

# 태양광 연계형 배터리 에너지 저장장치의 최적 용량 산정

## A Study of Optimum Capacity of Battery Energy Storage System Linked PV

백민규\* · 박종배\* · 손성용\*\* · 신하상\*\*\* · 박용기\*

(Min-Kyu Baek · Jong-Bae Park · Sung-Yong Son · Ha-Sang Shin · Yong-Gi Park)

**Abstract** - In September 2016, the government decided to apply a REC 5.0 weighting to solar-battery ESS to increase the supply of renewable energy. In this paper, we calculated the optimal capacity of battery ESS which maximizes the revenue when solar is linked with battery ESS. In the case study, the optimal capacity was calculated by applying the conservative REC price, and we studied sensitivity analysis about battery price and real-time REC price.

**Key Words** : BESS, PV, REC, Economic evaluation, Optimum capacity

### 기호 정의

- $T$  : BESS 총방전 계획 주기
- $PV_t$  : t 시간대 태양광 발전량(kWh)
- $SMP_t$  : t 시간대의 계통한계가격(원/kWh)
- $REC_t$  : t 시간대의 REC가격(원/kWh)
- $\overline{EC}$  : BESS 정격 저장용량(kWh)
- $\overline{EP}$  : BESS 총방전 시 정격전력(kW)
- $SOC_t$  : BESS t 시간 충전상태(%)
- $SOC^0$  : BESS 초기 충전상태(%)
- $ep_t$  : t 시간 BESS의 총·방전량(kW)
- $ep_t^c$  : t 시간 계통에서 BESS로의 충전량(kW)
- $EP_t^c$  : t 시간 BESS의 내부 충전량(kW)
- $ep_t^d$  : t 시간 계통으로의 BESS 방전량(kW)
- $EP_t^d$  : t 시간 BESS의 내부 방전량(kW)

### 1. 서 론

2015년 4월 정부에서는 ‘기후 변화 대응을 위한 에너지 신산업 육성’의 일환으로 ‘에너지 신산업 활성화 및 핵심 기술개발 전략 이행 계획’을 발표 하였다[1]. 특히 배터리 전기저장장치(이하 BESS) 분야에서는 2017년까지 총 660MWh의 대규모 보급을 목표로 하고 있으며, 그 중 주파수 조정용 BESS는 한전을 중심으로

500MW급 보급을 목표로 하고 있다. 그 일환으로 2016년 9월 한국 에너지공단에서는 태양광 발전소(PV)의 BESS의 보급 및 투자 유치를 촉진하기 위하여 ‘공급 인증서 발급 및 거래 시장 운영에 관한 규칙’을 공표 하였다[2]. 이는 2017년까지 REC 가중치 5.0을 적용하고 2018년부터는 보급여건 등을 고려한 가중치를 조정하여, 석탄 사용을 감소함과 동시에 신재생 에너지 산업의 보급을 목표로 삼고 있다[3]. 이에 따라 현 정책을 고려한 경제성 평가 진행이 필요하다.

본 논문에서는 REC 가중치를 활용하여 기존 설치되어있는 태양광(100kW)에 BESS를 연계하기 위한 경제성 평가를 수행하였다. BESS의 용량 별 경제성 평가를 반복 수행하여 최적 BESS 용량을 도출하였다. 운영 사업자는 PV-BESS의 가중치 5.0을 받기 위해 충전가능시간(10시~16시)을 지키고 에너지 수입 최대화 운영을 통해 가장 높은 경제성을 확보할 수 있다[2].

본 논문의 2장과 3장에서는 신재생공급인증서와 BESS 운영 모델링을 설명하였고, 4장에서는 경제성평가 방안을 제시하였다. 5장의 사례연구에서는 건물 옥상에 설치되는 100kW의 PV와 BESS 연계 시 PCS와 배터리의 최적 구성 용량 산출하였다. 또한, 배터리의 단가와 REC 가격에 대한 민감도 분석을 위해 B/C ratio와 순현재가치(NPV)를 비교하였다.

### 2. 신재생 공급인증서(REC)

신재생에너지 공급인증서(REC)는 발전사업자가 신재생에너지 설비를 이용하여 전기를 생산, 공급하였음을 증명하는 인증서로서 공급의무자는 의무 공급량을 신재생에너지 공급인증서를 구매하여 충당할 수 있다. 공급인증서 발급대상설비(신재생에너지 발전소)에서 공급된 신재생에너지 전력량에 대해 가중치를 곱하여 부과한다.

2016년 9월 한국에너지공단에서 공표한 REC 가중치는 표 1과 같다. 당해에 태양광에너지 설비와 ESS설비의 연계 시 ‘16년과

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Youngsan University, Korea.  
 E-mail : draco.park@ysu.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University, Korea.

\*\* Dept. of Electrical Engineering, Gachon University, Korea.

\*\*\*Solution advanced technology Co., Korea.

Received : August 8, 2017; Accepted : November 21, 2017

'17년에 한 해 REC 가중치를 5.0으로 적용하는 부분이 추가되었다[2]. 태양광 및 신재생에너지 설비는 계통한계가격(원/kWh) 외에도 시간별 REC 단가(원/kWh)를 적용하여 정산을 받는다. 아래 표에서 제시한 가중치는 시간별 REC 단가에 가중치를 곱하여 정산을 받기위해 사용한다. REC 단가 추이는 5장 민감도 분석의 그림 6에서 제시하고 있다.

표 1 태양광 에너지의 REC 가중치[2]

Table 1 REC weight parameter of PV

구분	공급인증서 가중치	대상에너지 및 기준	
		설치유형	세부기준
태양광 에너지	1.2	일반부지	100kW미만
	1.0		100kW부터
	0.7		3,000kW초과부터
	1.5	기존 시설물 이용	3,000kW이하
	1.0		3,000kW초과부터
	1.5	유지 등의 수면에 부유하여 설치하는 경우	
	1.0	자가용 발전설비를 통해 전력을 거래하는 경우	
	5.0	BESS설비 (태양광설비연계)	'16년, '17년

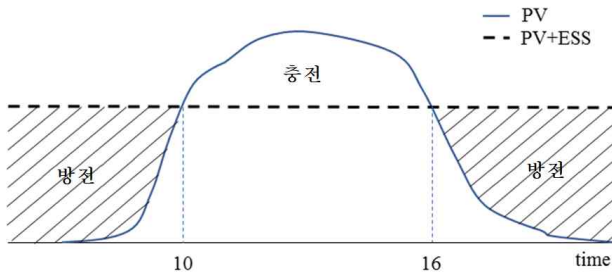


그림 1 가중치 적용 시간

Fig. 1 Available time to apply REC weight

BESS 연계를 통해 REC 5.0이 적용되기 위해서는 그림 1과 같이 10시에서 16시 사이에 BESS의 충전이 이루어져야 한다.

태양광 발전 설비와 BESS 연계는 시스템의 안정도에 큰 영향을 준다. 구름에 의한 증/감발과 같은 출력의 불확실성을 배터리가 충·방전을 통해 흡수하므로 계통 안정도를 높일 수 있다.

### 3. PV-BESS 연계 시 BESS 운영 모델링

#### 3.1 수익 최대화 목적함수

수익 최대화 목적함수는 다음과 같이 계통한계가격(SMP; System Marginal Price)과 REC 가중치가 적용된 가격을 합하여 수입이 최대화되는 BESS의 충·방전 스케줄을 구할 수 있다.

BESS를 소유한 태양광 발전 사업자는 계통한계가격에 REC 가중치 가격을 합한 가격으로 정산을 받으며, 그 때의 정산 에너지는 BESS가 충·방전한 에너지( $ep_t = ep_t^c - ep_t^d$ )를 포함한다.

$$\max \sum_{t=1}^T \{ (SMP_t + REC_t) \times (PV_t - ep_t) \} \quad (1)$$

#### 3.2 제약조건

BESS가 위 목적함수에 의해 충·방전을 수행하기 위해서는 다음의 기술적인 제약이 반영되어야 한다[4]. 식 (2)는 BESS의 충·방전 정격전력제약이다. BESS의 충·방전은 BESS의 정격 내에서 이루어져야 한다.

$$0 \leq EP_t^c \leq \overline{EP}, \quad 0 \leq EP_t^d \leq \overline{EP} \quad (2)$$

실제 BESS에 외부에 가해지는 에너지와 저장되는 내부에너지는 효율에 의해 서로 다르기 때문에 다음 등식을 만족해야 한다.

$$\frac{1}{\eta^c} EP_t^c = ep_t^c, \quad EP_t^d = \eta^d ep_t^d \quad (3)$$

PV 및 BESS 충·방전 제약은 다음과 같다. t 시간에서 PV 발전량과 BESS의 충·방전량의 합은 항상 0보다 커야 한다.

$$0 \leq PV_t + \sum_{t=1}^T (EP_t^c + EP_t^d) \quad (4)$$

SOC(State of Charge)는 배터리 내부에 저장된 에너지량을 퍼센트로 나타낸다. 따라서 내부 에너지량은 SOC와 정격의 곱으로 나타낼 수 있다. 배터리의 저장가능 용량제약은 다음 등식을 만족해야 한다. 전체 시간 T에 대해 충·방전량의 합은 항상 SOC 제약 내에 존재해야 한다. 초기 시점의 는 일반적으로 50%를 적용하며 계통의 부하특성에 따라 다르게 적용될 수 있다.

$$SOC^{\min} \times \overline{EC} \leq SOC^0 \times \overline{EC} + \sum_{t=1}^T (EP_t^c - EP_t^d) \quad (5)$$

$$SOC^{\max} \times \overline{EC} \geq SOC^0 \times \overline{EC} + \sum_{t=1}^T (EP_t^c - EP_t^d)$$

본 논문에서는 가중치 적용 시간에 의해 하루 1회 충 방전을 수행한다. BESS의 운영 주기는 24시간으로 가정한다.(T=24) BESS는 365일 시뮬레이션 기간 동안 매일 완전 충전과 완전 방전을 반복한다.

### 4. 경제성 평가

#### 4.1 경제성 평가 방안

경제성 평가는 다음과 같은 순서로 이루어진다. 경제성 분석 방법 수립, 평가 방법 결정, 주요전제 결정, 비용 및 편익 산정,

분석기간에 대한 경제성 평가 수행 순이다. 본 논문에서는 경제성 평가를 수행하기 위해 가장 먼저 비용과 편익에 대한 현시점의 비용현재가, 편익현재가를 측정하고 편익/비용 비율법(B/C ratio)을 사용하여 각 용량별 B/C 결과를 계산하였다[5]. 경제성 평가 기준 연도는 2015년으로 하였다. 리튬 이온 BESS의 수명은 제조사에서 보통 10년~15년으로 제공하며, 하루 1회 충·방전을 수행하여 충·방전 횟수가 적으므로 장기사용에 적합한 패턴을 보인다. 따라서 BESS의 수명은 15년으로 가정하였다[7]. 할인율(Discount rate)은 보수적인 값인 6.5%로 가정하였다. 할인율이 낮아지면 NPV와 B/C는 선형적으로 증가하며 민감도 분석에서 할인율 변화에 따른 B/C와 NPV변화를 도시하였다.

순현재가치법(NPV; Net Present Value)은 사업을 시행함으로써 발생하는 편익의 총합에서 비용의 총합을 뺀 순편익을 기준 연도의 현재가치로 할인하여 환산한 값으로 단위는 화폐가치이다. 순현재가치가 양 (+)의 값으로 분석되면, 사업의 경제적 타당성이 있는 것으로 판단할 수 있다.

$$\text{순현재가치} : NPV = \sum_{k=n_0}^N \frac{B_k - C_k}{(1+r)^k} \quad (6)$$

여기서,  $n_0$ 는 사업의 개시시점,  $N$ 은 사업의 전체 기간,  $r$ 은 할인율,  $B_k$ ,  $C_k$ 는 각각  $k$  년도의 편익과 비용을 의미한다.

편익-비용 비율법(B/C ratio)은 일정한 할인율을 적용하여 현재가치화한 비용과 편익을 산출한 후, 비용에 대한 편익 비율을 적용하여 사업의 경제적 타당성을 판단하는 방법이다. 일반적으로 어떤 사업에 대한 B/C비율을 분석한 결과 값이 1보다 크면 그 사업은 경제적 타당성이 있다고 판단할 수 있다.

$$\text{편익-비용 비율} : B/C \text{ ratio} = \frac{\sum_{n_0}^k B_k / (1+r)^k}{\sum_{n_0}^k C_k / (1+r)^k} \quad (7)$$

## 4.2 BESS 편익

PV와 BESS의 연계로 BESS는 에너지 차액거래를 수행한다. PV와 BESS의 연계 시 얻을 수 있는 총 수입은 BESS의 차액거래 수입과 PV 용량에 대한 에너지 판매수입으로 나뉜다.

PV-BESS 연계 편익의 대부분은 REC 가중치에 의해 발생한다. PV만 운영할 경우 일반부지에서는 대략 1의 REC 가중치가 적용되고, 시설위의 1000kW 이하 태양광 설비는 1.5의 REC 가중치가 적용된다. PV에 BESS를 연계함으로써 실질적으로 적용되는 편익은 5 REC 가중치에서 1.5 REC 가중치를 뺀 3.5 REC이다. 만약 PV가 건물에 아닌 일반 부지에 설치된 경우 실질적으로 적용되는 REC 편치는 4로 더 높은 편익이 발생한다.

본 논문에서는 건물의 옥상에 설치되는 경우인 1.5 REC 가중치와 BESS를 연계했을 때 적용되는 5 REC 가중치를 사용하여 편익을 산출하였다.

## 4.3 BESS 비용

일반적으로 비용 요소는 고정비용과 변동비용으로 구분한다. 고정비용은 시설투자비와 고정운전유지비용 등이 있고 변동비용은 설비 운영과 관련된 제반 비용을 포함된다. 본 논문에서 BESS 고정비용의 투자비는 배터리 제작비, PCS 제작비로 구분하였으며 배터리 제작비에는 배터리 셀 비용, 컨테이너 제작비, BMS(Battery Management System) 등이 포함되었다고 가정한다. PCS 제작비에는 전력변환장치, PMS(Power Management System), 계통연계비용 등이 모두 포함되었다고 가정한다. 계통연계비용에는 변압기 설치, 연계선로 구축 등 계통연계에 소요되는 제반 비용이 포함되었다고 가정한다.

고정 운전유지비용은 EPRI 보고서에서 연간 발생하는 BESS의 고정비용을 0.5%에서 2% 정도로 가정한 것을 인용하여 연간 시설투자비의 2%가 발생한다고 가정한다[6]. 변동비용의 경우 BESS를 운영하는데 있어 추가적인 연료비가 발생하지 않으므로 반영하지 않았고, BESS의 충·방전 및 대기상태에서 발생하는 비용은 고정 운전유지비용에 포함한다고 가정한다.

## 5. 사례 연구

본 논문에서는 총 3가지의 CASE에 대해 연구를 수행하였다.

- CASE 1 : 최적 용량 결정(기준 CASE)
- CASE 2 : 배터리 비용 하락에 대한 민감도 분석
- CASE 3 : REC 가격 상승에 따른 민감도 분석

각 시나리오에서 고려된 사항은 REC 단가, 배터리의 가격이다. CASE 1은 표2와 같이 비교적 저평가된 '15년의 REC 단가를 사용하였다. 건물 옥상에 설치된 PV에 BESS를 연계한 경우에 대해 PCS를 25kW와 50kW로 고정 후, 경제성 평가를 반복수행하여 최적 용량을 결정하였다. CASE 2는 지속적으로 BESS의 배터리 뱅크의 가격이 감소되어 투자비가 감소할 수 있으므로 민감도 분석을 수행하였다. CASE 3은 최근 아래 표 및 그림 6과 같이 REC가격의 높은 증가로 현 REC 단가에 맞는 추가적인 민감도 분석을 수행하였다.

표 2 최근 3년간의 평균 REC 단가(원/kWh)

Table 2 Average REC price last 3 years(KRW/kWh)

구분	'14년	'15년	'16년	'17년 (1월~5월)
REC 평균단가	61.8	84.8	167.4	130.7

### 5.1 BESS의 기술적 특성

다음 표는 본 논문에서 적용한 BESS의 기술적 특성이다. 여기서 배터리는 리튬 배터리를 사용하였으며, 충전 효율은 97%, 방전 효율은 98%이다. SOC 범위는 완전 충전 또는 완전 방전 시

수명이 크게 감소하므로 10%~90%를 적용하였다[7].

본 논문의 사례연구에서는 배터리의 가격을 산정하기 위해 '15년 IRENA의 배터리 저장장치 리포트를 참고하였다[8]. 아래 표는 해당 배터리 타입의 에너지 밀도, 수명, 가격을 보여주고 있다.

표 3 리튬-망간 배터리의 특성[7]

Table 3 Lithium manganese battery characteristics

	Energy density	Cycle life	'14 price per kWh
Lithium manganese spinel	85-105Wh/kg	200-2000	\$450 - \$700

위 가격 데이터를 바탕으로 다음과 같이 배터리 가격을 가정한다.

표 4 리튬 배터리 ESS의 기술적 특성

Table 4 Lithium battery ESS characteristics

구 분	평균단가	단 위
시설투자비	PCS	200,000 원/kW
	배터리뱅크	582,133 원/kWh
연간 고정 운전유지비용	시설 투자비의 2%	

PCS와 배터리 뱅크는 PCS 설치 및 기타 비용을 모두 포함하고 있으며, PCS는 배터리 뱅크의 1/3 수준으로 가정한다. 배터리 뱅크 고정 운전유지비용 및 PCS 계통연계 고정운전비용을 포함하고 있는 연간 고정 운전유지비용은 시설 투자비의 2%가 매년 발생한다고 가정한다. 단, 계통 연계비용은 없다고 가정한다.

CASE 1과 3에서는 위 표의 배터리 뱅크 단가를 사용하였으며 CASE 2에서 배터리 뱅크 가격 민감도를 분석하기 위해 배터리 뱅크의 단가가 30% 하락 하였을 때 민감도 분석을 수행하였다.

### 5.2 경제성 평가 결과

본 사례연구에서는 '15년 부하를 기준년도 및 기준 부하로 사용하였으며 '15년 SMP를 사용하였다. 전라남도 지역의 입야에 설치된 대규모 PV의 2015년 발전량 패턴으로부터 BESS 운영 분석을 수행하였다. CASE 1은 기준 시나리오이며, 시설 투자비는 표 4와 같고 저평가된 '15년 REC 평균단가를 사용하였다. 최적 BESS 용량을 계산하기 위해 가장 먼저 PCS를 25kW와 50kW로 고정하여 최적 PCS/배터리 뱅크 구성비(C-rate)를 산출하였고, C-rate를 고정한 후 PCS 및 배터리 뱅크의 용량을 증가시켜 가면서 경제성 평가를 반복 수행하였다.

CASE 2에서는 기준 케이스로부터 배터리 뱅크의 가격만 30% 하락시켜 민감도 분석을 수행하였다. CASE 3에서는 보수적인 REC 단가를 적용한 CASE 1의 민감도 분석을 위해 '17년 5월의 REC 단가를 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

BESS의 충·방전의 수행은 다른 운용 방법과 달리 충전제한으로 인한 1일 1회 완전 충전 및 완전 방전을 반복한다. 따라서 10시~16시 사이 1회 완전 충전만 하면 되므로 가장 경제성이 높을 때는 PCS 용량을 줄여 6시간동안 완전충전이 되도록 하는 것이다. 즉, PV의 용량이 결정되면 6시간동안 BESS를 충전하도록 하는 최소 PCS 용량이 결정되고, 이 때 투자비가 가장 작아지므로 B/C가 가장 높을 것으로 예상할 수 있다.

#### 5.2.1 CASE 1 : 최적 BESS 용량 결정

BESS 최적화 수행을 통해 BESS의 최적 구성비를 추정할 수 있다. 본 논문에서는 PCS 용량을 25kW 및 50kW 두 가지에 대해 최적 C-rate를 산출한 후, 최적 C-rate에 대해 PCS 용량 및 배터리 뱅크 용량을 증가시켜 최적 BESS 용량을 계산하였다.

아래 그림은 PCS가 25kW, 50kW일 때 배터리 용량별 B/C 값의 변화를 도시하고 있다. PCS 용량이 25kW이고 배터리 용량이 100kWh일 때 가장 높은 B/C 값인 0.938을 보였다. 25kW PCS와 100kWh의 배터리 뱅크 용량을 C-rate로 환산하면 0.25C 이므로 최적 구성비는 0.25이다.

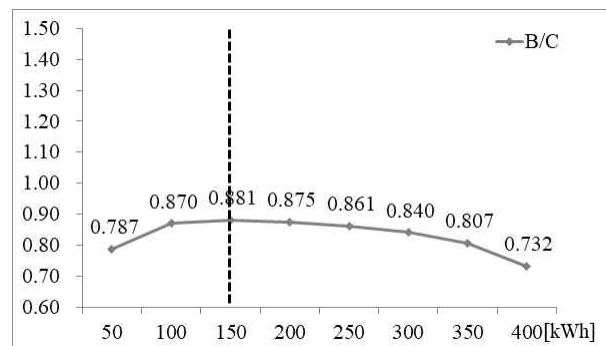
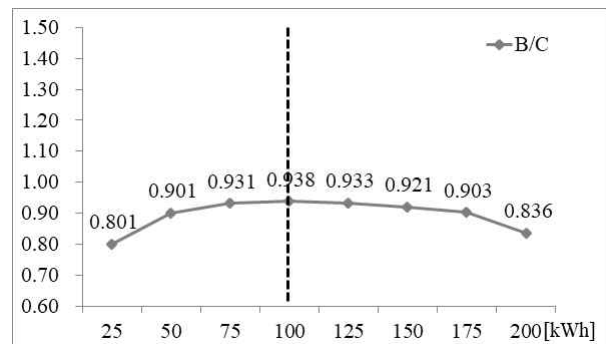


그림 2 PCS가 25kW 및 50kW일 때 배터리 용량별 B/C  
Fig. 2 B/C ratio for 25kW and 50kW PCS capacity

그림 2에서 PCS 용량이 50kW일 때, B/C는 배터리 뱅크의 용량 150kWh에서 0.881로 가장 높다. PCS의 용량이 25kW에서 50kW로 증가하면, 비용도 같이 증가하여 그림 2의 25kW 대비 전체적으로 낮아진 형태의 B/C 곡선을 보인다. PCS의 용량이 50kW일 때, 최적용량은 150kWh이고 C-rate는 0.3C이다. 25kW

와 비교하였을 때, 최적 구성비가 약 0.25에서 가장 높은 B/C 값을 보였다.

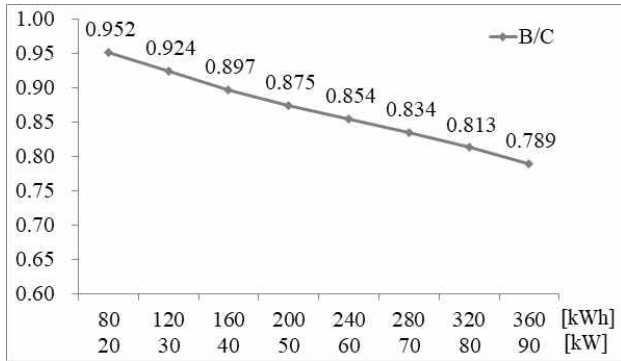


그림 3 C-rate가 0.25일 때 PCS 용량 별 B/C

Fig. 3 B/C ratio for 0.25C C-rate

시뮬레이션 결과 B/C가 최대가 되는 최적 구성비(C-rate)는 0.25이었고, 최적 용량을 산출하기 위해 C-rate를 0.25로 고정하고 PCS 용량을 다음과 같이 증가시켜가면서 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3과 같이 PCS의 용량이 증가할수록 B/C 값은 지속적으로 감소한다. 모든 용량에서 B/C 값은 1보다 작은 값을 나타낸다. 보수적인 REC 단가를 적용한 기준 시나리오인 CASE 1에서는 모든 용량에서 경제성이 부족하다. 그러나 현재의 '16년, '17년의 REC 가격추이는 점차 증가하고 있고 BESS의 가격은 하락하고 있는 추세이므로 CASE 2와 CASE 3에서 민감도 분석을 수행하였다.

### 5.2.2 CASE 2 : 배터리 비용 하락에 대한 민감도 분석

IRENA의 배터리 저장장치 리포트에서는 다음과 같이 미래에 BESS의 가격이 지속적으로 감소할 것으로 보고 있으며 '14년 기준 '17년까지 평균 20%, '20년까지 평균 33% 정도 감소할 것으로 전망하고 있다[8].

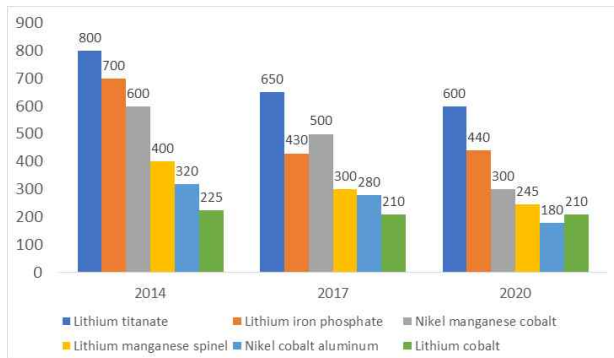


그림 4 배터리 ESS의 가격 전망[8]

Fig. 4 Forecast price of battery ESS

이는 전기자동차의 증가와 세계적인 신재생에너지 도입 정책과 함께 생산이 증가하면서 지속적으로 하락할 것으로 예상된다[3].

CASE2에서는 CASE 1에서 계산된 C-rate를 바탕으로 배터리 단가를 하락시켜 민감도 분석을 수행하였다.

표 5 CASE 2에 적용한 배터리 단가

Table 5 Applied battery price on CASE 2

	배터리 단가	단 위
CASE 1(기준)	582,133	원/kWh
CASE 2(30%단가하락)	400,000	원/kWh

기준 배터리 단가로부터 10%씩 하락시켜가면서 시뮬레이션을 반복 수행한 결과 배터리의 단가가 30% 하락하였을 때, 모든 구간에서 B/C가 1을 넘었다. PCS가 25kW일 때, B/C는 배터리 용량이 125kWh에서 약 1.32로 가장 높았고, C-rate는 0.2이었다. PCS가 50kW이고 배터리 용량이 200kWh에서 약 1.24의 가장 높은 B/C가 산출되었으며 그때의 C-rate는 0.25이었다. 즉, 배터리의 가격이 하락하고 다른 변화 요인이 없는 상태에서 최적 C-rate(최적 구성비)는 민감도가 둔한 것으로 분석되었다.

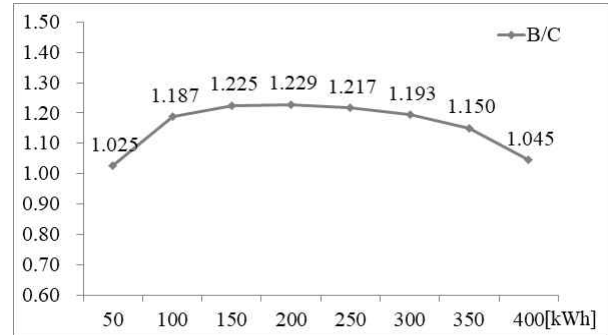
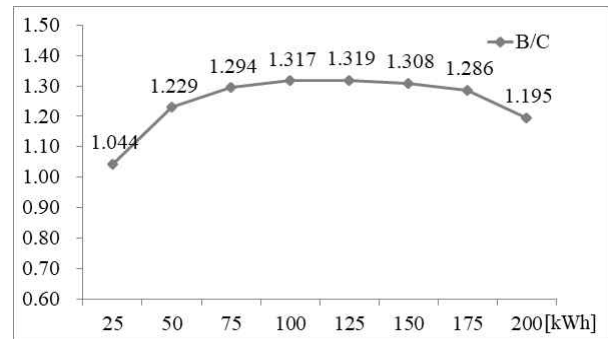


그림 5 PCS가 25kW 및 50kW일 때 배터리용량별 B/C

Fig. 5 B/C ratio for 25kW and 50kW PCS capacity

### 5.2.3 CASE 3 : REC 가격 상승에 따른 민감도 분석

'16년 5월부터 '17년 5월까지의 월 가중 평균 REC 단가는 다음 그림과 같다.

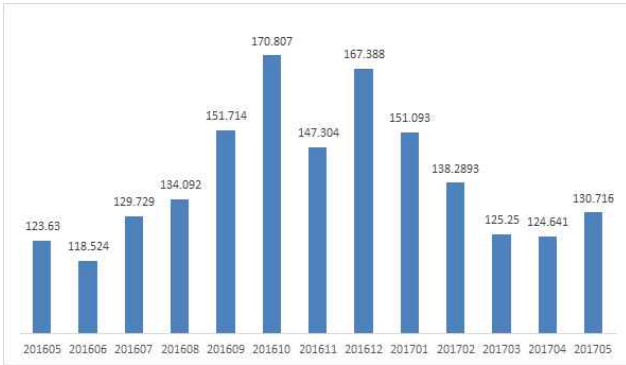


그림 6 '17년 5월까지의 월간 REC 평균 단가(₩/kWh)  
 Fig. 6 Monthly average REC price until May, 2017

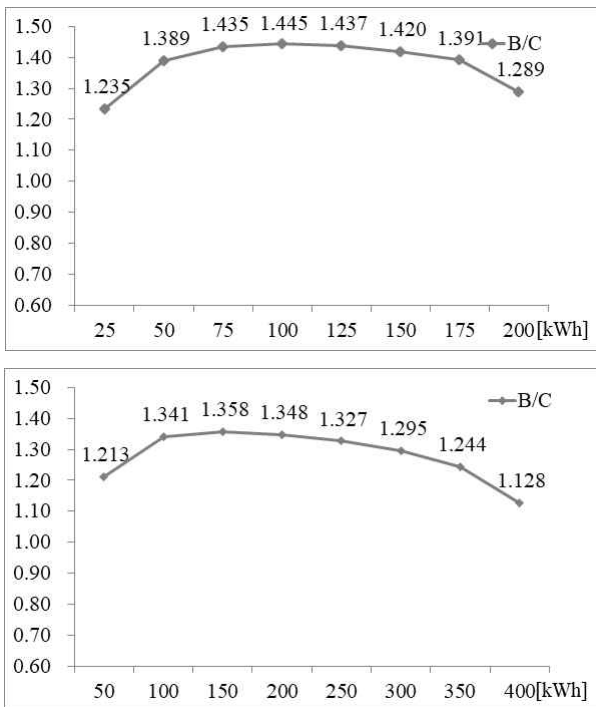


그림 7 PCS가 25kW 및 50kW일 때 B/C ratio  
 Fig. 7 B/C ratio for 25kW and 50kW PCS capacity

현재 REC 단가는 '16년 큰 폭으로 증가하였다가 '17년 초부터 약 130원/kWh를 유지하고 있는 추세이다. '16년 7월까지 REC 단가의 가중평균은 129,829원/MWh이고 kWh로 환산하면 129.8 원/kWh이다. 이 값은 '14년 REC 평균 단가 61.8 원/kWh, '15년 REC 평균 단가 84.8 원/kWh부터 각각 52.4%, 34.7%가 증가한 값이다.

CASE 3에서 배터리의 단가는 CASE 1과 동일하며 '17년 5월 REC 평균 단가를 사용하여 분석을 수행하였다.

시뮬레이션 결과 그림 7과 같이 모든 용량에서 B/C값이 1보다 큰 값을 보였다. PCS용량이 25kW이고 배터리 용량이 100 kWh

에서 가장 높은 1.445의 B/C와 0.25C C-rate를 보인다. 50kW PCS는 150kWh에서 가장 높은 1.358의 B/C와 0.3C C-rate를 보였다.

최적 C-rate는 REC 단가의 변화에 대해 둔감한 것으로 나타나며 약 0.25에서 최적 구성이다. CASE 1 대비 CASE 3의 REC 단가는 84.8원/kWh에서 130.716 원/kWh로 약 64%가 증가하였다. 각 PCS 용량 B/C ratio 변화량은 모두 64.9% 증가하였다. 따라서, REC 단가의 변화는 C-rate 변화에 둔감하므로 향후 변화량 계산 시 용이할 것으로 예상된다.

그림 8은 CASE 3의 PCS가 25kW, 50kW일 때 순현재가치를 도시하였다. 25kW PCS의 경우 배터리가 175kWh에서 가장 높은 값을 가진다. 이때의 C-rate는 0.14C이다. 50kW PCS의 경우 배터리의 용량이 300kWh에서 가장 높은 순현재가치를 가진다. 이때의 C-rate는 0.16C 이다.

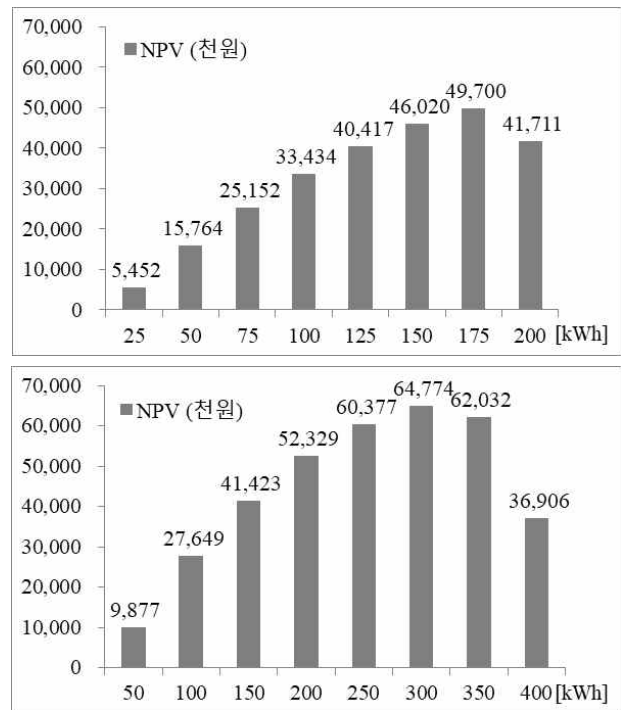


그림 8 PCS가 25kW 및 50kW일 때 순현재가치  
 Fig. 8 Net present value for 25kW and 50kW PCS capacity

건물 옥상의 PV-BESS 연계로 5.0의 REC 가중치를 받을 때 CASE 1, 2, 3으로부터 최적구성비는 PCS 25kW와 50kW에서 각각 0.25C, 0.3C를 산출 할 수 있었다.

그림 9는 최적 용량을 산출하기 위해 CASE 3에서 C-rate를 0.25C로 고정한 후, PCS와 배터리 뱅크의 용량별 경제성 분석을 수행하였다. B/C ratio는 용량이 증가할수록 점차 감소되며 모든 구간에서 1보다 큰 값을 가진다.

최적 용량을 구하기 위해 C-rate를 고정하고 순현재가치를 분석하였다. 순현재가치는 BESS 수명(15년)동안 총 수익을 현재화한 값으로서 용량이 증가할수록 선형적으로 증가하다 80kW/

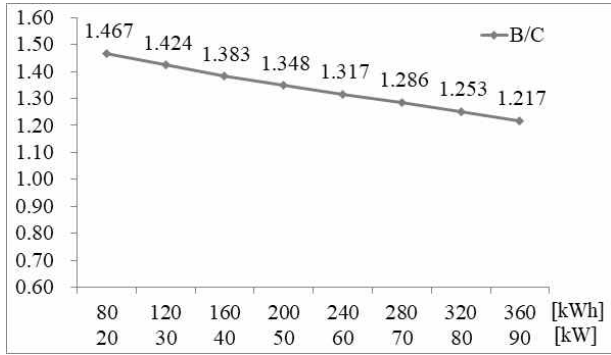


그림 9 용량 별 B/C ratio(C-rate 0.25)

Fig. 9 B/C ratio for 0.25C C-rate

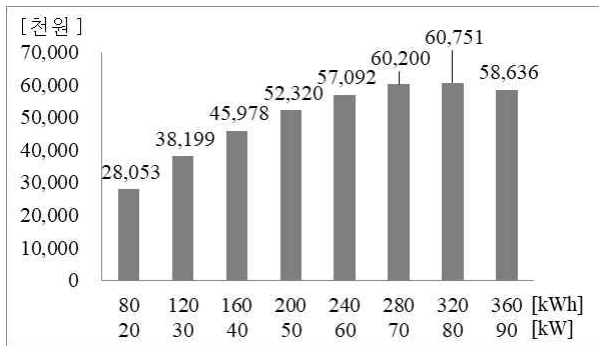


그림 10 용량 별 순현재가치(C-rate 0.25)

Fig. 10 Net present value at 0.25C C-rate

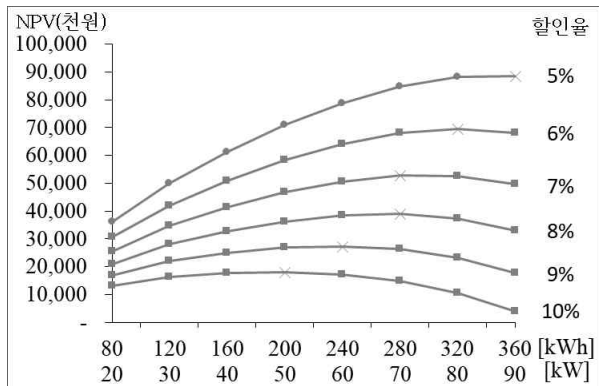


그림 11 할인율에 대한 NPV, B/C 민감도(320kWh/80kW)

Fig. 11 Sensitivity of discount rate at 320kWh/80kW

320kWh에서 감소한다.

경제성이 가장 높은 90kW/320kWh에서 최적 용량이다. 이 때, 순현재가치는 60,751 천원이다.

위 그림은 할인율이 변동할 때 각 용량별 NPV를 보여주고 있다. 각 할인율 별 그래프에서 할인율이 감소하면 최적 용량(NPV가 가장 높을 때의 용량)도 증가한다.

## 6. 결 론

신재생에너지 산업은 정부의 보급량 증가 정책과 맞물려 매년 증가하고 있는 추세이다. 특히 태양광 연계 BESS 분야에서는 가중치 부분이 추가되고 REC 단가가 높아짐에 따라 경제성 가치도 증가 추세이다.

본 논문에서는 건물 옥상에 설치된 100kW의 PV에 BESS를 추가로 설치할 경우 BESS의 최적용량과 경제성 평가를 수행하였다. 사례분석 결과 CASE 1에서는 BESS의 최적 용량을 산출하기 위해 최적 구성비(PCS와 배터리뱅크)인 0.25C C-rate를 산출하였다. 민감도 분석을 위한 CASE 2와 3에서도 약 0.25C의 C-rate를 도출하였으며, 최적 구성비는 배터리의 가격, REC 단가에 둔감한 것으로 분석되었다. 그러나 PV 출력 패턴과 PV 설비 용량, 초기 PCS 설정에 의해 C-rate 변화가 있을 수 있으므로 향후 추가 분석이 필요하다.

본 논문에서 사용된 비용 산정 및 지표는 최대한 실제와 비슷하도록 수치를 설정하였으며 태양광의 출력 또한 국내의 PV 패턴을 활용하여 BESS 최적 운영을 도출하였다.

기존 설치된 PV에 BESS를 설치할 경우 충전제약시간(6시간 충전)을 만족할 수 있는 가장 작은 용량의 BESS 설치가 가장 경제성이 있었다고 판단된다. 하지만 시설물에 부착된 PV 보다 일반 부지에 설치된 PV에 BESS를 설치할 경우 더 높은 REC 편차로 인해 B/C값과 NPV 값이 상승할 것으로 예상된다.

## 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20174030201660)

## References

- [1] Ministry of trade industry and energy, "Plan to implement development strategy of New Energy Industry and critical technology to response the climate change", 8th Economic Ministerial Meeting, 2015.
- [2] Korea Energy Agency, "The Regulation on the Issuance of Renewable Energy Certificate and the Operation of the Certificate Market", Renewable energy center, Vol. 6, 2017.
- [3] Ministry of trade industry and energy, "Briefing session for New Energy Industry and Renewable Energy Policy", 2017.
- [4] Jong-Bae park, et al. "An Economic Assessment of Large-scale Battery Energy Storage Systems in the Energy-Shift Application to Korea Power System", KIEE, Vol. 64, No. 3, pp. 384~392, 2015.



- [5] Gerald J. Thuesen & W. J Frbrycky, "Engineering Economy", Prentice Hall; 9 edition, June 9, 2000.
- [6] D. Rastler, "Electricity Energy Storage Technology Options: A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits", EPRI, 2011.
- [7] Zhou, C., Qian, K., Allan, M., & Zhou, W. "Modeling of the cost of EV battery wear due to V2G application in power systems." IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26, No. 4, pp. 1041-1050, 2011.
- [8] Grothoff, Johannes Michael. "Battery storage for renewables: market status and technology outlook." International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, 2015.
- [9] Jeng-Jin Jang, "Preliminary feasibility study reorganization plan" Ministry of Strategy and Finance, 2017



**신 하 상 (Ha-Sang Shin)**

1966년 4월 4일생. 2015년 한국산업기술대 산업융합학과 졸업. 현재 Solution Advanced Technology Co. 이사



**박 용 기 (Yong-Gi Park)**

1979년 11월 14일생. 2005년 건국대 전기공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 양산대학교 조교수.

저 자 소 개



**백 민 규 (Min-Kyu Baek)**

1986년 12월 20일생. 2012년 건국대 전기공학과 졸업. 현재 건국대학교 대학원 전기공학과 박사과정



**박 종 배 (Jong-Bae Park)**

1963년 11월 24일생. 1987년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 전기공학과 교수



**손 성 용 (Sung-Yong Son)**

1968년 1월 28일생. 1990년 KAIST 생산공학과 졸업. 1992년 동 대학원 정밀공학과 졸업(석사). 2000년 University of Michigan, Ann Arbor 기계공학과 졸업(박사). 현재 가천대학교 전기공학과 부교수.