DR을 고려한 최대전력 감소용 ESS의 운용 알고리즘에 관한 연구

원종흥, 박동명, 전진택, 노성은, 노대석
한국기술교육대학교 전기공학과
e-mail:wonjher@daum.net

A Study on the Operation Algorithm of ESS Peak Shaving Considering DR

Jong-Heung Won, ,Dong-Myoung Park, Jin-Taek Jeon, Seong-Eun Rho,
Dae-Seok Rho
Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요 약

최근, 전 세계적으로 신재생에너지원의 계통연계 안정화 및 최대전력 감소용으로 ESS(energy storage system)의 설치가 매년 급증하고 있다. 여기서, ESS의 투자비용은 고가임으로 투자비 회수에 대한 사전 계획단계에서 편익과 비용요소들에 대한 적정한 검토가 선행되어야 하고, ESS의 설치 및 운용에 따른 수익성은 제도나 정책에 크게 의존되므로, 경제성에 대한 평가가 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 수익창출의 극대화를 위해, 기존의 최대전력 감소와 더불어 DR 참여를 고려하고, 이에 따른 운용 전략을 제시한다. 또한, 많은 일반 수용가에서 운용 중에 있는 최대전력 감소용 ESS를 대상으로 최대전력 감소 및 DR(demand response)을 고려한 ESS의 운용 알고리즘을 제시하고, 이를 바탕으로 비용요소와 편익요소로 구성된 경제성 평가 모델링을 제시한다. 상기의 알고리즘과 모델링을 바탕으로 DR을 고려한 최대전력 감소용 ESS의 경제성을 평가한 결과, 최대전력 감소 및 DR을 각각 80%, 100% 수행한 경우 ROI가 13.2년으로 산정되고, 최대전력 감소 및 DR을 각각 100%, 80% 수행한 경우 ROI는 9.2년으로 산정되며, 최대전력 감소와 DR을 동시에 100% 수행하면 ROI는 8.4년으로 산정되어, 최대전력 감소용 ESS를 DR에 적극적으로 활용함으로서 어느 정도 경제성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

1. 서 론

최근, 신재생에너지원의 출력 안정화, 수요자원 관리(DR) 및 주파수 조정(FR) 등 다양한 기능을 가지고 있는 전기저장장치(ESS)의 설치가 매년 급격히 증가하고 있다. 또한, 수용가에서는 피크전력 저감을 통한 기본요금 절감 및 충·방전 시의 전력량요금의 차에 의한 편익 등, 경제적인 목적으로 ESS를 설치하여 운용하고 있다. 여기서, 수용가의 최대전력 감소 시간대와 DR 발령 시간대가 중첩되는 경우, 최대전력 감소와 DR을 동시에 수행함으로서 추가적인 수익을 기대할 수 있으며, 이러한 수익은 제도나 정책에 크게 의존되므로 경제성에 대한 평가가 선행되어야 한다. 따라서, 본 논문에서는 DR을 고려한 최대전력 감소용 ESS의 운용 전략 및 알고리즘을 제시하고, 이를 바탕으로 최대전력 감소 및 DR 수행 정도에 따른 ESS의 경제성을 평가하기 위하여, 비용요소와 편익요소로 구성된 경제성 평가 모델링을 제시한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로, 최대전력 감소와 DR 수행 정도에 따른 경제성을 평가한 결과, 최대전력 감소용 ESS를 DR에 적극적으로 활용함으로서 어느 정도 경제성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

2. DR을 고려한 최대전력 감소용 ESS의 운용 특성

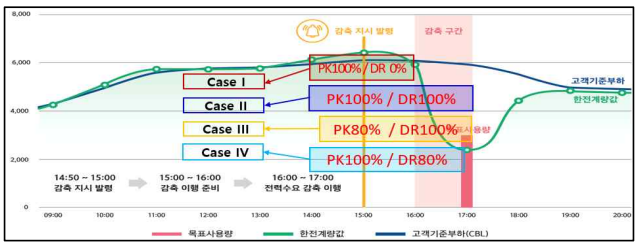
2.1 최대전력 감소용 ESS의 운용 전략

ESS는 크게 전력을 저장하는 배터리부, 교류와 직류를 상호 변환하는 전력변환장치부(power conditioning system, PCS)와 모니터링 및 제어를 담당하는 전력관리 시스템(power management mystem, PMS), 등으로 구성된다. ESS의 용도는 신재생연계용, 최대전력 감소용, 주파수 조정용, 등으로 분류된다. 본 논문은 최대전력 감소용 ESS를 대상으로 하고, 경부하 시간대에 충전하고, 최대부하 시간대이고 동시에 피크가 발생하는 시간대에 방전하여, 대상 수용가가 ESS에 의한 최대전력 감소 효과를 최대화한다. 이를 통해 얻는 편익은 기본요금 절감, 전력량요금 절감, 특례 요금제에 의한 기본요금 할인, 전력산업기반기금 및 부가가치세 절감 등의 요소로 구성된다.

2.2 DR 을 고려한 최대전력 감소용 ESS의 운용 전략

DR제도는 전력사용 감축 의무를 사전에 계약한 수용가가 전력거래소의 지시를 받아 ESS의 운용을 통해 수요자원 감

축을 통하여 전력소비 절감에 따라 받게 되는 인센티브로서, 기본정산금과 실적정산금으로 구성된다. 여기서, DR에 참여한 수용가는 자발적 수요감축에 참여할 경우, 고정기본정산금과 의무감축 실적금 뿐만 아니라, 차등기본정산금과 자발적 실적금을 추가적으로 받을 수 있다. 하지만, 최대전력 감소 실행 방전 후 신뢰성 DR발령 시 충전시간의 미확보로 즉시 부응하지 못하는 제약이 있다. 이것은 기본정산금의 차감은 물론 계약위반 누적 시 거래정지까지 이를 수 있는 문제가 있는데, 이를 개념도로 나타내면 그림 1과 같다. 여기서, Case Ⅰ은 최대전력 감소만을 실행한 경우를 나타내며, Case Ⅱ는 최대전력 감소 시간과 DR발령 시간의 일치로 최대전력 감소와 DR을 동시에 수행가능하고, Case Ⅲ, Ⅳ는 최대전력 감소 실행 후, DR을 발령받아 최대전력 감소와 DR을 각각 부분적으로 수행하는 경우를 나타낸다.



[그림 1] 최대전력 감소 및 DR 운용 개념도

3. DR을 고려한 최대전력 감소용 ESS의 운용 알고리즘

3.1 DR을 고려한 최대전력 감소용 ESS의 운용알고리즘

본 논문에서는 ESS의 운용전략을 경제성을 최우선적으로 고려하여, 전기요금이 저렴한 경부하 시간대에 ESS를 충전하고, 부하의 급격한 사용으로 최대전력이 발생하는 시간대에 15분 단위로 방전을 수행한다. 또한, 부하의 최대전력 발생을 예측하기 위하여, 과거 15분간 누적된 전력량의 기울기를 사용한다. 여기서, 과거 15분간 전력량은 식 (1)과 같고, 이 식에 의하여 전력량의 기울기를 산정하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 또한, 식 (2)에서 구한 기울기에 시간대를 고려하여 전력량 예측값을 구하면 식 (3)과 같다.

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

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

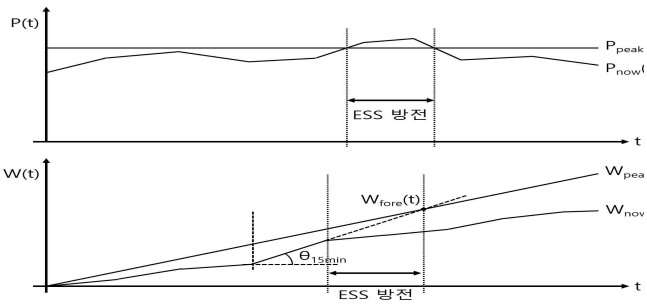
$$W_{fore}(t) = \tan(\theta_{15\min}) \cdot t + W_{now}(t) \tag{3}$$

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

한편, ESS의 최대전력 감소 방식은 식 (4)와 같이 15분간의 최대전력($P_{now}(t)$)이 기준 피크전력(P_{peak})보다 크거나, 예측전력량($W_{fore}(t)$)이 피크전력량($W_{peak}(t)$)보다 큰 경우 ESS를 방전하고, 그 외의 경우에는 충전이나 휴지 동작을 수행한다. 즉, 이와 같은 최대전력 및 예측전력량에 따른 최대전력 감소용 ESS의 운용 전략은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 이러한 패턴의 ESS 운용을 통해 잔여 방전용량을 확보하여 최대전력을 효과적으로 감축할 수 있다.

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

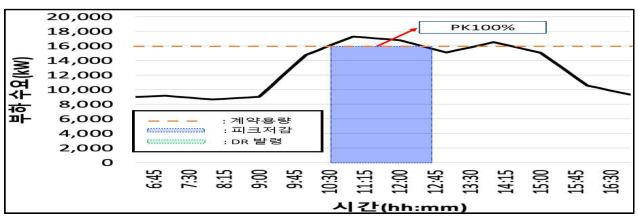
여기서, P_{peak} : 기준 피크전력, $P_{15\min}(t)$: 15분간의 최대전력, $w_{peak}(t)$: 피크 전력량



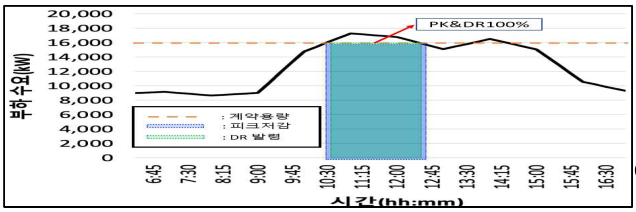
[그림 2] 최대전력 감소용 ESS의 운용 방안

3.2 DR을 고려한 최대전력 감소용 ESS의 운용 전략

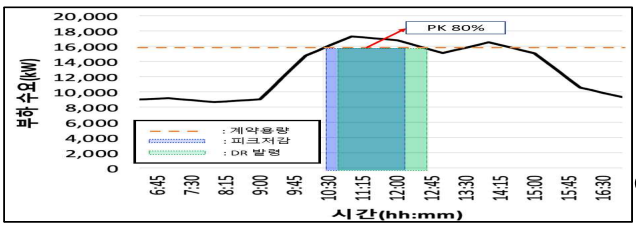
DR은 80% 이상을 수행하는 경우에만 인정을 받으므로, 이에 따라 본 논문에서는 최대전력 감소 시간대와 DR 발령 시간대가 80% 이상 중첩되는 경우에만 DR을 수행하는 것으로 상정한다. 여기서, 그림 3은 DR을 고려한 최대전력 감소용 ESS의 운용 전략을 나타낸 것으로, 그림 3 (a)는 최대전력 감소 실행시간과 DR 발령 시간이 불일치하여 최대전력 감소만 100%로 수행이 가능한 경우(Case Ⅰ)를 나타낸다. 또한, 그림 3 (b)는 최대전력 감소 실행시간과 DR 발령 시간이 대부분 일치하여 100%로 수행이 가능한 경우(Case Ⅱ)를 나타내며, 최대의 경제성을 기대할 수 있는 전략이다. 그림 3 (c)는최대전력 감소 시간대와 DR 시간대가 차이가 발생하여, 최대전력 감소는 80%, DR은 100%를 수행하는 경우(Case Ⅲ)를 나타내며, 그림 3 (d)는 최대전력 감소를 100%, DR은 80%를 수행하는 경우 (Case Ⅳ)를 나타낸다.



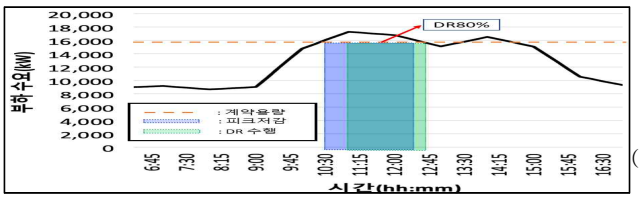
(a) Case Ⅰ



(b) Case Ⅱ



(c) Case Ⅲ



(d) Case Ⅳ

[그림 3] 최대전력 감소 및 DR 운용 개념도

3.3 DR을 고려한 최대전력 감소용 ESS의 운용 알고리즘

상기의 3.1절 및 3.2절의 운용전략을 토대로 DR을 고려한 최대전력 감소용 ESS의 운용 알고리즘은 다음과 같다.

[Step 1] 대상 수용가의 기준 피크전력(P_{peak}), 피크전력량($w_{peak}(t)$), DR 발령시간(t_{DR})을 상정한다.

[Step 2] 대상 수용가의 15분간 최대전력($P_{15\min}(t)$) 및 현재 전력량(W_{now})을 측정하고, 식 (1) ~ 식 (3)에 따라 15분간의 전력량의 기울기($\tan(\theta_{15\min})$) 및 예측 전력량($W_{\text{fore}}(t)$)을 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 수행 여부를 확인하기 위하여 [Step 5]로 이동한다.

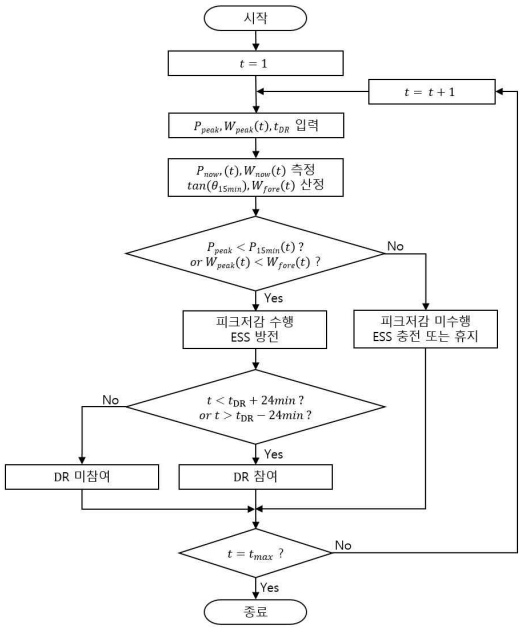
[Step 5] 현재 시간이 DR 발령 후 일정시간(24분) 이내거나, 현재 시간 기준 일정시간(24분) 이내 DR이 발령되는 경우 [Step 6]로 이동하고, 아니면 [Step 7]로 이동한다.

[Step 6] DR의 80% 이상 수행이 가능하여 피크전력 저감과 DR을 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.

상기의 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 [그림 3]과 같다.



[그림 4] DR과 최대전력 감소용 ESS 운용 플로우차트

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

DR을 고려한 최대전력 감소용 ESS의 경제성 평가에 대한 시뮬레이션 조건은 표 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 최대전력 감소용 ESS의 용량은 1MW/2MWh로 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. 또한, 계약용량은 17,289kW, 계약종별은 '일반용(을) 고압A 선택(Ⅱ)', 기본요금 단가는 8,320원/kW로 적용한다.

[표 1] 경제성평가 조건

항 목	내 역
대출 상환기간	20년
이자율	4.29%
할인율	5.5%
ESS 수명	15년
상환방식	원금균등상환
SMP	107원/kWh
운용비	2.5%

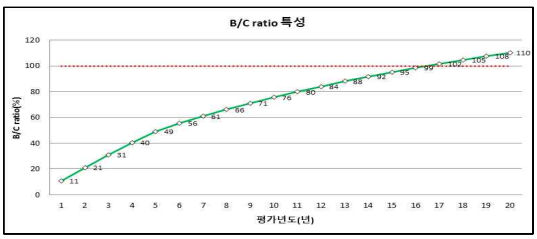
한편, DR을 고려한 최대전력 감소용 ESS 운용 알고리즘 및 경제성을 평가하기 위하여, 표 3과 같이 3가지의 시나리오를 상정한다. 여기서, Case Ⅰ은 최대전력 감소와 DR은 발령 시간대 100% 중첩되는 경우, Case Ⅱ는 최대전력 감소 80%, DR은 100%인 경우이며, Case Ⅲ는 최대전력 감소는 100%, DR은 80%로 운용되는 경우를 나타낸다.

[표 2] 신뢰성 RD 발령 시나리오별 예상

Cases	최대전력 감소	DR
Case Ⅰ	100%	0%
Case Ⅱ	100%	100%
Case Ⅲ	80%	100%
Case Ⅳ	100%	80%

4.2 최대전력 감소를 고려한 ESS의 타당성 평가

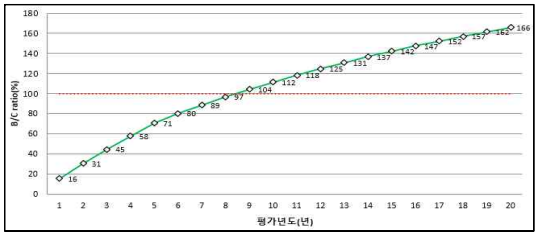
상기에서 제시한 운용방안 및 경제성평가 조건을 바탕으로, DR을 고려하지 않고 최대전력 감소만을 수행한 Case Ⅰ의 경제성을 평가하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 최대전력 감소에 의한 연간 편익은 142,572[천원]으로 산정되고, ROI가 배터리 수명시간을 초과하는 13년 정도이므로, 최대전력 감소만을 수행하는 경우 경제성을 확보하기 어려움을 알 수 있다.



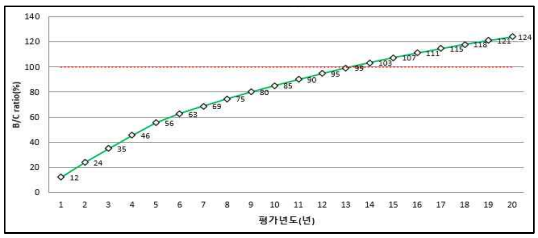
[그림 5] 최대전력 감소 수행에 따른 ROI 평가(Case Ⅰ)

4.3 DR 참여를 고려한 ESS의 타당성 평가

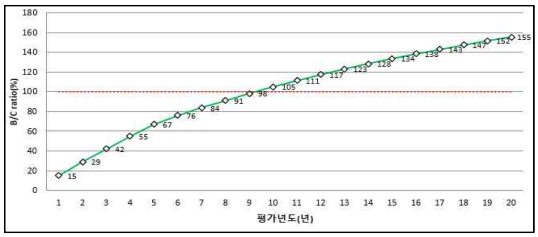
상기의 경제성평가 조건을 바탕으로, DR과 최대전력 감소의 수행 정도에 따른 경제성 평가를 수행한 결과는 그림 8과 같다. 여기서, 그림 6 (a)와 같이 DR과 피크 저감이 동일 시간대에 발생한 Case Ⅱ의 경우에는 8.4년 정도에 ROI에 도달하여 ESS의 사업 타당성 측면에서 경제성이 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 6 (b)와 같이 최대전력 감소를 80%, DR을 100% 수행한 Case Ⅲ의 경우, ROI가 배터리 수명시간을 초과하는 13.2년 정도로 산정되어, 최대전력 감소의 수행 정도가 감소하면, ESS의 경제성 확보가 어려움을 알 수 있다. 한편, 그림 6 (c)와 같이 DR을 80% 수행하고, 최대전력 감소를 100% 수행한 Case Ⅳ의 경우, ROI가 9.2년 정도이므로, 배터리 교체 비용이 발생하기 전에 원금 회수가 가능하고, Case Ⅱ에 비하여 더 일찍 ROI에 도달함을 알 수 있다. 따라서, 최대전력 감소와 DR이 동시간대에 발생하지 않을 경우, DR보다 최대전력 감소를 우선적으로 수행하는 것이 더 경제적임을 알 수 있다.



(a) Case Ⅱ



(b) Case Ⅲ



(c) Case Ⅳ

[그림 6] DR과 최대전력 감소 수행에 따른 ROI 평가

5. 결 론

본 논문에서는 ESS의 수익창출의 극대화를 위해, 기존 최대전력 감소와 더불어 DR 참여를 고려하고, 이에 따른 운용 전략을 제시한다. 또한, 많은 일반 수용가에서 운용 중에 있는 최대전력 감소용 ESS를 대상으로 최대전력 감소 및 DR(demand response)을 고려한 ESS의 운용 알고리즘을 제시하고, 이를 바탕으로 비용요소와 편익요소로 구성된 경제성 평가 모델링을 제시한다. 상기의 알고리즘과 모델링을 바탕으로 DR을 고려한 최대전력 감소용 ESS의 경제성을 평가한 결과, 최대전력 감소용 ESS를 DR에 적극적으로 활용함으로서 어느 정도 경제성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

[1] Byung O Kang, Byung Guk Hwang, Kyoon Kwon, Jaesung Jung, “Operational Strategy of Energy Storage System (ESS) to Participate in Demand Response(DR) Market for Industrial Customer”, New & Renewable Energy, Vol. 13, No. 2, 2017. 6.