

DR과 피크저감을 고려한 ESS의 운용 방안에 관한 연구

신하은*, 이승호*, 호삼 살라*, 김병기**, 노대석*
*한국기술교육대학교 전기공학과, **강원대학교 전기공학과
e-mail: shaeusnss@naver.com

A Study on the Operation Method of ESS Considering DR and Peak Shaving

Ha-Eun Shin*, Seung-Ho Lee*, Hossam S. Mohamed*,
Byung-Ki Kim**, Dea-Seok Rho*

*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education,

**Dept. of Electrical Engineering, Kangwon National University

요약

최근, 전 세계적으로 신재생 에너지원의 계통연계 안정화 및 피크저감을 목적으로 ESS(energy storage system)의 설치가 매년 급증하고 있다. 여기서, ESS의 설치비용은 고가이므로 사전 계획단계에서 투자비용 회수를 위해 비용 및 편익요소에 대한 검토가 선행되어야 하며, 현행되고 있는 제도나 정책을 바탕으로 타당성에 대한 평가가 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 피크저감과 DR(demand response) 참여를 고려한 ESS의 운용 방안을 제안한다. 여기서, ESS의 피크저감과 DR을 시나리오별로 수행함으로써 기존의 피크저감을 수행하였을 때 얻을 수 있는 편익뿐만 아니라 DR 참여에 대한 편익을 추가로 확보할 수 있다. 또한, ESS 건설비용과 운용비용으로 구성된 비용요소와 DR 참여에 의한 수익과 기본요금 절감, 전력량 요금 절감, 전력산업 기반기금 및 부가가치세 절감으로 구성된 편익요소를 바탕으로 ESS의 경제성 평가 모델링을 수행한다. 상기의 운용 방안과 경제성 평가 모델링을 바탕으로 ESS의 도입 타당성을 평가한 결과, 피크저감과 DR을 동시에 수행하면 피크저감만 수행하는 경우에 비해 경제성을 확보할 수 있고, 피크저감 시간대와 DR 시간대 사이에 큰 차이가 발생하는 경우, DR보다 피크저감을 우선적으로 수행하는 것이 더 경제적임을 알 수 있다.

1. 서론

최근, 신재생에너지의 출력 안정화, 피크저감 및 발전기 주파수 조정 등 다양한 기능을 가진 에너지 저장장치(energy storage system, ESS)의 설치가 증가하고 있다[1]. 여기서, 고가의 ESS 투자비용을 회수하기 위해서 사전 계획단계에서 편익과 비용요소들에 대한 검토가 선행되어야 하고, 이러한 수익은 제도나 정책에 크게 의존되므로 경제성에 대한 평가가 선행되어야 한다. 여기서, 수용가에서는 피크전력 저감에 의한 기본요금 절감 및 충·방전 시의 전력량요금의 차에 의한 편익 뿐만 아니라, DR(demand response)에 의한 추가적인 편익을 확보해 투자비용을 보다 빠르게 회수할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 수용가의 피크저감 시간대와 DR 발령 시간대가 중첩되는 경우, 피크저감과 DR을 동시에 수행하는 운용 방안을 제시하고, ESS의 경제성을 평가하기 위하여, 비용요소와 편익요소로 구성된 경제성 평가 모델링을 제시한다[2]. 상기의 모델링을 바탕으로 경제성을 평가한 결과, 피크저감용 ESS를 DR에 적극적으로 활용함으로써 경제성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

2. DR 제도의 운용 현황

DR 제도는 의무 감축 용량을 사전에 계약한 수용가가 전력거래소의 지시를 받아 수요자원 감축을 통하여 전력소비 절감에 의한 인센티브를 받는 것으로, 수요관리 사업자를 통해 참여할 수 있다. 한편, DR 제도는 신뢰성 DR과 자발적 DR에 참여해 편익을 얻을 수 있는데, 신뢰성 DR은 전력계통에서 전력수급의 불안정이 발생하는 경우 전력거래소의 의무감축 발령을 받아 사전에 등록된 의무 감축 용량에 상응하는 전력소비 절감을 수행하는 제도이다. 또한, 경제성 DR은 자발적으로 감축하고자 하는 용량을 전력시장에 입찰하고 전력거래소에 의해 감축 용량과 감축 시간을 낙찰받는 방식으로 진행되는 제도이다. 한편, 신뢰성 DR에 참여할 경우 고정 기본 정산금과 의무적 실적정산금을 지급받을 수 있다. 또한, 자발적 DR에 참여할 경우 차등 기본 정산금과 자발적 실적정산금을 추가로 지급받을 수 있다.

3. DR과 피크저감을 고려한 ESS의 운용 방안

수용가의 피크저감 실행을 위하여 ESS의 방전을 수행하면 DR 발령 시 ESS의 충전시간의 미확보로 즉시 DR에 대응하지 못하는 제약이 있다. 따라서, 피크저감과 DR 발령 시간대가 중첩되는 경우 피크저감과 DR을 동시에 수행하여 ESS의 경제성을 최대로 확보할 수 있는 운용 방안을 제시한다. 이를 바탕으로 현재가치 환산법과 원금 균등 상환방식을 이용한 경제성 평가를 모델링하여, DR과 피크저감 수행에 따른 편익과 손익분기점을 제시하고자 한다. ESS의 운용 방안은 경제성을 최우선적으로 고려하여, 전기요금에 저렴한 경우부하 시간대에 ESS를 충전하고, 피크전력이 발생하는 시간대에 15분 단위로 방전을 수행한다. 또한, 부하의 피크전력 발생을 예측하기 위하여, 과거 15분간 누적된 전력량의 기울기를 사용한다. 여기서, 과거 15분간 전력량은 식 (1)과 같고, 전력량의 기울기를 산정하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 또한, 전력량 예측값을 구하면 식 (3)과 같다.

$$W_{15min} = \int_0^T P(t) dt \quad (1)$$

$$\tan(\theta_{15min}) = \frac{W_{15min}}{T} \quad (2)$$

$$W_{fore}(t) = \tan(\theta_{15min}) \cdot t + W_{now}(t) \quad (3)$$

여기서, W_{15min} : 15분 전력량[Wh], $\tan(\theta_{15min})$: 예측 기준 기울기, $W_{fore}(t)$: 예측 전력량[Wh], $W_{now}(t)$: 현재 전력량[Wh]

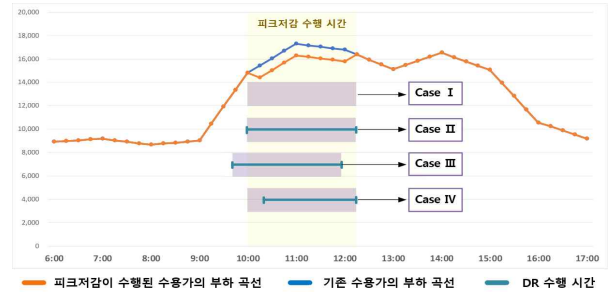
한편, ESS의 피크저감 방식은 식 (4)와 같이 15분간의 최대전력이 기준 피크전력보다 크거나, 예측 전력량이 피크전력량보다 큰 경우에 ESS를 방전하고, 그 외의 경우에는 충전이나 휴지 동작을 수행한다. 이러한 패턴의 ESS 운용을 통해 잔여 방전용량을 확보하여 피크전력을 효과적으로 감축할 수 있다.

$$\delta(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } P_{peak} < P_{15min}(t) \text{ or } W_{peak}(t) < W_{fore}(t) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

여기서, P_{peak} : 기준 피크전력[kW], $P_{15min}(t)$: 15분간의 최대전력[kW], $W_{peak}(t)$: 피크전력량[kWh]

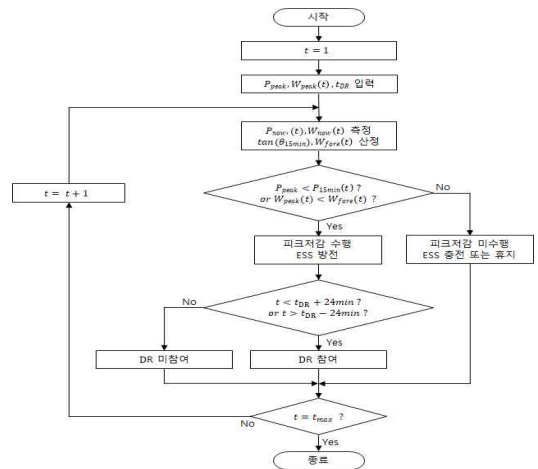
DR은 80% 이상을 수행하는 경우에만 인정을 받으므로, 이에 따라 본 논문에서는 피크저감 시간대와 DR 발령 시간대가 80% 이상 중첩되는 경우에만 DR을 수행하는 것으로 상정한다. 여기서, 그림 1은 DR을 고려한 피크저감용 ESS의 운용 방안을 나타낸 것으로, Case I은 피크저감 실행시간과 DR 발령 시간이 일치하여 피크저감만 100%로 수행이 가능한 경우를 나타낸다. 또

한, Case II는 피크저감 실행시간과 DR 발령 시간이 대부분 일치하여 100%로 수행이 가능한 경우를 나타낸다. Case III는 피크저감 시간대와 DR 시간대가 차이가 발생하여, 피크저감은 80%, DR은 100%를 수행하는 경우를 나타내며, Case IV는 피크저감이 100%, DR은 80%를 수행하는 경우를 나타낸다.



[그림 1] DR과 피크저감을 고려한 ESS의 운용 방안

상기의 운용 방안을 바탕으로 DR과 피크저감을 고려한 ESS의 운용 방안을 구체적으로 나타내면 그림 2와 같다.



[그림 2] DR과 피크저감을 고려한 ESS 운용 방안

- [Step 1] 대상 수용가의 기준 피크전력, 피크전력량, DR 발령시간을 상정한다.
- [Step 2] 대상 수용가의 15분간 최대전력 및 현재 전력량을 측정하고, 식 (1) ~ 식 (3)에 따라 15분간의 전력량의 기울기 및 예측 전력량을 산정한다.
- [Step 3] 15분간 최대전력이 기준 피크전력보다 크거나, 예측 전력량이 피크전력량보다 크면 [Step 4]로 이동하고, 아니면 [Step 8]로 이동한다.
- [Step 4] 피크전력을 저감하기 위해 ESS를 방전하고, DR 참여 여부를 확인하기 위하여 [Step 5]로 이동한다.
- [Step 5] 현재 시간이 DR 발령 후 일정시간(24분) 이내거나, 현재 시간 기준 일정시간(24분) 이내 DR이 발령되는 경

우[Step 6]로 이동하고, 아니면 [Step 7]로 이동한다.
 [Step 6] DR의 80% 이상 수행이 가능하여 피크전력 저감과 DR
 을 동시에 수행하고, [step 8]로 이동한다.
 [Step 7] DR의 80% 이상 참여가 불가능하여 피크전력 저감만
 수행한다.
 [Step 8] ESS를 충전 또는 휴지상태로 동작하고, 다음 시간대에
 대하여 [step 2]로 이동하여 동일한 절차를 반복한다.

4. DR과 피크저감을 고려한 ESS의 경제성 평가 모델링

4.1 비용요소 모델링

비용요소 모델링은 ESS 건설비용과 운영비용으로 구성한다.
 먼저, ESS의 건설비용은 ESS를 설치하는데 지출되는 총 비용으
 로서, 식 (5)와 같이 산정한다. 또한, 운영비용은 ESS를 운영할
 때 발생하는 유지보수 비용으로서, 식 (6)과 같이 산정한다.

$$C_{ess} = (C_{pcs} \cdot Q_{pcs} + C_{batt} \cdot Q_{batt}) \cdot (1 + r_{con}) \quad (5)$$

$$C_{oper} = \sum_{i=1}^n [C_{ess} \cdot r_{oper} \cdot (1 + r_{inf}(i))^{i-1}] \quad (6)$$

여기서, C_{ess} : ESS의 총 건설비용[원], C_{pcs} : PCS의 도입
 비용[원/MW], Q_{pcs} : PCS의 설치용량[MW], C_{batt} : 배터리
 시스템의 도입비용[원/MWh], Q_{batt} : 배터리 시스템의 설치
 용량[MWh], r_{con} : ESS 공사비의 비율[%], C_{oper} : 총 운영비
 용[원], r_{oper} : 운영비 적용비율[%], $r_{inf}(i)$: 물가상승률
 [%], i : 대상년도

4.2 편익요소 모델링

편익요소 모델링은 기본요금 절감, 전력량요금 절감, 전력산업
 기반기금 및 부가가치세 절감, DR 참여에 따른 수익으로 구성한
 다. 먼저, 기본요금 절감은 수용가의 최대수요전력의 감소로 발
 생하는 편익으로서, 식 (7)과 같이 산정한다. 또한, 전력량요금 절
 감에 의한 편익은 경부하 시간대에 ESS를 충전하고, 최대부하 시
 간대에 방전시켜 발생하는 차액으로, 식 (8)과 같이 산정한다.

$$B_{kW} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^d \sum_{k=1}^h [(P_{peak}(i,j,k) - P_{ess}(i,j,k)) \cdot C_{kW}(i)] \quad (7)$$

$$B_{kWh} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{d_{oper}} \sum_{k=1}^h [(W_{kWh}(i,j,k) - W_{ess}(i,j,k)) \cdot C_{kWh}(i,j,k)] \quad (8)$$

여기서, B_{kW} : 기본요금 절감에 의한 편익[원],
 $P_{peak}(i,j,k)$: 시간대별 수용가 피크전력[kW], $P_{ess}(i,j,k)$:
 ESS의 피크저감에 의해 감소된 수용가 피크전력[kW],
 $C_{kW}(i)$: 기본요금[원/kW], j : 대상일자, k : 대상시간
 B_{kWh} : 전력량요금 절감에 의한 편익요금[원], d_{oper} : ESS
 의 연간 운용일 수, $W_{kWh}(i,j,k)$: 수용가의 사용 전력량
 [kWh], $W_{ess}(i,j,k)$: ESS의 충방전 운전에 의한 수용가의
 사용 전력량[kWh], $C_{kWh}(i,j,k)$: 전력량요금[원/kWh]

한편, 전력산업기반기금 및 부가가치세 절감은 기본요금 절감
 분과 전력량요금 절감분에 대하여, 식 (9), 식 (10)과 같이 전력산
 업기반기금(2.7%)과 부가가치세(10%)의 정해진 비율만큼 각각
 절감된다.

$$B_{fund} = (B_{kW} + B_{kWh}) \cdot r_{fund} \quad (9)$$

$$B_{tax} = (B_{kW} + B_{kWh}) \cdot r_{tax} \quad (10)$$

여기서, B_{fund} : 전력산업기반기금 절감에 의한 편익요금
 [원], r_{fund} : 전력산업기반기금 비율[%], B_{tax} : 부가가치세
 절감에 의한 편익요금[원], r_{tax} : 부가가치세 비율[%]

또한, 수요자원 거래시 장의 참여수익은 식 (11)과 같이, 고정
 기본정산금, 의무감축 실적금, 차등기본정산금, 자발적 실적금으
 로 구성한다. 여기서, 고정기본정산금은 식 (12)와 같이, 의무감
 축실적금은 식 (13)과 같이 산정한다. 또한, 차등기본 정산금은
 식 (14)와 같이, 자발적실적금은 식 (15)와 같이 산정한다.

$$B_{DR} = B_{fix} + B_{ob} + B_{diff} + B_{vol} \quad (11)$$

$$B_{fix} = C_{red} \times P_{ann} \quad (12)$$

$$B_{ob} = C_{red} \times t_{red} \times SMP \quad (13)$$

$$B_{diff} = C_{red} \times t_{red} \quad (14)$$

$$B_{vol} = C_{bid} \times t_{bid} \times SMP \quad (15)$$

여기서, B_{DR} : 수요자원 거래시장 참여 수익[원], B_{fix} : 고
 정기본 정산금[원], B_{ob} : 의무감축 실적금[원], B_{diff} : 차등
 기본 정산금[원], B_{vol} : 자발적 실적금[원], C_{red} : 의무감축
 용량[kW], P_{ann} : 연간기본정산금 단가[원/kW], t_{red} : 감축
 시간, C_{bid} : 낙찰용량, t_{bid} : 낙찰시간

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

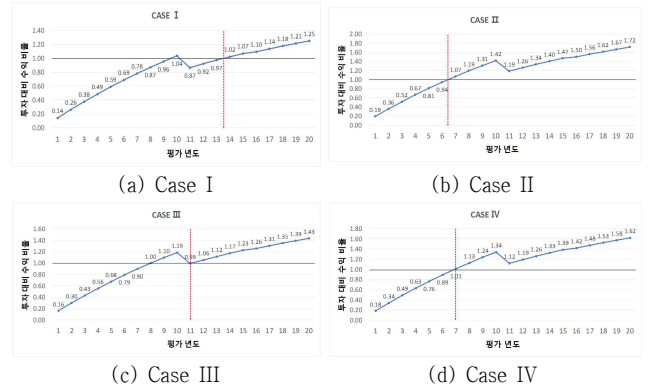
DR을 고려한 피크저감용 ESS의 경제성 평가에 대한 시뮬레이션 조건은 다음과 같다. 피크저감용 ESS의 용량은 1[MW]/2[MWh]로 상정하고, 대출 상환기간은 20년, 이자율과 할인율은 각각 4.29%, 5.5%로 상정한다. 또한, PCS 및 ESS의 교체시기는 각각 15년, 10년을 고려하며, 운영비는 2.5%로 상정한다. 한편, 경제성 평가를 수행하기 위한 대상 수용가는 석탄/원유 및 천연가스 광업산업의 평균 전력소비 일부하 패턴을 상정한다. 여기서, 계약용량은 17,289[kW], 계약종별은 ‘일반용(을) 고압A 선택(Ⅱ)’, 기본요금 단가는 8,320[원/kW]로 적용한다. 또한, DR을 고려한 피크저감용 ESS 운용 방안 및 경제성을 평가하기 위하여, 표 1과 같이 4가지의 시나리오를 상정한다.

[표 1] 경제성 평가 시나리오

상정 시나리오	피크저감률[%]	DR 참여율[%]
Case I	100	-
Case II	100	100
Case III	80	100
Case IV	100	80

5.2 DR과 피크저감을 고려한 ESS의 타당성 평가

상기에서 제시한 운용방안 및 경제성평가 조건을 바탕으로, DR과 피크저감을 고려한 ESS의 경제성을 평가하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Case I의 경우, 그림 3(a)와 같이, ROI가 배터리 수명시간을 초과하는 13.5년 정도이므로, 피크저감만을 수행하는 경우 경제성을 확보하기 어려움을 알 수 있다. 또한, Case II의 경우, 그림 3(b)와 같이, 6.4년 정도에 ROI에 도달하여 ESS의 사업 타당성 측면에서 경제성이 있음을 알 수 있다. 한편, Case III의 경우, 그림 3(c)와 같이, ROI가 배터리 수명시간을 초과하는 11년 정도로 산정되어, 피크저감의 수행 정도가 감소하면, ESS의 경제성 확보가 어려움을 알 수 있다. 또한, Case IV의 경우, 그림 3(d)와 같이, ROI가 7년 정도이므로, 배터리 교체비용이 발생하기 전에 원금 회수가 가능하고, Case II에 비하여 더 일찍 ROI에 도달함을 알 수 있다. 따라서, 피크저감과 DR이 동시근대에 발생하지 않을 경우, DR보다 피크저감을 우선적으로 수행하는 것이 더 경제적임을 알 수 있다.



[그림 2] DR과 피크저감을 고려한 ESS의 경제성 평가

6. 결 론

본 논문은 피크저감용 ESS의 수익창출의 극대화를 위해, 피크저감과 더불어 적극적인 DR 참여를 고려한 ESS 운용 방안을 제시한다. 또한, DR을 고려한 피크저감용 ESS의 비용요소와 편익요소로 구성된 경제성 평가 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 피크저감과 DR의 수행정도에 따른 경제성을 평가한다. 시뮬레이션 조건에 따라 피크저감용 ESS의 경제성을 평가한 결과, 피크저감과 DR을 각각 100% 수행한 경우, 피크저감만 100% 수행한 경우에 비해 경제성을 확보할 수 있음을 알 수 있고, 피크저감과 DR의 시간대가 차이가 발생하였을 경우, DR보다 피크저감을 우선적으로 수행하는 것이 더 경제적임을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] 이예빈, 김지명, 이민행, 노성은, 김세진, 노대석 “운용환경 및 용도를 고려한 ESS의 안전성 평가 방안에 관한 연구,” 전기학회논문지, 제73권 제5호, pp. 773-783, 2024.05.
- [2] 김경화, 한병길, 신건, 김지명, 노대석 “전력 거래방식을 고려한 에너지 프로슈머의 운용전략 및 경제성평가에 관한 연구,” 한국산학기술학회논문지, 제23권 제1호, pp. 618-626, 2022.01.