

# 풍력과 파력을 결합한 발전단지의 전기 출력 평활화와 정지 시간 감소

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

## 1. 머리말

- 풍력발전의 변동성을 평탄화하기 위한 방법으로 에너지저장과 비에너지 저장방법이 있는데 비에너지 저장에서 해상풍력과 파력에너지의 결합이 가장 유망한 선택으로 여겨진다. 풍력단지에 파도에너지 변환기를 포함시키면 전력 평형 비용을 35%까지 감소시킬 수 있다.
- 본문의 목적은 파력과 풍력을 결합한 발전단지에 의해 달성될 수 있는 전력 변동성 감소, 정지 기간 감소 및 다양화된 시스템의 용량계수를 분석하고 정량화 하는 것이다.

## 2. 재료와 방법

- 사례 연구
  - 이 조사는 Alpha Ventus와 Horns Rev 1 해상풍력단지의 두 사례 연구를 통해 수행되었다. Alpha Ventus는 Borkum 섬(독일)의 약 45km 북쪽 약 30m 수심에 위치해 있다. 이 단지는 3각대 위의 6기의 AREVA와 재킷 프레임 위의 6기의 Repower 5MW가 터빈 간격 약 800m로 떨어진 12기의 터빈으로 구성되어 있다.
  - Horns Rev 1은 동부 북해에 있는 덴마크의 서단 Blavands Huk에서 15km 떨어진 더 큰 해상풍력단지이다. 이 단지는 수심 6~14m에 10열로 정돈된 모노폴 위에 설치된 80기의 터빈(Vestas 80-2MW)을 가지고 있다. 인접 터빈 사이의 간격과 연속 열 사이의 거리는 560m이다.

- 본문에서 고려된 파력 풍력 결합 발전단지는 풍력단지에 설치된 전력의 몇 퍼센트를 파력 에너지 변환기(WEC: Wave Energy Converter)로 설치하였는가의 시나리오로 구성된다. 10%부터 100%까지 10%씩 증가하는 다른 퍼센트를 고려하였다. 예를 들면 Horns Rev에서 10% 결합된 단지는 160MW 풍력단지와 16MW의 파력 변환기로 구성된 반면, 100% 결합된 단지에서 설치된 파력 에너지 변환기의 수는 160MW의 설치된 파력 전력량이 될 것이다.
- 파력과 풍력에너지 자원: 2013년 1월부터 12월까지의 파력과 풍력의 측정된 데이터가 Alpha Ventus를 위해 FINO1에 의해 제공되었다. Horns Rev 1의 경우는 2012년 5월부터 2013년 4월까지 관측된 연간 데이터가 근처 부표에서 얻어 졌다.
- 전력 평탄화: 파도와 바람 사이의 상관관계는 측정된 파도와 존재하는 바람의 관점에서 예상되는 바람 사이의 상호반응을 분석하여 결정되었다. 풍력출력은 각 해상풍력단지의 전력 커브에 근거해서 계산되었다. 선택된 파도에너지 변환기는 WaveCat이고 실험실 실험결과가 사용되었다. 3%의 전력 손실이 모든 경우에 적용되었다.
- 정지 기간과 용량계수: 풍력에너지의 주요 문제점의 하나는 제로 전력생산을 갖는 긴 기간 즉, 단지의 전력 출력이 최소 수준 이상인 시간이다. 이 연구에서는 각 풍력단지의 정지 기간의 총 길이를 정량화하기 위해 고려된 총 시간에 대한 퍼센트로 계산되었고 그것을 결합된 파력과 풍력에너지 단지의 결과와 비교했다. 용량계수는 결합된 단지의 성능이 독립 시스템의 것보다 큰가를 파악하는데 사용될 수 있다.
- 경제적 관심: 위의 언급된 지표가 추정으로 금전적 조건으로 해석되었다. 평활화된 전력출력은 해상풍력이 전력망에 연결될 때 균형 비용의 감소를 나타낸다. 정지 기간의 감소와 성능계수의 증가는 더 큰 전력생산으로 높은 수익을 가져온다. WEC를 해상풍력단지에 추가하면 해양 공간 면적당 에너지 수율을 증가시킨다.

### 3. 결과

○ 파력과 풍력 자원: 이 연구 기간 동안 Alpha Ventus의 우세 풍향은 남서풍이고 이것이 또한 가장 강력한 바람방향이다. 대부분의 풍속은 5~9m/s 범위에서 변했고 평균 풍속은 9m/s에 가까웠다. Horns Ren 1의 경우는 바람방향이 큰 변동성을 보였고 가장 강력한 바람은 III과 IV 분면으로부터 불었고 속도는 4와 9m/s 사이였다. Alpha Ventus에서 파고는 1과 2m 사이 범위였다. Horns Rev의 경우는 평균 값 1.39m와 1과 3m 사이의 유의파고를 나타냈다.

○ 전력 평준화

- 연구 현장에서의 파도와 바람 사이의 상관관계에 관한 예비적 결론이 지역 바람 상태로부터 관측된 파도 파라미터들을 비교하여 얻어졌다. 보통 유의파고 면에서 상관이 침두 기간 면에서보다 더 높았다.

- Alpha Ventus에서 결합된 파력과 풍력에너지 단지들을 분석할 때에는 어떤 결합도 독자적인 시스템으로 풍력터빈을 작동하는 것에 비해서 더 연속적인 생산으로 혜택을 입는 것을 발견하였다. 최선의 결과는 60MW 풍력단지(기준 시나리오)와 30MW 공동 위치한 WEC(풍력단지에 설치된 전력의 50%)가 6%까지의 출력전력 변동성의 감소를 달성하여 혼합단지에서 얻어졌다.

- Horns Rev에서는 위와 같은 결과가 발생하지 않았다. 더구나 Horns Rev에서 결합된 단지의 계절적 변동은 거의 모든 시나리오에서 증가하였다. 이 설명은 파도와 바람이 Horns Rev.보다 Alpha Ventus에서 덜 상관되어서 변동성을 보상할 수 있는 풍력과 파력의 침두 사이에 지연을 경험하여 재생에너지 단지로부터 얻는 용량을 개선한 것이 입증되었다.

○ 정지 기간과 용량계수

- Alpha Ventus와 Horns Rev 풍력단지의 추정 전력출력 용량계수는 각각 38.95%와 35.62%였다. 시간 분포에 따르면 전력출력은 Alpha Ventus의 경우에 0과 40% 사이였고, 반면 Horns Rev에서는 뚜렷한

범위가 없었다. 설치된 전력의 약 95에서 100% 생산 시간이 두 경우에 관련이 있다.

- 그러나 시간의 상당한 부분(Horns Rev에서 20%와 Alpha Ventus에서 17%)에서 전력출력은 설치 전력의 0에서 5% 범위였다. 사실, 비작동 기간은 Horns Rev에서는 시간의 10.62%에 해당하고 Alpha Ventus에서는 9.24%에 해당했다. 이것은 Horns Rev에서 87%와 Alpha Ventus에서 76%의 비 작동 기간을 의미한다.
- 결합된 단지의 전력용량도 그들의 성능이 독립단지보다 좋은지 아닌지를 분석하기 위하여 정량화 되었다. Alpha Ventus에서 최적 조합(50% 혼합)의 경우에 이 계수는 38.95%에서 41.38%로 증가하였다. Horns Rev 1. 경우에 용량계수는 Alpha Venus보다 분석된 모든 조합에서 더 낮았다. 용량계수는 10% 혼합단지(전력 변동 면에서 최선의 결과를 결합된 단지)에서 35.62%에서 36.62%로 증가하였다.

○ 혼합단지의 경제적 평가

- 전체적인 방법에서 위 계수들을 분석하면 50% 혼합단지가 Alpha Ventus에서 최선의 선택으로 나타났다. 출력전력 변동은 6%까지 감소했고 용량계수는 6% 이상 증가했고 정지 기간은 약 76% 감소했다. 만약 이들 결과를 금전적 조건으로 표시하면 연간 5%의 추정 작동 비용 감소가 이루어질 것이다. 그러나 이 유리한 결과는 전력망 연결 비용 같은 주목할 만하게 높은 명목상의 전력을 선언하는 경제적 영향과 같은 다른 계수와 균형을 이루어야 한다.
- Horns Rev 1의 경우 전력출력 변동은 어떤 결합된 파력 풍력단지에서도 감소하지 않았다. 실제로 파력 설치된 전력의 퍼센트가 증가하면서 변동은 상승하였다. 그러나 이 증가는 30% 혼합단지까지 2%보다 낮았다. 정지 기간은 약 87% 감소하였다. 10과 30% 혼합단지 사이의 경제적 비교 연구가 최선의 시나리오를 확인하기 위하여 확립되었다. 용량계수의 증가가 전력 변동 증가보다 더 결정적이었다.
- 실제로, 작동 비용은 각각 10과 30%의 혼합단지의 경우에 연간 2.5와 3%

까지 감소된다. 그것 외에 금전 절약은 공동 인프라에 의해 달성된다. 하이브리드 파력과 풍력에너지 변환기는 차치하고, 해상발전소에서 전력망까지 송전 케이블의 공유가 가장 의미가 있는 혜택을 초래할 것이다. 투자비가 Alpha Ventus에서 12%, Horns Rev.에서 8% 각각 감소할 것이다.

#### 4. 맺음말

- 해상풍력터빈과 파도에너지 변환기의 전력생산이 공동 위치한 에너지 단지를 통해 달성될 수 있는 변동성의 감소를 정량화 할 목적으로 결합된 전력생산과 비교되었다.
- 이것이 현재 작동 중인 Alpha Ventus와 Horns Rev 1. 및 측정된 파도와 바람 데이터를 통해 조사되었다. 첫째, 파도와 바람 자원이 특정 지어졌고, 양쪽은 Horns Rev 1.의 경우가 약간 더 낮은 변동성을 가지고 1년 내내 상당한 변동을 나타냈다. 더구나 두 자원 간의 상관성이 Alpha Venus에서 1년의 중요한 부분에 걸쳐 낮았다.
- 둘째, 두 풍력단지의 출력이 검사되었고, 전력 변동성에 추가해서 풍력터빈의 저속 빈도와 시작과 멎는 풍속이 양쪽 풍력단지에서 상당한 수의 정지 시간을 야기했다. 이를 근거로, 설치된 파력전력의 다른 퍼센트를 갖는 동일 위치 단지의 전력출력이 추정되었다.
- 최선의 성능이 대부분의 Alpha Venus 구성단지에서 얻어졌다. 가장 중요한 발견은 결합된 전력출력이 더 평활했고, 개별(파도나 바람만) 전력출력보다 더 높은 가용성을 제공해서, 변동성은 6%까지, 비 작동 기간은 76%까지 감소했다. 더구나, 파력발전 추가가 하루에 더 안정한 전력출력을 허용했다.
- 그러나, Horns Rev.1의 경우에는 해상풍력과 파력에너지 사이의 상호보완성이 두 자원 간의 높은 상관성 때문에 작았다. 실제로 출력전력 변동성은 고려된 어떤 공동 위치한 단지에서 어떠한 중요한 방법으로도 감소되지 않았다. 그러나 정지 기간은 중요하게(87%) 감소했다.
- 결합된 단지의 전력 능력도 정량화 되었다. 전력 변동성(50% 혼합)에서도 최적 조합이 Alpha Venus에서 성능 계수가 약 6%인 최대 성능을 제시했다.

Horns Rev.1의 경우에는 10% 혼합단지에서 성능 계수가 3%까지 증가했다.

- 요약하면, 결합된 파력과 풍력에너지 단지가 모든 경우에 정지 기간을 감소시켜서, 결과적으로 전력망 선행 정지 시간에 공급한 전력의 급격한 감소를 방지하는데 효율적이다. 전력 변동성에 관해서, 파도와 바람 사이에 상관성이 약할수록 그들의 결합의 혜택은 더 크다. 이것은 그 결과를 금전적인 면으로 분석할 때에도 반영된다. 왜냐하면, 연간 5%까지의 추정된 작동 비용 감소가 Alpha Venus에서 발견되었기 때문이다.
- 그러므로, 전력출력에서 Horns Rev.1은 파도와 바람에너지의 결합이 두 자원이 시간적으로 중첩되지 않을 때 더 편리한 결과를 나타낸다. 이들 결과를 금전적인 용어로 해석하면 동일 위치의 단지들이 자원의 더 지속가능한 사용과 자원의 고유한 변동성으로 인한 공급 불확실성을 감소하기 위하여 비용 경쟁적인 방법으로 재생에너지로부터 전력생산을 증가하기 위한 좋은 기회를 제공한다.

출처 : S. Astariz, G. Iglesias, "Output power smoothing and reduced downtime period by combined wind and wave energy farms", *Energy*, 97, 2016, pp.69 - 81

## ◁ 전문가 제언 ▷

- 해상풍력단지의 풍속 변동은 전력시스템의 불안정한 결과와 관련된 평형비용 때문에 해상풍력에너지의 전기시장 침투를 저해할 수 있다. 본 연구는 독립형 대안에 비해 결합된 해상풍력과 파력단지의 전력 평활화와 정지시간 감소의 혜택에 집중한다.
- 이 분석은 현재 작동 중인 풍력단지와 광범위한 파도와 바람 데이터에 관련된 두 사례 연구를 통해 수행되었는데 그 결과는 다음과 같다. 첫째 87%까지의 정지시간과 6%의 전력변동성의 감소가 발견되었다. 둘째 파력과 풍력의 결합은 두 자원이 약하게 상관이 있는 위치에서만 정지 시간과 변동성 감소가 더 효율적이다. 셋째 동일 장소에 위치한 단지가 재생에너지로부터 비용 효율적인 방법으로 전력을 생산한다.
- 미국 캘리포니아 주에 있는 해상풍력과 파력에너지 단지에서 동일 장소에 위치한 풍력과 파력단지가 연간 100시간보다 적은 무전력 출력을 가진데 반해, 독립적인 해상풍력단지에서 연간 1,000시간 이상의 무전력 출력과 독립적인 파력단지에서 연간 200시간의 무전력 출력을 가졌다.
- 동일 장소에 위치한 풍력터빈과 파력에너지 변환기가 2013년에 북해 Alpha Ventus 해상풍력단지의 운영과 보수(O&M)를 위한 터빈에 접근성을 67.53%에서 82%로 독립적인 해상풍력터빈 단지보다 15%나 증가시켰다.
- 우리나라에 해상풍력 단지를 조성할 때 동일 장소에 파력에너지 단지를 동시에 조성하고 풍력과 파력 자원이 약하게 상관이 있는 위치를 선택하여 발전 정지 시간 즉, 무전력 출력 시간을 감소하고, 전력출력 변동성을 감소하며, 송전 케이블 공유와 O&M 인프라를 공유하여 투자비를 줄이는 것이 해상풍력의 경쟁력을 향상시킬 것이다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.