

개정 전력시장 운영규칙 기반 재생에너지 자원의 MILP 기반 최적제어 및 급전지시 추종 분석

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

MILP-based Optimal Control and Dispatch-Following Analysis of Renewable Resources under the Revised Electricity Market Operation Rules

Seung-Jin Yoon*, Kyung-Sang Ryu*, Chan-Su Kim*, Yang-Hyeon Nam*, Mi-Gon Choi*, Jeon Deok Hwan*, Dae-Jin Kim*
Electric Power System Research Team, Korea Institute of Energy Research*

Abstract - 2026년 개정된 전력시장 운영규칙은 급전가능재생에너지자원에 대해 급전지시 대비 실제 출력의 편차를 기준으로 하는 대칭형 임밸런스 페널티(IMBP)를 도입하였다. 본 논문은 개정 정산 규칙을 분석하고, 이중정산 수익에서 IMBP를 차감한 순수익을 목적함수로 하는 PV, WT, ESS로 구성된 VPP 모델의 통합 MILP 최적제어 모델을 수식화한다. KPX 실측 SMP 기반 시나리오 시뮬레이션을 통해 급전지시 편차를 허용하는 MILP 최적화(Case 1)와 허용오차 내 운영으로 제약한 MILP 최적화(Case 2)를 비교한 결과, Case 1은 미달발전 구간에서 급전지시를 추종하지 않으면서도 페널티를 거의 부담하지 않아 더 높은 수익을 얻었으며, 이는 개정 규칙에서 미달발전 구간의 임밸런스 페널티 적용가격이 상대적으로 낮게 설정된 특성에 기인하는 것으로 분석된다.

1. 서 론

태양광, 풍력 등 재생에너지 보급이 빠르게 확대되면서 변동성 자원의 전력시장 통합과 계통 신뢰도 확보가 핵심 과제로 부상하고 있다. 발전 출력의 변동성과 단기 예측오차는 계통 운영뿐 아니라 사업자의 시장 정산수익에도 직접적인 영향을 미치며 이에 따라 정산 규칙의 설계가 자원의 운영 전략을 좌우하는 요인이 된다. 한국전력거래소(KPX)는 2024년부터 제주 지역에서 하루전(DA) 단일시장 중심 정산에 실시간(RT) 시장 정산을 결합한 이중정산 기반 재생에너지 입찰제 시범사업을 운영하고 있으며 이는 향후 육지 계통으로 확대될 정산 체계의 선행 모델로서 중요한 의미를 갖는다. 2024년부터 2026년까지 운영된 재생에너지 입찰제 전력시장 운영규칙에서는 임밸런스 페널티가 초과발전에만 부여되는 형태로 운영되었다. 이로 인해 발전사업자가 필요이상의 재생에너지 자원을 과잉할 하는 행태가 발생하여 2026년 개정된 전력시장 운영규칙[1]은 급전가능재생에너지 자원에 대한 임밸런스 페널티를 하루전 입찰량이 아닌 급전지시(SET_POINT) 대비 실제 계량값의 편차를 기준으로 하는 대칭형 구조로 개편하였다. 이는 재생에너지 자원이 계통 운영자의 급전지시를 충실히 추종하도록 유도하기 위한 제도적 장치로 초과발전과 미달발전 양방향의 편차를 허용오차 이내로 관리하도록 요구한다. 다만 페널티 적용가격은 편차의 방향과 실시간 가격 조건에 따라 차등 적용되므로, 실제 부과되는 페널티의 크기는 운영 시점의 시장 상황에 따라 달라진다.

재생에너지 자원의 시장참여와 운영에 관한 기존 연구는 자원 운영 최적화, 전력시장 설계, 정산 메커니즘 및 분산자원 시장참여 전략 등 다양한 관점에서 수행되어 왔다. 그러나 기존 연구들은 재생에너지 자원의 입찰전략, 운영 최적화 또는 일반적인 시장설계 분석에 주로 초점을 두고 있어 2026년 새롭게 개편된 제주 재생에너지 전력시장 시범사업의 정산 구조 변화가 사업자 행태에 미치는 효과를 정량적으로 분석하거나 정산제도 개선 방안을 다룬 연구는 부족한 상황이다. 이에 본 논문에서는 2026년 새롭게 개정된 재생에너지 전력시장 시범사업 시장제도 하에서 PV, WT, ESS로 구성된 VPP 모델의 통합 MILP 최적제어 모델을 수식화하고 급전지시 편차를 허용하는 MILP 최적화(Case 1)와 허용오차 내로 제약한 MILP 최적화(Case 2)를 비교하여

현 제도 하에서 자원의 급전지시 추종 행태를 분석하고 향후 정산제도 개선 방향을 제시한다.

2. 본 론

2.1 제주 재생에너지 전력시장 시범사업 제도

제주 재생에너지 전력시장 시범사업의 일일 정산금은 하루전 시장 결과, 실시간 시장 결과, 그리고 급전지시 결과를 입력으로 하여 매 거래시간 t 에 대해 식 (1)과 같이 다섯 가지 항목의 합으로 산정된다.

$$Revenue_t = MEP_t + TPCP_t + MAP_t + MWP_t - IMBP_t \quad (1)$$

전력량 정산금(MEP)은 하루전 낙찰량을 SMP_{DA} 로 실제 발전량과의 편차를 SMP_{RT} 로 정산하며 변동비보전 정산금(MWP)과 기대이익 정산금(MAP)은 급전지시 이행 및 음수 가격 구간의 손실을 보전한다. 다음으로 용량 정산금(TPCP)은 가용용량에 비례하는 고정 보상으로 안정적 기반 수익을 제공하며 임밸런스 페널티(IMBP)는 급전지시 미이행 편차 전력량의 정산금을 환수하는 항목이다. 2026년 개정 운영규칙 [1]은 IMBP를 하루전 입찰량이 아닌 급전지시 $P_{set}(SET_POINT)$ 대비 실제 계량값 P_{actual} 의 편차를 기준으로 하는 대칭형으로 개편하여 식(2)과 같이 허용오차 초과분에 부과한다.

$$IMBP(t) = \max\{P_{actual} - P_{set}\} - ICDM \cdot IMB_{TOL} \cdot 0 \cdot \Delta t \cdot IMBPP \quad (2)$$

허용오차 비율 IMB_{TOL} 은 2026년부터 6%로 축소되었으며 특정 구간(급전지시 및 음수 SMP 구간)에서 1.5%가 적용된다. 페널티 적용가격 $IMBPP$ 는 편차 방향과 실시간 가격 조건에 따라 차등 적용되는데 미달발전($P_{actual} < P_{set}$)은 실시간 가격이 음수이거나 급전지시가 가용용량 미만인 일반적 조건에서 적용가격이 0으로 설정되어 초과발전 대비 페널티가 상대적으로 낮게 책정되어 있다. <표 1> 개선된 IMBP 페널티 구조를 나타낸다.

<표 1> 대칭형 IMBP 페널티 구성

시스템·급전 상황	과발전 ($P_{actual} > P_{dispatch}$)	미달발전 ($P_{actual} < P_{dispatch}$)
$SMP_{RT} \leq 0$ (음수가격·잉여)	$\max\{-bid_{min}, 0\} \cdot 2.5 + u_R$	면제
$SMP_{RT} > 0$, $P_{dispatch} < RA$	$\max\{SMP_{RT} - bid_{min}, 0\} + u_R$	면제
$SMP_{RT} > 0$, $P_{dispatch} \geq RA$	예비력가격	예비력가격

2.2 MILP 최적제어 모델

제주 재생에너지 시범사업 제도 분석을 위해 다종 자원으로 구성된 VPP 모델을 대상으로 시뮬레이션을 수행한다. 대상 모델은 PV 3대, WT 2대, ESS 2대로 구성되어 단일 접속점(PCC)

을 통해 계통과 연계된다. PV, WT는 인버터 출력제어로 가용 발전량 이내의 감발이 가능하고 ESS는 효율 및 SOC 범위 내에서 충방전한다. 자원 합산 출력 P_{actual} 은 식 (3)과 같다.

$$P_{actual}(t) = \Sigma P_{pv} + \Sigma P_{wt} + \Sigma P_{dis} - \Sigma P_{ch} \quad (3)$$

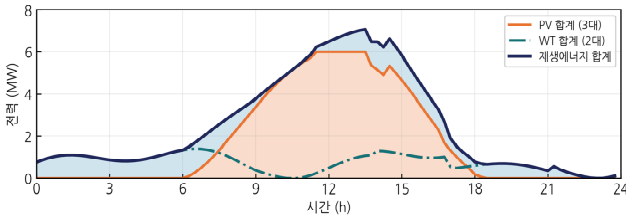
목적함수는 식(4)과 같이 이중정산 전력량 정산금(MEP)에서 식 (1)의IMBP를 차감한 일일 순수익이다. MEP는DA 발전계획 P_{set} 의 SMP_{DA} 정산과 실시간 편차의 SMP_{RT} 정산의 합으로 정의된다.

$$\max \Sigma [SMP_{DA} \cdot P_{set} + SMP_{RT} (P_{actual} - P_{set})] \cdot K \cdot \Delta t - \Sigma IMBP(t) \quad (4)$$

해당 목적함수 내에서 두가지 케이스를 비교를 위해 Case 1(급전지시 편차 허용 MILP)는 식 (4)을 제약 없이 최적화하여 전체 수익 최적화만을 고려하고, Case 2(허용오차 내 제약 MILP)는 모든 시간대에서 $|P_{actual} - P_{set}| \leq ICDM \cdot IMB_{TOL}$ 을 강제하여 항상 허용오차 내에서 운영하도록 한다.

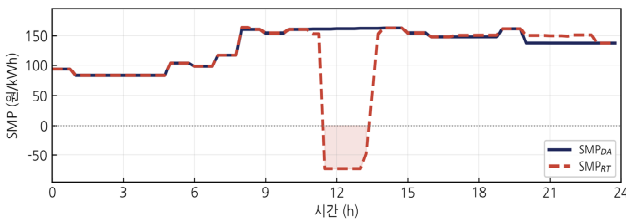
3. 시뮬레이션 결과

제주 재생에너지 시범사업 제도 분석을 위한 시뮬레이션 대상은 다중 자원을 포함한 VPP 모델로 구성하였으며 이중 재생에너지는 PV 3대와 WT 2대로 구성된다. 재생에너지 가용 발전 패턴은 <그림 1>과 같다. PV는 정오를 전후하여 최대 6 MW 수준의 출력을 보이고, WT는 상대적으로 완만한 패턴으로 발전하여 재생에너지 합산 출력은 정오~오후에 최대 약 7 MW로 발전한다.



<그림 1> 재생에너지 자원의 가용 발전 패턴(PV · WT)

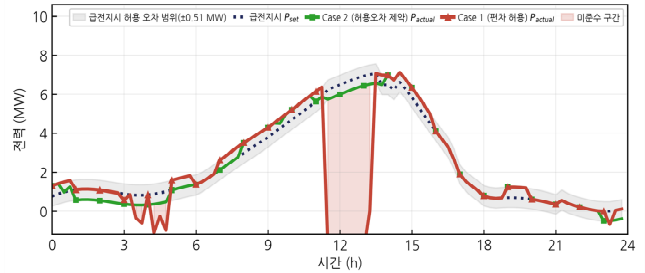
시장 가격은 KPX 2025년 04월 14일 SMP 실측 데이터를 사용하며 그림2와 같다. 정오11.5~13.25h 구간에서 SMP_{RT} 가 최저 -72.2원/kWh까지 하락하여 음수 가격이 형성되고 저녁 시간대에는 160원/kWh 내외의 고가가 나타난다. 급전지시 P_{set} 은 DA 발전계획(재생에너지 예측)으로 두고 허용오차는 정격 가용용량(8.5 MW)의 6%인 0.51 MW를 적용한다.



<그림 2> 시뮬레이션에 사용된 SMP 데이터(DA, RT)

그림3은 정산제도 비교 분석을 위한 각 케이스별 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 2장에서 설명한 바와 같이 Case 2는 급전지시 허용 오차 범위(± 0.51 MW) 내에서 운영되지만 Case 1의 경우 이러한 제약이 없기 때문에 특정 구간에서 수익 극대화를 위해 급전지시를 벗어나 미달발전하는 것을 확인할 수 있다. 첫 번째로 정오 음수SMP 구간(11.5~13.25h)에서는 발전량을 감발하여 매진 손실을 회피하고 이후 두 번째로 SMP가 가장 낮은 새벽 저가 구간(3~5h)에서는 저가에 매입한 전력으로 ESS를 충전하였다가 저녁 고가 시간대에 방전하는 차익거래 수익을 실현한

다. 이로 인해 계통 전력을 흡수하여 출력이 급전지시를 어기는 것을 확인할 수 있다. 최종적으로 24시간 시뮬레이션 결과를 식 (4)의 순수익 정산으로 산정한 두 케이스의 최종 정산금액은 표 2와 같다. Case 1의 순수익은 10,693천원으로 Case 2의 9,345천원 대비 +1,348천원(+14.4%) 높으며 이는 Case 1이 급전지시를 약 3.5시간(17.1 MWh) 미준수했음에도 부담한 IMBP가 0원이기 때문이다. 이는 식 (2)의 미달발전 적용가격이 특정 조건에서 0으로 설정되거나 예비력가격 수준으로 매우 낮게 설계되어 있어 사업자가 페널티 부담 없이 급전지시를 이탈할 수 있기 때문이다. 반면 Case 2는 허용오차 내 운영 제약으로 인해 음수 SMP 감발과 저가 구간 차익거래에 따른 추가 수익 기회를 포기하게 된다.



<그림 3> Case 1, Case 2의 P_{actual} 및 급전지시 미준수 구간

<표 2> 운영 케이스별 일일 정산수익 비교 (천원)

정산항목	Case 1	Case 2
DA 정산	9,019.0	9,019.0
RT 정산	+1,674.4	+326.3
IMBP	0.0	0.0
순수익	10,693.4	9,345.2

4. 결 론

본 논문은 2026년 개정된 전력시장 운영규칙을 분석하고 이를 반영한 PV, WT, ESS 통합 MILP 최적제어 모델을 구현하여 급전지시 추종 행태를 정량 평가하였다. 시뮬레이션 결과, 수익을 극대화하는 Case 1은 미달발전 구간에서 급전지시를 추종하지 않으면서도 페널티를 거의 부담하지 않아 급전지시 추종 제약 운영 대비 +14.4%의 순수익을 얻었다. 이는 개정 규칙에서 미달발전 구간의 임밸런스 페널티 적용가격이 상대적으로 낮게 설정된 특성에 기인하는 것으로 분석되며 향후 미달발전 구간의 페널티 적용가격 보완과 다양한 SMP 분포에 대한 추가 분석이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2026년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. RS-2024-00509239)
이 연구는 2026년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임.
(RS-2024-KT231919)

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력거래소(KPX), "전력시장운영규칙 별표33 - 전력시장 제도개선 제주 시범사업에 대한 정산기준", 2026.4.28. 개정.
- [2] S.-J. Yoon, K.-S. Ryu, C. Kim, Y.-H. Nam, D.-J. Kim, B. Kim, "Optimal bidding scheduling of virtual power plants using a dual-MILP approach under a real-time energy market", *Energies*, vol. 17, no. 15, 3773, 2024.