

대용량 재생e 확대와 HVDC 기술의 활용 전망

2023. 7. 5.

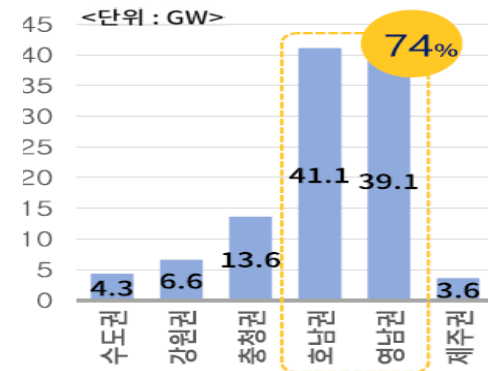
한국전력공사
전력연구원 송변전연구소 책임 객주식

탄소중립과 신재생e 확대 전망과 이슈

- 정부 정책 : 2050 탄소중립 이행 국제적 합의 정책 선언(2021)
 - 재생에너지 도입 가속화, 원전 이용 확대(2023)
- 해상풍력발전 2030년경 부터 급증 → 신재생 발전비중 30.6%, 용량 108.3GW(2036)
 - 전북 서남권(2.4GW), 신안(8.2GW), 울산(6.0GW) 등
 - 신재생E 전남 및 영남 지역 74% 집중



- 송전용량 부족, '26년 이후 재생E 수용 한계 도달 예상
 - AC 계통(345kV 변전소/송전선로) 보강 시급
 - 재생E에 의한 지역 간 생산-소비 불균형 회피 한계
- AC 계통 보강의 한계, 어려움(기술적,사회적,경제적) : 대안은?
 - (기술적)AC 계통 보강 루트 신설, 송전용량 확장 필요
 - 과부하, 안정도(전압/주파수 등) 저하, 고장 전류 초과
 - (사회적)민원 등 사회적 수용성, 적기 설비 보강의 불확실성 증가 (준공 지연, 송전/발전제약 증가)
 - (경제적)설비 보강에 56조원 이상 투자비 예상



국내 풍력, 태양광 보급 전망

10차 전력수급기본계획 수립

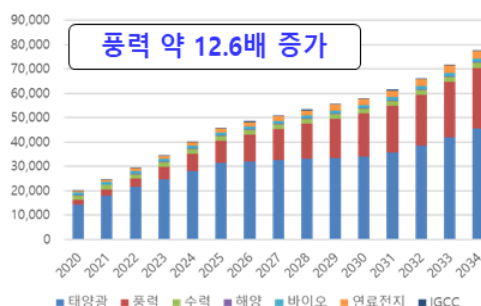
9차 수급계획 대비 10차 수급계획의 풍력 발전 보급 확대

✓ 10차 수급계획 풍력발전 보급 전망 확대에 따른 소비지로 장거리 수송 방안 필요

구분	9차 계획 (증가율 %)	10차 계획 (증가율 %)
태양광	14GW → 45GW (219%)	22GW → 66GW (197%)
풍력	2GW → 25GW (1,256%)	2GW → 34GW (1,742%)

✓ 수급 계획상 보급 증가량 및 증가율 : 풍력 > 태양광
→ 해상풍력E 수용 및 호남-수도권 수송방안 필요

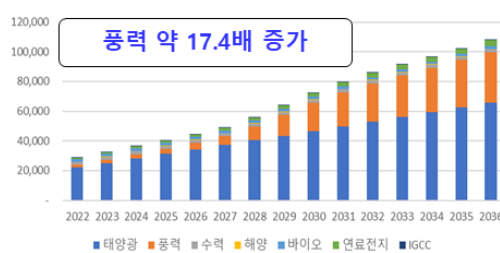
연도별 사업용 신재생 보급 전망[MW]



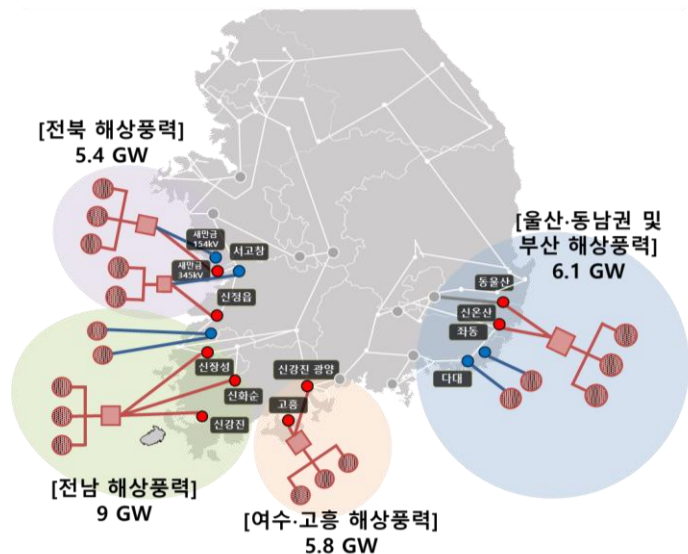
구분	단위:MW '20년(a)	'34년(b)	b/a	증가율/년
태양광	14,294	45,594	219.0%	6.4%
풍력	1,834	24,874	1256.3%	36.9%
수력	1,817	2,085	14.7%	0.4%
해양	256	256	0.0%	0.0%
바이오	1,000	1,410	41.0%	1.2%
연료전지	580	3,200	451.7%	13.3%
IGCC	346	346	0.0%	0.0%
합 계	20,126	77,764	286.4%	8.4%

9차 수급계획 신재생 보급 전망('20~'34)

연도별 신재생 에너지 설비 보급 전망[MW]



구분	단위 : MW 2022년	2036년	증가량 [%]	연 평균 증가율[%]
태양광	22,100	65,700	197%	14%
풍력	1,851	34,089	1742%	124%
수력	1,851	2,129	15%	1%
해양	256	256	0%	0%
바이오	1,800	1,800	0%	0%
연료전지	947	3,947	317%	23%
IGCC	346	346	0%	0%
합계	29,151	108,267	271%	19%



10차 전기본 2036년 해상풍력 발전단지 계획

10차 수급계획 신재생 보급 전망('22~'36)

재생e 수용을 위한 전력계통의 보강 방안

10차 전력수급기본계획 수립

HVDC 송변전 설비계획 8GW 반영

- ✓ 재생E 보급 급증지역(신안 및 서남권)의 발전 전력을 수도권 지역으로 수송하기 위한
지역간 융통 선로 계획 적기 이행을 위한 서해안 DC 연계 기술 개발 필요

〈 10차 전기본 주요 신규 송변전 설비계획(안) 〉

목적	내역
재생에너지 집중예상 지역 보강	신해남/새만금-태안TP-서인천C/C/영흥TP, 군산-신기흥, 광양-신진천, 신화순/신고흥-신계룡
송전 혼잡지역 망 여건 개선	당진TP-서화성-가정개폐소, 신탄정-신판교
원전 연계 보강	신강원-동용인, 신영주-신용인, 신고창-고덕#3, 신경주개폐소-울주
국가첨단전략산업	신평택, 고덕#3, 동용인
신도시 택지개발지구	신하남, 남양주, 신고양, 서화성



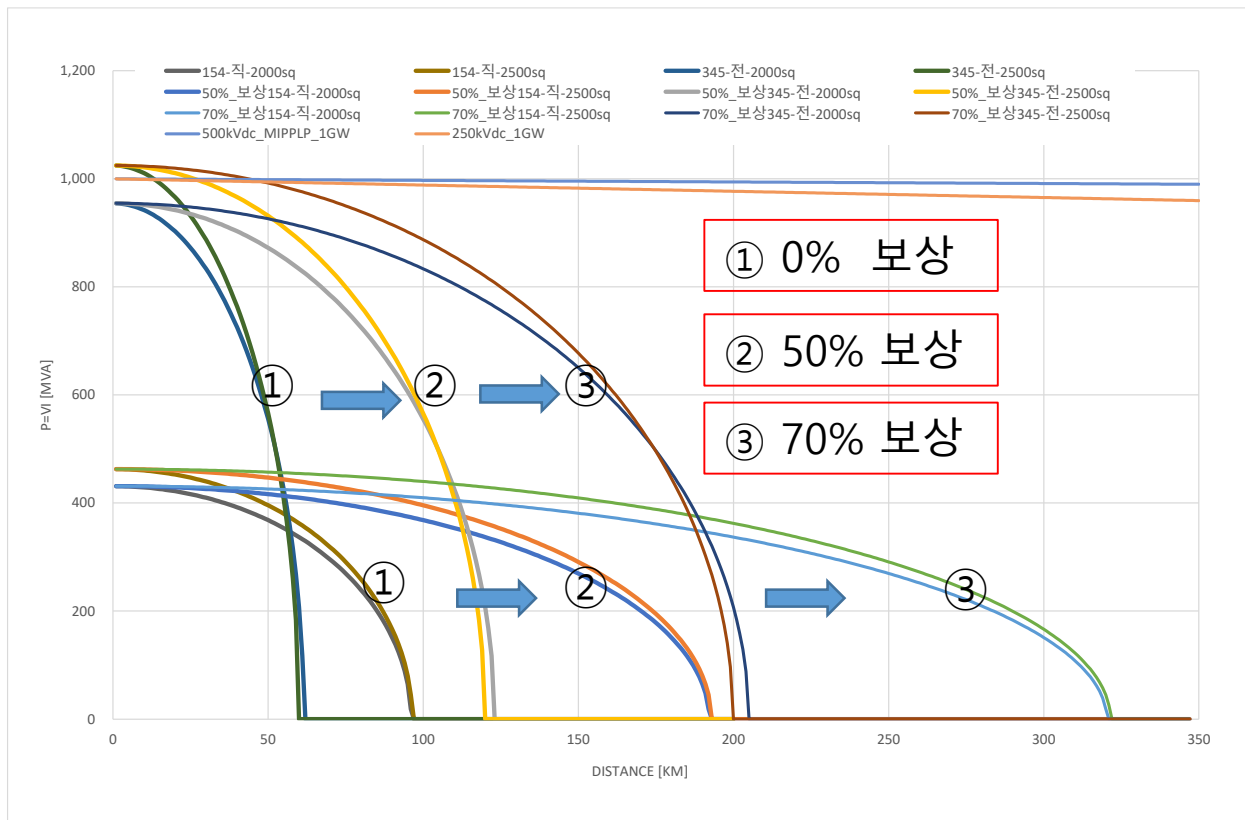
재생E 집중예상지역 보강 계획(안)

- ✓ 가공선로 보강의 어려움 → 지중, 해저 케이블 확대

- 케이블 송전시 고려사항 : 송전 거리-용량/무효전력
- HVAC 또는 HVDC/MTDC

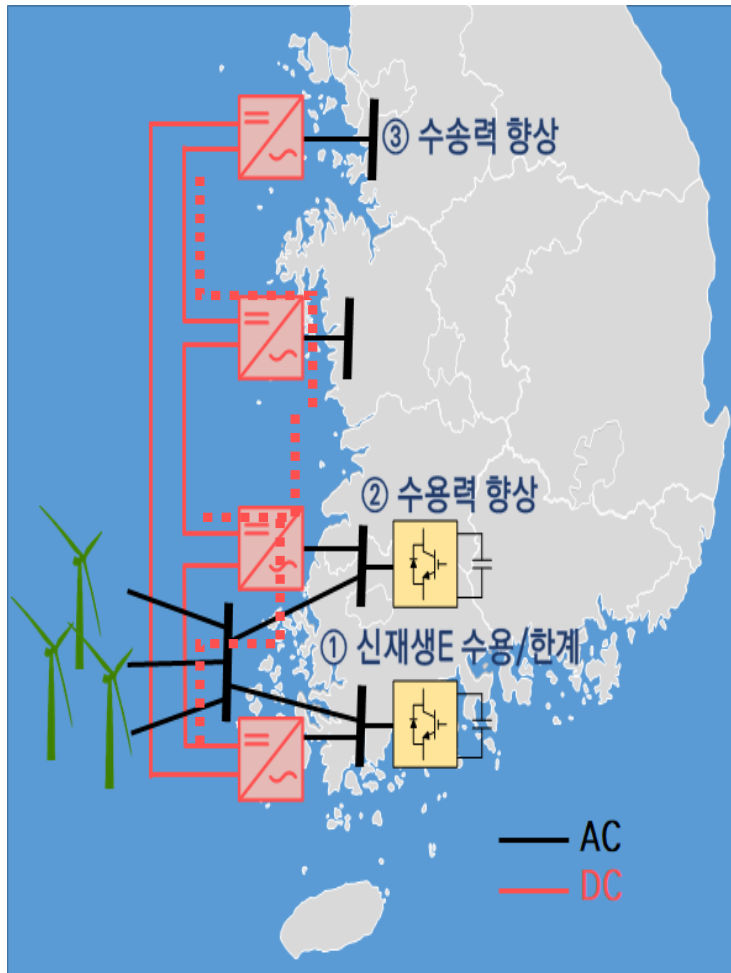
케이블 송전의 특징 : AC vs DC

- HVAC 송전거리를 제한하는 주요 요인 충전전류/무효전력, 냉각
 - 해저 케이블 : 해상 무효전력 보상 비용증가(400MW/50 ~ 100km 한계점)
 - 포설방식별 열방산 특성 : 지중(전력구,관로,직매), 해저
 - 조건 : KEPCO 단상 육상 케이블 계산값, 3상 해저 케이블의 경우 송전용량 변동 예상



AC 케이블 송전용량과 송전거리의 관계[3상 전력 기준]
KEPCO 지중 154 kV(직매) / 345kV(전력구) 허용전류 기준

연구개발 현황 – 대용량 DC 연계 기술



■ 해상풍력 계통 수용/한계 분석

① 풍력-계통

- 해상풍력단지 모델링
- 해상풍력단지 연계 계통 모델링 및 해석
- 육지 계통 영향(변동성, 가변성) 분석
- 해저 케이블 계통, 공진, 고조파, 전압, 안정도 등
- 100% 인버터 전원계통 연계 설계/제어, 운영

■ 해상풍력 수용력 향상 기술(연계점)

② 접속 개소

- 해상풍력 변동성/ 불안정성 억제 방안 검토
- 계통 안정화 설비(ESS, FACTS 등) 신기술 규격 도출
- 계통 안정화 설비 적용 및 운영 기술

■ 해상풍력 장거리 수송 향상 기술

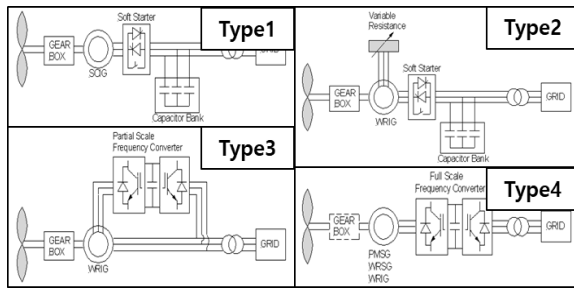
③ DC수송

- 수도권 대용량 장거리 전력 전송 방안 도출
- 가상 관성 적용 MTDC 설계 기술 개발
- RTDS 기반 DC 전력 전송 방안 검증

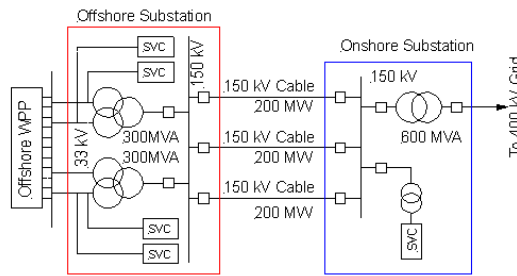
연구 개발 현황 (국내 해상풍력 발전단지 분석 및 모델링)

✓ 해상풍력 터빈/발전기 및 발전단지 연계 방식 특징

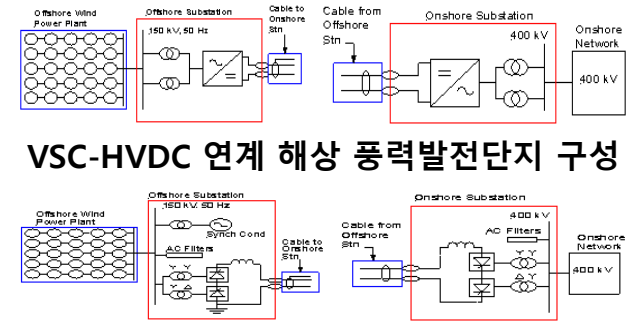
- 풍력발전기 type, 연계 방식 : HVAC, HVDC(LCC/VSC)
- 해상풍력 연계 방식 별 기술 적용 효과 및 비용/손실 특성



풍력발전기 터빈 타입별 구조

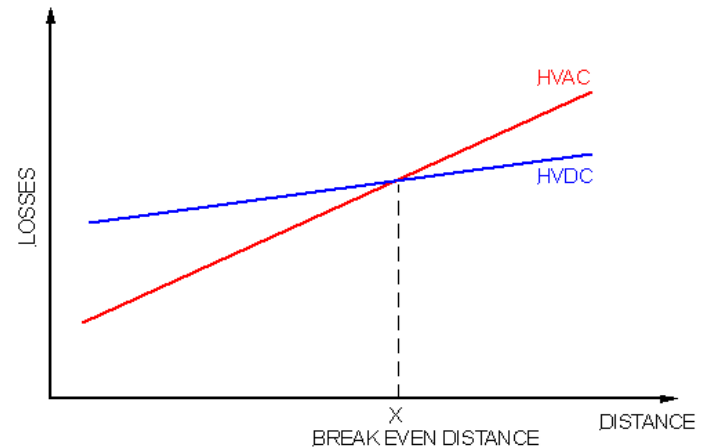


HVAC 연계 해상 풍력발전단지 구성



VSC-HVDC 연계 해상 풍력발전단지 구성

LCC-HVDC 연계 해상 풍력발전단지 구성

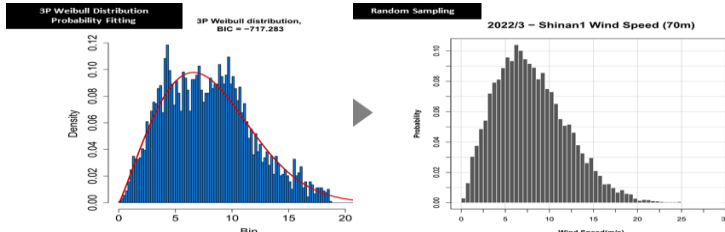


해상풍력 연계 방식별 거리에 따른 손실

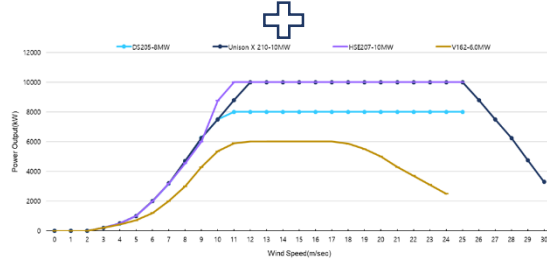
연구 개발 현황 [해상풍력 발전량 예측 및 모델링 - 연계용량 설계]

✓ 해상풍력 발전단지 풍력발전 출력 확률 모델 개발 : 이용률, 변동성, 안정성, 경제성

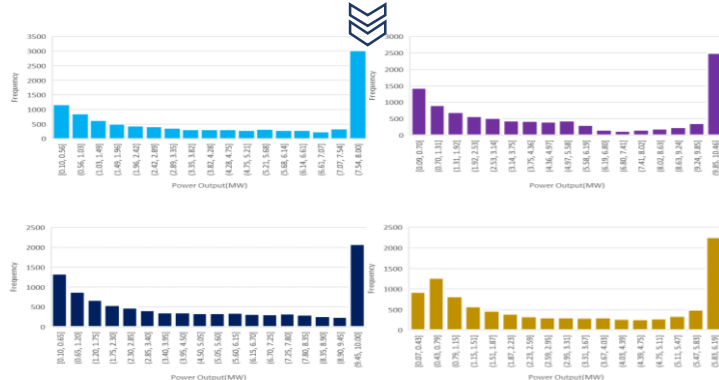
- 해상풍력 시범단지 풍황계측자료 기반 국내 해상풍력 발전단지 출력 확률 모델 수립 및 분석



(a) 해상풍력 시범단지 풍속 확률 모델 도출



(b) 풍력터빈 제조사별 Power Curve 예측



(c) 제조사별 해상풍력 시범단지 풍력발전 출력 확률 모델 적합

국내 해상풍력 발전단지 풍력발전 출력 확률 모델 수립(안)

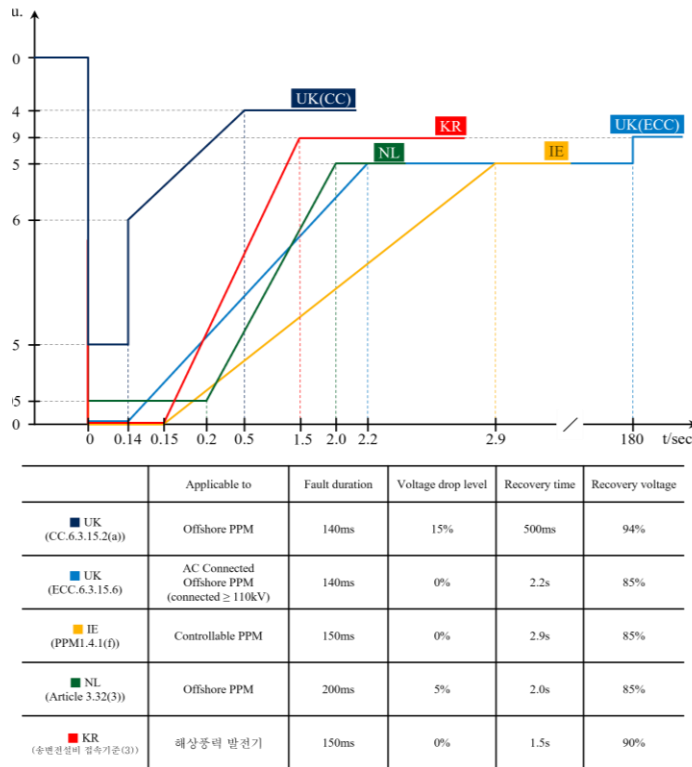
풍황계측자료 및 확률 모델 기반 신안/서남권 시범단지 연평균 이용률 예측 결과

해상풍력 시범단지	이용률(Capacity Factor)
사례-1	53.0%
사례-2	52.9%
사례-3	37.5%

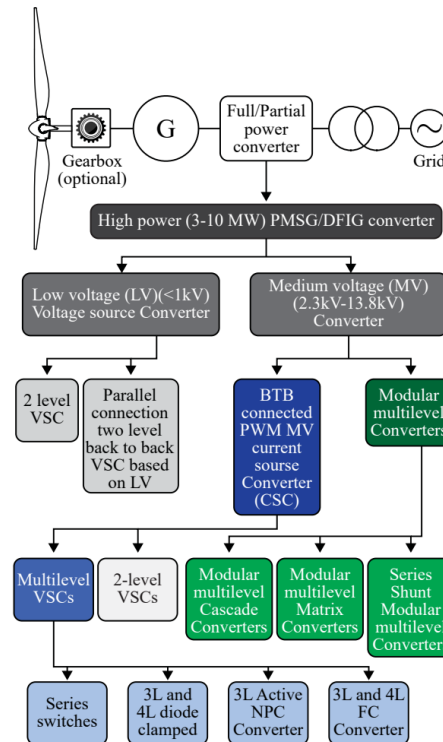
연구 개발 현황 (해상풍력 발전단지 분석 및 모델링 - 연계기준)

✓ GW급 해상풍력 발전단지 연계 계통 모델(안) - HVAC 연계 수 Gvar 보상설비 필요

- 국내외 Grid Code 비교 및 국내 해상풍력 발전기 연계 규정 업그레이드 필요
- 국내 해상풍력 발전단지 연계 계통 모델 수립 기본 설계기술/방안 확보



국내/국외 국가별 Grid Code(FRT) 비교

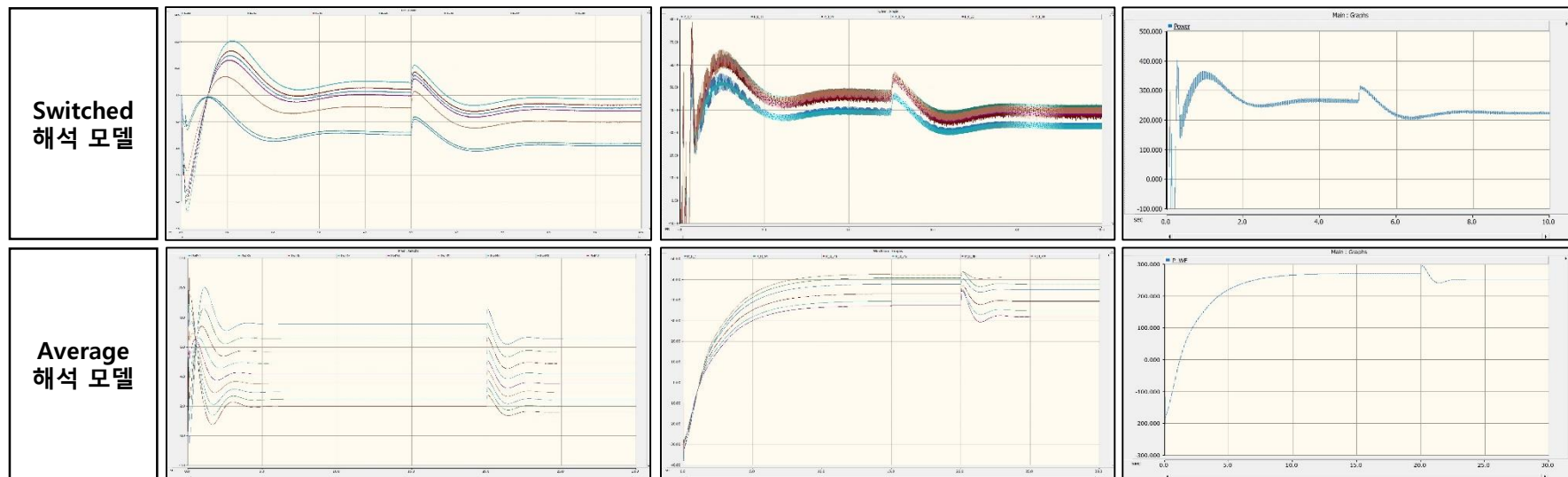


Type3/4 터빈 정격별 컨버터 종류

연구 개발 현황 (국내 해상풍력 발전단지 연계 계통 모델개발)

✓ 해상풍력 발전단지 연계 계통 해석 모델 특성 분석

- PSCAD 기반 해상풍력 발전단지 해석 모델 출력 특성 분석



터빈 유효전력 출력 특성

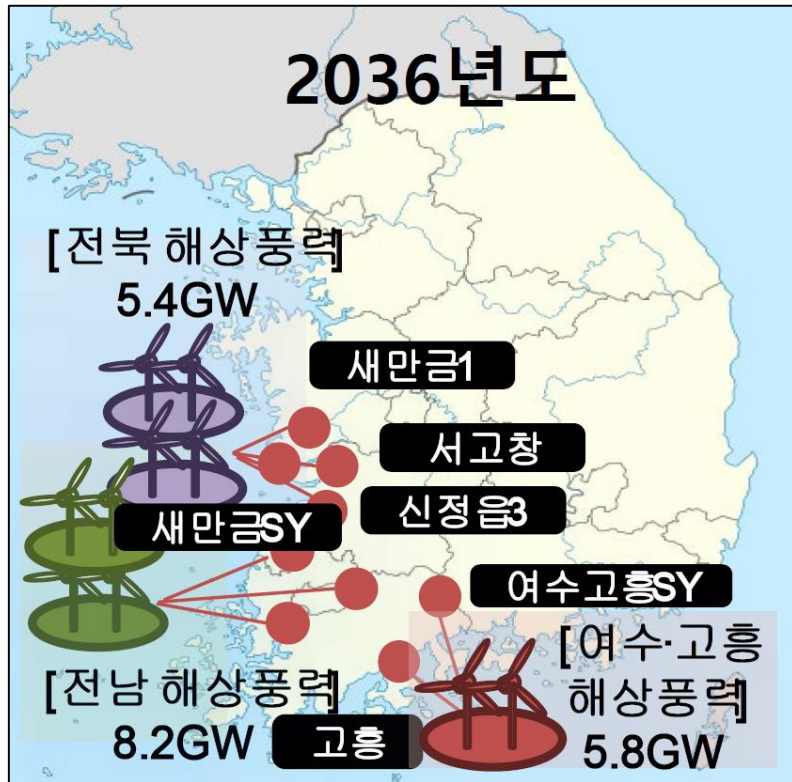
Feeder 유효전력 출력 특성

발전단지 유효전력 출력 특성

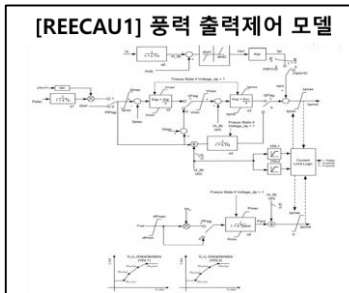
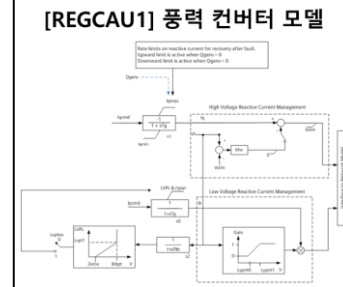
연구 개발 현황 (육지 접속 계통 해석 모델 개발 및 계통 영향 분석)

✓ 10차 수급계획 기반, PSS/E DB 분석 및 해상풍력 계통 연계 시나리오 수립

- PSS/E 중장기 계통 DB 분석 및 해상풍력 발전 계획 반영
- 10차 수급계획 및 계획 불확실성을 고려한 해상풍력 계통 연계 시나리오 수립



PSS/E DB 계획 반영



	Con Value	Con Description
1	0.0200	Tg, Converter time constant, second
2	2.0000	Rrpt, LVPL ramp rate limit (pu/s)
3	0.6000	Bkpt, LVPL voltage 2 (pu)
4	0.0000	Zerx, LVPL voltage 1 (pu)
5	0.1000	Lvpl1, LVPL gain (pu)
6	2.0000	Volim, Voltage limit for High Voltage Reactive Current Manag
7	0.0010	Lvpr1, High Voltage point for Low Voltage Active Current Ma
8	0.0000	Lvpr0, High Voltage point for Low Voltage Active Current Ma
9	-1.0000	Iolim, Current limit for HVRCM, pu (< 0)
10	0.0200	Tlfr, Voltage filter time constant for LVRCM (s)
11	0.0000	Khv, Overvoltage compensation gain used in HVRCM (>=0 an
12	999.0000	Iqmax, Upper limit on Rate of change for reactive current (pu/s)
13	9999.0000	Iqmin, Lower limit on Rate of change for reactive current (pu/s)
14	1.0000	Accel, Acc. factor for smoothing out voltage & angle calcula

	Con Value	Con Description
1	99.0000	Vdip (pu), low voltage threshold for reactive current injection
2	99.0000	Vup (pu), high voltage threshold for reactive current injection
3	0.0000	Trv (s), Voltage filter time constant
4	-1.0000	dbd1 (pu), Voltage error dead band lower threshold (<=0)
5	0.1000	dbd2 (pu), Voltage error dead band upper threshold (>=0)
6	0.0000	Kqv (pu), Reactive current injection gain
7	2.0000	Iqtl (pu), Upper limit on reactive current injection gain
8	0.0000	Iql (pu), Lower limit on reactive current injection gain
9	1.0000	Vref0 (pu), User defined reference (if 0, initialized by model)
10	0.0000	Iqfrz (pu), Value at which Iqfrz is held following voltage dip
11	0.0000	Thd (s) (<=0), Time that Iqfrz is held at Iqfrz following voltage
12	0.0000	Thd2 (s) (>=0), Time that Iqfrz is held at Iqfrz following voltage
13	0.0200	Tp (s), Filter time constant for electrical power
14	0.5200	Qmax (pu), limit for reactive power regulator
15	-0.5200	Qmin (pu) limit for reactive power regulator
16	1.5000	VMAX (pu), Max. limit for voltage control
17	0.8000	VMin (pu), Min. limit for voltage control
18	1.0000	Kqp (pu), Reactive power regulator proportional gain
19	0.0100	Kqi (pu), Reactive power regulator integral gain
20	0.5000	Kvp (pu), Voltage regulator proportional gain
21	0.2500	Kvi (pu), Voltage regulator integral gain
22	0.0000	Vbias (pu), User-defined bias (normally 0)
23	0.0000	Tvref, Time constant for voltage reference

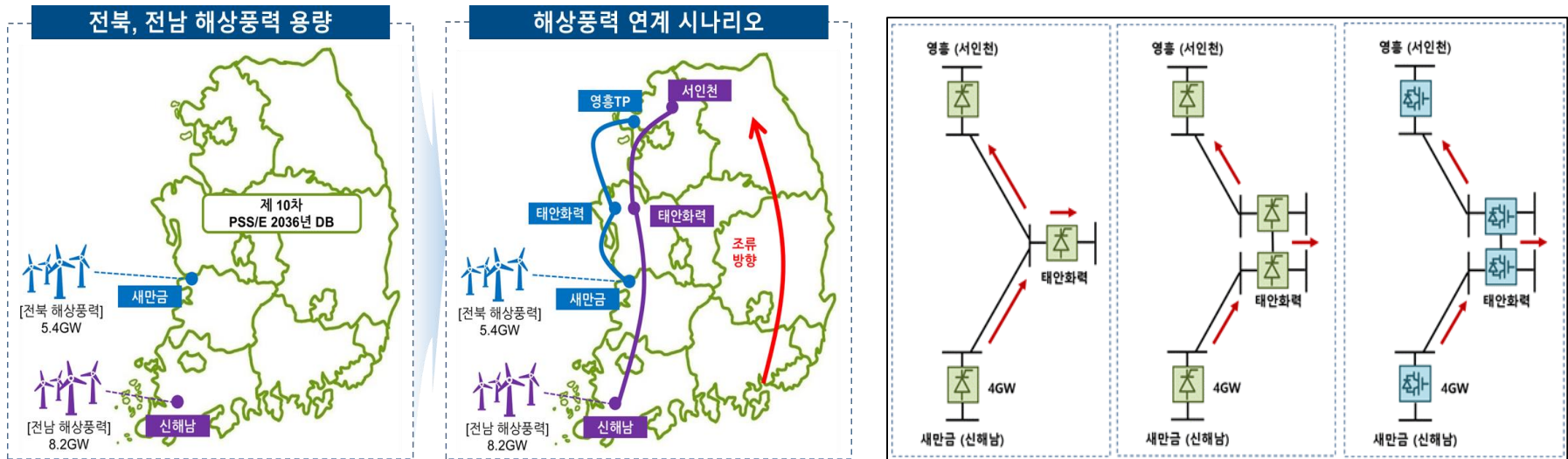
	Con Value	Con Description
1	0.0010	Tlfr, Voltage or reactive power measurement filter time constant
2	1.0000	Kp, Reactive power PI control proportional gain (pu)
3	0.0010	Ki, Reactive power PI control integral gain (pu)
4	0.0000	Tl, Lead time constant (s)
5	0.0200	Tl, Lag time constant (s)
6	0.3000	Vr, Voltage below which State s2 is frozen (pu)
7	0.0000	Rc, Line drop compensation resistance (pu)
8	0.0000	Xc, Line drop compensation reactance (pu)
9	0.0000	Kc, Reactive current compensation gain (pu)
10	1.0000	emax, upper limit on deadband output (pu)
11	-1.0000	emin, lower limit on deadband output (pu)
12	0.0000	dbd1, lower threshold for reactive power control deadband (<=
13	0.0000	dbd2, upper threshold for reactive power control deadband (>=
14	1.0000	Qmax, Upper limit on output of V/Q control (pu)
15	-1.0000	Qmin, Lower limit on output of V/Q control (pu)
16	1.0000	Kqp, Proportional gain for power control (pu)
17	0.0010	Kqi, Proportional gain for power control (pu)
18	0.0200	Tp, Real power measurement filter time constant (s)
19	-0.0006	dbd1, Deadband for frequency control, lower threshold (<=0)
20	0.0006	dbd2, Deadband for frequency control, upper threshold (>=0)
21	99.0000	femax, frequency error upper limit (pu)
22	-99.0000	femin, frequency error lower limit (pu)
23	1.0000	Pmax, upper limit on power reference (pu)

풍력 발전기 과도해석 모델 구조 및 파라미터 분석

연구 개발 현황 (육지 접속 계통 해석 모델 개발 및 계통 영향 분석)

✓ PSS/E 기반 육지 접속 계통 해석 모델 개발 및 분석 : 시나리오 개발

- 해상풍력 연계 계획 반영 PSS/E DB 수급운영 방안 모델링 및 풍력 수용을 위한 전력 수송 방안 검토



해상풍력 연계 및 HVDC 연계 전력 수송 방안

DC 연계 시나리오 및 모델 구성

연구 개발 현황 HVDC 기술방식 비교 - LCC/VSC

✓ 계통 용량(강건도) 고려한 분석 비교 : 인버터 전원

- 해상풍력E 전력수송을 위한 HVDC 시스템 종류 별 계통 보강 예상 비용 및 기술방식 비교 분석
- 계통 강건도(SCR) 기반 10차 수급 계획 HVDC 연계 변환소 기술 별 계통 적용 검토

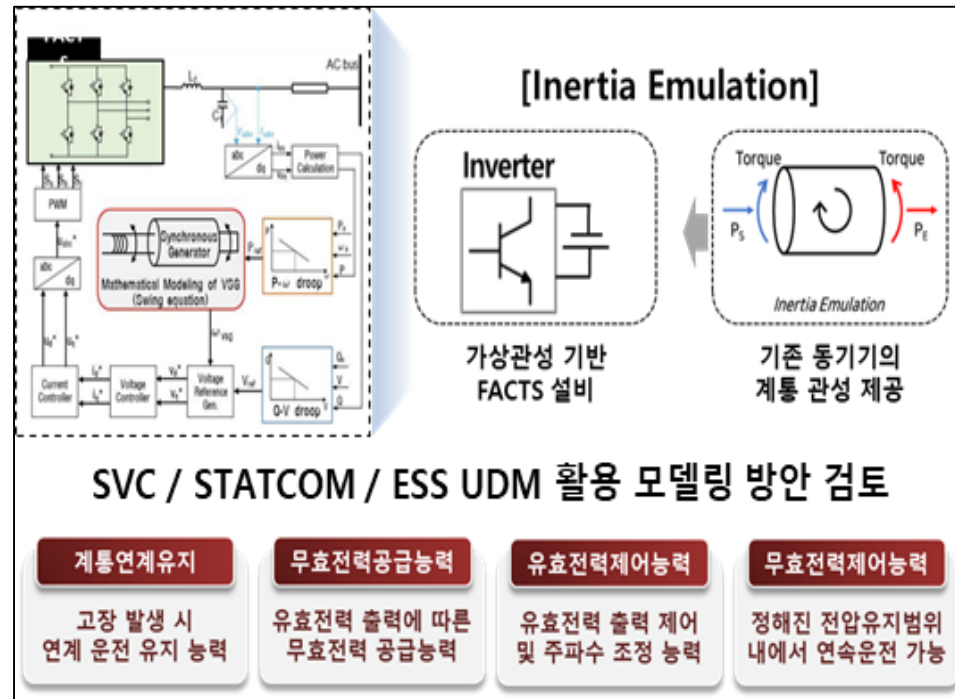
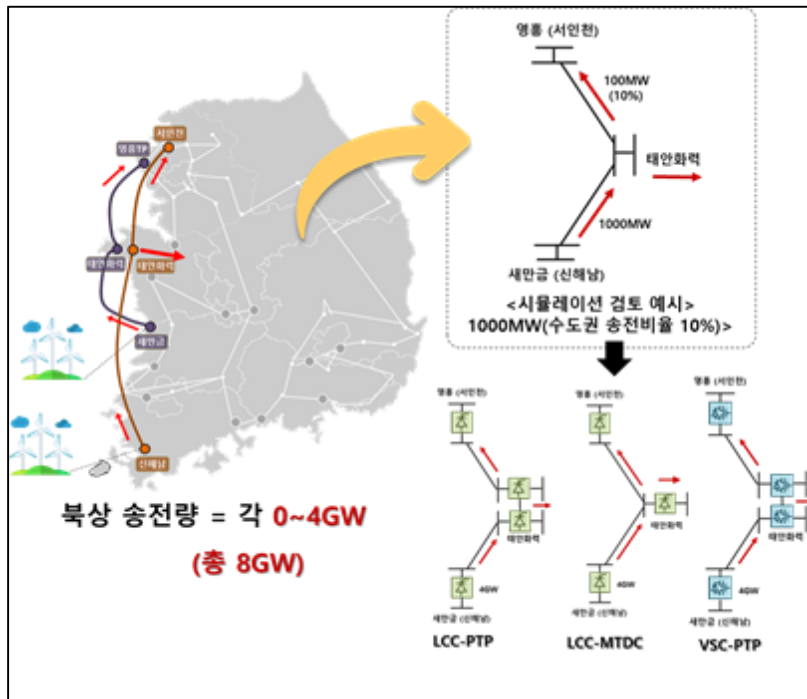
항 목	AC	전류형		전압형	비고
연계가능용량(GW)	1.5 이하	4.8 GW 이하	<	10 GW	345kV 연계
무효전력	-	소비, 보상 필수	<	불필요	
고조파 필터	-	필수	<	불필요	
강건도(SCR)	-	SCR 3.0 이상	<		재생e 연계 유리
부지면적	-	100%	<	60%	
적용가능 설비용량	-	1100kV, 12GW	>	525kV, 2GW	
손실	-	0.7%	>	1.0%	
비용	-		>		
DC-Grid 확장성	-	불리	<	유리	
양방향 전력전송	-	불리	<	유리	
솔루션(설계) 복잡도	대	중	<	소	

송전망 보강구현 기술방식 별(AC/LCC/VSC) 비교

연구 개발 현황 (육지 접속 계통 해석 모델 개발 및 계통 영향 분석)

✓ PSS/E 기반 육지 접속 계통 해석 모델 개발 및 분석

- 재생E 집중 지역 보강을 위한 HVDC 연계 시나리오 별 계통 조류 영향 분석
- HVDC 연계 육지 접속(AC) 계통 및 DC 시스템 안정도 검토 방안 수립
- ▶ 호남권 계통 조류 불안정에 따른 계통 보강 및 안정화 방안 개발 필요



DC 연계에 따른 전력 조류 케이스 분석

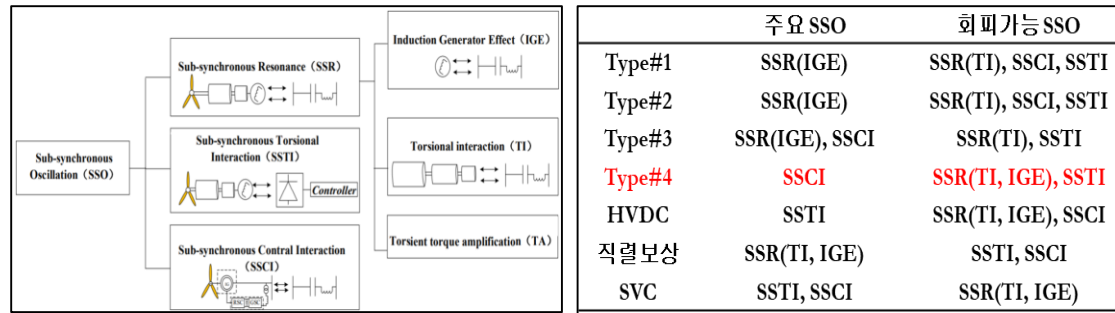
- PSS/E DB 기반 육지 접속 계통 시나리오에 따른 광주전남 정상상태 조류 영향 분석
- 육지 접속 계통 시나리오에 따른 전압 및 주파수 안정도 분석 → 상정고장 시 주파수 불안정
- ▶ 계통 안정 유지 및 재생E 수용 향상을 위한 DC 연계 시나리오 적합성 및 계통 안정화 설비 구축 필요

RMS 기반 계통 안정화 설비 해석 모델링

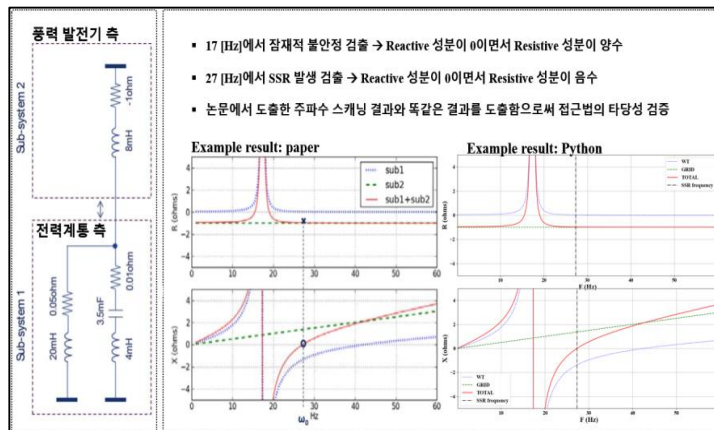
연구 개발 현황 (육지 접속 계통 해석 모델 개발 및 계통 영향 분석)

✓ 해석 자동화 도구 : SSO 분석

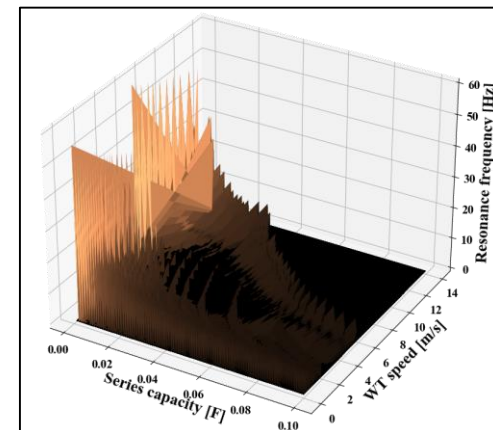
- 계통 상호영향 분석 방안 개발 및 SSO(Sub-Synchronous Oscillation) 사례 분석
 - Python/Julia 기반 주파수 스캐닝 알고리즘 개발 및 IEEE 벤치마크 모델 기반 검증
- * 주파수 스캐닝 : 풍력발전 설비-전력계통 접점 기준, 등가 임피던스 기반 SSR 공진 주파수 검출 기법



풍력 발전기 SSO 발생 개략도 및 타입별 SSO



주파수 스캐닝 알고리즘 검증(Julia)

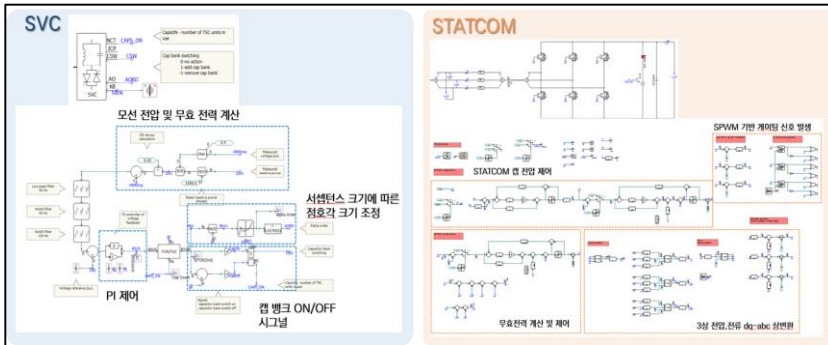


풍속을 고려한 SSR 분석 결과

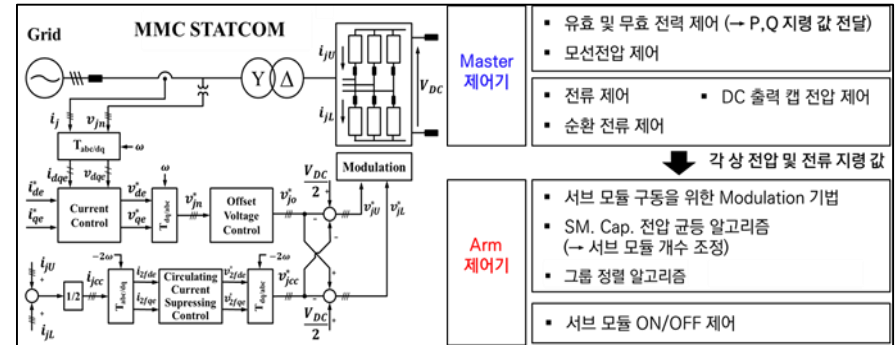
연구 개발 현황 (계통 안정화 설비 해석 모델 개발)

가상관성 기반 계통 안정화 설비 EMT(PSCAD) 해석 모델 개발

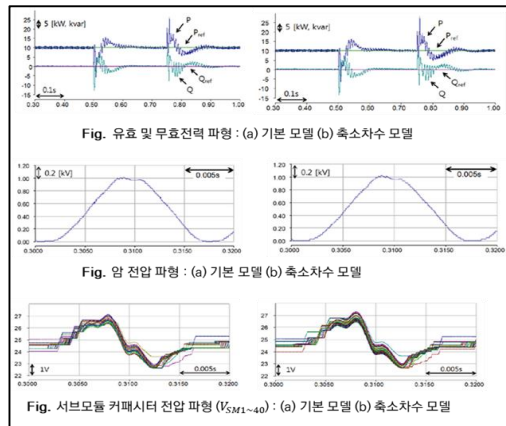
- 무효전력 보상장치(FACTS) PSCAD 해석 모델 구조 및 제어 분석 → 개발 방향 수립(MMC STATCOM)
- EMT 기반 시뮬레이션 효율화를 위한 축소 모델 해석 기법 적용 방안 검토
- MMC STATCOM 가상관성 지원을 위한 제어기 및 ESS 적용 방안 검토



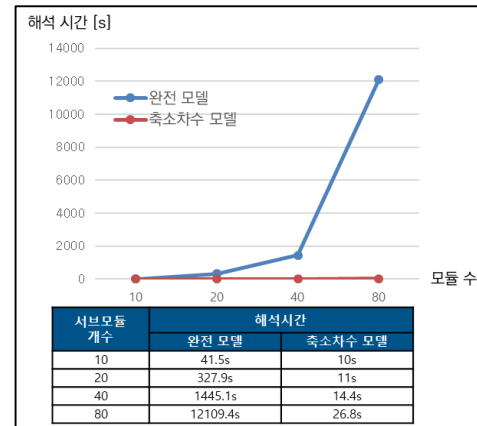
무효전력 보상장치(FACTS) 설비 모델 제어 블록



MMC STATCOM 제어기 설계 및 구성



축소 차수 모델 정합성 검토



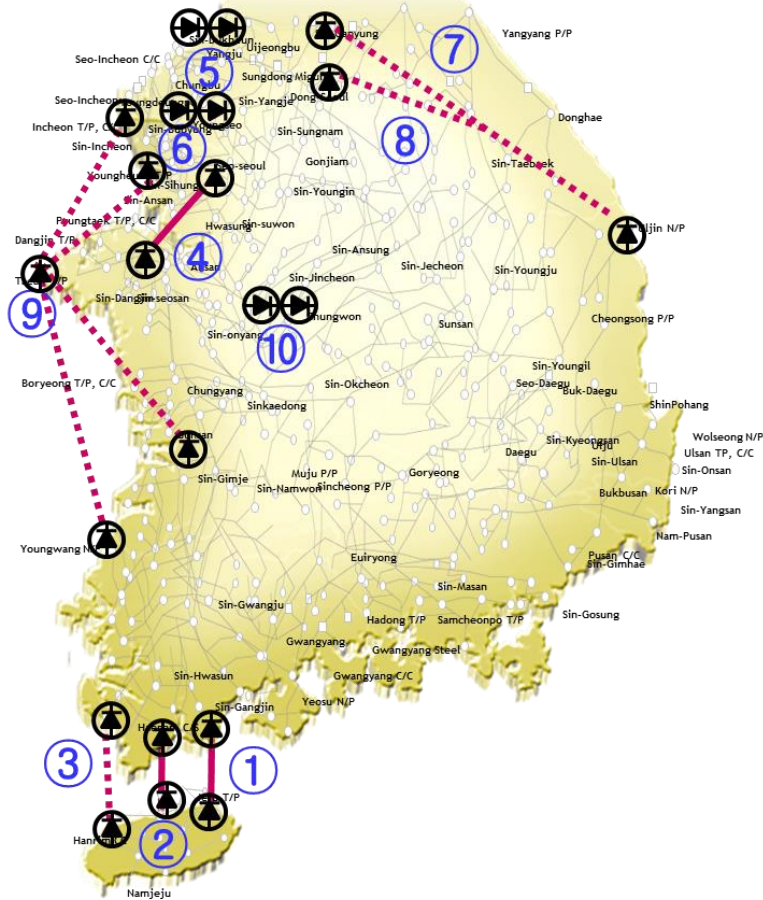
축소 모델 해석 시간

재생e 연계 MTDC 연계 프로젝트 - 해외

사업명	국가	방식	목표	용량	전압	DC 차단기	비고
Nanao MTDC (2017)	중국	MTDC	해상풍력연계	수백MW	160 kVdc	ACI 차단기	Pilot plant
Zhoushan MTDC (2016)	중국	MTDC	해상풍력 연계	수백MW	200 kVdc	DC MPE 차단기	Pilot plant
Zhangbei MTDC (2020)	중국	MTDC	내륙 계통 연계	3.0GW	500 kVdc	DC MPE/ACI 차단기	운전중
BEST PATH	유럽	MTDC	해상 풍력 연계	수 GW		미정	개념 설계
AWC	미국	MTDC	해상 풍력 연계			미정	개념 설계
Caithness-Moray -Shetland HVDC Link -Phase 2	영국	MTDC	섬-육지 계통연계	600MW	320 kVdc	하이브리드 HVDC 차단기	공사중

HVDC 프로젝트 - 국내

HVDC 현황(발전·운행, 저서·계획)



- ① 제주 #1 : 300MW Bipole (1998~)
- ② 제주 #2 : 200MW Bipole (2014~)
- ③ 제주 #3 : 200MW VSC Monopole (2024~)
- ④ 북당진-고덕 : 3GW, Bipole (2020~, 2022~)
- ⑤ 양주 : 200MW VSC BTB Monopole (2024~)
- ⑥ 신부평 : 500MW VSC BTB Monopole (2024~)
- ⑦ 동해안-신가평(EP I) : 4GW Bipole (2025~)
- ⑧ 동해안-신가평(EP II) : 4GW Bipole (2026~)
- ⑨ 신해남-태안화력-서인천복합
새만금-태안화력-영흥화력 : 4GW × 2 (Plan)
- ⑩ 당진화력-서화성, 신세종개폐소 BTB(Plan)

전압형 HVDC 수요의 증가 → MTDC / DC Grid 확장 필요성/가능성

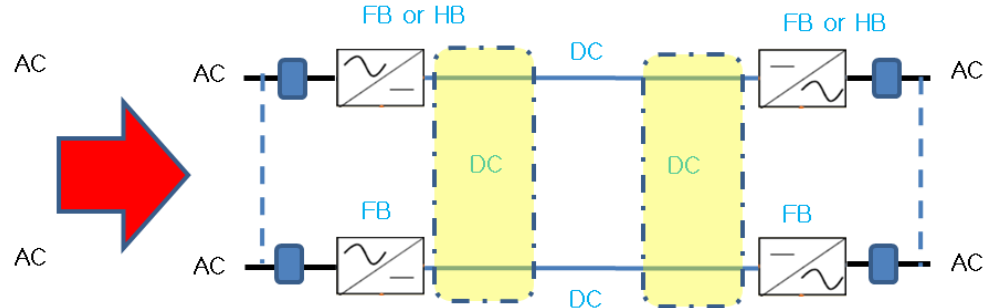
HVDC – MTDC 단계적 확장 시나리오[예시]

Stage - 1

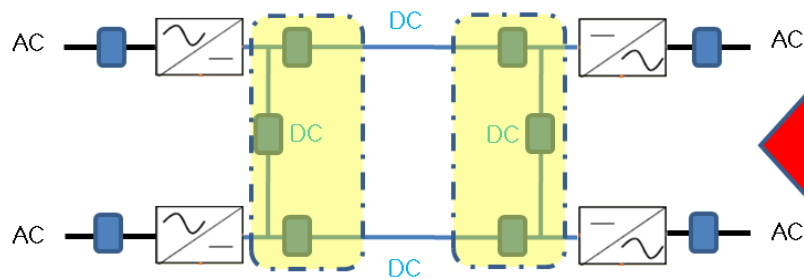


- PTP 용도
 - 해상풍력 연계점 계통 안정화
 - 송전 루트 확충

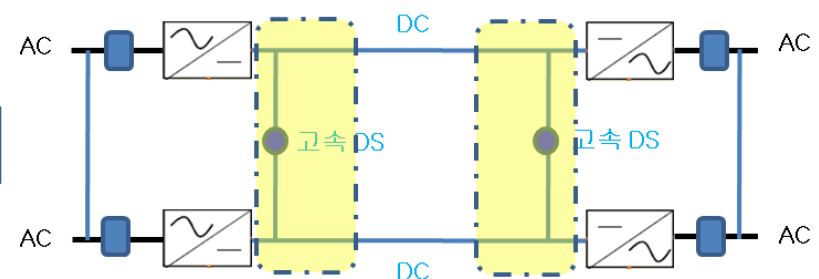
Stage - 2



Stage - 4



Stage - 3



기술개발 계획의 수정 : 조기 실증(1→3)

1단계
Lab-scale검증
(2020~2025)

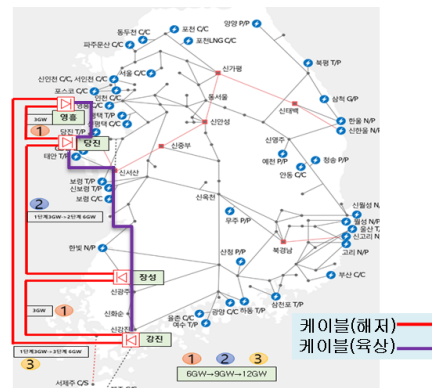
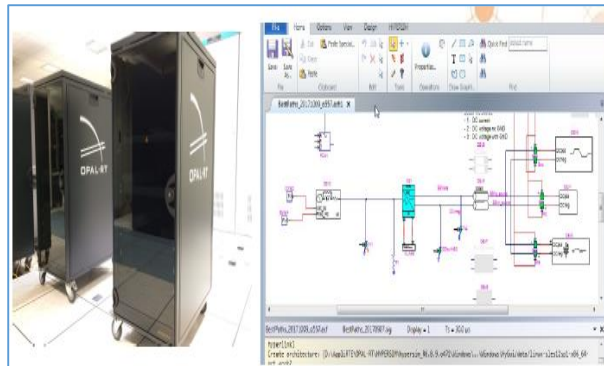
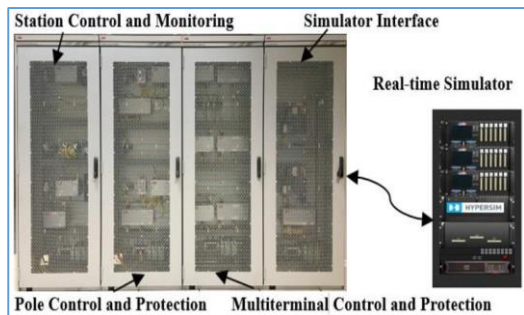
- 가상 관성 제어기 및 MTDC 설계/제어 방안 Lab-Scale 시험
- 계통 영향 분석, 통합 제어 전략 도출

2단계
축소모델 검증
(2026~2029)

- Multi-Vendor MTDC 시스템 시험 및 인증
- MTDC Test-Bed 실증 (축소 모형 실증)

3단계
시범적용/실증
(2030~2035)

- 가상 관성 제어 기반 서해안 MTDC 구축
- MTDC 신뢰성 강화 (제어/보호/진단) 기술
- 대용량 MTDC 설계 통 실증 적용 및 운영



[MTDC 케이블망 및 운영/제어 전략(예시)]

감사합니다