

디지털트윈기반 재생에너지 결합모델링 예측 모델 개발
및 통합 시스템에 관한 연구

이상엽, 김태형, 조인표, 이재규

한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터

syublee@keti.re.kr, thkim@keti.re.kr, inpyo.cho@keti.re.kr, jaekyu@keti.re.kr

Development and Performance Optimization of 3D Digital Twin-Based
Combined Modeling for Renewable Energy Forecasting

Lee Sang Yub, Kim Tae Hyoung, Cho In Pyo, Lee Jae Kyu

Korea Electronic Technology Institute Energy IT Convergence Research Center

요 약

본 논문은 재생에너지 발전량 예측의 정확도 향상을 위해 3차원 디지털 트윈 기술과 결합 모델링을 융합한 통합 시스템을 개발하였다. 태양광 시스템의 경우, 스카이 카메라를 활용한 실시간 운량 분석과 3D GIS 정보를 연동하여 구름 변화를 예측하는 시스템을 구축하였으며, 풍력 시스템의 경우, 고층실도 바람장 분석 기반 시뮬레이션과 데이터 모델을 결합하여 터빈의 고유 특성을 반영한 예측 모델을 개발하였다. 기존 단일 데이터 모델 대비 풍력과 태양광에서 모두 향상된 예측 정확도를 달성하였다. 본 논문에서는 3차원 공간정보기반 통합 시뮬레이션 환경구축, 실시간 다중 센서 데이터 융합, 공간적 이질성 반영을 통해 기존 재생에너지 예측 기술의 한계를 극복하였으며, 정형데이터, 비정형데이터, 전산해석 데이터의 융합이라는 새로운 접근방식을 제시하였다.

I. 서 론

재생에너지 발전량 예측 분야에서 결합 모델링 기술이 급속도로 발전하고 있다. 2024년 연구에 따르면, 태양광 및 풍력 발전량 예측의 정확도 향상을 위해 전통적인 시계열 분석과 머신러닝 알고리즘을 결합한 하이브리드 모델들이 점차 대중화되고 있으며, 이는 과적합이나 과소적합의 위험을 줄이면서도 정확도를 개선할 수 있는 효과적인 방법으로 인정받고 있다[1-2]. 최신 연구에서는 CNN-LSTM-Transformer 모델이 태양광 발전량 예측에서 Nadam 옵티마이저 사용시 평균 절대오차 0.551%라는 뛰어난 성능을 보이며, 단일 모델들을 크게 상회하는 결과를 달성했다[3]. 또한, RNN-LSTM을 통합한 새로운 하이브리드 예측 모델들이 전통적인 전기 구성요소와 순환신경망을 완벽하게 통합하여 예측 정확도, 변화하는 조건에 대한 적응성, 그리고 데이터 품질에 대한 견고성 면에서 기존 방법들을 능가하고 있다[4]. 특히 디지털 트윈 기술이 재생에너지 시스템의 설계, 운영, 전주기 관리를 빠르게 변화시키고 있으며, 2024년 문헌 검토에 따르면, 태양광, 풍력, 수력, 재생에너지 시스템 전반에 걸친 디지털 트윈 응용이 급속히 확산되고 있다[5-6]. 풍력 에너지 분야에서 디지털트윈은 미지의 매개변수를 예측하고 부정확한 측정을 교정하여 시스템 신뢰성과 성능을 향상시키는 데 크게 기여하고 있다[7-10].

II. 본론

II-1. 태양광 발전량 예측 시스템

본 논문에서는 3차원 디지털트윈 환경에서 구름 예측 기반의 혁신적인 태양광 발전량 예측 시스템을 개발하였다. 기존 태양광 발전지에 영향을 미치는 정형데이터(일사량, 기온 등)와 함께 3D GIS를 활용하여 주변 지역의 영향과 스카이 카메라 이미지를 활용한 운량 분석을 동반한 발전량

예측 모델을 설계하였다. 구름 이미지 수집 및 분석 시스템을 통해 실시간 구름 이미지를 수집하고, 이를 3D GIS 정보와 연동해 구름을 시각화하고 운량을 분석하는 통합 플랫폼을 구축하였다. 태양광 실증 발전단지에서 스카이 카메라를 설치해 구름 이미지와 실증단지의 3D GIS 정보를 이용하여 3D 리소스 위에 구름을 실현하고 운량을 분석할 수 있는 시스템을 완성하였다. 고층실도 스카이 캠 구름 운량 분석 기반의 시뮬레이션 모델의 발전량 예측과 데이터 모델의 발전량 예측을 결합하여 하이브리드 태양광 예측모델을 개발함으로써 기존 단일 모델 대비 향상된 예측 정확도를 달성하였다.

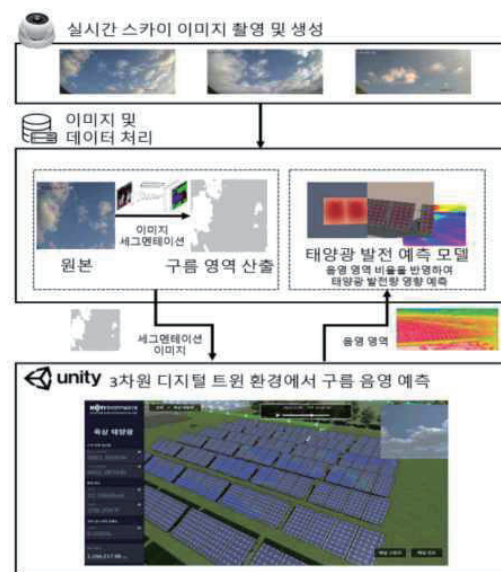


그림 1 태양광 발전량 예측 시스템

II-2. 풍력 발전량 예측 시스템

풍력 발전량 예측을 위해서는 고충실도 기반 풍력 하이브리드 모델 예측 프로세스를 개발하였다. 고충실도 기반인 바람장 분석 기반의 시뮬레이션 모델의 발전량 예측과 데이터 모델의 발전량 예측을 결합하여 고충실도 기반 하이브리드 풍력 예측 모델을 구현하였다. CFD 데이터 분석 및 해석 프로그램 활용을 통해 바람장 데이터 분석을 위해 기존 CFD 데이터를 활용하고, CFD 해석 프로그램을 사용하여 구조물의 데이터가 조밀할수록 정확성이 높아지는 특징을 반영하여, 해석 시간 증가 문제를 해결하기 위해 구조물 밀도를 차등 배치하였다. 특히, 풍력 발전지의 블레이드 실시 부분을 조밀하게 설정하여 정확도를 향상시켰다. 다양한 물리적 변수(풍속, 풍향 등)를 고려하여 바람의 움직임을 시뮬레이션하고, 이를 통해 지형적, 시간적 바람 패턴을 분석하고 고충실도 바람장 분석을 위해 병렬 분산처리 고해상도 물리 모델 렌더링 파이프라인을 구축하였다.

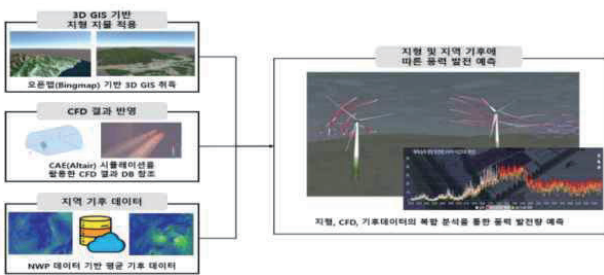


그림 2 풍력 발전량 예측 시스템

II-3. 3차원 공간정보기반 통합 시스템

본 논문에서는 3차원 공간정보기반 통합 시뮬레이션 환경을 구축하여 기존 연구들이 개별 패널이나 터빈의 성능 모니터링에 집중했던 한계를 극복하고, 3D GIS기반의 통합된 공간정보환경에서 풍력과 태양광을 동시에 관리할 수 있는 포괄적 시스템을 구현하였다. 또한, 실시간 이미지와 전산 해석 데이터의 융합을 통해 기존 수치 데이터 모델링과는 대조적으로, 결합모델링을 이용하여 구립의 실시간 변화와 바람의 3차원 특성을 고려한 예측 모델을 개발하였다.



그림 3 3차원 공간정보기반 통합 시스템

III. 결론

본 논문에서는 3D GIS 기반의 디지털트윈 환경에서 풍력과 태양광 발전량을 통합 예측할 수 있는 플랫폼을 구축하여 개별 에너지원 예측의 한계를 극복하고, 스카이 카메라, 기상 센서, CFD 해석 데이터를 실시간으로 융합하여 기존 연구에서 지적된 불정확한 예측 모델의 한계를 해결함으로써 예측 정확도를 크게 향상시켰다. 또한 발전단지 내 각 터빈과 패널의 위치별 고유 특성을 개별 모델링함으로써 공간적 변화에 대한 적응성을 확보하였다. 향후 연구에서는 디지털트윈과 인공지능의 발전이 에너지 관

리에 새로운 가능성을 열고 있는 만큼 Transformer 기반 어텐션 메커니즘과 강화학습 알고리즘을 추가 도입하여 예측 성능을 더욱 향상시키고, 스마트 그리드 기술과 차량-그리드 통합이 현대화된 지속가능한 그리드 발전에 핵심이 되고 있는 상황에서 본 시스템을 대규모 재생에너지 단지와 스마트 그리드 환경으로 확장하는 연구를 진행할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00232017, 재생에너지 디지털 트윈 기반 e-실증단지 고도화)

참 고 문 헌

- [1] Alharbi, T., Iqbal, S. "Novel hybrid data-driven models for enhanced renewable energy prediction," *Frontiers in Energy Research*, vol. 12, 2024.
- [2] Zhang, Y., et al. "Forecasting Renewable Energy Generation with Machine Learning and Deep Learning: Current Advances and Future Prospects," *Sustainability*, vol. 15, no. 9, pp. 7087, 2023.
- [3] Chen, L., Wang, X., Liu, M. "Hybrid deep learning models for time series forecasting of solar power," *Neural Computing and Applications*, 2024.
- [4] Team SVK. "The HEFTCom2024 winning model: a stacked CatBoost approach," *The Hybrid Renewable Energy Forecasting and Trading Competition 2024*, 2025.
- [5] Narayanan, S., Kumar, R. "Hybrid Forecasting Model Integrating RNN-LSTM for Renewable Energy Production," *Electric Power Components and Systems*, 2024.
- [6] Wang, J., et al. "A hybrid framework for forecasting power generation of multiple renewable energy sources," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 172, 2023.
- [7] Ukoba, K., et al. "Optimizing renewable energy systems through artificial intelligence: Review and future prospects," *Energy and Environment*, 2024.
- [8] Ahmed, N., et al. "Intelligent based hybrid renewable energy resources forecasting and real time power demand management system for resilient energy systems," *Scientific Reports*, 2023.
- [9] Semeraro, C., et al. "Harnessing the future: Exploring digital twin applications and implications in renewable energy," *Energy Nexus*, vol. 18, 2025.
- [10] Al-Shetwi, A.Q., et al. "Digital Twin Technology for Renewable Energy, Smart Grids, Energy Storage and Vehicle-to-Grid Integration," *IET Smart Grid*, 2025.