

풍력발전단지 제어기술 검증을 위한 가상풍력발전단지 시스템 설계

송민석, 임정택, 함경선, 김태형

한국전자기술연구원

mssong@keti.re.kr, jtlim@keti.re.kr, ksham@keti.re.kr, thkim@keti.re.kr

Design of Virtual Wind Farm System to Verify Wind Farm Control Technology

Minseok Song, Jeongtaek Lim, Kyung Sun Ham, Taehyoung Kim

Korea Electronic Technology Institute

요약

풍력발전단지의 계통 안정성 및 발전 효율성 향상을 위한 다양한 제어 기술을 개발하고 사전 검증 없이, 실제 단지에 적용하는 것은 비용과 안전 관련 문제로 어렵다. 본 논문에서는 풍력 발전 특성을 고려하여 개발한 다양한 제어 기술을 적용하여 사전 검증이 가능한 가상풍력발전단지 시스템을 제안한다. 가상풍력발전단지 시스템은 풍속과 풍향을 포함한 바람 정보와 제어 기술 기반의 터빈 별 출력 지령 값을 입력으로, 터빈 및 후류 모델을 사용하여 풍력 발전 단지를 실시간으로 모의한다. 터빈 및 후류 모델 구성을 변경하며 수행한 시뮬레이션 결과와 실제 풍력발전단지의 출력을 비교하는 과정을 반복하여 얻은 최적의 가상풍력발전단지 구성을 대상으로 다양한 제어 기술을 적용하고 검증을 통해 해당 기술의 성능 파악 및 사전 검증이 가능하다.

I. 서론

바람 에너지는 재생 가능 에너지의 주요 원천으로 부상하여 전 세계전력 생산에 크게 기여하고 있다. 그러나 예측이 어려운 바람의 특성으로 인해, 효율적인 전력 생산과 전력망 안정성을 위한 풍력발전단지 제어 기술의 필요성이 대두되고 있다. 또한, 제어 기술에 대한 사전 검증을 거치지 않고 실제 풍력발전단지에 적용하는 것은 비용과 안전 관련 문제로 어렵다. 이러한 문제는 실제 단지와 유사하게 동작하는 가상풍력발전단지 시스템에 개발한 제어 기술을 적용함으로써 사전 검증이 가능하다. 본 논문에서는 풍력 발전 특성을 고려한 다양한 제어 기술을 적용할 수 있는 가상풍력발전단지 시스템을 제안한다.

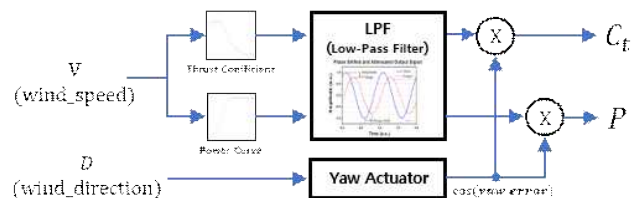
본 논문에서 제안한 시스템은 풍속과 풍향을 포함한 바람 정보와 제어 기술 기반의 터빈 별 출력 지령 값을 입력으로 받고 터빈 및 후류 모델을 사용하여 풍력 발전 단지를 실시간으로 모의한다. 시뮬레이션에서 바람에 대한 터빈의 출력과 터빈 간 상호작용을 구현하기 위해 구현된 다양한 터빈 및 후류 모델을 선택할 수 있어, 유연하게 구성된 가상풍력발전단지에 실제 풍력발전단지에서 측정된 바람 정보를 입력으로 시뮬레이션을 수행하고 결과를 비교함으로써 해당 단지에 최적화된 모델을 선택할 수 있다. 최종적으로, 실제 풍력발전단지에 최적화된 가상풍력발전단지에 계통 안정성 및 발전 효율성 향상을 위한 다양한 제어 기술을 적용한 결과와 실제 출력을 비교하여 해당 기술에 대한 사전 검증이 가능하다.

II. 본론

가상풍력발전단지 시스템은 다양한 풍력 발전소 레이아웃과 작동 조건을 시뮬레이션하기 위해 터빈 및 후류 모델을 유연하게 구성할 수 있는 모듈식 아키텍처로 구성된다. 시스템에 사용되는 터빈 및 후류 모델은 물리적 특성을 반영할 수 있도록 수학적 및 데이터 기반 모델링 등의 다양한 방식으로 구현된다.

터빈 모델

터빈 모델은 발전량과 후류 계산을 위해, 풍속 및 풍향을 입력 받아 발전량과 추력 계수를 출력하도록 설계한다. 시뮬레이션에는 수학적 모델과 데이터 기반 모델, 그리고 두 가지 모델링 방식을 결합하여 구현된 하이브리드 모델이 사용된다. **수학적 모델**은 시스템의 범용성을 확보하기 위해서 일반적으로 공개된 터빈 별 정보 중, 출력 및 추력 곡선을 활용하여 설계된다. 또한, 로터 관성으로 인해 풍속에 대한 출력 및 추력 곡선의 값에 도달하기까지 시간이 지연되는 물리적 특성을 반영하기 위해 저역 통과 필터(LPF, Low-Pass Filter)를 활용한다. **데이터 기반 모델**은 실제 풍력발전단지에서 수집된 운영 데이터에 대해 선형 회귀와 SVR, Random Forest 등의 다양한 알고리즘을 활용하여 구현된다. **하이브리드 모델**은 수학적 모델과 데이터 기반 모델의 출력 값을 집계하여 최종 결과 값을 출력하는 방식 또는 수학적 모델의 LPF에서 지연 효과를 나타내는 계수를 머신러닝 알고리즘으로 학습을 하는 방식 등의 여러 앙상블 기법을 사용하여 구현 될 수 있다.



<터빈의 수학적 모델>

후류 모델

후류 모델은 상류에 위치한 터빈 기준으로 후류의 영역과 해당 영역 내에서 풍속의 손실 정도를 계산하기 위해 사용된다. 상류 터빈이 받게 되는 추력 계수와 하류 터빈과의 거리 등을 입력으로 받아, 후류 영역 내에서 거리 별 풍속의 손실 정도를 계산하도록 설계한다. 시뮬레이션에서 Jensen[1][2] 모델과 Larsen[3], eddy viscosity[4] 모델 등의 수학적 모델을 선택할 수 있다. Jensen 모델은 효율성과 강건성, 단순함의 특징으로 가장 오래되고

유명한 모델 중 하나이다. 해당 모델은 상류 터빈과 X 만큼 떨어진 하류 터빈 간의 후류가 k의 비율로 확장된다는 가정 하에, 후류의 지름을 (1)과 같이 구할 수 있다. 또한, 자유류의 풍속이 u일 때의 후류의 풍속을 (2)로, 축방향 유도 계수에 해당하는 a를 (3)으로 얻을 수 있다.

$$D_w = D + 2kX \quad (1)$$

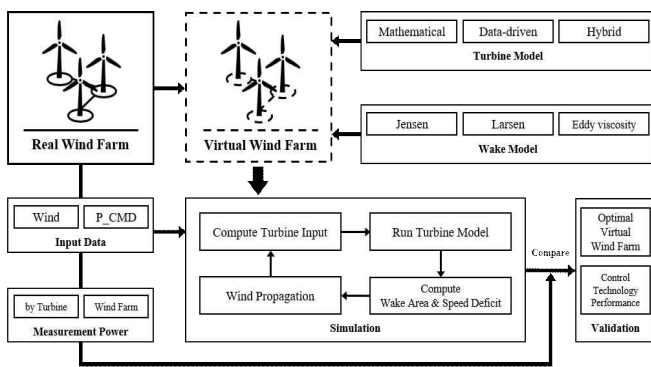
$$\frac{u_w}{u} = 1 - \frac{2a}{(1 + 2kX/D)^2} \quad (2)$$

$$a = \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{2} \quad (3)$$

후류 모델로부터 계산된 후류 영역과 속도 손실을 활용하여, 가상풍력발전단지 내에 존재하는 터빈 모델 간의 상호작용을 고려한 최종 출력을 얻을 수 있다.

가상풍력발전단지 시스템

본 논문에서 제안하는 시스템은 가상풍력발전단지 구성과 시뮬레이션, 검증의 세 가지 단계로 구성된다. 먼저, 제어 기술을 적용하고 싶은 실제 발전단지와 동일한 레이아웃 내에서 다양한 터빈 및 후류 모델로 가상풍력발전단지를 구성한다. 다음으로, 구성된 가상풍력 단지를 대상으로 실제 풍력발전단지의 실측 데이터를 입력으로 하여 시뮬레이션을 수행한다. 터빈 별 입력 풍속을 계산하고 모델에 전달하여 발전량 및 추력 계수를 추출하고, 후류 모델을 활용하여 터빈 간 거리와 추력 계수 등을 기반으로 풍속 손실 계수와 해당 손실이 하류에 위치한 터빈에 도달하기까지의 시간을 계산한다. 시뮬레이션은 사용자가 정의한 시간 해상도를 기준으로 한 스텝씩 진행되어, 손실 계수가 하류에 위치한 터빈까지 전달되는 바람 전파를 모의할 수 있다. 검증 단계에서는 다양한 터빈 및 하류 모델을 변경하며 구성된 가상풍력발전단지의 시뮬레이션 결과와 실제 풍력발전단지의 출력 결과를 비교하는 과정을 반복하며 해당 단지에 최적화된 가상풍력발전단지 모델 구성을 얻을 수 있다.



<가상풍력발전단지 시스템 구조>

마지막으로 실제 풍력발전단지에 최적화된 가상풍력발전단지를 대상으로 검증이 필요한 제어 기술 기반의 터빈 별 출력 지령 값을 입력으로 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션 결과와 실제 풍력발전단지의 전체 출력 값을 MAPE(Mean Absolute Percentage Error) 지표로 나타내어 해당 기술에 대한 성능을 검증할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 풍력발전단지의 계통 안정성 및 발전 효율성 향상을 위해

개발한 제어 기술을 사전 검증할 수 있는 가상풍력발전 시스템을 제안한다. 제안한 시스템은 풍속과 풍향을 포함한 바람 정보와 제어 기술 기반의 터빈 별 출력 지령 값을 입력으로 받아, 터빈 및 후류 모델을 활용하여 터빈 간 상호작용 및 바람의 전파를 모의한다. 다양한 방법론으로 구현된 모델로 유연하게 구성된 가상풍력발전단지의 시뮬레이션 결과와 실제 풍력발전단지로부터 측정된 값을 비교하며 최적의 구성을 얻을 수 있다. 최적화된 가상풍력발전단지 구성을 대상으로 개발한 제어 기술을 적용하고, 시뮬레이션 수행 및 실제 풍력발전단지의 전체 출력 값과의 비교를 통해 해당 기술에 대한 사전 검증이 가능하다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 한국동서발전(EWP)의 지원을 받아 수행된 연구임 (가상풍력발전단지 기반 풍력 제어기술 개발 및 검증시스템)

참고 문헌

- [1] N.O. Jensen, "A note on wind generator interaction", 1983.
- [2] Katic I, Højstrup J, Jensen N. A simple model for cluster efficiency. In: European wind energy association conference and exhibition; 1986. p. 407–10.
- [3] Gunner C. Larsen, "A simple wake calculation procedure", 1988.
- [4] F, Ainslie J, "Development of an eddy viscosity model for wind turbine wakes", in Proceedings of 7th BWEA Wind Energy Conference, Oxford, 1985.