

정 책 자 료

2030년 재생에너지 확대와 전력계통 부하로 본 원자력발전소의 출력감발과 안전성 문제

제8차(2030)와 제9차(2034) 전력수급기본계획의
원전 출력감발 비교 시뮬레이션을 중심으로

더불어민주당 국회의원 양이원영
홍익대학교 교수 전영환

서론

- 한국전력거래소는 2020년, 2021년 2년 간 경부하기간인 설과 추석명절, 신고리 3,4호기 출력감발 운전을 시행함.
- 현재 건설된 발전소 중 설비용량이 최대인 신고리 3,4호기(호기 당 1.4GW) 출력을 감발해 만약 1개 호기가 사고 시 계통안정을 취하려는 의도
- 2021. 10.18. 2050 탄소중립위원회는 NDC 목표를 40%로 상향하는 등 기후 위기에 대응한 탄소중립을 실현하기 위한 재생에너지로 전환은 더욱 가속화될 것으로 예상
- 기존 8차 전력수급기본계획과, 9차 전력수급기본계획에 따르면 경부하기 원자력발전소 출력감발은 명절기 연 2회가 아닌, 매주 주말마다 상시적으로 시행해야할 가능성이 높아짐
- 따라서, 전력계통 전문가인 전영환 홍익대학교 전기공학부 교수가 시뮬레이션한 자료를 토대로 2030년, 2034년 계절별 계통 부하를 예측하고 대비코자 함

❖ 수급계획검토를 위한 전력계통 발전계획 시뮬레이션

- 전영환 홍익대학교 교수

- 9차전력수급기본계획에서 2034년 신재생에너지 목표투입용량은 8차 전력수급기본계획의 2030년에 비해 대폭 증가함
 - 신재생에너지 발전량 비중 2030년 20% → 2034년 26.3%로 증가함
- 8차와 9차 전력수급기본계획의 발전계획(Unit Commitment, UC) 시뮬레이션 수행을 통해 원전 출력감발 상황을 분석
- 1주일 단위의 계절별 대표 순부하케이스를 선정하고 UC 시뮬레이션을 수행하여, 원전 출력감발 상황에 대한 검토

8차, 9차 전력수급기본계획 비교

❖ 전력수급기본계획의 발전원 구성변화(8차vs. 9차)

- ▶ 원자력설비는 큰 변화가 없음. 하지만, 석탄은 감소하고, LNG는 증가하는 경향을 보임
 - 2030년 기준, 석탄은 8차 대비 9차에서는 약 7.3GW가 감소하고, LNG가 약 8GW 증가함
 - 2034년 기준, 석탄은 29GW까지 감소하고, LNG는 59.1GW까지 증가함

연도	구분	원자력	석탄	LNG	신재생	석유	양수	계
2017	용량	22,529	36,920	37,353	11,316	4,151	4,700	116,968
	비중	19.3%	31.6%	31.9%	9.7%	3.5%	4.0%	100%
2022	용량	27,450	42,041	42,050	23,341	2,791	4,700	142,372
	비중	19.3%	29.5%	29.5%	16.4%	2.0%	3.3%	100%
2026	용량	23,700	39,921	44,310	38,826	1,391	4,700	152,847
	비중	15.5%	26.1%	29.0%	25.4%	0.9%	3.1%	100%
2030	용량	20,400	39,921	47,460	58,461	1,391	6,100	173,732
	비중	11.7%	23.0%	27.3%	33.7%	0.8%	3.5%	100%
2031	용량	20,400	39,921	47,460	58,611	1,391	6,700	174,482
	비중	11.7%	22.9%	27.2%	33.6%	0.8%	3.8%	100%

<제 8차 전력수급기본계획 연도별 전원구성 전망치(MW)>

연도	구분	원자력	석탄	LNG	신재생	양수	기타	계
2019	용량	23,250	36,992	39,655	15,791	4,700	4,950	125,388
	비중	18.5%	29.5%	31.6%	12.6%	3.7%	4.1%	100%
2022	용량	26,050	38,342	43,330	29,426	4,700	1,339	143,187
	비중	18.2%	26.8%	30.3%	20.6%	3.3%	0.8%	100%
2026	용량	23,700	38,112	50,748	48,533	4,700	1,237	167,030
	비중	14.2%	22.8%	30.4%	29.1%	2.8%	0.7%	100%
2030	용량	20,400	32,612	55,496	58,043	5,200	1,237	172,988
	비중	11.8%	18.9%	32.1%	33.6%	3.0%	0.6%	100%
2034	용량	19,400	29,012	59,096	77,764	6,500	1,237	193,009
	비중	10.1%	15.0%	30.6%	40.3%	3.4%	0.6%	100%

<제 9차 전력수급기본계획 연도별 전원구성 전망치(MW)>

❖ 전력수급기본계획의 신재생에너지원 구성변화(8차vs 9차)

- 8차 기준 2030년까지 신재생에너지원 발전비중 20%(사업용)
- 9차 기준 2034년까지 신재생에너지원 발전비중 26.3%(사업용)

*9차에서 폐기물 소각 및 부생가스는 신재생에서 제외됨

연도	사업용										자가용	합계
	재생에너지						신에너지		계			
	태양광	풍력	수력	해양	바이오	폐기물 소각*	부생 가스*	연료 전지		IGCC		
2017	5,030	1,174	1,795	255	725	323	1,377	291	346	11,316	2,770	14,086
2022	12,930	4,424	1,890	255	1,185	323	1,377	611	346	23,341	3,483	26,824
2026	21,930	10,024	1,985	255	1,475	323	1,377	711	746	38,826	4,233	43,059
2030	33,530	17,674	2,105	255	1,705	323	1,377	746	746	58,461	5,143	63,605
2031	33,680	17,674	2,105	255	1,705	323	1,377	746	746	58,611	5,153	63,765

<제 8차 전력수급기본계획 연도별 신재생에너지 전망치(MW)>

연도	사업용								자가용	합계
	재생에너지					신에너지		계		
	태양광	풍력	수력	해양	바이오	연료 전지	IGCC			
2020	14,294	1,834	1,817	256	1,000	580	346	20,126	1,215	21,341
2022	21,494	3,384	1,847	256	1,100	1,000	346	29,426	1,557	30,983
2026	32,061	11,034	1,897	256	1,140	1,800	346	48,533	2,383	50,916
2030	33,981	17,679	1,972	256	1,210	2,600	346	58,043	2,721	60,764
2034	45,594	24,874	2,085	256	1,410	3,200	346	77,764	4,421	82,185

<제 9차 전력수급기본계획 연도별 신재생에너지 전망치(MW)>

시뮬레이션 조건설정

❖ 재생에너지 출력 산정방법

- ▶ 제시된 설비용량을 기준으로 태양광과 풍력에너지의 출력을 산정함
- ▶ 2017년도 지역별 기상데이터(풍속, 일사량, 기온)를 활용하여 시간대별 태양광, 풍력 출력을 산정함.
 - 재생E 설비용량 전망치를 이용하여 기상데이터를 통해 출력을 산정하였기 때문에 8차와 9차 수급계획과 이용률 차이 발생 가능
 - 연간발전량 비중은 수급계획과 동일하게 산정
- ▶ 재생에너지 출력삭감(Curtailment) 적용
 - 재생에너지발전량(MWh)중에서 약 95%를 활용할수 있는 수준으로 최대출력을 제한함
 - 제한되는 재생에너지의 최대출력은 8차 2030년은 26GW, 9차2034년36GW
- ▶ 산정된 재생에너지 출력을 통해, 2030년과 2034년의 순부하 (부하-재생E출력) 곡선을 산정하고 입력 값으로 사용하여 UC 시뮬레이션수행

❖ 발전원별 조건설정

- 운전예비력 확보가능 용량은 발전계획 시뮬레이션 시 해당 발전기가 최대로 확보할 수 있는 용량을 의미
- 동일한 1차 예비력 용량을 확보하더라도, 가변속양수는 계통주파수 개선효과가 크기 때문에 가중치 적용

< 발전원별 발전계획 모의조건 >

발전원	최소정지/운전시간	발전기 최소출력	증감발률
원자력	X	X	X
LNG화력	X	O	O
석탄화력	O	O	O
양수	X	O	O
신재생에너지*	제9차 전력수급기본계획 발전량전망치 반영		
태양광+풍력	2017년 기상데이터를 활용한 예측값 반영		

* 해양, 바이오, 폐기물, 부생가스, 연료전지, IGCC

< 발전원별 운전예비력 확보가능 용량 >

발전원	1차 예비력	2차/주파수제어 예비력
원자력	X	X
LNG화력	설비용량 5%	5분 증감발률
석탄화력	설비용량 5%	5분 증감발률
정속 양수	설비용량 10%	5분 증감발률
가변속 양수	설비용량 20%	5분 증감발률
신재생에너지	X	X
태양광+풍력	X	X

- 겨울철의 경우 열병합발전(CHP)의 열 제약 발전량을 반영함
- 발전원별 예방 정비율
 - 8차 시나리오(2030년)의 경우 발전원별 예방정비는 고려하지 않음
 - 9차 시나리오(2034년)의 경우 발전원별 예방정비를 반영

❖ 예비력 요구량 제약 산정방안_1

- ▶ 現운영예비력 기준을 유지하는 전제하에 변동성 전원의 단주기 출력변동성에 의한 예비력 증분량을 반영
- ▶ 현재 운영 예비력은 N-1 상정고장에 대해 대응하기 위해 설계되어 있음
 - 단위용량이 가장 큰 원자력발전기 1기 탈락(1,400MW)

예비력	확보량 [MW]	응답시간	설명
1차 예비력	1,000	고장발생 후 10초 이내 응답, 5분 이상 유지	N-1 고장 대비, BESS 포함
2차 예비력	1,400	급전지시 후 10분 이내 출력, 30분 이상 유지	N-1 고장, BESS 포함
3차 예비력	1,400	급전지시 후 30분 이내 출력, 이후 유지가능	예비력 회복
주파수제어 예비력	700	급전지시 후 5분 이내 출력, 30분 이상 유지	정상시 주파수조정
속응성 예비력	2,000	20분 이내 출력 생산, 4시간 이상 유지	빠른 기동 자원 (양수, 가스터빈 등)
합계	6,500		

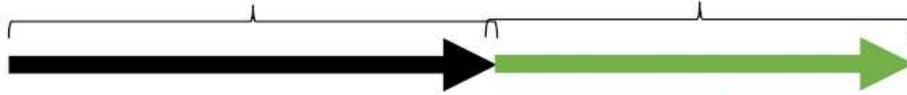
*출처: 전력시장운영규칙

❖ 예비력요구량제약산정방안_2

- ▶ 기존 예비력 요구량에 재생에너지 변동성 반영
- ▶ 재생에너지 1분 변동성과 5분 변동성은 각각 1차예비력과 2차/주파수제어 예비력에 반영
- ▶ 재생에너지 변동량은 정규분포를 따른다는 가정하에 변동량의 95%를 대응할수 있는 2-sigma 반영
 - 추가로, 재생에너지 출력수준에 따른 표준편차를 반영하여 재생에너지출력에 따라 예비력 요구량에 변화를 줌
- ▶ 재생에너지 변동성 확보방안
 - 재생에너지와 부하의 5분 변동량을 산술합으로 산정하는 경우 과도하게 산정될 수 있으므로 다음과 같이 기하합으로 산정함

최대용량 발전기
(1차예비력)

(풍력+태양광) 1분 변동량



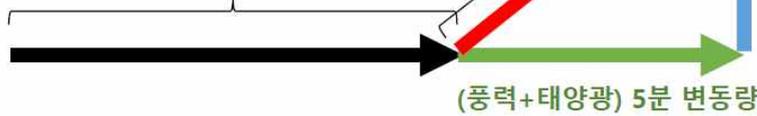
$$\text{GF예비력} = 1,000\text{MW} + n\text{-}\sigma(\text{재생E 1분})$$

<1차 예비력>

$$\sqrt{(\text{부하 5분 변동량})^2 + (\text{재생에너지 5분 변동량})^2}$$

최대용량 발전기(2차예비력)

부하 5분 변동량



(풍력+태양광) 5분 변동량

$$\text{AGC예비력} = 1,400\text{MW} + \sqrt{(n\text{-}\sigma(\text{부하5분}))^2 + (n\text{-}\sigma(\text{재생E 5분}))^2}$$

<2차/주파수제어 예비력>

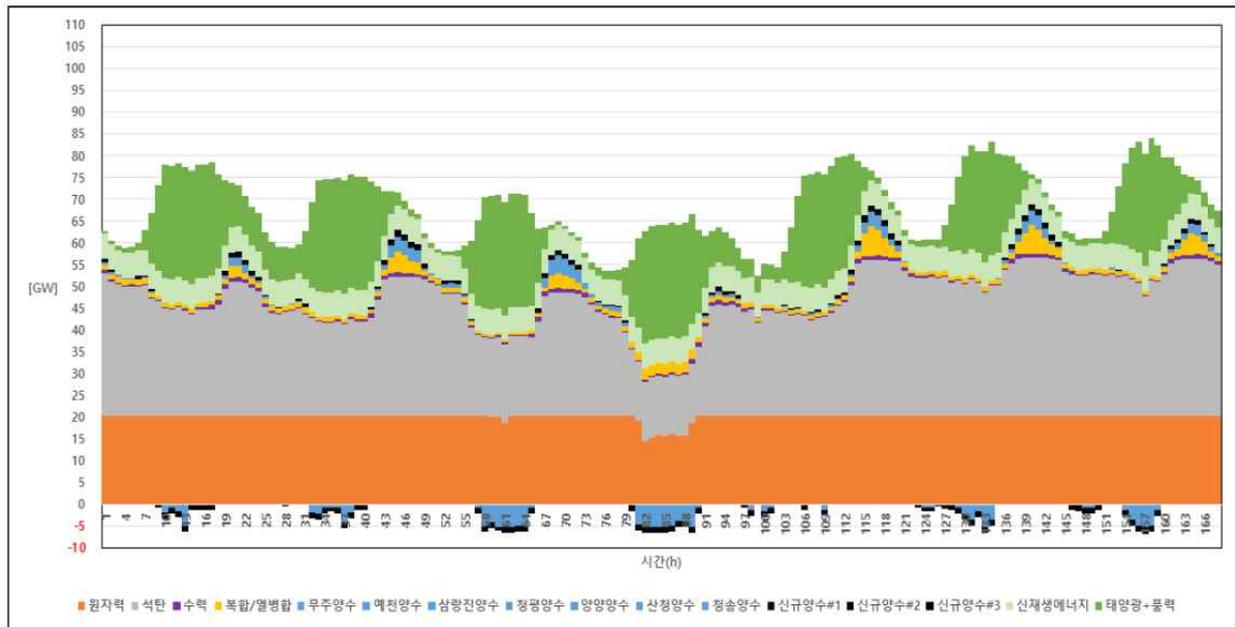
8차 반영 시뮬레이션 결과(봄)

* 1주 단위(목, 금, 토, 일, 월, 화, 수요일 순)

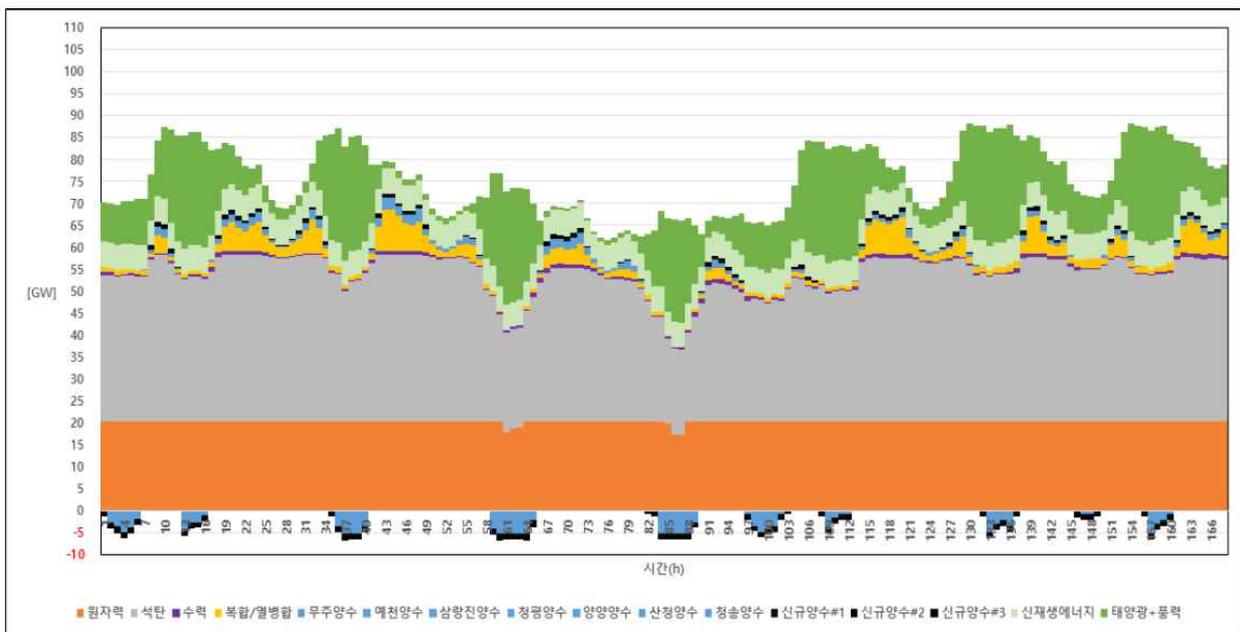
❖ 8차 전력수급기본계획 기준 2030년 시뮬레이션 결과

➢ 봄최소/최대순부하 시나리오 원전 최저출력: 14,402MW / 17,136MW

<봄 최소 순부하>



<봄 최대 순부하>



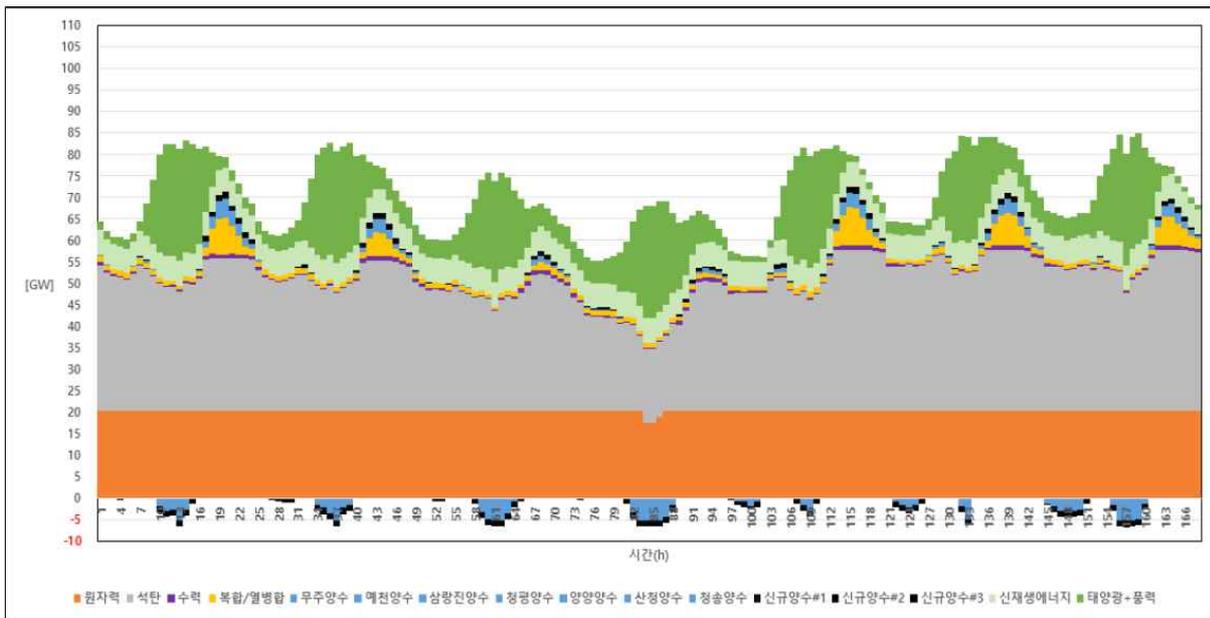
8차 반영 시뮬레이션 결과(가을)

* 1주 단위(목, 금, 토, 일, 월, 화, 수요일 순)

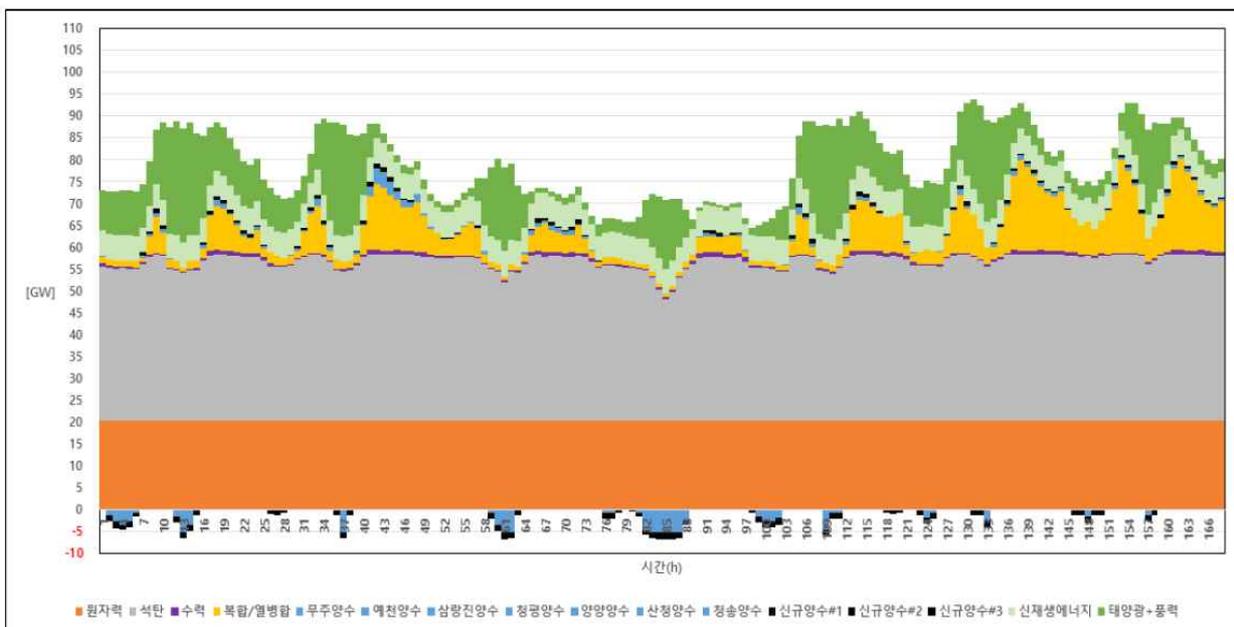
❖ 8차 기준 2030년 시뮬레이션 결과

➢ 가을최소/최대순부하 시나리오 원전 최저출력: 17,593MW / 20,400MW

<가을 최소 순부하>



<가을 최대 순부하>



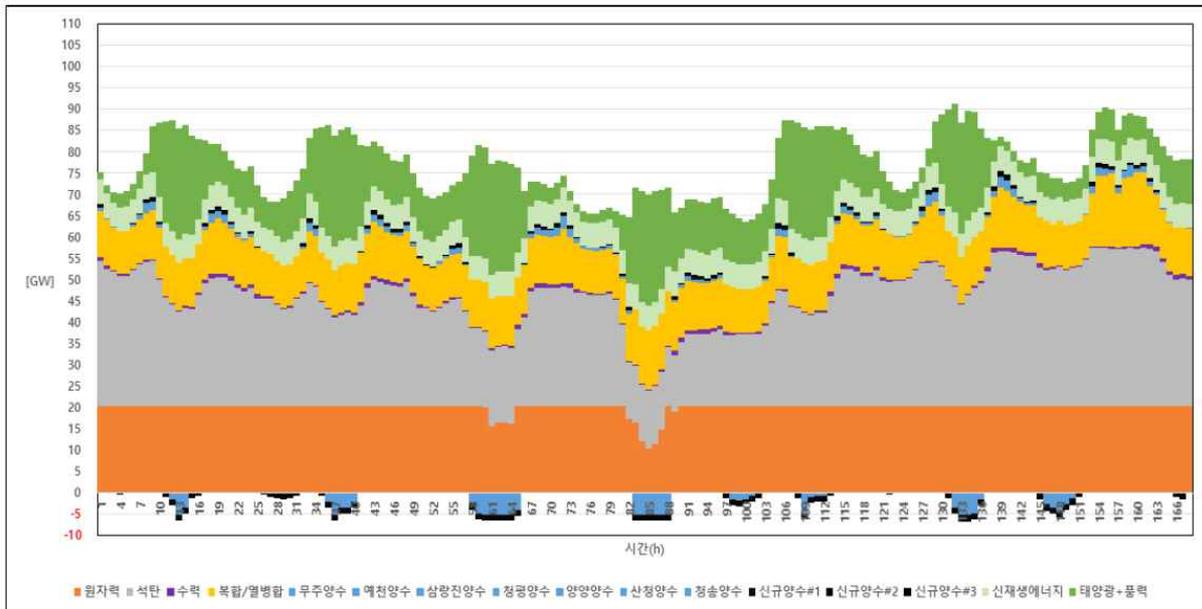
8차 반영 시뮬레이션 결과(겨울)

* 1주 단위(목, 금, 토, 일, 월, 화, 수요일 순)

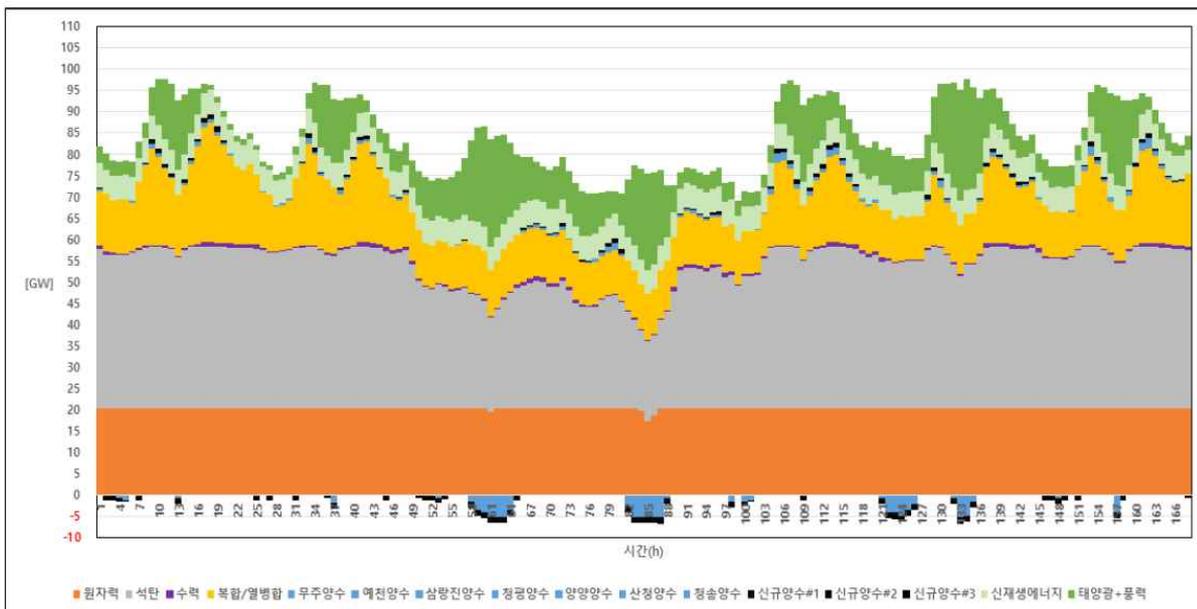
❖ 8차 기준 2030년 시뮬레이션 결과

➢ 겨울 최소/최대순부하 시나리오 원전 최저출력: 10,344MW / 17,203MW

<겨울 최소 순부하>



<겨울 최대 순부하>



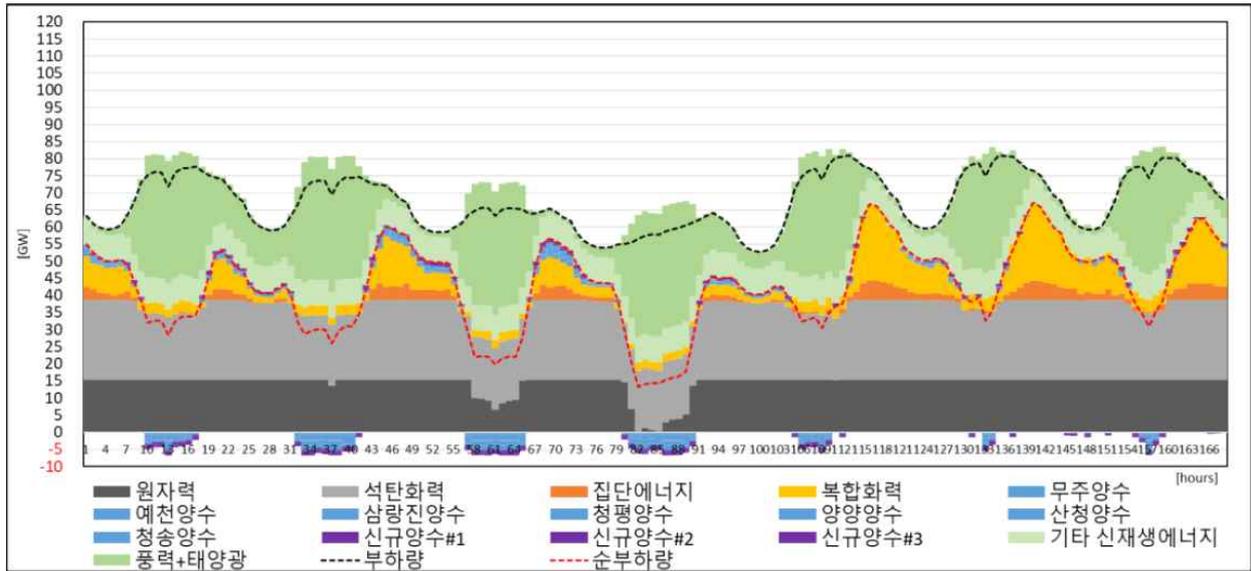
9차 반영 시뮬레이션 결과(봄)

* 1주 단위(목, 금, 토, 일, 월, 화, 수요일 순)

❖ 9차 기준 2034년 시뮬레이션 결과

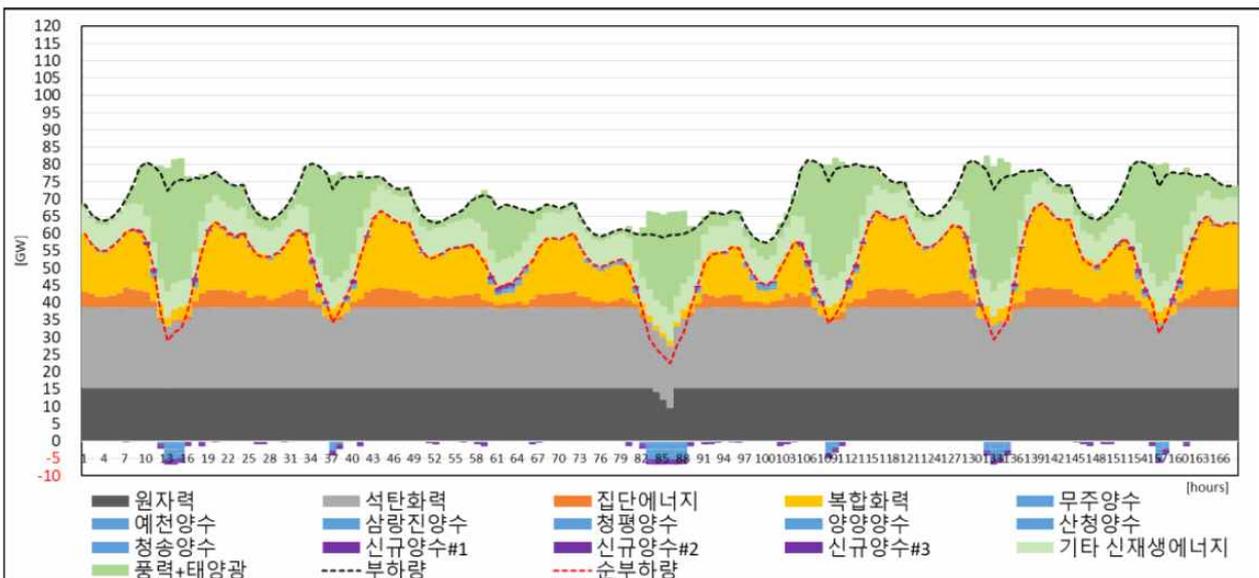
➢ 봄 최소/최대순부하 시나리오 원전 최저출력: 361MW / 9,658MW

<봄 최소 순부하>



* 봄철 최소 순부하 해설은 다음 장 참고

<봄 최대 순부하>



※ 2021. 10.12. 국정감사에서는 2034년 기준 봄철 최소 순부하 시뮬레이션을 토대로 상황을 예측함

- 9차 전력수급기본계획에 따른 2034년 재생에너지 확대와 원전 감발량 시뮬레이션 전제
 - 2034년 재생에너지 출력삭감(Curtailment) 적용해 최대출력은 36GW 기준으로 산정했음.

- 주말인 토요일과 일요일 경부하 시간대에 원전 감발량이 매우 큼.
원전 출력은 약 361MW에 최대감발량은 15GW 수준으로
APR1400 노형 원전 10기 설비용량을 감발해야 함.

* 봄철 최소(원전 감발 최대 시점)

- 부하 : 57,750MW
- 순부하 : 21,750MW
- 풍력+태양광 : 36,000MW

(풍력 : 15,573MW, 태양광 : 37,481MW 이지만 출력 제한으로 36,000MW 적용)

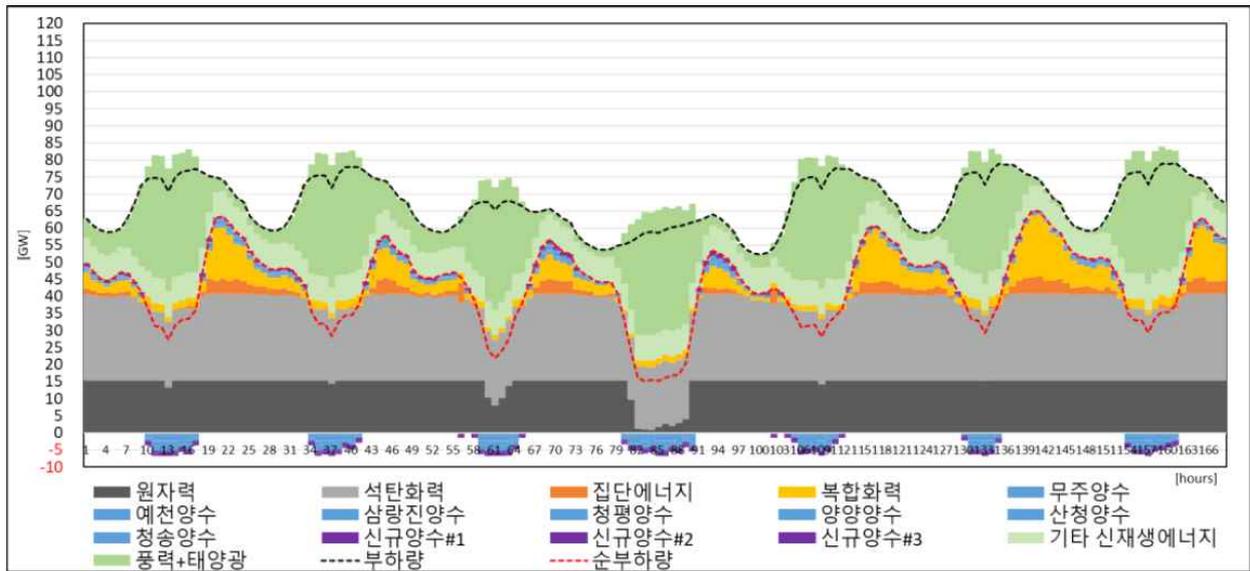
9차 반영 시뮬레이션 결과(여름)

* 1주 단위(목, 금, 토, 일, 월, 화, 수요일 순)

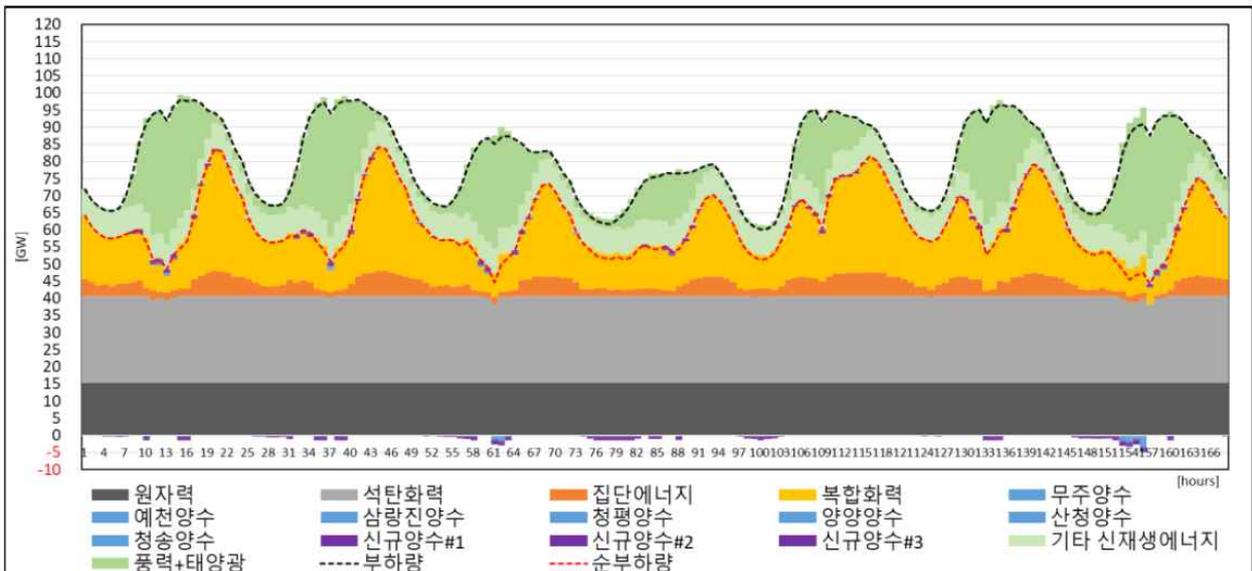
❖ 9차 기준 2034년 시뮬레이션 결과

➢ 여름최소/최대순부하 시나리오 원전 최저출력: 895MW / 15,400MW

<여름 최소 순부하>



<여름 최대 순부하>



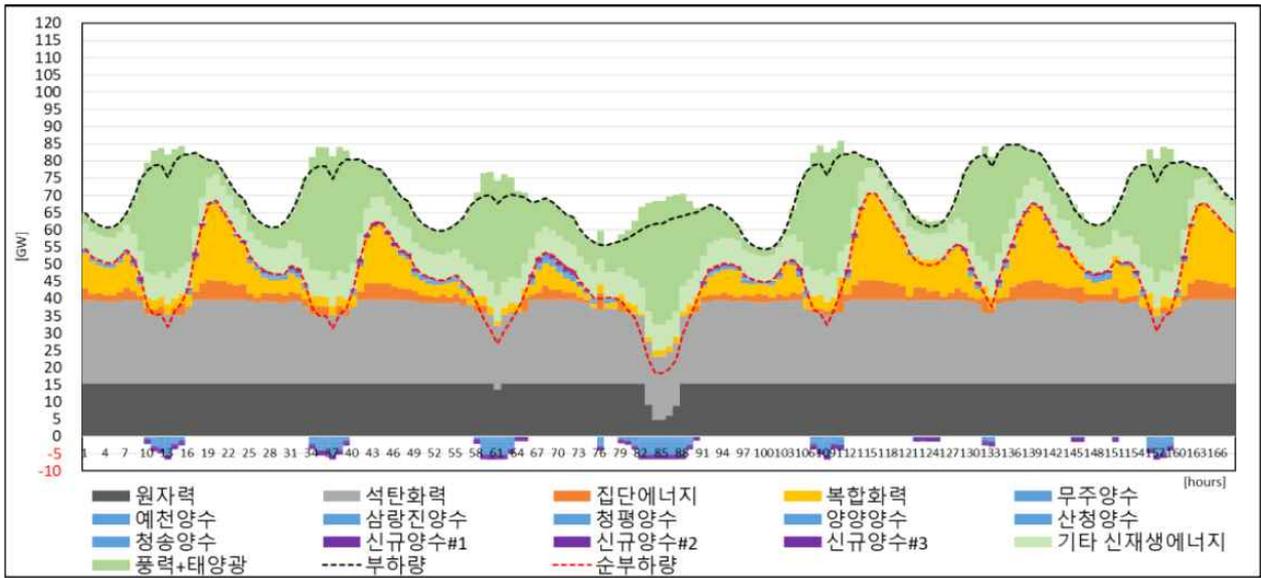
9차 반영 시뮬레이션 결과(가을)

* 1주 단위(목, 금, 토, 일, 월, 화, 수요일 순)

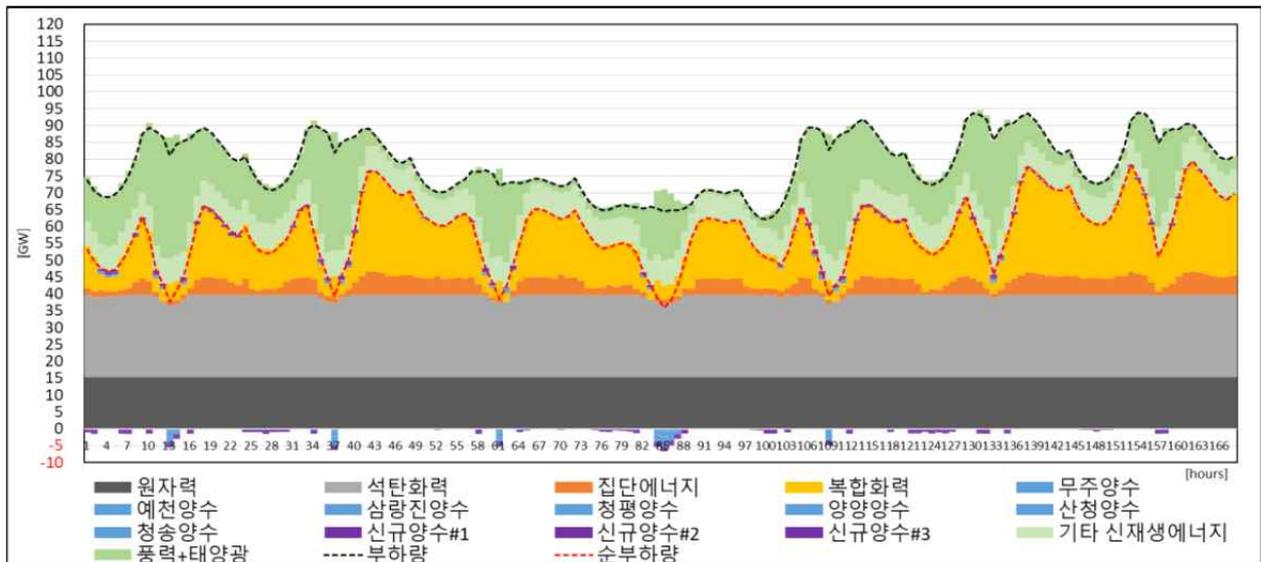
❖ 9차 기준 2034년 시뮬레이션 결과

➢ 가을최소/최대순부하 시나리오 원전 최저출력: 4,851MW / 15,400MW

<가을 최소 순부하>



<가을 최대 순부하>



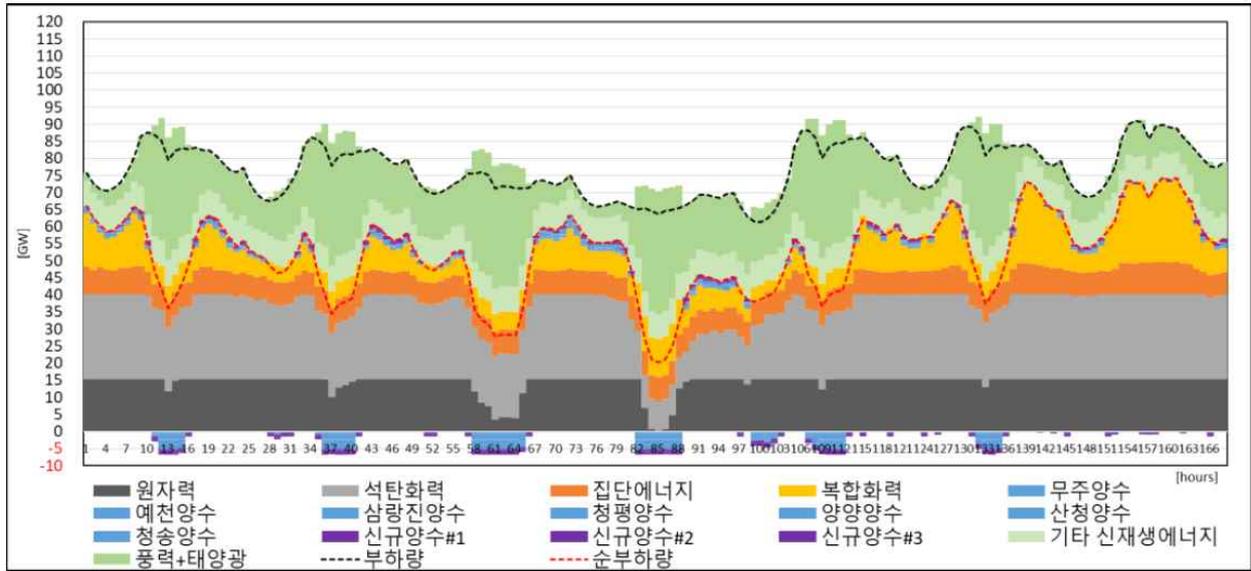
9차 반영 시뮬레이션 결과(겨울)

* 1주 단위(목, 금, 토, 일, 월, 화, 수요일 순)

❖ 9차 기준 2034년 시뮬레이션 결과

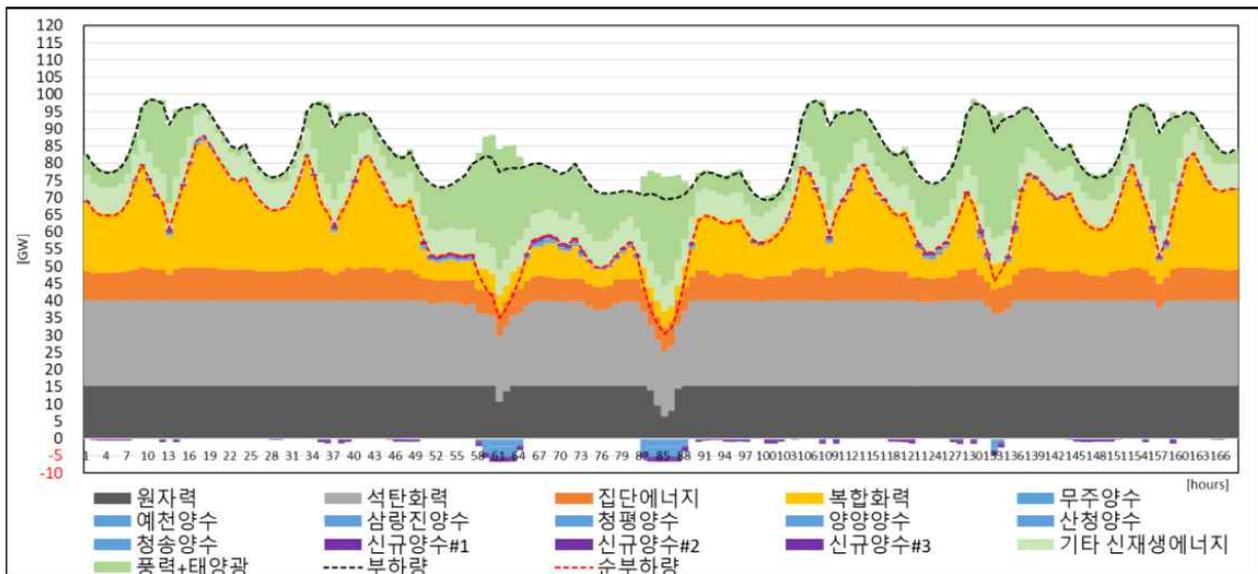
▶ 겨울최소/최대순부하 시나리오 원전 최저출력: 17MW / 6,556MW

<겨울 최소 순부하>



* 겨울철 최소 순부하 해설은 다음 장 참고

<겨울 최대 순부하>



※ 2021. 10.12. 국정감사에서는 2034년 기준 겨울철 최소 순부하 시뮬레이션을 토대로 상황 예측.

○ 9차 전력수급기본계획에 따른 2034년 재생에너지 확대와 원전 감발량 시뮬레이션 전제

- 2034년 재생에너지 출력삭감(Curtailment) 적용해 최대출력은 36GW 기준으로 산정했음.

○ 겨울철 최소 순부하는 열병합발전 등 집단에너지 부하가 높아 상황이 더 심각함.

- 원전 출력 17MW에 최대 감발량은 약 15.4GW에 달함.

* 겨울철 최소(원전 감발 최대 시점)

- 부하 : 63,697MW

- 순부하 : 27,697MW

- 풍력+태양광 : 36,000MW

(풍력 : 16,548MW, 태양광 : 28,561MW 이지만 출력 제한으로 36,000MW 적용)

8차, 9차 시뮬레이션 결과 비교

<8차, 2030년>

연도	순부하 케이스	재생E 출력 상한	원전 가용용량	원전 최저 출력	원전 최대 감발량
봄	최소 순부하	26,000	20,400	14,402	5,998
	최대 순부하	26,000	20,400	17,136	3,264
여름	최소 순부하	26,000	20,400	15,123	5,277
	최대 순부하	26,000	20,400	20,400	0
가을	최소 순부하	26,000	20,400	17,593	2,807
	최대 순부하	26,000	20,400	20,400	0
겨울	최소 순부하	26,000	20,400	10,344	10,056
	최대 순부하	26,000	20,400	17,203	3,197

*예방정비 고려 X

<9차, 2034년>

연도	순부하 케이스	재생E 출력 상한	원전 가용용량	원전 최저 출력	원전 최대 감발량
봄	최소 순부하	36,000	15,400	361	15,039
	최대 순부하	36,000	15,400	9,658	5,742
여름	최소 순부하	36,000	15,400	895	14,505
	최대 순부하	36,000	15,400	15,400	0
가을	최소 순부하	36,000	15,400	4,851	10,549
	최대 순부하	36,000	15,400	15,400	0
겨울	최소 순부하	36,000	15,400	17	15,383
	최대 순부하	36,000	15,400	6,556	8,844

*예방정비 고려 O

원전 출력감발 위험성

■ 해외사례

- 출력감발이 빈번해 질 경우 원전 안전성 문제도 심각. 프랑스와 독일의 경우 일부 원자력발전소가 주파수제어 및 부하추종운전을 하고 있지만, 안전상 이유로 대다수는 원전은 고정출력으로 운전 중임.
- 특히 독일은 몇 해 전 핵연료가 부하추종운전 중 손상되는 문제가 발생해 원자력업계와 규제기관 사이 논쟁이 진행되기도 함.

<해외 원전 출력감발 및 부하추종운전 사례>

- **(프랑스)** 상당수 원전들은 최대 고정출력 운전하며, 일부 원자력들이 주파수제어, 부하추종운전 모드로 운영 중('18년 기준)
 - 유럽 국가 간 전력망 연계로 인해 원전 2차 주파수제어가 중요
- **(독일)** 총 23기 원전 보유 중('17)이며, 일부 원자력 발전기들이 주파수제어 및 부하추종운전 중(신재생 간헐성 증가로 인해 원전 부하추종운전 능력이 중요)
- **(벨기에)** 총 7기 원전 593만kW 보유('17), 주파수제어 및 부하추종운전 중
- **(캐나다)** 일부 원전 주파수 제어 및 부하추종운전 중
 - 경부하기간 기저발전 필요량을 초과할 경우 출력감소 운전을 시행하며, 장기적 부하 감소가 예상될 경우는 원자력을 정지
- **(미국)** 대부분 baseload 고정출력 운전 중
 - 2019년부터 flexible operation에 대한 가능성과 기술적·물리적 제약(제어방법, 냉각재, 장기적 영향 등) 검토 중
- **(중국)** 대부분 baseload 고정출력 운전 중
 - 전체 설비용량 중 원전의 비중이 약 4%로 미미하여 원전감발 불필요

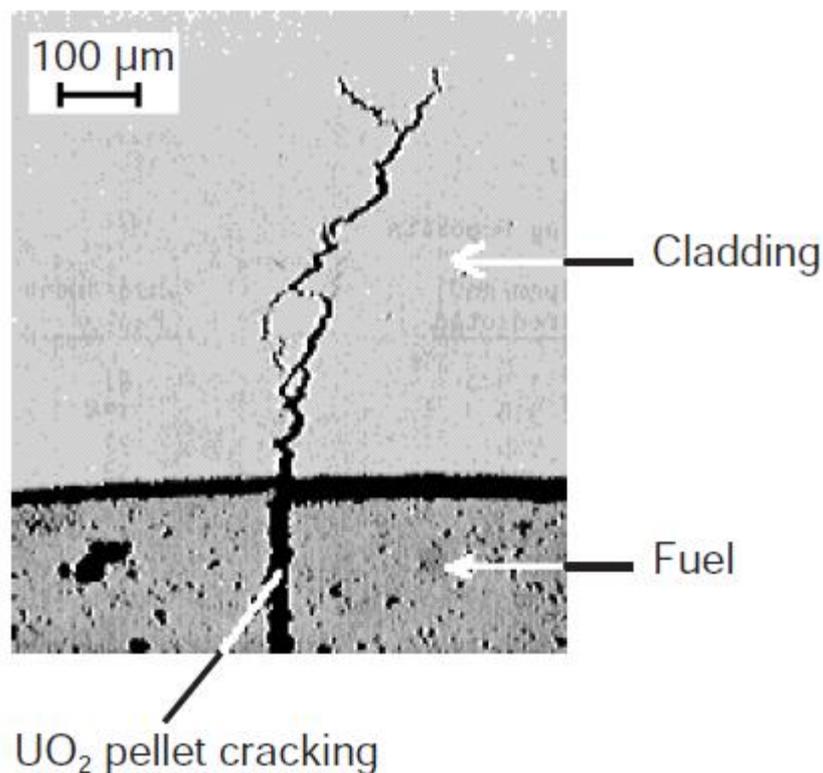
출처 : 한국전력거래소

- 미국도 일부 주에서 재순환펌프를 통한 출력조절이 용이한 비등경수로(BWR)에는 유연운전(flexible operation)을 시행했지만, 우리처럼 가압경수로(PWR)는 아직 경험이 부족한 상태.

■ 원전 상시적 출력감발 및 부하추종운전 안전성 검토

- 한국원자력안전기술원(KINS)은 2020년 2021년 한국전력거래소가 시행한 경부하기 출력감발은 원자력안전법과 운영기술지침서 등을 준수한 정상운전이라고 밝혔다.
- 하지만 부하추종운전처럼 상시화되는 것은 ▲노심 안전성 ▲피복관 피로 하중 등 핵연료 건전성 ▲기기 및 부품 건전성 등 이유로 새로운 안전규제와 심사, 검사지침, 설비기준 등이 필요하다는 입장(별첨).
- KINS 자료 중 핵연료 건전성 부분 우려와 실제 핵연료봉 소결체와 피복재 균열현상을 보여주는 그림. 핵연료 방사성물질을 1차, 2차로 막는 소결체와 피복재가 손상되면 방사성물질이 그 사이로 누출되는 위험 상황 발생.

<핵연료봉 소결체와 피복재 균열 현상>



(출처 : OECD NEA 2012, Nuclear Energy & Renewables: System Effects in Lowcarbon Electricity Systems)

〈원자력발전소 부하추종운전에 필요한 안전성 평가 중
핵연료 건전성 부분 발췌〉

- 급격한 출력변화에 따른 영향 평가
 - 급격한 출력변화는 소결체-피복재 상호작용(Pellet Cladding Interaction, PCI)을 통해 과도한 핵연료 피복관의 변형 및 손상을 초래할 수 있으므로 출력변화가 클 경우 PCI 영향에 대한 검토가 필요함 (예상운전과도시 피복

(출처 : 한국원자력안전기술원)

결론

- 8차, 9차 전력수급기본계획의 전력 믹스에 따른 계절별 최소 순부하 시뮬레이션 결과, 2030년 이후 원자력발전소 출력 감발을 매주 주말마다 시행해야 하는 상황 발생할 가능성 높음을 확인함
- 원자력발전소 출력감발은 횟수가 증가할수록 노심안전성 및 핵연료건전성 등 원전 안전에 영향을 주는 것으로 분석됨
- 원전 부하추종운전은 현행법과 내부규정, 현 가동 중인 설비 등을 고려했을 때 현재 시점에서 시행은 불가함을 확인함
- 2017년 「3020 에너지전환 로드맵」은 2084년¹⁾경까지 원전의 점진적 감축을 정책으로 채택했고, 최근 탄소중립위원회 발표에선 2030년 원전 비중을 23.9%(146.4TWh)²⁾로, 2050년에는 최대 6.1%(76.9TWh)³⁾까지 가동을 전망함
 - 1) 신고리 5,6호기 완공을 2024년으로 예상할 경우 설계수명 60년 반영한 결과
 - 2) 「2030 국가 온실가스 감축목표 상향안」(2050 탄소중립위원회)
 - 3) 「2050 탄소중립 시나리오안」 중 A안(전환부문 배출량 제로화) 기준(2050 탄소중립위원회)
- 2030년 재생에너지 비중이 20% 이상 늘어나고, 지속적으로 확대되는 가운데 원자력발전소는 상시적 출력감발이 예상되며, 이는 원전 안전에 심대한 지장을 초래할 수 있음
- 2021년 10월18일, 2050 탄소중립위원회가 발표한 「2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)」에 따르면, 시뮬레이션 조사 시점보다 신재생에너지 비중이 30.2%로 확대 상향됨에 따라 재분석 시 경직성 발전원인 원전은 전력계통 안정성을 더욱 위협하게 될 것
- 현재 상정한 원전 발전량으로도 이미 전력망 안정성을 심각하게 위협하고 있음. 추가로 2030년 재생에너지 비중이 20%에서 30.2%로 늘어나면 원전 가동률은 더 보장이 안 됨. 이번 시뮬레이션 결과로 신규원전 건설 등 주장이 전력계통 안정성을 위해서도 허용되지 않는다는 사실 확인

원자력발전소 부하추종운전에 필요한 안전성 평가

한국원자력안전기술원('20.9)

□ 노심 안전성에 미치는 영향 검토

○ 핵설계 방법론 재평가

- 전 주기 운전이력을 반영하여 매 주기 재장전 노심의 핵설계를 수행하여야 함. 장기간 운전이력에 감발운전, 제어봉삽입운전 등이 있을 경우 이를 다음 주기 설계에 반영해야 함
- 순시 부하추종운전은 출력분포에 영향을 줄 수 있으므로 부하추종 패턴을 사전에 고려하여 차주기 핵특성을 평가할 필요가 있음. 빈번한 제어봉 삽입에 따른 축방향 출력분포의 불균형이 노심설계에 영향을 줄 수 있으므로 이에 대한 평가가 필요함

○ 노심 운전제한조건(운영기술지침서 3.1절, 3.2절) 변경 검토

- 운전영역 확장과 관련하여 노심 운전제한조건이 변경될 수 있으므로 이에 대한 검토가 필요함
- * 운전제한조건: 정지여유도, 반응도평형, 감속제온도계수, 제어봉집합체 삽입한계, 선출력밀도, 핵비등이탈률 등

○ 원자로출력 및 출력분포 진동 제어 영향 평가

- 빈번한 출력변동 및 제어봉 운전으로 예상되는 출력 및 출력분포 진동을 허용범위 이내로 제어해야 하므로 이에 대한 재평가가 필요함
- * 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 제19조(원자로출력 및 출력분포 진동 제어)

원자로의 노심냉각계통·제어계통 및 보호계통은 연료허용손상한계를 초과하는 상태를 유발할 수 있는 출력 및 출력분포 진동이 발생되지 아니하도록 설계하거나 이를 적절하게 탐지하고 제어할 수 있도록 설계하여야 한다.

□ 핵연료 건전성에 미치는 영향 검토

○ 피복관 피로 하중 평가

- 순시 부하추종 운전은 핵연료 피복관에 피로 하중을 누적시켜 피복관을 손

상시킬 수 있으므로 부하추중 빈도를 제한하고 있음 (경수로형 원전 안전심사지침(KINS/GE-N001) 4.2절, '설계 피로수명 허용기준' 관련)

- 피복관 피로 평가 시, 핵연료 수명말까지 보수적으로 1일 100-15-100 %FP의 부하추중 운전을 가정하여 핵연료 건전성이 기 평가(핵연료 특정기술주제보고서, TR)되어 있으나, 필요시 관련 검토가 수행되어야 함

○ 급격한 출력변화에 따른 영향 평가

- 급격한 출력변화는 소결체-피복재 상호작용(Pellet Cladding Interaction, PCI)을 통해 과도한 핵연료 피복관의 변형 및 손상을 초래할 수 있으므로 출력변화가 클 경우 PCI 영향에 대한 검토가 필요함 (예상운전과도시 피복관의 탄-소성 변형률이 1% 보다 작도록 출력변화는 제한됨, 경수로형 원전 안전심사지침(KINS/GE-N001) 4.2절)
- 부하추중운전은 정상운전 범위에서 수행이 될 것으로 예상되는 바 핵연료 건전성에 영향을 미치지 않을 것으로 보이나, 출력증발율(3 %FP/hr) 등의 운전조건 등이 변경되면 이에 대한 검토가 필요함

□ 기기/부품의 건전성에 미치는 영향 검토

○ 설계과도상태의 적절성 평가

- 제어봉구동장치(압력경계부품), 가압기 및 증기발생기 등에 대한 설계과도상태(정상상태, 시험상태 및 과도상태 등) 운전조건에 대한 재평가가 필요

* 신고리 3,4호기 FSAR 3.9.1절(기계기기에 대한 특수사항)

원자로냉각재 환경영향을 포함한 피로 평가결과를 반영하여 피로감시시스템을 구축하고 감시프로그램 운영을 통해 실제적 운전과도상태 및 발생 횟수를 감시하여 기기의 피로를 관리한다. - 중략 -

KEPIC(해외구매품목은 ASME 코드) 1 등급과 노심지지기기의 응력 해석시 사용되는 설계기준사건과 발생빈도가 표 3.9-1에 요약되어 있다.

○ 제어봉구동장치 기능시험의 적절성 평가

- 제어봉구동장치(압력경계/비압력경계 부품)에 대한 기능시험을 재평가하여 설계적합성을 확인해야 함

□ 계측제어계통 변경에 대한 검토

○ 순시부하추종 운전 관련 설계변경 필요

- 현재 운영중인 원전의 터빈/발전기와 원자로출력제어계통에는 순시 부하추종운전을 할 수 있는 기능이 구현되어 있지 않음.
- 순시부하추종 운전을 위해서는 신규 센서 추가와 기존 원자로출력제어계통에 대한 설계변경 등이 수반되어야 함.
- 신규 및 설계변경되는 설비는 비안전 등급으로 설계될 것으로 예상되나 기존의 안전등급 계측제어계통에 미치는 영향이 없는지 평가되어야 함.

□ 인허가 요건 검토

○ 부하추종운전 여부 및 방법

- 원자력발전소의 부하추종운전 수행 여부 및 방법(주파수추종 혹은 일일부하추종 등)은 국가 전력부하 분배에 대해 산업통상자원부, 한국전력, 한수원 등 유관기관이 협의하여 결정할 사안임.

○ 법령 및 제도적 변경 관련

- 부하추종운전은 운영기술지침서 및 관련 운영절차서를 만족하는 한 정상적인 운전의 한 형태로 볼 수 있으므로 관련한 법령 및 제도적 변경은 없을 것으로 예상됨
- 규제기관은 인허가를 통해, 한수원이 하고자 하는 부하추종운전 방법이 「원자력안전법」 제21조제1항)의 허가기준에 적합한지 검토를 수행함
- 관련 설계 기준 : 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 제12조(안전등급 및 규격), 제15조(환경영향 등에 관한 설계기준), 제17조(원자로의 설계), 제18조(원자로의 고유보호), 제19조(원자로출력 및 출력분포 진동 제어), 제20조(계측 및 제어장치), 제22조(원자로냉각계통 등), 제26조(원자로보호계통), 제28조(반

- 1) 위원회규칙으로 정하는 발전용원자로 및 관계시설의 운영에 필요한 기술능력을 확보하고 있을 것
2. 발전용원자로 및 관계시설의 성능이 위원회규칙으로 정하는 기술기준에 적합하여 방사성물질등에 따른 인체·문화 및 환경의 재해방지에 기장이 없을 것
3. 발전용원자로 및 관계시설의 운영으로 인하여 발생하는 방사성물질등으로부터 국민의 건강 및 환경상의 위해를 방지하기 위하여 대통령령으로 정하는 기준에 적합할 것

용도 제어계통) 등

- 다만, 부하추중운전에 따른 핵연료, 핵설계, 제어봉 건전성 등 영향평가가 추가로 수행되어야 하며 계통, 기기 추가 등의 설계변경이 필요하면 이에 대한 인허가가 요구됨
- 또한, 부하추중운전과 관련된 시험, 운전원 교육, 운전절차의 수립 등에 대한 확인이 필요함.

□ 심/검사 영향 평가

○ 최종안전성분석보고서 및 관련 운영기술지침서 개정 검토 필요

- 부하추중운전과 관련한 설계변경(예: 제어봉 및 붕소농도조절 방법, 자동운전제어기, 주과수제어 운전 등)에 대한 적합성을 확인하여야 함.
- 부하추중운전에 따른 영향(노심, 핵연료, 기기건전성 등) 평가를 통해 그 적합성을 확인하여야 함.
- FSAR 제3장(구조물,부품,기기 및 계통의 설계), 제4장(원자로), 제6장(공학적 안전설비), 제7장(계측제어), 제8장(전력계통), 제9장(보조계통), 제10장(증기 및 동력변환계통), 제11장(방사선평기물관리), 제15장(사고해석), 제16장(기술지침서), 제17장(품질보증), 제18장(인간공학) 등

○ 심사 및 검사지침서 개정 필요

- 관련 인허가 심사와 관련하여 심사지침서 개정이 필요
- 관련 설계변경에 따라 검사항목 및 내용이 변경될 수 있으며 이에 따른 정기검사지침서 개정이 필요

2030년 재생에너지 확대와 전력계통 부하로 본 원자력발전소의 출력감발과 안전성 문제

제8차(2030)와 제9차(2034) 전력수급기본계획의
원전 출력감발 비교 시뮬레이션을 중심으로

더불어민주당 국회의원 양이원영
홍익대학교 교수 전영환