

고속철도 변전소 피크부하 저감용 ESS 용량 산정 및 경제성 분석

Sizing and Economic Analysis of Battery Energy Storage System for Peak Shaving of High-Speed Railway Substations

김 슬 기[†] · 김 종 율^{*} · 조 경 희^{*} · 변 길 성^{*}
(Seul-Ki Kim · Jong-Yul Kim · Kyeong-Hee Cho · Gil-Sung Byun)

Abstract - The paper proposed a sizing method of an energy storage system(ESS) for peak shaving of high-speed railway substations based on load profile patterns of substations. A lithium based battery ESS was selected since it can produce high-power at high speed that peak shaving requires, and also takes up a relatively smaller space for installation. Adequate size of the ESS, minimum capacity which can technically meet a peak shaving target, was determined by collectively considering load patterns of a target substation, characteristics of the ESS to be installed, and optimal scheduling of the ESS. In case study, a local substation was considered to demonstrate the proposed sizing method. Also economic analysis with the determined size of ESS was performed to calculate electricity cost savings of the peak shaving ESS, and to offer pay-back period and return on investment.

Key Words : Energy storage system, Demand management, Optimal scheduling, Peak shaving, Battery sizing

1. 서 론

고속열차는 정격 15MW의 대용량 부하로서, 운행되는 고속열차에 필요한 전력은 고속철도 각 구간에 설치된 고속철도 변전소에서 공급된다. 고속철도는 빠른 속도와 정시성 등 편리성, 접근성 제고를 위한 연계교통망 확충 등으로 매년 이용객이 증가함에 따라 매년 열차 운행횟수를 점차적으로 확대해 나가고 있고, 고속철도 변전소의 피크전력 또한 점진적으로 증가하고 있다[1]. 이러한 피크전력 증가로 인하여 고속철도 변전소 변압기 증가 등의 설비비용이 증가되며, 철도 운영기관의 전기요금도 크게 증가하고 있다. 이에 대한 대안으로서 에너지저장시스템(Energy Storage System, ESS)을 이용하여 전차선로의 부하가 적을 때 에너지를 충전하고, 전차선로의 부하가 많을 때에는 저장시스템으로부터 에너지를 방전하여 고속철도변전소의 최대부하를 감소시켜 전기요금을 절감하는 방식이 연구되고 있다[2-4].

ESS의 종류는 다양하지만 고속철도 변전소 피크저감용으로는 비교적 설치면적을 작게 차지하면서, 속응성이 빠르고 고출력이 가능하며 충분한 에너지용량을 가져야 한다는 점에서 이차전지시스템이 적합하다. ESS는 저장매체인 이차전지 등의 설비투자비가 크므로, 운전에 따른 비용절감효과를 정확하게 분석하여 적정용량을 설계하는 것이 매우 중요하

다[5].

본 논문에서는 과거의 부하패턴을 이용하여 고속철도 변전소의 피크부하를 저감하기 위한 ESS의 적정용량을 산정하는 방법을 제시하였다. 속응성과 고출력이 요구되는 피크저감 기능의 특성과 설치공간, 기술수준 등을 고려하여 리튬계열 전지를 이용한 ESS를 대상으로 하였다. 적정용량은 피크부하 저감 목표를 달성하기 위한 기술적인 관점에서의 최소용량으로서, 대상 변전소의 부하패턴, 적용 ESS의 특성, 충전전 계획 최적화 등을 고려하여 결정하였다. 울산 고속철도 변전소를 대상으로 최근 3년간 부하 데이터를 바탕으로 목표 피크저감율을 달성하기 위한 적정용량을 산정하였다. 또한, 산정된 적정용량 적용 시의 전기요금 절감액과 시스템 투자비를 고려한 투자비회수기간 및 투자수익률을 산정하여 경제성을 분석하였다.

2. 고속철도 변전소 피크부하 저감용 ESS

그림 1은 고속철도 변전소의 최대부하일 곡선으로서, 15분 평균 데이터를 기준으로 24시간 동안의 전력사용현황을 나타낸다. 전체적으로는 일반적인 산업용 수용가와 특성이 유사한데, 고속철도 운행시간이 아닌 오전 2시부터 오전 5시까지는 전력사용이 거의 없으며, 이후 고속철도 운행시간 동안은 일정한 전력을 지속적으로 소모하는 형태를 가진다. 또한, 특이한 점은 일간 운행시간 중 특정한 1-2개 구간(15분 평균전력 기준)에서 전력소비가 급증하는 현상을 나타내는데 이로 인해 기본요금이 급증하게 되어 연간 전기요금을 상승시키는 원인이 된다. 따라서 고속철도 변전소는 이와 같이 짧은 시간동안 크게 증가하는 피크전력을 적절히 저감할 경우 기본요금 절감효과가 상당히 클 것으로 예상된다. 반면에, 전력사용량요금을 저감하기 위해서는 일간 피크부하

* Smart Distribution Research Center, Advanced Power Grid Research Division, Korea Electrotechnology Research Institute, Korea

† Corresponding Author : Smart Distribution Research Center, Advanced Power Grid Research Division, Korea Electrotechnology Research Institute, Korea

E-mail : blksheep@keri.re.kr

Received : July 14, 2013; Accepted : December 26, 2013

시간대에 사용하는 전력량의 일부를 전력요금이 싼 심야시간(오전 2시-오전 5시)으로 이동해야 하는데 고속철도 변전소의 부하수준을 고려할 때, 수십 MWh 규모의 ESS가 필요하다. 그러나 현 단계에서 수십MWh 이상의 ESS를 신뢰성있게 구현하는 데는 기술적 어려움이 있고, 현재의 가격수준을 고려할 때 초기투자비용 역시 막대한 금액이 소요될 것으로 예상된다. 따라서, 현 시점에서 현실적인 고속철도 변전소용 전력저장시스템의 운전방안은 피크전력을 저감하는 용도가 가장 합리적일 것으로 판단된다.

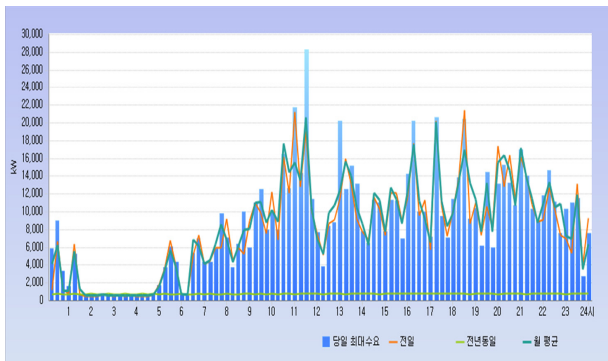


그림 1 고속철도 변전소 최대부하일 곡선
Fig. 1 Load curve of annual peak day of high speed railway substation

고속철도 변전소는 계약용량 300kW 이상의 산업용 수용가에 해당되므로, 전기요금은 기본요금과 전력량요금으로 구성되며, 기본요금과 전력량요금의 합계에 전력산업기반기금(3.7%)과 부가가치세(10%)가 포함되어 청구금액이 결정된다. 기본요금은 검침당월과 직전 12개월 중 7월~8월 및 11월~2월의 당월분 최대수요전력 중 가장 큰 최대수요전력을 요금적용전력으로 하여 산정한다[6]. 최대수요전력은 전력량을 계측하여 15분 단위로 평균한 값을 사용하며, 피크저감용 ESS는 적어도 15분간 지속적인 출력을 낼 수 있는 에너지용량이 확보되어야 한다.

3. 적정용량 산정

고속철도 변전소의 피크부하를 저감하기 위한 ESS의 용량은 낼 수 있는 출력[MW]을 결정하는 PCS의 정격과 가능한 충방전 전력량(에너지)[MWh]을 결정하는 전지의 용량으로 구분된다. PCS의 정격은 순시적으로 저감해야하는 부하 크기보다 커야 하며, ESS의 전지 용량은 저감해야 하는 부하가 지속되는 시간 동안 필요한 전력량 이상을 공급할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 울산 고속철도 변전소를 대상으로 기존 피크부하의 20%를 저감할 수 있는 ESS의 적정용량을 산정하였다. 울산변전소는 2009년 10월 이후 가압이 되었기 때문에, 취득된 데이터 중 2010년부터 2012년까지 3년간의 부하 데이터를 기준으로 ESS의 정격과 용량을 산정하였다.

3.1 ESS 정격 및 전지 용량 산정 방법

그림 2는 본 연구에서 사용된 고속철도 변전소 피크저감용 ESS 정격의 산정절차를 나타낸다. 먼저 변전소의 최근 3년 기간 중 일간 최대부하를 찾고 여기에 적정한 여유분을 준 값을 기준 최대부하로 선정된 후, 이 기준 최대부하에 피크 저감율을 곱하여 산정하였다.

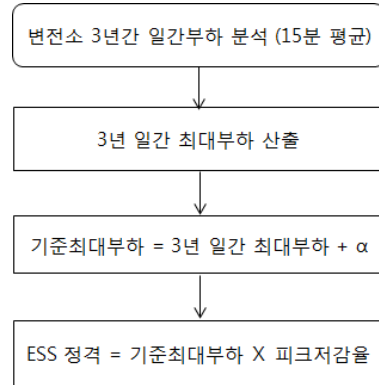


그림 2 ESS 정격 산정 절차
Fig. 2 ESS rating design process

그림 3은 본 연구에서 사용된 ESS 적정용량 산정을 위한 절차를 나타낸다. 기준 최대부하와 피크저감율, 전지용량 이용률 및 ESS 충방전용 전력조정장치(Power Conditioning System, PCS)의 충방전 효율 등을 고려하여 필요한 최소한의 용량을 기준용량으로 설정하고, 이로부터 용량을 점진적으로 늘려가면서 3년간의 일간 데이터에 적용하여 피크 저감율 목표를 달성할 수 있는 최소용량을 바탕으로 적정용량을 산정하였다. 상세한 절차는 다음과 같다.

- ① 대상변전소의 해당연도 1년간 15분 평균 부하 데이터를 수집
- ② 해당연도의 연간 최대부하를 산출
- ③ 일간 최대부하가 연간 최대부하의 80%(피크저감 목표값)를 초과하는 날들을 ESS 충방전 대상 부하일로 선정
- ④ ESS 용량 후보 중 최소용량에 적절한 여유분(α)을 더하여 기준용량으로 선정

$$\text{기준용량} = (\text{연간 최대부하} \times \text{피크 저감율}) \times (\text{피크 지속시간}) \div (\text{전지 용량 이용률} \times \text{PCS 충방전효율}) + \alpha \quad (1)$$

- ⑤ ESS 일간 충방전 최적 모형을 이용하여 대상 부하일들에 대하여 최적화 실행
- ⑥ ESS 용량을 점진적으로 증가시키며, 위의 단계를 되풀이하며, 대상부하일들의 최대부하가 모두 목표값 이하로 유지되는 경우, 그 시점의 ESS 용량을 적정 용량으로 산정

위의 절차를 최근 3년 (2010년, 2011년, 2012년)에 대하여 수행하여, 각 연도별 부하에 맞는 적정용량을 산출하고, 3개년도의 적정용량 중 제일 큰 용량을 적정용량으로 선정하였다.

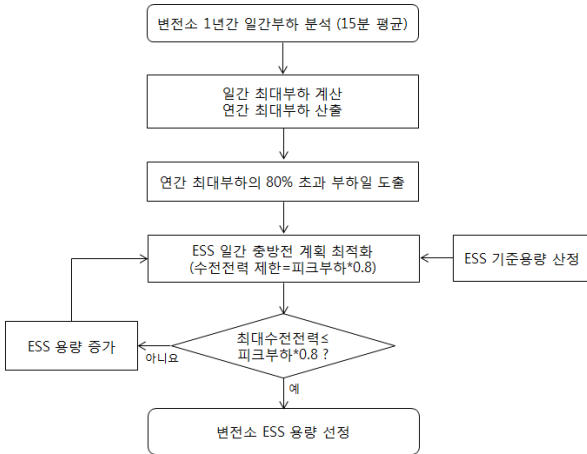


그림 3 ESS 적정용량 산정 절차
Fig. 3 ESS sizing process

피크저감을 위하여 ESS 일간 최적충방전 계획 모형은 그림 4와 같다. 충방전계획은 운전 당일 24시간에 대하여 15분 단위로 96개의 구간에 대하여 수립하였다. 최적모형의 제어변수는 96개 구간에 대한 ESS의 충방전출력(EO_i)이며, 목적함수는 ESS의 일간 충전비용(F)으로서 정의하였다. 제약조건으로는 전지의 SOC(State of Charge) 가용 상하한(SOC_{max}, SOC_{min}), 대상 변전소 수전전력 상하한(P_{max}, P_{min}), ESS 출력 상하한(EO_{max}, EO_{min})을 설정하였다. 제약조건에서 대상 변전소 수전전력 상한을 저감하려는 피크부하로 설정하여, ESS 일간 충전비용을 최소화하도록 96개 구간에 대하여 ESS의 충방전 출력을 결정하는 모형을 사용하였다. 제어변수, 목적함수 및 제약조건을 설정하는 수식모형은 그림 4에 나타내었다. 3년간 대상 부하일의 24시간 부하곡선, 전지의 충방전효율, ESS 충방전장치 효율, 전기요금 단가 등을 데이터로 입력하였다.

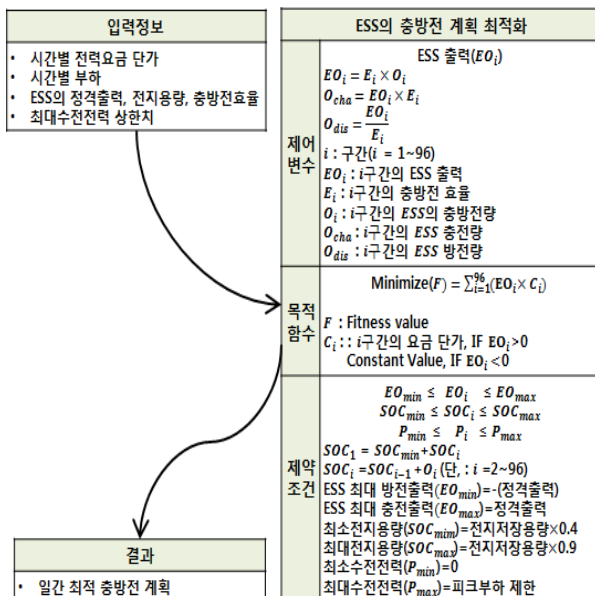


그림 4 피크저감용 ESS 일간 충방전 계획 모형
Fig. 4 Daily scheduling model of peak-cut ESS

3.2 피크저감 ESS 정격 및 적정용량 산정

표 1은 울산 고속철도 변전소의 계약 현황 및 최대수요 전력 정보를 나타낸다.

표 1 울산변전소 현황

Table 1 Information on Ulsan high speed railway substation

수용가	울산 고속철도 변전소		
계약전력	95 [MW]	계약종별	산업용(을)
송전일	2009. 10. 2		고압B 선택 II
연간 최대수요 전력	날짜	시간	최대수요
	2010년12월25일(토)	11시30분	25,178[kW]
	2011년05월08일(일)	11시30분	28,314[kW]
	2012년12월23일(일)	11시00분	25,805[kW]

3년간 최대부하는 28,313kW이므로, 여유분을 고려하여 30MW를 기준 최대부하로 설정하였다. 피크저감 목표는 20%이므로 기준 최대부하의 20%를 ESS 정격으로 산정할 수 있다. 기준용량 산정 시, SOC의 가용범위를 50%로 산정하였는데, 이는 현재 정부 주도의 실증사업 등에서 안전성이나 기술적 검증의 부족 등으로 대용량 리튬계열 ESS의 이용률을 약 50% 수준으로 제한하여 운전 중인 것에 근거하였다. PCS 충방전효율은 유로효율 기준으로 90%로 적용하였다. 따라서 울산 변전소의 2010년~2012년의 기준용량을 식 (1)을 이용하여 구하면 표 2와 같다.

표 2 ESS 적정용량 산정을 위한 연도별 기준용량

Table 2 Annual base capacity for sizing ESS

연도 [년]	최대수요 [MW]	정격 [MW]	기준용량 [MWh]
2010	25.2	6.0	3.0
2011	28.3	6.0	3.5
2012	25.8	6.0	3.0

① 2010년 사례 분석

울산변전소의 2010년 연간 최대수요는 25,178kW이며, 일간 최대부하가 연간 최대부하의 80%(피크저감율 20% 기준)인 20,142kW를 넘는 검토 대상 부하일은 43일이다(부록 참고). 앞에서 계산된 ESS 정격과 기준용량 6MW/3MWh를 대상 부하일 43일 모두에 적용한 결과, 모든 경우에 대하여 피크저감목표인 20,142kW를 만족하는 ESS 최적충방전계획을 찾을 수 있었다. 따라서 2010년 데이터를 기준으로 한 울산변전소의 적정용량은 6MW/3MWh가 된다. 그림 5와 그림 6은 2010년 최대부하일인 12월 25일의 ESS 적용에 의한 최대수전전력 제한 결과와 ESS의 충방전 출력 및 SOC 변화를 나타낸다. 그림 5에서 ESS 적용 후 최대수전전력 제한 값 이하로 제한되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 그림 6과 같은 ESS의 충방전 계획에 의하여 달성되었다. +출력은 충전, -출력은 방전을 의미한다.

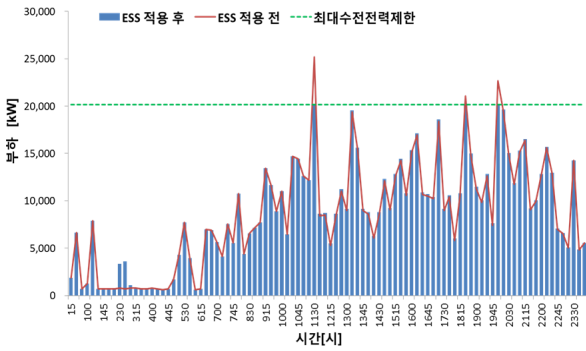


그림 5 6MW/3MWh ESS의 적용에 의한 최대수전전력제한 (2010년)

Fig. 5 Peak cut simulation result (6MW/3MWh ESS, year 2010)

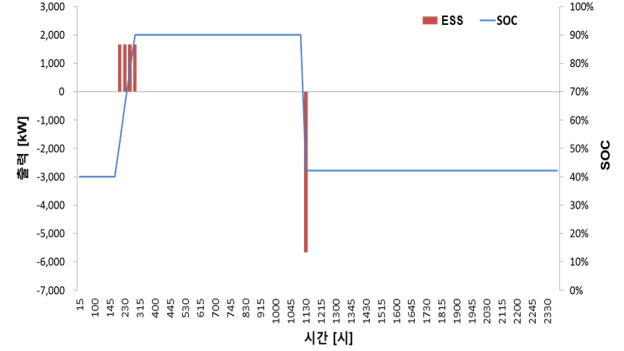


그림 8 6MW/3.5MWh ESS의 충방전 출력 및 SOC[%] (2011년)

Fig. 8 Power output and SOC (6MW/3MWh ESS, year 2011)

앞에서 계산된 ESS 정격과 기준용량 6MW/3.5MWh를 대상 부하일 37일 모두에 적용한 결과, 모든 경우에 대하여 피크저감목표인 22,651kW를 만족하는 ESS 최적충방전계획을 찾을 수 있었다. 따라서 2011년 데이터를 기준으로 한 울산변전소의 적정용량은 6MW/3.5MWh가 된다. 그림 7과 그림 8은 2011년 최대부하일인 5월 8일의 ESS 적용에 의한 최대수전전력 제한 결과와 ESS의 충방전 출력 및 SOC를 나타낸다. 그림 8과 같은 ESS 충방전 계획에 의하여 그림 7과 같이 ESS 적용 후 최대수전전력이 제한 값 이하로 제한되고 있음을 확인할 수 있다.

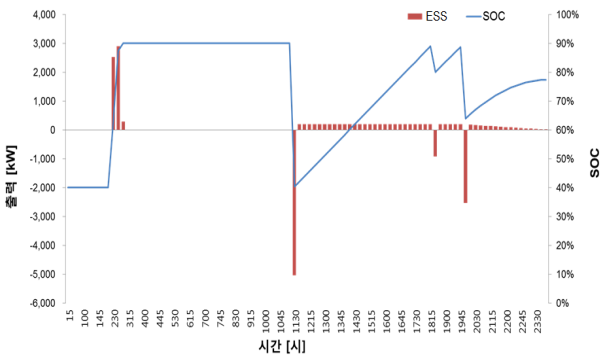


그림 6 6MW/3MWh ESS의 충방전 출력 및 SOC[%] (2010년)

Fig. 6 Power output and SOC (6MW/3MWh ESS, year 2010)

② 2011년 사례 분석

울산변전소의 2011년 연간 최대수요는 28,314kW이며, 일간 최대부하가 연간 최대부하의 80%(피크저감율 20% 기준)인 22,651kW를 넘는 검토 대상 부하일은 37일이다.

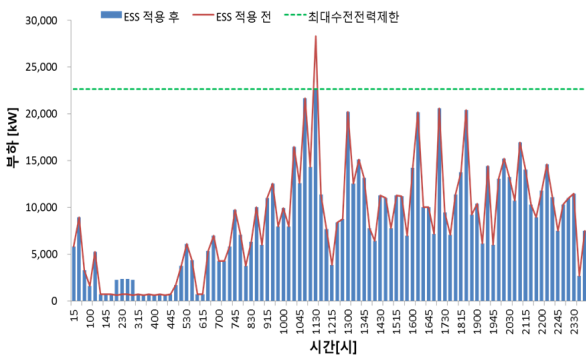


그림 7 6MW/3.5MWh ESS의 적용에 의한 최대수전전력제한 (2011년)

Fig. 7 Peak cut simulation result (6MW/3.5MWh ESS, year 2011)

③ 2012년 사례 분석

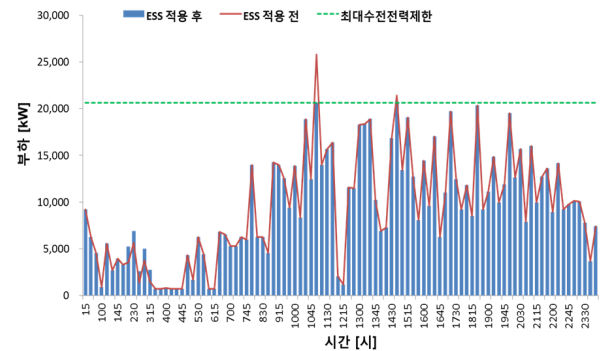


그림 9 6MW/3.5MWh ESS 적용에 의한 최대수전전력 제한 (2012년)

Fig. 9 Peak cut simulation result (6MW/3.5MWh ESS, year 2012)

울산변전소의 2012년 연간 최대수요는 25,805kW이며, 일간 최대부하가 연간 최대부하의 80%(피크저감율 20% 기준)인 20,644kW를 넘는 검토 대상 부하일은 77일이다(부록참고). 앞에서 계산된 ESS 정격과 기준용량 6MW/3MWh를 대상 부하일 77일 모두에 적용한 결과, 2012년 최대부하일과 2번째 최대부하일인 12월 23일과 11월 25일에 대하여 최대부하를 피크저감목표인 20,644kW이하로 유지할 수 없었다. 용량을 0.5MWh 증가시켜서 6MW/3.5MWh를 적용한 결과,

대상 부하일 77일 모두에 대하여 최대부하를 목표값 이하로 제한할 수 있었다. 따라서 2012년 데이터를 기준으로 한 울산변전소의 적정용량은 6MW/3.5MWh가 된다. 그림 9와 그림 10은 2012년 최대부하일인 12월 23일의 ESS 적용에 의한 최대수전전력 제한 결과와 ESS의 충방전 출력 및 SOC를 나타낸다. 그림 10과 같은 ESS 충방전 계획에 의하여 그림 9와 같이 최대수전전력이 제한 값 이하로 제한되고 있음을 확인할 수 있다.

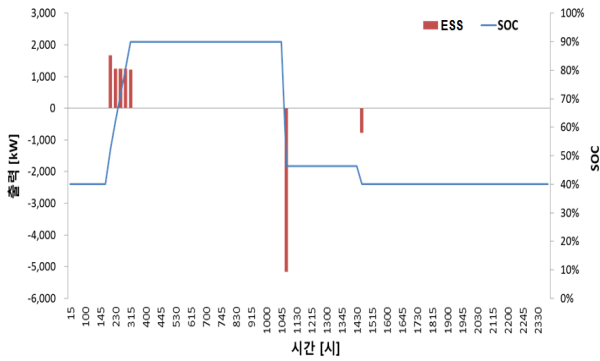


그림 10 6MW/3.5MWh ESS 적용 시 충방전 출력 및 SOC[%] (2012년)

Fig. 10 Power output and SOC (6MW/3.5MWh ESS, year 2012)

최근 3년간 데이터를 기준으로 하여 울산변전소의 최대부하를 20% 저감하기 위한 리튬계열 전지 ESS의 적정용량 산정결과를 정리하면 표 3과 같고, 가장 큰 6MW/3.5MWh를 적정용량으로 산정하였다.

표 3 울산변전소 피크저감용 ESS 적정용량 산정 결과
Table 3 Ulsan substation ESS sizing results

ESS 적정용량(정격출력/전지용량)			
2010년	2011년	2012년	결과
6MW/ 3MWh	6MW/ 3.5MWh	6MW/ 3.5MWh	6MW/ 3.5MWh

4. 경제성 분석

3절에서 산정된 울산변전소 피크저감용 ESS의 적정용량 6MW/3.5MWh에 대하여 경제성을 분석하였다.

4.1 경제성 분석 절차

피크저감용 ESS의 경제성을 평가하기 위하여 사용한 절차는 그림 11과 같다. 먼저 대상 고속철도 변전소의 적용요금제 및 최근 1년간 부하데이터, ESS 데이터(정격 출력 및 용량, 충방전효율, 사이클 수명, 방전심도 등)를 입력한다. 입력된 데이터를 이용하여 ESS 적용 전의 연간 기본요금을 계산하고, ESS를 적용함으로써 최대로 저감할 수 있는 연간 피크를 계산하여, 이로부터 피크저감 시 연간 기본요금 절감액을 계산한다. 그리고 과거의 기본요금 인상률과 할인

율을 적용하여 매년 연간 기본요금 절감액을 현가화하며, ESS 사용기간 동안의 절감액의 합계를 계산한다. 이렇게 현가화된 누적 절감액으로부터 투자비 회수기간과 투자 수익률을 산출한다. 최대로 제한할 수 있는 연간피크는 그림 12와 같이 계산한다. 모든 대상 부하일에 대하여 삭감가능 피크를 최대수전전력 제약으로 두고 그림 4의 일간 충방전계획 최적화를 수행하여 최적해 존재여부를 판별하여 최대 삭감가능한 연간 피크를 계산한다.

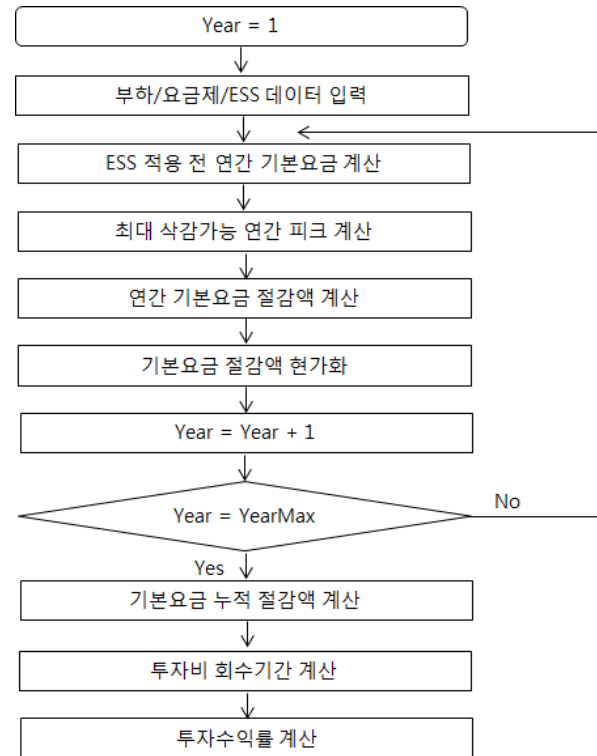


그림 11 경제성 분석 절차

Fig. 11 Economic analysis process

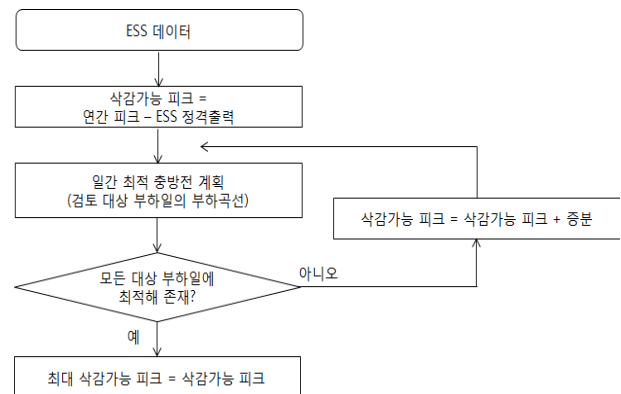


그림 12 최대삭감 가능 연간 피크 계산 절차

Fig. 12 Maximum peak-cut calculation process

연간 기본요금 절감액은 ESS 적용 전의 연간 기본요금 합계와 적용 후의 연간 기본요금 합계의 차이로부터 구하며, 기본요금 인상률과 할인율을 고려하여 식 (2)와 같이 현가화한다.

$$A_n' = A_n \left(\frac{1+\alpha}{1+\gamma} \right)^n \quad (2)$$

단, A_n' 는 n 번째 해의 현가화된 연간 기본요금 절감액, A_n 은 n 번째 해의 연간 기본요금 절감액, α 는 기본요금 인상률, γ 는 할인율이다.

ESS 적용에 의한 투자회수기간 P 및 연평균 투자수익률 R은 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$P = M - \frac{\left(\sum_{n=1}^M A_n' \right) - D}{A_M'}, \quad R = \left(\frac{\sum_{n=1}^L A_n'}{D} \right)^{\frac{1}{L}} - 1 \quad (3)$$

여기서, D는 투자비, M은 최소수익발생연도, L은 ESS의 사용수명[년]이다.

4.2 피크저감용 ESS 경제성 분석

경제성 분석에 사용된 시스템 파라미터는 요약하면 다음과 같다.

- 부하데이터: 울산변전소 2012년 부하데이터(연간 최대 수요는 25,805kW)
- PCS 효율: 유로효율 기준으로 95%로 가정
- 전지 충방전 효율 [7]

표 4 전지의 충방전전류에 따른 효율

Table 4 Battery efficiency per discharging current

시간율	방전전류	효율
5	0.2C	100%
1	1.0C	99%
0.2	5.2C	98%
0.1	10.0C	95%

전지 Cycle 수명: 방전심도 70%로 3,000회 충방전 시 초기용량의 80%로 감소 [7]

ESS 사용연한: 20년 가정 (최근 3년간 변전소 부하데이터로 볼 때, 피크저감용으로는 연간 50~100회 정도의 충방전이 예상되며, 본 논문에서는 방전심도를 50%로 적용했으므로, 제시된 전지 cycle 효율에 근거하면 20년 이상 사용할 수도 있으나 이는 단전지를 기준으로 한 경우이며, 현재 대용량 리튬계열 ESS의 기술수준에서 20년 정도를 통상적인 사용연한으로 고려함. 실증을 통해 검증된 데이터가 없기 때문에 다르게 고려될 소지가 있음)

- ESS 가용 용량: 배터리시스템의 SOC의 40%~90%에서 가용
- 기본요금 인상율 : 2013년 기준으로 과거 5년간 기본요금 인상율 7.3%를 적용 [6]
- 할인율: 5.5%로 가정 [8]

ESS 시설비: 6MW/3.5MWh ESS 투자비는 표 5와 같이 산정하였으며, 본격적인 시장이 형성되어 있지 않은 관계로 에너지관리공단 시범보급사업 지원단가 가이드라인과 업체의 동향을 반영하여 산정하였다[9]. 기초공사 등 설치비는

각 항목에 포함되어 있는 것으로 가정하였다.

표 5 ESS 투자비 산정 항목별 단가

Table 5 ESS component unit price

항 목	단 가	용 량	비 용 [천원]
Battery	1,000,000[천원/MWh]	3.5MWh	3,500,000
PCS	230,000[천원/MW]	6MW	1,380,000
EMS	(Battery+PCS)단가*1 0%[천원]	-	488,000
합 계			5,368,000

표 6은 ESS 사용연도별 연간 최대부하 제한값과 이에 따른 연간 기본요금 절감액, 그리고 이를 현가화한 절감액 결과를 보여준다. 이 용량으로 최대로 제한 가능한 연간피크는 19,892kW로 피크저감 목표 20%에 해당되는 20,644kW를 충분히 달성가능하다. 또한 전지의 사용연한에 따라 가용용량이 조금씩 줄어들므로 ESS 적용 후의 연간 피크는 매년 조금씩 상승함을 볼 수 있다.

표 6 사용연차별 연간 기본요금 절감액

Table 6 Annual base charge savings

사용 연도	ESS 적용 후 연간 피크 [kW]	연간기본요금 절감액 (현가화 전)	연간기본요금 절감액 (현가화 후)
1	19,892	576,034	576,034
2	19,893	575,936	585,965
3	19,893	575,936	596,168
4	19,894	575,839	606,446
5	19,895	575,741	616,901
6	19,896	575,644	627,537
7	19,897	575,547	638,355
8	19,897	575,547	649,471
9	19,898	575,449	660,668
10	19,899	575,352	672,058
11	19,901	575,157	683,528
12	19,902	575,059	695,312
13	19,903	574,962	707,300
14	19,904	574,865	719,494
15	19,906	574,670	731,774
16	19,907	574,572	744,389
17	19,909	574,378	757,094
18	19,911	574,183	770,016
19	19,913	573,988	783,158
20	19,915	573,793	796,524
합계		11,502,649	13,618,189

표 7은 현가화된 연간 기본요금 절감액에 따른 누적절감액과 누적수익을 나타낸다. 표 8은 표 5 및 표 6, 표 7의 결과로부터 얻어진 경제성 분석 결과를 요약한 것으로서, 울산

변전소에 6MW/3.5MWh의 피크저감용 ESS를 설치했을 경우, 투자비가 회수되는 기간은 설치 후 약 8.7년이며, 이후 20년이 되는 시점까지의 누적수익은 8,250,189천원으로 20년간 전체 투자수익률은 153.7%이며, 이는 20년간 연 평균 4.76%의 투자수익률에 해당한다.

표 7 사용연차별 누적 수익

Table 7 Accumulated profits by operation year

사용 연도	년 절감액 [천원]	누적절감액 [천원]	누적 수익 [천원]
1	576,034	576,034	-4,791,966
2	585,965	1,161,998	-4,206,002
3	596,168	1,758,166	-3,609,834
4	606,446	2,364,612	-3,003,388
5	616,901	2,981,513	-2,386,487
6	627,537	3,609,049	-1,758,951
7	638,355	4,247,405	-1,120,595
8	649,471	4,896,875	-471,125
9	660,668	5,557,543	189,543
10	672,058	6,229,601	861,601
11	683,528	6,913,129	1,545,129
12	695,312	7,608,442	2,240,442
13	707,300	8,315,741	2,947,741
14	719,494	9,035,235	3,667,235
15	731,774	9,767,008	4,399,008
16	744,389	10,511,398	5,143,398
17	757,094	11,268,492	5,900,492
18	770,016	12,038,507	6,670,507
19	783,158	12,821,665	7,453,665
20	796,524	13,618,189	8,250,189

표 8 피크저감용 ESS 경제성 평가 결과

Table 8 Economic analysis result for peak-cut ESS

항 목	결 과
시스템 비용 [천원]	5,368,000
20년간 누적절감액 [천원]	13,618,189
20년간 누적수익 [천원]	8,250,189
투자비 회수기간	8.7년
20년간 투자수익률	153.7%
연평균 투자수익률	4.76%

5. 결 론

고속철도 변전소의 피크부하 저감을 위한 ESS의 적정용량을 산정하고, 해당 용량에 대하여 경제성을 평가하는 방법을 제시하였다. 변전소의 연간 부하데이터로부터 일간 최대 부하가 피크 저감목표를 초과하는 날을 대상 부하일로 설정하고, 모든 대상 부하일에 대하여 ESS 일간 최적 충방전계획 모형을 사용하여 후보 용량 적용 시 피크저감 목표 달성

여부를 검토하는 방식을 이용하였다. 산정된 적정용량에 대하여 피크저감에 의한 기본요금 누적절감액을 계산하고, 이로부터 투자 경제성을 분석하였다. 울산 변전소에 연간 피크의 20%를 저감하기 위한 리튬계열 전지 ESS적정용량을 6MW/3.5MWh로 산정하였고, 경제성 평가 결과 투자비 회수기간은 약 8.7년, 20년 사용 시 연평균 투자수익률은 약 4.8%이었다. 리튬전지를 이용한 ESS에 대한 장기간 실증운전이나 상용운전 예가 없어서 사용연한, 대용량 시스템의 전지 Cycle 효율 및 가용량 등과 같이 경제성에 큰 영향을 주는 핵심 파라미터에 대한 값은 관련 기술 분야에서 받아들여지는 통상적인 수치를 사용하였으나, 검증되지 않은 파라미터들이므로 ESS의 경제성을 본 논문의 결과만을 가지고 속단하기는 힘들다. 다만, 초기 투자비가 막대하여 초기 용량 설계가 매우 중요한 ESS 설계 시 본 논문에서 제시한 방법이 참고가 될 수 있을 것으로 보이고, 대규모 ESS의 보급 및 활성화를 위하여 다양한 설계기술의 개발과 객관성있는 운전데이터 확보 등의 노력이 절실히 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 국토교통부의 지원에 의하여 이루어진 미래철도기술개발사업 연구(13PRTD-C063965-02)로서, 관계부처에 감사 드립니다.

References

- [1] KORAIL, KTX Passenger transportation statistics, <http://www.index.go.kr/egams/index.jsp>
- [2] Chang-mu Lee, Han-min Lee, Gil-dong Kim, "Estimation about Installation Effect of Energy Storage System at High Speed Railway", KIEE Summer Conference, 2010. 7. 14-16
- [3] Chang-mu Lee, Han-min Lee, Gil-dong Kim, "Review about Peak Power reduction utilizing Energy Storage System at AC Electric Railway", The Korean Society for Railway, Autumn Conference, 2009.
- [4] Han-min Lee, Gil-dung Kim, Chen-heon An, Gil-soo Jang, Sea-hyuk Kwon, "A Study on Applying Energy Storage System on Electric Railway System", KIEE Autumn Conference, 09.
- [5] Kyeong-hee Cho, Seul-ki Kim, Eung-sang Kim, "Optimal Capacity Determination Method of Battery Energy Storage System for Demand Management of Electricity Customer", The Transactions of KIEE, Vol.62, No.1, pp.21-28, 2013 January
- [6] Korea Electric Power Corporation, Electric Rates Table, <http://cyber.kepco.co.kr>
- [7] Linden's Handbook of Batteries, Thomas B. Reddy, 2 of 2, 4th edition, 2011
- [8] Byung-rok Song, Dong-jin Kang, Jeong-hyun Rho, "Estimation of the Appropriate Social Discount Rate

of Public Transportation Investment Project”, The Korea Spatial Planning Review, Vol. 61, pp. 3-23, 2009 June.

- [9] Korea Energy Management Corporation, ESS component unit price guideline for ESS deployment into public buildings, 2013 August.

저 자 소 개



김 슬 기 (金 슬 기)

1972년 5월 7일 생. 1998년 고려대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재, 한국전기연구원 스마트배전연구센터 선임연구원.

Tel : 055-280-1332

E-mail : blksheep@keri.re.kr



김 종 율 (金 鐘 律)

1974년 7월 6일 생. 1997년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 스마트배전연구센터 선임연구원.

Tel : 055-280-1336

E-mail : jykim@keri.re.kr



조 경 희 (趙 京 姬)

1987년 10월 9일 생. 2010년 경상대 전기공학과 졸업. 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 스마트배전연구센터 연구원.

Tel : 055-280-2438

E-mail : kx1004xh@keri.re.kr



변 길 성 (邊 吉 成)

1981년 9월 19일 생. 2006년 고려대 전기전자전파공학부 졸업. 2013년 동 대학원 전기전자전파공학부 졸업(석사, 박사). 현재 한국전기연구원 스마트배전연구센터 선임연구원.

Tel : 055-280-1314

E-mail : gsbyeon@keri.re.kr