

낙찰확률을 고려한 산업용 고객의 월별 수요자원 거래시장 참여수익 분석

남정훈, 정재성*

아주대학교, *아주대학교

yoke624@ajou.ac.kr, *jjung@ajou.ac.kr

Analysis of Monthly Demand Response Profit for Industrial Customers by Considering Probability of Successful Bid

Nam Joung Hoon, Jung Jae Sung*

Ajou Univ., *Ajou Univ.

요약

본 논문은 산업용 고객의 수요자원 거래시장 참여 활성화를 위한 월별 참여수익 분석을 수행하였다. 수익 분석은 경제성 DR을 중심으로 진행하였다. 하루 전 입찰 시장을 기반으로 운영되는 경제성 DR의 특성을 반영하기 위해 우선 국내 실제 시장 운영 데이터를 기반으로 시점별 낙찰확률을 도출하였다. 또한 수익 분석을 위한 최적 입찰전략 도출을 위해 낙찰확률 고려가 가능한 수요자원 잠재량 평가모델을 제안하였다. 해당 모델은 공정별 유연성 용량과 제약조건 그리고 시점별 낙찰확률을 고려하여 도출한 입찰전략을 통해 수요자원 잠재량을 평가한다. 이후 앞서 도출한 낙찰확률을 통해 몬테-카를로 시뮬레이션을 진행하여 월별 수익 분석을 수행하였다.

I. 서론

최근 기후변화 및 기술의 발전으로 인해 전력수요가 증가하면서 전력 계통에 유연성을 제공하기 위한 경제적 기법 중 하나인 수요반응에 대한 필요성이 증가하고 있다. 수요반응은 시장참여 고객의 부하 패턴을 조절함으로써 유연성을 공급할 수 있어 기존 발전자원 대비 경제적 및 환경적 이점을 지닌다 [1]. 이를 효과적으로 활용하기 위해서는 자원 운영 및 시장참여 최적화를 위한 사전 스케줄링이 선행되어야 한다. 하지만 많은 수요반응 자원들이 그 방법 및 효과에 대해 잘 몰라 활용되지 못하고 있다. 또한 활용 중인 자원들도 대부분 고정된 규칙을 기반으로 운영되기 때문에 변화하는 시장의 특성을 반영하지 못하는 경우가 발생하기도 한다 [2].

따라서 본 논문에서는 산업용 고객의 수요자원 거래시장 참여를 위한 지침 제고를 위한 잠재량 평가와 수익 분석을 수행하였다. 이를 위해 국내 실제 DR 시장 운영 데이터를 분석하여 시점별 수요자원 거래시장 낙찰확률을 도출하였다. 또한 산업용 고객의 공정별 특성과 시장 특성인 낙찰확률 및 SMP(System Marginal Price)를 반영할 수 있는 수요자원 잠재량 평가모델을 제안하였다. 이후 확률 기반 시뮬레이션 기법인 몬테-카를로 시뮬레이션을 통해 월별 예상 수익 분석하였다.

II. 본론

2.1 수요자원 잠재량 평가모델

본 논문에서 제안한 수요자원 잠재량 평가모델은 대상 산업용 고객의 공정별 조정 가능 부하와 제약조건을 통해 경제성 DR 참여 스케줄을 도출하고, 이를 통해 수요자원 잠재량을 평가한다. 부하 조정 방식은 산업용 고객의 제품 생산량 감소를 방지하기 위해 단순 부하 감축이 아닌 부하이동 방식을 사용하였다. 또한 공정별 조정 가능 부하를 미국 에너지부의 연구들을 통해 도출하였다 [3].

경제성 DR 참여 최적화를 위해서는 국내 수요자원 거래시장의 정산 구조를 반영한 스케줄링을 진행하여야 한다. 따라서 경제성 DR 정산금 도출

식인 식(1)을 고려하여 목적함수를 구성하였다 [4]. 해당 수익은 시간별 실제 감축량과 하루 전 시장 낙찰량 중 더 낮은 용량에 해당 시간대의 SMP를 곱하여 최종 정산금을 도출한다.

$$S_{edr} = \sum_{t=1}^{24} [SMP(t) \times \min\{E_{bid}(t), E_{red}(t)\}] \quad (1)$$

여기서 S_{edr} 은 경제성 DR 정산금을, $SMP(t)$ 는 SMP를, $E_{bid}(t)$ 는 낙찰용량을, $E_{red}(t)$ 실제 감축 용량을 의미한다.

최종적으로 위의 수식과 선행연구 분석을 통해 도출한 유연성 용량, 감축 지속시간, 부하 회복 제한 시간 관련 제약을 고려하여 구성된 수요자원 잠재량 평가모델의 목적함수 및 제약조건은 아래의 식(2-4)와 같다.

$$\max [\sum_{t=1}^{24} SMP(t) \times p_{dr}(t) \times E_{red}(t)] \quad (2)$$

$$\sum_{t=1}^{24} \Delta E(t) = 0 \quad (3)$$

$$E_{min}(t) \leq \Delta E(t) \leq E_{max}(t) \quad (4)$$

여기서 $p_{dr}(t)$ 는 시간대별 경제성 DR 낙찰확률을, $\Delta E(t)$ 는 부하이동에 따른 시간대별 전력량의 변화량, $E_{min}(t)$ 와 $E_{max}(t)$ 는 시간대별 최대 및 최소 조정 가능용량을 의미한다.

식(2)는 낙찰확률을 기존 식(1)에 반영하여 도출한 식이다. 이는 낙찰확률과 SMP를 모두 고려하여 경제성 DR 수익의 기댓값이 최대인 스케줄을 탐색하도록 한다. 식(3)은 하루 단위 스케줄링을 위한 수식으로, 하루전 시장을 기반으로 운영되는 DR 시장의 특성을 반영한다. 또한 식(4)는 앞서 도출한 유연성 용량 내에서 부하를 조정하도록 하여 수요반응 참여로 인한 공정 기기의 손상을 막는다.

2.2 수요자원 거래시장 낙찰확률 분석

경제성 DR은 하루 전 입찰 시장을 통해 운영되며, 전력거래소가 가격결정 발전계획을 통해 선정한 낙찰용량만 시장에 참여할 수 있다. 낙찰용량은

전국단위 예상 부하, 발전량, 발전단가 등 시기별로 변화하는 요소를 고려하여 산정된다. 따라서 사전에 적절한 시기별 낙찰확률을 도출하고, 이를 수요반응 자원 스케줄링과 시뮬레이션 과정에 반영할 필요가 있다.

따라서 본 논문은 실제 시장 데이터 분석을 통해 시기별 낙찰확률의 대푯값을 산정하고 이를 반영한 스케줄링 및 시뮬레이션을 진행하였다. 이를 위해 우선 실제 경제성 DR 시장 운영 데이터를 계절, 월, 요일 총 3가지 기준을 통해 분류하고, 각 기준의 시간별 평균 낙찰확률을 도출하였다. 또한 데이터 전처리 기법인 IQR(Interquartile Range) Method를 취득한 데이터에 적용하여 이상치를 제거하였다. 시기별 적정 기준을 도출하기 위한 기준으로는 아래의 식(5)을 통해 산출되는 MAPE(Mean Absolute Percentage Error)를 적용하였다. 마지막으로 시기별로 해당 값이 가장 낮은 기준을 통해 도출된 낙찰확률을 대푯값으로 선정하였다.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|A_i - C|}{A_i} \quad (5)$$

여기서 n 은 기준별 전체 데이터의 개수를, i 는 분류 내 해당 시점의 순번을, A_i 는 실제 값을, C 는 해당 기준에 속한 데이터의 평균을 의미한다.

낙찰확률 분석은 전력거래소에서 제공한 국내 수요자원 거래시장의 경제성 DR 입찰 및 낙찰 건수 데이터를 활용하여 진행하였다 [5]. 그 결과 아래의 표1과 같이 월별 및 요일별 분류기준을 동시에 적용했을 때의 MAPE가 전체기간 기준 17.91%로 가장 낮은 것으로 나타났다. 또한 타 분류기준 대비 시기별 MAPE 산출 값의 편차가 낮은 것으로 나타났다. 따라서 본 논문에서는 월별 및 요일별 분류기준을 동시에 적용하여 산출된 낙찰확률을 대푯값으로 선정하여 스케줄링 및 시뮬레이션에 활용하였다.

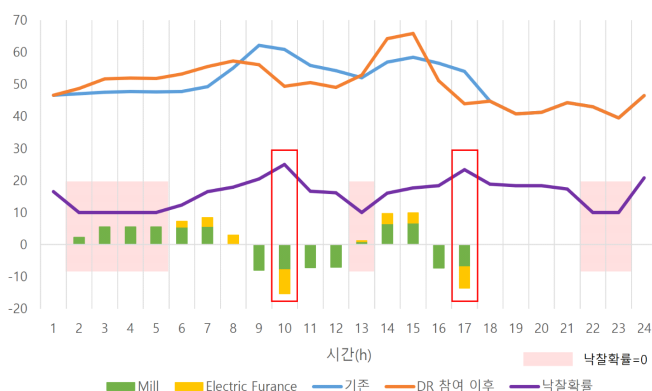
<표1> 기준별 DR 낙찰확률 MAPE 산출 결과(평균/표준편차)

구분	전체[%]	요일별[%]
계절별	21.03/5.45	25.01/1.61
월별	19.98/5.31	17.91/2.83

2.3 사례 연구

본 논문에서는 산업용 고객의 월별 경제성 DR 참여수익 분석을 위해 우선 대상 산업군의 표준부하와 실제 시장 운영 데이터(경제성 DR 입찰 건수, SMP)를 통해 시기별 낙찰확률과 수요반응 잠재량을 평가하였다. 대상 산업군은 주요 수요반응 적정 업종 중 하나인 비금속 광물제품 제조업으로 선정하였다 [3]. 또한 전력 소비계수를 통해 일일 평균부하가 50kW인 해당 업종의 표준부하 데이터를 생성하고, 이를 제한한 모델에 적용하여 스케줄링 및 잠재량 평가를 진행하였다.

<비금속 광물제품 제조업 스케줄링 결과>



<그림1> 비금속 광물 제품 제조업 일일 스케줄링 결과

그림1은 2021년 1월 4일의 데이터를 기반으로 스케줄링을 진행한 결과를 나타낸다. 이를 통해 낙찰확률이 높은 시간대에 부하 감축을 통해 시장에 참여하고, 낙찰확률이 높은 시간대에 이를 회복하도록 스케줄링이 진행된 것을 확인할 수 있다. 또한 제안한 평가모델이 낙찰확률이 0인 시간대에 부하 감축을 진행하지 않으며, 낙찰확률이 타 시간 대비 높은 시간대에 많은 용량을 감축하도록 스케줄링하는 것을 확인할 수 있다.

<표2> 월별 일 평균 경제성 DR 참여수익

[단위 : KRW]

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월
평균수익	2903.24	1208.43	1994.28	1505.44	1173.82	1454.67
7월	8월	9월	10월	11월	12월	전체평균
1951.05	1563.52	1144.02	909.53	462.34	1546.67	1499.53

표2는 몬테-카를로 시뮬레이션을 통해 산업용 고객의 월별 예상 수익을 도출한 결과를 나타낸다. 시뮬레이션은 2021년 실제 시장 데이터와 앞서 도출한 스케줄링 결과 및 낙찰확률을 통해 데이터셋을 구성하여 진행하였다. 그 결과 일 평균 경제성 DR 참여수익이 월별로 차이를 보이는 것으로 나타났다. 또한 동·하절기에 타 계절 대비 많은 수익을 창출하는 것으로 나타났다. 이는 유사시 수요자원을 운용하는 신뢰성 DR의 고정 기본정산금 단가 추이와 흡사하다. 따라서 수익 최대화를 위해서는 생산 일정 조정을 통해 동·하절기를 중심으로 DR 참여용량을 최대화할 필요가 있다.

III. 결론

본 논문은 산업용 고객의 수요자원 거래시장 참여 활성화를 위한 월별 수익 분석을 수행하였다. 이를 위해 산업용 고객의 특성을 반영할 수 있는 공정별 잠재량 평가모델을 제안하였다. 해당 모델은 경제성 DR의 기대 수익 최대화를 위한 스케줄링을 도출하고, 이를 기반으로 잠재량을 평가한다. 수익 분석을 위한 시뮬레이션은 전력거래소 제공 데이터를 기반으로 도출한 낙찰확률과 제안 모델 기반 스케줄링 결과를 통해 진행되었다. 그 결과 1월과의 경제성 DR 참여수익이 가장 높았으며, 동·하절기에 평균 이상의 수익을 창출하는 것으로 나타났다. 본 논문에서 제안한 평가모델 및 시뮬레이션 결과는 예상 수익 도출 및 스케줄링 지침으로써 활용될 수 있다. 따라서 산업용 고객의 수요자원 거래시장 참여 독려를 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20191210301820)

참 고 문 헌

- [1] Pechmann A., Shrouf F., Chonin M., Steenhuisen N. "Load-shifting potential at SMEs manufacturing sites: A methodology and case study," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, vol. 78, pp. 431-438.
- [2] Behl M., Smarra F., Mangharam R. "DR-Advisor: A data-driven demand response recommender system," Applied Energy, 2016, vol. 170, pp. 30-46.
- [3] Alkadi Nasr E., Starke Michael R., Ma Ookie. "Assessment of Industrial Load for Demand Response across Western Interconnect," United States Department of Energy Report
- [4] 한국전력거래소, "수요반응자원의 정산기준," 전력시장운영규칙, 별표26, pp. 655-692
- [5] 한국전력거래소, "수요자원 거래시장 입찰 건수," 공공데이터포털, <https://www.data.go.kr/data/15100239/fileData.do>