

# 전력거래모델에 따른 가상발전소의 경제성 평가 방안에 관한 연구

왕종용\*\*\*, 김윤호\*, 황소연\*, 송두리\*, 노대석\*  
\*한국기술교육대학교, \*\*한국전기산업연구원  
e-mail : wangjy0115@koreatech.ac.kr

## A Study on the Economic Evaluation Method of Virtual Power Plant According to the Electricity Power Exchange Market Models

Jong-Yong Wang\*\*\*, Yun-Ho Kim\*, So-Yeon Hwang\*, Doo-Ri Song\*, Dae-Seok Rho\*  
\*Korea University of Technology and Education, \*\*Electrical industry Research Institute of Korea

### 요 약

최근, 태양광 및 풍력 등과 같은 재생에너지 도입이 증가하고 있지만, 기상 상황에 따라 출력 변동성 등의 문제를 가지고 있어, 다양한 분산자원을 하나의 발전소처럼 운용할 수 있는 가상발전소에 대한 관심이 증가하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 가상발전소를 비중양급전, 단독형 급전가능, 집합형 급전가능 전력거래 모델로 분류하고, ESS를 고려한 가상발전소의 운용 방안을 제안한다. 또한, 전력거래시장에 참여하는 가상발전소의 도입 타당성을 평가하기 위하여, 설치비용, 가상발전소 플랫폼의 구축비용, 운용비용, 임밸런스 페널티로 구성된 비용요소와 에너지 정산금, REC(renewable energy certificate) 정산금, 용량 정산금, 부가 정산금 등의 편익요소를 고려한 경제성 평가를 수행한다. 상기에서 제시한 경제성 평가 모델링과 운용 방안을 바탕으로 가상발전소의 도입 타당성을 평가한 결과, 집합형 급전가능 가상발전소의 전력거래 모델이 임밸런스 페널티를 효과적으로 저감시킬 수 있어 가장 경제성이 높게 평가됨을 알 수 있다.

### 1. 서 론

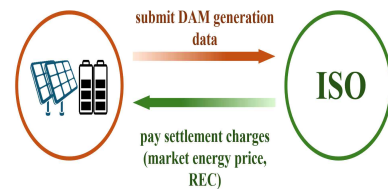
최근, 전세계적으로 탄소중립 목표 달성을 위하여 탄소 배출량이 적은 재생에너지의 도입이 증가하고 있다[1,2]. 하지만, 태양광 및 풍력 등과 같은 재생에너지는 기상상황에 따라 출력 변동성과 예측 불확실성에 의하여 전력수급의 불일치 및 출력제한 등의 문제를 가지고 있다[3,4]. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 재생에너지가 주요 전력공급 자원으로 활용될 수 있도록 본 논문에서는 가상발전소의 전력거래 시장 참여 모델인 비중양급전 가상발전소, 단독형 가상발전소와 집합형 가상발전소의 특성 분석을 수행하였다. 그리고 집합형 가상발전소에 ESS가 적용된 가상발전소 모델에 대하여, 전력계통의 출력 변동성을 최소화하여 임밸런스 페널티를 저감할 수 있는 집합형 가상발전소의 운용 방안을 제안한다.

또한, 전력거래시장에 참여하는 가상발전소의 도입 타당성을 평가하기 위하여, 건설비용, 운용비용, 임밸런스 페널티로 구성된 비용요소와 에너지 정산금, REC 정산금, 용량 정산금, 부가 정산금 등의 편익요소를 고려한 경제성 평가를 수행한다. 본 연구에서 제안한 방안으로 태양광전원과 ESS로 구성된 집합형 가상발전소를 운용하는 경우, 임밸런스 페널티를 효과적으로 저감시킬 수 있

어, 가장 경제성이 높게 평가됨을 알 수 있다.

### 2. 가상발전소의 전력거래시장 참여모델 특성 분석

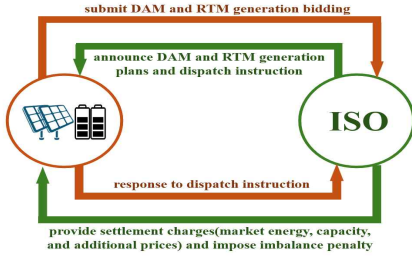
가상발전소의 전력거래시장 참여모델은 비중양급전용 가상발전소, 단독형 가상발전소, 집합형 가상발전소로 분류되며, 이에 대한 내용을 설명하면 다음과 같다. 먼저, 비중양급전용 가상발전소의 전력거래는 그림 1과 같이 계통 운용자로부터 직접적으로 전력거래에 참여하지 않고, 재생에너지 발전 사업자가 자체 발전계획량을 제출하여 출력량만큼 정산금을 지급받는 방식이다.



[그림 1] 비중양급전용 가상발전소의 전력거래 개념도

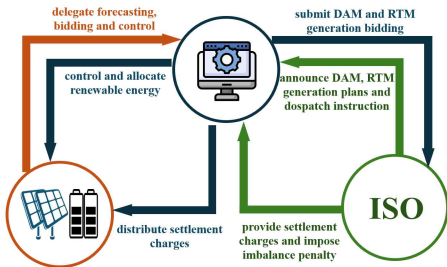
그리고, 단독형 가상발전소의 전력거래는 그림 2와 같

이 1[MW]~100[MW]까지 단독 규모의 재생에너지를 중앙 급전 발전기와 동일하게 운용하는 구조를 의미한다.

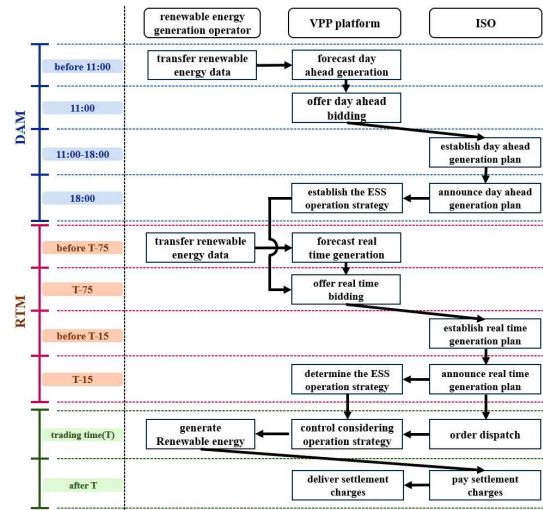


[그림 2] 단독형 가상발전소의 전력거래 개념도

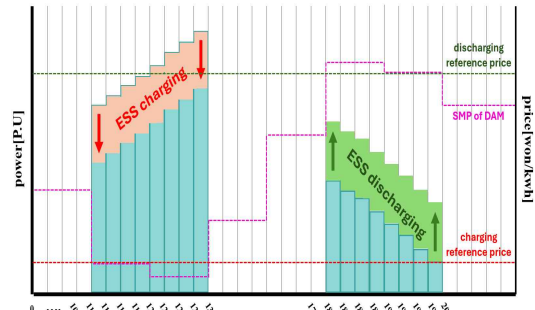
또한, 집합형 가상발전소의 전력거래는 그림 3과 같이 다수의 소규모 재생에너지를 하나의 발전자원으로 통합하여 전력거래 시장에 참여하는 구조를 나타낸다.



[그림 3] 집합형 가상발전소의 전력거래 개념도



[그림 4] ESS를 고려한 가상발전소의 운용 방안



[그림 5] 가상발전소의 ESS 충·방전 운용 전략

### 3. ESS를 고려한 가상발전소의 운용 방안

ESS를 고려한 가상발전소 플랫폼 사업자는 그림 4와 같이 하루 전 시장에 참여하여 낙찰받은 발전량에 대해서 익일 실시간 시장을 통해 전력을 계통에 공급한다. 즉, 플랫폼 사업자는 하루 전 시장에서 낙찰받은 발전량을 실시간 시장에서 15분 단위(24시간 기준 총 96회)로 ISO의 급전지시에 따라 ESS와 재생에너지로 제어한다. 이때, 가상발전소 플랫폼은 그림 5와 같이 수익의 극대화를 위하여 시간대별 SMP를 고려한 ESS의 운용 전략을 수립한다. 여기서, ESS의 운용전략은 시간대별 SMP의 하한치에서 ESS가 필요한 kWh 용량만큼 충전동작을 수행하고, SMP의 상한치에서 방전동작을 수행한다. 즉, 가상발전소 플랫폼 사업자는 예측 오차에 따른 발전량 변동을 최소화하여 ESS를 고려하여 운용하게 되면 임밸런스 페널티를 크게 저감할 수 있다. 이에 따라 에너지 정산금과 용량 정산금, 변동비보전 및 기대이익에 대한 부가 정산금을 추가로 확보함으로써 수익성을 크게 확보할 수 있다.

### 4. 전력거래모델에 따른 가상발전소의 경제성 평가 모델링

#### 4.1 비용요소

가상발전소의 비용요소는 설치비용, 가상발전소 플랫폼의 구축비용, 운용비용, 임밸런스 페널티 등으로 식 (1) ~ 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 설치비용은 식(1)과 같이 태양광 전원과 ESS를 설치하는데 소요되는 총 비용이며, 가상발전소의 플랫폼 구축비용은 식 (2)와 같이 S/W 및 센서 설치비용, 제어를 위한 인버터 유지보수 비용 등을 포함하는 H/W 비용이다. 또한, 운용비용은 식 (3)과 같이 가상발전소를 운용할 때 발생하는 비용이며, 임밸런스 페널티는 식 (4)와 같이 급전지시량과 실시간 발전량의 편차가 허용오차를 초과하면 발생하는 비용을 의미한다.

$$C_{con} = C_{PV} \cdot Q_{PV} + (C_{PCS} \cdot Q_{PCS} + C_{batt} \cdot Q_{batt}) \quad (1)$$

$$C_{plat} = (C_{set} + C_{sen}) \cdot Q_{PV} + C_{inv} \cdot k \quad (2)$$

$$C_{oper} = \begin{cases} C_{sub} \cdot k & \text{in aggregated VPP} \\ C_{con} \cdot r_{oper} & \text{in the others} \end{cases} \quad (3)$$

$$C_{IMBP} = \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^z (SMP_{RT}(i,j) - O_{RT}(i,j)) \times \max[P_{RT,G}(i,j) - P_{DO}(i,j) \cdot \epsilon_{IMBP}, 0] \quad (4)$$

여기서,  $C_{con}$  : 태양광 전원과 ESS의 총 건설비용(원),  $C_{PV}$  : 태양광 전원의 도입비용(원/MW),  $Q_{PV}$  : 태양광 전원의 설치용량(MW),  $C_{PCS}$  : PCS의 도입비용(원/MW),  $Q_{PCS}$  : PCS의 설치용량(MW),  $C_{batt}$  : 배터리 시스템의 도입비용(원/MWh),  $Q_{batt}$  : 배터리 시스템의 설치용량(MWh),  $C_{equip}$  : VPP 설비비용(원),  $C_{set}$  : S/W 설정비용(원/MW),  $C_{sen}$  : H/W 센서 설치비용(원/MW),  $C_{inv}$  : 인버터 유지보수 비용(원/MW),  $k$  : 태양광 전원 개소,  $C_{oper}$  : 운용비용(원),  $r_{oper}$  : 운용비에 대한 비율(%),  $C_{sub}$  : VPP 서비스 수수료(원),  $k$  : 태양광 전원 개소,  $C_{IMBP}$  : 임밸런스 페널티,  $SMP_{RT}(i,j)$  :  $i$  거래시간에서  $j$ 구간의 실시간 SMP(원),  $O_{RT}(i,j)$  :  $i$  거래시간에서  $j$ 구간의 실시간 입찰가격(원),  $P_{RT,G}(i,j)$  : 실시간 발전량,  $P_{DO}(i,j)$  :  $i$  거래시간에서  $j$ 구간의 급전지시량,  $\epsilon_{IMBP}$  : 임밸런스 페널티 허용오차

## 4.2 편익요소

가상발전소의 편익요소는 에너지 정산금, REC 정산금, 용량 정산금, 부가 정산금 등으로 식 (5) ~ 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다. 에너지 정산금은 식 (5) ~ 식 (7)과 같이 하루 전 에너지 정산금과 실시간 에너지 정산금의 합을 의미하며, REC 정산금은 식 (8)과 같이 실제 발전량에 비례하여 발전사업자에게 지급되는 금액이다. 그리고 용량 정산금 식 (9) ~ 식(10)과 같이 공급능력에 대한 금액으로서, 공급가능 용량과 변경 공급가능 용량, 실효용량을 바탕으로 산정한다. 또한, 부가 정산금 식 (11)과 같이 변동비보전 정산금과 기대이익 정산금으로 변동비보전 정산금은 급전지시에 따라 출력 제어를 수행하는 과정에서 발생하는 운전 및 제어 비용을 보전하기 위해 지급되는 금액이며, 기대이익 정산금은 식 (12)와 같이 급전지시에 의하여 감발하는 경우, 발전량 손실에 대한 기대 수익을 보전하기 위한 금액을 의미한다.

$$B_{MEP} = \sum_{i=1}^h [B_{MEP,DA}(i) + B_{MEP,RT}(i)] \quad (5)$$

$$B_{MEP,DA}(i) = P_{DA,A}(i) \cdot SMP_{DA}(i) \quad (6)$$

$$B_{MEP,RT}(i) = \sum_{j=1}^z [(P_{RT,G}(i,j) - P_{DA,A}(i)) \cdot SMP_{RT}(i,j) \cdot R_{TP}] \quad (7)$$

$$B_{REC} = \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^z P_{RT,G}(i,j) \cdot REC \cdot w_{REC} \quad (8)$$

$$B_{CP} = \sum_{i=1}^h \max[P_{RA}(i), P_{RA,mod}(i), P_{eff}] \cdot R_{CP} \quad (9)$$

$$P_{eff} = R_{eff} \cdot P_{inst} \quad (10)$$

$$B_{MWP} = \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^z \max[P_{RT,G}(i,j) \cdot O_{DA}(i) - (B_{MEP,DA}(i) + B_{MEP,RT}(i)), 0] \quad (11)$$

$$B_{MAP} = \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^z \max[(P_{DA,A}(i) - P_{RT,G}(i,j)) \cdot (SMP_{RT}(i,j) - O_{DA}(i)), 0] \quad (12)$$

여기서,  $B_{MEP}$  : 에너지 정산금[원],  $i$  : 거래시간,  $h$  : 전체시간,  $B_{MEP,DA}(i)$  :  $i$  거래시간의 하루전 에너지 정산금,  $B_{MEP,RT}(i)$  :  $i$  거래시간의 실시간 에너지 정산금,  $P_{DA,A}(i)$  :  $i$  거래시간의 하루전 낙찰량,  $SMP_{DA}(i)$  :  $i$  거래시간의 하루전 SMP,  $j$  : 거래구간,  $z$  : 전체구간,  $P_{RT,G}(i,j)$  :  $i$  거래시간에서  $j$ 구간의 실시간 발전량,  $SMP_{RT}(i,j)$  :  $i$  거래시간에서  $j$ 구간의 실시간 SMP,  $R_{TP}$  : 에너지 거래단위 변환계수(0.25),  $B_{REC}$  : REC 요금[원],  $P_{RT,G}(i,j)$  :  $i$  거래시간에서  $j$ 구간의 실시간 발전량,  $REC$  : REC 단가,  $w_{REC}$  : REC 가중치,  $B_{CP}$  : 용량 정산금,  $P_{RA}(i)$  :  $i$  거래시간의 공급가능 용량,  $P_{RA,adj}(i)$  :  $i$  거래시간의 변경 공급가능 용량,  $P_{eff}$  : 재생에너지의 실효용량,  $R_{CP}$  : 기준 용량가격,  $R_{eff}$  : 재생에너지의 실효용량 비율,  $P_{inst}$  : 재생에너지의 설비용량,  $B_{MWP}$  : 변동비보전 정산금,  $B_{MAP}$  : 기대이익 정산금

## 5. 시물레이션 결과 및 분석

### 5.1 시물레이션 조건

가상발전소의 전력거래시장 참여모델의 경제성을 평가하기 위한 시물레이션 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 먼저, 평가기간은 20년으로 상정하고, 이자율과 물가상승률, 할인율은 각각 3.5[%], 3[%], 5.5[%]로 적용한다.

[표 1] 시물레이션 조건

items	contents
evaluation period[year]	20
interest rate[%]	3.5
inflation rate[%]	3
discount rate[%]	5.5
construction cost of PV[thousandwon/kW]	1,500
construction cost of PCS[thousandwon/kW]	90
construction cost of battery[thousandwon/kW]	500
error rate of imbalance penalty[%]	8
rate of reference capacity price[won/kWh]	22.05
rate of effective capacity for PV[%]	13
weighting factor of REC for PV	1.1

가상발전소의 전력거래 모델 상정 시나리오를 나타내면 표 2와 같다. 먼저, Case I와 Case II는 비중양급전용 가상발전소로서, Case I은 배전계통에 태양광 전원만으로 구성된 모델이고, Case II는 20[MW]의 태양광 전원과 4[MW]/8[MWh]의 ESS가 연계된

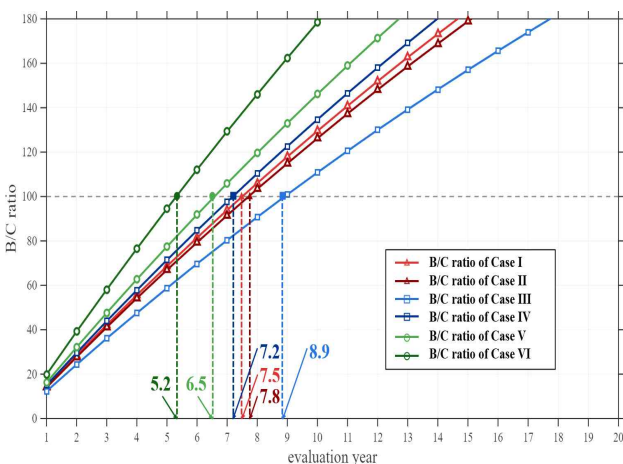
모델을 의미한다. 또한, Case III과 Case IV는 Case I, Case II와 동일한 설비용량을 가지는 단독형 가상발전소로 가정한다. 그리고, Case V는 2.86[MW]의 태양광 전원 7개소로 구성된 집합형 가상발전소 모델이고, Case VI는 배전계통에 2.86[MW]의 태양광 전원과 0.6[MW]/1.2[MWh]의 ESS를 통합한 집합형 가상발전소 모델로 가정한다.

[표 2] 전력거래 모델에 따른 가상발전소의 상정 시나리오

Case	model	capacity of PV	capacity of ESS	operation method
I	non-dispatchable VPP	20[MW]	-	existing
II	stand-alone dispatchable VPP	20[MW]	4[MW]/8[MWh]	existing
III	non-dispatchable VPP	20[MW]	-	existing
IV	stand-alone dispatchable VPP	20[MW]	4[MW]/8[MWh]	existing
V	aggregated VPP	2.85[MW] ×7[EA]	-	existing
VI	aggregated VPP	0.6[MW] /1.2[MWh] ×7[EA]	0.6[MW] /1.2[MWh] ×7[EA]	proposed

### 5.2 전력거래모델에 따른 가상발전소의 경제성 평가

가상발전소의 전력거래 모델에 따른 경제성을 종합적으로 평가한 결과를 나타내면 그림 6과 같다. 먼저, 태양광 전원으로 구성된 비중양급전용 가상발전소 모델(Case I), 단독형 가상발전소 모델(Case III), 집합형 가상발전소 모델(Case V)은 7.5년, 8.9년, 6.5년부터 도입 타당성을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 한편, 태양광 전원과 ESS로 구성된 비중양급전용 가상발전소 모델(Case II), 단독형 가상발전소 모델(Case IV), 집합형 가상발전소 모델(Case VI)은 7.7년, 7.2년, 5.2년부터 도입 타당성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.



[그림 6] 전력거래참여 모델에 따른 가상발전소의 B/C ratio 특성

## 6. 결 론

본 논문에서는 전력거래 시장에 참여하는 가상발전소 모델 특성을 분류하고, ESS를 고려한 가상발전소의 운용 방안을 제시한다. 또한, 경제성 평가 모델링과 운용 방안을 바탕으로 가상발전소의 도입 타당성을 평가한 결과는 다음과 같다. 태양광 전원으로 구성된 비중양급전용, 단독형, 집합형 가상발전소 모델은 7.5년, 8.9년, 6.5년부터 도입 타당성을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 이는 태양광 전원으로 구성된 단독형 가상발전소 모델에서는 급전지시를 적절하게 이행하지 못하여, 높은 임밸런스 페널티가 발생함에 따라 경제성이 가장 낮게 평가된다. 하지만, 집합형 가상발전소 모델에서는 보다 정확한 발전 예측률에 의하여 임밸런스 페널티가 상대적으로 적게 발생함에 따라, 경제성이 상대적으로 높게 평가됨을 알 수 있다. 또한, 태양광 전원과 ESS로 구성된 비중양급전용, 단독형, 집합형 가상발전소 모델은 7.7년, 7.2년, 5.2년부터 도입 타당성을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 제안한 방안으로 태양광 전원과 ESS로 구성된 집합형 가상발전소를 운영하는 경우, 임밸런스 페널티를 효과적으로 저감시킬 수 있어, 가장 경제성이 높게 평가됨을 알 수 있다.

### 참고문헌

- [1] Y. M. Wi, "Comparative Analysis of Effective Supply Capacity Estimation Methods for Renewable Energy Generation in the Jeju Island Power Systems", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 73, No. 2, pp. 237-242, 2024.
- [2] J. H. Lee, W. J. Hong and H. C. Cho, "Research on Structural Problems and Fundamental Solutions in the Korean Electricity Market", Journal of Industrial Studies, Vol. 48, No. 1, pp. 79-114, 2024.
- [3] K. S. Park, S. W. Park, and S. H. Jung, "A Study on Variable Renewable Energy Curtailment in Jeju Island Using AHP", Journal of Innovation Studies, Vol. 20, No. 1, pp. 305-323, 2025.
- [4] S. E. Rho, S. M. Choi, J. S. Lee, H. S. You, S. H. Lee and D. S. Rho, "A Feasibility Study of a Virtual Power Line Device to Improve Hosting Capacity in Renewable Energy Sources", energies, Vol. 18, No. 14, pp. 3,714-3,730, 2025.