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 2023b; Bundesnetzagentur 2021) 그러나 업계 협회들은 이러한 정의를 비판하며 전기 저장 과정 또한 법적으로 정의되어야 한다고 주장한다. 협회는 이를 통해 재정적 이중 부담을 피할 수 있기 때문에 다른 유연성 옵션과 마찬가지로 에너지 저장의 차별 없는 적용이 보장될 것이라고 주장한다. (다음에서 확인: Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V. 2024; Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft 2024)

**EEG 법의 배타성 원칙:** 재생에너지법(Erneuerbare Energien Gesetz, EEG)은 BESS 가 재생에너지원에서 100% 친환경 전기를 공급받는 경우에만 친환경 전기 공급에 대한 보상을 받을 수 있도록 규정하고 있다. 그러나 BESS 가 현재 회색 전력으로 분류되는 전력망에서 추가 전력을 사용하는 경우, 일시적으로 저장된 친환경 전기에 대한 자금 지원을 받지 못하게 된다. 해당 관행은 유연성을 위한 저장 용량의 최적 활용을 제한한다. (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 2023b)

**복잡한 인허가 절차:** 독일의 대규모 배터리 저장 시스템 인허가 절차는 복잡하고 시간이 많이 소요된다. 현재 850 개가 넘는 배전 시스템 운영자(DSO)는 ESS 를 전력망에 통합하는 데 적용되는 요건, 필요한 서류, 그리고 적용되는 규제 요건에 대해

<sup>31</sup> 1 차 밸런싱 전력은 매우 짧은 시간 내에 계통 주파수 안정성을 유지하는 데 사용된다. 1 차 밸런싱 전력은 몇 초 이내에 공급되어야 하며 최소 15 분 동안 지속되어야 한다. 2 차 밸런싱 전력은 1 차 밸런싱 전력을 대체하여 주파수를 공칭 수준으로 복원하는 데 사용된다. 2 차 밸런싱 전력은 5 분 이내에 공급되어야 하며 15 분 동안 지속되어야 한다. (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 2023b)

각기 다른 기준을 가지고 있다. 필요한 정보에 대한 디지털 접근성이 부족하기 때문에 인증 과정에서 기획자는 구성 요소 사용 제한이나 문서 누락을 발견하여 프로젝트 지연 또는 취소로 이어질 수 있다. 프로젝트 개발을 간소화하기 위해서는 독일 연방 및 주 정부 차원에서 이러한 인허가 절차를 검토하고 효율성을 높여야 한다. (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 2023b)

**비차별화된 계통 구축 비용:** BKZ(Bau-kostenzuschuss, eng. grid construction cost)는 계통 연결 신청자가 계통 용량 확장 비용 중 본인 부담금을 충당하기 위해 지불하는 일회성 비용이다. 실제 에너지 소비량을 기준으로 계산되는 연간 계통 사용료와 달리, BKZ는 합의된 최대 연결 부하와 필요한 계통 용량에 따라 결정된다. 이 모델은 비용이 발생 비용에 따라 배분되도록 하고 계통 자원의 효율적인 활용을 장려하는 것을 목표로 한다. 계통 운영자는 전기가 소비되고 공급되는 경우 BKZ에 차등적으로 요금을 부과할 수 있지만, 이러한 차등적 처리는 계통 연결 BESS에는 적용되지 않는다. 그 이유는 BESS가 최종 에너지 소비자로서 간주되기 때문이다.

(Shelestova et al. 2024) 배터리 저장 업체는 이를 비판하며, BESS의 운영 현실을 정확하게 반영하지 못하고 프로젝트에 상당한 재정적 부담을 준다고 주장한다. (Bundesverband Energiespeicher Systeme 2024)

**불균일한 기여 요건:** BNetzA는 전력 저장 시스템 개발자 및 운영자의 재정 기여에 대한 구속력 있는 요건을 수립하고 표준화하기 위한 공식 절차 도입을 고려하고 있다. 이러한 기여는 BKZ 및 계통 연결 비용을 충당할 것이다. 제안된 프레임워크는 이러한 기여가 투명성, 인과 관계, 그리고 지역적 조화의 원칙에 따라 이루어지도록 하는 것을 목표로 한다. 이 이니셔티브는 현재 정확한 비용 예측과 대규모 배터리 저장 프로젝트의 신속한 구축을 저해하는 기여 요건의 지역적 차이로 인한 업계의 우려에 대응하기 위한 것이다. (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 2023b)

### 3.5.2 기술적 어려움

**계통 연결 부족:** 규모 BESS 확장에 있어 주요 기술적 과제 중 하나는 계통 연결 확보이다. TSO(전력 시스템 운영자)와 DSO(전력 배전 시스템 운영자)는 계획된 대규모 저장 프로젝트에 대한 연결 요청이 증가하고 있다. 계통 접근 허가 절차는 본질적으로 시간이 오래 걸리고 복잡하며, 여러 이해관계자가 관여한다. 규제 조정을 통해 일부 문제를 완화할 수 있지만, 향후 2~3년 내에 완전한 해결책이 나올 것으로 예상되지는 않는다. (Cook 2023; Johannsen 2024c)

**BESS의 제한된 수명:** BESS 가격이 하락하고 있지만, 업계 관계자들은 높은 초기 투자 비용과 제한된 배터리 수명이 민간 투자자의 사업성을 저해한다고 지적한다. 계통 사용료 면제가 제한적인 현재의 규제 환경은 유리한 장기 투자 환경을 조성하지 못하고 있다. (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft 2024) 또한, 앞서 언급한 혁신 입찰은 일반적으로 20년 설치 약정을 요구하는 반면, 일반적인 배터리 수명은 10~15년이다. (Eco Affect 2024; Tennet 2024)

### 3.5.3 시장의 어려움

독일 전력 시장 안정화를 위한 BESS의 최적 활용 및 저장 용량 확보는 여러 시장 문제로 인해 어려움을 겪고 있다.

**균일 가격 신호:** 독일의 BESS는 라이프치히 중앙 전력 거래소의 가격 신호를 기반으로 운영되며, 이 신호는 독일 전력 시장 전체에 동일하게 적용된다. 차익거래에서는 배터리가 시장 가격이 낮을 때 충전되고, 가격이 높을 때 방전된다. 그러나 독일에서 적용되는 균일 가격은 지역 전력망의 상황을 반영하지 않는다. 예를 들어, 독일 북부의 풍부한 해상 풍력 에너지 공급은 일중 시장의 도매 전력 가격을 낮춰 전국의 BESS 운영에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 균일성은 전력망 혼잡 문제를 악화시킬 수 있으며, 특히 전력이 북부에서 남부로 효율적으로 송전되지 않을 경우 남부 독일의 전력망 과부하로 이어질 수 있다. TSO Tennet은 시장 신호에 대한 현재의 지향성이 전력망 혼잡을 심화시키고 지역 클러스터 형성으로 이어질 수 있다고 보고한다. (Tennet 2024) 따라서 비즈니스에 최적화된 배터리 적재 및 하역은 재분배를 필요로 하고 전력망 관리 비용 증가로 이어질 수 있다. (Johannsen 2024a) 전력망에 미치는 이러한 부정적 영향을 완화하고 보조 서비스를 위한 BESS 사용을 향상시키려면 전력망의 지역적 상태를 반영하는 보다 차별화된 가격 신호가 필요하다.

**활용에 대한 인센티브 부족:** 업계의 협회들은 독일의 계통 안정성을 지원하는 방식으로 BESS를 구축할 사업자들에게 인센티브가 부족하다고 지적한다. 현재의 시장 구조는 주로 전력 공급에 대한 보상을 제공하여 BESS가 계통 수요보다는 시장 가격에 따라 운영되도록 유도한다. 이렇게 되면 전력이 계통에 최적의 시기에 저장 및 방출되는 것이 아니기 때문에 계통 안정성 문제를 악화시킬 수 있다. 해당 문제를 해결하기 위해 업계 협회들은 BESS의 계통 안정 운영을 촉진하는 법적 및 규제적 인센티브를 옹호한다. (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft 2024)

**위치 및 시기:** BESS의 잠재력을 최대한 활용하여 전력 시스템을 안정화하려면 이러한 시스템을 전략적으로 분산 배치해야 한다. 대규모 BESS는 다음과 같은 다양한 위치에 전략적으로 배치할 수 있다. 1) 송전망 내, 2) 부하 중심 근처의 배전망 내, 3) 가변형 재생에너지(VRE) 발전기와 함께 배치하는 것이다. BESS의 위치는 BESS가 최적으로 제공할 수 있는 서비스 유형에 상당한 영향을 미친다. 예를 들어, BESS가 부하 근처에 위치하면 송배전 손실을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 지역에서 전력 품질 서비스를 제공하고 복원력을 향상시킬 수 있다. (National Renewable Energy Laboratory 2019) TSO 테넷은 BESS 입지 계획의 핵심 요소로 현재 전력망 확장 상황, 지역 재생에너지 센터와의 근접성, 그리고 전력망 혼잡을 방지하고 지역 클러스터 형성을 방지하기 위한 기존 BESS 설비의 존재 여부를 강조한다. (Tennet 2024) 그러나 업계 전문가들은 현재 시장 상황이 전력망의 요구를 제대로 반영하지 못하고 있다고 지적한다. 예를 들어, 많은 설비 요청이 북부 지역에 집중되어 있어, 실제로 도입될 경우 전력망에 부담을 줄 수 있다. (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft 2024; Johannsen 2024a) 2024년 11월, BNetzA는 계통 구축 비용(BKZ)에 대한 지역별 차등 적용 계획을 발표했다. 이 제도에 따라 전력망 운영자는 해당 지역이 전체 시스템에 얼마나 유리한지에 따라 BKZ를 조정할 수 있다. 수요가 높은 지역에 BESS를 새로 설치하면 요금이 최대 100%까지 인상될 수 있는 반면, 미사용 용량이 있는 지역에 BESS를 설치할 경우 BKZ의 20%까지 비용이 절감될 수 있다. 이는 가격 신호를 도입하고 접속자들이 용량을 효율적으로 계획하도록 유도함으로써 전력망 용량의 경제적 사용을 장려하는 것을 목표로 한다. (Bundesnetzagentur 2024c) 그러나 배터리 협회 BVES는 이 메커니즘이 '에너지 저장'이 가장 시급하게 필요한 위치가 가장 높은 비용을 부담해야

한다'는 결과를 낼 것이라고 주장한다. BNetzA의 계산이 계통 운영자의 계산과 다르기 때문이다. (Bundesverband Energiespeicher Systeme 2025; PV Magazin 2024a)

#### 외부 도전과제

**숙련된 인력 부족:** BESS 구축에 필요한 숙련된 인력 부족은 심각한 외부 과제이다. BVES가 2024년에 실시한 설문 조사에 따르면, 배터리 분야 기업의 3분의 1 이상이 숙련된 인력 부족을 이 분야의 걸림돌로 꼽았다. 설문 참여자의 50% 이상이 팀에 충분한 인력을 확보하지 못했고, 90% 이상이 2024년에 채용을 고려하고 있었다. (Bundesverband Energiespeicher Systeme 2024) 이 문제는 독일 재생에너지 부문 전반에 걸쳐 만연해 있으며, 독일의 인구 구조 변화와 관련이 있다. 인구 고령화와 저출산, 그리고 경제 성장(2024년에는 정체될 것으로 예상)과 전력 수요 증가가 맞물려 있다. 동시에 신기술 설치 및 유지보수 기술 교육은 해당 기술 발전에 뒤처져 있다. 대규모 배터리 저장에 비교적 새로운 기술이라는 점을 고려할 때, 이 문제는 어느 정도 예상할 수 있다. 이를 해결하려면 태양광 산업의 이니셔티브처럼 교육 프로그램을 확대하고 인재

유치를 위한 포괄적인 마케팅 캠페인을 전개해야 한다. (PV Magazin 2024b)

**공급망의 취약성:** 배터리 원자재 및 부품 공급망에는 또 다른 외부적 어려움이 존재한다. 두 가지 모두의 공급망은 극소수의 공급업체와 소수 국가에 집중되어 있어 공급 차질 발생 시 불안정성을 초래한다. 자원 부족 및 수급 불균형과 같은 요인은 국내 생산 둔화 또는 중단으로 이어질 수 있다. (Miao et al. 2023) 따라서 공급망을 다각화하고 부품의 국내 생산을 늘리는 것이 중요하다. 더욱이, 리튬 이온 배터리의 보급으로 인해 대량의 리튬에 대한 본질적인 수요가 존재한다. 리튬은 희귀한 물질은 아니지만 에너지 전환에 필수적인 광물이며, 향후 전 세계 리튬 수요는 증가할 것으로 예상된다. 또한, 배터리용 리튬 가격은 2015년 이후 급등했다. (Talan and Huang 2022) 따라서 이 귀중한 자원을 회수하기 위한 재활용 기술에 투자하는 것이 매우 중요하다. 이 기술은 아직 널리 보급되지 않아 또 다른 과제를 안고 있기 때문이다. 배터리 생산에 필요한 리튬 및 기타 핵심 소재의 재활용 시설 확충이 필수적이다. (Tembo et al. 2024)

### 3.6. 사례 연구: Megabattery117+ 프로젝트



그림 3: 독일 링겐과 베르네의 배터리 저장 시스템(출처: RWE, 허가 받은 후 재구성)

RWE의 링겐과 베르네에 위치한 MEGABATTERY 117+ 배터리 저장 시스템은 2023년 1월부터 운영 중이다. 이 시스템은 128MWh(117MW)의 저장 용량을 갖추고 있으며, 14개월에 걸쳐 구축되었다. 기존 발전소 부지에 총 420개의 리튬 이온 배터리 모듈을 설치하여 가용 전력망 인프라를 활용했다.

링겐에 49MWh(45MW) 용량, 베르네에 79MWh(72MW) 용량의 두 시설은 모젤 강변에 위치한 RWE 수력 발전소와 가상으로 통합되어 있다. 이러한 가상 통합을 통해 발전소의 용량을 선택적으로 조절하여 전력망 안정화를 위한 조정 및 최적화를 개선할 수 있다. RWE는 이 배터리 저장 시스템에 약 5천만 유로를 투자했다.

베르네와 링겐에 위치한 BESS는 전력망의 주파수 조정에 기여하여 변동성을 완화한다. 또한 피크 및 비-피크 기간의 가격 변동성을 줄여 에너지 시장을 안정시킨다. RWE는 2025년까지 동일 지역에 총 235MWh(220MW) 용량의 배터리 저장 시스템 두 개를 추가로 구축할 계획이다.

#### 링겐 및 베르네 BESS 주요 정보

운영사	RWE Generation SE
에너지 용량	128MWh (링겐 49MWh, 베르네 79MWh)
건설 기간	14 개월
가동 시작 일시	2023년 1월
투자금	5천만 유로

#### 출처:

RWE (2023): RWE completes megabattery in Lingen and Werne. Available online at <https://www.rwe.com/en/press/rwe-generation/2023-01-09-rwe-completes-megabattery-in-lingen-and-werne/>

En:former (2023): RWE stellt Megabatterie in Lingen und Werne fertig. Available online at <https://www.en-former.com/rwe-stellt-megabatterie-in-lingen-und-werne-fertig/>

## 4 한국 BESS 의 현황과 전망

2023 년 말 현재, 한국은 누적 10GWh 의 에너지 저장 시스템 운영 용량을 자랑하며 세계 에너지 저장 분야의 핵심 국가로 부상했다. 이 분야는 재생에너지 연계 및 수요 관리에 대한 강력한 의지를 바탕으로 빠르게 발전하고 있다. 주로 리튬 이온 배터리에 의존하는 이러한 시스템은 특히 고립된 전력망을 갖춘 한국의 에너지 전환에 필수적 다. 한국은 과거의 어려움에도 불구하고, 세계 시장에서의 경쟁력을 유지하고 보급을 확대하기 위해 상당한 진전을 이루고 있다.

### 4.1 국내 BESS 현황

한국에서는 주로 BESS(4.4GW/10.4GWh)와 양수발전(4.7GW/37.6GWh)을 통해 전력을 저장하고 있다. 다음 절에서는 두 유형의 보급 현황, 활용 방식, 그리고 다양한 배터리 유형에 대한 최신 기술 현황을 간략하게 살펴본다.

#### 4.1.1 운용 현황

배터리 에너지 저장 시스템

2023 년 말 기준, 한국에는 누적 BESS 용량 10GWh 가 설치 및 운영되고 있다. 주요 용도는 재생에너지 연계(55.8%), 수요 관리(42.4%), 주파수 조정이며, 나머지는 기타 용도이다. 배치 용량의 99% 이상이 리튬 이온 배터리를 기반으로 하며, 바나듐 레독스 흐름 전지(VRFB) 및 나트륨-황(NaS) 전지와 같은 기술은 시범 연구 및 초기 실증 사업에 국한되어 있다. (Ministry of Trade, Industry and Energy and Korean Energy Economics Institute 2023)

2017 년 이후 연이은 화재 사고와 지원 프로그램 만료로 BESS 시장이 크게 위축되었다. 정부는 BESS 시장 유지를 위해 공공건물에 BESS 설치를 의무화하는 법률을 제정했다(섹션 4.2.2 참조) 따라서 현재 시장은 의무 설치 제도에 따라 공공기관으로 제한되어 있다(예: 계약 용량이 2,000kW 를 초과하는 공공기관은 용량의 5%에 해당하는 BESS 를 설치해야 함) (Korea Energy Agency 2024a)

한편, 한국전력거래소(KPX)는 제주도 전력망의 전력 감축 문제 해결을 목표로 BESS(65MW/260MWh) 중앙계약시장 구축을 위한 시범사업을 제주도에 시작했다. BESS 설치는 2025 년 완료될 예정이며, 추가 설치를 검토 중이다. 고압직류전원(HVDC), 화력, 재생에너지원으로 운영되는 제주도 전력망은 2015 년 이후 과잉설비로 인해 풍력 및 태양광 발전의 감축이 증가하고 있다.

한국에서 대규모 전력 저장 시스템은 주로 다음과 같은 목적으로 사용된다.

**재생에너지 연계:** 태양광 및 풍력과 같은 재생에너지원과 연계된 배터리 에너지 저장 시스템은 정부의 일시적 조치로 REC 가중치 증가를 통해 수익성을 확보하는 인센티브를 받았다. 이로 인해 2018 년부터 2020 년까지 BESS 가 대량 보급되었다. (Korea Energy Agency 2024c)

**수요 관리:** 전기 사용량이 많은 산업 및 상업 소비자는 전기 요금 절감을 위해 BESS 를 설치한다. 한국의 이러한 소비자를 위한

#### 인포 박스 1:

**재생에너지 공급인증서(REC)**는 적격 재생에너지 시설에서 공급된 전력량에 가중치를 곱하여 MWh 단위로 발행된다. 이 인증서는 발전사업자가 재생에너지 시설을 사용하여 전력을 생산 및 공급했음을 증명하는 역할을 한다. 의무 공급자는 이 재생에너지 공급인증서를 구매함으로써 공급 의무를 이행할 수 있다.

여기서 의무 공급자란 전력을 공급하는 독립발전사업자(IPP)를 의미한다. 이들은 재생에너지 공급의무화제도(RPS)에 따라 정부가 지정한 일정량의 전력을 재생에너지원에서 공급해야 하는 기준 발전사업자이다.

전기 요금 체계는 최대 수요 기반 수요 요금과 에너지 소비량 요금으로 구성되며, 대규모 소비자에게는 시간대별 요금이 적용된다. BESS 를 구축하면 최대 수요를 줄여 기본 요금을 낮추거나 최대 수요 시간대에 방전하여 에너지 비용을 절감할 수 있다. 또한, BESS 에 대한 심야 충전 요금을 50% 할인하는 한시적 정책을 통해 경제성이 크게 향상되고 광범위한 구축으로 이어졌다 (Korea Energy Agency 2024b).

**주파수 조정:** 한국전력공사(KEPCO)는 2015 년부터 2017 년까지 376MW(30 분 용량)의 주파수 조정용 BESS 를 설치했다. 이러한 BESS 를 운영하면 전력 품질이 향상되고, 계통 운영 효율이 향상되며, 전력 조달 비용이 절감된다. 주파수 조정에 BESS 를 활용하면 기존 발전소가 전력 생산량을 극대화하여 에너지 효율을 높일 수 있다. (Lee 2018)

**계통 안정화:** 한국전력은 2023 년부터 2024 년 9 월까지 영천변전소 336MW 시스템을 포함하여 총 6 개 변전소에 978MW/889MWh 용량의 계통 안정화 BESS 를 설치했다. 계통 안정화 BESS 는 계통 인프라 구축 지연으로 인한 제약을 해결하여 최대 1GW 의 발전량 감축을 완화한다. 또한, 이러한 시스템은 재생에너지 출력의 높은 변동성을 수용하여 계통 신뢰성을 향상시키고 주파수 안정성에 기여한다. (Han-gyo Jeong 2024a)

#### 펌프 저장

한국은 4.7GW 규모의 양수발전을 예비 용량으로 운영하고 있다. 양수발전은 주파수 조정, 예비 용량 확보, 그리고 자립형 시동(Black Start) 서비스를 제공하며, 장기 에너지저장장치(ESS) 역할을 한다. 신규 프로젝트는 가변속

양수발전을 활용하여 재생에너지 변동성을 더 효과적으로 흡수할 것이다. (Statista 2023b)

- 제 9 차 전력수급기본계획(2020~2034 년)에는 2030 년 완공을 목표로 1.8GW 규모의 신규 양수발전소 건설이 포함되어 있다.
- 제 10 차 전력수급기본계획(2022~2036 년)에는 2035 년까지 1.75GW 규모의 신규 사업이 완료될 예정이다.
- 곧 발표될 제 11 차 전력수급기본계획(2024~2038 년)에는 가능한 경우 석탄화력발전소를 양수발전소로 대체하는 1.15GW 규모의 예비 사업이 추가로 포함되어 있으며, 2035~2038 년에 완공될 예정이다.

### 4.1.2 기술 현황

**리튬이온 배터리 ESS:** 한국은 세계 10 대 리튬이온 배터리 제조업체 중 3 곳을 보유하고 있다. 이들 기업은 한국뿐만 아니라 중국, 미국, 유럽에도 생산 시설을 운영하며 전기차 및 ESS 용 배터리를 생산하고 있다. 현재 시장은 니켈망간코발트(NMC) 계열 리튬이온 배터리가 주도하고 있지만, 리튬인산철(LFP) 계열 배터리 생산을 준비 중이다. 또한, 전고체 배터리 등 차세대 기술에 대한 연구 및 양산 계획도 진행 중이다. 국내 BESS 의 99% 이상이 국산 NMC 리튬이온 배터리를 사용하고 있다. (SNE Research 2023)

**비리튬 배터리 ESS:** 비리튬 이차전지 중 바나듐 레독스 흐름 전지(VRFB)는 국내에서 유일하게 상업적으로 실현 가능한 에너지 저장 장치이다. 국내 벤처기업이 연간 300MWh 생산 시설을 구축하고 현재 미국 캘리포니아에서 20MWh 규모의 VRFB 실증 사업을 진행하고 있다. 초기 상용화 단계에 있는 VRFB 기술은 장기 에너지 저장 시스템(LDES)을 위한 리튬이온 배터리의 대안으로 부상하고 있다. (Murray 2024)

**LDES:** 배터리 범주를 벗어난 장기 에너지 저장을 위해 열 및 기계적 대규모 저장 시스템과 같은 기술이 고려되고 있다. 폐쇄된 석탄 화력 발전소를 활용하는 고온 열 저장 시스템에 대한 연구는 2025 년부터 시작될 예정이다. 또한, 한국의 발전소 설비, 엔지니어링 역량 및 토목 공학 기술에 대한 전문성을 활용하여 압축 공기 에너지 저장(CAES)에 대한 연구개발을 계획하고 있다. (Han-gyo Jeong 2024b)

## 4.2 BESS 정책 도구 및 전략 개요

### 4.2.1 목표

한국 정부는 에너지 저장의 중요성을 인식하고 BESS 구축을 지원하는 두 가지 주요 목표를 수립했다.

#### 재생에너지 비중 증가로 전력망의 유연성 확대

2022 년 기준, 한국 탄소 배출량의 30% 이상이 전력 부문에서 발생한다. (Carbon Neutrality and Green Growth Commission 2025) 한국 에너지 전환 정책의 핵심 축은 석탄화력발전소의 단계적 폐쇄, 원자력 발전의 활용 확대, 그리고 재생에너지 보급 확대이다. 제 11 차 전력수급기본계획에 따르면, 2030 년대 후반까지 원자력 및

재생에너지는 한국 전력 공급의 70% 이상을 차지할 것으로 예상된다. (Ministry of Trade, Industry and Energy 2025) 현재 우리나라 전력의 약 3 분의 1 을 원자력이 담당하고 있으며, 정부는 2030 년까지 32.4%, 2036 년까지 34.6%로 비중을 늘릴 계획이다. (World Nuclear Association 2025; International Trade Administration 2023)

가변적인 전력원인 재생에너지는 주변국과의 연계가 부족한 한국의 단독 전력망에서 수급 균형을 맞추는 데 어려움을 야기한다. 따라서 안정적인 전력 공급은 매우 중요한 문제이며, 에너지저장장치(ESS)는 가변적인 재생에너지원을 한국 전력 시스템에 통합하는 데 필수적이다. 특히 전력망의 수용 용량을 확대하고, 생산량 감축을 최소화하며, 재생에너지 활용을 극대화하는 데 중요하다. 또한, 한국의 제조업은 반도체와 같이 전력 신뢰성과 비용이 산업 경쟁력에 직접적인 영향을 미치는 전력 집약 산업의 비중이 높다.

이러한 맥락에서 유연성 자원 확보와 전력망 확충은 에너지 전환에 있어 중요한 과제이다. 국가 전략 산업으로서 이차전지는 전기차뿐만 아니라 에너지 저장 분야에서도 고성능 시장을 대표한다. 이차전지는 전력망 문제를 해결하고 글로벌 배터리 시장에서 한국의 경쟁력을 강화하는 데 중요한 역할을 한다.

#### ESS 를 한국의 전략적 산업으로 지원

제조업 강국인 한국은 석유화학, 발전 설비, 송배전 시스템 등 에너지 분야에서 상당한 산업 역량을 보유하고 있다. 탄소 중립 목표 달성을 위해 한국의 에너지 전환 정책은 스마트 그리드, 수요 대응 시스템, MVDC/HVDC 기술, 전기차 충전 인프라와 같은 신에너지 산업을 미래 성장 동력으로 선정했다.

에너지 저장은 에너지 전환을 주도하는 3D 트렌드, 즉 탈탄소화(탄소 배출 감축), 분산형 에너지 자원(분산형 에너지 자원), 디지털화(AI 적용)에서 중요한 기술적·산업적 가치를 지닌다.

2 차 전지 외에도 전력 변환, 제어 소프트웨어, AI 기술 등의 산업 또한 상당한 파급 효과를 가지고 있다. 더욱이 이러한 산업들은 세계 경제 성장 잠재력이 매우 높아 한국의 미래를 위한 전략적 산업으로서의 중요성을 더욱 강조한다.

### 4.2.2 정책 도구

앞서 언급한 목표를 지원하기 위해 한국 정부는 다음과 같은 정책과 전략을 채택했다.

#### 정부 지원

한국 정부는 이차전지를 12 대 국가전략기술 중 하나로 지정하고, 기술 개발부터 산업화, 수출까지 전 분야에 걸쳐 전략 수립을 주도하고 지속적인 지원을 제공하고 있다.

- '2 차전지 산업 발전 전략 (2008, 지식경제부)
- '2030 2 차전지 산업(K-Battery) 발전 전략 (2021, 합동 부처)

이러한 개발 전략은 중장기 기술 비전을 제시하고, 기술 개발 로드맵 수립, 산업 생태계 조성, 시장 수요 창출 등 실행 전략을 포함한다.

기술 개발 분야에는 핵심 부품·소재, 배터리 제조 기술 등이 포함되며, 인재 육성, 시험 인프라 구축 등 사업 기반 구축도 지원한다. 또한, 첨단기술 지정을 통해 생산시설 투자에 대한 세액 공제 혜택을 제공한다.

**전력수급기본계획과 연계된 전망적 목표**

한국은 2년마다 전력수급기본계획을 수립하며, 이 계획에는 수요 예측을 기반으로 발전 및 예비 설비의 필요 용량이 명시되어 있다. 이 계획은 증가하는 재생에너지 보급을 지원하기 위해 필요한 에너지 저장 용량을 명시한다. 양수 발전과 같은 장기 저장 솔루션은 계획 내에 별도의 할당으로 포함된다.

예비 용량 요건은 단기 저장(1시간 미만)과 장기 저장(1시간 초과) 모두에 대해 산정된다. 이러한 산정은 재생에너지 보급의 지역적 분포와 송배전망 확충 계획을 고려하여 연간 재생에너지 감축량을 3% 이하로 제한하는 것을 목표로 한다. 양수 발전을 제외한 모든 예비 용량은 배터리 기반 에너지저장장치(ESS)를 통해 공급되는 것으로 가정한다.

양수 발전의 경우, 5개 발전 공기업과 지방자치단체가 협력하여 적합한 부지를 선정한다. 부지가 확정되면 필요한 용량이 기본계획에 반영되고 최종 확정된다. 양수 발전 투자는 발전 공기업들이 경쟁적으로 결정한다.

**최근의 다른 정책 진전:**

2025년 3월 현재, 한국 국회는 국내 배터리 산업을 강화하기 위한 입법 조치를 마련하고 있다. 11명의 초당파 의원이 주도하는 이 법안은 국내 배터리 생산업체에 대한 직접 보조금 도입을 목표로 한다. 해당 계획은 미국의 첨단 제조 생산 크레딧(AMPC)과 유사하며, 중국 제조업체와의 경쟁 심화와 전기 자동차(EV) 수요의 전 세계적인 감소에 대응하기 위한 전략적 노력을 나타낸다. 소위 배터리 산업 특별법은 배터리 산업에 대한 맞춤형 재정 지원을 목표로 한다. 이는 2024년 반도체 산업 진흥법에 이어 한국의 두 번째 중요한 산업별 입법 시도이다. 이 계획은 변화하는 경제 및 경쟁 역학 속에서 글로벌 배터리 시장에서의 입지를 강화하려는 한국의 의지를 강조한다.

**과거 정책: 정부 주도로 지원되는 조기 배치 정책 (~2020)**

BESS의 보급과 리튬이온 배터리 시장의 성장을 촉진하기 위해 한국 정부는 2016년에 임시 지원 프로그램을 도입했다. 이 프로그램은 재생에너지에 연계된 BESS에 4.0~5.0의 REC 가중치를 제공했다. 이 정책은 오전 10시부터 오후 2시 사이에 재생에너지원에서 충전되고 이 시간 외에 방전되는 전기에 REC 가중치가 적용되어 ESS 운영자에게 추가 수입을 제공했다. 결과적으로 2018년까지 전 세계 ESS 시장의 3분의 1을 차지하는 3.7GWh의 ESS가 보급되었다. 그러나 태양광 PV에 연계된 소규모 독립형 ESS 프로젝트가 초기에는 산업 기반을 확대했지만, 주로 그리드와 독립적으로 운영되었고 간단한 충전-방전 사이클을 통해 REC 수익을 창출하는 데 중점을 두었다. 이로 인해 그리드 안정성에 대한 기여가 제한되었다.

높은 REC가중치(4.0~5.0)로 인한 과도한 REC 발행 또한 REC 시장의 수급 균형을 교란했다. (Korea Energy Agency 2024c) 결과적으로 이 정책은 2020년 말에 단계적으로 폐지되었다. 그 결과, REC가중치가 중단되었고, 충전/방전 요금에 대한 정부 권고로 인해 시장이 상당히 냉각되었다.

결과적으로 이 정책은 2020년 말까지 단계적으로 폐지되었다. 그 결과, REC가중치가 중단되었고, 정부의 충전/방전 요금 권고로 시장이 크게 냉각되었다.

수요측 ESS의 경우, 정부는 심야 충전 요금을 50% 할인하여 대규모 전력 소비자의 ESS 도입을 장려했다.

2017년부터 발생한 일련의 화재 사고와 2020년 이후 REC 및 충전 할인 정책 만료로 시장은 침체에 접어들었다.

**현재 정책: 전력 시장 개혁을 통한 배치 정책(2020년~현재)**

**현재 상황:** 한국의 전력 시장은 현재 단일 전일 현물 시장으로 운영되고 있어 시장 메커니즘을 통한 ESS 구축에 어려움을 겪고 있다. 이는 ESS 투자 비용 대비 수익 구조가 낮기 때문이다. 또한, 소매 시장은 한국전력공사가 독점하고 있어 P2P(개인 간) 에너지 거래가 제한적이다.

**계획:** 전력 시장 개선을 위해 정부와 전력거래소는 15분 실시간 밸런싱 시장 도입 및 장단기 계약 시장 도입을 포함한 개혁 방안을 논의하고 있다. 또한, 2023년 통과된 분산형 에너지 진흥 특별법은 시행령 개정을 통해 2024년 6월부터 시행되었다. 이 법은 분산형 에너지 구역을 지정하여 P2P(개인 간) 에너지 거래 및 지역별 한계 가격(LMP)과 같은 시범 프로그램을 시행함으로써, 전력 시장을 거치지 않고 사용자와 발전 시설 간 직접 전력 공급을 가능하게 한다.

**지속적인 노력:** 전력거래소는 본격적인 시장 개혁에 앞서 제주도에서 시범 사업을 진행하고 있다. 2023년부터 시행되는 BESS 중앙계약시장, 신재생에너지 입찰시장, 그리고 저장에너지 판매시장 등이 그 예이다. 제주도의 전력 감축 문제 해결을 위한 BESS 중앙계약시장은 4시간 장기 BESS 입찰을 15년 동안 확보한다. 이러한 사업의 성과를 바탕으로 제주도를 비롯한 전국적으로 BESS 프로그램을 확대할 계획이다.

11월에 시작된 제주 BESS 중앙계약시장 1차 입찰에서는 65MW/260MWh 용량의 입찰 물량이 접수되었다. 입찰은 두 지역으로 나뉘어 진행되었으며, 경쟁률은 각각 3.6:1과 2.7:1이었다. 동부 지역은 35MW/140MWh, 서부 지역은 10MW/40MWh, 23MW/92MWh 용량의 ESS 사업에 낙찰되었다. 낙찰된 발전사는 4시간 이상 가동 가능한 장기 ESS 설비를 건설 및 운영하게 되며, 낙찰가에 따라 15년간 보상을 받게 된다. 해당 설비는 2025년 초 준공될 예정이다. 100% 국산 리튬 배터리로 구성될 예정이며, 아직 운영 실적은 확보되지 않았다.

**기술 개발: 저장 믹스 확보 전략**

산업통상자원부는 2023년 10월 "에너지 저장 산업 발전 전략"을 발표했다. 이 전략은 안정적인 전력망 운영, 에너지 저장 산업의 수출 중심 산업 육성, 생태계 활성화, 보급 확대, 그리고 선진 기술 확보에 중점을 두고 있다.



**단기 전략:** 이 단기 전략은 현재 리튬이온 배터리 중심의 글로벌 ESS 시장에서 한국의 경쟁력을 유지하는 것을 목표로 한다. 주요 목표는 다음과 같다.

- 수냉 시스템 도입을 통한 화재 안전성 강화
- 고성능 및 고밀도 LFP 배터리 기술을 발전시켜 글로벌 ESS 시장에서의 적용 확대

2023년 기준, LFP 배터리는 낮은 에너지 밀도에도 불구하고 저렴한 비용, 화재 안전성, 긴 수명으로 전 세계 ESS 시장의 80%를 차지했다. 이러한 특성으로 인해 LFP 배터리는 특히 고정형 ESS 애플리케이션에 적합하다. (BloombergNEF 2023)

**중기:** 중기 전략은 5년 이내에 상용화 가능한 높은 TRL(기술 준비 수준) 기술을 개발하는 데 중점을 두고 있으며, ESS 애플리케이션에 맞춰 성능과 비용 효율성 향상을 도모한다. 2030년경에는 이러한 기술을 통해 증가하는 재생에너지 보급률을 수용할 수 있도록 국내 전력망에 광범위하게 도입될 것이다. 또한, 리튬 기반 ESS 기술에 대한 전 세계적인 의존도를 낮추려는 노력은 전력망 유연성을 고려하여 설계된 장기 에너지 저장(LDES) 시스템의 수출 기회를 창출할 것이다.

유망한 중기 기술로는 유동 전지, 나트륨-황(NaS) 전지, 그리고 중규모(100MW 미만) 가변속 양수 발전 시스템 등이 있으며, 모두 상용화 초기 단계에 있다.

**장기:** 본 장기 전략은 재생에너지 보급이 성숙기에 접어드는 2030년 이후의 ESS 시장을 목표로 한다. 저비용, 친환경, 내구성, 대용량을 갖춘 장기 ESS 기술 개발에 중점을 두고 있다. 현재 선진국에서 연구 또는 시범 단계에 있는 비배터리 기반 LDES 기술은 상용화, 국내 적용 및 수출을 위해 한국의 산업 및 연구 역량을 활용할 것이다.

대표적인 기술로는 **압축공기 에너지 저장(CAES)**이 있다. CAES는 1970년대와 1990년대부터 독일과 미국에서 사용되어 왔으며, 인공 터널 기술을 활용하여 부지 제약을 극복하기 위해 발전하고 있다. 개발 목표에는 화석 연료의 필요성을 없애는 단일 CAES(A-CAES)가 포함된다.

**카르노 전지:** 이 시스템은 폐쇄된 석탄 화력 발전소를 활용하여 대규모 저비용 장기 ESS 솔루션을 구축한다.

목표는 계통 안정성을 지원하는 고용량 열 저장 시스템을 위한 인프라를 재활용하는 것이다. 이 포괄적인 전략은 국내 에너지 안보와 지속 가능한 성장을 보장하는 동시에 한국을 글로벌 ESS 기술 및 혁신의 선두주자로 자리매김하는 것을 목표로 한다.

### 4.3 이해관계자 개요

한국의 대규모 배터리 에너지 저장 시스템(BESS) 시장은 다양한 주체들로 구성되어 있다. 한국 BESS 생태계의 이해관계자 지도는 그림 5에서 확인할 수 있다. 아래에서 가장 중요한 주체/주체 그룹에 대한 설명을 참조할 수 있다.

**한국전력공사(KEPCO):** 송배전망의 구축, 운영 및 유지보수를 담당하는 배전 시스템 운영자(DSO)와 송전망 운영자(TSO)

역할을 수행한다. 또한 유일한 도소매 전력 공급자이기도 한다. 주파수 조정을 수행하는 모든 설치된 BESS는 한국전력공사가 소유 및 운영한다.

**한국전력공사(KEPCO):** 송배전망의 건설, 운영 및 유지보수를 담당하는 배전계통운영자(DSO)와 송전선로운영자(TSO) 역할을 수행한다. 또한 유일한 도소매 전력 공급자이기도 하다. 주파수 조정을 수행하는 모든 BESS는 한국전력공사가 소유 및 운영한다.

**발전 회사 및 민간 독립 발전사(IPP):** ESS 부문의 투자자 및 운영자 역할을 하는 5대 주요 공공 발전 회사(예: 한국동서발전)와 여러 민간 IPP를 포함한다. 재생에너지 연계 및 수요 관리에 사용되는 BESS는 주로 민간 ESS 사업자 또는 재생에너지 회사가 소유 및 운영한다. 5대 주요 발전 회사는 자체 재생에너지원에 연계된 BESS도 소유 및 운영한다.

**한국전력거래소(KPX):** 전력망 운영 및 전력 시장 운영을 관리한다.

**배터리 제조업체, 시스템 통합업체(SI), 장비 제조업체:** ESS 부품 생산, 소프트웨어 개발 및 시스템 통합에 참여한다.

**협회, 연구소 및 시험기관:** 표준화, 기술 개발, 시험인증 업무를 담당한다.

**정부, 특히 산업통상자원부(MOTIE):** 분산형 에너지 및 ESS 구축 정책, 기술 개발, 중장기 계획 수립을 총괄한다.

**정부 특히 산업통상자원부(MOTIE):** 분산형 에너지 및 ESS 구축, 기술 개발 및 중장기 계획에 대한 정책을 감독한다.

## 4.4 한국 BESS의 잠재력

### 4.4.1 배경

한국에서 BESS의 중요성은 다음과 같은 이유로 부각된다.

#### 원자력 및 재생에너지 중심의 장기 전력 믹스 정책

한국은 원자력과 재생에너지에 중점을 둔 전력 믹스 전략을 유지하고 있다. 한국은 에너지 수입 의존도가 높고, 잘 구축된 원자력 산업 생태계를 갖추고 있다. 따라서 한국은 원자력에 대한 논쟁이 지속되고 있음에도 불구하고, 에너지 안보 및 산업 정책적 이유로 원자력을 에너지 믹스의 핵심 요소로 계획하고 있다. 한국은 원자력, 재생에너지, 수소를 포함하는 무탄소 에너지(CFE) 믹스를 지지한다.

그러나 원자력과 재생에너지는 모두 유연성이 낮은 전력원으로, 전력 수급 균형을 복잡하게 만든다. 원자력의 부하 추종 능력 향상에 대한 연구가 진행 중이지만, 그 기간 동안 BESS를 유연성 자원으로 활용하는 것이 필수적이다.

#### 인접 국가와의 연계 없음

인접 국가와의 계통 연계는 수급 균형을 보장하고 유연성을 확보하는 가장 효과적인 방법 중 하나이다. 그러나 국가 안보 문제로 인해 현재 한국은 주변국과 전력망을 연계하지 못하고

있다. 따라서 한국은 전력을 수입하거나 수출하지 않고도 자체적으로 안정적인 전력 공급을 유지해야 한다. 그렇기에 전력 수급 균형과 예비 전력 수요를 위해 BESS의 충분한 구축이 매우 중요하다.

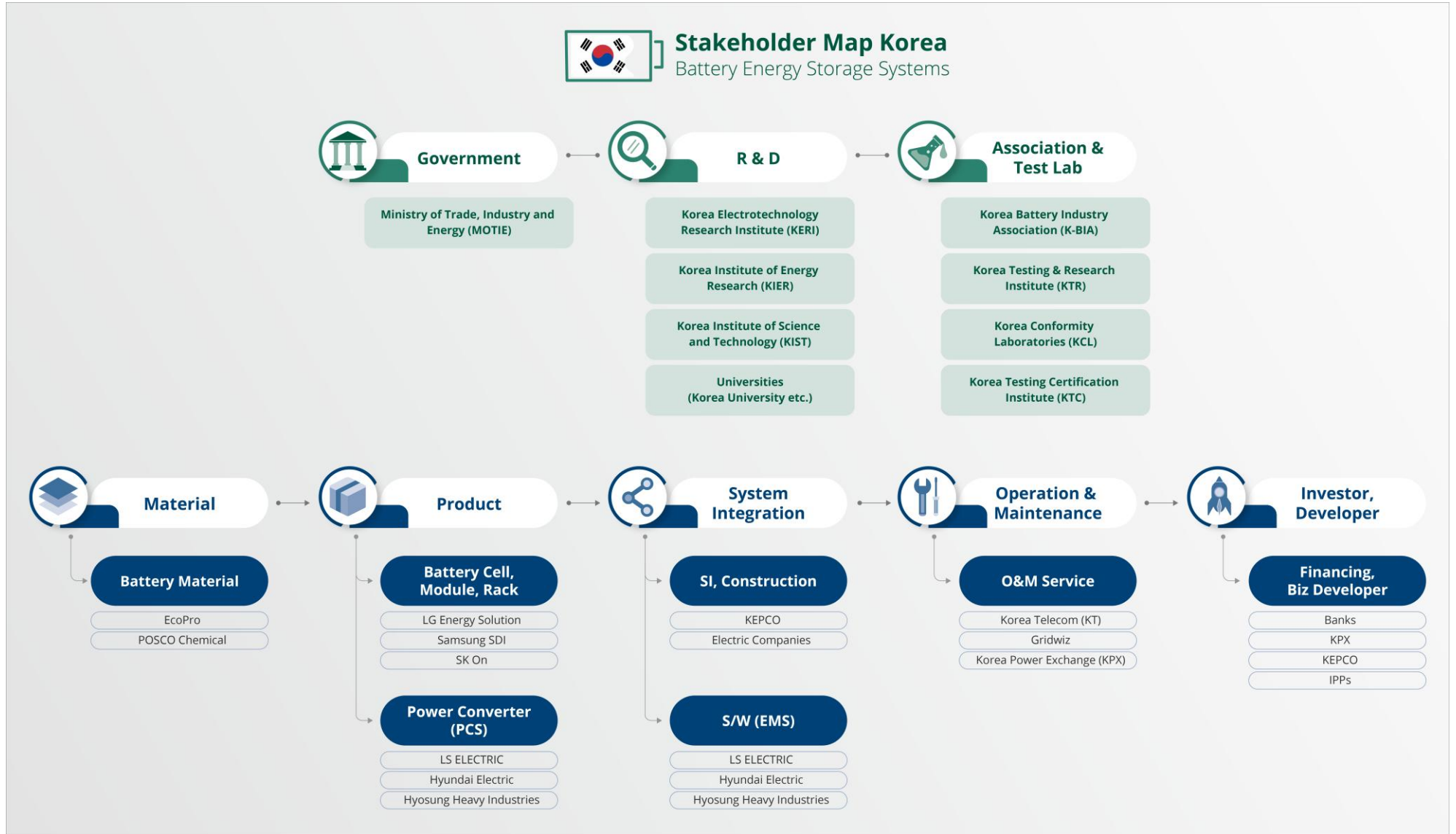


그림 4: 한국 BESS 생태계 이해관계자 맵(출처: 자체 일러스트레이션)

#### 4.4.2 시장

제 10 차 전력수급기본계획(2022~2036)에 따르면, 재생에너지 확대를 지원하기 위한 저장 용량 요건은 다음과 같다.

- **초단기 저장:** 계통 관성 및 전압 안정성 유지를 위한 동기식 응축기와 같은 시스템.
- **단기 ESS:** 주파수 조정 및 실시간 수급 균형을 위해 1 시간 미만의 지속 시간을 갖는 저장 시스템. 2036 년까지 누적 용량 3.66GW/2.29GWh 가 필요하다.
- **장기 ESS:** 감축 완화, 부하 평준화 및 공급 과잉 해소를 위해 1 시간 이상의 지속 시간을 갖는 저장 시스템. 2036 년까지 누적 용량 20.85GW/124.97GWh 와 1.75GW 의 양수 발전이 필요하다.

배터리 기반 ESS 를 중심으로 한 저장 시스템에 약 45 조 원(약 299 억 유로)의 투자가 예상된다. 기술 발전에 따라 대체 저장 기술 도입도 고려될 수 있다.

#### 4.4.3 기술

동기식 응축기나 양수 발전과 같은 초단기 솔루션을 제외하고, 장기 에너지 저장 솔루션의 일부인 단기 및 장기 에너지 저장을 위한 백업 용량은 대부분 리튬 이온 배터리에 의존하는 것으로 추정된다. VREB, 나트륨-황(NaS) 배터리, 그리고 열 또는 기계적 장기 에너지 저장 기술은 현재 비용 및 성능 측면에서 경쟁력이 낮다. 그러나 조기 상용화와 성공적인 시연을 통해 이러한 기술들이 이 기간 동안 백업 시스템에 대한 실용적인 선택지가 될 수 있다.

### 4.5 도전과제

#### 4.5.1 정책 과제

효과적인 전력 수급 균형과 안정적인 계통 운영을 위해서는 ESS 와 같은 유연 자원과 백업 설비, 그리고 수요 반응(DR) 및 부문 결합(Sector Coupling)과 같은 기타 조치가 필요하다. 제 10 차 전력수급기본계획에 명시된 백업 용량 요건은 ESS 를 고려하고 있지만, 수요 반응(DR) 및 부문 결합과 같은 유연 조치는 고려하지 않았다. 이러한 요건은 재생에너지 감축이 3% 수준으로 유지된다는 것을 전제로 한다. 다양한 유연 자원을 도입하기 위해서는 성능, 비용 및 가용성을 고려한 추가적인 정책과 기술 계획이 필요하다. 유연 자원의 최적 조합을 설계하는 것은 중요한 정책 과제이다. 또한, 재생에너지 감축은 현재 보상되지 않고 있지만, 적절하게 관리되지 않을 경우 이에 상응하는 보상 정책이 필요할 수 있다.

#### 4.5.2 기술적 과제

현재 대부분의 백업 시스템은 리튬 이온 배터리에 의존할 것으로 예상되는데, 이는 대규모 투자 필요성, 설치 장소 제약, 지역 사회의 수용, 안전 문제, 자재 공급망 불안정성 등 수많은 위험에 직면해 있다. 한국의 경우, 도시 변전소 인근 BESS 설치 공간 부족과 높은 토지 비용 등의 지역적 제약이 있다. 더욱이, BESS 는 발전 시설로 분류되어 지역 사회에 보상을 요구하며, 이는 투자 비용을 더욱 증가시킨다. 송전 및 배전 시설과

마찬가지로 BESS 설치 또한 지역 주민의 동의가 필요하다. 그러나 리튬 이온 배터리 ESS 와 관련된 화재 위험 때문에 지역 사회의 수용은 낮은 경우가 많으며, 이는 "내 집 마당에 설치하면 안 된다"는 님비 현상을 부추긴다. 이러한 갈등은 인허가 시간과 투자 비용을 더욱 증가시킨다.

양수 발전 시스템 또한 부지 제약, 지역 사회의 수용, 환경 영향, 높은 투자 비용, 긴 건설 기간과 같은 어려움에 직면해 있다. 이러한 위험을 완화하기 위한 에너지 저장 기술 믹스를 개발하는 것은 큰 과제이다. 새로운 저장 기술은 유망하지만 성능 개선, 비용 절감, 적용 가능성을 검증하기 위한 대규모 시연에 시간이 필요하다. (Denholm et al. 2021)

#### 4.5.3 운용 및 시장 과제

ESS 구축에는 상당한 투자가 필요하며, 최적의 구축 방식을 결정하는 것은 또 다른 과제이다. ESS 구축을 위한 최적의 전략에는 전력 구성 변화, 전력망 혼잡도, 불안정성 등을 고려하여 ESS 설치 시기와 용량을 최적화하는 것이 포함된다. 이러한 접근 방식을 위해서는 단기 리튬 이온 배터리 및 장기 저장 솔루션과 같은 경제적으로 실행 가능하고 효율적인 ESS 유형의 조합을 파악해야 한다. 또한 비리튬 배터리 ESS 와 같은 리튬 이온 배터리 대안과 카르노 배터리 및 압축 공기 저장과 같은 대규모 저장 기술을 평가하는 것도 포함된다. ESS 배치를 최적화하려면 재생 에너지원의 분포, 전력망의 현재 상태, 그리고 주요 에너지 소비 지역의 변화를 평가해야 한다.

또한, 정부 또는 전력회사의 공공 투자에 의존할 것인지, 아니면 시장 메커니즘을 통해 민간 자본 투자를 장려할 것인지에 대한 결정이 필요하다.

더욱이, 사회 및 산업적 영향은 신중하고 철저한 분석을 필요로 한다. 예를 들어, 전기 요금 인상 가능성은 BESS 구축을 가속화할 수 있다. 현재 한국의 고정 전기 요금은 다른 OECD 국가에 비해 매우 낮다. 전기 요금이 OECD 수준으로 인상되면 가계의 비용 절감과 공공 서비스의 투자 수익 증가로 인해 가정용 및 공공 서비스용 BESS 구축이 가속화될 수 있다.

## 4.6. 사례 연구

한국의 주목할 만한 BESS 프로젝트에 대한 다음 두 가지 사례 연구는 한국에서 전기 저장 시스템을 사용할 수 있는 다양한 사용 사례를 보여준다.

### 4.6.1. 주파수 조정 ESS

**사업 개요:** 한국전력은 종합 ESS 구축 계획의 일환으로 500MW 규모의 주파수 조정용 ESS 를 설치 및 운영하기 위해 약 6,200 억 원(약 4 억 1,260 만 유로)을 투자하기로 결정했다. 사업 기간은 2014 년 1 월부터 2017 년 12 월까지였다. 본 사업의 목표는 전력 조달 비용 절감, 새로운 전력 시장 창출, 그리고 국내 기업의 글로벌 시장 진출 지원이었다.

주파수 조정용 ESS 는 기존에는 주파수 조정을 위해 발전기의 5% 출력 예비율을 유지하는 방식을 ESS 를 활용하여 대체한다. 예를 들어, 52MW 의 ESS 를 운영하면 석탄 화력 발전소의 발전량을 95%에서 100%까지 증가시켜 약 500MW 의 예비 용량(석탄 화력 발전소 1 기 용량에 해당)을 확보하고, 연간 약 3,500 억 원(약 2 억 3,290 만 유로)의 국가 편익을 창출할 수 있다. 이 중 3,200 억 원(약 2 억 1,300 만 유로)은 전력 구매 비용 절감으로 이어질 수 있다.

**진행 상황:** 2014 년 10 월, 한국전력은 520 억 원(약 3,460 만 유로)을 투자하여 서안성(28MW)과 신용인(24MW) 발전소에 52MW 의 ESS 를 설치하는 첫 번째 시범 사업을 시작했다. 이는 당시 세계 최대 규모였다. 2017 년까지 한국전력은 13 개 발전소에 30 분 단위 ESS 376MW 를 설치했으며, 각 용량은 16MW 에서 48MW 까지 다양하다. (Lee 2018)

### 4.6.2. 그리드 안정화 ESS

**사업 개요:** 재생에너지 도입 증가와 전력 인프라 노후화에 대응하여 한국전력은 2021 년 계통 안정화 ESS 사업을 시작했다. 계통 안정화 ESS 는 주파수 조정을 지원하는 동시에 발전 제약을 완화하는 다기능 ESS 이다.

**진행 상황:** 본 사업은 2022 년 예비타당성 조사를 통과하여 제 9 차 전력수급기본계획에 포함되었다. 한국전력은 2024 년 7 월까지 영주, 함양, 예산, 영천, 신안원, 부북 등 6 개 발전소에 총 978MW/889MWh 용량의 ESS 를 구축 완료했다. 가장 큰 규모인 336MW 용량의 ESS 는 부북 발전소에 설치되었으며, 총 투자액은 8,300 억 원(약 5 억 5,240 만 유로)이다.

**영향:** 계통 안정화 ESS 사업은 탄소 중립화 발전원 연계를 촉진하여 탄소 중립 달성에 기여할 것으로 예상된다. 또한 최대 1GW 의 발전 제약을 완화하여 전력 공급 불안정을 해소하고 안정적인 전력 공급을 확보할 것으로 기대된다. (Han-gyo Jeong 2024c)

## 5 비교 분석

이후 장에서는 3 장과 4 장에서 설명한 바와 같이 한국과 독일의 BESS 구축 현황, 잠재력 및 관련 정책을 비교한다. 이 장에서는 두 나라 간의 주요 유사점과 차이점을 파악한다.

### 5.1 일반적인 맥락과 전기 시스템

한국과 독일의 BESS 구축에 대한 구체적인 내용을 살펴보기 전에, 구축에 영향을 미치는 전반적인 맥락을 이해하는 것이 중요하다. 두 국가의 비교는 이러한 유사점과 차이점을 고려하여 검토되어야 한다.

한국과 독일은 모두 야심찬 탄소 중립 목표를 설정했으며, 각각 2050 년과 2045 년까지 기후 중립을 달성하는 것을 목표로 한다. 두 국가 모두 고소득 국가로 분류되고, 경제가 다각화되어 있으며, 국가 부에 크게 기여하는 고도로 발달된 산업 제조 부문을 특징으로 한다. 두 국가 모두 제조업 부문에서 세계 선두 자리를 차지하고 있으며, 이러한 지위를 유지하기 위해 노력하고 있다. 그러나 두 국가 모두 제한된 원자재와 자원이라는 어려움에 직면하여 제 3 국에서 이러한 원자재를 수입해야 한다. 독일은 규모, 경제 규모, 인구가 더 크지만, 한국은 독일보다 더 많은 전력을 소비한다 (2023 년 기준 독일의 전력 소비량은 463TWh, 한국의 전력 소비량은 557TWh 이다. (Statista 2023a) 두 나라 모두 자원이 부족하고 에너지 수입에 크게 의존하고 있어 최근 세계 에너지 가격 변동으로 어려움을 겪었다.

독일과 한국의 BESS 배치와 관련된 주요 차이점은 지리적 현실에서 비롯된다. 독일은 지리적으로나 정치적으로 유럽 대륙과 유럽 연합에 잘 통합되어 있다. 반면, 한국은 지리적으로 상대적으로 고립되어 있으며, 한반도에 위치하여 조선민주주의인민공화국의 유일한 국경이 심각하고 장기적인 안보 위협을 초래한다. 이러한 불균형은 전력 시장에서도 분명하게 드러난다. 독일은 유럽 중앙 전력 시장에 잘 통합되어 있는 반면, 한국의 전력 시스템은 고립되어 있다. 결과적으로 한국은 에너지 안보 측면에서 뚜렷한 어려움에 직면하고 있으며 충분한 전력 생산을 확보해야 한다. 이와 대조적으로, 독일은 주변 국가의 전력 인프라에 통합되어 있어 균형을 이룰 수 있다.

양국 모두 파리 기후 협정에 서명하고 비준했으며, 이에 따라 기후 중립을 달성하고자 하지만, 각 국가의 접근 방식은 상이하다. 독일은 2024 년에 원자력 발전을 단계적으로 폐지하고 재생에너지에 중점을 두어 2030 년까지 전력 믹스에서 재생에너지 비중을 80%로 확대하는 목표를 세웠다. 반면 한국은 다른 전략을 채택하여 재생에너지와 함께 원자력 발전(제 11 차 기본계획에 따르면 2038 년 재생에너지 비중 35% 예상)을 통해 전력 시스템의 탈탄소화를 추진하고 있다. (Ministry of Trade, Industry and Energy 2025). 두 나라 모두 전력 믹스에서 탄소 중립 에너지(재생에너지 및 원자력)를 대폭 확대하는 것을 목표로 하고 있지만, 전력망 안정성과 보안을 확보하는 데 있어 각기 다른 과제에 직면하게 될 것이다. 원자력에 의존하는 전력 믹스와 달리, 독일의 전력 믹스는

재생에너지의 계절적 변동성에 더 큰 영향을 받을 것이다. 더욱이 독일은 에너지 전환을 일찍 시작했으며 재생에너지의 신속한 도입에 더욱 중점을 두고 있다. 그 결과, 독일의 전력 믹스에서 재생에너지 비중은 이미 훨씬 높다. (2023 년 기준 독일의 재생에너지 비중은 52%인 반면 한국은 9%) (Umweltbundesamt 2024; International Energy Agency 2025). 이는 독일이 전환 경로에서 더 앞서 있음을 시사한다. 따라서 독일은 현재 한국과는 다른 어려움에 직면할 수 있지만, 이는 미래의 한국에도 영향을 미칠 수 있다.

마지막으로, 다음 섹션에서 볼 수 있듯이 양국에서 BESS 를 운영하는 현실에 영향을 미치는 전력 시장 설계 및 관련 규제 프레임워크의 차이점을 주목하는 것이 중요하다. 한국에서는 전력 시장의 일부(송전, 배전 및 소매 부문)가 한국전력공사(KEPCO)의 단독 통제 하에 있다. 이는 자유화된 독일 시장과 대조적이다. 이 차이점의 한 예는 시장 참여자의 수이다. 한국에서는 전력 시장에서 활동하는 시장 참여자가 소수인 반면, 독일에서는 다양한 특성, 업무 및 이해관계자가 참여한다. 예를 들어, 현재 독일에는 800 개가 넘는 배전 시스템 운영자가 있는 반면, 한국에서는 KEPCO 가 배전 시스템의 유일한 운영자이다.

### 5.2 운용 현황 및 잠재력

#### 5.2.1 현황

독일에 비해 한국은 BESS 구축 현황이 더 발전되어 있다. 2023 년 말 기준 한국의 누적 에너지 저장 용량은 독일보다 거의 5 배 높았다. (10GWh vs. 1.5GWh) (Figgner et al. 2025; Ministry of Trade, Industry and Energy and Korean Energy Economics Institute 2023) 그러나 독일은 최근 몇 년 동안 차익거래를 위한 수익성 있는 시장 환경과 화석 연료에서의 에너지 전환 등 여러 가지 이유로 대규모 BESS 에 대한 수요가 급격히 증가한 반면, 한국은 2017 년 이후 일련의 화재 사고와 관련 안전 문제로 수요가 감소했다. 앞서 언급한 지원 정책의 만료 또한 시장 위축의 요인이었다.

두 나라의 BESS 배치 방식을 비교하면 뚜렷한 패턴이 드러난다. 한국에서는 BESS 가 주로 재생에너지 연계에 활용된다. 즉, BESS 는 재생에너지 생산 시설에 직접 연결되어 설치되고 잉여 재생에너지를 저장한 후 계통 수요 관리에 사용된다. 반대로 독일에서는 BESS 가 주로 보조 서비스에 사용되고, 재생에너지 연계는 부차적인 목적으로 사용된다. 한국에서 재생에너지 연계에 더욱 중점을 둔 것은 2016 년부터 2020 년까지 재생에너지 공급인증서(REC) 제도의 성공적인 지원 프로그램에 기인할 수 있으며, 이 프로그램은 재생에너지원과 함께 BESS 배치를 촉진했다. 독일 또한 혁신 입찰을 통해 BESS 와 재생에너지의 공동 개발을 지원해 왔지만, 이는 비교적 최근(2020 년 이후)에 도입되었으며, 계통 중심적인 방식으로 BESS 를 운영할 인센티브를 제공하지 않는다. (Figgner et al. 2023) 독일에서 보조 서비스용 BESS 가 널리 보급된 것은 여러 요인으로 설명될 수 있다. 2019 년 이전에는 혁신 경매와 같은

다른 용도에 대한 인센티브가 부족하여 BESS 설비가 거의 보조 서비스용으로만 건설되었다. 더욱이, 독일의 자유화된 전력 시장은 BESS 에 유리한 환경을 제공하여 전력 시장에서 BESS 운영을 통해 이익을 얻을 수 있는 다양한 주체의 (제한 없는) 참여를 장려한다. 이와 대조적으로, 제한된 보조 서비스와 실시간 시장으로 운영되는 한국의 중앙집중적이고 비용 기반의 전력 시장은 BESS 시장 진입에 유리하지 않다. 2020 년까지 BESS 구축은 주로 요금 할인 및 재생에너지 연계 BESS 에 대한 추가 REC 와 같은 지원 정책에 의해 주도되었으며, 이는 공공 및 민간 투자를 유치했다.

이러한 통찰력이 현재 상황을 반영한다는 점을 인식하는 것이 중요하다. 독일은 향후 몇 년 동안 배터리 저장 설비가 크게 증가할 것으로 예상되며, 이는 일반적인 사용 사례를 변화시킬 가능성이 있다. 예를 들어, 대용량 '그리드 부스터'가 이러한 성장에 상당히 기여할 것으로 예측된다. 한편, 한국 시장은 최근 몇 년 동안 침체에 직면했다. 2017 년 이후 일련의 화재 사고로 인해 안전 조치 강화가 필요했고, 이는 BESS 비용 증가로 이어졌다. 더욱이 지원 정책 만료로 인해 시장 침체가 발생했으며, 이는 아직 완전히 회복되지 않았다. 이러한 개혁에 앞서 시범 사업을 통해 전력 시장 개혁을 통해 BESS 운용을 활성화할 계획이 진행 중이다. 예를 들어, 제주도에는 15 년 동안 입찰 가격을 통해 BESS 전력 공급 비용을 보상하는 중앙 BESS 계약 시장이 있다.

한국과 독일의 BESS 시장에 참여하는 주체들을 살펴보면, 전력 시장 구조에 상당한 차이가 있다. 한국은 한국전력거래소(KPX)와 한국전력공사(KEPCO)가 관리하는 중앙집중형 전력 시장을 운영하고 있으며, 이들은 송배전 시설을 건설 및 관리하고 소매 시장을 운영한다. BESS 의 소유 및 운영 또한 과도기 단계에 있으며, 한국전력공사는 주파수 조정 및 계통 안정화 ESS 를 소유 및 운영하는 반면, 재생에너지 및 수요 관리 BESS 는 사전 정의된 규칙과 요금 체계에 따라 개별 소유주가 운영한다. 중앙 BESS 계약 시장은 민간 또는 공공 투자자가 소유하고 KPX 가 출력 제한 해결 등의 목적으로 운영한다. 이와 대조적으로 독일의 시장은 자유화되고 분산된 접근 방식을 반영하여 다양한 참여자가 참여한다. BESS 는 800 개가 넘는 DSO(전력공급사업자)뿐만 아니라 에너지 회사나 민간 투자자와 같은 다른 주체들도 운영한다.

BESS 의 소유 및 운영 또한 과도기 단계에 있다. 한전은 주파수 조정 및 계통 안정화 ESS 를 소유 및 운영하는 반면, 재생에너지 및 수요 관리 BESS 는 개별 소유주가 사전 정의된 규칙 및 요금 체계에 따라 운영한다. 중앙 BESS 계약 시장은 민간 또는 공공 투자자가 소유하고 있으며, 전력거래소(KPX)가 생산량 제한 해결 등의 목적으로 운영된다. 이와 대조적으로, 독일 시장은 자유화되고 분산된 접근 방식을 반영하여 다양한 참여자가 참여한다. BESS 는 800 개가 넘는 전력회사(DSO)뿐만 아니라 에너지 회사나 개인 투자자와 같은 다른 주체들도 운영한다.

한국은 배터리 셀 생산의 글로벌 리더로 자리매김했으며, 세계 10 대 리튬이온 배터리 제조업체 중 3 곳이 한국뿐만 아니라 전 세계에 공장을 두고 있다. 한국에 설치된 ESS 의 99% 이상이 국산 NMC 리튬이온 배터리를 사용한다. 한국 정부는 현재 침체된 국내 ESS 산업을 되살리고 글로벌 제조 리더로서의 입지를 더욱 강화하는 것을 목표로 하고 있다. (섹션 3 참조) 독일은 배터리 셀의 대부분을 수입하고 있다. 그러나 독일은 현재 국내 수요에 대응하고 공급망 위험을 완화하기 위해

배터리 가치 사슬 전반에 걸쳐 생산 능력을 확대하고 있다. 최근 243GWh 규모의 생산 용량 프로젝트가 실패하거나 지연되었음에도 불구하고, 독일은 유럽에서 배터리 셀 생산의 주요 국가 중 하나로 남을 것으로 예상된다. 두 나라의 국내 배터리 생산 규모는 다르지만, 양국 모두 국내 생산 확대에 대한 의지를 공유하고 있으며, 각기 다른 목표를 가지고 있다.

### 5.2.2 BESS 의 잠재력

한국과 독일의 대규모 배터리 저장 시스템의 잠재력은 절대적인 측면에서 비슷하다. 현재 추정에 따르면 한국은 2036 년까지 24.4GW 단기 및 중기 용량의 전기 저장 용량이 필요한 반면 독일은 2037 년까지 24GW 가 필요하다. (독일의 2037 년까지 추정 에너지 소비량은 약 630TWh 이며, 한국은 2038 년까지 700TWh 이다.) (Bundesnetzagentur 2024a; Ministry of Trade, Industry and Energy 2025). 재생 에너지 점유율에 대한 각각의 목표(독일 90%, 한국 약 30%)와 비교했을 때, 한국은 전기 믹스에서 재생 에너지의 점유율이 낮음에도 불구하고 BESS 를 통한 유연화에 대한 필요성이 상대적으로 더 높은 것으로 보인다. 한국의 전력망이 이웃 국가와 연결되지 않은 섬형 계통이라는 사실이 이에 영향을 미칠 가능성이 있다.

### 5.3 BESS 정책 목표 및 지원

한국과 독일은 모두 전력 저장에 대한 특별한 대중적 관심을 표명했으며, 이 기술이 각자의 에너지 전환에 중요하다는 점을 인식하고 있다. 이러한 보급 확대를 위해 양국은 최근 구체적인 전략을 발표했다. 한국은 향후 몇 년간 구체적인 보급 목표를 제시한 반면, 독일은 공식적인 목표가 없고 다양한 시나리오에 기반한 추정치만 제시하고 있다.

한국은 목표 달성을 위해 포괄적인 중장기 전략에 제시된 다양한 방안을 통해 BESS 의 국내 수요와 생산을 활성화하는 데 주력하고 있다. 특히 2016 년 ESS 와 연계된 재생에너지원에 대한 신재생에너지 공급인증서(REC) 제도가 도입되면서 REC 제도가 단계적으로 폐지되는 2020 년까지 수요가 강세를 보였다. 그러나 최근 몇 년간 여러 사고와 관련 안전 문제, 그리고 더 중요한 REC 제도의 종료로 인해 BESS 수요가 감소함에 따라 한국 정부는 현재의 전략을 수정해야 한다. 이를 위해 전력 시장 메커니즘을 개혁하고 제주도에 장기 용량의 BESS 를 위한 중앙 입찰 시장을 도입할 계획이다.

한국과 마찬가지로 독일도 국내 배터리 생산 육성에 힘쓰고 있다. 독일은 수년간 연구 프로그램을 통해 배터리 및 배터리 시스템 개발을 지원해 왔으며, 이를 통해 이 분야의 탄탄한 기반을 구축해 왔다. 최근 정책적 초점은 국내 배터리 생산 역량 강화로 옮겨갔다. 보급 확대는 장려되지만, 수요 측면의 정책은 상대적으로 제한적이다. 한국과 마찬가지로 독일도 전력 저장 장치와 함께 재생에너지원을 설치하도록 인센티브를 제공하고, 전력망 요금을 인하하여 ESS 의 운영 비용을 절감했다. 그러나 독일의 유리한 시장 환경을 고려할 때, BESS 에 대한 재정 지원은 포괄적이지 않아 투자에 더욱 매력적이다. 더욱이 독일 정부는 모든 유연화 옵션에 대해 '공정한 경쟁 환경'을 조성하는 것을 목표로 한다. 그럼에도 불구하고, 2023 년 12 월에 발표된 전력 저장 전략에 명시된 조치 및 활동 분야의 이행은 독일의 전력 저장 시장 및 투자 환경에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

### 5.4 도전과제

독일과 한국의 BESS 구축은 여러 가지 어려움으로 인해 어려움을 겪고 있다. 에너지 전환을 위한 저장 옵션의 잠재력을 최대한 활용하려면 이러한 문제를 해결해야 한다. 양국 모두 기존 규제 및 정책 체계와 관련하여 어려움을 겪고 있다. 한국의 경우 전력 공급 계획 및 재생에너지 감축 관리에 유연성 조치를 통합하는 것이 충분하지 않은 반면, 독일의 경우 BESS 설치 및 운영이 복잡한 인허가 절차, 불균일한 설치 요건, 그리고 제한적인 법률 및 규정으로 인해 직접적인 어려움을 겪고 있다.

규제 장벽 외에도, 양국은 제한된 배터리 수명이나 높은 초기 투자 비용과 같은 기술 자체와 관련된 공통적인 기술적 어려움을 공유한다. 또한, 두 나라 모두 공급망의 취약성과 설치 장소 문제에 직면해 있다. 반면, 한국은 과거 화재 사고로 인해 안전 문제와 지역 사회의 수용도가 문제가 더 대두되는 반면, 독일은 기존 전력망 인프라와의 통합에 상당한 어려움을 겪고 있다.

시장 문제 또한 상당한 장벽으로 작용한다. 한국과 독일 모두 투자 취약성을 겪고 있지만, 이러한 어려움의 본질은 서로 다르다. 한국의 기존 강력한 인센티브 제도(REC)는 민간 및 공공 투자를 유치했지만, 재정적으로 지속가능하지 않다는 점이 분명해졌다. 따라서 한국은 BESS 투자에 더 유리한 전력 시장 구조 개편에 주력하고 있다. 독일의 경우, BESS 투자에 유리한 시장 환경이 조성되어 있지만, 2029년 이후 전력망 요금 면제와 BESS의 수명이 짧음에도 불구하고 공공 자금으로 운영되는 프로젝트에 대한 장기 운영 의무화 등의 불확실성이 투자를 제한하고 있다. 시장 문제는 서로 다른 전력 시장 구조에서도 비롯된다. 독일의 분산형 시스템은 BESS의 시스템적 활용에 대한 인센티브가 부족하며, BESS 구축을 위한 최적의 위치 및 시기를 제시하지 못하고 있다. 한국 또한 이러한 문제에 직면하고 있지만, BESS 구축으로 인한 전기 요금 인상 가능성과 같은 사회적 및 산업적 영향을 고려해야 한다.



## 6 한-독 협력을 위한 결론 및 제언

### 6.1 결론

본 연구는 한국과 독일의 에너지 저장 시스템(ESS) 도입 및 잠재력을 분석하며, 특히 에너지 전환의 핵심 요소인 배터리 ESS에 초점을 맞춘다. 양국 모두 대규모 배터리 저장 장치와 전력망 안정화, 재생에너지 연계, 그리고 탄소 중립 달성에 중요한 역할을 한다는 점을 인지하고 있다. 한국은 선진 배터리 제조 산업을 활용하여 원자력 및 재생에너지 중심의 전력 믹스 속에서 전력망 안정성을 강화하고자 한다. 독일은 배터리 생산을 확대하고 재생에너지 연계 및 전력망 유연성을 지원하는 정책을 시행하고 있다.

본 연구는 독일의 단일 시장 가격 체계가 지역 전력망 상황을 반영하지 못하여 BESS 운영에 영향을 미치고, 양국 에너지 부문의 숙련된 인력 부족 등 여러 과제를 지적한다. 이는 전력망 서비스 최적화를 위한 전략적 BESS 배치의 중요성과 지역 전력망 수요를 효과적으로 충족하기 위한 차별화된 가격 신호의 필요성을 강조한다. 또한, BESS 가격 상승 시기에 지원 프로그램이 폐지됨에 따라 한국의 BESS 보급률이 저조한 것은 외부(시장) 신호를 고려한 신중하게 설계된 정책 지원 조치의 필요성을 시사한다.

재생에너지 확대는 BESS와 같은 유연성 옵션의 확대와 함께 이루어져야 한다. 따라서 각국의 과제를 해결하는 것은 BESS의 목표 지향적이고 시스템 호환 가능한 구축 및 통합을 촉진하는 데 매우 중요하다. 예를 들어, 전력 저장 시스템 소유 및 운영에 관한 규제 프레임워크를 간소화하거나 조정하여 TSO가 전력 저장 옵션을 최적으로 활용할 수 있도록 하는 것은 전력 저장 시스템의 잠재력을 최대한 활용하는 데 도움이 될 수 있다. 각 국가의 넷제로 목표 달성까지 걸리는 시간이 짧다는 점을 고려할 때, 시의적절한 조치가 필요하다.

### 6.2 한-독 협력을 위한 권고사항

대부분의 과제는 개별적으로 해결해야 하지만, 특정 측면에서는 협력이 바람직하다. 한-독 협력을 위한 권고 사항에는 규제 기준 조율 및 기술 협력 증진을 통해 이러한 장애 요소를 극복하는 것이 포함된다. 아래에서는 BESS 구축, 운영 및 제조 협력에 대한 권고 사항을 제시한다. 이러한 양자 협력의 한 축은 한-독 에너지 파트너십이다. 이는 2019년 독일 경제기후행동부(BMWK)와 한국 통상산업부(MOTIE)가 양국의 에너지 전환을 촉진하기 위해 설립한 고위급 협력 체계다.

#### BESS의 전력망 통합

BESS의 최적 운영 및 활용을 위해서는 전력망에 적시에 정확하게 통합하는 것이 중요하다. 앞 장에서 살펴본 과제들은 독일과 한국의 서로 다른 전력 시스템이 다양한 과제를 야기함을 보여준다. 정책 및 전문가 교류를 통해 상호 학습을

촉진하고 긍정적인 발전을 촉진할 수 있다. 따라서 다음과 같은 사항을 권고한다.

- 한국과 독일의 전력계통 내 대규모 BESS 통합에 대한 전문가 교류 개최
- 전력계통 유연화를 위한 BESS 통합에 대한 TSO/DSO 간 교류를 진행

또한 BESS 통합을 지원하기 위해 전력망 보안 및 안정성, 전력 공급의 유연화와 같은 인접 주제에 대한 양자 간 교류가 권장된다.

#### BESS 기술 개발 및 표준

한국과 독일은 모두 BESS 제조 부문에서 세계/지역적 리더로 자리매김하고자 한다. 에너지 파트너십은 다음과 같은 협력 방식을 통해 이러한 목표를 지원할 수 있다.

첫째, BESS의 안전한 운영을 보장하고 BESS와의 글로벌 무역을 활성화하기 위해서는 (안전) 표준 및 규정에 대한 협력이 바람직하다. 2024년부터 시행될 표준에 따른 배터리 안전 시험에 대한 유럽 위원회 보고서는 기존 안전 표준 간에 상당한 차이가 있다는 결론을 내렸다. (Hildebrand et al. 2024) 이러한 표준화 부족은 무역에 기술 장벽을 조성하고 시장 진입을 저해한다. (Fraunhofer ISI 2020) 더욱이 한국에서 볼 수 있듯이, 화재 사고 등으로 인한 국민 안전 우려는 BESS 운영 중단으로 이어질 수 있다. 에너지 파트너십은 다음과 같은 방법을 통해 독일과 한국 간의 이 문제에 대한 공조를 지원함으로써 (글로벌) 표준 개발을 지원할 수 있다.

- BESS 표준화 및 인증에 중점을 둔 전문가 워크숍 개최
- 표준 및 인증 프로세스의 조화를 위해 표준화 기관 간 교류 촉진

둘째, 특히 BESS 설비와 관련된 화재 사고를 고려하여 보다 효율적이고 안전하며 재생 가능한 배터리 유형의 개발을 촉진하기 위해 다음과 같은 형식을 권장한다.

- 새로운 배터리 기술, 배터리 재활용, 더욱 지속 가능한 배터리 개발 등 최신 연구 동향에 대한 전문가 교류 진행
- BESS 시스템의 안전한 운영 및 배터리 안전 표준에 대한 전문가 워크숍 개최

#### BESS 공급망 및 국내 생산의 회복탄력성

양국은 현지 생산과 BESS 공급망의 회복탄력성의 중요성을 강조한다. 배터리 경제에 참여하는 중소기업 간의 상호 학습을 지원하고 활성화하기 위해, 에너지 파트너십은 다음과 같은 형식을 통해 이를 지원할 수 있다.

- 배터리 가치 사슬 전반의 기업 간 **B2B** 회의 및 교류 주최
- 기업 대표단의 상호 방문을 지원하여 네트워킹 및 협업 촉진
- **BESS** 공급망의 회복탄력성 및 원자재 조달에 대한 교류 진행

이러한 권고안을 이행함으로써 한-독 에너지 파트너십은 한국과 독일 전력 부문의 **BESS** 구축 및 통합을 지원하고, **BESS** 제조 부문에서 양국의 전략적 입지를 강화할 수 있다. 이러한 협력은 양국이 글로벌 지속가능성 목표 달성에 기여하는 동시에 국내 에너지 안보를 강화하는 데 도움이 될 것이다.

# 그림 목차

그림 1: 독일 내 계획 및 기존 대규모 BSS의 지역별 분포  
Figure 1: Regional Distribution of planned and existing large-Scale BSS in Germany (Source: Figgener et al. (2025)) .....12  
그림 2: 독일 BESS 생태계의 이해관계자 맵 (출처: 자체 일러스트레이션) .....16

# 표 목차

표 1: 총 용량 기준 독일 내 설치된 BESS 프로젝트 상위 5 개..... 11



## 7 참고문헌

- Amprion (2024): Dezentraler Netzbooster. Available online at <https://www.amprion.net/Netzausbau/Aktuelle-Projekte/Dezentraler-Netzbooster/>, checked on 1/14/2025.
- BASF (2023): Battery materials meet recycling: BASF is the first company to establish a co-located battery materials and recycling center and close the loop in the European battery value chain. Available online at <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2023/06/p-23-251>, updated on 1/15/2025, checked on 1/15/2025.
- Batterie 2020 (2025a): Institutionelle Förderung. Available online at <https://batterie-2020.de/foerderung/institutionelle-foerderung/>, updated on 1/14/2025, checked on 1/14/2025.
- Batterie 2020 (2025b): Rückblick: Förderung seit 2007. Available online at <https://batterie-2020.de/foerderinitiative/foerderungen-der-batterieforschung-durch-das-bmbf/rueckblick-foerderung-seit-2007/>, updated on 1/14/2025, checked on 1/14/2025.
- Berkeley Lab (2023): A Clean Energy Korea by 2035. Transitioning to 80% Carbon-Free Electricity Generation. Available online at <https://emp.lbl.gov/publications/clean-energy-korea-2035-transitioning>, updated on 3/10/2025, checked on 3/10/2025.
- BloombergNEF (2023): 2H 2023 Energy Storage Market Outlook. Available online at <https://about.bnef.com/blog/2h-2023-energy-storage-market-outlook/>, updated on 4/23/2024, checked on 1/30/2025.
- Bundesnetzagentur (2021): Regelungen zu Stromspeichern im deutschen Strommarkt. Bericht. Bonn.
- Bundesnetzagentur (2024a): Bedarfsermittlung 2023-2037/ 2045. Bestätigung Netzentwicklungsplan Strom. Bonn.
- Bundesnetzagentur (2024b): Ergebnisse der Innovationsausschreibung und der Ausschreibung für Biomethananlagen zum 1. September 2024. Available online at [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20241015\\_Inno\\_Biomethan.html](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20241015_Inno_Biomethan.html), updated on 1/14/2025, checked on 1/14/2025.
- Bundesnetzagentur (2024c): Positionspapier zu regionalen Preissignalen für mehr Kosteneffizienz im Übertragungsnetz. Available online at [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20241120\\_BKZ.html](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20241120_BKZ.html), updated on 2/17/2025, checked on 2/17/2025.
- Bundesnetzagentur (2025a): Bundesnetzagentur veröffentlicht Daten zum Strommarkt 2024. Available online at [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2025/20250103\\_smard.html](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2025/20250103_smard.html), updated on 2/5/2025, checked on 2/5/2025.
- Bundesnetzagentur (2025b): Marktstammdatenregister. Available online at <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR>, updated on 1/15/2025, checked on 1/15/2025.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (2024): Stellungnahme Stromspeicher-Strategie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz. Berlin.
- Bundesverband Energiespeicher Systeme (2023): Systeminfrastruktur - BVES. Available online at <https://www.bves.de/energiespeicher/systeminfrastruktur/>, updated on 7/26/2023, checked on 1/14/2025.
- Bundesverband Energiespeicher Systeme (2024): Branchenanalyse 2024. Entwicklung und Perspektiven der Energiespeicherbranche in Deutschland. Volta-X Stuttgart. Available online at <https://www.bves.de/wp-content/uploads/2024/03/BVES-Branchenanalyse-2024.pdf>, checked on 1/14/2025.
- Bundesverband Energiespeicher Systeme (2025): Endspurt 2030. Die Speicheragenda zur 21. Legislaturperiode. Available online at [https://www.bves.de/wp-content/uploads/2025/02/BVES\\_Endspurt2030\\_Speicheragenda\\_21\\_Legislaturperiode.pdf](https://www.bves.de/wp-content/uploads/2025/02/BVES_Endspurt2030_Speicheragenda_21_Legislaturperiode.pdf).
- Bundesverband Erneuerbare Energien (2024): BEE-Stellungnahme zur Stromspeicher-Strategie des BMWK vom 8. Dezember 2023. Berlin.
- Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V. (2024): Stellungnahme zum Entwurf: Stromspeicher-Strategie. Handlungsfelder und maßnahmen für eine anhaltende Ausbaudynamik und optimale Systemintegration von Stromspeichern. Stand 08.12.2023. Berlin.

Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (2024): Verfünfachung der Großspeicher-Kapazität geplant. In *Bundesverband Solarwirtschaft e.V.*, 2024. Available online at <https://www.solarwirtschaft.de/2024/10/02/verfuenffachung-der-grossspeicher-kapazitaet-geplant/>, checked on 1/17/2025.

Carbon Neutrality and Green Growth Commission (2025): 2030 Nationally Determined Contribution. Available online at <https://www.2050cnc.go.kr/eng/contents/view?contentsNo=67&menuLevel=2&menuNo=119>, updated on 1/30/2025, checked on 1/30/2025.

Cebulla, Felix; Haas, Jannik; Eichman, Josh; Nowak, Wolfgang; Mancarella, Pierluigi (2018): How much electrical energy storage do we need? A synthesis for the U.S., Europe, and Germany. In *Journal of Cleaner Production* 181, pp. 449–459. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.144.

Clark, Gary (2025): Why Are Lithium Batteries So Expensive To Make? Available online at <https://holobattery.com/why-are-lithium-batteries-so-expensive-to-make/>, updated on 1/24/2025, checked on 1/24/2025.

Cook, Kody (2023): Grid connection challenges explained. In *Energy Magazine*, 2023. Available online at <https://www.energymagazine.com.au/grid-connection-challenges-explained-qa-with-risen-australias-grid-connection-and-technical-services-manager-michael-forder/>, checked on 1/23/2025.

Dai, Yixin; Panahi, Aidin (2025): Thermal runaway process in lithium-ion batteries: A review. In *Next Energy* 6, p. 100186. DOI: 10.1016/j.nxener.2024.100186.

Deguenon, Lere; Yamegueu, Daniel; Moussa kadri, Sani; Gomna, Aboubakar (2023): Overcoming the challenges of integrating variable renewable energy to the grid: A comprehensive review of electrochemical battery storage systems. In *Journal of Power Sources* 580. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2023.233343.

Denholm, Paul; Cole, Wesley; Frazier, A. Will; Podkaminer, Kara; Blair, Nate (2021): Storage Futures Study The Challenge of Defining Long-Duration Energy Storage. National Renewable Energy Laboratory (NREL) (NREL/TP-6A40-80583.).

Deutscher Bundestag (2024): Drucksache 20/10897. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion CDU/CSU - Drucksache 20/10658. Kürzung der Fördermittel für Batterieforschung. Available online at <https://dserver.bundestag.de/btd/20/108/2010897.pdf>, checked on 1/14/2025.

DIN; Deutsche Kommission Elektrotechnik; DVGW; Verein Deutscher Ingenieure (2021): Deutsche Normungsroadmap Energiespeicher. Version 2.

dpa (2024): Northvolt steht zum Bau der Batteriefabrik in Heide. In *springerprofessional.de*, 2024. Available online at <https://www.springerprofessional.de/batterie/unternehmen---institutionen/northvolt-steht-zum-bau-der-batteriefabrik-in-heide/50086818>, checked on 1/15/2025.

Eco Affect (2024): What's The Life Expectancy of Battery Storage Systems? Available online at <https://ecoaffect.org/battery-storage/life-expectancy-battery-storage-systems/>, updated on 5/20/2024, checked on 1/23/2025.

Eichhammer, Wolfgang; Zheng, Lin; Klobasa, Marian; Yuxia, Yin; Ryssel, Maximilian (2020): Energy storage in Germany. Present developments and applicability in China. Available online at <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/ba91f2b5-b8db-4a4c-a2e3-702ad549d63c>.

Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (2023a): 8. Energieforschungsprogramm zur angewandten Energieforschung. Forschungsmissionen für die Energiewende. Berlin. Available online at [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/8-energieforschungsprogramm-zur-angewandten-energieforschung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=10](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/8-energieforschungsprogramm-zur-angewandten-energieforschung.pdf?__blob=publicationFile&v=10), checked on 1/14/2025.

Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (2023b): Electricity Storage Strategy. Fields of action and measures to ensure a persistent and dynamic expansion of electricity storage facilities and their optimal systems integration. Berlin.

Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (2025): Batterien „made in Germany“ – ein Beitrag zu nachhaltigem Wachstum und klimafreundlicher Mobilität. Available online at <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/batteriezellfertigung.html>, updated on 1/15/2025, checked on 1/15/2025.

Federal Ministry of Education and Research (2022): Batterieforschung in Deutschland – Materialien, Prozesse und Zellfertigung. Bonn. Available online at [https://batterie-2020.de/wp-content/uploads/2022/07/Broschuere\\_Batterieforschung\\_Deutschland.pdf](https://batterie-2020.de/wp-content/uploads/2022/07/Broschuere_Batterieforschung_Deutschland.pdf), checked on 1/14/2025.

Federal Ministry of Education and Research (2023): BMBF-Dachkonzept Batterieforschung. Souveränität für eine nachhaltige Wertschöpfung von morgen. Bonn.

- Federal Ministry of Education and Research (2025): Förderung der Batterieforschung durch das BMBF - Batterie 2020. Available online at <https://batterie-2020.de/foerderinitiative/foerderungen-der-batterieforschung-durch-das-bmbf/>, updated on 1/14/2025, checked on 1/14/2025.
- Figgenger, Jan; Hecht, Christopher; Haberschusz, David; Bors, Jakob; Spreuer, Kai Gerd; Kairies, Kai-Philipp et al. (2023): The development of battery storage systems in Germany: A market review (status 2023).
- Figgenger, Jan; Sauer, Dirk Uwe; Hecht, Christopher (2025): Battery Charts. Available online at <https://www.battery-charts.de/>, updated on 1/14/2025, checked on 1/14/2025.
- Fraunhofer ISE (2022): Batteriespeicher an ehemaligen Kraftwerksstandorten. Positionspapier. Freiburg. Available online at <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2022/fraunhofer-ise-kurzstudie-batteriegrossspeicher-an-ehemaligen-kraftwerksstandorten-sinnvoll.html>, checked on 1/14/2025.
- Fraunhofer ISI (2020): Energy Storage in Germany – Present Developments and Applicability in China. Karlsruhe.
- Fraunhofer IWES; Stiftung Umweltenergierecht; Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (2014): Roadmap Speicher. Bestimmung des Speicherbedarfs in Deutschland im europäischen Kontext und Ableitung von technisch-ökonomischen sowie rechtlichen Handlungsempfehlungen für die Speicherförderung. Endbericht.
- Frey, Ulrich J.; Wassermann, Sandra; Deissenroth-Uhrig, Marc (2021): Storage Technologies for the Electricity Transition: An Analysis of Actors, Actor Perspectives and Transition Pathways in Germany. In *Energies* 14 (1), p. 18. DOI: 10.3390/en14010018.
- Gür, Turgut M. (2018): Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage. In *Energy Environ. Sci.* 11 (10), pp. 2696–2767. DOI: 10.1039/c8ee01419a.
- Han-gyo Jeong (2024a): KEPCO Completes 978MW ESS for Grid Stabilization... Largest in Asia. Available online at <https://www.industrynews.co.kr/news/articleView.html?idxno=55791>, updated on 1/30/2025, checked on 1/30/2025.
- Han-gyo Jeong (2024b): Industry, academia, research, and government all in one place to develop the next-generation energy storage technology, 'Carnot Battery'! Available online at <https://www.industrynews.co.kr/news/articleView.html?idxno=53270>, updated on 1/30/2025, checked on 1/30/2025.
- Hannan, M. A.; Al-Shetwi, AliQ.; Begum, R. A.; Young, S. E.; Hoque, M. M.; Ker, PinJern et al. (2020): The value of thermal management control strategies for battery energy storage in grid decarbonization: Issues and recommendations. In *Journal of Cleaner Production* 276, p. 124223. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124223.
- Hildebrand, Stephan; Eddarir, A.; Lebedeva, Natalia (2024): Overview of battery safety tests in standards for stationary battery energy storage systems. Europäische Kommission. Luxembourg (JRC technical report, JRC135870). Available online at <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/e1c22d69-c3da-11ee-95d9-01aa75ed71a1>.
- International Energy Agency (2025): Korea. Available online at <https://www.iea.org/countries/korea/energy-mix>, updated on 2/5/2025, checked on 2/5/2025.
- International Trade Administration (2023): South Korea. Country Commercial Guide. Available online at <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/south-korea-energy-carbon-neutrality-initiatives>, updated on 3/10/2025, checked on 3/10/2025.
- Johannsen, Katharina (2024a): Batteriestandorte können Redispatch verteuern – Tennet. Available online at <https://montelnews.com/de/news/c0dcfebo-9240-4035-adff-57fb753bb430/batteriestandorte-konnen-redispatch-verteuern-tennet>, updated on 12/11/2024, checked on 1/20/2025.
- Johannsen, Katharina (2024b): Solarerträge brauchen Batteriehochlauf. Available online at <https://montelnews.com/de/news/51f4b9ef-b668-4e07-b113-702564db9fcc/batteriehochlauf-konnte-solarausbau-retten>, updated on 12/18/2024, checked on 1/20/2025.
- Johannsen, Katharina (2024c): ÜNB verzeichnen 161 GW an Batterie-Anschlussanfragen. Available online at <https://montelnews.com/de/news/8458570b-24b0-46c0-9fb4-e9c881de5660/unb-verzeichnen-161-gw-an-batterie-anschlussanfragen>, updated on 10/29/2024, checked on 1/23/2025.
- Korea Energy Agency (2024a): Energy Efficiency in Building, Transport and Equipment Sector. Available online at <https://www.energy.or.kr/en/conts/10400200000000.do>, checked on 08.2024.
- Korea Energy Agency (2024b): Energy Efficiency in Industry Sector. Available online at <https://www.energy.or.kr/en/conts/10400100000000.do>, checked on 08.2024.
- Korea Energy Agency (2024c): Growth and Deployment of Renewable Energy. Available online at <https://www.energy.or.kr/en/conts/10400300000000.do>, checked on 08.2024.



- Kyon Energy (2025): New 100 MW large battery storage project from Kyon Energy in North Rhine-Westphalia. Available online at <https://en.kyon-energy.de/en/pressemitteilung/neues-100mw-batteriegrossspeicherprojekt-von-kyon-energy-in-nordrhein-westfalen>, updated on 2/1/2025, checked on 2/6/2025.
- Lan, Tu; Graeber, Gustav; Sieuw, Louis; Svaluto-Ferro, Enea; Vagliani, Fabrizio; Basso, Diego et al. (2023): Planar Sodium-Nickel Chloride Batteries with High Areal Capacity for Sustainable Energy Storage. In *Adv Funct Materials* 33 (33), Article 2302040. DOI: 10.1002/adfm.202302040.
- Lee, Geon-oh (2018): ESS for frequency regulation leads domestic power auxiliary service market, updated on <https://www.industrynews.co.kr/news/articleView.html?idxno=27441>, checked on 08.2024.
- Liu, Zhao (2019): The History of the Lithium-Ion Battery. Available online at <https://www.thermofisher.com/blog/materials/the-history-of-the-lithium-ion-battery/>, updated on 6/13/2023, checked on 1/24/2025.
- Lozanova, Sarah (2025): Solid State Battery Technology: The Future of Energy Storage. Edited by Greenlancer. Available online at <https://www.greenlancer.com/post/solid-state-batteries>.
- May, Geoffrey J.; Davidson, Alistair; Monahov, Boris (2018): Lead batteries for utility energy storage: A review. In *Journal of Energy Storage* 15, pp. 145–157. DOI: 10.1016/j.est.2017.11.008.
- MDR (2024): Batteriespezialist Tesvolt in Wittenberg baut Standort aus. In *MDR*, 2024. Available online at <https://www.mdr.de/nachrichten/sachsen-anhalt/dessau/wittenberg/tesvolt-energiespeicher-fabrik-ausbau-100.html>, checked on 1/15/2025.
- Miao, Youping; Liu, Lili; Xu, Kaihua; Li, Jinhui (2023): High concentration from resources to market heightens risk for power lithium-ion battery supply chains globally. In *Environmental science and pollution research international* 30 (24), pp. 65558–65571. DOI: 10.1007/s11356-023-27035-9.
- Ministry of Science, Energy, Climate Protection and Environment of the State of Saxony-Anhalt (2024): Energieministerium startet Speicherförderung: 22 Millionen Euro für heimische Wirtschaft. Available online at <https://mwu.sachsen-anhalt.de/artikel-detail/energieministerium-startet-speicherfoerderung-22-millionen-euro-fuer-heimische-wirtschaft>, updated on 4/24/2024, checked on 1/14/2025.
- Ministry of Trade, Industry and Energy (2025): 11th Basic Plan of Electricity Supply and Demand. Working-Level Draft.
- Ministry of Trade, Industry and Energy; Korean Energy Economics Institute (2023): Energy Storage (ESS) Industry Development Strategy. Policy paper prepared on behalf of MOTIE.
- Mongrid, K.; Fotegar, V.; Viswanathan, V.; Koritarov, V.; Balducci, P.; Alam, J.; Hadjerioua, B. (2019): Energy Storage Technology and Cost Characterization Report. Edited by U.S. Department of Energy.
- Mul, Nikolay (2025): History of Grid-Scale. In *Energy Storage World Forum*, 2025. Available online at <https://energystorageforum.com/energy-storage-technologies/history-grid-scale-energy-storage>, checked on 1/13/2025.
- Murray, Cameron (2024): H2 to deploy 8.8MWh vanadium flow battery in Spain. In *Energy-Storage.News*, 3/9/2024. Available online at <https://www.energy-storage.news/h2-to-deploy-8-8mwh-vanadium-flow-battery-in-spain/>, checked on 1/30/2025.
- National Renewable Energy Laboratory (2019): Grid-Scale Battery Storage. Frequently Asked Questions. Available online at <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/74426.pdf>, checked on 1/14/2025.
- NEXT Kraftwerke (2025): Innovationsausschreibungen nach dem EEG. Available online at <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/innovationsausschreibung-eeq>, updated on 1/14/2025, checked on 1/14/2025.
- Olabi, Abdul Ghani; Allam, Mohamed Adel; Abdelkareem, Mohammad Ali; Deepa, T. D.; Alami, Abdul Hai; Abbas, Qaisar et al. (2023): Redox Flow Batteries: Recent Development in Main Components, Emerging Technologies, Diagnostic Techniques, Large-Scale Applications, and Challenges and Barriers. In *Batteries* 9 (8), p. 409. DOI: 10.3390/batteries9080409.
- Prakash, Krishneel; Ali, Muhammad; Siddique, Md Nazrul Islam; Chand, Aneesh A.; Kumar, Nallapaneni Manoj; Dong, Daoyi; Pota, Hemanshu R. (2022): A review of battery energy storage systems for ancillary services in distribution grids: Current status, challenges and future directions. In *Front. Energy Res.* 10, Article 971704. DOI: 10.3389/fenrg.2022.971704.
- PV Magazin (2024a): BVES: Bundesnetzagentur verschärft finanzielle Hürden beim Baukostenzuschuss für Energiespeicher. Available online at <https://www.pv-magazine.de/2024/11/21/bves-bundesnetzagentur-verschaerft-finanzielle-huerden-beim-baukostenzuschuss-fuer-energiespeicher/>, updated on 2/17/2025, checked on 2/17/2025.

PV Magazin (2024b): Solarcamps gegen den Fachkräftemangel. Available online at <https://www.pv-magazine.de/archiv/solarcamps-gegen-den-fachkraeftemangel/>, updated on 1/23/2025, checked on 1/23/2025.

PV Magazin (2024c): Wann wird es flächendeckend Finanzierungslösungen für Batteriespeicher geben? Available online at <https://www.pv-magazine.de/2024/10/01/wann-wird-es-flaechendeckend-finanzierungsloesungen-fuer-batteriespeicher-geben/>, updated on 1/14/2025, checked on 1/14/2025.

PWC (2024): Battery Energy Storage Systems. Whitepaper.

Ritchie, Hannah (2024): What share of lithium-ion batteries are recycled? In *Sustainability by numbers*, 2024. Available online at <https://www.sustainabilitybynumbers.com/p/battery-recycling-myth>, checked on 1/24/2025.

RWTH Aachen University (2024): Battery Atlas 2024. Shaping the european lithium-ion battery industry. 2<sup>nd</sup> ed. Edited by Heiner Heimes. Aachen. Available online at [https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show\\_document.asp?id=aaaaaaacmsamgz](https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaacmsamgz), checked on 1/17/2025.

Schulz, Beatrice; Bundesverband Energiespeicher Systeme (2025): Battery Storage Landscape in Germany. With assistance of Japanes-German Energy Partnership. Online (Zoom In! Japanese-German Energy Transition Talks).

Shelestova, Anastasia; Herdt, Nicola; Armbruster, Carolin (2024): Neues zu Baukostenzuschüssen bei Batteriespeichern. CMS Blog. Available online at <https://www.cmshs-bloggt.de/rechtsthemen/sustainability/sustainability-environment-and-climate-change/neues-zu-baukostenzuschuessen-bei-batteriespeichern/>, updated on 12/6/2024, checked on 2/18/2025.

Sino Voltaics (2025): Battery Types for Energy Storage Applications. Available online at <https://sinovoltaics.com/energy-storage/batteries/battery-types-for-energy-storage-applications/>, updated on 11/1/2021, checked on 1/24/2025.

SNE Research (2023): Global LiB for ESS Sales in 2023. Available online at [https://www.sneresearch.com/en/insight/release\\_view/245/page/48?s\\_cat=|&s\\_keyword=ESS#ac\\_id](https://www.sneresearch.com/en/insight/release_view/245/page/48?s_cat=|&s_keyword=ESS#ac_id), updated on 1/30/2025, checked on 1/30/2025.

Statista (2023a): Electricity consumption by country 2023. Available online at <https://www.statista.com/statistics/267081/electricity-consumption-in-selected-countries-worldwide/>, updated on 3/11/2025, checked on 3/11/2025.

Statista (2023b): Global pumped storage capacity by country 2023. Available online at <https://www.statista.com/statistics/689667/pumped-storage-hydropower-capacity-worldwide-by-country/>, updated on 1/30/2025, checked on 1/30/2025.

Statista (2025): Lithium-ion battery price worldwide from 2013 to 2024, with a forecast for 2025. Edited by Statista Research Department. Available online at <https://www.statista.com/statistics/883118/global-lithium-ion-battery-pack-costs/>.

Statistisches Bundesamt (2024): Importwert von Lithium-Ionen-Akkus in Deutschland im Zeitraum in den Jahren 2012 bis 2023. Edited by Statista. Available online at <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1346958/umfrage/importwert-von-lithium-ionen-akkus-in-deutschland/>, updated on 1/17/2025, checked on 1/17/2025.

Statistisches Bundesamt; ZVEI (2024): Import von Zellen und Batterien nach Deutschland 2023. Edited by Statista. Available online at <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/813832/umfrage/import-von-zellen-und-batterien-nach-deutschland/>, updated on 1/17/2025, checked on 1/17/2025.

Stephan, Maximilian (2024): Battery recycling in Europe continues to pick up speed: Recycling capacities of lithium-ion batteries in Europe. Edited by Fraunhofer ISI. Available online at <https://www.isi.fraunhofer.de/en/blog/themen/batterie-update/lithium-ionen-batterie-recycling-europa-kapazitaeten-update-2024.html>.

Stöcker, Christian (2024): Riesige Speicher fürs Stromnetz: Ein Batterie-Tsunami rollt heran. In *DER SPIEGEL*, 11/17/2024. Available online at <https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/energiewende-riesige-speicher-fuers-stromnetz-ein-batterietsunami-rollt-heran-a-59e79edc-91a7-421b-a1b8-8c3b5e39645b>, checked on 1/14/2025.

Talan, Deniz; Huang, Qingqing (2022): A review study of rare Earth, Cobalt, Lithium, and Manganese in Coal-based sources and process development for their recovery. In *Minerals Engineering* 189, p. 107897. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107897.

Tembo, P. M.; Dyer, C.; Subramanian, V. (2024): Lithium-ion battery recycling—a review of the material supply and policy infrastructure. In *NPG Asia Mater* 16 (1). DOI: 10.1038/s41427-024-00562-8.

Tennet (2024): Quo Voids, Groß-Batteriespeicher? Identifikation netzdienlicher Standorte für den Betrieb von Groß-Batteriespeichern in der TenneT Regelzone. Bayreuth.

Thimet, P. J.; Mavromatidis, G. (2023): What-where-when: Investigating the role of storage for the German electricity system transition. In *Applied Energy* 351, p. 121764. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121764.

U.S. Energy Information Administration (2023): Energy storage for electricity generation. Available online at <https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/energy-storage-for-electricity-generation.php>, updated on 1/13/2025, checked on 1/13/2025.

Umweltbundesamt (2024): Mehr Strom aus erneuerbaren Energien. Available online at <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/mehr-strom-aus-erneuerbaren-energien>, updated on 2/5/2025, checked on 2/5/2025.

Verband der Elektro- und Digitalindustrie (2024): Faktenblatt. Batterien-Import 2023. Available online at [https://www.zvei.org/fileadmin/user\\_upload/Presse\\_und\\_Medien/Publikationen/2024/Juni/Faktenblaetter\\_Batteriemarkt\\_2024/Import-Batterien-Faktenblatt-2024.pdf](https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2024/Juni/Faktenblaetter_Batteriemarkt_2024/Import-Batterien-Faktenblatt-2024.pdf), checked on 1/15/2025.

WattLogic (2021): What Types of Batteries are Used in Battery Energy Storage Systems? Available online at <https://wattlogic.com/blog/types-of-battery-energy-storage-systems/>, updated on 1/16/2024, checked on 1/24/2025.

World Nuclear Association (2025): Nuclear Power in South Korea. Available online at <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/south-korea>, updated on 3/10/2025, checked on 3/10/2025.

Zheng, March (2023): The Environmental Impacts of Lithium and Cobalt Mining. In *Earth.Org*, 3/31/2023. Available online at <https://earth.org/lithium-and-cobalt-mining/>, checked on 1/24/2025.