

Low-Pass Filter를 활용한 풍력터빈의 범용 물리모델 개발

홍석재, 송민석, 김민호, 임정택, 함경선, 김태형

한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터

sjhong@keti.re.kr, mssong@keti.re.kr, idencare@gmail.com, jtlim@keti.re.kr, ksham@keti.re.kr, thkim@keti.re.kr

Development of a general-purpose physical model for wind turbine using Low-Pass Filter

Seokjae Hong, Minseok Song, Minho Kim, Jeongtaek Lim, Kyung Sun Ham, Taehyoung Kim

Korea Electronics Technology Institute, EnergyIT Convergence Research Center

요약

풍력발전은 지속가능한 에너지원으로서 급속한 발전을 이루고 있으며, 이는 기후 변화 대응과 에너지 안정성 확보에 크게 기여하고 있다. 특히, 풍력터빈은 이러한 풍력발전 방식의 핵심 요소로서 기술적인 발전이 요구되고 있다. 풍력터빈의 운영 시뮬레이션을 위해서 가장 중요한 요소는 풍력터빈에 대한 모델링 기술이며, 모델링의 높은 정확도 확보를 위해서는 풍력터빈 설계에 활용되는 GH Bladed와 같은 터빈의 설계정보에 대한 데이터가 필요하다. 그러나 이러한 데이터는 제작자의 소유권 문제와 데이터 확보의 어려움이 있어, 이를 극복 할 수 있는 대안적인 방법이 요구되고 있다. 본 연구는 풍력터빈의 공개된 정보인 출력 곡선(Power Curve)과 추력계수(Thrust Coefficient)를 활용하여 범용성을 확보한 풍력터빈모델을 개발하였다. 풍력터빈의 로터 관성으로 인해 풍속의 지연 현상에 의한 물리적 특성을 반영하기 위해 저역통과필터(LPF, Low Pass Filter)를 활용하여 기본 LPF 터빈모델을 구현하였으며, 정확도는 86.33%로 나타났다.

I. 서론

풍력발전은 지속할 수 있는 에너지원으로서 급속한 발전을 이루고 있으며, 이는 기후 변화 대응과 에너지 안정성 확보에 크게 기여하고 있다[1]. 특히, 풍력터빈은 이러한 풍력발전 방식의 핵심 요소로서 기술적인 발전이 요구되고 있다. 풍력터빈의 운영 시뮬레이션을 위해서 가장 중요한 요소는 풍력터빈에 대한 모델링 기술이며, 모델링의 높은 정확도 확보를 위해서는 풍력터빈 설계에 활용되는 풍력터빈에 대한 방대한 데이터가 필요하다. 그러나 제작자의 소유권 문제와 데이터 확보의 어려움이 있어, 이를 극복 할 수 있는 대안적인 방법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 풍력터빈의 공개된 정보인 출력 곡선(Power Curve)과 추력계수(C_t , Thrust Coefficient)를 활용하여 GH Bladed와 같은 설계정보 없이도 풍력터빈의 물리적 특성을 모델링하는 방법을 제안한다. 특히, 로터 관성으로 인한 풍속의 지연 현상에 주목하여 이를 반영하기 위해 저역 통과필터(LPF, Low Pass Filter)를 도입하여 범용성을 확보한 풍력터빈 모델을 개발을 개발하고, 이를 최적화하여 기존 모델보다 경량화되면서도 높은 정확도를 갖는 터빈 모델을 개발하는 것을 목표로 한다.

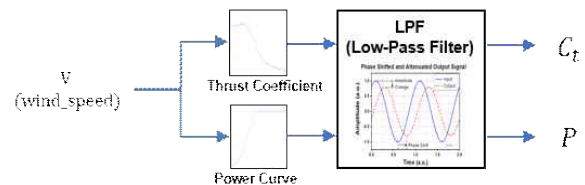
II. 본론

풍력터빈의 출력은 풍속, 풍향, 로터 회전 속도 등의 요인에 따라 영향을 받는다. 따라서 풍력터빈의 출력을 정확하게 예측하기 위해서는 이러한 요인들을 고려한 모델링이 필요하다. 본 연구에서는 일반적으로 공개된 터빈의 정보 중 터빈의 스펙 정보, 출력 및 추력 곡선을 활용하였으며, 개발된 모델의 정확도 검증에 위해 경주 제2 풍력단지 1년 치 운영데이터

를 확보하여 데이터에 대한 검증을 수행하였다. 풍력터빈의 출력 곡선(Power Curve)은 풍속과 풍력터빈이 생산하는 발전량 사이의 이론적인 관계를 나타내는데, 이론적인 풍력 발전량 P_w 는 공기밀도(ρ), 터빈의 rotor 면적 (A), 그리고 풍속(v)에 대해 식(1)과 같이 표현할 수 있다[2].

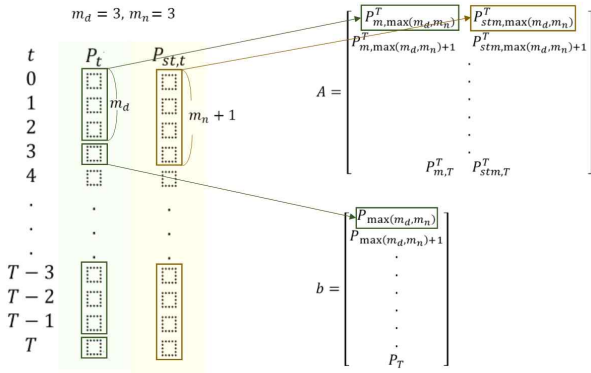
$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad \text{식(1)}$$

출력 곡선에서 도출되는 발전량은 풍속에 따른 이론적인 예측발전량으로, 풍속에 의한 지연 효과가 반영되어 있지 않다. 따라서 로터 관성으로 인해 풍속에 대한 출력 및 추력 곡선의 값에 도달하기까지 시간이 소요되는 물리적 특성을 반영하기 위해 저역 통과 필터(LPF, Low-Pass Filter)를 활용하였다. LPF는 이전 데이터를 메모리에 저장하여 현재 결과 값을 산출하는 데 활용되며, 이를 활용하여 풍속의 물리적 지연 특성을 모델에 통합하였다. 범용터빈 모델은 LPF와 최적화된 계수 Θ 를 사용하여 풍력터빈의 발전량을 예측하고, 각 타임 스텝에서 풍속 데이터를 입력으로 받아 발전량을 예측한다.



< LPF를 활용한 기본 터빈 모델 구조 >

m_n , m_d 는 LPF의 복잡도를 나타내는 상수로써, 해당 상수는 최적화 과정 후, 터빈 모델의 출력과 실측 데이터 비교를 통한 검증과정을 거치며 최적의 값을 추출하는 방식으로 활용한다.

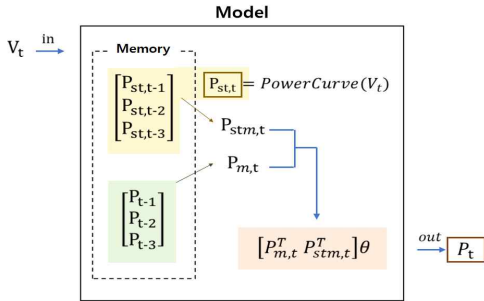


< LPF의 최적화 계수 산출 방식 >

m_n, m_d 를 기반으로 P_t 와 P_{st} 의 일부분을 반복적으로 추출하며 구성된 행렬 A와 b를 기반으로 식(2)와 같은 연산을 통해 계수 θ 를 산출한다.

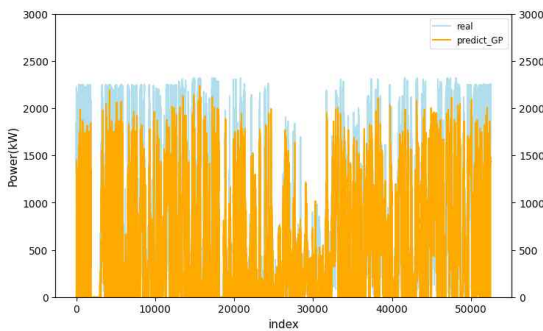
$$\theta = (A^T A)^{-1} A^T b \quad \text{식 (2)}$$

특정 시간의 발전량을 산출하기 위해 $(m_n + 1)$ 개의 P_{st} 배열과 출력 곡선을 통해 산출한 t 시점의 풍속을 정상상태의 발전량 $P_{st,t}$ 를 기반으로 $P_{stm,t}$ 를 산출하고, m_d 개의 P_t 를 기반으로 산출한 실제 발전량 데이터 $P_{m,t}$ 와 함께 하나의 행렬을 구성하여 θ 를 곱해주어 발전량을 산출한다.



< LPF의 발전량 산출 방식 >

구성된 모델에 대한 검증은 경주 제2 풍력 발전단지에서 1년 동안 수집된 풍속 및 실측 발전량 데이터로 검증 수행되었으며, 발전량 예측 평균 정확도 86.33%로 나타났다.



< 모델 검증 결과 시각화 >

III. 결론

본 연구에서는 GH Bladed와 같은 풍력터빈 설계 정보 없이도 풍력터빈의 물리적 특성을 모델링하기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 풍력터빈의 공개된 정보 중 출력 곡선과 추력계수를 활용하여 범용성을 확보한 풍력터빈 모델을 개발하였으며, 이를 통해 터빈의 물리적 특성을 정확하게

반영하였다. 특히, 로터 관성으로 인한 풍속의 지연 현상을 고려하여 저역 통과필터(LPF)를 도입하여 기본 터빈 모델을 구현하였다. 이로써 발전량 예측 모델이 풍속 변화에 대해 실제 풍력터빈의 물리적 특성을 높은 정확도로 반영할 수 있었다. 최적화된 LPF 계수를 산출하는 과정에서는 경주 제2 풍력 발전단지의 1년 동안 수집된 운영데이터를 활용하여 모델의 정확도를 검증하였다. 결과적으로, 발전량 예측 평균 정확도는 86.33%로 나타났다. 이는 GH Bladed와 같은 설계정보를 사용하는 기존 모델에 비해 경량화되면서도 뛰어난 예측 능력을 갖는 새로운 풍력터빈 모델을 제시함을 의미한다. 따라서, 본 연구에서 제안된 풍력터빈 모델은 설계 정보의 부재로 인한 어려움을 극복하면서도 높은 정확도를 갖추어 풍력발전 산업의 지속적인 성장과 에너지 안정성에 기여할 것으로 기대된다.

본 연구에서 제안된 범용 풍력터빈 모델은 과거의 데이터를 기반으로 LPF의 최적화 계수를 선정하여 모델을 개발하였다. 그러나 이러한 방식은 과거 값에 의존하고 있어서, 오차가 누적되는 가능성이 있다. 따라서 추후 연구에서는 모델의 정확도를 향상하기 위해 운영데이터를 기반으로 한 최적화 과정을 도입할 필요가 있다. 구체적으로, 풍력터빈의 운영데이터를 실시간으로 수집하고 이를 활용하여 LPF의 최적화 계수인 θ 를 조정하는 방식을 도입함으로써 모델의 정확도를 높일 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 추후 연구에서는 다양한 풍속 조건 및 환경 변수에 대한 모델의 성능을 더욱 확장해 나갈 필요가 있다. 다양한 운영 환경에서의 테스트를 통해 모델의 범용성을 높일 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참고 문헌

- [1] Kumar, Yogesh, et al. "Wind energy: Trends and enabling technologies." Renewable and Sustainable Energy Reviews 53 : 209-224, 2016.
- [2] Haque, Md Emdadul, Md Nasmus Sakib Khan, and Md Rafiqul Islam Sheikh. "Smoothing control of wind farm output fluctuations by proposed low pass filter, and moving averages." 2015 international conference on electrical & electronic engineering (ICEEE). IEEE, 2015.