2024년도 연구보고서
공모과제-02-02

삼척화력발전소 초과발전 및 잉여전력 활용방안

2024. 11.

삼척시탄소중립지원센터

환경부 Ministry of Environment
삼척시 SAMCHEOK CITY
시멘트산업사회공헌재단 Cement Industry Social Contribution Foundation
KNU 강원대학교 KANGWON NATIONAL UNIVERSITY

제 출 문

○ 과 제 명 : 삼척화력발전소 초과발전 및 잉여전력 활용방안

○ 계약기간 : 2024년 08월 19일 ~ 2024년 11월 18일 (총3개월)

○ 계 약 일 : 2024년 08월 19일

○ 착 수 일 : 2024년 08월 19일

○ 완 료 일 : 2024년 11월 18일

상기와 같이 「2024 제2차 삼척시 탄소중립 연구과제 공모사업」의 최종 연구보고서를 제출합니다.

2024년 11월 18일

소 속 : 강원대학교

직 위 : 교수

성 명 : 권 병 완 ( )

삼척시탄소중립지원센터장 귀하

주 의

1. 이 보고서는 삼척시탄소중립지원센터에서 시행한 「2024 제2차 삼척시 탄소중립 연구과제 공모사업」으로 수행된 최종 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 삼척시탄소중립지원센터에서 시행한 「2024 제2차 삼척시 탄소중립 연구과제 공모사업」의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

요 약 문

Ⅰ. 연구개요

○ 본 연구는 삼척시 내 화력발전소에서 발전된 잉여 전력을 스마트 그리드 기술, 에너지저장시스템 그리고 수전해를 통한 수소 생산 기술을 연계 하여, 보다 효율적인 전력망 구축 및 수소 에너지 자원을 통한 경제성 확보와 탄소 중립 실현을 위해 제안됨. 이를 통해 지속 가능한 에너지 관리와 지역 경제 활성화를 도모함.

Ⅱ. 연구의 필요성 및 목적

○ 연구의 필요성

• 공급자와 수요자 간 양방향으로 실시간 정보를 교환함으로써 지능형 수요관리, 신재생에너지 연계, 전기차 충전 등을 할 수 있는 스마트 그리드 기술을 활용함으로써 잉여전력을 적절히 활용하여 타지역과의 에너지 분배 및 에너지 절약을 할 수 있는 기반 조성의 필요성.

• 국내 그린수소 생산 현황을 살펴보면 2040년 목표 수소 공급량을 충당하기 어려움. 이에 초과발전을 이용한 수전해 및 해수전해를 이용하여 탄소중립 대응 그린수소 생산을 할 수 있는 기회가 됨. 또한 삼척은 액화수소특별시로 지정되었지만 수소생산 기지가 없다는 결함을 극복할 수 있는 개기를 마련할 수 있음.

○ 연구의 목적

• 강원도 도내 전력소비량을 초과하는 잉여전력에 대한 타지역으로의 역송을 위한 스마트 그리드(Smart Grid) 기술 활용 방안 및 에너지저장장치 기술 활용 방안 제시.

• 탄소중립 목표 달성을 위한 수전해 기반 그린 수소 생산으로의 에너지 전환의 필요.

Ⅲ. 연구의 내용 및 범위

○ 삼척화력발전소의 현황과 전국 및 도내 잉여 전력량 분석

○ 스마트 그리드를 통한 타지역 전력 전송 및 전력망 효율 향상.

○ 조건에 부합하는 에너지저장장치를 통한 잉여 전력 저장 및 부하 관리.

○ 수전해 기반 그린 수소 생산 기술의 경제적·환경적 분석

○ 탄소중립 목표와 지역 에너지 정책의 통합.

IV. 연구결과

○ 스마트 그리드 기술과 에너지저장장치 기술의 연계 및 인프라 구축이 필요함.

○ 수전해 기반 수소 생산의 기술적 성장이 요구됨.

○ 잉여 전력 활용을 통한 화석연료 저감 및 그린 수소 생산을 통한 탄소 중립 실현에 기여함.

○ 효율적인 전력망 구축 및 수소의 생산으로 인한 고용 창출 및 수소 경제 활성화에 기여

V. 연구결과의 활용계획

○ 국내 수소특화단지인 삼척시를 중심으로 수소 기반 경제의 구축.

○ 지역 내 에너지 자립 및 탄소 중립에 기여.

○ 전국적 에너지 전환 모델로의 발전.

○ 정부 및 지자체의 민간 기업 활성화를 통한 기술 상용화 및 내재화 실현.

<본문목차>

제1장 연구 개요 1

1.1. 연구 배경 1

1.2. 연구 목적 1

1.3. 연구의 필요성 및 방향 1

제2장 삼척화력발전소 개요 3

제3장 전력 수요 및 공급 현황 6

3.1. 전국 전력 현황 6

3.2. 강원특별자치도 내 전력 현황 8

제4장 전력 전송을 위한 스마트 그리드 기술 10

4.1. 스마트 그리드 기술 개요 10

(1) 지능형 검침인프라 11

(2) 수요 반응 12

(3) 에너지 관리 시스템 12

(4) 지능형 송배전망 13

4.2. 스마트 그리드를 통한 타지역 전력 전송 14

제5장 탄소중립을 위한 에너지저장장치의 활용 16

5.1. 에너지저장장치 개요 16

5.2. 에너지저장장치의 유형 20

(1) 배터리형 에너지저장장치 20

(2) 압축공기 에너지저장장치 21

(3) 플라이휠 에너지저장장치 22

5.3. 에너지저장장치의 경제적 환경적 효과 23

5.4. 에너지저장장치 운영 시나리오 26

제6장 잉여 전력을 활용한 수전해 기반 그린 수소 생산 29

6.1. 수전해 기술 29

(1) 고분자 전해질막 수전해 30

(2) 알칼라인 수전해 31

(3) 음이온 교환막 수전해 32
(4) 고체 산화물 수전해 33
(5) 수전해 종류별 특징 비교 35
6.2. 그린 수소 36
6.3. 잉여 전력 기반 그린 수소 생산 37
6.4. 삼척화력발전소 수소 생산 전략 38

제7장 기대효과 40
7.1. 경제적 효과 40
7.2. 사회적 효과 40
7.3. 환경적 효과 41

제8장 결론 및 제언 42

<표목차>

표 1. 삼척그린파워 증기터빈 설계조건 4

표 2. 한국전력거래소 시간별 전국 전력수요량 2023 8

표 3. 기존 전력망과 스마트 그리드 전력망 특징 비교 11

표 4. ESS기술별 비용 및 특성 정리 25

표 5. 수전해 기술별 특징 비교 35

<그림목차>

그림 1. 삼척그린파워발전소 조감도 3

그림 2. 삼척그린파워 초임계압 순환유동층 보일러 4

그림 3. 한국남부발전 미세먼지 종합 저감 체계 5

그림 4. 국내 전력량/손실량 전력지표 6

그림 5. 2021년 전국 전력 통계 지표 7

그림 6. 강원도 내 주요 발전 시설 용량 9

그림 7. 스마트 그리드 개념도 10

그림 8. 한국전력에서 제안된 AMI 개념도 11

그림 9. DR 메커니즘 12

그림 10. 지능형 송배전망 모식도 13

그림 11. 제8차 장기 송변전설비계획, 2017~2031년 송전변전 설비 계획 15

그림 12. 에너지저장장치를 통한 전력망 모식도 16

그림 13. 에너지저장장치의 주요 특징 17

그림 14. 해외 ESS 적용 사례 18

그림 15. 영주변전소 내 설치된 ESS (56MW) 사진 19

그림 16. 마이크로그리드 구축 개념도 20

그림 17. Li-ion 배터리와 VRFB 비교 21

그림 18. 압축공기 저장 시스템 모식도 22

그림 19. 차세대 플라이 휠 축전 시스템 실증시험 시설 (일본) 23
그림 20. 봄, 여름, 가을 기간 ESS 운전 시나리오의 순서도 27
그림 21. ESS 비상 운전 시나리오 순서도 27
그림 22. 분산자원 ESS 시나리오 28
그림 23. 재생에너지원 수전해 기반 그린 수소 생산 및 활용 시스템 29
그림 24. 수전해 설비의 종류 및 특징 30
그림 25. PEM 수전해 구성 요소 31
그림 26. 알칼라인 수전해 모식도 32
그림 27. 음이온교환막 수전해 구성 요소 및 모식도 33
그림 28. 고체 산화물 수전해 시스템 모식도와 반응식 34
그림 29. 그레이 수소, 블루 수소, 그린 수소 분류 36
그림 30. 수소경제 활성화 로드맵 37

제1장 연구 배경 및 목적

1.1 연구 배경

○ 강원특별자치도 내 전력 수요 대비 삼척화력발전소의 발전량 초과 상황

- 삼척화력발전소는 2023년 기준 삼척그린파워발전소의 발전량은 8,867,020MWh이며, 삼척블루파워의 경우 2024년부터 가동이 예정됨. 이에 따라 강원특별자치도 내에서 안정적으로 전력 공급이 가능할 뿐만 아니라 초과 전력 또한 발생하고 있음. 이로 인해 전력 소비가 상대적으로 적은 강원특별자치도 지역의 수요를 초과하는 잉여 전력이 잦아지고 있음. 따라서 이러한 초과 전력을 효과적으로 관리하지 않으면 경제적 손실로 이어질 수 있으며, 이와 동시에 발전소의 환경적 목표 달성에도 부정적 영향을 미칠 수 있음.

○ 탄소중립 목표 달성을 위한 에너지 전환 필요성

- 2050년 탄소중립 목표를 달성하기 위해, 화석 연료에 의존하는 발전소도 지속 가능한 에너지 전환 방안을 마련해야 함. 삼척화력발전소는 석탄을 연료로 사용하는 발전소로서, 초과발전이 발생하는 상황을 친환경적이고 지속 가능한 방식으로 전환하는 방안을 모색할 필요가 있음. 이를 위해 에너지저장장치(ESS)를 통해 잉여 전력을 저장하고, 수전해 방식으로 그린 수소를 생산하여 탄소중립에 기여할 수 있음. ESS와 수소 생산은 초과 전력의 친환경적 활용을 가능하게 하며, 이는 장기적으로 화석 연료 사용을 줄이고, 재생 가능 에너지를 활용하는 기반을 마련함.

1.2. 연구 목적

○ 일정 지역에서 국지적으로 발생하는 전력 수급의 변동에 대응하여 통합 운영이 가능한 배전망 연계 전력 설비을 갖춘 통합운영발전계획 시스템을 구축하여 잉여전력을 타직역으로 역송하는 시스템 구축의 필요성 증대에 따른 삼척화력 발전소의 잉여 전력의 분배 방안 제시.

○ 전력의 수요와 공급의 불균형을 극복하기 위한 방안으로 에너지저장장치(ESS) 이용과 잉여 전력을 사용하여 그린 수소 생산을 통해 탄소중립 목표를 달성할 수 있는 방안을 제시하고자 함.

1.3. 연구의 필요성 및 방향

○ 삼척화력발전소의 초과 전력을 활용하는 것은 에너지 효율을 극대화하고, 전력망의 안정성을 높이는 데 필수적임. 또한, 탄소 배출 저감과 더불어 지역 경제 활성화를 위해서도 필요한 과제임.

○ 본 연구는 강원특별자치도 내에서 발생하는 초과 전력을 타지역으로 전송하기 위한

스마트 그리드 기술과 ESS 및 수전해 기반 그린 수소 생산 시스템을 제안함으로써, 경제적·환경적 가치를 극대화하고 국가적 탄소중립 목표 달성에 기여하고자 함.

○ 따라서 본 보고서에서는 스마트 그리드, 에너지저장장치, 수소 생산 기술 등의 활용 방안을 구체적으로 제시하여, 삼척화력발전소의 초과 전력 문제를 해결하는 동시에 강원특별자치도와 국가 차원의 에너지 정책 목표를 지원하는 실질적 방안을 모색하였음.

제2장 삼척화력발전소 개요

○ 삼척시내 화력발전소는 현재 2016년 12월부터 상업 운전을 가동중인 삼척그린파워발전소와 현재 완공이 진행 중인 국내 최대 규모 석탄화력발전소인 삼척블루파워가 있음. 삼척블루파워는 2024년 5월 기준 상업 운전 가동 승인을 받았으나, 동해안 지역 내 8기의 원전 가동에 따라 생산량을 소화할 송전선로가 부족하여 현재 가동되기 어려운 상황임. 이는, 삼척그린파워발전의 가동에도 영향을 미치고 있음.

○ 2023년 기준 삼척그린파워발전소의 발전량은 8,867,020MWh이며, 삼척블루파워의 경우 2024년부터 가동이 예정됨. 따라서, 본 보고서는 화력발전에 대해 현재 가동 중인 삼척그린파워발전소에 대해 서술함. (출처 : 전력통계정보시스템)

○ 삼척그린파워발전소는 한국남부발전이 운영하는 석탄화력발전소임. 본 발전소는 강원특별자치도 삼척시 원덕읍 호산리에 위치하고, 총 2,044MW의 설비용량을 갖추고 있음.



그림 1. 삼척그린파워발전소 조감도 (출처 : 한국남부발전(주) 홈페이지, 삼척빛드림본부 소개)

○ 삼척그린파워발전소 발전 설비

- 발전 용량은 총 2,044MW로, 1,022MW급 발전기 2기로 구성되어 있음.
- 세계 최대 규모의 500MW급 초임계압 순환유동층 보일러(CFBC) 2기가 각 발전기 내

도입됨. 이는 1000MW급 터빈 1기를 2대의 보일러와 조합하여 구성되어 있음.

- 순환유동층 보일러(CFBC)는 저열량탄을 완전 연소시키기 위해 보일러 내에서 지속적으로 순환시키는 방식으로, 연소 효율을 높이고 환경 오염 물질 배출을 감소시킴.
- 옥내형 저탄장, 무폐수 무방류 시스템, 석탄회 재활용을 통해 먼지 배출량을 70% 이상 저감함.

Item	Technical Data
Turbine type	TC-4F (Hp 1xDF+8, IP 9x2F, LP 6x4F)
LSB	48 inch, Titanium
Rated output	1,022MW(NR)/ 1,100MW(VWO)
Rotating speed (rpm)	3,600
Main steam condition	246 bar g / 600 deg C
Reheat steam conditino	55 bar g / 600 deg C
Condenser pressure	38.1 mmHgA
Efficiency	48.7 %

표 1. 삼척그린파워 증기터빈 설계조건 (출처 : 기계저널, 2016, 10., Vol. 56, No. 10)

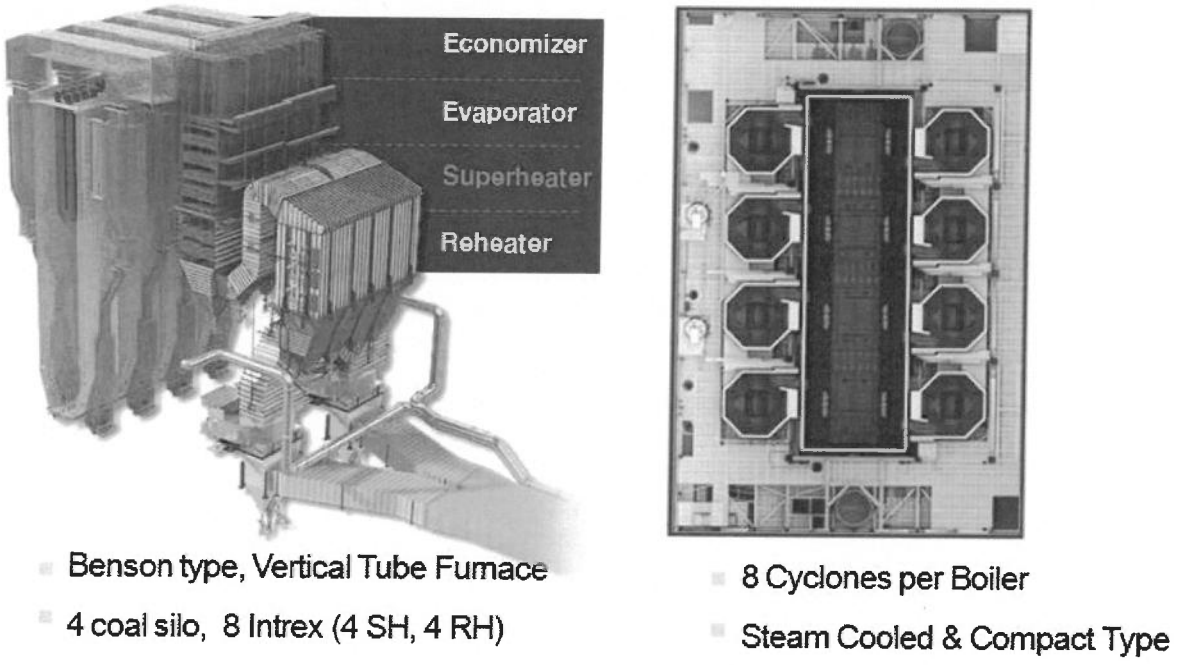


그림 2. 삼척그린파워 초임계압 순환유동층 보일러 (출처 : 기계저널, 2016, 10., Vol. 56, No. 10)

○ 삼척그린파워발전소 환경 설비

- 탈황 설비 (FGD, Flue Gas Desulfurization) : 연소 과정에서 발생하는 황산화물(SOx)을 제거하기 위한 장치로, 석회석을 이용하여 배출가스 중의 SOx를 흡수하여 황산칼슘(석고)으로 전환하여 대기 중 황산화물 배출을 효과적으로 감소시킴.
- 탈질 설비 (SCR, Selective Catalytic Reduction) : 질소산화물(NOx)을 선택적 촉매 환원법을 통해 제거하는 장치로, 기체 암모니아(NH_3) 또는 암모니아 수 (Urea)를 주입함에 따라 NOx를 질소(N_2)와 물(H_2O)로 전환하여 질소산화물 배출을 효과적으로 저감함.
- 전기집진기 (Electrostatic Precipitator) : 연소 과정에서 발생하는 미세먼지와 분진을 제거하기 위한 장치로, 전기장을 이용하여 입자를 집진판에 부착시켜 제거하고 이를 통해 미세먼지 배출을 최소화함.
- 태양광 발전 설비 : 발전소 부지 내 유휴 공간을 활용하여 태양광 패널을 설치하고, 이를 통해 신재생에너지를 생산할 수 있음. 삼척그린파워발전소는 약 4MW 규모의 태양광 발전 설비를 운영하고 있으며, 이를 통해 연간 약 5,000MWh의 전력을 생산하고 있음.

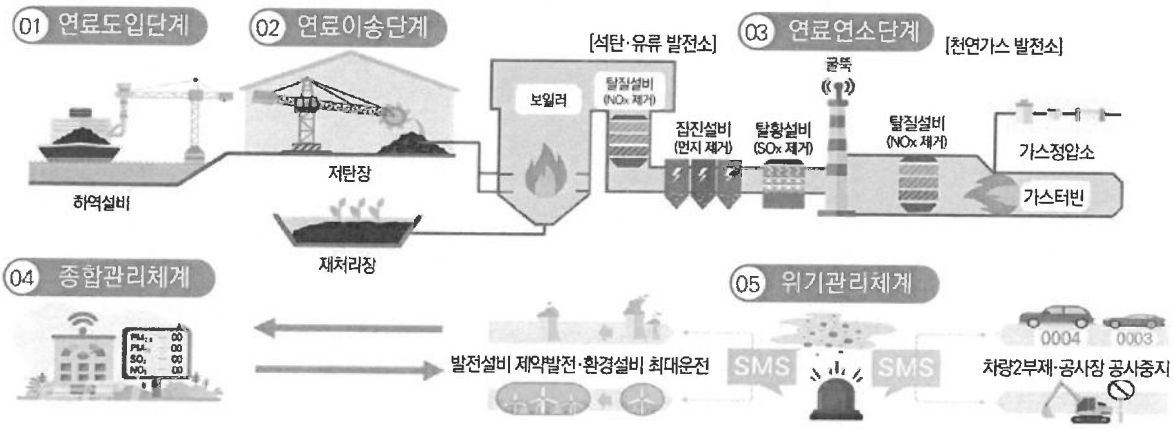


그림 3. 한국남부발전 미세먼지 종합 저감 체계 (출처 : Electric Power Journal, 2020.03.23.)

제3장 전력 수요 및 공급 현황

3.1. 전국 전력 현황

○ 전국 전력 수요 및 공급 현황

- 2024년 8월 기준으로 전국 공급능력은 약 105,360MW이며, 전력 최대 수요는 97,115MW로, 여유 전력이 약 8,245MW에 달함.
- 전력거래소의 실시간 전력수급현황에 따르면, 2024년 11월 5일 기준으로 공급능력은 90,585MW, 현재 부하는 67,264MW, 공급예비력은 23,321MW, 공급예비율은 34.67%를 기록함.

○ 전국 잉여 전력 현황



그림 4. 국내 전력량/손실량 전력지표 (출처 : EPSIS, 전력통계정보시스템, https://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectEkesKepChart.do?menuId=010100)

○ 국내에서 발생하는 잉여 전력을 다양한 방식으로 활용될 수 있으며, 다양한 실증 사업이 진행되고 있음.

- 제주에너지공사는 재생에너지 잉여전력을 활용한 P2H (Power to Heat) 시스템을 국내 최초로 제주도내 서부농업기술센터에 구축하여 실증 단계에 들어섬. (SOLAR TODAY 기사, 2024.06.14.)
- 한국전력은 제주도 내 풍력 및 태양광 에너지로부터의 잉여전력을 활용하여 도내 '플러스 전력수요관리(Demand Response, DR)' 제도를 시행하여 전기차충전 전력의 단가

를 낮추고 전력의 부하를 효율적으로 운영하여 전체적인 효율을 향상시키고자 함. (뉴시스 기사, 2023.05.03.)

- 한국전력은 2019년부터 재생에너지 잉여전력을 활용한 P2G (Power-to-Gas) 기술을 적용하여 수전해를 통한 그린수소를 생산하고 저장하는 기술을 추진하고 있음. 이는 그린 수소를 통해 잉여 전력 문제를 해결하고 에너지 활용을 높이고자 함. (전기신문 기사, 2019.09.05.)



그림 5. 2021년 전국 전력 통계 지표 (출처 : 에너지경제연구원, 2022 지역에너지통계연보)

○ 국내 계절별, 시각별 전력 사용

- 2023년 한국전력거래소에서 발표한 결과 데이터를 바탕으로 계절별 (계절 선정의 기준은 계절내 중간 일별로 함.) 하루 평균 전력수요량은 다음과 같음.
  - 봄 : 53,329MWh
  - 여름 : 61,872MWh
  - 가을 : 45,402MWh
  - 겨울 : 59,269MWh
- 시각별 평균 (1년 기준, 2023.01.01. ~ 2023.12.31.) 전력수요량은 다음과 같음.
  - 03:00 : 57,293MWh
  - 06:00 : 57,861MWh
  - 09:00 : 66,610MWh
  - 12:00 : 65,533MWh

- 15:00 : 66,809MWh
- 18:00 : 70,915MWh
- 21:00 : 69,444MWh
- 24:00 : 64,663MWh

	시각							
날짜	03:00	06:00	09:00	12:00	15:00	18:00	21:00	24:00
23.04.01. (봄)	54,713	55,083	51,766	47,054	47,413	55,002	58,648	56,949
23.07.01. (여름)	57,291	55,586	59,247	61,864	62,153	67,292	69,184	62,359
23.10.01. (가을)	43,439	43,511	42,074	38,559	41,153	51,374	53,471	49,634
23.12.31. (겨울)	55,450	55,037	57,689	59,950	58,995	62,847	62,061	62,125

전력량 단위 : MWh

표 2. 한국전력거래소 시간별 전국 전력수요량 2023 (출처 : 한국전력거래소)

3.2. 강원특별자치도 내 전력 현황

○ 강원특별자치도 전력 발전량 및 소비량 (출처 : 2022 지역에너지통계연보)

- 강원특별자치도는 전력 생산량이 높아 국내 다른 지역에 비해 전력 공급이 많음. 그러나 수요는 상대적으로 낮아, 잉여 전력이 발생하는 지역 중 하나로 평가받고 있음.
- 2021년 기준 강원특별자치도 내 최종 발전량은 30,623GWh임.
- 2021년 기준 강원특별자치도 내 발전설비 용량은 8,696MW이며, 52개의 변전소가 가동중임.
- 2021년 기준 강원특별자치도 내 배전 설비는 다음과 같음. 선로길이: 지중 2,823km, 전선전체길이: 지중 9,244km, 변압기 용량: 8,379MVA.
- 2021년 기준 강원특별자치도 내 최종 전력 소비는 16,808 GWh임. 특히, 산업 부문별 전력 소비는 다음과 같음. 가정용: 2,290GWh, 공공용: 1,479GWh, 서비스업 (전철, 수도, 사업자용 전력 포함): 6,399GWh, 농림어업: 784GWh, 광업: 452GWh, 제조업: 5,406GWh

○ 강원특별자치도는 전력 생산량이 소비량을 초과하는 지역으로, 2023년 기준 전력자립률이 212.8%에 달해 경북, 충남에 이어 전국 3위를 기록함. 특히, 삼척블루파워의 가동이 시작되면 강원특별자치도의 전력자립률은 전국 1위로 상승할 전망임.

○ 강원특별자치도 동해안 지역의 경우, 송전망의 한계로 인해 잉여 전력을 효율적으로 타지역에 전송하는 데 어려움을 겪고 있음. 더욱이, 500kV 동해안-신가평 송전선로의 건설 지연으로 인해 동해안에서 생산된 전력을 수도권으로 송전하는 데 제약이 발생하고 있음. (조선일보 기사, 2024.05.06.)



그림 6. 강원도 내 주요 발전 시설 용량 (출처 : 강원일보 기사, 2023.05.19.)

제4장 전력 전송을 위한 스마트 그리드 기술

4.1. 스마트 그리드 기술

○ 스마트 그리드 개요

- 스마트 그리드 (Smart grid)는 전력망의 효율성과 안정성을 높여 잉여 전력의 효과적인 분배와 활용을 가능하게 함. 이는 기존 전력망에 정보통신기술(ICT)을 접목하여 전력 생산, 전달, 소비의 모든 과정을 지능화하고 효율적으로 관리하는 차세대 전력망 시스템임. 이를 통해 전력 공급자와 소비자 간의 실시간 정보 교환이 가능해지며, 에너지 효율성과 전력망 안정성이 향상됨.
- 특히, 강원특별자치도의 잉여 전력을 효율적으로 타지역으로 전송하기 위해서는 도내 스마트 그리드 구축을 통해 지능형 송배전망과 에너지 관리 시스템(EMS)을 활용하여 송전 인프라 구축이 필요함.

구분	기존 전력망	스마트 그리드
통제시스템	아날로그	디지털, 인공지능
발전	중앙집중형 전원	중앙집중형+분상형 전원
전력공급원	화석연료 발전	화석연료 발전+신재생에너지발전
제어시스템	제한적 제어	자동적 제어
운전	수동 감시, 정기적 유지보수	자동 감시, 상태기반 유지보수
시스템 흐름	수지상, 정해진 방향의 전력흐름	네트워크, 다양한 전력흐름

표 3. 기존 전력망과 스마트 그리드 전력망 특징 비교 (출처 : 한국스마트그리드산업단)

(1) 지능형 검침 인프라

○ 지능형 검침 인프라 (Advanced Metering Infrastructure, AMI)는 전력 공급자와 소비자 간의 실시간 전력 데이터 송수신을 가능하게 하는 시스템으로, 스마트 그리드의 핵심 구성 요소 중 하나임. 이를 통해 전력 사용량, 시간대별 소비 패턴, 전력 품질 등의 정보를 실시간으로 모니터링할 수 있음.

○ AMI는 스마트미터를 통해 실시간 데이터 수집 및 통신 네트워크를 구축할 수 있음. 이는 효율적인 전력 요금 체계 도입 및 장애 탐지, 전력망 관리, 소비자와의 소통가능.

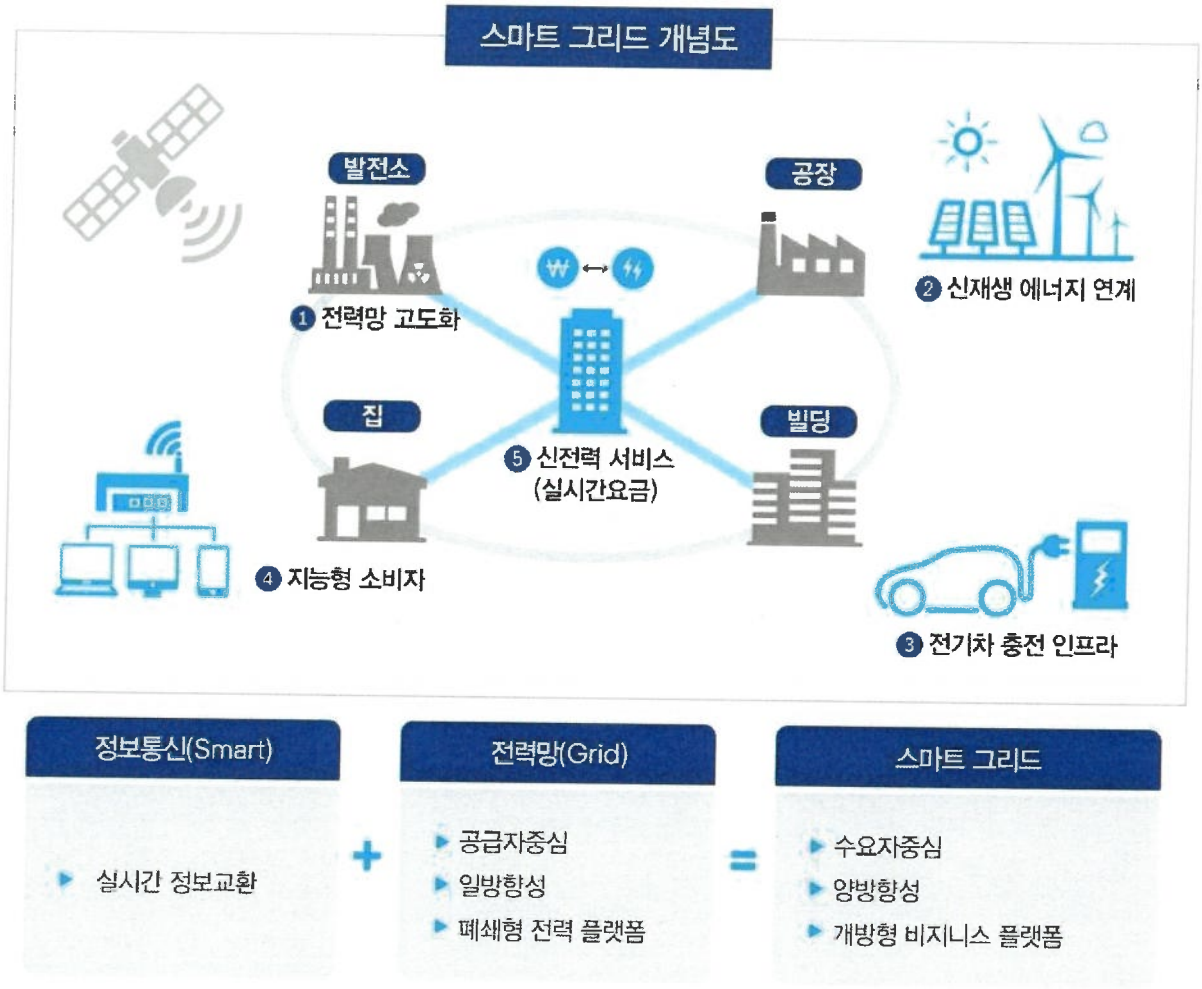


그림 7. 스마트 그리드 개념도 (출처 : 한화큐셀, https://qcells.com/kr/blog/blog-detail?blogId=BLG231222154716056)

○ 한전은 2010년부터 AMI 보급 사업을 시작하여 2025년까지 2,250만 가구에 AMI를 설치하는 것을 목표로 하고 있으며, 이를 통해 2025년부터 연간 전력량의 3.7%에 해당하는 약 200GWh를 절감할 수 있을 것으로 예상함. 또한, AMI를 기반으로 종합 에너지 서비스를 제공하고, 설비 관리 효율화와 안정적인 배전망 운영을 통해 연간 3,927억 원의 사회적 순편익이 창출될 것으로 전망하고 있음. (국민일보 기사, 2024.10.29.)

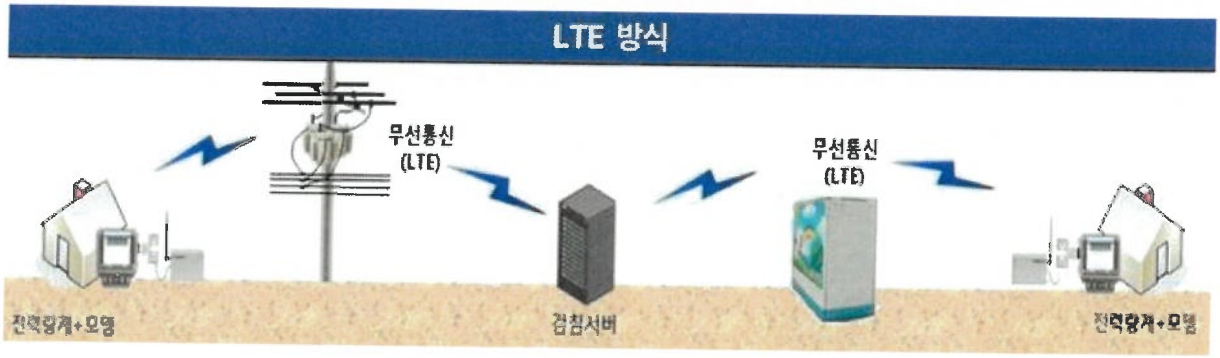


그림 8. 한국전력에서 제안된 AMI 개념도 (출처 : 대한경제 기사, 2023.07.23.)

(2) 수요 반응

○ 수요 반응은 전력 소비 패턴을 조정하여 전력 수요와 공급의 균형을 맞추는 스마트 그리드의 핵심 기술 요소 중 하나임. DR은 주로 피크 부하 시간에 소비자에게 전력 사용을 줄이거나 시점을 변경하도록 유도하는 방안을 제시함. 이는 전력 회사와 소비자 간의 실시간 소통을 통해 이뤄지며, 실시간 전력 요금제 또는 인센티브 방식으로 전력 소비의 효율성을 향상시킴.

○ 수요 반응은 전력 수요의 변동을 실시간으로 감지하여 피크 시간대 전력 사용을 줄이고 전력 사용 시간의 분산을 통해 전체 전력망의 부하를 줄일 수 있음. 이는 전력 생산량과 수요의 불일치로 인한 전력 낭비와 경제적 손실을 최소하는데 기여함. 그러나 실시간 데이터에 대한 정보 유출 및 소비자의 불편을 초래할 수 있기에 에너지 관리 시스템을 통한 최적화가 필요함.



그림 9. DR 메커니즘 (출처 : 전자신문 기사, 2019.08.01.)

○ GS리테일은 2024년 3월 전력거래소와 업무협약을 통해 자사 편의점 매장내 스마트에너지관리시스템과 자동 수요반응 시스템을 도입하여 19,167kWh의 전력 절감을 이끌어 냄. (출처 : 이데일리 기사, 2024.11.16.)

(3) 에너지관리시스템

○ 에너지관리시스템 (Energy Management System, EMS)은 전력망의 전체 에너지 흐름을 실시간으로 모니터링하고 최적화하여 전력 공급과 수요를 관리하는 시스템임.

○ EMS는 송전과 배전망에서 발생하는 전력의 변동성을 예측하고 제어하는 역할을 하며,

잉여 전력의 활용을 포함해 전체적인 에너지 효율을 높이는 데 핵심적인 역할을 수행함. 특히, 스마트 그리드와 연계하여 실시간 데이터를 바탕으로 신속한 대응과 전력 최적화를 수행하고 이를 수요 반응과 연계하여 잉여 전력이 발생할 때 소비자의 전력 소비를 조절함.

○ 또한, EMS는 전력망의 상태를 실시간으로 파악하여 전력망의 공급과 수요의 통제를 통해 과부하, 정전, 전력 손실 등을 예방하고 전체 전력망의 안정성을 강화함. 더욱이, 태양광, 풍력 등 변동성이 큰 재생에너지를 효율적으로 통합하여 공급 안정성을 유지함.

○ 국내 EMS 시스템 현황 (출처 : Kt Enterprise, AICT 스토리, 2022.08.19., https://enterprise.kt.com/bt/dxstory/1554.do)

- LS산전은 자사 청주 2사업장 공장 내 EMS 시스템을 구축하여 공장 내 중앙제어센터에서 공장 전체 에너지 사용 현황을 관리할 수 있음. 이를 통해 연간 약 1억 1000만원 이상의 전기료 절감 효과를 거두고 있음.
- 삼성전자는 자사 서초 사옥 내 자체 개발한 EMS 시스템을 통해 2007년 대비 2009년 대략 11%의 에너지 절감 효과를 얻어냄.
- 풀무원 기술원은 건물 내 EMS 시스템을 구축하여 효율적인 냉-난방 시스템을 운영하여 연간 전력 사용량의 10%의 온실가스 배출량을 절감함.
- KT는 EMS 시스템과 인공지능을 결합하여 통합관제 플랫폼을 구축하였으며, 이를 요식업 매장에 시범사업한 결과 14% 이상의 전기 사용량을 절감하였음.

(4) 지능형 송배전망

○ 지능형 송배전망 기술은 AMI, DR, EMS 기술을 모두 접목시켜 전력의 생산, 전송, 배전, 소비 과정을 모두 포함하여 전력망의 효율성과 안정성을 향상시키는 시스템임.

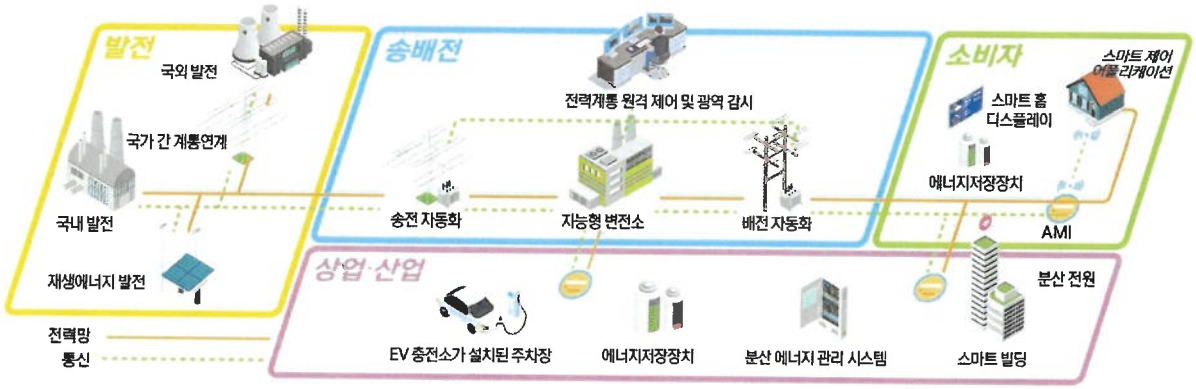


그림 10. 지능형 송배전망 모식도 (출처 : 지능형전력망 기본계획 2023, 산업통상자원부)

4.2. 스마트 그리드를 통한 타지역 전력 전송

○ 국내에서는 주로 765kV, 345kV, 154kV의 전압 등급으로 구성된 안정적인 국가 전력 송전선로를 운영하고 있음.

○ 전국 주요 송전망은 다음과 같음.

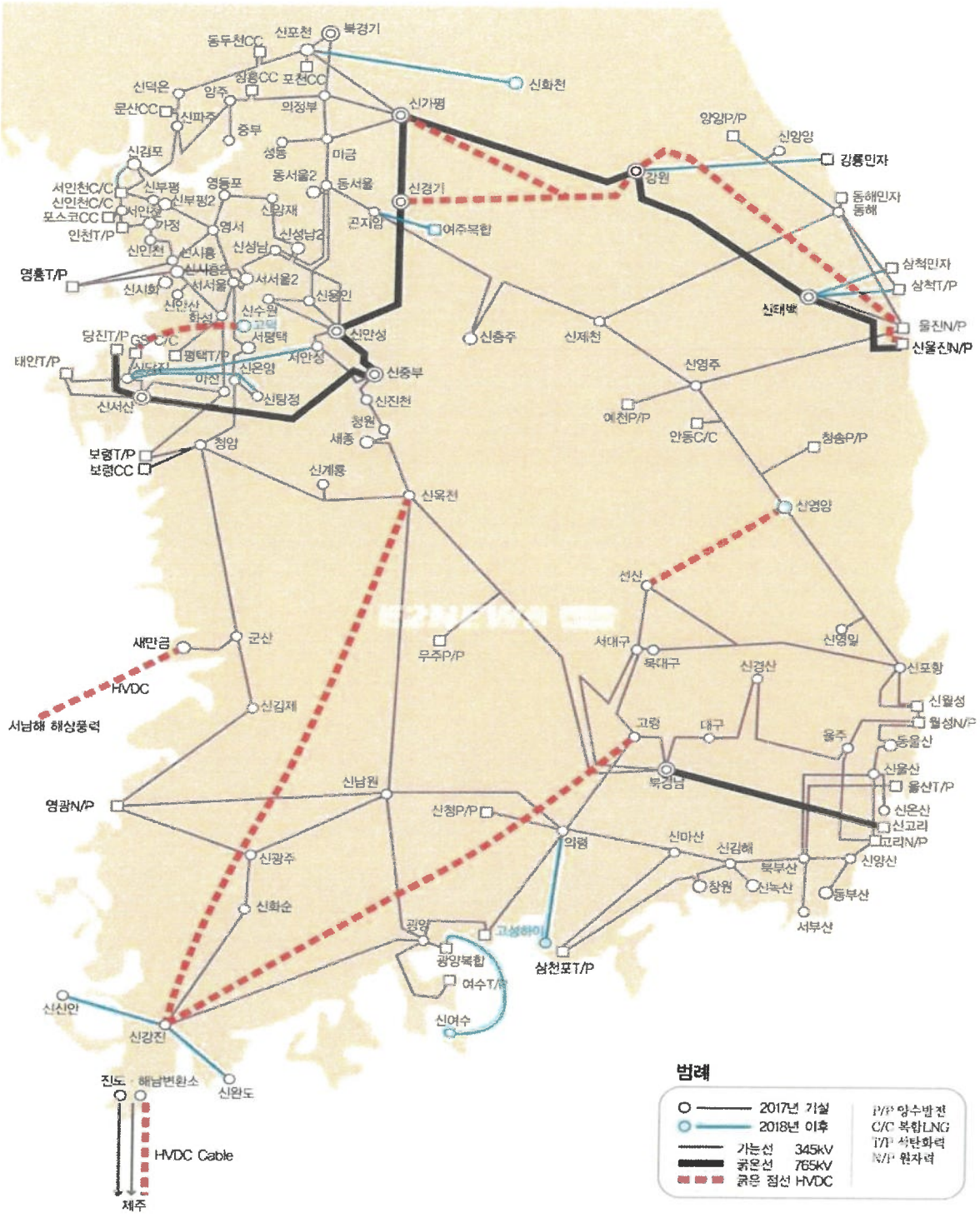


그림 11. 제8차 장기 송변전설비계획, 2017~2031년 송전변전 설비 계획 (출처 : 이투뉴스 기사, 2018.10.08.)

- 765kV 송전선로

  - 신태백 ~ 신가평 선로 : 강원특별자치도 태백에서 경기도 가평까지 연결되며, 동해안 지역의 발전 전력을 수도권으로 송전함.

  - 신안성 ~ 신가평 선로 : 경기도 안성에서 가평까지 연결되어 수도권으로 전력을 송전함.

  - 신고리 ~ 북경남 선로 : 부산 신고리 원자력발전소에서 경남 지역으로 전력을 송전함.

- 345kV 송전선로

  - 당진 ~ 신안성 선로 : 충남 당진에서 경기도 안성까지 연결되며, 서해안 지역의 발전 전력을 수도권으로 송전함.

  - 신태백 ~ 신가평 선로 : 강원특별자치도 태백에서 경기도 가평까지 연결되어 동해안 지역의 전력을 수도권으로 송전함.

  - 울진 ~ 신태백 선로 : 경북 울진에서 강원특별자치도 태백까지 연결되어 동해안 지역의 전력을 내륙으로 송전함.

- 154kV 송전선로는 지역 내 전력 공급을 위해 사용되며, 도시와 산업 단지 등에 전력을 공급함.

○ 스마트 그리드는 타지역 전력 전송을 위해 다음과 같이 활용될 수 있음.

- 고전압 직류 송전 (High Voltage Direct Current, HVDC)을 스마트 그리드와 연계하여 송전량을 조절할 수 있음.
- 지역별 재생에너지 발전소에서 생성된 전력을 스마트 그리드 시스템으로 통합 관리하여 전력의 분배를 최적화 하고, 전력 피크가 적은 시간대에 에너지저장장치를 활용하여 저장된 전력을 활용함.
- 특히, 스마트 그리드 시스템을 통해 에너지저장장치의 충전과 방전 스케줄을 실시간으로 제어하여 전력망의 과부하를 방지하고, 타 지역의 전력 수급 현황과의 실시간 소통을 통해 이를 관리함. 이는 스마트 그리드 기술 내 인공지능과 빅데이터를 기반으로 자동적으로 수행할 수 있음.
- 스마트 그리드 시스템을 통해 동적 라인 평가 (Dynamic Line Rating, DLR)를 수행함으로써 송전선로의 실시간 상태에 대해 파악할 수 있음. 이는 지역간 전력망의 기상조건에 따라 송전량을 동적으로 조정이 가능함.

제5장 탄소중립을 위한 에너지저장장치의 활용

5.1. 에너지저장장치 개요

○ 에너지저장장치 (Energy Storage System, ESS)는 생산된 전기에너지를 저장하여 필요 시 사용하는 시스템으로, 전력 수급의 효율성과 안정성을 높이는 데 핵심적인 역할을 수행함. 특히 재생에너지의 변동성을 보완하고, 전력망의 안정성을 강화하며, 최종적으로 탄소 배출 저감에 기여함.

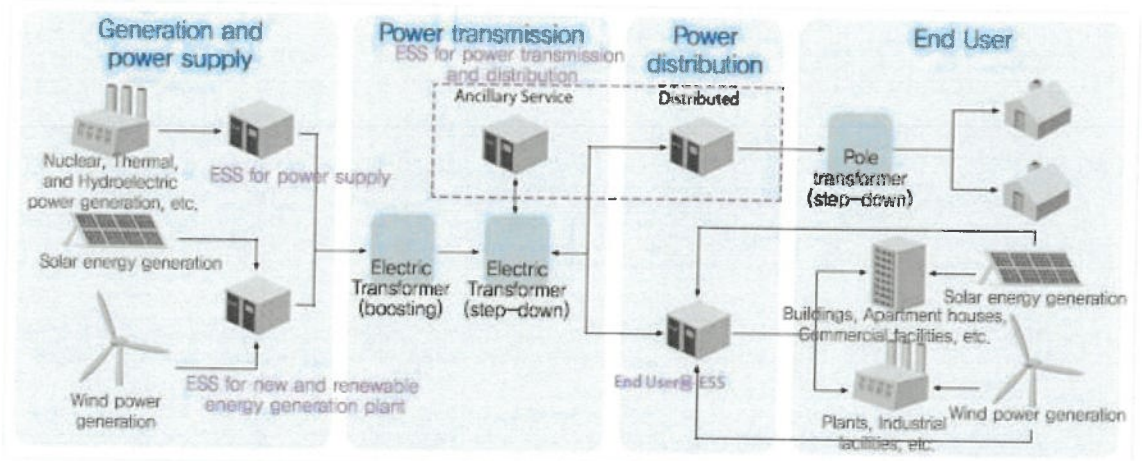


그림 12. 에너지저장장치를 통한 전력망 모식도 (출처 : GS Neotek, ESS, https://www.gsneotek.co.kr/en/business/env/ess.jsp)

○ ESS의 활용

- 발전소에서 전력 수요가 낮은 시간대에 발생하는 잉여 전력을 ESS에 저장하고, 수요가 높은 피크 시간대에 이를 방출하여 공급할 수 있어 전력망 부하를 균등화하여 발전 효율을 높이고, 피크 부하 시 추가 발전소 가동을 줄여 연료 비용 절감과 탄소 배출 감소에 기여함.
- ESS를 활용하여 전력망의 주파수 (Hz) 변동을 실시간으로 조정할 수 있음. 주파수는 전력 수요와 공급이 일치하지 않으면 주파수가 변동하게 되어 전력 공급이 수요보다 많으면 주파수가 상승하고, 공급이 부족하면 주파수가 낮아짐. 이는 주파수가 변하면 전력망에 연결된 기기들이 과열되거나 오작동할 위험이 생기며, 전력 품질이 떨어지고 정전의 발생 위험이 증가함. 국내의 경우 60Hz의 주파수가 유지되고 있음.
- 발전소 유휴 부지 내 태양광, 풍력 등 재생에너지 설비를 설치하고, ESS와 연계하여 재생에너지의 변동성을 보완할 수 있음. 이는 탄소 배출을 줄이고, 안정적인 전력 공급을 지원함.

- ESS는 잉여 전력을 저장함으로써 전력 손실을 최소화하고 전력 공급의 안정성을 유지할 수 있을 뿐만 아니라 전력망 장애나 발전소 설비 고장 시 저장된 전력을 활용하여 비상 전력을 공급할 수 있음.

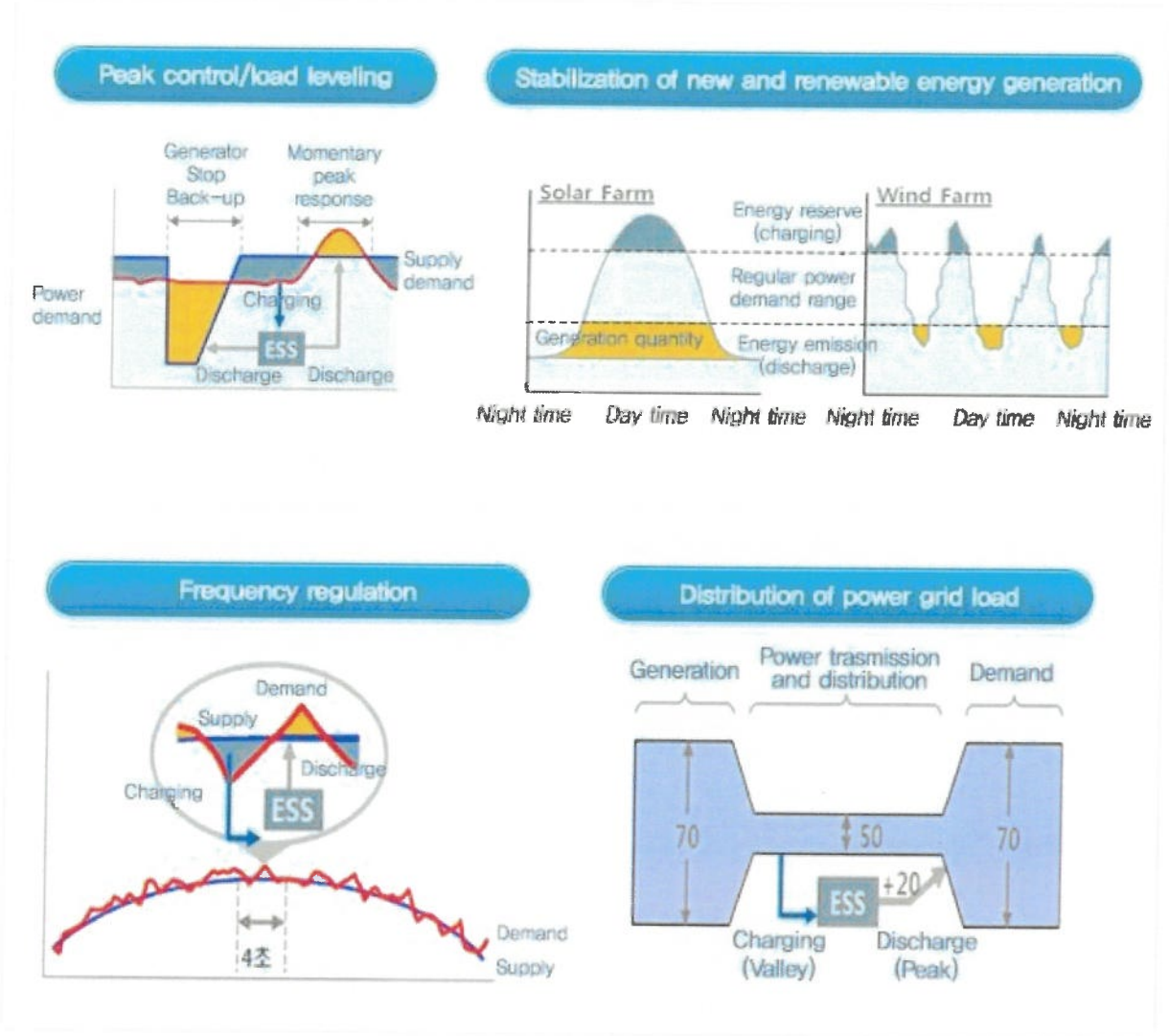


그림 13. 에너지저장장치의 주요 특징 (출처 : GS Neotek, ESS, https://www.gsneotek.co.kr/en/business/env/ess.jsp)

○ 해외 ESS 적용 사례

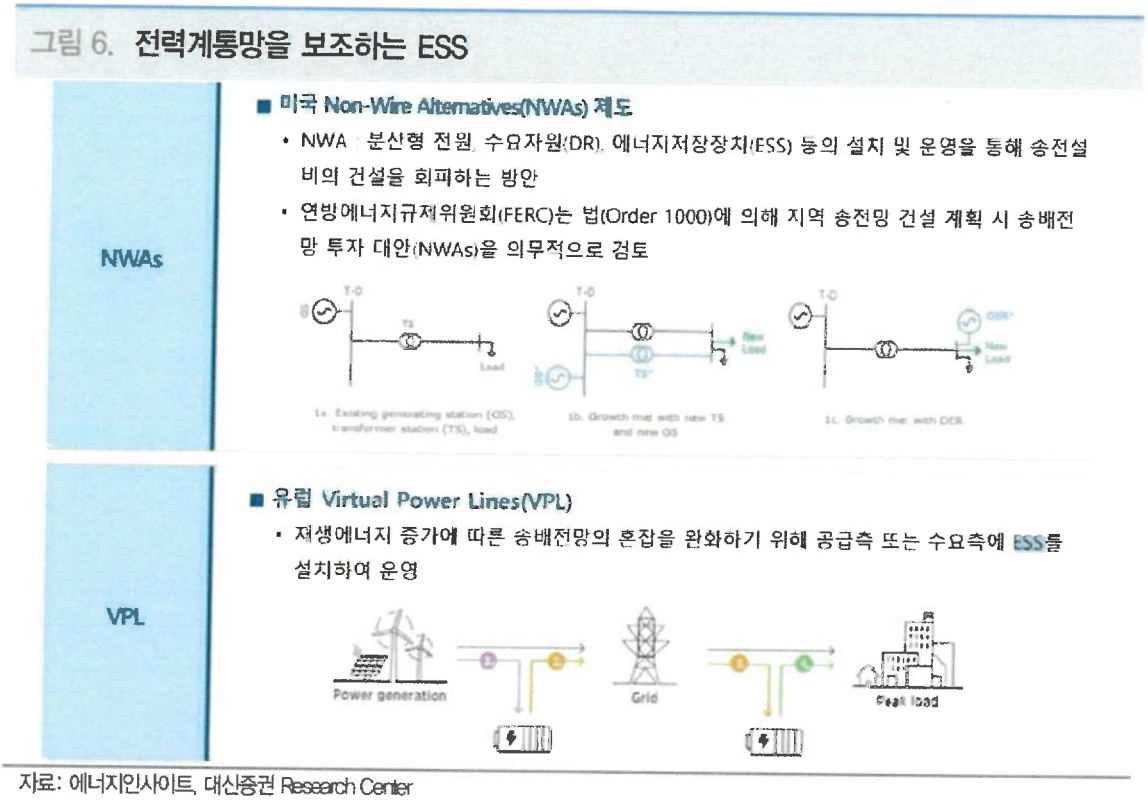


그림 14. 해외 ESS 적용 사례 (출처 : 대신증권 보고서, 에너지 전환의 퍼즐을 채우다, 2023.08.)

○ 화력발전에서 생성된 잉여 전력을 ESS에 저장하기 위해서는 배터리형 ESS 또는 압축공기저장 방식의 ESS가 적합하다고 대부분 평가됨. 국내에서는 2022년 기준 세계 4위 수준의 ESS 설비 규모를 보유 중이며, 대부분 리튬 이온 배터리를 활용한 ESS를 활용중에 있음. 설치된 ESS는 주로 재생에너지 연계, 피크 저감 및 주파수조정용으로 활용되며 변전소 근방에 설치됨. (출처 : 산업통상자원부, 에너지스토리지(ESS) 산업 발전전략, 2023.10.31.)

○ 현재 전국적 ESS의 신규 설치는 줄어들고 있는데, 이는 기존 리튬 이온 배터리 방식 에너지저장장치의 화재로 인한 위험성과 낮은 경제성 그리고 장주기 저장 기술 및 재사용 기술 미흡이 원인으로 평가됨. 따라서 ESS 설치에 대한 선정 기준이 높아짐.

○ 현재 국내에서 운영 및 추진 중인 ESS는 다음과 같음.

- 한국서부발전은 2018년 6월부터 태안화력발전소 내 25MW급 배터리형 ESS를 도입하여 운영중에 있음. (출처 : 전기저널 기사, 2021.04.08.)
- 한국동서발전은 2018년 5월부터 울산발전본부 내 1MWh급 레독스 흐름 전지 (바나듐)기반 ESS를 도입하여 운영중에 있음. (출처 : 이투뉴스 기사, 2020.03.18.)
- 한국전력은 제9차 전력수급기본계획에 따라 영주, 함양, 예산, 영천, 신남원, 부북 등의 6개 변전소에서 국내 최대규모인 978MW의 ESS 건설을 추진 중이며, 2024년 7월 기

준 마무리 단계에 있음.



그림 15. 영주변전소 내 설치된 ESS (56MW) 사진 (출처 : 전기신문 기사, 2023.08.30.)

○ 에너지저장장치는 광범위한 전력망 뿐만 아니라, 좁은 지역의 마이크로그리드(Microgrid) 내에서도 활용이 가능함.

○ 마이크로그리드는 소규모 지역이나 건물 단위에서 전력을 생산, 저장, 소비할 수 있는 독립적인 전력망 시스템임. 이는 재생에너지에서 발전된 전력을 소규모 ESS를 통해 저장하고 운영함.

○ 마이크로그리드 내 ESS는 필요에 따라 기존 전력망과 연계하여 운영될 수도 있음.

○ 국내에서는 제주도 스마트그리드 실증단지, 서울시 에너지자립마을 등에서 마이크로그리드 시스템을 도입하여 실증하고 개발하고 있음.



그림 16. 마이크로그리드 구축 개념도 (출처 : 전기신문 기사, 2014.05.10.)

5.2. 에너지저장장치의 유형

(1) 배터리형 ESS

○ 리튬이온 배터리(Lithium-Ion Battery) : 높은 에너지 밀도와 효율, 빠른 충·방전 속도를 갖추고 있으며, 수명이 길어 다양한 용도로 활용됨. 다만, 리튬 이온 양극재와 음극재가 고체상으로 대용량 에너지를 저장보다는 휴대용 전자기기 및 자동차에 적용되고 있음.

○ 나트륨-황 배터리(Sodium-Sulfur Battery) : 고온에서 작동하며, 대용량 에너지 저장이 가능하지만, 고온 유지가 필요하여 추가적인 에너지 소모가 발생할 수 있음.

○ 레독스 흐름 전지(Redox Flow Battery) : 레독스 흐름 전지는 전해질 용액을 저장하고, 이를 양극과 음극을 통해 흐르게 하여 에너지를 저장하고 방출하는 방식으로 작동함. 이는 전해질의 양을 조절하여 에너지 저장 용량을 조정할 수 있어 대규모 에너지 저장에 적합함. 또한, 긴 수명과 높은 안전성을 갖추고 있으며, 충·방전이 독립적이라 배터리 자체의 열화가 거의 없어 장기적으로 안정적인 성능을 유지할 수 있음.

리튬이온배터리·VRFB ESS 비교

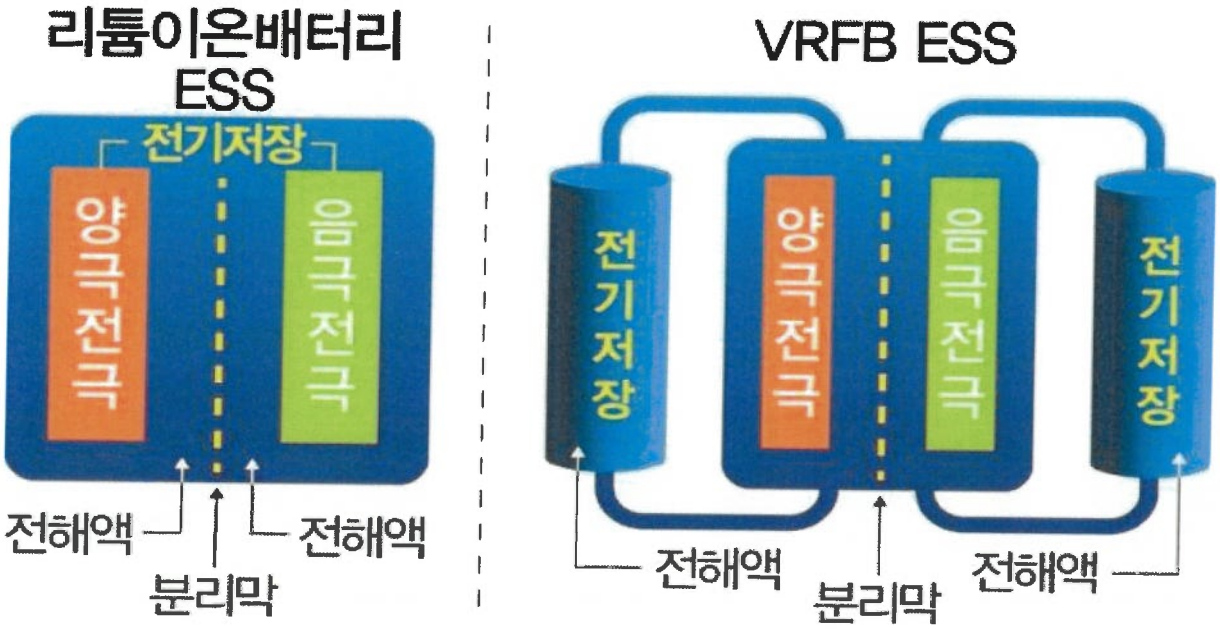


그림 17. Li-ion 배터리와 VRFB 비교 (출처 : 서울경제 기사, 2023.05.26.)

(2) 압축공기 에너지저장장치

○ 압축공기저장시스템(Compressed Air Energy Storage, CAES)은 잉여 전력을 이용해 공기를 압축하여 지하 동굴이나 대형 탱크에 저장하고, 필요시 이 압축공기를 방출하여 전력을 생산하는 방식으로 대규모 에너지 저장이 가능하며, 장기간 저장이 용이함. 다만, 저장에 따른 유지보수 비용과 저장 공간의 지질 조건을 충족하는 설계가 필요함.

○ 국내에서는 한국중부발전이 대규모 재생에너지 전력 수용성 확보를 위해 200MW급 압축공기저장 발전시스템을 개발중에 있음. (뉴시스 기사, 2023.11.28.)

○ 해외의 경우, 독일의 Huntorf에 290MW의 CAES 발전소가 20년 이상 운영되고, 미국의 Alabama주의 McIntosh에서 348MW의 CAES 발전소가 운영되고 있음. (투데이에너지 기사, 2012.01.17.)

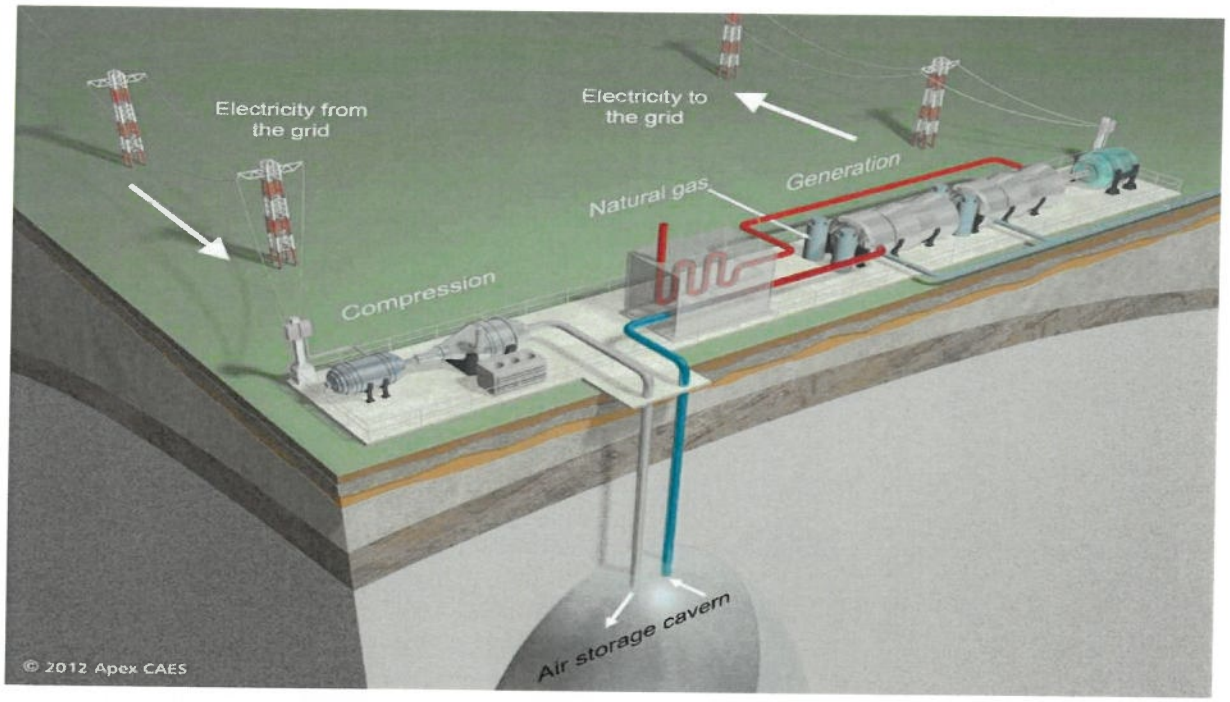


그림 18. 압축공기 저장 시스템 모식도 (출처 : http://www.apexcaes.com/technology-overview)

(3) 플라이휠 에너지저장장치

○ 플라이휠 에너지 저장장치(Flywheel Energy Storage)는 고속으로 회전하는 원판에 에너지를 저장하고, 필요시 이를 전력으로 변환하는 방식임. 이는 빠른 응답 속도와 긴 수명을 갖추고 있음, 그러나 에너지 저장 용량이 상대적으로 적어 대용량 저장 장치로는 부적합하다고 평가됨.

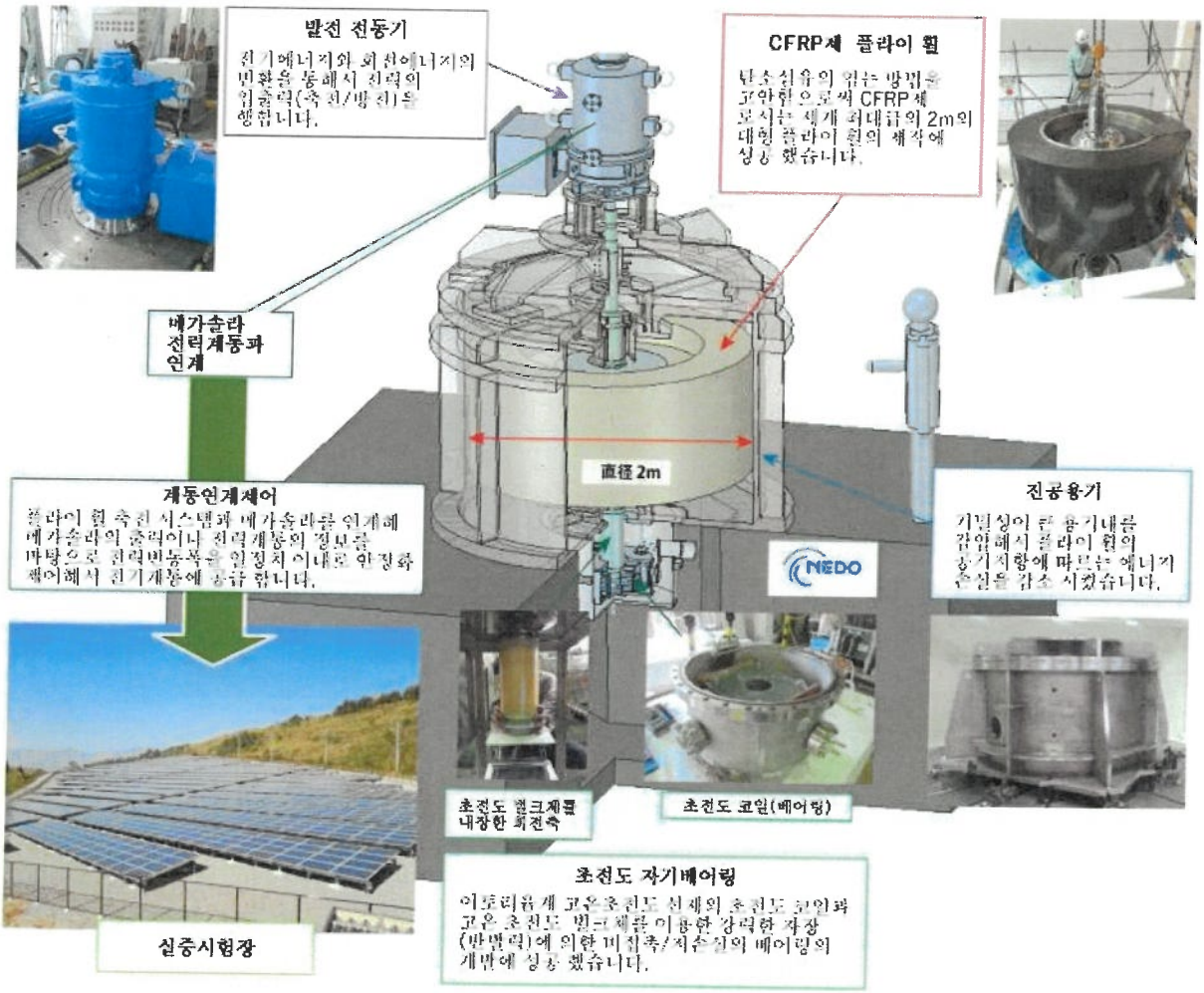


그림 19. 차세대 플라이 휠 축전 시스템 실증시험 시설 (일본), (출처 : Mirapro, https://www.mirapro.co.jp/kr/technology/flywheel/flywheel-20150903/)

5.3. 에너지저장장치의 경제적·환경적 효과

○ ESS의 경제적 효과

- 에너지 비용 절감 : 저부하 시간대의 저렴한 전력을 저장하여 고부하 시간대에 사용함으로써 전력 비용을 줄일 수 있음. 이는 전기요금 체계의 시간대별 차이를 활용하여 비용 절감을 실현함.
- 피크 수요 관리: 피크 수요를 줄여 전력망 설비 투자 비용 절감하고 전력망의 과부하를 방지하여 안정적인 전력 공급을 통해 유지보수 비용 절감이 가능.
- 송배전 비용 절감 : ESS를 분산 설치하여 송배전망의 부담을 완화하고 관련 투자 비용을 줄임.

- 주요 경제적 지표는 다음과 같음.

  - 투자비 회수 기간(Payback Period) : ESS 설치 이후 투자비를 회수하는 데 걸리는 기간.

  - 순현재가치(NPV) : ESS 운영으로 발생하는 순현금흐름의 현재가치를 계산하여 경제적 타당성을 평가하는 지표임. 초기 투자비용이 높으면 NPV가 음수로 나타나 낮은 경제성을 나타냄.

  - 비용-편익 비율(B/C Ratio) : ESS 설치 및 운영으로 발생하는 편익 대비 비용의 비율을 나타냄. B/C 비율이 1 이상일 경우 경제성이 있음.

  - 내부수익률(IRR) : ESS 설치 투자에 대한 연간 평균 수익률로 IRR이 투자비 조달 비용보다 높을 경우 경제성이 있음.

- 정책적 고려 사항으로는 보조금 지원을 통한 초기 설치비용 부담을 줄일 수 있으며, ESS 전용 요금제를 도입하여 경부하와 최대부하 시간대 간의 요금 차이를 두어 전력 소비에 대한 경제성을 향상시킴.

○ 에너지저장기술별 비용 특성

적용분야	설치비용(투자비용)		연간유지관리비 (%/설치비)	방전시간
	출력비용 (USD/kW)	저장비용 (USD/kWh)		
양수발전	500 ~ 4,600	30 ~ 200	1	시간
CAES	500 ~ 1,500	10 ~ 150	4 ~ 5	시간
리튬이온 배터리	900 ~ 3,500	200 ~ 2,300	3	분 ~ 시간
나트륨-황 배터리	300 ~ 2,500	275 ~ 500	5	시간
납축전지 (LA)	250 ~ 840	60 ~ 300	5	시간
바나듐 레독스-흐름 전지	1,000 ~ 4,000	350 ~ 800	3	시간
플라이휠	130 ~ 500	1,000 ~ 4,500	-	분
초전도 자기 에너지 저장 시스템 (SMES)	130 ~ 515	900 ~ 9,000	-	분
슈퍼커패시터	130 ~ 515	380 ~ 5,200	-	초 ~ 분
수소	600 ~ 1,500 800 ~ 1,200 (CCGT, 가스터빈)	10 ~ 150	5	분

표 4. ESS기술별 비용 및 특성 정리 (출처 : 에너지경제연구원, 2015 겨울호, 에너지저장 시스템의 경제성 분석 및 정책제언)

○ ESS의 환경적 효과

- 재생에너지의 간헐성에 따른 문제점들을 해결하고 자원의 활용도를 향상시킬 수 있음. 이는 재생에너지의 활용을 증가시킴으로써 탄소 배출을 줄일 수 있음.
- 또한 피크시간대 저장된 전력을 방출하여 추가적인 화석연료 발전의 기동률을 줄이고, 전력 공급의 효율성을 개선하여 탄소 배출을 감소시킴.
- ESS는 전력망의 전력 손실을 줄이고, 과잉 생산으로 인한 출력 제한을 방지할 수 있으며, 이에 따라 전력의 품질을 유지하여 추가적인 전력망 설비 의존도를 낮춤.
- 이들 ESS의 환경적 효과는 국가와 기업의 탄소 배출권 확보에 기여할 수 있어 청정 에너지로의 전환을 가속화함.

5.4. 에너지저장장치 운영 시나리오

○ ESS는 일반적으로 전력 수요가 적을 때 에너지를 저장하고, 전력 수요가 많은 피크 부하 시간에 저장된 에너지를 방출하여 피크 전력 저감 및 전력 공급의 안정성을 확보하는 기술임. 따라서, ESS 운영에 대한 핵심 요소는 피크 전력에 따른 변동성에 대응할 수 있어야 함.

○ 이는 특히, 스마트 그리드 기술과 연계되어, 보다 효율적인 전력 공급망을 구축할 수 있음.

○ 국내 전력 현황 내 계절별 피크 전력의 수요는 여름 > 겨울 > 봄 > 가을 순서이며 시간대별 평균 피크 전력의 수요는 18:00 > 21:00 > 15:00 > 09:00 > 12:00 > 24:00 > 06:00 > 03:00 으로 집계됨. 따라서 봄, 가을 계절 내 24:00 ~ 06:00시에서 발전된 전력의 저장이 가장 적합함.

○ 몇 가지 제시된 ESS의 운전 시나리오 순서도 및 비상 운전 시나리오 순서도는 다음과 같음

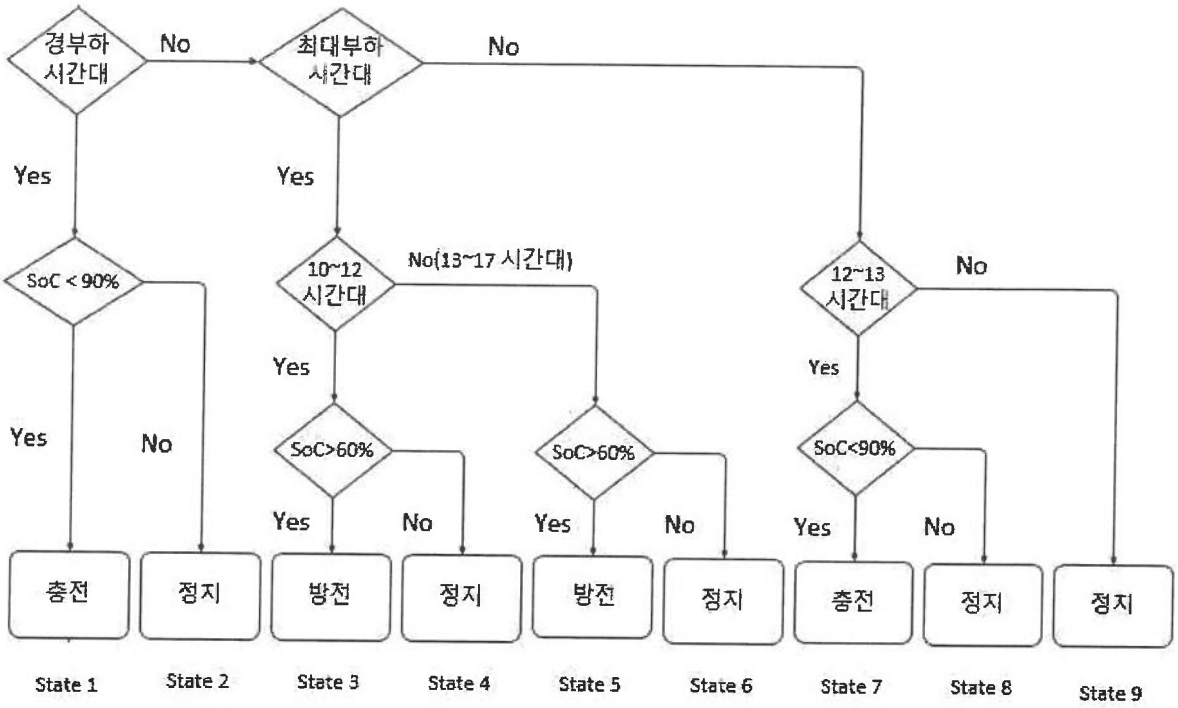


그림 20. 봄, 여름, 가을 기간 ESS 운전 시나리오의 순서도 (출처 : Trans. KIEE. Vol. 67, No.2, FEB, 2018)

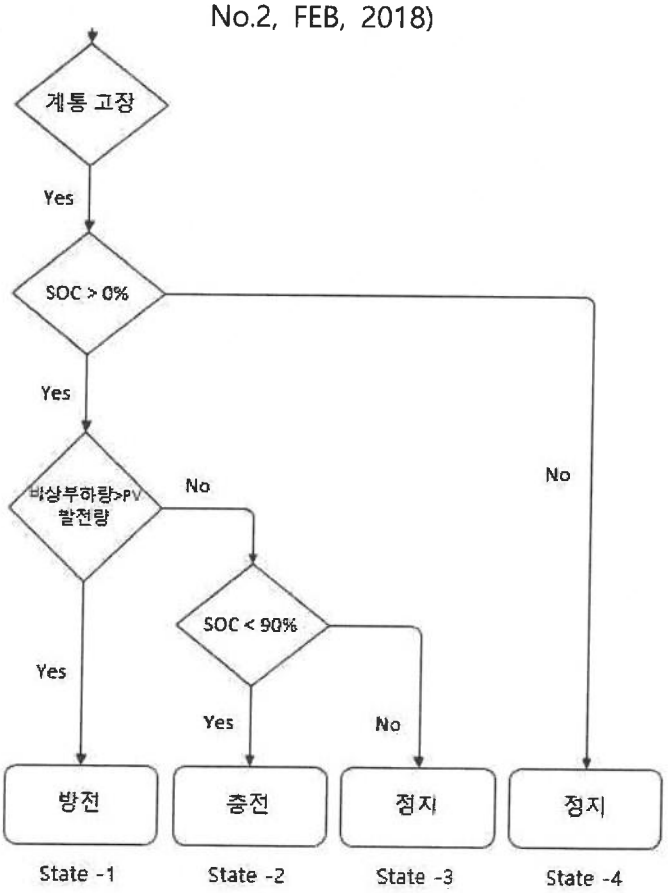


그림 21. ESS 비상 운전 시나리오 순서도 (출처 : Trans. KIEE. Vol. 67, No.2, FEB, 2018)

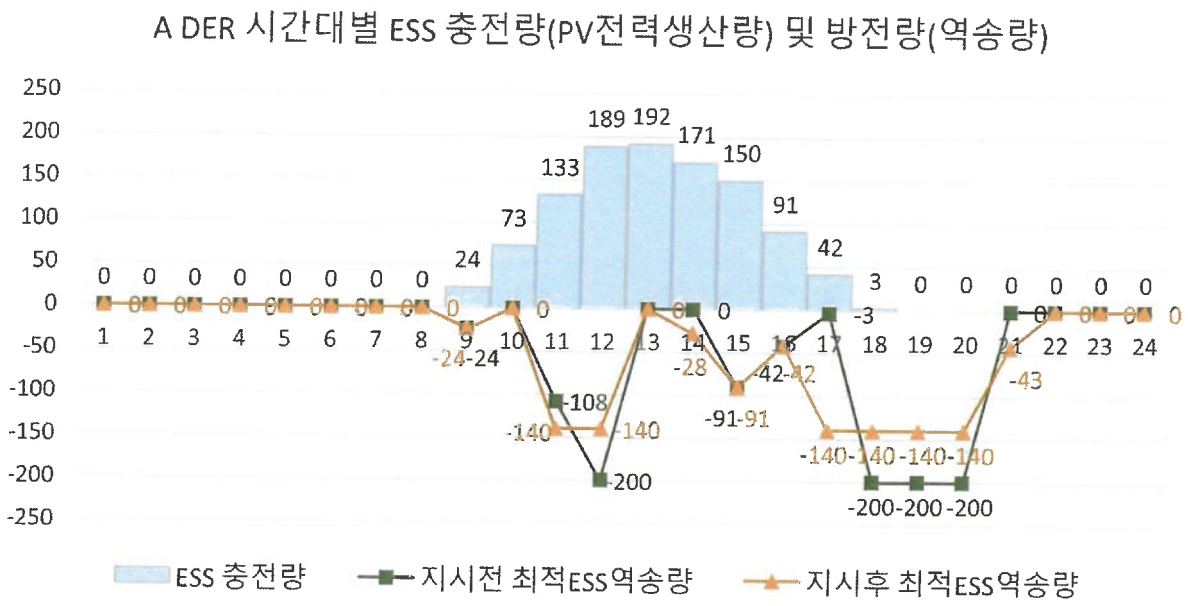


그림 22. 분산자원 ESS 시나리오 (출처 : Journal of KIIEE, Vol.35, No.10, October 2021)

제6장 잉여 전력을 활용한 수전해 기반 그린 수소 생산

6.1. 수전해 기술

○ 수전해 개요

- 수전해(water electrolysis)는 전기 에너지를 이용하여 물(H_2O)을 수소(H_2)와 산소(O_2)로 분해하는 기술로, 특히 재생에너지 발전과 잉여 전력을 활용하여 그린 수소를 생산하는 데 큰 주목을 받고있는 기술임. 이 과정에서 에너지저장장치(ESS)에 저장된 잉여 전력을 사용하면, 전력 수요와 공급의 불균형을 해소하고, 탄소 배출이 없는 청정 에너지원인 수소를 생산할 수 있음.
- 수전해를 통해 생산된 수소는 그린 수소로 분류되며, 이는 수소 에너지 산업에서 미래 친환경 에너지원의 핵심 물질로 각광 받고 있음.

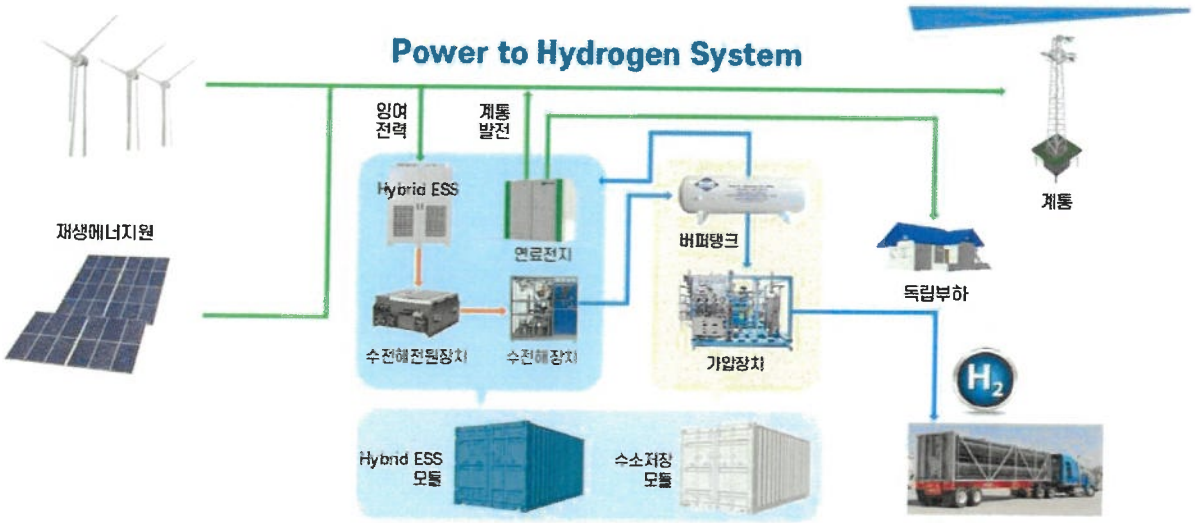


그림 23. 재생에너지원 수전해 기반 그린 수소 생산 및 활용 시스템 (출처 : KOMIPO 한국중부발전, https://www.komipo.co.kr/kor/content/48/main.do?mnCd=FN021501)

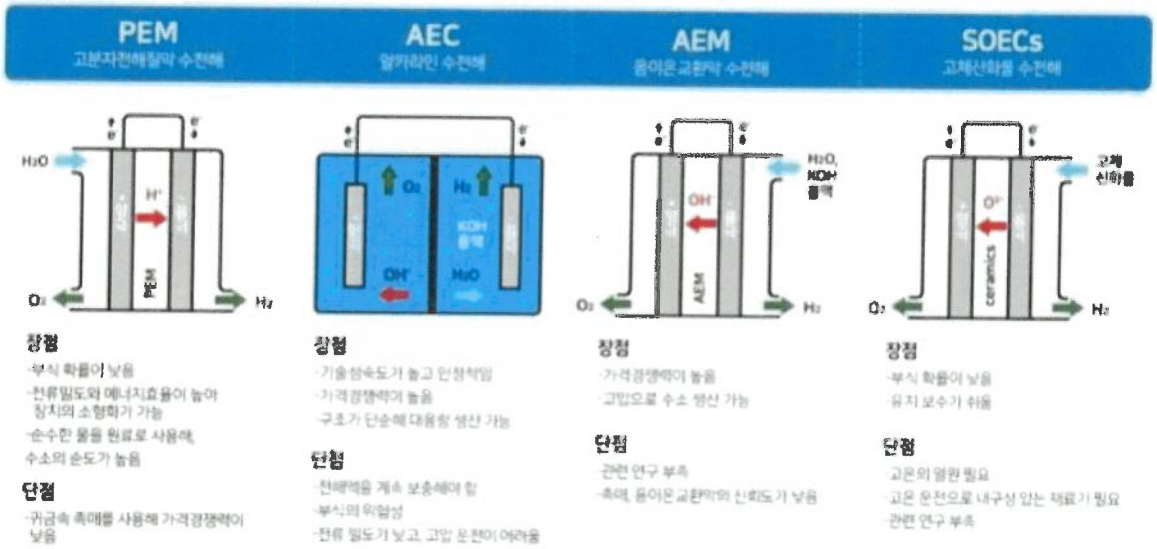


그림 24. 수전해 설비의 종류 및 특징 (출처 : SK이노베이션 E&S, 수전해, https://media.skens.com/4952)

(1) 고분자 전해질막 수전해

○ 고분자 전해질막 (Polymer Electrolyte Membrane, PEM) 수전해는 고분자 전해질을 막(membrane)으로써 사용하여 높은 전류 밀도와 효율을 제공하며, 비교적 낮은 온도에서도 빠른 반응 속도를 갖추고 있음. 그러나 전극 촉매로 귀금속을 사용하여 초기 비용이 높을 수 있음.

○ PEM 수전해 시스템의 구성 요소는 다음과 같음.

- 양극 (Anode) : 산소 발생 전극으로 보통 이리듐 산화물(IrO_2) 또는 루테늄 산화물(RuO_2) 같은 귀금속 촉매가 사용되며 높은 산화 저항성과 촉매 활성을 가짐.
- 음극 (Cathode) : 수소 발생 전극으로 백금(Pt) 촉매가 주로 사용됨.
- 고분자 전해질막 (PEM) : 주로 Dupont사에서 개발된 Nafion(나피온) 고분자 전해질막을 사용하며 이는, 양성자(H^+)의 이동을 돕는 고체 전해질로 물에서 분해된 양성자가 음극으로 이동하는 매개체 역할을 함.
- 가스 확산층 (Gas Diffusion Layer, GDL) : 전극에서 생성된 수소와 산소를 외부 채널로의 이동을 수행하는 역할을 함. 주로 티타늄과 탄소 소재 섬유가 사용됨.

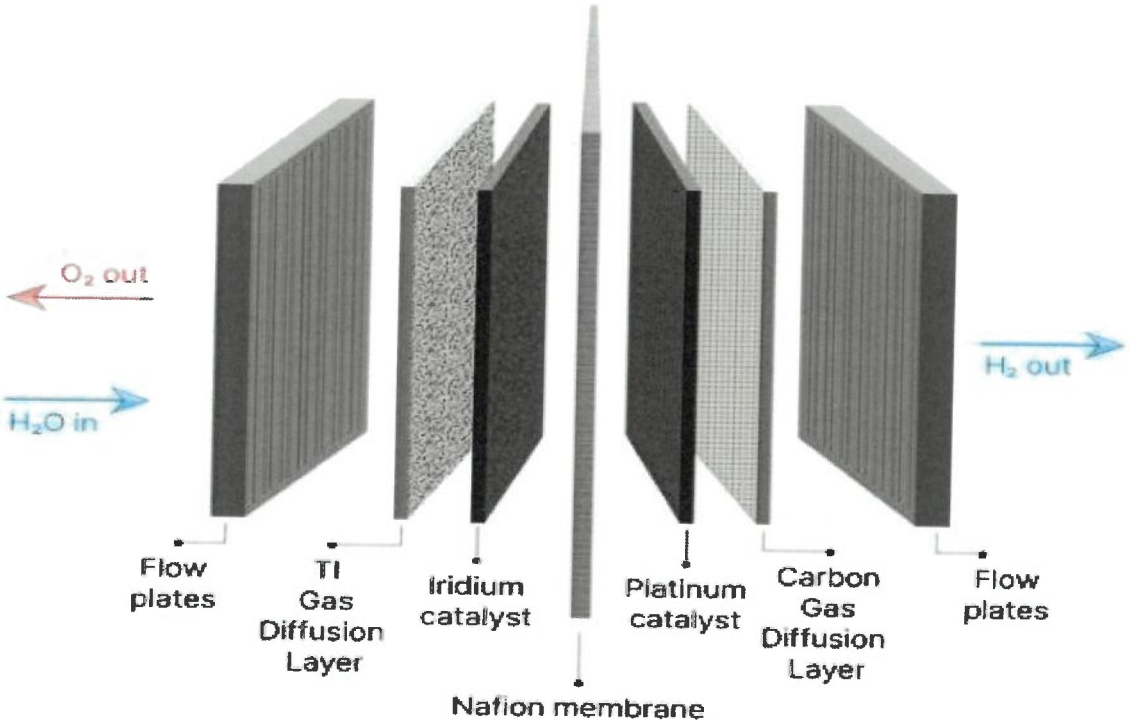


그림 25. PEM 수전해 구성 요소 (출처 : Nexon Star, http://nexonstar.org/page/product/rnd.html)

(2) 알칼라인 수전해

○ 알칼라인 수전해 (Alkaline Water Electrolysis)는 알칼리성 전해질(보통 수산화칼륨, KOH 또는 수산화나트륨, NaOH 용액)을 사용하여 전기 분해를 통해 물(H_2O)을 산소(O_2)와 수소(H_2)로 분리하는 기술임. 저렴한 전극 재료를 사용할 수 있어 초기 비용이 낮고, 대규모 적용에 적합한 기술로 평가받음. 다만, 비교적 낮은 전류 밀도와 큰 시스템 부피가 단점으로 지적됨.

○ 알칼라인 수전해 시스템의 구성 요소는 다음과 같음.

- 양극 (Anode) : 산소 발생 전극, 니켈(Ni), 니켈-철(Ni-Fe) 합금, 니켈 산화물(NiO) 등의 비귀금속 촉매를 사용되며 높은 산화 저항성을 가져 내구성이 우수함.
- 음극 (Cathode) : 수소 발생 전극, 니켈(Ni)이나 니켈-몰리브덴(Ni-Mo) 합금을 사용됨.
- 전해질 (Electrolyte) : 수산화칼륨(KOH) 또는 수산화나트륨(NaOH) 수용액을 사용하여 양극에서 생성된 OH^-(수산화 이온)가 음극으로 이동할 수 있는 매개체 역할을 수행함.
- 다이어프램 (Diaphragm) : 주로 다공성 폴리프로필렌 기반 고분자를 사용하며, 기체 혼합 방지와 이온 전도성을 동시에 제공함. 이는 또한 전해질의 수산화 이온의 이동을 지원함.
- 가스 확산층 (GDL) : 생성된 수소와 산소를 외부로 전달하는 역할을 수행함. 주로 다공성 니켈 기반 화합물이 사용됨.

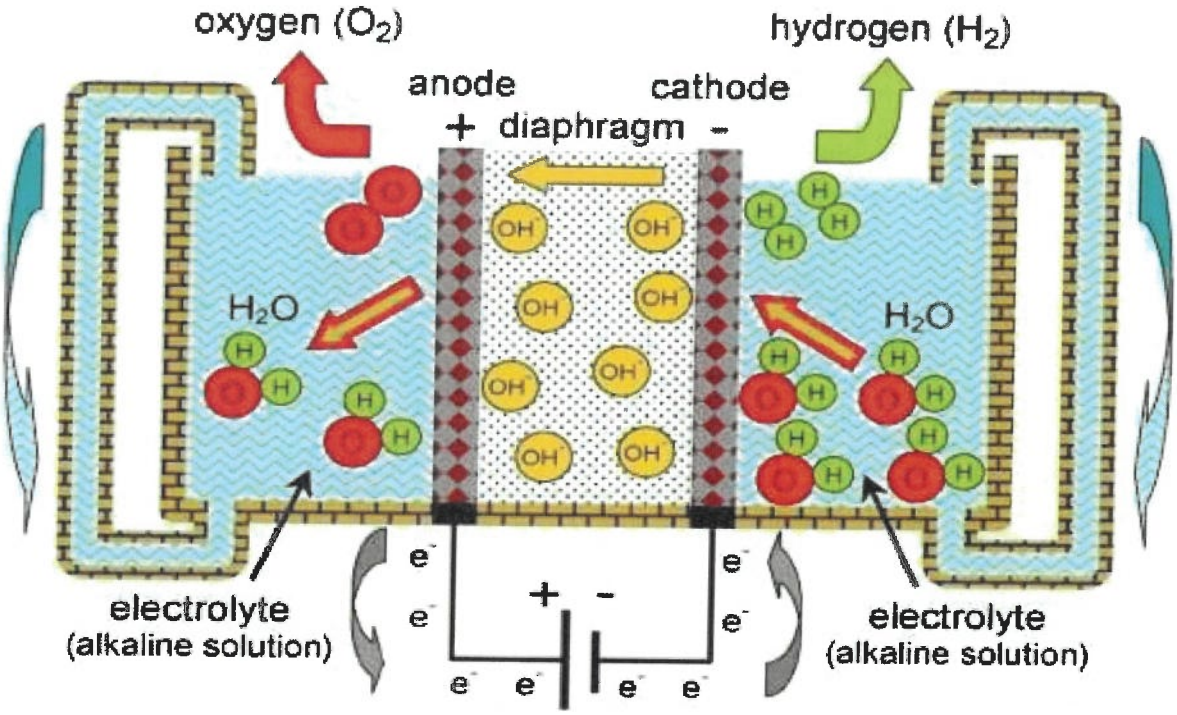


그림 26. 알칼라인 수전해 모식도 (출처 : http://doi:10.13140/RG.2.2.14351.12964)

(3) 음이온 교환막 수전해

○ 음이온 교환막 (Anion Exchange Membrane, AEM) 수전해는 음이온 교환막을 활용하여 물을 전기 분해해 수소와 산소를 생산하는 기술로 알칼라인 수전해의 낮은 비용과 PEM 수전해의 높은 효율을 접목시킨 수전해 시스템임.

○ AEM은 저비용 비귀금속 촉매를 사용하며, 중온 구간(40~80°C)에서도 높은 효율을 보임. 다만, 현재까지는 기술 성숙도가 낮고, 음이온 교환막(AEM)의 내구성이 한계로 지적되고 있음.

○ 음이온 교환막 수전해 시스템 구성요소는 다음과 같음.

- 양극 (Anode) : 산소 발생 전극, 니켈(Ni), 니켈-철(Ni-Fe) 합금 및 여러 비귀금속 산화물이 사용됨.
- 음극 (Cathode) : 수소 발생 전극, 알칼라인 수전해와 유사하게 니켈(Ni)이나 니켈-몰리브덴(Ni-Mo) 합금을 사용됨.
- 음이온 교환막 (AEM) : 대표적으로 Fumatech사의 Fumapem, Dioxide Materials의 AEM이 사용되며, 물 분해로부터 발생된 수산화이온의 이동을 수행함.
- 전해질 (Electrolyte) : 고체 전해질로 AEM만을 사용할 수 있으며, 또는 희석된 KOH 수용액과 병행하여 사용되기도 함.
- 가스 확산층 (GDL) : 생성된 수소와 산소를 외부로 전달하는 역할을 수행함. 주로 다공성 니켈 폼이나 탄소 섬유 기반 소재가 사용됨.

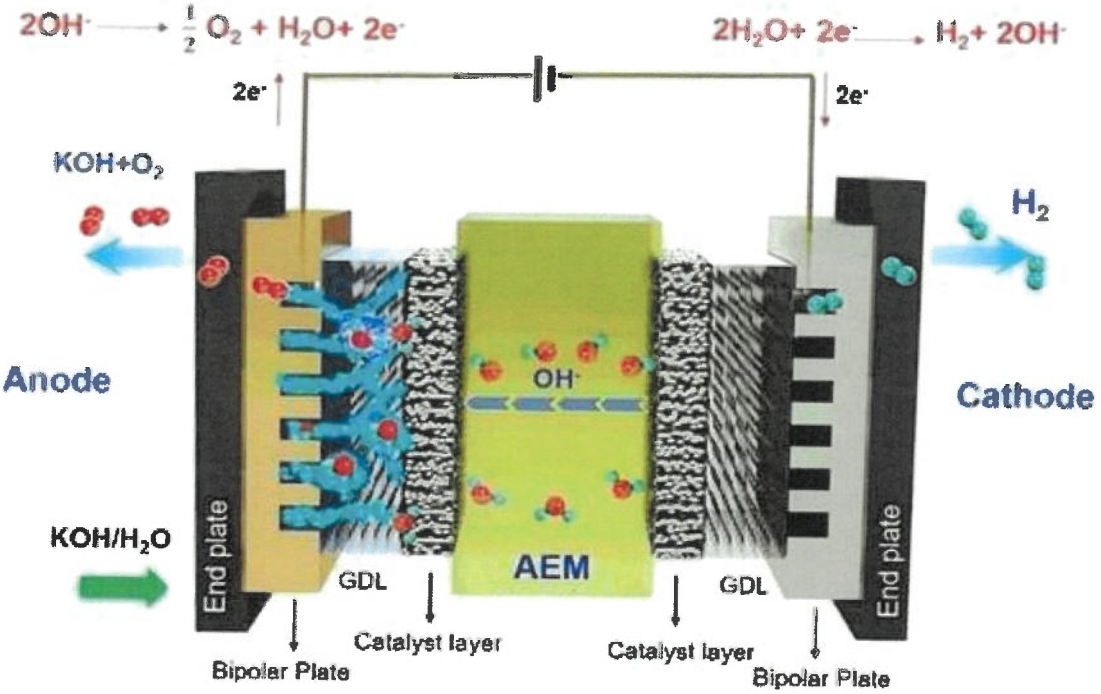


그림 27. 음이온교환막 수전해 구성 요소 및 모식도 (출처 : 월간수소경제 기사, 2021.12.30.)

(4) 고체 산화물 수전해

○ 고체 산화물 수전해 (Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC)는 고체 산화물을 전해질로 사용하는 고온 수전해 기술로, 물(H_2O)을 전기 분해하여 수소(H_2)를 생산함.

○ 이는 높은 작동 온도(700 ~ 1000°C)에서 작동하여 열에너지를 활용할 수 있으며, 전력 효율이 매우 뛰어남.

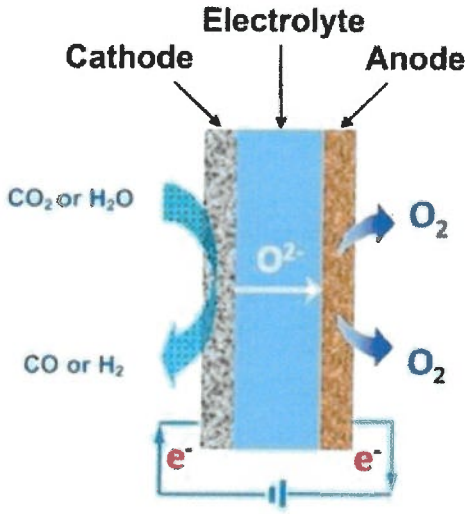
○ 또한 SOEC의 고온의 특성을 이용하여 이산화탄소(CO_2)를 활용한 합성가스(Syngas) 생산이 가능하여 CCU 기술에 접목시킬 수 있음.

○ SOEC는 작동온도가 고온임에 따라 내구성과 초기 설치 비용을 고려해야함.

○ 고체 산화물 수전해 시스템의 구성요소는 다음과 같음.

- 양극 (Anode) : 산소 발생 전극, 다양한 금속 산화물이 사용되며 주로 고온에도 안정한 페로브스카이트 화합물이 사용됨. (LSM, LSCF, Double Layered Perovskite 등)
- 음극 (Cathode) : 수소 발생 전극, 니켈 기반 화합물이 사용되며, Ni-YSZ, Ni-CGO, Ni-Perovskite 등의 금속 복합체가 대표적인 음극 촉매로 사용됨.
- 고체 산화물 전해질 (Solid Oxide Electrolyte) : 대표적으로 YSZ, ScSZ, GDC등의 금속 산화물 복합체가 사용되며, 이들은 작동 온도에 따라 분류됨. 고체 산화물 전해질은 수증기 분해에 따른 산소 이온(O^{2-})의 전달 역할을 수행함.
- 지지체 (Support Layer) : 기계적 강도를 제공하여 전극과 전해질을 물리적으로 지지하는 역할을 수행함.
- 가스 확산층 (GDL) : 생성된 수소와 산소를 외부로 전달하는 역할을 수행함. 주로 고

온 안정한 니켈 기반 다공성 소재가 사용됨.



Cathode: $CO_2(g) + 2e^- \rightarrow CO(g) + O^{2-}$

$H_2O(g) + 2e^- \rightarrow H_2(g) + O^{2-}$

Anode: $2O^{2-} \rightarrow O_2(g) + 4e^-$

그림 28. 고체 산화물 수전해 시스템 모식도와 반응식 (출처 : Journal of Material Science and Technology 55 (2020), 35-55, https://doi.10.1016/j.jmst.2019.07.026)

(5) 수전해 종류별 특징 비교

○ 수전해 기술별 특성 비교

구분	고분자 전해질 막 수전해 (PEMEC)	알칼라인 수전해 (AEC)	음이온 교환막 수전해 (AEMEC)	고체산화물 수전해 (SOEC)
전해질	Nafion 고분자 전해질 막	KOH 또는 NaOH 수용액	음이온 교환막	YSZ 등 고체산화물
작동 온도 (℃)	50 ~ 80	60 ~ 80	40 ~ 60	700 ~ 1000
전류 밀도 (A/cm^2)	1.0 ~ 2.0	0.2 ~ 0.4	0.5 ~ 1.0	0.3 ~ 1.0
효율 (HHV)	60 ~ 70%	60 ~ 70	60 ~ 70	80 ~ 90
장점	- 높은 전류 밀도 - 빠른 부하 응답성 - 소형화 가능 - 고순도 수소 생산	- 기술 성숙도 높음 - 저렴한 전극 재료 - 대규모 수소 생산	- 비귀금속 촉매 사용 가능 - 알칼라인과 PEM의 장점 결합 - 저렴한 전해질 사용	- 높은 에너지 효율 - 열에너지 활용 가능 - CO_2 전환 연계
단점	- 귀금속 촉매 사용 - 높은 전해질 막의 비용	- 낮은 전류 밀도 - 큰 시스템 부피 - 부식성 전해질로 인한 유지보수	- 기술 성숙도 낮음 - 전해질막의 낮은 내구성	- 고온 작동으로 인한 소재의 열화 - 높은 초기 투자 비용 - 시동 시간 필요
경제성	- 초기 투자 비용 높음 - 운영 비용 중간	- 초기 투자 비용 낮음 - 운영 비용 중간	- 초기 투자 비용 중간 - 운영 비용 낮음	- 초기 투자 비용 높음 - 운영 비용 낮음
상용화 단계	상용화 진행중	상용화 완료	연구 및 파일럿 단계	연구 및 파일럿 단계
적용 분야	- 재생에너지 연계 수소 생산 - 휴대용 연료전지 내 연료 생산	- 대규모 산업용 수소 생산	- 소규모 분산형 수소 생산 - 재생에너지 연계	- 고효율 수소 생산 - 합성 연료 생산

표 5. 수전해 기술별 특징 비교

6.2. 그린 수소

○ 그린 수소 개요

- 기후 변화와 환경 오염 문제의 심각성이 대두됨에 따라, 전 세계는 지속가능한 에너지원을 모색하고 있으며, 그중에서도 수소 에너지는 청정 에너지원으로 주목받고 있음.
- 특히 재생 가능 에너지를 활용하여 생산되는 '그린 수소'는 탄소 배출이 없는 친환경 에너지임.
- 그린 수소는 태양광, 풍력 등 재생 가능 에너지를 통해 물을 전기분해하여 생산되는 수소를 의미함. 이러한 생산 과정에서 이산화탄소 등 온실가스 배출이 전혀 발생하지 않으므로, 가장 친환경적인 수소 생산 방식임.

○ 수소의 분류

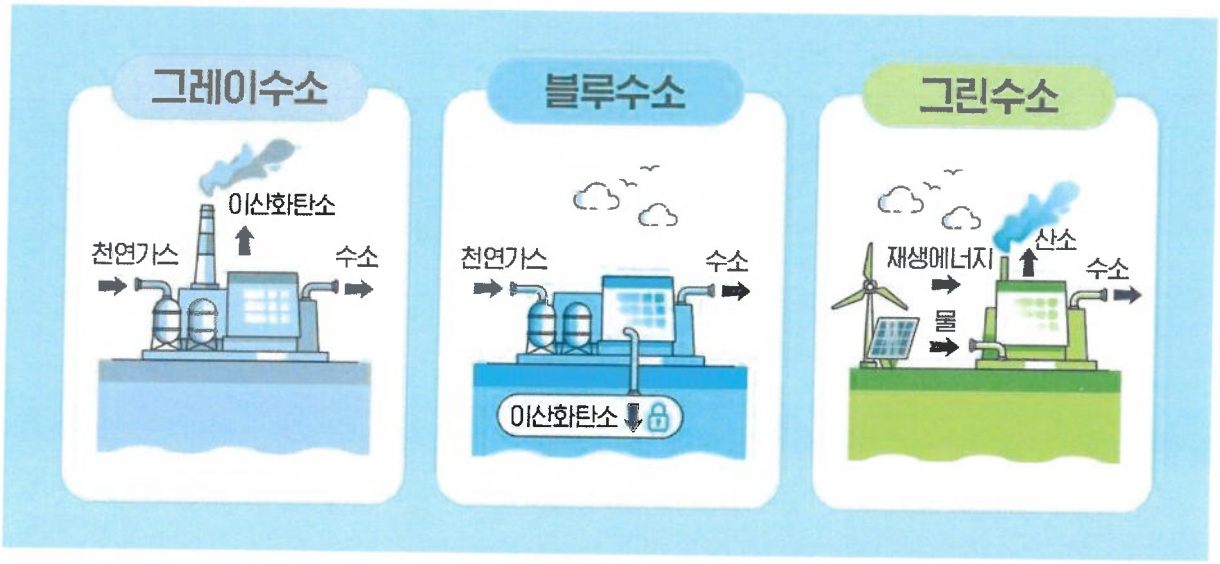


그림 29. 그레이 수소, 블루 수소, 그린 수소 분류 (출처 : GS칼텍스, 미디어허브, 2023.02.14.)

○ 국내 수소경제 활성화 로드맵 (수소경제활성화로드맵, 출처 : 한국수소연료전지산업협회, https://www.khfcia.com/67)

- 2019년 1월 정부에서 국내 수소경제 활성화 로드맵 발표는 국내 수소 산업을 세계 최고 수준의 수소 경제 선도국가로 도약하는 것을 목표로 함.
- 로드맵의 주요 발표 내용은 다음과 같음.

  - 목표 : 수소 활용 확대, 수소 생산 패러다임 전환, 수소 저장·운송 체계 확립, 수소 산업 생태계 조성

  - 추진 전략: 수소 경제 준비기 (2018 ~ 2022), 수소 경제 확산기 (2022 ~ 2030), 수소 경제 선도기 (2030 ~ 2040)

- 정부 : 지원 및 규제 완화, 대규모 인프라 투자, 산업 생태계 보완, 국제 표준 선정, 수소 사회 이행, 국제 리더십 확보 등
- 민간 : 핵심 기술 내재화, 투자 확대, 상업적 생산 체계 구축, 수소 비즈니스 플랫폼 구축, 민간 주도 시장 확대, 글로벌 시장 선도 등
- 기대 효과 : 2040년까지 수소차 620만 대 보급, 연료전지 발전용 15GW 설치, 가정·건물용 연료전지 2.1GW 설치, 수소 공급 526만 톤 이상, 수소 가격 3,000원/kg 달성 등을 목표로 함.

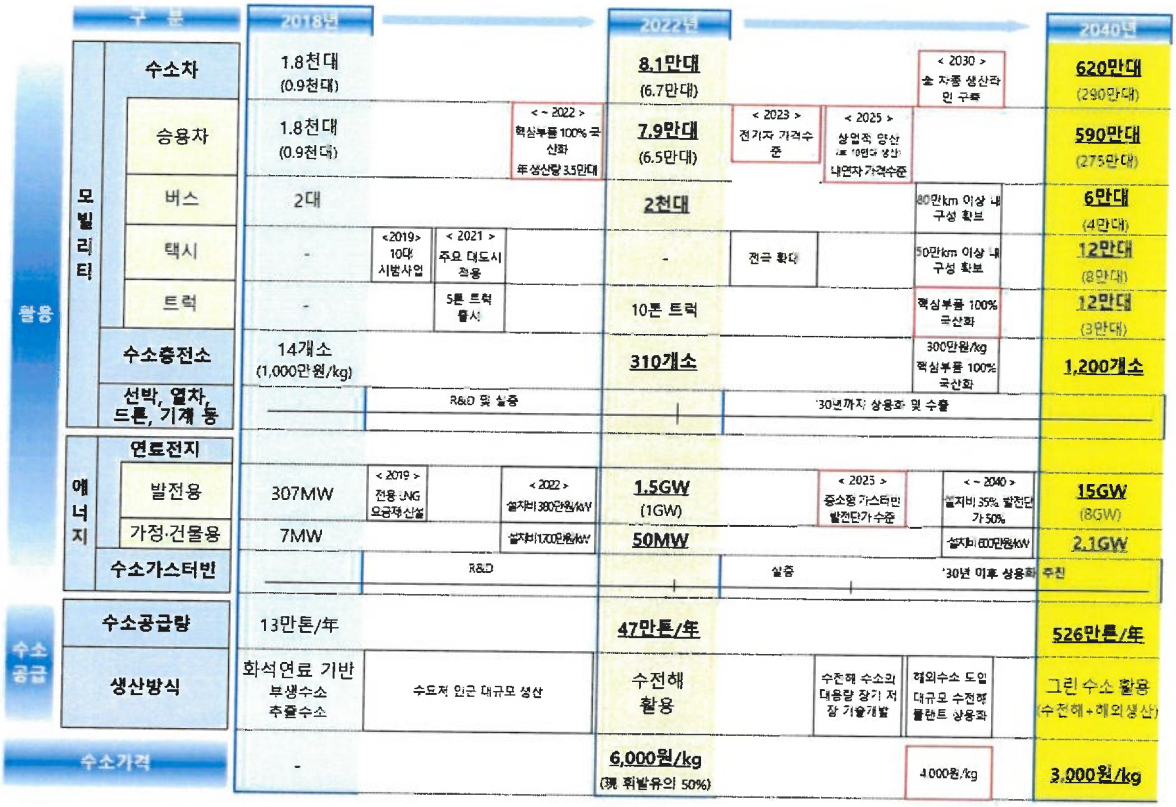


그림 30. 수소경제 활성화 로드맵 (출처 : 산업통상자원부 보도자료, http://www.motie.go.kr)

○ 그러나 현재 국제에너지기구(IEA)에서 발표한 '재생에너지 2023' 연례 보고서에 따르면 그린 수소 에너지 시장 전망을 2022년 대비 하향 조정하였음. 이는 전세계적인 경제 인플레이션에 따른 비용 증가와 수요 부족, 정책적 지원 부족 등에 따른 원인으로 중국을 제외한 모든 지역에서 그린 수소 생산 목표치를 하향 조정하였기 때문임. (출처 : 그리니엄 기사, 2024.01.31.)

6.3. 잉여 전력 기반 그린 수소 생산

○ 재생에너지 기반 잉여 전력은 지역 내 마이크로그리드를 통해 잉여전력을 저장하고,

수전해 기술을 통해 그린 수소로 변환한 뒤, 전력 수요가 많은 타지역으로 제공될 수 있음.

- ○ 독일의 REFHYNE 프로젝트는 2021년 7월 유럽에서 그린 수소 생산을 선도하는 프로젝트 중 하나로 평가받으며, 재생 에너지를 전력원으로써 활용하여 10MW급 PEM 수전해를 통해 연간 1,300톤의 그린 수소를 생산함. 생산된 수소는 정유 공정에서 다시 사용되어 탈탄소화를 촉진시킴. (출처 : REFHYNE, https://www.refhyne.eu/refhyne-2/)
- ○ 호주 재생에너지청 (Australian Renewable Energy Agency, ARENA)에서는 재생에너지를 활용한 수전해 기술을 통해 그린 수소 생산 시스템의 상용화를 추진하고 있음. 호주 AGL Energy는 빅토리아주 롯지 석탄 화력발전소 부지에 200MW 규모의 수전해 설비를 구축하여 그린 수소를 생산 시스템을 추진중임. 또한, 호주 Yara는 필바라 지역에 위치한 암모니아 생산 시설에서 재생에너지를 활용한 수전해 기술을 통해 그린 수소를 생산하고, 이를 그린 암모니아로 생산하는 프로젝트를 추진중임.
- ○ 국내에서는 제주 상명풍력발전단지에서 풍력 발전에 따른 잉여 전력을 활용하여 그린 수소의 생산 시스템에 대한 실증 작업이 수행중임. 이는 한국중부발전과 지필로스가 협력하여 500kW급 그린수소 생산 단지를 구축하고 일평균 35kg의 수소를 생산함. 또한, 성남 광역정수장의 소수력 발전 기반 그린수소 생산시설이 2023년 9월 준공되어, 일평균 188kg의 수소를 생산하였음. (출처 : 한겨레 경제, 2021.10.29.)

6.4. 삼척화력발전소 수소 생산 전략

- ○ 삼척화력발전소는 발전량이 수요를 초과하는 경우 잉여 전력이 발생됨. 이에 따라 초과된 잉여 전력을 ESS를 통해 저장하고, 수전해를 통해 수소를 생산함으로써 전력 낭비를 방지하고, 에너지 효율을 향상시킬 수 있음.
- ○ 삼척시는 2024년 11월 국내 공식 수소특화단지로 선정되어 수소 인프라 구축, 생산, 유통 등 다양한 사업 계획을 추진중에 있음. 정부는 2024년부터 2028년까지 총 3,177억 원의 예산을 통해 수소 저장·운송 클러스터 구축 사업을 추진함. 또한, 동해 북평산업단지 내 기업 기반 시설을 건설하고, 삼척 호산 산업단지에 LNG 인수기지 인근 부지를 활용하여 수소액화플랜트를 구축 예정임.(출처 : 월간수소경제 기사, 2024.11.01.)
- ○ 일반적으로 수소 1kg을 생산하는데 필요한 전력 소비량은 64.3kwh이며. 이를 2023년 기준 삼척화력발전소의 최대 발전 용량(약 2,000MW) 대비 소비 용량 (8,8867,020 MWh)으로 계산하였을 때, 잉여 전력 비율은 49.4%에 달함. 이를 연간 수소 생산 가능량으로 나타내면 다음과 같은 식을 적용하여 연간 10만톤 이상의 수소를 생산할 수 있음.

- 잉여 전력 비율 (%) $= \left(\frac{(2{,}000\,MW \times 8{,}760\,h) - 8{,}867{,}020\,MWh}{(2{,}000\,MW \times 8{,}760\,h)}\right) \times 100\% \approx 49.4\%$

- 수소 생산량 $(ton) = \frac{\text{잉여 전력}\,(MWh)}{\text{수소 1톤 생산당 소비 전력}\,(MWh)} = \frac{8{,}562{,}980MWh}{0.0643MWh/ton} \approx 134{,}628ton$

○ 생산된 수소는 수소 저장 및 운송에 대한 인프라 구축이 완료된다면, 타지역으로 직접적인 에너지 보급이 가능함. 그러나, 수소 생산 단가와 판매 단가를 고려해보았을 때, 2024년 기준 석탄 균등화 발전비용(LCOE)은 kWh당 168.0원으로, 이를 1kg 수소 생산에 필요한 전력량으로 환산 시 10,802원/$kg_{(수소)}$의 생산 단가임을 알 수 있음. 2024년 11월 기준으로 국내 수소 충전소 평균 판매 가격이 10,027원/$kg_{(수소)}$임을 고려하였을 때, 수소 생산 대비 판매에 대한 순이익은 –775.4원/$kg_{(수소)}$임. 또한 이는 수소 저장 및 운송에 대한 추가적인 비용을 고려하지 않았기 때문에 현재까지는 경제적이지 않다고 평가됨.

○ 이는 수소 생산에 필요한 전력을 스마트 그리드를 통해 효율적으로 관리하고 운영 비용이 저렴한 ESS선택이 필요하며, 수전해의 효율(수소 생산에 필요한 전력량 감소 등)을 개선하여야 잉여 전력의 활용을 경제성 있는 기술로 성장시킬 수 있음.

제7장 기대효과

7.1. 경제적 효과

- ○ 삼척화력발전소 및 강원특별자치도 내에서 생산된 잉여 전력을 제시된 ESS내 저장하고 필요시 사용함으로써 추가적인 발전 비용 절감 및 수익 창출이 기대됨. 또한, 저장된 잉여 전력을 활용해 수전해를 실시하여 그린 수소를 생산함으로써 수소 산업 에너지 시장에 경제성을 확보함. 이는 잉여 전력에서 그린 수소로의 전환을 통해 탄소 배출량을 줄임으로써 추가적인 탄소 배출권 거래를 활용하여 경제적 이익을 창출해 낼 수 있음.
- ○ 스마트 그리드 기술을 통해 강원특별자치도에서 수도권과 같은 전력 수요가 높은 지역으로 잉여 전력을 효율적으로 송전하여 송전 손실을 줄이고, 송배전망 확충 비용을 절감할 수 있음.
- ○ 삼척시는 특히 국내 수소특화지구로 선정되어 그린 수소 생산 및 송전 인프라 구축을 위한 투자가 전폭적으로 이루어져 지역 내 고용 창출 및 경제적 파급 효과가 기대됨. 이는 국내 수소 생산 및 저장 기술의 중심지로 육성하여 관련 산업 성장을 촉진시킴.

7.2 사회적 효과

- ○ 강원특별자치도 내 잉여 전력을 저장하고 필요시 타지역으로 송전하여 지역 간 에너지 불균형 문제를 완화시켜 지역 간 에너지 형평성을 확보함. 또한 스마트 그리드 기술을 통해 전력 수요와 공급을 조절하여 전력 공급 안정성을 확보함으로써 에너지 복지 증진.
- ○ ESS 설치 및 운영, 수소 생산 시설 관리, 스마트 그리드 운영 등을 위한 새로운 고용 창출 및 기술 인력 양성 일자리가 창출됨.
- ○ 또한 국내 수소특화지구인 삼척 내 전문 기술 인력 양성을 통해 지역 주민들에게 교육 기회와 지속가능한 고용을 제공함.
- ○ 강원특별자치도를 청정 에너지 중심지로 발전시켜, 환경친화적인 지역 이미지를 구축하고 탄소 중립 실현에 기여하며, 에너지 전환을 통한 지역 이미지 제고 및 국제적인 에너지 전환 모범 사례로 자리매김.

7.3 환경적 효과

- 삼척화력발전소에서 발전된 잉여 전력을 수전해를 통해 수소로 저장하고 도내 신재생 에너지 발전으로부터 비롯된 잉여 전력을 그린 수소로의 저장은 전력 수요에 따른 추가적인 화석연료 기반 에너지 사용을 대체하고 온실가스 배출 저감을 이룩할 수 있음.
- 스마트 그리드와 ESS를 통한 효율적인 전력 공급은 화석연료 발전소의 추가 가동을 줄임으로써 미세먼지와 대기오염 물질 배출을 감축함.
- 장기적인 잉여 전력의 저장과 수소 생산, 스마트 그리드를 통한 고효율 송전은 국가적 탄소중립 목표 달성에 기여하고 지속가능한 에너지 생태계 구축 및 환경 보호에 기여함.

제8장 결론 및 제언

○ 잉여 전력 활용의 필요성

- 강원특별자치도 전력 자립률: 2023년 기준 212.8%로 전국 평균을 상회하며, 삼척화력발전소와 재생에너지 시설로 인해 잉여 전력이 지속적으로 발생함.
- 삼척화력발전소 발전량: 2023년 기준 8,867,020MWh 생산하였으며, 삼척블루파워의 상업운전 시 추가 잉여 전력 발생 예상됨.
- 전국 잉여 전력량: 2024년 기준 약 8,245MW로, 강원도는 이중 상당량을 차지함.

○ 스마트 그리드 및 ESS의 연계

- 스마트 그리드와 ESS 기술 접목을 통해 잉여 전력을 저장 및 분배 가능하며, 주파수 안정성 유지 및 전력망 과부하의 방지가 가능함.

○ 그린 수소 생산의 중요성

- 그린 수소는 재생에너지를 기반으로 물을 전기분해(수전해) 하여 탄소중립 목표 실현에 있어 에너지 전환의 중심이 됨.
- 국내 그린 수소 생산 시장은 2018년 연간 13만톤에서 2040년 연간 526만톤까지의 확대가 전망되며, 수소 생산 방식 또한 화석연료 기반에서 수전해 방식으로 전환하고자 함.
- 따라서, ESS와 수전해가 연계된 재생에너지 기반 그린 수소 생산은 매우 중요한 과제임.

○ 삼척화력발전소에서 발전되어 남는 잉여 전력은 송배전망의 부족과 전력 수요에 따라 결정됨. 이러한 전력 손실을 해결하기 위해선 스마트 그리드 기술을 통한 실시간 전력 피크 분산과 ESS를 통한 잉여 전력의 저장을 제시함. 특히, 삼척화력발전소에서 제공하는 태양광 발전의 경우에는 운전 여부와 관계없이 전력의 손실이 야기될 수 있으므로 이를 개선하기 위해서는 ESS의 도입이 필요함.

○ 화력발전을 통한 잉여 전력은 수전해에 사용되어 대체 에너지원인 수소를 생산할 수 있음. 이는 그린 수소로 분류되지는 않지만, 생산된 수소는 타지역으로의 보급이 비교적 용이함. 또한, 강원특별자치도 내 재생에너지로 비롯된 잉여 전력의 수전해는 그린 수소 생산 공정으로 탄소중립에 기여함. 하지만, 2024년 기준 수소 생산에 대한 경제성이 없기 때문에, 이를 실현하기 위해서는 수소 생산에 대한 인프라 구축 및 개발이 필요함.