

춘계학술대회 전력계통계획 기술위원회 세미나

# 포괄적 전력망 계획: Why and How

2024년 4월 25일

장길수 (고려대학교)

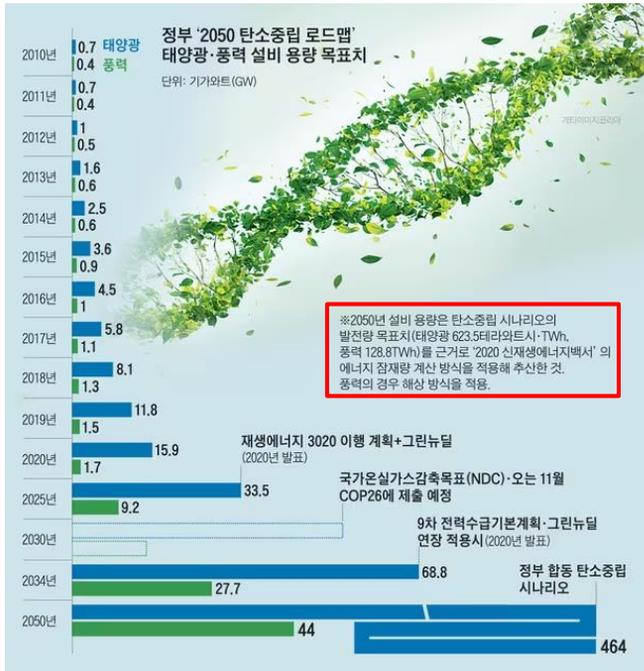
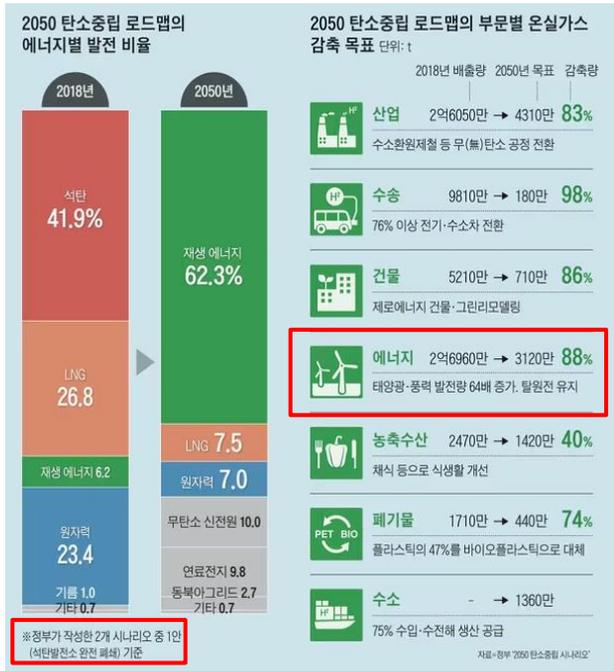
# 전력망 당면 문제

# 탄소중립과 전력망



## 탄소중립 시나리오에 따른 신재생에너지 예상 설비 용량

- B안 시나리오(신재생e 60%)에서 태양광 464 GW · 풍력 44 GW 설비 용량 추산
- A안 시나리오(신재생e 70%)에서 태양광 542 GW · 풍력 52 GW 설비 용량 추산



<탄소중립 시나리오에 따른 풍력 및 태양광 예상 설비용량 (B안 기준)> \*출처 : 조선일보, 2050 탄소중립 시나리오

# 탄소중립과 전력망



## 탄소중립 시나리오에 따른 전력망 확충 필요

- 호남권의 재생에너지 생산 전력을 수송하기 위한 지역간 **용통선로 건설 필요**
- 동해안 지역 원전 신규 건설(신한울 3·4호기) 및 계속 운전(신한울 1·2호기) 적기 수용을 위한 **송전선로 건설 필요**
- 사회적 수용성 문제로 전력망 확충 어려움

구분	송전선로(C-km)			변전소(개)			변전설비 용량(MVA)		
	2021	2029	2036	2021	2029	2036	2021	2029	2036
765kV	1,024	1,032	1,032	8	9	9	44,110	56,110	56,110
345kV	9,899	12,195	17,643	118	148	166	144,070	176,570	202,570
154kV	23,769	29,949	35,922	760	933	1,026	156,000	179,460	192,620
HVDC	498	1,774	3,084	6	17	27	4,400	35,700	66,200
<b>합계</b>	<b>35,190</b>	<b>44,950</b>	<b>57,681</b>	<b>892</b>	<b>1,107</b>	<b>1,228</b>	<b>348,580</b>	<b>447,840</b>	<b>517,500</b>

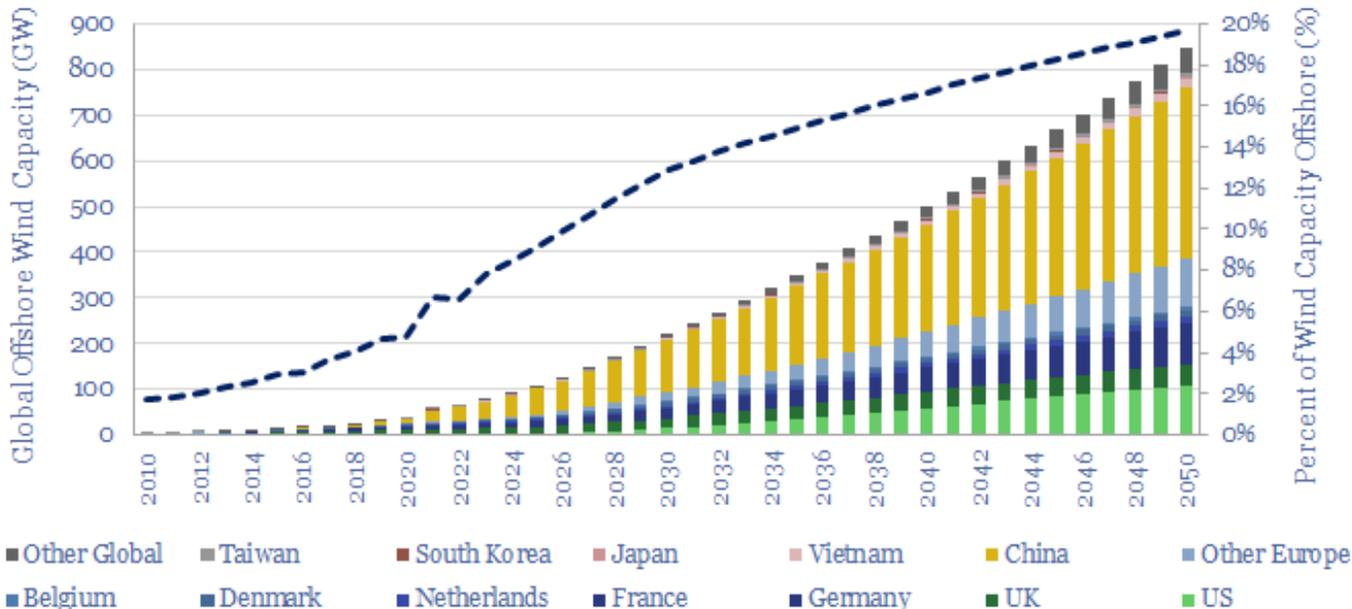
<'36년 전압 및 설비별 송변전설비 증가 추이>

# 포괄적 전력망 계획 필요성



## 해상풍력발전의 증가

- 해상 풍력의 증가는 전 세계적인 추세
- 2050년까지 최대 900 GW의 글로벌 해상풍력 설치 용량 전망



<국가별 해상 풍력 신규 설치 용량 전망>

# 포괄적 전력망 계획 필요성

## - 열악한 신재생에너지 지리적 입지

- 변동성이 큰 기후 조건과 좁은 공간으로 인해 신재생 지리적 조건이 **42개국 중 최하위**
- 전력 수요를 태양광·풍력으로만 공급 시\*, 국내 전력 안정도\*\* 70% 초반까지 추락

\* (태양광+풍력)의 연간 생산량이 연간 총소비량과 같은 규모의 설비가 운영 중일 때 기준

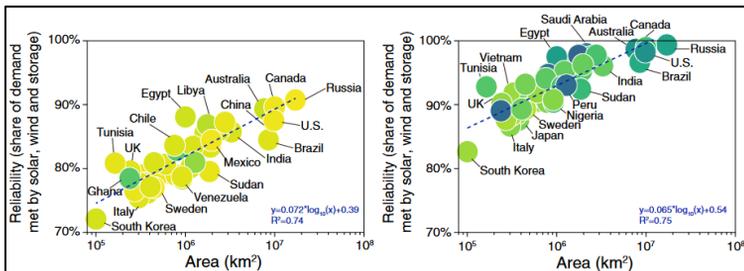
\*\* 전력 안정도 = (계통 정전 발생 시간 / 전체 시간) - 42개국 평균 전력 안정도 83%

## - 지리적 한계 극복을 위한 해상 풍력과 해상 그리드 활용 필요

### 태양광·풍력 입지... 한국, 42國중 꼴찌

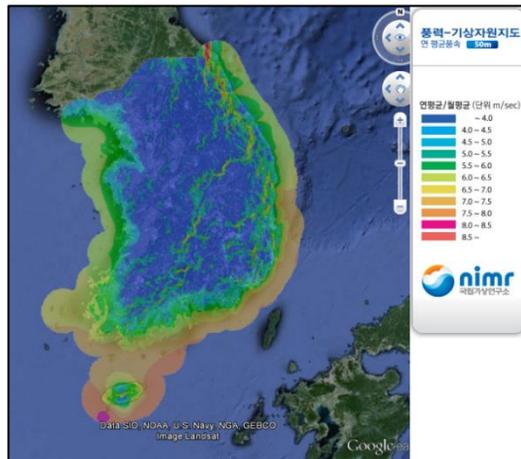
네이처, 주요국 분석 보고서

<국내 태양광·풍력 입지 뉴스>



<태양광·풍력으로만 운전 시, 국가별 전력 안정도>

좌: 생산량 = 1x소비량 우: 생산량 = 1.5x소비량



<국내 풍력 자원 지도>

\*출처 : Nature Communications

# 포괄적 전력망 계획 필요성

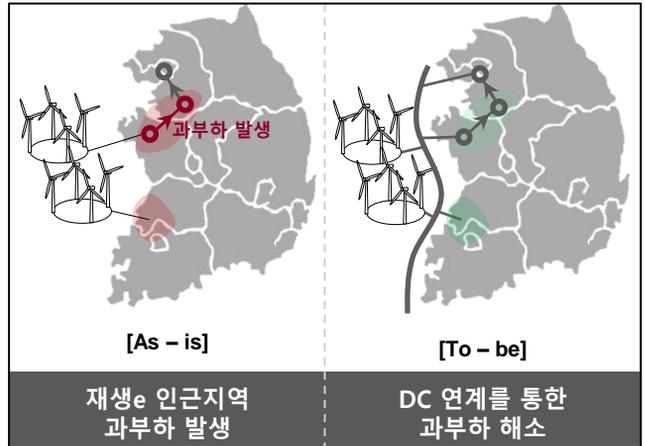
## 🔍 DC 연계를 통한 전력 조류 제어 필요

- 특정 지역의 신재생 전력 과잉 공급으로 인한 문제
- 신재생발전원의 전력계통 접속 지연 문제
- DC 해상 그리드를 통한 신재생에너지 접속과 전력 조류 제어로 변동성 대응
  - 변환 설비를 통한 전력량 제어로 전력계통 문제 해결
  - 신재생에너지원 접속 지연과 수용성 문제의 선제적 해결
  - RE100 수요에 대한 대응

정부, 전력계통 안정 위해 태양광 출력제어 나선다...호남·경남지역 지속운전성능 미개선 설비 대상  
 © 권인홍 기자 | © 승인 2023.03.24 11:00 | @ 연합뉴스



<국내 제주 출력제어 횟수 증가 사례>



<DC 연계 해상 그리드를 통한 과부하 해소>

# 포괄적 전력망 계획 필요성

## DC 직접 연계를 통한 DC 부하 공급 필요

- 해상 풍력·대규모 태양광 단지 등, DC 발전원 증설로 인한 직류 전력 발전량 확대 전망
- **대용량 DC 전력 부하 확대 전망** - 데이터센터: ('21년)142개 → (~'29년)234개 / 전기화 수요(전기차 충전 등)
- AC 변환 없는, DC 변압만을 통해 소비자에 직접 송전 가능한 **독립적인 DC 전력망** 고려 필요

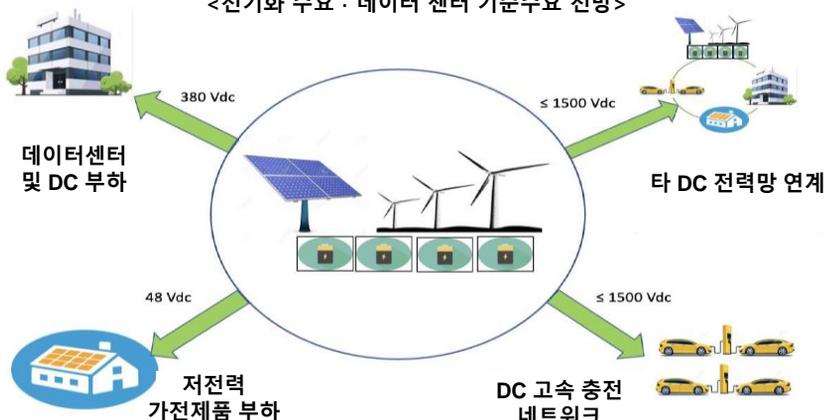
< 전력계통 소비량 기준수요 전망결과(단위 : TWh) >

연도	모형 전망	전기화	데이터센터	합계
2023	543.7	0.3	14.3	558.3
2025	562.7	3.0	19.1	584.8
2030	603.3	14.9	19.4	637.6
2034	630.7	31.3	19.0	681.0
2036	642.9	41.7	18.5	703.2

< 전력계통 최대전력(하계) 기준수요 전망결과(단위 : GW) >

연도	모형 전망	전기화	데이터센터	합계
2023	100.6	0.1	1.8	102.5
2025	104.6	0.5	2.5	107.6
2030	114.5	2.8	2.5	119.8
2034	121.7	6.0	2.4	130.1
2036	125.2	8.1	2.4	135.6

<전기화 수요·데이터 센터 기준수요 전망>



<DC 부하 전력공급을 위한 DC 전력망 예시>

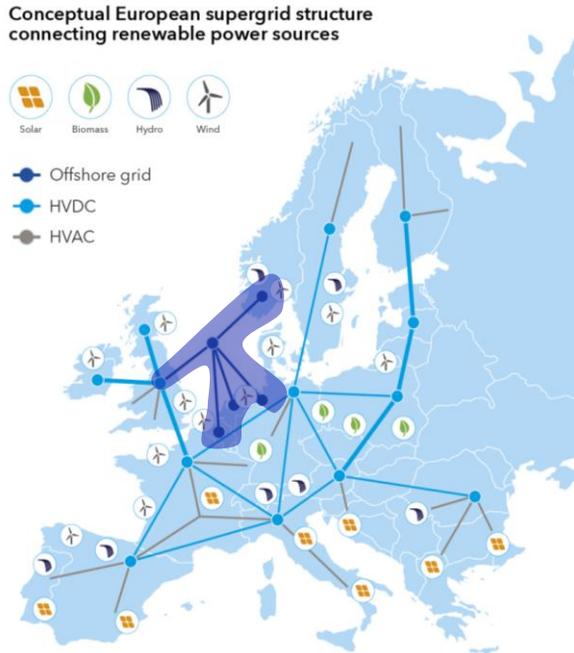
# 포괄적 전력망 계획 필요성

## 🔍 국가간 전력망 연계 필요성 증대

- 한국의 경우, 해상그리드 및 HVDC를 통한 전력망 연계 필요



<아시아 슈퍼그리드>



<유럽 슈퍼그리드>

➡ “포괄적 전력망 계획의 수단: 해상그리드와 HVDC”

# 해상 그리드 활용

# 해상 그리드 산업



## 해상 그리드 인프라의 구성

- 해상 그리드(Offshore Grid)는 해양에서 발전하는 다수 재생 에너지원 전력을 수집, 연결 및 분배하거나 해상을 통해 국가간 전력망을 연계하는 전력 인프라
- 주로 해상 풍력 발전을 위한 설비로 사용됨
- 해상 그리드 구성 인프라
  - 해상 풍력 발전소
  - 해저 및 육지 전력 케이블 (Offshore and Onshore Power Cables)
  - 해상 변환소/변전소 (Offshore and Onshore Substations)



<해상 그리드 구성의 예시>

# 해상 그리드 산업

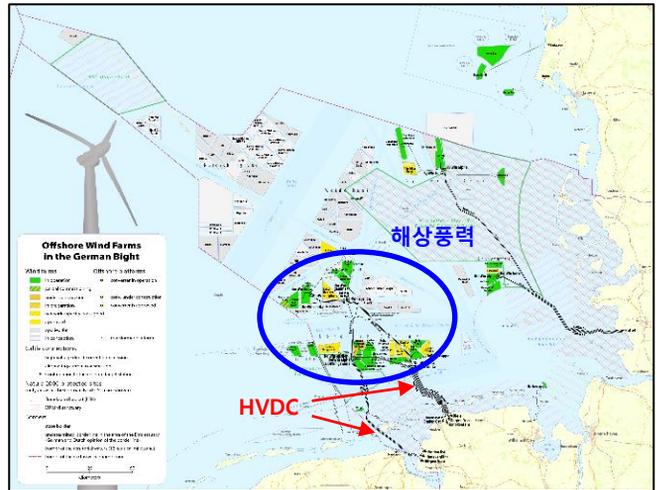


## 해상 그리드 HVDC 연계

- 해저 고전압 직류송전(Offshore HVDC)은 해상발전소와 육지 그리드 간 전력 전송에 사용
- 직류와 제어 가능한 송전의 장점 활용
- 해저 HVDC 케이블을 통해 발전소에서 육지까지 전력을 전송
- 제어가 용이하고 해상 구조물 설계에 유리한 전압형 HVDC 방식 선호
- 유럽에서는 해상 풍력의 HVDC 연계를 위한 다수 프로젝트 진행 중



<해상 그리드에서의 HVDC 연계>



<독일 해상 풍력 HVDC 연계 예시>

# 해상 그리드 산업



## 해상 그리드 케이블 업계 동향

- DC 케이블 기술 개발로 장거리 · 고전압 · 대용량 전력 전송 가능
- 해외 케이블 제조사는 **640kV급 케이블 시스템까지 개발을 완료**하였으며, **525kV급 케이블 시스템을 상용화** 진행중
- DC 525kV급 케이블 시스템은 국가핵심기술로, AC 500kV 대비 높은 기술적 · 경제적 가치가 존재
- 국내 LS전선에서 **525kV급 케이블 시스템 기술개발을 완료**하였으며, 한전은 500kV HVDC 동해안-신가평 T/L 가공선 및 지중케이블 설치 예정

Year	Voltage (kV)	Rated Power (MW)	Cable Length (km)
~ 2000	150	300	150~250
~ 2010	320	600	200~300
~ 2020	600	3000	300~800
~ 2030 (Future)	*Higher 800, 1000...	*Higher 5000, 7000...	*Longer 800 ↑

<HVDC 케이블 기술의 성장>

(\*PQ : Pre-Qualification)

제조사	525kV급 이상 PQ* 인증 현황	해외 국가
<b>Prysmian</b>	525kV	Italy
<b>Nexans Group</b>	525kV	France
<b>NKT A/S</b>	640kV	German
<b>Sumitomo Electric</b>	525kV	Japan

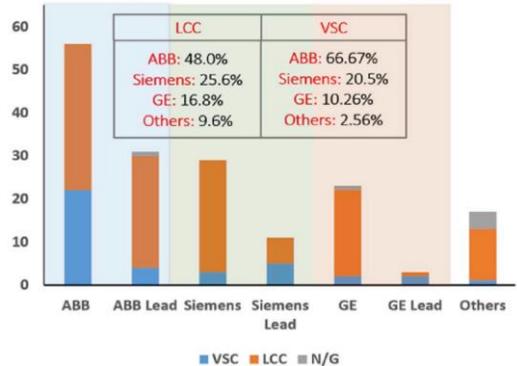
<해외 케이블 제조사 525kV XLPE PQ 확보 현황>

# 해상 그리드 산업



## 해외 컨버터 기술 동향

- 지속적으로 성장하는 HVDC 컨버터 시장은 Siemens, GE, ABB 등 해외 기업이 선점
- HVDC 수요는 지속 증가하고, 해외 3사를 중심으로 다수 프로젝트가 진행 중
- 최근 3사 모두 북해 해상그리드 건설 사업에 참여하고 있으며, 컨버터의 스펙 2GW/525kV 표준화 진행



<HVDC 컨버터 시장 점유율 (2016)>

국가	업체명	핵심기술	특징
유럽	SIEMENS	초고압직류 시장 선도기업	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 효율적인 장거리 친환경 송전, 전력망 간의 전력 교환, 분산형 전원시스템 전력망 연계 등 혁신적 솔루션 개발</li> <li>• Trans Bay Cable 프로젝트를 통해 세계 최초 MMC 상용 운영</li> </ul>
	ABB	초고압직류 시장 선도기업	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 세계 전류형 HVDC 시장의 50% 차지</li> <li>• 전압형 HVDC로 DoWin1 PJT, ±320kV 800MW, MMC 방식으로 수행 완료</li> </ul>
미국	GE	초고압직류 설비	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ALSTOM에서 전력 및 그리드 사업을 인수</li> <li>• 한전과 함께 KAPES를 설립하여 전류형 HVDC 프로젝트 진행</li> </ul>
일본	Hitachi	초고압직류 설비	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ABB와의 조인트 벤처인 'Hitachi ABB HVDC Technologies, Ltd' 설립을 통해 HVDC 기술이전</li> </ul>

<해외 컨버터 업체 동향>

# 해상 그리드 산업



## 국내 컨버터 기술 동향

### - KAPES

- GE로부터 전류형 HVDC 기술이전과 동시에 제주 #2, 북당진-고덕, EP 등의 프로젝트를 수행
- 신부평 500MW 전압형 BTB 프로젝트 추진 중 (KAPES + GE)

### - 효성

- 국책 사업을 통해 양주 200MW VSC BTB HVDC 개발 중
- STATCOM 자체 개발 및 실용화 단계를 거쳐 해외시장 진출



프로젝트명	HVDC 타입	제어기	밸브	DC 전압	용량	공급업체
제주 #3	전압형(SM)	ABB	Half Bridge SM (IGBT, HVDC Light)	150kV	200MW	ABB
양주 BTB	전압형(BTB)	-	Half Bridge SM (IGBT)	120kV	200MW	효성
신부평 BTB	전압형(BTB)	eLumina	Half Bridge SM (IGBT, Maxsine)	130kV	500MW	KAPES(GE)

<국내 주요 VSC HVDC 프로젝트 현황>

# 해상 그리드 산업

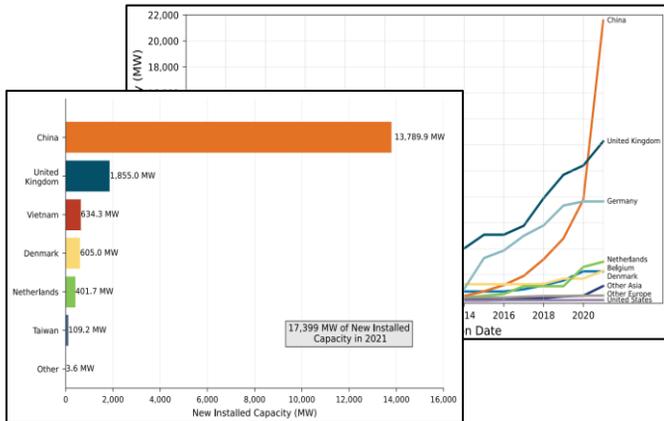


## 해상 풍력 시장 동향

- 토지 이용의 제약을 극복할 수 있고 풍력 자원이 풍부하여 육지보다 해상 풍력 조건이 우수
- '21년 17.4GW의 해상풍력이 새롭게 추가되면서, 총 50.6GW의 해상풍력이 설치됨
- '30년까지 세계 해상풍력시장은 약 230GW 보급 예상
  - 영국 National Grid의 경우 '26년까지 20GW급 Green energy project 진행



“탄소 중립 달성을 위해 해상 그리드 연계를 위한 전력망 계획 및 검토 필요”



안정적인 계통 연계를 위해  
내륙 전력계통의 동향, 문제 여부 파악 및  
해상 그리드의 보조적인 서비스 제공 가능성 등 검토 필요

\*출처 : Offshore Wind Market Report: 2022 Edition

<증가하는 해상풍력 연계에 따른 추가적 검토 필요>

# 해상 그리드 활용 사례

# 해상 그리드 프로젝트



## 벨기에 – Modular Offshore Grid

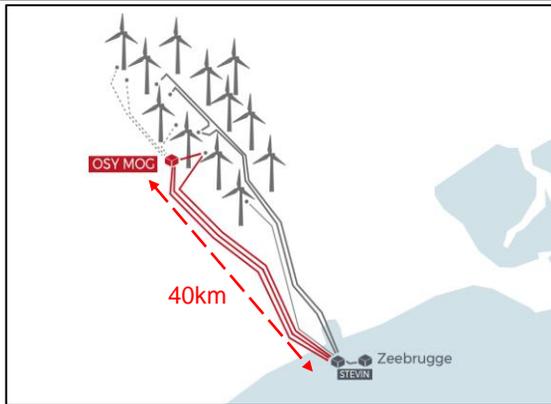
설치 위치 벨기에 북해

스펙 40km, 220kV 케이블

준공 년도 2019년, 운영 중

사업 규모 £ 365million

- 비고
- 벨기에의 TSO인 Elia는 다수의 해상풍력단지로부터 모은 출력을 육지로 전송하는 스위치 야드(Offshore Switch Yard, OSY)를 개발
  - 여러 해상 풍력의 출력을 허브 형태로 모아 육지로 전송할 수 있는 구조



<벨기에 MOG 프로젝트 개요>

1 We are making it possible to connect future wind farms to the grid

2 We are reducing the impact on the marine environment

3 We can connect new renewable energy sources (such as tidal and wave energy, or storage solutions) to the grid

4 In the long term, we will be able to build international offshore interconnectors

<벨기에 MOG 프로젝트 기대 효과>

# 해상 그리드 프로젝트 (계획)



## 독일 & 네덜란드 - TenneT 2GW Project

설치 위치 북해 (독일, 네덜란드)

스펙 2GW,  $\pm 525$  kV

준공 년도 2029~2031

- 비고
- 독일과 네덜란드를 중심으로 대규모 해상풍력 컨버터 건설 진행 중
  - TenneT 주도의  $\pm 525$  kV, 2GW 스펙의 컨버터의 표준화 주도
  - GE, Hitachi 등 해외 선진 기업 다수 참여



<HVDC를 통한 해상풍력 연계>



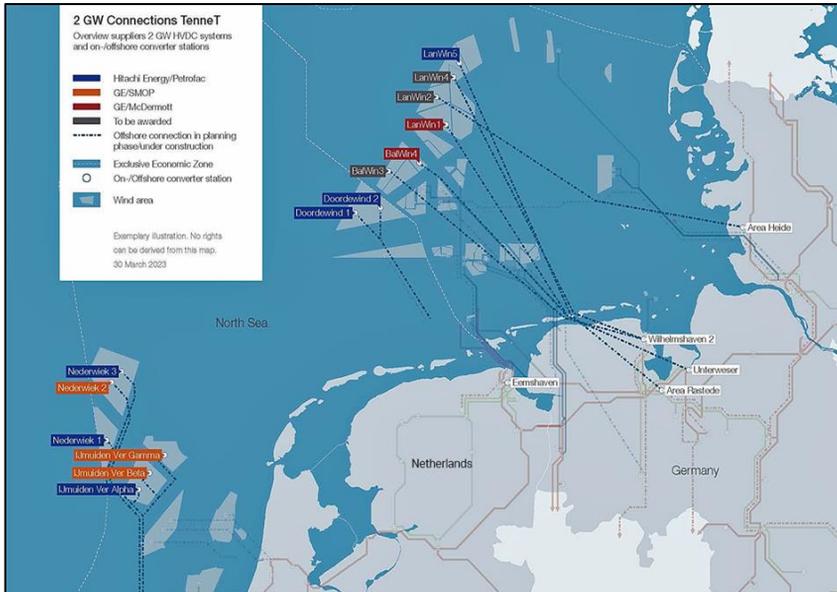
<표준화된 컨버터 스테이션 : Big Yellow Box>

# 해상 그리드 프로젝트 (계획)



## 독일 & 네덜란드 - TenneT 2GW Project

- **Hitachi**에서는 Petrofac 社와 협업하여 12GW의 컨버터 스테이션을 공급할 예정
- **GE**는 Sembcorp Marine, McDermott 社와 협업하여 10GW의 컨버터 스테이션을 공급할 예정
  - 이외 물량에 대해서는 추후 계약 예정



<TenneT 2GW Project Map>

국가	프로젝트 명	준공 년도
독일 (12GW)	BalWin3	2031
	BalWin4	2029
	LanWin1	2030
	LanWin2	2030
	LanWin4	2031
	LanWin5	2031
네덜란드 (16GW)	IJmuiden Ver Beta	2030
	IJmuiden Ver Alpha	2029
	IJmuiden Ver Gamma	2029
	Nederwiek 1	2030
	Nederwiek 2	2030
	Nederwiek 3	2031
	DoordeWind 1	2031
DoordeWind 2	2031	

<주요 프로젝트 준공년도>

# 해상 그리드 프로젝트 (계획)



## 덴마크 - Energy Island

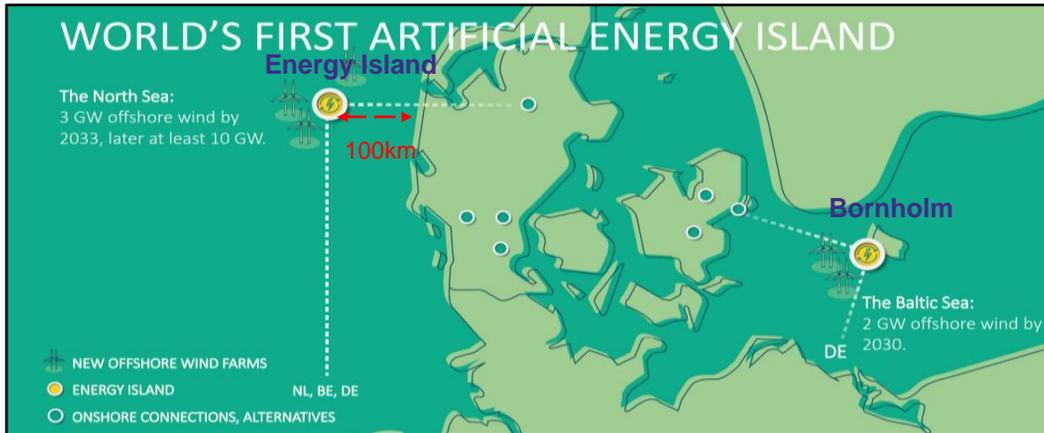
설치 위치 보른홀름 섬 & 북해 에너지 섬 (덴마크)

스펙 Bornholm - 3GW, 525kV  
Energy Island - 2033년까지 3GW 40년까지 10GW, **해안에서 100km**

준공 년도 Bornholm - 2030 완료예정, Energy Island - 2033 완료예정

사업 규모 € 2billion(Bornholm), € 8billion(Energy Island)

비고 • 해상풍력단지의 에너지를 인공 섬 혹은 섬에서 HVDC로 변환 후 공급



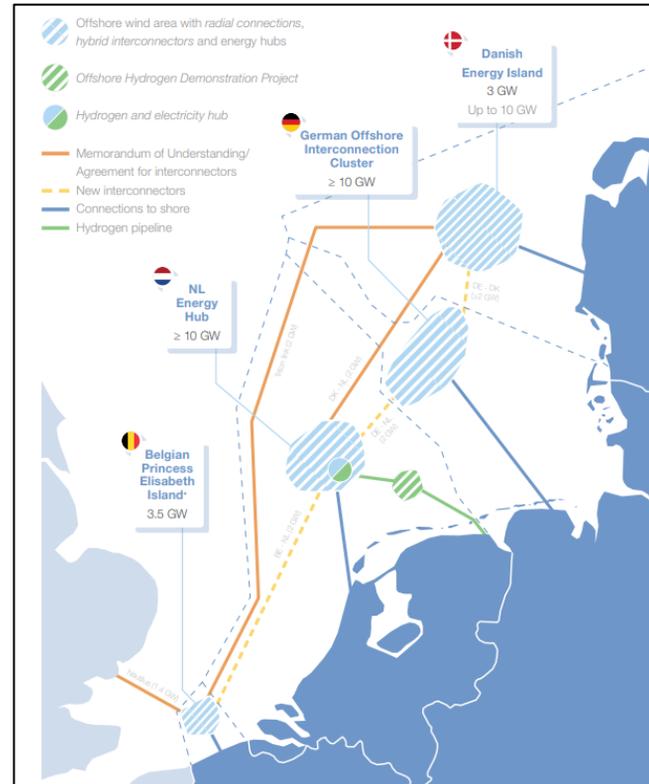
<Denmark Energy Island 구성도>

# 해상 그리드 프로젝트 (계획)



## 북해 해상 그리드의 연계 (안)

- 벨기에, 네덜란드, 독일, 덴마크는 각 국가의 해상 그리드와 수소 생산 설비를 연계할 계획
- 국가 간 해상 그리드 연계를 통해 재생 에너지 생산 전력 교환 가능
- 해상풍력이 다양한 시장과 연계되어 풍력 사업자는 유리한 시장 참여 가능
- 개별 전력망에 과부하 발생 시 해상 그리드의 운전점을 조정하여 전력 조류의 혼잡 관리



<연도별 HVDC 누적 설치 용량>

# 해상 그리드 프로젝트 (계획)



## UK-Morocco Xlink

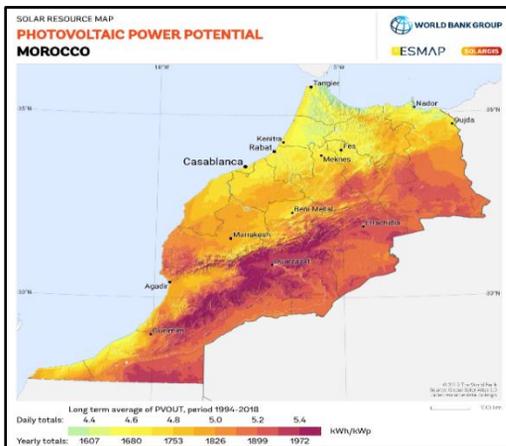
설치 위치 모로코 - 영국

스펙 3800km, 두개의 1.8GW 케이블 송전(총 3.6GW)

준공 년도 2030 완료예정

사업 규모 £ 20billion

- 비고
- 모로코의 신재생에너지자원을 HVDC를 통해 영국에 직접 송전
  - 22.5GWh/5GW 배터리 저장장치와의 결합으로 안정적인 전력 전송



<Morocco의 태양광 자원>



<UK-Morocco Xlink 전력 프로젝트>

# 해상 그리드 프로젝트 (계획)



## AAPowerLink (Australia-Asia PowerLink)

설치 위치 호주 Darwin - 싱가포르

스펙 길이: 약 5,000km(해저 4,300km) 용량: 가공(3GW), 해저(1.75GW)

준공 년도 2024년 건설 예정, 2029년 완전 가동 목표

사업 규모 \$ 35 billion

- 비고
- 호주 NT(Northern Territory)지역의 태양광에너지를 해저케이블을 통해 송전
  - 세계 최대 규모의 17GW~20GW 용량의 태양광 발전소 및 36GWh~42GWh 용량의 배터리 시스템을 포함



<AAPowerLink 연결>

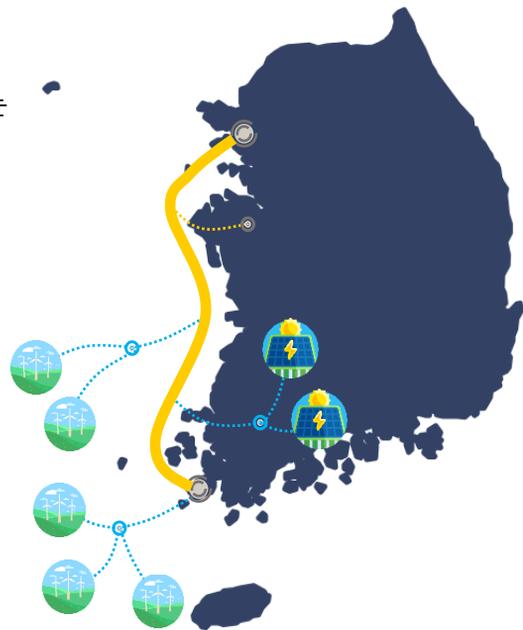
# 포괄적 전력망 계획

# 포괄적 전력망 계획 1



## 서해안 DC Grid (10차 전력수급기본계획 반영)

- 해상 경과지를 가진 HVDC 전력망
  - 신재생E 전용 접속 전력망
  - 대규모 재생E 발전 단지 출력을 수도권으로 송전하는 육지 송전선로 대체
  - 각 컨버터를 통한 전력 제어로 전력계통 문제를 해결하는 Multi-terminal VSC HVDC
- 서해안 DC Grid의 장점
  - 재생E 자원의 최대 활용이 가능한 선제적 접속 방안
  - 제어가능 설비와 연계하여 재생E 변동성 대응
  - P2P 방식 DC 접속 대비 적은 설비 용량
  - RE100 기업에 직접 신재생E 공급
- 서해안 DC Grid 도전 과제
  - 막대한 사업비 부담 방안
  - 다수 HVDC에 대한 상위 제어 기술 확보
  - 국산 기술에 의한 사업 진행



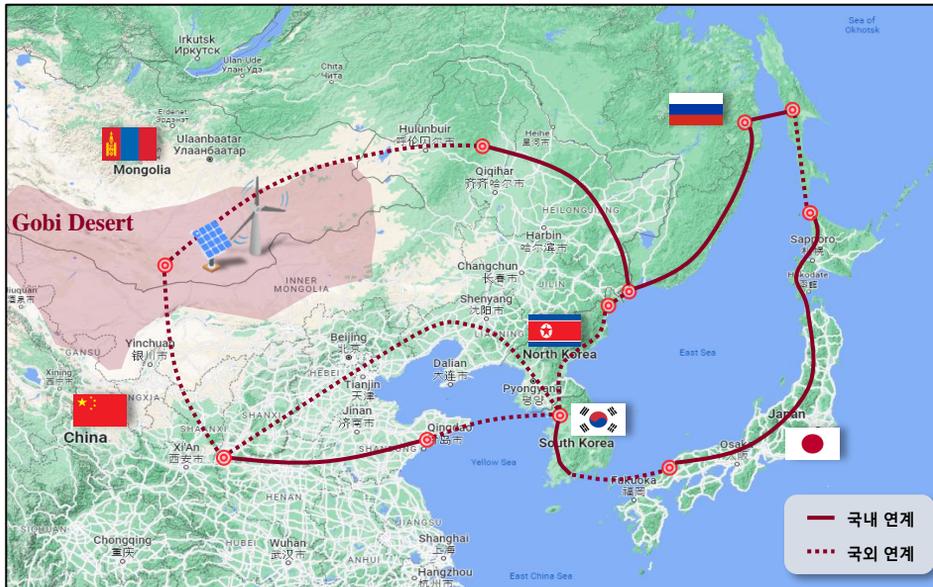
<서해안 DC Grid>

# 포괄적 전력망 계획 2



## 동북아 슈퍼그리드

- 한국과 중국, 일본, 러시아, 몽골을 잇는 대규모 DC 송전망 구축 계획
- 극동 시베리아 및 몽골 고비사막의 청정에너지 등 풍부한 해외 자원 활용 가능



<동북아 슈퍼그리드 개념도(예시)>

# 포괄적 전력망 계획 2

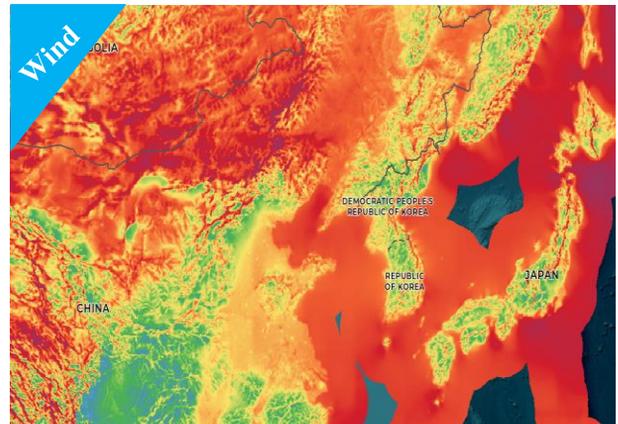
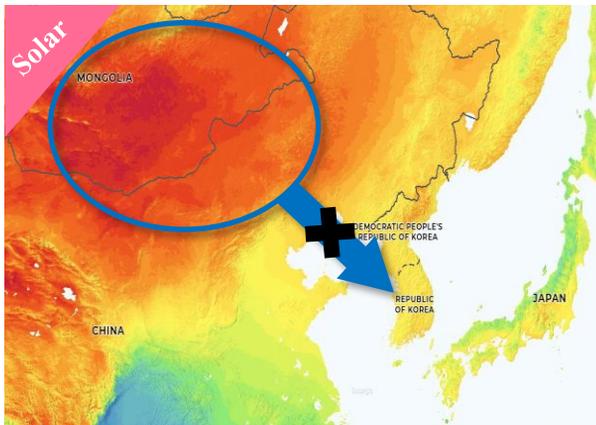


## 동북아 슈퍼그리드

- 국가 간의 해상 그리드 연계로 동북아 재생에너지 자원 활용
  - 몽골의 풍부한 풍력에너지(약 1100GW) 및 태양에너지(약 2500GW) 자원 활용
- 예비력과 변동성 공유를 통한 독립 전력계통 한계 극복
  - 장거리 케이블과 다른 주파수로 인한 HVDC 기술 기반의 전력망 기술 필요



“해상 그리드를 활용한 전력 공급의 다양성 확보”



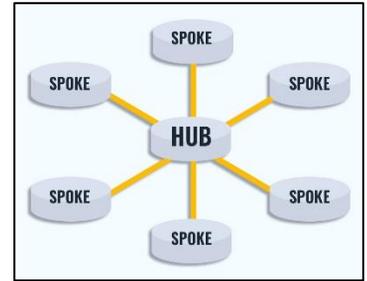
<동북아시아 지역의 재생에너지 잠재량>

# 포괄적 전력망 계획 3

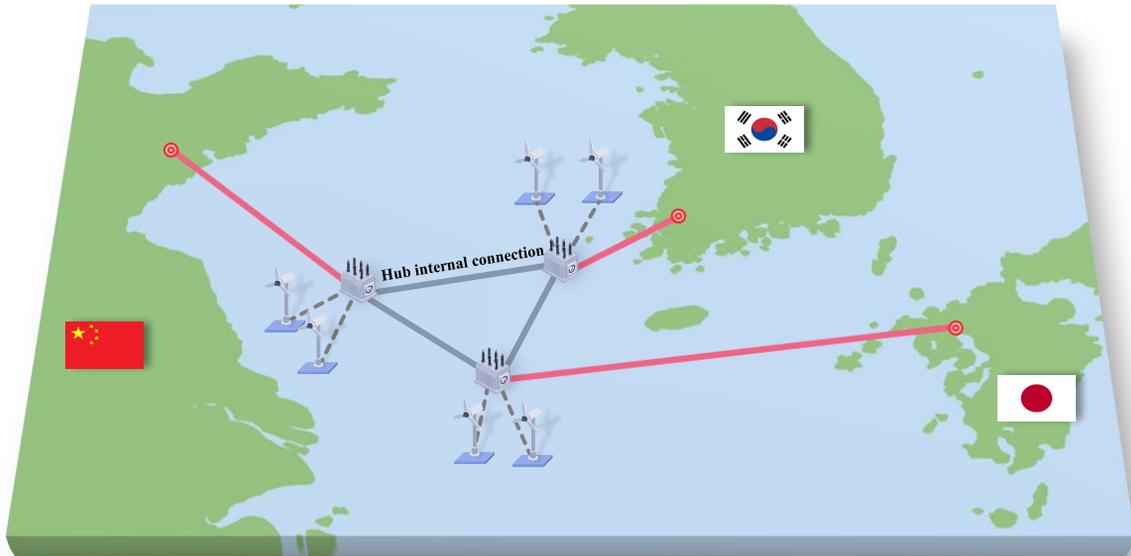


## 한·중·일 해상풍력 공동 활용을 위한 해상 그리드

- **Hub-and-spoke** 방식의 해상풍력 연계
  - 각 국가에서 건설한 Hub로 풍력단지의 출력이 집중되고, 각 HUB는 DC로 연계하여 전력 교환이 가능한 구조
  - 추후 서해안 HVDC 기간망과의 연계 가능



<Hub and Spoke 구조>



# 포괄적 전력망 계획 4



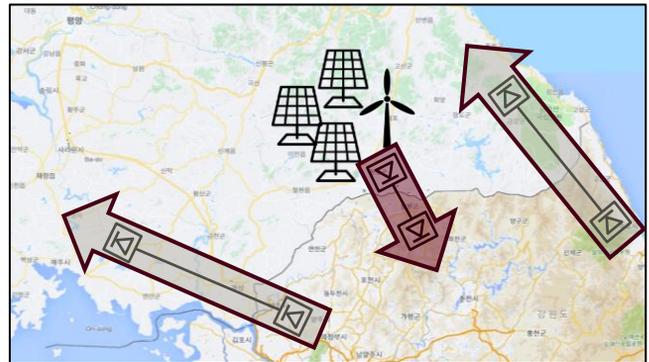
## 북한 전력망의 전력공급 방안

- HVDC 멀티터미널 전력 공급
  - 북한 전력망의 수급 불균형 해소 및 전력 조류 제어
  - Multi-terminal 전압형 HVDC 연계



<북한 MTDC 전력망 연계 예시>

- 5GW 신재생원 단지 개발
  - 남한 전력계통 접속(약 50km)
  - 변동성 고려하여 AC 또는 DC 연계



<북한 신재생e 활용을 위한 전력망 연계 예시>

감사합니다

THANK YOU