



탄소 중립과 재생에너지 확대에 따른 전원 비중 분석 및 이슈별 대응방안 검토

제갈성^{1)*} · 최용석²⁾

A Study on Energy Mix Analysis and Countermeasures for the Carbon Neutrality and Renewable Energy Expansion Issues

Seong Jegarl^{1)*} · Yongseok Choi²⁾

Received 8 December 2025 Revised 11 December 2025 Accepted 12 December 2025 Published online 22 December 2025

ABSTRACT Renewable Energy is expected to become a dominant energy supply source with nuclear energy in Korea, to achieve Carbon Neutral by 2050. In recent energy demand & supply system, the base-load demand has been supplied by nuclear and coal power. By contrast, the fluctuation in demand has been met by natural gas, pumped hydro power and energy storage system (ESS). Fluctuations in energy supply arise from variations in renewable energy supply and energy demand between day- and night-time. Renewable and nuclear energy should be deployed to achieve as much carbon neutrality as possible. Excessive supply of renewable energy, however, can make some issues like curtailment, reduced power inertia and an increased need of flexible resources. To address these challenges, forecasting of power generation, supply of power inertia and addition of flexible resources like ESS are required. Numerous ESS technologies have been developed, each with characteristics and specific application fields. Consequently, further integrated research on the optimal storage mix, including application fields, economics and efficiency, should be conducted.

Key words Energy mix(에너지믹스), Carbon neutrality(탄소중립), Renewable energy(재생에너지), Energy storage(에너지저장), Storage mix(저장믹스)

1. 서론

일반적으로 에너지 및 전력산업계의 가장 큰 임무 또는 목표로 삼고 있는 것이, '깨끗하고 값싼 에너지(전기)를 안정적으로 공급하는 것이다. 이 말에 에너지 및 전력산업계

에서 추구하는 방향이 다 포함되어 있는데, 그것은 환경성, 경제성, 공급 안정성이다. 여러 에너지원 중에서 대표적인 석탄, 천연가스(Liquefied Natural Gas), 원자력, 재생에너지를 비교해보면, 환경성 측면에서는 재생에너지와 원자력이 가장 좋을 것이며 천연가스가 그 다음이고 석탄이 가장 안 좋다고 할 수 있겠다. 그렇지만 생애 전주기의 탄소 발자국(footprint)까지 고려한다면 그 차이는 좀 줄어들 것으로 보인다. 경제성 측면에서는 공급 비용을 나타내는 값인 LCOE(Levelized Cost of Energy or Electricity, 균등화 에너지(전력)비용)를 비교하면, 원자력이 가장 경제적이며 그 다음이 석탄, 천연가스, 재생에너지 순서인데, 재생

1) Professor, Industry-University Cooperation Foundation, Kunsan National University

2) Professor, Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University

*Corresponding author: jegarls@kunsan.ac.kr

Tel: +82-63-469-8951

Fax: +82-63-469-4280

에너지의 LCOE가 국내에서는 아직 비싼 편에 속하지만 유럽 등 해외에서는 이미 재생에너지가 화석연료의 LCOE와 같아지는 grid parity를 넘어서 경제성이 증가하고 있다. 즉, 상용발전소로 건설, 운영되는 용량이 증가하면 그에 따른 발전단가 저감이 이루어진다는 것이니, 국내에서도 곧 grid parity에 도달할 시기가 오면 경제적인 공급원도 달라질 수 있을 것이다. 공급 안정성 측면에서는 국내 생산과 공급을 고려하면, 재생에너지와 원자력이 가장 안정적일 것이고, 원료 수급 이슈가 있는 석탄과 천연가스가 그 뒤를 차지할 것이다. 하지만 안정성에서 원료 공급 안정성 외에 공급망 안정성 측면에서 본다면 재생에너지의 변동성이 안정성에는 치명적인 단점이 될 수밖에 없을 것이다.

에너지 분야에서 가장 큰 이슈 중의 하나는 온실가스와 탄소중립일 것이다. 2015년 파리 기후협약을 통해 전 세계에서는 ‘산업화 이전 대비 평균기온 상승 2°C 이내 유지 및 1.5°C 이하로 유지하도록 노력’하기로 결정하였다. 이를 위해 국제사회에서는 2030년까지 2010년 대비 CO₂ 순배출을 45% 감축하고 2050년까지 순배출 Zero를 달성하는 목표를 발표하였다. 이를 위해서 IPCC(International Panel on Climate Change, 기후변화에 관한 정부간 협의체)는 2018년, ‘Global Warming of 1.5°C’ 보고서를 통해 에너지전환 부문의 달성 방안으로 전력의 75~80%를 재생에너지로 공급해야 한다고 제시하였고,^[1] IEA(International Energy Agency, 국제에너지기구)는 2020년에, 전 세계 주요국은 재생에너지를 적극 육성 중이며 2040년에는 전 세계 전력수요의 67%를 재생에너지가 공급할 것이라고 전망했다. 국내에서도 탄소중립을 선언하며 이를 달성하기 위한 노력을 진행하고 있다. 2020년 10월 대통령 국회 시정연설에서 “국제사회와 함께 기후변화에 적극 대응하여 2050년 탄소중립을 목표로 나아가겠다.”라며 2050년 탄소제로 첫 선언을 하였으며, 이를 달성하기 위한 주요 정책으로 ‘2050 장기 저탄소 발전전략’을 통해 2050년 재생에너지 발전 비중 80% 달성을, ‘제3차 에너지기본계획(2019.6)’에서는 2040년까지 재생에너지 발전 비중 30~35%로 확대를, ‘제11차 전력수급 기본계획(2024.5)’에서는 2038년의 재생에너지 용량은 115.5 GW(태양광 74.8 GW, 풍력 40.7 GW)를, 발전량 비중은 32.9%를 달성하는 목표를 제시하고 있다.

이러한 계획에서 에너지원별 비중인 에너지 믹스를 다양하게 제시하고 있는데, 이런 분석을 수행하고 제시하기 위해 각 기관에서 많은 인력과 예산을 바탕으로 분석모델을 개발하고 이를 이용해 적정 에너지믹스를 계산하고 있다. 하지만 이에는 많은 비용과 시간이 소요되기에, 조금 더 간단하게 기존 전력운영 data를 바탕으로, 정성적인 방법을 이용한 적정 에너지믹스를 계산해 보고자 한다. 또한 이러한 에너지믹스를 바탕으로 재생에너지가 확대될 경우 발생할 수 있는 다양한 문제점들을 찾아보고 이에 대응하기 위해 준비해야 할 사항을 제시해 보고자 한다.

2. 전력운영 데이터에 기반한 전력수급 및 발전원별 현황 분석

전력수요와 이에 맞춘 공급량은 하루 중 전력수요 패턴에도 시간별, 날씨별, 요일별, 계절별로도 차이가 많이 난다. Fig. 1과 2는 한국전력거래소(KPX)에서 공개하고 있는 하루 중 전력수급현황을 나타낸 것으로, 한밤중 전력수요

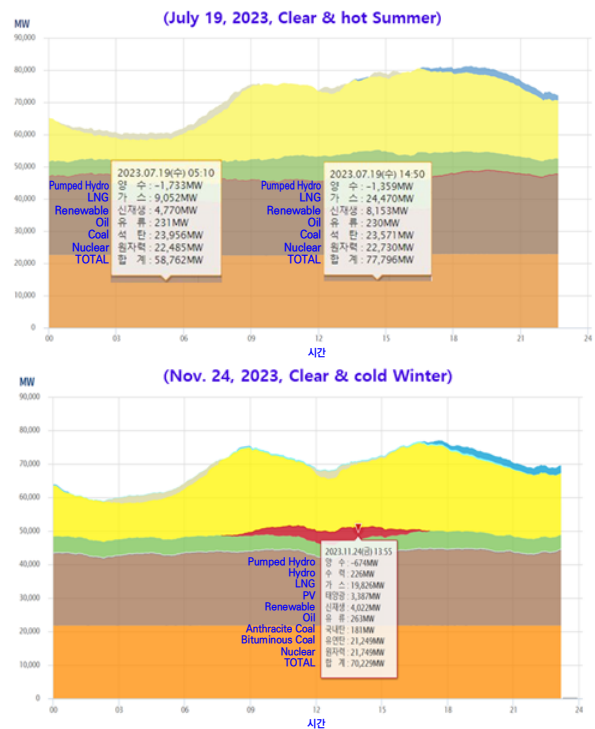


Fig. 1. The graph of real-time power demand and supply by each energy resource at summer and winter in 2023^[2]

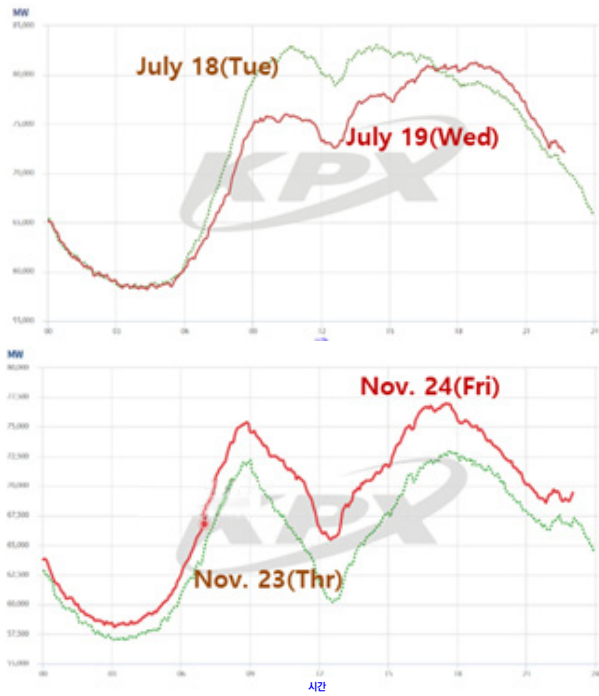


Fig. 2. The graph of real-time power demand and supply on specific day (July 19 & Nov. 24 in 2023)^[2]

가 가장 적고 오전에 전력수요가 늘어났다가 정오 즈음에 수요가 적어졌다가 오후에 증가하여 저녁에 피크에 도달하고는 다시 줄어드는, 전형적인 오리곡선(duck curve)을 보여주고 있다. 이런 현상은 계절과 요일에 따라 크기는 조금 차이가 있지만, 형태는 유사하게 발생하고 있다. 정오 즈음

에 수요가 적어지는 것은 수요가 줄어드는 영향도 있지만 전력거래소에서 집계되지 않는 소규모 자가 태양광발전에 의한 수요상쇄 영향도 있다. Fig. 1을 보면 전력수요에 대한 기반(base) 발전원은 원자력과 석탄이 담당하고 있음을 알 수 있다. 하지만 석탄은 수요변화와 발전원의 공급 현황에 따라 조금씩 출력이 조절되고 있음을 알 수 있다. 그리고 낮 시간의 태양광 출력의 큰 변동 발생과, 이러한 공급원의 발전량과 수요량의 차이를 보완하는 중요한 역할은 가스(LNG) 발전이 담당하고 있음을 볼 수 있다. 이외에 적은 양이지만 양수(Pumped Hydro) 발전이 펌핑과 발전을 통해 수요와 공급을 맞추는데 일익을 담당하고 있음을 알 수 있다.

이러한 상황은 향후 탄소배출이 0이 되는 탄소중립을 위해 석탄발전이 모두 폐지된다고 가정할 때 고려해야 하는 중요한 사항이 될 것이다.

Table 1은 2021년 1월 ~ 2024년 12월까지 4년간의 월별 최대수요가 발생한 날짜와 시간, 그리고 당일의 최소 수요량과 예비력을 나타낸 것이다. 일반적으로 잘 알려진 것과 같이, 여름과 겨울철에 최대수요가 발생하고, 봄과 가을에는 최소 수요가 발생하는 것을, 이 표를 통해서도 유사한 결과를 알 수 있다. 이와 함께 알 수 있는 내용을 정리해 보면 다음과 같다.

- 1) 여름과 겨울의 월 최대수요가 발생할 월의 최대 수요는 약 91~97 GW 정도이고, 당일 최소 수요는 59~65

Table 1. Seasonal maximum and minimum demand and supply and generation for recent four years^[3]

	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Yr-2024	Date/Time 23 rd (Thr, 5pm)	22 nd (Thr, 11am)	5 th (Tue, 11am)	3 rd (Wed, 11am)	23 rd (Thr, 8pm)	19 th (Thr, 6pm)	25 th (Thr, 5pm)	20 th (Thr, 5pm)	11 th (Thr, 5pm)	15 th (Tue, 7pm)	27 th (Thr, 11am)	19 th (Thr, 9am)
	Supply Capacity 104,997	101,921	95,500	83,155	82,585	89,170	99,162	105,360	101,806	85,391	97,490	106,287
	Max. Demand 89,231	84,093	81,691	71,199	69,899	80,077	90,254	97,115	93,246	72,272	79,064	83,314
	Min. Demand 67,259	61,257	58,851	54,041	53,570	55,976	61,420	64,535	62,559	53,811	57,584	63,226
	Supply Reserve 15,766	17,828	13,809	11,956	12,686	9,093	8,908	8,245	8,560	13,119	18,426	22,973
	Operation Reserve 10,850	10,241	9,666	11,534	9,958	9,831	10,380	8,276	8,917	9,807	10,389	10,160
	Avg. Temp. (°C) -11.2 ~ -5.9	1 ~ 3	6.2 ~ 9.5	13.4 ~ 16.6	17.0 ~ 26.2	21.2 ~ 33.7	26.0 ~ 32.0	27.1 ~ 33.3	26.1 ~ 32.7	18.3 ~ 21.7	-1.3 ~ 1.2	-5.2 ~ 5.9
Yr-2023	Date/Time 26 th (Thr, 11am)	3 rd (Thr, 10am)	2 nd (Thr, 7pm)	5 th (Wed, 11am)	30 th (Tue, 5pm)	29 th (Thr, 11am)	27 th (Thr, 6pm)	7 th (Mon, 5pm)	5 th (Tue, 6pm)	19 th (Thr, 7pm)	30 th (Thr, 6pm)	21 st (Thr, 10am)
	Supply Capacity 103,138	101,103	92,683	84,938	82,332	93,562	102,234	104,397	99,391	85,738	96,366	105,213
	Max. Demand 92,613	84,290	76,510	72,292	72,772	82,196	87,033	93,615	85,682	70,985	82,716	91,556
	Min. Demand 68,527	65,505	59,414	54,928	51,364	57,889	59,995	58,738	59,806	54,175	61,617	67,921
	Supply Reserve 10,525	16,813	23,509	16,403	9,560	11,366	15,201	10,682	13,709	14,753	13,650	13,657
	Operation Reserve 9,121	9,087	12,201	10,521	9,388	9,608	10,284	10,264	11,192	10,651	11,181	13,657
	Avg. Temp. (°C) -8.4 ~ -1.3	-2.1 ~ 5.2	0 ~ 7.4	10.6 ~ 14.7	19.6 ~ 25.2	23.5 ~ 25.8	24.4 ~ 32.0	27.3 ~ 33.9	24.4 ~ 31.6	15.5 ~ 19.7	-4.3 ~ 1.6	-11.5 ~ -6
Yr-2022	Date/Time 5 th (Wed, 10am)	7 th (Mon, 5pm)	23 rd (Wed, 5pm)	13 th (Wed, 5pm)	30 th (Wed, 5pm)	27 th (Mon, 5pm)	7 th (Thr, 5pm)	8 th (Mon, 5pm)	16 th (Fri, 5pm)	4 th (Tue, 10am)	30 th (Wed, 5pm)	23 rd (Fri, 11am)
	Supply Capacity 107,631	100,103	89,033	84,457	84,474	94,364	99,716	100,691	91,923	86,998	92,682	105,628
	Max. Demand 89,397	87,351	78,233	71,879	73,134	84,739	92,990	89,263	82,122	72,544	82,117	91,556
	Min. Demand 66,721	61,096	59,228	54,636	49,683	53,646	63,424	58,823	57,404	53,017	60,206	70,139
	Supply Reserve 18,234	12,752	10,800	12,578	11,340	9,625	6,726	11,428	9,801	13,554	10,565	11,119
	Operation Reserve 12,403	9,992	7,514	9,336	10,725	9,625	6,684	11,428	7,562	9,674	10,565	11,119
	Avg. Temp. (°C) -4.7 ~ -3.7	-5.4 ~ 2.6	4.8 ~ 9.5	11.4 ~ 16.0	18.2 ~ 23.7	25.2 ~ 27.3	26.4 ~ 30.9	26.7 ~ 29.1	23.2 ~ 29.1	15.0 ~ 23.2	-5.3 ~ 1.3	-10.5 ~ -6.1
Yr-2021	Date/Time 11 th (Mon, 11am)	17 th (Wed, 10am)	2 nd (Tue, 10am)	12 th (Mon, 5pm)	20 th (Mon, 5pm)	29 th (Tue, 5pm)	27 th (Tue, 6pm)	12 th (Thr, 5pm)	13 th (Mon, 5pm)	5 th (Tue, 6pm)	30 th (Tue, 11am)	27 th (Mon, 5pm)
	Supply Capacity 99,189	95,992	92,526	77,695	80,387	87,573	100,739	98,952	90,532	82,449	95,394	103,554
	Max. Demand 90,564	84,749	77,208	69,016	69,140	75,854	91,141	86,355	77,820	75,698	80,362	90,708
	Min. Demand 62,743	64,230	55,689	47,967	50,864	55,254	61,334	59,066	50,756	53,017	58,476	62,540
	Supply Reserve 8,625	11,243	15,318	8,679	11,247	11,719	9,598	12,597	12,712	6,751	15,032	13,846
	Operation Reserve 7,059	10,840	8,029	8,632	10,427	10,593	9,811	9,586	10,156	6,949	8,792	9,117
	Avg. Temp. (°C) -7.6 ~ -1.9	-8.1 ~ -3.9	1.1 ~ 6.5	12.6 ~ 16.2	15.5 ~ 20.4	21.1 ~ 27.2	26.2 ~ 33.7	23.7 ~ 30.4	21.5 ~ 28.0	21.7 ~ 27.0	2.7 ~ 9.8	-10.5 ~ -6.1

GW 정도로 최대수요 대비 약 62~68% 수준이다. 하루 간 수요의 차이가 22~35 GW 정도이다. 이 차이를 가스 및 양수발전 등이 감당하고 있는 것이다.

- 2) 봄과 가을의 월간 최대수요가 가장 적게 발생하는 월의 최대수요는 69~75 GW 정도이고, 당일 최소수요는 48~55 GW 정도로 최대수요 대비 약 66~76% 수준이다. 하루 간 수요의 차이는 17~22 GW로 여름과 겨울에 비해서는 조금 적은 편이다. 이는 최대수요량이 적어진 영향이라고 보여진다.
- 3) 봄과 가을철의 최소 수요는 40 GW 정도로, 공급능력 또한 여름과 겨울의 105 GW 정도인 것에 비해 봄과 가을은 85 GW 정도로 차이를 보이는 것과 유사하게, 수요가 줄어드는 것에 맞추어 원자력과 석탄 발전의 계획예방정비 등을 봄과 가을에 수행하고 발전소의 출력을 줄이는 유연 운전을 하거나 일시 정지와 같은 대책을 시행하여 발생한 것이라 볼 수 있다.
- 4) 계절별 최소 및 최대수요 발생 시 각 발전원이 담당할 발전 비중을 살펴보면, 원자력이 35~25%, 석탄이 40~30%, 가스발전이 15~35%, 풍력이 6~4%, 태양광이 0~7%, 양수발전이 2~7% 수준이다. 이는 향후 탄소 중립을 위해 석탄과 가스발전을 줄일 경우 참고가 될 수 있을 것이다.

Fig. 3은 2024년 봄과 여름, 즉 전력수요가 가장 적었던 5월과 가장 많았던 8월의 최대수요 발생일의 전력수요 패턴과 양을 보여준다.

두 날짜의 각 전원별 공급량을 보면, 원자력의 공급량은

크게 차이나지 않는 반면, 석탄발전과 가스발전은 큰 차이를 보이고 있다. 석탄발전은 여름에 발전량이 확연히 많고, 가스발전도 여름에 발전량이 많은 것과 함께 하루 중의 시간별 공급량에 큰 변화를 보이고 있음을 알 수 있다. 이것은 석탄발전은 봄과 가을과 같이 수요가 적은 날에는 상당수의 발전소가 아예 정지상태를 유지하고 있고 일부 발전소는 하루 중 변화를 출력 조절을 통해 운영되고 있음을 파악할 수 있다. 가스발전의 경우에는 석탄발전보다 하루 중 시간별, 계절별 변동이 더 심한 것으로 보인다. 이 변동은 석탄발전과 유사하게 발전소의 출력조절과 발전 정지의 조합으로 달성하고 있는 것으로 보인다.

평상시 또는 고장 발생 시에 전력계통망의 전력 주파수를 60 ± 0.2 Hz 이내로 안정적으로 유지하거나 빠르게 안정 상태로 회복시키고 전력품질과 신뢰도를 확보하기 위해 두는, 즉시 발전가능한 능력을 운영 예비력이라고 한다. 이 운영 예비력에는 평상시에 주로 작동하는, 가스(LNG) 발전소의 회전하는 터빈에 연결된 발전기의 자동발전제어(AGC, Automatic Generation Control) 및 전기저장장치(ESS)의 원격 출력제어 운전을 통해 5분 이내 응동하여 30분 이상 출력을 유지할 수 있는 주파수제어예비력과, 고장 발생 시 발전기의 조속기(Governor Free) 운전 및 ESS의 주파수 추종 운전, 그리고 발전기의 자동발전제어(AGC) 운전 및 중앙급전발전기를 통한 주파수회복예비력이 있다.^[4] 주파수회복예비력은 1차 예비력, 2차 예비력, 3차 예비력으로 구분하여 운영하고 있다. 이 운영 예비력을 통해 급격한 수요 및 공급의 변화에 대해 안정적으로 전력계통

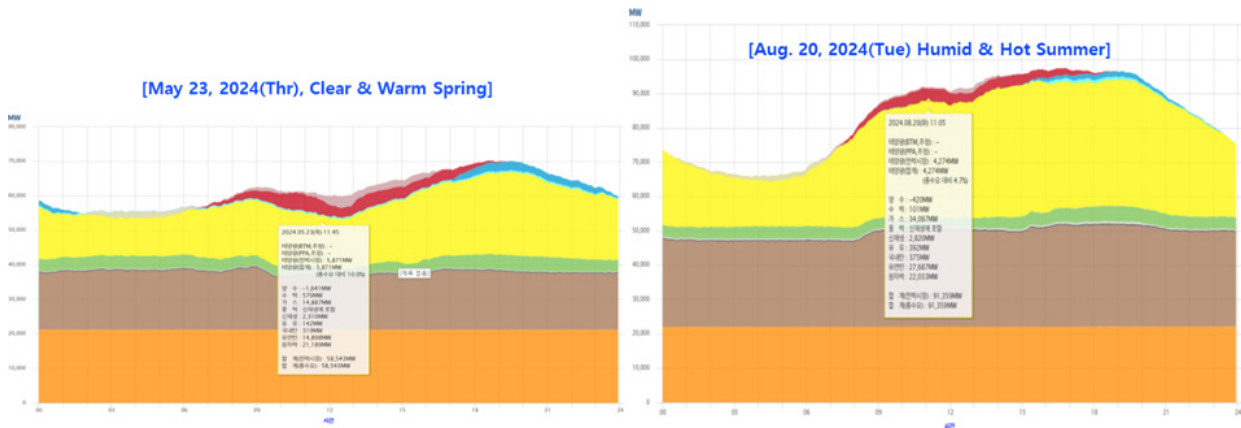


Fig. 3. Comparison of real-time power supply by each energy resource between spring and summer in 2024

을 운영할 수 있다. 이에서 보듯이 전력계통망의 정상시의 주파수제어예비력과 고장 발생 시의 주파수회복예비력을 공급하기 위한 전력으로 가스(LNG) 발전소와 전기저장장치(ESS)가 주요한 역할을 수행하고 있음을 알 수 있다.

3. 전력운영 데이터 기반 2050 탄소중립 적정 전력공급 비중에 관한 정성적 분석

2050년 탄소중립을 전 세계 국가들뿐만 아니라 국내에서도 목표로 제시하고 있다. 이를 위해 적절한 에너지원별 비중을 어떻게 가져가는 것이 좋을 지를, 앞에서 분석했던 여러 상황에 따른 각 에너지원 별 현황과 필수 에너지원의 역할 등을 고려하고, 현재의 에너지원별 운영 현황 data를 바탕으로 분석하였으며 필요한 조건에 대해서도 분석하여 보았다.

이를 위한 각 에너지원 별로 고려하는 것이 좋을 것으로 보이는 전제 사항을 다음과 같이 제시할 수 있다. 우선 대표적인 탄소배출 에너지원인 석탄발전은 2050년 이전에 완전히 퇴출된다는 전제하에, 설비용량과 발전량은 '0'으로 고려한다. 또 다른 탄소배출 에너지원인 천연가스(LNG) 발전은 최소로 줄여야 하지만, 정상시의 낮과 밤 수요변동에 맞춘 전력공급 역할과, 운영 예비력으로서의 역할을 고려하여 적정 수준을 계속 유지하는 것이 좋을 것으로 보인다. 다만 가스발전 운영에 따라 발생하는 CO₂는 탄소포집활용 저장(CCUS, Carbon Capture, Utilization & Storage)을 통해 처리해야 한다. 계통운영과 예비력 공급 역할을 하는 다른 수단인 양수발전이나 에너지저장장치(ESS)와는 상호 보완 관계가 될 것이다. 그러므로 가스발전에 CCUS를 설치하여 운영하는 비용과, 천연가스발전 대신에 양수발전이나 ESS를 추가하여 운영하는 비용을 비교, 분석하는 것이 필요할 것이다.

이러한 상황을 고려한다면, 현재의 석탄발전 비중인 40~30%를 0%로 줄이고, 천연가스발전 비중인 15~35%를 적정 수준으로 줄인다면, 전체적으로 타 발전원으로 조정되어야 할 비중은 약 35~45% 정도가 될 것으로 보이며, 이 비중만큼이 다른 무탄소 발전원들로 시차를 가지면서 이진되어야 할 것으로 보인다. 이를 위해서는 대표적인 무탄소

발전원인 원자력과 재생에너지는 최대한 확대하는 것이 필수적일 것이다. 다만 원자력발전은 출력을 조정하는데 어려움이 있기에 최소전력수요 시기에 수요감소 용량 부분을 정기 예방 정비 등으로 감당하고, 그러고도 추가로 감소가 필요한 발전량은 원전의 탄력운전이나 양수와 ESS가 최대한 흡수할 수 있는 수준까지만 확대할 수 있을 것이다. 재생에너지도 가능한 확대하되, 출력변동 특성이 계통망 운영에 어려움을 초래하지 않는 정도까지 확대할 수 있을 것으로 보인다. 재생에너지 출력변동은 목적과 저장기간을 고려하여 단/중/장주기 에너지저장을 이용하여 최대한 흡수 조정하고 그럼에도 수용 불가능한 초과분은 출력조정으로 제어해야 할 것이다. 수소 및 암모니아와 같은 무탄소 전원은 비용 효과적이고 원료 공급이 가능한 수준까지 확대 가능할 것으로 보인다. 그리고 여전히 기술 발전 수준도 중요한 고려 요인이기에 이러한 점들을 모두 고려한 적정 수준에서 운영하는 것이 바람직할 것이다.

현재의 계통운영 현황 데이터와 상기 전제조건 들을 고려한, 각 전원 별 적정한 발전량 비중을 정성적으로 분석한 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다. 원자력발전은 최대 약 40% 수준으로 증가시킬 수 있을 것으로 보인다. 이는 최저 수요 시간대의 수요량 수준에서 현재의 석탄발전 공급량을 최대한 전환한 수준으로, 탄력운전 등 자체출력조정 수행을 고려한 것이다. 하지만 적정 수준의 탄력운전과 양수발전이나 ESS의 지원이 어렵다면 35~37% 수준으로 조정하는 것이 필요할 것으로 보인다.

재생에너지는 최대한 확대하지만 35% 정도 수준이 적절할 것으로 보이며, 그 이상이 된다면 계통운영에 어려움이 있을 것으로 보인다. 태양광과 풍력이 유사한 수준으로 운영되어야 하며, 태양광은 건물태양광, 영농태양광, 수상태양광 등으로, 풍력은 해상풍력을 중점으로 공급하게 될 것으로 보인다. 재생에너지 확대의 주요 걸림돌은 입지 문제와 ESS 확충 비용이 될 것으로 보여진다. 이러한 문제가 걸림돌이 된다면, 32~34% 수준으로 조정이 필요할 것이다.

천연가스발전은 계통변동성 보완과 운영 예비력을 위한 발전원 역할을 수행해야 하기에 약 10% 수준에서는 운영해야 할 것으로 보인다. 하지만 CO₂ 배출량은 석탄발전의 약 45% 수준으로, CCUS 적용과 ESS 대체에 대한 세부 비용 효과평가를 통해 적정 수준을 고려해야 할 것이다. CCUS

적용의 또 하나의 고려사항은 국내에서 CO₂ 저장입지 확보이다. 저장할 장소를 확보하기 어려울 경우에는 10% 이하로 유지하면서 CCU-only와 ESS 적용을 모두 고려해서 결정하여야 할 것이다. 수력, 양수 및 ESS는 부하피크 조정, 출력변동 완화, 계통운영 여부 확보 등을 위해 가능한 확대하는 것이 필요할 것으로 보이며, 발전량 비중은 10% 이상, 약 12~13% 수준을 유지하는 것이 바람직해 보인다. 다만 양수와 ESS는 각각 입지 확보와 비용효과 분석을 통해 경제적이라 판단될 경우 확대할 수 있을 것으로 보인다.

수소와 암모니아 발전은 탄소중립과 계통안정화를 위해 5~7% 수준을 유지하는 것이 좋을 것으로 보이며, 혼소와 전소 발전을 포함하여 원료 공급에 문제가 없는 수준에서 최대한 도입하는 것이 좋을 것이다. 폐기물 등 기타 발전은 탄소중립에 영향을 주지 않은 범위에서 1~2% 이내에서 유지하되, 수소/암모니아 발전과 합쳐서 6~8% 정도로 유지하는 것이 좋아 보인다.

이 분석 결과는 현재의 발전량 비중과 에너지원별 운영 형태, 운영상의 한계점 등을 종합적으로 고려하였지만, 정량적인 분석은 아닌 데이터를 근거로 한 정성적인 분석이기에 정확도에서 한계는 존재한다. 향후 데이터가 축적되고, 최소한 여러 요인에 의한 경험론적 모델을 개발하여 분석하거나 통계적 분석을 추가하여 분석을 수행할 수 있다면 보다 좋은 결과를 보여줄 수 있을 것이다.

4. 재생에너지 확대에 따른 주요 이슈와 대응 방안 분석

재생에너지 발전량 비중이 증가함에 따라 재생에너지 출력의 불확실성과 간헐성 등에 의해 발전소 운영과 전력계통 운영에 지대한 영향을 줄 수 있다. 이에 따라 국제에너지기구(IEA)에서는 재생에너지 발전량 비중에 따라 다섯 단계로 구분하여 발생할 수 있는 기술적 이슈와 대응방법을 제시하고 있다.^[5]

발전량 비중이 0~3% 수준인 1단계에서는 재생에너지에 의한 영향이 거의 없으며 다만 접속점에서 국지적 계통으로 영향이 약간 발생하는 정도이며, 향후를 대비한 계통연계 기준인 Grid Code 개정을 준비하고 국지적 계통 영향

정도를 검토해야 한다고 제시하고 있다. 재생에너지의 발전량 비중이 3~15% 수준인 2단계에서는 재생에너지 발전용량이 계통운영에 영향을 주기 시작하며, 이에 따라 준비했던 Grid Code를 개정하고 발전제약 완화를 위한 노력을 수행해야 하며 출력예측 시스템을 개발하여 적용해야 한다고 제시하고 있다. 현재 국내의 재생에너지 발전량 비중이 2024년 10%를 넘는 상황을 보면 현재 한국은 2단계 수준에 있다고 봐야 할 것이다. 발전량 비중이 15~25% 수준인 3단계에서는 계통운영의 불확실성과 변동성이 더욱 증가하게 되어 재생에너지의 출력감시, 예측, 제어시스템을 구축하고 유연성 자원 확대가 중요할 것으로 제시하고 있다. 국내에서는 제주지역이 이 상황에 놓여 있고 육지도 2028년 이후에 3단계에 들어갈 것으로 예측되고 있다. 재생에너지 발전량 비중이 25~50% 수준이 되는 4단계에서는 일시적으로 재생에너지로만 100% 공급되는 상황이 발생할 수 있어 계통 안정도에 큰 영향을 미치는 상황이 발생할 것으로 보고 있다. 이 단계에서는 관성 확보가 최우선 대응과제가 될 것이며 ESS 등 대규모 전력계통 유연성 자원 보강이 필요한 과제가 될 것으로 제시되고 있다. 재생에너지 발전량 비중이 50% 넘는 5단계에서는 대규모의 잉여전력 발생과 출력조정이 필요하고 계절에 따른 수급 부족 현상이 발생할 수도 있을 것으로 보고 있다. 이에 따른 대응 방안으로 부하를 전기화하는 등 전력수요를 만들어 내는 Plus-DR이 필요하거나 잉여전력을 열이나 수소와 같은 다른 물질로 변경하여 활용하는 Sector Coupling이 필요하다고 제시하고 있다.

재생에너지 확대에 따른 대표적인 대응 방안에는 출력예측, 관성 확보 및 유연성 확보 기술이 있다. 재생에너지 출력을 보다 정확히 예측할 수 있다면 다른 발전원의 운영계획에 큰 도움이 될 수 있다. 재생에너지는 그 특성상 기온, 일사량, 풍속 등의 기상 조건에 영향을 받게 되기에, 과거의 기온, 일사량, 풍속, 습도 등의 기상정보와 당시의 발전실적을 데이터베이스로 구축한 뒤, 1일 후 등 미래의 기상 예측 정보를 바탕으로 미래의 재생에너지 발전량 변화를 사전에 예측하는 것이다. 보다 정확한 출력예측이 가능하다면, 다른 발전원을 가동하거나 대기시키는 등의 발전계획 및 운영 손실을 줄일 수 있고, 재생에너지의 발전제약(curtailment) 횟수도 줄일 수 있을 것이다.

또 다른 대응 필요 이슈는 재생에너지에 의한 계통관성 (System Inertia) 저하이다. 계통관성은 발전기 불시 정지 등 계통상의 수급 불균형이 발생하였을 때 계통주파수의 변동속도를 늦춰주는 에너지인데, 관성 에너지는 회전하는 터빈으로 교류전력을 생산하는 발전소의 동기발전기로부터 제공되며 주파수 변동 시 즉각적으로 반응한다(Fig. 4 참조). 계통관성은 동기발전기 운전 대수와 비례하게 되는데, 심각한 수준 이하의 관성에서는 전력망의 안정적 운영에 어려움이 발생할 가능성이 높다. 그런데 관성을 제공하기 어려운 인버터 기반의 재생에너지가 증가하게 되면 계통 관성이 저하되어 무관성의 무탄소 발전원을 전력망에서 수용할 수 있는 한계가 발생하게 된다. 이에 계통관성을 보강하기 위한 기술로, 전력계통의 전압보상과 단락용량 증대 목적으로 운영되는 동기조상기를 활용하는 것이다. 구조는 동기발전기와 동일하나 터빈이 연결되지 않아 회전관성이 발전기의 약 1/5 수준이다. 그래서 수십 톤 중량의 플라이휠을 동기조상기에 연결하여 회전시켜서 기존 동기조상기 대비 약 10배 정도의 큰 회전관성을 제공할 수 있다. 계통관성을 제공하지 못하는 인버터를 조정하는 기술도 있다. 일반적인 Grid-following 인버터 대신에, 인버터를 동기발전기와 유사한 특성을 갖도록 제어할 수 있는 Grid-forming 인버터를 사용하는 것으로 재생에너지와 ESS용 인버터에 적용 가능하다. 그리고 인버터 출력을 전력계통 주파수 변화에 따라 빠르게 제어함으로써 주파수 회복에 기여 가능하다.

재생에너지의 간헐적 출력생산에 대한 보완책으로는 유연성 자원 확충이 대응책으로 제시되고 있다. 계통에의 유연성 확충은 NWA(Non-Wires Alternatives) 기술로, 에너지저장장치(ESS), 분산전원(VPP, Virtual Power Provider)

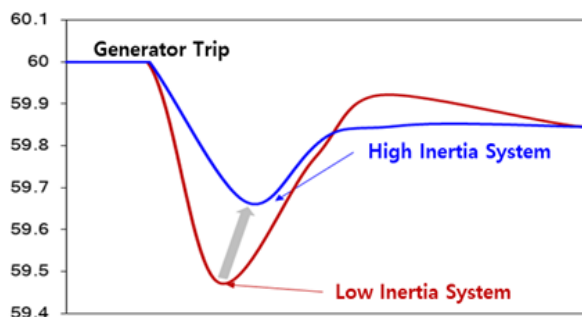


Fig. 4. Concept map of system inertia

와 수요 반응(DR, Demand Response) 결합, 전기자동차(EV, Electric Vehicle) 및 DC 제어 등의 신기술을 활용하여 송배전망의 계획 및 운영에 유연성을 높이는 기술을 말한다. 재생에너지 비중 증가에 따른 전력공급 간헐성 증가로 재생에너지 집중 지역에서는 선로 과부하가 발생하고, 화력발전 이용률 저하 등으로 노후 화력발전소 주변 지역에서는 선로 이용률이 저하하는 기술적 이슈가 발생하게 된다. 이의 해결 방안으로 기존에는 선로를 신설하거나 용량을 증대시키는 방식을 사용하였는데, 과도한 신규 건설 투자비 증가와 송전선로 건설 어려움 등으로 적기에 선로를 확충하기 어려운 상황이 발생하게 되어, 그 해결 방안으로 위에서 언급한 ESS, VPP+DR, EV, DC 제어 등의 신기술을 적용하여 해결하려는 것이다. 이 중에서 널리 사용되는 ESS 기술은 다양한 종류가 개발 및 적용되고 있기에, 보다 효과적인 활용을 위해서는 적절한 저장기술 포트폴리오, 즉 Storage Mix가 필요하며 이에 대해 좀 더 상세히 정리해 보고자 한다.

5. 에너지저장 기술의 활용 최적화 분석

에너지저장기술은 그 원리와 특성에서 다양한 종류가 있다. 에너지저장 기술에 따른 구분으로 보면, 보편적인 리튬이온배터리, 납축전지, Flow Battery와 같은 각종 배터리 기술인 전기화학적 저장 방식과 회전운동을 이용하는 Flywheel, 위치에너지를 이용하는 양수발전, 압력을 이용하는 압축공기저장(CAES) 등 기계적 저장 방식과 Capacitor나 초전도 자석(SMES, Superconducting Magnetic Energy Storage) 등에 전기 형태로 저장하는 전기적 저장방식, Molten Salt 나 콘크리트에 열에너지로 변환 저장하여 필요시 전기로 변환하는 열적 저장 방식, 그리고 수소나 합성연료 등의 화학물질로 변화시키는 화학적 저장 방식 등으로 구분할 수 있다.

하지만 에너지저장 기술의 핵심적인 기술 특성은 활용성과 효율성(경제성)에 달려 있다고 할 수 있다. ESS 기술은 저장도 중요하지만 에너지를 필요로 할 때 빠르게 에너지를 공급하는 것이 핵심이라고 할 수 있다. 그래서 원하는 시간에 빠르게 방전하여 전력을 공급하는 방전시간, C-rate가 가장 중요하며, 얼마나 오랫동안 많이 공급할 수 있는지

에 대한 능력인 용량(Capacity)과, 경제성과 관련이 있는, 오랫동안 충전하면서도 충전량이 적게 줄어드는 충방전효율, RTE(Round-trip Efficiency)가 중요하다. 이러한 특성에 따라 사용 용도가 결정되는데, 전력의 빠른 변동에 맞게 전력품질이나 주파수를 공급해주기 위해서는 큰 C-rate, 즉 방전시간이 짧은 Super capacitor나 SMES 기술이 필요하다.

일시적인 에너지 불균형이나 혼잡을 완화하기 위해 짧은 시간 저장과 방전을 반복하는 기술로는 리튬이온배터리가 많이 이용되며, 주로 태양광발전에 의해 발생하는 하루 중 전력 생산 peak와 수요 peak를 관리하기 위한 저장기술로는 대부분의 배터리 기술과 열저장 기술이 사용되고 있다. 하루 또는 주간 단위의 대규모 에너지 이동이 필요한 경우에는 양수발전, 압축공기저장 등 기계적 저장, 열저장 및 수소 변환 등의 기술이 사용 가능하다. 재생에너지가 대규모로 도입되고, 여름과 겨울의 에너지 수요가 많이 증가하게 되면서 봄과 가을의 재생에너지, 특히 태양광발전 에너지를 저장하여 여름과 겨울에 사용하는, 계절 간 저장 기술의 필요성도 제기되고 있어 이에 대한 대규모 장주기 에너지저장 기술도 개발될 것으로 보인다.

이렇게 다양한 기술적 특성을 가진 에너지저장 기술이 개발되고 있고, 에너지저장 기술의 사용 목적도 제시되고

있다. 또한, 사용 위치별로도 생산지, 송전설비, 배전설비, 소비자 인근으로 구분 가능하며, ESS가 제공할 수 있는 서비스도 대용량 에너지 서비스, 보조 서비스, 송전 인프라 서비스, 배전 인프라 서비스 및 소비자 에너지관리 서비스 등으로도 구분하여 필요로 하는 에너지저장 기술과 일부 에너지저장 기술의 조합과 비율을 결정하는 것도 필요할 것이다.^[6]

이에 따라 Fig. 5에서 보는 바와 같이, 각 기술에 대한 특성을 고려하여 각종 에너지저장 서비스 중에서 적절한 서비스에 활용하거나, 에너지저장 서비스를 정하면 이에 적합한 특성을 가지는 저장기술을 선정하는 방법이다. 이 과정에 한 개의 기술만 선정하는 것이 아니라, 필요에 따라 여러 저장 기술의 적절한 조합(Storage Mix)을 선정하거나 필요에 따라 수소, 열, 합성연료로 변환하는 Sector coupling 방법의 조합도 활용할 수 있을 것이다. 상세한 내용은 참고문헌 [6]에서 확인하기 바란다. 최적의 조합을 결정하는 방법에는 적용 분야에 대한 분석과 적용할 기술의 특성, 그리고 기술의 경제성 등을 복합적으로 고려해야 하는 다항 방정식 문제가 될 것이다. 향후 이러한 최적의 Storage Mix와 Sector Coupling 비율을 정하는 기술 개발도 필요할 것으로 보인다.

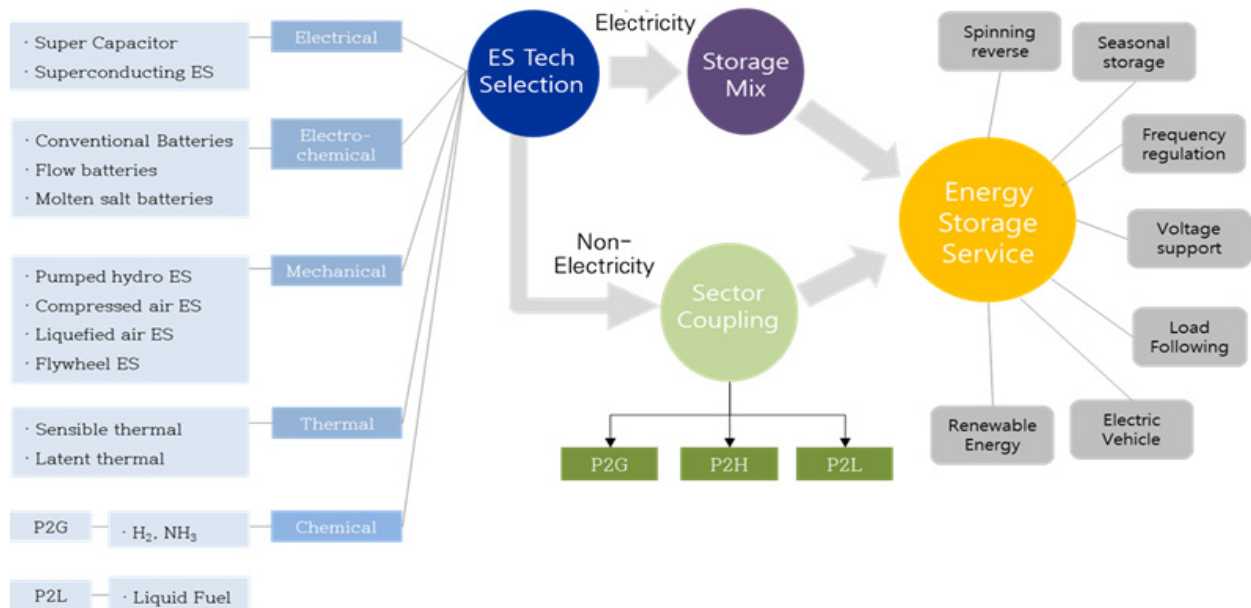


Fig. 5. An optimization analysis of ESS technologies for technical characteristics & required services, etc.^[6]

6. 결론

본 연구는 현재의 에너지 공급 시스템에서 각 전원 별 에너지 비중에 대해 2021~2024년까지 4년간의 전력 공급 data를 분석하였고, 2050년 탄소중립을 위한 주력 에너지원으로 원자력과 재생에너지가 될 것으로 분석, 제시하였다. 그리고 탄소중립을 위한 재생에너지 확대의 비중을 다섯 단계로 구분하여 발생할 수 있는 주요 이슈와 이에 대한 주요 대응 기술인 출력예측, 계통관성 및 유연성 자원 확보에 대해 알아보았다. 유연성 자원의 하나인 에너지저장장치에는 다양한 기술과 활용처가 있음을 조사하여 제시하였다.

다만 이번 고찰에는 기존 전력 운영 data에 기반하여 정성적으로 분석한 결과이기에 그 결과의 정확도에는 한계가 존재하는 바, 여러 영향 요인을 설정하고 data를 경험적 모델을 만들어 분석하게 된다면 좀더 정확도를 높일 수 있을 것으로 보인다. 또한 각 요인에 영향을 줄 것으로 예상되는 요일, 계절과 같은 시계열 요인과 온도, 날씨, 풍량 등 환경적 요인 등 분석 data를 추가적으로 활용하여 요인별 정량 분석을 수행한다면 좀 더 정교한 모형 개발과 결과 정확도를 더욱 향상할 수 있을 것으로 보인다. 또한 향후에는 Storage mix와 sector coupling을 포함하여, 경제성, 활용성, 적용성 등을 고려한 다양한 기술의 최적 활용 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 2025학년도 국립군산대학교 신입교수 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

This paper was supported by research funds of Kunsan National University.

References

- [1] IPCC, 2018, “Global Warming of 1.5°C”, IPCC Special Report, <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- [2] KPX (Korea Power Exchange), 2025, “Status of real-time electricity demand and supply”, Accessed 19 July 2023 & 24 November 2023, <https://www.kpx.or.kr/powerinfo/Submain.es?mid=a10404030000>.
- [3] KPX (Korea Power Exchange), 2025, “Power system operation performance”, Accessed 18 March 2025, <https://www.kpx.or.kr/board.es?mid=a10102000000&bid=0159>.
- [4] KPX (Korea Power Exchange), 2025, “Electricity Market Operation Rule”, Accessed 18 March 2025, <https://marketrule.kpx.or.kr/lmxsrv/main/main.do>.
- [5] IEA (International Energy Agency), 2019, “Status of Power System Transformation 2019”, Accessed 1 July 2022, <https://www.iea.org/reports/status-of-power-system-transformation-2019>.
- [6] Jegarl, S., Lee, J.H., Kim, H.S., Shin, J.S., and Lim, J.H., 2023, “Technology Selection Method for Optimal Energy Storage”, *New. Renew. Energy*, **19**(1), 31-40.