

재생에너지 변동성 대응을 위한 그린수소 시스템의 MILP 기반 최적화 모델링 및 통합 운영 플랫폼 설계

전덕환*, 김찬수* 유경상*, 윤승진*, 최미곤*, 남양현*, 김대진*

*한국에너지기술연구원 전력시스템연구실

e-mail: first7976@kier.re.kr

MILP-Based Optimization Modeling and Integrated Operation Platform Design for Green Hydrogen Systems to Respond to Renewable Energy Variability

Deok Hwan Jeon*, Chan-Soo Kim*, Kyung-Sang Ryu*,

Seung-Jin Yoon*, Mi-Gon Choi*, Yang-Hyeon Nam* and Dae-Jin Kim†*

*Electric Power System Research Laboratory, Korea Institute of Energy Research

요약

재생에너지의 급격한 확대는 전력계통의 변동성과 불확실성을 증가시키며, 이에 대응하기 위한 유연한 에너지 운영 전략의 필요성이 커지고 있다. 본 연구에서는 태양광(PV) 및 풍력(WT) 기반 재생에너지와 배터리 에너지저장장치(ESS) 및 수전해 설비로 구성된 그린수소 통합 시스템을 대상으로, 혼합정수선형계획(MILP) 기반 최적화 모델을 수립하고 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검증하였다. 제안된 MILP 모델은 수소 생산 수익 극대화 및 계통 전력 구매 비용 최소화를 동시에 달성하는 목적함수를 기반으로 하며, ESS 충방전 제약, 수전해 설비의 기동-정지 및 Ramp rate 제약, 탄소 배출 제한 조건을 통합적으로 고려한다. 시뮬레이션 결과, ESS와 수전해 설비의 상호 보완적 운영을 통해 재생에너지 출력 변동성 완화 및 수소 생산 효율 향상이 가능함을 확인하였다. 또한, 다계층 데이터 처리 아키텍처 및 AI 기반 통합 운영 플랫폼의 개념 설계를 제시하였으며, 이를 통해 향후 강화학습(RL) 기반 적응형 운영 전략 적용을 위한 기술적 기반을 마련하였다. 본 연구는 재생에너지 변동성이 높은 제주 실증 환경에서 그린수소 시스템의 효율적 운영을 위한 실용적 접근법을 제시한다

1. 서론

최근 태양광 및 풍력과 같은 재생에너지의 급격한 확대는 전력 계통의 탈탄소화에 크게 기여하고 있으나, 동시에 높은 변동성과 예측 불확실성으로 인해 계통 운영의 어려움을 초래하고 있다. 특히 제주와 같은 재생에너지 비중이 높은 지역에서는 출력제한(curtailment) 문제와 수급 불균형이 빈번하게 발생하고 있으며, 이를 해결하기 위한 유연성 자원의 확보가 중요한 과제로 대두되고 있다. 기존 연구에서는 수전해 시스템의 최적 운영을 위해 혼합정수선형계획(MILP), 모델예측제어(MPC) 등의 최적화 기법이 주로 활용되어 왔다. 그러나 이러한 방법들은 정확한 시스템 모델이 요구되며, 계산 복잡도가 높고, 실시간 운전 환경에서의 적용에는 한계가 존재한다. 특히 재생에너지 출력과 전력시장 가격과 같은 확률적 요소를 반영하는 데 어려움이 있다.

이에 본 연구에서는 재생에너지-ESS-수전해 설비로 구성된 그린수소 통합 시스템을 대상으로, MILP 기반 최적화 모델을 수립하고 시뮬레이션을 통해 통합 운영 전략의 타당성을 검증하였다. 또한, 향후 AI 기반 적응형 제어의 적용을 위한 다계층 데이터 처리 아키텍처와

통합 운영 플랫폼의 개념 설계를 함께 제시하였다. 본 연구의 목적은 통합 재생에너지-ESS-수전해 설비 통합 에너지 시스템에서 MILP 최적화를 통해 계통 의존도를 감소시키고 에너지 운영 효율을 향상시킬 수 있음을 검증하는 한편, 향후 강화학습(Reinforcement Learning, RL) 기반 AI 적응형 운영 전략으로의 확장을 위한 기반 데이터 및 플랫폼 구조를 마련하는 것이다

2. 그린수소 성능평가 플랫폼 개념 설계

2.1 MILP(Mixed-Integer Linear Programming) 기반 그린수소 생산을 위한 수전해 설비 및 ESS 모델링

본 연구에서는 재생에너지 기반 그린수소 생산 시스템의 경제적 운영을 위해 혼합정수선형계획(Mixed-Integer Linear Programming, MILP) 기반 최적화 모델을 구성하였다. 해당 모델은 수전해 설비와 에너지저장장치(ESS)를 통합적으로 고려하여, 재생에너지 활용 극대화 및 계통 의존도 최소화를 동시에 달성하는 것을 목표로 한다. 목적함수는 일정 시간 구간 $t \in T$ 에 대해 수소 생산으로부터 얻는 수익과 계통으로부터 전력을 구매하는 비용의 차이를 최대화 하도록 정의된다.

$$\max \sum_{t \in T} (\pi^{H_2} H_t - \pi_t^{grid} P_t^{grid} \Delta t) \quad (1)$$

각 시간 단계에서 시스템의 전력 수지는 다음과 같이 정의된다.

$$P_t^{PV} + P_t^{WT} + P_t^{dis} + P_t^{grid} = P_t^{EL} + P_t^{ch} \quad (2)$$

ESS 운영 제약조건으로는 충·방전 효율을 고려하여 에너지 상태 업데이트를 위해 다음과 같이 정의된다.

$$E_{t+1}^{ESS} = E_t^{ESS} + \eta_{ch} P_t^{ch} \Delta t - \frac{1}{\eta_{dis} P_t^{dis} \Delta t} \quad (3)$$

$$E^{ESS, \min} \leq E_t^{ESS} \leq E^{ESS, \max} \quad (4)$$

$$0 \leq P_t^{ch} \leq P^{ch, \max} z_t^{ch} \quad (5)$$

$$0 \leq P_t^{dis} \leq P^{dis, \max} z_t^{dis} \quad (6)$$

$$z_t^{ch} + z_t^{dis} \leq 1, z_t^{ch}, z_t^{dis} \in \{0, 1\} \quad (7)$$

수전해 설비 출력 범위 및 가동/정지 횟수 제한, Ramp rate 등은 다음과 같이 정의 된다.

$$P^{EL, \min} u_t \leq P_t^{EL} \leq P^{EL, \max} u_t \quad (8)$$

$$u_t - u_{t-1} \leq y_t^{on} - y_t^{off}, y_t^{on}, y_t^{off} \in \{0, 1\} \quad (9)$$

$$\sum_{t \in T} y_t^{on} \leq N^{start, \max} \quad (10)$$

$$R^{down} \leq P_t^{EL} - P_{t-1}^{EL} \leq R^{up} \quad (11)$$

수전해 입력 전력과 수소 생산량 간의 관계는 다음과 같이 선형 모델로 정의된다.

$$H_t = \alpha_{H_2} P_t^{EL} \Delta t \quad (12)$$

계통 전력 사용을 제한하기 위한 제약은 다음과 같이 설정할 수 있다. (총 CO₂ 배출량 ≤ 허용 탄소 계수 X 총 수소 생산량)

$$\sum_{t \in T} P_t^{grid} EF_{grid} \Delta t \leq \lambda_{H_2}^{max} \sum_{t \in T} H_t \quad (13)$$

이를 위해 설정한 변수 및 파라미터는 다음 [표 1], [표 2]와 같다.

[표 1] 그린수소 운영을 위한 최적화 모델 변수

| 개요 | 변수 | 설명 | 단위 |
|-------|----------------------------|-----------------|----|
| 연속 변수 | $H_t (\geq 0)$ | 수소 생산량 | kg |
| | $P_t^{EL} (\geq 0)$ | 수전해설비 전력 | MW |
| | $P_t^{ch} (\geq 0)$ | ESS 충전 전력 | MW |
| | $P_t^{dis} (\geq 0)$ | ESS 방전 전력 | MW |
| | E_t^{ESS} | ESS 잔여 에너지 | MW |
| 이진 변수 | P_t^{grid} | 계통 전력 | MW |
| | $u_t (\in \{0, 1\})$ | 수전해설비 on/off 상태 | - |
| | $y_t^{on} (\in \{0, 1\})$ | 수전해설비 가동 여부 | - |
| | $y_t^{off} (\in \{0, 1\})$ | 수전해설비 정지 여부 | - |
| | $z_t^{ch} (\in \{0, 1\})$ | ESS 충전 모드 | - |
| | $z_t^{dis} (\in \{0, 1\})$ | ESS 방전 모드 | - |

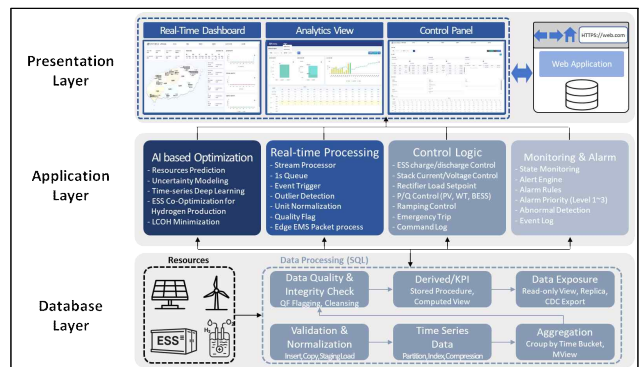
[표 2] 그린수소 운영을 위한 최적화 모델 파라미터

| 파라미터 | 설명 | 단위 | 적용 값 |
|------|---------|------|------|
| T | 시간 스텝 수 | Step | 96 |

| 파라미터 | 설명 | 단위 | 적용 값 |
|-----------------------|---------------|-------------------------------------|--------------|
| Δt | 시간 간격 | h (hour) | 0.25 (15/60) |
| $P^{EL, \max}$ | 수전해설비 최대 전력 | MW | 1.2 |
| $P^{EL, \min}$ | 수전해설비 최소 전력 | MW | 0.45 |
| R^{up} | 수전해설비 램프업 한계 | MW | 0.3 |
| R^{down} | 수전해설비 램프다운 한계 | MW | 0.3 |
| $N^{start, \max}$ | 허용 가동 횟수 | 회 | 2 |
| α_{H_2} | 수소 변환 계수 | kg/MWh | 20 |
| $\pi_{H_2}^{max}$ | 수소 판매 단가 | 원/kg | 4,000 |
| $P^{ch, \max}$ | ESS 최대 충전 전력 | MW | 1 |
| $P^{dis, \max}$ | ESS 최대 방전 전력 | MW | 1 |
| $E^{ESS, \max}$ | ESS 최대 잔여 에너지 | MWh | 1.6 |
| $E^{ESS, \min}$ | ESS 최소 잔여 에너지 | MWh | 0.4 |
| E_0 | ESS 초기 잔여 에너지 | MWh | 1 |
| η_{ch} | ESS 충전 효율 | - | 0.95 |
| η_{dis} | ESS 방전 효율 | - | 0.95 |
| SOC^{\min} | SOC 하한 | % | 20 |
| SOC^{\max} | SOC 상한 | % | 80 |
| EF_{grid} | Grid 탄소 배출 계수 | tCO ₂ /MWh | 0.4 |
| $\lambda_{H_2}^{max}$ | 허용 탄소 계수 | tCO ₂ /kg-H ₂ | 0.004 |
| P_t^{PV} | 태양광발전 프로파일 | MW | 그래프 참조 |
| P_t^{WT} | 풍력발전 프로파일 | MW | 그래프 참조 |
| π_t^{grid} | 계통 전력 단가 | 원/MWh | 그래프 참조 |

2.2 통합 운영을 위한 시스템 아키텍처 설계

본 연구에서는 재생에너지-ESS-수전해 설비로 구성된 분산 자원(DER)의 효율적 운영을 위해 데이터의 수집부터 활용까지 전 과정을 포괄하는 통합 데이터 처리 구조를 정의하였다. 제안된 구조는 다양한 이종 설비에서 발생하는 데이터를 안정적으로 수집하고, 데이터 품질을 확보하기 위한 검증 과정을 거친 후, 장기 저장 및 분석이 가능한 형태로 관리하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 실시간 데이터 스트리밍 기반의 수집 계층과 데이터 정합성 검증 및 전처리 모듈, 그리고 시계열 데이터베이스 기반 저장 구조를 포함하는 다계층 데이터 처리 아키텍처를 설계하였다. [그림1]



[그림 1] 분산자원 통합 운영을 위한 관리·제어 플랫폼 아키텍처
 재생에너지 기반 그린수소 통합 시스템의 안정적 운영과 AI 기반 최적화를 위해, 수전해 시스템 및 연계 설비(PV, WT, ESS)를 대상으로 유닛별 데이터 취득 항목을 체계적으로 정의하였다. 데이터 항목은 설비의 운전 상태, 성능 평가, 이상 진단, 안전성 확보 및

에너지 흐름 최적화를 동시에 지원할 수 있도록 구성하였다.

수전해 시스템은 그린수소 생산의 핵심 설비로서, 운전 효율 및 안전성 확보를 위해 다층적인 데이터 수집이 요구된다. 이에 따라 본 연구에서는 수전해 시스템의 데이터를 크게 운전 데이터, 공정 데이터, 안전-품질 데이터, 전력 및 에너지 데이터, 상태 및 알람 데이터로 구분하여 정의하였다.

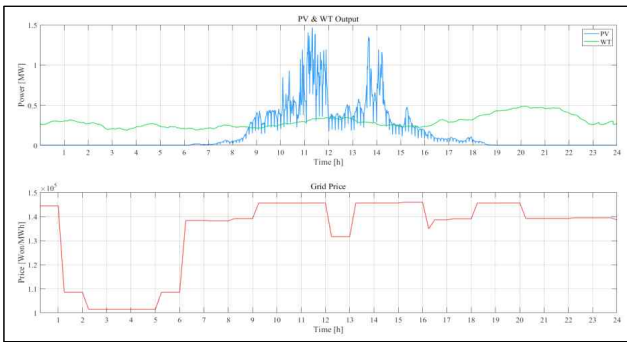
재생에너지 발전 시스템은 출력 변동성이 크기 때문에 정밀한 계측과 데이터 확보가 필수적이다. 본 연구에서는 풍력(WT) 및 태양광(PV) 설비의 안정적 운영과 성능평가를 위해 전기적, 기계적, 환경적 계측 항목을 포함하는 데이터 구조를 정의하였다.

에너지저장장치(ESS)는 단기 변동성 대응을 위한 핵심 설비로서, 배터리 상태 및 전력 흐름에 대한 정밀한 데이터 수집이 요구된다. 본 연구에서는 ESS 데이터를 전기적, 열적, 상태 진단 데이터로 구분하여 정의하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 데이터 아키텍처

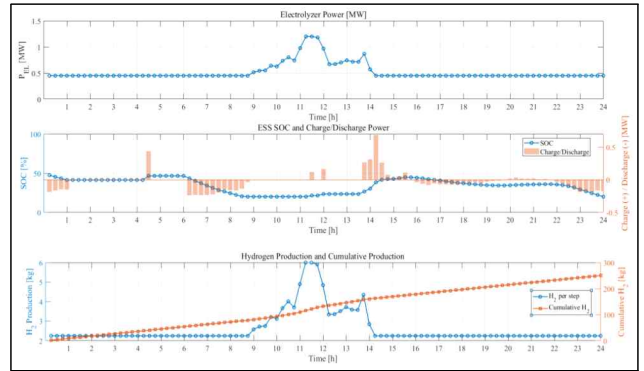
3.1 MILP(Mixed-Integer Linear Programming) 기반 시뮬레이션 결과

MILP 기반 최적화를 수행하기 위하여 재생에너지(PV 및 WT) 발전 프로파일과 전력단가(원/MWh)를 입력 변수로 설정하고, ESS의 초기 SOC는 50%로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 전체적으로 재생에너지 발전량은 시간에 따라 큰 변동성을 보이며, 특히 태양광 발전은 일사량에 따라 낮 시간대에 급격히 증가하는 반면, 풍력 발전은 상대적으로 불규칙한 패턴을 나타낸다. [그림2]

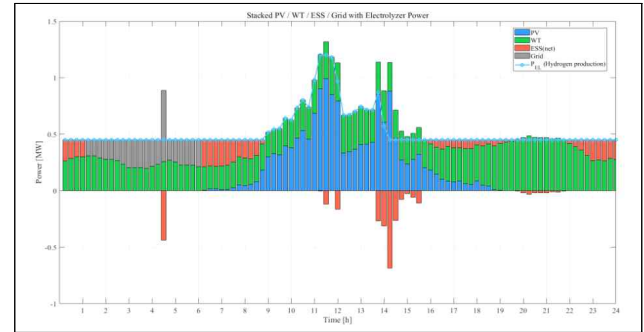


[그림 2] 재생에너지(PV, WT) 프로파일 및 시간별 전력 단가
이러한 재생에너지의 출력 변동성은 수전해 설비와 같은 전력 소비 설비의 안정적 운영을 저해하는 주요 요인으로 작용한다. 특히, 수전해 시스템은 일정 수준 이상의 연속적인 전력 공급이 요구되며, 급격한 출력 변동은 효율 저하, 빈번한 기동/정지, 그리고 설비 열화로 이어질 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 ESS를 활용하여 재생에너지 출력 변동을 완화하고, 이를 기반으로 수전해 설비의 운전 안정성과 생산 효율을 동시에 확보할 수 있는 운영 전략을 검증하고자 시뮬레이션을 수행하였다. ESS는 단기적인 전력 불균형을 조정하는 역할을 수행하며, 수전해 설비는 잉여 전력을 활용하여 수소를 생산하는 장기 에너지 저장

수단으로 기능함으로써 두 시스템 간의 상호 보완적 운전이 가능함을 확인하였다.



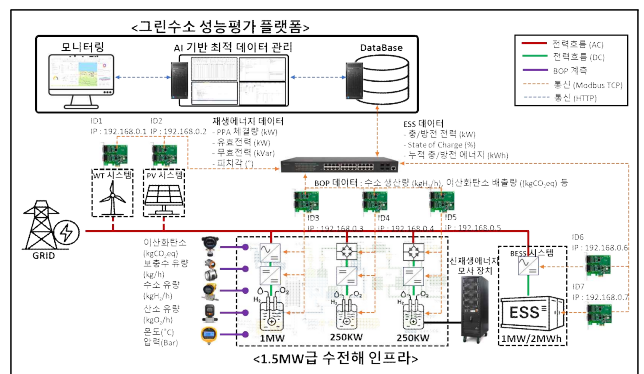
[그림 3] 수전해 설비 및 ESS 출력 조정에 따른 수소 생산량 결과적으로, 본 시뮬레이션은 재생에너지 변동성이 큰 환경에서 ESS와 수전해 설비를 연계한 통합 운영 전략의 타당성을 검증하고, 향후 AI 기반 적응형 제어 및 최적화 기법 적용을 위한 기초 데이터를 확보하는 데 목적이 있다.



[그림 4] 재생에너지 기반 수전해 운영 시뮬레이션 결과

3.2 AI 기반 그린수소 성능평가 플랫폼

재생에너지 기반 그린수소 생산 시스템과 AI 기반 통합 운영 플랫폼을 구축하기 위해 전력계통, 재생에너지, 수전해 설비, ESS, 그리고 데이터 기반 AI 운영 플랫폼이 유기적으로 연계된 구조로 구성하였다.



[그림 5] 그린수소 통합 플랫폼 아키텍처

우선, 하위 계층에는 실제 물리적 설비로서 전력계통(Grid), 태양광 및 풍력 발전원, 그리고 수전해 시스템과 ESS가 포함된다. 재생에너지 발전원에서 생산된 전력은 수전해 설비로 공급되어 수소 생산에 활용되며, 잉여 전력 또는 출력 변동은 ESS를 통해

참고문헌

- [1] Lesniak, Angelina, et al. "Advanced scheduling of electrolyzer modules for grid flexibility." 2025 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2025.

흡수 및 방출되어 전력 수급 균형을 유지한다. 특히, 수전해 설비는 모듈 단위로 구성되어 병렬 운전이 가능하며, 각 모듈의 상태 및 출력이 개별적으로 제어될 수 있도록 설계되었다.

중간 계층은 데이터 수집 및 처리 영역으로, 각 설비에서 발생하는 전력, 유량, 온도, 압력, 상태 정보 등의 운영 데이터를 실시간으로 수집하여 통합 DB에 저장한다. 수집된 데이터는 전처리 및 검증 과정을 거쳐 시계열 데이터 형태로 관리되며, 향후 분석 및 최적화 알고리즘의 입력 데이터로 활용된다.

상위 계층에는 AI 기반 운영 플랫폼이 위치하며, 이는 데이터 분석, 예측, 최적화 및 제어 기능을 수행한다. 해당 플랫폼은 재생에너지 발전량 예측, 부하 예측, 수전해 및 ESS 운전 최적화, 그리고 이상 진단 기능을 포함하며, 강화학습 또는 최적화 기반 알고리즘과 연동되어 실시간 운영 전략을 도출한다. 또한, 사용자 인터페이스(UI)를 통해 운영자는 시스템 상태를 모니터링하고, 주요 성능 지표를 확인하며, 필요시 제어 명령을 수행할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 재생에너지 출력 변동에 대응하기 위한 그린수소 통합 시스템의 경제적 운영을 목적으로, MILP 기반 최적화 모델을 수립하고 시뮬레이션을 통해 그 유효성을 검증하였다. 제안된 모델은 수소 생산 수의 극대화 및 계통 전력 구매 비용 최소화를 동시에 달성하는 목적함수를 기반으로 하며, ESS 충·방전 제약, 수전해 설비의 기동·정지 및 Ramp rate 제약, 탄소 배출 제한 조건을 통합적으로 반영하였다. 시뮬레이션 결과, PV 및 WT 발전 프로파일의 변동성이 큰 환경에서도 ESS와 수전해 설비의 상호 보완적 운영을 통해 안정적인 수소 생산이 가능함을 확인하였다. 또한, 수전해 시스템(PV, WT, ESS) 각 유닛의 운전·공정·안전·에너지 데이터를 체계적으로 정의하고, 실시간 스트리밍 기반의 다계층 데이터 처리 아키텍처를 설계하였다. 이를 토대로 재생에너지 발전량 예측, 이상 진단, 수전해·ESS 운전 최적화 등의 기능을 통합하는 AI 기반 운영 플랫폼의 개념 구조를 제시하였다. 본 연구에서 구축된 데이터 수집·관리 구조 및 플랫폼 아키텍처는 향후 강화학습(RL) 기반 AI 적응형 운영 전략의 실증 적용을 위한 핵심 기반 인프라로 활용될 수 있다.

향후 연구에서는 본 연구에서 수립된 MILP 모델 및 시뮬레이션 데이터를 기반으로 강화학습 에이전트를 학습시키고, 기존 MILP 최적화 대비 계통 의존도 감소 및 실시간 의사결정 성능을 비교·분석할 예정이다. 또한, 제주 실증 현장의 실제 설비 데이터를 활용한 AI 플랫폼의 성능 검증 및 현장 적용 가능성 실증을 수행할 계획이다.

감사의 글

이 연구는 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발특구진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2025-25444452)
본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업(C6-2410-38)을 재원으로 수행한 연구과제의 결과입니다.