

2050 탄소중립 실현을 위한 원전/재생에너지 시나리오 분석 및 시사점

이종호

서울대 원자력정책센터

2024.05.09 (목)

* 2024년 춘계원자력학회 공동워크숍

CONTENTS

탄소중립과 원전/재생에너지

- 주요국의 탄소중립 현황

우리나라 탄소중립계획

- 2050 탄소중립 시나리오
- 제10차 전력수급기본계획

2050 탄소중립 시나리오 분석

- 양수설비 민감도 분석
- 원전 부하추종 민감도 분석

안정적 전력공급을 위한 시사점

-

맺음말

탄소중립과 원전/재생에너지

탄소 중립을 향한 전 지구적 노력

2015. 12. COP21, 세기내 지구온도 상승률 2도 이내로 하는 파리협정 체결

- 2022년 기준으로 지난 10년간 변동성 재생에너지 (풍력, 태양광) : 5.8배 증가(356.9GW → 2,076.4GW)
- 2030년까지의 전망을 살펴보아도 현재의 태양광, 풍력 설비량의 4배 정도 증가 예상

2021. 11. COP26, 중간목표로 국가온실가스감축목표(NDC) 발표

- 우리나라 2030년까지 2018년 대비 40%를 감축하는 국가온실가스감축목표(NDC) 발표

세제지원, 원전건설 확대 등 다시 세계는 원전을 탄소중립의 중요한 수단으로 활용

- 유럽은 2022. 7월, 녹색분류체계(Green Taxonomy)에 원자력을 포함
- 미국은 인플레이션 감축법을 제정하여 대형원전, SMR 등 원전에 대한 세제 혜택

2023. 12. COP28, 에너지 확보, 재생에너지의 변동성 등으로 주요국가 원전 확대 정책 선언

- 2023. 12. : COP28에서 22개국은 '50년까지 원자력발전 용량을 현재의 3배로 확대하는 목표 선언

2024. 4. G7 국가, 2035년부터 탄소포집되지 않은 석탄 발전 전면 금지 합의 등 에너지 전환 가속화

국가별로 다양한 형태로 탄소중립 이행

표. 2022년 기준 발전원별 및 무탄소 전원 비중

- 각국은 자기 나라의 부존자원을 활용
- 수력이 풍부한 국가가 상대적으로 용이
- 스위스는 풍력 자원을 활용하지 않음
- 한국을 제외하고 태양광 발전이 최고 비중을 차지하는 나라는 없음
- 원전 비중이 큰 나라가 탄소중립 근접
- 우리나라의 재생에너지 비중은 OECD 국가 중 최 하위권 ⇒ ?

국가	원자력	재생에너지					무탄소전원
		풍력	태양광	수력	기타	소계	
스위스	37.1	0.2	5.7	52.0	4.3	62.2	99.3
핀란드	35.1	16.7	0.5	18.7	18.5 (16.5:바이오)	54.9	89.5
프랑스	62.0	8.0	4.3	10.7	4.0	27.0	89.0
덴마크	0.0	54.0	6.3	0	23.2 (17.9:바이오)	83.5	83.5
영국	14.7	24.7	4.3	2.3	12.5	43.8	58.5
독일	5.9	21.3	10.3	4.0	9.7	44.9	50.8
이태리	0.0	7.2	9.8	10.5	9.2	36.7	36.7
한국	27.6	0.5	4.5	1.1	2.8	8.9	36.5

출처 : OECD IEA, "OECD Energy prices and taxes", 2023.6 중 일부 인용

OECD 주요국가의 전력요금

- 무탄소전원(원전,수력)이 풍부한 나라(프랑스,핀란드, 스위스)가 상대적으로 전력요금 저렴
 - 에너지전환에 따른 비용 증가도 낮음
- 변동성 재생에너지가 주력이 국가의 전력 요금은 상대적으로 높음 (덴마크, 스페인, 독일, 이태리, 영국)

그림 주요국 주택용 전기요금 (\$/MWh)

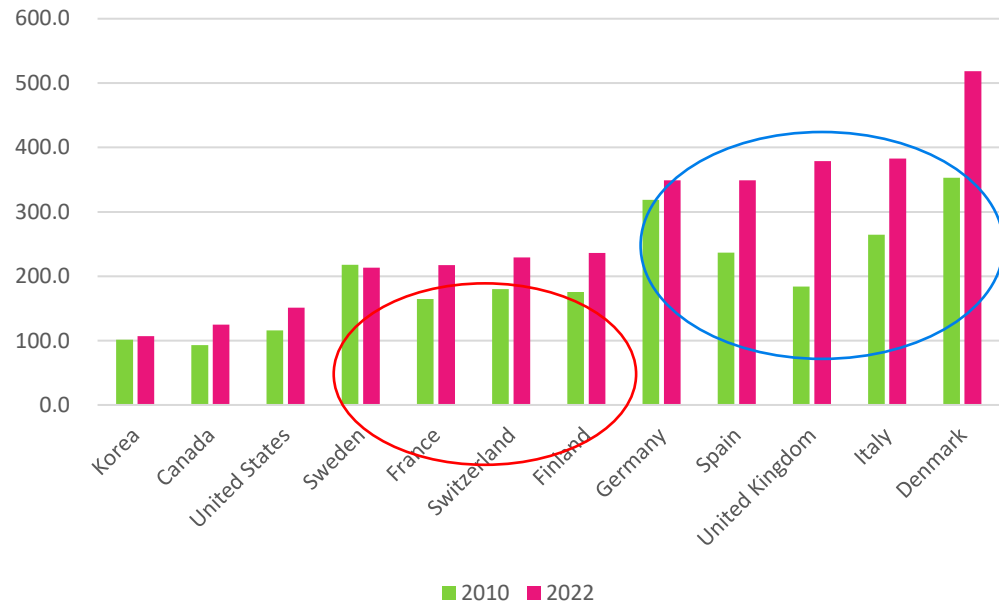
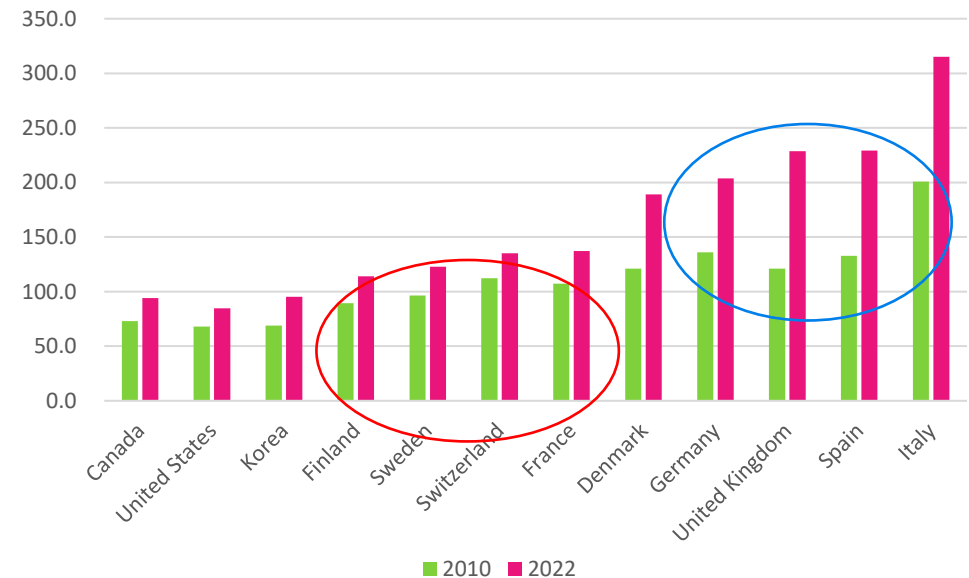


그림. 주요국 산업용 전기요금 (\$/MWh)

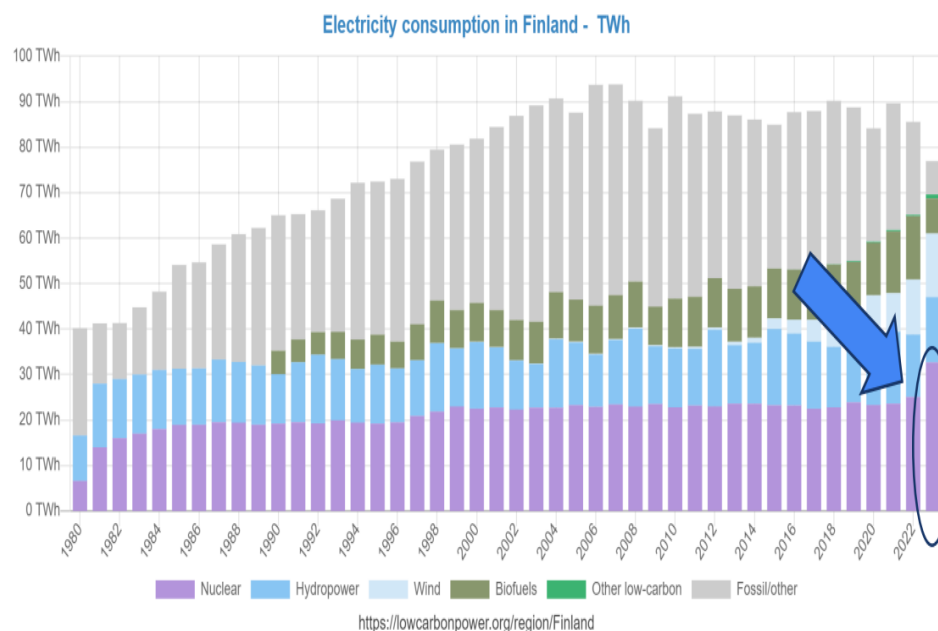


출처 : OECD IEA, "OECD Energy prices and taxes", 2023.6 중 일부 인용

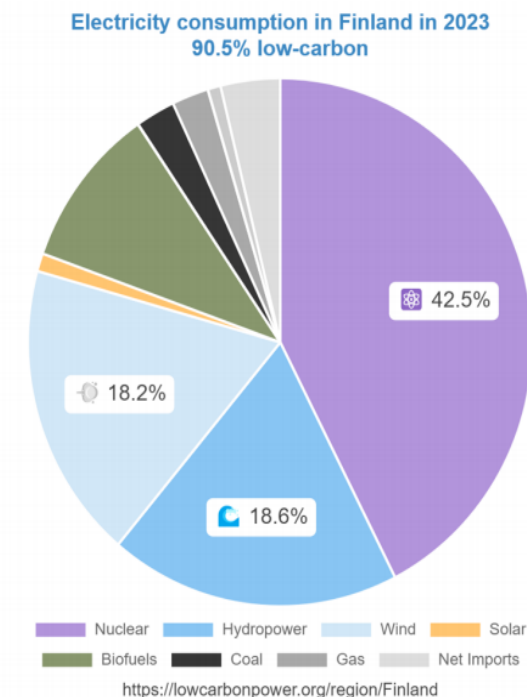
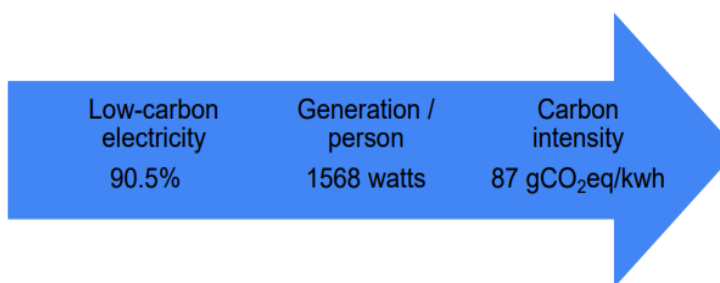
참고 : 90% 이상의 탄소중립을 달성한 핀란드

- 화석연료를 원전과 풍력 발전으로 대체하여 탄소중립(91%)에 근접

Electricity consumption in Finland



Electricity in Finland (2)



우리나라 2050 탄소중립 계획

● 2050년 수요 전망

- 산업, 수송, 건물 등 부문별로 전력화(화석연료 → 전기로 대체)가 진행되면서
전체 전력수요는 2018년(526.1 TWh) 대비 221.7% ~ 230.7%로 대폭 증가
- 2050년 전력수요는 1,166.5 ~ 1,213.7 TWh 전망

구분	산업	수송	건물	농축수산	수소생산	CCUS	DAC	합계
A안	503.6	71.3	277.1	25.1	235.3	101.3	-	1,213.7
B안		70.2			129.0	155.6	5.9	1,166.5

● 2050년 발전량 시나리오

- 발전소 내 소비 및 송·배전 손실(3.5%) 등을 고려하여 1,208.8 ~ 1,257.7 TWh 필요

구분	원자력	석탄	LNG	재생에너지	연료전지	동북아그리드	무탄소가스터빈	부생가스	합계
A안	76.9 (6.1%)	0.0 (0.0%)	0.0 (0.0%)	889.8 (70.8%)	17.1 (1.4%)	0.0 (0.0%)	270.0 (21.5%)	3.9 (0.3%)	1,257.7 (100.0%)
B안	86.9 (7.2%)	0.0 (0.0%)	61.0 (5.0%)	736.0 (60.9%)	121.4 (10.1%)	33.1 (2.7%)	166.5 (13.8%)	3.9 (0.3%)	1,208.8 (100.0%)

제 10차 전력수급 기본계획

● 목표 최대수요 증가 : 19.2 GW(98.8 → 118.0)

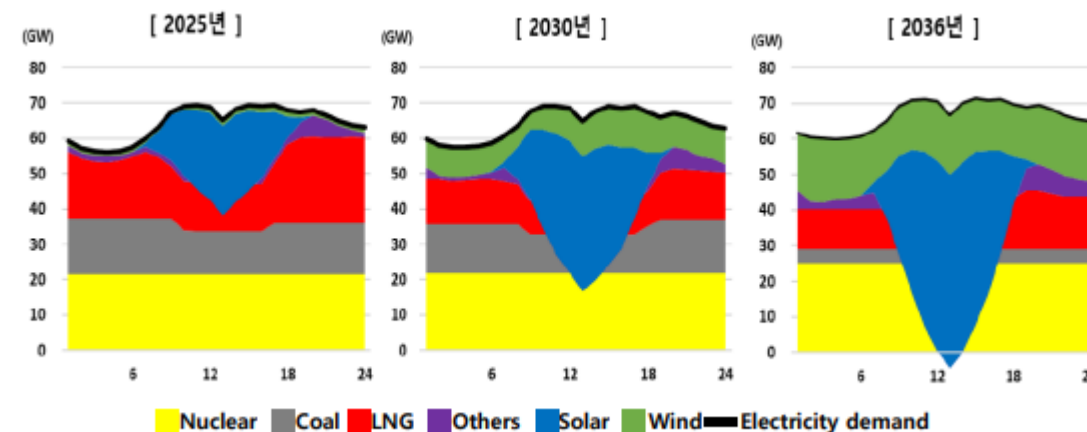
● 전력설비 증가 : 총 90.6GW(원전 : 31.7GW, 재생에너지 : 108.3GW)

< 연도별 전원구성(연말 정격용량 기준) 전망 (단위 : GW) >

연도	구분	원자력	석탄	LNG	신재생	양수	기타	계
2023	용량	26.1	40.2	43.5	32.8	4.7	1.1	148.4
	비중	17.5%	27.1%	29.3%	22.1%	3.2%	0.8%	100%
2026	용량	28.9	37.6	52.4	44.8	4.7	0.7	169.1
	비중	17.1%	22.2%	31.0%	26.5%	2.8%	0.4%	100%
2030	용량	28.9	31.7	58.6	72.7	5.2	0.9	198.0
	비중	14.6%	16.0%	29.6%	36.7%	2.6%	0.5%	100%
2033	용량	31.7	29.7	62.0	91.5	5.8	0.9	221.6
	비중	14.3%	13.4%	28.0%	41.3%	2.6%	0.4%	100%
2036	용량	31.7	27.1	64.6	108.3	6.5	0.8	239.0
	비중	13.2%	11.3%	27.0%	45.3%	2.7%	0.5%	100%

< 전원별 발전량 및 비중 전망 (단위 : TWh) >

연도	구분	원자력	석탄	LNG	신재생*	수소 암모니아	기타	계
'30년	발전량	201.7	122.5	142.4	134.1	13.0	8.1	621.8
	비중	32.4%	19.7%	22.9%	21.6%	2.1%	1.3%	100%
'36년	발전량	230.7	95.9	62.3	204.4	47.4	26.6	667.3
	비중	34.6%	14.4%	9.3%	30.6%	7.1%	4.0%	100%

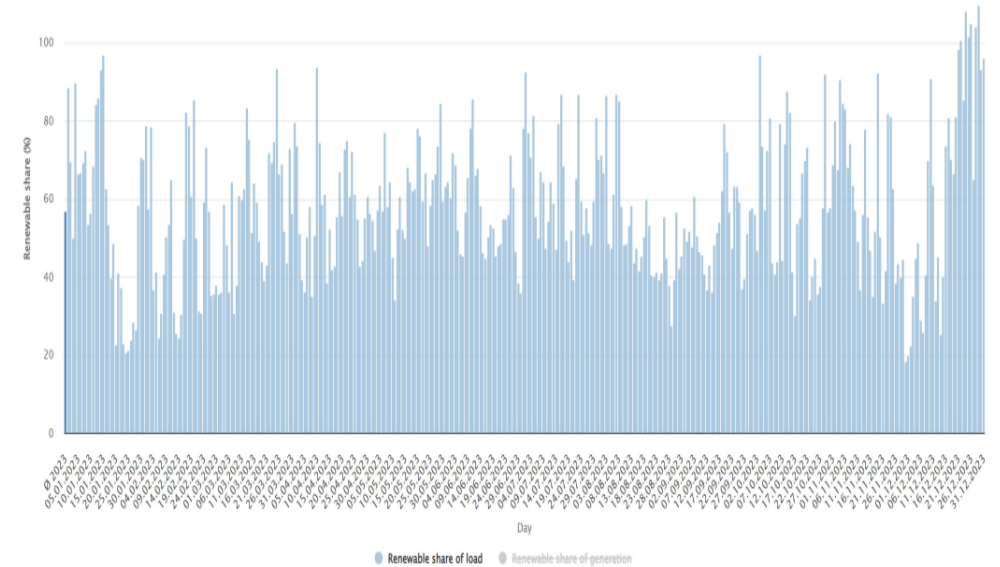


Source : Korea Electric Power Corporation Power Economy Forum - KPX

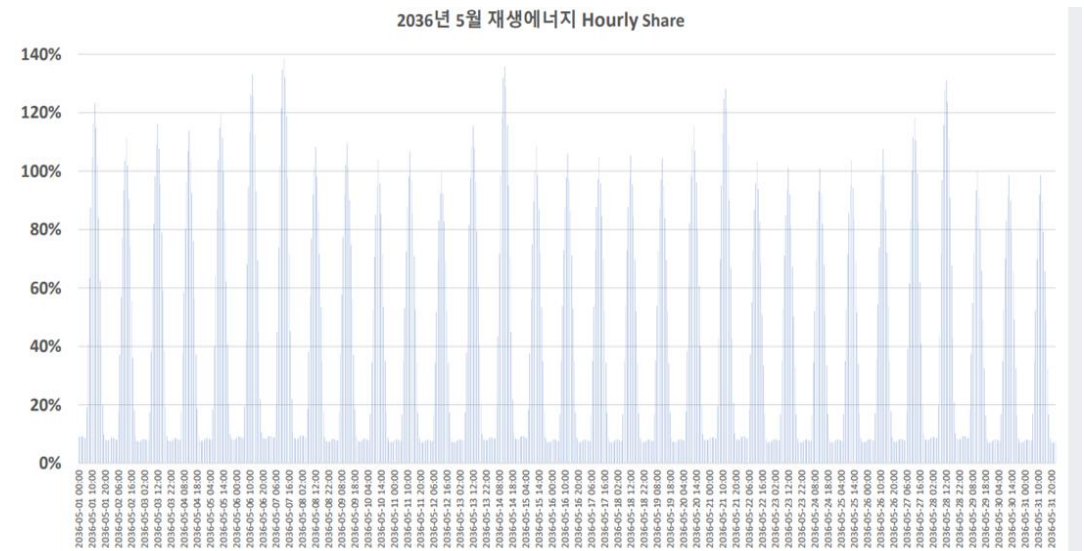
참고 : 2023년 독일과 2036년 한국의 예상 전력수급 비교

- 2023년 독일과 2036년 한국의 전력수급 비교
 - 태양광 비중 : 한국이 독일의 1.5배
 - 가변적 재생에너지 : 한국과 독일이 비슷
- 독일 2023년 재생에너지 일일 비중이 100% 이상 발생
- 한국도 봄철(5월) 재생에너지 시간비중은 거의 100% 이상

Daily share of renewable energies in the load
Year 2023

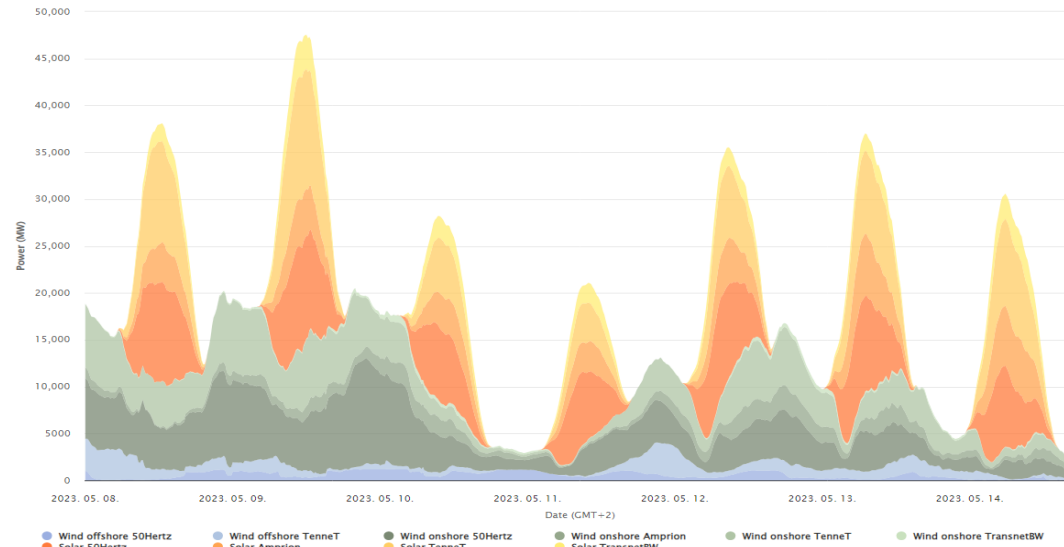


국가		원자력	재생에너지				화석 에너지	총계
			태양광	풍력	기타	소계		
한국 (2036)	발전량 (TWh)	230.7	122.6	81.8	26.6	231.0	158.2	667.3
	비중(%)	34.6	18.4	12.2	4.0	34.6	23.7	100
독일 (2023)	발전량 (TWh)	6.7	59.9	139.8	63.1	262.8	193.3	462.8
	비중(%)	1.4	12.9	30.2	13.6	56.8	41.8	100



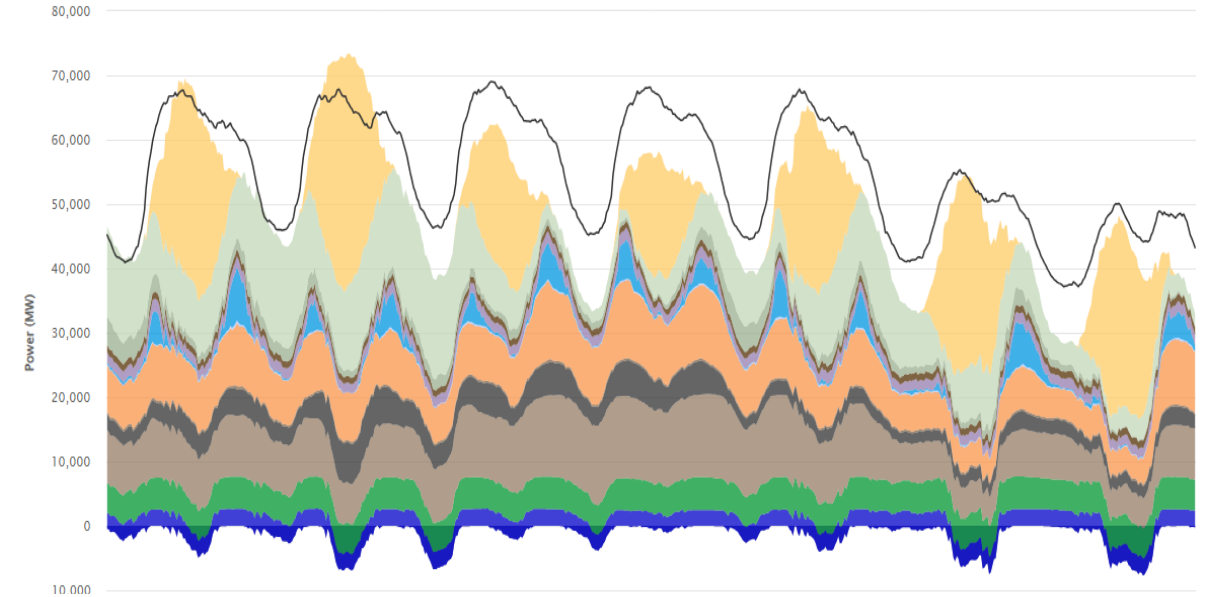
참고 : 2023년 독일의 전력계통 운영현황 <https://www.energy-charts.info>

Public net electricity generation in Germany in week 19 2023



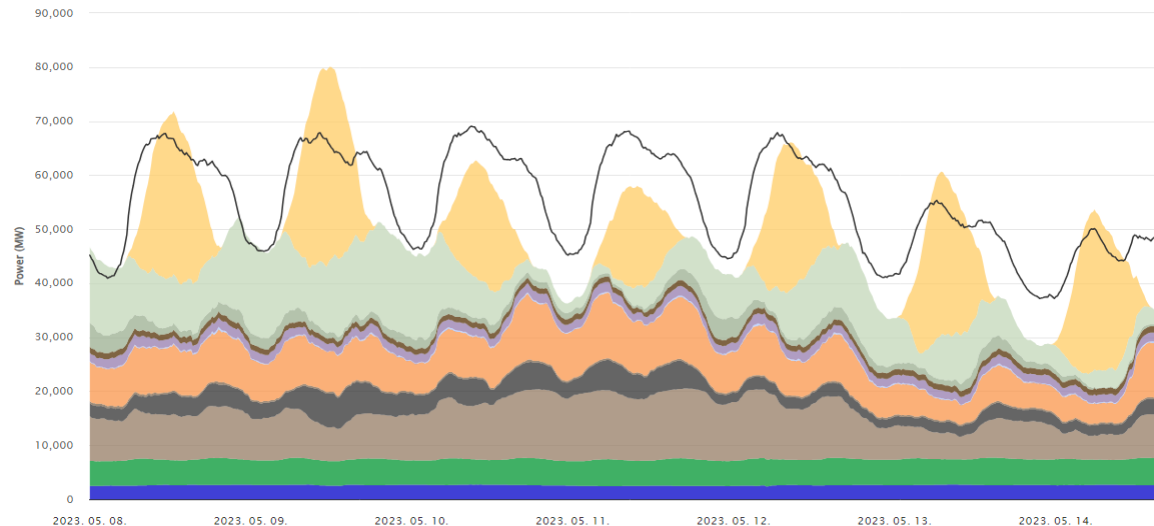
Total net electricity generation in Germany in week 19 2023

Energetically corrected values



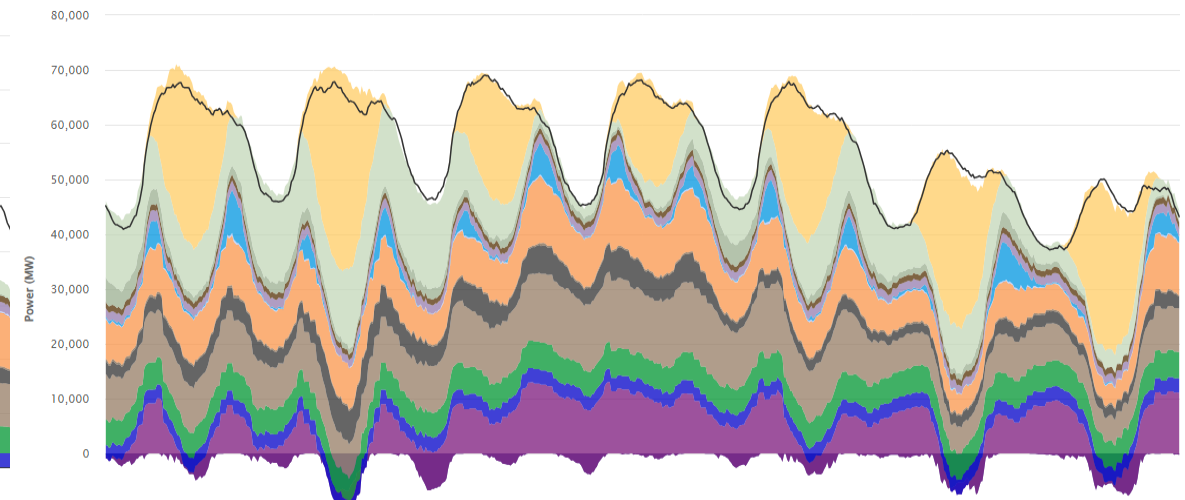
Total net electricity generation in Germany in week 19 2023

Energetically corrected values



Total net electricity generation in Germany in week 19 2023

Energetically corrected values



원전/재생에너지 시나리오 분석

탄소중립 시대의 전원믹스 방법론

- 기존의 에너지 믹스는 LDC (Long Duration Curve)를 활용하여 산정함.
- 그러나 신·재생에너지 설비 증가로 인해, 미래의 전력 계통은 신재생의 간헐성과 경직성으로 LDC를 기반으로 모사 불가능

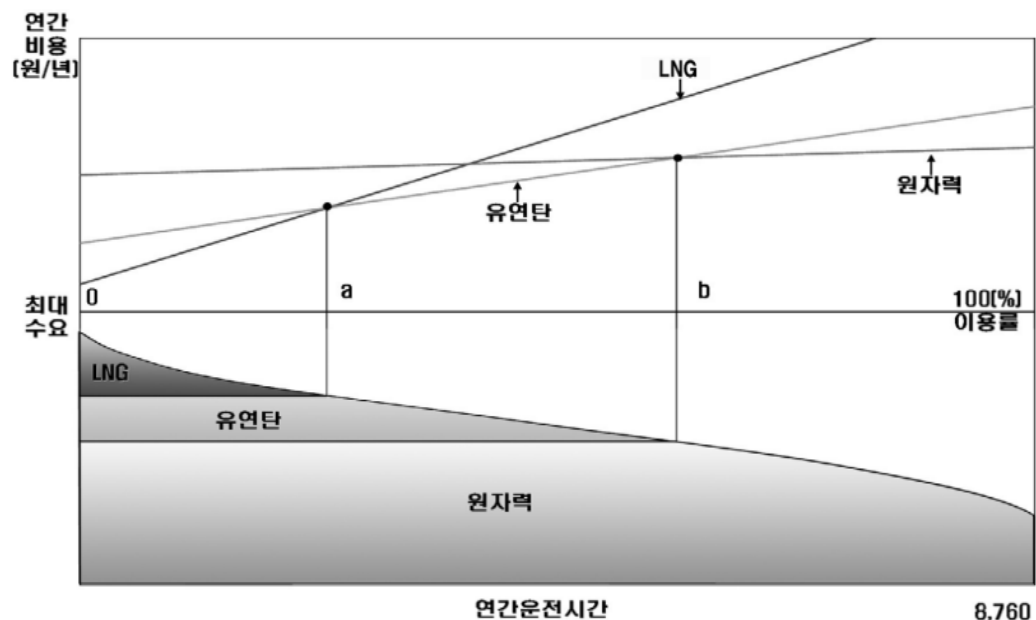


그림. 기존 Screening Curve 방법론

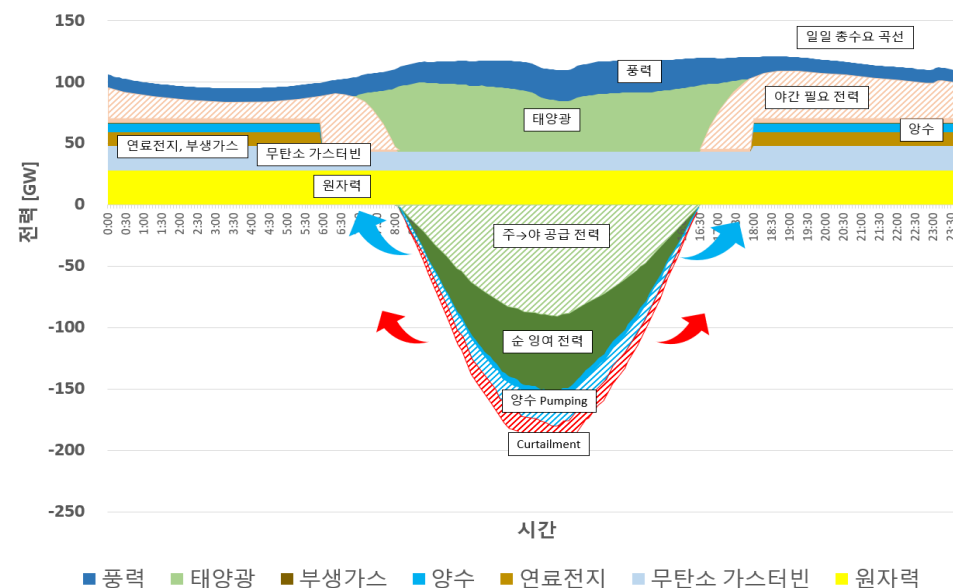


그림. Duck Curve가 음의 수요인 경우 발생

주간 평균 전력수요-공급모형 개발

- 각 계절별 주간 평균 전력 수요 공급 모형
 - 시나리오별 발전 구성비 입력
 - 주야간, 주말-주중 발전량 차이를 보완하는 ESS량 계산
 - 발전설비 운전 방식 입력
 - 원자력 : 기저 및 계획 부하추종
 - 무탄소 가스터빈 : 주야간, 주중-주말 차등 운전
 - 양수 : 주야간 수요 급변 대처
- ⇒ 배터리(ESS) 필요량 계산

그림. 2050년 계절별 총수요 패턴

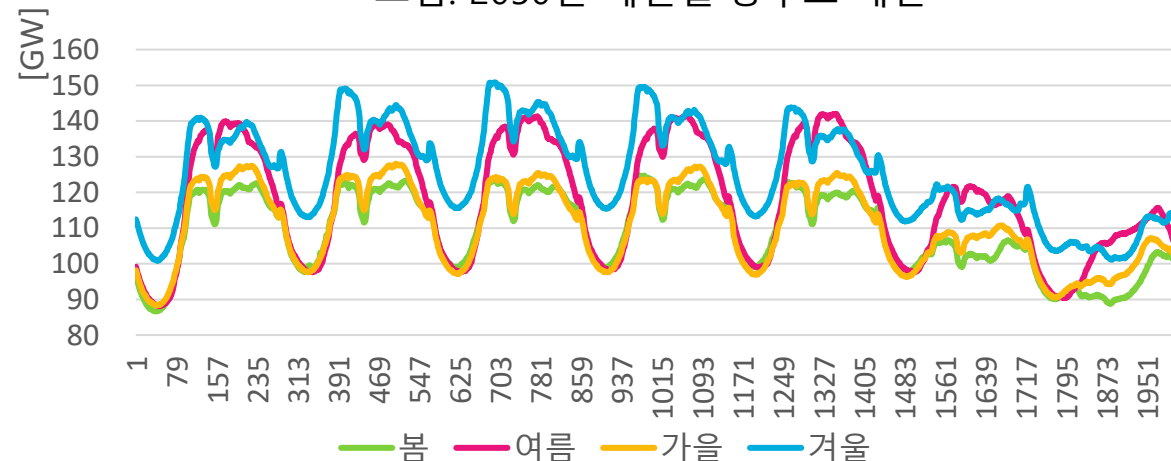
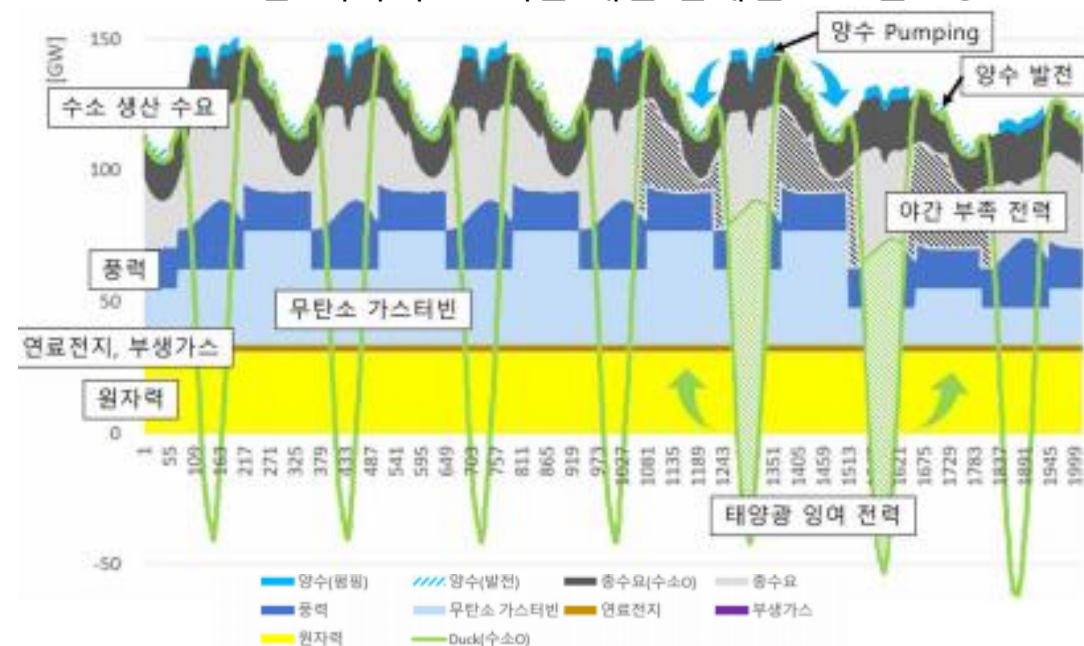


그림. 시나리오 3기준 개발 단계별 ESS 필요량

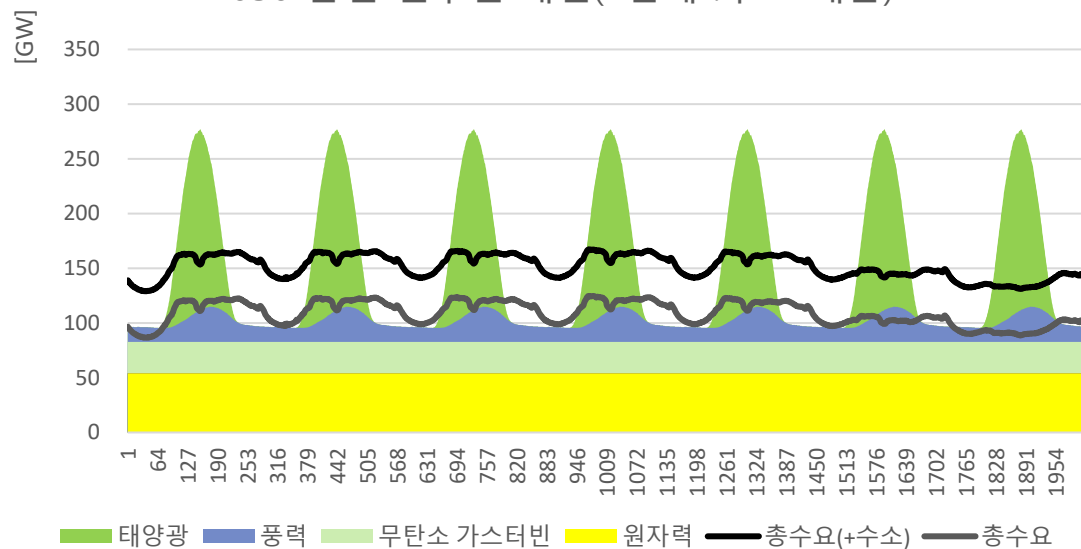


* NET, 2024.3., "Electricity mix scenarios simulation for Korean carbon neutrality in 2050", 주필현, 최성렬, 이종호

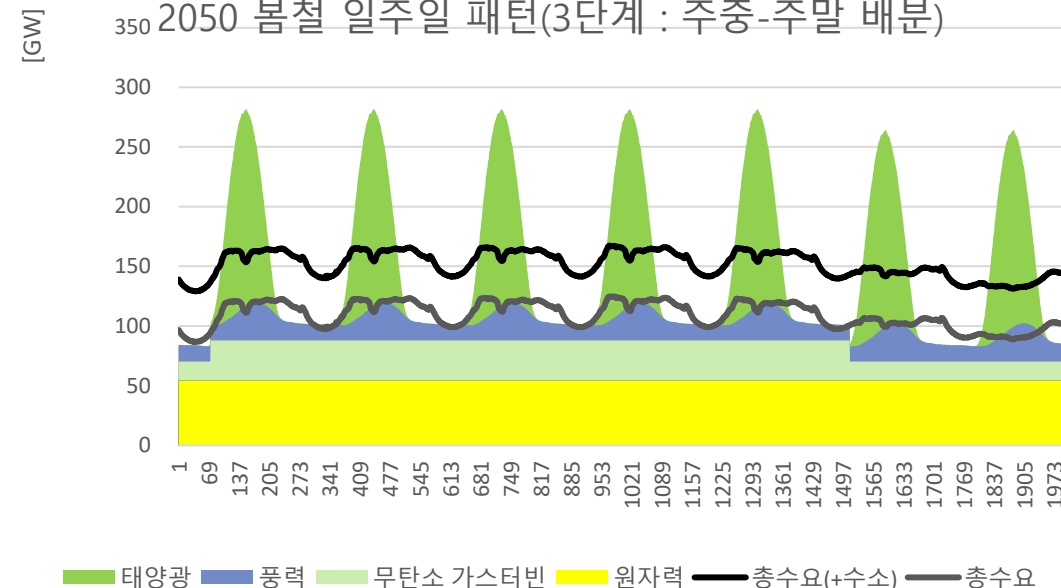
• 서울대 원자력정책센터, 2023.10., "CF100 이행을 위한 원전의 역할과 정책분석 : 부록, 2050 탄소중립 달성을 위한 바람직한 원전/재생에너지 구성비 연구", 이종호, 주필현.

무탄소가스터빈 발전전략 고려

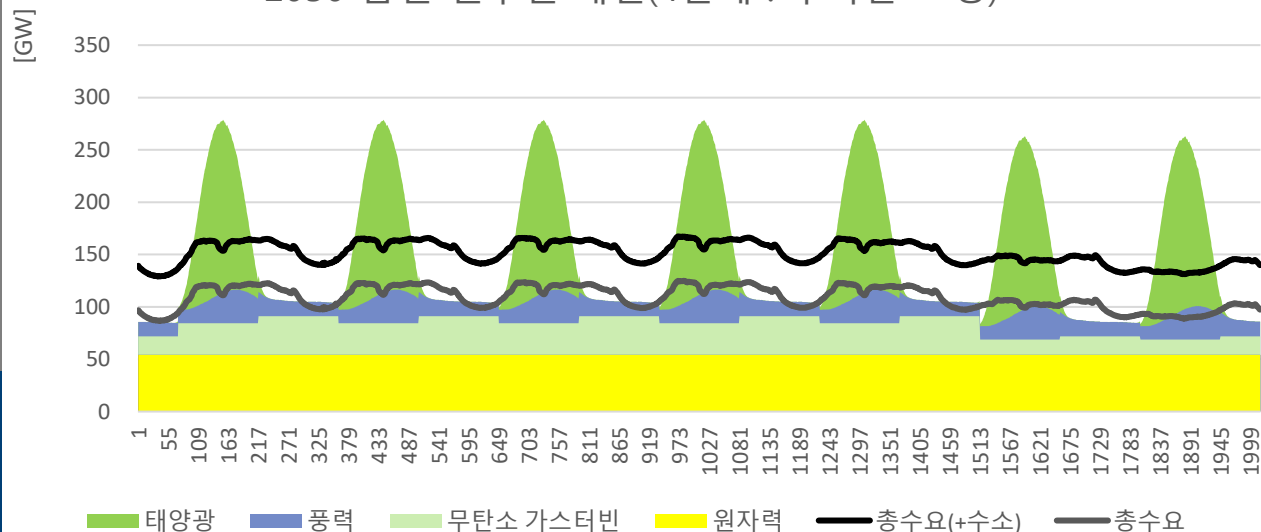
2050 봄철 일주일 패턴(2단계 : 수소 배분)



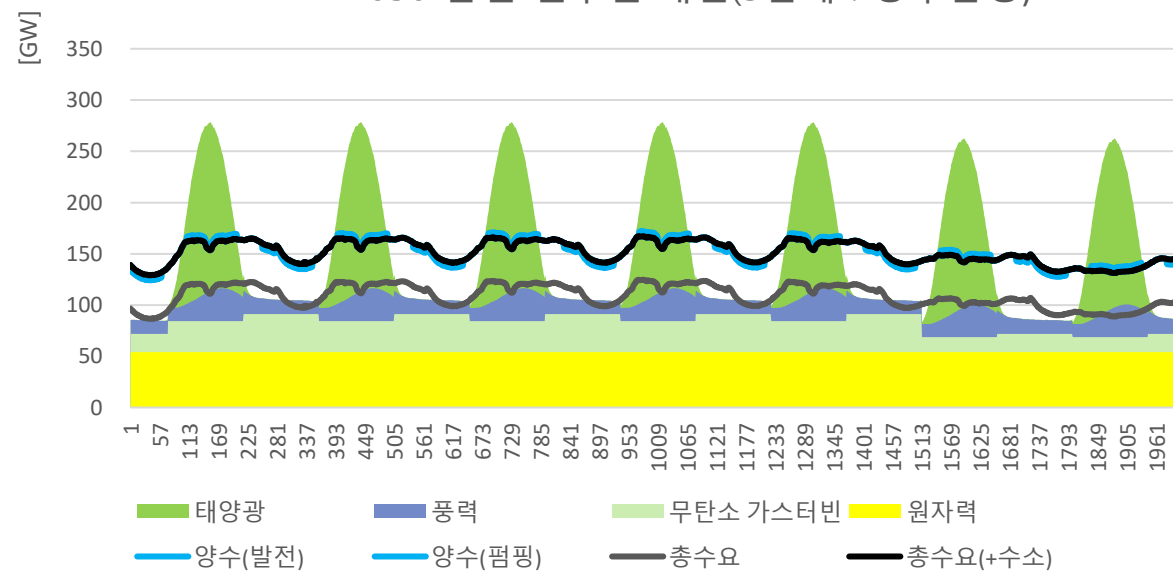
2050 봄철 일주일 패턴(3단계 : 주중-주말 배분)



2050 봄철 일주일 패턴(4단계 : 주야간 조정)



2050 봄철 일주일 패턴(5단계 : 양수반영)



원전 부하추종 고려 및 단계별 ESS 필요량

2050 봄철 일주일 패턴(6단계 : 원전 부하추종)

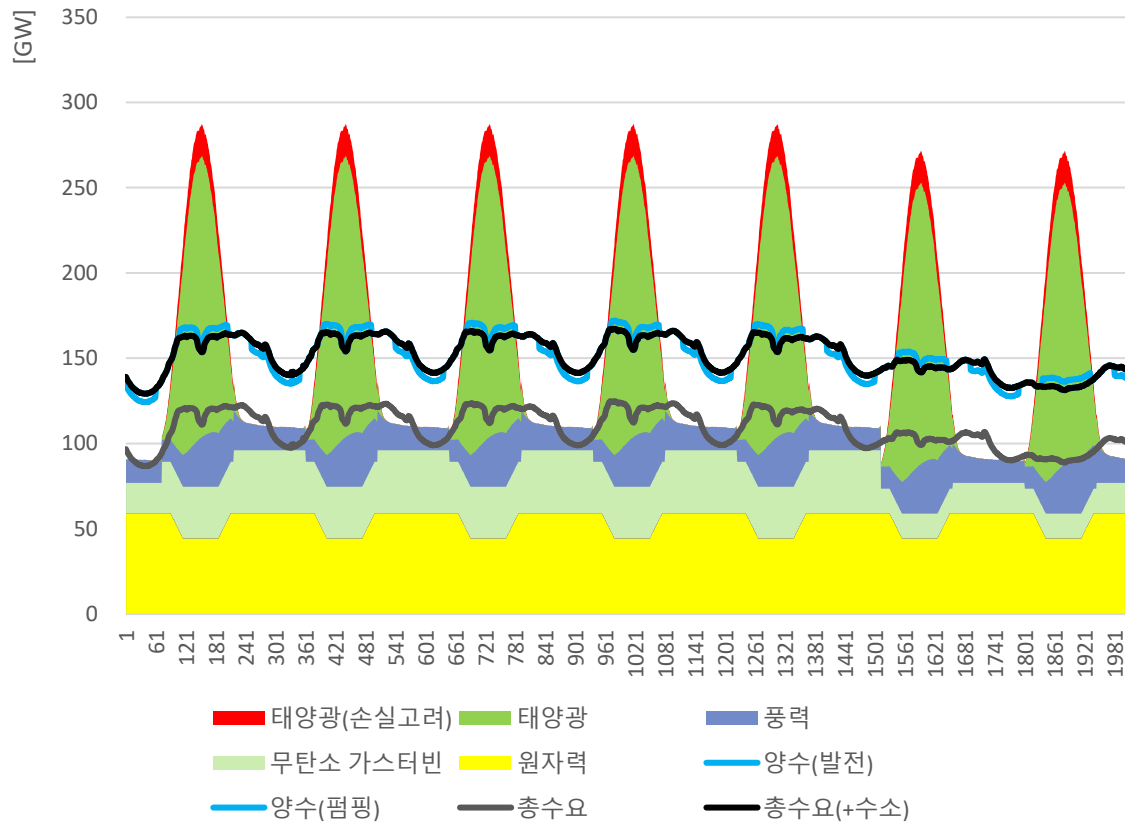


그림. 시나리오 3기준 봄철 잉여-부족 전력 추이

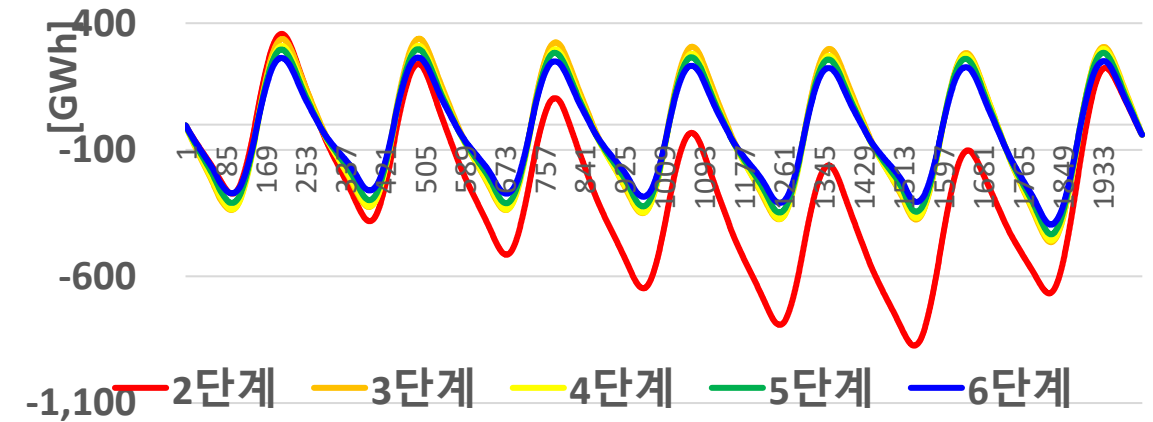
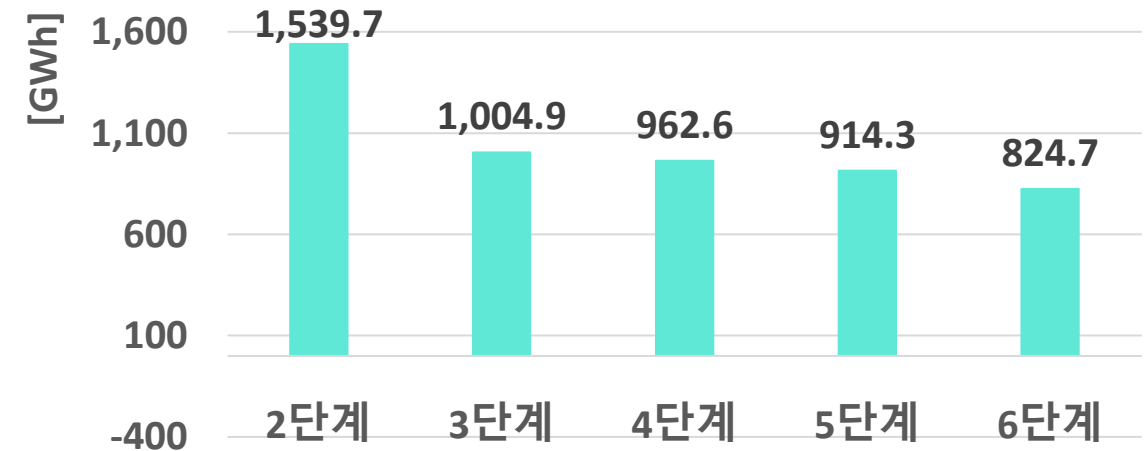


그림. 시나리오 3기준 개발 단계별 ESS 필요량



원전/재생에너지 시나리오

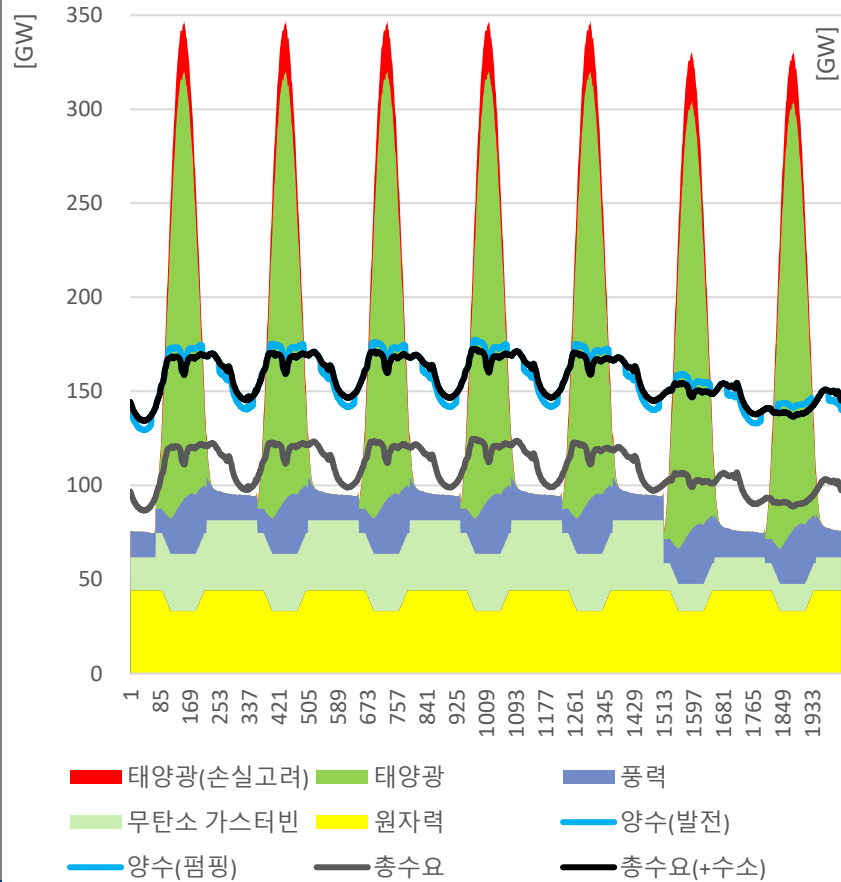
- 계산 편이를 위해 원자력과 변동성 재생에너지 및 무탄소가스터빈으로 단순화
- 풍력 국내 최대 잠재발전량(2020에너지백서)을 최대치로 함
- 원자력, 재생에너지 각각을 30~50%로 변동, 무탄소가스터빈은 20%로 고정

표. 시나리오 별 발전량 및 발전량 비중(단위 : TWh(%))

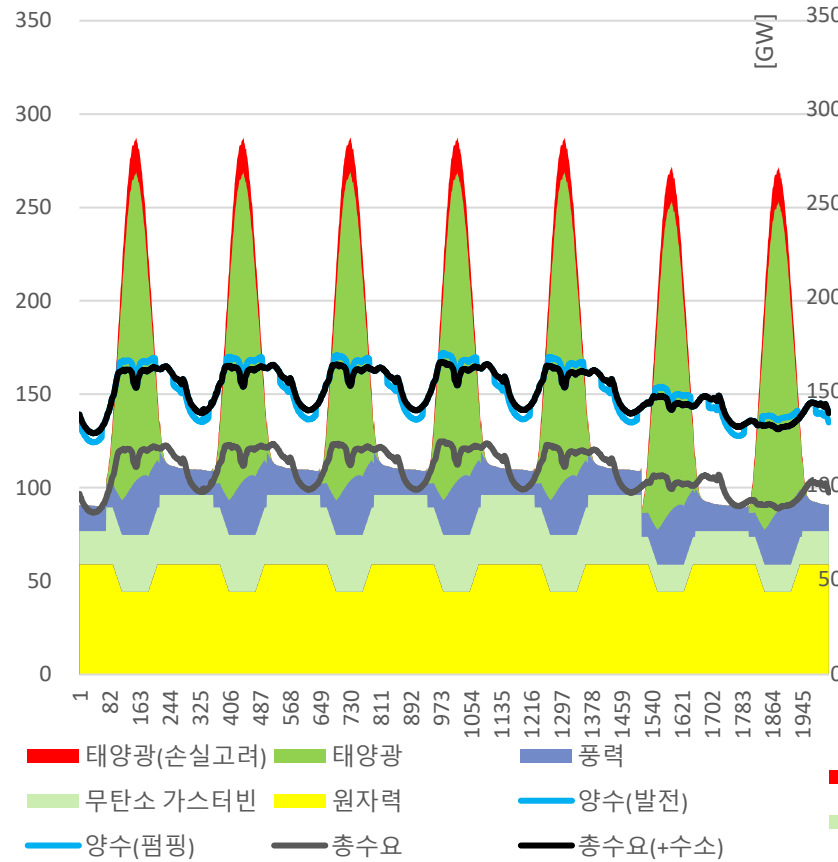
시나리오 (원전/재생)	원자력	재생에너지			무탄소 가스터빈	총 발전량
		태양광	풍력	소계		
1(30/50)	377.3(30)	457.9	171.0	628.9(50)	251.5(20)	1,257.7(100)
2(35/45)	440.2(35)	395.0	171.0	566.0(45)	251.5(20)	1,257.7(100)
3(40/40)	503.1(40)	332.1	171.0	503.1(40)	251.5(20)	1,257.7(100)
4(45/35)	566.0(45)	269.2	171.0	440.2(35)	251.5(20)	1,257.7(100)
5(50/30)	628.9(50)	226.4	150.9	377.3(30)	251.5(20)	1,257.7(100)

봄철 기준 시나리오별 수급패턴

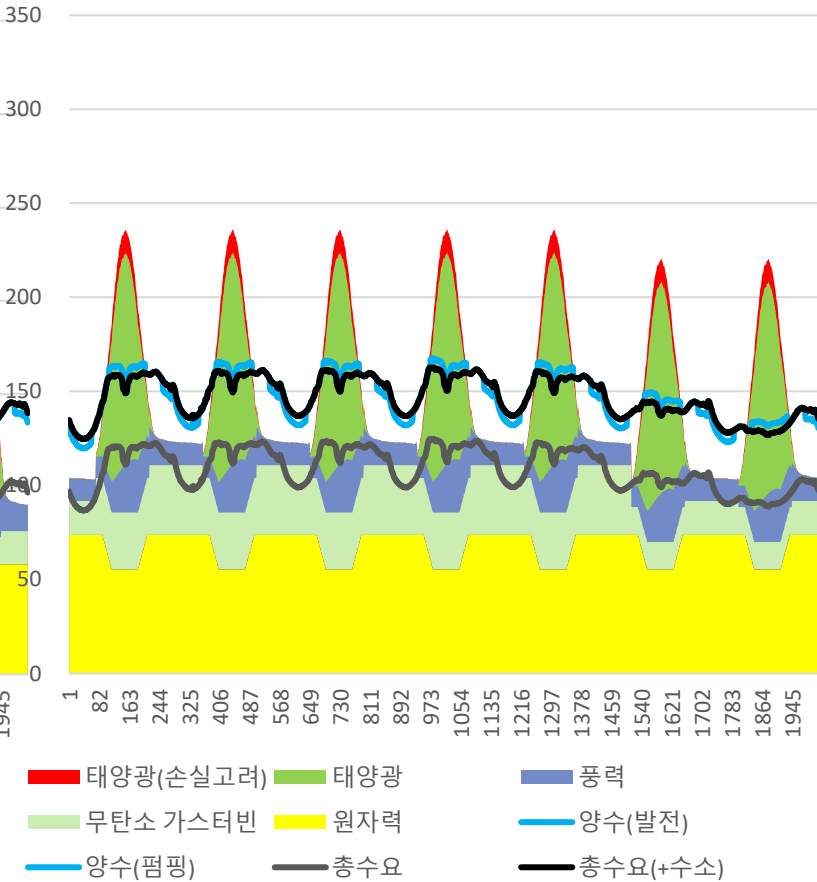
시나리오 1: 2050 봄철 일주일 패턴



시나리오 3: 2050 봄철 일주일 패턴



시나리오 5: 2050 봄철 일주일 패턴



시나리오별 원자력-재생에너지 설비필요량 및 투자비

- 원전 비중을 30% → 50% 증가 : 총설비는 물론 필요 ESS량 대폭 감소
- 원전 비중을 30% → 50% 증가 : 투자비는 약 680조 절감
- 배터리(ESS) 필요량이 비용에 가장 영향

그림. 시나리오별 설비량 및 배터리 필요량

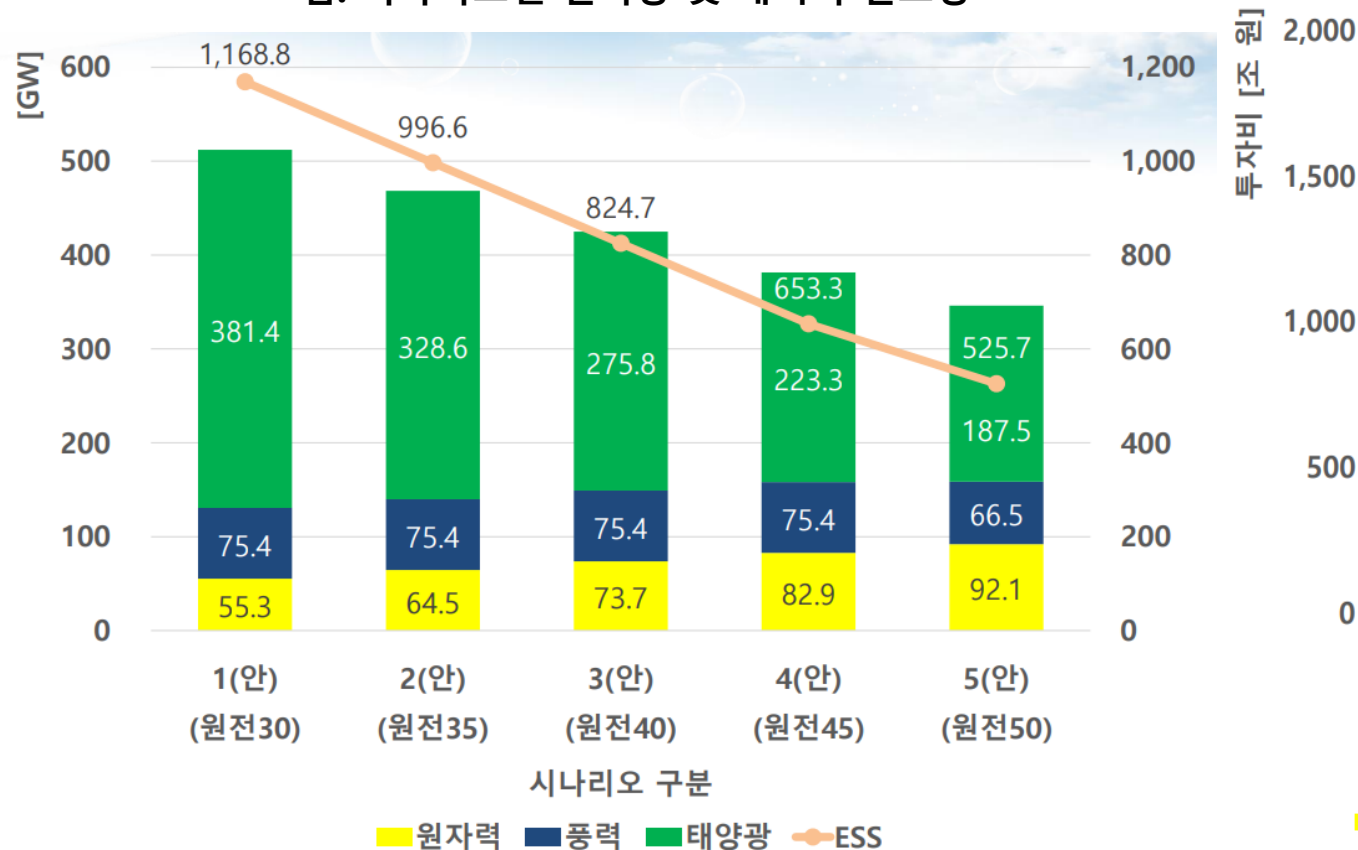
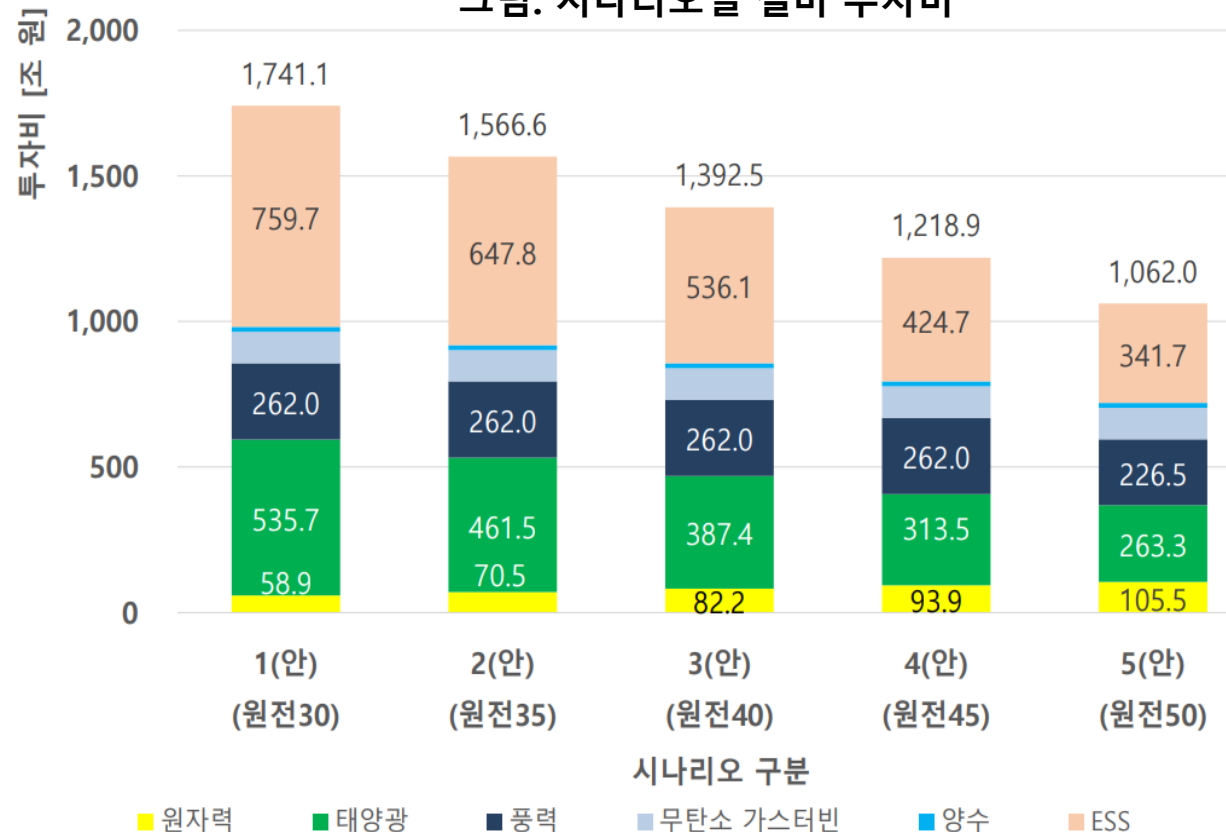
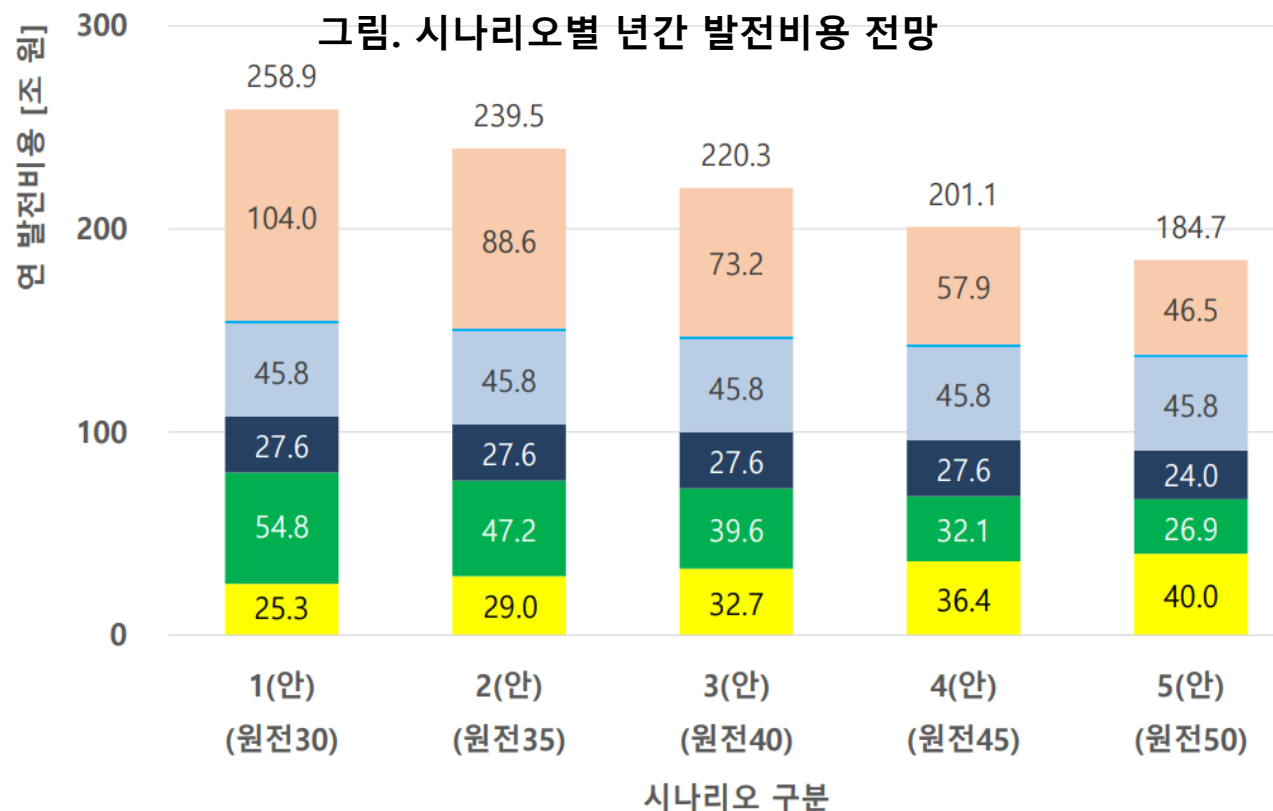


그림. 시나리오별 설비 투자비

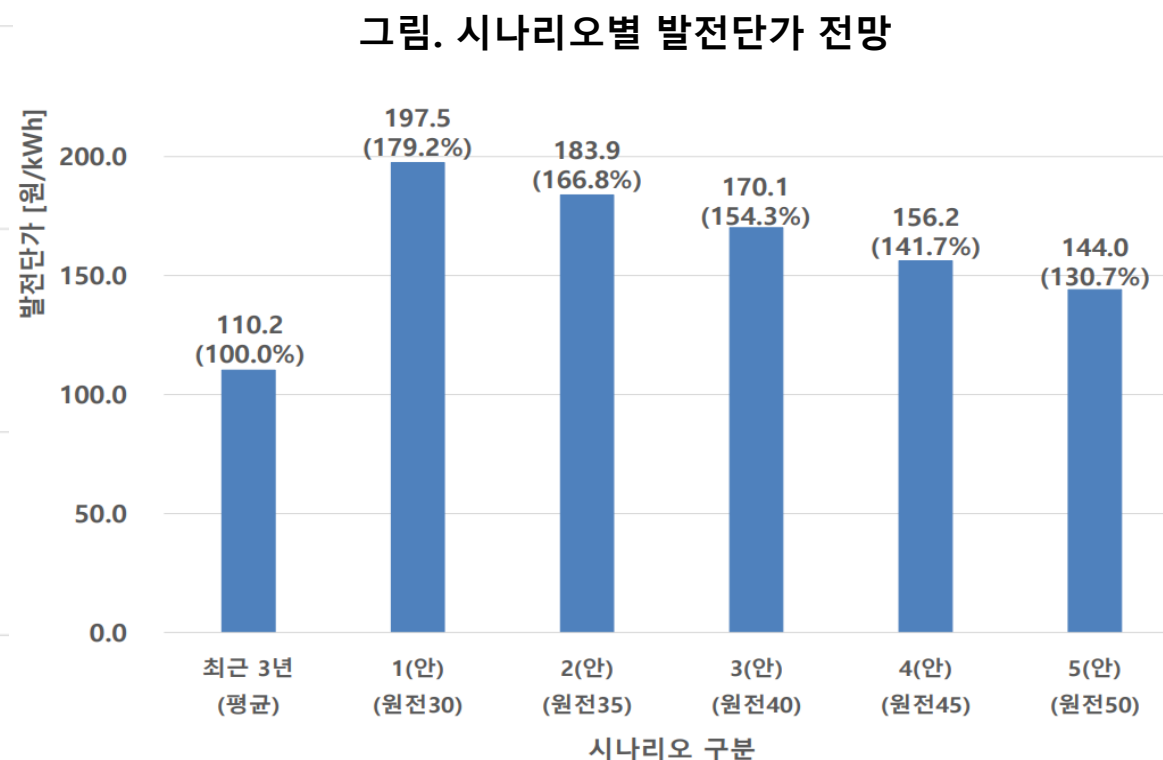


시나리오별 연간 발전비용 및 발전단가

- 원전 비중을 30% → 50% 증가 : 연간 발전비용 74.2조 절감
- 원전 비중을 30% → 50% 증가 : 발전단가는 kWh 당 53.5원 절감
- 원전비중을 50%로 할 시 전력요금 30% 인상만으로 탄소중립 달성



■ 원자력 ■ 태양광 ■ 풍력 ■ 무탄소 가스터빈 ■ 양수 ■ ESS



양수발전 설비량에 따른 민감도 분석

- 양수설비를 증가시키면 배터리 필요량이 감소하나 비용효과는 크지 않음
- 양수설비는 부지확보 문제로 설비증설에 한계

그림. 양수설비량 변화에 따른 배터리 필요량

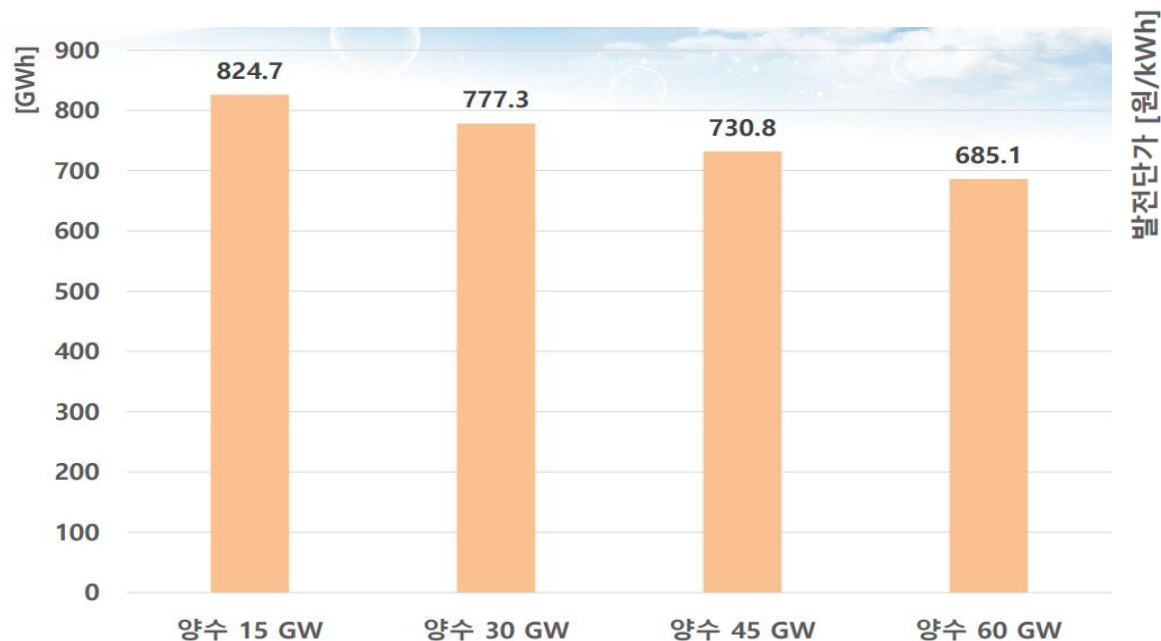
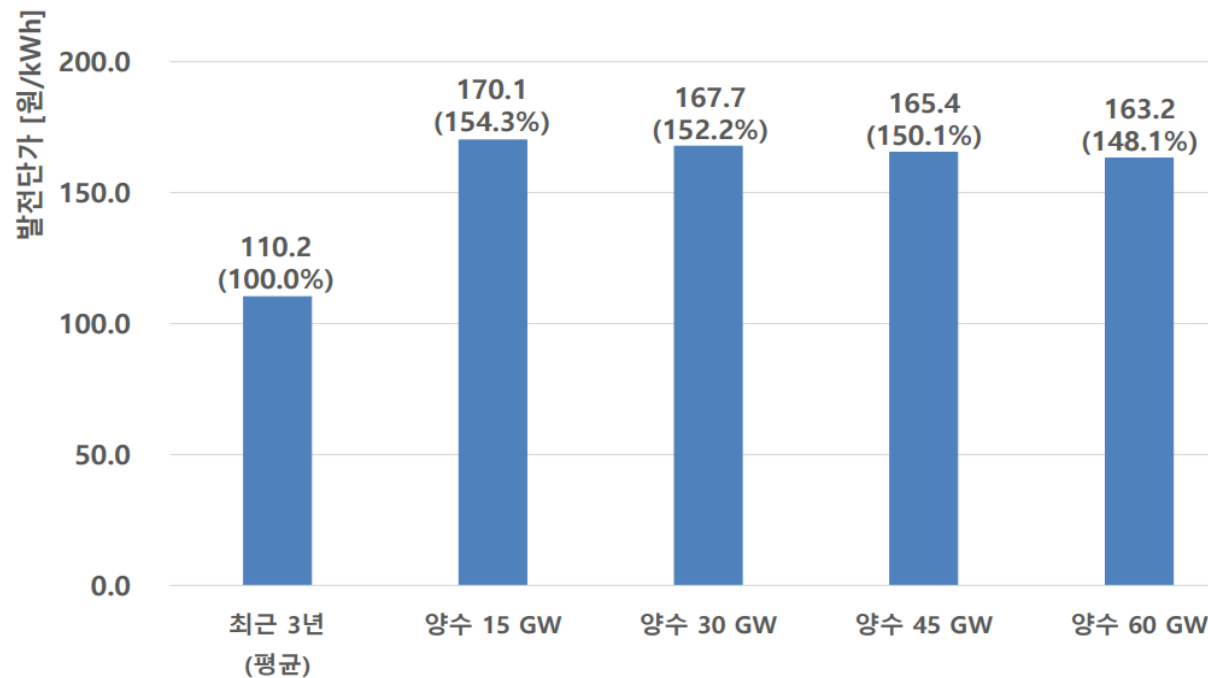


그림. 양수설비량 변화에 발전단가 전망



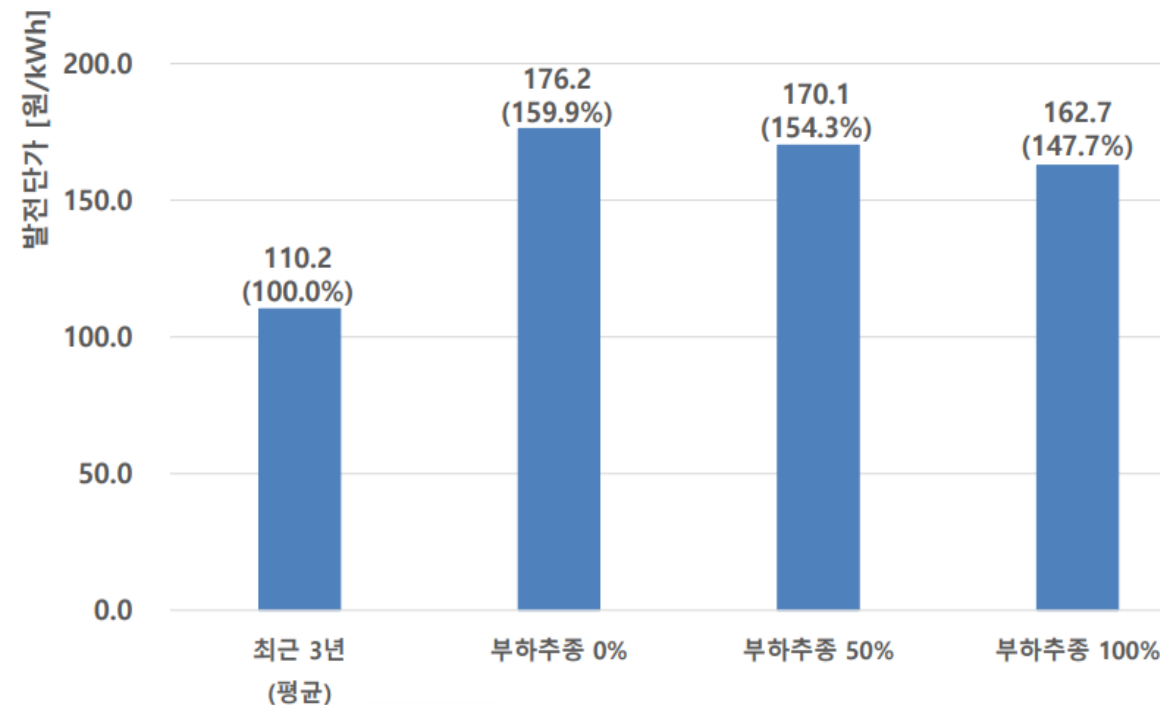
원전 부하추종에 따른 민감도 분석

- 시나리오 3를 기준으로 원전 총 발전량은 고정, 부하 추종에 따른 설비량은 변화
- 원전 부하추종 : 2-6-2 시간 으로 50% 부하추종을 적용하는 비율에 따라 민감도 분석
- 원전 부하추종의 효과는 양수발전에 비해 효과가 큼

그림. 원전부하추종에 따른 배터리 필요량



그림. 원전부하추종에 따른 발전단가 전망



- 원전/재생에너지 적정믹스는 경제성, 에너지 안보, 부지, 수용성 등 다양한 변수를 고려해야 함
 - 조화로운 원전/재생에너지 비중을 통한 탄소중립을 위해 보다 활발한 연구 필요
- 안정적 무탄소 전원인 원전이 증가시키면 안정적이고 경제적인 계통 운영 가능
 - 재생에너지 변동성 영향 감소로 배터리 필요량 감소
- 그러나 원전을 50% 이상으로 할 경우 계통운영에 부담
 - 야간에 원전에 의한 공급 과잉 발생
- 수소생산과 발전은 향후 중요한 전력수급 안정화 수단으로 전망
 - 재생에너지 계절별 차등 해소의 수단(태양광 : 겨울철 발전량의 봄철 발전량의 50% 수준)
- 양수 설비와 원전 부하 추종의 확대 필요
 - 과잉-부족 전력 완화로 배터리 필요량 감소로 비용 절감 가능

시나리오 분석의 시사점

- **세계적으로 보기 드문 탄소중립을 위한 전력계통 환경 ⇒ 우리에게 적합한 전력수급 체계 설계**
 - 독립된 계통으로 주변국으로 부터 전력 융통이 어려움
 - 태양광이 가장 많은 재생에너지 자원으로 전력 공급의 간헐성, 변동성이 큼
 - 비용의 상당부분을 재생에너지 간헐성 제어를 위한 배터리 비용이 차지
- **수급안정화 차원 및 시장원리에 기반한 수요와 공급체계를 조속히 구축해야**
 - 수소 발전 및 수소 생산을 통한 수급 안정, 데이터 센터, 산업단지 등 분산형 전력수급 체계 구축
 - 바람직한 수요공급 유도가 가능한 전력시장의 조속한 구축 및 민간 등 다양한 주체 참여 유도
- **원전의 비중확대를 위해서는 전력공급 경직성 완화와 주민 수용성 제고를 위한 노력 필요**
 - 대형원전 부하추종 적용성 강화 필요, SMR의 조기 상용화를 통한 부하추종 능력 제고
 - 안정성이 대폭 향상된 SMR의 조기 개발, 대형원전의 지속적인 안전성 개선 등으로 원전 주민 수용성 획기적 개선
- **안정적이고 경제적인 전력계통 구축을 위한 다각적인 연구개발 활성화 필요**
 - 특이하고 복잡한 전력계통 환경임에도 불구하고 관련 분야 심도 있는 연구는 빈약
 - 조화로운 중장기 재생에너지/원전 믹스, 국가 송전망 구축, 전력시장 설계 분야 등의 미래 연구개발 활성화 필요

경청해 주셔서 감사합니다