

Holistic Network Design for Cost-effective Integration of Offshore Wind Energy

해상풍력의 비용-효율적 연계를 위한 **전체론적 계통계획**

김승완

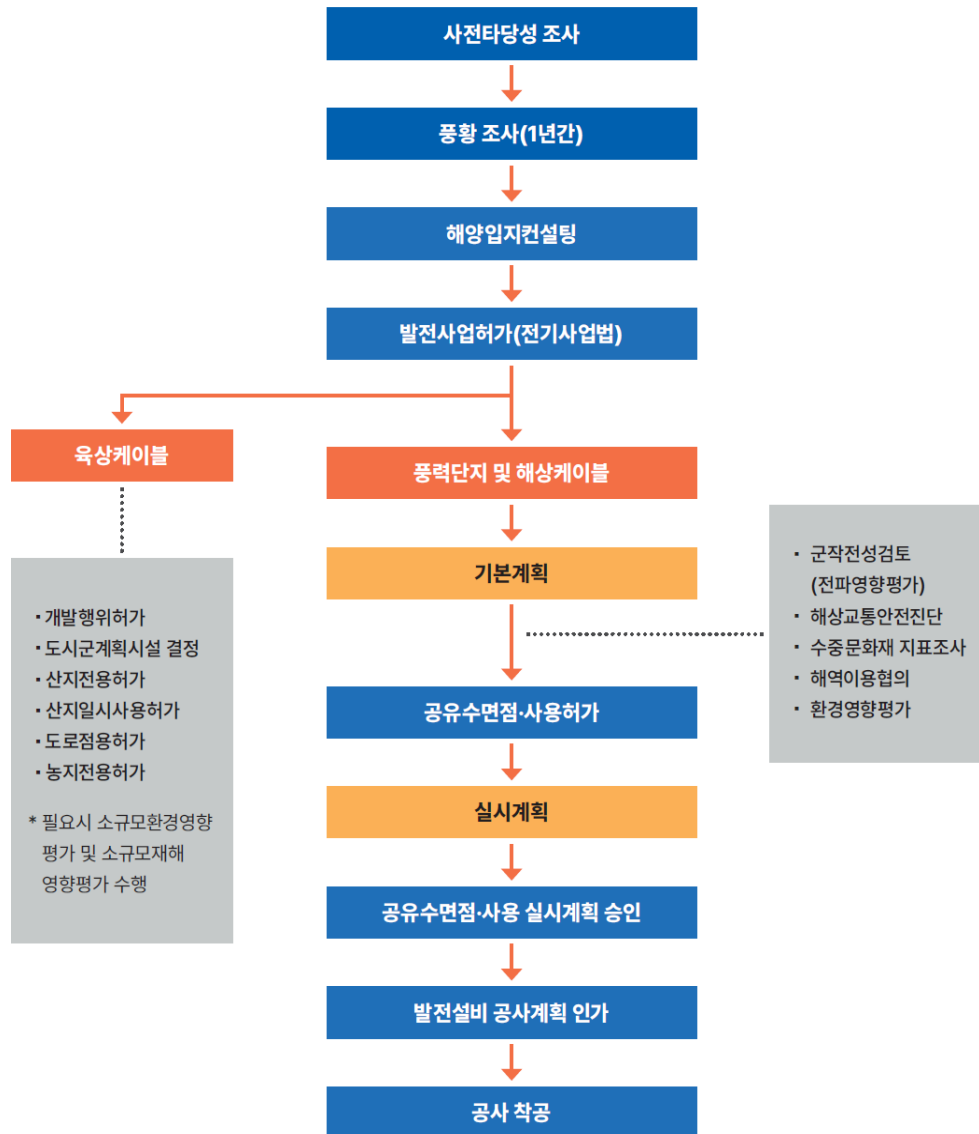
충남대 전기공학과 교수

사단법인 넥스트 대표

논의 배경 - 해상풍력 관련 정책현황 및 여건

- (국내현황) '20.12, 2050 탄소중립 선언 후 '기후위기 대응을 위한 탄소중립녹색성장 기본법' 제정을 통해 이를 법제화, 하위 법정계획을 통해 해상풍력 보급을 탄소중립의 주요 수단으로 계획
 - 제10차 전기본 2030 해상풍력 누적 설치용량 목표는 14.3GW
- (인허가 복잡성) 우리나라는 개별 발전사업자가 입지에 대한 사전타당성 조사를 스스로 진행한 뒤, 일련의 검토와 인허가들을 단계적으로 취득하는 방식을 취하고 있는 것이 특징
- (공기 불확실성) 우리나라 특유의 인허가 절차 및 민원으로 인해 공기 자체의 예측가능성이 매우 떨어져 사업자 입장에서 사업추진이 어려움
 - 사업자의 공기에 따라서 송전계통 신/증설이 함께 추진되어야 하지만 개별 사업자 스스로도 공기 예측이 어려워 송전사업자의 계획수립에도 차질이 생기는 상황

논의 배경 - 해상풍력 관련 정책현황 및 여건



■ 사업자 단위의 개별적 입지선정 및 인허가 이후 후속조치들도 분절적으로 수행

1. 사업자들의 개발 진행 정도를 고려하여 정부의 재량적 판단에 의해 전체 해상풍력 사업의 일부를 전기본 물량에 반영



2. 전기본의 하위계획으로 송전사업자 주도로 장기송변전 설비계획을 수립



3. 향후 실제 송변전설비계획의 실행 단계에서 보다 실제적인 실시계획 재수립



4. 송전사업자 주도로 사전 예비타당성 조사를 자체 수행하고, 기재부 산하의 본 예비타당성 평가 단계로 넘어감

논의 배경 - 해상풍력 관련 정책현황 및 여건

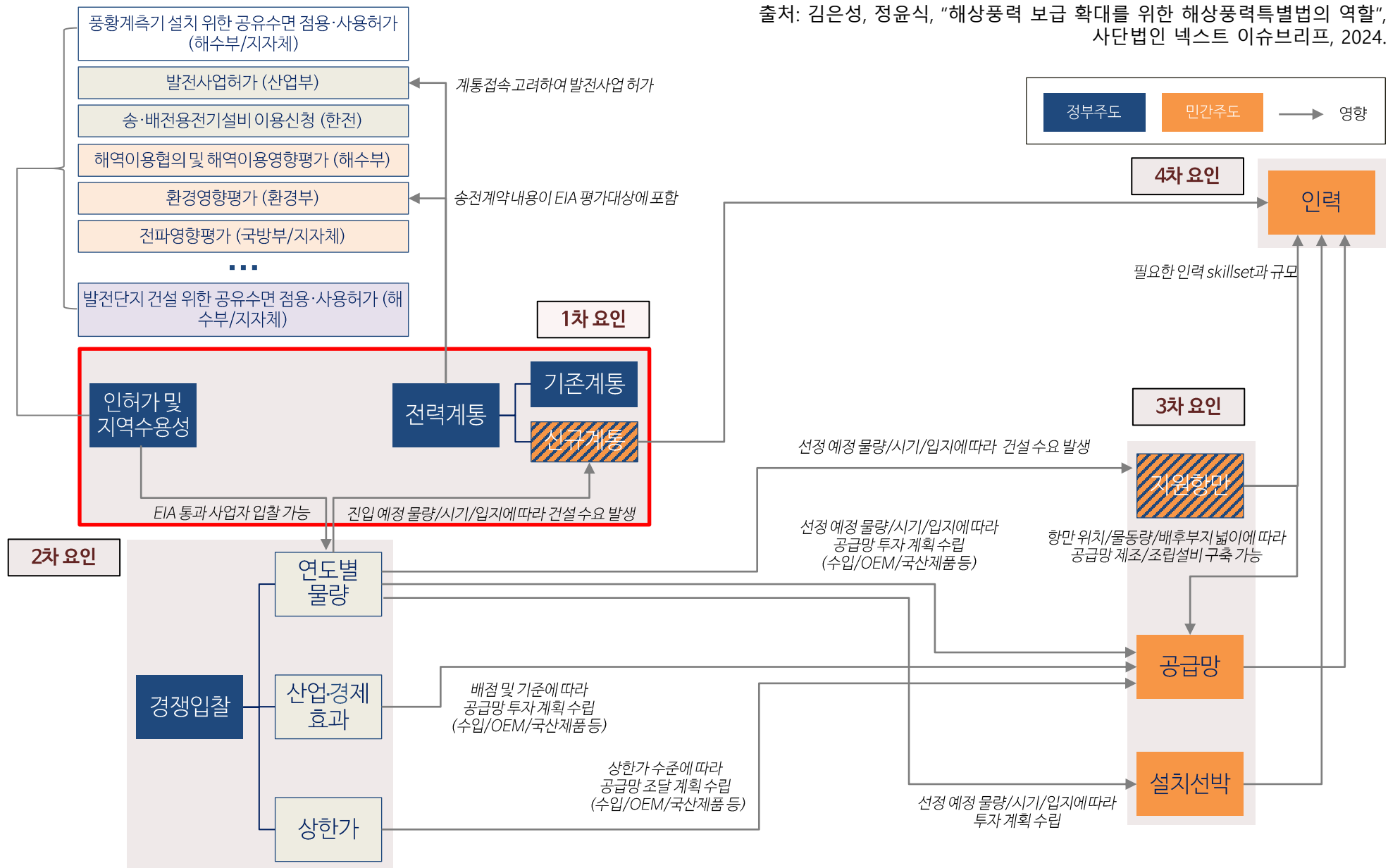
- (계통연계) 사업자의 계통비용 부담을 줄이고 망 계획의 효율성을 높이기 위해서 공동접속설비 제도('20.7)를 운영하고 있으나 구조적인 애로사항이 다수 존재하는 상황
 - (공동접속설비 개념) 다수 발전사업자가 공동으로 이용하는 접속설비, 개별사업자 단위로 다수 접속설비를 구축하는 것보다 망 운영을 최적화하고 비용-효율성을 제고할 수 있음
 - ✓ (유형1) 지자체별 집적화단지 지정 후 송전사업자가 선구축하는 공동접속설비를 통해 계통연계
 - ✓ (유형2) 발전사업자 별 공동협약을 통해 직접 구축한 공동접속설비로 계통연계

<공동접속설비 제도가 가지는 구조적인 애로사항>

- ❖ 어떤 유형이든 추진주체가 다양하여 (N개의 발전사업자, 지자체, 송전사업자) 상호 타임라인 조율의 문제가 존재
- ❖ 공동접속설비 이후 전체 계통의 최적화는 현재 공동접속설비 제도의 고려사항이 아님

논의 배경 - 해상풍력 보급활성화 결정요인과 선후관계

출처: 김은성, 정윤식, "해상풍력 보급 확대를 위한 해상풍력특별법의 역할", 사단법인 넥스트 이슈브리프, 2024.



전체론적 계통계획 (Holistic Network Design)

■ 벤치마크 대상 설정 – 영국

- 정부 주도로 해상풍력을 적극적으로 개발하고 있는 국가들 중 전체론적인 계통계획(Holistic Network Planning; HND) 방법론에 기반한 공식적인 마스터플랜을 가지고 있는 영국의 사례를 벤치마크 대상으로 선정

❖ **HND란?** : 미래의 접속수요, 자산별 노후화 전망, 육지계통과의 연계방식, 육지계통의 보강방식 및 비용, 해상계통 경과지 상황 및 비용, 전체 계통운영 및 혼잡비용, 사회적 수용성 등을 종합적으로 고려하여 가장 최적의 해상풍력 연계방식을 탐색하는 일련의 계통계획 절차를 통칭함

■ HND의 전제 – 해상공간 이용 및 인허가 단계에서의 아래와 같은 전제조건 성립 필요

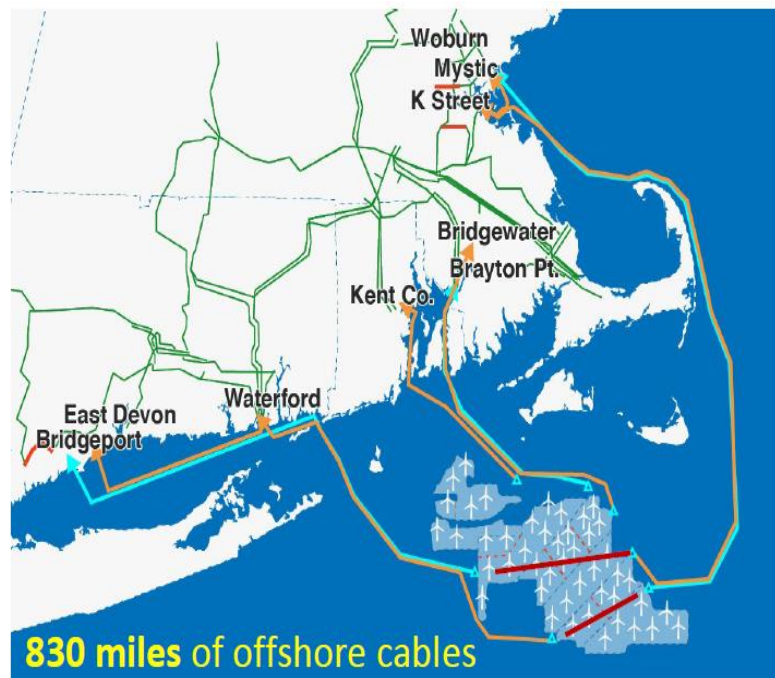
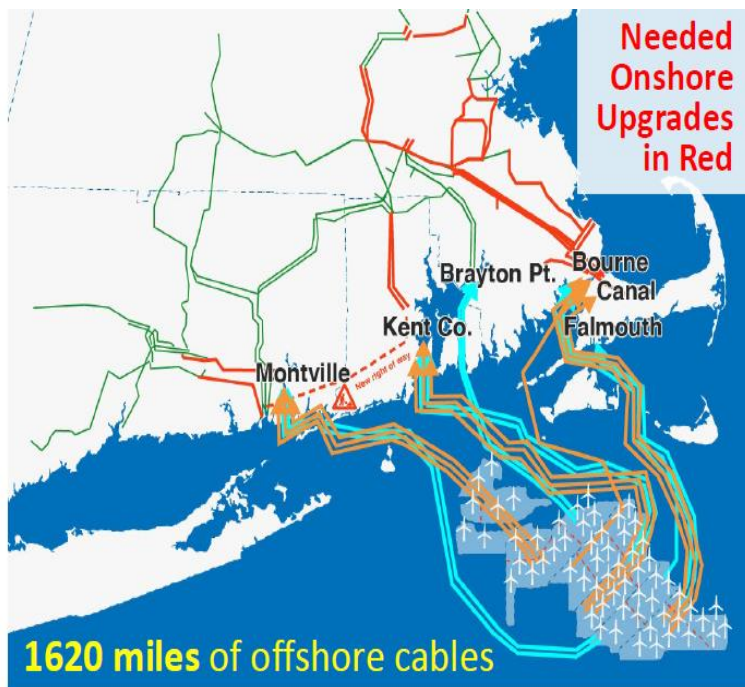
1. 해상공간 이용에 대한 계획을 국가가 주도로 수립하여 발전 입지에 대한 개발우선순위와 위치에 관한 불확실성이 존재하지 않아야 함
2. 발전단지의 인허가 소요시간과 허가 여부에 대한 불확실성을 제도적으로 최소화하여야 함

전체론적 계통계획 (Holistic Network Design)

출처: The Brattle Group, "US Offshore Wind Transmission: Holistic Planning and Challenges", 2023.9.

■ HND 적용 시 총 비용절감 가능성

- 순차적-방사형 계통연계와 HND 비교 시 비용절감 요인
 - ✓ HVDC 회선별 송전용량 상향을 통해 해상공간 이용을 효율화 가능
 - ✓ 육지 접속점을 사전에 계획하여 최적화할 경우 육지계통 신/증설 수요 저감 가능
 - ✓ 해상 플랫폼 구축을 통한 신뢰성 증대 가능



[그림] 미국의 순차적-방사형 계통연계 결과 (좌), HND 적용 시 계통계획 결과 (우)

영국 HND 사례

- 영국의 기업에너지산업전략부(이하 산업부)는 2020년 7월 해상풍력계통에 대한 전반적인 검토(Offshore Transmission Network Review; ONTR) 절차를 시작
 - 영국 정부의 탄소중립 목표(2030년 총 50GW; 11GW는 스코틀랜드) 실현을 위해 해상풍력 보급의 실현가능성 여부를 검토하고, 해상풍력 계통연계를 위한 효율적 방법 탐색 목적
 - ONTR의 주요 모듈 중 하나로 계통계획에 대한 로드맵 수립(Pathway to 2030) 모듈이 존재하며, 이 로드맵의 하위 개념으로 **Holistic Network Design (HND)** 정책 발표 ('22.7)
 - HND의 계획 대상 발전입지로는 기존에 발전사업허가를 취득한 해상풍력 사업들과 더불어 영국의 해상이용권 경매(The Crown Estate's Offshore Wind Leasing Round 4, The Crown Estate Scotland's ScotWind Leasing Round)를 통과한 단계의 사업들을 고려

* 영국의 해상은 모두 영국 왕실의 소유로서 정부 주도로 입지를 발굴하고 계획한 곳에 한해서 해상이용권 경매(Leasing Round)가 진행됨. 우리나라의 개별사업자 주도 인허가 방식과는 본질적으로 차이가 존재함.

- **HND의 정책목표 4가지**
 - Economic and Efficient Costs / Deliverability and Operability (2030년 기한) / Environmental Impact Minimization / Local Community Impact Minimization

영국 HND 사례

출처: National Grid ESO, "Pathway to 2030: Holistic Network Design", 2022.7.

■ HND의 수립 방법론 전체 절차

순번	절차	상세 내용
1	Objective and Data	- 영국 National Grid ESO의 Future Energy Scenario (FES) 중 "Leading the Way" 시나리오의 데이터를 주로 활용 ('30, '35, '50년에 대한 수요전망, 발전원별 용량 전망)
2	Design Options	- 계통설계에 고려할 자산, 연계기술, 접속점 위치 등의 경우의 수를 사전에 설정 - 설계옵션에 대한 상위레벨의 검토를 진행하고 정책목적에 반하거나 실현불가능한 옵션을 우선적으로 제거
3	Initial Strategic Appraisal	- 해상풍력 발전단지 <-> 접속점 간 가능한 경로를 복수로 결정 후 정책목표 부합여부 검토 - 세부검토를 위한 기본적인 계통구성 옵션들을 도출 - 향후 4단계의 경제성 평가의 결과를 고려해서 반복 수행
4	Economic Assessment	- 각 계통구성 옵션에 대한 1) 해상계통 비용, 2) 육상계통 신/증설 비용, 3) 전체 계통제약 변화에 따른 혼잡비용 변화 를 고려해서 경제성 평가 수행
5	Final Strategic Appraisal	- 모든 정책목표에 대해서 종합적으로 평가 진행 - 권고 설계방안을 도출
6	Refresh Network Options Assessment (NOA)	- 앞서 도출한 해상계통 계획에 대응되는 육지계통 보강에 대해서 검토 - 이 때, 5에서 도출한 해상계통의 설계방안을 입력으로 활용하여 NOA 프로세스를 진행
7	Final HND	- 해상계통에 대한 설계방안 제안 - 육지계통에 대한 신/증설방안 제안

영국 HND 사례

출처: National Grid ESO, "Pathway to 2030: Holistic Network Design", 2022.7.

■ HND의 데이터셋 구성

- 미래의 전체계통 발전원 구성과 전력수요 전망 등의 데이터는 FES 시나리오를 준용

	2022	2030				2035				2050			
Emissions		CT	ST	LW	FS	CT	ST	LW	FS	CT	ST	LW	FS
Annual average carbon intensity of electricity (g CO ₂ /kWh)	183	66	68	38	104	-14	0	-7	50	-41	-40	-13	-10
Net annual emissions (MtCO ₂ e)	463	303	323	288	389	164	187	145	328	-1	-9	-34	178
Electricity													
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
Natural Gas													
Annual demand (TWh) ⁷	986	571	671	533	828	384	581	331	700	29	364	74	513
1-in-20 peak demand (GWh/day)	5550	3985	4823	3368	5331	2593	3858	1987	4950	282	2086	509	3962
Residential demand (TWh) ⁸	311	240	276	227	325	151	204	117	294	0	1	0	147
Imports (TWh)	598	411	460	353	559	285	422	227	436	25	358	55	356
Hydrogen													
Annual demand (TWh)	0	3	38	40	1	19	151	80	3	120	446	242	14
Residential hydrogen demand for heat (TWh)	0	0	0	5	0	0	49	14	0	0	119	29	0
CCS enabled hydrogen production (TWh) ⁹	0	0	25	7	0	1	104	26	1	1	218	26	6
Electrolytic hydrogen production (TWh) ¹⁰	0	3	11	32	1	17	26	48	2	111	175	177	8
Bioresources													
Bioresource demand (TWh)	127	103	113	147	130	169	156	139	137	219	228	160	148

[그림] Future Energy Scenario의 시나리오 별 미래 배출량, 전력수요, 발전원 구성 전망

CT : Consumer Transformation

ST : System Transformation

LW : Leading the Way

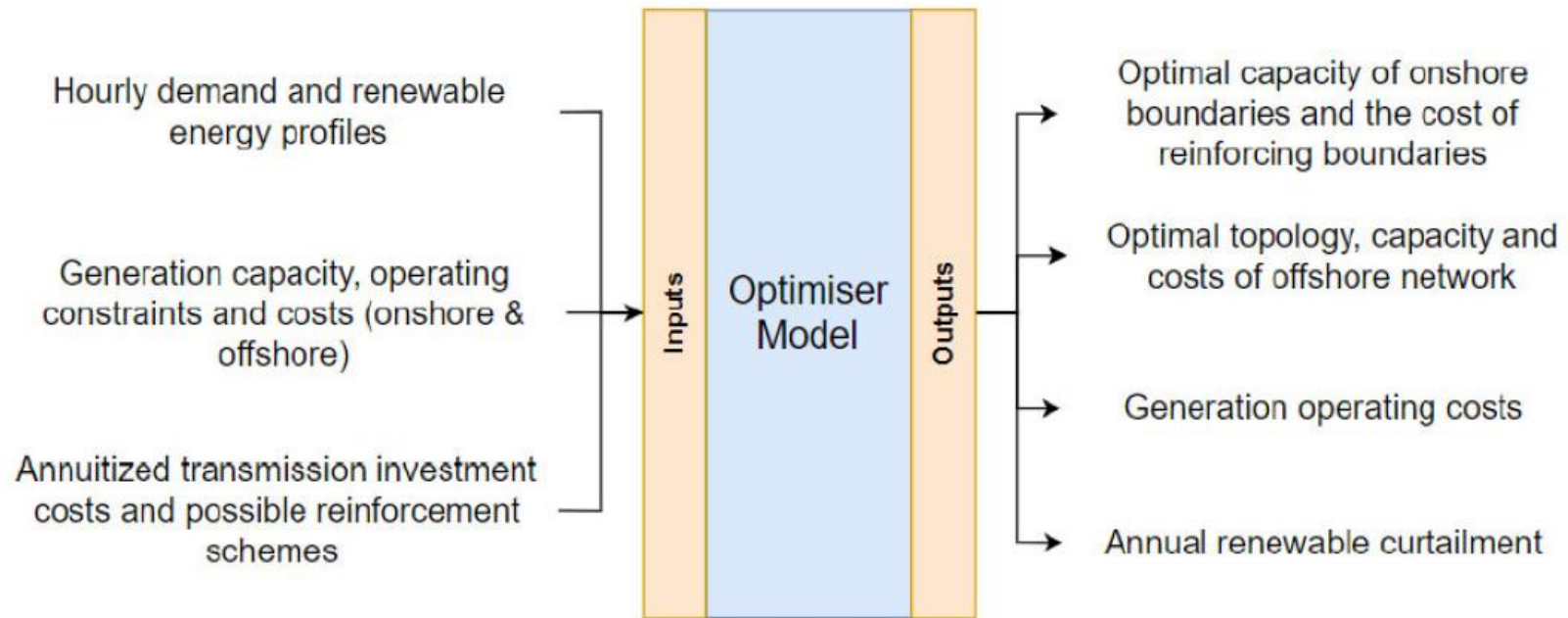
FS : Falling Short

- 육지계통은 모든 기존 계통계획이 실현되었다는 가정을 전제로 2030년 계통을 기반으로 함
- 공사중인 스코틀랜드와 잉글랜드 사이의 4개의 해상 Eastern HVDC Links를 포함

출처: National Grid ESO, "Pathway to 2030: Holistic Network Design", 2022.7.

■ HND Optimizer Model

- HND에서는 종합적인 경제성 평가를 위해서 아래와 같이 상세한 비용들을 고려
- 우리나라의 송전선로에 대한 기재부 예비타당성 절차에서 고려하는 것과 동일한 요소
 - ✓ 해상풍력의 연계로 인한 육지계통의 보강에 소요되는 자본비용 / 해상계통 투자비용
 - ✓ 해상풍력을 고려한 전체 계통의 총 발전비용 / 계통제약으로 인한 혼잡비용



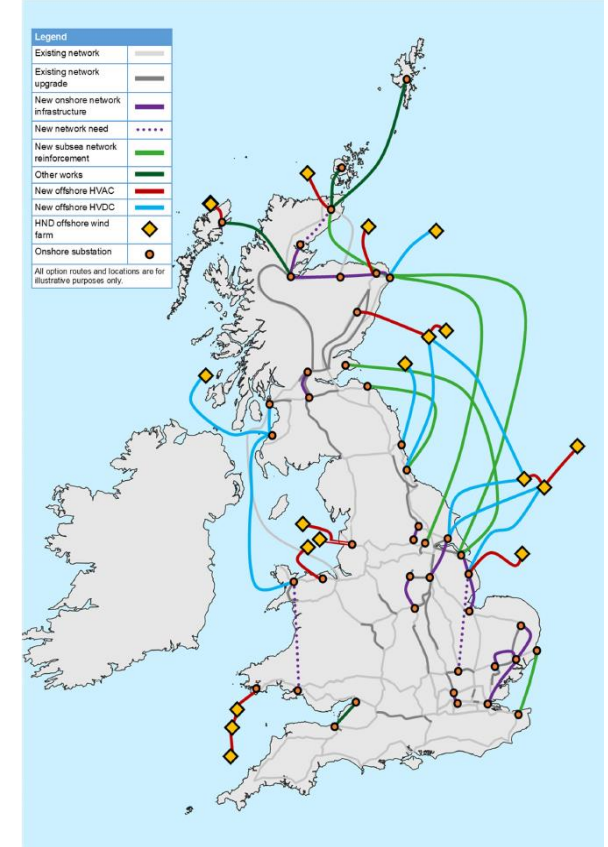
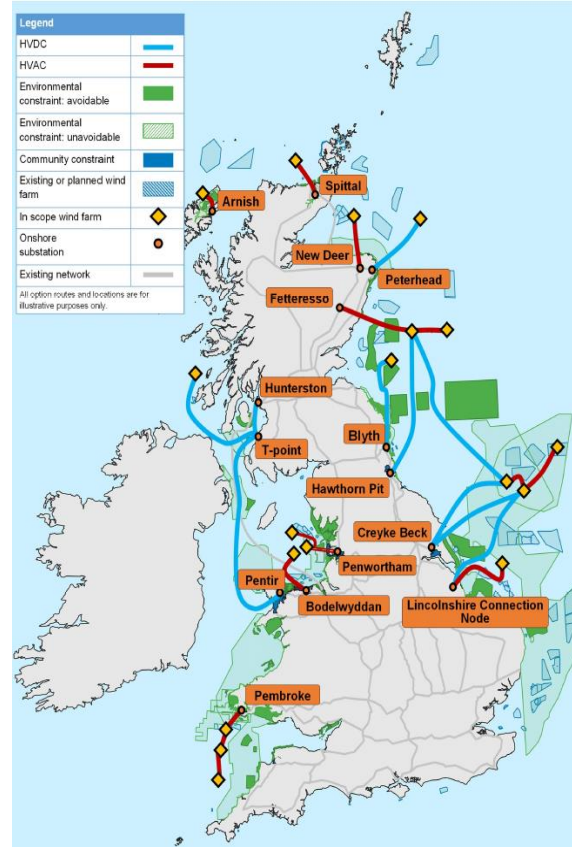
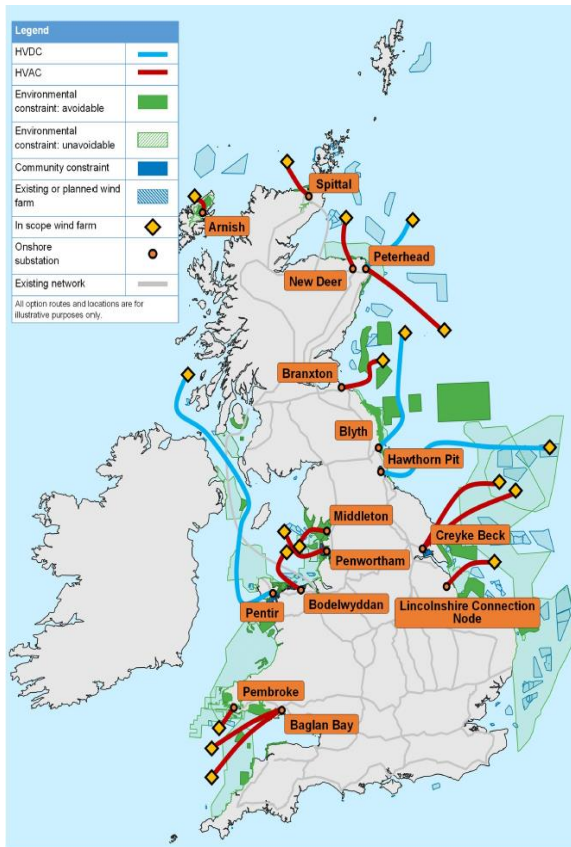
[그림] HND 최적화 모형의 입출력 구조

영국 HND 사례

출처: National Grid ESO, "Pathway to 2030: Holistic Network Design", 2022.7.

■ HND 수립 결과

- HND를 통해 기존의 순차적-방사형 계통연계만 고려하여 최소비용의 계통을 구성한 것보다 더욱 경제적인 계통구성안을 도출



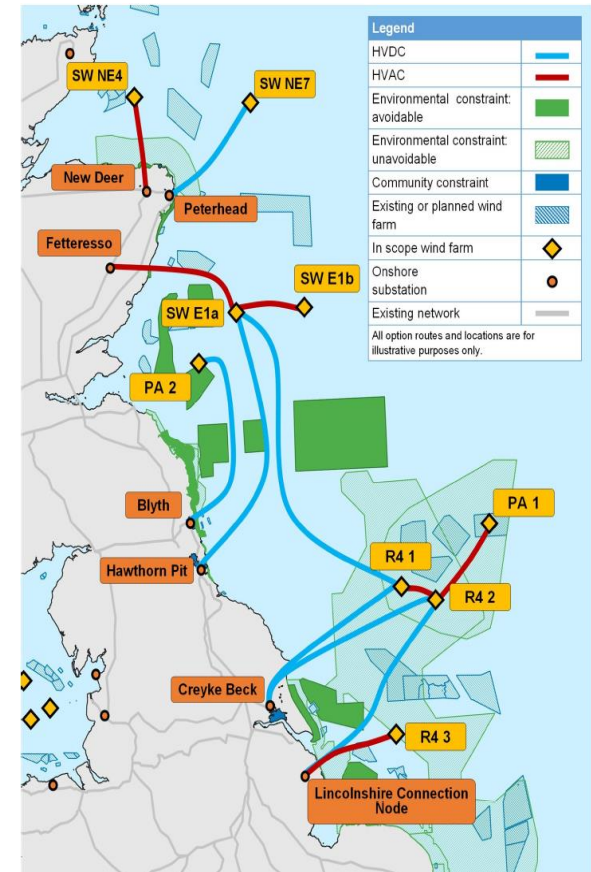
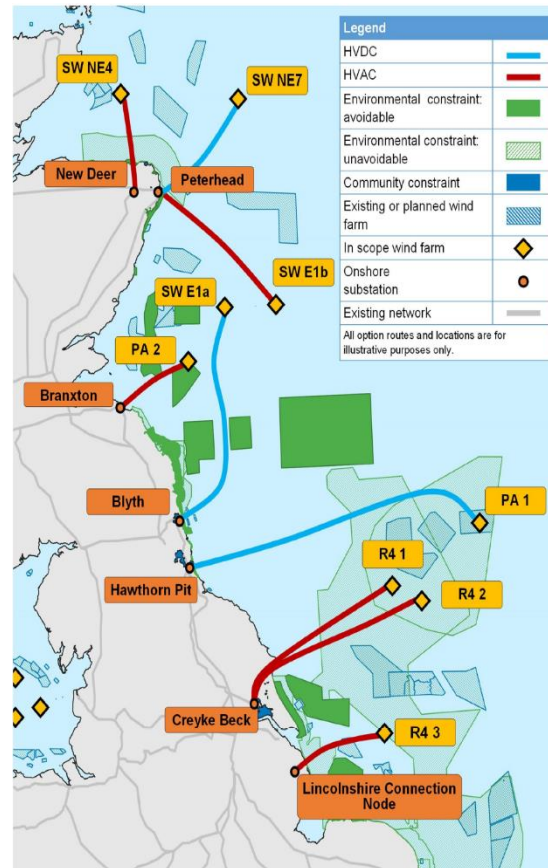
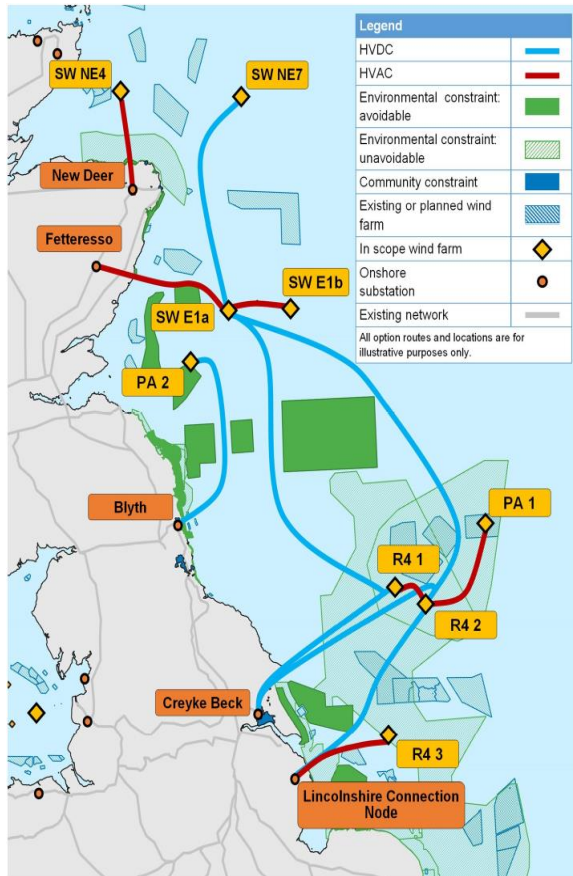
[그림] 순차적-방사형 계통연계만 고려 시 해상계통 최적설계방안 (좌), HND 방식의 설계 시 해상계통 최적설계방안 (중간) 육지계통의 신/증설까지 고려한 전체 계통 구성도 (우)

영국 HND 사례

■ HND 수립 결과

➤ East Coast 지역 해상계통 설계 상세

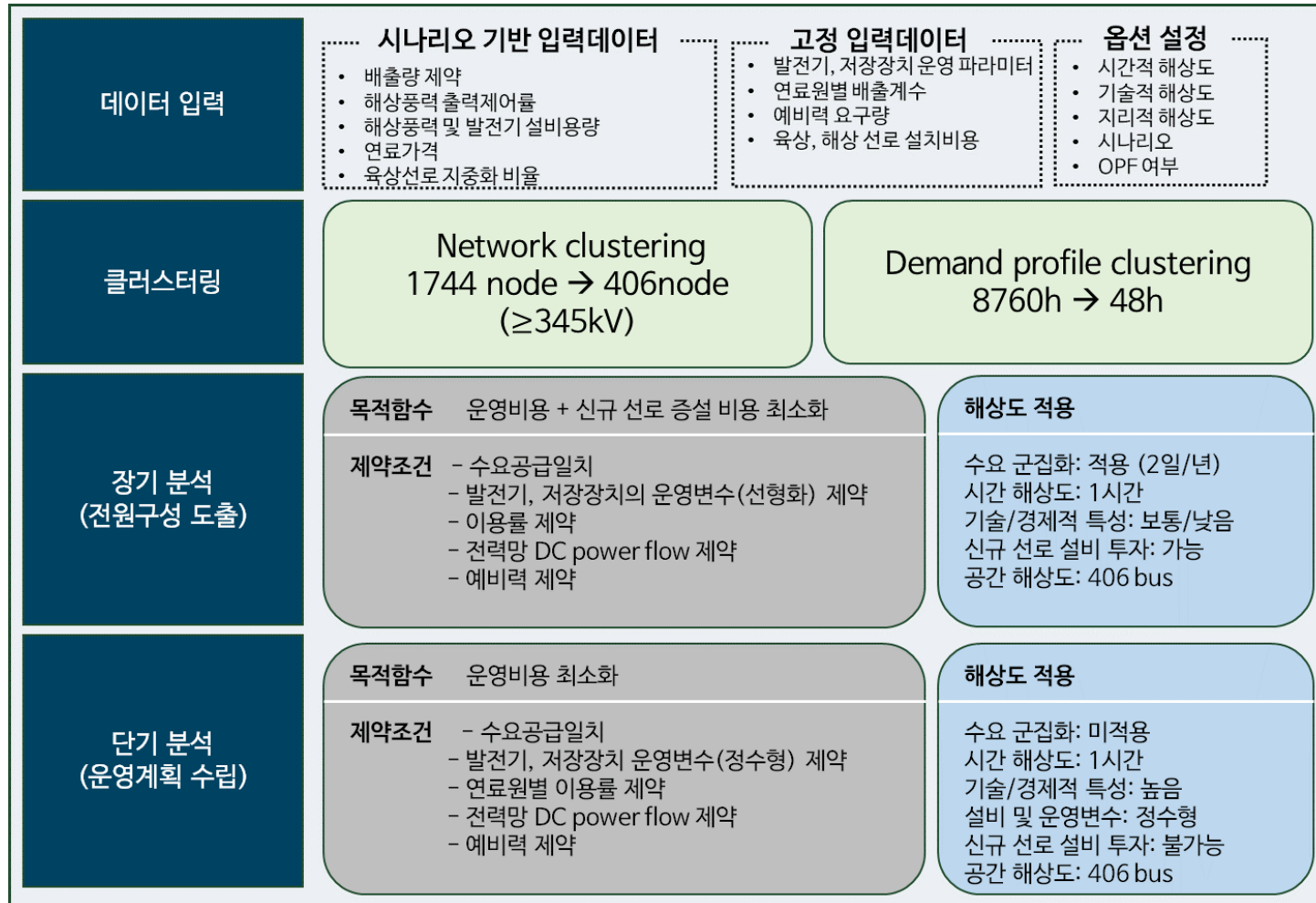
출처: National Grid ESO, "Pathway to 2030: Holistic Network Design", 2022.7.



[그림] 검토 대안 1 : 육지 접속점 수 최소화 안 (좌), 검토 대안 2 : 순차적-방사형 계통연계 방식 (중간), HND 방식의 East Coast 최적설계 (우)

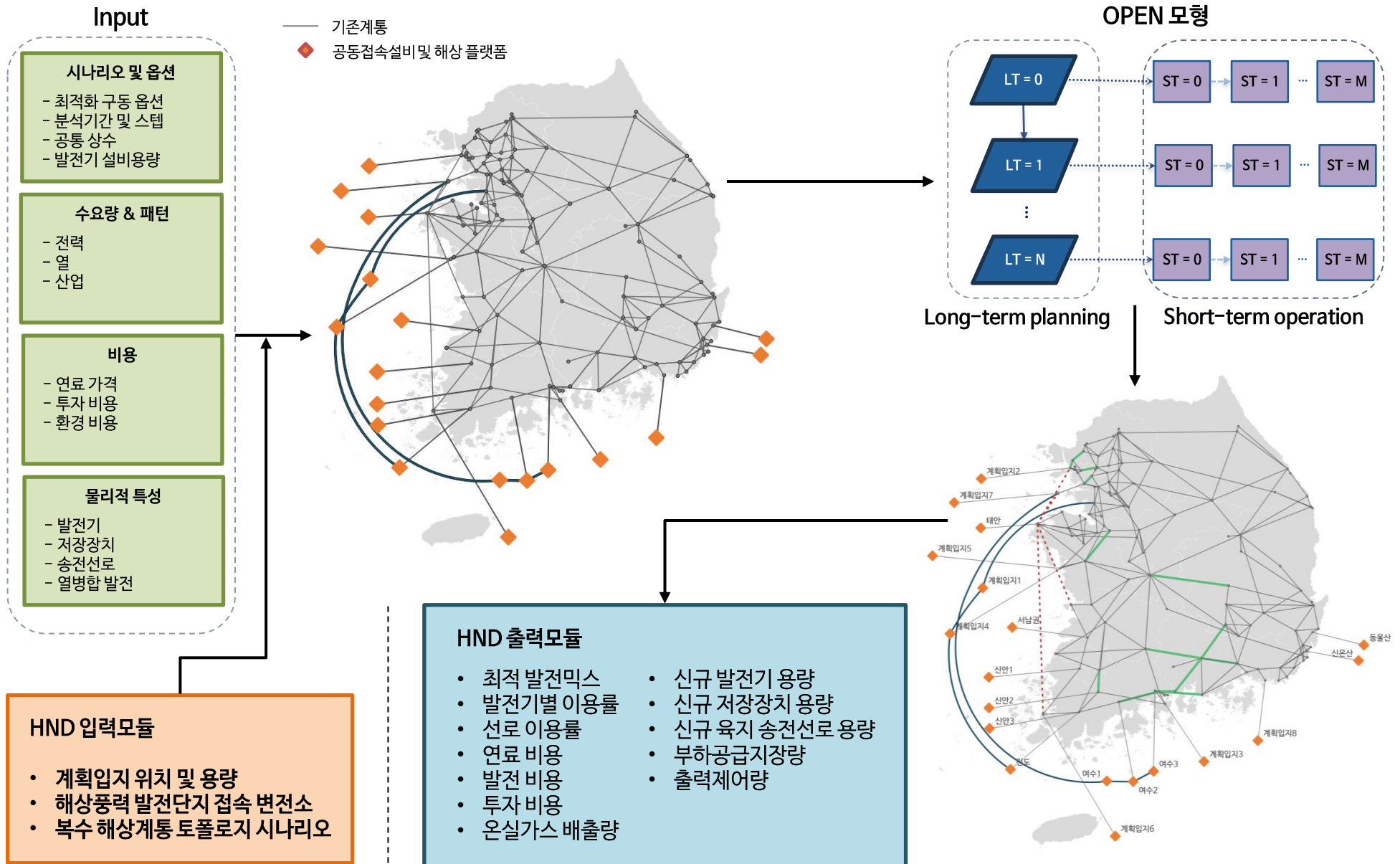
국내 HND 수립 모델 소개

OPEN 모형 – Generation + Transmission Expansion Planning



[그림] OPEN 모형 전체 개념도

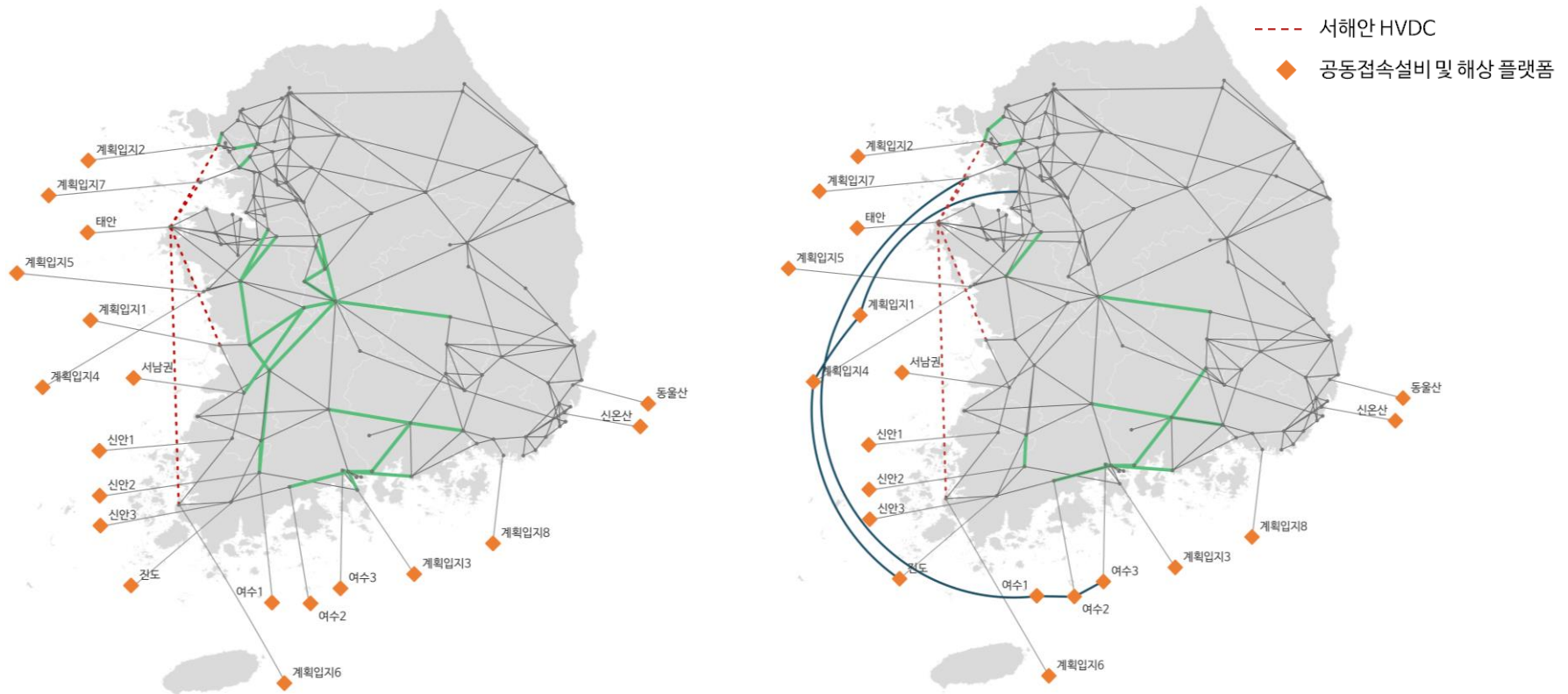
국내 HND 수립 모델 소개 - OPEN-HND 모듈 및 모의 절차



국내 HND 수립 모델 소개 - OPEN-HND 수립결과 (예시)

■ 순차적-방사형 계통연계 VS HND 기반 해상계통 시나리오 검토 안

- 해상계통 투자비용 < 육지계통 보강비용 절감 - 시나리오 발굴 가능성 확인
- 최적 해상계통 토폴로지 도출을 위한 추가분석 필요
- 계통안정도, 고장분석 등 추가분석 필요



[그림] 순차적-방사형 계통연계 (좌), HND 기반 해상계통 시나리오 검토 안 (우)

- 전체론적 계통계획 수행을 위해 우리나라 입지선정 및 인허가 방식 개선 필요
 - 해외 벤치마크 사례처럼 전체론적 계통계획 수행을 위해 정부 주도 해상풍력의 입지 선정 후 경매를 통한 사업자 선정이 필요
 - ✓ 우리나라도 풍특법 제정을 계기로 정부의 중앙집중식 해양공간계획 수립을 통해 해상 풍력에 적합한 계획입지를 선정하고, 충분한 자격을 갖춘 사업자 중 낮은 가격을 입찰한 사업자를 선정해 해상사용권을 분양하는 방식 필요
 - ✓ 위와 같은 방식으로 입지선정 방식이 바뀌어야 전체론적 계통계획의 전제로 사용되는 발전입지의 불확실성을 제거할 수 있음
 - 발전입지가 사전에 확실하게 정해진다고 할지라도 우리나라와 같은 복잡한 인허가 시스템을 단순화해야 해당 입지의 착공, 준공시점의 불확실성을 제거할 수 있음
 - ✓ 입지와 착공, 준공시점의 불확실성이 모두 제거되어야 전체론적 계통계획을 사용해서 효과적으로 마스터플랜을 수립할 수 있음

■ 보급목표-입지선정-계통계획의 통합관리 필요

➤ 아래 절차들이 일원화되어 관리될 경우 해상풍력 보급의 속도를 높일 수 있음

- ✓ 정부가 연도별 보급 목표를 설정
- ✓ 연도별 보급 목표를 준수하기 위한 정부주도의 해상풍력 입지선정
- ✓ 정부와 송전사업자가 1, 2의 정보를 바탕으로 가장 비용-효율적인 계통계획을 수립
- ✓ 정해진 입지에 대해 입지선정(해상사용권) 경매를 진행하여 사업자 선정

■ 전체론적 계통계획을 위한 Tool 개발 필요

➤ HND 사례처럼 전체 계통의 기동정지계획과 해상/육지계통의 설비확장계획 문제를 통합한 최적화 모형 개발과 다양한 파라미터의 표준 DB 개발도 중요

➤ 계통계획 시 향후 예비타당성 평가 절차 진행을 위한 경제성 평가도 고도화할 필요성 존재

- ✓ 현재에는 분절적으로 사후에 예타 관점의 경제성 평가가 진행되는 구조

➤ 향후 서해안 Back-bone 망을 비롯한 AC/DC 하이브리드 계통으로의 진화에 대한 사회적 합의의 위해서는 최적화 모형 기반의 투명한 프로세스를 통한 계통설계 방안 도출이 중요

- ✓ 현재 우리나라의 장기송변전건설계획 등에는 계통계획의 결과만 제시할 뿐 과정에 대한 설명이나 근거가 부족하여 사회적 수용성을 이끌어내기에 한계가 존재함