대한민국의 에너지 안보와 구조 전환

이승환 [1†] 시지훈 [1] 정현찬 [2] 황장현 [3] 배현경 [4] 김동현 [4]

[1] 김천고등학교 바야흐로 KE 에너지부 [2] 김천고등학교 바야흐로 KE 화학부

[3] 김천고등학교 바야흐로 KE 기계부 [4] 김천고등학교 바야흐로 KE 정보부

(경상북도 김천시 송설로 90)

Key Words: Energy Security, Energy Transition

ABSTRACT: 본 보고서는 대한민국의 에너지 안보를 개선하기 위해서 구조 재설계가 필요하다고 판단하고, 자급 가능한 발전원으로 이루어진 분산형 전력 시스템으로의 전환을 제안하였다. 우선 해상풍력을 주요 재생에너지원으로 설정하고 지역별 바람 자원을 분석하여 거점을 선정하였다. 그리고 재생에너지의 간헐적 특성을 보완하기 위해 기존 리튬이온 배터리의 한계를 극복할 수 있는 수계 아연-이온 전지와 장주기 저장이 가능한 수소 시스템의 활용 가능성을 검토하였다. 최종적으로는 재생에너지, 에너지저장시스템을 기반으로 원자력 발전소의 부하추종운전 기술을 융합하여 지리적 조건별 분산형 에너지 체계를 구축하는 방안을 제시하였다.

서론 (Introduction)

최근 국제 사회에서 중동 지역의 분쟁과 러시아와 우크라이나 전쟁 같은 문제로 인해 에너지 안보의 중요성이 높아지고 있다. 특히 우리나라는 에너지 자원이 부족한 나라이기 때문에 이에 취약하다.

따라서 대한민국은 자원과 지역에 치우친 수입 구조에서 벗어나 자력으로 생산할 수 있는 발전원을 중심으로 한 독자적 에너지 체계를 구축해야 한다. 그래서 본 보고서를 통해 대한민국의 에너지 안보 체계를 여러 방면에서 분석하고 대안을 제시하여 앞으로 발생할 수 있는 일에도 위태로워지지 않는 지속 가능한 에너지 시스템을 구축하고자 한다.

연구 배경 (Background of study)

1. 대한민국의 에너지 안보 취약성

1.1 석유 자급률

에너지 안보를 논할 때 가장 기본이 되는 지표는 석유 자급률이다. 석유 자급률은 한 국가가 자국 내 석유 수요를 자국 내 생산으로 얼마나 충당할 수 있는지를 보여주는 수치이며 이 값이 낮을수록 경제는 외부 요인에 더 취약해진다.
본 탐구조는 Energy Institute 의 「Statistical Review of World Energy 2024」를 참고해 대한민국의 석유 소비량과 생산량을 분석하였다.

Oil Crude oil and condensate production in thousands of barrels per day*

Thousand barrels daily	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Growth rate per annum 2023	Growth rate per annum 2013–23	Share 2023
Australia	335	353	322	290	263	282	361	351	335	311	**281**	-9.5%	-1.7%	0.3%
Brunei	122	114	115	109	101	100	110	100	98	84	**84**	0.2%	-3.7%	0.1%
China	4216	4246	4309	3999	3846	3802	3848	3901	3994	4111	**4198**	2.1%	1	5.1%
India	785	778	772	752	744	719	677	636	620	609	**605**	-0.7%	-2.6%	0.7%
Indonesia	825	789	786	629	801	772	745	708	659	612	**606**	-1.1%	-3.0%	0.7%
Malaysia	588	610	662	667	660	653	610	556	511	502	**508**	1.1%	-1.5%	0.6%
Thailand	241	233	248	258	240	228	228	202	177	143	**136**	-5.0%	-5.5%	0.2%
Vietnam	337	315	342	308	275	243	225	195	185	182	**175**	-3.8%	-6.3%	0.2%
Other Asia Pacific	233	257	261	246	237	204	202	184	177	151	**144**	-4.5%	-4.7%	0.2%
Total Asia Pacific	7681	7695	7816	7457	7167	7004	7006	6834	6755	6707	**6737**	0.5%	-1.3%	8.1%

Oil Consumption in thousands of barrels per day*

Thousand barrels daily	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Growth rate per annum 2023	Growth rate per annum 2013–23	Share 2023
Australia	1031	1025	1015	1016	1062	1075	1064	915	941	999	**1056**	5.8%	0.2%	1.1%
Bangladesh	117	128	155	160	181	208	204	171	233	283	**240**	-15.3%	7.5%	0.2%
China	10563	11018	11890	12297	13003	13641	14316	14404	14888	14970	**16577**	10.7%	4.6%	16.5%
China Hong Kong SAR	351	335	367	379	427	433	407	283	254	214	**268**	25.2%	-2.7%	0.3%
India	3743	3865	4181	4574	4754	5004	5179	4738	4841	5209	**5446**	4.6%	3.8%	5.4%
Indonesia	1574	1574	1508	1456	1567	1618	1584	1403	1464	1597	**1604**	0.4%	0.2%	1.6%
Japan	4605	4379	4235	4103	4084	3939	3846	3412	3485	3504	**3366**	-3.9%	-3.1%	3.4%
Malaysia	803	803	754	838	797	804	867	729	699	837	**930**	11.0%	1.5%	0.9%
New Zealand	151	154	160	165	174	175	179	148	148	147	**157**	6.8%	0.4%	0.2%
Pakistan	442	458	505	566	589	499	446	434	503	489	**394**	-19.6%	-1.2%	0.4%
Philippines	317	336	385	414	445	456	465	381	412	451	**471**	4.5%	4.1%	0.5%
Singapore	1147	1172	1232	1300	1320	1338	1310	1262	1247	1203	**1359**	13.0%	1.7%	1.4%
South Korea	2466	2458	2568	2793	2791	2783	2768	2630	2816	2856	**2797**	-2.1%	1.3%	2.8%
Sri Lanka	94	108	105	127	138	138	144	124	118	98	**108**	10.7%	1.4%	0.1%
Taiwan	965	995	1020	1021	1012	1014	958	916	968	888	**840**	-5.5%	-1.4%	0.8%
Thailand	1152	1169	1171	1197	1243	1272	1285	1146	1160	1221	**1221**	1	0.6%	1.2%
Vietnam	370	388	475	524	552	581	597	507	493	534	**602**	12.7%	5.0%	0.6%
Other Asia Pacific	353	368	434	418	476	529	566	576	581	610	**626**	2.7%	5.9%	0.6%
Total Asia Pacific	30245	30734	32160	33349	34615	35508	36184	34180	35250	36110	**38061**	5.4%	2.3%	38.0%

[그림 1: Statistical Review of World Energy 2024]

통계에 따르면 대한민국의 석유 소비량은 세계 10 위권이지만 국내 생산량은 사실상 존재하지 않아 기타 항목으로 분류될 정도다. 자급률 산출식 (자급률(%) = (국내 생산량/국내 소비량) × 100)에 따라 계산하면 대한민국의 석유 자급률은 사실상 0 에 가깝다.

† bayahro91@gmail.com

1.2 초크 포인트

원유 수입 경로 역시 구조적 불안정을 키우는 요인이다. 호르무즈 해협은 폭이 약 40km 에 불과하지만 전 세계 해상 원유 수송량의 20~30%가 통과하는 대표적 초크포인트인데 대한민국은 원유 수입의 70% 이상을 호르무즈 해협을 거쳐 들어오는 중동 지역에다가 의존한다. 만약 이란의 군사적 행동으로 해협이 봉쇄된다면 대한민국의 원유 수입이 어려워질 수 있다.

비슷한 석유 의존도를 가진 일본과 비교해도 차이가 있다. 일본은 오일쇼크 이후 자원개발공사를 중심으로 해외 유전 지분 투자와 비중동 지역 개발을 확대하며 수입 방법을 다양하게 만들었다. 그 결과로 일본은 중동 의존도를 낮추고 특정 지역의 지정학적 리스크를 분산시킬 수 있었다. 하지만 대한민국은 안정적인 장기 도입 계약에 집중하기만 하고 단일 경로 의존에서 벗어나지는 못했다.

1.3 전력망 구조와 계통 취약성

전력망 자체의 문제도 있다. 본 탐구조는 제주도의 전력망 사례를 통해 계통 안정성 문제를 분석하였다. 제주도는 자체 발전 설비와 본토와 연결된 HVDC 연계망을 통해 전력을 공급받고 있지만 최대 수요의 약 40% 이상을 외부에 의존하고 있다. 이 과정에서 특정 노드와 변전소에 전력 흐름이 집중되는 현상이 드러나기도 한다.

2. 기존 전력 네트워크 보완

대한민국의 전력망은 중앙집중식 구조를 기반으로 설계되어 왔다. 이런 구조는 대규모 발전소와 주요 변전소에 의존하면서 효율성을 높지만 특정 지점에서 문제가 발생하면 계통 전체로 퍼질 수 있는 위험성이 있다. 본 탐구조는 이 문제를 확인하기 위해 제주 지역 전력망을 축약 모델로 구성하고 네트워크 분석을 수행하였다.

분석은 파이썬 기반의 networkx와 community_louvain 라이브러리를 활용해 진행하였으며

```
import networkx as nx
import community.community_louvain as community
```

[그림 2]

방향 그래프를 통해 발전소에서 변전소, 변전소에서 도시로 이어지는 전력 흐름을 단순화하여 정의하였다.

```
# 그래프 생성
G = nx.DiGraph()
```

[그림 3]

그래프의 노드는 발전소, 변전소, 도시로 구분되어 설정하였으며 주요 거점을 중심으로 선택하였다.

```
# 노드 목록
nodes = ["발전소A", "발전소B", "발전소C", "변전소A", "변전소B", "변전소C", "변전소D", "도시A", "도시B", "도시C"]
G.add_nodes_from(nodes)
```

[그림 4]

이어 단방향 에지는 (시작, 끝, 가중치) 형식으로, 양방향 에지는 두 방향을 각각 명시하여 정의하였다.

```
#단방향 에지 설정
Oneway_edges = [
    ("발전소A", "변전소A", 1), ("발전소B", "변전소B", 1), ("발전소B", "변전소C", 1),
    ("변전소A", "도시A", 1), ("변전소C", "도시A", 1), ("변전소B", "도시A", 1),
    ("변전소C", "도시C", 1), ("발전소C", "변전소D", 1),
    ("변전소D", "도시B", 1), ("변전소D", "도시C", 1), ("변전소A", "도시B", 1)
]
#양방향 에지 설정
Twoway_edges = [
    ("변전소A", "변전소C", 1), ("변전소C", "변전소A", 1),
    ("변전소C", "변전소B", 1), ("변전소B", "변전소C", 1)
]
```

[그림 5]

단방향 에지를 본 그래프에 추가하고 양방향 에지는 보조 무방향 그래프를 구성하는 데 활용하였다. 중복되는 에지에 대해서는 가중치를 합산하여 보다 현실적인 계통 흐름을 반영하였다.

```
# 에지 추가
for u, v, w in Oneway_edges:
    Net_Graph.add_edge(u, v, weight=w, direction='directed')
Net_Graph.add_edges_from([(u, v, {"weight": w}) for u, v, w in Twoway_edges])
```

[그림 6]

```
# 방향성 없는 그래프 생성
G_Twoway = nx.Graph()
for u, v, data in Net_Graph.edges(data=True):
    weight = data["weight"]
    if G_Twoway.has_edge(u, v):
        G_Twoway[u][v]['weight'] += weight
    else:
        G_Twoway.add_edge(u, v, weight=weight)
```

[그림 7]

networkx 의 함수를 활용해 각 노드의 사이중심성을 계산하고 community_louvain.best_partition()을 이용해 커뮤니티를 도출하였다. 그 후 modularity() 값을 통해 계통의 응집도를 산출하였다.

```
# 사이 중심성 계산
betweenness_centrality = nx.betweenness_centrality(Net_Graph)
```

[그림 8]

```
# 사이 중심성 계산
betweenness_centrality = nx.betweenness_centrality(Net_Graph)

# 커뮤니티 탐지
partition = community.best_partition(G_Twoway, weight='weight')

modularity = community.modularity(partition, G_Twoway, weight='weight')

# 사이 중심성 출력
print("Betweenness Centrality:")
for node, centrality in betweenness_centrality.items():
    print(f"Node {node}: {centrality}")

print("\nModularity:", modularity)
```

[그림 9]

결과로 각 노드의 커뮤니티 소속과 사이중심성 값이 차례로 출력되었으며 마지막에 모듈도가 함께 제시되었다.

```
Betweenness Centrality:
Node 발전소A: 0.0
Node 발전소B: 0.0
Node 변전소A: 0.11904761904761904
Node 변전소B: 0.011904761904761904
Node 변전소C: 0.2976190476190476
Node 도시A: 0.0
Node 도시B: 0.0
Node 도시C: 0.0

Modularity: 0.11111111111111113
```

[그림 10]

```
Betweenness Centrality:
Node 발전소A: 0.0
Node 발전소B: 0.0
Node 발전소C: 0.0
Node 변전소A: 0.1111111111111111
Node 변전소B: 0.006944444444444444
Node 변전소C: 0.14583333333333331
Node 변전소D: 0.027777777777777776
Node 도시A: 0.0
Node 도시B: 0.0
Node 도시C: 0.0

Modularity: 0.27111111111111114
```

[그림 11]

분석 결과 변전소 C 는 가장 높은 사이중심성을 보였고 전력 흐름의 병목 지점으로 드러났다

본 탐구조는 이에 대한 개선 시나리오를 고안하였다. 기존의 C–B 연결을 A–B 로 교체하고 서부 지역에 발전소 D 와 변전소 D 를 신설해 D–B 와 D–C 연결을 추가하였다. 재분석 결과 변전소 C 의 사이중심성은 약 0.1 가량 줄었고 모듈도는 기존망의 0.111…에서 개선망의 0.271…로 상승하였다.

이 결과를 통해서 네트워크 구조를 보강하는 것만으로도 계통의 취약성을 효과적으로 줄일 수 있음을 알 수 있었고, 전력 설비 증설이나 발전량 확보 보다 구조 설계가 우선시되어야 한다는 점을 느꼈다.

연구 방법 및 절차 (Materials and Methods)

전력망이 중앙집중식으로 설계된 상황에서는 특정 구간의 고장이 곧바로 계통 전체로 확산된다. 전력망 안정성을 확보하기 위해서는 분산형 시스템으로의 전환이 필수적이다. 분산형 전력망은 전력을 한 곳에서 집중 공급하는 방식이 아니라 여러 지역과 설비가 자급자족하는 구조다. 이렇게 하면 개별 거점의 충격을 흡수해 전체 계통이 무너지는 것을 막을 수 있고 송전으로 인한 전력 손실도 줄일 수 있다.

1 재생에너지 전환

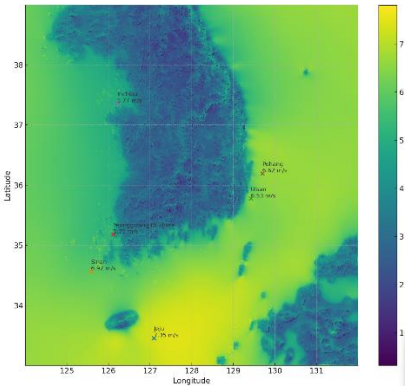
1.1 해상풍력발전

해외 자원 의존을 줄이기 위해 본 탐구조는 주요 해안 지역에 대규모 해상풍력 단지를 조성하는 방안을 검토하였다. 해상 풍력 발전을 선택한 이유는 국토 면적이 좁은 우리나라의 지리적 특성과 다량의 전력을 공급할 수 있는 발전원이 필요함을 고려해서이다.

1.1.1 부지 선정 과정

부지 선정 과정에서는 국립기상연구소의 풍력기상자원지도 데이터를 활용하였다. 평균 풍속과 가용풍속비율을 핵심 지표로 삼아 각 지역의 잠재력을 분석하였다. 수도권, 전라도, 경상도와 같은 전력 수요 중심지 인근 해역 그리고 자체 전력 생산에 유리한 제주도를 주요 후보지로 설정하였다.

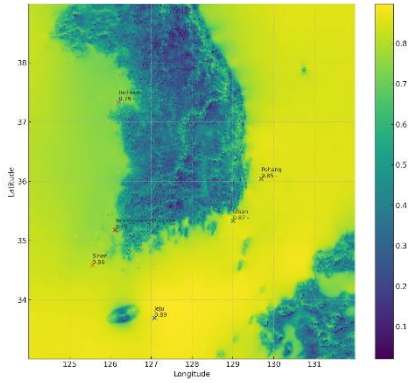
아래에 제시된 풍력자원지도는 기상청의 자료를 코딩을 통해 시각화한 것으로 평균풍속과 가용풍속비율을 통해 국내 해역의 발전 잠재력을 볼 수 있다.



[그림 12: 풍력자원지도 평균풍속 80m]

평균 풍속은 발전량과 직결되는 변수이다. 풍력 터빈의 출력은 풍속의 세제곱에 비례하므로 평균 풍속이 높을수록 경제성이 확보된다.

위의 평균풍속 지도를 분석해보면 바람 자원이 특정 지역에 집중되어 있음을 알 수 있다. 제주 서남부 해역, 울산과 포항을 잇는 동남해안에 높은 풍속대가 형성되어 있다.



[그림 13: 기상청 풍력자원지도 가용풍속비율 80m 3-25m/s]

가용풍속비율은 발전의 안정성을 나타내는 지표로 터빈이 실제 가동될 수 있는 풍속 범위(3~25m/s)의 시간 비율을 의미한다. 이 비율이 높을수록 설비이용률이 향상되고 예측 가능한 전력 생산이 가능해져 전력 계통 운영의 안정성이 높다.

최적 입지는 높은 평균 풍속과 높은 가용풍속비율이 중첩되는 지역이다. 두 지도를 중첩 분석하였다.

아래는 주요 지점의 평균 풍속과 가용 풍속 비율을 정리한 것이다.

번호	부지	평균 풍속	가용풍속비율
A	제주	7.3472	0.7905
B	신안	6.9173	0.8855
C	울산	6.5348	0.8483
D	영광	5.7006	0.8617
E	인천	5.7731	0.8653
F	포항	6.6199	0.7847

[표 1: 부지별 평균 풍속, 가용풍속비율(소수점 4 자리)]

1.1.2. 부지 선정 결과

A) 제주[7.35m/s,79.1%]는 평균 풍속이 가장 높아 발전 잠재력은 높고 가용 풍속 비율도 높아서 다른 지역보다 안정적이고 많은 전력 생산이 가능하다. 그리고 육지와 거리가 멀어 송전이 어려워서 자급자족 시스템이 가장 필요한 곳이기도 하다.

B) 신안[6.92m/s, 88.6%]은 높은 평균 풍속과 가장 높은 가용풍속비율을 보여 발전량과 안정성 측면에서 최적의 균형을 갖춘 것으로 평가하였다. 계통거리 측면에서는 영광이 신안보다 적합하겠지만 평균 풍속이 상당히 차이가 나서 대규모 발전 단지를 건설하기에는 신안이 적합할 것이라고 생각한다.

C) 울산[6.53m/s,84.8%]과 포항[6.62m/s, 78.5%]은 산업단지에 인접하여 송전 효율이 높고 양호한 풍력 자원을 바탕으로 개발 가치가 높다고 생각한다. 실제로도 울산에는 해안에서 80km 떨어진 해역에 풍력 발전단지를 건설하고 있기 때문에 실증성도 있다.

E) 인천[5.77m/s, 86.5%]은 평균 풍속이 상대적으로 낮지만 높은 가용풍속비율과 수도권에 인접한 이점을 고려하여 수도권 전력 공급을 위한 중소규모 단지 개발을 검토할 수 있다는 의견을 모았다.

본 탐구조는 위와 같이 분석한 부지들을 풍부한 풍력 자원을 기반으로 분산형 전력 공급 단지(제주, 신안)로, 인근 산업단지의 전력 수요를 충족시키는 거점(울산)으로 수도권에 전력을 공급하는 발전 거점(인천)으로 구축하는 것이 타당하다고 판단하였다.

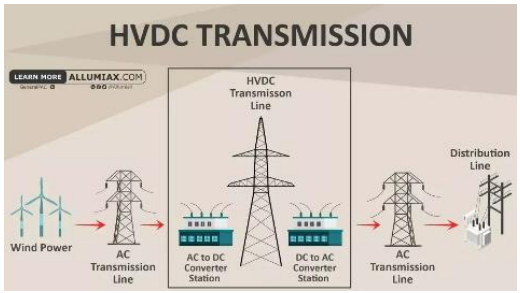
1.2 재생에너지의 한계와 대응 전략

재생에너지는 기상에 따라 발전량이 자주 변동되고 수요와 공급이 변할 때 대응하지 못한다. 그리고 우리나라의 송전망은 늘어나는 발전량을 따라가지 못해서 특정 구간에 전력이 몰리면 전력 손실이 생기기도 한다.

따라서 문제는 재생에너지 자체가 아니라 전력을 받아들이는 구조에 있다고 판단했다. 본 탐구조가 고안한 해결책은 체계 없는 발전 확대가 아니라 계통을 변동성에 맞게 다시 설계하는 데서 출발하였다. 먼저 ESS 와 HVDC 두 가지 방안을 검토하였다.

1.3 ESS 와 HVDC

ESS 는 재생에너지의 잉여 전력을 저장해 두었다가 필요할 때 공급으로 바꾸는 장치다.



[그림 14: HVDC]

HVDC 는 지역 간 전력을 직류로 고압 송전해 특정 지역에 집중된 발전량을 전국으로 재배치하는 기술이다. 그러나 본 탐구조는 우리나라의 조건을 고려할 때 ESS 가 더 직접적이고 현실적인 해법이라고 판단하였다.

그 이유는 국토가 좁고 송전망 확충이 제한적인 대한민국에서는 발생지에서 변동성을 완충할 수 있는 장치가 필요하기 때문이다. HVDC 는 설치 과정에서 많은 비용이 필요하고 계통 거리가 길어질수록 부담이 더해진다. 물론 ESS 역시 초기 설치 비용과 배터리 수명에 따른 교체 비용이 발생하여 경제적 부담이 없는 것은 아니다. 하지만 HVDC 처럼 대규모 토목 공사와 장거리 송전망 건설이 필요한 것은 아니기에 차이가 있다.

따라서 HVDC 는 보조적 수단으로는 유용하지만 단독으로 사용하기에는 무리가 있어서 ESS 를 중심으로 다루어야 한다고 보았다.

2 에너지 저장 시스템(ESS) 전환

재생에너지 변동성을 흡수하는 장치로서 ESS 는 이미 전국적으로 사용되고 있다. 하지만 대규모 ESS 에서 화재가 발생하는 문제를 해결해야 한다.

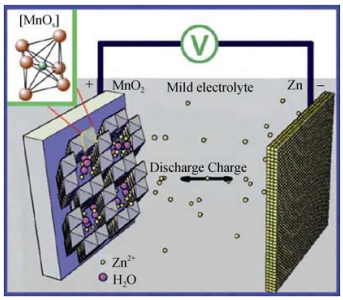
2.1 베터리 (BESS)

그리드 스케일 에너지저장장치는 재생에너지의 변동성을 보완하는 데 꼭 필요하지만 현재 주류인 리튬이온 배터리(LiB)는 문제점이 있다. 충방전 과정에서 생기는 과열만으로도 전해질이 분해되고 가연성 가스가 생겨서 화재가 발생할 수 있다는 것이다. 게다가 LiB 에 쓰이는 리튬, 코발트, 니켈 같은 원자재는 특정 지역에 집중돼 있기도 하다.

본 탐구조는 최근 몇 년 동안 국내에서 계속 일어난 ESS 화재 사례를 통해서 리튬이온 기반 시스템의 불안정성을 확인하고 대체 방안을 제시하고자 한다.

2.1.1 수계 아연-이온 전지

이와 같은 문제를 해결할 수 있는 대안으로 먼저 수계 아연-이온 전지(AZIB)를 제안한다.



[그림 15: 아연 이온 전지의 전기화학 원리도]

AZIB 는 불연성 수계 전해질을 쓰기 때문에 본질적으로 화재 위험이 거의 없다. 또 아연과 망간은 값싼 원자재라 특정 국가나 지역에 공급이 몰려 있지 않다. 그래서 자원 공급망의 안정성과 비용 면에서 유리하고 대규모로 도입하더라도 비용 부담이 크지 않을 것이라고 생각한다.

그러나 AZIB 에는 해결해야 할 기술적 과제가 남아 있다. 가장 큰 문제는 아연 음극의 계면이 불안정하다는 점이다. 충방전이 반복되면 아연이 균일하게 쌓이지 않고 불규칙하게 석출되며 이런 과정에서 덴드라이트가 발생한다. 덴드라이트는 전극을 뚫고 들어가 단락을 일으키고 결국 배터리의 성능을 낮추며 수명도 짧아지게한다.

2.1.2 덴드라이트 발생 문제

덴드라이트 문제를 해결하기 위해서는 전해질 환경 개선을 해야한다. 전해질에 유기 첨가제를 도입하면 아연 증착을 덴드라이트에 저항성이 강한 결정면으로 유도할 수 있다. 이 과정에서 생성된 물질이 덴드라이트 끝에 흡착하여 추가 성장을 억제하는 역할을 한다. 그러나 전해질 개선만으로는 충분하지 않기 때문에 문제의 근원이라고 할 수 있는 아연 음극의 개선도 필요하다. 「Research Progress and Prospect of Aqueous Zinc Ion Battery」에 따르면 전극 제작 시 활성탄을 첨가하면 전극 내부에 3 차원 골격이 형성되어 반응 균일성을 높이고, 전극 표면의 비활성화를 효과적으로 억제할 수 있다고 한다.

나아가 덴드라이트 형성의 원인인 전류 집중 현상을 해결하는 방법을 고안해보았다. 아연 전극 표면보다 전기 전도성이 높고 균일한 전도성 완충층을 도입하여 전해질로부터 온 전류를 먼저 받은 뒤 아연 표면 전체에 고르게 분산시키는 것이다. 이러면 전류를 고르게 받게 되어 아연 이온이 표면 전체에 균일하게 증착될 수 있을 것이라고 생각한다.

2.1.3 양극 수소 발생 문제

또한 조사 중 전지의 양극에서 수소가 발생하는 문제를 파악했다. 이 문제를 해결하기 위해서 본 탐구조는 다음과 같은 해결책을 제시한다. 세포막의 선택적 투과성을 활용한 수소 반응물 차단을 통해 양극에서의 수소 생성을 억제하고자 한다.

세포막의 선택적 투과성은 이온 채널과 단백질에 의해 조정되는 방식으로, 선택적으로 이온을 통과시킨다. 이에 영감을 받아, 수계 아연전지 내에서 아연 이온은 통과시키지만 수소 발생을 유발하는 분자들은 차단하는 인공막을 제시해보고자 한다. 이와 유사한 예시로는, 리튬-황 배터리에서는 산화환원 스위치형 미세 다공성 고분자막이라는 인공막이 배터리의 사이클 수명을 크게 향상기키는 사례가 있다.

이와 같은 예시에 기반해, 하이드로겔 기반 인터페이스를 제시하고자 한다. 수계 전해질에서 무독성이고, 유연한 시스템으로 가장 알맞은 것은 하이드로겔이 적합하다 보았다. 수소를 유발하는 활성 수분이나 프로톤은 차단하고, 아연 이온은 수송하는 다중층 구조를 입혀 (소수성 층으로 자유수를 차단, 내층 이온 전도층으로 아연 채널을 제공) 지속성을 높이고자 한다.

2.2 전력 수요 예측과 ESS 적용 분석

앞에서 논의한 수계 아연-이온 전지(AZIB)와 같은 배터리 기반 에너지 저장 시스템은 재생에너지의 단기 변동성을 흡수하고 계통 안정성을 확보하는 데 핵심이다. 본 탐구조는 시계열 분석을 통해 실제 전력 수요 데이터를 예측하고 ESS 가 피크 저감 및 부하 평준화에 기여하는 효과를 정량적으로 시뮬레이션하여 그 구체적인 역할을 확인하고자 한다.

2.2.1 전력 수요 데이터 선정과 예측 모델

한국전력거래소의 2024 년 데이터 중 가장 최근의 1 주일 데이터를 사용하고 향후 2 일의 데이터를 예측하였다. 충전/방전 용량, 저장 용량, 피크 감소 기준 등을 적용하여 ess 적용 시뮬레이션을 돌려서 그에 따른 값 또한 그래프에 나타내고 적용 여부에 따른 변화를 보았다.

이 데이터의 특성은 장기간 시계열 구조를 띠고 있다. 데이터를 정제하는 과정에서 최근 1 주일의 데이터만 사용 가능한 형태로 바꿀 것이다. 보조 정보로는 전력 수요 데이터의 주기성과 ess 운영방식에 대한 지식을 이용하였다.

2.2.2 데이터 주기성 분석

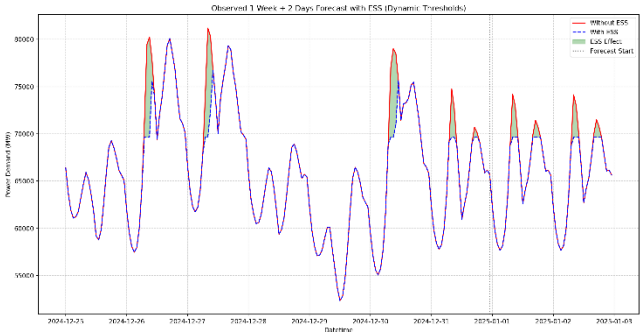
단순 이동평균 모델과 SARIMA 모델 LSTM 모델을 후보 모델로 선정하였고, 여러 관점으로 고려하여 SARIMA 모델을 사용하기로 결정을 하였다. 전력 수요 데이터가 뚜렷한 일일 주기성과 계절성을 보이기 때문에 SARIMA 모델의 구조가 가장 적절하다고 판단하였다.

데이터의 탐색 과정에서 전력 수요량 데이터가 주기성을 강하게 나타내고 있음과 주중, 주말에 따라 수요 패턴이 달라지는 계절성이 나타남을 확인하였다. ACF/PACF 분석을 통해 자기상관 구조 확인하고 SARIMA 모델 사용에 대한 근거를 확보하였다. 모델에 ESS 시뮬레이션 로직을 적용했을 때, 피크 시점 수요가 감소하고 저부하 구간에서 충전이 일어나는 패턴 가시화를 진행하였다.

```python
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from statsmodels.tsa.statespace.sarimax import SARIMAX

file_path = r"C:\Users\wardu\가온\Downloads\한국전력거래소_시간별 전국 전력수요량_20241231.csv"
df = pd.read_csv(file_path, encoding="cp949")

if len(df.columns) > 5:
    date_col = df.columns[0]
    df_long = df.melt(id_vars=[date_col], var_name="hour", value_name="demand")
    df_long[date_col] = pd.to_datetime(df_long[date_col])
    df_long["hour"] = df_long["hour"].astype(str).str.replace("시","").astype(int)
    df_long = df_long.rename(columns={date_col:"date"})
else:
    df.columns = ["date","hour","demand"]
    df_long = df.copy()
    df_long["date"] = pd.to_datetime(df_long["date"])

latest_date = df_long["date"].max()
start_date = latest_date - pd.Timedelta(days=6)
week_data = df_long[(df_long["date"] >= start_date) & (df_long["date"] <= latest_date)]

week_data = week_data.sort_values(["date","hour"])
week_data["datetime"] = week_data["date"] + pd.to_timedelta(week_data["hour"]-1, unit="h")
week_data.set_index("datetime", inplace=True)
demand_series = week_data["demand"]

def apply_ess(demand, ess_capacity, ess_power, ess_eff=0.9):
    ess_state = 0
    adjusted = demand.copy()
    for i in range(len(adjusted)):
        if adjusted[i] > 60000:
            discharge = min(ess_power, ess_state, adjusted[i]-60000)
            adjusted[i] -= discharge
            ess_state -= discharge
        elif adjusted[i] < 55000:
            charge = min(ess_power, ess_capacity - ess_state)
            ess_state += charge*ess_eff
    return adjusted

mean_demand = demand_series.mean()
std_demand = demand_series.std()

threshold_high = mean_demand + 0.5*std_demand
threshold_low  = mean_demand - 0.5*std_demand

ess_capacity = 0.3 * demand_series.max()
ess_power = 0.2 * demand_series.max()

def apply_ess_dynamic(demand, ess_capacity, ess_power, threshold_high, threshold_low, ess_eff=0.9):
    ess_state = 0
    adjusted = demand.copy()
    for i in range(len(adjusted)):
        if adjusted[i] > threshold_high:
            discharge = min(ess_power, ess_state, adjusted[i]-threshold_high)
            adjusted[i] -= discharge
            ess_state -= discharge
        elif adjusted[i] < threshold_low:
            charge = min(ess_power, ess_capacity - ess_state)
            ess_state += charge*ess_eff
    return adjusted

observed_without_ess = demand_series.values
observed_with_ess = apply_ess_dynamic(observed_without_ess, ess_capacity, ess_power, threshold_high, threshold_low)

model = SARIMAX(demand_series, order=(1,0,1), seasonal_order=(1,1,1,24), enforce_stationarity=False, enforce_invertibility=False)
results = model.fit(disp=False)
forecast_steps = 48
forecast = results.get_forecast(steps=forecast_steps)
forecast_mean = forecast.predicted_mean.values

forecast_with_ess = apply_ess_dynamic(forecast_mean, ess_capacity, ess_power, threshold_high, threshold_low)

combined_time = list(demand_series.index) + [demand_series.index[-1] + pd.Timedelta(hours=i+1) for i in range(forecast_steps)]
combined_without_ess = np.concatenate([observed_without_ess, forecast_mean])
combined_with_ess = np.concatenate([observed_with_ess, forecast_with_ess])

plt.figure(figsize=(16,6))
plt.plot(combined_time, combined_without_ess, label="Without ESS", color="red", linewidth=1.5)
plt.plot(combined_time, combined_with_ess, label="With ESS", color="blue", linewidth=1.5, linestyle="--")
plt.fill_between(combined_time, combined_without_ess, combined_with_ess, color="green", alpha=0.3, label="ESS Effect")
plt.axvline(demand_series.index[-1], color="gray", linestyle=":", linewidth=1.5, label="Forecast Start")
plt.xlabel("Datetime")
plt.ylabel("Power Demand (MW)")
plt.title("Observed 1 Week + 2 Days Forecast with ESS (Dynamic Thresholds)")
plt.legend()
plt.grid(True, linestyle="--", alpha=0.6)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

[그림 16: Python 을 통한 모델 구현]

2.2.3 ESS 시뮬레이션 결과와 효과



[그림 17: ESS 적용 전력 수요량 그래프]

그래프 분석 결과, ESS 적용 시 전력 수요 곡선에서 피크 구간의 수요가 소폭 낮아지는 피크 저감 효과(Peak shaving)가 확인되었다. 특히 12 월 26 일, 27 일, 30 일 전후의 최대 전력 수요 구간에서 ESS 가 방전하여 전력 수요가 완화되는 모습을 볼 수 있다. 반면, 수요가 낮은 새벽 시간대에는 ESS 충전 효과가 뚜렷하게 드러나지 않았는데, 이는 충전·방전 임계값 설정과 ESS 용량 및 출력 제한이 보수적으로 적용된 결과가 나타난다. 또한 SARIMA 모델이 생성한 예측 구간에서도 하루 단위 주기성이 반영된 전력 수요 패턴이 나타났으며, ESS 는 동일한 주기성 속에서 피크만 완화시키는 형태로 예측을 진행하였다. 따라서 이번 분석은 ESS 가 단기적으로 전력 피크를 줄여 데이터 안정성 향상에 영향을 줌을 보여주지만, 부하 평준화 효과를 더 명확히 확인하기 위해서는 ESS 용량 및 충전 규칙의 추가적인 조정이 필요함을 알 수 있다.

SARIMA 모델을 통해서 향후 2 일의 전력 수요량을 예측한 결과가 나왔고, 예측된 수요 곡선에 충전/방전 규칙을 적용해서 ess 적용 시뮬레이션의 결과 또한 반영되었다. 또 ess 적용 사례와 미적용 사례를 비교하여 피크 감소와 부하 평준화 효과를 확인할 수 있었다.

2.3 수소 (P2G)

수소를 에너지 저장 시스템으로 채택한 이유는 장주기 저장과 에너지 운송을 동시에 해결할 수 있기 때문이다. 베터리 기반 ESS 는 4~6 시간 이내의 중단기 저장에만 적합하다. 반면에 수소는 전력을 화학적 형태로 전환해 장기간 대규모 저장이 가능하고 배관과 탱크를 통해 전국적으로 운송과 분배가 가능하다.

2.3.1 연안 PEMEC 시스템 구상

1 절에서 제안한 해상풍력 단지와 연계하여 단지 인근에 PEMEC 기반 수전해 시설을 설치하여 잉여 전력을 수소로 전환하는 체계를 고안하였다. 탐구에 들어가기 앞서 이 시설을 설치할 때 발생할 수 있는 문제점을 떠올려보았다. 먼저 해양 환경에서 담수 확보가 어렵다는 점이 있다. 또한 해양지역에 설치해야 하므로 시설의 부식에 대한 문제가 생길 수도 있다.

현재 해상 수소 생산은 역삼투압 방식의 담수화 공정을 통해 순수한 물을 확보한 뒤에 수전해에 활용하는 공정을 통해 진행된다. 본 탐구조는 이 방식이 초기 투자비용과 운영비용이 높아서 경제성이 떨어진다고 판단하였다. 이에 대한 방안으로 담수화 공정 대신 해수를 직접 분해하는 직접 해수 수전해 기술을 제안한다.

2.3.2 연안 PEMEC 시설의 과제

그러나 이러한 직접 해수 수전해 기술을 구현하기 위해서는 해결해야 할 과제가 있다. 해수를 직접 사용할 경우 시설의 부식에 대한 문제가 생길 수 있다. 본 탐구조는「Metal nitrides for seawater electrolysis」자료를 참고하여 높은 전위에서 산소발생반응과 동시에 부반응인 염소발생반응이 일어나 효율이 저하되고 생성된 염소 가스가 촉매와 지지체를 부식시켜 시스템 수명을 단축시킬 수 있음을 파악하였다.

그래서 이산화티타늄 보호막을 적용하는 방법을 조사했다. 결과적으로 선정한 방식은 부식이 큰 양극의 OER 촉매층에 TiO_2 를 나노미터 두께의 얇은 막으로 씌우는 오버레이어 방식이다. 이 보호막은 화학적으로 안정된 물리적 장벽을 형성하여 OER 촉매를 염소 이온으로부터 차단하는 역할을 한다.

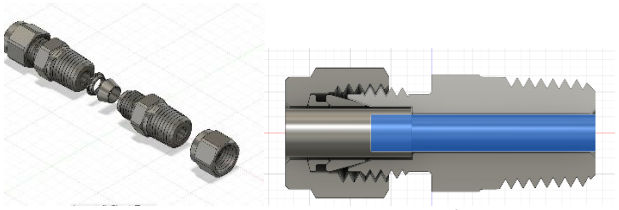
추가적으로 해수 적용 문제가 해결되더라도 PEMEC 기술 자체가 가진 근본적인 비용 문제가 남아 있다. 백금은 높은 비용과 가격 변동성 때문에 상용화를 늦추는 주요 요인이다. 본 탐구조는 백금을 완전히 배제하기보다는 사용량을 최소화하는 방향에 주목하였다.

백금을 아예 사용하지 않는 방안을 고려하지 않은 이유는 백금이 완벽에 가까운 전기화학적 특성을 보이기 때문이다. 금속 촉매의 활성을 나타내는 볼케이노 플롯 분석에 따르면 백금은 정점에 위치하는데 백금이 수소 원자와 가장 이상적인 세기로 결합하여 과전압이 가장 적은 촉매임을 알 수 있다. 따라서 백금을 전혀 사용하지 않고 높은 효율의 촉매를 만들기는 어려울 것이라고 판단하였다.

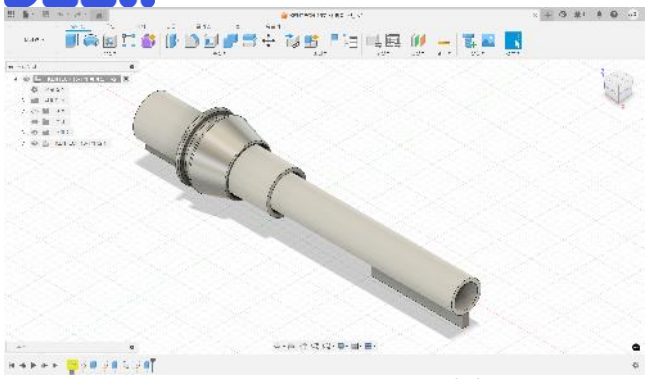
따라서 본 탐구조가 고안한 방향은 해수 직접 수전해 기술에 TiO_2 보호막을 활용하여 안정성을 확보하고 백금 사용량을 최소화하는 촉매 기술을 적용하여 비용을 줄여 상용화하는 방향이다.

2.3.3 수소 운송과 배관 피팅

수소를 생산하고 실제로 활용되기 위해서는 운송망이 필요하다. 그러기 위해서 대게 파이프라인을 활용하는데 이 과정에서 가장 큰 문제점은 피팅에서 나타난다. 수소는 원자 크기가 작아 미세한 틈으로도 쉽게 새어 나오고 고압 환경에서 반복되는 진동과 압력 변화 때문에 피팅 접합부에 응력이 쌓여 균열이 만들어진다.



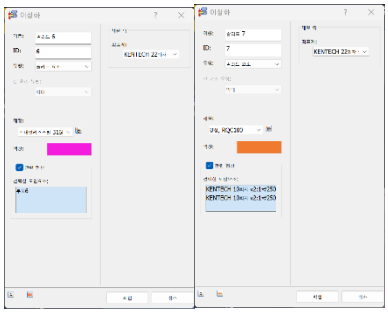
[그림 18: Autodesk Fusion360 을 통한 모델링 과정]



[그림 19: Autodesk Fusion360 을 통한 모델링 결과]

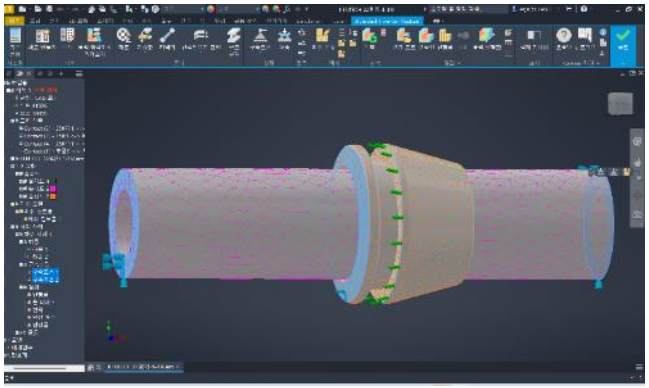
본 탐구조는 어느 부분에 응력이 쌓여 문제가 되는지 확인하기 위해 Autodesk 사의 Fusion360 을 활용해 고압 수소 배관 시스템의 이중 페룰 피팅을 3 차원으로 모델링하고 Inventor Nastran 을 활용하여 유한요소해석을 수행하였다.

파이프의 이상화는 스테인리스 스틸 316L 로 하였고, 페룰의 이상화는 강철로 설정하였다.



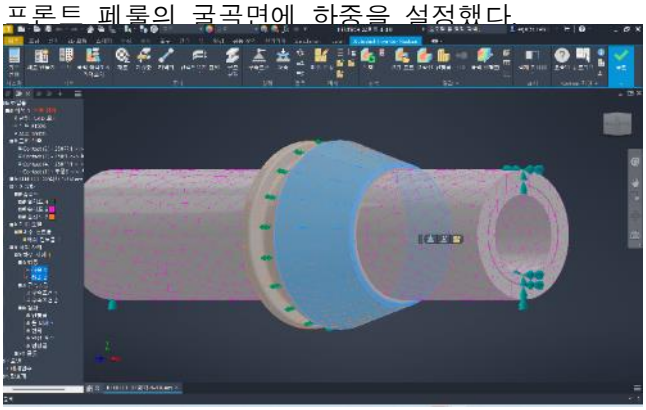
[그림 20: Autodesk Inventor Nastran 을 통한 유한요소해석 - 이상화]

파이프의 양 끝 표면과 백페룰 말단을 구속조건으로 설정하고



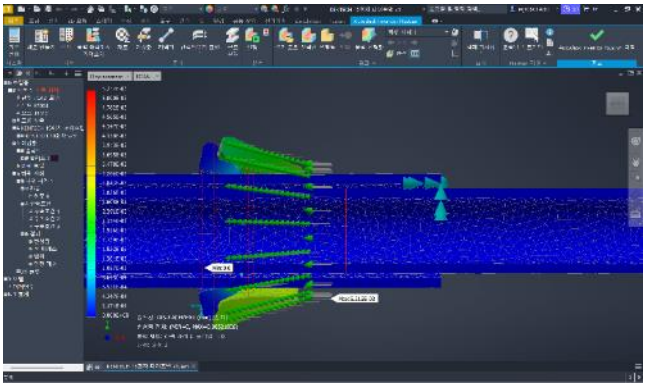
[그림 21: Autodesk Inventor Nastran 을 통한 유한요소해석 - 구속]

프론트 페룰의 굴곡면에 하중을 설정했다.



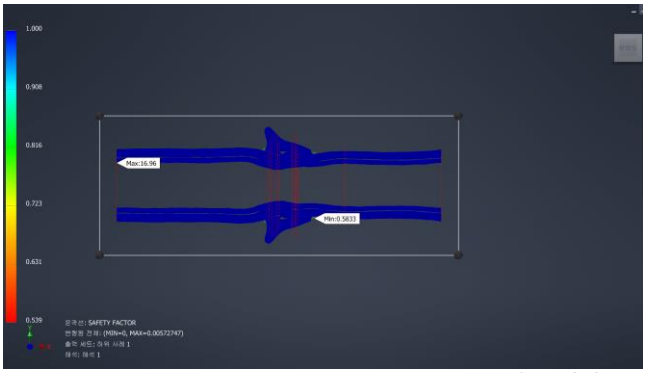
[그림 22: Autodesk Inventor Nastran 을 통한 유한요소해석 - 하중]

이후 해석을 진행하였다.



[그림 23: Autodesk Inventor Nastran 을 통한 유한요소해석 과정]

결과를 safety factor 로 표시하여 안전계수를 확인하였다.



[그림 24: Autodesk Inventor Nastran 을 통한 유한요소해석 결과]

소재를 스테인리스 316L 로 했을 때 프론트 페룰 전방과 백 페룰 후방에 응력이 집중되며 특히 프론트 페룰의 앞부분의 안전계수는 0.5833 으로 낮게 계산되었다.

이를 개선하기 위해 본 탐구조는 먼저 오링을 활용한 물리적 보강 방안을 고안하였다. 오링의 탄성을 이용해 페룰 접합부에 가해지는 압력을

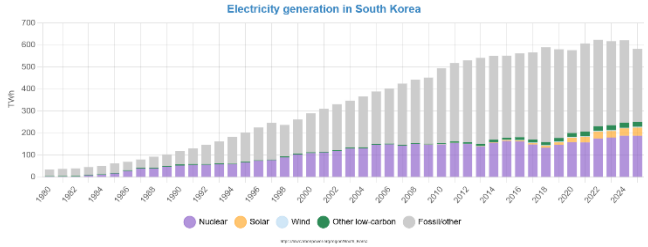
분산시키고, 미세 진동을 흡수하여 응력 집중과 균열 발생을 억제하는 방식이다. 그러나 이 방식은 오링 소재의 주기적 교체가 필요해서 만약 파이프라인을 지하화한다면 유지보수가 어렵다는 한계가 발생한다.

다음으로는 플라즈마와 자기장을 활용한 분자 단위 제어 방안을 검토하였다. 피팅 부분에서 수소를 플라즈마화한 뒤 자기장으로 부유시켜 배관과의 직접적인 접촉을 차단하는 방향성을 가진 계획이다. 하지만 고압의 수소 환경에서 플라즈마를 안정적으로 유지하기 어려워 현시점에서는 적용 가능성이 낮다고 판단했다.

최종적으로 본 탐구조는 가장 현실적인 대안으로 형상기억합금 니티놀을 페룰 소재로 활용하는 방안을 제시한다. 니티놀은 온도 변화에 따라 원래 형상을 복원하는 형상기억효과와 외부 충격을 흡수하는 초탄성효과를 동시에 지닌다. 따라서 니티놀로 제작된 페룰은 수소 운송 과정에서 발생하는 진동이나 압력 변화로 미세한 변형이 생기더라도 스스로 초기 형상으로 복원하여 기밀성을 유지할 수 있을 것이다. 또한 초탄성 특성을 통해 진동 에너지를 효과적으로 흡수하여 응력 축적과 균열을 근본적으로 차단하기 때문에 유지보수 부담 없이 피팅의 내구성과 안전성을 획기적으로 높일 수 있는 가장 합리적인 해결책이라고 생각한다.

3. 원자력에너지 전환

기저발전원은 항상 가동하여 국가 전력 수요의 최소치를 담당하는 발전원을 의미하며, 대표적으로 석탄, 원자력이 있다.



[그림 25: 대한민국의 발전원별 전력 생산량]

대한민국은 그동안 2024 년 기준 원자력(31.7%), 석탄(28.1%), 순으로 발전원을 사용해왔으나, 무탄소 발전원을 추진하는 세계의 흐름에 발맞추기 위해서는 더 이상 석탄화력발전을 기저발전원으로 활용하기는 어렵다.

또한 재생에너지 비중이 높아지는 현대 전력망에서 출력 조정이 어려운 원자력의 경직성 때문에 재생에너지와 충돌하며 전력 손실이 생기는 경우가 있다. 이에 본 탐구조는 기존 원자력 시설의 활용도를 높이고 경직성을 줄이는 방안을 마련하고자 한다.

3.1. 기존 원전시설의 유연성 확보

현실적으로 기존 원자력 발전소의 활용도를 높이는 방안은 현재 운영 중인 원전의 경직성을 완화하는 것이다. 이를 위해 본 탐구조가 채택한 기술이 부하추종운전이다. 이는 전력 수요와 발전량 변화에 맞춰 원자로 출력을 능동적으로 조절하는 기술이다.

대한민국은 이미 부하추종운전 기술을 보유하고 있다. 하지만 과거의 전력 시스템은 원자력 발전소를 24 시간 최대 출력으로 가동하는 기저발전원으로 활용하는 것이 경제성 측면에서 효율적이었다. 그래서 기술이 있음에도 운영에 적용할 필요성이 없었다.

그러나 최근 재생에너지를 중심으로 변동성 재생에너지의 비중이 급격히 증가함에 따라 과거의 경직된 운영 방식이 더 이상 효율적이지 않다. 따라서 대한민국도 부하추종운전을 활용할 때가 되었다. 본 탐구조는 대한민국에 부하추종운전 기술을 활용할 방안을 마련해보았다.

3.2 ESS 와 원자력 발전의 우선 순위 지정

구상 과정에서 전력 수요가 재생에너지의 공급 능력을 넘을 때 ESS 와 원자력 발전 중 어떤 시스템을 우선 적용해야 하는지 고민하였고, 때문에 각 ESS 의 LCOS 와 원자력 발전의 LCOE 를 비교하였다.

데이터를 기반으로 비교한 결과 기술 발전으로 인한 ESS 가격 하락을 고려하더라도 장주기 에너지 공급에서는 원자력 발전이 ESS 단독 시스템보다 경제성이 높음을 확인할 수 있었다. 본 탐구조는 지역별 특성에 맞게 두 가지 시나리오의 통합 에너지 시스템을 구상하였다. 직전에 했던 탐구를 바탕으로 전력 수요 증가시 원자력 발전으로 생산한 전력을 우선 공급하는 체계를 세웠다.

3.2 원자력 발전소가 있는 지역의 시스템 구상

원자력 발전소가 있는 지역은 재생에너지 발전단지에서 생산된 전력을 우선적으로 공급하고, 재생에너지의 간헐성으로 인해 전력 수요가 재생에너지 공급량을 초과할 경우에 부하추종운전이 가능한 원자력 발전소의 출력을 높여 전력 수요에 맞춰 보강 공급한다.

그리고 예상치 못한 대규모 전력 수요 증가 상황으로 인해 원자력 발전소의 최대 출력마저 넘어설 경우에는 장주기 ESS 를 활용하여 연료전지를 통해 전력을 공급한다. 이 시스템을 구현하기 위해서는 대규모 재생에너지 발전단지, 부하추종운전 기능을 갖춘 원자력 발전소, 그리고 수소 기반 장주기 ESS 시설이 필요하다.

3.3 원자력 발전소가 없는 지역의 시스템 구상

원자력 발전소 인프라가 없는 지역에서는 대규모 ESS 설비를 통해 재생에너지의 간헐성을 보완하고, 100% 재생에너지 기반의 독립적인 전력망을 구축하는 것이 목표이다. 이 시스템은 대규모 재생에너지 발전단지와 단,중,장주기 ESS (슈퍼캐패시터, 수계 아연-이온 전지, 수소 에너지 저장 시스템)로 구성하였다.

재생에너지 발전단지에서 생산된 전력을 우선적으로 전력망에 공급하고, 수요를 초과하는 잉여 전력은 순서대로 단, 중, 장 주기의 ESS 에 저장한다. 이렇게 순서를 정한 이유는 전력망은 10 초 안에 60Hz 를 맞춰야 하고 0.2Hz 만 벗어나도 정전으로 이어질 수 있기 때문이다.

이후 재생에너지 공급량 부족으로 전력 부족이 발생할 경우 잉여 전력으로 충전해 둔 ESS 를 단계적으로 활용하여 전력을 공급한다. 전력 수급 변동에 맞춰 기존의 슈퍼캐패시터와 같은 단주기 ESS 는 주파수 안정을 위해 재생에너지의 출력 변동에도 계통이 붕괴되지 않도록 보호하는 역할로 한다. 이어서 수계 아연-이온 전지를 활용해서 일내 변동성을 흡수하는 중주기 배터리 ESS 기능을 수행하도록 한다.

마지막으로 장주기 ESS 는 수소를 활용하여 장마철이나 동절기처럼 발전량이 장기간 저조할 때를 보완하는 수단으로 설정하였다. 좀더 구체적으로 설명하자면 잉여 전력이 발생하면 먼저 중주기 배터리를 충전하여 단기 변동에 대비하고, 잉여가 지속되면 수전해 설비를 가동해 수소로 전환함으로써 에너지 손실을 최소화하며 장기적으로 비축한다. 반대로 전력 부족 시에는 배터리를 방전하여 1 차 대응을 수행하고, 공급 부족이 장기화될 경우 비축된 수소를 연료전지로 전환하여 안정적인 전력 공급을 이어가는 방안이다.

결론 (Conclusion)

본 보고서는 대한민국 에너지 안보의 구조적 취약성을 분석하고 이를 극복하기 위한 구조 전환 로드맵을 제시하였다.

대한민국의 에너지 체계가 외부 자원 의존과 중앙집중식 전력망으로 인해 취약하다고 판단하고 해결책으로 자체 생산이 가능한 발전원을 기반으로 하는 분산형 전력 시스템이 필요함을 주장하였다. 이후 탐구를 통해 재생에너지-ESS-원자력에너지 체계를 지역별 특성에 맞게 적용하는 것이 에너지 자립을 위한 최적의 경로임을 결론지었다.

보고서에서 제안하는 구조 전환은 시행과정에서 많은 어려움을 동반할 것이라고 생각한다. 그럼에도 분명한 사실은 에너지 자립 없이는 국가가 지금 이상으로 발전하기 어렵다는 점이다. 본 탐구조는 이 보고서가 대한민국이 에너지 자립국으로 변모하는 데 조금이나마 기여가 되기를 바란다.

REFERENCES

1. 산업통상자원부. (2023). 제 11 차 전력수급기본계획(2024-2038) 실무안.

2. 송근용, 방철한, 박영산, & 최영진. (2012). 풍력발전단지 입지선정 기술개발을 위한 기반조사 및 사례분석. 한국풍공학회지, 16(1), 3-12.

3. 에너지경제연구원. (1996). 비상시 석유수급 안정화 방안 연구.

4. 에너지통계정보시스템 (EG-TIPS). (n.d.). 국가별 주요 에너지 통계.

5. 한국전력거래소. (2023). 2022 년도판 한국전력통계(제 91 호).

6. 최동배. (2020). ESS 사업 아는 만큼 성공한다: 놓쳐서는 안 될 8 가지 팩트.

7. 히라타 다케오. (2023). 세계 에너지 전쟁지도: 세계 주요국의 에너지 전략에서 미래지도까지.

8. 권태영. "시계열 분석 ARIMA 모형을 이용한 제주 방문 미래 예측 연구." 국내석사학위논문 남서울대학교 복지경영대학원, 2019. 충청남도

9. 한국환경공단. (2023). 전국 사업장 대기오염물질 배출현황 [데이터셋]. 공공데이터포털. https://www.data.go.kr/data/15065266/fileData.do

10. Lee, D.-H., Jung, A., Kim, J.-Y., Kim, C. K., Kim, H.-G., & Lee, Y.-S. (2019, June 1). Solar Power Generation Forecast Model Using Seasonal ARIMA. Journal of the Korean Solar Energy Society. The Korean Solar Energy Society. https://doi.org/10.7836/kses.2019.39.3.059

11. Energy Institute. (2024). Statistical Review of World Energy 2024: 73rd Edition. Energy Institute.

12. International Energy Agency (IEA). (2023). World Energy Outlook 2023. IEA.

13. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2025). Renewable Capacity Statistics 2025. IRENA. https://www.irena.org/Data/Statistical-publications/Yearbooks

14. Bh Chung & J. Jeon. (1994). Nuclear power development in Korea. https://www.semanticscholar.org/paper/600a23fba253332a305d80c2e5df77e5497f6f75

15. L Bird, M Milligan, & D Lew. (2013). Integrating variable renewable energy: Challenges and solutions. https://www.osti.gov/biblio/1097911

16. D Teichmann, W Arlt, & P Wasserscheid. (2012). Liquid Organic Hydrogen Carriers as an efficient vector for the transport and storage of renewable energy. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031991201868X

17. Ömer Karaduman. (2020). Economics of Grid-Scale Energy Storage. https://www.semanticscholar.org/paper/05a551f03c49da2e73d7108dba2dfddabb6c16d4

18. Cha, D. C., Seok, J. H., Cho, S. C., Singh, M., Singh, T. I., Lee, S. U., & Lee, S. (2025). Tunable B-Doped Cobalt Phosphide Nanosheets Engineered via Phosphorus Activation of Co-MOFs for High Efficiency Alkaline Water-Splitting. Small. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/smll.202570245

19. ACS Central Science. (n.d.). Selective ion transport across membranes. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acscentsci.7b00012

20. Chen, L. N., Yan, M. Y., Mei, Z. W., & Mai, L. Q. (2017). Research progress and prospect of aqueous zinc ion battery. *Journal of Inorganic Materials*, *32*(3), 225–234. https://doi.org/10.15541/jim20160192

21. Kurmanbayeva, I., Rakhymbay, L., Korzhynbayeva, K., Adi, A., Batyrbekuly, D., Mentbayeva, A., & Bakenov, Z. (2020). Tetrapropylammonium hydroxide as a zinc dendrite growth suppressor for rechargeable aqueous battery. *Frontiers in Energy Research*, *8*, 599009. https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.599009