새만금 산업단지의 안정적 전력공급을 위한 SMR과 신재생에너지의 하이브리드 시스템 효율성 분석

Assessment of an SMR–Renewable Energy Hybrid System for Stable Power Supply to the Saemangeum Industrial Complex

박경진[a,b] · 김긍구[a] · 임학규[a]
[a] 한국전력국제원자력대학원(KINGS) [b] ㈜성일에스아이엠(SIM)

SUNG IL CO., LTD.(SIM)
KINGS

목차

01. 연구 배경 및 목적
새만금 재생에너지 중심 산업단지
연구 필요성 및 연구 방향

02. 전력수요 및 분석조건
새만금 산업단지 전력수요 산정
시간별 부하 프로파일
분석자료 및 기본조건

03. 시나리오 구성 및 운전방식
시나리오 A : 재생에너지 + ESS
시나리오 B : SMR 고정 기저발전
시나리오 C : SMR 부하추종 운전

04. 8,760시간 수급분석 결과
시나리오별 전력수급 분석
ESS 명목용량 비교
SMR 운전방식에 따른 ESS 감소효과

05. 경제성 분석
경제성 분석 방법 및 적용단가
보정 LCOE 분석

06. 결론 및 시사점
주요 연구결과
SMR·ESS 하이브리드 시스템의 시사점

1. 연구 배경

탄소중립

AI·데이터센터

수전해

24시간
안정적 전력 수요

새만금은 재생에너지 기반 산업단지이지만,
재생에너지의 시간별·계절별 변동성을 보완할 수 있는 전력공급 체계가 필요

연구 초점: 재생에너지 + SMR + ESS 효율성 분석

1. 연구 배경

새만금, 재생에너지 중심의 미래 산업 거점

새만금은 대규모 재생에너지 발전단지와 RE100 산업단지를 기반으로,
탄소중립 시대의 신산업을 이끄는 에너지 자립형 산업거점으로 개발되고 있습니다.

"재생에너지가 만드는 새로운 산업의 미래, 새만금"



새만금 재생에너지 발전단지 (총 3GW)

태양광	풍력	연료전지
2.8 GW	0.1 GW	0.1 GW

- 사업 면적: 약 38.29 ㎢ (새만금 전체 면적의 9.4%)
- 연간 발전량: 약 4,730 GWh

1 대규모 재생에너지 발전단지 조성



- 태양광 2.8GW, 풍력 0.1GW, 연료전지 0.1GW 등 총 3GW 규모
- 약 38.29㎢ 부지에 조성 (새만금 전체 면적의 9.4%)

2 신재생에너지 공급계획



- 연간 4,730 GWh 생산 계획
- 설비용량 기준 3.0 GW 확보
- 새만금 인근까지 포함 시, 전체 예상 전력사용량의 105.5% 수준

3 RE100 스마트그린산업단지



- 국내 최초 RE100 구현 목표
- 재생에너지 100% 사용을 지향하는 스마트그린산업단지 조성

4 민간 투자 확대



- 현대차그룹, 새만금에 GW급 태양광 투자 추진
- AI 데이터센터, 수전해 플랜트 등의 핵심 전력원으로 재생에너지 활용 계획

출처 새만금개발청 | 산업통상자원부 | 연합뉴스 | 현대자동차그룹 | 한국에너지공단 등

2. 재생에너지 중심 산단으로서의 새만금

새만금은 대규모 재생에너지 보급을 기반으로 산업유치와 전력공급을
연계하는 대표적 재생에너지 중심 산업단지로 논의 중

대규모 재생에너지 기반
태양광·풍력 중심의 전원 구성이
산업단지 조성 논의의 출발점

산업유치와 전력공급 연계
데이터센터·수전해 등 전력다소비
산업과 전력공급 방안이 동시에 검토됨

핵심 과제
재생에너지의 변동성을 보완할 수
있는 안정적 전력공급 체계 필요

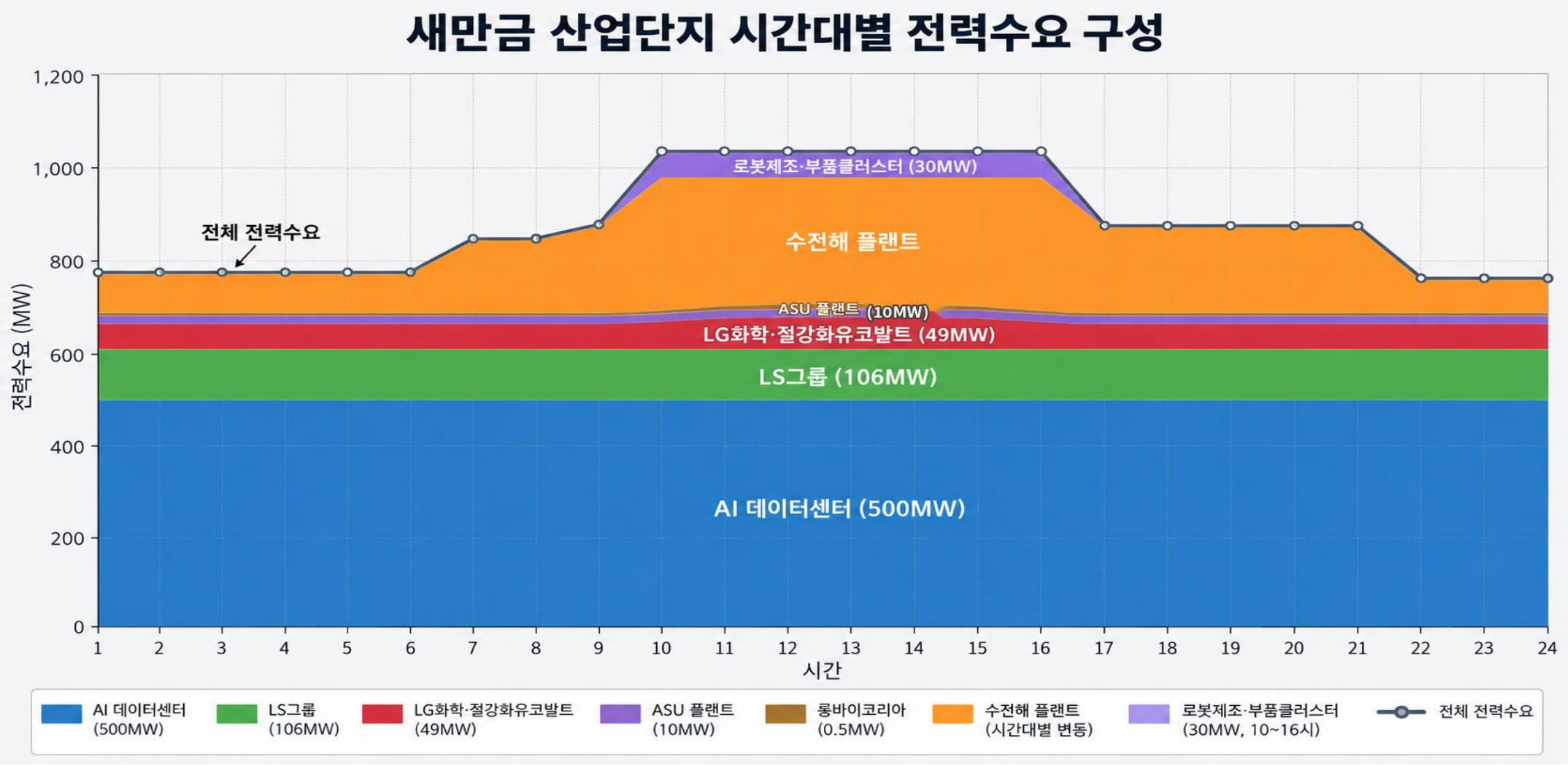
즉, 새만금은 “재생에너지 중심”이라는 장점과 “변동성 보완 필요”라는 과제를 동시에 갖고있음

3. 새만금 전력수요 가정

기업/사업	연간 전력사용량	운영시간 추정	운영시간에 따른 평균부하
현대차그룹 AI데이터센터	4.4TWh/년	24시간	500MW
현대차그룹 수전해플랜트	1.7TWh/년	24시간	200MW
현대차그룹 로봇제조·부품클러스터	88GWh/년	8시간	30MW
룽바이코리아 전구체·황산염공장	4GWh/년	24시간	0.5MW
한국특수가스 ASU플랜트	91GWh/년	24시간	10MW
LG화학·절강화유코발트 새만금 공장 추정	432GWh/년	24시간	49MW
LS그룹 새만금 사업 추정	931GWh/년	24시간	106MW

대규모 연속부하 + 주간 피크를 동시에 고려

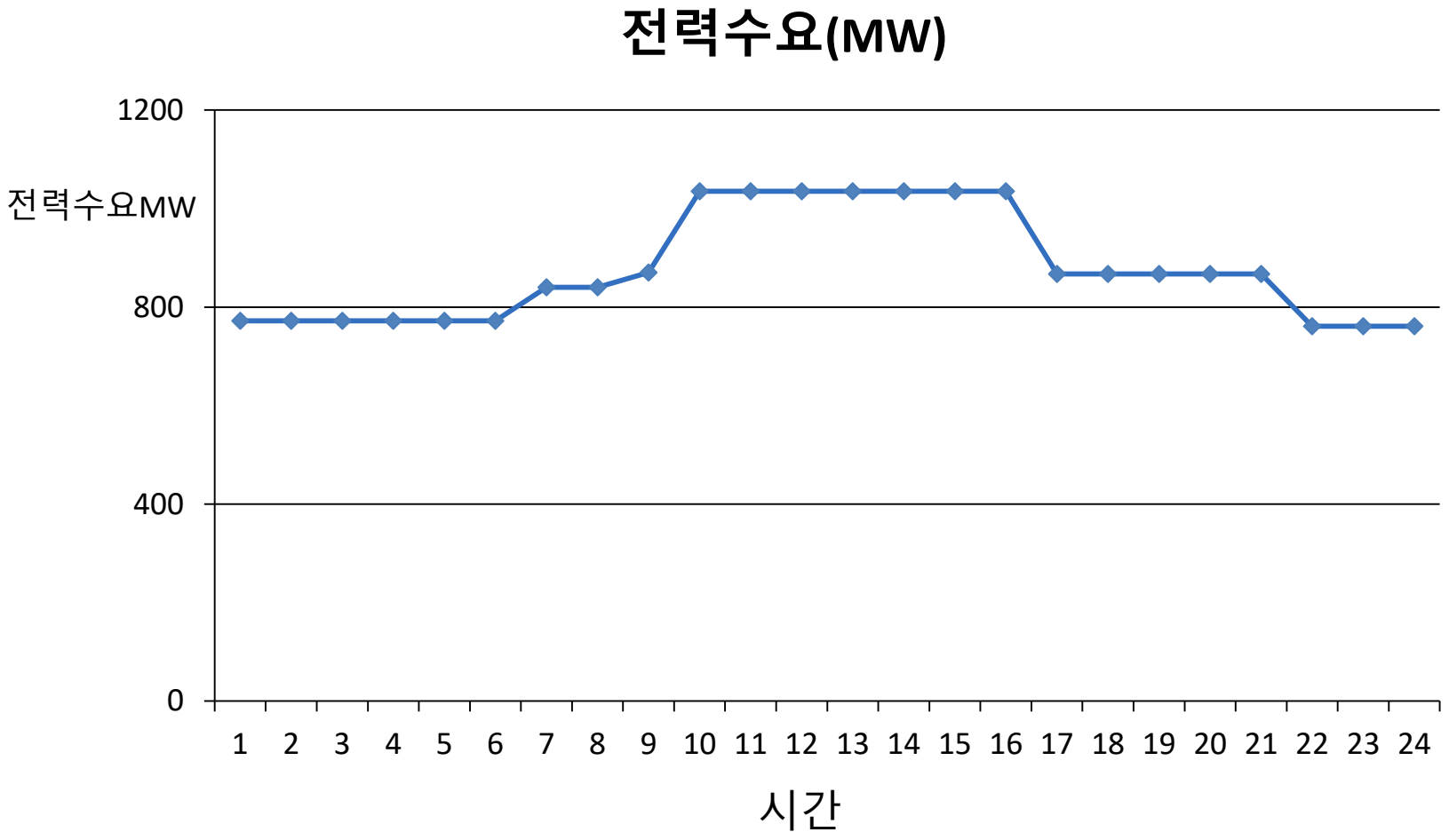
3. 새만금 기업별 수요전력



SUNG IL CO., LTD.(SIM)

KINGS

4. 시간별 부하 프로파일



최대
1,035 MW

최소
761 MW

평균
877 MW

5. 분석자료 및 기본조건

구분	적용 조건
분석시간	8,760시간
재생에너지 자료	태양광: 전라북도익산 다송리 용량비례 환산 2025년 풍력: 전국 육상풍력 시간별 발전량 2025년
ESS 효율	충전 90%, 방전 90%, DoD 80%
외부계통 수전	제외
기본조건	재생에너지 출력제한을 고려하지 않음 초과 발전량은 ESS에 저장

6. 시나리오 설정

시나리오	전원구성	SMR 운전	변동성 대응
A	재생에너지(태양광 + 풍력) + ESS	-	ESS 전담
B	재생에너지(태양광 + 풍력) + SMR + ESS	680 MW (기저발전)	ESS 전담
C	재생에너지(태양광 + 풍력) + SMR + ESS	170~680 MW (부하추종)	SMR + ESS

시나리오C에서 SMR의 부하추종운전능력은 20%FP~100%FP의 범위이지만,
본 논문에서는 1기용량 25%FP를 최소로 가정함

동일한 수요 조건에서 전원구성과 운전방식만 비교

7. 시나리오 A: 재생에너지 + ESS

항목	발전설비용량
태양광	5,220 MW
풍력	522 MW
ESS	733.2 GWh (에너지저장장치용량)

ESS 명목용량 733.2 GWh

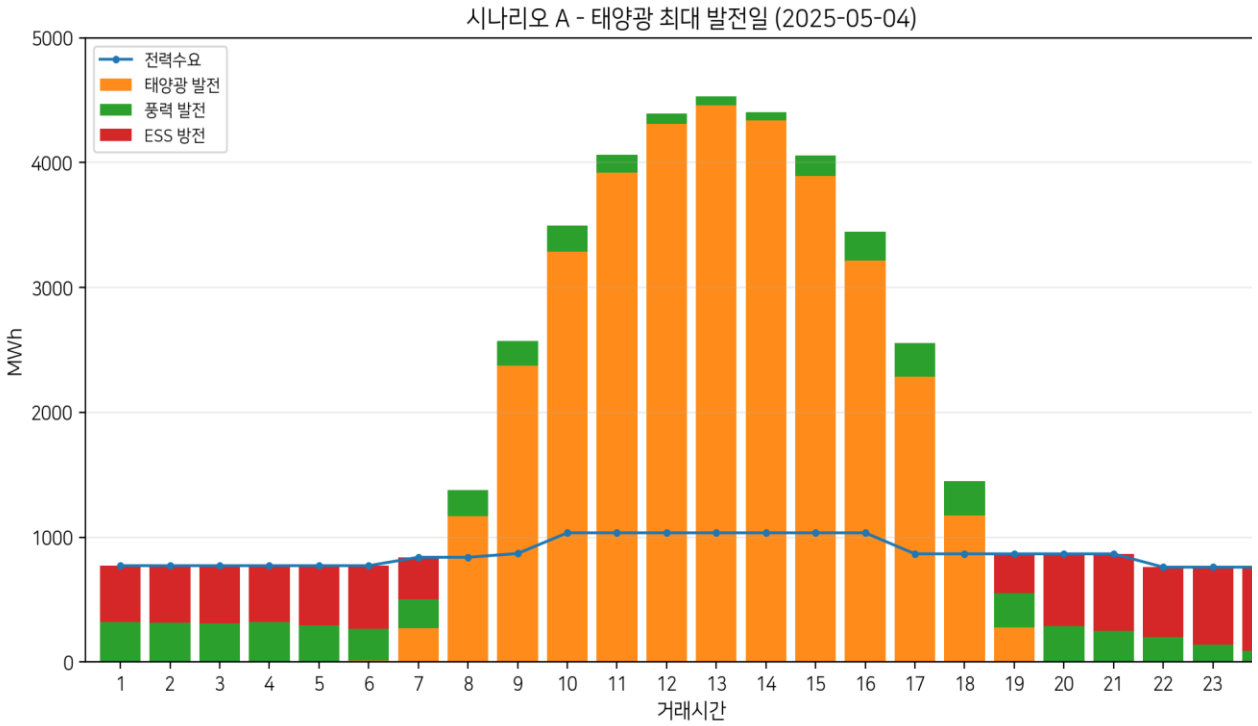
하루 평균 수요: 7,682.3 ÷ 365 ≈ 21.05 GWh/일

명목용량 기준: 733.2 ÷ 21.05 ≈ 34.8일

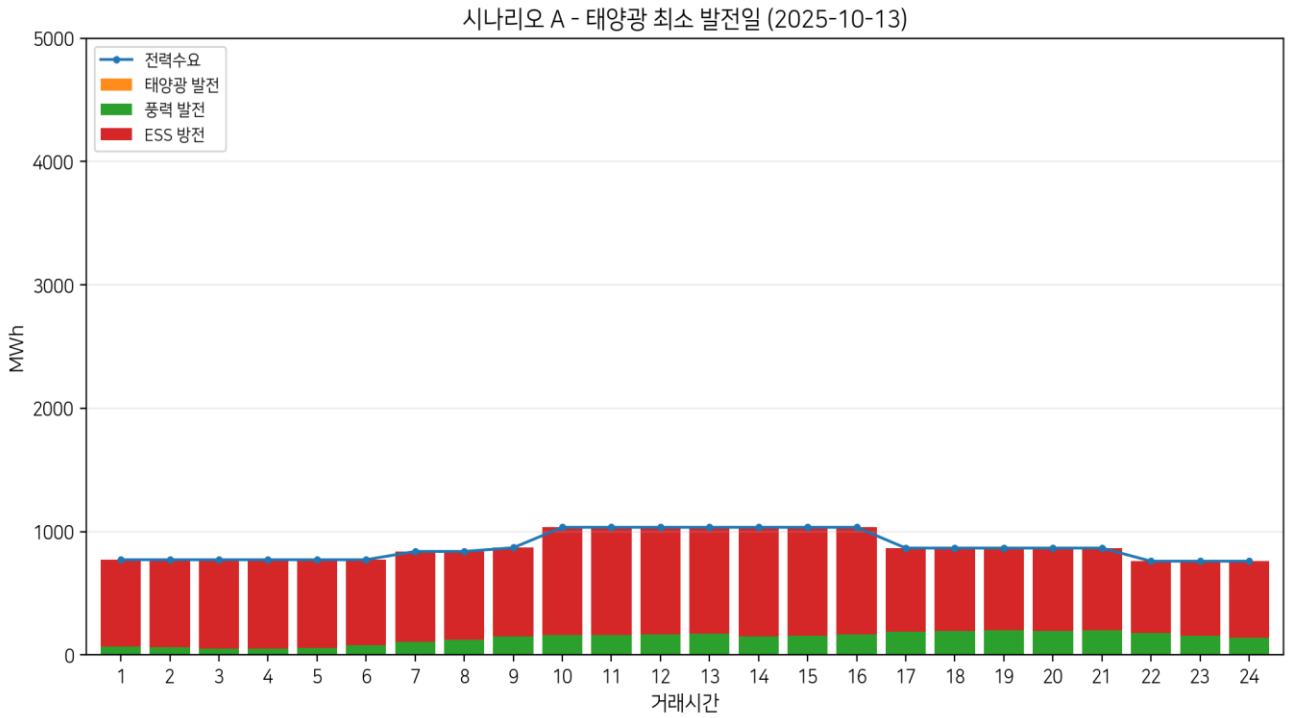
DoD 80%·방전효율 90% 적용 시:
733.2 × 0.8 × 0.9 = 527.9 GWh
527.9 ÷ 21.05 ≈ 25.1일분
(재생에너지 공급 0, ESS 손실·예비율 추가제약 제외)

피크수요 대비 약 5.5배의 재생에너지 설비가 필요하고, 장기 부족구간은 ESS가 전적으로 보완

7. 시나리오 A: 재생에너지 + ESS



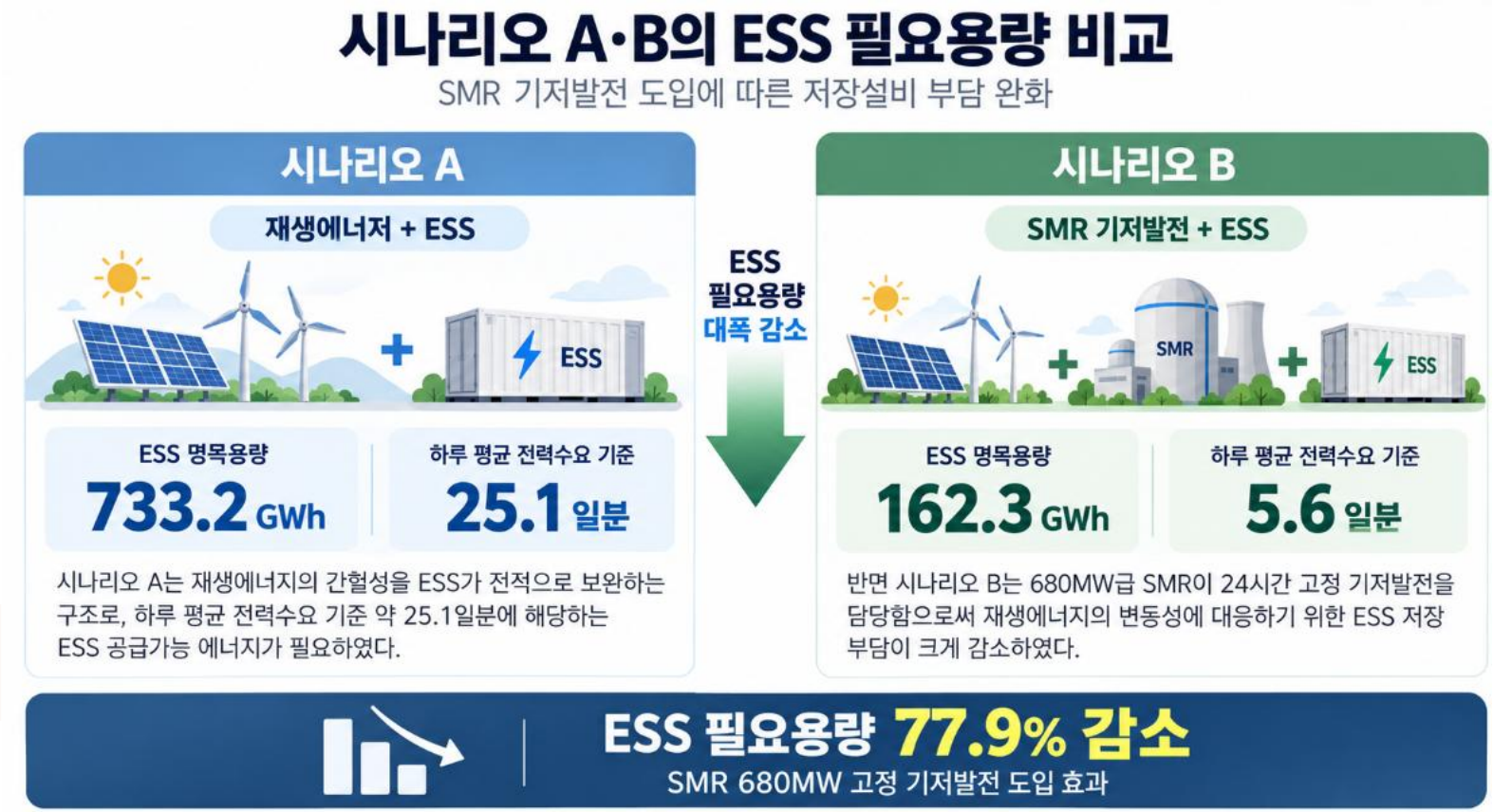
25.05.04(일) 데이터 기준
태양광 발전량 합계 35,002 MWh/일



25.10.13(월) 데이터 기준
태양광 발전량 0 MWh/일

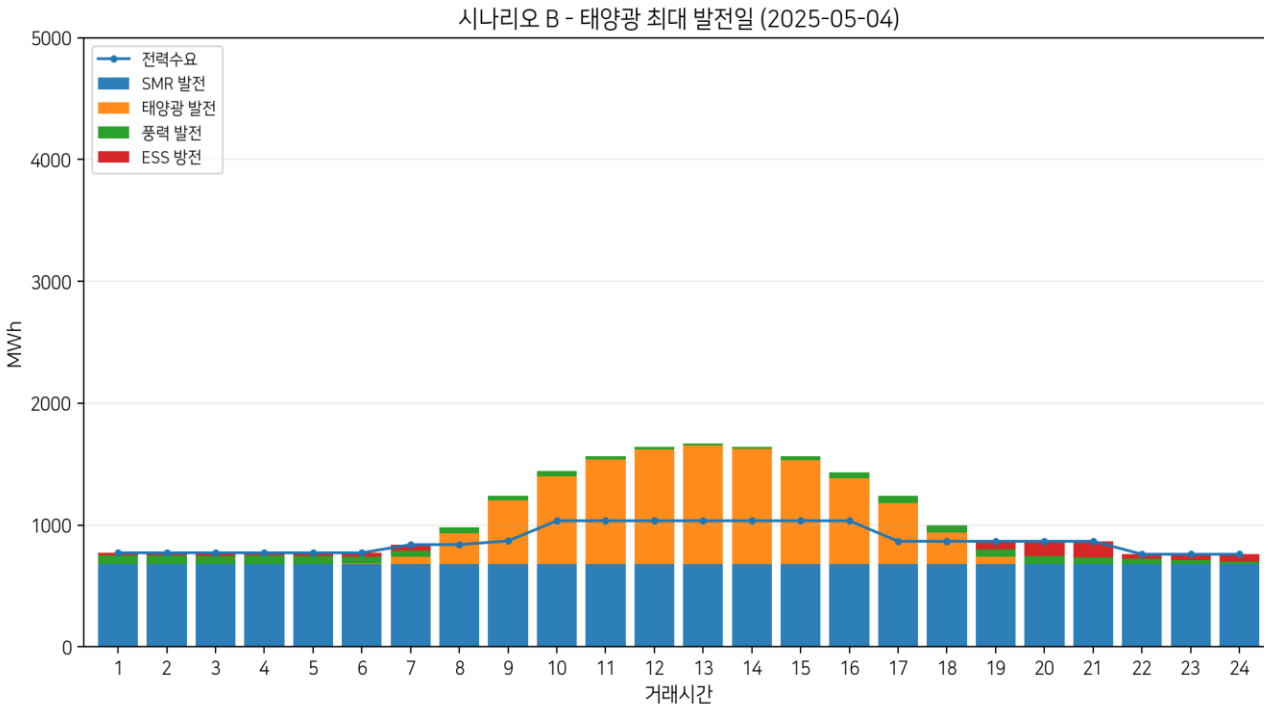
8. 시나리오 B: 고정 기저 SMR

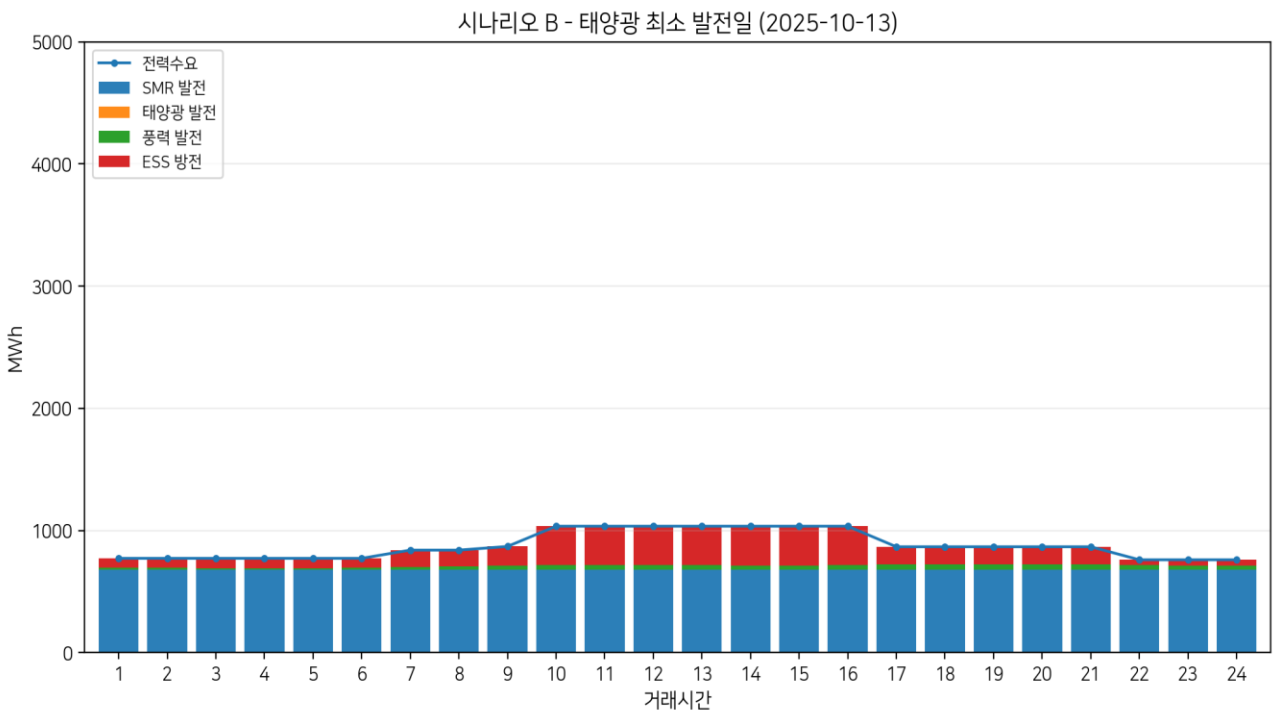
항목	발전설비용량
태양광	1,141 MW
풍력	114 MW
SMR	680 MW
ESS	162.3 GWh (에너지저장장치용량)



SMR이 기저부하를 담당했기에 재생에너지가 공급할 용량이 줄었음

8. 시나리오 B의 역할분담 구조





아래: SMR 고정 기저발전

위: 재생에너지 변동 + ESS 조정

SMR의 고정출력 방식은 안정적인 기저공급에는 유리, 재생에너지의 시간별 변동성은 ESS가 부담함

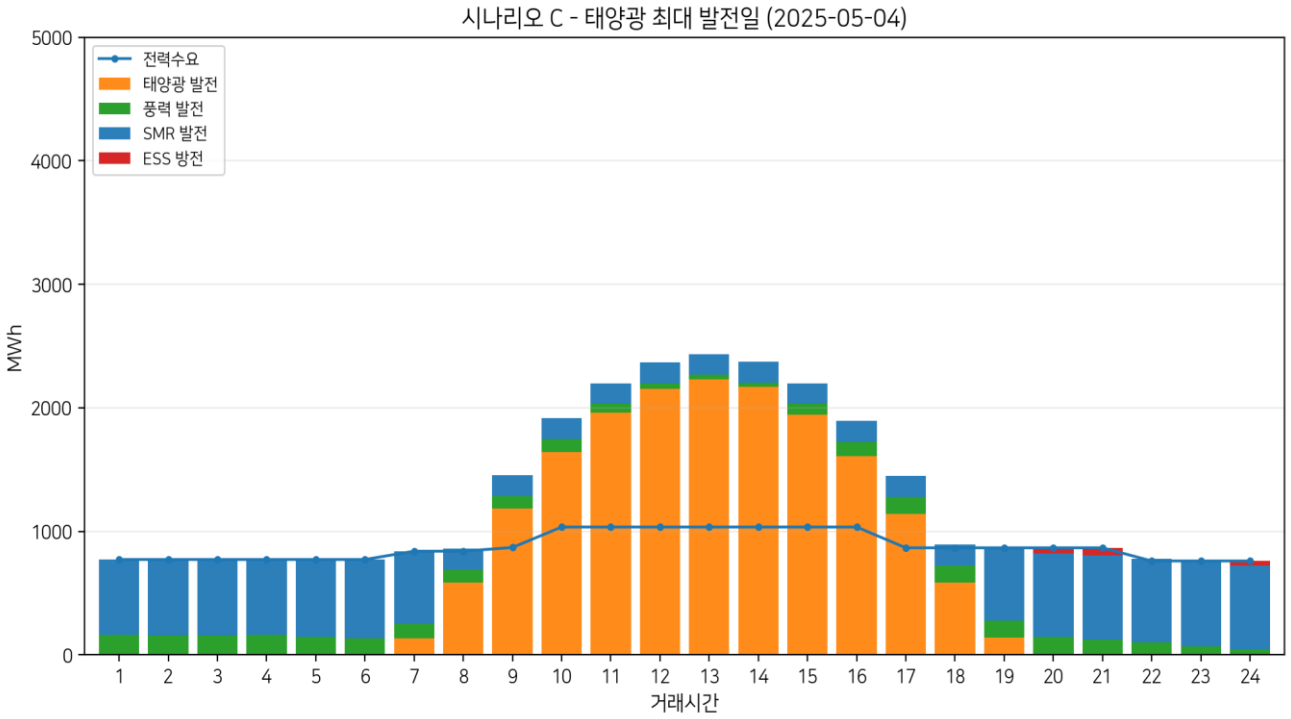
9. 시나리오 C: SMR 부하추종

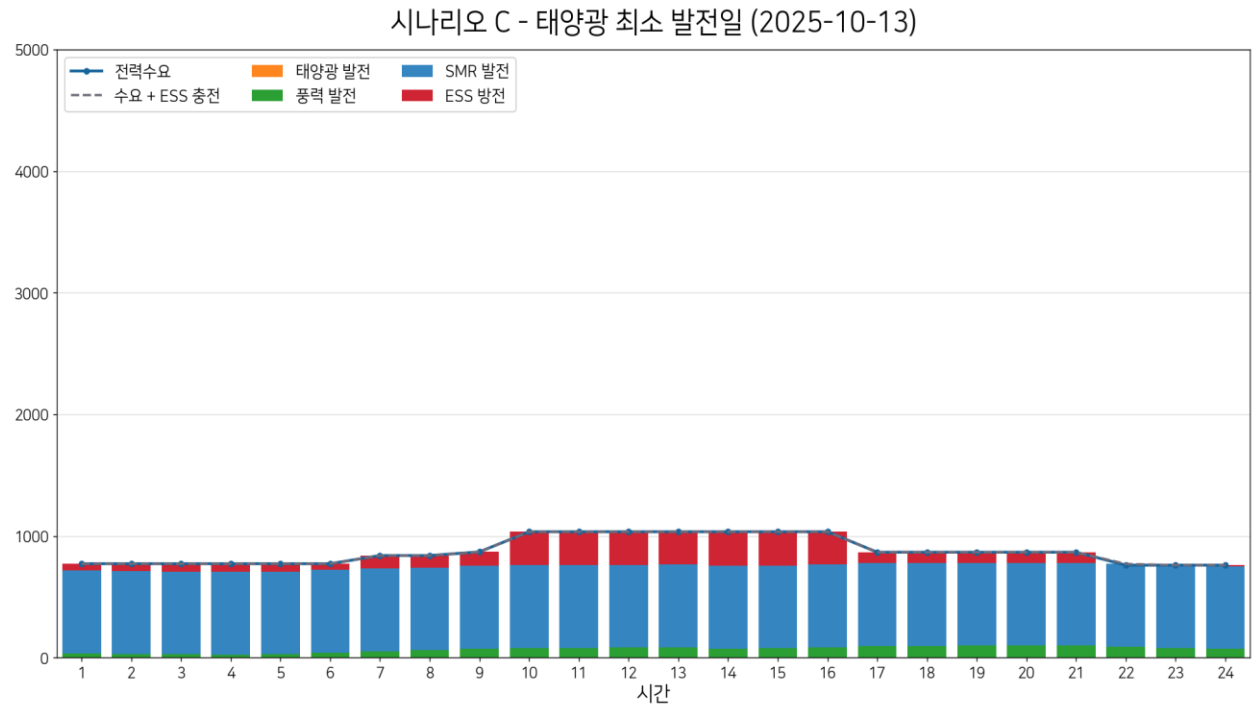
항목	발전설비용량
태양광	2,610 MW
풍력	261 MW
SMR	170~680 MW (부하추종운전)
ESS	**12.9 GWh** **(에너지저장장치용량)**

SMR Capacity Factor : 62.0%

재생에너지의 부족전력이 지속될때,
SMR이 출력을 증가시켜 장주기 저장 부담을 줄임

9. 시나리오 C의 역할분담 구조





재생에너지 우선 → SMR 부족전력 공급 및 ESS 충전지원 → ESS 최종 부족분 방전
이러한 역할분담으로 ESS 필요용량을 12.9GWh까지 축소

10. 8,760시간 해석결과

구분	시나리오 A	시나리오 B	시나리오 C
태양광 설비용량 (MW)	5,220	1,141	2,610
풍력 설비용량 (MW)	522	114	261
SMR 설비용량 (MW)	-	680	680
ESS (에너지저장장치용량) (GWh)	733.2	162.3	12.9
SMR 이용률 (%)	-	100	62.0
재생에너지 총 발전량 (GWh/년)	8,498	1,857	4,249
SMR 발전량 (GWh/년)	-	5,957	3,691

10. 총발전량

1. 시나리오별 연간 총 발전량

● 총발전량이 전력수요보다 큰 이유는 ESS 충·방전 과정에서의 손실이 포함되기 때문임.

구분	재생에너지 발전량 (GWh)	SMR 발전량 (GWh)	총발전량 (GWh)	최종 전력수요 (GWh)	차이 (GWh)
시나리오 A	8,497.501	0	**8,497.501**	7,682.319	**815.182**
시나리오 B	1,857.235	5,956.800	**7,814.035**	7,682.319	**131.716**
시나리오 C	4,248.751	3,690.672	**7,939.422**	7,682.319	**257.103**

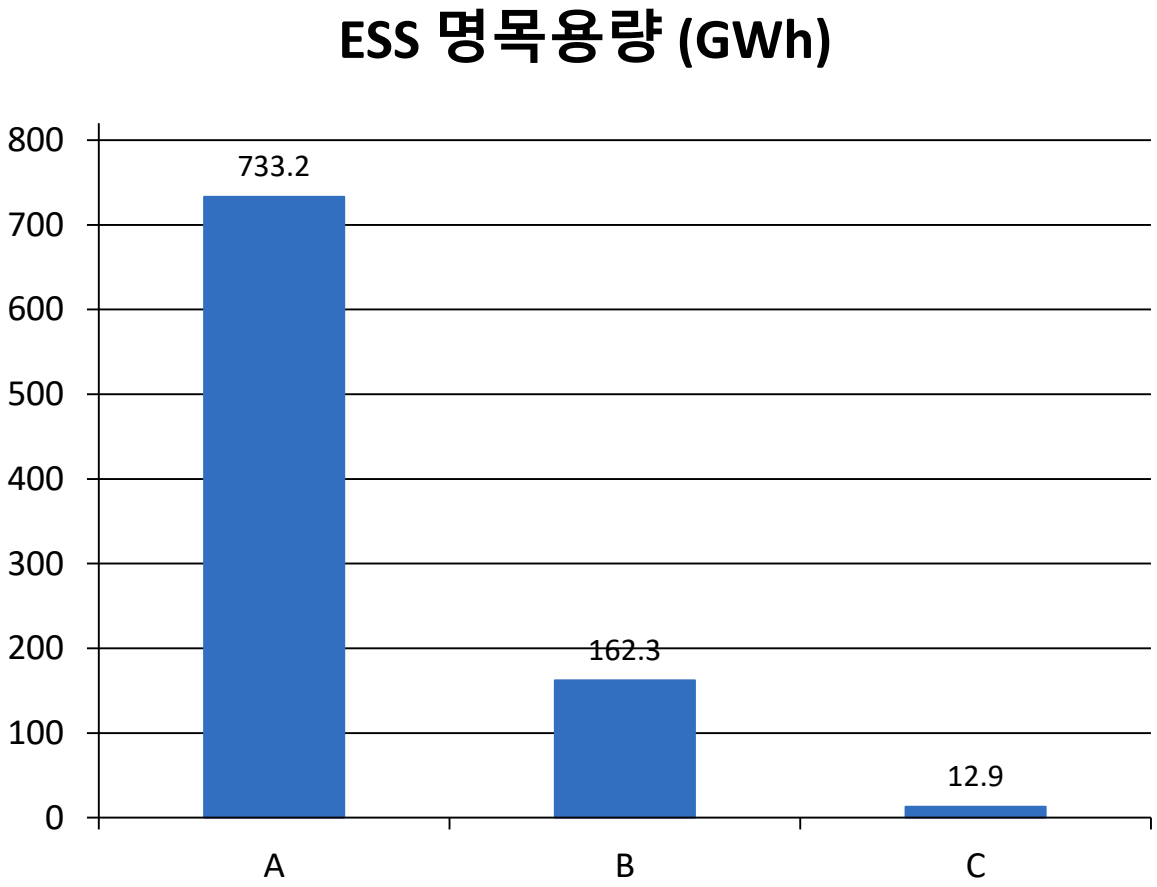
2. 남는 전력과 ESS손실 차이 비교

구분	ESS 충전량 (GWh/년)	ESS 방전량 (GWh/년)	ESS 손실 (GWh/년)	총발전량 - 전력수요 (GWh)
시나리오 A	4,290.431	3,475.249	**815.182**	**815.182**
시나리오 B	693.241	561.525	**131.716**	**131.716**
시나리오 C	1,353.174	1,096.071	**257.103**	**257.103**

예를 들어 시나리오 C는 충전효율과 방전효율이 각각 90%이므로, 왕복효율은 81%.
1,353.174 * (1 – 0.9 * 0.9) = 257.103 GWH

즉, 시나리오 A,B,C의 연간 총 발전량 차이는 모두 ESS 충전 및 방전 과정에서 발생하는 손실량과 일치

11. ESS 명목용량 비교



구분	의미
A	재생에너지 변동성을 ESS가 전적으로 담당
B	SMR 기저발전으로 ESS 필요용량 감소
C	SMR 부하추종으로 ESS 설비용량 대폭 감소

SMR 부하추종이
ESS 설비용량을 줄임

12. 경제성 분석 방법

구분	산정 방식
발전비용	발전량 × 기준 LCOE
ESS 설치비	에너지용량 + 충전 PCS + 방전 PCS
ESS 운영비	출력설비 기준 고정 O&M
연환산	10년, 할인율 5%, CRF 0.1295
보정 LCOE	연간 총비용 ÷ 최종공급량

단일 LCOS가 아닌 설치비·운영비 구분

LCOE (Levelized Cost of Energy) 균등화 발전비용
발전소의 건설비, 운영비, 연료비 등을 전체 발전량으로 나눈 값으로, **전기를 1kWh 생산하는 데 드는 평균 비용**
LCOS (Levelized Cost of Storage) 균등화 저장비용
ESS의 설치비, 운영비, 효율손실 등을 저장 후 실제 공급한 전력량으로 나눈 값으로, **전기를 1kWh 저장했다가 다시 공급하는 데 드는 평균 비용**

13. 경제성 적용 단가

항목	적용값	비고
태양광	129 원/kWh	에너지경제연구원(KESIS), 「재생에너지 LCOE 통계」, 시나리오 1(국내 분석자료 기반), 2025년 중규모 태양광 발전단가 전망값 129.1원/kWh
육상풍력	165 원/kWh	에너지경제연구원(KESIS), 「재생에너지 LCOE 통계」, 시나리오 1(국내 분석자료 기반), 2025년 육상풍력 발전단가 전망값 164.6원/kWh
SMR 기준단가	105 원/kWh	에너지경제연구원(2024), i-SMR 목표 건설단가 3,500달러/kW, 할인율 7% 조건의 LCOE 74.5달러/MWh를 가정환율 1,410원/달러로 환산
ESS 에너지용량	369,936 원/kWh	에너지경제연구원(2025), p.97, 표 5-7, 국내 LFP ESS 에너지용 CAPEX(6시간 기준)
ESS 출력설비	245,295 원/kW	에너지경제연구원(2025), p.97, 표 5-7, 국내 LFP ESS 출력용 CAPEX(6시간 기준)
ESS 고정 O&M	10,770 원/kW·년	에너지경제연구원(2025), p.98, 표 5-8, 국내 LFP ESS 출력용 OPEX(6시간 기준)

SMR 비용은 상용실적 부족으로 불확실성이 있으며, 상대 비교용 기준값으로 적용

13-1. ESS 에너지용량 및 PCS 출력 산정

시나리오 C 적용 예시 | 2025년 8,760시간 수급해석 결과를 설비 정격으로 환산

01 ESS 에너지 저장용량

SOC(t) = SOC(t−1) + 0.9×충전 − 방전/0.9

8,760시간 추적 → 사용가능 용량: 10.301 GWh

방전심도(DoD) 80% 적용

10.301 ÷ 0.80 = 12.876 GWh

12.876 GWh = 12,875,790 kWh

배터리비 = 저장용량(kWh) × 369,936원/kWh

= 47,632.2 억원

02 ESS 충·방전 출력설비 (PCS)

8,760시간 중 최대 충·방전 출력을

각각 충전·방전 PCS 정격으로 적용

충전 : 1,581.106 MW → 1,581,106 kW

방전 : 779.303 MW → 779,303 kW

합산 PCS = 2,360,408 kW

PCS비 = 합산 출력(kW) × 245,295원/kW

= 5,790.0 억원

※ 연간 충·방전량은 누적 이용량으로 저장용량·PCS 정격과 다르며, PCS 합산은 반올림 전 원자료 기준임.

13-2. ESS 설치비·연간 운영비 산정

시나리오 C 적용 예시 | 초기 설치비를 연환산하고 출력설비 기준 고정 O&M을 더해 총비용 산정

01 초기 설치비

ESS 배터리 비용

47,632.2 억원

충·방전 PCS 비용

5,790.0 억원

총 설치비 (투자비)

53,422.1 억원

02 연환산 설치비

사용수명 10년 / 할인율 5%

CRF = r(1+r)^n / [(1+r)^n−1]

CRF = 0.129505

53,422.1 × 0.129505

연환산 설치비

6,918.4 억원/년

03 고정 O&M (운영비)

운영비 단가: 10,770 원/kW·년

적용 대상: 충전 + 방전 PCS

2,360,408 kW

× 10,770 원/kW·년

연간 고정 운영·유지관리비

254.2 억원/년

ESS 연간 총비용 = 6,918.4 + 254.2 = 7,172.6 억원/년

※ O&M은 ESS 연간 충·방전량이 아닌 PCS 정격출력(kW) 기준이며, 발전원별 발전비는 별도 합산함.

14. 보정 LCOE 분석 결과

발전비
연간 발전량 × 발전원별 기준단가
· 태양광 129원/kWh · 풍력 165원/kWh
· SMR 기준 105원/kWh

SMR 비용 보정
시나리오 C 이용률 62.0% 반영
발전단가 약 169.5원/kWh

ESS 총설치비
배터리 저장용량 + 충전·방전 PCS
· 에너지용량 369,936원/kWh
· 출력설비 245,295원/kW

ESS 연간비용
설치비 × CRF(0.1295) + 고정 O&M
O&M: PCS 합계 × 10,770원/kW·년

보정 LCOE
연간 총비용 ÷ 연간 최종공급량

비용항목	시나리오 A	시나리오 B	시나리오 C
태양광 발전비	9,170억원/년	2,004억원/년	4,585억원/년
풍력 발전비	2,292억원/년	501억원/년	1,146억원/년
SMR 발전비	-	6,255억원/년	6,255억원/년
발전비 합계	**11,462억원/년**	**8,760억원/년**	**11,986억원/년**
ESS 총설치비	2,724,364억원	603,073억원	53,422억원
ESS 연환산 설치비	352,818억원/년	78,101억원/년	6,918억원/년
ESS 운영비	527억원/년	115억원/년	254억원/년
ESS 연간비용	**353,344억원/년**	**78,216억원/년**	**7,173억원/년**
연간 총비용	364,806억원/년	86,976억원/년	19,158억원/년
보정 LCOE	4,749원/kWh	1,132원/kWh	249원/kWh
ESS 비용 비중	약 96.9%	약 89.9%	약 37.4%
경제성 순위	3위	2위	1위

15. 결론 및 시사점

시나리오별 핵심 비교

구분	시나리오 A	시나리오 B	시나리오 C
전원 구성	재생에너지 + ESS	재생에너지 + SMR(고정) + ESS	재생에너지 + SMR(부하추종) + ESS
재생 발전량 (GWh/년)	8,498	1,857	4,249
SMR 운전	없음	680 MW (기저발전)	170~680 MW 부하추종
ESS 에너지저장장치용량 (GWh)	733.2	162.3	**12.9**
보정 단위공급비용 (원/kWh)	4,749	1,132	**249**
운전·비용 특성	장주기 ESS 의존도 큼	ESS 부담 완화, SMR 기저발전	**ESS 용량·비용 가장 작음**

공통조건 | 전력수요 7,682GWh/년 · 8,760시간 분석 · 외부수전·공급부족·출력제한 0

시나리오 C의 운전 원리

01 재생에너지 우선 발전
태양광·풍력 발전가능량 출력제한 없이 활용

02 SMR·ESS 발전운전
SMR 출력을 조절하고 ESS 충·방전 시점을 조정

03 ESS 용량 최소화
최소 저장용량 12.9GWh

종합 결론

- 시나리오 모두 연중 공급부족 없이 수요 충족
- 시나리오A는 간헐성을 보완하기 위해 막대한 ESS필요 문제 발생 → 보완해줄 SMR 발전원 필요

결론 | 재생에너지와 SMR(부하추종운전)의 하이브리드 시스템은 안정적 에너지 공급과 비용을 줄이는 유효한 대안