

물리 기반 풍력 터빈 모델을 활용한 그리드포밍 실시간 MPC 연동 구조 설계

김민수, 김민호, 임정택, 함경선, 김태형

한국전자기술연구원

rlaalstn2909@keti.re.kr, minhokim@keti.re.kr, jthlim@keti.re.kr, ksham@keti.re.kr, thkim@keti.re.kr

Design of Grid-Forming Real-time MPC Interworking Structure Using Physics-Based Wind Turbine Model

Minsu Kim, Minho Kim, Jeongtaek Lim, Kyung Sun Ham, Taehyoung Kim

Korea Electronics Technology Institute, Republic of Korea

요약

분산에너지의 비중이 높아짐에 따라 계통의 안정성을 확보하는 그리드포밍 기술이 대두되고 있다. 그리드포밍 인버터는 1초 이내로 가상관성을 제공하여 주파수 하락에 대응함으로써, 기존 그리드포밍 인버터 대비 안정적인 재생에너지 발전자원의 계통 연계가 가능하다. 이를 위해 MPC 제어기는 계통 주파수 변화를 실시간으로 감지하고, 계통에 가상 관성을 제공하기 위한 예비력을 수초 이내의 시간 해상도로 산정하고 반응할 수 있어야 한다. 이 과정에서, 발전량 예측 모델을 실시간으로 연동함으로써 MPC 제어기는 향후 확보 가능한 예비력을 사전에 산출할 수 있다. 본 논문에서는 데이터 기반 모델 대신 IEC 61400-27-1 표준에 근거한 물리 기반 Generic 모델을 활용하여 실시간 MPC 연동이 가능한 구조를 제안한다. 물리 기반 모델은 데이터 기반 모델과 달리 학습 과정 없이 풍력 발전기의 동역학적 특성을 반영할 수 있으며, 표준화된 파라미터 구성을 통해 다양한 환경에 적용이 용이하다. 제안된 구조는 물리 기반 모델의 파라미터 최적화를 통해 실행시간을 보장하고, 복합환경 시뮬레이션을 통해 모델의 예측 정확도와 실시간성을 검증한다.

I. 서론

분산 에너지 자원의 전력 시스템 내 비중이 빠르게 증가함에 따라, 전통적인 발전원 감소로 인한 계통 안정성 유지 문제가 대두되고 있다. 특히, 태양광 및 풍력 발전과 같은 인버터 기반의 재생에너지 발전원은 물리적 관성을 제공하지 않아 주파수 변동에 취약하며, 이는 계통 운영에 있어 새로운 도전 과제를 제시한다. 이러한 배경 속에서 주파수 변동에 능동적으로 반응하고, 관성을 제공함으로써 전력망의 안정성을 높이는 그리드포밍 기술이 주목받고 있다.

그리드포밍 인버터는 짧은 시간 내에 가상 관성을 제공하여 갑작스러운 부하 변동이나 발전 손실 발생 시 발생하는 주파수 하락에 효과적으로 대응할 수 있다. 이러한 빠른 응답을 위해서는 제어 시스템이 수초 이내의 짧은 시간 해상도로 시스템의 상태를 예측하고 필요한 예비력을 정확하게 산정하는 것이 필수적이다. MPC(Model Predictive Control)는 시스템의 동적 모델을 기반으로 미래 상태를 예측하고 최적의 제어 입력을 계산하는 제어 기법으로, 그리드포밍 인버터의 예비력 산정에 활용할 수 있다.

기존의 발전량 예측 모델은 주로 과거 운영 데이터를 기반으로 하는 데이터 기반 모델이 연구되어 왔으나, MPC 제어에 요구되는 수초 이내의 실시간 예측 및 물리적인 시스템 제약 반영에는 한계가 있을 수 있다. 반면, 물리 기반 모델은 시스템의 물리적 특성을 반영하여 모델링하므로 다양한 운영 조건에서 시스템의 응답을 실시간으로 예측하는 데 유리하기에, MPC와 같은 모델 기반 제어 기법과의 연동에 적합하다.

본 논문은 이러한 배경 하에 물리 기반 풍력 터빈 모델을 활용한 그리드포밍 실시간 MPC 연동 구조 설계를 목표로 한다. 구체적으로, IEC 61400-27-1 표준[1]에 기반한 물리 기반 풍력 터빈 Generic 모델을 MPC 제어기에 연동하여 실시간으로 풍력 터빈의 가용 예비력을 예측하고, 이

를 기반으로 MPC가 최적의 제어 전략을 수립할 수 있도록 하는 구조를 제안한다. 기존 연구들이 데이터 기반 예측 모델을 활용하거나 물리 기반 모델의 실시간 연동 및 파라미터 불확실성을 고려하지 않은 반면, 본 논문은 실시간 활용 가능한 물리 기반 Generic 모델을 사용하고 운영 데이터를 활용한 파라미터 최적화 방안을 제시함으로써 모델의 정확성과 실시간성을 동시에 확보한다. 이는 분산 에너지 시스템의 안정적인 운영 및 제어 성능 향상에 기여할 것으로 기대된다.

II. 본론

MPC 제어

MPC는 현재 시점으로부터 일정 시간 동안의 시스템 거동을 예측하고, 정의된 성능 기준을 최적화하는 제어 입력 시퀀스를 계산하는 제어 방법이다. MPC는 풍력 터빈 또는 다른 분산 자원의 현재 상태와 물리 기반 모델을 활용하여 향후 수초 내지 수십 초 동안의 가용 예비력을 예측하고, 계통의 주파수 안정을 위한 최적의 유효 전력 지령치를 계산할 수 있다. 이를 통해 그리드포밍 인버터는 예측되는 계통 상황에 미리 대비하고, 신속하게 가상 관성을 제공하여 주파수 변동에 대응할 수 있다[2].

IEC 61400-27-1 기반 범용 터빈 모델 구성

IEC 61400-27 표준은 전력 시스템 안정도 해석을 위한 풍력 터빈 및 풍력 발전 단지의 동적 시뮬레이션 모델을 정의한다. 이 표준은 풍력 터빈 모델 및 검증 절차를 명시하며, 다양한 유형의 풍력 터빈 기술에 대한 Generic 모델 구조를 제공한다. 이러한 Generic 모델은 제조사 특정 모델의 상세한 정보를 모두 알지 못하더라도 통일된 형태로 풍력 터빈의 동적 거동을 모의할 수 있도록 설계되었다.

IEC 61400-27-1 기반의 풍력 터빈 Generic 모델은 모듈형 구조를 특징으로 한다. 이는 모델의 유연성을 확보하고 향후 기술 발전에 따른 모델 개정을 용이하게 한다. 일반적인 모듈 구조는 공기역학(Aerodynamic), 기계(Mechanical), 발전기 시스템(Generator System), 전기 장비(Electrical Equipment), 제어(Control) 및 계통 보호(Grid Protection) 모듈로 구성된다. 각 모듈은 풍력 터빈의 특정 물리적 구성 요소 또는 제어 기능을 나타내며, 모듈 간의 입출력 변수를 통해 전체 시스템의 동적 모델이 완성된다. 본 논문에서 활용하는 물리 기반 Generic 모델은 이러한 IEC 61400-27-1 표준의 모듈형 구조를 따르며, 특히 MPC 제어에 필요한 실시간 발전량 및 가용 예비력 산출에 적합하도록 구성된다. 모델은 풍속, 퍼치각, 회전 속도 등 물리적인 입력 변수를 기반으로 전기적인 출력을 계산한다.

물리 기반 모델의 파라미터 식별

물리 기반 풍력 터빈 모델은 시스템의 동적 특성을 잘 나타낼 수 있지만, 모델의 정확도는 사용되는 파라미터 값에 크게 좌우된다. 이상적으로는 터빈 제조사가 제공하는 실제 파라미터를 사용해야 하지만, 이러한 파라미터는 종종 보안상의 이유로 공개되지 않거나, 운영 중 터빈의 노화나 부품 교체 등으로 인해 실제 값이 변경될 수 있다. 이로 인해, 모델 파라미터의 불확실성이 발생하며, 이는 모델 예측의 정확성을 저하시켜 MPC 제어 성능에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

물리 기반 모델을 실시간 MPC 연동에 효과적으로 활용하기 위해서는 이러한 파라미터 불확실성을 해결하고 모델 파라미터를 최적화하는 과정이 필요하다. 운영 데이터를 활용한 파라미터 추정 기법은 이 문제를 해결하기 위한 효과적인 방법이다. 운영 데이터는 실제 풍력 터빈의 동작 정보를 담고 있으므로, 이 데이터를 활용하여 모델의 출력과 실제 측정값 간의 오차를 최소화하는 방향으로 모델 파라미터를 조정할 수 있다.

본 논문에서는 물리 기반 모델의 실시간 MPC 연동을 위해 운영 데이터를 활용하여 모델 파라미터를 주기적으로 또는 필요에 따라 업데이트하는 구조를 고려한다. 이를 위해 데이터 수집, 파라미터 추정 알고리즘 적용, 그리고 모델 파라미터 업데이트 과정을 포함하는 최적화 모듈을 설계한다. 파라미터 추정 기법으로는 실시간 운영 데이터 처리에 적합하고 비선형 시스템의 파라미터 추정 성능이 우수한 칼만 필터 기반 방법을 유력하게 검토할 수 있다. 또한, 추정할 파라미터 수를 줄이고 최적화 효율을 높이기 위해 민감도 분석을 통해 모델 출력에 큰 영향을 미치는 주요 파라미터를 식별하는 과정도 포함할 수 있다.

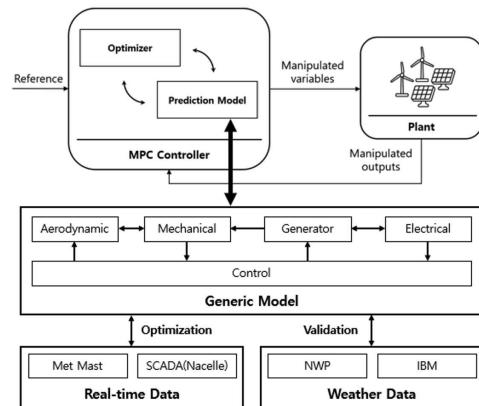
물리 기반 모델 검증 및 MPC 연동 구조

운영 데이터를 활용하여 물리 기반 모델의 파라미터 최적화를 수행한 후에는 최적화된 모델의 정확성과 신뢰성을 검증하는 과정이 필수적이다. 모델 검증은 특정 입력 조건에 대한 모델의 출력과 실제 시스템의 측정값 간의 비교를 통해 이루어진다. IEC 61400-27 표준은 풍력 터빈 모델의 전기적 특성에 대한 다양한 검증 절차를 명시하고 있다.

검증 과정에서는 특정 계통 상태 변화 또는 제어 지령치 변경 발생 시, 최적화된 물리 기반 모델의 동적 응답과 실제 풍력 터빈의 측정된 응답을 비교 평가한다. 이를 통해 모델이 실제 시스템의 거동을 얼마나 정확하게 모사하는지 정량적으로 평가할 수 있다. 검증 결과, 모델의 오차가 허용 가능한 범위 이내이면 해당 모델은 MPC 제어와의 연동에 적합하다고 판단할 수 있다.

검증된 물리 기반 모델은 MPC 제어기에 실시간으로 연동된다. 연동 구

조는 다음과 같이 설계될 수 있다. 풍력 터빈의 현재 운영 상태(예: 풍속, 회전 속도, 전기적 출력 등)가 실시간으로 물리 기반 모델에 입력된다. 물리 기반 모델은 이 정보를 기반으로 향후 예측 구간 동안의 풍력 터빈 거동을 예측한다. 예측된 정보는 MPC 제어기로 전달되며, MPC는 이 예측 정보를 활용하여 계통 안정화 및 주파수/전압 제어를 위한 최적의 풍력 터빈 제어 지령치를 계산한다. 계산된 제어 지령치는 실제 풍력 터빈 제어 시스템으로 전달되어 반영된다.



<물리 기반 모델 MPC 실시간 연동 구조>

III. 결론

본 논문은 물리 기반 풍력 터빈 모델을 그리드포밍 실시간 MPC 제어와 연동하는 구조를 설계하고, 이를 통해 분산 에너지 시스템의 계통 안정성 확보 및 제어 성능 향상을 이루고자 하였다. 분산 에너지 자원의 증가로 인한 계통 안정성 문제를 해결하기 위한 그리드포밍 기술의 중요성과 MPC 제어의 예측 기반 제어 성능을 강조하였다. 특히, IEC 61400-27-1 표준 기반의 물리 기반 풍력 터빈 Generic 모델을 활용하여 데이터 기반 모델의 한계를 극복하고 실시간 예측 정보의 정확성을 높이는 방안을 제시하였다.

향후 연구에서는 본 논문에서 제안한 물리 기반 모델링 및 MPC 연동 구조의 범위를 태양광 발전 및 에너지 저장 시스템(ESS) 등 다른 분산 에너지 자원으로 확장할 계획이다. 다양한 분산 자원에 대한 물리 기반 모델을 개발하고, 이들을 통합된 MPC 제어 프레임워크 하에서 연동함으로써 유연하고 안정적인 가상 발전소 운영 기술을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술 평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00231709, 분산에너지 계통접속 기반 그리드포밍 핵심기술 운영실증)

참 고 문 현

- [1] IEC 61400-27-1. Electrical Simulation Models–Wind Turbines; IEC: Geneva, Switzerland, 2015.
- [2] Hoke, Andy, et al. Inverter-Based Operation of Maui: Electromagnetic Transient Simulations. No. NREL/PR-5D00-79852. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2021.