

# 이동 부유식 풍력터빈으로 구성된 해상 풍력단지의 후류 손실 최적화

한국과학기술정보연구원  
전문연구위원 신호순  
(0637shin@reseat.re.kr)

## 1. 머리말

- 더 일정하고 더 빠른 평균 풍속의 필요성 때문에 해상풍력단지가 해안에서 더 멀리 설치되고 있다. 경제적으로 실행 가능한 방법으로 더 깊은 수심으로 이동할 목적으로 부유식 풍력터빈이 지난 수년간에 출시되었다. 이들 부유식 터빈 개념의 하나가 IDEOL사에 의해 개발되었다.
- 이 설계는 터빈이 해저에 고정되지 않아서 설치 후에도 약간 이동할 수 있지만, 케이블 설치와 지역 임대 비용을 저감하기 위해 터빈들을 서로 가깝게 설치하기 때문에 그림자 효과를 통한 후류 손실과 같은 간섭을 야기한다. 이 글은 이동이 가능한 풍력터빈으로 구성된 부유식 해상풍력 프로젝트를 위한 새로운 최적화 시스템을 제시한다.

## 2. 부유식 풍력터빈

- 기존의 상용 크기 해상풍력단지는 터빈을 지지하기 위하여 밑바닥에 하부구조 기반을 둔 개념을 사용한다. 그와 같은 하부구조는 수심이 증가할수록 더 비싸고 설계가 어렵게 된다. 더 높은 풍속이 있는 장소에서 더 높은 에너지생산을 위해 부유식 터빈이 검토되고, 유럽에서는 지중해, 대서양 및 노르웨이에서 집중적으로 검토하고 있다.
- 장기적으로는 부유식 구조가 해상풍력시장에서 유리하지만 부유식 풍력터빈에 관련된 몇 가지 중요 과제가 있다. 예를 들면 증가하는 풍력과 파랑 유도운동, 설계과정의 추가된 복잡성, 전기 인프라 설계와 비용(특히 가요성 케이블), 건설, 설치 및 O&M 절차 등이다. 이들 난관을 극복하기 위해 노하우를 축적하고, 표준화 관행을 실시하고 있다.

- IDOL사는 구조체가 계류선을 따라 움직이도록 하는 새로운 이동식 풍력터빈 개념을 개발하였다. 선형 이동만 허용하는 이동터빈은 터빈과 앵커 사이의 거리(1개 변수)에 의해 정해지기 때문에 조종하기가 쉽다. 앵커위치를 재조정하여 터빈이 삼각형 지역을 커버하게 하는 더 복잡한 설계는 터빈에 2자유도를 주어서 2방향으로 움직일 수 있게 한다.
- 이 2방향 이동성에 의해 바람과 파랑 방향 두 가지 환경 데이터에 근거리 풍력 단지 레이아웃을 최적화 할 수 있다. 이 해법은 후류 손실을 감소할 수 있어서 연간 에너지생산을 증가시킬 수 있는 반면 이 개념은 여분의 이동성 기계 때문에 유사한 부유식 개념보다 더 복잡하고 시스템 운영자가 바람 방향에 따라 터빈을 움직여야 한다.

### 3. 풍력단지 레이아웃 최적화 체계

- 여기에 제안된 최적화 체계는 이동식 풍력터빈에 의해 제기된 장점을 이용한다. 그것은 바람 방향에 따른 터빈의 실시간 위치를 최적화 한다. 이 체계는 그것이 계류선과 터빈앵커 위치 내에서 터빈의 위치를 최적화하기 때문에 통합적 설계전략을 갖고 있다.
- 공분산 행렬 적용(CMA-ES: Covariance Matrix Adoption) 전략을 제안된 체계에 사용하였다. CMA-ES는 비선형과 비 블록 함수의 실수치 단일목적 최적화를 위한 가장 강력한 진화적 알고리즘이다. 중첩된 최적화 체계가 이 연구에서 터빈 위치를 동시에 최적화하기 위해 제안되었다. 외부 최적화루프는 우선 터빈의 앵커 위치를 확립한다. 반면, 내부 루프는 각 바람방향을 위해 계류선 내에서 터빈 위치를 최적화한다.
- 풍력단지 생산의 최적화는 가장 공통적인 최적화 목표의 하나이고, 학계와 상용 소프트웨어에서 널리 사용된다. 이 연구에서 후류 손실이 있고 없는 풍력단지 생산 사이의 비율로 계산된 풍력단지 효율의 최적화인 유사한 최적화 목표를 사용한다.

### 4. 후류 손실 모델

- 터빈을 서로 근접해서 설치하면 그림자를 통해 후류 손실과 같은 간섭을 야기한다. 다른 정확한 수준으로 풍력단지 내의 후류로 인한 출력 손실을 계산하기 위한 후류손실모델은 Jensen 모델, Eddy Viscosity 모델 등이 있다. 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics) 모델은 고 충실도의 끝을 대신한다. CFD모델은 대형풍력단지를 계산하는데 몇 시간이나 걸리는 포물선 모양의 Navier - Stokes식을 푼다.
- 해상풍력단지 내의 후류손실을 계산하기 위하여 스펙트럼의 양 끝단에 위치한 두 모델을 이 연구에 사용하였다. Jensen 모델은 최적화하는데 적용하였고, 반면 FarmFlow는 최적화된 풍력단지의 효율을 증명하기 위하여 사용되었다.
- Jensen모델은 풍력터빈 후류 내의 풍속을 계산하는 단순화되고 빠른 방법이다. 실시하기 쉽고 신속한 계산 때문에 이 모델은 풍력단지 모델링에 널리 채택되었다.
- UPMWAKE 모델이 개선된 FarmFlow는 모든 3차원에서 포물선 모양의 Navier - Stokes식을 푸는 반면, 후류에서 난류 과정은  $\kappa-\epsilon$  난류모델로 모델링된다. FarmFlow의 성능이 터빈후류 내의 풍속감소를 예측하기 위하여 평가되었고, 일반적으로 사용되는 모델과 비교되었다.

## 5. 사례연구

- 180MW 설치전력과 5km 내의 정사각형 모양의 중형 크기의 해상풍력단지에서 제안된 최적화 체제를 시험하였다. 단지는 5MW의 정격 전력을 가진 36개의 동등한 터빈으로 구성되어 있다. 터빈은 90m의 허브 높이와 126m의 로터지름을 가지고 있다.
- 초기 기본 풍력단지 레이아웃에서 풍력터빈들이 그들 사이에 1km 거리로 격자형으로 놓여있고 계류선을 위한 각도가 기준 값으로 설정되었다. 풍력단지는 연속공간으로 고려되었고, 계류선은 터빈 로터지름보다 50% 더 길게 했다.
- 풍배도(Wind rose): 제안된 체제는 최적화된 레이아웃을 얻기 위하여

해상풍력 현장에 존재하는 풍력자원에 의존하였다. 사용된 풍력자원은 북해에 위치한 해상풍력 플랫폼 Fino 1에서 4년 동안 수집한 측정데이터에 근거한다.

- CMA-ES: 외부 루프 CMA-ES는 24시간 동안 가동했고, 반면 내부 루프 알고리즘은 풍력방향과 해법당 100회 반복이 주어졌다. CMA-ES 알고리즘의 모든 나머지 매개변수는 그들의 기본지침 값으로 설정되었다.
- 시나리오: 사례연구를 위하여 여섯 가지 다른 시나리오를 고려하였다. 시나리오 1은 표준격자형에 근거한 풍력단지 프로젝트를 나타낸다. 시나리오 2에서는 터빈 위치가 최적화되었지만 터빈이동성은 고려되지 않았다. 시나리오 3과 4는 격자형 레이아웃을 사용하고 이동식 풍력터빈을 적용하였다. 시나리오 5와 6은 터빈앵커 위치와 계류선 내의 터빈 위치를 둘 다 포함하는 통합적 접근법을 사용하였다.

## 6. 결과

- Jensen 모델에 의하면 정상적인 풍력단지 레이아웃이 가장 낮은 풍력단지 효율을 갖는다. 표준격자형 레이아웃은 바람이 터빈과 행으로 정렬된 방향에서 매우 낮은 풍력단지 효율을 가진다. 고정된 터빈에서 최적화된 레이아웃으로 구성된 풍력단지 레이아웃이 2번째로 가장 높은 풍력단지 효율을 갖고, 터빈앵커 위치와 계류선 내의 터빈 위치를 둘 다 포함하는 통합적 접근법인 시나리오 6이 가장 좋은 효율을 갖는다.
- FarmFlow 모델에 의하면 시나리오 1이 240°와 330° 사이에서 가장 높은 효율을 갖는다. 이 방향의 평균 풍속이 제일 높고 추력계수가 낮으므로 터빈이 후류발생에 미치는 영향이 가장 약하다. 또한 격자형 레이아웃은 터빈들이 이들 각도에서 더 큰 간격을 가지는 사실에서 혜택을 갖는다.
- 이로부터 주 풍력 부문이 터빈 열(row)과 정렬되는 경우에 낮은 풍력단지 효율이 예상된다. FarmFlow에 따르면 시나리오 3과 4가 가장 낮은 효율을 보여주는 반면, 시나리오 2, 5 및 6이 최고의 에너지 생산뿐만 아니라 양쪽 모델을 따라 가장 낮은 효율 변동성을 가졌다. 두 후류모델을 따라 풍력단지효율의 절대적인 차이가 있는 것을 보여준다.

- FarmFlow 모델에서 얻은 결과는 터빈 레이아웃이 좌표 적으로 최적화 되면 이동식 부유터빈이 혜택을 보는 것으로 보인다. 반면, Jensen 모델에서는 모든 최적화된 레이아웃이 표준 레이아웃보다 성능이 더 좋다. 또한 두 모델에 따르면 풍력단지 레이아웃이 이동식 풍력터빈을 사용하여 최적화 될 때 최고의 에너지 개선이 이루어진다.

## 7. 맺음말

- 이 연구는 이동식 부유터빈으로 구성된 해상풍력단지 설계를 위한 최초의 최적화 체계를 제시했다. 첫째 비표준 격자 기반(non-standard grid-based) 레이아웃을 초래하는 풍력터빈의 앵커 위치, 둘째 각 풍력 방향을 위한 계류선 내 터빈 위치의 두 가지 요인을 동시에 최적화 할 때 에너지 회수율이 더 증가하는 것을 확인하였다.
- 풍력단지 효율은 최적화 과정에 사용된 Jensen모델과 최종 레이아웃의 효율을 증명하기 위해 적용된 FarmFlow모델 사이에 상대적 차이를 보인다. 이들 결과는 미래 대형 해상풍력단지의 최적화 과정에 적용될 충분히 빠른 정확한 후류모델 개발의 중요성을 입증하였다.
- 터빈 가동지역이 더 커지면 풍력단지 효율은 4.4%까지 더 높아진다. 이 작업에서 얻은 결과는 터빈과 풍력단지 개발자가 미래 해상 풍력프로젝트를 최적화하기 위해서 협조해야 한다는 것을 제시한다.

출처 : S.F. Rodrigues, R. Teixeira Pinto, M. Soleimanzadeh, Peter A.N. Bosman, P. Bauer, "Wake losses optimization of offshore wind farms with moveable floating wind turbines", *Energy Conversion and Management*, 89, 2015, pp.933~941

## ◁ 전문가 제언 ▷

- 미래에는 더 높은 평균 풍속이 관측되는 깊은 해상구역에서 에너지를 획득하기 위하여 부유식 풍력터빈이 사용될 것이다. 현재 여러 부유식 터빈 개념이 작은 규모의 프로젝트로 설계되고 시험 중인데 특히 터빈이 설치 후에 이동을 할 수 있는 장점이 있다. 이 글은 이동식 부유터빈으로 구성된 풍력단지를 위한 새로운 레이아웃 최적화 체계를 제시한다.
- 제안된 체계는 각 풍력방향을 위한 계류선 내에서 앵커 위치와 풍력터빈 배치를 동시에 최적화하는 중첩된 형태에서 진화적 최적화 전략을 사용하였다. 이동식 풍력터빈이 최적화된 레이아웃으로 배치되었을 때에 최대 에너지생산이 얻어지므로 이 체계가 이동식 부유터빈으로 구성된 미래 해상풍력단지를 위한 새로운 설계 최적화 도구를 나타낸다.
- 풍력터빈의 후류로 인한 평균 전력손실은 대형 해상풍력단지에서 총 출력의 10~20% 정도이므로 후류로 인한 전력손실을 정확하게 정량화하는 것은 전체 풍력단지 경제의 중요한 부분이다. 대형풍력단지에서 풍력터빈 후류로 인해 유도된 동력 손실 크기의 일차적 제어는 허브높이에서의 풍속이다. 중간 이하의 풍속에서는 추력계수가 높아 후류 손실이 비례적으로 크고, 정격풍속 이상의 풍속에서는 사실상 감지할 수 없을 정도로 감소하고 풍향도 중요하다.
- 전북대 박근성 등은 제주도 성산풍력발전단지의 후류 손실 및 터빈 재배치에 관한 연구에서 주 풍향과 동일한 라인에 두 터빈이 설치되어 있는 경우 후방에 위치한 터빈 이격거리를 8D 이상으로 설치하면 후류 영향을 줄일 수 있음을 확인하였다.
- 일본은 2011년 Fukushima 해역 20km 근해에 건설되는 아시아지역 최초의 부유식 해상풍력단지 실증연구 사업을 착수했다. Mitsubishi 중공업은 이 프로젝트에서 세계 최대급 7MW 부유식 해상풍력터빈을 건조하고 있다. 우리나라는 동해안 먼 바다와 제주도 남방 먼 곳에 우수한 해상풍력 자원이 있다. 이 연구가 이동식 부유 해상풍력터빈 단지를 계획할 때 도움이 될 것이다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.