

AI 기반 수직농장 에너지 하베스팅 제어 시스템 연구

최현오, 이명훈*

*국립순천대학교

wishind@scnu.ac.kr, *leemh777@scnu.ac.kr

A Study on AI-Based Energy Harvesting Control System for Vertical Farms

Choe Hyeon O, Lee Meong Hun*

*Sunchon National Univ.

요약

본 연구는 수직농장의 높은 에너지 소비 문제를 해결하기 위해 AI 기반 에너지 하베스팅 제어 시스템을 제안하였다. 제안 시스템은 수직농장 내부의 센서 데이터를 실시간 수집·분석하고, 열전·압전·태양광 등 다양한 에너지원을 통합하여 생성된 전력을 효율적으로 분배한다. 시스템은 예측, 최적화, 제어, 피드백으로 구성된 AI 제어 모듈을 중심으로 동작하며, LSTM 기반의 시계열 예측과 강화학습 기반의 제어 정책 결정을 통해 전력 상태와 환경 변화를 동적으로 반영한다. 또한 주 전력과 보조 전력을 병행 운영하는 이중 전력 구조를 채택하여 외부 전력 의존도를 낮추고, 내부 잉여 에너지를 순환적으로 활용할 수 있도록 설계하였다. 본 시스템은 에너지 하베스팅 효율을 실시간으로 평가하고 제어 알고리즘을 자율적으로 보정함으로써 에너지 자립형 스마트 수직농장 구현 가능성을 제시한다. 향후 연구에서는 Physics-AI 기반 모델을 적용하여 에너지 흐름과 생육 반응 간의 상관관계를 정밀 분석하고, 저탄소형 지능화 수직농장 플랫폼으로 확장할 계획이다.

I. 서론

최근 농업은 도시화, 인구 증가, 기후 변화 등의 문제로 인해 생산 공간과 에너지 효율의 제약을 받고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 수직농장(Vertical Farm)이 주목받고 있으며, 이는 밀폐형 인공광 환경에서 작물 생육을 정밀 제어하는 스마트 재배 시스템이다. 그러나 수직농장은 조명, 냉난방, 환기 등으로 인해 높은 에너지 소비를 요구하며, 이로 인한 운영비 증가와 탄소 배출 확대가 주요 문제로 지적되고 있다[1,2].

이에 따라, 에너지 하베스팅(Energy Harvesting)기술을 활용하여 농장 내부에서 발생하는 열, 진동, 공기 흐름 등의 잉여 에너지를 회수하고 이를 재활용하는 연구가 진행되고 있다[3]. 하지만 기존 연구는 단일 에너지원을 대상으로 한 정적 회수 방식에 머물러 있으며, 실제 운영 환경에서의 동적 제어 및 최적화에 한계가 존재한다[4,5].

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 AI 기반의 에너지 하베스팅 제어 시스템을 제안한다. 제안 시스템은 수직농장의 센서 데이터를 실시간으로 수집·분석하고, 인공지능 알고리즘을 통해 하베스팅 가능한 에너지량을 예측하여 제어 모듈의 동작을 최적화한다. 이를 통해 에너지 자립형 스마트 수직농장을 구현하는 것을 목표로 한다.

본 논문의 2장에서는 AI 기반 수직농장 에너지 하베스팅 제어 시스템을 설계하고, 3장에서는 본 연구의 기대효과 및 활용 방안에 대해 서술하였다.

II. 시스템 설계

본 논문에서는 제안하는 시스템 구성도는 그림 1과 같다. 본 시스템은 에너지 하베스팅 모듈, AI 제어 모듈, 환경제어 모듈, 전력 관리 모듈, 데이터 수집 및 통신 모듈로 구성된다.

에너지 하베스팅 모듈은 수직농장 내부에서 발생하는 잉여 에너지를 회수하기 위한 장치로, LED 광원에서 발생하는 열에너지를 수집하는 열전 모듈, 환기팬의 회전력을 이용한 압전 모듈, 그리고 태양광 발전 모듈로

구성된다. 수집된 전력은 전력 변환기 및 저장장치를 통해 안정화되어 시스템의 보조 전원으로 공급된다.

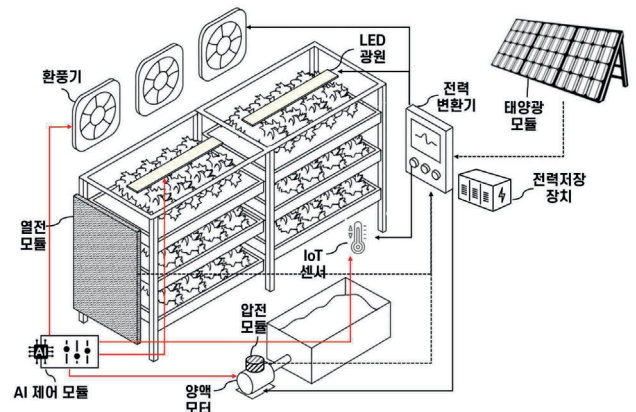


그림 1 AI 기반 수직농장 에너지 하베스팅 제어 시스템 구성도

Fig 1. System Architecture of AI-based Energy Harvesting Control for Vertical Farm

AI 제어 모듈은 수집된 센서 데이터(온도, 습도, CO₂, 조도 등)와 하베스팅 전력량 데이터를 기반으로, 환경 제어 장치(LED 광원, 환풍기, 양액 모터)의 동작 우선순위를 자동으로 조정한다. 이때 제어 모듈은 LSTM 기반의 시계열 예측 구조와 강화학습 기반의 정책 결정 모듈로 구성되어, 시간대별 에너지 사용량과 하베스팅 가능 전력량을 실시간으로 예측한다.

환경제어 모듈은 실제 수직농장 내의 조명, 냉난방, 환기, 양액 공급 장치를 제어하는 부분으로, AI 제어 모듈의 명령에 따라 동작하며, IoT 센서를 통해 피드백 데이터를 수집한다.

전력 관리 모듈은 태양광 및 하베스팅 모듈에서 유입되는 전력을 변환·저장·분배하는 기능을 수행하며, 전력 변환기를 통해 전압 및 전류를

안정화하여 AI 제어 모듈과 환경제어 장치로 전송한다.

데이터 통신 모듈은 MQTT 프로토콜 기반의 경량 통신 구조를 채택하여 모듈 간 데이터 흐름을 관리하며, 클라우드 서버에 로그를 전송하여 장기적 에너지 효율 분석 및 시스템 개선에 활용한다.

이와 같은 모듈 통합 구조를 통해, 제안된 시스템은 내부 발생 에너지를 실시간으로 회수하고, AI 제어를 통해 최적화함으로써 에너지 자립형 수직농장 구현을 가능하게 한다.

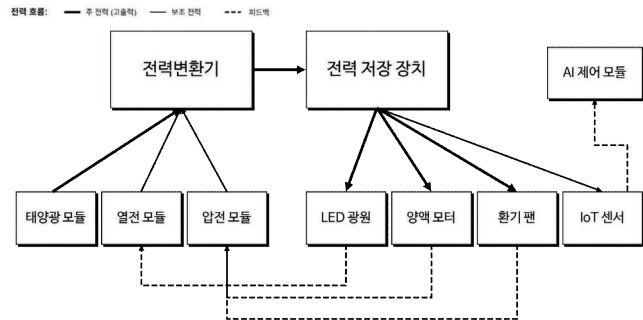


그림 2 AI 기반 수직농장 에너지 하베스팅 제어 시스템의 전력 분배 구조
Fig 2. Power Distribution Architecture of AI-Based Energy Harvesting Control System for Vertical Farm

그림 2는 본 연구에서 제안한 AI 기반 수직농장 에너지 하베스팅 제어 시스템의 전력 분배 구조를 나타낸 것이다. 본 시스템은 수직농장 내부의 다양한 에너지원을 통합적으로 관리하기 위해, 주 전력과 보조 전력을 병행 운용하는 이중 전력 구조를 채택하였다.

주 전력은 외부 상용 전원에서 공급되어 LED 광원, 양액 모터, 환기 팬, IoT 센서 등 주요 구동 장치의 안정적인 운전을 담당한다. 주 전력은 전력변환기를 거쳐 각 부하의 요구 전압·전류 수준에 맞게 분배되며, 실시간 전류 감지 기능을 통해 과부하를 방지한다.

보조 전력은 태양광 모듈, 열전 모듈, 압전 모듈 등에서 발생한 하베스팅 전력으로 구성된다. 이 전력은 전력 저장 장치에 일시적으로 저장된 후, 전력변환기를 통해 주 전력망에 병합되어 보조 전원으로 활용된다. AI 제어 모듈은 하베스팅 전력의 잔량과 부하 요구량을 기반으로, 각 부하에 대한 보조 전력의 공급 비율을 실시간으로 결정한다.

피드백 루프는 IoT 센서에서 수집된 온도, 습도, 조도, 전류량 등의 데이터를 AI 제어 모듈로 전달하여, 에너지 사용 효율 및 하베스팅 성능을 평가하고 제어 정책을 지속적으로 보정한다. 이 과정을 통해 시스템은 에너지 공급의 균형을 유지하며, 하베스팅 전력의 활용률을 극대화한다.

결과적으로 본 전력 분배 구조는 외부 전력 의존도를 낮추고, 내부 잉여 에너지를 순환적으로 활용함으로써 자율적 에너지 관리형 수직농장의 구현을 가능하게 한다.

그림 3은 제안된 시스템의 AI 제어 모듈 내부 데이터 흐름을 나타낸다. 시스템은 IoT 센서로부터 온도, 습도, 조도, CO₂ 농도 등 환경 데이터를 수집하고, 이를 예측 엔진으로 전달하여 단기 에너지 수요 및 환경 변화를 분석한다. 이후 최적화 엔진에서 에너지 효율과 생육 안정성을 고려한 제어 조건을 산출하고, 전력 상태를 평가하여 제어 신호 생성 여부를 판단한다. 전력 부족 시에는 대기·재처리를 수행하고, 안정 시에는 제어 엔진을 통해 LED, 환기 팬, 양액 모터 등에 제어 명령을 전송한다.

마지막으로, 각 장치에서 수집된 피드백 데이터는 AI 제어 모듈로 재투입되어 제어 정책을 지속적으로 보정한다. 이러한 폐루프 구조를 통해 시스템은 실시간 자율 최적 제어를 수행할 수 있다.

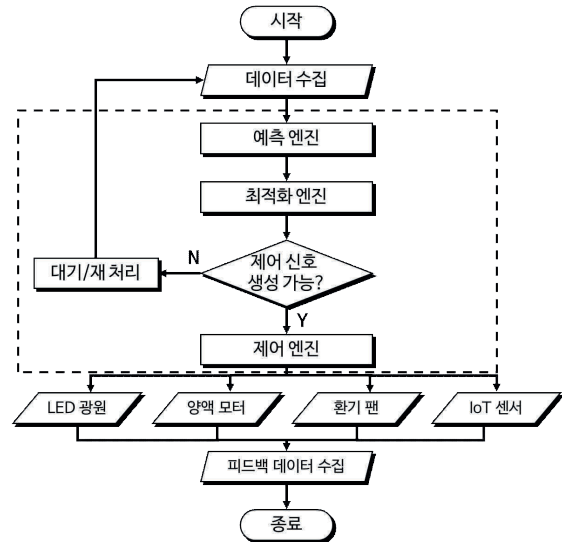


그림 3 AI 제어 모듈 데이터 흐름도

Fig 3. Power Distribution Architecture of AI-Based Energy Harvesting Control System for Vertical Farm

IV. 결론

본 연구에서는 수직농장의 높은 에너지 소비 문제를 해결하기 위해 AI 기반 에너지 하베스팅 제어 시스템을 제안하였다. 제안 시스템은 열전, 압전, 태양광 등 다양한 에너지원을 통합하여 생산된 전력을 효율적으로 분배하고, AI 제어 모듈을 통해 에너지 사용량을 실시간 최적화한다.

특히, 예측·최적화·제어·피드백으로 구성된 AI 제어 구조를 통해 환경 변화와 전력 상태를 동적으로 반영함으로써, 기존의 정적 제어 방식보다 에너지 자립성과 제어 효율을 동시에 향상시켰다.

제안된 시스템은 향후 실제 재배 환경에서 실증될 예정이며, Physics AI 기반의 예측·제어 모델을 적용하여 에너지 흐름과 생육 반응 간의 상관관계를 정밀하게 분석할 계획이다. 이를 통해 지속할 수 있고 지능화된 저탄소형 스마트 수직농장 플랫폼으로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

"본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음" (RS-2025-00259703)

참 고 문 헌

- [1] 이영재, "열회수 환기장치 기반의 에너지 절감형 수직농장시스템 구축 및 설계," 석사학위논문, 순천대학교, 순천, 대한민국, 2023
- [2] 정현준, 서현무, 이명훈, "수직농장 온도 제어 시스템 설계에 관한 연구," 한국통신학회 학술대회논문집, 제주, 대한민국, 2025.06.18.
- [3] 정예은, 신민진, 안현석, "에너지 하베스팅 시스템에서의 효율적 에너지 활용을 위한 전력 제어 연구," 대한전자공학회 학술대회, 제주, 대한민국, 2025.06.24.
- [4] 강대현, "기후변화와 실내농업의 미래," 한국원예학회 학술발표요지, 전북, 대한민국, 2021.10.21.
- [5] 이민재, 김지민, "수경 재배 온실의 에너지 및 일광 성능 향상을 위한 최적화," 한국생태환경건축학회 학술발표대회 논문집, 서울, 대한민국, 2025.05.23.