

피크 저감용 ESS의 화재예방 설비를 고려한 경제성 평가에 관한 연구

이예빈*, 김지명*, 이중선*, 이나경*, 노대석*

*한국기술교육대학교

e-mail:yeab10@koreatech.ac.kr

A Study on Economic Evaluation Considering Fire Prevention Devices of ESS for Peak Shaving

Ye-Bin Lee*, Ji-Myung Kim*, Joong-Seon Lee*, Na-Kyung Lee*, Dea-Seok Rho*

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

요약

최근, 탄소중립·녹색성장 기본법이 시행되면서, 신재생에너지 전원 및 ESS의 도입이 증가하고 있다. 하지만, 리튬이온 배터리를 이용한 ESS의 화재사고의 지속적인 발생으로, ESS의 안전성에 대한 우려가 증가하고 있어, ESS 산업에 악영향을 미치고 있는 실정이다. 이에 따라, ESS의 화재 예방을 위한 전기적 보호장치와 소방설비의 의무 설치 규정이 시행되고 있고, off-gas 검출장치, 화재감지 및 진압 등의 추가적인 보호장치의 필요성이 증가하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 피크 저감용 ESS의 화재예방 설비를 고려한 경제성 평가 방안을 제시한다. 여기서, 경제성 평가 모델링은 크게 비용요소와 편익요소로 구성되며, 비용요소는 ESS 설치비용, 운용비용, 보호기기 설치비용으로 구성되고, 편익요소는 기본요금 절감, 전력량요금 절감, 전력산업기반기금 및 부가가치세 절감과 DR 참여에 의한 수익으로 구성된다. 여기서, 보호기기 설치비용은 화재 발생 확률이 높은 운용환경에 대하여 가중치를 적용한다. 이를 바탕으로, 현재가치 환산법을 이용하여 화재예방 설비를 고려한 ESS의 경제성 평가를 수행한 결과, ROI는 화재예방 설비를 도입하기 전에는 8.93년으로 산정되지만, 도입 후에는 12.14년 정도로 산정되어 약 4년 정도 경제성이 저하되는 것을 알 수 있다. 따라서, ESS의 운용환경 및 용도에 따라 적절한 종류의 화재예방 설비를 도입하는 것이 필요함을 알 수 있다.

1. 서론

최근, 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장기본법의 시행되면서, 신재생에너지의 출력 안정화, 피크 부하 저감 및 발전기 주파수 조정 등 다양한 기능을 가진 에너지 저장장치의 설치가 증가하고 있다. 하지만, 리튬이온배터리를 이용한 ESS의 화재사고는 2017년 8월 고창에서 발생한 전력연구원의 화재 이후 현재까지 지속적으로 발생하고 있어, ESS의 안전성에 대한 우려가 증가하고 있는 실정이다. 이에 따라, 정부는 ESS의 화재원인 파악과 안전성 평가를 위해, ESS 화재사고 원인조사를 통해 ESS의 위험요인 및 ESS의 운용 환경에 관한 원인을 추정하고 있다. 또한, ESS의 안전을 강화하기 위하여, 제조 기준, 설치 기준, 운영관리와 소방에 대한 대책 등을 바탕으로 전기적 보호장치 및 비상정지장치 등의 의무 설치가 시행되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 화재예방을 위해 의무적으로 설치되는 전기적 보호장치 및 화재 진압 장치 외에 추가적인 보호기기 설치에 대한 타당성을 평가

하기 위하여, 비용요소와 편익요소로 구성된 ESS의 화재예방 설비를 고려한 경제성 평가 모델링을 제시한다. 여기서, 비용요소는 설치비용, 운용비용과 보호기기 설치비용, 편익요소는 기본요금 절감, 전력량요금 절감, 특례 요금제에 의한 기본요금 할인, 전력산업기반기금 및 부가가치세 절감과 DR 참여에 의한 수익으로 구성된다. 여기서, 화재 발생 확률이 높은 운용환경의 경우, 추가적인 보호기기 설치 비용에 가중치를 적용한다. 상기에서 제시한 ESS의 화재예방 경제성 평가 모델링을 바탕으로 현재가치 환산법을 이용하여 경제성 평가를 수행한 결과, 운용환경에 따라 화재 보호 시스템을 추가적으로 도입하는 경우, 경제성이 확보되지 않음을 알 수 있다. 따라서, ESS의 운용환경 및 용도에 따라 적절한 종류의 화재예방 설비의 도입이 필요함을 알 수 있다.

2. 운용환경별 ESS의 화재

ESS의 화재사고는 2017년 고창 전력시험센터를 시작으로 2022년까지 총 40건이 발생하여, ESS 산업 및 사업자에게 큰

피해를 끼치고 있는 실정이다. 여기서, 2022년까지 발생한 40건의 사고를 운용환경에 따라서 분류하면, 산지에서 발생한 사고가 26건(65%), 공장지대 7건(17.5%), 해안가 4건(10%), 평지 2건(5%), 기타 1건(2.5%)이 있다. 여기서, 해안가는 높은 습도 및 염도와 큰 일교차로 결로가 발생하기 쉬우며, 산지에 설치된 ESS는 큰 일교차에 의하여 결로 발생이 높고, 곤충 등에 의한 절연파괴와 낙뢰 등의 발생 확률이 높다. 공장지대는 먼지 발생이 많고, 주변 부하에 의한 전기적 요인(기동전류, 순간 전압변동, 서지 발생, 누설전류 등)에 의해 배터리가 영향을 받을 수 있으며, 평지는 비교적 작은 일교차와 작고 먼지 발생이 적다. 즉, 전체 사고 중 37건(92.5%)이 먼지 또는 습도 등과 같은 주변 환경에 영향을 받아 발생할 가능성이 있음을 알 수 있다. 이에 따라 ESS의 화재를 예방하기 위하여 SPD, IMD 등과 같은 전기적 보호기기 및 소방 시설의 의무 설치에 관한 법규가 시행되고 있으며, 추가적으로 SMS, 화재진압 시스템 등의 도입에 대한 필요성이 증가하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 운용환경별 피크 저감용 ESS의 추가적인 보호기기 설치를 바탕으로, 화재예방 설비를 고려한 경제성 평가 모델링을 수행하고자 한다.

3. 피크 저감용 ESS의 화재예방 설비를 고려한 경제성 평가 모델링

3.1 비용요소

3.1.1 ESS의 설치비용

ESS의 도입에 대한 비용요소는 설치비용, 운용비용, 보호기기 설치비용으로 구성된다. 여기서, 설치비용은 ESS를 설치하는데 소요되는 총 비용으로서, 식 (1)과 같이 PCS와 배터리 시스템의 도입비용에 대하여 kW 및 kWh의 설치용량과 단가를 곱하여 산정하고, ESS의 배터리 교체에 대한 비용을 추가로 고려한다.

$$C_{ESS} = (C_{PCS} \cdot Q_{PCS}) + (C_{bat} \cdot Q_{bat}) + \alpha + \beta \quad (1)$$

여기서, C_{ESS} : ESS의 총 건설비용(원), C_{PCS} : PCS의 도입비용(원/kW), Q_{PCS} : PCS의 설치용량(kW), C_{bat} : 배터리 시스템의 도입비용(원/kWh), Q_{bat} : 배터리 시스템의 설치용량(kWh), α : 배터리 교체비용(원/kWh), β : PCS 교체비용(원/kWh)

3.1.2 ESS의 운용비용

운용비용은 ESS를 운용할 때 발생하는 유지보수 비용으로서, 식 (2)와 같이 ESS 초기 건설비의 일정 비율로 산정하며, 물가상승률은 연도별로 반영한다.

$$C_{op} = \sum_{i=1}^n [C_{ESS} \cdot r_{op} \cdot (1+r_{i,n,f}(i))^{i-1}] \quad (2)$$

여기서, C_{op} : 총 운영비용(원), r_{op} : 운영비 적용비율(%), $r_{i,n,f}(i)$: 물가상승률(%), i : 경제성 평가년도, n : 최종 평가년도

3.1.3 ESS의 화재예방 설비 설치비용

ESS의 화재예방 설비는 전기적 보호장치, 화재진압 시스템, SMS 등의 비용으로 구성되며, 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{safe} = C_{ele.safe} + (C_{fire.safe} + C_{sms}) \cdot Q_{bat} \quad (3)$$

여기서, C_{safe} : 보호기기의 총 건설비용(원), $C_{ele.safe}$: 전기적 보호장치의 도입비용(원), $C_{fire.safe}$: 화재진압 시스템의 도입비용(원/kWh), Q_{bat} : 배터리의 설치용량(kWh), C_{sms} : SMS 건설비용(원/kWh)

3.2 피크 저감용 ESS의 편익요소

3.2.1 기본요금 절감

피크 저감용 ESS의 편익은 기본요금, 특례요금, 전력산업기반기금 및 부가가치세 절감 요금으로 구성된다. 여기서, 기본요금 절감은 피크 저감 효과에 의한 수용가의 최대수요전력의 감소로 발생하는 편익으로 식 (4)와 같이 ESS가 도입되기 전의 수용가의 피크전력과 ESS 도입 이후의 피크전력 차이에 기본요금을 곱하여 산정하며, 기본요금의 1배만큼 적용된다.

$$B_{kW} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^d \sum_{k=1}^h [(P_{peak}(i,j,k) - P_{ess}(i,j,k)) \cdot C_{kW}(i)] \quad (4)$$

여기서, B_{kW} : 기본요금 할인에 의한 편익요금(원), $P_{peak}(i,l,k)$: 월평균 최대수요전력 감축량(kW), $P_{ess}(i,l,k)$: ESS에 의한 피크 저감량(kW), $C_{kW}(i,j,k)$: 기본요금(원/kW), i : 대상연도, j : 대상일자, k : 대상시간

3.2.2 전력량요금 절감

ESS의 운용에 따른 전력량요금 절감에 의한 편익은 상대적으로 요금이 저렴한 경우부하 시간대에 ESS를 충전하고, 요금이 높은 최대부하 시간대에 방전시켜 발생하는 차액으로, Eq. (5)와 같이 ESS가 도입되기 전의 수용가의 시간대별 사용 전력량과 ESS 도입 이후 충·방전 운전에 의해 변동된 수용가의 시간대별 사용 전력량의 차이에 전력량요금을 곱하여 산정한다.

$$B_{kwh} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{d_{oper}} \sum_{k=1}^h [(W_{kwh}(i,j,k) - W_{ess}(i,j,k)) \cdot C_{kwh}(i,j,k)] \quad (5)$$

여기서, B_{kwh} : 전력량요금 절감에 의한 편익요금(원), d_{oper} : ESS의 연간 운용일 수, $W_{kwh}(i,j,k)$: 수용가의 사용 전력량(kWh), $W_{ess}(i,j,k)$: ESS의 충·방전운전에 의한 수용가의 사용 전력량(kWh), $C_{kwh}(i,j,k)$: 전력량요금(원/kWh)

3.2.3 전력산업기반기금 및 부가가치세 절감

한편, 전력산업기반기금 및 부가가치세 절감은 ESS의 피크 저감에 의한 기본요금 절감분과 계시별 요금제를 이용한 차익거래를 통한 전력량요금 절감분을 포함한 수용가 전기요금 절감액 및 특례 요금제에 의한 전기요금 할인금액에 대하여, 식 (6)과 식 (7)과 같이 전력산업기반기금(3.7%)과 부가가치세(10%)의 정해진 비율만큼 각각 절감된다.

$$B_{fund} = (B_{kW} + B_{kWh} + B_{dis}) \cdot r_{fund} \quad (6)$$

$$B_{tax} = (B_{kW} + B_{kWh} + B_{dis}) \cdot r_{tax} \quad (7)$$

여기서, B_{fund} : 전력산업기반기금 절감에 의한 편익요금(원), r_{fund} : 전력산업기반기금 비율(3.7%), B_{tax} : 부가가치세 절감에 의한 편익요금(원), r_{tax} : 부가가치세 비율(10%)

3.2.4 DR 참여에 따른 수익

수요자원 거래시장의 참여수익은 식 (8)과 같이, 고정기본정산금, 의무감축 실적금, 차등기본정산금, 자발적 실적금으로 구성된다. 여기서, 고정기본정산금은 식 (9)와 같이, 의무감축용량과 연간 기본정산금 단가를 곱하여 산정하며, 의무감축실적금은 식 (10)과 같이, 연간 기본정산금 단가와 감축시간에 SMP를 곱하여 산정한다. 또한, 차등기본 정산금은 식 (11)과 같이, 의무감축용량과 연간 기본정산금 단가와 곱하여 산정하며, 자발적실적금은 식 (12)와 같이, 낙찰용량, 낙찰시간과 SMP를 곱하여 편익을 산정한다.

$$B_{DR} = B_{fix} + B_{ob} + B_{diff} + B_{vol} \quad (8)$$

$$B_{fix} = C_{red} \times P_{ann} \quad (9)$$

$$B_{ob} = C_{red} \times t_{red} \times SMP \quad (10)$$

$$B_{diff} = C_{red} \times P_{ann} \quad (11)$$

$$B_{vol} = C_{bid} \times t_{bid} \times SMP \quad (12)$$

여기서, B_{DR} : 수요자원 거래시장 참여 수익(원), B_{fix} : 고정기본정산금(원), B_{ob} : 의무감축 실적금(원), $B_{diff,bas}$: 차등기본정산금(원), B_{vol} : 자발적 실적금(원), $C_{reduction}$: 의무감축용량(kw), $t_{reduction}$: 감축시간, $P_{annal,bas}$: 년간기본정산금 단가(원/kw), C_{bia} : 낙찰용량, t_{bia} : 낙찰시간

3.3 현재가치 환산법

경제성평가를 위한 비용과 편익의 요소는 미래에 발생할 가치로서, 식 (14)와 같이 비용 및 편익요소를 동일한 시점의 가치로 산정하여 경제성을 평가한다.

$$PW = \sum_{t=1}^n \frac{CF}{(1+d)^t} \quad (14)$$

여기서, PW : 현재가치(원), CF : 현금흐름(원), n : 기간(years), d : 할인율(%)

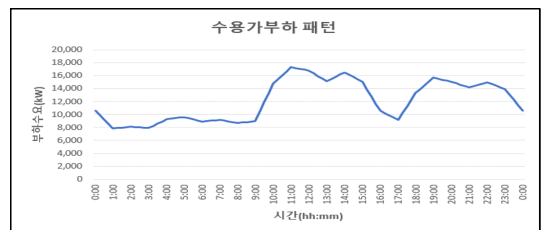
4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

ESS의 화재예방 경제성을 평가하기 위하여, 본 논문에서는 표 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 피크 저감용의 단위 설치 용량은 4.5[MWh]인데, 4시간의 평균 운전 시간을 바탕으로 1.12[MW]/4.5[MWh]의 용량으로 산정한다. 또한, 대출 상환기간은 20년, 할인율은 5.5%로 상정한다. 또한, PCS 및 ESS의 교체시기는 10년으로 고려하며, 운영비는 2.5%로 상정한다. 한편, 경제성 평가를 수행하기 위한 대상 수용가는 그림 1과 같이 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, ESS의 충·방전 운용패턴은 사계절 동안 경부하 시간대인 1시~5시에 충전하고, 피크가 발생하는 10시~14시에 방전한다. 한편, 산지에 설치되는 ESS의 경우, 주변환경에 의하여 화재가 발생할 확률이 높으므로, 이를 방지하기 위하여 보호기기 설치 비용에 1.5배의 가중치를 적용한다.

[표 1] 경제성 평가 조건

항목	내역
경제성 평가기간[년]	20
할인율[%]	5.5
물가 상승률[%]	3
SMP 가격 단가[원/kWh]	167
REC 요금[원/kWh]	56.48
ESS 운용비[%]	2.5
PCS 내용연수[년]	10
배터리 내용연수[년]	10

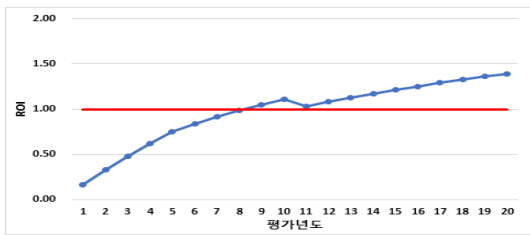


[그림 1] 대상 수용가의 부하수요 일일 패턴

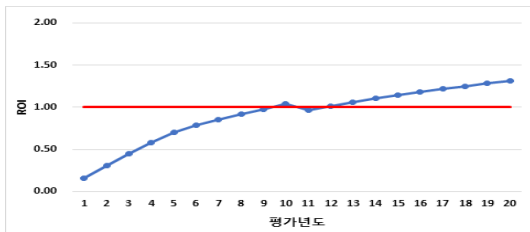
4.2 화재예방 설비를 고려한 ESS의 경제성 평가

4.2.1 공장지대에 설치된 경우

상기에서 제시한 경제성 평가 조건을 바탕으로, 공장지대에 설치된 피크 저감용 ESS의 타당성을 평가하면 그림 2와 같다. 여기서, 그림 2의 (a)와 같이 화재예방 설비의 설치를 고려하지 않은 경우, ROI가 8.93년으로 산정되는 것을 알 수 있다. 또한, 보호기기 및 화재진압 시스템 등 화재예방 설비의 설치를 고려한 경우, 그림 2의 (b)와 같이 ROI가 10.64년으로 산정되는 것을 알 수 있다. 따라서, 화재예방 설비의 설치로 인하여 ESS의 경제성이 확보되지 않는 것을 알 수 있다.



(a) 화재예방 설비 미설치

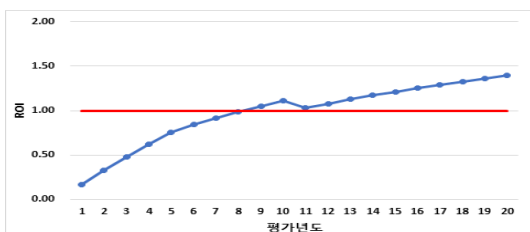


(b) 화재예방 설비 설치

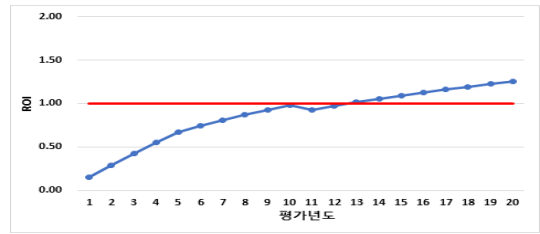
[그림 2] 공장지대에 설치된 ESS의 ROI 특성

4.2.2 산지에 설치된 경우

상기에서 제시한 경제성 평가조건을 바탕으로, 산지에 설치된 피크 저감용 ESS의 타당성을 평가하면 그림 3과 같다. 여기서, 그림 3의 (a)와 같이 화재예방 설비의 설치를 고려하지 않은 경우, ROI가 8.93년으로 산정되는 것을 알 수 있다. 또한, 보호기기 및 화재진압 시스템 등 화재예방 설비의 설치를 고려한 경우, 그림 3의 (b)와 같이 ROI가 12.14년으로 산정되는 것을 알 수 있다. 따라서, 화재예방 설비의 설치로 인하여 ESS의 경제성이 확보되지 않는 것을 알 수 있다. 따라서, ESS의 운용환경 및 용도에 따라 적절한 종류의 화재예방 설비의 도입이 필요함을 알 수 있다.



(a) 화재예방 설비 미설치



(b) 화재예방 설비 설치

[그림 3] 산지에 설치된 ESS의 ROI 특성

5. 결 론

본 논문에서는 ESS의 화재를 예방할 수 있는 보호기기 및 화재진압 시스템 등의 화재예방 설비 도입에 대한 타당성을 평가하기 위하여, 피크 저감용 ESS의 경제성 평가 방안을 제시한다. 또한, 화재 발생 확률이 높은 운용환경의 경우, 화재 예방 설비의 비용에 가중치를 적용한다. 이를 바탕으로, 현재 가치 환산법을 이용하여 화재예방 설비를 고려한 ESS의 경제성 평가를 수행한 결과, ROI는 화재예방 설비를 도입하기 전에는 8.93년으로 산정되지만, 도입 후에는 12.14년 정도로 산정되어 약 4년 정도 경제성이 저하되는 것을 알 수 있다. 따라서, ESS의 운용환경 및 용도에 따라 적절한 종류의 화재예방 설비를 도입하는 것이 필요함을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] Energy Storage System Industry Development Strategy, Ministry of Trade, Industry and Energy, pp. 6, 2023.
- [2] 원종홍, 유현상, 최성문, 김지명, 노대석, "DR과 피크저감을 고려한 ESS의 운용 알고리즘에 관한 연구", 한국산학기술학회 논문지, 24, 8, 2023