

확장된 풍력단지에서 터빈 간격이 출력에 미치는 영향

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

1. 머리말

- 상류 풍력터빈에 의해 생성된 후류는 하류 풍력터빈의 전력생산을 상당히 감소시킬 수 있고 이 현상은 풍력단지 성능에 중대하게 영향을 줄 수 있다. 후류 영향에 대한 우리의 기본적 이해가 전체 전력 추출 효율을 증가시키는 대형풍력단지의 최적화를 위해 중요하다.
- 격자로 정돈된 표준 풍력단지를 고려하면 날개방향과 유동방향 터빈 간격은 설계 파라미터이고, 어떻게 전력출력이 이들 간격에 의존하는가를 아는 것이 중요하다. 관련된 파라미터는 $s = \sqrt{s_x \cdot s_y}$ (s_x 와 s_y 는 각각 유동방향과 날개방향의 무차원 간격)로 규정되는 기하학적 평균 터빈 간격이다.
- 모델가정에 덜 의존하고 더 신뢰성 있는 결과를 달성하기 위하여 풍력단지의 고성능 컴퓨터모사가 풍력터빈 정렬에서 유동연구, 특히 후류효과를 연구하기 위한 도구로 주의를 모았다. 최소의 모델링 가정을 요구하는 도구는 직접수치모사(DNS: Direct Numerical Simulation)이다.
- DNS는 공기 경계층과 블레이드에 가까운 층에서 높은 레이놀즈수의 유동과 관련된 매우 큰 규모 차이 때문에 풍력단지모사를 위해 연산적으로 다루기에는 쉬운 방법이 아니다. DNS와 공학적 모델과의 중간 복잡성을 갖는 대형 회오리 모사(LES: Large Eddy Simulation)가 풍력단지의 후류 상호작용을 연구하는 매력적인 대안의 방법을 제공한다.

2. 대형 회오리 모사의 구조

- 각각 지름 $D=100\text{m}$ 와 허브 높이 $z_H=100\text{m}$ 를 갖는 풍력터빈의 정상적 배열이 모델링되었다. 대부분 경우에 적용된 연산영역은 유동방향, 날개방향 및 수직방향으로 각각 $8\pi \times \pi \times 2\text{km}$ ($L_x \times L_y \times L_z$)이다. 또한 두 가지 사례가 하류 위치의 함수로 출력이 상수가 되는 체제인 완전히 발달된 체제가 모든 경우에 도달한 것을 증명하기 위하여 $12\pi \times \pi \times 2\text{km}$ 에서 계산되었다.

3. 결과

- 정렬 및 엇갈린 열의 전기출력
 - 하류 위치의 함수로 된 상대적 터빈출력은 7.85와 5.24D의 날개방향 간격으로 정렬된 배치에서 거의 동등하였다. 그러므로 정렬된 풍력단지에서 약 5D 이상의 날개방향 간격 증가는 출력에 유의한 효과를 주지 않는다고 결론지을 수 있다. 어긋난 배열의 완전히 발달된 체제에서도 출력은 날개방향 간격에 상당히 의존한다. 어긋난 풍력단지의 출력은 주로 기하학적 터빈 간격에 의존한다. 고정된 기하학적 평균 터빈 간격의 입구영역에서 출력은 유동방향과 날개방향의 터빈 간격에 강력히 의존한다.
 - 명확히 이 결과는 유동방향 간격이 커질 때 터빈출력이 점차적으로 더 감소하는 것을 증명한다. 다른 경우에 출력이 6km 하류보다 큰 위치에서 변하지 않는 것을 보여주었다. 어긋난 배열의 완전히 발달된 체제에서 출력은 주로 기하학적 평균 간격에 의존하는 반면, 정렬된 배열에서 출력은 터빈 사이의 유동방향 거리에 의존한다. 풍력터빈의 출력은 작은 터빈 간격으로 어긋나는 배열일 때 가장 높다.
 - 작은 터빈 간격을 가진 풍력단지가 더 작은 터빈 간격 때문에 터빈성능의 손실이 단위면적당 더 많은 수의 터빈에 의하여 더 많이 보상되기 때문이다. 그러나 풍력단지 설계자는 면적당 에너지생산을 극대화하기보다 에너지비용을 극소화하는 것을 유념해야 한다. 그래

서 실제 풍력단지에서 사용되는 간격은 날개방향과 유동방향에 7D에 가깝다. 정렬된 배치가 터빈밀도와 터빈 사이의 거리가 같지만 어긋난 배치보다 더 높은 출력을 보인다.

○ 중간 정렬 터빈의 전기출력

- 두 번째 줄에서 정상화된 전력출력은 정렬 각 ψ 에 의하여 나타나는 터빈의 상대적 위치에 강력히 의존한다. $s_x=7.85D$ 에서 터빈의 둘째 줄에서 정렬각이 약 $10\sim 11^\circ$ 보다 클 때 상류 터빈의 후류 바깥이다. $5.24D$ 의 더 적은 유동방향 간격에서는 이것이 ψ 가 $13\sim 14^\circ$ 일 때 발생한다. 더 큰 날개방향 간격 $7.85D$ 에서는 완전히 발달된 체제에서 출력은 정렬각 ψ 에 상당히 의존한다.
- 가장 높은 평균 출력은 중간 정렬각에서 얻어진다. 오직 예외는 $7.85D$ 의 유동방향 간격과 $3.49D$ 의 날개방향 간격을 갖는 풍력단지이다. 여기서는 어긋난 경우가 최고의 출력을 준다. 그 이유는 다음에 있는 터빈이 바로 상류에 있는 터빈으로부터 후류 효과에 의하여 영향을 받지 않는 위치에 있을 때 얻어지기 때문이다. $3.49D$ 의 작은 날개방향 간격을 가질 때 후류의 영향은 어긋나는 배치에서만 최소화된다.

○ 수직 운동에너지 유동 후류 회복

- 풍력단지의 입구영역에서 허브 높이에서의 운동에너지 포획률은 주어진 터빈배치에서 얻을 수 있는 전력출력의 주 결정요인이다. 그러므로 이 지역의 전력출력을 극대화하기 위하여 터빈은 그들이 바로 상류 터빈으로부터 후류에 의해 최소로 영향을 받는 위치에 있을 필요가 있다. 완전히 발전된 영역에서 터빈에 의해 발전된 전력은 주로 수직 운동에너지 유동에 의하여 허브 높이 평면에 이월된 고속 풍력으로부터 주로 유래한다.
- 수직 운동에너지 유동은 대기 경계층의 난류, 풍력터빈 후류에 의해 야기된 증가된 난류 수준 및 내부 풍력단지 경계층의 누적성장을 포함한 유동 현상의 조합에 의하여 결정된다. LES로부터 본 연구에서

고려된 각 배열에 대한 풍력단지의 수직 운동에너지 유동의 개발을 결정할 수 있다. 수직 운동에너지 유동은 풍력단지에서 하류 거리가 증가하면서 더 강해진다. 또한 수직 운동에너지 유동은 어긋난 배열보다 정렬된 배열에서 더 국부화된 것을 보여준다. 완전히 발달된 영역에서 수직 운동에너지와 전력밀도 사이에 강한 상관관계가 있다.

- 수직 운동에너지 유동으로 인한 허브높이 평면에 이월된 고속풍력은 얼마나 빨리 풍력터빈 후류가 회복되느냐의 직접적이고 편리한 지표이다. 후류는 어긋난 배치보다 정렬된 배치에서 더 빨리 회복된다. 후류가 수직 운동에너지 유동의 강한 국부화와 약한 측면 후류 때문에 정렬된 풍력단지에서 더 빨리 회복한다. 그러나 가용 후류 회복 길이는 정렬된 풍력단지보다 어긋난 풍력단지에서 두 배나 길므로 전력 생산은 어긋난 경우가 높다.
- 완전히 발전된 체제에서 터빈 뒤 7.5D(정렬된 풍력단지를 위한 프로필에서 최고)에서 얻은 속도는 터빈이 어긋날 때 터빈 뒤 7.5D에서의 속도보다 정렬된 배치에서 상당히 높다. 이것은 어긋난 경우와 비교한 정렬된 경우의 저조가 예측한 것보다 적은 것을 나타낸다.

4. 맺음말

- 본 연구는 대형풍력단지의 전력출력과 후류효과를 분석하기 위하여 LES를 사용하였다. 다양한 유동방향과 횡방향의 터빈 간격의 조합을 가진 다수의 다른 풍력단지 배열이 고려되었다. 결과는 완전히 발달된 체제에서 어긋난 배열로 정렬된 풍력단지를 위한 터빈 전력출력은 주로 터빈 간격의 기하학적 평균에 의존하는 것을 보여주었다.
- 그러나 정렬된 풍력터빈에서는 충분한 유동방향 간격이 터빈 사이의 횡방향 간격보다 더 중요하다. 관측은 [3,5,8]D 범위에서 유동방향과 횡방향을 위해 행하여졌다. 완전히 발달된 체제에서 중간 터빈정렬에서는 거의 정돈된 배열을 제외하고는 풍력단지 정렬각에 독립적이었다.
- 입구 양역의 분석은 풍력단지 레이아웃이 완전히 발달된 체제보다 이 영역에서 더 강력한 영향을 가진 것을 나타냈다. 풍력단지의 입구 영역

에서의 전력출력은 주로 허브 높이에서 들어오는 유동으로부터 추출될 수 있는 에너지의 양에 의하여 결정된다.

- 완전히 발달된 체제에서 허브높이 평면에 이월된 고속풍력의 양의 측정인 수직 운동에너지 유동은 터빈의 전력출력 밀도에 강력히 상관된다. 이 양은 정렬된 배치에서 더 국부화되므로 후류 회복은 어긋난 배치에서보다 정렬된 배치에서 더 빠르다.
- 어긋난 배치의 전력출력은 일반적으로 더 크다. 이들 결과는 풍력단지 모델링 도구에서 포착할 필요가 있는 정렬과 어긋난 배치 사이의 중요한 차이가 있는 것을 보여 준다. 이들 차이를 포착하도록 설계된 최근 모델은 Stevens 등에 의해 소개된 결합된 후류 경계층인 CWBL이다.

출처 : Richard J. A. M. Stevens, Dennice F. Gayme and Charles Meneveau, "Effects of turbine spacing on the power output of extended wind-farms", *Wind Energy*, 19, 2016, pp.359-370



◁ 전문가 제언 ▷

- 확장된 풍력단지에서 여러 범위의 횡 방향과 유동방향 간격조합을 갖는 풍력터빈 배열을 위한 대형와류의 결과가 제시되었다. 결과는 [3,5,8]D(D는 터빈 지름) 범위의 완전히 발달된 체제에서 횡 방향 간격을 갖는 어긋나는 배열로 정돈된 풍력단지의 전력출력은 횡 방향과 유동방향 터빈 간격의 기하학적 평균에 주로 의존하는 것을 보여 주었다.
- 완전히 발달된 체제에서 정렬된 배열의 전력출력은 유동방향 터빈 간격에 강력하게 의존하고 횡 방향 간격에 약하게 의존한다. 후류손실에 의한 전력출력은 얼마나 많은 운동에너지가 평균유동에 의하여 풍력터빈영역으로 전달되었는지의 방법인 수직 운동에너지 유동과 연관된다.
- 정렬된 배치와 엇갈린 배치 사이의 비교는 수직 운동에너지 유동이 엇갈린 배치보다 정렬된 풍력단지에서 터빈기둥을 따라 더 국부적이 되었다. 이 추가적인 혼합이 정렬된 풍력단지를 위하여 비교적 신속한 후류회복을 야기한다.
- 서울대학교의 손은국 등은 결합된 수치모델을 사용하여 최적 풍력단지 효율을 위한 터빈 간격 특성을 조사하였다. 상류터빈으로부터의 후류효과가 로터평면의 속도분포를 결정할 수 있는 모델에 의하여 예측되었다. 결과는 첫 번째 줄 터빈과 두 번째 줄 터빈 사이의 간격이 전체 단지 효율에 중요한 것을 보여주었다.
- 풍력터빈 위치를 위해 제안된 확실한 포인트 선택(DPS: Definite Point Selection)이 풍력단지 레이아웃 최적화를 위해서 성공적으로 적용되었다. 일정방향으로 균일한 풍력인 경우는 모든 내부 각도가 90°인 풍력단지가 적당한 반면, 다양한 방향으로 다양한 풍속을 갖는 경우는 두 가지 반대 내부 각도 120°와 60°를 갖는 풍력단지 치수가 적당하다.
- 우리나라 서남해안에 계획 중인 2.5GW 단지의 Layout 설계에 Stevens의 CWBL 대형 회오리 모사를 활용하고, 어민들과 상생할 수 있도록 모노 폴 기초에 어류 양식시설을 통합하는 것을 적극 권장한다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.