

# 이중정산 전력시장의 MEP/IMBP 정산규칙을 반영한 재생에너지 기반 마이크로그리드의 수익최적화 전략

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

\*한국에너지기술연구원 전력시스템연구실

sjyoon@kier.re.kr

Profit Optimization Strategy for a Renewable Energy-Based Microgrid under MEP/IMBP  
Settlement Rules

Seung-Jin Yoon\*, Byungki Kim\*, Kyung-Sang Ryu\*, Chan-Soo Kim\*, Yang-Hyun Nam\*, Choi  
Mi-gon\*, and Dae-Jin Kim1\*

\*Electric Power System Research lab, Korea Institute of Energy Research

제주도에서 시범적으로 운영 중인 실시간 전력시장은 이중정산 체계를 기반으로 재생에너지 자원의 정산을 수행한다. 이 시장에서는 계량기반정산(MEP)을 통해 실제량 전력량에 대한 정산이 이루어지고, 허용오차(dead-band)를 초과하는 발전 편차에 대해서는 불균형정산금(IMBP)이 비대칭적으로 부과된다. 이와 같은 정산구조에서는 재생에너지의 출력 변동성, 발전예측오차 및 입찰전략이 정산 수익에 직접적인 영향을 미치며 이로 인해 MEP/IMBP 정산규칙을 반영한 마이크로그리드 내부 자원의 통합 운영전략이 중요하다. 이를 위해 본 논문은 MEP/IMBP 정산규칙 하에서 재생에너지 및 ESS가 연계된 마이크로그리드의 수익최적화를 위한 MILP 기반 운영전략을 제안한다. 제안한 전략은 실시간 SMP, 급전지시량, 재생에너지 예측발전량 및 입찰 전략을 기반으로 정산수익과 불균형 페널티를 고려한 목적함수를 구성하고, ESS 운전 제약 및 재생에너지 출력제한 조건을 고려하여 제약조건을 수식화한다. 본 연구의 유효성을 검증하기 위해 2025년도 KPX 실시간 전력시장 SMP 데이터를 활용한 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과 불균형정산 비용을 완화하고 운영수익을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

## 1. 서론

재생에너지 보급 확대에 따라 태양광·풍력의 계통 접속 비중이 지속적으로 증가하면서, 출력 변동성과 예측오차가 계통 운영과 재생에너지 사업자의 정산 수익에 미치는 영향이 커지고 있다. 최근 한국전력거래소(KPX)는 2024년 제주 시범사업을 시작으로 기존의 하루전(DA) 단일시장에 실시간(RT) 시장을 결합한 이중정산 체계를 단계적으로 도입하고 있으며, 제주 시범사업은 향후 육지 계통으로 확대 적용되는 정산체계의 선행 모델로서 운영되고 있다 [1].

제주 이중정산 체계에서 재생에너지 사업자는 하루전 시장에서 입찰한 발전계획에 대해 하루전 SMP(계통한계가격) 기반의 정산을 받고, 실시간 시장에서는 계량기반정산(MEP)에 따라 실제량 전력량 전량을 실시간 SMP로 정산받는다. 하지만 하루전 입찰량과 실시간 실적의 편차가 사전에 정해진 허용오차를 초과할 경우 불균형정산금(IMBP)이 추가로 부과된다 [1]. 해당 정산 규칙은 MEP 정산은 편차 전량을 실시간 SMP로 정산하되 실시간 가격이 음수인 구간에서는 페널티가 부과되지 않으며, IMBP는 허용오차 이내 편차에 대해서는 면제되고 초과분에 대해서 과금이 부여된다. 따라서 재생에너지 사업자의 수익은 단순히 총 발전량이나 편차 크기가 아니라 실시간 SMP 가격과 허용오차 근처에서의 편차 배분에 따라 크게 달라지며, 재생에너지 출력제한-ESS 총

발전 스케줄링을 통합적으로 운영하여 MEP 정산수익을 극대화하는 의사결정이 요구된다. 그러나 기존의 재생에너지 입찰-운영 최적화 연구들은 주로 유럽형 균형시장을 대상으로 정식화되어 왔으며 [2], 국내 MEP/IMBP의 허용오차 이내 편차 면제와 음수 SMP 구간 페널티 면제와 같은 구간별 비대칭을 그대로 반영하기 어렵다. 이에 본 논문에서는 MEP/IMBP 정산규칙 하에서 재생에너지 및 ESS가 연계된 마이크로그리드의 수익최적화를 위한 혼합정수선형계획(MILP) 기반 운영전략을 제안한다. 제안 방법은 실시간 SMP, 급전지시량, 재생에너지 예측발전량 및 입찰 전략을 바탕으로 정산수익과 불균형 페널티를 동시에 반영한 목적함수를 구성하고, ESS의 충·방전 및 SOC(State of Charge) 제약, 재생에너지 출력제한 조건을 포함한 선형 제약으로 정식화한다. 이를 통해 마이크로그리드 내부 자원의 실시간 협조운전을 수행하여 불균형정산 비용을 완화하고 총 운영수익을 향상시키는 것을 목표로 한다. 본 연구의 유효성은 2025년도 KPX 실시간 전력시장 SMP 데이터를 활용한 시뮬레이션을 통해 검증한다.

## 2. MEP/IMBP 기반 수익최적화 전략

본 장에서는 제주 이중정산 체계의 MEP/IMBP 정산규칙을 반영한 MILP 기반 마이크로그리드 운영전략의 구조와 작동 원리를 설명한다. 제안된 알고리즘은 하루를  $\Delta t = 15 \text{ min}$  단위의  $N = 96$  스텝으로 이산화하고, 하루전 입찰량 기준 허용오차를 기반으

로 실시간 편차를 분해하여 IMBP의 구간별 비대칭성을 선형 제약으로 수식화한다. 마지막으로 실시간 SMP가 음수인 구간에서 MEP 페널티가 부과되지 않는 규칙은  $\max(0, e)$ 을 통해 목적함수에 직접 반영한다. 이를 위한 MILP 목적함수는 다음과 같다.

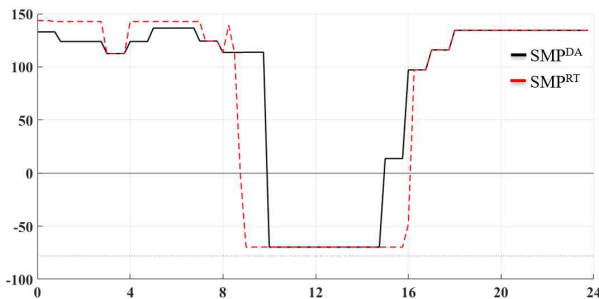
$$\begin{aligned} \max \sum_{t=1}^N \Delta t (smp_{DA}(t) \cdot P_{sched}(t) + smp_{RT}(t) \cdot (d^+(t) - d^-(t)) \\ - \max(0, smp_{RT}(t)) \cdot (d_{pen}^+(t) + d_{pen}^-(t))) \end{aligned} \quad (1)$$

위 수식(1)의 첫 항은 하루전 정산수익, 두 번째 항은 MEP 규칙에 따른 실시간 편차 전량의 정산수익, 세 번째 항은 허용오차 초과분에 부과되는 IMBP 페널티를 나타낸다. 수식(1)의 편차 제약에 사용되는  $d^+(t)$ ,  $d^-(t)$ ,  $d_{pen}^+(t)$ ,  $d_{pen}^-(t)$ 는 아래와 같이 구성된다.

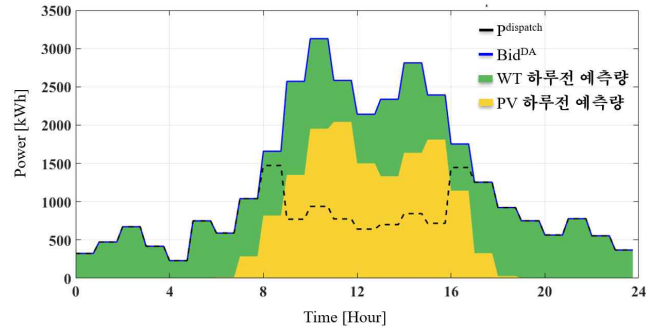
$$\begin{aligned} P_{sched}(t) &= P_{PV}(t) + P_{WT}(t) \\ P_{actual}(t) &= c_{PV,RT} P_{PV}(t) + c_{WT,RT} P_{WT}(t) + P_{dis}(t) - P_{ch}(t) \\ P_{actual}(t) - P_{sched}(t) &= d^+(t) - d^-(t) \\ d^+(t) - d_{pen}^+(t) &\leq D_{DB} \quad d^-(t) - d_{pen}^-(t) \leq D_{DB} \end{aligned} \quad (2)$$

### 3. 사례연구 및 시뮬레이션 결과

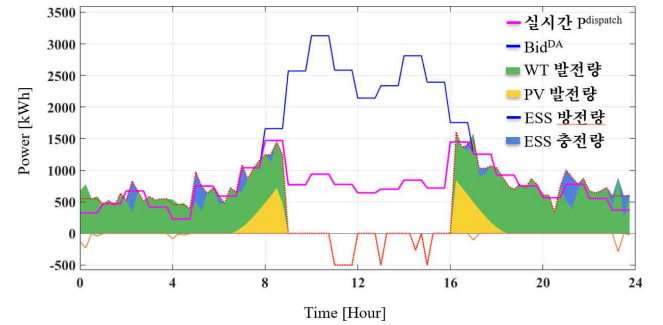
제안된 기법의 성능을 입증하기 위해 본 장에서는 2025년도 한국전력거래소 실시간 전력시장 SMP 데이터를 활용한 시뮬레이션 기반 사례 분석을 수행하였다. PV(3.0 MW), WT(1.5 MW), ESS(500 kW / 1.0 MWh)가 참여하는 마이크로그리드를 대상으로 하며, ESS는 SOC 제약(10~90%)과 일 단위 순환 조건 및 발전량 허용오차를 고려하여 실시간 시장 조건 하에서 MEP/IMBP 정산규칙을 반영한 마이크로그리드 운영을 통한 수익성 확보 및 효과를 검증한다. <그림 1>은 해당 일자의 시장가격, 재생에너지 예측, 하루전 입찰량, 실시간 급전지시량을 나타내며, 음수 SMP 구간에서 ISO가 P\_dispatch를 마이크로그리드 발전 가능량의 약 30% 수준으로 줄어드는 상황을 확인할 수 있다. <그림 2>의 운전 결과에서, 제안 MILP는 음수 SMP 구간에 재생에너지 출력을 제한하고 ESS를 만충전 운영하여 P\_actual을 P\_sched보다 충분히 낮게 유지함으로써 MEP수익을 극대화한다.



[그림 1] 하루전 시장가격 및 실시간 시장 가격



(a) 하루전 재생에너지 예측발전량, 입찰량 및 급전지시량



(b) 제안된 알고리즘을 사용한 실시간 PV·WT 발전량 / ESS 충·방전 운전 결과

[그림 2] 시뮬레이션 기반 사례 분석 결과

### 3. 결론

본 논문은 제주 이중정산 시장의 MEP/IMBP 정산규칙을 직접 반영한 재생에너지 기반 마이크로그리드의 MILP 기반 수익최적화 전략을 제안하였다. 제안전략은 음수 SMP 구간 페널티 면제와 같은 정산규칙상의 비대칭성을 선형 제약과 목적함수에 반영하였으며, 실시간 급전지시량( $P_{dispatch}$ ) 값을 사용하여 ESS 충·방전과 재생에너지 출력제한이 동시에 협조 운전되도록 수식화하였다. 2025년도 KPX SMP 데이터 기반 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과 불균형정산 비용을 완화하면서 일일 운영수익을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 향후 연구에서는 EV, DR, 수전해 등을 포함한 다양한 자원을 포함하는 마크로그리드로의 확장, MILP를 활용한 출력 데이터를 지도학습 데이터로 활용한 실시간 AI 제어기 개발을 진행할 예정이다.

#### 감사의 글

이 연구는 2026년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20031919)  
이 연구는 2026년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로  
한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P267400009)

#### 참고문헌

[1] KPX 제주 시범사업 운영 매뉴얼  
[2] J. M. Morales, A. J. Conejo, H. Madsen, P. Pinson, and M. Zugno, Integrating Renewables in Electricity Markets: Operational Problems. New York, NY, USA: Springer, 2014.