

풍력단지의 최적화 운영방법

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

1. 개요

- 이 발명은 다수의 풍력터빈이 있는 풍력단지의 운영에 관련된다. 특히 상류 풍력터빈과 하류 풍력터빈을 포함하고 있는 풍력단지의 운영 방법에 대한 내용이다.
- 이 발명의 목적은 예측된 바람의 조건을 고려하여 풍력단지의 운영방법을 개선하고자 하는 것이며, 독립적인 특허 청구범위에 따라 선호하는 실시방법이 달라진다. 이 발명에서 변수를 변경하기 위한 비용과 노력을 적절히 감안하면, 순수한 후류효과의 최소화 관점에서 예측된 바람 조건 하에서 에너지 생성을 증가시킬 수 있다.

2. 기술현황

- 풍력터빈은 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 장치이다. 풍력단지에서 자유 유동 풍속을 전면에 맞이하는 첫 번째 줄에 설치된 풍력터빈은 바람이 가진 최대 에너지를 추출할 수 있다. 그러나 뒤쪽에 설치된 풍력터빈은 앞쪽 풍력터빈의 로터 블레이드 회전운동에 기인하여 발생하는 난류 조건 또는 낮은 풍속을 맞이하게 된다. 이 현상을 후류효과(wake effect)라고 한다.
- 후류효과의 영향을 살펴보면 첫째, 풍력터빈의 발전량은 풍속의 세제곱에 비례하기 때문에 뒤쪽 터빈에 의해 생성되는 전기에너지만큼 감소하고 둘째, 후류에 의한 난류가 부품의 마모를 증대시키기 때문에 뒤쪽 풍력터빈의 수명은 그만큼 감소하게 된다.
- 풍력단지에서 후류효과의 영향을 최소화하기 위해 그 단지의 풍향과 풍속에 관한 통계적 데이터를 근거로 하여 후류 상호작용을 감소시킬

수 있는 풍력터빈의 레이아웃을 결정한다. 그러나 수시로 변하는 풍속과 풍향에 따라 후류의 영향도가 달라지기 때문에 후류 영향을 실시간으로 감소하는 것은 대단히 어렵거나 거의 불가능하다.

- 기존 풍력단지에는 각 풍력터빈의 개별제어에 기반을 두고 운영한다. 즉 풍력단지 제어장치는 전력망에 접속되는 연결점에서의 전기 수요를 충족하기 위해 각 풍력터빈의 능동적 및 반응적 발전에 관해 설정된 값을 변화하는 역할을 수행한다. 즉 개별 제어는 후류 상호작용 때문에 단지 전체의 에너지를 극대화하는 관점에서 효율적이지 못하다.
- 풍력터빈의 개별제어는 피치(pitch)제어, 요(yaw)제어 및 토크(torque)제어를 포함한 세 가지 형태의 액추에이터 또는 터빈 운전변수에 기반을 둔다. 액추에이터의 설정에 따라 추출할 수 있는 에너지의 양이 달라지고, 이 설정값은 후류에 직접적 영향을 주어 발전량이 변하므로 협조적 거동을 통해 풍력단지의 총체적 발전량을 증대시킬 수 있다.
- 후류 상호작용을 최소화 하여 풍력단지의 운영성능을 향상시키는 방법에는 여러 가지가 있다. 예로 앞쪽 터빈에서 추출하는 에너지양을 조절하여 뒤쪽 터빈에서 풍력에너지를 획득할 수 있게 만들어 준다. 액추에이터 또는 변수의 제어에 블레이드 피치 및 발전기 토크의 제어, 요 정렬 제어와 같은 축 방향 유도 인자를 포함시킨다.
- 현재 대부분의 가변속도 수평축 풍력터빈에서는 일반적으로 피치 및 토크제어를 사용한다. 상류 풍력터빈의 요 동작은 뒤쪽 풍력터빈이 앞쪽 풍력터빈의 후류 영향권에 부분적으로 노출되거나 또는 전혀 영향을 받지 않도록 해준다. 결과적으로 뒤쪽 풍력터빈이 더 많은 에너지를 발생하여 단지 전체의 에너지 생성을 증가시킬 수 있다.
- 단지 내 여러 대의 풍력 터빈으로부터 데이터를 획득하는 중앙제어장치를 포함한 풍력단지 운영방법이 특허 EP1790851 A2에 제시되어 있다. 중앙 제어장치가 획득하는 데이터에는 각 풍력터빈의 풍속과 풍향을 포함하고 이 데이터는 뒤쪽 풍력터빈에 미치는 부하 영향을 예측하고 제어를 위한 의사결정을 도와주는 데 사용된다.

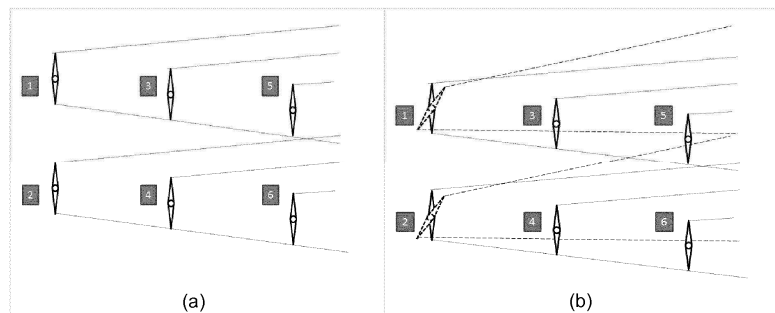
3. 발명의 내용

- 이 발명에 의한 풍력단지에서 상류 풍력터빈은 현재 바람 조건하에서 상류 운전 변수 값에 따라 운전한다. 운전 변수는 상류 터빈의 풍향과 로터 축 사이의 정렬을 나타내는 요 각도, 풍향과 로터 블레이드 방향 사이의 정렬을 나타내는 피치 각도, 발전기 토크 또는 로터 속도, 풍속과 풍향과 같은 바람의 조건을 포함한다.
- 풍력단지는 다음과 같은 단계를 거쳐 운전된다. 첫째, 각 시간 간격에 대하여 상류 및 하류 풍력터빈에서 예측된 바람의 조건을 획득한다. 둘째, 각 시간 간격 순서에 따라 상류 운전 변수의 순서를 결정하게 되는데 이 시간 간격은 예측한 바람 조건하에서 하류 풍력터빈에 의한 후류효과를 최소화할 수 있다.
- 셋째, 현재의 운전 변수 값으로부터 제일 앞쪽의 운전 변수 값까지의 변화량을 나타내는 변수 변환 비용을 예측한다. 변수 변환 비용은 피로 영향을 포함한 구동 모터 또는 터빈의 움직이는 부분과 같은 부품의 마모 그리고 관성, 마찰 및 자이로에 기인하여 생성되는 기계적 부하 모멘트에 의한 요 베어링의 마모를 포함한다.
- 넷째, 상류 터빈이 예측하는 바람 조건하에서 운전될 경우 예측하는 시간 동안에 걸친 풍력단지의 생산성 또는 출력을 예측한다. 생산성은 발생된 전기에너지의 총량 또는 그에 상응하는 수입액을 포함한다. 다섯째, 고려하고 있는 상류 운전 변수 순서에 따른 풍력단지의 생산성과 현재 상류 운전 변수 값과의 차이와 같은 풍력단지 생산성에 기반을 둔 이득을 계산한다.
- 발명의 주요 구성
 - 이 발명에 의한 풍력단지의 효율적 실시 예를 그림 1에 보였다. 그림 1에는 풍력단지에 발생하는 후류 현상을 도식적으로 나타내었고, (a)는 요 작동을 하기 전의 모습이고 (b)는 요 작동한 후의 모습이다. (b)에서 터빈 1과 2를 요 작동하여 터빈 1과 2에서 생성되는 에너지를 감소하고, 그 대신 터빈 3~6에서 생성되는 에너지양을 증가시키

고 있다.

- 그림 1에 제시한 풍력단지 배치에서 요 작동을 한 후에 전력량의 발생이 증가하였다. 즉 터빈 1과 2에서 요 작동을 시켜 에너지 생성을 감소시키고, 뒤쪽에 위치한 풍력터빈에서는 후류 그림자 영역을 줄일 수 있어 그 만큼 에너지 생성을 증가시킬 수 있다.

<그림 1> 풍력단지의 효율적 운영 방법



○ 발명의 기술적 특징

- 이 발명에 의한 실시 방법은 상류 풍력터빈에서 터빈 로터가 바람 방향과 일치되게 정렬되지 않아 발생하는 피로하중의 증가를 고려하는 것이다. 이 방법은 먼저 현재의 상류 운전 변수 값이 아니고 오히려 고려하고 있는 상류 운전 변수 순서에 따라 운전될 경우 상류 풍력터빈의 피로 영향을 예측한다.
- 피로영향은 터빈의 수명주기 동안 발생한 에너지의 감소 또는 그에 상응하는 수입금액의 감소를 포함하는데 이는 과거의 경험 데이터로부터 예측한다. 피로영향은 터빈이나 회전 부품의 정비 또는 조기 교체 비용으로 표시한다. 상류 터빈의 운전은 생산성 이득, 변수변환 비용 및 피로영향을 포함한 예측 균형에 기반을 둔다. 특히 피로영향은 생산성 이득에 부가하여 변화비용으로부터 추출한다.
- 이 발명에 의한 실시 예에서 예측기간은 상류 운전 변수 값을 변화하기 위한 액추에이터 운전기간을 크게 초과하는 시간을 의미한다. 요 각도 변화율이 초당 1도 이하일 경우 예측기간은 10초 이상, 즉 1분 또는 20분 정도가 되고 시간간격은 1~5분이 된다. 바람조건에 따른

시간간격과 예측기간에 걸쳐 후류효과, 변수변환 비용, 생산성 이득 및 피로영향을 평가하고, 통합하고, 평균을 계산한다.

- 이 발명을 확장하면 풍속과 풍향의 예측을 사용하여 피치, 토크 및 요 각도를 조절함으로써 풍력단지의 목표를 실현할 수 있는 적절한 방법을 선택할 수 있다. 또한 요 각도 변화 비용/시간과 에너지 획득 효과 사이의 상대변화를 고려하고, 단시간(수초에서 1분) 및 중간 시간(수분에서 한 시간) 예측을 통합하여 요 각도의 변화를 결정할 수 있다.

4. 효과 및 응용

- 이 발명은 풍력단지를 제어하는 기존의 방법을 여러 가지 형식으로 바꾸어 준다. 기존 방법은 대부분 현재의 운전 상태를 조절하는 데 집중하는 데 반해 이 발명은 가까운 미래까지 확장하여 제안한다. 이는 수초~수분 후 또는 수 시간 후의 의사결정을 위한 제어를 포함한다.
- 이 발명에 의한 후류모델과 바람의 예측을 사용하면, 요 각도를 변경할 필요가 있는지, 변경한다면 어느 정도 변경할 것인가를 결정할 수 있다. 구동 모터의 마모에 근거한 개별 풍력터빈의 요 각도 변경비용을 계산할 수 있고, 풍력터빈의 피로 감소와 전력생산의 증가에 따른 이익의 증가를 비교할 수 있다. 동시에 뒤쪽 터빈에서 후류와 가용한 전력 생산을 분석하여 후류의 영향구역을 최적화하여 피로를 최소화하고 전력생산 능력을 증대시킬 수 있다.
- 이 발명에 의한 풍력단지의 효율적 운영방법은 본문에 제시한 구도에 따른 실시 예에 국한하지 않고 동일한 목적으로 단순한 확장 개념을 활용하여 다양한 범위로 확장 적용할 수 있다. 따라서 본 특허에 주장한 권리 범위는 첨부한 실시 예에 국한하지 않고 기본개념과 확장성에 따라 여러 가지 풍력단지의 효율적 운영에 폭넓게 응용할 수 있다.

출처 : ABB TECHNOLOGY AG, "OPTIMAL WIND FARM OPERATION", WO 2016/102154 A1

◁ 전문가 제언 ▷

- 풍력터빈의 후류로 인한 평균 전력손실은 총 출력의 10~20% 정도이므로 후류로 인한 전력손실을 최소화 하는 터빈 배치는 전체 풍력단지 경제의 중요한 요소이다. 후류효과의 영향에 의해 하류 터빈에서 생성되는 전기에너지만큼 감소하고, 후류에 의한 난류가 부품의 마모를 증대시켜 후류 풍력터빈의 수명은 그만큼 감소하게 된다.
- 이 발명은 상류 및 하류 풍력터빈으로 구성된 풍력단지의 운영방법에 관한 내용이다. 이 운전방법은 먼저 풍력단지에 관한 일정한 기간 동안의 미래 바람조건을 수집하고, 하류터빈의 후류효과를 최소화하는 데 필요한 운전변수를 평가하고, 운전변수를 소요되는 수준까지 변화하기 위한 비용계수를 결정하고, 설정된 기간 동안에 전력 생산량을 계산한다.
- 현재 바람조건 하에서 현재 운전변수에 의해 운전될 경우와 미래 바람조건 하에서 필요한 운전변수에 의해 운전될 경우의 두 가지 경우에 대해 전력생산량을 계산한다. 비용계수가 전력 생산증가에 기인한 비용보다 낮을 경우에는 필요 운전 변수에 의해 상류 터빈을 운전한다.
- 전북대 박근성 등은 제주도 성산풍력발전단지의 후류 손실 및 터빈 재배치에 관한 연구에서 후방에 위치한 터빈 간격을 8D 이상으로 설치하면 후류영향을 줄일 수 있음을 확인하였다. 한국에너지연구원 김도형 등은 50MW 해상풍력단지의 설계 시 후류에 의한 발전량의 영향과 단지 배치에 따른 경제적 비용을 도출하여 경제성 분석을 실시하였다.
- 후류가 풍력단지에 미치는 영향은 터빈 사이의 간격, 풍향, 풍속의 분포 등 바람의 성질에 의존한다. 바람조건은 수정할 수 없지만, 풍력단지 레이아웃은 후류효과 감소를 목적으로 수정하여 풍력단지 성능을 최적화할 수 있다. 우리나라는 육상보다 해상풍력 자원이 풍부하다. 후류효과와 계절에 따른 바람 조건을 고려하여 풍력터빈의 최적화 배열을 통해 해저 케이블 공사비를 고려한 경제성을 확보하고 후류 간섭영향을 줄여 풍력단지를 효율적으로 운영하여야 한다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.