

전력수요반응제도의 집합자원 최적화 구성 방법

안서연, 박강구
주식회사 케이티

{seoyeon.ahn, kanggu.park} @kt.com

The method of optimal aggregator portfolio for demand response systems

Seoyeon Ahn, Kanggu Park
KT corporation

요약

본 논문은 전력수요반응제도(Demand Response, DR)의 집합자원 구성 방법에 대해 연구하였다. DR 집합자원은 전력시장에서 수요 측의 유연성을 제공하고, 전력계통의 안정성과 효율성을 향상시키는 역할을 한다. 본 논문에서는 DR 집합자원의 구성을 최적화 문제로 정의하고, 다양한 제약 조건과 목적 함수를 고려하여 DR 집합자원의 구성을 결정하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 실제 전력시장과 전력계통의 데이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, DR 집합자원 구성은 자원의 경제성을 높이고 사업적 리스크를 감소시키는 효과가 있음을 확인하였다.

I. 서론

전력은 저장이 어려운 에너지로써 수요와 공급이 항상 균형을 이루어야 한다. 전력수요는 시간, 공간, 계절, 기후 등에 따라 변동성이 크고, 특히 최근에는 신재생에너지의 보급으로 인해 공급 측의 변동성도 증가하고 있다. 따라서, 수요와 공급의 균형을 유지하기 위해 전력시장과 전력계통의 운영에 유연성이 필요하다. 전력수요반응제도(Demand Response, DR)는 수요 측의 유연성을 활용하여 전력시장과 전력계통의 운영을 개선하는 방법이다. DR은 참여 사업장이 전력시장의 가격 신호나 전력계통의 상태에 따라 전력사용량을 조절하는 자원을 운영하며 전력시장에서 공급 측의 유연성을 보완하고, 전력계통에서 수요 측의 부하를 관리하는 역할을 한다. DR의 효과는 집합자원의 구성에 따라 달라진다. 집합자원은 DR의 발령 이행의 단위로, 사업장의 유형, 용량, 위치, 전력사용량 등을 기반으로 사업장을 여러 묶음으로 구성하게 된다. 집합자원의 구성은 전력시장과 전력계통의 특성, 사업장 성향 등을 고려하여 [1]의 연구와 같이 최적화 문제로 정의하고 해결하는 것이 바람직하다. [1]의 연구와 접근 방식이 비슷하지만 태양광 집합자원과 DR 집합자원의 특성이 다르기 때문에 본 논문에서는 DR 집합자원에 특화된 제약조건과 목적함수를 기반으로 최적화 문제를 해결한다는 차이가 있다. [2]와 같이 DR 자원과 태양광, 풍력 등의 발전 자원들을 함께 이용하여 포트폴리오 구성을 하는 연구도 존재하나, 본 논문에서는 DR 집합자원의 구성을 최적화 문제로 정의하고, DR 사업장 데이터를 활용하여 집합자원의 구성을 수행하는 방법을 제안하였다. 사업장 데이터는 전력사용 패턴, DR 입찰 데이터, DR 이행 데이터를 이용한다. 제안한 방법은 실제 전력시장과 전력계통의 데이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 집합자원의 구성이 집합자원의 경제성과 사업적 리스크에 어떤 영향을 미치는지 분석하였다.

II. 본론

II.1. 집합자원 구성의 최적화 문제 정의

집합자원의 구성은 다음과 같은 제약 조건과 목적 함수를 만족하도록 사업장 유형, 용량, 위치, 전력사용량 등을 바탕으로 사업장이 속할 자원을 결정하는 것으로 설계했다. 자원 구성은 사업장 전력사용 패턴, 입찰 데이터, 이행 데이터에 따라 결정된다.

- 제약 1. 사업장은 단 한 개의 집합자원에만 포함될 수 있으며, 한 개의 집합자원에는 최소 10 개 이상의 사업장이 포함되어야 한다.
- 제약 2. 집합자원의 용량에 따라 중소형의 경우 2MW~50MW, 표준형의 경우 10MW~500MW 로 자원 유형이 제한된다.
- 제약 3. 사업장의 위치에 따라 비수도권, 수도권, 제주 등의 자원 유형으로 제한된다.

자원 포트폴리오의 구성은 집합자원의 경제성과 사업적 리스크를 동시에 고려하여 최적화되어야 한다. 자원의 경제성은 수요 감축 이행 능력의 증가와 동시간대 입찰량을 늘려 낙찰 확률을 높임으로써 증가할 수 있다. 사업적 리스크는 미이행 리스크를 모든 자원에 균등 분배함으로써 감소시킬 수 있다.

$$\max \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (RS_n + BFS_n) + LF_N \right\} \quad (1)$$

여기서 N 은 전체 자원 개수를 의미하며 RS_n (2)는 자원 별 취약 사업장 보완 지수(Redeem score), BFS_n (3)는 자원 별 입찰 실패 지수(Bid flock score), LF_N (4)는 전체 자원 이행 균등 지수(Load factor)를 나타낸다.

$$RS_n = \frac{\sum_{t=1}^{24} P_t}{|\sum_{t=1}^{24} M_t|} \quad (2)$$

t 는 시간을 의미하며, P_t 와 M_t 는 시간 별 전력사용량에서 사업장의 계약용량을 뺀 값으로 여유 전력으로 명칭한다. P_t 는 n 번 자원의 여유 전력이 양수인

사업장의 합이고, M_t 는 n 번 자원의 여유 전력이 음수인 사업장의 합을 나타낸다. 따라서, RS 는 전력사용 패턴에 따른 자원 별 DR 이행 능력을 나타내는 지표이다.

$$BFS_n = \sigma \left(\frac{1}{D} \sum_{d=1}^D B_t^d \right), 1 \leq t \leq 24 \quad (3)$$

d 는 일자, D 는 총 입/낙찰 시장일수, B_t^d 는 일자 별 특정시간의 입찰량이 양수인 횟수를 의미한다. 이에 따라 BFS 는 시간 별 평균 입찰 횟수들의 표준편차를 나타내고 DR의 특성 상 입찰이 동시간에 많이 쏠릴수록 낙찰 가능성이 높아지기 때문에, BFS 는 DR 입찰 데이터에 따른 자원 별 입/낙찰 능력을 나타내는 지표이다.

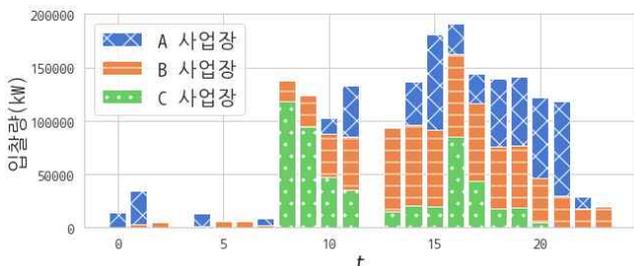
$$LF_N = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N R_n}{\max(R_1, R_2, \dots, R_N)} \quad (4)$$

R_n 은 자원 별 이행률을 의미하고, LF 는 Load Factor 라는 전력 사용 효율 지수 식을 응용하여 DR 이행 데이터에 따라 전체 자원의 DR 이행 안정성을 표현하는 지표로 정의했다. 전력 사용 효율 지수는 평균 사용량에서 피크 사용량을 나눈 값으로 사용량이 균등 분배될 수록 효율이 높음을 의미한다.

II.2. 집합자원 구성 수혜

사업장 별 실제 전력시장과 전력계통의 데이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행했으며, 2021년 6월부터 2022년 5월까지의 1년치 데이터를 이용하여 분석하였다. DR은 매년 12월마다 집합자원 구성이 필요하므로, 2021년 6월부터 2021년 9월까지의 데이터를 기반으로 집합자원 구성 시뮬레이션을 진행하였고 나머지 데이터로 집합자원 구성 결과를 분석하였다. 구성은 아래의 3가지 단계로 이루어지며 전력 사용 취약 사업장 보완, 입찰 패턴 유사 사업장 매핑, 전체 자원 이행률 균등화 순서로 진행된다.

1 단계, 전력 사용 취약 사업장 보완 단계는 사업장들의 전력사용 패턴을 분석하여 DR 발령 시 이행 불가 요인을 없애기 위해 여유 전력이 없는 취약 사업장과 여유 전력이 있는 여유 사업장을 같은 자원에 매핑하여 취약 사업장을 보완한다. 이는 각 자원의 감축 이행 가능 능력을 높여 식 (2)의 자원 별 취약 사업장 보완 지수(RS)를 향상시킨다. 전력사용 패턴 데이터를 정규화하고 시간 별 표준편차의 평균 값의 분포를 분석하여 패턴화가 가능한 사업장과 불가능한 사업장을 나누었다. 이후 패턴화가 가능한 사업장에 대해 M_t 이 큰 순서대로 P_t 인 사업장과 묶어서 여유 전력을 보완한다.

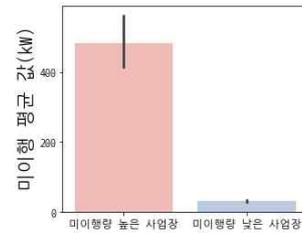


[그림 1] 사업장의 시간별 입찰량 그래프 (사업장의 구분: 색상)

2 단계, 입찰 패턴 유사 사업장 매핑에서는 사업장들의 DR 입찰 데이터를 패턴화하여 유사 패턴 사업장들끼리

같은 자원에 매핑한다. 그림 1에서 A 사업장은 15시와 18시 이후에 입찰량이 많고, B 사업장은 오후 시간대에 꾸준히 입찰량이 많으며, C 사업장은 오후보다는 오전 시간대에 입찰량이 많은 것을 볼 수 있다. 그림 1의 분포로 사업장별 입찰 패턴이 존재함을 알 수 있으며, 이를 바탕으로 K-means Clustering 기법을 이용하여 DR 참여 의향 패턴에 따라 사업장들을 군집화 한다. 동시간대 입찰량을 늘려 낙찰 확률을 높여 자원 별 입찰 쏠림 지수(BFS)를 향상시킨다.

마지막 3 단계, 전체 자원 이행률 균등화 단계에는 DR 이행 데이터의 미이행 평균값을 바탕으로 이행 능력에 따라 전체 자원에 사업장들을 균등 분배한다. 이에 따라 자원별 미이행 리스크를 분산시켜 전체 자원의 리스크를 감소시키고 식 (4)의 전체 자원 이행 균등 지수(LF)를 향상시킨다. 미이행 평균값은 아래 그림 2의 통계적 가설 검정을 통해 유의미하다고 판단했다.



[그림 2] 미이행 평균값의 통계적 가설 검정 (p-value=0.0027)

세 단계를 거쳐 만들어진 최적의 집합자원 구성의 결과는 아래 표 1과 같다. 일반 자원 구성보다 최적 자원 구성 시에 3가지 지표 결과가 모두 우수한 것을 알 수 있다. 일반 자원 구성은 최적 구성 방법을 이용하지 않고 관리자의 경험에 의존하여 구성한 방법을 의미한다. RS_n 과 BFS_n 의 평균은 N 개의 자원 구성이 완료되었을 때의 각 자원별 지수 평균을 나타내고, LF_N 은 전체 자원에서의 지수를 나타낸다.

[표 1] 집합자원 구성 최적화 결과

| | 일반 구성 | 최적 구성 | 증가율(%) |
|------------|-------|-------|--------|
| RS_n 평균 | 12.38 | 13.47 | 8.8 |
| BFS_n 평균 | 2.28 | 3.61 | 58.3 |
| LF_N | 0.95 | 1 | 5.2 |

III. 결론

본 논문에서는 전력수요반응제도에 참여하는 사업장 유형, 용량, 위치, 전력사용량 등의 데이터를 바탕으로 DR 집합자원 구성의 최적 방법을 도출하였다. 실제 전력시장 데이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 자원 별 DR 이행 능력, 자원 별 입/낙찰 능력, 전체 자원의 DR 이행 안정성을 나타내는 평가 지표 결과를 통해 최적 집합자원 구성 효과를 검증하였다. 이에 따라 최적 집합자원 구성을 통해서 집합자원의 경제성을 높이고 사업적 리스크를 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] 한혜순, 김아현, 강동주. 발전량 예측오차 최소화를 위한 집합자원 포트폴리오 최적화: 태양광을 중심으로. 2021. 대한전기학회 학술대회 논문.
- [2] Zhou Wu, Xiaohua Xia. (2017). A Portfolio Approach of Demand Side Management. IFAC-PapersOnLine, 50, 171-176.