

도시철도 변전소에 설치한 첨두부하 절감용 ESS의 경제성 분석

Economic Assessment of ESS for Peak Load Shaving in the Substation of Urban Railway

박종영[†] · 신승권* · 김형철* · 정호성*
(Jong-young Park · Seungkwon Shin · Hyungchul Kim · Hosung Jung)

Abstract - This paper evaluates economic benefits of ESS (Energy Storage System) for peak load shaving in the substation of urban railway. For this purpose, the method to determine capacities of ESS and PCS (Power Conditioning System) for peak load shaving is proposed. Then the economic benefits of those devices are evaluated using net present value method. The proposed methods are applied to actual measurements of loads in the substation of urban railway. The results show that electric power costs can be reduced and the economic benefits of ESS for peak load shaving mainly depends on the price of battery.

Key Words : ESS, Peak load shaving, Economic assessment, NPV, Urban railway

1. 서론

최근 들어 에너지 소비의 절감 및 효율화에 대한 필요성이 높아지고 있으며, 이에 따라 전력 산업 분야에서는 친환경 에너지원의 발전비중 증가와 에너지 저장장치의 활용에 대한 연구 및 적용이 이루어지고 있다. 도시철도시스템 분야에서도 효율적인 전력에너지의 사용을 위해 신재생에너지원 및 에너지저장장치의 적용이나 스마트그리드 기술 및 에너지관리시스템(Energy Management System, EMS)의 적용에 대한 연구 및 실증이 이루어지고 있다[1-3].

에너지의 효율적인 소비를 위한 기법은 여러 가지 측면에서 접근할 수 있다. 전력소비 자체를 줄일 수 있는 설비나 소재를 이용하는 관점에서부터[4-6] 변전소나 설비를 설치에 대한 장기적인 계획까지 고려하는 관점까지[7], 다루는 시간대 및 범위에 따라 다양한 관점에서의 접근이 가능하다.

이 논문에서는 도시철도변전소에서 첨두부하 절감을 위해 ESS 및 PCS를 설치할 때 그 경제성을 평가하는 방법을 제안하였다. 그리고 실제 도시철도변전소에서 측정된 데이터에 기반하여 ESS를 설치했을 때의 경제성을 분석하였다.

전력계통의 여러 분야에 대해서 첨두부하의 절감을 위한 방법으로 ESS(Energy Storage System, 에너지저장장치)가 많이 제안되고 있으며[8-10], 그 경제성에 대하여 연구되고 있다[8-9]. 이 논문에서는 [10]에서 제안한 ESS의 용량을

결정하는 방법을 도시철도변전소에 적용하여 ESS 및 PCS의 설치용량을 결정하였다. 그리고 순현재가치법을 이용하여 첨두부하 절감량에 따른 경제성을 분석하였다.

유용한 결과를 얻어 내기 위하여 실제 도시철도 변전소 중의 한 곳에서 측정된 2013년도 실측데이터를 이용해 제안한 방법을 검증하였다. 그를 위하여 부하절감량에 대하여 필요한 배터리 및 PCS의 용량을 계산한 다음, 부하절감량에 따른 ESS의 경제성을 분석하였다.

2. 첨두부하 절감을 위한 ESS와 PCS 용량 산정

첨두부하 절감을 위한 ESS를 설치하기 위해서는 ESS의 저장용량[kWh]과 PCS의 출력용량[kW]을 결정하여야 한다. 이 중 ESS 저장용량은 하루 (또는 특정 기간) 동안의 부하 패턴에 따라 결정할 수 있고, PCS 출력용량은 첨두부하 절감을 위해 최대출력이 필요한 시간대의 부하에 따라 결정한다. ESS와 PCS의 용량을 산정하는 방법으로써 [10]에서 제시한 방법을 사용하였다.

2.1 ESS 용량 산정

첨두부하 절감을 위한 ESS의 용량을 산정하기 위해 변전소의 일일 시간당 부하곡선을 이용하였다. 그림 1은 도시철도 변전소의 시간당 측정된 일일부하곡선의 예이다. 평탄화 기준부하 P_{base} 를 기준으로 하여 그 값을 초과하는 부하에 대해서는 ESS의 방전을 통하여 보상하는 것으로 가정하였다. 실제 부하곡선은 순시로 변화하기 때문에 일부부하곡선과 시간당 부하곡선과 다르지만, 어느 부하곡선으로 계산하든 보상을 해주어야 하는 부하량은 같음을 유추할 수 있다.

[†] Corresponding Author : Korea Railroad Research Institute, Korea

E-mail : jypark@krii.re.kr

* Korea Railroad Research Institute, Korea

Received : October 24, 2014; Accepted : November 11, 2014

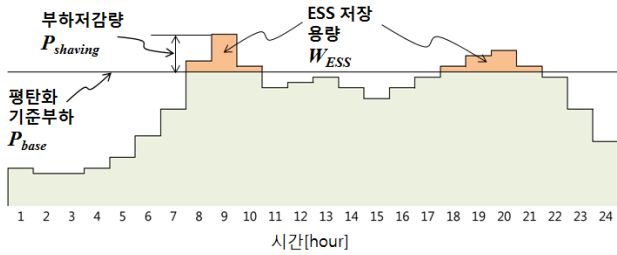


그림 1 일일부하곡선에 따른 ESS 저장 용량의 산정
 Fig. 1 Determination of the ESS storage capacity using the daily load curve

이 때 입력값이 0보다 큰 때에만 입력값을 그대로 출력값으로 갖는 함수 $f(\cdot)$ 를 이용하여, ESS의 저장용량 W_{ESS} 는 수식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$W_{ESS} = \sum_{i=1}^{24} f(P_{load,i} - P_{base}) = \sum_{i=1}^{24} P_{shaving,i} \quad [\text{kWh}] \quad (1)$$

s.t.

$$W_{ESS} < \sum_{i=1}^{24} f(P_{base} - P_{load,i}) \quad (2)$$

where

$$f(a) = \begin{cases} a & \text{if } a > 0 \\ 0 & \text{if } a \leq 0 \end{cases}$$

$P_{load,i}$: 시간 i 에서의 시간당 부하

$P_{shaving,i}$: 시간 i 에 ESS로 보상해 주는 부하

수식 (2)의 우변은 충전 가능한 전력량으로서, 만약 수식 (2)의 조건을 만족하지 않으면 하루 동안의 충전 가능한 용량이 필요한 방전용량보다 작게 되어 하루 동안 총 방전하는 용량 W_{ESS} 을 만족할 수 없다.

2.2 PCS 용량 산정

첨두부하 저감을 위해 필요한 PCS 용량을 산정하기 위해서는 실제 첨두부하가 측정되는 기준을 고려하여야 한다. 현재 한전에서 전력요금을 산정할 때 사용되는 첨두부하값

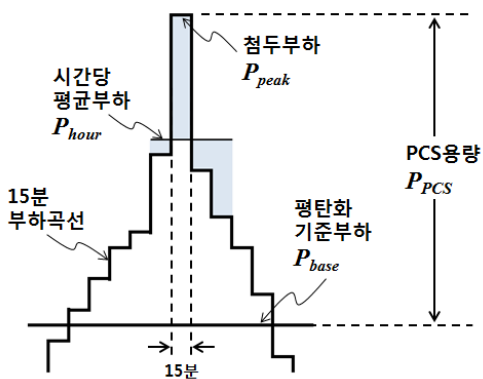


그림 2 첨두부하의 크기에 따른 PCS용량의 산정
 Fig. 2 Determination of the PCS capacity according to the amount of the peak load

은 15분마다 측정되는 부하값들 중 가장 큰 값이다. 따라서 15분 부하곡선을 그렸을 때 최대값이 첨두부하가 됨을 알 수 있다. 이를 고려하여 그림 2에 나타나 있는 15분 부하곡선을 이용하여 첨두부하를 저감하는데 필요한 PCS의 용량을 산정할 수 있다.

15분당 첨두부하를 보상하기 위해 ESS가 출력을 최대로 내는 경우를 생각하여 보면, ESS 용량을 산정하면서 계산된 시간당 산정된 출력($P_{shaving} \times 1 \text{ hour}$)을 15분 동안만 최대로 방전하고 나머지 시간에는 방전을 하지 않는 경우이다. 이러한 경우를 그림으로 나타내면 그림 3과 같다. 그림에서 PCS의 용량 P_{PCS} 는 다음 수식 (3)과 같이 결정됨을 알 수 있으며, 이 값은 ESS가 용량이 정해졌을 때 15분 동안 최대로 방전할 때의 값임을 알 수 있다.

$$P_{PCS} = 4 \cdot P_{shaving} \quad [\text{kW}] \quad (3)$$

where

$P_{shaving}$: 수식 (1)의 $P_{shaving,i}$ 중 최대값. (시간당 부하곡선으로 산정한 ESS 방전량)

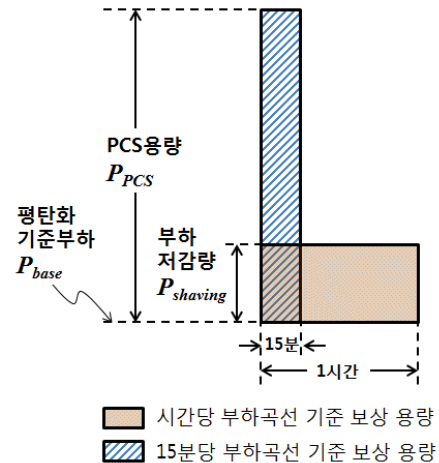


그림 3 ESS용량에 대하여 PCS용량이 최대로 필요한 경우
 Fig. 3 The case of the largest capacity of PCS for ESS

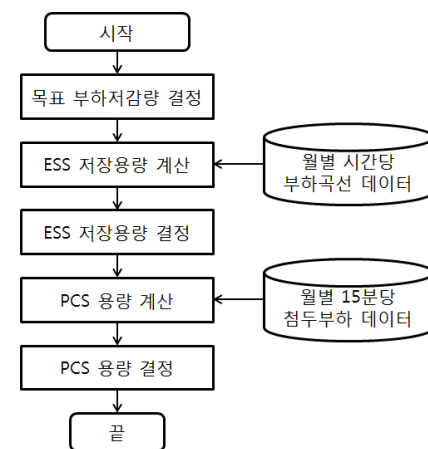


그림 4 첨두부하 저감용 ESS 및 PCS 용량 결정 흐름도
 Fig. 4 Flowchart of determination of the capacities of ESS and PCS for peak load shaving

그림 4는 ESS 저장용량 및 PCS의 출력용량을 결정하는 과정을 나타낸 흐름도이다. 먼저 월별 시간당 부하곡선 데이터를 이용하여 ESS의 저장용량을 계산하고, 15분당 첨두 부하 데이터를 이용하여 PCS의 용량을 계산한다.

3. 첨두부하 절감용 ESS의 경제성 분석

본 논문에서는 철도 운영기관의 입장에서 도시철도변전소에 설치한 첨두부하 저감용 ESS의 경제성을 평가하기 위한 방법으로 순현재가치법을 사용하였다. 순현재가치(순현재가, Net Present Value, NPV)는 어떤 사업의 가치를 나타내는 척도 중 하나로써, 투자의 결과 발생하는 현금유입(cash inflow)의 현재에서 현금유출(cash out flow)의 현재를 차감한 것을 의미한다. 순현재가치법(줄여서 순현재가법 또는 NPV법)은 NPV를 계산하여 투자 가치를 판단하는 방법으로 NPV가 0보다 크면 투자가치가 있는 것으로, 0보다 작으면 투자가치가 없는 것으로 평가한다. 아래 수식 (4)를 통하여 각 현금 흐름을 현재가치로 변환하여 합산하면 순현재가치를 구할 수 있다.

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{C_t}{(1+r)^t} - C_0 = \sum_{t=0}^N \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (4)$$

s.t.

$$C_t = C_{benefit,t} - C_{cost,t} \quad (5)$$

where

- t : 현금 흐름의 기간
- N : 사업의 전체 기간
- r : 할인율
- C_t : 시간 t 에서의 순 현금 흐름
- $C_{benefit,t}$: 시간 t 에서의 편익
- $C_{cost,t}$: 시간 t 에서의 비용
- C_0 : 초기 투자자본(투자액)

수식 (4)의 좌변 식은 초기 투자를 강조하기 위해 C_0 를 명시한 수식이며, 일반적으로 우변의 식으로 나타낼 수 있다. 이 논문에서 다루고 있는 ESS 및 PCS의 경우에는 두 기기의 수명 차이 때문에 사업 기간 동안 복수 회의 투자가 이루어져야 한다. 따라서 수식 (4)의 우변의 형태를 사용한다. 수식 (5)는 사업 기간 매해에 대한 순 현금 흐름이다.

순현재가법을 적용하여 도시철도 변전소에 설치한 ESS 및 PCS의 경제성을 평가하기 위해서는 그 비용과 편익을 알아야 한다. 편익은 전기요금 절감액이 되는데, 현재 한전의 전기요금 체계에서 전기요금은 계약전력량에 의한 기본요금과 사용량에 대한 전력량요금으로 구성된다. 도시철도변전소에서는 첨두부하 시간대가 일반 전력부하의 첨두부하 시간대와 차이가 나기 때문에 첨두부하 절감을 위해 부하이동(load shifting)을 시행해도 최대부하 시간대의 부하사용량이 많이 줄어들지는 않는다. 따라서 전력량요금의 절감에 의한 편익보다는 첨두부하 저감을 통해 계약용량을 낮춤으로써 기본요금 절감을 통한 편익이 더 크다.

그리고 비용은 기기의 설치 및 운용에 대한 비용이 될 것이다. 현재 판매, 설치되고 있는 ESS 및 PCS 관련 기술은 미성숙기라 할 수 있고, 따라서 기술 수준이나 가격이 계속적으로 변해가고 있다. 특히 PCS의 경우 기술발전에 따라

용량당 가격이 하락하고 있는 추세이며, 대량 생산이 본격화 될 경우 더 낮아질 수 있을 것으로 보인다.

4. 실측 도시철도 부하곡선 분석

첨두부하 절감용 ESS의 경제성 분석을 위해서는 우선 도시철도변전소의 부하에 대한 분석이 필요하다. 이를 위하여 A지역 도시철도공사 B 변전소의 2013년 실측데이터를 분석하였고, 시간당 평균부하의 데이터와 15분 단위 첨두부하 데이터를 대상으로 분석하였다[10]. 그림 5와 그림 6은 각각 평일과 휴일 일부하의 시간당 부하 곡선인데, 평일에 대해서는 월별로 평균을 내었으며 휴일에 대해서는 계절별로 평균을 내었다. (봄: 3~5월, 여름: 6~8월, 가을: 9~10월, 겨울: 11~2월)

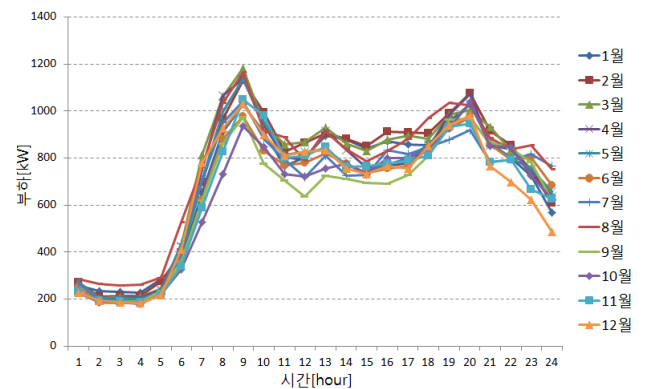


그림 5 도시철도 변전소의 일일부하곡선 - 평일
Fig. 5 Daily load curve of the substation of urban railway - weekday

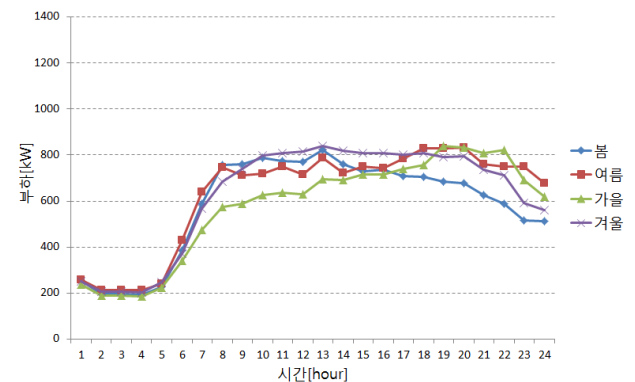


그림 6 도시철도 변전소의 일일부하곡선 - 주말
Fig. 6 Daily load curve of the substation of urban railway - weekend

평일 도시철도 변전소의 일일부하곡선인 그림 5를 보면 일반적인 전력부하 일일부하곡선과는 다르게 출퇴근 시간대인 오전 9시와 오후 8시 부근에서 큰 부하를 나타내는 것을 볼 수 있다. 9월의 부하량이 다른 달에 비해서 다소 낮기는

하나, 전체적으로 계절에 상관없이 비슷한 패턴을 나타내는 것을 볼 수 있다. 주말 일일부하곡선인 그림 6을 보면 우선 평일 출퇴근 시간대에 나타나는 큰 부하의 패턴이 없음을 볼 수 있다. 그리고 일과 시간 동안 부하량에 큰 차이를 보이지 않는다.

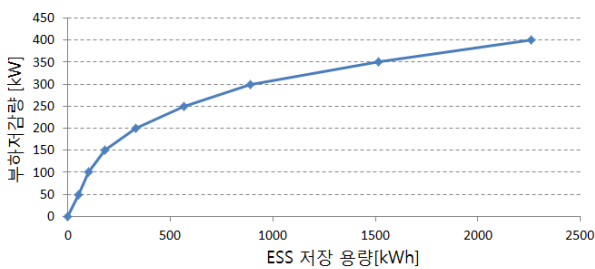
지역이나 교통 수요에 따라 그림 5와 그림 6에서 보이는 부하곡선과 다른 특징을 가질 수는 있겠지만, 출퇴근 시간대의 큰 부하나 평일부하와 주말부하의 패턴 차이는 일반적인 도시철도 변전소의 부하 패턴으로 이해해도 될 것이다.

5. 실측 부하 데이터에 대한 ESS 경제성 평가

5.1 ESS와 PCS의 용량 산정

앞 장에서 분석한 변전소의 연중 부하곡선의 첨두부하량을 절감하기 위하여 2장에서 제시한 ESS 및 PCS 용량 산정 방법을 적용하였다. 첨두부하가 문제가 되는 것은 주말이 아닌 평일이므로, 그림 5의 월별 평일 부하곡선에 대하여 수식 (1)을 적용하여 ESS의 저장용량을 계산하였다. 여기에서 월별 일일부하곡선이 다르기 때문에, 동일한 값의 평탄화 기준부하에 대하여 12달의 일일부하곡선에 수식 (1)을 적용하여 그 중 최대의 값을 선택하였다. 월별 시간당 일일부하곡선의 최대값을 기준으로 부하저감량에 따라 필요한 ESS의 저장용량은 그림 7과 같다.

그림 7의 그래프와 표에서 볼 수 있듯 200kW 정도의 부하 저감량에 대해서 1kW의 부하를 저감하기 위해 ESS의 저장용량은 1.66kWh 가 필요하게 된다. 그리고 부하저감량이 커질수록 1kW 를 낮추기 위해 필요한 ESS 의 저장용량 kWh 값이 커지는 것을 알 수 있다.



부하저감량 $P_{Shaving}$ [kW]	필요한 ESS 저장 용량 W_{ESS} [kWh]	W_{ESS} / P_{Saving}
50	50.0	1.00
100	100.0	1.00
150	181.9	1.21
200	332.2	1.66
250	567.2	2.27
300	889.6	2.97
350	1513.5	4.32
400	2260.1	5.65

그림 7 부하저감량에 따른 필요 ESS 저장용량의 변화

Fig. 7 Required storage capacity of ESS according to the amount of peak load shaving

표 1은 서로 다른 부하저감량에 대하여 필요한 ESS의 저장용량이 최대값인 달을 표시한 표이다. 표에서 보다시피 150kW 이하의 용량에서는 3월달에 가장 큰 용량의 ESS가 필요하였고, 부하저감량이 200kW 일 때에는 4월달의 일일 부하곡선에 의하여 그 용량이 결정되었다. 그리고 250과 300kW 에 대해서는 8월달의 일일부하곡선에 따라 ESS의 저장용량이 결정되었다.

이렇게 필요한 ESS 용량에 영향을 미치는 달이 달라지는 이유는 그림 8의 월별 첨두부하 곡선을 통하여 이해할 수 있다. 이 그림에서는 부하저감량 100, 200, 300kW 에 대하여 각각 표시하고, ESS 용량에 영향이 미치는 달이 3, 4, 8월의 첨두부하 곡선을 나타내었다.

부하저감량을 100kW(평탄화기준부하 1081.6kW)로 하였을 때에는 출근 시간대인 9시 부근의 첨두부하 시간에만 방전이 이루어지게 된다. 따라서 첨두부하치가 높은 3월의 부하곡선에 의해 ESS 용량이 결정된다. 부하저감량을 200kW(평탄화 기준부하 981.6kW)일 때에는 퇴근 시간대인 19, 20시 부근에서도 방전이 이루어져야 하며, 이때 부하량이 큰 4월달의 부하곡선에 의해 ESS의 용량이 결정된다. 부하저감량을 300kW 로 하면 출퇴근 시간대뿐만 아니라 13시 부근의 부하에 대해서도 ESS의 방전이 필요하게 된다. 이에 따라 전체적으로 부하량이 많은 8월달의 부하곡선에 의해 ESS의 용량이 결정된다.

표 1 부하저감량에 따른 ESS용량 산정에 영향을 미치는 달의 변화

Table 1 Changes of month which is dominant to determine the capacity of ESS

부하저감량 [kW]	최대용량이 필요한 달
50	3월
100	3월
150	3월
200	4월
250	8월
300	8월
350	2월
400	2월

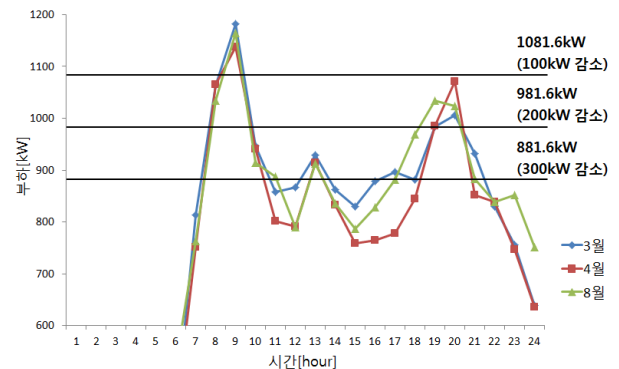


그림 8 도시철도 변전소 월별 첨두부하 곡선

Fig. 8 Monthly peak load of the substation of urban railway

이와 같이 ESS의 저장용량[kWh]이 결정된 후 첨두부하 저감을 위해 필요한 PCS용량을 산정하였다. 목표 부하저감량이 결정되면 수식 (3)을 이용하여 PCS의 용량[kW]을 계산하게 된다. 그리고 이에 따라 실제 15분 부하 데이터 기준으로 첨두부하가 어느 정도 감소하는지 계산할 수 있다.

표 2는 도시철도 변전소 실측 데이터에 대하여 목표 첨두부하저감량에 따라 계산된 ESS 저장용량과 PCS 용량, 그리고 감소되는 첨두부하의 값을 정리한 표이다. 그림 9와 표 2에서 볼 수 있듯이 목표로 부하저감량이 커짐에 따라 단위용량의 부하를 저감하기 위해서 추가되어야 할 ESS의 저장용량이 커짐을 알 수 있다. 이처럼 각 변전소의 시간별, 계절별 부하 패턴에 따라 첨두부하 저감을 위해 필요한 ESS와 PCS의 용량이 달라짐을 알 수 있다.

표 2에서 부하저감량이 50kW일 때를 살펴보면 다음과 같다. ESS 용량을 결정함에 있어, 시간당 평균부하의 최대값은 1181.6kW 이고 이에 대하여 50kW를 낮추어 평탄화기준부하가 1131.6kW 이하가 되도록 ESS 용량을 정하였다. 그리고 PCS 용량은 2.2절에서 소개한 방법에 따라 15분 단위의 부하 측정값을 기준으로 결정하게 된다. 이 경우에는 15분 단위 측정 부하의 최대값이 1482.2kW 이고 2.3절에서 설명한 바와 같이 최대 ESS 용량의 4배 용량이면 15분 단위 측정부하의 값을 평탄화기준부하 1131.6kW 이하로 낮출 수 있다. 다른 케이스에서도 마찬가지로 PCS용량이 부하저감량의 4배이면 15분 단위 측정 부하의 최대값을 평탄화기준부하 이하로 낮출 수 있다.

표 2 ESS와 PCS 용량과 첨두부하 절감량

Table 2 Peak load shaving according to the capacities of ESS and PCS

부하 저감량 $P_{Shaving}$ [kW]	ESS용량 W_{ESS} [kWh]	PCS용량 P_{PCS} [kW]	첨두부하 감소	
			kW	%
50	50.0	200.0	487.2	32.9
100	100.0	400.0	537.2	36.2
150	181.9	600.0	587.2	39.6
200	332.2	800.0	637.2	43.0
250	567.2	1000.0	687.2	46.4
300	889.6	1200.0	737.2	49.7
350	1513.5	1400.0	787.2	53.1
400	2260.1	1600.0	837.2	56.5

5.2 ESS 운용을 통한 전기요금 절감

5.1절에서 결정된 용량의 ESS와 PCS가 설치되었을 때 절감되는 전기요금을 계산함으로써 편익을 계산할 수 있다 [11]. 전기요금은 도시철도변전소에 현재의 한전 전기요금 체계 중 산업용전력(을) 요금제 고압A 중 선택II가 적용되었다고 가정하였고, 요금제의 상세사항은 표 3과 같다.

표 3 산업용전력(을)요금제 고압A/선택II (2013.11.21.시행)

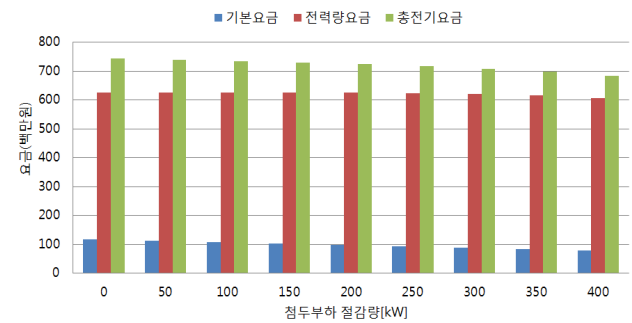
Table 3 Table of Electricity Price of KEPCO

기본요금 (원/kW)	전력량요금(원/kWh)			
	시간대	여름철 (6~8월)	봄·가을철 (3~5, 9~10월)	겨울철 (11~2월)
8,320	경부하	56.10	56.10	63.10
	중간부하	109.00	78.60	190.20
	최대부하	191.10	109.30	166.70

시간대 구분	여름철 (6~8월)	봄·가을철 (3~5,9~10월)	겨울철 (11~2월)
경부하	23:00~09:00	23:00~09:00	23:00~09:00
중간부하	09:00~10:00	09:00~10:00	09:00~10:00
	12:00~13:00	12:00~13:00	12:00~17:00
	17:00~23:00	17:00~23:00	20:00~22:00
최대부하	10:00~12:00	10:00~12:00	10:00~12:00
	13:00~17:00	13:00~17:00	17:00~20:00 22:00~23:00

위 요금제에 대한 설명에서 볼 수 있듯이 총 전력 사용량이 같더라도 첨두부하값과 시간대별 부하량에 따라 비용이 달라질 수 있음을 알 수 있다. 첨두부하값은 기본요금에 영향을 미치게 되고, 최대부하 시간대에 사용하는 전력량을 다른 시간대로 옮김으로써 전력량요금을 줄일 수 있다.

그림 5에서 보였던 도시철도 월별 일부하 곡선 중 전력사용량이 가장 큰 8월에 대하여 ESS를 적용하지 않았을 때와 적용하였을 때의 전기요금을 계산하였다. 적용한 ESS 및 PCS의 용량은 표 2에서 제시된 값을 사용하였다. 표 4와 그림 9에서 계산된 전기요금 절감액을 정리하였다.



부하 저감량 (kW)	기본요금(천원)		전력량요금 (천원)		전기요금 (천원)	
	금액	절감액	금액	절감액	금액	절감액
0	117,968	-	626,465	-	744,432	-
50	112,976	4,992	626,465	0	739,440	4,992
100	107,984	9,984	626,465	0	734,448	9,984
150	102,992	14,976	626,300	164	729,292	15,140
200	98,000	19,968	625,671	793	723,671	20,761
250	93,008	24,960	623,997	2,468	717,004	27,428
300	88,016	29,952	620,701	5,764	708,717	35,716
350	83,024	34,944	614,855	11,609	697,879	46,553
400	78,032	39,936	605,279	21,186	683,310	61,122

그림 9 첨두부하 저감에 따른 전기요금

Fig. 9 Electricity prices according to the amount of peak load shaving

부하저감량 100kW까지는 부하저감이 경부하 시간대인 오전 8시에서 9시 사이의 시간대에서만 이루어지기 때문에 전력량요금은 변화가 없고, 기본요금만 줄어든다. 더 큰 용량에 대해서도 전력량요금보다는 기본요금에서 줄어드는 금액이 더 큼을 볼 수 있다. 이는 도시철도 변전소에서 첨두부하가 발생하는 시간대가 일반 전력부하의 최대부하 시간대와 달라서 부하 이동(load shifting)에 의한 비용절감 효과가 크지 않기 때문일 것이다.

5.3 첨두부하 절감용 ESS의 경제성 분석

도시철도 변전소에 설치한 ESS 및 PCS의 경제성을 평가하기 위해서는 그 비용과 편익을 알아야 한다. 3장에서 살펴본 바와 같이 편익은 전기요금 절감액이며 비용은 기기의 설치 및 운용 비용이 될 것이다. 현재 판매, 설치되고 있는 배터리 및 PCS의 가격은 기술이 미성숙하기 때문에 계속적으로 변해가고 있다. 특히 PCS의 경우 기술발전에 따라 용량당 가격이 하락하고 있는 추세이며, 대량 생산이 본격화될 경우 더 낮아질 수 있을 것으로 보인다.

배터리와 PCS의 설치 및 운용 비용을 조사하기 위해 관련 업체에 문의, 조사하였고, 그 데이터를 기반으로 도시철도변전소에서 첨두부하 저감용으로 사용되는 배터리 및 PCS의 가격과 수명을 표 4와 같이 가정하였다. 조사 결과에 따라 추가어드는 운용비용에 대해서는 없거나 고려할 만큼 크지 않으며, 수명에 따른 기기 교체비용만 고려하면 된다고 가정하였다.

표 4 배터리와 PCS의 설치 비용
Table 4 Installation costs of battery and PCS

항목	가격	수명
배터리	400,000 원/kWh	8년
PCS	500,000 원/kW	16년

경제성을 분석함에 있어 프로젝트 기간은 16년으로 산정하고 3장에서 소개한 순현재가치를 적용하였다. 표 4의 가정에 의하여 투자 비용은 초기 비용과 사업 기간 중간에 배터리를 교체하는 비용으로 산정하였다. 이와 같은 가정하에, 수식 (4)를 이용하여 첨두부하 절감에 따른 편익과 기기 설치에 따른 비용에 대한 NPV를 정리하면 다음 표 5와 같다. 이 때 이자율 r 은 3.5%로 가정하였다. 표 5에서 초기투자비용은 배터리와 PCS를

표 5 첨두부하 절감량에 따른 편익/비용과 순현재가치
Table 5 NPV according to the amount of peak load shaving

부하저감량 $P_{Shaving}$ [kW]	초기투자비용 $C_{cost,0}$ [천원]	중간투자비용 $C_{cost,7}$ [천원]	연도별 편익 $C_{benefit,t}$ [천원]	순현재가치 NPV [천원]
50	45,000	20,000	4,992	2,299
100	90,000	40,000	9,984	4,597
150	147,768	72,768	15,140	-13,510
200	232,877	132,877	20,761	-73,905
250	351,899	226,899	27,428	-180,882
300	505,853	355,853	35,716	-329,025
350	780,402	605,402	46,553	-657,427
400	1,104,051	904,051	61,122	-1,025,510

프로젝트 기간 $N = 16$ 년, 할인율 $r = 3.5\%$ 로 가정

동시에 설치하면서 발생하는 비용이고, 중간 투자비용은 배터리의 수명이 다하여서 교체할 때 발생하는 비용을 나타낸다.

표 5에 정리된 바와 같이 첨두부하저감량을 100kW로 산정하였을 때 NPV가 가장 큰 것으로 나타났다. 그리고 150kW 이상의 용량에서는 비용 증가로 인해 NPV가 음의 값을 나타냄을 볼 수 있었다. 따라서 표 4의 가정하에서 경제적으로 최적인 첨두부하 저감량은 100kW로 볼 수 있고, 이를 위하여 표 2에서 볼 수 있듯 100kWh 용량의 ESS와 400kW 용량의 PCS를 설치해야 함을 알 수 있다.

이렇게 주어진 조건에서 ESS와 PCS의 최적 용량 및 그를 통한 경제적 편익을 순현재가치법을 통하여 계산할 수 있었다. 그런데 계산 과정에서 살펴보았듯이 같은 전기요금 체계 내에서도 배터리나 PCS 가격에 따라 ESS의 경제성이 달라짐을 알 수 있다. 표 5에서 가정한 배터리와 PCS의 단위 용량당 가격이 변할 때 ESS의 NPV가 어떻게 변하는지 그림 10에 나타내었다. 우선 PCS 가격을 표 4에 가정한 가격으로 고정한 다음 배터리 가격 변화에 따른 NPV의 변화를 그래프로 나타내었고, 마찬가지로 PCS 가격 변화에 따른 NPV의 변화를 그래프로 나타내었다.

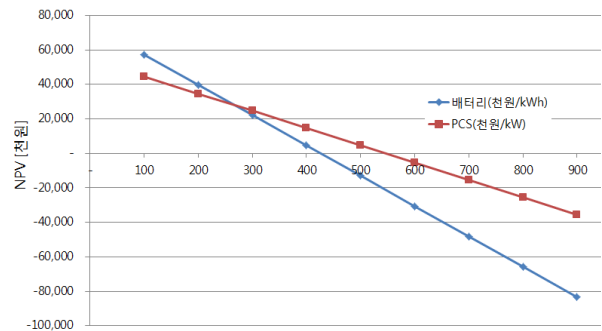


그림 10 배터리와 PCS의 가격 변화에 따른 NPV
Fig. 10 NPV according to prices of battery and PCS

그림 10에서 볼 수 있듯이 PCS의 가격변화에 비해서 배터리의 가격변화가 ESS 설치의 NPV에 많은 영향을 끼친다. 그래프에서 보면 배터리의 단위 가격이 kWh 당 400만원을 넘어가면 ESS의 NPV가 음의 값을 가져서 경제성이 없음을 알 수 있다. 반대로 배터리의 가격이 낮아질수록 ESS의 경제성이 많이 높아짐을 볼 수 있다. 배터리 가격은 그 종류에 따라 가격이나 수명에 차이가 있으며 적용하고자 하는 변전소의 부하 곡선의 특성을 고려하여 ESS의 적용 여부 및 그 용량을 결정할 수 있을 것이다. 배터리 가격에 비해서 영향이 작지만, PCS의 가격도 마찬가지로 ESS의 경제성에 영향을 끼침을 볼 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 도시철도변전소의 첨두부하량을 줄이기 위해 부하 패턴에 따라 ESS의 저장용량과 PCS의 출력용량을 산정하는 방법을 제안하였다. 그리고 순현재가치법을 이용하여 첨두부하 절감용 ESS의 경제성을 평가하는 방법을 제안하였다. 이를 이용하여 실제 도시철도변전소에서 측정된 부하 데이터에 기반하여 첨두부하를 줄이기 위하여 설치해

야 하는 ESS와 PCS의 용량을 계산하였다. 그리고 침두부하 절감에 따른 편익을 통하여 ESS의 경제성을 평가하였다.

업체에 조사한 기기 가격에 기반하여 계산한 결과 침두부하를 100kW 절감했을 때 NPV가 가장 높게 나와 경제성이 높은 것으로 결과가 나왔다. 그리고 침두부하 절감용 ESS의 경제성은 배터리 가격에 영향을 많이 받음을 알 수 있었다. 추후 이렇게 설치한 ESS를 효율적으로 제어하는 방법에 대한 연구가 더하여진다면, 실제 ESS의 설치 및 운용에 가이드가 될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비 지원(14RTRP-B067916-02)에 의해 수행되었습니다.

References

[1] Hosung Jung, Hyungchul Kim, Seoungkwon Shin, Kiyong Yoon, Jae-moon Kim, and Yang-su Kim, "Installation of power monitoring system for load pattern analysis on DC urban transit system," ISGC&E 2013, July 2013.

[2] Seoungkwon Shin, Hosung Jung, Hyungchul Kim, and Jinho Kim, "Study on HVDC application in AC power grid for Korean railway," ISGC&E 2013, July 2013.

[3] Hansang Lee, Seungmin Jung, Hosung Jung, Hyungchul Kim, and Gilsoo Jang, "Power management for electric railway system to reduce the railway operating cost," 2012 KIEE fall conf., pp. 411-413, 2012.

[4] Chang-mu Lee, Han-min Lee, and Gil-dong Kim, "Application effect and optimal location of energy storage system in AC electric railway," 2010 KIEE Fall Conf., Oct. 2010.

[5] H. Lee, J. Song, H. Lee, C. Lee, G. Jang, and G. Kim, "Capacity optimization of the supercapacitor energy stroages on DC railway system using a railway powerflow algorithm," IJICIC, Vol. 7, no. 5, pp. 2739-2753, May 2011.

[6] Hosung Jung, Hyungchul Kim, Seoungkwon Shin, Jinho Kim, Kiyong Yoon, and Yonghyeun Cho, "A power losses analysis of AC railway power feeding network using adaptiveVoltage control," Trans. of KIEE, Vol. 62, no. 11, pp. 1621-1627, 2013.

[7] Joo-uk Kim, Hosung Jung, and Hyungchul Kim, "A study on constructing rail energy management system applied SE process," ISGC&E 2013, July 2013.

[8] Sung-min Cho, Hee-sang Shin, and Jae-chul Kim, "Modeling of battery energy storage system at substation for load leveling and its economic evaluation," Trans. of KIEE, Vol. 61, no. 7, pp. 950-956, 2012.

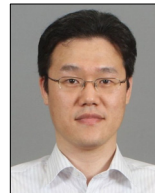
[9] Sung-hwan Park, Jin-young Choi, Tae-ho Lee, Dong-jun Won, Seung-il Moon, Yeong-jun Seo, Kyeong-seob Moon, and Yong-wan Kim, "Economic assessment of short-term battery energy storage

system applying to Korean power system," 2013 KIEE Summer Conf., July, 2013.

[10] Jong-young Park, Hosung Jung, Hyungchul Kim, and Seung-kwon Shin, "Capacity Determination of ESS for Peak Load Shaving Based on the Actual Measurement of Loads in the Substation of Urban Railway," Trans. of KIEE, Vol. 63, no. 6, pp. 860-865, 2014.

[11] Jong-young Park, Hosung Jung, Hyungchul Kim, and Seung-kwon Shin, "Analysis of Electricity Cost with Peak Load Shaving by ESS in the Substation of Urban Railway," 2014 KIEE Summer Conf., July. 2014.

저 자 소 개



박 종 영(Jong-young Park)

1976년 8월생. 1999년 서울대학교 전기공학부 졸업. 2007년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 2007~2009년 한국전기연구원, 2009년~2013년 LS산전. 2013년~현재 한국철도기술연구원 스마트역사연구팀 선임연구원.

Tel : 031-460-5731 Fax : 031-460-5749
E-mail : jypark@krri.re.kr



신 승 권(Seungkwon Shin)

1972년 6월생, 1998년 성균관대학교 전기공학과 졸업(공학석사). 2001년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 2003년 ~ 현재 한국철도기술연구원 스마트역사연구팀 선임연구원

Tel : 031-460-5685 Fax : 031-460-5749
E-mail : skshin@krri.re.kr



김 형 철(Hyungchul Kim)

1967년 9월생, 1991년 고려대학교 전기공학과 졸업, 2003년 Texas A&M 졸업(공학박사). 2004년~ 현재 한국철도기술연구원 스마트역사연구팀 책임연구원

Tel : 031-460-5450 Fax : 031-460-5749
E-mail : hckim@krri.re.kr



정 호 성(Hosung Jung)

1971년 10월생, 2002년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 2002년 ~ 현재 한국철도기술연구원 책임연구원, 기술전략실장

Tel : 031-460-5116 Fax : 031-460-5749
E-mail : hsjung@krri.re.kr