

미래전력망 설비구성 및 정밀분석 연구

2024. 04. 25.

조윤성, 김익재

대구가톨릭대학교 전기공학과

1. 국외 탄소중립 달성을 위한 사례 분석
2. 국내 탄소중립 달성을 위한 사례 분석
3. 탄소중립 미래계통 구성

미래전력망 설비구성 및 정밀분석 연구

01

국외 탄소중립 달성을 위한 사례 분석



1. 국외 탄소중립 달성을 위한 사례 분석: 독일 NETZ

□ 독일 NETZ 장기 송전망 개발계획

- '37년 및 '45년, 다양한 발전원 설비 구성(재생e 중심, 기존발전 최소화, 섹터 커플링, ESS)
- '45년 수요 1,300TWh 예상되며, 750GW 내외 설비용량 예상

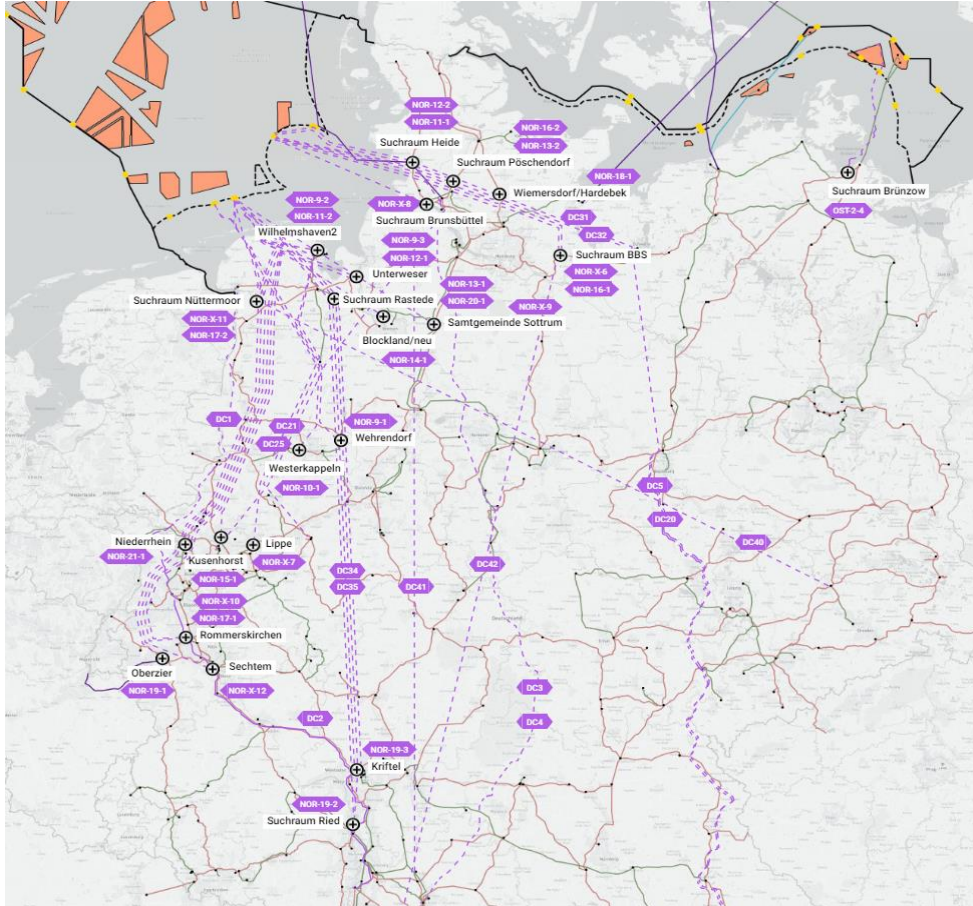
[단위:GW]

발전원	현재('21)	A2037	B2037	C2037	A2045	B2045	C2045
천연가스/수소	32.1	>38.4	>38.4	>38.4	>34.6	>34.6	>34.6
양수	9.8	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1
기존발전원 합	92.9	>50.5	>50.5	>50.5	>46.7	>46.7	>46.7
육상풍력	56.1	158.2	158.2	161.6	160.0	160.0	180.0
해상풍력	7.8	50.5	58.5	58.5	70.0	70.0	70.0
태양광	59.3	345.4	345.4	345.4	400.0	400.0	445.0
재생e(기타포함)	138.7	564.9	572.9	576.3	638.3	638.3	703.3
섹터커플링 (P2H, 전기화 등)	3.3	92.1	88.1	96	146	124	130.6
계통유연화설비 (소규모/대규모 ESS, 수요관리 등)	3.0	96.1	98.3	98.8	149.9	153	179.9

1. 국외 탄소중립 달성을 위한 사례 분석: 독일 NETZ

□ 독일 NETZ 장기 송전망 개발계획

- 시나리오 구성에 따른 신규 DC설비 프로젝트 및 연계선로
- 풍력 발전기 연계를 위한 DC선로 건설 확장



[풍력 발전기 연계를 위한 DC선로 신규설비 계획]

Angaben in km	AC-Verstärkung		DC-Verstärkung		AC-Neubau	DC-Neubau	Summe
	Zu-/Umbeseilung	Ersatz-/Parallelneubau	Zu-/Umbeseilung	Ersatz-/Parallelneubau			
Startnetz	919	2.081	321	560	599	2.466	6.945
Zubaunetz							
A 2037	2.279	3.846	0	179	1.714	4.396	12.413
B 2037	2.279	3.846	0	179	1.714	4.396	12.413
C 2037	2.279	3.846	0	179	1.714	4.396	12.413
A 2045	2.279	3.846	0	179	1.714	4.396	12.413
B 2045	2.279	3.846	0	179	1.714	4.396	12.413
C 2045	2.279	3.846	0	179	1.714	4.396	12.413
Start- und Zubaunetz							
A 2037	3.198	5.927	321	739	2.312	6.861	19.358
B 2037	3.198	5.927	321	739	2.312	6.861	19.358
C 2037	3.198	5.927	321	739	2.312	6.861	19.358
A 2045	3.198	5.927	321	739	2.312	6.861	19.358
B 2045	3.198	5.927	321	739	2.312	6.861	19.358
C 2045	3.198	5.927	321	739	2.312	6.861	19.358

[2037/45년 시나리오별 송전망 설비계획 선로길이 정보]

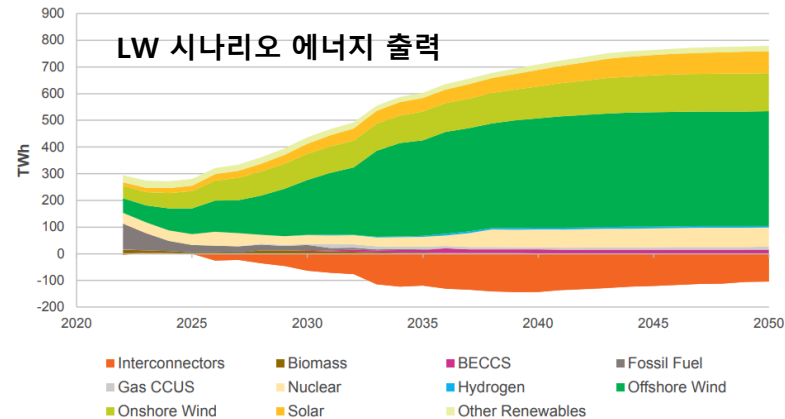
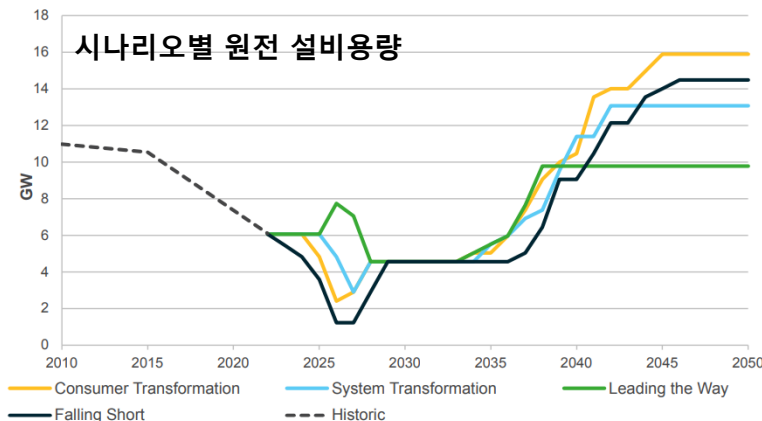
1. 국외 탄소중립 달성을 위한 사례 분석: 영국 ESO

□ 영국 ESO (Electricity System Operator) 장기 전력계통 수급 시나리오

- '30년, '35년 및 '50년에 대한 총 4가지 시나리오 기반 미래 에너지 시나리오 구성
- 해상풍력/육상풍력/태양/수소/원전/저장장치/외부연계 등 다양한 자원 Mix 구성

Electricity	2022	2030				2035				2050			
		CT	ST	LW	FS	CT	ST	LW	FS	CT	ST	LW	FS
Annual demand (TWh) ¹	286	344	325	369	326	467	400	479	373	726	678	671	570
Electricity demand for heat (TWh)	19	27	21	28	24	43	21	45	30	80	60	65	69
Peak demand (GW) ²	58	69	63	63	67	87	73	82	78	113	101	98	114
Total installed capacity (GW) ³	112	187	172	207	159	266	225	287	189	386	344	387	285
Wind and solar capacity (GW)	35	102	89	119	70	158	134	178	94	239	213	249	149
Interconnector capacity (GW)	7	12	12	17	12	19	16	24	15	21	16	27	16
Total storage capacity (GW) ⁴	3	21	17	31	13	37	20	52	15	64	41	72	26
Total storage capacity (GWh) ⁵	29	60	51	118	44	116	59	149	47	166	116	197	62
Total vehicle-to-grid capacity (GW) ⁶	0	2	0	3	0	14	1	28	0	34	16	39	8

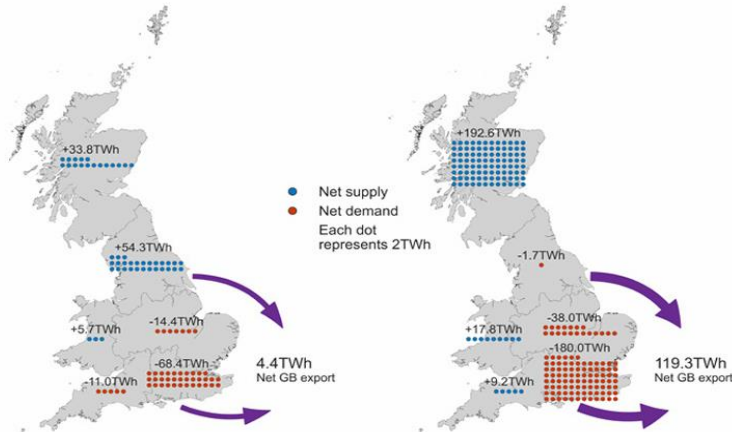
3: 기본 발전원, CT: Consumer Transformation, ST: System Transformation, LW: Leading the Way, FS: Falling Short



1. 국외 탄소중립 달성을 위한 사례 분석: 영국 ESO

□ 영국 ESO (Electricity System Operator) 사례

- 수소 파이프라인을 통한 송전망 공급확대



• 중앙 집중식 전략 송전망 건설 계획

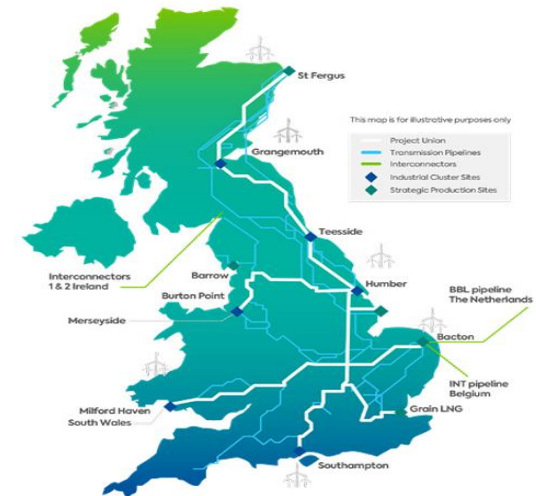
2030년까지 50GW의 해상 풍력을 달성하기 위한 송전망 건설 계획

• 송전망 네트워크 계획

- 1) 수소 전기분해와 같은 대규모 수요 기술의 성장
- 2) 발전 시스템 접근 방식을 중앙 집중식 송전망 건설로 미래 네트워크 투자 수준을 최적화

• 재생e 설비 밀집 지역 공급 확대

- 1) 지역별 재생e 발전 공급을 위한 송전망 추가계획
- 2) 실현가능한 최적 개발경로 계획



• 현재 잉글랜드 및 웨일스 수소 생산 클러스터 집중

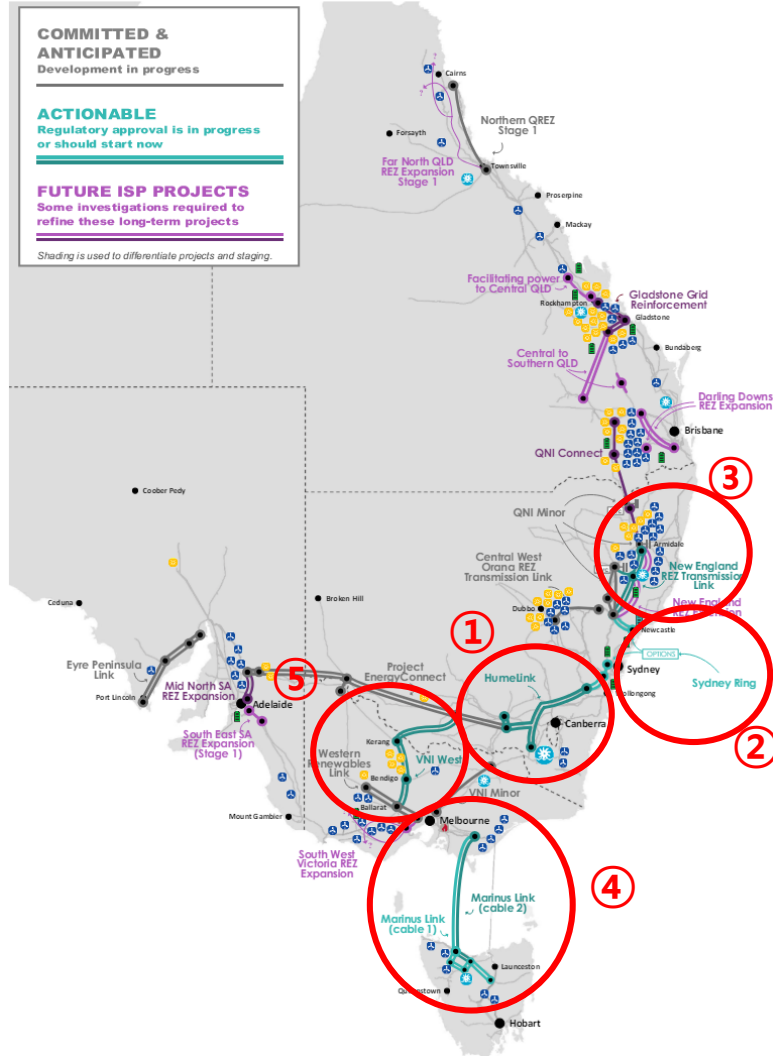
- 1) 수소 운송을 위한 파이프라인 네트워크 無
- 2) 현재 주요 공급은 도로나 철도를 통해 공급되거나 직접연결
- 3) 새로운 파이프라인을 건설하는 것뿐만 아니라 기존 가스 공급 전력망을 **재사용**

• '수소 Back-bone' 송전망 개발 목표

- 1) 대규모 수소 생산의 중심이 될 산업 허브 연결
- 2) 다양한 시나리오를 통한 공급 옵션 제공

1. 국외 탄소중립 달성을 위한 사례 분석: 호주 AEMO ISP

□ 호주 AEMO ISP 계획 : 규제 승인 진행 중 및 설비 건설 단계



• 최적 송전망 투자 계획

- 1) 약 10,000km 송전선로 계획
- 2) 약 280억 달러 투자 계획

• 해상풍력 단지 간 HVDC Cable 건설 계획

- 1) VICTORIA주 TASMANIA주 간 해상풍력 단지 HVDC 설비 추가 계획(2029~2031년)

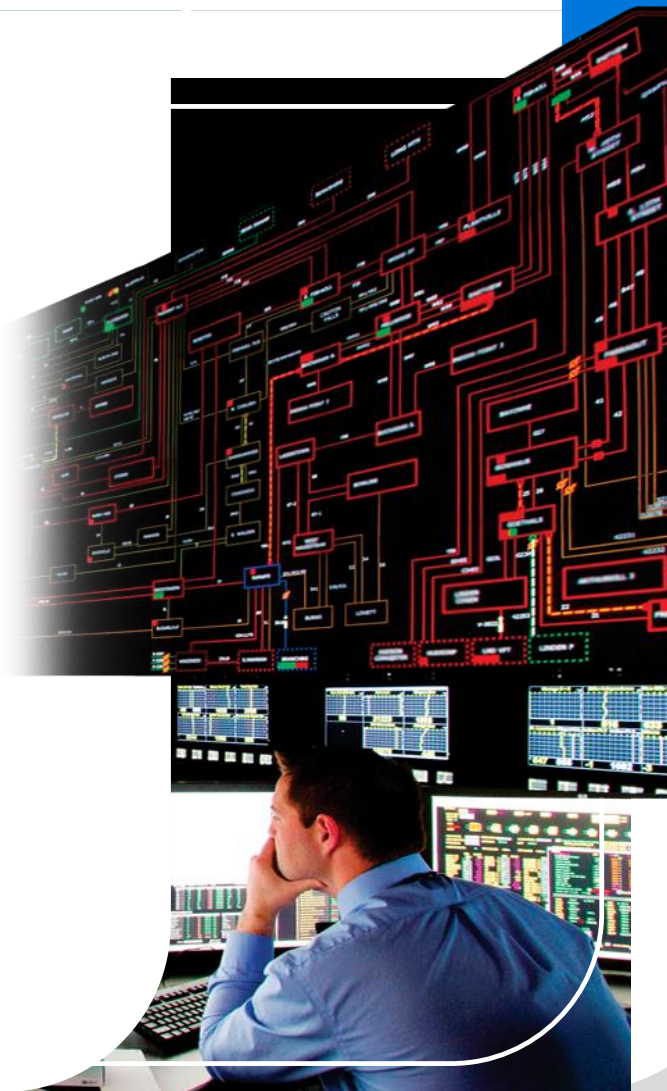
• 재생e 설비 밀집 지역 공급 확대

- 1) 지역별 재생e 발전 공급을 위한 송전망 추가계획
- 2) 실현가능한 최적 개발경로 계획

지역 Number	준공 계획일	설명
①	'26년 7월	- 500 kV 송전선로 보강 계획
②	'27년 7월	- 시드니, 뉴캐슬 부하 단지에 대한 공급강화 계획 - 대용량 ESS 설비 투자계획
③	'27년 7월	- 재생e 밀집단지 공급 강화를 위한 송전망 건설
④	cable1 : '29년 7월 cable2 : '31년 7월	- 빅토리아주-태즈메이니아주 간 1.5GW용량의 HVDC 건설 계획 - 연관된 AC 송전망 계획 포함
⑤	'31년 7월	- 기설 재생e 연계 송전선로와 신규 재생e 단지 500kV 송전선로 건설 계획

02

국내 탄소중립 달성을 위한 사례 분석



2. 국내 탄소중립 달성을 위한 사례 분석

탄소중립 시나리오 배경

□ 재생에너지 증가에 따른 계통 불안정성 증대

- 신재생에너지 발전원 증가에 따른 동기발전기 감소
- 인버터 기반 발전기 비율 증가로 인한 계통 관성 하락
- 전라권 재생에너지 설비 밀집권역 북상조류 과다
- 지역간 조류 불균형으로 인한 계통 공용망 보강 필요

□ 2050 탄소중립 달성 목표 미래계통 구성

- 2050년 탄소중립 시나리오 분석
- 기후변화로 인한 온실가스 배출량 감축 목표
- 태양광, 풍력 등 재생에너지 중심 에너지 전환 확대

【 탄소중립 선언 국가 (2020) 】



Source: Net Zero Tracker | Energy & Climate Intelligence Unit

10차 전력수급기본계획

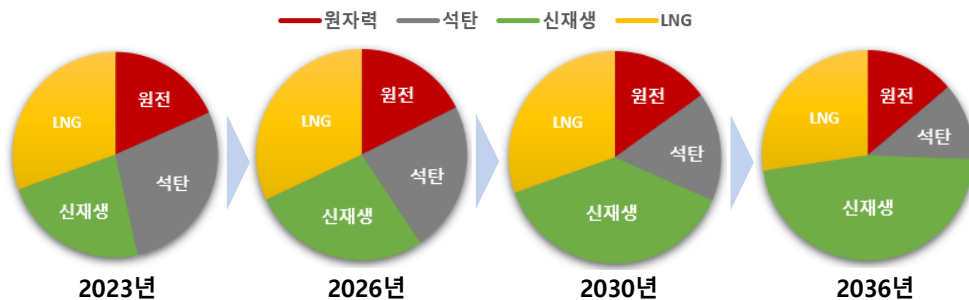
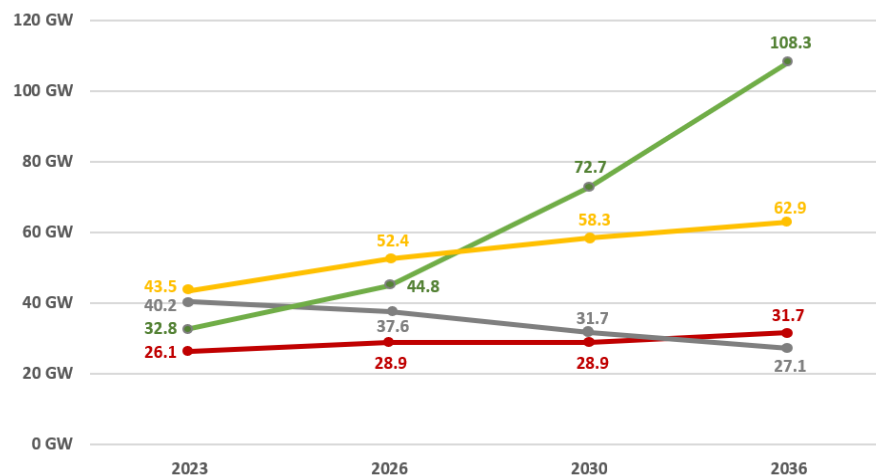
□ 신재생 발전설비 점차 증가

- 2023년(22.1%) → 2036년(45.3%) 설비용량 기준 22.8% **증가**
- 재생에너지 변동성 대응 자원 필요

□ 온실가스 감축 목표를 위한 석탄(화력)발전 감축

- 2023년(27.1%) → 2036년(11.3%) 설비용량 기준 15.8% **감소**

발전원 설비용량



2. 국내 탄소중립 달성을 위한 사례 분석

□ 탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제 1차 국가 기본계획

- '21년 탄소중립 A/B 안 시나리오 수립
- '23년 탄소중립 계획 : 합리적인고 실현가능한 재생e 확대 추진

< 시나리오 상 전원별 발전량 및 온실가스 배출량 >

(단위 : TWh, 괄호 안은 전체 에너지 소비량 중 부문별 소비량 비중)

구분	원자력	석탄	LNG	재생E	연료전지	동북아 그리드	무탄소 가스터빈	부생가스	합계	예상 배출량 (백만톤)
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%)	1257.7 (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%)	20.7

2050 탄소중립 시나리오안

2021. 10. 18



관계부처 합동

탄소중립·녹색성장 국가전략 및

제1차 국가 기본계획 요약

(중장기 온실가스 감축목표 포함)

2023. 4.

관계부처 합동

전환부문 주요 내용

- 합리적/실현가능 재생e 확대

- (1) '30년 재생e 비중 실현가능한 수준으로 조정
- (2) '36년 30% 초반대 확대

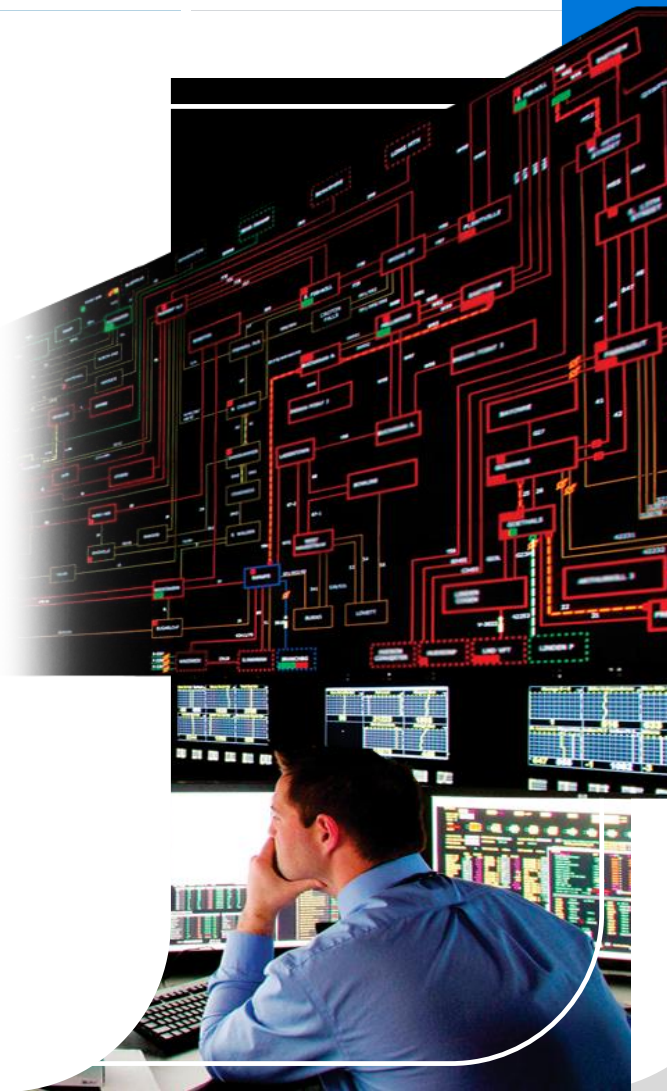
* 신재생에너지 발전 비중 ('22) 9.2% → ('30) 21.6%+α

- (3) 해상풍력 확대 통한 재생e 원별 균형 보급

* 태양광:풍력 비율 : ('21) 87:13 → ('30) 60:40

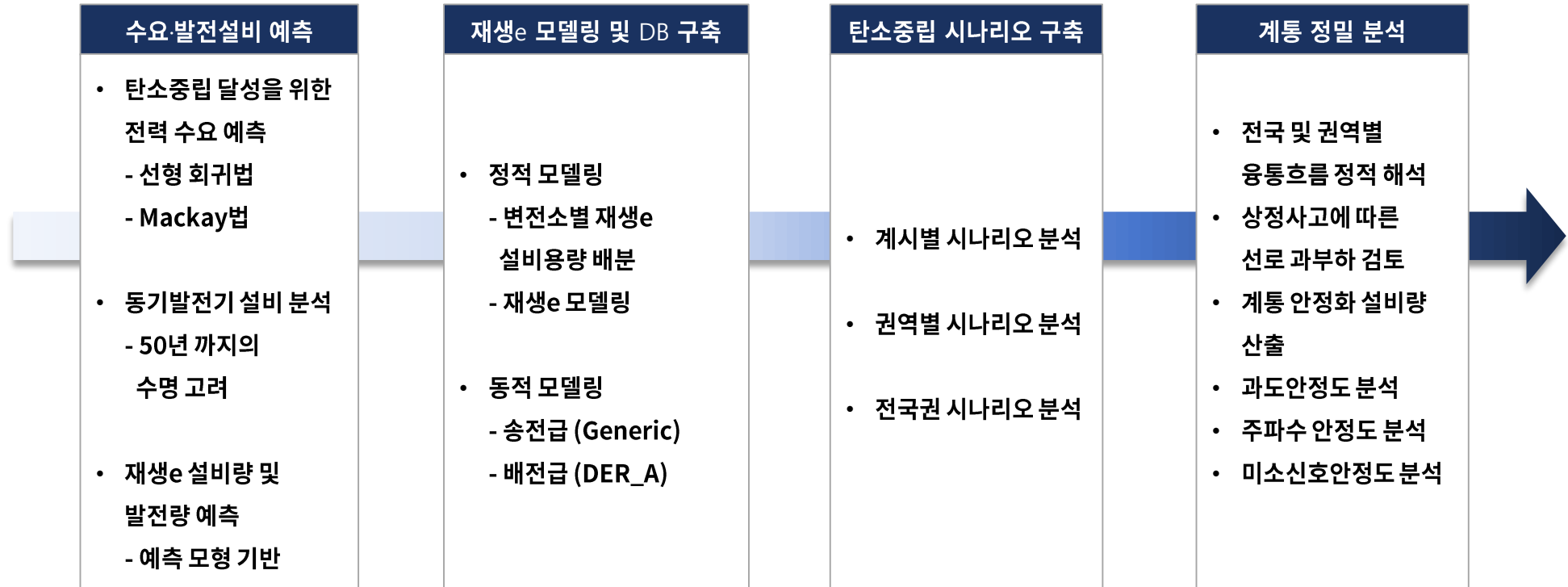
03

탄소중립 미래계통 구성



3. 탄소중립 미래계통 구성 : 전체 개요

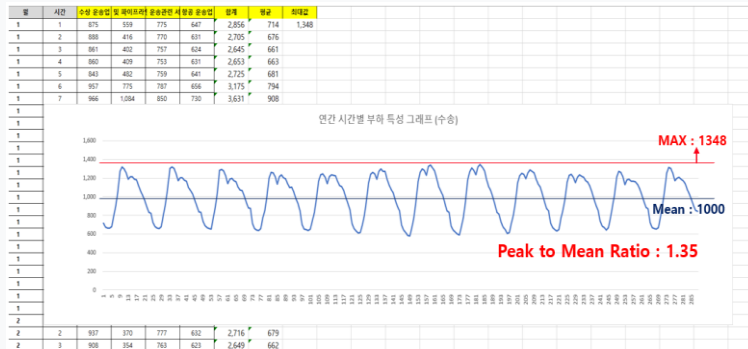
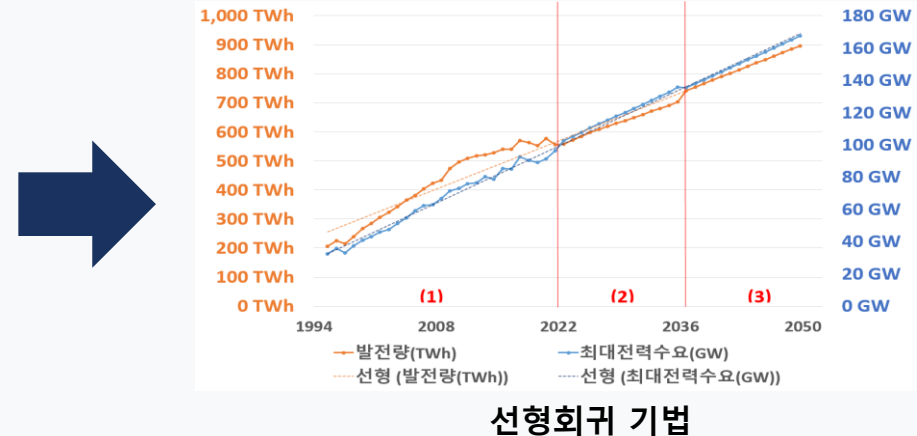
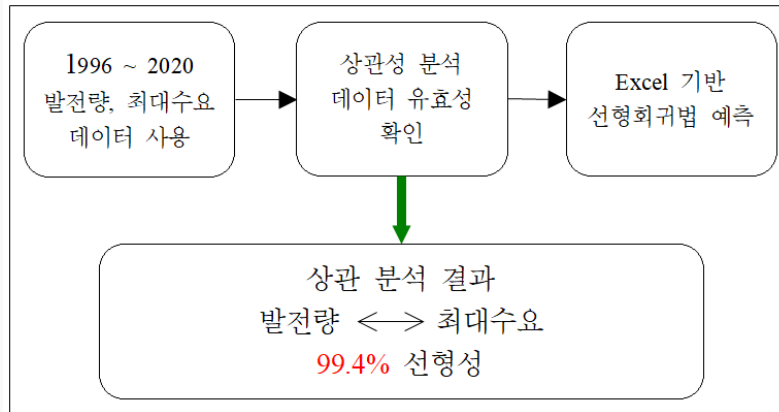
□ 탄소중립 달성을 위한 AC/DC 복합망 구축 절차



3. 탄소중립 미래계통 구성 : 전력수요 산출

□ 2050 탄소중립 전력수요 산정

- 10차 전력수급기본계획을 만족하면서 2050 탄소중립 시나리오 수요 산정
- 수요 예측 기법 : 두 예측 기법은 **전력수요(TWh)를 예측 후 (GW)단위로 환산**하여 용량 산정
- 선형계획법 : 과거 발전량 데이터를 통해 미래 전력수요 예측
- **수요패턴** 기반 Mackay 활용 : 탄소중립 시나리오 B안의 부문별 전력수요량(TWh)에 대해 **수요패턴 기반 단위(GW) 변환**



영국 Mackay 탄소 계산기를 활용한 수요 예측

(단위 : TWh)

구분	A안	B안
총 전력공급량(가나)	1257.7	1208.8
부문별 전력수요(가)	1,213.7	1,166.5
- 산업	503.6	503.6
- 수송	71.3	70.2
- 건물	277.1	277.1
- 농축수산	25.1	25.1
- 수소 생산	235.3	129.0
- CCUS 등	101.3	161.5
손실분(나)	44.0	42.3

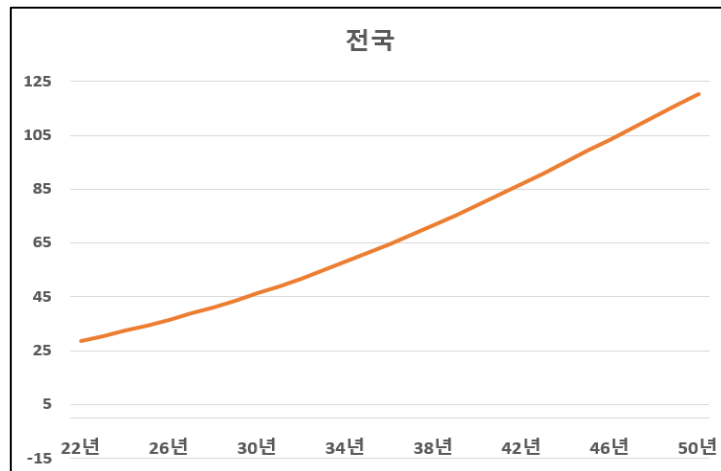
탄소중립 시나리오 B안

3. 탄소중립 미래계통 구성 : 신재생에너지 설비용량 산출

□ 2050 탄소중립 태양광 및 풍력 설비용량 산출

- 단계 1) 시나리오 1안 / 2안 설비용량 산출
- 단계 2) 시나리오 1안 / 2안 계시별 분석
- 단계 3) 계시별 잉여에너지 분석 후 설비용량 선정

구분	시나리오 1안 (Bottom-Up-Approach)	시나리오 2안 (Top-Down-Approach)
방법론	개별 발전원 설비용량 예측	'50년 태양광 및 풍력 시장잠재량 반영
재생e 설비용량	10차 전기본 만족하면서 '50년 설비용량 예측	신재생에너지 백서 기반 시장잠재량 ['20년 발행]



태양광 설비용량 예측 그래프

[재생에너지 설비량 변전소 배분절차]

실적/이용신청/발전허가 정보 분석



권역별 / 모선별 재생e 배분계수 산정

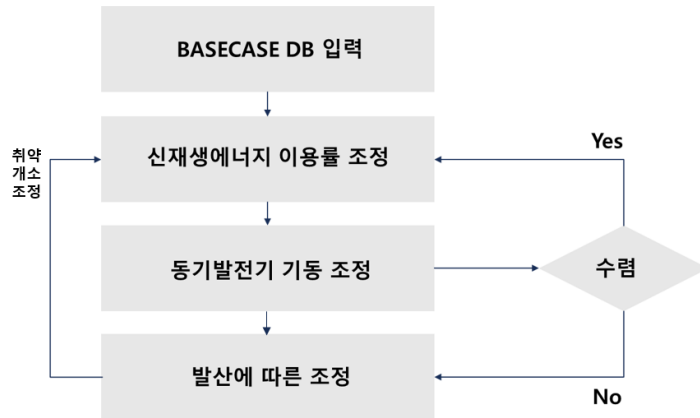


모선별 재생e 설비용량 =
권역별 예측용량 * 모선별 재생e 배분계수 산정

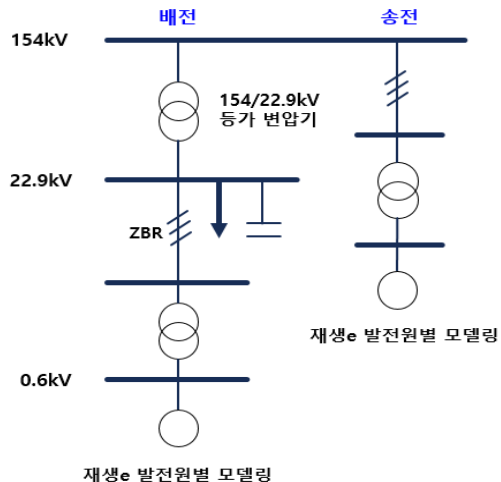
3. 탄소중립 미래계통 구성 : DB 구축 및 모델링

탄소중립 DB 구축 : 정적 모델링

- 탄소중립 발전기 기동을 고려한 DB 구축



- 미래계통 재생e 발전기를 고려한 정적 모델링
 - 등가변압기는 부하 및 재생에너지의 특성 반영

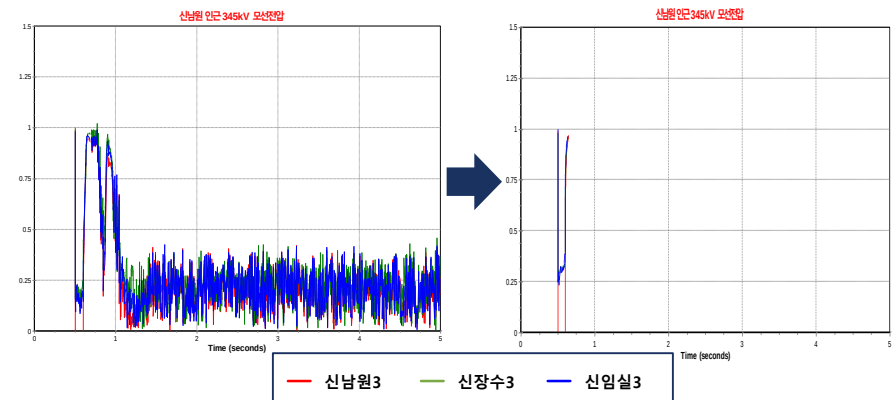


탄소중립 DB 구축 : 동적 모델링

- 송전 재생e 동적 모델링 : 2nd Renewable Generic 모델
- 배전 태양광 : 역률제어, DER_A 모델 적용
- 미래 계통을 고려한 재생e 전압원 모델 적용

연계 전압	역률 범위	동적 모델
154kV 이상	± 0.95	REGC_A, REEC_A, REPC_A
22.9kV	1.0	DER_A

- 100% REGC_A + REEC_A 모델 적용 : 불안정
- 100% DER_A 모델 적용 : 안정

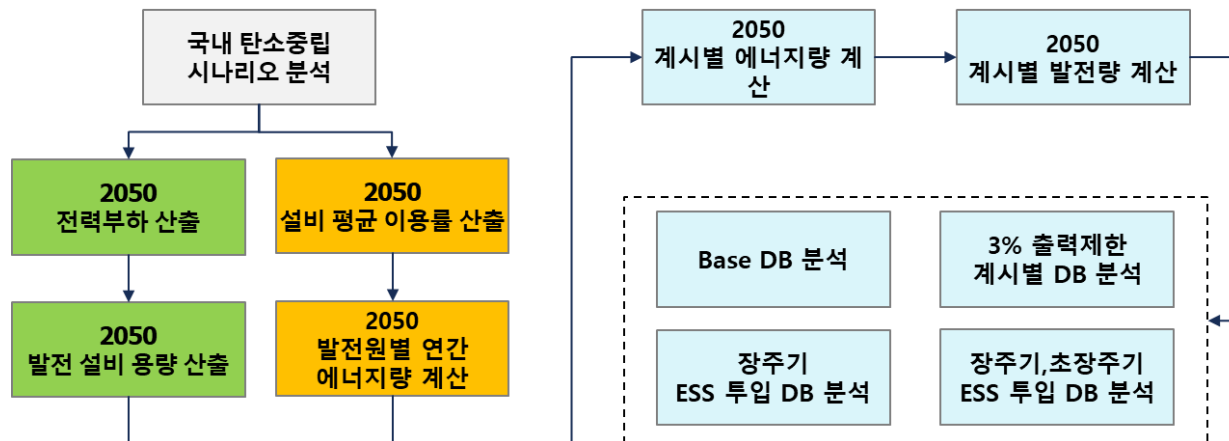


3. 탄소중립 미래계통 구성 : 시나리오 구성방안

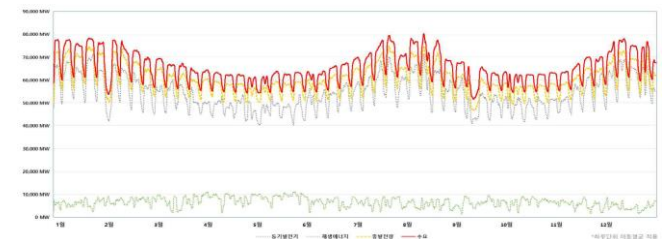
□ 2050 탄소중립 시나리오 구성방안

- 미래계통 분석 방안 : 수요수준 최대, 최저수요 검토 + 재생e 발전량 큰 시점의 Case 분석
- Critical Case 분석 : 재생e 발전량 적은 시간대의 계통 검토
 - 기존 시나리오 이외 잉여발전 시나리오 / 신재생 Zero-최대부하 시나리오 등

구분	계시별 시나리오	권역별 시나리오 검토	전국권 시나리오 검토
Critical Case 분석	- 춘계 주간 : 최저수요 및 재생e 출력량 大 - 동계 석간 시간대의 재생e 출력량 급감 시간대 (Ramping 고려)	- 관심지역 재생e 출력량 증가 - 비관심지역 재생e 동시 이용률 적용 - 권역별 융통흐름 및 선로 과부하 분석	- 전국권 재생e 출력량 증가 - 전국 정상,상정 고려한 선로 과부하 분석 - 출력제어를 고려한 선접속 후제어 방식 고려



[에너지량 관점에서의 시나리오 구성 절차]

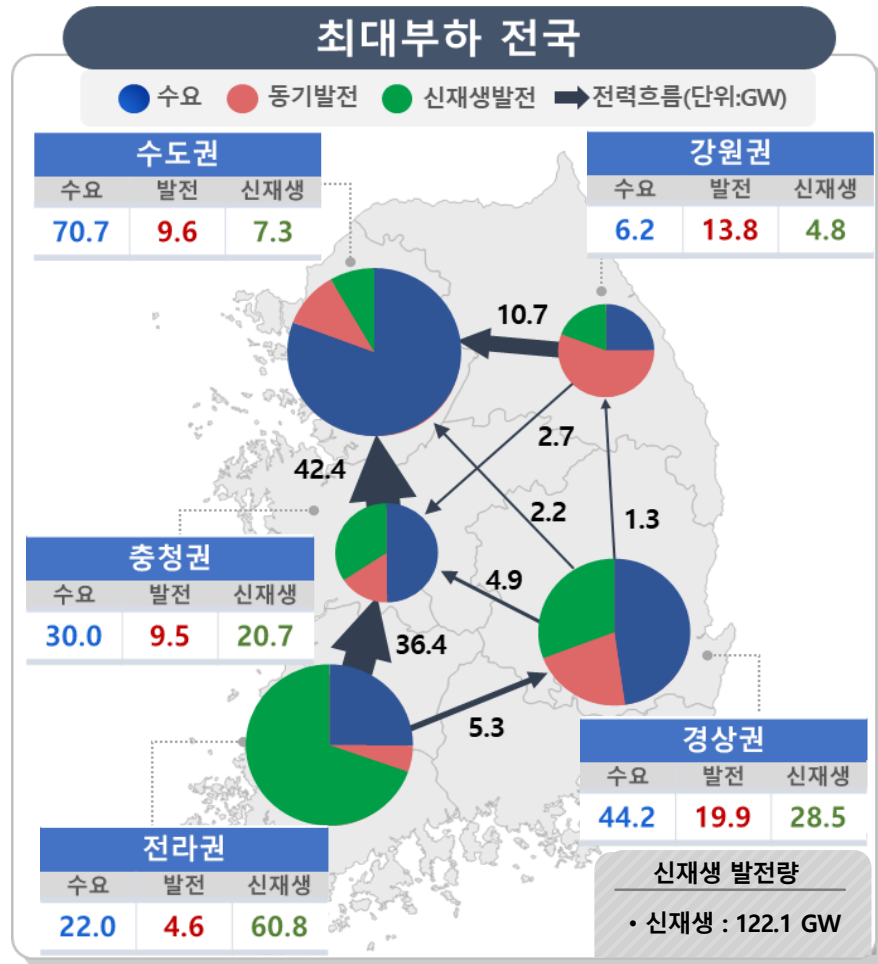
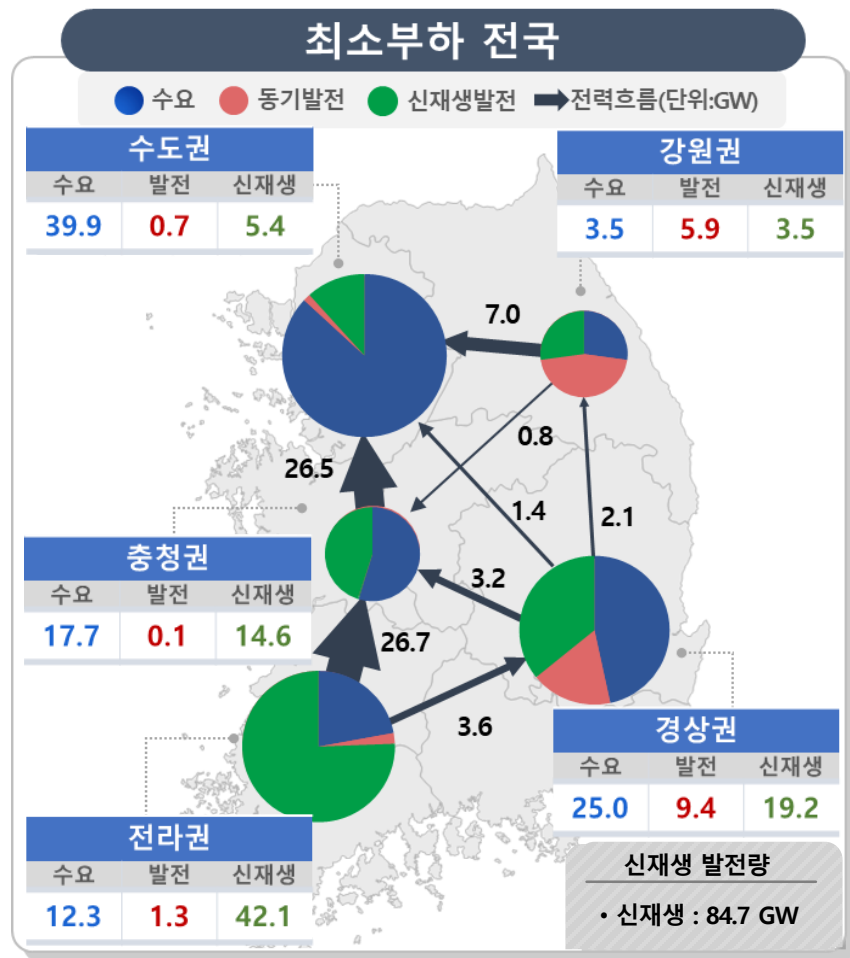


- PLEXOS 등 데이터를 활용한 8760시간 시계열 분석
- Critical 시나리오 도출

[8760 시계열 분석]

3. 탄소중립 미래계통 구성 : 융통흐름

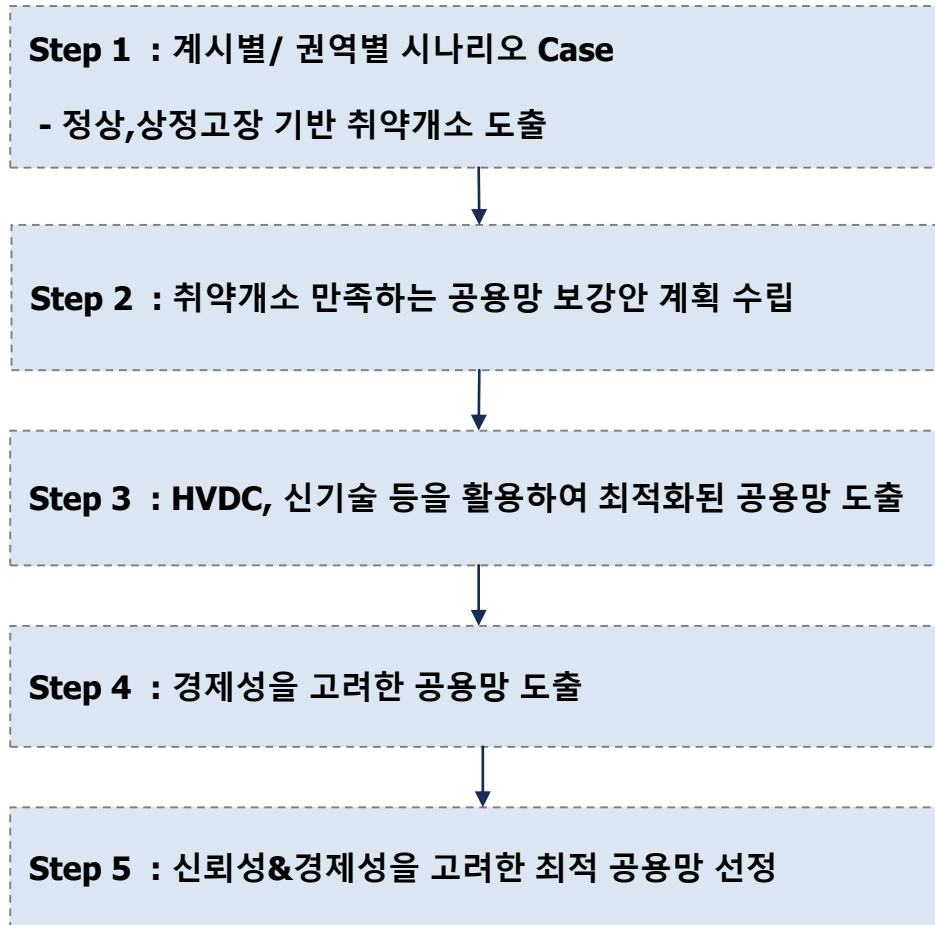
□ 부하 수준을 고려한 전국 융통 흐름 분석



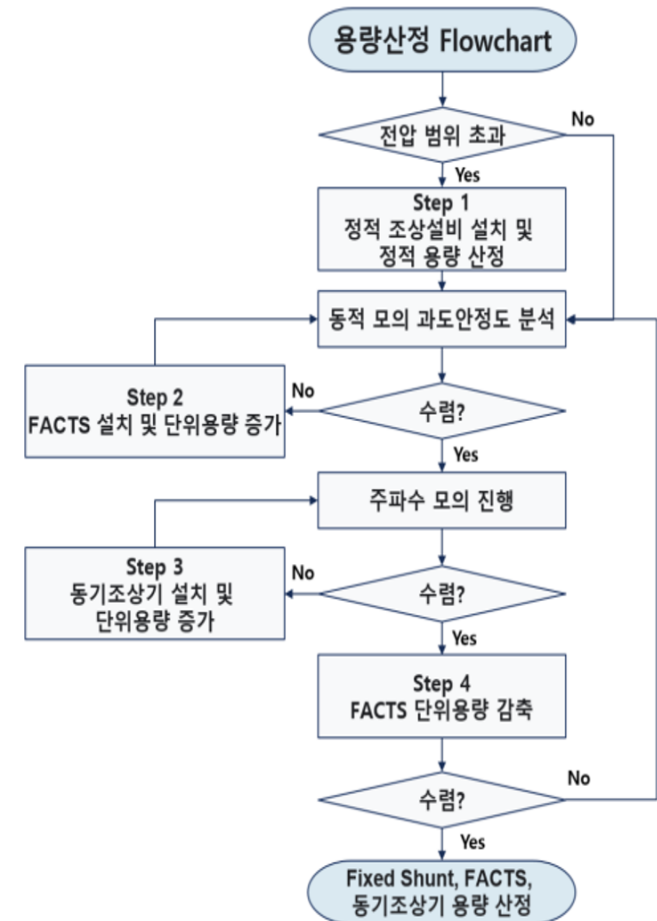
- 권역별 신재생에너지 불균형으로 권역간 수급 불균형 심화
- 다양한 공용망 보강 및 계통 안정화 자원 필요

3. 탄소중립 미래계통 구성 : 공용망 보강 자원 산출 절차

□ 복합망 보강계획 절차 구성안



[공용망 보강 자원 필요량 산출 절차]



[계통안정화 자원 필요량 산출 절차]

3. 탄소중립 미래계통 구성 : 공용망 보강 자원 산출 절차

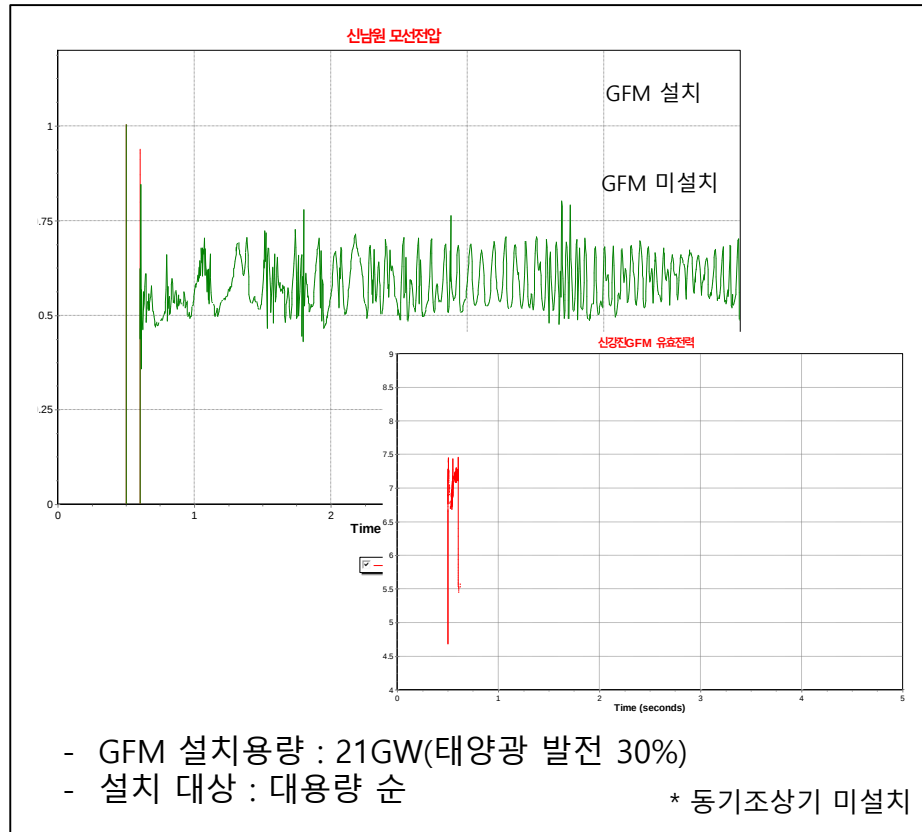
□ AC-DC 공용망 보강설비 및 계통 안정화 자원

전력설비	운영현황	탄소중립 활용도
AC 송전선로	O	권역내부 전력망
HVDC	O	대규모 신재생 연계, 지역간 전력 전송
BTB	△	지역간 조류 제어
TCSC	O	지역간 조류 제어
STATCOM/SVC	O	무효전력 공급
동기조상기	△	관성/단락용량 공급
ESS	O	최저 주파수 개선, 단/장주기 활용 가능
E-STATCOM	■	무효전력보상장치+저장장치 결합
수소 연료전지	■	수소를 활용한 저장장치, 중/장주기 활용 가능

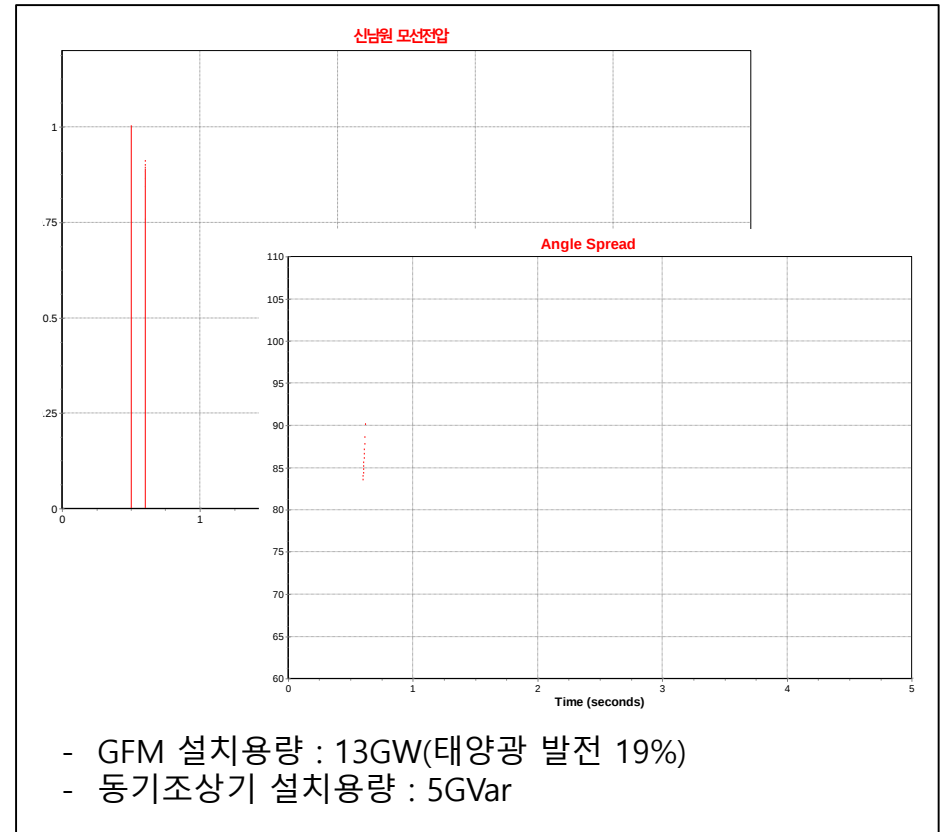
3. 탄소중립 미래계통 구성 : 신기술 적용 방안

□ Grid Forming Inverter 기술 기반 탄소중립 전력망 기여도 분석 절차

- 사고분석 : 신남원 3상단락, 신남원-신광주 선로 탈락
- 1단계 : GFM 미설치 동적 안정도 분석 / GFM 설치시 동적 안정도 분석
- 2단계 : GFM – 동기조상기 조합함에 따른 GFM 용량 변경 검토 → **GFM + SC = Mix** 통합 운영 가능



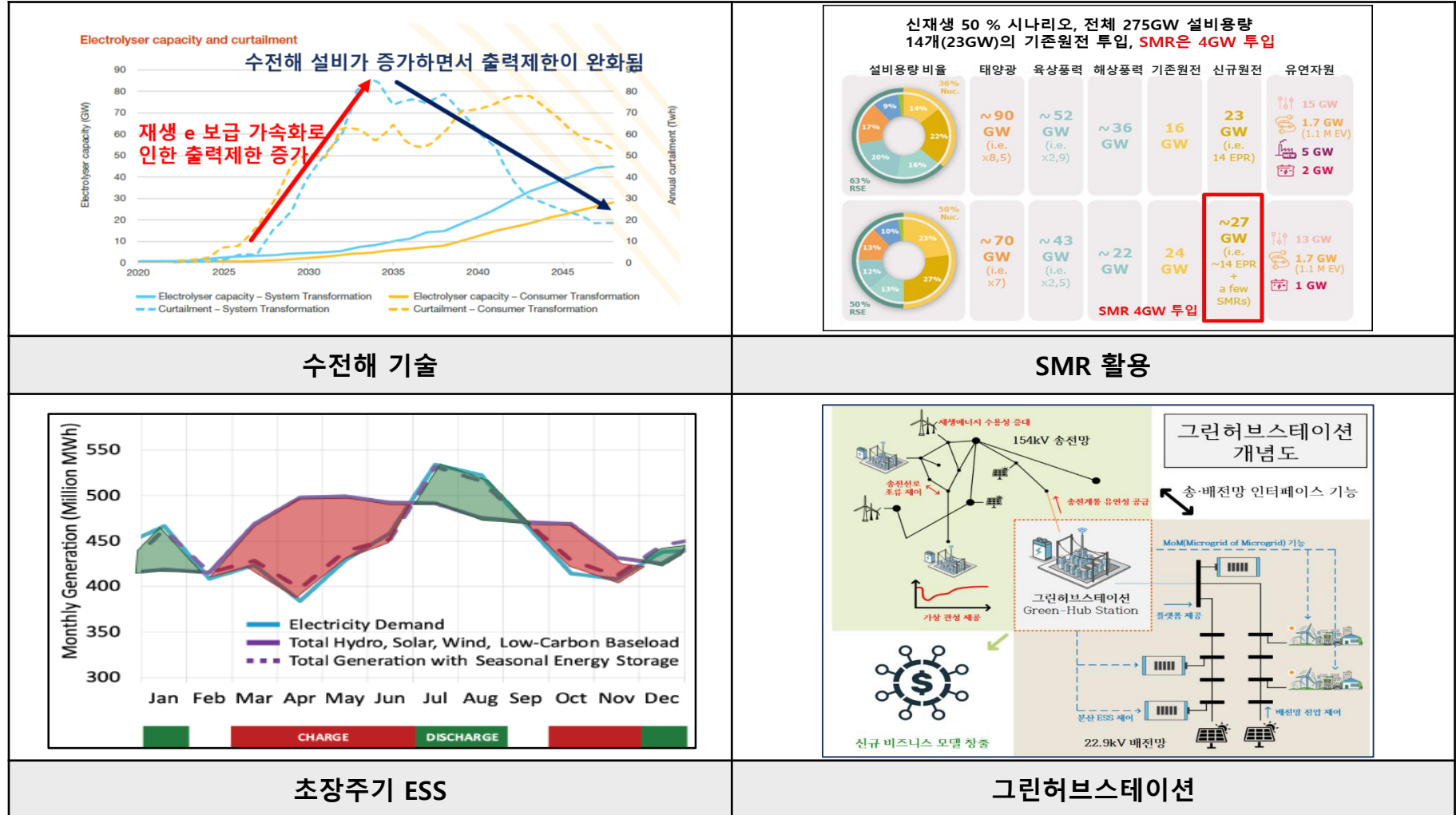
<GFM 모델 유무에 따른 특성>



<GFM + 동기조상기 Mix 동특성 분석>

3. 탄소중립 미래계통 구성 : 신기술 적용 방안

□ 미래 계통 신기술 적용 방안





Q&A