

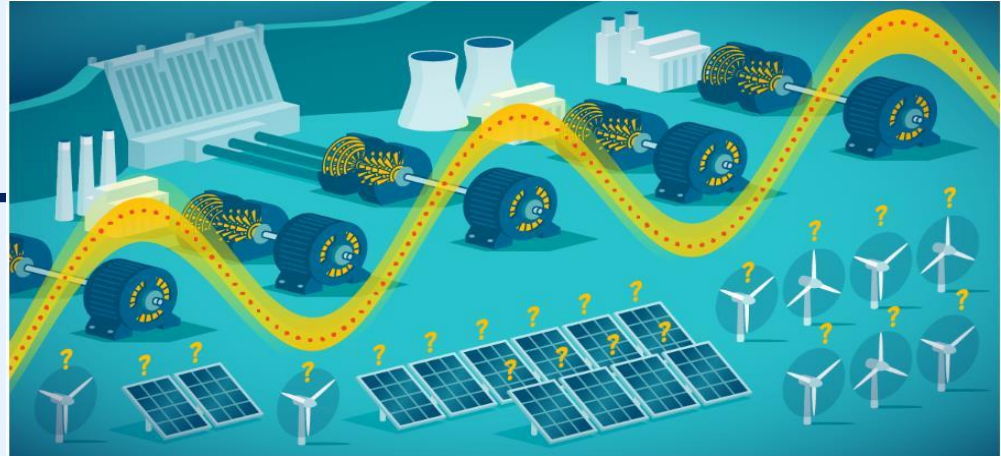
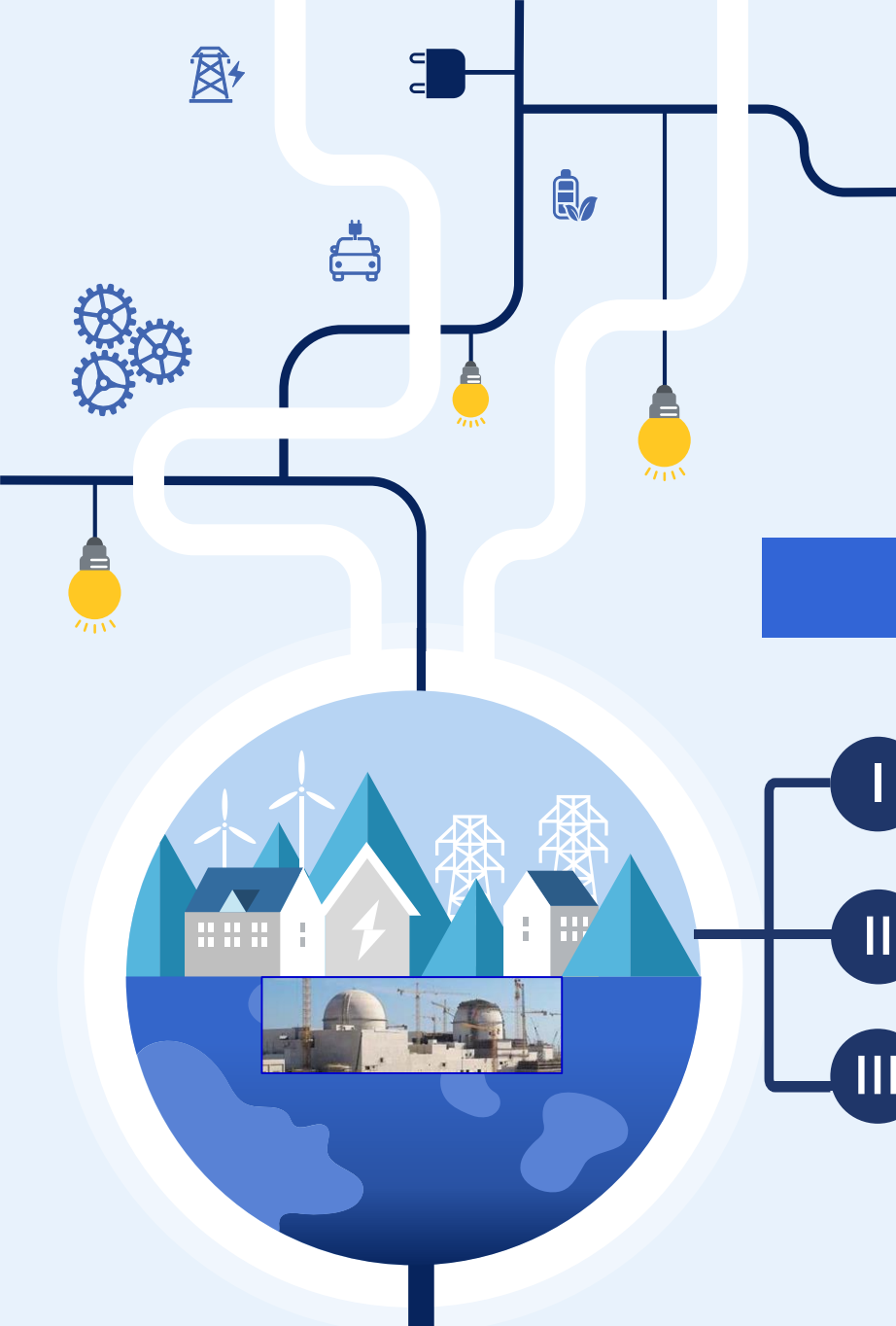
그림 출처 : "Grid Inertia – Fundamental concepts and the Developing Landscape" ('20. EPRI)

국내 전력계통 여건을 고려한 무탄소 전원 확대방안

2024.05.09

한국전력공사

곽은섭

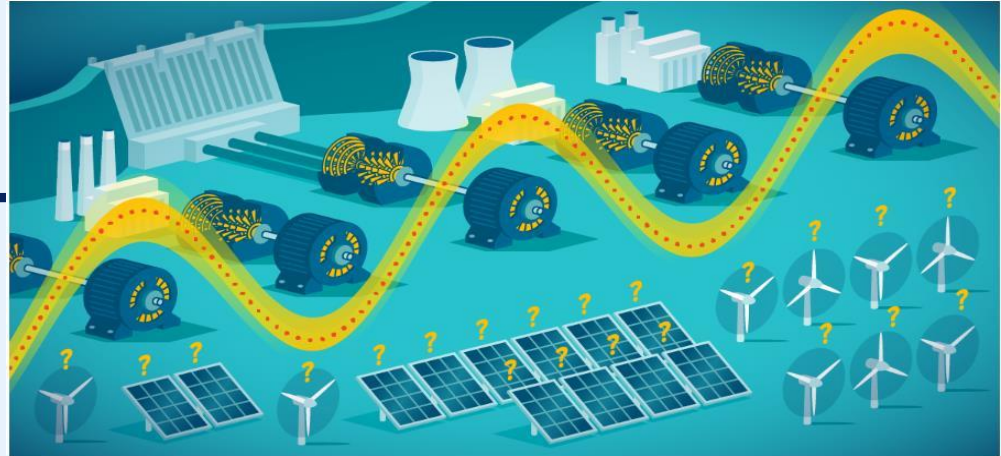


CONTENTS

I 국내 전력계통 특성

II 무탄소 전원 확대(전력계통 수용성) 장애요인

III 무탄소 전원 확대(전력계통 수용성) 방안

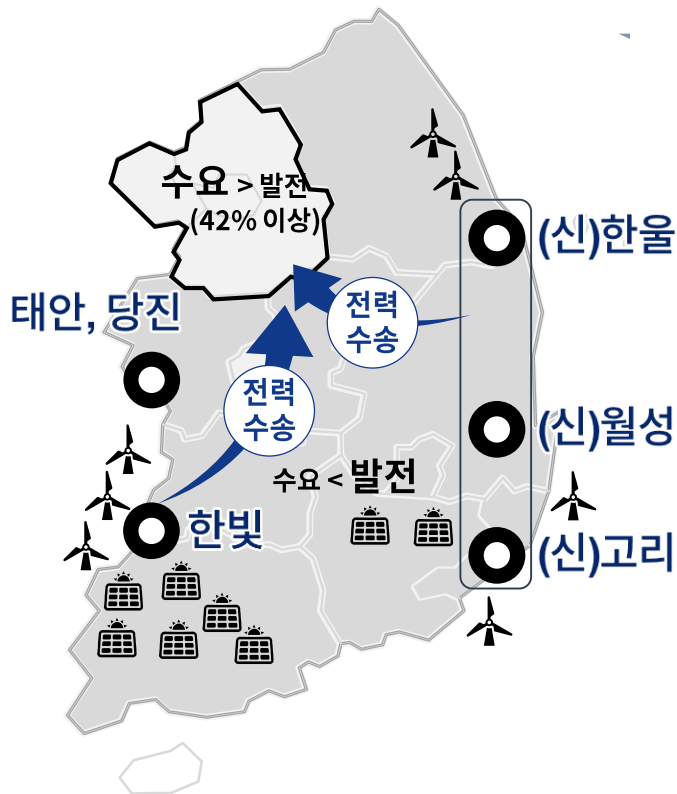


검 토 전 제

- ① 대표적 무탄소 전원인 원전과 재생e는 병립 운영.
전력계통 계획/운영에서는 이를 수용할 기반을 마련
- ② 재생e의 유연성 확보와 안정적 운영이 원전을 비롯한 기존 동기발전기의 이용률 유지에 중요
- ③ 또한, 재생e가 안정적으로 운영되기 위해서도 동기발전기 유연성/계통기여 강화가 전제되어야

국내 전력계통 특성

고도의 전력계통 효율화, COMPACT 추구 시스템 (초고속 압축 성장 모델)



- ▶ 1GW를 초과하는 단위 발전기 용량(최대 Unit 1.4GW)
- ▶ 비수도권 몇 개 지역에 분포된 각 20GW 수준 대규모 발전단지
- ▶ 대규모 발전단지 인출위한 2~3개의 345, 765kV 초고압 송전계통

- ▶ 수도권(42% 이상) 공급력은 6개 초고압 대용량 송전선로에 의존
- ▶ 관성공급, 수급균형 등 유지할 국가간 연계선로가 없는 단일 계통

- ▶ 관성공급이 없는 재생에너지도 기존 발전단지 특성 반복 성향

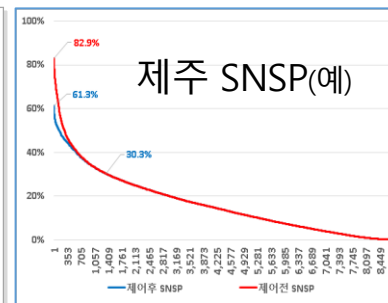
* 사업용, 상계거래 포함, 자가용 제외 ('24.1월)

단위 : GW(개소)

구분	수도권	충청	강원	호남	영남	제주	합계
태양광	2.4 (19만)	5.3 (17만)	2.0 (6만)	10.9 (23만)	6.4 (24만)	0.6 (2만)	27.6 (91만)
점유비(%)	8.7	19.2	7.2	39.5	23.2	2.2	100

- ▶ 고유의 전력계통 특성에 기반한 계통관성, ROCOF, SNSP (System Non-Synchronous Penetration) 등에 취약한 문제

$$SNSP = \frac{(\text{실시간})[\text{비동기 발전력} + \text{국가간 연계선로 수입 발전력}]}{(\text{실시간})[\text{총 전력수요} + \text{국가간 연계선로 수출 발전력}]} \times 100(\%)$$



* 출력제어 전 최대 SNSP는 82.9%, 출력제어 시행으로 실제로는 30.3~61.3% 기록

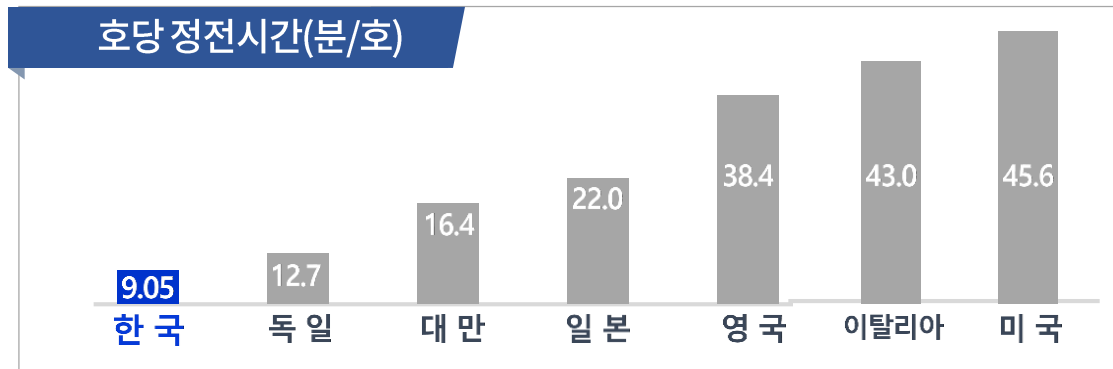
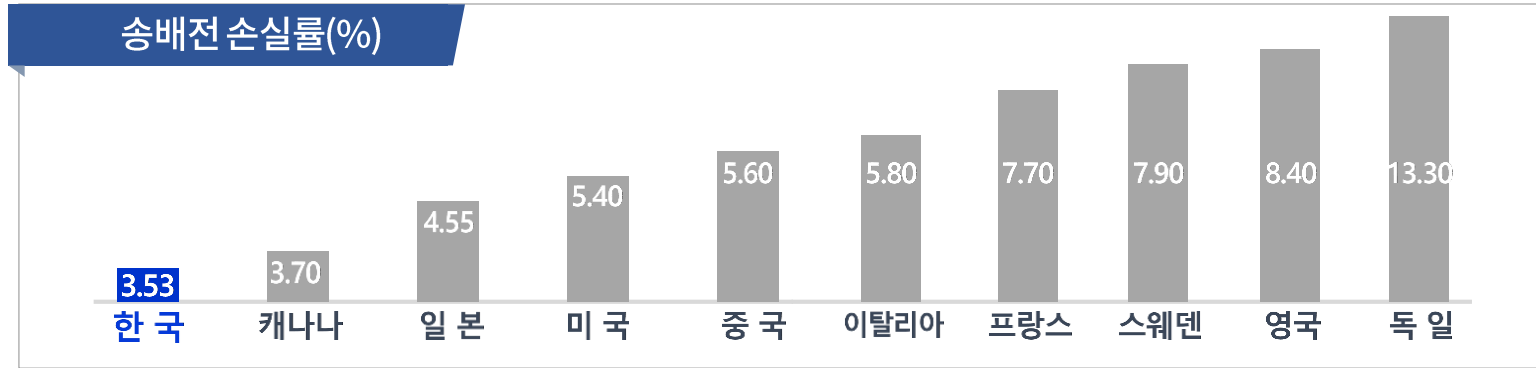
* 제주 HVDC가 없는 경우는 30% 수준 일 것으로 평가

* 연계선로 등 계통수용 확대 방안의 중요성을 시사

국내 전력계통 특성

출처 : 한전 통계

» 고유의 전력계통 특성에 따른 결과 (자타공인 세계 최고의 전력품질)



규정 V, F 유지율

- 전압, 주파수 유지율 : 99% 이상
- 해외 : 95~99%

*** 지역적 특성이 있는 전압은 90년대 후반 이후 해외 별도 공시 통계 없음

계통 고장 사례 ** 최대전력 변전(GW) : '61(0.3) → '70(1.6) → '80(5.5) → '90(17.3) → '00(41) → '10(71.3) → '20(89.1)

장소	일시	고장 개요	고장 지장 규모
서울	'71.09.27	• 서울#5호기 탈락 → 주파수 저하 → 발전기 추가 탈락 → 계통불안정 → 전계통 정전	1,278MW, 1시간
대구	'86.10.10	• 345kV 송전선 Trip → 단독계통 → 발전기 추가 탈락 → 계통불안정 → 광역정전	2,470MW, 17분
서울	'91.11.19	• 345kV 송전선 Trip → 154kV 계통 과부하, 저전압 → 수도권 계통불안정 → 광역정전	3,025MW, 26분

» 고유의 전력계통 특성에 따른 결과 (자타공인 세계 최고 전력품질. But, 동전의 양면)

현재 전력계통

현재 전력계통 + IBRs

설비 과부하

» 수요, 전원 증가에 비해 송전망 **건설 지연**

➔ 설비 허용 능력 초과 → 설비 이상 → 지역 정전

» 재생e 지역편중, 이용률 편차(지역내 0~90% 가능)

➔ 지역내 송전망 혼잡, 지역간 유통선로 문제 동시 발생

고장전류 증가

» 발전력 증가 및 계통 다중 연계

➔ 고장 제거 불가 → 광역 계통 고장

» 저관성으로 단락용량(고장전류) 부족, 초과문제 동시

➔ 적정 SCR 유지, 보호 Relay 동작, X/R비 확대문제 등



주파수

» 수요 및 재생e 급변동, 대형 발전기, 부하의 정지

➔ 발전기 연쇄 정지 → 광역 계통 고장

» 공급변동, Rocof, 주파수 급락으로 계통고장 파급우려

» 1GW 초과 Unit 발전기 고장시 계통 파급 영향 확대

» 주파수 안정도는 대용량 발전기, 재생e 수용량을 결정

전압

» 주요 선로 고장, 수요 및 재생e 급변동

➔ 주요 선로 고장시 전압 Cascading → 광역 계통 고장

» 계통 저관성에 따른 무효전력 수급유지 어려움

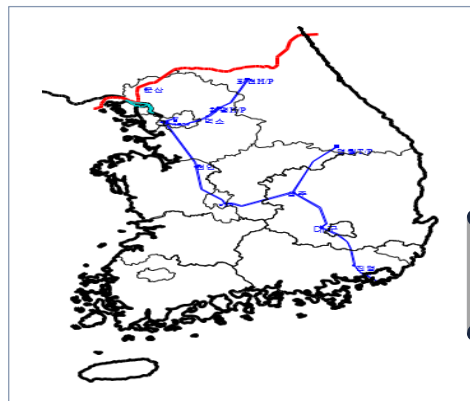
» 발전기 또는 송전선 고장시 전압불안정 영향 확대

» 재생e 계통기여 요구(GridCode) 및 신뢰성 필수

국내 전력계통 특성

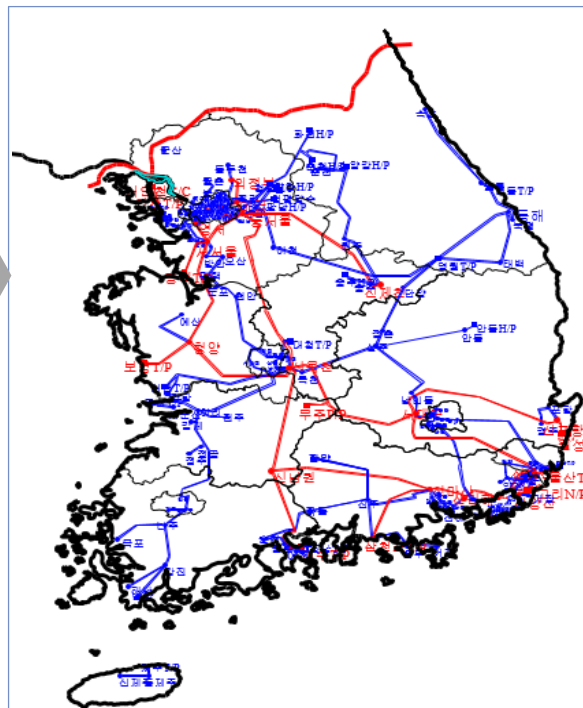
154 kV
345 kV
765 kV

참고 국내 전력계통 변천과정



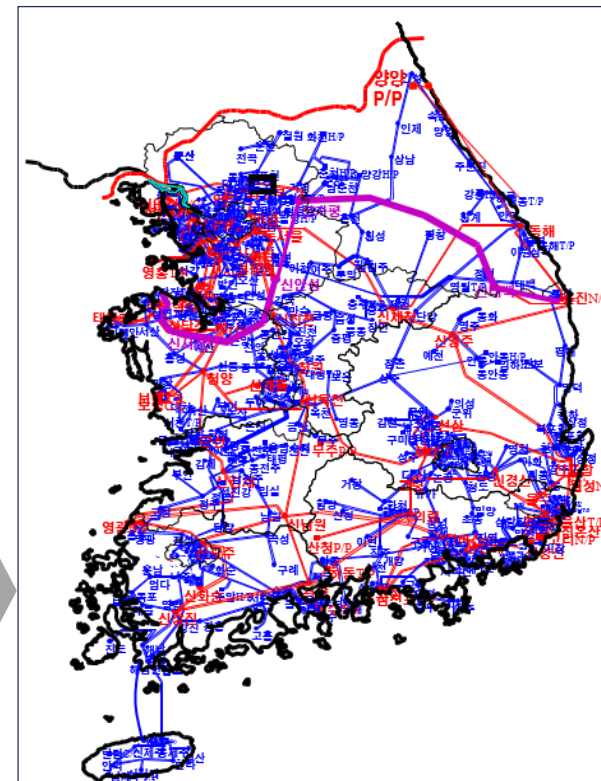
1961년

- 송전 : 5,238 C-km
- 발전 : 367MW
- 수요 : 306MW



1981(80)년

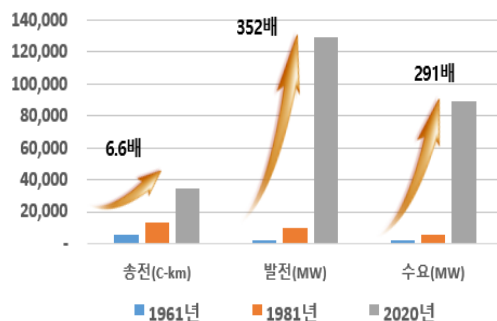
- 송전 : 13,059 C-km
- 발전 : 9,391MW
- 수요 : 5,460MW



2020년

- 송전 : 34,644 C-km
- 발전 : 129,191MW
- 수요 : 89,091MW

지난 60년간 전력계통 확대 추이



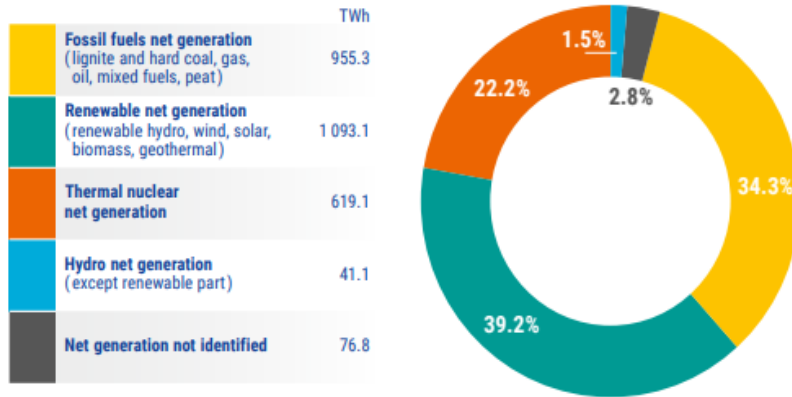
국내 전력계통 특성

참고 ENTSO-E Gen Mix

<< ENTSO-E >

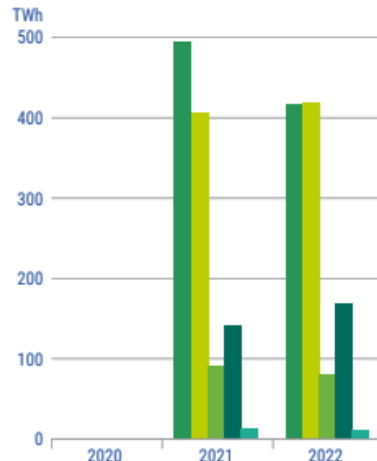
- European Network of Transmission System Operators for Electricity
- 40 Members from 36 countries are part of ENTSO-E
- 발전량은 3,659.1TWh('18년, 2,785('22)) 로 국내 571.8TWh('22년) 의 6.4배 수준

Generation mix in ENTSO-E member TSOs in 2022¹

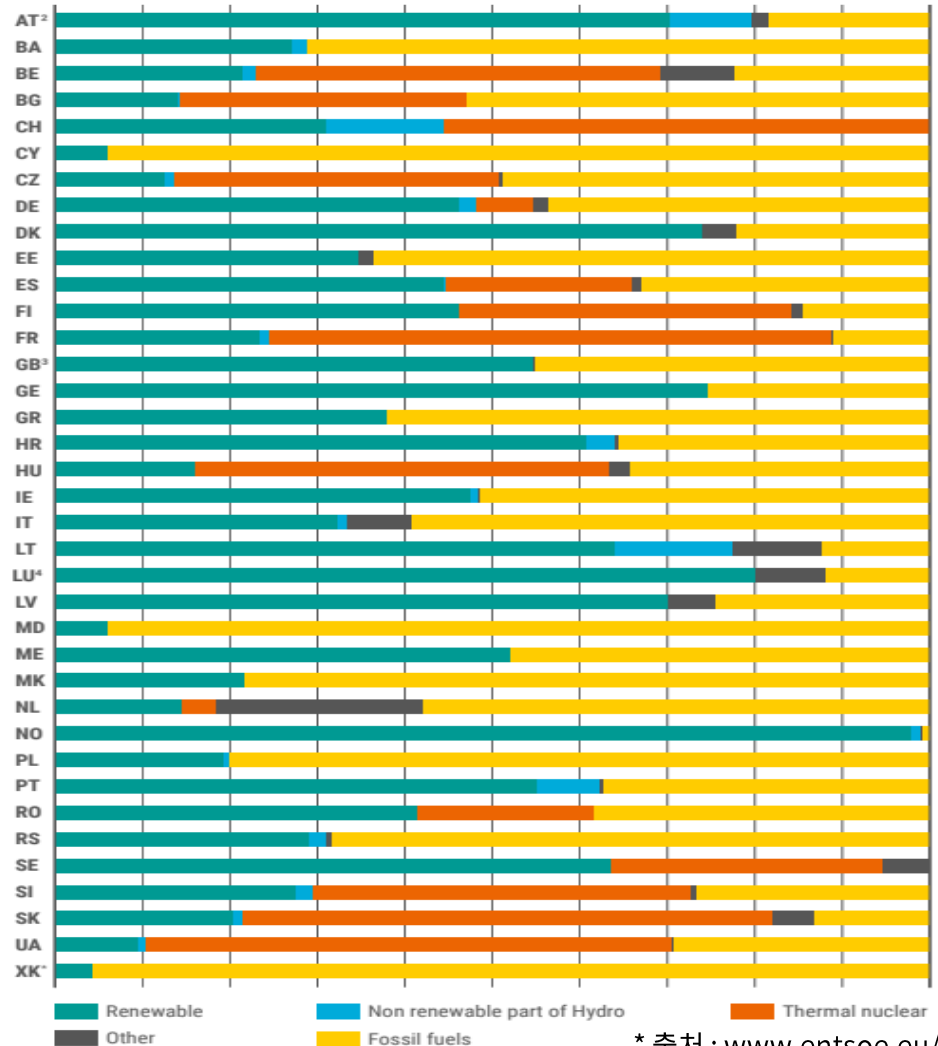


ENTSO-E renewable generation¹

	Year	TWh	%
Renewable net generation	2020	n. a.	
	2021	1 145.3	
	2022	1 093.1	
of which hydro	2020	n. a.	n. a.
	2021	494.5	43
	2022	416.2	38
of which wind	2020	n. a.	n. a.
	2021	407.3	36
	2022	416.8	38
of which biomass	2020	n. a.	n. a.
	2021	90.2	8
	2022	80.5	7
of which solar	2020	n. a.	n. a.
	2021	141.4	12
	2022	168.3	15
of which other renewable	2020	n. a.	n. a.
	2021	11.9	1
	2022	11.2	1



Share of energy produced of each member TSOs 2022 in %¹



* 출처 : www.entsoe.eu/

국내 전력계통 특성

참고 ENTSO-E 국가간 연계선로

구분		독일	덴마크	영국	이탈리아
연계선로 현황 (지속 확대 중)		9개국 (AC 33개, DC 2개)	3개국 (AC 6개, DC 3개)	3개국 (DC 4개)	5개국 (AC 15개, DC 1개)
전체발전량 대비 태양광&풍력 발전비율	2015	18%	51%	14%	13%
	2016	18%	44%	14%	14%
	2017	22%	50%	18%	14%
	2022	36%	62%	21%(?)	17%



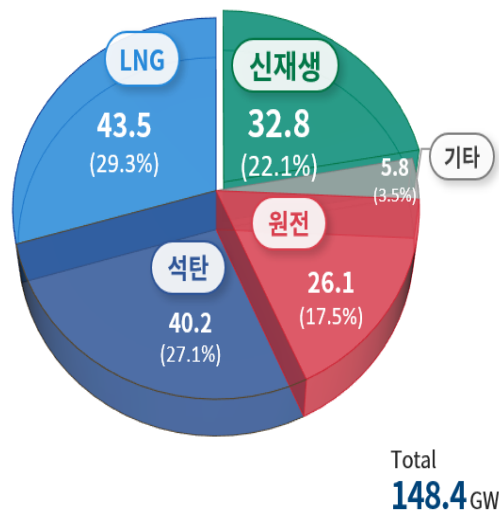
시사점

- ✓ 재생e 중 수력, 지열, 바이오 매스도 주력전원 중 하나
- ✓ ' 22년 기준 전체 발전량 중 재생e 발전량 비중 39.2%
- ✓ 재생e 비중 중 태양광, 풍력 53% 차지 ⇒ 따라서 전체 발전 중 **태양광, 풍력 비중은 20.8%에 불과**(국내도 전원 다각화 필요)
- ✓ 유럽 국가간 AC, DC 다수 연계로 안정적 계통운영 뿐 아니라 전력수급 유지(거래)에 핵심 자원
- ✓ 국내 계통 특성(거대 단일 계통, IBRs 위주, 초고압 송전, 대용량 발전기/전원단지 등)으로 **해외 선도국 사례는 참조는 하되, 국내 고유의 무탄소 전원 확대 및 안정적 운영 기술 창조 필요**
- ✓ 향후 유럽 거대 계통의 수용한계 시점(ex: 동기기 최소 운전 등) 도래시 국내 계통계획/운영 사례(기술)가 선도국 역할 가능

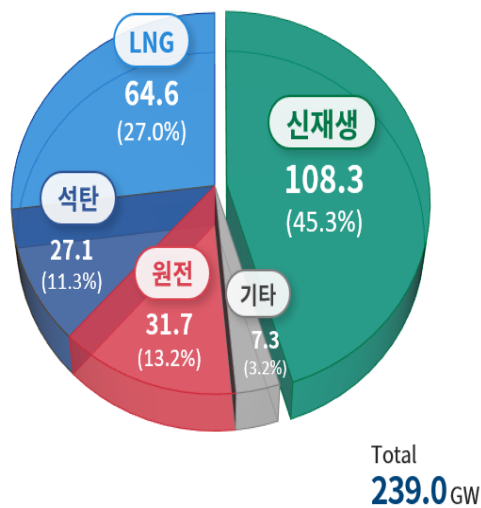
국내 전력계통 특성

참고 10차 전력수급기본계획(~'36), 장기 송변전설비계획(~'36)

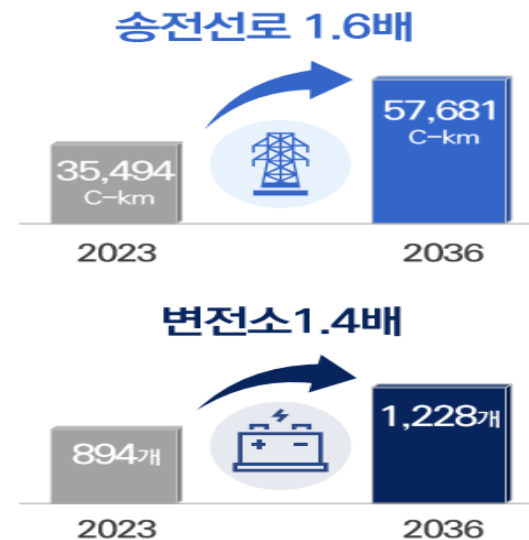
전원구성 현황 ('23년, 단위 : GW)



전원구성 계획 ('36년, 단위 : GW)



10차 설비계획 설비규모



국내 고유 전력계통 특성과 함께 전력설비 확장을 고려한 전원 확대방안 마련이 중요

저관성, 수급편중 **최저 수요 40GW 미만 일상화 예상** (동기발전기 vs 재생e 공급 ?) (⇒ 과도, 주파수, 전압, 미소신호 불안정 발생)

Figure 1 is a line graph showing the variation of the average value of the output voltage (V) of the converter. The x-axis represents time in seconds (0 to 24), and the y-axis represents voltage in Volts (V) (340 to 368). The graph shows a blue line for the average value and an orange line for the ripple. Key points are marked: 354.98V at 2s, 356.76V at 10s, and 364.21V at 12s. The ripple is labeled as 5.5%.

4월 수급

재생에너지로 인한 장기 공급과잉

공급과잉 44.8TWh

공급부족 30.8TWh

4/1 4/11 4/21 5/1

특정지역 집중, 건설 어려운 도서지역

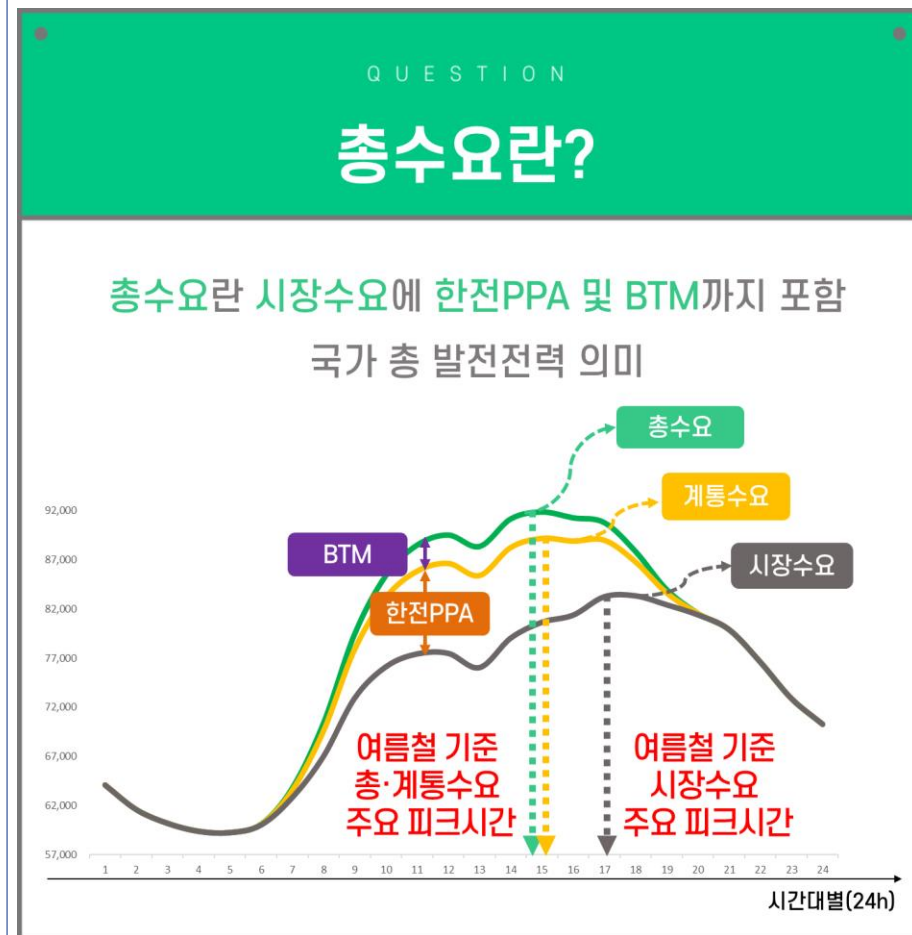
원거리 대규모 발전단지

건설 물량 폭증, 주민 수용성, 보상문제

* 연료전지 : 유효전력 제어능력 등 일부 미비
계통연계기준 "제4조 유효전력 제어능력"

무탄소 전원 확대(전력계통 수용성) 장애요인

참고 최저 수요는 시장수요



- BTM까지 포함하는 총수요(Load)의 실시간 계량(감시)은 사실상 어려움
 - PPA까지 포함하는 계통수요는 한전의 AMI 연계(시스템 준비 完)하여 계량 가능
 - 안정적 계통운영, 변동성, 간헐성, 계통 저관성 등 대응력 강화를 위해 전력수요는 계통수요로의 정상화가 필요
 - 계통안정도(주파수, 전압, 미소신호 등)는 실시간 운전되는 동기기 운전대수(계통 Natural 관성)가 사실상 결정(SNSP와 대비)
- * BTM (Behind the Meter, 계량되지 않는 자가소비용)

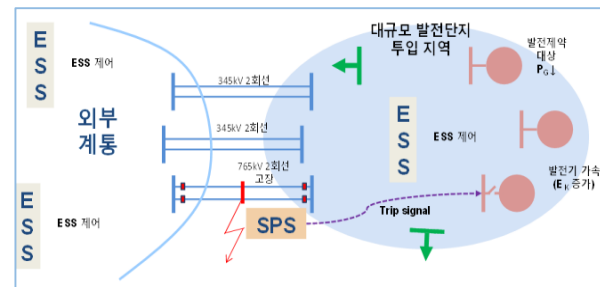
무탄소 전원 확대(전력계통 수용성) 방안

저관성, 수급편중

① 동기조상기 설치 확대 : 최대(소) 부하 조건에서 6GMVAs~30GMVAs 설치시 SNSP 약15%~30% 상향가능

② 동기조상기(전압, 관성제공) + 계통안정화용 BESS(주파수 안정) 동시 설치시 역할 분담 가능

- 과도 및 주파수 안정도 향상 : BESS 설치 용량의 80% 수준까지 발전제약 완화 (선행연구)
- 특히, 1GW 초과 단위기 발전 및 대규모 발전단지 발전제약 해소에 효과적
- 단, **과도한 의존은 또 다른 계통 불안정 초래 우려가 있어 2차 대책으로 제한할 필요**



③ 계통 저관성 시대 도래 대비 단위기(Unit) 발전기 용량 하향 보급 필요 : 500MW 이하 급

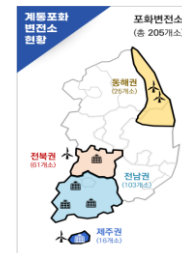
- 발전단지 규모 축소, 적정 송전망 운영, 초고압 송전망 의존 완화로 고장 파급 규모 최소화
- 계통관성 확보로 재생e 운전 확대시에도 원전을 비롯한 동기발전기의 이용률 극대화 가능
- 현재 : (N-2) 3GW 이상 발전정지 적용시 재생e & 발전기 출력제어 or cut-off 운전 빈번 예상

☞ 소수의 대용량/대규모 시스템 ⇒ 다수의 소(중)용량/ 소(중)규모 시스템으로 전환 필요

④ 계통포화 변전소(154kV 이상)에는 발전사업 허가를 제한 : 대부분 태양광이 해당 될 것으로 예상

⑤ “계통특별관리 지역“ 지정 및 특화된 계통대책 마련

- 포화 변전소 밀집, 출력제어 상시 발생 등 계통 현안 지역을 지정, 혼잡 해소 대책을 마련
- 특별법을 활용, 주요 송전선로 신속 확충, 유연한 허가·접속(ESS구비, 출력제어 조건부 등)

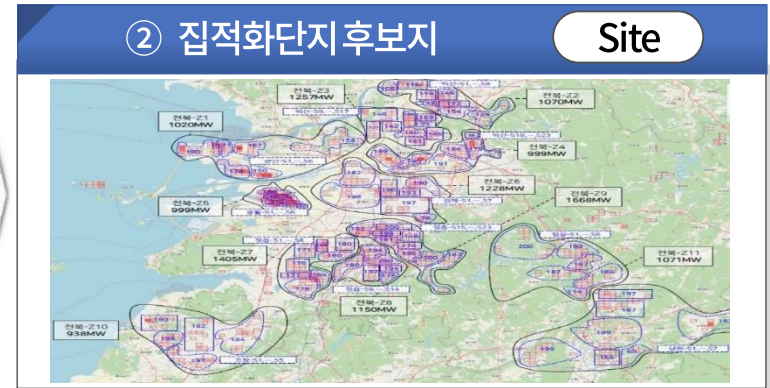
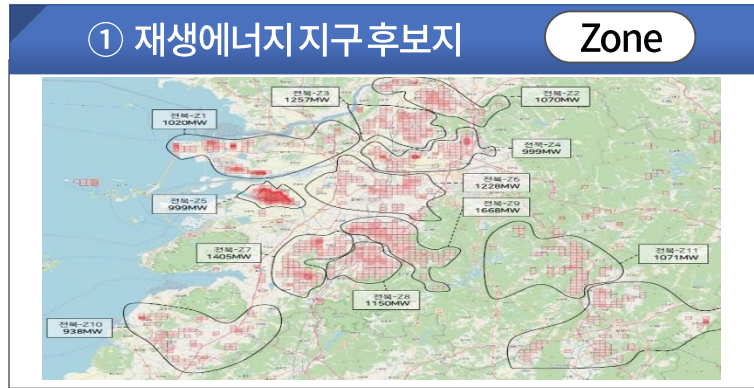


무탄소 전원 확대(전력계통 수용성) 방안

저관성, 수급편중

⑥ 재생에너지 계획입지 도입

- 정부 주도 재생e 지구(Zone)를 지정하고, 지자체 주도로 지구내에서 집적화 단지(Site) 신청·승인 후 송전권을 공모(Tender)·분양하는 방식



⑦ 계통안정화 Mix 계획 수립, 안정화 설비 건설 및 운영 수단 등 이행력 강화

- 경직성, 간헐성, 변동성, 무관성 확대 등 전력계통 전반 구조 변화는 시대적 흐름
- 안정적 계통운행을 보장하면서도 각 참여자들의 최대한의 효율을 담보하기 위해서는
- BESS, 동기조상기, 양수(발전), 주파수 예비력(G/F 운전), +DR, Fast DR, 고객 참여형 SPS, **재생e (원격)출력 제어(제한) 자원화**, 섹터커플링, FACTS 등 각 수단의 최적 조합(Mix)이 필수

무탄소 전원 확대(전력계통 수용성) 방안

저관성, 수급편중

⑧ ①~⑦ 이행, 안정계통운영 수행할 계통해석 체계 고도화 (복잡, 복합, 다변, 미시, 상호작용 등 분석할 관련 기관 전문 체계 시급)

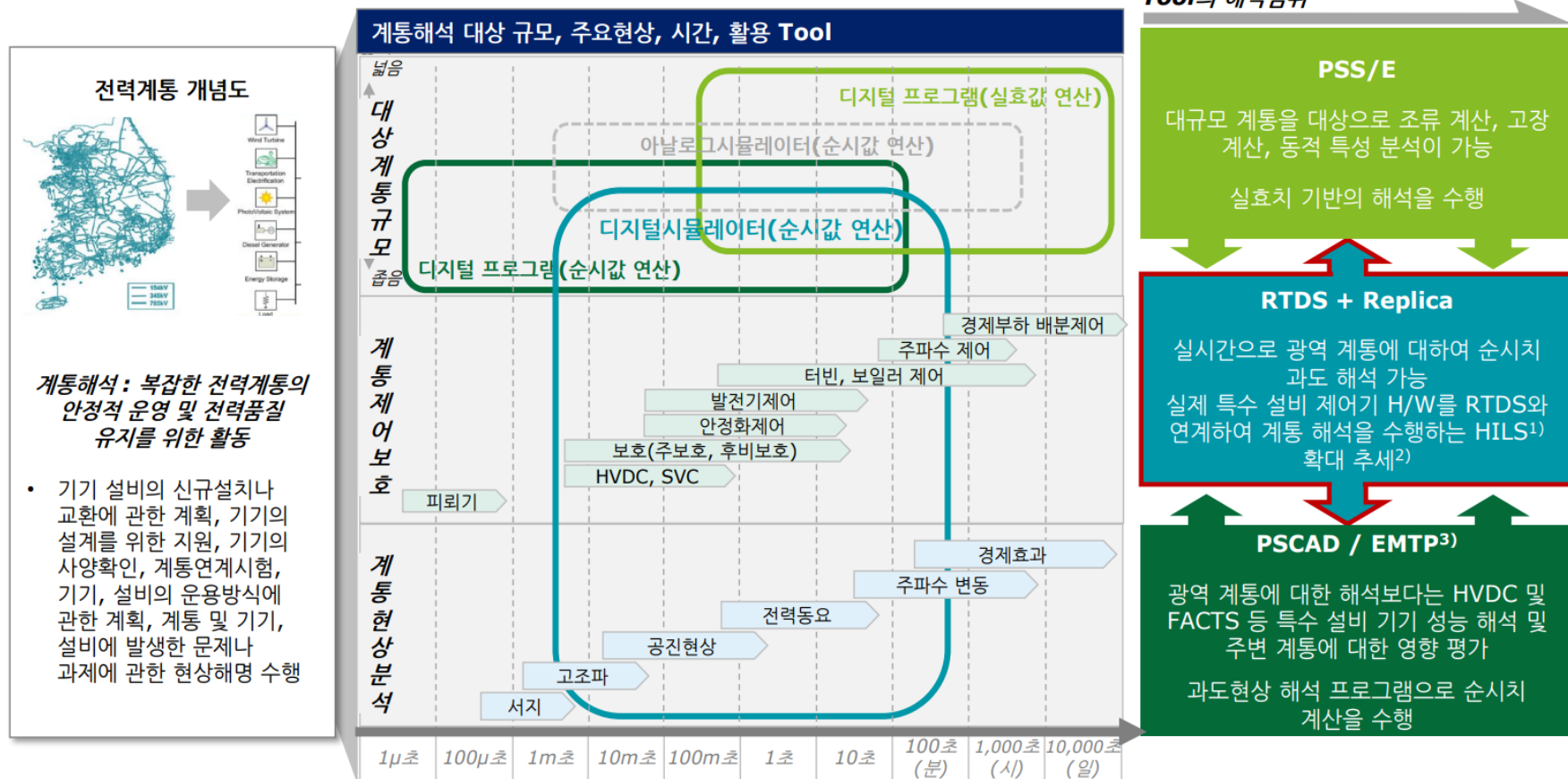


그림 출처: "전력계통 해석·엔지니어링 내부 운영체계 구축방안 수립" ("19. KEPCO & Deloitte))

Note 1) HardWare In Loop Simulation; 2) KEPCO는 RTDS Rack 34개를 보유하고 HVDC, FACTS 등 특수설비 레플리카 도입 중; 3) Electro Magnetic Transient Program Source: 특수설비 레플리카제어기 연계시험기술개발(전력연구원, 2018), 전력계통 해석 시뮬레이션 기술과 해석사례(히타치 제작소)

무탄소 전원 확대(전력계통 수용성) 방안

전력망 건설지연

① 시나리오 기반 전력망 선제적 보강

- 전원확대 등 불확실성을 반영한 다양한 시나리오 기반으로 전력망 선제 구축 체계 마련
- 우선 검토 대상 : (1) 수요집중지역 (2) 재생e집중지역 (3) 지역간 융통선로 보강(대규모 발전단지) (4) 계통안정화 설비 보강

② 전력설비 건설 패러다임 전환

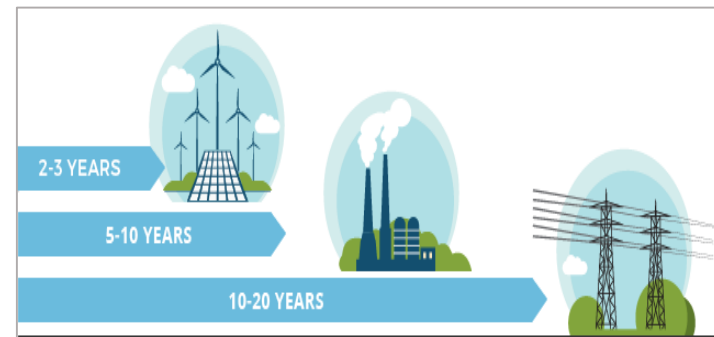
법령·제도 혁신

(1) 건설 이행력 확보를 위한 전원개발촉진법 개정('23)

- ☐ 입지선정위원회 법제화 ☐ (승인 前) 협의 간주제도
- ☐ (공사 前) 신고 간주제도

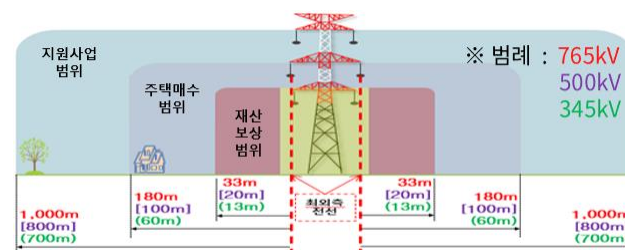
(2) 국가 기간 전력망 확충 특별법('24 ?) : 대규모 발전단지(화석연료 제외) 연계 전력 설비의 신속한 건설을 위해 fast-track 도입

- ☐ (기간단축) 인허가의제 확대 ☐ (수용성제고) 용지 협의 간소화, 보상선택제
- ☐ (민감참여) 용지·민원 제3자 위탁 등



보상 혁신

- (1) 송전선로 건설에 따른 재산권 침해 개선을 위한 지방세특례제한법 개정('23)
- (2) 송전선로 주변지역 주거환경비 신설을 위한 송주법 개정('23년)

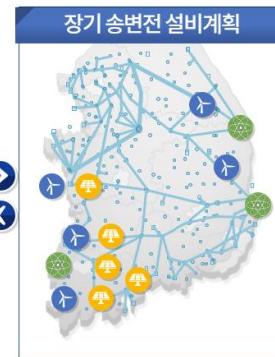
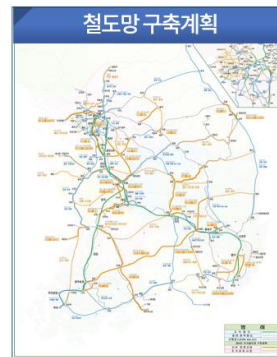


무탄소 전원 확대(전력계통 수용성) 방안

전력망 건설지연

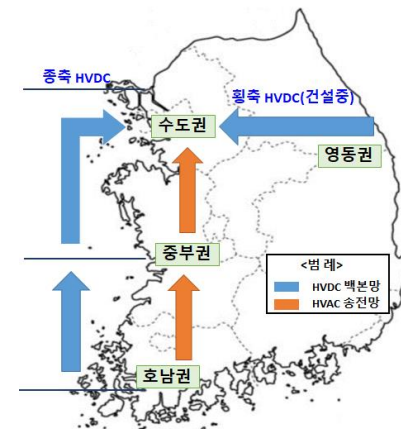
선형 S.O.C 사업 공동연계

- (1) 건설 전력, 철도, 도로 선형 S.O.C 사업 기관 간 협력체계 구축 및 공동 건설계획 수립으로 주민 갈등 최소화 및 국토의 효율적 활용



권역별 수요/공급계획에 따른 맞춤형 전력망 구축

- (1) 영동/영남 : 신규원전, 계속운전 및 대규모 해상풍력 증가에도 송전망 건설지연. 기존 선로 용량 증대 및 일부 선로 보강
- (2) 영동/영남 : 원전 계속운전, 재생e 집중지역 수도권 대규모 수요 지역과 직접연계



무탄소 전원 경직성

재생에너지

- (1) 계통기여 : 계통연계시 출력, 주파수, 전압제어설비 등 관련 기술성능에 대한 엄격한 기준을 요구
- (2) 감시제어 : 발전설비 특성자료, 출력정보, 예측정보 등을 전력거래소와 송·배전사업자에게 제공 의무화

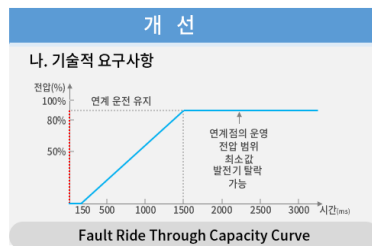
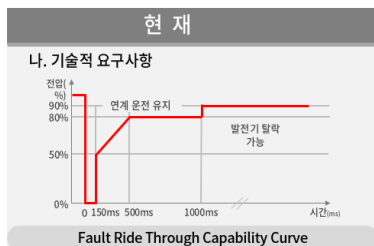
무탄소 전원 확대(전력계통 수용성) 방안

무탄소 전원 경직성

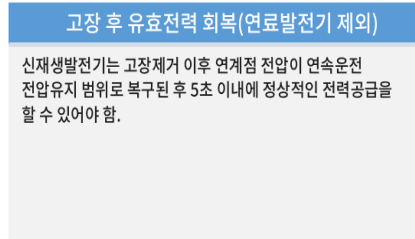
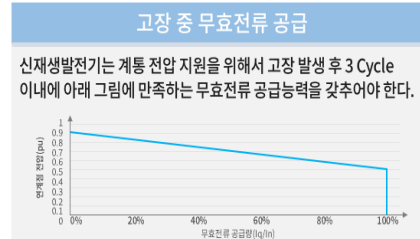
* 송배전용전기설비 이용규정 내 "신재생발전기 계통연계기준"(Grid Code)의 개정('20.4) 주요내용 발취

재생에너지*

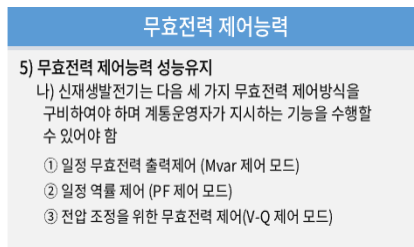
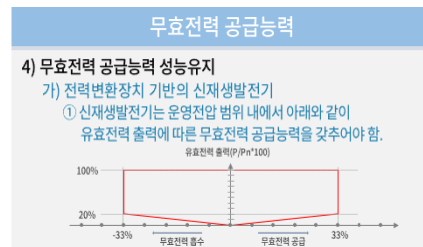
□ FRT(Fault Ride Through)



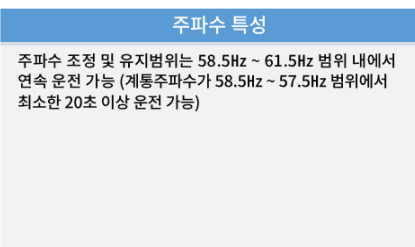
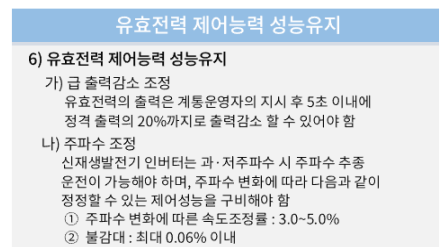
□ 무효전류 공급, 유효전력 회복 성능



□ 무효전력 공급 및 제어능력



□ 유효전력 회복 성능



□ 전압변동 및 고조파

전압변동

가) 전압변동

① 접속점에서 다음의 허용기준을 초과하지 않아야 함

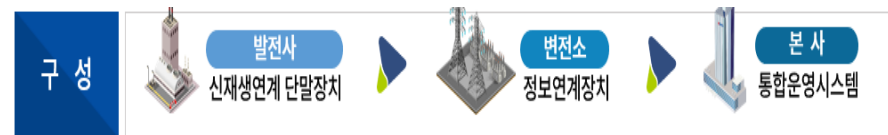
전압변동률(%)	출력변동 빈도 제한
5	일일 4회 이하
3	한시간내 2회 이하
2.5	한시간내 2회 초과 10회 미만

고조파

다) 신재생발전기는 계통에 연계시 접속점에서 다음 기준의 고조파 전류를 초과하여 발생시켜서는 안 됨

송전계통	종합 전압 왜형률(%)
22.9전용선로	5.0
70kV ~ 154kV	2.5
154kV 초과	1.5

□ 감시제어 시스템



- 정보연계장치: 변전소별 계통접속 재생E 정보 취합 및 상위전송
- 신재생연계 단말장치: 발전사 재생E 실시간 계측 및 인버터 제어 중계

무탄소 전원 확대(전력계통 수용성) 방안

무탄소 전원 경직성

원전, 화력기

- ☐ 발전기 기동/정지 시간 단축
- ☐ 출력 증감발율 개선(Ramp up/down)
- ☐ 최소 출력 하향 운전
- ☐ 관성 정수 상향 터빈 채용
- ☐ 가동 출력 범위 확대

☞ 향후 동기기(원전, 일반 화력기) 간 최적 운전 비율, 동기기과 재생e 간 최대 병립 운전 비율 등은 원전, 재생e의 유연성 확보 정도, 계통안정화 설비 Mix 등에 따라 정해질 것으로 예상

출처 : 산업부 고시 "전력계통 신뢰도 및 품질유지 기준" 제4장 발전설비 신뢰도

구 분	원전	석탄	중유	G/T	IGCC	수력	내연	RE
출력변동률 (%/Min 이상)	-	3.0	4.5	5.0	3.0	-	-	-
자동발전 제어	X	○						X
주파수 추종운전 (정격 용량의 % 이상)	X	5	5	5	5	가능한 최대		-
속도조정률(%)	-	5~6		4~5	40이내	3~4	3~4	-

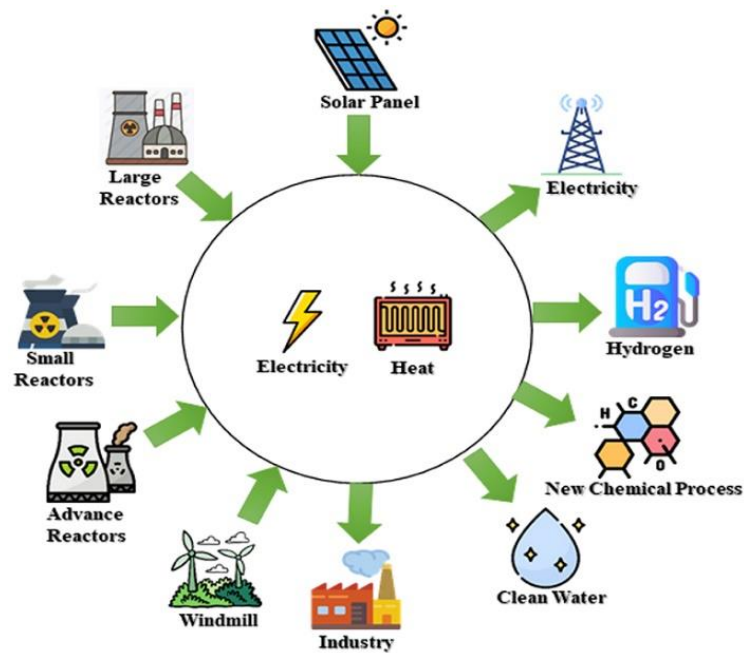


그림 출처 : A Comprehensive Review of Nuclear-Renewable Hybrid Energy System : Status, Operation, Configuration, Benefit, and Feasibility (21. Md Arman Arefin 외)

국내 전력계통 여건을 고려한 무탄소 전원 확대방안

- ◆ 무탄소 전원 확대는 국가적 과제로 **국내 전력계통의 고유 특성** 고려시 동기기(원전-일반 화력기) 간, 특히 동기기-재생e 간은 상보 관계
- ◆ 다만, 안정적 확대 위해서는 전술 방안실행과 입체적인 준비필요. 해외 전력계통 유사 사례 부재에도 **우리만의 기술과 경험축적** 중이고 해결 역량도 보유 ⇒ **확대 수용 가능** (전력계통 해석 기반 안정도 최우선 고려)
(정부, 유관 기관 총력 대응 중이나 모든 계통 기여(전력공급) 의무(참여)자 적극 동행 필요)

감사합니다.