

P-HILS 연계 시뮬레이션 기반의 재생에너지 설비 성능평가 프레임워크

이지현, 김민호, 임정택, 함경선, 김태형

한국전자기술연구원

jhlee00@keti.re.kr, minhokim@keti.re.kr, jtlim@keti.re.kr, ksham@keti.re.kr, thkim@keti.re.kr

Performance Evaluation Framework for Renewable Energy Facility Based on P-HILS Linked Simulation

Jihyeon Lee, Minho Kim, Jeongtaek Lim, Kyung Sun Ham, Taehyoung Kim

Korea Electronics Technology Institute

요약

최근 태양광, 풍력, 에너지 저장장치(ESS), 스마트 인버터 등 다양한 DC 기반 분산에너지 자원의 확산으로 인해 계통의 복잡성과 변동성이 증가하고 있다. 이러한 분산에너지 자원은 계통 연계 전, 실제와 유사한 환경에서 안정성을 확인하는 것이 필수적이다. 하지만 안정성 확인 절차는 비교적 높은 비용과 시간을 필요로 하며, 계통 내 동적 부하의 다양한 특성을 반영한 시나리오를 적용하기 어렵다는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 한계를 완화하기 위해, 계통을 모의하는 시뮬레이터와 가상 모델을 활용하여 실제 설비의 계통연계 시 성능을 모의 테스트 할 수 있는 성능평가 프레임워크를 제안한다. 성능평가 프레임워크는 실시간 디지털 시뮬레이터(RTDS 또는 OPAL-RT)를 기반으로 한 P-HILS(Power Hardware-In-the-Loop Simulation) 시스템, 에너지 설비 가상 모델, 성능평가 대상 에너지 설비로 구성된다. 일련의 성능평가 과정은 실시간 디지털 시뮬레이터는 계통을 모의하고, 가상 모델은 계통 내 이미 설치된 실험 대상 외 설비의 출력을 생성하며, 이 과정에서 실제 설비에는 파워앰프(Power Amp)를 통해 계통의 동적인 변동을 전달하는 방식으로 수행된다. 이를 통해 분산형 에너지 자원의 성능을 기존 정적 시험 대비 비교적 낮은 비용으로 평가할 수 있으며, 실제 계통 적용 전 다양한 시나리오에 대하여 사전 검증이 가능하다.

I. 서론

전 세계적으로 환경 문제와 에너지 고갈 우려가 증가함에 따라, 태양광 및 풍력 발전과 같은 DC 전원을 기반으로 한 분산형 에너지 자원(Distributed Energy Resources, DERs)의 보급과 활용이 확대되고 있다. 이로 인해 계통은 AC/DC 변환 설비가 혼재하는 복잡한 구조로 변화하고 있으며, 다양한 자원의 상호작용에 따른 계통 안정성 및 설비의 신뢰성 확보가 중요한 과제로 대두되고 있다.

분산형 에너지 설비의 성능을 정밀하게 평가하고 최적의 제어 알고리즘을 도출하기 위해서는, 다양한 계통 조건을 반영할 수 있는 실험 환경이 필요하다[1]. 그러나 실제 전력 계통과 유사한 환경을 물리적으로 구현하는 데에는 높은 구축 비용과 시간이 소요되며, 실시간으로 변화하는 계통 조건을 재현하기도 어렵다.

이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 P-HILS(Power Hardware-In-the-Loop Simulation) 기반의 가상 실험 환경을 활용한 분산에너지 설비 성능평가 시스템을 제안한다. P-HILS는 실시간 디지털 시뮬레이터(RTDS, OPAL-RT 등)와 실제 설비를 전기적으로 연계함으로써, 실제 계통과 유사한 조건을 재현하는 실험 환경을 제공한다.

이를 통해 실험 비용과 시간을 절감하는 동시에, 현실적인 운영 조건에서의 설비 성능 및 반응 특성을 정밀하게 분석할 수 있으며, 복잡하고 동적인 계통 변화에 대응할 수 있는 효과적인 성능평가 방법을 제시하고자 한다.

II. 본론

1. P-HILS 연계 시뮬레이션 개요

P-HILS는 가상 계통 환경과 물리적 설비를 실시간으로 연계하여, 물리적으로 계통을 재현하지 않고도 유사한 실험 환경을 구현하는 기술이다. 이는 RTDS나 OPAL-RT와 같은 실시간 계통 해석 장치를 기반으로 하며, 다양한 분산형 자원들의 동작을 가상으로 반영하고, 설비 출력을 피드백 받아 계통 상태를 실시간으로 갱신함으로써 현실적인 테스트 환경을 구축한다.

P-HILS 기반 시스템은 고비용의 물리적 테스트 환경을 대체함과 동시에, 다양한 계통 조건과 설비 간 상호작용을 정밀하게 모사할 수 있다는 점에서, 재생에너지 설비의 성능평가 및 검증에 매우 유효하다[2].

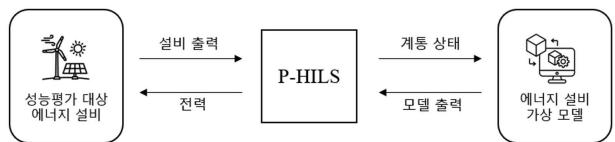


그림 1 P-HILS 연계 시뮬레이션 개요도

2. 시스템 구조

본 연구에서 제안하는 성능평가 시스템은 성능평가 대상 설비, P-HILS 시스템, 에너지 설비 가상 모델의 세 가지 구성 요소로 이루어진다. 성능평가 대상 설비는 태양광, 풍력, ESS, 전기차 충전기, 수소 관련 설비 등과 같이 실제 물리적 환경에서 동작하는 분산형 에너

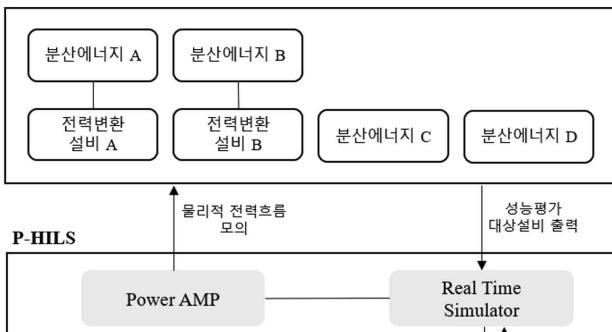
지 자원으로, P-HILS 시스템에 직접 연결되어 전력을 입력받고, 그에 따른 출력 특성을 평가받는다.

P-HILS 시스템은 RTDS(Real-Time Digital Simulator) 또는 OPAL-RT와 같은 실시간 계통 해석 장비를 기반으로 하며[3], 입력된 설비 출력 데이터를 바탕으로 가상 계통 환경의 전압, 주파수 등 주요 지표를 실시간으로 연산하고 지속적으로 업데이트한다. 이 과정을 통해 다양한 계통 조건을 정밀하게 재현할 수 있으며, 실제 계통 운전 환경과 유사한 실험 조건을 제공한다.

에너지 설비 가상 모델은 성능평가 대상 이외의 자원들을 소프트웨어적으로 구현한 것으로, 실제 설비와의 상호작용을 반영하기 위한 목적을 가진다. 이 가상 모델은 전용 프로토콜(예: Modbus 등)을 통해 P-HILS 시스템과 통신하며, 계통 내 다른 자원의 영향을 모사하는 데 활용된다. 이를 통해 설비 간의 복합적인 상호작용 효과를 정밀하게 반영할 수 있다.

실물 설비에서 수집된 출력 데이터는 센서를 통해 실시간으로 취득되며, 데이터 교환 장치를 거쳐 P-HILS 시스템으로 전달된다. P-HILS는 이 데이터를 기반으로 가상 계통의 상태를 계산하고, 계산 결과는 별도의 모니터링 시스템으로 전송된다. 사용자는 이 결과를 통해 다양한 운영 조건 하에서 설비의 실제 성능과 반응 특성을 객관적으로 분석하고, 설비의 유효성과 신뢰성을 정량적으로 평가할 수 있다.

성능 평가 대상 에너지 설비



계통 내 연계 설비 정보

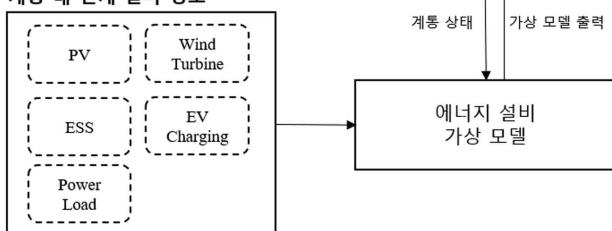


그림 2 P-HILS 연계 시뮬레이션 구성도

3. 동적 환경 기반 성능평가

기존의 정적 환경에서 수행되던 설비 성능 평가는 계통의 실제 운영 특성을 반영하기에 한계가 있었다. 반면, P-HILS 기반 시스템은 시간에 따라 변화하는 부하, 자원 간 상호작용, 전압/주파수 변동 등을 실시간으로 반영할 수 있어, 보다 현실적인 동적 운영 환경에서의 평가를 가능하게 한다[4]. 이 시스템은 태양광, 풍력, ESS뿐만 아니라 전기차 충전기, 수전해 설비, 수소 저장 시스템 등 다양한 형태의 분산형 에너지 자원을 대상으로 하며, 예측이 어려운 비정형 계통 상황에서도 설비의 성능과 안정성을 정량적으로 평가할 수 있는 기반을 제공한다.

III. 결론 및 향후연구

본 논문에서는 P-HILS 기반 시뮬레이션 시스템을 활용하여, 분산 에너지 설비의 성능을 평가할 수 있는 프레임워크를 제시하였다. 본 시스템은 고비용의 실증 환경 없이도 실제 계통 조건과 유사한 실험 환경을 제공함으로써, 효율적이고 정확한 성능 검증을 가능하게 한다. 특히, 정적인 테스트 조건에서 벗어나 다양한 변수와 동적 변화가 반영된 환경에서 설비의 반응 특성을 평가할 수 있다는 점은, 재생에너지 기반 전력 계통의 신뢰성과 안정성 확보에 중요한 기여할 것으로 기대된다. 향후 연구에서는 IEEE 9-bus 시스템을 기반으로 한 가상 계통 환경을 시뮬레이터에서 구현하고, 이 환경 내에 태양광 인버터를 연계한 실시간 제어기 연동 기반의 성능 평가를 수행함으로써, 설비 수준과 계통 수준에서의 성능을 동시에 검증할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00231702, 분산형 재생에너지 시스템 개방형 통합 플랫폼 개발)

참 고 문 헌

- [1] G. Krishnan and C. Konstantinou, "Design and Evaluation of a DC Microgrid Testbed for DER Integration and Power Management," arXiv preprint, arXiv:2403.19176, 2024.
- [2] O. Craciun, A. Folea, I. Munteanu, A. I. Bratcu, S. Bacha, and D. Roye, "Hardware-in-the-loop simulation applied to protection devices testing," Electrical Power and Energy Systems, vol. 54, pp. 55 - 64, 2014. DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.06.031
- [3] K. Mentesidi, E. Rikos, V. Kleftakis, P. Kotsampopoulos, M. Santamaria and M. Aguado, "Implementation of a microgrid model for DER integration in real-time simulation platform," 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, Turkey, 2014, pp. 2274-2279, doi: 10.1109/ISIE.2014.6864972.
- [4] M. O. Faruque, F. Gonzalez-Longatt, J. R. Aguero, V. Dinavahi, K. Strunz, M. Saeedifard, N. Hatziargyriou, and R. Palma-Behnke, "Power Hardware-in-the-Loop (PHIL): A Review to Advance Smart Grid and Microgrid Applications," Energies, vol. 16, no. 2, p. 916, Jan. 2023.