



한·독 에너지 파트너십 팀
Energiepartnerschaft - Team
DEUTSCHLAND - KOREA

단기 유연성 제공을 위한 배터리 전기 자동차(BEV)

독일과 한국의 잠재력 개요

독일연방경제기후행동부에서 양국의 에너지 파트너십의 일환으로 위임 발행



출판정보

발행인:

한독 에너지 파트너십팀

실행 기관:

adelphi consult GmbH

Alt-Moabit 91

10559 Berlin

T +49 (30) 8900068-0

F +49 (30) 8900068-10

office@adelphi.de

www.adelphi.de

저자 :

Henri Dörr, adelphi

Roman Eric Sieler, adelphi

Daniel Meißner, adelphi

Lena Grimm, adelphi

Mervin Hummel, adelphi

지원:

한독상공회의소에 특별히 감사드립니다.

한독상공회의소의 피드백과 추가 정보를 통해 연구가 증진 및 개선되었습니다.

다음과 같이 인용:

Dörr, Henri; Sieler, Roman Eric; Meißner, Daniel; Grimm, Lena; Mervin Hummel(2023): 단기 유연성 제공을 위한 배터리 전기 자동차 - 한국과 독일의 잠재력 개요. 베를린: adelphi.

사진 출처:

© Shutterstock/Smile Fight

© Shutterstock/urbans

버전:

04/2024

모든 권리 유보.

이 출판물의 모든 사용은 adelphi consult 의 승인을 받아야 한다.

이 출판물은 다운로드 가능한 PDF 파일로만 제공됩니다.

주최



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action

실행기관



한·독 에너지 파트너십 팀
Energiepartnerschaft - Team
DEUTSCHLAND - KOREA

adelphi

**단기 유연성 제공을 위한 배터리 전기 자동차
독일과 한국의 잠재력 개요**

목차

전체 요약	7
1 서론	8
2 유연성 현황	10
2.1 유연성 옵션	10
2.2 사례: 배터리 전기 자동차(BEV)	11
3 독일의 현황	15
3.1 목표 및 정책	15
3.2 BEV의 유연성 및 수요 반응	18
4 한국의 현황	23
4.1 목표 및 정책 조치	23
4.2 BEV의 유연성 및 수요 반응	26
5 비교	31
6 결론 및 협력 가능성	33
그림 목록	35
참고문헌	37

약어 목록

BDEW	독일 에너지 및 수자원 산업 협회
BEV	배터리 전기 자동차
BMDV	독일 연방 디지털 및 교통부
BMJ	독일 연방 법무부
BMWK	독일 연방 경제 및 기후행동부
BNetzA	독일 연방 네트워크 기관
BKartA	독일 연방 카르텔 사무소
BPLE	장기 전력수급 기본계획
DR	수요 측 반응
DSO	유통 시스템 운영자
DSRA	수요 측 반응
EC	유럽 집행위원회
EEG	재생 에너지원법
EMS	에너지 관리 시스템
EP	유럽 의회
EU	유럽 연합
FCEV	연료전지 전기자동차
GEIG	독일 건물 전기 모빌리티 인프라법
IEA	국제 에너지 기구
IPP	독립 전력 생산자
IRENA	국제 재생 에너지 기구
KEPCO	한국전력공사
KOREC	한국전기규제위원회
KPX	한국전력거래소
KOTI	한국교통연구원
KOGI	한국스마트그리드사업단
MOLIT	한국 국토교통부
MOE	한국 환경부
MOTIE	한국 산업통상자원부
NLL	충전 인프라를 위한 국가 센터
NOW	독일 국가 조직 수소 및 연료 전지 기술
PHEV	플러그인 하이브리드 전기 자동차
PPA	전력 구매 계약
PtX	파워 투 엑스
SME	중소기업
ToU	사용 시간별 가격 책정
TSO	송전 시스템 운영자
V1G	스마트 충전(단방향 전력 흐름)
V2B	차량 to 건물
V2G	차량 to 계통망

V2H
VDA
VGI

차량 to 가정

독일 자동차 산업 협회

차량 계통망 통합

VKU

독일 지방 공익사업 협회

VPP

가상 발전소

전체 요약

다양한 유연성 옵션을 계획 및 관리를 통해 계통망에 통합하는 것은 비선로(non-wire) 대안으로서 큰 잠재력을 제공한다. 시스템 효율성을 높일 뿐만 아니라 전체 시스템 비용도 낮춘다. 배터리 전기 자동차(BEV)나 열 펌프와 같은 새로운 최종 사용자의 계통망 통합은 종종 우려의 이유로 언급되지만, 유연한 에너지 자원으로서는 큰 잠재력을 제공한다.

본 연구는 독일과 한국에서 유연성을 제공하기 위한 BEV의 잠재력과 현재 상태를 살펴본다. 연구의 목적은 이 주제에 대한 상태와 미래 잠재력에 대한 개요를 제공하고, 상호 학습, 모범 사례 및 잠재적인 미래 독일-한국 협력에 대한 권장 사항을 식별하는 것이다. 양국 모두 배출량을 크게 줄이는 것을 목표로 하며, 독일은 2045년까지, 한국은 2050년까지 탄소 중립을 목표로 한다. 재생 에너지와 BEV는 이러한 노력의 핵심이다. BEV는 양국의 운송 부문을 탈탄소화하는 데 핵심적이다. 독일은 2030년까지 1,500만 대의 배터리 전기 자동차(BEV) 도입을 목표로 하고 있으며, 한국은 420만 대의 BEV를 목표로 한다.

양국 모두 BEV를 계통망에 통합하고 이를 유연한 에너지 자원으로 사용하는 데 있어 비슷한 과제에 직면해 있다. 기술적 솔루션이 존재하지만, 대규모 보급을 용이하게 하기 위해 규제 프레임워크를 개발해야 한다. 또한 해당 과정에서 협력을 위한 상당한 잠재력이 존재한다.

양국 모두 BEV가 계통망 유연성과 안정성을 강화할 수 있다는 잠재력을 인식하고 있으나, 해당 이점을 완전히 실현하기 위해 포괄적인 규제 및 인센티브 시스템을 개발해야 한다. 수요 반응(DR) 프로그램과 스마트 계통망 기술은 BEV의 증가된 전기 수요를 관리하는 데 필수적이다. 독일은 스마트 미터기 도입을 촉진하고, 비-피크타임 충전에 인센티브를 제공하는 반면, 한국은 스마트 미터 인프라를 선도하고 있지만 DR 프로그램에 대한 추가적인 정책적 지원이 필요하다.

차량 계통 간(V2G) 기술의 통합은 기술적 가능성을 제시하지만 법적, 경제적 장벽을 해결하기 위한 규제 프레임워크가 필요하다. 양국 모두 V2G 기술을 발전시키기 위한 연구 및 시범 프로젝트를 진행하고 있지만, 대규모의 도입은 여전히 규제 이슈로 인해 저해되고 있다.

전반적으로 한국과 독일의 경우, 특히 소비자 인센티브 설계와 기술 요건 표준화에서 협력할 기회가 존재한다. 양국 모두 재생 에너지와 BEV를 계통망에 비용 효율적이고 지속 가능하게 통합할 수 있도록 규제 프레임워크를 계속 조정해야 한다.

협력을 위한 주요 분야는 다음과 같다.

- 규제 프레임워크: V2G 기술에 대한 포괄적인 규제 프레임워크를 수립하기 위해 경험을 공유하고 공동 전략을 개발함으로써 양국 모두에서 V2G 기술 배포를 가속화할 수 있다.
- 수요 반응 프로그램: 양국 모두 효과적인 수요 반응(DR) 프로그램을 설계하는 모범 사례를 교환함으로써 이익을 얻을 수 있다. 한국의 첨단 스마트 미터기 인프라와 독일의 선진 인센티브 시스템은 상호 보완적인 강점을 제공한다.
- 표준화 및 기술 요구 사항: 기술 장비와 통신 프로토콜을 표준화하기 위한 공동 노력을 통해 EV 통합을 간소화하고 시장 효율성을 높일 수 있다.
- 유연성 자원의 시장 통합: 집계자 및 가상 발전소(VPP)와 같은 유연한 자원을 통합하기 위해 협업하면 계통망 안정성을 개선하고 기존 발전소에 대한 의존도를 줄일 수 있다.
- 스마트 계통망 개발: 독일과 한국은 스마트 계통망 기술에 대한 통찰력을 공유할 수 있으며, 한국의 첨단 계측 인프라는 독일의 지속적인 개발에 귀중한 교훈을 제공한다.

해당 협력 분야에 집중함으로써 양국은 모두 에너지 전환을 개선하고, 재생 에너지와 전기 자동차를 전력망에 보다 비용 효율적이고 지속 가능하게 통합할 수 있다.

1 서론

각국은 저렴한 에너지 공급을 늘리고, 에너지 안보를 강화하고, 각 전력 부문에서 탄소중립 달성(net-zero)을 목표로 재생 에너지원의 가속화 설치를 추진하고 있다. 세계적인 코로나 19 팬데믹에서 후, 우크라이나에 대한 러시아의 침략 전쟁으로 인한 에너지 위기가 이어지면서, 청정 에너지원에 대한 투자가 기록적으로 증가했다 (IEA 2023f; IRENA 2023b).

재생 에너지원은 전통적인 화석 연료에 비해 장기적으로 저렴하고 깨끗한 대안을 제공한다. 그럼에도 불구하고, 계절적, 시간적 변동성, 불안정한 잉여 전력 및 낮은 발전 기간으로 인해 현재 전력 시스템에 통합하는 데에는 어려움이 따른다. 석탄 및 원자력 발전소의 부분적 폐쇄는 수요와 공급의 균형을 맞추는 문제를 더욱 복잡하게 한다. 전력망의 전반적인 강화와 가능한 경우 추가 교류 전류 및 장거리 고전압 직류 연결은 새로운 전기 시스템의 변동성을 해결하기 위한 공급 인프라 옵션을 제공한다. 특히 상호 연결된 시스템은 변동성이 큰 재생 에너지 발전의 영향을 덜 받을 것이다. 재생 에너지에서 잠재적으로 낮아지는 발전량이 다른 지역에서 수입을 통해 상쇄될 수 있기 때문이다 (IRENA 2019).

그러나 해당 옵션은 충분한 기존 계통망 인프라를 전제로 한다. 이 옵션은 높은 투자, 장기 수정 계획 프로세스가 필요하며 가까운 미래에도 여전히 제한된 송전 용량 문제에 직면하여 계통망 혼잡과 같은 문제를 처리하기 위한 추가 비용이 발생할 가능성이 있다 (acatech et al. 2021). 게다가 일부 국가는 고립된 시스템을 가지고 있으며 지정학적 문제나 지리적 제한으로 인해 상호 연결 가능성이 없다.

재생 에너지의 확대와 함께, 다양한 에너지 집약적 산업 공정, 모빌리티, 난방 및 기타 부문의 전기화가 전반적인 전기 수요를 끌어올릴 것으로 예상된다. 미래의 계통망 구축과 유연하고 통제 가능한 매장량이 미래 수요 피크에 맞춰진다면(예: 국가 또는 지역에서 배터리 전기 자동차(BEV)를 동시에 충전하는 시간), 국가와 지역은 이렇게 거의 사용되지 않는 인프라와 잠재적으로 방치된 자산에 과도한 투자를 할 위험에 직면하게 된다. 이전 사례에 따라, 하루 중 특정 시간대에 BEV를 동시에 광범위하게 충전하는 것과 일반적인 최대 전기 소비가 동시에 일어나면 미래에 가스 및 녹색 수소와 같은 비용이 많이 드는 한계 발전 단위에 대한 수요가 증가하고, 따라서 충분한 계통망 용량이 있어도 추가 시스템 비용이 발생한다 (IEA 2023d).

“IEA는 보다 가변적인 에너지원으로의 전환에서 전력 안보를 유지하려면 전력 시스템의 가변성과 부분적 불확실성을 관리하는 방법이 필요하다고 지적한다 (IEA 2023d). 유연한 에너지 자원은 계절적 변동성을 해결하는데 중요한 역할을 한다. 해당 자원은 능동적 또는 수동적 외부 신호에 대응하여 전기 소비 또는 생산을 조정할 수 있는 특성이 있으며, 해당 자원은 미래의 계통망을 균형 있게 유지하고 계통망에 재생 에너지의 비용 효율적이고 안정적인 통합을 확보하는 데 필요할 것이다.

BEV는 이러한 잠재력을 보여줄 수 있는 유망한 옵션을 제공한다. 충전 프로세스가 제어되지 않으면 전 세계적으로 전기 수요가 잠재적으로 감당하기 어려운 수준으로 더욱 증가할 것이기 때문이다. 동시에, BEV의 총 배터리 용량은 매우 유연한 에너지 저장 장치이다. BEV는 스마트 충전을 통해 유연성을 제공하는 옵션을 제공한다. 예를 들어 수요를 전환하거나 차량 계통망 간(V2G) 기술을 통해 에너지 공급이 낮은 시기에 계통망을 잠시 안정화 할 수 있다.

이러한 유형의 수요 측 유연성 옵션은 변동성이 큰 재생 에너지원의 원활한 통합을 용이하게 하는 데 큰 잠재력을 제공한다. 이는 수요 피크를 완화하는 데 도움이 될 수 있다. BEV의 경우, 이는 예를 들어 수요가 낮은 시기에 충전하는 것이 더 매력적으로 만드는 동적 가격 신호를 통해 작동할 수 있다. 낮은 가격은 종종 재생 에너지의 높은 점유율과도 관련이 있으므로, 낮은 가격으로 충전하면 잉여 재생 에너지의 원활한 통합에 도움이 된다. 동시에 BEV의 탄소 발자국을 줄이고 소비자의 비용을 절감할 수 있다. BEV는 적절한 기술, 정책 및 규정으로 적절한 인센티브를 제공하면 계통망에 귀중한 이점을 제공할 수 있다. 예를 들어 V2G 서비스는 전 세계적으로 최대 600GW의 유연성 용량을 제공하고 최대 수요 시간 동안 전기 생산 요건을 380TWh 줄일 수 있는 것으로 추산된다 (IEA 2020a).

본 연구는 독일과 한국에서 유연성을 제공하기 위한 BEV의 잠재력과 현황을 살펴본다. 양국 모두 각각 2045년과 2050년에 청정 에너지를 사용하는 에너지 시스템으로 넷제로를 달성하는 것을 목표로 한다. 동시에, 양국은 또한 미래 운송 부문에서 BEV의 높은 점유율을 목표로 하고 있으며, 혁신적인 자동차 산업을 보유하고 있다. 양국은 재생 에너지의 적절한 계통망 통합과 BEV와 같은 신규 사용자와 관련하여 비슷한

과제에 직면해 있다. 본 연구의 목적은 이 주제에 대한 상태와 미래 잠재력에 대한 개요를 제공하고, 상호 학습, 모범 사례 및 잠재적인 미래 독일-한국 협력에 대한 권장 사항을 식별하는 것이다.

다음장에서는 BEV의 특정 사용 사례에 대한 간략한 개요를 제공하고, 이어서 독일과 한국에 대한 국가 연구가 이어진다. 본 연구는 양국의 상태와 진전을 비교, 그리고 계통망 유연화와 BEV의 효율적이고 계통 친화적인 그리드 통합에 대한 연구의 전반적인 주제에 대한 독일과 한국 간의 협력 가능성에 대한 제안으로 끝을 맺는다.



2 유연성 개요

2.1 유연성 옵션

다양한 유연성 옵션을 계획 및 관리를 통해 계통망에 통합하는 것은 비선로(non-wire) 대안으로서 큰 잠재력을 제공한다. 시스템 효율성을 높일 뿐만 아니라 전체 시스템 비용을 추가로 낮춘다 (IRENA 2019). 사용에는 추가 계통망 강화가 수반되어야 한다. 그럼에도 불구하고, 특히 BEV 또는 열 펌프와 같은 최종 사용자의 새로운 수요에 의해 특히 영향을 받을 지역 배전 계통망의 확장과 관련된 비용과 규모가 줄어든다 (Agora Verkehrswende 2023). 따라서 정부는 장기 계통망 허가 프로세스와 재생 에너지의 램프업의 기존 비대칭성을 시급히 해결해야 하는 과제에 직면해 있다. IEA는 글로벌 에너지 전환을 위해 투자 부족과 병목 현상의 위험을 피하는 것이 필수적이라고 주장한다. 통합된 계획 프로세스(공급, 수요 및 유연성을 위한)를 개선해야 하며, 스마트 계통망 배포를 장려하는 적절한 보상책을 확립해야 한다 (IEA 2022b).

유연성은 다양한 유형의 자원에 의해 제공될 수 있다. 생산, 저장뿐만 아니라 수요 측면에서도 발생할 수 있다. 생산 증가를 통한 상향 공급 또는 그 반대의 소비 감소를 통한 하향 공급이 될 수 있다. 화력 발전소는 오늘날 유연하게 제어 가능한 용량의 일반적인 발전원이다 (IEA 2020b). 해당 발전소는 주로 줄지 않는 화석 연료로 가동된다. 그리고 이들은 글로벌 에너지 전환의 여파로 저탄소 및 무탄소 에너지원(예: 녹색 수소 및 그 파생물)으로 대체되어야 한다 (Sieler and Dörr 2023).

유연성은 전기 생산뿐만 아니라 나중에 사용하기 위해 잉여 전력을 소비하고 저장하는 것도 수반한다. 예를 들어, 녹색 수소와 그 파생물은 재생 가능 잉여 전력이 있는 시기에 전기 분해를 통해 생산할 수 있다. 이를 통해 계통망 통합과 재생 가능 에너지원의 효율적인 사용이 더욱 용이해져, 예를 들면, 출력 제한이 완화된다. Power-to-X 기술(PtX)은 또한 저장 난방과 같이 재생 가능 잉여 전력의 다른 사용을 수반할 수 있다 (Bloess et al. 2018). 또한 장기적 유연한 에너지 저장의 중요 개념에는 양수식 수력 발전, 대규모 또는 소규모 배터리 팩 및 압축 공기 에너지 저장과 같은 기타 기술이 포함된다 (German Energy Agency 2021; Okamura et al. 2022).

또한, 다른 많은 부문의 광범위한 전기화는 수요를 일반적으로 보다 유연한 자산으로 전환한다. BEV 및 열

펌프와 같은 다양한 최종 사용자의 점진적인 전기화는 부문 결합 애플리케이션에 유망한 잠재력을 제공한다. 스마트하고 연결된 기술과 결합하여 수요 측 반응(DSR) 조치를 통해 유연성을 제공하는 소스로 사용할 수 있다. DSR은 "[...] 모든 활성 고객이 외부 신호에 반응하고 개별적으로 그리고 집계를 통해 동적 시간 종속 방식으로 에너지 생성 및 소비를 조정할 수 있는 기능"이다 (smartEN and DNV 2022). DSR은 이미 오랫동안 적용되어 왔다. 예를 들어, 축열 히터는 소비를 늦은 시간으로 전환할 수 있다. 따라서 전기 야간 요금을 낮추는 이점이 있다. 대규모 산업용 부하 분산은 이미 사용 중인 DSR 조치의 또 다른 예이다.

그러나 스마트 기술과의 결합을 통해 DSR은 더욱 역동적이 되었고, 다양한 외부 신호에 실시간으로 반응할 수 있으며, 소규모 애플리케이션에 더욱 쉽게 사용할 수 있게 되었다. 이제 민간 BEV와 같은 소규모 자원은 잠재적으로 제어 가능한 부하로써 원격 실시간으로 액세스하기가 더 쉬워졌다. 최종 사용자의 전기화는 이러한 기술의 스마트 계통망 통합에 새로운 기회를 제공한다. 스마트 충전 전략, 에너지 저장 컨셉, 심지어 BEV용 V2G와 같은 기술을 통한 능동적 밸런싱 서비스를 기반으로 하는 부하 유연성이 그 예이다. IEA는 건물, 전기 분해 수소 생산(PtX), BEV 및 산업이 미래에 DSR 대책의 주요 잠재적 공급자가 될 것으로 생각한다 (IEA 2023d).

DSR 조치는 재생 에너지 생산량이 낮은 시기에 전기 수요를 줄이거나 심지어 없애는 데 적용할 수 있다. 반면에 재생 에너지 공급이 수요를 초과하는 시기에는 수요를 늘릴 수 있다. 동시에 DSR은 산업 및 개인 소비자가 비용을 줄이는 데 도움이 될 수 있다. DSR 조치를 통해 재생 에너지 잉여로 인해 전기 가격이 낮은 시기에 수요를 전환할 수 있다. 따라서 DSR은 일반적으로 이러한 새로운 기술의 원활한 통합에 기여할 수 있다. 동시에 재생 에너지와 부문별 탈탄소화의 비용 효율적인 통합을 용이하게 한다 (IRENA 2023b).

DSR은 주파수 조절의 몇 초에서 몇 분, 몇 시간까지 유연성을 제공할 것으로 예상되며, 특히 가상 발전소(VPP)의 일부로 다른 분산형 에너지 자원과 통합되는 경우에는 더욱 그러하다 (IEA 2023d). IEA의 다양한 시나리오에 따르면 DSR은 2050년에 전력 시스템 유연성의 약 4분의 1을 제공할 것이다. IEA의 넷제로

배출 시나리오에서 수요 반응의 기여도는 2030 년에 500GW 로 증가한다 (Emi Bertoli 2022).

화석 연료를 이용한 기존 발전에 초점을 맞춘 전력 시스템은 더 높은 공급 및 수요 측 변동성이라는 새로운 현실을 반영할 업데이트가 필요하다. 부하 이동을 위한 대규모 산업 사용자의 공급 측 유연성 및 수요 반응은 종종 현재 시스템에 이미 포함되어 있다. 특히 소규모 분산형 유연성 옵션 의 잠재력을 최대한 활용하기 위해 정부는 전체 시장 참여에 대한 적절한 인센티브와 보상에 중점을 두어야 한다 (smartEN 2022). 새로운 소규모 분산형 에너지 자원은 경쟁을 강화하고, 조달 비용을 낮추며, 시장 효율성을 개선할 수 있다. 규제 기관은 다양한 유연성 제공자에게 동등한 경쟁 환경을 보장해야 한다. 주로 대규모 공급업체를 위해 설계된 지나치게 높은 최소 입찰 규모와 소규모 자원의 집계자를 위한 명확한 참여 규칙 등 시장 참여 규칙의 개정이 이에 대한 예가 될 수 있다 (Emi Bertoli 2022; Kim 2022). 또한 모든 규모에서 DSR 의 이점을 얻기 위해 개별 소비자는 시스템에 유연성을 제공할 수 있는 가능성에 대해 장려되어야 한다. 정부는 에너지 시스템 뿐만 아니라 잠재적인 금전적 이점을 활용해 소비자에게도 DSR 을 유용한 방식으로 사용하는 방법을 홍보해야 한다 (Kim 2022).

시장 설계가 이렇게 적절한 프레임워크를 제공하도록 하는 다양한 접근 방식과 논의가 있다 (IRENA 2019; Kim 2022; IRENA 2023a). 그러나 이에 대해 더 깊이 다루는 것은 본 연구의 범위를 벗어난다. 어떤 경우든 시장 설계 시에는 많은 추가적인 국가 또는 지역별 특정 조건을 고려해야 한다. 기존 인프라 또는 상호 연결성이 그 예이며, 모든 주체에게 동일하게 적용되는 만능 솔루션은 없다.

그러나 스마트 그리드와 미터링의 구현은 필수적이다. 이는 유연성 자원과 특히 DSR 조치의 성공적인 통합을 위한 전제 조건이다. 스마트 그리드는 디지털 기술을 사용하는 전력 네트워크로, 이를 통해 전기 수송을 보다 정확하고 좋은 성능으로 모니터링 및 관리할 수 있다. 이를 통해 모든 발전원의 매칭과 최종 사용자의 다양한 요구 사항을 용이하게 할 수 있다. (IEA 2022b). IEA 에 따르면, 스마트 계통망은 시스템 운영을 가능한 한 효율적으로 실행하여 비용과 환경적 영향을 최소화하는 동시에 시스템 안정성, 회복성, 유연성 및 안정성을 극대화할 수 있도록 한다 (IEA 2022b). 송전 및 배전 계통망의 상태와 용량에 대한 실시간 정보는 해당 자원의 통합을 가능하게 한다. 또한, 다양한 유연성 에너지 자원을 대규모 또는 소규모로 활성화하거나 비활성화할 수 있는 가용성 및 가능성에 대한 정보가 필요하다.

2.2 사례: 배터리 전기 자동차(BEV)

BEV 는 특히 흥미로운 사례를 제공한다. BEV 의 광범위한 채택은 잠재적으로 감당하기 어려운 수준으로 에너지 수요를 더욱 증가시킬 것이다. 2022 년에 BEV 의 글로벌 전기 수요는 110TWh 였다. 2030 년 BEV 의 글로벌 전기 수요에 대한 추정치는 950TWh 에서 약 1,800TWh(IEA 2023) 사이, 2040 년에는 3,000TWh 에서 4,500TWh(IRENA 2023) 정도로 예측된다. 유럽의 경우 BEV 는 대부분 주간에 단기적인 유연성을 제공할 수 있다는 추정치가 있다. 스마트 충전 솔루션 또는 V2G 기술을 통해 (Agora Energiewende 2023a)2030 년에는 필요한 유연성의 약 5%, 2050 년에는 유럽에 20%를 제공할 것으로 추산된다. IEA 는 중국, 인도, 미국, EU 의 경우, 예를 들어 BEV 충전을 야간 비수요 시간대로 전환하도록 설계된 사용 시간 가격 책정(ToU)으로 인해 BEV 충전의 80%가 18:00-00:00 에 발생한다고 가정한 시나리오와 비교하여 최대 부하 증가의 60%를 피할 수 있다고 계산했다. V2G 서비스는 또한 전 세계적으로 600GW 의 유연한 용량을 제공하고 최대 수요 중에 전기 생산 요구 사항을 380TWh 줄일 수 있다 (IEA 2020a).또 다른 연구에서 IEA 는 전기 믹스에서 재생 에너지 점유율이 70%-90%를 넘는 계통망에서 BEV 가 유연성 요구 사항을 충족할 수 있는 잠재력이 21%-30%라고 추정한다 (IEA 2023d).

대부분의 배터리 시스템과 달리 자동차는 본질적으로 모빌리티가 있으며 사람이나 물건을 운송하는 것이 주요 응용 분야이다. 이로 인해 자동차가 항상 유연한 에너지 자원으로 제공되는 것은 아니다. 그러나 대부분의 자동차는 평균적인 하루 동안 적극적으로 사용되는 것보다 집이나 직장에 주차되는 경우가 더 많다. BEV 의 경우 주차 시 충전기에 연결되는 경우가 많으며, 완전히 충전하는 데 짧은 시간만 필요하다. BEV 의 배터리 용량은 일일 평균 요구 사항의 5~10 배를 초과하는 경향이 있다. (Agora Verkehrswende 2023)승용차는 95~96%의 시간 동안 주차되어 있고, 매일 10%의 시간만 적극적으로 충전되는 것으로 추정된다. BEV 사용자의 경우 출발 (Kim 2022)시 충분한 배터리 용량을 확보하는 것이 중요하며, 이는 사전에 정의될 수도 있는 매개변수이며 실제 충전 시간대가 아니다. BEV 의 유연성 잠재력을 활용하는 가장 유망한 방법은 사용 시간 가격 책정(ToU), 스마트 충전 및 V2G 기술을 통한 것이다.

ToU 가격 책정은 일반적으로 소비자에게 정적 가격 시그널을 주면서 작동한다. 골자는 일반적으로 수요가 낮은 시간대에 충전에 대한 더 낮은 가격을 제공하여 충전을 장려하는 것이다. 예를 들면, 전체 전기 수요가 낮은 야간 시간대에 충전하는 것이다. 한국에는 계절과

연결 전압 수준에 따라 차별화된 BEV 에 대한 특정 정적 (KEPCO 2023a)ToU 요금의 존재한다.

이에 반해 스마트 충전은 일반적으로 보다 적극적인 조치를 말한다. 충전 프로세스는 외부의 신호를 따른다. 계통망에서 BEV 로의 전기 흐름에 대한 단방향 제어로 V1G 라고도 한다. 외부 신호는 가격 신호, 계통망 상태 또는 전기 믹스에서 재생 에너지의 점유율일 수 있다. 또한 수요가 너무 많은 시기에는 특별 요금을 통해 가격을 높게 책정하고 수요가 적거나 공급이 과잉인 시기에는 가격이 낮게 책정하는 등 동적, 심지어 실시간(real-time) 책정이 이루어지는 체계이다. 이는 또한 맑거나 바람이 부는 날과 같이 계통망에서 재생 에너지의 점유율이 높은 시기에 발생하는 경향이 있다. 스마트 충전은 또한 가격에 관계없이 전력 시스템에서 재생 에너지의 점유율이 높은 시기에 충전에 집중하여 전기 믹스에서 배출 강도를 낮추고 BEV 의 수명 주기 탄소 발자국을 줄이는 데에도 적용될 수 있다 (Okamura et al. 2022; IRENA 2023a). 독일 송전 시스템 운영자(TSO) TenneT 은 최근 CO2 모니터를 출시하여 소비자가 독일 전기 믹스의 CO2 강도를 추적하고 그에 따라 소비를 최적화할 수 있도록 했다 (TenneT 2024).

그림 1: BEV 의 유연성으로 인한 경제적 및 시스템적 이점에 대한 예시적 추정치

출처	BEV 의 유연성으로 인한 경제적 및 시스템적 이점
유럽 집행위원회 (2019)	<ul style="list-style-type: none"> 실시간 가격 책정을 통해 전력 생산 비용을 최대 27% 절감하고 재생에너지 출력제한을 14%까지 줄일 수 있다.
IEA (2020a)	<ul style="list-style-type: none"> 사용시간대별 가격 책정(ToU)을 적용하면 최대 부하 증가를 60%까지 피할 수 있다(중국, 인도, 미국, EU). V2G 는 600GW 의 유연한 용량을 제공하고, 피크 시간대에 전기 수요를 380TWh 까지 줄일 수 있다.
IEA (2022a)	<ul style="list-style-type: none"> 캘리포니아의 최대 용량 발생을 피함으로써 약 2 억 1,000 만~6 억 6,000 만 달러를 절약할 수 있다. 통제되지 않은 충전과 비교해 스마트 충전을 사용하면 6-13GW 의 유연한 용량을 얻을 수 있다. 규정에 따라 연간 EV 1 대당 V2G 순 절감액/비용은 EUR 2,304 에서 EUR - 955 까지이다.
smartEN and DNV (2022)	<ul style="list-style-type: none"> EV 소유자는 스마트 충전 및 V2G 를 통해 2030 년에 최대 7 센트 /kWh(연간 176 유로)를 절약할 수 있다.

Agora Energiewende (2023a)	<ul style="list-style-type: none"> 전기 자동차는 유럽에 필요한 유연성의 약 5%(2030 년)에서 20%(2050 년)까지 제공할 수 있다.
Agora Verkehrswende (2023)	<ul style="list-style-type: none"> 설치된 태양광 시스템의 소비를 극대화함으로써 차량 한 대당 연간 10~45 유로를 절감할 수 있다. 전력망 확장 투자 감소로 차량 한 대당 연간 20~130 유로, 총 비용의 50%가 절감된다. 시장 지향적 유연성(동적 관세)을 활용하면 차량 한 대당 연간 20~60 유로의 경제적 이익을 얻을 수 있다. 제어 용량 제공을 통해 차량당 연간 35~75 유로의 경제적 이익이 발생한다.
IEA (2023d)	<ul style="list-style-type: none"> 전기 자동차는 재생에너지가 70~90%인 전력망에서 전반적인 단기 유연성 요구 사항의 21~30%를 제공할 수 있다.

출처: 하기 설명 출처의 설명에 근거함 Agora Energiewende (2023a), Agora Verkehrswende (2023), European Commission (2019), IEA (2020a), IEA (2022a), IEA (2023d), smartEN and DNV (2022)

스마트 충전 프로세스는 TSO 또는 배전 시스템 운영자(DSO)의 활성 신호에 대한 직접적인 반응일 수 있다. 이는 계통망의 요구에 맞게 전기 흐름을 줄이거나 특정 시간에 완전히 제한하라는 명령일 수 있다. 그러나 이러한 직접적인 간섭은 스마트 충전에 참여하려는 소비자 수용과 BEV 에 대한 전반적인 수용성을 감소시킬 위험 때문에 비판적으로 논의된다. BEV 의 최소 부하 임계값을 개별 사용자에게 보장하여, 해당 위험을 낮출 수 있다. 또 다른 옵션은 더 낮은 네트워크 요금 또는 특별 요금 도입으로 해당 DSR 프로그램 참여를 장려하는 것이다. 이를 통해 스마트 충전은 기존 배전 계통망의 보다 최적화된 사용에 기여하고, 과부하 및 전압 불안정을 방지하여 네트워크 강화의 필요성을 줄일 수 있다 (Agora Verkehrswende et al. 2019).

반면 V2G 는 양방향 전기 흐름을 허용한다. V2G 기술은 차량이 과도한 전기를 계통망으로 방전하여 TSO 를 위한 빠른 밸런싱 서비스와 같은 더 많은 계통망 기능을 가능하게 한다. 공급이 부족한 동안 BEV 는 매우 짧은 시간 내에 배터리를 충전하거나 방전하여 계통망의 에너지 흐름에 균형을 맞추는 데 도움이 될 수 있다. 또한 BEV 사용자는 배터리 용량을 마케팅할 수 있다. 평균적으로 BEV 소유자는 스마트 충전 및 V2G 절감을 통해 2030 년에 에너지 요금을 연간 최대 176 유로 절약할 수 있다 (smartEN and DNV 2022).

추가 응용 프로그램에는 차량 주택간(V2H) 및 차량 건물간(V2B)과 연결과 같은 가능성이 포함된다. 여기에는 BEV 배터리를 개별 주택 또는 전체 개인 및 산업용 건물에 대한 백업 전원 또는 저장 장치로 사용하는 것이 포함된다. 이러한 시스템은 옥상 PV와 같은 분산형 에너지원과 연결될 때 더욱 매력적으로 보일 수 있다. BEV는 저장 장치로 사용되어 방사선이 낮은 시간이나 야간에 잉여 태양열 전기를 주택이나 건물로 다시 공급할 수 있다. 에너지 관리 시스템(EMS)을 통해 BEV는 전기 가격이 낮은 시간에 충전되어 가격이 비싼 기간에 주택 소유자가 이 저렴한 전기를 사용할 수 있다. 이를 통해 소비자 및 산업 모두의 효율성을 높이고 비용을 절감할 수 있으며, 또한 개인 또는 산업용과 같은 분산형 에너지원을 최적으로 활용할 수 있다. PV 설치 (Okamura et al. 2022; IRENA 2023a).

그러나 스마트 충전 및 V2G 시스템을 도입하는 것도 어려울 수 있다. IRENA는 BEV가 계통망에 제공할 수 있는 서비스 가치와 유연성과 관련하여 사용 사례가 다르다고 지적한다. 이미 이웃 지역과의 양호한 상호 연결과 같은 다양한 유연성 발전 옵션의 점유율이 높은 시스템에서 V2G 시스템을 구현하는 데 드는 추가 비용은 다른 유연성 자원과 비교했을 때 경쟁력이 없을 수 있다 (IRENA 2023a). 또한, BEV 사용자의 다양한 모빌리티 및 충전 패턴과 기존 충전 인프라를 고려해야 한다. 공공 충전소 점유율이 높은 국가에서는 BEV가 계통망에 연결되는 시간이 가정용 충전 점유율이 높은 국가보다 짧을 가능성이 높다. 그리고 이것은 BEV가 계통망 서비스 또는 스마트 충전 전략에 사용할 수 있는 시간에 영향을 미친다.

스마트 충전의 이점을 얻으려면 계통망 용량, 전기 공급 및 다양한 최종 사용자에게 대한 정보에 액세스하고 연결해야 한다. 스마트 미터링 장치는 계통망에서 개별 충전 지점으로 신호를 수신하고 전달하여 충전

프로세스를 시작하거나 줄이는 데 중요하다. 소비자 수용을 보장하기 위해 스마트 충전 및 V2X 시스템은 지속적인 감독이나 적극적인 의사 결정이 필요하지 않고 백그라운드에서 원활하게 실행되도록 설계되어야 한다. (IRENA 2023a). 이 자동화된 처리에는 스마트하고 디지털적인 계량 및 통신 프로토콜이 필요하며, 이를 통해 계통망, 전기 자동차 공급 장비 및 BEV 간의 원활한 통신이 가능하다. 즉, BEV 사용자는 예를 들어 BEV에 대한 특정 매개변수를 설정하여 충전을 시작하거나 중지할 수 있다. 이 결정은 특정 가격 프레임, 계통망의 특정 재생 에너지 점유율 또는 피크 평활화를 위한 전체 전기 수요 증가에 따라 충전을 줄이거나 중지할 수 있다 (IRENA 2019).

이러한 프로세스를 가능하게 하려면 충전 지점에 적절한 통신 및 제어 설비가 필요하다. 특정 스마트 충전 애플리케이션과 V2G를 출시하고 사용하려면 충전 지점과 BEV가 양방향 통신을 구현할 수 있어야 하며 V2G 양방향 에너지 흐름의 경우 ISO 15118(-20) 또는 CHAdeMO 표준과 같이 양방향 충전을 포함하도록 설계된 적절한 통신 프로토콜 표준을 의무화해야 한다 (Okamura et al. 2022; Großmann and Eisele 2022).

충전 인프라와 상호 운용성을 위한 공통 통신 프로토콜과 표준은 소비자가 다양한 충전소 공급업체에 대한 접근성을 유지할 수 있게 해주므로 BEV 시장 도입에 도움이 된다. 이러한 프로토콜과 표준은 차량 모델 선택이나 전기 자동차 시스템 장비에 관계없이 BEV의 유연한 통합을 더욱 촉진할 수 있다. 예를 들어, 집과 직장에서 서로 다른 시스템을 사용하여 충전하는 경우이다. 마지막으로, 이는 전체 전력 시스템에 대한 BEV의 유연성 잠재력을 증가시킬 것이다. 공통 통신 프로토콜을 사용하여 상호 운용성을 용이하게 하면 데이터 흐름과 명령을 표준화하는 데 도움이 된다 (IEA 2022a). 따라서 본 연구에서는 정부에 이러한 상호 운용성을 의무화하거나 적어도 인센티브를 제공할 것을



제안한다. 예를 들면, 개인 또는 공공 충전소에 대한
세액 공제, 보조금 또는 입찰 지침을 통해 잠금 효과를
피하고, 즉, 외부 신호와 양방향 전기 흐름에 반응할 수
있는 충전소와 스테이션에만 보조금을 지급하는 것이다
(IRENA 2019; IEA 2022a).

3 독일의 현황

3.1 목표 및 정책

3.1.1 독일 에너지 정책의 배경

독일은 2045년까지 기후 중립을 달성하는 목표를 가지고 있다. 이를 위해서는 에너지 부문의 전환이 필수적이다. 2023년 독일은 6억 7,300만 톤의 CO₂e를 배출했고, 그 중 2억 1,000만 톤의 CO₂e가 발전 부문에서 발생했다 (Agora Energiewende 2024). 발전 부문을 전환하기 위해 독일 정부는 2030년까지 전기 공급의 80%를 재생 에너지원에서 얻고, 2035년까지는 이산화탄소 배출이 없는 전력 생산을 목표로 한다 (Bundesregierung 2023a).

우크라이나에 대한 러시아의 침략 전쟁과 에너지 시장, 공급 및 가격에 미치는 영향은 독일이 에너지 전환에 대한 목표를 키우도록 더욱 동기를 부여했다. 독일은 화석 연료로부터 더 큰 독립을 달성하고, 이에 따른 확장된 에너지 안보를 원한다. 2023년에 총 전기 소비량에서 재생 에너지의 점유율은 55%였다 (BNetzA 2024b). 전기 믹스에서 재생 에너지가 증가했음에도 불구하고 평균 시스템 중단은 최근 몇 년 동안 점차 감소하여 높은 시스템 안정성을 보여준다 (BNetzA 2022b).

3.1.2 주요 이해 관계자 및 규제 기관

규제 측면에서 이 연구 주제와 관련된 주요 부처는 연방 경제 및 기후 행동부(BMWK)와 연방 디지털 및 교통부(BMDV)이다. 계통망 확장을 담당하는 연방 기관은 독일 연방 네트워크 기관(BNetzA)이다. 해당 연방 기관은 유연한 전력 시장, 계통망 차원화 및 혼잡 관리 등을 통해 전기 시스템을 보다 유연하게 만드는 것을 목표로 한다. 나아가 BNetzA는 계통망 유연성 공급자에 대한 보상, 저장에 따른 유연성, 시장 균형, 부하 제한 또는 새로운 형태의 혼잡 관리 등을 통해 미래에 유연성에 대한 접근성을 개선하고자 한다 (BNetzA 2017, 2024c).

국가 수소 및 연료 전지 기술 기구(NOW)는 지속 가능한 모빌리티를 강화하는 프로젝트를 담당하며, 계통망 유연화 맥락에서 중요한 역할을 한다. NOW는 충전 인프라 확장을 포함해 BEV를 기존 전력 시스템에 통합하는 것을 촉진한다. 이 노력은 NOW의 감독 하에 운영되는 국가 충전 인프라 센터(NLL)의 지원을 받는다. NLL은 독일에서 충전 인프라를 더욱 확장하기 위한 활동을 조정하는 역할을 한다 (NOW GmbH 2021; NLL 2024b). 또한 NLL은 BEV의 계통망 통합 지원, 충전 인프라 계획, 구현 및

자금 조달 등을 통해 독일에서 V2G를 촉진한다. NOW는 또한 V2G 기술 개발을 위한 프로젝트에 직접 자금을 지원한다 (NOW GmbH 2023b).

또 다른 중요한 참여자는 독일 TSO 및 DSO이다. 4개의 독일 TSO는 TenneT, 50Hertz, Amprion 및 TransnetBW이다. 이들은 독일의 고전압 전력선의 건설, 운영 및 유지 관리와 시스템 안정성 유지를 담당한다 (BNetzA 2024d). DSO는 DSR 조치를 통해 전력망을 보다 유연하게 만드는 중요한 역할을 한다. 2023년 독일에는 주로 지방 자치 단체 또는 민간 에너지 회사인 866개의 DSO가 있었다 (Statista 2023). DSO는 지역 에너지 공급을 수요에 맞게 조정하고 소비자가 전력망에 액세스할 수 있도록 한다. 분산형 발전 장치(예: 옥상 PV 시스템)와 새로운 소비자(예: BEV 충전소, 열 펌프)를 연결하므로, 제어된 전력망 통합에 관심을 갖고 있다. DSO의 다른 업무로는 피크 부하 및 네트워크 혼잡 관리가 있다 (Reppert 2023). 또한 모든 시장 참여자, 즉 전기 소비자 및 생산자, 특히 대규모 전기를 소비하고 생성하는 사람은 전력망의 유연성에 관련된 이해 관계자이다.

3.1.3 모빌리티 부문의 전기화

운송 부문은 2023년 독일 GHG 배출량의 약 22%를 차지했다. 약 146Mt. CO₂e가 배출되었으며, 도로 운송이 가장 큰 배출원 중 하나였다. 전년 대비 배출량이 전반적으로 감소했음에도 불구하고 2023년 133Mt. CO₂e의 부문 목표는 달성되지 않았다 (UBA 2024). 도로 운송의 전기화는 이 부문의 배출량을 줄이는 핵심 기동 중 하나이다.

BEV 현황 및 목표

2021년 연합 협정에서 독일 정부는 2030년까지 1,500만 대의 완전 전기 승용차 운용 목표를 발표했다 (Bundesregierung 2022b). 2023년 말 기준 독일의 BEV 차량은 140만 대가 조금 넘으며, 월 평균 43,684대가 신규로 등록된다 (KBA 2024). 2030년 목표를 달성하려면 월 평균 145,000대의 BEV가 증가해야 한다. 또한 현재 독일 도로에는 약 900,000대의 플러그인 하이브리드(PHEV)가 다닌다 (NOW GmbH 2023a). 독일 자동차 제조업체를 대상으로 실시한 조사에 따르면 NLL은 2030년까지 정부 목표에 가까운 약 1,340만 대의 BEV와 추가로 320만 대의 PHEV가 도입될 것을 예상한다 (NOW GmbH 2024). 다른 연구에서는 독일의 BEV 차량이

800 만~1,700 만 대, PHEV 가 300 만~800 만 대가 될 것으로 추정한다 (Gnann et al. 2022; German Institute for Economic Research 2023).

BEV 시장 확대를 장려하기 위해 독일 정부는 2016 년에 보조금 제도를 도입했다. 2023 년 말까지 약 210 만 대의 BEV 에 BEV 당 최대 4,500 유로의 보조금이 지급되어 총액이 약 100 억 유로에 달했다 (Clean Energy Wire 2023). 이 보조금 프로그램은 성공적인 것으로 간주되며, 덕분에 독일에서 BEV 시장이 활성화되었다. 또한 정부 보조금 없이는 2030 년 목표를 달성하지 못할 수 있다는 우려가 있다 (ADAC 2024). 보조금 제도가 종료되더라도 새로 등록된 BEV 는 2030 년까지 독일 국가 자동차세가 면제되며, 공공 및 민간 충전소에 대한 추가 자금 지원이 제공된다 (Finanztip 2024).

독일의 노력은 초국가적 수준에서의 정책 개발과 더욱 밀접하게 연관되어 있다. 유럽 연합(EU)은 2022 년 10 월에 2035 년까지 EU 에서 새로 등록된 모든 승용차가 무공해 차량이어야 한다고 결정했다 (European Commission 2022). 그리고 2030 년부터는 다음의 새로운 기준이 적용될 예정이다. 신차의 평균 배출량은 55%, 승합차의 경우 50% 감소해야 한다. 완전 전기 및 연료 전지 차량 외에도 무공해 차량에는 재생 가능 에너지원에서 생산된 e-연료를 기반으로 하는 내연 기관으로 구동할 수 있는 차량도 포함된다. 그럼에도 불구하고 초점은 BEV 에 맞춰져 있다. REPowerEU 의제에 따른 목표는 2030 년까지 운송 부문에서 재생 에너지의 점유율이 32%가 되어야 함을 의미한다. (2023e) 그러나 IEA 는 EU 가 현재 목표 달성 경로에 있지 않다고 주장한다. IEA 는 2027 년까지 16~20%의 점유율이 현실적이라고 보고 있으며, 이는 더 이상 원대한 목표의 정책 조치가 시행되지 않는다면 2030 년까지 달성해야 할 목표의 절반만 달성하게 되는 것을 의미한다.

충전 인프라 현황 및 목표

전기 모빌리티 도입에 중요한 것은 충전소의 밀집된 네트워크를 동시에 확장하는 것이다. 독일 정부는 2030 년까지 100 만 개의 공공 및 차별 없이 접근 가능한 충전소 건설을 목표로 설정했으며, 특히 고속 충전 인프라에 중점을 두고 있다. 충전 인프라 마스터 플랜 II 는 이를 위한 전반적인 정책적 전략이다 (Bundesregierung 2022a). 마스터 플랜은 "충전 인프라 2030" 미션의 맥락에서 충전 인프라를 전력 시스템에 통합하는 것을 핵심 과제 중 하나로 식별한다. 효율적이고 미래 지향적인 통합은 마스터 플랜에 명시된 전력망과 충전 인프라 간 상호 작용의 잠재력을 활용하는데 필수적인 목표이자 전제 조건이다. 타 조치와 더불어, 마스터플랜의 목표는 계통망 계획 및 확장에서 처음부터

양방향 충전을 가능하게 하고 고려하는 것이다 (Bundesregierung 2022a).

BNetzA 충전소 등록 리스트에는 2024 년 2 월 현재 운영 중인 일반 공공 충전소 89,106 개와 급속 공공 충전소 17,800 개가 포함되어 있다. 총 4.65GW 의 충전 전력을 충전 지점에서 동시에 제공할 수 있다 (NLL 2024c). 그러나 많은 BEV 소유자가 집이나 직장에서 충전하는 것을 선호하여 공공 충전 지점에 대한 전반적인 필요성이 줄어들 것으로 추정된다 (Sorge and Raymunt 2023). NLL 은 2030 년 접근 가능한 공공 충전 인프라에 대한 실제 수요를 440,000~843,000 개의 충전 포인트로 추산한다. 이 수치는 사용 가능한 개인 충전 인프라의 양과 공공 접근 가능한 충전 인프라의 사용 빈도뿐만 아니라 사용자의 충전 행동에 따라 달라진다. 개인 충전의 점유율은 2030 년까지 76~88%에 도달할 것으로 예상된다. 2030 년에는 개인 주차 공간의 약 61%에서 충전기를 사용할 수 있을 것이다 (Windt and Arnhold 2020).

충전 인프라 전체에 대한 자금 지원 측면에서 독일 정부에서 자금을 지원한 약 80 만 개의 충전 포인트가 운영 중이고 2023 년 기준 약 20 만 개가 계획 단계에 있다 (NLL 2023a). 지금까지 배치된 총 자금은 약 17 억 4 천만 유로이다. 5 억 유로 규모의 접근 가능한 공공 충전 인프라에 대한 자금 지원 프로그램은 2025 년 말까지 운영될 예정이다 (NLL 2023b). 해당 자금 지원 가이드라인은 (BMDV 2021)충전소 및 계통망 연결당 최대 자금 지원 금액을 정량화하고, 기술적 요구 사항, 충전 인프라 운영, 재생 가능 에너지원의 전기 사용, 접근성, 라벨링 및 보고를 포함한 충전 인프라에 대한 요구 사항을 정의하고 있다. 무엇보다도 개방형 커뮤니케이션 표준(예: OCPP), 온라인 연결 및 원격 기능은 기술적인 측면의 필요 사항이다.

충전 인프라와 관련하여 EU 는 대체 연료 인프라(AFIR) 배치 규정의 일부로 구속력 있는 목표를 채택했다 (European Council 2023; European Parliament 2023). 등록된 BEV 하나당 EU 회원국은 1.3kW 의 공개적으로 접근 가능한 충전 인프라를 제공해야 한다 (European Council and European Parliament 2023). 2030 년까지 1,500 만 대의 BEV 를 목표로 하는 독일의 경우, 이는 1,950 만 GW 의 의무 충전 용량에 해당한다. 또한 2019 년 Green Deal 에서 EU 는 2025 년까지 공개적으로 접근 가능한 충전 포인트 100 만 개를 목표로 설정했으며, 지속 가능하고 스마트한 모빌리티 전략에서 2030 년까지 300 만 개의 공공 충전소가 필요하다고 밝혔다 (European Council 2023).

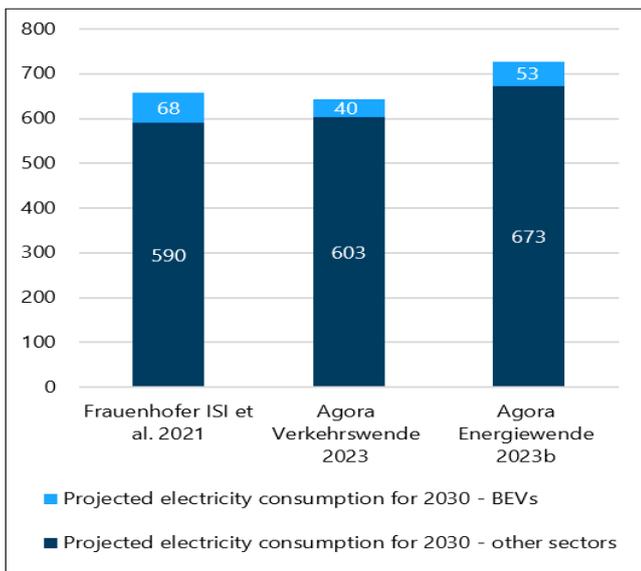
건물과 관련된 에너지 문제를 규제하기 위한 EU 의 입법 프레임워크는 건물 에너지 성능 지침(EPBD)이다. 이

지침은 또한 적절한 건물 정책을 통해 전기 모빌리티를 촉진하는 것을 목표로 한다. EU 지침은 건물 전기 모빌리티 인프라법(GEIG)을 통해 독일 법률에 구현된다 (BMJ 2021). GEIG는 5개 이상의 주차 공간이 있는 신축 주거용 건물에서 각 주차 공간에 전기 모빌리티를 위한 케이블 인프라를 갖추어야 할 것을 요구한다. 6개 이상의 주차 공간이 있는 신축 비주거용 건물의 경우 최소 3분의 1의 주차 공간에 케이블 인프라를 갖추어야 하고 충전기를 설치해야 한다. 대대적인 리노베이션 계획의 경우 기존 건물에 대한 유사한 규정이 있다. 20개 이상의 주차 공간이 있는 기존 비주거용 건물의 경우 2025년 1월 1일부터 충전기를 설치해야 한다. (BMW 2021).

BEV의 현재 및 예상 전기 소비량

독일의 총 전기 소비량은 2020년 556TWh, 2021년 569TWh, 2022년 551TWh, 2023년 529TWh였다 (UBA 2023). 코로나 팬데믹으로 인한 감소는 2020년에 특히 두드러졌다. 우크라이나에 대한 러시아의 침략 전쟁으로 인한 영향은 2022년 수치가 낮은 이유 중 하나이다. 2030년 총 전기 소비량은 655TWh(± 10TWh)로 추산된다 (Fraunhofer ISI et al. 2021). 현재 독일에 등록된 BEV의 연간 전기 소비량은 약 2TWh로 전체 전기 소비량의 1% 미만이다 (Agora Verkehrswende 2023). 그림 2는 BEV의 예상 총 전기 소비량에 대한 다양한 연구 결과를 보여준다.

그림 2: 2030년 독일의 총 수요 중 BEV의 예상 총 전기 소비량(TWh)



출처: 다음에 기반한 자체 설명 Fraunhofer ISI et al. (2021), Agora Verkehrswende (2023), Agora Energiewende (2023b)

예상되는 추가 전기 소비는 산업, 난방 및 운송 부문을 포함한 부문 간 결합 증가로 인한 것이다. 운송 부문의 추가 소비는 68TWh로 특히 상당하며, 이는 주로 BEV 사용(추정 총 전기 수요의 약 10%)에서 나온다. 이

추정에서는 2030년까지 1,600만 대의 BEV와 220만 대의 플러그인 하이브리드(PHEV)를 가정한다. 다른 연구에서는 2030년까지 총 전기 소비량이 726TWh가 될 것으로 계산하며, 이 중 53TWh가 중대형화물 운송을 제외한 전기 모빌리티에서 나온다 (Agora Energiewende 2023b). 싱크 탱크 Agora Verkehrswende는 (2023) 1,500만 대의 BEV에 대한 연간 전기 수요가 40TWh가 될 것으로 예측하며, 이는 2030년 예상 총 전기 소비량(643TWh)의 약 6%에 해당한다. 그림 3은 독일의 기후 중립성, 재생 에너지 확대, BEV 및 관련 충전 인프라에 대한 주요 정책 목표와 현황을 담아 본 장의 내용을 요약한 것이다.

그림 3: 독일의 BEV에 대한 주요 목표 및 현재 수치

주제	수치/목표
에너지 및 기후 관련 수치	
기후 중립 목표	2045년까지
현재 전력 생산에서 재생에너지의 점유율	55% (2023)
전력 생산에서 재생에너지의 목표 점유율	80% (2030)
현재 전기 수요	549TWh(2022)
예상 전력 수요	655 TWh - 726(2030)
BEV 관련 수치	
현재 BEV 전기 수요	2TWh(2021년)
예상 BEV 전기 수요	40-68TWh(2030)
현재 BEV 수	1.4m(2023)
BEV 목표 대수	15m (2030)
현재 공공 충전소 수	약 90,000 개(2023년)
공공 충전소 목표 수	1m (2030)

출처: 다음에 기반한 자체 설명 BReg (2023a), UBA (2023), Fraunhofer ISI 등. (2021), Agora Energiewende (2023b), DIW (2023), BReg (2022b), BNetzA (2023d), BReg (2023b), BNetzA (2022a), BMW (2023a), EC(2020)

3.1.4 스마트 계통망 도입

재생 에너지의 계통망 통합, 전기의 장거리 수송, 유럽 전력 시장의 상호 연결성 증가를 달성하기 위해서는 향후 몇 년 안에 독일의 배전 및 송전 계통망을 확장해야 한다 (BNetzA 2023f). 특히 북-남 연결의 확장은 독일 북부의 해상 및 육상 풍력 발전소에서 남부 독일의 산업 중심지로 재생 전기를 수송하는 데 있어 매우 중요하다 (BNetzA 2024d).

DSO의 네트워크 상태 및 네트워크 확장 계획 대한 연례 조사에 따르면, 향후 10년간 예상되는 계통망 확장 수요는 422억 7천만 유로이다 (BNetzA 2023b). 2045년을 전망하는 2037년 전기 네트워크 개발 계획(ENDP)은 장거리 송전망에 대한 네트워크 계획을 담당하며, 해당 계획에는 특히 재생 에너지의 신규 및 미래 용량 통합과 계통망을 미래에 적합하게 만드는 혁신이 포함된다.

4 개의 독일 TSO 는 2 년마다 계획을 수립하며, 이후 BNetzA 로부터 초고압 네트워크를 최적화, 강화 및 확장하기 위해 제안된 조치에 대한 승인을 받아야 한다. 현재 계획에는 약 4,800km 의 신규 회선을 건설하고 약 2,500km 의 기존 회선을 강화하는 것이 포함된다 (50Hertz Transmission et al. 2023; BNetzA 2024a).

계통망은 확장 되어야 할 뿐만 아니라 더욱 스마트하고 유연해야 한다. 스마트 미터링 기술은 미래 전력 공급 규제에서 중요한 역할을 할 것이다. 이를 통해 전기 소비 또는 공급(feed-in)을 보다 효율적으로 제어할 수 있다. 또한 소비자는 자신의 소비량을 보다 쉽게 모니터링할 수 있고, 계통망 운영자는 계통망 활용도를 더 잘 관찰할 수 있다. 2016 년 독일 에너지 전환 디지털화법은 스마트 미터의 일반적인 도입에 초점을 맞추었다. 그러나 스마트 미터 배포를 충분히 가속화하는 데는 성공하지 못했다. 필요한 기술과 기술 공급자의 표준화 및 인증 프로세스에 초점이 맞춰졌기 때문이다. 부분적으로 누락되고 불분명한 기술 규정으로 인해 이후 실제 스마트 미터 출시가 지연되었다 (EY 2020).

따라서 2023 년 4 월 독일은 에너지 전환의 디지털화를 재개하기 위한 법안을 채택했다. 이 법안에는 두 가지 주요 목적이 있다. 스마트 미터링 기술의 설치가 비효율적이지 않게 만들고, 계획된 출시를 가속화하는 것이다. 스마트 미터 출시를 위한 입법 로드맵은 3 단계로 도입을 설명하고 있다 (BMWK 2023a).

- 연간 최대 100,000kWh 의 소비자와 최대 25kW 의 설치 용량의 발전기를 대상으로 민첩한 자발적 출시 즉시 시작
- 2025 년부터 6,000~100,000kWh 의 소비자와 7~100kW 의 설치 용량의 발전기에 대한 의무적 도입 시작. 이 카테고리의 경우 2025 년 말까지 최소 20%, 2028 년 말까지 최소 50%, 2030 년 말까지 최소 95%의 목표가 설정되었다.
- 마지막으로, 2028 년부터 연간 100,000kWh 이상의 소비자와 설치 용량이 100kW 를 넘는 발전기에 대한 의무적 도입이 필요하다. 이 카테고리의 경우 2028 년 말까지 최소 20%, 2030 년 말까지 최소 50%, 2032 년 말까지 최소 95%를 목표로 한다.

약 520 만 명의 최종 사용자가 의무 도입의 영향을 받는다 (BNetzA and BKartA 2023). 주로 개인 가구인 소규모 소비자의 경우 연간 6,000kWh 미만이고 설치 용량이 1~7kW 인 소규모 발전기의 경우, 의무사항이 없다. 해당 소비자는 예를 들어 미래에 동적 전기 요금을 사용하려는 경우 스마트 미터기를 선택할 수 있다 (Statistisches Bundesamt 2022). 현재 전기 공급 및 소비에 따른 동적 전기 요금은 늦어도 2025 년부터 전기 공급업체에서 제공해야 한다. 그러면 소비자는 수요에 비해 공급이

많은 저렴한 시간 동안 전기를 소비하여 이익을 얻을 수 있다. 독일에는 이미 이런 옵션이 몇 가지 있지만 스마트 미터가 더 널리 설치되면, 더 매력적이게 될 것으로 간주된다 (Geißler 2023).

EU 수준에서 스마트 계통망의 활용은 세 가지 우선순위 중 하나이며, 세 개의 우선순위는 다음과 같다. 스마트 전기 계통망 배치, 스마트 가스 계통망, 유럽 에너지 네트워크(TEN-E) 규정에 따른 국경 간 이산화탄소 네트워크이다 (European Commission 2023a, 2023b). 통합된 유럽 수준의 전력망을 고려하면, 유연성을 추가적으로 봐야한다. 국가 간 전력망의 스마트한 상호 연결은 재생 에너지의 피크와 변동을 균형 있게 조절할 수 있다. 유럽 전역의 서로 다른 기상 패턴은 지리적 평활화 효과를 낼 수 있다. 유럽 전력 시장의 통합 증가는 계통망 부하가 낮은 지역으로의 수출을 통해 태양열 및 풍력 에너지 공급이 많은 시기에 저장 솔루션의 필요성과 재생 에너지의 출력 제한을 10 배까지 줄일 수 있는 잠재력이 있는 것으로 추산된다 (Agora Energiewende 2015).

3.2 BEV 의 유연성 및 수요 반응

3.2.1 공급측 계통망 혼잡 관리

공급 측면에서 독일은 계통망 내 공급과 수요의 균형을 맞추기 위해 광범위한 조치를 적용하고 있다. 재배치는 기존 발전 시설의 전력 출력을 조정하는 것을 말한다. 이 조정은 일반적으로 더 빠른 주파수 억제 및 기타 복구 조치에 비해 분 또는 시간의 시간 단위로 진행되며 비교적 느리다. 독일에서 재배치는 여전히 대부분 가스 또는 석탄인 기존 발전소를 사용하여 이루어진다. 2022 년에 사용된 재배치 전체 양은 약 2,837,000 유로의 비용으로 29.5GWh 였다.(BNetzA and BKartA 2023).

독일에서 재생 에너지원의 적극적 출력 제한은 최후의 수단이다. 재생 에너지원은 일반적으로 우선시된다(재생 에너지법 2023 년 11 조). 그러나 계통망의 용량이 부족하고 비재생 에너지 발전소가 이미 출력이 제한된 경우, 특정 상황에서 제한될 수 있다. 2021 년에 출력제한은 전체 전력 조정량 8,071GW 를 차지했으며, 이는 전년 대비 약 2.2GW 증가한 것이다. 재생 에너지 출력 제한은 현재 전체 출력 제한의 73%를 차지하고 있음에도 시간이 지남에 따라 TSO 와는 관련성이 낮아지고 있지만, DSO 에 대한 중요성이 커지고 있다 (BNetzA and BKartA 2023).

또한 독일은 통합된 유럽 전력 시스템 덕분에 기존의 유럽 상호 연결과 국경 간 거래의 혜택을 받는다. 유럽 시스템에서 전기는 가장 싼 곳에서 생산된다. 따라서 전기의 공동 내부 시장은 계통망 안정성과 저렴한 전기

가격을 지원한다. 전반적으로 독일은 2023 년에 96.3TWh(수입 54.1TWh, 수출 42.4TWh)를 거래했다 (BNetzA 2024b). 2003 년부터 2022 년까지 독일은 전기 순수출국이였다 (Statista 2024b). 따라서 독일은 타 지역의 낮은 전기 가격의 혜택을 종종 받았지만, 다른 지역에는 저렴한 재생 에너지도 제공하기도 했다.

3.2.2 수요 측 계통망 혼잡 관리

에너지 저장

독일에서 에너지 저장의 중요성이 증가하고 있다. 재배치보다 중요성이 낮긴하지만, 출력 제한보다 더 많은 유연성을 제공한다. 이 중요성으로 인해 에너지 저장의 경우, 특정 연방 규정을 충족하는 경우 계통망 요금을 낮추거나, 계통망 요금을 완전히 면제받을 수 있다. 또한 개별 시설에 대해 개별 계통망 요금 또는 추가 할인에 대해 협상할 수 있다. 이러한 할인 외에도 DSO 는 전기 계통망 요금 규정(StromNEV) 의 § 18 (BNetzA and BKartA 2022)에 따라 2023 년 1 월 1 일 이전에 운영되는 저장 시설 운영자에게 회피 네트워크 요금을 재배치한다. 그리고 저장 시설은 등록해야 한다. 2023 년에는 비펌프 저장 시설의 전력 출력이 7GW, 펌프 저장이 6GW, 독일 외부에 3.6GW 가 추가되어 독일 계통망에 연결되었다. 2022 년에는 총 약 9.2TWh 의 전기를 제공했다 (BMWK 2023b).

에너지 제어

제어 에너지는 더 단기적이며 전반적인 수요 및 공급 관리와 대조적으로 계통망 주파수의 단기 편차를 균형 있게 조절하도록 설계되었다. 제어 에너지는 일반적으로 시장에서 거래되며, 발전소 운영자와 산업 소비자 모두 입찰에 참여할 수 있다. 제어 에너지는 주파수 억제 예비분 (시작까지 30 초), 자동 활성화가 있는 주파수 복구 예비분 (5 분), 수동 활성화가 있는 주파수 복구 예비분 (7.5 분)의 세 가지 유형으로 구분된다 (BNetzA 2023g). 제어 에너지의 규모는 재배치 또는 출력 제한보다 훨씬 낮으며 2021 년에는 100MW(자동 활성화) 및 200MW(수동 활성화) 규모였다 (BNetzA and BKartA 2022). 제어 에너지는 여전히 기존 에너지 사업자가 주도하고 있지만 독일은 시장에서 재생 에너지 부문의 참여를 개선하고자 한다.

부하 관리

부하 관리의 상당 부분은 업계에서 수행하며, 2019 년에는 약 75TWh 가 부하 관리되었으며, 주로 네트워크 요금을 줄이거나 전기 가격에 따라 전기 소비를 최적화하기 위한 것이었다 (German Energy Agency 2021). 이는 대부분 네트워크 운영자가 적극적으로 관리하지 않지만, 에너지

계통망 요금 규정에 정의된 다양한 잠재적 비용 절감에 대한 대응이다. (StromNEV). 또한, 요구 사항을 충족하는 대규모 산업 소비자는 제어 에너지 시장에 참여할 수 있으며, 이는 부하를 관리하기 위한 추가 인센티브를 제공한다. 주거용 수요 반응 방법으로서의 부하 전환은 1950 년대부터 독일에서 사용되었다. 열 저장 히터는 밤에 전기 요금이 낮아지고 낮에 열을 방출했다. 그러나 저장 히터는 상대적인 비효율성과 전기 비용 상승으로 인해 점점 더 인기가 없어졌다 (German Energy Agency 2021). 최근 몇 년 동안 열 펌프의 중요성이 높아졌으며, 이제 주거용 부하 전환 장치의 상당 부분을 차지하고 있다.

에너지 산업법(EnWG) 제 14 조 a 항은 계통망 지향 부하 관리에 대한 규제 프레임워크를 명시하고 있으며, 특히 BEV 충전소와 같은 제어 가능한 소비자 기기에 대해 명시하고 있다. 2023 년 개정 이전에 계통망 운영자는 합의에 따라 고객의 유연성 자원을 사용할 수 있었다. 전반적으로 2022 년에 807 개 계통망 운영자 중 675 개가 이를 사용했으며 1,813,007 개 기기를 포함했다. 그 중에는 저장 히터가 60%, 열 펌프가 37%, BEV 가 1%를 차지했다 (BNetzA and BKartA 2022). DSO 에 유연성을 제공하기로 합의하면 계통망 사용료가 평균 약 57% 감소했으며 회사에 따라 큰 차이가 있었다. 그러나 참여 히터의 약 1%만이 최신 원격 제어 기술을 사용했고 55%는 기존 리플 제어를 사용했으며 약 1/3 은 타이머로만 제어했다. 자동차의 경우 약 40%는 전혀 제어할 수 없었지만 유연성 제공에 대한 할인 혜택을 받았다 (The Mobility House 2022). 각 충전 사업자가 이러한 계약을 제공할지 여부와 방법을 선택함에 있어 통일된 접근 방식이 부족하다는 점이 이 규정의 영향력이 낮은 이유일 수 있다.

많은 새로운 소비자, 주로 열펌프와 BEV 를 통합한 계통망을 준비하기 위해 BNetzA 는 제 14a 조를 추가로 개발했다. 이 규정은 계통망 운영자와 소비자가 계통망 요금을 낮추는 대가로 계통망 지향적 부하 제어에 대한 계약을 체결하도록 의무화한다. 독일에서 해당 요금은 주거 소비자의 전체 전기 비용의 약 20%에 해당한다. 따라서 계통망 요금을 통한 전기 비용 절감 범위는 제한적이지만 여전히 관련성이 존재한다. 14a 의 개정 규정은 2023 년 11 월에 발표되어 2024 년 1 월 1 일에 발효되었다 (BNetzA 2023a). 이 규정은 독일에서 스마트 충전 조치를 미래에 구현하는 데 필수적인 것으로 간주된다. 그러나 잠재적인 부하 분산에 대한 논의와 소비자가 BEV 를 충전하거나 열펌프로 집을 난방할 수 없다는 두려움으로 인해 논란이 되는 논의가 촉발되어 두 차례의 협의가 이루어졌다. 이는 스마트 충전 구현에 대한 논의에서 시스템과 소비자 관점을 모두 고려하는

것의 중요성을 강조한다. 그렇지 않으면 BEV 나 열 펌프의 배치 목표가 위험에 처할 수 있다.

새로운 규정은 2023년 12월 31일 이후에 설치된 4.2kW 이상인 규제된 제어 가능 부하(개인 BEV 충전소, 히트 펌프, 냉각 및 전기 저장)의 소유자와 계통망 운영자 모두에 대한 부하 제어 계약 참여를 의무화한다. 그러나 부하 감소는 계통망 안정성 또는 보안에 대한 위협의 맥락에서 객관적으로 필요한 경우에만 합법적이다. 또한 이렇게 감소시킬 경우에도 최소 4.2kW 가 제공되어야 한다. 따라서 이를 부하 디밍(load dimming)이라고 한다 (BNetzA 2023c). 이 조치는 소비자가 완전히 차단될 수 있다는 걱정을 해소해준다. 게다가, 신규 규정은 새로운 소비 단위의 연결을 가속화하는 것을 목표로 한다. 계통망 운영자가 이제 지역 계통망의 잠재적인 과부하에 대한 우려를 이유로 새로운 월박스 및 열 펌프 (Christian Schaudwet 11/28/2023)의 설치를 거부하거나 연기하는 것이 금지되었다.

소비자를 보상하기 위해, 신규 규정은 현장에서의 다양한 상황을 고려한 모듈식 접근 방식을 도입한다. 이는 독일 전역의 다양한 수준의 계통망 요금을 고려하고 생산자와 소비자 사이의 중개자로서 전기 공급업체의 투명성을 보장하는 데 중점을 둔다. 그리고 세 가지 보상 옵션이 제공되며, 제어 가능한 부하를 가진 소비자는 이 중에서 선택할 수 있다. 첫 번째는 네트워크 운영자에 따라 네트워크 요금에 대한 일반 할인으로, 네트워크 지역에 따라 110-190 유로(총액) 사이로 분포되어 있다. 이는 평균 BEV의 연간 소비에 대해 지불해야 하는 네트워크 요금의 50-95%로 추산된다. 제어 가능한 부하에 대한 별도 측정 지점에 따라 달라지는 두 번째 옵션은 제어 가능한 장치에 대한 계통망 요금의 60%를 줄이는 것이다. 그러나 다른 비용은 이 규정에 영향을 받지 않는다. 세 번째 옵션은 2025년부터 제공될 예정이다. 이는 하루 중 다른 시간대에 대해 다른 가격 수준의 시간 가변 계통망 요금을 도입하고, 고객이 수요가 낮은 시간대로 소비를 전환하도록 유도하는 것을 목표로 한다. 옵션 3은 옵션 1과 함께만 제공되며 BEV를 보유한 고객에게 특별한 관심을 유발할 것으로 예상된다 (BNetzA 2023e). 운영자는 자신의 필요에 따라 수준을 설계할 수 있으며 소비자는 해당 제안을 받아들일지 여부를 자유롭게 선택할 수 있다. 모든 할인은 전력 공급업체를 통해 투명하게 전달되어야 하며, 전력 공급업체는 청구서에 계통망 요금 할인을 명확하게 명시해야 한다.

새로운 규정에 대한 반응은 대체로 긍정적이었다. 업계는 스마트 미터기 설치 증가와 같은 수반되는 요구 사항을 강조했다. 다른 사람들은 계통망 운영자가 저전압 계통망의 상태를 제어하고 더 잘 모니터링하는 데 있어 기술적 어려움이 있다고 언급했다 (Gabel 2023). 독일

자동차 산업 협회(VDA)는 특히 시간변동 계통망 요금 도입에 대한 지지를 표명하면서 이러한 예방 조치가 우선순위가 되어야 한다고 강조했다. 부하 감소는 전기 모빌리티의 매력력이 감소하는 것을 방지하기 위해 비상 상황에만 국한되어야 한다 (VDA 2023). 산업 협회 BDEW는 해당 규정 도입을 환영했고, 임계값을 포함하면 가구가 여전히 충분한 전기를 공급받고, 속도가 느려지긴 하지만 EV를 충전할 수 있을 것이라고 강조했다. (BDEW 2023).

위에서 언급한 전력망 요금 인하 및 개별 가구의 수요 반응과 관련된 개발 외에도 현재 독일 전력 시장을 개혁하고 새로운 발전소 전략을 수립하려는 노력이 진행 중이며, 이는 첫 번째 프레임워크 초안에서 독일의 미래 발전소와 관련 전략(예: 수소 발전소를 백업으로 사용)을 개략적으로 설명했다 (BMW 2024). 이러한 토론의 일환으로 독일 정부는 "플랫폼 기후 중립 전기 시스템"(Plattform Klimaneutrales Stromsystem, PKNS)을 시작하여 전력 시장 개혁에 대한 제안을 개발하도록 하였다 (Hermann et al. 2023). 이러한 맥락에서 독일 재생 에너지 연합(BEE)은 BEV와 같은 분산형 수요 반응 조치를 통한 유연성이 백업 발전소의 필요성을 줄이는 실행 가능하고 비용 효율적인 옵션이 될 수 있다고 강조했다며, 화석 연료 고정 효과(lock-in)을 피하기 위해 유연성에 대한 집중을 강화할 것을 촉구했다 (BEE 2023). 또한 업계 관계자에 따르면 해당 단계에서 유연성 제공자에게 보상하는 전력 시장의 가격 시그널이 추가로 필요할 수 있다. (Becker 2023; ContextCrew Neue Energy GmbH 2023). 그림 4는 스마트 충전 전략과 V2G 구현 모두에서 독일의 BEV에서 유연성의 잠재력을 더욱 강조하고 경제적 및 시스템적 이점을 일부 강조한다.

그림 4: 독일의 BEV의 유연성으로 인한 경제적 및 시스템적 이점 추정치

출처	경제적 및 시스템적 이점 추정
Agora Energiewende (2023b)	<ul style="list-style-type: none"> 2035년 독일의 순 용량은 28GW에 달할 것으로 예상되는데, 이는 모든 BEV의 25%(2035년 총 2,830만 대 예상)가 V2G를 사용하고 이 중 40%가 실제로 전력 시장에 용량을 제공한다는 가정 하에 계산된 것이다. 전체 비용의 대폭적인 감소 및 시스템 효율성 증가(예비 용량, 배치에 대한 필요성 감소, 출력 제한)
Agora Verkehrswende et al. (2019)	<ul style="list-style-type: none"> 독일의 스마트 충전을 통해 2030년까지 누적 배전망 투자 요건을 40%(BEV 600만 대 기준) 또는 50%(BEV 1,500만 대

	<p>기준)까지 줄일 수 있으며, 각각 140 억 유로와 360 억 유로의 절대적 절감 효과가 있을 것으로 예상된다.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 완전 전기화(2050년까지 3,000만~4,500만 대의 BEV를 통해 이동 수단 부문을 전기 이동 수단으로 완전히 전환)의 경우, 독일에서 약 260억~330억 유로의 절감 효과가 있을 것으로 추산된다.
Okamura et al. (2022)	<ul style="list-style-type: none"> • 2030년까지 독일의 모든 승용 BEV의 총 저장 용량은 약 1.575TWh로 추산된다(BEV 1,500만 대, BEV당 평균 배터리 용량 105kWh).
Fraunhofer ISE et al. (2023)	<ul style="list-style-type: none"> • BEV를 보유한 단독 주택의 경우, 5MWh 이상의 유연성 제공은 동적 요금제를 통한 인센티브와 함께 계산된다. • 고정 전기 요금을 적용할 경우, 유연하게 공급되는 예상 에너지량은 약 2.5MWh로 절반에 불과하다.

출처: 다음에 기반한 자체설명 *Agora Energiewende (2023b), Agora Verkehrswende et al. (2019), Okamura et al. (2022), Fraunhofer ISE et al. (2023)*

차량 - 계통망(V2G)

양방향 충전, 특히 V2G는 독일의 계통망 균형을 맞추기 위한 미래 옵션으로 논의되고 테스트되고 있다. 다양한 시범 프로그램을 통해 이미 실행 가능성이 입증되었으며, 현재 시중에 판매되는 다양한 차량이 이론적으로 양방향 충전을 허용하는 기술을 지원한다 (Next Kraftwerke 2022). 현재 독일 정부는 연정 협정에서 V2G를 활성화하기로 합의했다 (The Mobility House 2023b). 그러나 해당 규정이 2025년 중반까지 남은 입법 기간 동안 통과될 것으로 예상되지 않는다.

V2G 및 V2H의 광범위한 도입과 관련하여 몇 가지 과제가 아직 해결되지 않은 채로 남아 있다. 첫 번째는 두 가지 경쟁적인 기술 개념인 AC 및 DC 양방향 충전이 있는데, (The Mobility House 2023a) DC 충전이 표준이 될 가능성이 더 높다는 일부 징후에도 불구하고 현재 명확하게 확립되지는 않았다. 일부 자동차는 이미 양방향 DC 충전을 지원하지만 이 접근 방식을 사용하려면 벽면 박스 또는 충전기에 추가 기술이 장착되어야 하는데, 모든 충전기가 해당 기술을 장착한 것은 아니다. 특히, 자동차가 더 오랜 시간 동안 연결되어 있기 때문에 이론적으로 V2G에 더 많은 잠재력을 가진 느린 가정용 충전기가 (Agora Verkehrswende 2023) 이를 갖춘 것이 더 드물다. AC 옵션은 BEV 자체에 추가 기술이 필요하지만 현재 장착되지 않았고 자동차가 더 비싸고 무거워질 것이다. 이러한 충전기 또는 자동차 특정 기술 외에도 가정에는 다양한 전기 흐름을 측정할 수 있는 특정 스마트 미터도 필요하다.

시범 프로젝트

EV를 위한 건물 전기화(ELBE)



프로젝트:

ELBE 프로젝트에는 함부르크 도시 지역의 시 정부, 지방 공공 서비스, 기술 회사, 연구 기관, 배전망 운영자, 충전소 운영자의 프로젝트 파트너가 포함되었다. 첫 번째 단계는 2018년 10월부터 2023년 12월까지 진행되었다. 이 프로젝트는 BEV 충전으로 인해 발생하는 전력망의 부하 피크를 줄이기 위해 함부르크의 배전망과 충전소 운영자 간 제어 및 그리드에서 제공되는 충전을 위한 IT 인터페이스를 개발하고 테스트했다. 구체적인 목표는 함부르크의 개인 부지, 예를 들어 주거 및 상업용 건물에 최대 7,400개의 충전소를 설치하고 운영하는 것이었다. 이 과정에서 충전 인프라의 수요 기반 및 효율적인 확장 및 운영을 가능하게 하는 새로운 비즈니스 모델이 개발되었다. 이 프로젝트의 총 투자 규모는 약 2,100만 유로에 달했다. (hysOLUTIONS 2023, 2022a; Helmut Schmidt Universität 2022; The Mobility House 2023b; IFB Hamburg 2019).

핵심 결과 (Status: July 2022):

- 2019년부터 총 389개 충전소에서 여러 차례 충전 작업을 통해 현장 테스트를 실시했다.
- 현장 테스트에서 충전 전력이 25% 감소했다. 충전 전력 감소로 영향을 받은 고객은 스마트폰을 통해 알림을 받고 부하 곡선을 볼 수 있었다.
- 결과:
 - 2030년에는 10만 대의 BEV가 예상된다. 함부르크의 배전망의 피크 부하는 향후 20년 동안 40% 증가할 것으로 예상된다.
 - 25% BEV 보급 시나리오에서는 부하 제한이 필요 없고, 50-75% BEV 보급 시나리오에서는 20% 부하 제한이 필요하다.



두 번째 이슈는 V2G를 재정적으로, 실질적으로 실행 가능하게 만들기 위해 현재 규정을 적용해야 할 필요성이다. 모빌리티 하우스(Mobility House)에 따르면, BEV를 다른 고정형 배터리로 취급해야 할 필요가 있다. 충전 시와 계통망으로 피드백할 때 모두 전기에 세금이 부과되는 이중 과세의 경우는, V2G를 재정적으로 더 매력적으로 만들기 위해 피해야 한다 (The Mobility House 2023c). 또한 Agora Verkehrswende는 기술, 특히 적합한 충전기가 사용 가능하자마자 적시에 출시되도록 규제 프레임워크를 조기에 구현하는 것이 중요하다고 강조했다 (Agora Verkehrswende 2023).

2024년 3월, NLL 자문 위원회는 산업 이해 관계자와 함께 개발한 독일에서 양방향 충전을 도입하는 데 필요한 단계가 포함된 로드맵을 제시했다. 이 로드맵은 2021년 연합 협정과 충전 인프라 II 마스터플랜의 조치 47에 명시된 목표를 따르며, 양방향 충전을 전국적으로 도입하고 차별 없이 이용할 수 있도록 추진한다. 자문 위원회는 최초의 시장 출시 준비가 된 V2H 애플리케이션이 2025년부터 준비될 것이고, 그 직후에 상용화된 V2G 애플리케이션이 이어질 것으로 추정한다. 2028년부터 V2H 및 V2G에 대한 상호 운용 가능하고 표준화된 솔루션에 대한 시장이 성장할 수 있다. 이를 위해서는 그때까지 관련 표준이 결정되어야 한다. 또한 규제 기관에서 필요한 규제 및 기술 과정을 도입해야 한다. 또한 자문 위원회는 원활한 플러그 앤 플레이 솔루션에 대한 지지를 가장 유리하다고 밝혔다. 이를 위해서는 전기 안전, 계통망 연결 및 디지털 측정 분야의 표준화가 필요한 것으로 간주된다. V2G 기술을 성공적으로 도입하려면 EU 수준에서 차량에서 제공하는 데이터를 사용하는 데 필요한 규정을 조화시키는 것이 권장된다 (NLL 2024a).

요약하자면, BEV의 계통망 통합은 계통망 유연성을 지원할 수 있는 상당한 잠재력을 가지고 있으며 분산형 재생 에너지 중심 에너지 시스템을 지원할 수 있다. 독일은 이 방향으로 몇 가지 중요한 단계를 밟았다. 제어 가능한 소비자 기기에 대한 계통망 지향 부하 관리에 관한 14a 조의 통과와 계통망 안정성을 우선시하는 균형 잡힌 접근 방식과 소비자 요구 사항을 해결하는 핵심 규제 변화로 볼 수 있다. 부하 이동(load shifting)은 분명히 추가적인 유연성을 가능하게 하지만, 양방향 충전 및 V2G는 이 방향으로 나아가는 중요한 추가 단계가 될 것이다. 현재 독일 정부는 원칙적으로 V2G를 활성화하기로 동의했지만 대규모 채택을 방해하는 규제 및 기술적 장벽이 여전히 남아 있다. 이러한 맥락에서 V2G의 재정적 및 실질적 실행 가능성을 보장하는 규제를 구현하여 필요한 기술의 출시를 촉진하고 규제 환경이 NLL에서 최근 발표한 로드맵에 자세히 설명된 대로

기술의 성숙에 맞춰 준비되도록 하는 것이 중요할 것이다.

4 한국의 현황

4.1 목표 및 정책 대책

4.1.1 한국의 에너지 정책 배경

한국은 2050년까지 기후 중립을 목표로 한다. 사회와 경제가 변화하면서 전력 공급과 전력망을 통한 분배와 관련하여 에너지 부문에서 근본적인 변화를 요구할 것이다. 2022년 한국은 6억 5,450만 톤의 CO2를 배출했다. 같은 해에 전기의 32.5%는 석탄 화력 발전소에서 생산되었고, 29.6%는 원자력에서, 8.9%는 재생 에너지에서 생산되었다 (MOE 2024).

전력 부문, 특히 전기 생산 부문의 배출량을 줄이기 위해 한국은 제 10차 장기 전력 수급 기본 계획(BPLE)에 따라 2030년까지 전력 공급에서 재생 에너지의 점유율을 21.6%, 2036년까지 30.6%로 늘릴 계획이다. 또한 원자력은 한국의 전력 공급을 탈탄소화하고 안정화하는데 중요한 역할을 할 것이다. 한국은 원자력 발전에 대해 2030년까지 32.4%, 2036년까지 34.6%의 점유율을 목표로 하고 있다 (Enerdata 2023). 한국의 전력 시스템은 OECD 국가 중 가장 신뢰할 수 있는 시스템 중 하나였으며, 시스템 안정성 지표는 지난 수십 년 동안 꾸준히 개선되었다 (IEA and KEEI 2021).

4.1.2 주요 이해 관계자 및 규제 기관

한국의 에너지 부문의 전환과 재생 에너지 및 BEV 전력 시스템 통합 관할 정부 기관은 산업통상자원부(MOTIE), 환경부(MOE), 국토교통부(MOLIT)이다. MOE와 MOLIT는 주로 BEV와 충전 인프라의 배치에 관여한다. MOTIE는 에너지 인프라를 담당하고 BPLE를 발표하여 장기 에너지 목표를 결정한다 (IEA and KEEI 2021).

한국의 전력 시장은 한국전력거래소(KPX)가 운영하는 도매시장과, 독립발전사업자와 한국전력공사(KEPCO) 간에 협상되는 전력구매계약(PPA)으로 구성된다. KEPCO는 한국 전력 생산의 3분의 2 이상을 차지한다 (IEA and KEEI 2021). 그러나 생산되는 재생에너지의 대부분은 독립발전사업자로부터 나온다. KEPCO는 한국 전력 시장에서 유일한 구매자이자 소매업체로서 독점 규제로 운영된다. 또한 해당 기업을 한국 정부가 대부분을 소유하고 있다. KPX는 한국에서 전기를 공급하는 유일한 송전 시스템 운영자이며 산업통상자원부 직속으로 운영된다. 반면 KEPCO는 자산 소유자로서 배전 및 송전 시설 관리를 담당한다. 따라서 KPX와 KEPCO는 계통망 안정성을 보장하고 계통망을 유연화하는 데 중심적인

역할을 한다. 여기에는 스마트 계통망으로의 전환, 분산형 발전 장치의 통합, 열 펌프 및 BEV의 새로운 수요 처리가 포함되어 있다 (IEA 2023c).

전력연구원(KEPRI)은 스마트 전력 분배에 대한 연구에서 여러 연구 프로젝트를 개발하고 실행한다. KEPRI는 한국의 다른 연구 기관 및 산업 이해 관계자와 함께 V1G 및 V2G를 중심으로 하는 프로젝트를 실행하고 자금을 지원한다 (KEPRI 2024). 또한, 다수의 정부 지원 기관이 BEV의 모빌리티 전기화 및 계통망 통합을 위한 추가 프로젝트를 실행하고 지원한다. 한국교통연구원(KOTI)은 한국 교통 시스템 개발을 위한 권장 사항을 제공하고 BEV 및 해당 충전 인프라의 출시를 지원한다 (KOTI 2024). 한국스마트그리드사업단(KSGI)은 스마트 계통망 개발을 촉진한다. 이 연구소의 목적은 에너지 부문의 디지털 전환을 가속화하고 분산 에너지 개념을 기반으로 지역 수준에서 스마트 계통망 활용을 확산하는 것이다. 여기에는 DSR 대책을 위한 BEV의 양방향 충전 시스템 및 활용 계획을 개발하는 프로젝트도 포함된다 (KSGI 2024).

마지막으로, 독일과 마찬가지로 산업 참여자와 소비자 모두 이해 관계자로서 핵심적인 역할을 한다. 산업 내 기업은 스마트 충전 및/또는 V2G 애플리케이션을 지원하는 신제품에 대한 혁신과 시험을 수행하고자 한다. 예를 들어, 한국스마트그리드협회(KSGA)는 한국에서 스마트 그리드를 만드는 데 적극적으로 참여하는 민간 기업을 대표한다. 해당 협회는 수요 반응, 에너지 저장 시스템, 건설, 마이크로그리드, 전기 자동차 충전과 같은 다양한 분야에서 활동하는 150개 이상의 회원을 보유하고 있다 (KSGA 2024).

4.1.3 모빌리티 부문의 전기화

한국 정부의 예비 수치에 따르면, 운송 부문은 2023년 한국 온실가스 배출량의 약 16%를 차지한 것으로 추산된다. 약 95Mt CO2e가 배출되었으며, 이는 전년 대비 2.9% 감소한 수치이다 (Yonhap News Agency 2024). 청정 차량 부문의 강력한 성장에도 불구하고, 도로 운송은 여전히 한국 운송 부문에서 가장 큰 배출원이다(2022년 약 95%). 운송 부문의 배출량을 줄이기 위한 한국 정부의 주요 전략에는 도로 운송의 전기화와 수소 도입이 포함된다. 2021년 한국 탄소 중립 시나리오에 따르면, 이러한 이니셔티브를 통해 2018년 수준 대비 2050년까지 해당 부문의 온실가스 배출량이 90.6%~97.1% 감소할 것으로 예상된다 (IEA 2024b; KAS and KOTI 2024).

BEV의 현황 및 목표

2023년에 탄소 중립 및 녹색 성장을 위한 한국 국가 기본 계획이 발표되었다. 2030년까지 420만 대의 BEV와 30만 대의 연료 전지 전기 자동차(FCEV)를 목표로 설정했다(IEA 2024b; KAS and KOTI 2024). 이 수치는 제4차 친환경차 기본 계획(MOTIE 2021)의 작은 목표와 비교하면 조정된 수치이다. 2025년까지 113만 대의 BEV, 2030년까지 300만 대의 BEV, 2025년까지 20만 대, 2030년까지 85만 대의 FCEV를 목표로 했었기 때문이다. 한국의 BEV 수는 지난 몇 년 동안 꾸준히 증가했다. 2022년에 12만 대의 새로운 BEV가 판매되었다(IEA 2023a). 2023년에 한국은 FCEV를 포함하여 약 585,000대의 누적 제로 에미션 차량 수에 도달했다(Statista 2024a).

한국은 현재 전 세계 FCEV 자동차 성장을 선도하고 있으며, 2022년 신규 FCEV의 3분의 2가 한국에 등록되었다. 한국은 전 세계 총 FCEV 재고의 40% 이상을 보유하고 있으며, 주로 약 33,000대의 승용 FCEV로 구성되어 있다.(IEA 2024a). 그러나 한국의 FCEV 시장은 어려움을 겪고 있다. 2023년 말 수소 연료 가격 상승과 공급 부족으로 인해 전국 주유소의 약 75%가 일시적으로 문을 닫았고, 정부 보조금에도 불구하고 FCEV에 대한 전반적인 수요가 감소했다(Hydrogeninsight 2024).

MOE는 운송 부문에서 BEV의 보급을 지속적으로 촉진하기 위해 2023년 BEV에 대한 보조금 제도를 개정했다. 개정안은 계획은 약 2조 5,600억 원(17억 5,600만 유로)으로 구성된다. 보조금 차량 가격을 기준으로 하며, 가격이 5,700만 원(39,000유로 미만) 미만인 EV는 전액 보조금을 받는다. 가격이 5,700만 원에서 8,500만 원(39,000유로~58,000유로)인 차량은 전액 보조금의 최대 50%를 보조금으로 받는다. 가격이 8,500만 원(58,000유로 초과) 이상인 차량은 보조금을 받지 않는다. 또한 구매자는 차량의 에너지 효율과 주행거리에 따라 평가되는 성과보조금을 350만 원에서 500만 원(약 2,400유로~3,400유로)까지 받을 수 있다. 저소득 가정과 소규모 사업주는 초소형 BEV 구매 시 10% 더 많은 보조금 또는 20% 더 많은 보조금을 받게 된다. 총 215,000대의 차량이 보조금을 받을 수 있으며, 작년 한도는 160,000대였다(MOE 2023).

보조금 제도에 따라, 차량 to 부하(V2L) 기술을 탑재한 차량의 경우, 차량에 이 기술을 설치하고 확대하는 것을 촉진하기 위해 차량당 200,000원(약 140유로)의 추가 보조금을 받는다. 지난 3년 동안 100개 이상의 충전소를 설치한 BEV 제조업체도 차량당 200,000원(약 140유로)을 받을 것이다. 이를 소위 충전 인프라 보조금이라고 한다(MOE 2023). 2023년 9월, 한국 정부는 BEV 판매가

2022년 9월에 비해 34.1% 감소함에 따라 보조금을 일시적으로 전반적으로 늘리겠다고 발표했다(The Korea Times 2023). 반면, 한국 정부는 2025년에 개별 BEV에 대한 보조금을 전반적으로 줄이고 대신 충전소와 같은 전기차 공급 장비에 자금을 지원하기로 했다(IEA 2024a; The Korea Herald 2024).

충전 인프라의 현황 및 목표

전 세계적으로 한국은 BEV에 대한 공공 충전 역량의 비율이 가장 높다(IEA 2024a). 그럼에도 불구하고 대중의 인식에서 충전 인프라는 여전히 BEV 시장 확대를 방해하는 주요 문제 중 하나로 간주된다.

한국 정부는 제4차 친환경자동차 기본계획(2025년 개정)을(MOTIE 2021)기반으로 충전인프라 확충을 추진하고 있다. 여기에는 생활거점(주거지, 직장)과 이동거점(차량노선, 고속도로 휴게소) 모두 포함되며, 충전인프라 분야에서 민간부문 사업모델을 활성화하기 위한 인센티브도 제공된다. 한국은 인구밀도가 매우 높은 나라로, 많은 사람이 공동주택에 살고 있다. 이로 인해 집에서 충전하기가 더 어렵다. 따라서 한국 정부는 충분한 공공 충전인프라를 설치하는 것이 필수적이라고 생각한다.

목표는 2025년까지 주거 및 상업 건물을 중심으로 생활 기반 근처에 50만 개 이상의 공공 충전 포인트를 설치하고 2030년까지 123만 개를 설치하는 것이다. 이 목표를 달성하기 위해 신규 건물의 의무 설치율은 2020년 0.5%에서 2022년 5%, 2025년 10%로 인상되었다. 기존 건물의 경우 2022년에 공공 건물에 2%의 의무 설치율이 도입되었고 2023년에는 민간 건물로 확대될 예정이다. 자동차 도로와 고속도로를 따라 이동하는 기지의 목표는 공공-민간 파트너십을 통해 17,000개의 충전 포인트를 설치하는 것이다. 630개 이상의 충전소는 특히 접근성이 좋은 기존 가스 또는 LPG 주유소("하이브리드 주유소") 내에 설치된다. 2022년에는 권역당 8기, 2025년에는 권역당 15기 등 전국 197개 고속도로에 350kWh 규모의 초고속 충전기를 설치할 예정이다. 2025년까지 민간사업자가 초고속 충전기를 2,600기 이상 보급하도록 하고, 설치비용의 최대 50%를 보조한다(MOTIE 2021).

2022년 기준 한국에는 약 20만 개의 공공 EV 충전소가 설치되어 있다. 충전소의 약 90%(18만 개)가 완속 충전소(출력 22kW 이하 충전소)이고 나머지 10%(21,000개)가 급속 충전소(출력 22kW 이상 350kW 이하 충전소)이다. 공공 충전소의 상당 부분이 완속 충전소임에도 불구하고 한국은 경형 EV(LDV) 대수에 대한 공공 충전 전력 용량 비율이 차량당 7kW로 가장 높다. 세계 평균은 EV 당 2.4kW, EU는 EV 당 약 1.2kW, 독일은

EV 당 1kW 미만이다. 2022년 기준으로 한국에는 충전소당 LDV가 2대 있는 반면 독일은 충전소당 LDV가 약 25대이다 (IEA 2023b).

BEV의 현재 및 예상 전기 소비량

2022년 한국의 총 전기 소비량은 568TWh였다 (Enerdata 2022). 한국 10차 BPLE는 예를 들어 모빌리티 부문에서 전기화가 증가하고 데이터 센터의 전력 수요가 증가함에 따라 2027년에는 약 609TWh, 2032년에는 660TWh, 2036년에는 703TWh로 증가할 것으로 추정한다 (MOTIE 2023a, p. 5). 2023년에 한국에 등록된 BEV의 연간 전기 소비량은 약 544,000대로 약 1TWh로 추산할 수 있다. 한국에너지경제연구원의 보고서에 따르면 2030년까지 BEV가 300만 대 보급되면 한국의 BEV 전기 소비량은 약 6TWh가 될 것으로 추정된다 (KEEI 2017). 한국 정부가 2030년까지 BEV를 420만 대 보급한다는 목표를 업데이트했기 때문에 이러한 BEV 보급에 대한 전기 소비량은 약 8.4TWh가 될 것으로 추산된다. 산업부는 2020년 이전 9차 BPLE에서 2034년까지 485만 대의 BEV가 보급되고 이로 인해 16.3TWh의 추가 전력 소비가 예상된다고 계산했다 (MOTIE 2020). 이러한 추정치는 모두 배터리 기술 개발을 고려하지 않은 다양한 BEV 보급 수치를 기반으로 하므로, 이 수치는 대략적인 근사치로 간주해야 한다. 그림 5는 이러한 주요 정책 목표와 한국의 기후 중립성, 재생 에너지 확대, BEV 및 관련 충전 인프라에 대한 현황을 요약한 것이다.

그림 5: 한국 BEV의 주요 목표 및 현재 수치

주제	그림 / 목표
에너지 및 기후 관련 수치	
기후 중립 목표	2050년까지
현재 전력 생산에서 재생에너지의 점유율	8.9% (2022년)
전력 생산에서 재생에너지의 목표 점유율	21.6% (2030)
현재 전기 수요	568TWh(2022)
예상 전력 수요	660TWh(2030)
BEV 관련 수치	
현재 BEV 전기 수요	1TWh(2023)
예상 BEV 전기 수요	6-16.3 TWh(2034)
현재 BEV 수	544,000 (2023)
BEV 목표 대수	4.2m(2030)
현재 공공 충전소 수	약 200,000명(2023년)
공공 충전소 목표 수	1.23m(2030)

MOE (2023, 2024), Statista (2024a), IEA (2024b), KAS 및 KOTI를 (2024)기반으로 한 자체 설명(2023b),

4.1.4 스마트 계통망 전개

제 10차 BLE에 따라 KEPCO는 2023년 5월에 10차 장기 송전 및 변전 계획을 발표했다. 이 계획은 2023-2036년 기간 동안 필요한 배전 및 송전 전력망 확장 및 보강을 자세히 설명하며, 2년마다 개정된다. 주요 우선순위 중 하나는 수많은 해상 풍력 프로젝트가 계획되어 있는 서해안에서 북서쪽 서울 근처 수요 센터까지 이어지는 구간을 개발하는 것이다 (KEPCO 2023b). 한국 전력망은 국경 간 송전선이 없는 고립된 시스템이다. 따라서 현재는 국내 전력망 확장에만 중점을 두고 있다 (Renewable Energy Institute 2023b).

한국은 이미 미래 지향적인 지능형 전력망을 개발하기 위한 다양한 조치를 취했다. 한국 정부는 2010년에 스마트 계통망 로드맵을 채택했으며, 여기에는 2012년까지 "세계 최초의 스마트 계통망 테스트 도시"를 건설하고, 2020년까지 "소비자 중심의 광역 스마트 계통망"을 구축하고, 2030년까지 "전국 스마트 계통망"을 구축하는 목표가 포함되었다. 이 로드맵은 지능형 전력망, 지능형 소비자, 지능형 교통, 지능형 재생 에너지, 지능형 전력 서비스의 5가지 핵심 영역을 정의한다. 이러한 핵심 영역 뒤에 있는 구체적인 하위 목표는 개방형 전력 플랫폼 구축, 계통망 고장 예측 시스템 및 자동 복구, 지능형 계량 인프라, 에너지 관리 시스템, V2G 및 ICT 서비스를 허용하는 전국적 충전 인프라, 대규모 재생 에너지 확대, 에너지 자립형 주택 및 건물 개발, 다양한 유형의 전기 요금제 및 지능형 전력 거래 시스템이다 (KSGA 2024).

산업통상자원부는 스마트계통망 구축 및 활용 촉진법에 따라 5년마다 해당 계획을 수립하여 시행하고 있다. 현재 제 3차 스마트계통망 기본계획은 2023년부터 2027년까지의 목표, 전략, 우선순위 및 투자를 정의한다. 제 1차 및 제 2차 기본계획은 각각 2012년부터 2016년까지, 2016년부터 2022년까지의 기간을 포괄한다. 계획의 목적은 지능형 전력망 개발을 촉진하는 것이다. 여기에는 스마트계통망의 확대 및 활용을 통해 전기 생산 및 소비의 효율성을 높이는 목표가 포함되지만 이 분야에서 한국의 산업 경쟁력을 육성하는 아이디어도 포함된다 (MOTIE 2023a).

한국 정부는 스마트 미터링 장치 배포의 선두에 있으며 2024년까지 모든 2,250만 가구(저압 유닛)에 스마트 미터를 장착할 계획이다 (IEA 2023c). 2022년 말까지 한국에는 첨단 미터링 인프라(AMI)를 위한 약 1,200만 대가 설치되었다. 목표를 달성하려면 향후 2년 동안 매년 약 500만 대를 설치해야 한다.

제 3차 스마트계통망 기본계획은 향후 5년간 스마트계통망에 약 3조 7,000억 원(약 26억 유로)을 투자하는 것을 목표로 하고 있다. 이 계획은 이러한

목표를 달성하기 위한 5 가지 우선순위를 제시하고 있다. 첫째, 유연성 자원을 확보하고 통합 가상 발전소(VPP)를 도입하여 전력 공급 유연성을 높인다. 둘째, 수요 반응 시장, 스마트 미터링 및 ToU (Time-of-use) 요금제를 확대하여 스마트한 전력 소비 시스템을 구축한다. 셋째, 분산형 에너지 기술을 개발하고 분산형 에너지 시스템을 구축하고 ICT 기반 전력 시스템을 구축하여 전력망을 디지털화한다. 넷째, 핵심 마이크로그리드 모델을 개발하고 에너지 프로슈머를 육성하여 마이크로그리드를 활성화한다. 다섯째, 스마트계통망 표준 및 인증을 촉진하여 스마트계통망 산업 생태계를 구축한다.

제 3 차 기본계획 또 다른 핵심 목표는 전력 공급에서 분산형 에너지 자원의 비중을 2022 년 13.2%에서 2027 년 18.6%로 늘리는 것이다. 제 10 차 BPLE는 분산형 에너지 공급 비중이 2030 년 20.4%, 2036 년 23.3%에 이를 것으로 예측한다. 2023 년 6 월에는 분산형 에너지 진흥 특별법이 제정되어 2024 년에 시행되었다. 이 법은 에너지가 주로 소비되는 곳에서 생산되는 보다 분산형 에너지 시스템으로의 개발을 추가적으로 지원하려는 것이다. 이는 장거리 송전망 확장의 필요성을 줄이는 것으로 여겨집니다. 이 법에 따르면 분산형 에너지 프로젝트로 간주되는 프로젝트는 소규모 및 중규모 원자력 발전소, 통합 발전소(예: 열병합 발전소 또는 power-to-x 발전소), 연료 전지 발전, 수소 발전, 재생 가능 발전소 및 BEV 도 포함하는 에너지 저장 시설이다. 분산형 발전 플랜트를 설립하고 지원할 규모는 아직 최종적으로 명확해지지 않았다. 전문가들은 발전 시설의 경우 40MW 이하, 통합 에너지 시설의 경우 500MW 이하를 가정한다 (Shin & Kim LLC 2023). 또한 이 법률은 특별히 지정된 분산형 에너지 지역의 에너지 생산자가 전력 시장을 거치지 않고 소비자에게 직접 전기를 판매할 수 있도록 허용한다. 특정 지리적 지역의 기업은 분산형 에너지 생산 시설을 설립해야 할 수도 있다 (KSGI 2023).

4.2 BEV의 유연성 및 수요 반응

4.2.1 공급측 계통망 혼잡 관리

계통망 내에서 공급과 수요를 균형 잡기 위한 한국의 기존 접근 방식은 예를 들어 피크 부하 동안 기존 발전 시설의 전력 출력을 조정하는 것이다. 이는 주로 가스 발전소에서 수행된다. 제 10 차 BPLE에 따르면, 앞으로 폐쇄될 26 개의 석탄 화력 발전소는 2036 년까지 추가 전력 수요와 유연성 요구 사항을 충족하기 위해 가스 발전소로 전환될 것이다. 또한, 추가적인 새로운 가스 및 수소 발전소가 계획되어 있다. 가스 발전소의 용량은 2036 년에 41.2GW에서 최대 63GW로 증가할 예정이다 (Solutions for Our Climate 2022).

한국은 고립된 지리적 위치 때문에 현재 국경을 넘나드는 송전선이 없다. 한국은 전적으로 국내 전기 생산에 의존하고 있으며 국제 무역을 통해 전력량 밸런싱을 할 수 없다 (IEA 2023c). 특히 재생 에너지 생산의 목표 증가로 인해 한국 전력망에서 유연성 옵션의 중요성이 크게 커졌다. 장기적으로 "아시아 슈퍼 계통망"을 만드는 것에 대한 논의가 있었는데, 이는 다른 동북아시아 국가와 연결을 개발할 것이다. 처음에는 한국과 일본을 연결하여 공급 보안을 강화하고 전체 시스템 비용을 낮추는 것이 포함될 수 있다. 그러나 잠재적 참여 국가 간의 정치적 차이와 긴장으로 인해 이 아이디어에 대한 추가 진전이 발목 잡혔다. 보고서는 또한 일본과 한국을 연결하는 해저 케이블 상호 연결의 잠재력과 기술적 타당성에 주목했다. 한국과 일본은 모두 출력제한 문제를 줄이고 이 지역의 저렴한 재생 에너지 자원을 공동으로 활용할 수 있다 (Renewable Energy Institute 2023a).

현재 한국에서의 재생에너지 비중이 상대적으로 낮기 때문에 재생에너지 출력 제한은 주로 한반도 남쪽에 위치한 제주도에서 논의되어 왔다. 한국에서 가장 큰 섬인 제주도는 선구적인 지역으로 간주되며 동시에 한국 에너지 전환의 실시간 실험실이다. CFI 2030(Carbon Free Island) 비전의 일환으로 이 섬은 재생에너지의 확장과 전력망 통합을 가속화했다. 이 섬의 전력 공급에서 재생에너지 비중은 19.2%(2023년)인 반면 한국 국가 수준에서는 약 9.1%(2022년)이다 (Invest Korea 2023). 풍력 발전은 제주도에서 출력제한의 영향을 가장 많이 받는다. 출력제한에 대한 경제적 보상은 제공되지 않는다 (Renewable Energy Institute 2023b).

한국의 제 3 차 스마트 전력망 기본 계획에서 제주도는 중요한 역할을 한다. 이 전략의 핵심 이니셔티브 중 하나는 섬에서 테스트한 스마트 에너지 관리 시스템(EMS)을 구축하는 것이다. 이는 출력제한 문제를 해결하고 나중에 본토에서도 구현할 수 있다 (MOTIE 2023a). 또한 DSR 조치는 출력 제한 및 재생 에너지 통합 문제를 해결하기 위해 고려된다.

4.2.2 수요 측 계통망 혼잡 관리

에너지 저장

한국은 배터리 저장 부문에서 세계적 리더 중 하나이다. 2022 년 기준, 한국은 누적 설치된 배터리 저장 용량이 4.1GW였다. 비수요 시간대에 충전을 장려하고 저장 수요 증가로 인한 계통망 혼잡 위험을 완화하기 위해 충전 요금은 23:00에서 09:00까지 50% 할인된다 (Ahn 2023). 한국 정부는 배터리 저장을 크게 확대하기로 약속했다. 10 차 BPLE에서 2036 년까지 24.5GW의 저장 용량 목표가 설정되었다. 여기에는 배터리 저장은 포함되지만 양수

저장은 포함되지 않는다. 이 용량 중 20.85GW는 재생 에너지 출력 제한을 줄이거나 부하 평준화를 위한 장기 시스템이어야 하며 3.66GW는 주파수 조절을 위한 단기로 계획되어 있다 (Renewable Energy Institute 2023b). 한국 정부는 약 310억 유로의 필요한 투자액을 예상하고 있다.

부하 관리

2014년 한국은 전기 공급과 수요를 균형을 보다 잘 맞추기 위해 DR(수요 반응 시장)로 약칭되는 수요 반응 시장을 출범시켰고, 이는 빠르게 주목을 받고 있다 (Kim 2023). 2022년 현재 한국에는 4.4GW의 DR 용량이 등록되어 있으며, 정부는 2036년까지 6.7GW를 목표로 하고 있다. DR 시장 참여자 수는 수년에 걸쳐 증가하여 2022년 현재 12,000개 이상이 되었다. 이러한 증가는 2019년 가구 포함과 같은 DR 프로그램 수의 증가로 인한 부분적인 결과이다 (Kim 2023).

전반적으로 한국은 다양한 부문을 겨냥한 다양한 수요 측 대책을 수립했다. 이러한 대책 중 첫 번째는 신뢰성 중심 DR이다. 이 DR 시스템에서 정부는 다양한 수준의 긴급성에 따라 수요 감소 대책과 비상 시 부하 분산(load shedding)을 명령할 수 있다. 이러한 의무적 DR의 적용을 받는 기업은 기본 보상과 실제 제공된 서비스에 따른 추가 인센티브를 통해 보상을 받는다 (Solutions for Our Climate 2022). 극단적인 경우 정부가 이해 관계자와 협력하고 소통하여 발전 부문에 가장 관련성 있는 소비자에게만 전기를 공급하도록 명령할 수도 있다 (IEA 2023c). 2021년에 신뢰성 중심 DR 시스템으로 인해 약 10.9GWh의 감소가 발생했다 (Solutions for Our Climate 2022).

신뢰성 중심의 DR 외에도 한국 정부는 자발적 DR의 잠재력을 끌어내고 전체 판매 시장에서 유연한 거래를 가능하게 하기 위해 여러 가지 추가 프로그램을 도입했다. (IEA and KEEI 2021). 이러한 프로그램 중 가장 오래 운영된 것은 경제 DR 프로그램으로, 유연성 거래를 가능하게 한다. 2023년까지 이 프로그램은 수동 활성화가 있는 전일 하루 시장으로 제한되어 단기 유연성 요구를 처리하는 프로그램의 능력을 저해했다.

2023년에는 실시간 시장으로 추가적으로 구현되었다. 이 시장은 현재 제주도로 제한되어 있으며 2025년까지 전국으로 확대될 예정이다. (Kim 2023). 2021년 경제적 DR 감소 수요는 492GWh였다 (Solutions for Our Climate 2022).

DR 시장에 참여하는 가장 관련성 있는 고객은 대규모 산업 회사로, 운영 일정을 조정하고 난방이나 냉방과 같은 비필수 사용 사례에 대한 수요 감소를 구현하고

백업 발전기를 사용하여 수요 측 유연성을 제공한다. DR 프로그램은 한국의 TSO인 한국 전력 거래소(KPX)에서 관리하며, 모니터링과 지불도 처리한다. KPX와 참여 고객 사이에는 참여 고객을 모집하고 감소 주문을 전달하고 지불을 실행하는 소위 수요 반응 집계자가 있다 (Solutions for Our Climate 2022).

현재 DR 시장에서는 가스 발전소와 신뢰성 기반 DR 고객 모두 입찰할 수 있으며 그에 따라 보상을 받는다. 그러나 유연성 제공 측면에서 DR보다 가스 발전소를 선호하는 데는 이유가 되는 둘의 차이가 있다. 예를 들어 DR의 잠재적 보상 시간은 제한되어 있고 DR은 실제 기여도에 따라서만 보상되는 반면 가스 발전소는 실제 참여도에 관계없이 보상을 받는다 (Solutions for Our Climate 2022).

DR에 대한 보상은 일반적으로 다양한 범주에 따라 구성되며, 경제적인 DR에만 참여하고 신뢰성 기반 DR에는 참여하지 않는 사업체는 2021년에 고정 금액인 27,800원을 받고, 참여 최대치인 60시간 동안 참여하는 경우 추가로 46,600/KW를 받는다 (Solutions for Our Climate 2022). 그러나 현재의 가격 책정 시스템은 입찰 비용이 한계 발전의 연료 비용보다 낮은 경우에만 유연성이 적용되며, 전문가들이 비판했듯이 이는 시스템에 대한 DR의 전체 가치를 반영하지 못할 것이다. 공급 곡선에서 가변 비용만 고려하는 이러한 가격 책정 구조는 DR이 입찰에서 이기는 경우가 드물다는 결과를 낳는다 (Solutions for Our Climate 2022).

두 개의 더 큰 DR 프로그램과 함께 한국 정부는 더 작은 조치를 수립했다. 빠른 DR은 더 빠르게 배치할 수 있는 유연성 옵션을 제공하는 것을 목표로 한다. 이 조치는 특히 계통망 주파수의 안정화를 목표로 하며 2020년부터 시행되었다 (Kim 2023). 빠른 DR은 여전히 범위가 제한적이다. 2021년에는 총 3,422MW가 10분 간격으로 감소했다 (Solutions for Our Climate 2022). 또한 한국은 2022년에 자동 DR을 시작하여 고객이 DR 감소 요청이 전송되면 자동으로 소비를 줄일 수 있는 장치를 연결하여 더 빠른 DR 배치를 허용했다 (Kim 2023).

국민(국가적) DR은 ToU 가격을 제공하여 가정, 개인, 건물 및 기업(예: 개인 충전소)을 DR 관리에 더욱 통합하는 것을 목표로 하는 DR 프로그램이다. 그러나 실제 참여는 매우 낮아서 국민 DR을 연간 약 10,000명만 사용한다 (Solutions for Our Climate 2022). 스마트 계통망을 위한 제3차 기본 계획은 2027년까지 이 DR 세그먼트 참여자 점유율을 20,000명으로 늘릴 계획이다 (MOTIE 2023a).

마지막으로, Plus DR은 재생 에너지 확장과 스마트 충전 전략의 잠재력의 맥락에서 특히 중요하다. 재생 에너지의

감축을 피하기 위해 과도한 전기 공급이 있는 시간 동안 전기 수요를 증가시키는 데 중점을 둔다. 감축을 피함으로써 얻은 추가 수익은 DR 고객, 예를 들어 BEV 사용자, 소규모 공장 또는 호텔과 부분적으로 공유된다. 이 시스템은 고객이 거의 없었고 초기에는 거의 사용되지 않았지만, 등록된 고객 수는 2022 년에 1,000 명 이상으로 증가했다 (Electimes 2022; Kim 2023). 스마트 계통망을 위한 제 3 차 기본 계획은 DR Plus 시장을 73.5MW 에서 175MW 로 늘리는 것을 목표로 한다 (MOTIE 2023a).

이 연구의 맥락에서 BEV 의 사례는 가장 흥미로운데, 최대 생산 시간 동안 BEV 충전을 장려하는 것이 전체 프로젝트에서 중요한 역할을 하기 때문이다. 예를 들어 KEPCO 는 수요 반응 시장에서 제주도에 약 400 개의 충전기를 등록하고 DR 에 입찰했다. 낙찰 시, 정보는 전담 중개 플랫폼인 ChargeLink 를 통해 전송되고, 고객은 할인 혜택을 받고 전담 시간에 충전기를 예약할 수 있다. 이 프로젝트는 다른 충전 제공 (Kbiznews 2021)업체에도 동일한 서비스를 제공하도록 확장되었다. (Energydaily 2023). 지금까지 Plus DR 은 제주도에만 적용되고 있는데, 제주도의 재생에너지 비중은 이미 전국 평균보다 상당히 높다 (Solutions for Our Climate 2022).

또한 한국에는 다양한 유형의 전기 요금의 설계가 되어있으며, 이는 소비자에게 전력망 서비스 인센티브를 제공하여 수요 와 에너지 공급의 균형을 더 잘 맞추는 것을 목표로 논의, 구현 및 테스트되고 있다. 특히 BEV 를 살펴보면, 예를 들어 KEPCO 는 계절(여름, 봄/가을, 겨울), 기간(비수기, 중간, 피크) 및 전압(저전압 및 고전압)에 따라 차별화된 BEV 충전을 위한 (KEPCO 2023a)ToU 요금을 제공한다. 보다 일반적으로 KEPCO 는 사용 사례에 따라 차별화된 다양한 전기 요금과 피크 시간에 수요를 관리하는 대가로 고객에게 할인된 요금을 제공하는 두 가지 수요 관리 요금을 제공한다. 그러나 한국은 ToU 요금이 아닌 정액 요금을 제공하는 공공 충전기의 점유율이 매우 높기 때문에 부하 전환에 대한 효과는 제한적인 것으로 간주된다 (Park et al. 2023).

차량 계통망 통합(VGI)/차량 to 계통망(V2G)

한국 기업들도 앞서 나가고 있으며, 한국 제조업체의 BEV 는 양방향 충전 기능을 제공하는 최초의 제품 중 하나였으며 독일 등 전 세계의 시범 프로젝트에 사용되고 있다 (electrived.net 2022). V2G 솔루션과 관련하여 한국은 기술의 실현 가능성을 탐색하기 위해 다양한 시범 프로젝트를 시행했다 (Miha Jensterle, Regina Yoonmie Soh, Maike Venjakob, Oliver Wagner 2019; Businesswire 2023).

현재까지 V2G 에 대한 포괄적인 규정은 없지만, 한국 정부는 규제 샌드박스 제도에 따라 보다 광범위한 시범

사업을 승인했으며, 제 3 차 에너지 기본 계획에서는 장기적으로 V2G 가 전력 시장에 포함될 것으로 예상하고 있다 (MOTIE 2019; He-rim 2021).

한국의 제 3 차 스마트계통망 기본계획은 또한 전력 공급 유연성을 높이기 위한 목표의 일환으로 BEV 계통망 통합을 다룬다. 이 계획은 이를 차량 계통망 통합(VGI)이라고 하며, 여기에는 V2G 도 포함된다. 이 계획은 VGI 를 용이하게 하는 중요한 방법으로 스마트 충전 및 방전을 강조하고 이 분야의 사업 개발을 지원하는 것을 목표로 한다. 이는 V2G 기술 홍보로 확대된다. 또한, 사업자 분류 및 양방향 충전기의 성능 기준을 포함하여 V2G 기술에 대한 규정이 수립될 예정이다. 또한, V2G 는 소규모 전력 시장에서 거래되는 자원의 정의에 포함될 예정이다. 이 계획은 또한 통합 가상 발전소(VPP)를 도입하고 제주도에 50MW VPP 시범 사업을 계획하여 배터리 저장 장치 및 BEV 와 같은 분산형 에너지 자원의 통합을 용이하게 할 것이다 (Lee 2023).

이미 2018 년에서 2023 년 사이에 KEPCO 는 "전기차 계통망 통합(EV-Grid Integration, VGI) 제어 기술 개발 및 DR 자원으로서의 EV 의 V2G 현장 시연"이라는 제목으로 대규모 연구 프로젝트를 시작했다. 이 프로젝트에는 현대 및 기타 연구 기관과 같은 산업 이해 관계자가 포함되었다. 주요 목표는 DR 자원으로 EV 를 시연하고, VGI 제어 시스템을 테스트하고, 상업용 V2G-BEV, V2G EVSE 및 일치하는 V2G 제어 시스템을 개발하는 것이었다. 이 연구 프로젝트의 틀 안에서 여러 시연 프로젝트를 거친 후, KEPCO 는 결과를 더욱 상용화하려고 노력한다.Park et al. (2023).

한국전력은 한국 기업 그리드위즈(Gridwiz)와 업무 협정을 체결했다. 그리드위즈 는 수요 관리 사업자로, 제주도의 Plus DR 프로젝트에도 참여하고 있다. 이 협정은 다른 세 개의 한국 충전 사업자(SKelectlink, Scalar Data, TBU)에도 적용된다. 체결된 계약의 목표는 "스마트 충전(V1G) 기반 전기 자동차 충전 국가 수요 반응(DR) 프로젝트"를 홍보하는 것이다. DR 프로젝트는 2024 년 하반기에 시작될 예정이다. KEPCO 는 전국의 약 400 개 완속 충전기의 스마트 충전 기능을 업그레이드하고 기능 도입을 점진적으로 확대할 계획이다. 이 시스템 도입은 2030 년까지 BEV 에 대한 한국 배치 목표를 고려하여 전력 안정성에 기여하는 것을 목적으로 한다. DR 프로젝트가 성공하면 이 프로젝트를 더 많은 충전기로 확대할 수 있다. 이 시스템은 이전 KEPCO 시범 프로젝트와 유사할 것으로 예상된다 (Energydaily 2024).

그림 6: 한국에서 BEV 의 유연성으로 인한 경제적 및 시스템적 이점 추정치

출처	경제적 및 시스템적 이점 추정
----	------------------

IEA (2021)	<ul style="list-style-type: none"> • 한국에서 예상되는 BEV 차량의 30%에 대한 충전 패턴을 최적화하면 BEV 차량의 평균 운영 비용과 피크 비용을 각각 21%와 30% 절감할 수 있고, BEV 배출량을 21% 줄일 수 있다.
IEA and KEEI (2021)	<ul style="list-style-type: none"> • 스마트 충전을 포함한 수요 측 관리를 통해 한국의 최대 수요는 평상시 수요 대비 최대 12.6% 낮아질 것으로 예상된다.
Wooyoung Jeon et al. (2021)	<ul style="list-style-type: none"> • V2G 기능이 있는 VPP 를 도입할 경우 한국의 BEV 수요 측 관리의 순이익은 월 평균 연료 비용의 67%~85%로 추산된다.

출처: 다음에 기반한 자체 설명 IEA (2021), Park et al. (2023), IEA and KEEI (2021), Wooyoung Jeon et al. (2021)



제주: 스마트 그리드 테스트베드가 있는 무탄소 섬



프로젝트 배경:

제주도는 한국의 "제 3 차 스마트 전력망 기본 계획"에서 중요한 역할을 한다. 이 전략의 핵심 이니셔티브 중 하나는 섬에서 테스트되었던 스마트 에너지 관리 시스템(EMS)을 구축하는 것이다. 한국에서 가장 큰 섬인 제주는 한국의 에너지 전환에 있어 선구적인 지역으로 간주된다. CFI 2030(Carbon Free Island) 비전의 일환으로 제주는 전력망에 재생 에너지의 확장과 통합을 가속화했다. 제주도의 전기 공급에서 재생 에너지 점유율은 19.2%(2023 년)인 반면 한국 국가 수준에서는 약 9.1%(2022 년)이다(Invest Korea 2023). 그러나 한 연구에 따르면 제주도도 상당히 높은 출력제한율을 경험한 것으로 나타났다. 예를 들어, 2021 년 2.09%. 수요에 비해 과도한 전력 공급, 유연하지 못한 전력망, 확장에 대한 경제적 인센티브가 부족하여 전력 저장 용량이 부족한 것이 해당 상황의 원인으로 간주된다(Solutions for Our Climate 및 NEXT Group 2021; Invest Korea 2023).

2021 년 한국 정부는 전력 수요와 공급의 균형을 잘 맞추고 재생 에너지 감축을 방지하기 위해 "Plus DR" 및 "EV Plus DR"라는 수요 반응 조치를 도입하기 시작했다. "EV Plus DR" 모델은 "EV 배터리를 전력 시스템의 새로운 유연한 자원으로 활용"하는 것을 목표로 한다. 이는 "가치인센티브를 제공하는 전력 소비자는 데미컬이제터부터 제공하는 세계 최우히그저전수오반의비즈니스 모델"즈

5 비교

한국과 독일은 경제를 탈탄소화하기 위한 비슷한 과제에 직면해 있다. 양국 모두 각각 2045 년과 2050 년까지 탄소 중립을 달성하기로 약속했다. 양국은 강력한 산업 분야와 배출 집약적 분야를 보유하고 있다. 반면에 에너지 자원의 국내 공급이 제한적이어서 수입 의존도가 높다. 재생 에너지는 탄소 중립을 위한 노력에서 기존 과제를 해결하는 솔루션 중 하나로 확인되었다. 독일은 2030 년까지 재생 에너지 80%, 2035 년까지 거의 100%를 목표로 하는 반면, 한국은 2030 년까지 21.6%를 목표로 하고 추가로 원자력 에너지로 전력 부문을 탈탄소화할 것이다. 독일의 전기 믹스에서 재생 에너지의 비중은 2024 년 4 월에 60%에 가까워지고 있다. 이처럼 변동성이 큰 에너지 생산의 비중이 높음에도 불구하고 독일의 시스템 안정성은 높은 수준을 유지하고 있다. 그러나 한국도 높은 시스템 안정성을 보이며 재생 에너지 비중은 약 8.9%로 훨씬 낮다.

탄소 중립 목표를 달성하려면 양국 모두 산업 및 운송 분야의 추가 전기화가 필요하다. BEV 는 독일과 한국 운송 부문의 탈탄소화에서 주도적인 역할을 한다. 독일은 2030 년까지 1,500 만 대, 한국은 420 만 대의 BEV 를 목표로 한다. 한국은 추가로 30 만 대의 FCEV 를 도입하고자 하지만, 지금까지 독일에서는 중요성하게 여겨지지 않는다. 두 시장에서 지난 몇 년 동안 BEV 수가 급격히 증가한 후, 정부 보조금이 감소하고 BEV 의 시작 가격이 비교적 높아 판매가 감소했다. 2023 년에 독일은 약 140 만 대, 한국은 약 544,000 대의 BEV 를 등록했다. 이는 두 경우 모두 2030 년 국가 목표를 위협에 빠뜨리고 판매를 다시 한 번 촉진하기 위해 정부 지원을 재도입하는 것으로 논의가 전환될 수 있다.

총 전기 소비량의 경우 독일은 2022 년 기준 약 549TWh, 한국은 약 568TWh 였다. 지금까지 BEV 의 점유율은 한국이 약 1TWh, 독일이 각각 2TWh 로 그다지 중요하지 않다. 그러나 해당 점유율은 2030 년까지 한국에서 6~8.4TWh, 독일에서 40~68TWh 로 증가할 것으로 예상된다. 이는 시스템 안정성을 위협하는 것으로 간주되지 않는다. 그러나 특히 지역 배전 차원에서 BEV 수요 증가는 아침과 저녁 시간의 피크 부하를 증가시켜 추가적인 혼잡 및 계통망 관리 문제로 이어질 가능성이 있다. ToU 가격 책정, 스마트 충전 또는 V2G 를 통한 유연화 수요는 이 연구의 두 사례 모두에서 이러한 문제를 해결하는 데 도움이 될 수 있다.

BEV 의 확장과 함께, 독일과 한국 전역에 필요한 충전 인프라가 구축되었다. 양국은 소비자의 주행 불안에 대한 우려를 극복하기 위해 공공 충전소, 저속 및 고속 충전기의 밀집된 공급망을 구축하는 것이 중요하다는 것을 인식했다. 그럼에도 불구하고, 두 사례 간의 중요한 차이점은 독일의 가정용 충전기 네트워크가 더욱 강력하다는 것이다. 많은 한국인은 충전 가능성이 없는 다세대 주택에서 인구 밀도가 높은 도시에 살고 있어 공공 충전에 대한 의존도가 더 높으며, 한국 정부는 이 문제를 해결하려고 노력하고 있다. 2023 년까지 한국은 전 세계에서 BEV 당 가장 높은 공공(저속) 충전률을 달성했다. 공공 충전의 보급과 BEV 의 예상 연결 시간 단축은 부하 이동과 같은 특정 유연화 조치를 구현하는데 어려움이 될 수 있다.

그림 7: 한국과 독일의 주요 수치, 추정치 및 목표

주제	한국	독일
에너지 및 기후 관련 수치		
기후 중립 목표	2050 년까지	2045 년까지
전기 부문에서 재생에너지의 목표 점유율	21.6% (2030)	80% (2030)
현재 전기 수요	568TWh(2022)	549TWh(2022)
예상 전력 수요	660TWh(2032)	655TWh - 726TWh(2030)
EV 관련 수치		
현재 BEV 수	544,000(2023)	1.4m(2023)
BEV 목표 대수	4.2m (2030)	15m (2030)
현재 공공 충전소 수	약 200,000 명(2022 년)	약 90,000 명(2023 년)
공공 충전소 목표 수	1,230,000(2030)	1m (2030)
현재 BEV 전기 수요	1TWh (2023)	2TWh(2021 년)
견적. BEV 전력수요	6~8.4TWh(2030 년)	68TWh(2030)

출처: 한국의 경우 OTIE MOE (2023, 2024), Statista (2024a), IEA (2024b), KAS 및 KOTI 를 (2024)기반으로 한 자체 설명, 독일의 경우 및 BReg (2023b), (2023a), UBA (2023), Fraunhofer ISI 등. (2021), 야고라 에네르기 벤데 (2023b), DIW

(2023), BReg (2022), BNetzA (2023d), BReg (2023b), BNetzA (2022a), BMWK (2023a), EC (2020)를 기반으로 한 자체 설명

증가하는 전기 수요와 변동성이 큰 재생 에너지의 높은 점유율에 대처하기 위해 한국과 독일은 전력망을 확장한다. BEV의 유연한 통합은 추가 송전선에 대한 필요성을 바꾸지 않지만, 배전 수준에서 재생 에너지의 계통망 통합을 용이하게 한다. 스마트 계통망은 이 잠재력을 활용하기 위한 중요한 전제 조건이다. 양국 모두 이를 인식했지만 지금까지 이와 관련하여 서로 다른 방식의 진전을 이루었으며 한국은 선구자 중 하나이다.

독일은 계통망 상태를 더 잘 제어 및 측정하여 수요와 공급의 균형을 맞추기 위한 스마트 미터링 기술의 배포를 확대하고 가속화하는 것을 목표로 하지만 해당 기술의 실제 배포에는 여전히 뒤처져 있다. 2023년 에너지 전환의 디지털화 재개에 관한 법률로 독일은 절실히 필요한 스마트 미터 배포를 가속화할 수 있는 기반을 마련했다. 로드맵에서는 소규모 사용자를 대상으로 자발적인 스마트 미터 설치를 촉진하고 대규모 사용자를 대상으로 의무적인 설치를 촉진하여 독일의 현재 구현 격차를 메우기 위한 명확한 목표를 설정하고 있다. 한국은 스마트 미터링 인프라를 설치하는 데 훨씬 더 앞서 있다. 한국 정부는 스마트 미터링 기기 배포의 최전선에 있다. 한국정부의 계획은 2024년 말까지 모든 2,250만 가구(저전압 장치)에 스마트 미터를 설치하는 것을 목표로 하고 있다.

이에 더하여, 양국 모두 유연성 옵션 확대의 중요성을 인식했다. 예를 들어, 양국에 존재하는 재생 에너지 출력제한 및 일반적으로 전력망 혼잡 문제를 해결하기 위한 것이다. 두 사례의 주요 차이점은 독일이 유럽 통합 전력 시장과 주변 국가와의 상호 연결의 혜택을 누릴 수 있다는 것이다. 이러한 상호 연결성은 유럽 전역의 재생 에너지 통합을 위한 수요와 공급의 균형을 맞추는 중요하고 경제적인 도구이다. 한국은 기술적 잠재력에도 불구하고 해당 지역의 외교적 환경의 차이로 인해 이러한 상호 연결이 부족하며 수입과 국내 시장에 집중해야 한다. 그럼에도 불구하고 수요 유연화는 두 사례 모두에서 매우 중요하며 잠재력이 있다.

DSR 프로그램은 독일과 한국에서 모두 수립되었다. 산업 및 경제 DSR 조치는 지금까지 양국에서 가장 큰 영향을 미쳤다. 그럼에도 불구하고 양국은 DSR 프로그램의 범위를 확대하고 주거용 DSR 프로그램, 특히 열 펌프와 BEV를 통해 새로운 소비자의 잠재력을 활용할 수 있는 잠재력을 인식했다.

독일은 EnWG 조항의 통과로 이점표를 달성했다. 이는 BEV 시장 개발과 동시에 전력망 안정성에 중요한 것으로

간주된다. 이 규정은 DSO가 수요를 줄여야 할 필요성을 파악하는 경우 최소 4.2KWh의 충전 속도를 보장하여 소비자가 원하는 시간에 충전할 수 없다는 우려를 해소하려고 한다. 그러나 DSO가 충전 속도를 줄일 수 있도록 허용함으로써 전력망 안정성을 항상 보장할 수 있고 동시에 새로운 소비자는 지속적으로 연결할 수 있다. 전력망 서비스 요금이 낮아짐에 따라 비수요 시간대의 스마트 충전은 디밍을 최후의 수단으로 줄이도록 인센티브를 제공한다. 2025년까지 전기 소매업체가 실시간 전기 가격을 의무적으로 추가로 제공하면 수요와 공급을 더 잘 맞추기 위한 추가 인센티브로 작용할 것으로 보이며, 재생 에너지의 비중이 높고 가격이 낮은 것이 일반적으로 일치한다. 그러나 앞으로 이러한 조치의 잠재력을 최대한 활용하려면 앞서 언급한 스마트 미터를 가능한 한 빨리 독일 전역에 광범위하게 설치해야 한다.

반면 한국은 이미 고급 계량 인프라를 갖추고 있지만, 여전히 지원 규제 프레임워크와 인센티브가 부족하다. 현재 수요 반응 프로그램은 아직 개발 중이지만 범위가 제한되어 있다. 하지만 앞으로 모든 잠재력을 발휘하도록 확장할 계획이다. BEV 사용자를 직접 타겟으로 하는 한국 Plus DR 프로그램은 BEV 충전 및 재생 에너지 통합에 대한 수요를 더 잘 맞추기 위한 인센티브와 함께 작동한다. 계통망에서 재생 에너지 비중이 높은 시기에 충전하면 소비자에게 재정적 혜택이 제공된다. Plus DR의 미래 확장을 통해 한국은 새로운 풍력 및 PV 발전 통합을 용이하게 하고 BEV의 유연성 잠재력을 활용할 수 있는 길에 올랐다. 최근 발표된 VGI 프로젝트인 스마트 충전 촉진 및 연결된 DR 시스템 도입은 올바른 방향으로 나아가는 또 다른 단계이다. 전국적으로 약 400개의 KEPCO 저속 충전기의 스마트 충전 기능을 업그레이드하고 이 기능을 점진적으로 전국적으로 확장하려는 계획은 계통망에 BEV의 잠재력을 활용하려는 한국의 노력에 큰 잠재력이 있다. 그러나 독점적이고 고정된 전기 요금 체계에서는 이러한 노력의 인센티브가 낮아진다. 정적 ToU 가격은 수요를 부분적으로 전환하는 데 도움이 될 수 있지만, 특히 한국이 풍력 발전 용량을 확장할 계획이기 때문에 RE의 변동성을 완전히 충족하지는 못한다.

V2G에 대해 양국 모두 아직 구체적으로 규제적 접근 방식을 개발하는 단계에 있다. 양국 모두에서 많은 연구 및 시범 프로젝트가 시행되었다. 업계는 더 큰 규모의 시험을 시작하고 더 큰 규모의 상용화에 들어갈 준비가 된 듯하지만 여전히 많은 규제적 문제가 불분명하다. 최근 독일과 한국에서 각각의 로드맵이 통과된 것은 기존 문제를 더욱 해결하기 위한 올바른 방향으로 나아가는 단계이며 필수 법제화 과정을 곧 시작할 수 있을 것으로 보인다.

6 결론 및 협력 가능성

한국과 독일의 경우, 계통망 유연화와 BEV의 관리형 그리드 통합은 미래의 계통망을 균형 있게 유지하고 계통망에 재생에너지를 비용 효율적이고 안정적으로 통합하는 데 중요한 자원이 될 수 있다. 두 경제권 모두에서 BEV의 시장 램프는 지난 몇 년 동안 크게 증가했다. 작년에 흡수가 둔화되었음에도 불구하고 독일과 한국의 BEV 수는 여전히 임계치에 도달할 가능성이 높으며, 계통망 통합에 대한 관련 잠재적 우려, 과제 및 기회가 존재한다.

양국 모두 BEV의 유연성의 잠재력을 인식했다. 스마트 계통망과 미터의 홍보, 관세 제도와 DR 프로그램을 통한 보완적인 재정적 인센티브는 해당 과정에서 중요한 단계이다. 이러한 이니셔티브는 성과를 보여야 하며, 정부는 지속적으로 규제 프레임워크를 개발해야 한다. 전반적인 그림에서 고립된 계통망 시스템을 갖춘 한국은 독일보다 국내 유연성 옵션에 더 많이 의존한다는 점을 강조하는 것도 중요할 것이다. 독일은 유럽 내에서 국경 간 전기 거래의 혜택을 볼 수 있다.

유연성 옵션이 재정적으로 실행 가능하고 양국에서 광범위하게 실행되기 위해서는 규제 프레임워크를 조정하고 공정한 경쟁 시장 조건을 확립해야 한다. 한국과 독일은 모두 지난 몇 년 동안 BEV의 관리형 계통망 통합을 용이하게 하기 위해 몇 가지 결정적인 조치를 취했다. 해당 조치들은 실제 구현 시에 성공해야 한다.

한국은 스마트 미터의 배포에 있어서 세계적 리더 중 하나이다. 거의 모든 가구에 2024년 말까지 스마트 미터가 장착될 예정이며, 약 2,250만 대의 기기가 설치될 예정이다. 다양한 한국 수요 반응 프로그램과 가구 및 충전소와 같은 더욱 분산된 에너지 자원으로의 확장은 매우 유망하며, 추가로 집계기와 VPP가 시장에 더 많이 통합될 수 있다. 특히, Plus DR 프로그램은 세계 최초의 포지티브 DR 프로그램 중 하나로, 재생 에너지 출력 제한이 예상될 때 잉여 전기 소비에 대한 인센티브를 제공하여 한국의 노력을 강조한다.

V2G 솔루션에 관해서는 한국에는 아직 V2G에 대한 포괄적인 규정이 없다. 그러나 한국 정부는 2021년보다 광범위한 시범 사업을 승인했으며, 3차 스마트 계통망 기본 계획에서는 V2G를 전력 시장에 포함하고 이 기술을 더욱 상용화할 것으로 예상하였기에, 곧 예상되는 기술의 발전과 한국에서의 시장 도입을 뒷받침하고 있다.

올해는 독일에서 몇 가지 주요 규제 개발도 있었다. 에너지 전환의 디지털화를 재개하는 법은 관료주의적이지 않고 신속하게 스마트 미터기 설치를 촉진하는 것을 목표로 한다. 2030년까지 구속력 있는 목표가 있는 점진적인 확장 계획을 제시하고 있다. 늦어도 2025년까지 모든 스마트 미터 소유자는 동적 전기 요금의 혜택을 받게 된다. 가격이 낮을 때, 특히 재생 에너지에서 전기를 많이 생산하는 기간에 전기를 사용하거나 차량을 충전할 수 있게 된다. 따라서 공급과 수요가 더 잘 일치하며, 재생 에너지의 계통망 통합이 용이해질 것이다. 이미 오늘날 계통망 운영자에 따라 일부 고객의 경우에는 충전 관리를 허용하는 경우 더 낮은 계통망 요금(전기 요금의 약 20-30%를 차지함)의 혜택을 받을 수 있다. 그러나 이 옵션을 활용하는 고객의 수는 적다. 앞으로 해당 계약은 의무화될 예정이다. 이를 위해 에너지 산업법 제 14a 조에 따라 제어 가능한 소비 장치에 대한 규정이 추가로 개발되고 있다. 네트워크 운영자는 임박한 네트워크 과부하 발생 시 제어 신호를 통해 충전 전력을 약화할 수 있다. 그러나 이러한 개입을 최소한으로 유지하기 위해 소비자는 시간 가변 계통망 요금과 해당 재정적 인센티브를 통해 스스로 계통망 서비스 충전에 참여하도록 하는 동기부여가 이루어져야 한다. 이는 계통망 운영자가 새로운 소비 단위에도 불구하고 계통망 안정성을 보장할 수 있어야 한다는 요구와 소비자가 수요에 맞춰 차량을 충전할 수 없다는 우려 사이에서 균형을 맞추기 위한 노력이다.

V2G와 관련하여 독일의 상황은 한국과 유사하다. 2021년 연합 협정과 2022년 충전 인프라 마스터 플랜 II에서 정부는 V2G의 중요성과 도입을 약속했다. 그러나 양방향 충전(V2G)은 현재 연구 및 시범 프로젝트에만 사용된다. V2G의 대규모 도입을 달성하려면 법적 및 기술적 장벽을 더욱 제거해야 하며 명확한 규제 프레임워크를 수립해야 한다.

결론적으로, 양국 모두 BEV의 유연한 부하 관리를 용이하게 하기 위해 적절한 요금제와 수요 반응 프로그램을 도입했다. 그럼에도 불구하고, 특히 V2G와 VPP와 같은 유연성 및 새로운 행위자의 시장 통합과 관련하여 해야 할 일이 많이 남아 있다. 예를 들어, 전력 시장 설계(자유화 대 독점화)의 차이에도 불구하고, BEV를 전력 계통망에 유연성 옵션으로 도입하는 데 따른 문제와 과제는 양국에서 유사하다. V2G 기술의 통합은 기술적 관점에서 이미 가능하지만, 양국 모두 BEV에서

전기를 방출하는 것을 규제하는 적절한 규제 프레임워크가 필요하다. 게다가, 개인 소유자를 위한 인센티브 시스템의 설계는 매우 중요한데, BEV를 통한 전력 시장 참여가 현재로서는 경제적으로 실행 가능하지 않은 경우가 많기 때문이다.

전반적으로, 한국과 독일은 소비자를 위한 인센티브 제도 설계, 기술 장비 표준화, 유연성 옵션의 시장 통합 또는 규제 프레임워크 설계와 같은 주제에 대해 추가 협력과 교류를 할 수 있는 잠재력이 매우 크다. 특히 집계기를 통한 소규모 소비 단위의 대규모 통합은 유연성에 대한 큰 잠재력을 제공한다. 양국 모두 현재 다양한 유연성 자원의 역할에 대해 논의하고 있다. 예를 들어, BEV가 새로운 (예비) 가스 발전소의 필요성을 얼마나 줄일 수 있는지, 그리고 이러한 전통적인 발전소가 기존 보상 메커니즘에 의해 어느 정도 선호되는지에 대한 연구 등이 논의 중이다. 해당 논의는 정부와 산업 및 연구 분야의 이해 관계자가 가장 비용 효율적이고 지속 가능한 에너지 전환 및 시장을 달성하기 위해 가속화되어야 한다.

추가적인 협력 가능성은 다음과 같다.

- DR 프로그램/인센티브 설계: 예를 들어 BEV 시장 확대를 위태롭게 하지 않고도 소규모 소비 단위와 소비자의 수요 반응 조치에 대한 참여와 동기를 어떻게 보장할 수 있는가? 소비자는 반드시 계통망 안정성을 염두에 두고 있는 것은 아니다. 따라서 충분한 참여율을 보장하기 위한 DR 프로그램 설계는 양국 간의 유익한 교류 주제이다.
- V2G: 한국과 독일은 연구 및 시범 프로젝트와 관련하여 선두 주자이다. 규제 관련 교류는 계속 촉진되어야 하며 기존 프로젝트의 데이터와 결과를 공유해야 한다.
- 기술 장비/요구 사항(예: 통신 프로토콜)의 표준화 및 정의는 추가적인 협력 잠재력을 요구하지만, 지금까지 부분적으로만 활용되고 있다. 한국과 독일도 해당 부문에서 주도적인 역할을 할 수 있다.
- 유연성 자원의 일반적인 시장 통합, 공정한 참여 조건의 확립, 그리고 새로운 플레이어(예: 애그리게이터, VPP)의 처리 및 통합은 경험 교류에 있어 적합한 주제이다.

그림 목록

그림 1: BEV의 유연성으로 인한 경제적 및 시스템적 이점에 대한 예시적 추정치	12
그림 2: 2030년 독일의 총 수요 중 BEV의 예상 총 전기 소비량(TWh)	17
그림 3: 독일의 BEV에 대한 주요 목표 및 현재 수치 ...	17
그림 4: 독일의 BEV의 유연성으로 인한 경제적 및 시스템적 이점 추정치	20
그림 5: 한국 BEV의 주요 목표 및 현재 수치	25
그림 6: 한국에서 BEV의 유연성으로 인한 경제적 및 시스템적 이점 추정치	28
그림 7: 한국과 독일의 주요 수치, 추정치 및 목표 ...	31

Publication bibliography

50Hertz Transmission; Amprion; TenneT; TransnetBW (2023): Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2023. Erster Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber. With assistance of Tim Drees, Birte Greve, Christian Brehm, Claudia Halici. Available online at https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2023-03/NEP_2037_2045_V2023_1_Entwurf_Teil1_5.pdf, checked on 6/7/2023.

acatech; Leopoldina; Akademienunion (2021): Grid congestion as a challenge for the electricity system. Options for a future market design. Edited by acatech – National Academy of Science and Engineering, German National Academy of Sciences Leopoldina, Union of the German Academies of Sciences and Humanities. Available online at <https://en.acatech.de/publication/grid-congestion-as-a-challenge-electricity-system/>, checked on 6/5/2024.

ADAC (2024): Pkw-Neuzulassungen April 2024: E-Autos kommen nicht in Fahrt. Available online at <https://www.adac.de/news/neuzulassungen-kba/>, updated on 5/6/2024, checked on 5/8/2024.

Agora Energiewende (2015): The Europea Power System in 2030: Flexibility Challenges and Integration Benefits. An Analysis with a Focus on the Pentalateral Energy Forum Region. With assistance of Mirjam Stappel, Ann-Katrin Gerlach, Angela Scholz, Carsten Pape. Available online at https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2014/Ein-flexibler-Strommarkt-2030/Agora_European_Flexibility_Challenges_Integration_Benefits_WEB_Rev1.pdf, checked on 7/20/2023.

Agora Energiewende (2023a): Breaking free from fossil gas. A new path to a climate-neutral Europe. Version 1.1. With assistance of Andreas Graf, Murielle Gagnebin, Matthias Buck. Available online at https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_07_EU_GEXIT/A-EW_292_Breaking_free_WEB.pdf, checked on 7/20/2023.

Agora Energiewende (2023b): Climate-neutral power sytem 2035. How the German power sector can become climate-neutral by 2035. Executive Summary. With assistance of Elias Althoff, Hans Dambeck, Hanno Falkenberg, Aurel Wunsch, Inka Ziegenhagen, Christoph Maurer et al. Edited by Agora Energiewende. Available online at https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_11_DE_KNStrom2035/AEW_KNStrom2035_Summary_EN.pdf, checked on 6/7/2023.

Agora Energiewende (2024): Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2023. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2024. Available online at https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-35_DE_JAW23/A-EW_317_JAW23_WEB.pdf, checked on 5/7/2024.

Agora Verkehrswende (2023): Gesteuertes Laden. Warum es sich lohnt, beim Laden von Elektrofahrzeugen auf Stromangebot und Netzauslastung zu achten. With assistance of Luise Bangert, Wolfgang Fritz, Linke Christian. Available online at https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2023/Gesteuertes-Laden/97_Analyse-Gesteuertes_Laden.pdf.

Agora Verkehrswende; Agora Energiewende; Regulatory Assistance Project (RAP) (2019): Verteilnetzausbau für die Energiewende - Elektromobilität im Fokus. With assistance of Urs Maier, Frank Peter, Andreas Jahn. Available online at https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Netzausbau_Elektromobilitaet/AgoraRAP2019_VerteilnetzausbauElektromobilitaet.pdf, checked on 7/13/2023.

Ahn, Jongbo (2023): Overview on status & policies for ESS in Korea. KETEP.

BDEW (2023): BDEW zur Festlegung der Bundesnetzagentur zum §14a Energiewirtschaftsgesetz. Pressemitteilung. Available online at <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/bdew-zur-festlegung-der-bundesnetzagentur-zum-14a-energiewirtschaftsgesetz/>, updated on 12/6/2023, checked on 12/6/2023.

Becker, Sven (2023): Flexibilität in Erzeugung und Verbrauch: der natürliche Partner der erneuerbaren Energien. Edited by Handelsblatt live. Available online at <https://live.handelsblatt.com/flexibilitaet-in-erzeugung-und-verbrauch-der-natuerliche-partner-der-erneuerbaren-energien/>, updated on 4/5/2023, checked on 8/10/2023.

BEE (2023): Kraftwerksstrategie zu einer ganzheitlichen Flexibilitätsstrategie weiterentwickeln. Thesenpapier zur geplanten Kraftwerksstrategie der Bundesregierung. With assistance of Matthias Stark, Sandra Rostek. Edited by Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. Available online at https://www.bee-ev.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Meldungen/Positionspapiere/2023/20230417_BEE_Thesenpapier_Kraftwerksstrategie.pdf, checked on 8/10/2023.

Bloess, Andreas; Schill, Wolf-Peter; Zerrahn, Alexander (2018): Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials. In *Applied Energy* 212, pp. 1611–1626. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.073.

BMDV (2021): Förderrichtlinie "Öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland". Edited by Bundesministerium für Digitales und Verkehr. Available online at https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/foerderrichtlinie-oeffentlich-zugaengliche-ladeinfrastruktur.pdf?__blob=publicationFile, checked on 7/20/2023.

BMJ (2021): GEIG - Gesetz zum Aufbau einer gebäudeintegrierten Lade- und Leitungsinfrastruktur für die Elektromobilität. Edited by Bundesministerium der Justiz. Available online at <https://www.gesetze-im-internet.de/geig/BJNR035400021.html>, updated on 7/20/2023, checked on 7/20/2023.

BMWK (2021): Gebäude-Elektromobilitätsinfrastruktur-Gesetz (GEIG). BMWI. Available online at <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Service/Gesetzesvorhaben/gebaeude-elektromobilitaetsinfrastruktur-gesetz.html>, updated on 3/5/2021, checked on 5/8/2024.

BMWK (2023a): Gesetzlicher Smart-Meter-Rolloutfahrplan. Edited by Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Available online at https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/II/Infografiken/infografik-smart-meter-rolloutfahrplan.pdf?__blob=publicationFile&v=5, updated on 2023, checked on 6/7/2023.

BMWK (2023b): Stromspeicher-Strategie. Handlungsfelder und Maßnahmen für eine anhaltende Ausbaudynamik und optimale Systemintegration von Stromspeichern. Available online at https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/stromspeicherstrategie-231208.pdf?__blob=publicationFile&v=8, checked on 5/13/2024.

BMWK (2024): Agreement on Power Station Strategy. With assistance of BMWK. BMWK. Available online at <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2024/02/20240205-agreement-on-power-station-strategy.html>, updated on 2/5/2024, checked on 5/13/2024.

BNetzA (2017): Flexibility in the electricity system. Status quo, obstacles and approaches for a better use of flexibility. Discussion Paper. Edited by Bundesnetzagentur. Available online at https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/EN/Areas/ElectricityGas/FlexibilityPaper_EN.pdf?__blob=publicationFile&v=2, checked on 6/7/2023.

BNetzA (2022a): Bericht zum Zustand und Ausbau der Verteilernetze 2021. Edited by Bundesnetzagentur. Available online at https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/NetzentwicklungUndSmartGrid/ZustandAusbauVerteilernetze2021.pdf?__blob=publicationFile&v=4, checked on 7/20/2023.

BNetzA (2022b): Kennzahlen der Versorgungsunterbrechungen Strom. Edited by Bundesnetzagentur. Available online at https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Versorgungsunterbrechungen/Auswertung_Strom/start.html, updated on 7/19/2023, checked on 7/19/2023.

BNetzA (2023a): § 14a EnWG | Entgeltmodell. 2. Konsultation | BK8-22/010-A. Bundesnetzagentur. Bonn. Available online at https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/BK08/BK8_06_Netzentgelte/68_%C2%A7%2014a%20EnWG/Downloads/BK8-22-010-A_erl%C3%A4uternde_Pr%C3%A4sentation_zweite_Kons.pdf;jsessionid=F9132460F5FFD85A11700E66E5ED8838?__blob=publicationFile&v=2, updated on 2023, checked on 7/20/2023.

BNetzA (2023b): Bericht zum Zustand und Ausbau der Verteilernetze 2022. Available online at https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/NetzentwicklungUndSmartGrid/ZustandAusbauVerteilernetze2022.pdf?__blob=publicationFile&v=1, checked on 5/15/2024.

BNetzA (2023c): Beschluss zur Integration von steuerbaren Verbrauchseinrichtungen und steuerbaren Netzanschlüssen nach § 14a Energiewirtschaftsgesetz (EnWG). Beschlusskammer 6. Available online at https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/BK6-GZ/2022/BK6-22-300/Beschluss/BK6-22-300_Beschluss_20231127.pdf?__blob=publicationFile&v=1, checked on 12/6/2023.

BNetzA (2023d): Elektromobilität: Öffentliche Ladeinfrastruktur. Edited by Bundesnetzagentur. Available online at <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/E-Mobilitaet/start.html>, updated on 7/20/2023, checked on 7/20/2023.

BNetzA (2023e): Festlegung von Netzentgelten für steuerbare Anschlüsse und Verbrauchseinrichtungen (NSAVER) nach § 14a EnWG. Beschlusskammer 8. Available online at https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/BK8-GZ/2022/2022_4-Steller/BK8-22-0010/BK8-22-0010-A_Festlegung_Download.pdf?__blob=publicationFile&v=5, checked on 12/6/2023.

BNetzA (2023f): Netzentwicklung und Intelligente Systeme. Edited by Bundesnetzagentur. Available online at <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/NetzentwicklungSmartGrid/start.html>, updated on 7/20/2023, checked on 7/20/2023.

BNetzA (2023g): Regelenergie. Bundesnetzagentur. Available online at <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Netzengpassmanagement/Engpassmanagement/Regelenergie/start.html>, updated on 8/10/2023, checked on 8/10/2023.

BNetzA (2024a): Bundesnetzagentur bestätigt mit dem Netzentwicklungsplan Strom 2023-2037/2045 das Übertragungsnetz für die Klimaneutralität. Available online at https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20240301_NEP.html, updated on 3/1/2024, checked on 5/8/2024.

BNetzA (2024b): Bundesnetzagentur veröffentlicht Daten zum Strommarkt 2023. Available online at https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20240103_SMARD.html, updated on 1/3/2024, checked on 5/8/2024.

BNetzA (2024c): Grid development and intelligent networks. Available online at <https://www.bundesnetzagentur.de/EN/Areas/Energy/GridDevelopment/start.html>, updated on 5/15/2024, checked on 5/15/2024.

BNetzA (2024d): Transmission system operators in Germany. Available online at <https://www.smard.de/page/en/wiki-article/5884/205528>, updated on 5/8/2024, checked on 5/8/2024.

BNetzA; BKartA (2022): Monitoringbericht 2022. Monitoringbericht gemäß § 63 Abs. 3 i. V. m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i. V. m. § 53 Abs. 3 GWB. Stand: 14. Dezember 2022. Bundesnetzagentur; Bundeskartellamt. Bonn. Available online at https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/MonitoringberichtEnergie2022.pdf?__blob=publicationFile&v=6, checked on 7/20/2023.

BNetzA; BKartA (2023): Monitoringbericht 2023. Available online at <https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/MonitoringberichtEnergie2023.pdf>, checked on 5/13/2024.

Bundesregierung (2022a): Masterplan Ladeinfrastruktur II der Bundesregierung. Edited by Bundesregierung, Bundesministerium für Digitales und Verkehr. Available online at https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/masterplan-ladeinfrastruktur-2.pdf?__blob=publicationFile, checked on 6/7/2023.

Bundesregierung (2022b): Nachhaltige Mobilität - Nicht weniger fortbewegen, sondern anders. Edited by Bundesregierung. Available online at <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/eenergie-und-mobilitaet/nachhaltige-mobilitaet-2044132>, updated on 6/7/2023, checked on 6/7/2023.

Bundesregierung (2023a): EEG 2023 - Ausbau erneuerbarer Energien beschleunigen. Edited by Bundesregierung. Available online at <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/novelle-eeg-gesetz-2023-2023972>, updated on 6/7/2023, checked on 6/7/2023.

Bundesregierung (2023b): Mehr Ladepunkte für E-Autos. Edited by Bundesregierung. Available online at <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/ladepunkte-in-deutschland-1884666>, updated on 7/20/2023, checked on 7/20/2023.

Businesswire (2023): Gridwiz Celebrates Successful V2G Projects in South Korea. Available online at <https://www.businesswire.com/news/home/20230629370000/en/Gridwiz-Celebrates-Successful-V2G-Projects-in-South-Korea>, updated on 6/29/2023, checked on 5/14/2024.

Christian Schaudwet (11/28/2023): Netzbetreiber dürfen ab Januar Verbrauch mitsteuern. Tagesspiegel Background. Available online at <https://background.tagesspiegel.de/energie-klima/netzbetreiber-duerfen-ab-januar-verbrauch-mitsteuern>.

Clean Energy Wire (2023): Abrupt end to German electric car subsidies fuels doubts about green mobility target. Available online at <https://www.cleanenergywire.org/news/abrupt-end-german-electric-car-subsidies-fuels-doubts-about-green-mobility-target>, updated on 12/18/2023, checked on 5/8/2024.

ContextCrew Neue Energy GmbH (2023): Im Blickpunkt: Flexibilitätsmärkte zur Stabilisierung des Stromnetzes. Available online at <https://www.contextcrew.de/im-blickpunkt-flexibilitaetsmaerkte-zur-stabilisierung-des-stromnetzes/>, updated on 7/15/2023, checked on 8/10/2023.

Electimes (2022): Jeju Island Plus DR issued only 3 times in 6 months. Available online at <https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=302917>, updated on 4/4/2022, checked on 5/14/2024.

electrive.net (2022): Hyundai plant V2G-Funktionen für Elektroautos - electrive.net. Available online at <https://www.electrive.net/2022/04/12/hyundai-plant-v2g-funktionen-fuer-elektroautos/>, updated on 4/12/2022, checked on 5/14/2024.

Emi Bertoli (2022): Demand Response. Technology deep dive. With assistance of Emi Bertoli, Vida Rozite, Pauline Henriot, Sungjin Oh, Timothy Goodson. Edited by IEA. IEA. Available online at <https://www.iea.org/reports/demand-response>, updated on 6/22/2023, checked on 6/22/2023.

Enerdata (2022): South Korea Energy Information. Available online at <https://www.enerdata.net/estore/energy-market/south-korea/>, updated on 8/16/2023, checked on 8/16/2023.

Enerdata (2023): South Korea targets 34.6% nuclear and 30.6% renewable power generation in 2036. Available online at <https://www.enerdata.net/publications/daily-energy-news/south-korea-targets-346-nuclear-and-306-renewable-power-generation-2036.html>, updated on 3/27/2023, checked on 8/16/2023.

Energydaily (2023): KEPCO implements electric vehicle charging 'Plus DR' system. Available online at <https://www.energydaily.co.kr/news/articleView.html?idxno=136679>, updated on 5/14/2024, checked on 5/14/2024.

Energydaily (2024): KEPCO takes the lead in stabilizing the power system with electric vehicle smart charging (V1G) technology. Available online at <http://www.energydaily.co.kr/news/articleView.html?idxno=145337>, updated on 4/3/2024, checked on 5/22/2024.

European Commission (2019): Effect of electromobility on the power system and the integration of RES - Publications Office of the EU. With assistance of Annika Klettke, Albert Moser, Tobias Bossmann, Paul Barberi, Laurent Fournié. Edited by European Commission. Available online at <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0d44e933-6d4d-11e9-9f05-01aa75ed71a1/language-en>, checked on 7/20/2023.

European Commission (2020): Benchmarking smart metering deployment in the EU-28. With assistance of Directorate-General for Energy, Clément Alaton, Frédéric Tounquet. Edited by European Commission. Brussels. Available online at https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b397ef73-698f-11ea-b735-01aa75ed71a1/language-en?WT_mc_id=Searchresult&WT_ria_c=37085&WT_ria_f=3608&WT_ria_ev=search, checked on 7/20/2023.

European Commission (2022): Zero emission vehicles: first 'Fit for 55' deal will end the sale of new CO2 emitting cars in Europe by 2035. With assistance of Tim McPhie, Ana Crespo Parrondo. European Commission. Brussels. Available online at https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6462, updated on 10/28/2022, checked on 6/5/2024.

European Commission (2023a): Smart grids and meters. Smart grids and smart meters enable better management of energy networks and more efficient consumption. Edited by European Commission ((Keine Angabe)). Available online at https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters_en, updated on 7/20/2023, checked on 7/20/2023.

European Commission (2023b): Trans-European Networks for Energy. Linking the energy infrastructure of EU countries. Edited by European Commission. Available online at https://energy.ec.europa.eu/topics/infrastructure/trans-european-networks-energy_en#priority-thematic-areas, updated on 7/20/2023, checked on 7/20/2023.

European Council (2023): Alternative fuels infrastructure: Council adopts new law for more recharging and refuelling stations across Europe. Press release. With assistance of Dimosthenis Mammonas. Edited by Council of the European Union. Available online at <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/07/25/alternative-fuels-infrastructure-council-adopts-new-law-for-more-recharging-and-refuelling-stations-across-europe/>, updated on 8/10/2023, checked on 8/10/2023.

European Council; European Parliament (2023): Regulation of the European Parliament and of the Council on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU. European Council; European Parliament. Available online at <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-25-2023-INIT/en/pdf>, updated on 2023, checked on 8/10/2023.

European Parliament (2023): Fit for 55: deal on charging and fuelling stations for alternative fuels. With assistance of Gediminas Vilkas. Edited by European Parliament. Available online at <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20230327IPR78504/fit-for-55-deal-on-charging-and-fuelling-stations-for-alternative-fuels>, updated on 7/19/2023, checked on 7/19/2023.

EY (2020): Barometer - Digitalisierung der Energiewende. Digitalisierung 2020: Spürbare Fortschritte sowie neue Hindernisse bei Regulierung und Umsetzung. Edited by BMWK. Available online at https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/barometer-digitalisierung-der-energiewende-berichtsjaehr-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=18, checked on 5/13/2024.

Finanztip (2024): E-Auto Förderung 2024: Umweltbonus weg: So gibt's noch Zuschüsse für ein E-Auto. Available online at <https://www.finanztip.de/neuwagen-kaufen/e-auto-foerderung/>, updated on 2/2/2024, checked on 5/8/2024.

Fraunhofer ISE; Fraunhofer IEE; Becker Büttner Held (2023): Neues Strommarktdesign. Neues Strommarktdesign für die Integration fluktuierender Erneuerbarer Energien. Edited by Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. Kassel, Freiburg, Berlin. Available online at https://www.klimaneutrales-stromsystem.de/pdf/Strommarktdesignstudie_BEE_final_Stand_14_12_2021.pdf, checked on 8/10/2023.

Fraunhofer ISI; Öko-Institut; Prognos AG (2021): Entwicklung des Bruttostromverbrauchs bis 2030. Berechnungsergebnisse aus dem Szenario 1. With assistance of Andreas Kemmler, Aurel Wunsch, Heiko Burret. Edited by Fraunhofer ISI, Öko-Institut, Prognos AG. Available online at https://www.prognos.com/sites/default/files/2021-11/20211116_Kurzpapier_Bruttostromverbrauch2018-2030.pdf, checked on 6/7/2023.

Gabel, Mathias (2023): Stabile Verteilnetze für die schnelle Integration der neuen flexiblen Lasten. Anhörung Bundesnetzagentur § 14a Festlegungen. Edited by Netze BW. Available online at https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/BK08/BK8_06_Netzentgelte/68_%C2%A7%2014a%20EnWG/Downloads/BK8-22-0010-A%20Vortrag_Netze_BW.pdf;jsessionid=F9132460F5FFD85A11700E66E5ED8838?__blob=publicationFile&v=2, checked on 7/20/2023.

Geißler, Ralf (2023): Für wen sich variable Stromtarife wirklich lohnen. Available online at <https://www.mdr.de/nachrichten/deutschland/wirtschaft/variabler-strompreis-boerse-sparen-hohe-kosten-100.html>, updated on 4/19/2023, checked on 6/7/2023.

German Energy Agency (2021): Flexibility for the Turkish and German Electricity Grids. With assistance of Jens Völler, Katerina Simou, Yannick Severin dos Santos, Lea-Valeska Giebel, Matthias Simolka, Meric Tokyay, Elif Koyuncuoglu. Edited by Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Berlin.

German Institute for Economic Research (2023): Ampel-Monitor Energiewende #5: Eine Million Elektrofahrzeuge, Zulassungsrekord im Dezember. Blogbeitrag vom 05. Januar 2023. With assistance of Wolf-Peter Schill. Edited by Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. Berlin. Available online at https://www.diw.de/de/diw_01.c.862674.de/nachrichten/ampel-monitor-energiewende_5_eine-million-elektrofahrzeuge_zulassungsrekord_im-dezember.html, updated on 6/7/2023, checked on 6/7/2023.

Gnann, Till; Speth, Daniel; Plötz, Patrick; Wietschel, Martin; Krail, Michael (2022): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge - Rückblick und Ausblick bis 2030. Working Paper Sustainability and Innovation. Edited by Fraunhofer ISI. Karlsruhe (05/2022). Available online at https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2022/WP05-2022_Markthochlaufszszenarien_E-Fahrzeuge_GNT-final.pdf, checked on 7/19/2023.

Großmann, Dirk; Eisele, Fabian (2022): Intelligentes Laden von E-Autos nach ISO-15118-20-Standard. Available online at <https://www.all-electronics.de/e-mobility/laden/intelligentes-laden-nach-iso-15118-20-standard-97-83-277.html>, updated on 10/24/2022, checked on 7/13/2023.

He-rim, Jo (2021): Vehicle-to-grid service approved under regulatory sandbox - The Korea Herald. Available online at <https://www.koreaherald.com/view.php?ud=20210728000850>, updated on 7/28/2021, checked on 5/14/2024.

Hermann, Hauke; Weibelzahl, Martin; Kemfert, Claudia; Leprich, Uwe (2023): Neues Strommarkt-Design: Welches passt am besten zu Wind und Sonne? Edited by Science Media Center Germany. Available online at <https://www.sciencemediacenter.de/alle-angebote/science-response/details/news/neues-strommarkt-design-welches-passt-am-besten-zu-wind-und-sonne/>, updated on 8/10/2023, checked on 8/10/2023.

Hydrogeninsight (2024): South Korea's largest operator of hydrogen filling stations in crisis after top shareholder refuses to invest more capital. Available online at <https://www.hydrogeninsight.com/transport/south-koreas-largest-operator-of-hydrogen-filling-stations-in-crisis-after-top-shareholder-refuses-to-invest-more-capital/2-1-1607209>, updated on 3/4/2024, checked on 5/21/2024.

IEA (2020a): Global EV Outlook 2020. Entering the decade of electric drive? Edited by International Energy Agency. International Energy Agency. Available online at https://iea.blob.core.windows.net/assets/af46e012-18c2-44d6-becd-bad21fa844fd/Global_EV_Outlook_2020.pdf, checked on 7/14/2023.

IEA (2020b): The role of CCUS in low-carbon power systems. Edited by International Energy Agency. Available online at https://iea.blob.core.windows.net/assets/ccdcb6b3-f6dd-4f9a-98c3-8366f4671427/The_role_of_CCUS_in_low-carbon_power_systems.pdf, checked on 7/20/2023.

IEA (2021): Reforming Korea's Electricity Market for Net Zero. International Energy Agency. Available online at <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ab5343c6-5220-4154-a88e-750de58b9c8c/ReformingKoreasElectricityMarketforNetZero.pdf>, checked on 5/6/2024.

IEA (2022a): Grid Integration of Electric Vehicles. A manual for policy makers. Edited by International Energy Agency. International Energy Agency. Available online at <https://iea.blob.core.windows.net/assets/21fe1dcb-c7ca-4e32-91d4-928715c9d14b/GridIntegrationofElectricVehicles.pdf>, checked on 7/11/2023.

IEA (2022b): Smart Grids. Infrastructure deep dive. With assistance of Pablo Gonzalez. Edited by IEA. Available online at <https://www.iea.org/reports/smart-grids>, updated on 6/22/2023, checked on 6/22/2023.

IEA (2023a): Global EV Data Explorer. Korea. Edited by International Energy Agency. Available online at <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>, updated on 4/26/2023, checked on 6/19/2023.

IEA (2023b): Global EV Outlook 2023. Catching up with climate ambitions. Edited by International Energy Agency. Available online at <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dacf14d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf>, checked on 6/19/2023.

IEA (2023c): Korea Electricity Security Policy. Edited by International Energy Agency. Available online at <https://www.iea.org/articles/korea-electricity-security-policy>, checked on 6/19/2023.

IEA (2023d): Managing Seasonal and Interannual Variability of Renewables. Edited by International Energy Agency. International Energy Agency. Available online at <https://iea.blob.core.windows.net/assets/bfe623d2-f44e-49cb-ae25-90add42d750c/ManagingSeasonalandInterannualVariabilityofRenewables.pdf>, checked on 6/23/2023.

IEA (2023e): Renewables 2022. Analysis and forecast to 2027. Revised Version, January 2023. Edited by International Energy Agency. Available online at <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ada7af90-e280-46c4-a577-df2e4fb44254/Renewables2022.pdf>, checked on 7/19/2023.

IEA (2023f): World Energy Investment 2023. Edited by International Energy Agency. International Energy Agency. Available online at <https://iea.blob.core.windows.net/assets/54a781e5-05ab-4d43-bb7f-752c27495680/WorldEnergyInvestment2023.pdf>, checked on 6/23/2023.

IEA (2024a): Global EV Outlook 2024. Moving towards increased affordability. Paris. Available online at <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a9e3544b-0b12-4e15-b407-65f5c8ce1b5f/GlobalEVO Outlook2024.pdf>, checked on 5/21/2024.

IEA (2024b): Korea. Available online at <https://www.iea.org/countries/korea/emissions/>, updated on 5/21/2024, checked on 5/21/2024.

IEA; KEEI (2021): Korea Electricity Security Review. A joint report with the Korea Energy Economics Institute. Edited by International Energy Agency, Korea Energy Economics Institute. Available online at <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a8539b34-fb1b-42cc-ba09-e08637a59bc1/KoreaElectricitySecurityReview.pdf>, checked on 8/16/2023.

Invest Korea (2023): Jeju Island Strives to Become a Distributed Energy Specialized Area. Edited by Yonhap News. Available online at https://www.investkorea.org/jj-en/bbs/i-1497/detail.do?ntt_sn=491338, updated on 8/10/2023, checked on 8/10/2023.

IRENA (2019): Innovation Outlook: Smart charging for electric vehicles. Edited by International Renewable Energy Agency. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. Available online at https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_Innovation_Outlook_EV_smart_charging_2019.pdf?rev=41ac5142c4f140779c2d91679658cade, checked on 6/23/2023.

IRENA (2023a): Innovation landscape for smart electrification: Decarbonising end-use sectors with renewable power. Edited by International Renewable Energy Agency. International Renewable Energy Agency. Available online at https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/IRENA_Innovation_landscape_smart_electrification_2023.pdf?rev=786ef5cd85024414b21bc32d0af8be3c, checked on 7/13/2023.

IRENA (2023b): World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway. Volume 1. Edited by International Renewable Energy Agency. International Renewable Energy Agency. Available online at https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/IRENA_World_energy_transitions_outlook_v_1_2023.pdf?rev=b1d4be858ad549a9a750921d0f2b5d53.

KAS; KOTI (2024): Mobility Transformation. Republic of Korea. Available online at <https://www.kasmobilitytransformation.com/>, checked on 6/4/2024.

KBA (2024): Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2024. Available online at https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Fahrzeugbestand/2024/pm08_fz_bestand_pm_komplett.html?snn=3662144, updated on 3/4/2024, checked on 5/8/2024.

Kbiznews (2021): KEPCO uses electric vehicles as a demand resource. Available online at <http://www.kbiznews.co.kr/news/articleView.html?idxno=87047>, updated on 5/14/2024, checked on 5/14/2024.

KEEI (2017): Study on strategies for the energy industry to respond to the growth of e-mobility (1/4). Available online at <http://www.keei.re.kr/keei/download/KIP2017.pdf>, checked on 5/22/2024.

KEPCO (2023a): Electric Rates Table. Available online at <https://home.kepco.co.kr/kepco/EN/F/htmlView/ENFBHP00109.do?menuCd=EN060201>, checked on 6/19/2023.

KEPCO (2023b): Establishment of the 10th long-term transmission and substation facility plan to establish national energy security. Available online at https://home.kepco.co.kr/kepco/PR/ntcob/ntcobView.do?pageIndex=1&boardCd=BRD_000117&boardSeq=21061873&menuCd=FN06030103, updated on 5/8/2023, checked on 5/22/2024.

KEPRI (2024): Fields of our research. Smart Power Distribution. KEPRI. Available online at <https://www.kepri.re.kr:20808/eng/group/field-11>, updated on 5/21/2024, checked on 5/21/2024.

Kim, Doyob (2022): Unlocking the Potential of Distributed Energy Resources. Power system opportunities and best practices. Edited by International Energy Agency. International Energy Agency. Available online at https://iea.blob.core.windows.net/assets/3520710c-c828-4001-911c-ae78b645ce67/UnlockingthePotentialofDERs_Powersystemopportunitiesandbestpractices.pdf, checked on 7/12/2023.

Kim, Eun-Hwan (2023): Environmental changes and opportunity factors in the demand response market. Available online at <http://www.keaj.kr/news/articleView.html?idxno=4900>, updated on 2023, checked on 5/13/2024.

KOTI (2024): General Research. Available online at <https://www.koti.re.kr/eng/bbs/generalRschList.do>, updated on 5/13/2024, checked on 5/13/2024.

KSGA (2024): Roadmap for Smart Grid. Edited by Korea Smart Grid Association. Available online at <https://www.ksga.org/eng/info/roadmap.do>, updated on 5/21/2024, checked on 5/21/2024.

KSGI (2023): Special Act on Promotion of Distributed Energy passed by the National Assembly. Available online at https://www.smartgrid.or.kr/bbs/board.php?tbl=bbs51&mode=VIEW&num=24&category=&findType=&findWord=&sort1=&sort2=&it_id=&hop_flag=&mobile_flag=&page=1#, updated on 6/5/2023, checked on 5/22/2024.

KSGI (2024): About KSGI. Vision & Goals. Edited by Korea Smart Grid Institute. Available online at <https://www.smartgrid.or.kr/sub01/sub03.php>, updated on 8/16/2023, checked on 8/16/2023.

Lee, Kumjung (2023): Technology trends & Policy developments on Smart grids in Korea. KETEP.

Miha Jensterle, Regina Yoonmie Soh, Maike Venjakob, Oliver Wagner (2019): System Integration of Renewables and Smart Grids in Korea. adelphi, Wuppertal Institut. Available online at https://www.energypartnership-korea.org/fileadmin/user_upload/korea/media_elements/8-Study_2019_System_Integration_of_RE_and_Smart_Grids_in_Korea.pdf, checked on 5/14/2024.

MOE (2023): Environment ministry to reform rule on subsidies for the purchase of EVs in 2023 to popularize EVs. Available online at <https://eng.me.go.kr/eng/web/board/read.do?menuId=461&boardMasterId=522&boardId=1582640>, updated on 2/24/2023, checked on 5/21/2024.

MOE (2024): Announcement of the First Carbon Neutrality and Green Growth Implementation Review Results with Direct Participation of Climate Crisis Stakeholders. Available online at <https://eng.me.go.kr/eng/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=titleOrContent&searchValue=greenhouse+gas+emissions&menuId=461&orgCd=&boardId=1648880&boardMasterId=522&boardCategoryId=&decorator>, updated on 1/4/2024, checked on 5/13/2024.

MOTIE (2019): Third Energy Master Plan. A New Energy Paradigm for the Future. Available online at <https://www.etrans.or.kr/ebook/05/files/assets/common/downloads/Third%20Energy%20Master%20Plan.pdf>, checked on 5/14/2024.

MOTIE (2020): 9th Basic Plan for Power Supply and Demand. Available online at <https://policy.asiapacificenergy.org/sites/default/files/9th%20Basic%20Plan%20for%20Power%20Supply%20and%20Demand%20.pdf>, checked on 5/22/2024.

MOTIE (2021): 4th Basic Plan for the Eco-friendly Vehicles (2021-2025). Edited by Ministry of Trade, Industry and Energy. Available online at http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=163830&bbs_cd_n=81¤tPage=1&search_key_n=&cate_n=1&dept_v=&search_val_v=, updated on 8/17/2023, checked on 8/17/2023.

MOTIE (2023a): 3rd Basic Plan for Smart Grid.

MOTIE (2023b): The 10th Basic Plan for Long-Term Electricity Supply and Demand.

Next Kraftwerke (2022): Honda und Next Kraftwerke präqualifizieren E-Auto-Flotte für Primärregelleistung in Amprions Netzgebiet. Next Kraftwerke. Available online at <https://www.next-kraftwerke.de/neues/regelleistung-honda>, updated on 11/25/2022, checked on 6/4/2024.

NLL (2023a): Förderung von Infrastruktur durch die Bundesregierung. Available online at https://nationale-leitstelle.de/verstehen/forderung_von_ladeinfrastruktur_durch_die_bundesregierung/, updated on 6/7/2023, checked on 6/7/2023.

NLL (2023b): Übersicht Förderprogramme und Förderrichtlinien. Available online at https://nationale-leitstelle.de/foerdern/#Das_Deutschlandnetz, updated on 7/20/2023, checked on 7/20/2023.

NLL (2024a): Bidirektionales Laden flächendeckend ermöglichen. Beirat der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur präsentiert Handlungsempfehlungen im BMDV. Available online at <https://nationale-leitstelle.de/bidirektionales-laden-flaechendeckend-ermoeglichen-beirat-der-nationalen-leitstelle-ladeinfrastruktur-praesentiert-handlungsempfehlungen-im-bmdv/>, updated on 3/11/2024, checked on 5/13/2024.

NLL (2024b): Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur für E-Mobilität in Deutschland. Available online at <https://nationale-leitstelle.de/>, updated on 5/15/2024, checked on 5/15/2024.

NLL (2024c): Öffentliche Ladeinfrastruktur. Report der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur Dezember 2023 - Februar 2024. Available online at https://nationale-leitstelle.de/wp-content/uploads/2024/02/oeLIS_Report_2023_Dez_2024_Feb.pdf, checked on 5/8/2024.

NOW GmbH (2021): Charging Infrastructure - NOW GmbH. Available online at <https://www.now-gmbh.de/en/sectors-themes/mobility-infrastructure-provision/electricity/>, updated on 6/16/2021, checked on 5/8/2024.

NOW GmbH (2023a): Bestand nach Fahrzeugklassen. Edited by Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie. Available online at <https://www.now-gmbh.de/datenfinder/bestand-pkw-lkw-bus-zugmaschinen/>, updated on 3/21/2023, checked on 6/7/2023.

NOW GmbH (2023b): Universelles, bidirektionales und kostenoptimiertes Onboard-Ladegerät (UniCharge). Available online at <https://www.now-gmbh.de/projektfinder/universelles-bidirektionales-und-kostenoptimiertes-onboard-ladegeraet-unicharge/>, updated on 2/21/2023, checked on 5/8/2024.

NOW GmbH (2024): Herstellerbefragung E-Pkw. Marktentwicklung und Technologietrends. Available online at https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2024/04/NOW_Factsheet-Herstellerbefragung-E-Pkw.pdf, checked on 5/8/2024.

Okamura, Toshiya; Doi, Naoko; Thomas, Stefan; Kolde, Lisa (2022): The role of batteries towards carbon neutrality: How can distributed electricity storage contribute to balancing supply and demand in power markets as well as in power grids? Study for the GJETC. Edited by Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, The Institute for Energy Economics, Japan, German-Japanese Energy Transition Council (GJETC). Available online at https://gjetc.org/wp-content/uploads/2022/06/GJETC_Role-of-batteries-towards-carbon-neutrality.pdf, checked on 6/30/2023.

Park, Kijun; Jang, Dongsik; Kim, Sangok; Lim, Youseok; Lee, Jungho (2023): A Grid-Friendly Electric Vehicle Infrastructure: The Korean Approach. In *IEEE Power and Energy Mag.* 21 (6), pp. 28–37. DOI: 10.1109/MPE.2023.3308232.

Renewable Energy Institute (2023a): International Power Interconnections Progress and Help Countries in the Energy Crisis. With assistance of Romain Zissler. Available online at <https://www.renewable-ei.org/en/activities/column/REupdate/20230119.php>, updated on 1/19/2023, checked on 5/22/2024.

Renewable Energy Institute (2023b): South Korea: Low Renewable Energy Ambitions Result in High Nuclear and Fossil Power Dependencies. Available online at https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/REI_SKoreaReport_202311_EN.pdf, checked on 5/22/2024.

Reppert, Thorsten (2023): Local-level ownership of electricity grids: An analysis of Germany's distribution system operators (DSOs). In *Utilities Policy* 85, p. 101678. DOI: 10.1016/j.jup.2023.101678.

Shin & Kim LLC (2023): Enactment of the Dispersed Energy Promotion Special Act. Available online at <https://www.shinkim.com/eng/media/newsletter/2131?page=0&code=&keyword=>, updated on 6/16/2023, checked on 5/22/2024.

Sieler, Roman; Dörr, Henri (2023): Certification of green and low-carbon hydrogen. An overview of international and national initiatives. Edited by Japanese-German Energy Partnership Team. Japanese-German Energy Partnership Team. Available online at https://www.energypartnership.jp/fileadmin/user_upload/japan/media_elements/adelphi_-_International_Overview_-_Certification_of_Clean_and_Green_Hydrogen.pdf.

smartEN (2022): Local Flexibility Markets. smartEN Spotlight. Edited by Smart Energy Europe. Brussels. Available online at <https://smarten.eu/wp-content/uploads/2022/07/Spotlight-Local-Flexibility-Markets.pdf>, checked on 8/8/2023.

smartEN; DNV (2022): Demand-side flexibility in the EU. Quantification of benefits in 2030. With assistance of Aurora Sáez Armenteros, Hans de Heer, Laura Fiorini, María Miranda Castillo, Thijs Slot, Andrés Pinto-Bello Gómez. Edited by Smart Energy Europe: DNV. Available online at https://smarten.eu/wp-content/uploads/2022/09/SmartEN-DSF-benefits-2030-Report_DIGITAL.pdf, checked on 7/19/2023.

Solutions for Our Climate (2022): The Unlevel Playing Field. How the Power Market Structure Discriminates Against Demand Response to Favor Gas Power Generation. With assistance of Gyuri Cho, Gayeong Son. Available online at https://forourclimate.org/hubfs/%5BENG%5D%20The%20Unlevel%20Playing%20Field_How%20the%20Power%20Market%20Structure%20Discriminates%20Against%20Demand%20Response%20to%20Favor%20Gas%20Power%20Generation.pdf, checked on 5/13/2024.

Sorge, Petra; Raymunt, Monica (2023): Germany to Drop Electric Car Charging Goals as People Plug EVs at Home. Available online at <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-06-08/germany-to-walk-back-charging-goal-as-people-plug-evs-at-home#xj4y7vzkg>, updated on 6/8/2023, checked on 7/20/2023.

Statista (2023): Stromnetzbetreiber in Deutschland. Available online at <https://de.statista.com/statistik/studie/id/21844/dokument/stromnetzbetreiber-in-deutschland/>, checked on 5/8/2024.

Statista (2024a): South Korea: total number of registered electric vehicles 2023. Available online at <https://www.statista.com/statistics/1097976/south-korea-total-registration-number-of-electric-vehicles/>, updated on 4/9/2024, checked on 5/21/2024.

Statista (2024b): Stromaustauschsaldo Deutschlands in den Jahren 1990 bis 2023. Available online at <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/153533/umfrage/stromimportsaldo-von-deutschland-seit-1990/>, updated on 5/13/2024, checked on 5/13/2024.

Statistisches Bundesamt (2022): Stromverbrauch der privaten Haushalte nach Haushaltsgrößenklassen. Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Available online at <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Tabellen/stromverbrauch-haushalte.html>, updated on 12/16/2022, checked on 6/7/2023.

TenneT (2024): TenneT und fFe entwickeln CO2-Monitor für deutschen Strommix. Available online at <https://www.tennet.eu/de/news/tennet-und-ffe-entwickeln-co2-monitor-fuer-deutschen-strommix>, updated on 5/7/2024, checked on 5/7/2024.

The Korea Herald (2024): Govt. mulls further cutting EV subsidies. Available online at <https://www.koreaherald.com/view.php?ud=20240331050057>, updated on 3/31/2024, checked on 5/21/2024.

The Korea Times (2023): Korea boosts subsidies to rev up falling EV sales. Available online at https://www.koreatimes.co.kr/www/tech/2023/09/129_359848.html, updated on 9/22/2023, checked on 5/21/2024.

The Mobility House (2022): §14a EnWG funktioniert für Elektroautos heute schon – Wenn die Netzbetreiber wollen, sparen Kund:innen bis zu 120 Euro pro EV und Jahr. Available online at https://www.mobilityhouse.com/de_de/knowledge-center/artikel/schon-heute-mit-dem-enwg-fuer-elektroautos-sparen, updated on 8/10/2023, checked on 8/10/2023.

The Mobility House (2023a): Die Umsetzung von V2G. Available online at https://www.mobilityhouse.com/de_de/knowledge-center/artikel/umsetzung-von-v2g, updated on 8/10/2023, checked on 8/10/2023.

The Mobility House (2023b): V2G-Status-Quo – welches Land ist wie weit. Available online at https://www.mobilityhouse.com/de_de/knowledge-center/artikel/v2g-welches-land-ist-wie-weit, updated on 8/10/2023, checked on 8/10/2023.

The Mobility House (2023c): Vehicle-to-Grid: Elektroauto als Stromspeicher nutzen. Available online at https://www.mobilityhouse.com/de_de/vehicle-to-grid, updated on 8/10/2023, checked on 8/10/2023.

UBA (2023): Stromverbrauch in Deutschland. Edited by Umweltbundesamt. Available online at <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromverbrauch>, updated on 6/7/2023, checked on 6/7/2023.

UBA (2024): Klimaschutz im Verkehr. Available online at <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/klimaschutz-im-verkehr#rolle>, updated on 4/30/2024, checked on 5/8/2024.

VDA (2023): Zum Start des Festlegungsverfahrens nach § 14a des EnWG. Stabilisierung der Stromnetze. Edited by Verband der Automobilindustrie. Available online at <https://www.vda.de/de/aktuelles/artikel/2023/zum-start-des-festlegungsverfahrens-nach--14a-des-enwg->, updated on 7/20/2023, checked on 7/20/2023.

VKU (2023): Stabile Stromnetze dank steuerbarer Verbrauchseinrichtungen. Pressemitteilung. Available online at <https://www.vku.de/presse/pressemitteilungen/vku-stabile-stromnetze-dank-steuerbarer-verbrauchseinrichtungen/>, updated on 12/6/2023, checked on 12/6/2023.

Windt, Alexander; Arnhold, Oliver (2020): Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf. Studie im Auftrag des BMVI. With assistance of Alexander Windt, Oliver Arnhold. Edited by Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur. Reiner Lemoine Institut. Berlin. Available online at <https://nationale-leitstelle.de/wp-content/pdf/broschuere-lis-2025-2030-final.pdf>, checked on 7/19/2023.

Wooyoung Jeon; Sangmin Cho; Ilhyun Cho (2021): The Economics Value of Electric Vehicle Demand Resource under the Energy Transition Plan. In *Environmental and Resource Economics Review* 2021 (30), Article 2, pp. 237–268. Available online at <https://koreascience.kr/article/JAKO202119759427819.pdf>, checked on 5/21/2024.

Yonhap News Agency (2024): Estimates show S. Korea's greenhouse gas emissions fell in 2023 for 2nd consecutive year. Seoul. Available online at <https://en.yna.co.kr/view/AEN20240407002100315>, updated on 4/7/2024, checked on 5/21/2024.

