

뒷바람 형식 해상풍력터빈의 최근 동향

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 나덕주
(djra15@reseat.re.kr)

1. 서언

- 세계 대부분의 국가에서는 석탄, 천연가스, 오일 및 원자력과 같은 비신재생 에너지자원을 주 에너지자원으로 사용하고 있다. 대량의 탄산가스를 방출하는 화석연료의 연소는 지구온난화와 같은 환경문제를 일으킨다. 에너지 정책의 새로운 방향은 세계 기후변화를 줄이는 것이다.
- 정치적 및 사회경제적 요인에 의해 화석 연료의 가격이 변동하기 때문에 각 국가는 에너지 자급자족을 위해 저비용 에너지자원과 기술을 개발하고 있다. 신재생에너지 자원은 큰 관심과 빠른 성장으로 저탄소 에너지 공급의 핵심이 되고 있다. 각종 지원금과 비용 절감을 통해 신재생에너지 자원은 전력생산의 중요한 역할을 담당하고 있다.
- 지난 40년 동안 풍력발전은 신재생에너지의 선도적 자원으로 21세기 중요한 에너지자원으로 부각되었다. 풍력에너지는 신뢰성이 있고 비용 효과적이고, 다른 에너지자원에 비해 경제성과 경쟁력이 있기 때문에 급속하게 성장하고 있다. 그중 해상풍력 에너지는 주거 지역에 가까운 위치, 높은 풍속, 낮은 난류, 경관을 해치거나 소음의 영향을 최소화 할 수 있는 장점이 있다.

2. 현재의 해상풍력터빈 기술

- 대부분의 해상풍력터빈 프로젝트는 50m 이하 깊이에 고정식 해상 풍력터빈을 주로 적용하는데 이는 고정식 기초의 검증된 기술과 기술적 및 경제적 가능성에 기인한다. 보다 깊은 바다에는 부유식 해상풍력터빈을 사용하는데 이는 보다 적은 비용으로 대형 터빈을 운송하고, 배치하고, 해체할 수 있기 때문이다.

- 해상풍력터빈을 설계할 때는 기초 및 부유 플랫폼에 관해 터빈 중량과 높이, 해저 조건, 수심, 시스템 하중 및 동특성 및 풍랑 조건을 고려하여야 한다. 해상풍력터빈은 일반적으로 지지 구조물의 형태에 따라 분류하며, 아래에 실제 운용하는 해상풍력터빈의 하부 구조물에 대해 설명한다. 이들은 대부분 오일 및 가스 산업용 해상 지지구조물에 내식성과 강도를 보강해 적용하고, 육상용 맞바람 형식 풍력터빈을 해상용으로 개조하여 사용하고 있다.
- 50m 이하 수심에는 고정식 기초 구조물을 사용하며 단주식(monopile), 중력식(gravity based), 재킷식(jacket), 삼각대 방식(tripod), 세 기둥 방식(tripile)의 5종류가 있다. 단주식 기초 구조물은 가장 단순하고 값이 싸며, 25m 이하의 수심에 주로 적용하고, 터빈 타워를 단주 위에 연결 부재를 사용하여 설치한다. 이 단주식 구조물은 London Array, Horns, DanTysk 및 Anholt 풍력 단지에 적용하고 있다.
- 25m 이하에서 사용하는 중력식 기초 구조물은 일반적으로 벨러스트가 있는 강화 콘크리트로 제작하여 자중으로 해저에 계류(anchoring)하고, Vindeby 해상풍력단지과 Nysted 해상풍력단지에 적용하고 있다. 재킷식 기초 구조물은 20~50m 수심에 사용하며, 강철제 튜브로 제작한 3개 또는 4개의 다리를 가진 격자형 구조를 가진다. 이 기초는 낮은 풍랑의 Thornton Bank 및 Ormonde 해상 풍력단지에 사용되고 있다.
- 삼각대방식 기초 구조물은 비교적 경량으로 3개의 다리를 가진 강철 구조물로 프레임은 물에 잠겨 있다. 이 방식은 20~50m 수심에 사용되고, Alpha Ventus, Global Tech 1 등 풍력단지에 사용되고 있다. 세 기둥 방식 기초 구조물은 30~50m 수심에 적합하고 3개의 강철 지지 프레임이 바다 밑 기초로부터 수면까지 올라와 타워에 연결하는 구조로 Bard 해상 풍력단지에 사용되고 있다.
- 수심이 50m를 넘으면 고정식 구조물 비용이 비싸므로 부유식 기초 구조물을 사용한다. 아래에 프로토 타입 및 실물 규모 시험에 사용되는 몇 가지 부유식 기초 구조물에 대해 설명한다. 스파 타입 부표는 양단이 밀폐된 긴 강철제 실린더로 제작하고, 부력이 실린더를 수면에 떠 있게 만든다. 이 시스템은 기저에 있는 벨러스트에 의해 안정을 이루고

2.3MW 풍력터빈이 수심 200m에 설치된 사례가 있다.

- 인장 다리형 플랫폼은 부분적으로 해수면 아래에 잠겨 있고, 해저에 계류되어 있는 가느다란 인장 로드 또는 선에 의해 고정된다. 최초 프로토타입은 노르웨이 SWAY사에 의해 개발되었고, 여러 개의 다리를 가진 플랫폼은 Blue H 그룹에 의해 남부 이태리에서 113m 수심에 프로토타입을 설치하였다. 반 잠수식 구조물은 삼각형 또는 사각형의 안정된 기둥 구조체가 해저에 계류된 선으로 고정되는 구조를 가진다.

3. 하향식 풍력터빈 배치의 새로운 시도

- 육상용 풍력터빈에서 입증된 기술을 그대로 적용하여 해상풍력터빈을 설계하면 단기적 투자 비용을 줄일 수 있다. 기존의 육상용 로터가 가진 중량 문제를 극복하고, 제한조건이 보다 적은 해상환경에서 새로운 설계와 배치를 적용함으로써 에너지 비용을 훨씬 줄일 가능성이 있다.
- 1941년 Smith-Putnam은 최초로 MW 규모 뒷바람(downwind type) 형식 풍력터빈을 개발하였다. 그 후 20년 동안 NASA 풍력터빈 등 다양한 크기의 뒷바람 형식 풍력터빈이 개발되면서 능동적 요(yaw) 시스템의 개발에 의하여 맞바람 형식(upwind type) 로터가 다양한 장점을 가지게 되었다. 해상 풍력에너지 산업의 성장에 동반하여 해상풍력터빈을 뒷바람 형식으로 배치하기 위해 고려하여야 할 사항에 대해 아래에 기술한다.
- 소음: 분석적이고 실험적인 음향연구에 의하면 뒷바람 형식 로터가 맞바람 형식 로터보다 더 많은 소음을 발생한다. 뒷바람 형식 로터는 타워의 공기역학적 후류와 상호작용하여 추가적인 소음을 일으키기 때문에 육상용으로는 맞바람 형식 풍력터빈을 채택한다. 해상풍력터빈은 거주 지역에서 멀리 떨어진 곳에 설치하기 때문에 운영 중 소음 피해는 적지만 설치 및 운전하는 동안 소음의 영향을 고려하여야 한다.
- 풍력터빈의 크기 증대: 대형 풍력터빈은 경제적으로 총 비용의 감소와 환경적으로 그린에너지의 활용 관점에서 유리하기 때문에 5MW 이상의 풍력터빈을 사용한다. 육로는 운반과 건설 장비의 제한을 받지만 해

상은 그 영향이 적으므로 점차 더 큰 풍력터빈을 적용하는 경향이 있다. 상용화한 대형 풍력터빈은 Vestas의 V164 8MW, Enercon의 E126 7.5MW, 삼성의 S7.0 7MW 등이 있고, 2020년에는 10MW~20MW의 대형 풍력터빈이 개발될 것으로 예상된다.

- 블레이드와 타워 사이의 간극: 이 간극은 사용하는 복합재료의 피로현상에 기인하여 시간이 경과함에 따라 줄어들게 된다. 맞바람 형식 로터의 간극을 개선하기 위해 블레이드를 콘(cone) 형태로 설치하거나, 축을 임의 각도로 경사지게 설치하거나, 블레이드를 바깥 방향 곡면으로 제작하거나, 허브를 더 멀리 설치하는 방법 등을 적용한다. 뒷바람 형식의 경우 이 간극이 더 커지게 되는 장점이 있다.
- 블레이드 기술과 운영: 유연한 블레이드를 사용하면 블레이드 재료를 줄일 수 있어 블레이드, 허브 및 기어박스에 걸리는 하중을 감소할 수 있다. 또 하향식 배치의 경우 터빈의 운전 중 원심력에 의해 블레이드 루트에 걸리는 벤딩모멘트를 줄일 수 있다. Jemieson이 제안한 고속 로터의 경우 뒷바람 형식 로터를 채용하여 풍력터빈 투자 비용의 15~20%를 감소하였다.
- 능동적 요 시스템의 제거: 요(yaw) 시스템은 육상용 맞바람 형식 풍력터빈의 총 비용의 1.3~5%를 차지하고, 비용과 중량 측면에서 전체 풍력터빈 부품 중 두 번째로 높은 비중을 갖고 있다. 뒷바람 형식 배치를 적용할 경우 수동적으로 바람에 맞추어 요잉(yawing)할 수 있으므로 능동적 요 시스템의 제거가 가능하고, 그에 따른 직접 투자 비용은 물론 운전 및 정비 비용을 감소할 수 있다.
- 전력 성능의 영향: 타워 간섭효과 및 비 균일 유동은 비교적 적고, 맞바람 형식과 뒷바람 형식 로터 사이의 전력 변동은 5% 이하로 예상된다. Hitachi 2MW 풍력터빈에 대한 계산 및 실험적 연구에 의하면 맞바람 형식 배치에 비해 뒷바람 형식 로터가 출력과 추력이 더 크게 나타났다. 부유식 풍력터빈의 경우 로터를 경사지게 설치하여 간극을 크게 하면 전력 성능을 더 크게 할 수 있다.

4. 뒷바람 형식 해상풍력터빈 프로젝트

- 현재 실제로 사용하고 있는 해상풍력터빈은 대부분 맞바람 형식 터빈이지만, 최근 뒷바람 형식 풍력터빈을 시범적으로 설계하고 시험 중인 몇 개 프로젝트를 아래에 소개한다.
- 2-B Energy사는 2개 블레이드를 가진 6MW 규모의 뒷바람 형식 고정형 풍력터빈을 네덜란드 Eemshaven 해안에 설치하고, 또 스코틀랜드 해상에 설치하는 Methil 프로젝트를 계획하고 있다.
- Ming Yang 사는 2014년 말에 2-블레이드 6MW 규모의 뒷바람 형식 고정형 풍력터빈을 중국에 설치하였다. 이 140m 로터 직경을 가진 풍력터빈은 Aerodyn Energysystem사가 설계하였고, 단일 로터 베어링, 2단 유성 기어박스 및 영구자석 발전기를 채택하고 있다.
- 후쿠시마 부유식 해상풍력터빈 시범단지(Fukushima FORWARD) 프로젝트는 어업, 해상 안전 및 환경 평가와 관련한 기술적 과제를 해결하는데 집중하고 있다. 첫 단계로 Hitachi의 2MW 뒷바람 형식 풍력터빈을 제조, 설치 및 시험하고, 부유 동작, 안전 및 발전효율을 연구하고 있다.
- Goto 부유식 해상풍력터빈 시범 프로젝트는 2016년까지 2개의 부유식 풍력터빈의 설치하고 시험하는 것이다. 첫 번째 풍력터빈은 2012년에 100kW 뒷바람 형식 풍력터빈을 전력망에 연결하였고, 두 번째로는 2013년에 2MW 뒷바람 형식 풍력터빈을 설치하였다. 이 프로젝트를 통하여 기술적 실현 가능성, 해상 측정 및 환경 영향평가를 실시하였다.
- Hitachi사는 15개의 2MW 뒷바람 형식 풍력터빈을 고정식 기초 위에 설치하였고, 해상 환경에 적합한 5MW 뒷바람 형식 풍력터빈을 개발하고 있으며, 향후 Murakami 해상 프로젝트를 위해 44대의 5MW 뒷바람 형식 풍력터빈을 설치할 계획이다.
- SWAY사는 단일 인장 스파 플랫폼을 사용한 3-블레이드 뒷바람 형식 부유형 풍력터빈을 개발하였다. 특징은 개별 블레이드 피치 제어가 가능하고, 나셀은 타워에 고정되어 바람의 방향과 평행되도록 최적의 각도를 유지한다. 1:6.5 프로토 타입의 시험을 거쳐 최대 124m 로터 직경과 최고 210m 높이의 타워를 가진 2.5~10MW 실물 크기 풍력터빈을

설계하고 있다.

5. 결론

- 현재 해상풍력터빈 설계에서 보수적인 설계가 가장 확실한 기회를 제공하고 있다. 해상풍력터빈에서 뒷바람 형식 터빈을 구현하면 결정적으로 에너지 비용을 낮출 수 있다. 풍력터빈의 사이즈가 커지게 될 경우 뒷바람 형식 로터를 채택함으로써 구조물, 로터, 기어박스에 가해지는 높은 하중의 부담과 블레이드와 타워 사이의 간격을 줄일 수 있다.
- 뒷바람 형식 배열은 유연한 블레이드, 고속 로터, 타워 페어링 및 전체 격자형 타워와 같은 새로운 타워와 블레이드 설계를 가능하게 한다. 개별적 피치 제어로 시스템의 요(yaw) 동작을 확실하게 구동할 수 있으면 능동적 요(yaw) 시스템을 제거하여 직접 비용을 줄일 수 있다. 지난 수십 년 동안 많은 풍력터빈 제조사와 정부 지원 계획에서도 해상 환경 하에서 뒷바람 형식 풍력터빈 적용을 추진하고 있다.
- 미래 연구개발 방향과 도전 과제로는 대형 뒷바람 형식 터빈의 간섭효과(shadow effect), 타워 음영과 나셀 영향의 정밀한 분석, 타워 간섭의 영향을 축소하고 뒷바람 형식 로터의 안전한 운전을 보장할 수 있는 제어 알고리즘의 구현 등이 있다. 또한 뒷바람 형식 해상풍력터빈에 대한 실물 크기 시스템의 최적화 설계 및 비용 분석도 전체 투자비용을 줄이기 위해 대단히 중요한 과제이다.

출처 : J.H. Koh, E.Y.K. Ng, “Downwind offshore wind turbines: Opportunities, trends and technical challenges”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 2016, pp.797~808

◁ 전문가 제언 ▷

- 현재 해상풍력터빈의 설계는 기본적으로 표준 육상풍력터빈을 해상용으로 전환하고 부식 방지와 강도를 추가적으로 보강하여 설계한다. 이는 단기적으로 기술적 및 경제적 실현 가능성을 보장하기 위하여 육상용 풍력터빈의 입증된 기술과 해상용 고정식 기초를 그대로 적용하고, 고정식 해상풍력터빈은 보통 50m 이하 바다에 적용한다.
- 육상용 기술을 해상 환경에 적용하면 해상 환경에서 에너지 비용을 훨씬 낮출 가능성이 있다. 본문에 해상풍력터빈 기술을 검토하고, 뒷바람 형식(downwind type) 해상풍력터빈을 선정하는데 필요한 몇 가지 요인과 기회에 대해 논의한다. 또한 현재 뒷바람 형식 해상풍력터빈산업과 연구개발에 대해 설명하고 도전 과제에 대해 기술한다.
- 수평축 풍력발전기(HWAT, Horizontal Axis Wind Turbine)는 회전축이 바람이 불어오는 방향에 수평인 풍력발전 시스템으로 현재 가장 안정적인 고효율 풍력발전 시스템으로 인정되고 있다, 수평축 발전기로는 바람을 맞이하는 방식에 따라 맞바람 형식(upwind type)과 뒷바람 형식(downwind type)으로 나눌 수 있다.
- 뒷바람 형식은 바람이 타워와 나셀을 먼저 만나고 그 다음 블레이드를 만나게 되는 형태로 자체 요잉 모멘트 발생으로 요잉 시스템이 불필요하게 되며 타워와 로터의 충돌은 피할 수 있다. 그러나 타워와 나셀에 의한 풍속의 손실이 발생하고 주기적 풍속 변동으로 인한 피로하중 및 소음이 증가하는 단점이 있다.
- 국내 해상용 대형풍력터빈 제조사는 대형 뒷바람 형식 터빈의 간섭효과(shadow effect), 타워 음영과 나셀 영향의 정밀한 분석, 타워 간섭의 영향을 축소하고 뒷바람 형식 로터의 안전한 운전을 보장할 수 있는 제어 알고리즘의 구현 등을 포함하여 뒷바람 형식 해상풍력터빈에 대한 실물 크기 시스템의 최적화 설계 및 비용 분석도 전체 투자비용을 줄이기 위해 노력을 집중할 필요가 있다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.