



외국의 해상풍력발전단지 개발 동향



윤 기 갑
한전 전력연구원 선임연구원

1. 개 황

해상풍력발전은 일반적으로 육지로부터 10km 또는 그 이상 떨어진 해상에 풍력발전기를 설치하는 것으로

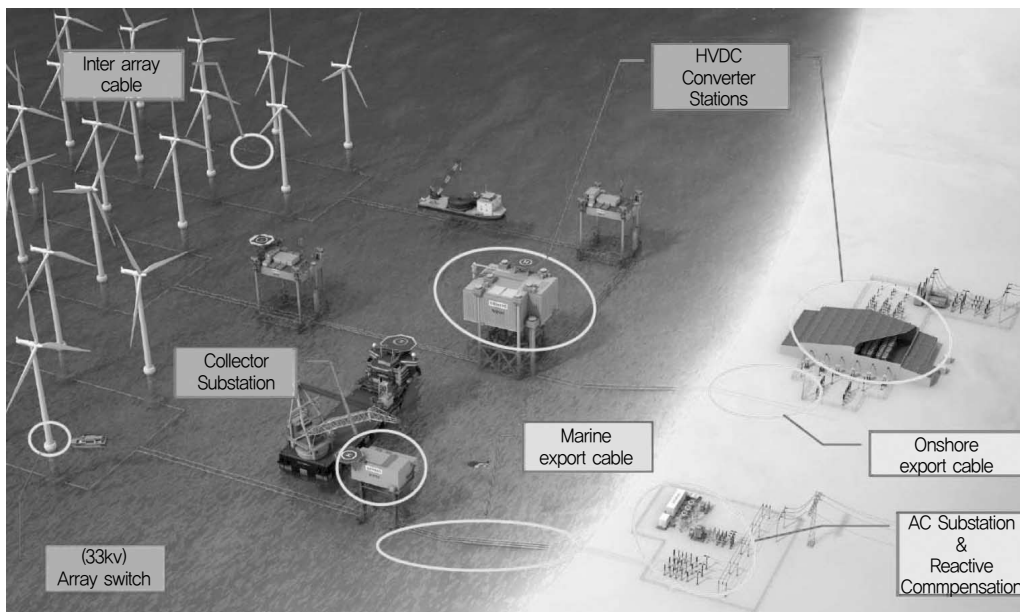
알려져 있으며, 아직 기술적인 면이나 경제성 등의 문제로 보급 초기단계에 있다. 2009년 말 기준으로 세계 풍력 발전설비용량 158,505MW 중 해상풍력은 2,055.9MW (약1.3%)에 불과하다. 1991년 이후 유럽에서 덴마크,



[그림 1] 유럽의 풍력발전 설비용량 (단위 MW)

벨기에, 스웨덴, 핀란드, 독일, 영국, 네덜란드, 아일랜드 등 8개국이 33개소의 해상풍력발전소를 운영 중에 있으며, 프랑스, 이탈리아, 노르웨이, 폴란드, 스페인 등이 2015년 까지 해상풍력 발전소 건설을 계획하고 있다. 2009년 말

기준 세계적으로 설치된 풍력발전설비 용량은 미국이 가장 많은 35,064MW(22.1%)이며, 중국이 25,805MW (16.3%), 독일이 25,777MW(16.3%)로 2위권을 형성하고 있다. 이중 해상풍력발전설비는 영국이 882.8MW로



[그림 2] 해상풍력단지 계통연계 개념도

가장 많고, 그 뒤를 덴마크(639.15MW) 등이 따르고 있다.



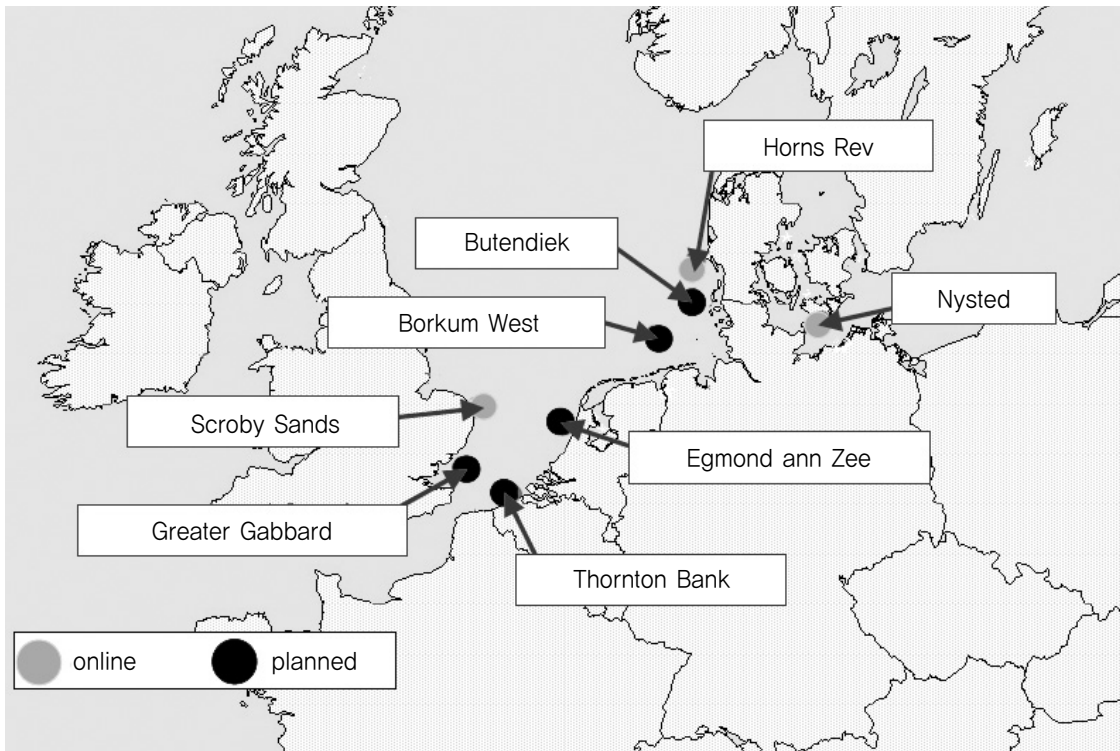
[그림 3] 해상풍력발전단지(해상변전소, 풍력발전기)전경

국내에서도 점차 해상풍력발전의 개발 필요성이 증대되고 있는 시점에서 국외 해상풍력발전단지 개발 동향에 대해 살펴봄으로써 향후 국내 해상풍력발전단지 건설 시 관련 기술을 파악하여 구축에 참조하고자 한다.

2. 현황

최근 외교통상부가 배포한 에너지자원 동향에 따르면 2001년부터 2009년까지 영국과 덴마크 등 유럽 9개국에서 38개의 해상풍력발전단지 건설 프로젝트가 진행되어 2,000MW 이상의 풍력발전기가 설치되었고, 2009년도에만 영국, 덴마크, 독일, 스웨덴, 노르웨이 5개국에서 600MW의 해상풍력발전기를 설치한 것으로 알려졌다. 또한 독일은 2030년까지 약 25~30GW, 영국은 10년 후 25GW 규모의 해상풍력발전단지를 건설할 계획을 발표하며, 앞으로 해상풍력의 핵심시장으로 부상할 것을 예고하고 있다.

많은 유럽의 국가들이 풍력에 관심을 가지고 있으며, 점차 해상풍력단지의 건설에 비중을 두고 있다. 미래의 풍력산업이 해상풍력을 기반으로 발전할 것임을 예상했을 때, 유럽의 해상풍력발전단지 건설의 사례를 분석하여



[그림 4] 유럽의 주요 해상풍력발전단지

우리의 해상풍력단지건설에 필요한 사항을 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

■ 유럽 현황

가. Egmond aan Zee(네덜란드)

네덜란드 정부의 지원하에 정유기업인 Shell과의 합작투자로 조성된 해상풍력발전 시설은 36개의 풍력발전기에서 108MW(3MW×36기)의 전력을 생산할 수 있으며, 이는 10만 가구에 청정전력을 공급할 수 있는 양이다. 운영자는 NoordzeeWind이며, 면적은 30km², 수심은 15~20m, 해변까지의 거리는 10~18km이다. 터빈 제작사 및 종류는 Vestas V90-3MW, 터빈개수 36개, 발전용량 108MW, 회전자 직경은 90m, 허브 높이는 70m이다. 계통연계방식은 36개 풍력발전기가 12개씩 3개의 섹션으로 나누어져 있으며, 발전된 전력은 34kV의 해저케이블을 통하여 해안으로 전송된다. 해저케이블은 2~3m의 깊이로 매설되어 있으며, 각각 50m정도의 간격을 두고 있다. 케이블의 총 길이는 약 43km이며, Velsen에 있는 변전소에서 150kV로 승압이 이루어진 후에 전력이 전송된다.

나. Borkum West(독일)

'Borkum West'는 독일의 첫 번째 해상풍력발전 프로젝트로 시공사는 환경의 제약이 가장 적은 장소를 찾고자 했으며, 그 결과 Borkum West 프로젝트가 시작되었다. 시범운영 단계로 5MW급의 12개 풍력발전기를 이용하여 해상풍력발전단지가 건설되었으며, 확장단계로 1,000MW의 추가적인 해상풍력발전단지 건설이 예정되어 있다. 운영자는 Porkon Nord Energiesysteme GmbH이며, 위치는 Borkum으로 부터 45km 북쪽의 독일 배타적 경제수역 내에 위치해 있고 해변까지의 거리는 45km이다.

터빈 개수 12기/208기(시범/확산), 발전용량은 60MW/1,000MW, 회전자 직경은 116m 이상, 허브 높이는 90m이다.

시범운영단계의 송전망은 HVAC를 이용하여 건설되었으며 해상풍력발전단지 내부 그리드는 36kV로 연계되며, 해안에 접속되는 외부 그리드는 110kV의 전압으로 연계된다. 36kV를 110kV로 변환하는 변전소는 해상에 건설되며, 모든 풍력발전기는 이곳에 접속된다. 풍력발전기에서 발전된 전력은 변전소를 통하여 바다에 매설된 해저케이블로 해안까지 전송된다.

해안의 접속지점은 Hilgenrieder Siel로 이곳으로 부터 Emden Borsum 계통에 전력이 전송된다. 케이블의 길이는 70km의 해저케이블과 45km의 내륙케이블을 이용한 것으로 알려져 있다.

HVAC의 경우 장거리 송전으로 인한 전력의 손실이 발생하게 된다. 따라서 확장 운영단계에서는 양극(bipolar) HVDC 시스템이 채택될 수 있다. 이러한 경우에 해상풍력발전단지 내부에서 모인 전력(36kV)은 DC로 변환될 것이다. 해저케이블은 양극(bipolar)의 DC케이블로 매설될 것이며, 해안의 접속지점에서 다시 AC로 변환되어 계통에 전력을 송전하게 된다. 각각의 풍력발전기는 개별 변압기를 가지고 있기 때문에 발전된 저전압의 전력을 36kV로 승압할 수 있다.

다. Scroby Sands(영국)

Scroby Sands는 영국의 초창기 해상풍력단지 중의 하나이며, 2004년부터 운영되었다. E.ON UK Renewables Offshore Wind Ltd(EROWL)가 Scroby Sands 해상 풍력을 소유하고 있으며, Anglia의 동쪽 해안에 위치한 Great Yarmouth에서 2.5km 떨어진 해상에 위치하고 있다. 면적은 10km², 수심은 3~12m이다.



[그림 5] Scroby Sands 해상풍력발전단지 전경

풍력발전기는 Vestas, V80, 2MW로 총 30개의 풍력 발전기로 구성되어 있으며, 전체 용량은 60MW이다.

회전자 직경은 80m이며 허브 높이는 68m이다. 계통 연계방식은 해상풍력발전단지로부터 내륙으로 연계하는 송전선로가 인근의 항만관리소, 어업 관련 종사자 및 지역 의회와 협의하여 건설되었다. Scroby Sands는 해상에 변압기를 건설하지 않고 직접 전력을 전송한다. 내부 그리드망 전압은 33kV로 3개의 해저케이블이 각각 해안으로 전력을 전송하며, 각각의 케이블에 10개의 풍력 발전기가 연계된다.

라. Butendiek(독일)

3MW 풍력터빈 80개를 설치하여 총 발전용량은 240MW에 달하는 Butendiek 해상풍력발전단지는 수심이 비교적 얕으며, 서해안에 해상풍력발전단지를 건설할 경우 참고할 사례가 될 것이다. 운영자는 OSB Offshore- Bürger-Windpark Butendiek GmbH & Co. KG, 위치는 Schleswig-Holstein이며 면적은 34km², 수심은 16~20m, 해변까지의 거리는 34km이다. 터빈 제작사 및 종류는 Vestas 3MW, 터빈개수 80기,

발전용량은 240MW, 회전자 직경은 90m 이상, 허브 높이는 80m이다. 계통연계방식으로 Butendiek 해상 풍력발전단지는 HVAC를 이용하여 연계될 예정이다. 풍력단지 내부그리드 전압은 33kV 이며, 해저케이블은 약 0.8m 깊이로 매설된다. 풍력단지로부터 계통까지 연계되는 케이블은 1.5m의 깊이로 매설된다.

마. Horns Rev(덴마크)

2002년 말 완공된 Horns Rev 해상풍력단지는 100m 높이의 풍력발전기 80기로 이루어져 있다. 터빈 1기의 용량은 2MW로 97%의 가동율을 보이고 있으며, 각



[그림 6] Horns Rev 해상풍력발전단지 전경

풍력발전기에서 만들어진 전기는 풍력발전단지 말단에 설치된 송압 시설에서 150kV로 송압되어 총 21km의 해저 송전망을 통해 육지로 연계된다. 덴마크는 2050년 화석에너지 의존율을 제로로 만들기 위해 해상풍력에 적극 투자하고 있으며, Horns Rev의 인근에 새로운 프로젝트를 구상하고 있다. Horns Rev는 북해에 처음으로 설치된 해상풍력으로 덴마크의 해상풍력개발 계획의 최초 결과물이다. 덴마크는 2030년까지 4,000MW의 해상풍력발전단지를 조성하는 것을 목표로 하고 있으며, Horns Rev를 포함한 5개 지역의 풍향을 조사하고 있다.

운영자는 Elsam, 단지 위치는 Danish west coastdlau 면적은 20km², 수심은 6~14m이며, 해변까지의 거리는 14km이다. 터빈제작사 및 종류는 Vestas V80 - 2 MW, 터빈 개수 80기, 발전용량 160MW, 회전자 직경은 80m, 허브 높이는 70m이다.

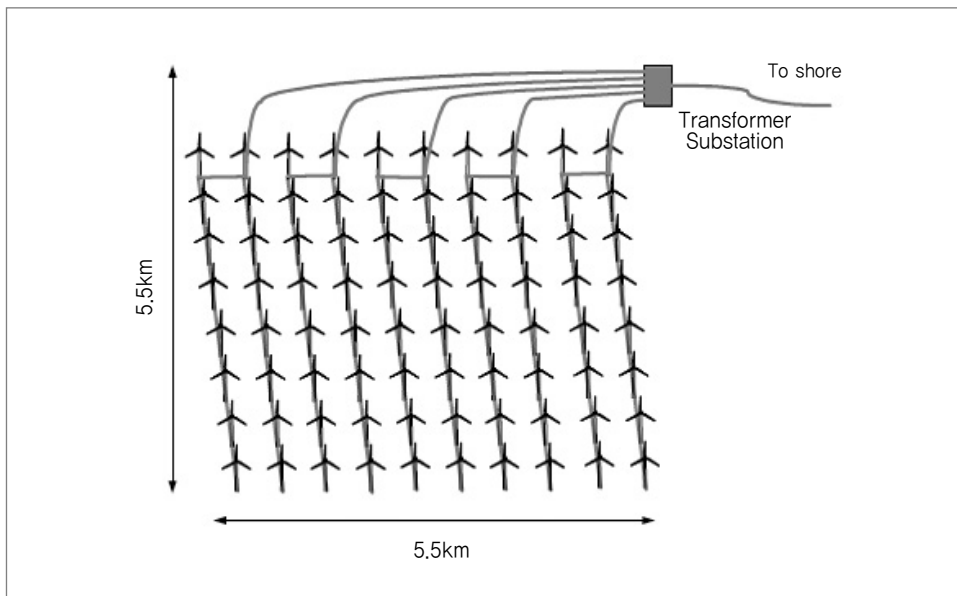
전력망 연계에 있어 해상풍력단지에서 해안까지의 거리에 따라 송전방식을 결정하게 되는데, Horns Rev의 송전거리는 상대적으로 짧은 편에 속한다.

따라서 육지와 가까운 거리로 인하여 HVAC 송전 시스템을 적용하였으며, 내륙의 150kV 계통에 직접적으로 연계되어 있다. 풍력단지에서 생성되는 전력은 인근의 변압기에서 송압되어 내륙의 계통에 연계된다.

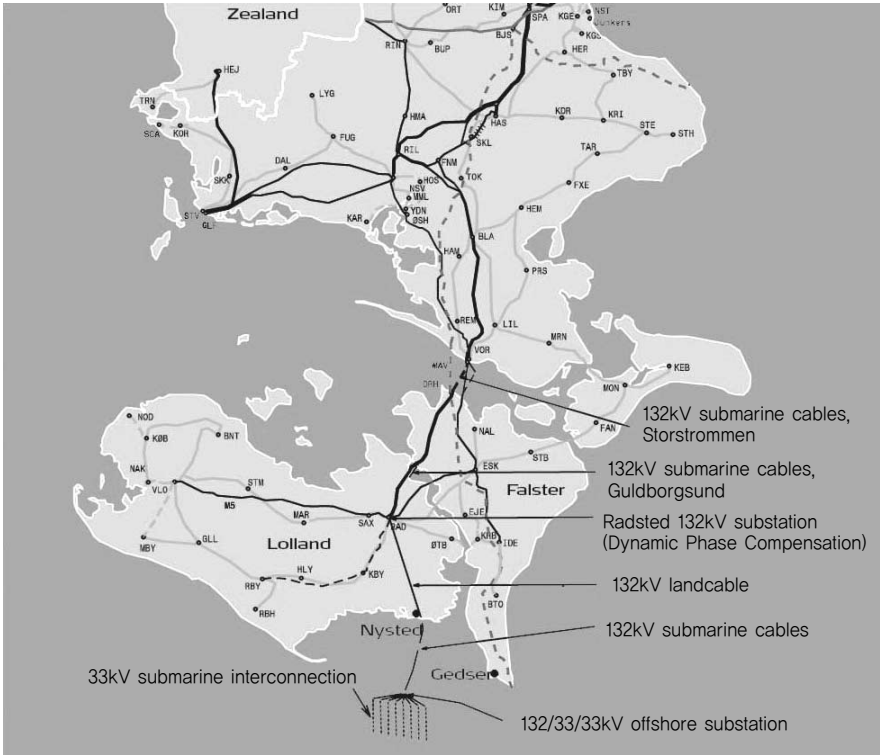
바. Nysted(덴마크)

2003년 코펜하겐 남쪽에 세워진 Nysted 해상풍력 단지는 2.3MW의 풍력발전기 72기로 구성되었으며, 총 발전량은 165.6MW이다. 1997년에 덴마크의 에너지 장관과 Elsam, Elkraft사의 협의로 5개의 세부 프로젝트를 추진하였으며 그 프로젝트의 결과물 중 하나이다. 두 개의 분야로 나누어 프로젝트팀을 구성하였으며, 풍력단지 설계 및 구성은 ENERGI E2, 해상 변전시설 및 송전 설비는 SEAS Transmission이 총괄하였다.

운영자는 ENERGI E2, 단지 위치는 South of the coast of Lolland, Denmark, Baltic Sea, 단지면적은 24km²이며 수심은 6~9.5m, 해변까지의 거리는 9km 이다. 터빈제작사 및 설비규모와 구성은 Bonus A/S이고



[그림 7] Horns Rev 해상풍력단지 내부망 배치도



[그림 8] Nysted 해상풍력 계통연계도

2.3MW, 터빈 개수는 72기, 발전용량은 165.6MW, 회전자 직경은 82.4m, 허브 높이는 69m이다.

165MW 용량의 Nysted 해상풍력을 계통에 연계시키기 위해서는 지역에 연계된 전력계통 분석이 선행되어야 했다. 이미 Falster와 Lolland에 위치한 250MW 규모의 육상풍력과 Nysted 해상풍력의 연계는 150MW의 지역 부하를 초과하기 때문에 Elcraft에서 계통을 측정하고 분석한 결과를 토대로 전력망을 보강하였다.

사. Greater gabbard(영국)

Greater Gabbard 해상풍력은 템즈 강 하류 근해에 위치해 있다. Suffolk 해안에서 23km 떨어진 곳에 위치할 이 해상풍력단지에는 140개의 터빈으로 500MW의 발전용량을 목표로 하고 있으며, 이러한 발전 용량은 기존의 400kV 송전선을 통해 Sizewell에 연계될 예정이다. 운영자는

Greater Gabbard Offshore Winds Ltd (GGOWL), 단지위치는 템즈강 인근 Suffolk 해안근처, 단지면적은 147km²이며 수심은 20~50m, 해변까지의 거리는 23km 이다. 터빈 제작사 및 설비규모와 구성은 3~7MW, 터빈 개수 140기 이상, 발전용량은 500MW이다.

예상되는 터빈의 직경은 해발 170m를 초과하지 않을 것으로 예상되며, 허브 높이는 105m, 회전자 직경은 130m로 예상된다.

GGOWL은 Bradwell, Bramfordd과 Sizewell 세 지역을 계통연계 지점으로 고려하였다. Sizewell은 해안에서의 짧은 송전선 경로와 충분한 연계 용량 때문에 선정되었다. 육상의 설비들은 풍력 터빈에 의해 발전된 전기들을 연계된 지점에 전달해야 하며 이러한 설비의 설치는 환경보고서에 따라야 한다.

최대 4개의 해상 변압기 플랫폼은 케이블을 접속하여

132kV로 변환하여 전송한다. 지반 조사와 간격의 예시를 바탕으로 송전선의 루트를 결정하였다. 계통연계지점까지는 132kV로 전력이 전송되며, Greater Gabbard 해상풍력의 총 송전케이블의 길이는 200km에 달한다.

3. 전망

국내의 경우 2012년부터 신재생에너지 의무할당제 (RPS : Renewable Portfolio Standard)의 시행으로 공급의무가 있는 발전사업자 및 일부 지자체의 지역발전과 연계한 적극적인 프로젝트 추진으로 향후 본격적인 해상풍력의 보급이 전망된다. 특히 서남해안에 2.5GW의 대규모 해상풍력발전단지 건설을 추진 중에 있다. 그러나 국내에서 해상풍력이 본격적으로 보급되려면 유럽 등 선진국과 마찬가지로 일정기간 해상풍력에 대한 정책적

지원 및 기술개발에 따른 지원이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 해상풍력이 가장 활발하게 보급되고 있는 유럽 여러 나라의 해상풍력에 대한 구축현황을 파악하여 향후 건설될 국내 해상풍력발전단지의 건설에 참조할 필요성이 있다.

해상풍력발전은 육상풍력에 비하여 바람의 질이 좋기 때문에 더 많은 발전량을 얻을수 있는 장점이 있는 반면 조건이 가혹한 환경에서 발전기가 가동되어야 하기 때문에 고도의 신뢰성이 요구된다. 또한 해상풍력단지는 육상풍력에 비하여 민원발생 등 여러 제반여건이 유리하기 때문에 대규모 단지구성이 가능하다.

그러나 대규모 단지구성의 경우 계통비용 증가 등이 수반된다. 따라서 풍력발전단지 구성 시 바람 자원의 분석과 계통운영의 신뢰성, 경제성을 확보하기위한 전력계통 연계 방식 결정도 대단히 중요하다. KEA