

# 운용환경 및 용도를 고려한 ESS의 경제성 평가에 관한 연구

이예빈\*, 최성문\*, 임민규\*\*\*, 이나경\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교

\*\*한국배터리안전연구원

e-mail:yeab10@koreatech.ac.kr

## A Study on Economic Evaluation Modeling Considering Operation Environments and Applications in ESS

Ye-Bin Lee\*, Sung-Moon Choi\*, Min-Gyu Lim\*\*\*, Na-Kyung Lee\*, Dea-Seok Rho\*

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

\*\*Korea Battery Safety Testing-labs

### 요 약

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 ESS의 운용환경 및 용도에 따른 보호장치 도입의 타당성을 평가하기 위하여 비용요소, 편익요소, 현재가치 환산법으로 구성된 경제성 평가 모델링을 제안한다. 여기서, 비용요소는 ESS의 설치비용, 운용비용으로 구성되며, 편익요소는 용도에 따라서 개시별 요금 절감, 탄소 배출권 요금, 피크요금 절감, 석탄화력발전기 대체 편익 등으로 구성된다. 이를 바탕으로, 현재가치 환산법을 이용하여 운용환경 및 용도를 고려한 ESS의 경제성을 평가한 결과, 배터리에 악영향을 많이 미치는 산지나 해안가에 설치하는 피크 저감 및 신재생에너지 연계용 ESS에 대하여, 오프가스 검출장치와 추가적인 소방 설비 등의 보호장치를 도입해야 하므로 ESS의 B/C ratio가 2년 정도 저하됨을 알 수 있다. 또한, 화재 발생 가능성이 가장 높은 주파수 조정용 ESS의 경우에는 추가적인 보호장치를 도입하더라도 경제성이 1년 이내에 확보됨을 알 수 있다.

### 1. 서 론

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 운용환경 및 용도를 고려한 ESS의 보호장치 도입의 타당성을 평가하기 위

하여, 비용요소, 편익요소, 현재가치 환산법으로 구성된 경제성 평가 모델링을 제안한다. 여기서, 비용요소는 ESS의 설치비용과 운용비용으로 구성된다.

또한, 신재생에너지 연계용 ESS의 편익요소는 개시별 요금 절감, 탄소 배출권 요금으로 구성되고, 피크 저감용 ESS는 피크요금 절감, 특례 요금, 전력산업기반기금 및 부가가치세 절감 요금, 주파수 조정용 ESS는 석탄화력발전기 대체 편익과 보조서비스 정산금으로 구성된다. 여기서, 화재 발생 확률이 높은 운용환경의 경우, 추가적인 보호장치 비용에 가중치를 적용한다. 상기에서 제시한 ESS의 경제성 평가 모델링을 바탕으로 현재가치 환산법을 이용하여 경제성 평가를 수행한 결과, 배터리에 악영향을 많이 미치는 산지나 해안가에 설치하는 피크 저감 및 신재생에너지 연계용 ESS에 대하여, 오프가스 검출장치와 추가적인 소방 설비 등의 보호장치를 도입해야 하므로 ESS의 B/C ratio가 2년 정도 저하됨을 알 수 있다. 또한, 화재 발생 가능성이 가장 높은 주파수 조정용 ESS의 경우에는 추가적인 보호장치를 도입하더라도 경제성이 1

년 이내에 확보됨을 알 수 있다.

## 2. 운용환경별 ESS의 화재사례 분석

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 보호장치 및 소방 시설의 의무 설치에 관한 법규가 시행되고 있으며, 추가적으로 SMS, 화재진압 시스템 등의 도입에 대한 필요성이 증가하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 운용환경 및 용도를 고려한 ESS의 보호장치 도입의 타당성을 평가하기 위한 경제성 평가 모델링을 제안한다.

## 3. 운용환경 및 용도를 고려한 ESS의 경제성 평가 모델링

### 3.1 비용요소

ESS의 도입에 대한 비용요소는 설치비용, 운용비용으로 구성된다. 여기서, ESS의 설치비용은 식 (1)과 같이 PCS와 배터리 시스템의 도입비용과 교체비용, 보호장치 비용을 추가적으로 고려한다. 또한, 보호장치는 전기적 보호장치, 화재진압 및 차단 시스템, BMS 등으로 구성되며, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 한편, 운용비용은 식 (3)과 같이 ESS의 초기 선설비의 일정비율로 산정하며, 물가상승률은 연도별로 반영한다.

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

$$C_{safe} = C_{ele.safe} + (C_{fire.safe} + C_{bms}) \cdot Q_{bat} \quad (2)$$

$$C_{op} = \sum_{i=1}^n [C_{ESS} \cdot r_{op} \cdot (1 + r_{i.n.f}(i))^{i-1}] \quad (3)$$

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),  $C_{safe}$ :보호장치의 총 건설비용(원),  $C_{ele.safe}$ :전기적 보호장치의 도입비용(원),  $C_{fire.safe}$ :화재진압 및 차단 시스템의 도입비용(원),  $C_{op}$ :총 운영비용(원),  $r_{op}$ :운영비 적용비율(%),  $r_{i.n.f}(i)$ :물가상승률(%),  $i$ :경제성 평가년도,  $n$ :최종 평가년도

### 3.2 편익요소

#### 3.2.1 신재생에너지 연계용 ESS

신재생에너지 연계용 ESS의 편익요소는 개시별 요금 절감과 탄소배출권 요금으로 구성된다. 먼저, 개시별 요금 절감은 신재생에너지 ESS의 도입으로 발생하는 전력 판매 요금으로서, 식 (4)와 같이 전력거래량과 전력거래 단가에 선로손실률 [%]을 고려한다. 또한, 탄소배출권 요금은 식 (5)와 같이 탄소배출량과 온실가스 감축분의 단가를 곱하여 연간 발전시간까지의 합을 더하여 산정하며, 탄소 배출량은 식 (6)과 같다.

$$B_{kWh} = P_{kWh} \cdot U_{SMP} \cdot P_{loss} \quad (4)$$

$$B_{CO_2} = \sum_{t=1}^T E_{CO_2}(t) \cdot CER \quad (5)$$

$$E_{CO_2}(t) = R_{kWh} \cdot C_{fu} \cdot F_{CO_2} \cdot F_{oil} \cdot \left(\frac{M_{CO_2}}{A_C}\right) \quad (6)$$

여기서,  $B_{kWh}$ :개시별 절감 요금(원),  $P_{kWh}$ : 전력거래량(kWh),  $U_{SMP}$ : 전력거래단가(원/kWh),  $P_{loss}$ : 선로손실률(%),  $B_{CO_2}$ : 해당연도 탄소배출권 요금(원),  $E_{CO_2}(t)$ : 시간대별 탄소배출량(ton),  $CER$ : 시간대별 온실가스 감축분(원/ton),  $R_{kWh}$ : 신재생에너지의 발전량(ton),  $C_{fu}$ : 연료소비율(L/kWh),  $F_{CO_2}$ : 탄소배출계수(경유:0.837),  $F_{oil}$ : 석유환산계수(경유:0.842),  $M_{CO_2}$ : 이산화탄소 분자량(44),  $A_C$ : 탄소 원자량(12)

#### 3.2.2 피크 저감용 ESS

피크 저감용 ESS의 편익요소는 기본요금 절감, 전력량요금 절감, 전력산업기반기금 및 부가가치세 절감으로 구성된다. 여기서, 기본요금 절감은 피크 저감 효과에 의한 수용가의 최대수요전력의 감소로 발생하는 편익으로 식 (7)과 같이 ESS가 도입되기 전의 수용가의 피크전력과 ESS 도입 이후의 피크전력 차이에 기본요금을 곱하여 산정하며, 기본요금의 1배만큼 적용된다. 또한, ESS의 운용에 따른 전력량요금

절감에 의한 편익은 상대적으로 요금이 저렴한 경부하 시간대에 ESS를 충전하고, 요금이 높은 최대부하 시간대에 방전시켜 발생하는 차액으로, 식 (8)과 같이 ESS가 도입되기 전의 수용가의 시간대별 사용 전력량과 ESS 도입 이후 총 방전 운전에 의해 변동된 수용가의 시간대별 사용 전력량의 차이에 전력량요금을 곱하여 산정한다.

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

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

여기서,  $B_{kW}$ : 기본요금 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,  $j$ : 대상 일자,  $k$ : 대상시간,  $B_{kwh}$ : 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 총 방전운전에 의한 수용가의 사용 전력량(kWh),  $C_{kwh}(i,j,k)$ : 전력량요금(원/kWh)

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 (9)와 식 (10)과 같이 전력산업기반기금(3.7%)과 부가가치세(10%)의 정해진 비율만큼 각각 절감된다.

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

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

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%)

### 3.2.3 주파수 제어용 ESS

주파수 제어용 ESS의 편익요소는 선택화력 대체편익과 보조서비스 정산에 따른 편익으로 구성된다. 여기서, 고가발전기중, 어떤 발전기의 운전을 감소시켰는지 알 수 없으므로, SMP 정산금과 LNG 정산금을 적용하여 석탄 화력발전기의 정산금 차익을 산정한다. 즉, 식 (11)과 식 (12)와 같이 각 발

전기의 정산금 차이와 ESS용량 그리고 운전시간의 곱으로 편익을 구할 수 있다. 또한, 편익계산에 필요한 SMP 정산금, 유연탄 정산금, LNG 정산금 자료는 전력거래소에서 분석한 2023년 전력시장 운영실적 자료를 참조한다. 한편, AS(보조서비스) 정산에 따른 편익은 GFR 정산편익과 AGC 정산편익으로 나눌 수 있다. GFR 및 AGC 서비스 산정식은 각각 식 (5-13) 및 (5-14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{석탄화력 대체편익금} &= (SMP\text{정산금} - \text{유연탄정산금}) \\ &\quad \times \text{ESS용량} \times \text{운전시간} \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{석탄화력 대체편익금} &= (LNG\text{정산금} - \text{유연탄정산금}) \\ &\quad \times \text{ESS용량} \times \text{운전시간} \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} GFR_{i,t} &= GFRQ_{i,t} \times SDWF_i \times DBWF_i \\ &\quad \times GFSF_{i,t} \times GFHF \times \text{운전시간(분)}/60 \quad (13) \end{aligned}$$

$$AGCP_{i,t} = AGCQ_{i,t} \times CAWF_{i,t} \times CPWF_i \times AGCF \quad (14)$$

여기서,  $GFP_{i,t}$ : 주파수추종서비스 정산금액,  $GFRQ_{i,t}$ : 주파수추종서비스 응답가능용량,  $SDWF_i$ : 속도조정율에 따른 가중치,  $DBWF_i$ : 부동대에 따른 가중치,  $GFSF_{i,t}$ : 주파수추종서비스 운전상태,  $AGCP_{i,t}$ : 자동발전제어서비스 정산금,  $AGCQ_{i,t}$ : 자동발전제어서비스 제어가능용량,  $CAWF_{i,t}$ : 제어가능률에 따른 가중치,  $CPWF_i$ : 제어성공에 따른 가중치,  $AGCF$ : 자동발전제어서비스 정산단가

### 3.3 현재가치 환산법

경제성평가를 위한 비용과 편익의 요소는 미래에 발생할 가치로서, 식 (15)와 같이 비용 및 편익요소를 동일한 시점의 가치로 산정하여 경제성을 평가한다.

$$PW = \sum_{t=1}^n \frac{CF}{(1+d)^t} \quad (15)$$

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

## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 4.1 시뮬레이션 조건

운용환경 및 용도를 고려한 ESS의 경제성을 평가하기 위하여, 본 논문에서는 표 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 대출받은 원금은 20년 동안 매년 균등 상환하는

방식으로 가정하고, 미래의 가치에 대한 할인율과 물가 상승률은 각각 5.5[%]와 3[%]로 상정한다. 또한, ESS의 운용비용은 건설비용의 2.5[%]로 상정하고, PCS 및 배터리의 교체시기는 각각 20년, 10년을 대상으로 한다. 한편, ESS의 편익을 계산하기 위한 SMP 정산금, 유연탄 정산금, LNG 정산금 자료는 전력거래소에서 제시한 2023년 전력시장 운영실적 자료를 활용한다.

또한, ESS의 보호장치 및 소방 설비의 단가는 운용환경별 영향도를 바탕으로 표 2와 표 3과 같이 상정한다. 여기서, ESS의 배터리에 악영향을 미칠 확률이 높은 운용환경의 경우, 추가적인 화재예방 설비와 보호장치 비용에 가중치를 적용하고, 배터리에 악영향을 미칠 확률이 낮은 운용환경은 필수로 설치해야 하는 보호장치인 SMS와 전기적 보호장치를 고려한다.

[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]	78.8
ESS 운용비[%]	2.5
PCS 내용연수[년]	20
배터리 내용연수[년]	10

[표 2] 운용환경별 보호장치 설치 단가

항목	산지	해안가	공장지대	평지
오프가스 센서 [천원/MWh]	32,000	32,000	24,000	0
각종 센서 [천원/MW]	14,000	14,000	10,500	7,000
감시제어장치 [천원/MW]	54,000	54,000	27,000	27,000
전기적 보호장치 [천원]	10,000	10,000	5,000	5,000

[표 3] 용도별 ESS의 화재진압 및 차단 시스템 단가

항목	신재생에너지 연계용	피크 저감용	주파수 제어용
화재진압 시스템[천원]	17,710	18,810	24,760
화재차단 시스템[천원]	10,000	11,000	21,000

4.2 운용환경 및 용도를 고려한 ESS의 경제성 평가  
상기에서 제시한 ESS의 경제성 평가 모델링을 바탕으로, 운용환경 및 용도를 고려한 ESS의 타당성을 평가하면 표 4와

같다. 여기서, 신재생에너지 연계용 ESS는 평가 기간 내에 경제성을 확보할 수 없음을 알 수 있고, 피크 저감용 ESS는 보호장치를 추가적으로 설치함에 따라 약 2년 정도 경제성이 저하되며, 주파수 조정용 ESS는 1년 이내에 경제성을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 배터리에 악영향을 많이 미치는 산지나 해안가에 설치하는 피크 저감 및 신재생에너지 연계용 ESS에 대하여, 오프가스 검출장치와 추가적인 소방 설비 등의 보호장치를 도입해야 하므로 ESS의 B/C ratio가 2년 정도 저하됨을 알 수 있다. 또한, 화재 발생 가능성이 가장 높은 주파수 조정용 ESS의 경우에는 추가적인 보호장치를 도입하더라도 경제성이 1년 이내에 확보됨을 알 수 있다.

[표 4] 운용환경 및 용도를 고려한 ESS의 경제성 평가

용도 \ 운용환경	신재생에너지 연계용	피크 저감용	주파수 조정용
산지	20.7년	16.4년	1년
공장지대	20.6년	15.6년	1년
평지	19.4년	14.9년	1년
화재예방 설비 미설치	19.1년	14.5년	1년

## 5. 결 론

운용환경 및 용도를 고려한 ESS의 타당성을 평가하기 위하여, 비용요소, 편익요소, 현재가치 환산법으로 구성된 경제성 평가 방안을 제시한다. 한편, 운용환경 및 용도를 고려한 ESS의 경제성을 평가한 결과, 배터리에 악영향을 많이 미치는 산지나 해안가에 설치하는 피크 저감 및 신재생에너지 연계용 ESS에 대하여, 오프가스 검출장치와 추가적인 소방 설비 등의 보호장치를 도입해야 하므로 ESS의 B/C ratio가 2년 정도 저하됨을 알 수 있다. 또한, 화재 발생 가능성이 가장 높은 주파수 조정용 ESS의 경우에는 추가적인 보호장치를 도입하더라도 경제성이 1년 이내에 확보됨을 알 수 있다.

## 참고문헌

- [1] Energy Storage System Industry Development Strategy, Ministry of Trade, Industry and Energy, pp. 6, 2023.
- [2] 이예빈, 김지명, 이민행, 노성은, 김세진, 노대석, “운용환경 및 용도를 고려한 ESS의 안전성 평가 방안”에 관한 연구,” 전기학회논문지, vol. 73, no. 5, pp. 773-783, 2024.