



[2019-12-PV-005]

경제성 평가를 통한 태양광발전기와 연계된 배터리 에너지저장장치의 최적 용량 산정

김하양¹⁾ · 김수덕²⁾ · 김현구³⁾*

Assessment of the Optimal Capacity of a Battery Energy Storage System Linked with a PV System based on an Economic Evaluation

Hayang Kim¹⁾ · Sudek Kim²⁾ · Hyun-Goo Kim³⁾*

Received 27 July 2019 Revised 18 October 2019 Accepted 4 November 2019

ABSTRACT In situations, where the weight of a renewable energy certificate (REC) for a battery energy storage system (BESS) linked to a photovoltaic (PV) system is applied, it is necessary to evaluate the optimal capacity of the BESS to maximize the profit and prepare for a change in future support policy. The levelized cost of energy (LCOE) was calculated for a range of conditions using the hourly power generation data and charge/discharge guidelines of the nationwide PV plants. As a result, the optimal capacity of BESS under the current REC weight 5.0 was determined to be 2.7 times that of the PV capacity nationwide. In the reference cases of Jeju, Gyeongnam, and Jeonnam, which have the lowest, average, and highest solar radiation of the country, it was confirmed that the economic benefit by BESS linkage was higher in cases of lower solar radiation. If the REC weight is downgraded in the future, the optimal capacity of BESS will also be reduced. If there is no reduction in the BESS facility unit cost, the advantage of the REC weighted value of 3.5 or less will be lower than that of a PV single operation.

Key words Photovoltaic(PV; 태양광발전기), Battery energy storage system(BESS; 배터리 저장장치), Renewable energy certificate (REC; 신재생에너지공급인증서), Levelized cost of energy (LCOE; 균등화 발전비용)

Subscript

BESS : battery energy storage system

GHI : global horizontal irradiance (MJ/m²/y)

LCOE : levelized cost of energy (원/kWh)

PCS : power conditioning system

PV : photovoltaic

REC : renewable energy certificate (or credit)

1) M.S., Department of Energy Systems Research, Ajou University

2) Professor, Department of Energy Systems Research, Ajou University

3) Principal Researcher, Center Chief, New & Renewable Energy Resource and Policy Center, Korean Institute of Energy Research

*Corresponding author: hyungoo@kier.re.kr

Tel: +82-42-860-3376

Fax: +82-42-860-3642

1. 서론

2016년 국내 에너지저장장치의 보급을 촉진하기 위해 태양광, 풍력과 연계된 배터리 에너지저장장치(BESS)에 신재생에너지공급인증서(REC) 가중치를 높게 부여하는 '공급인증서 발급 및 거래 시장 운영에 관한 규칙'이 공포되었

다^[1]. 이에 따라 국내 에너지저장장치 신규 설치용량이 2016년 207 MWh, 2017년 723 MWh, 2018년 3,632 MWh로 급속도로 증가하고 있으나^[2], 현재의 REC 체계 하에서 에너지저장장치의 최적용량에 대해서는 명확한 규정이나 가이드라인이 없다.

신재생에너지공급인증서란 공급인증서 발급 대상 발전 설비에서 공급되는 전력량에 에너지원별 가중치를 적용하여 발전사업자가 신재생에너지 설비를 이용하여 전기를 생산·공급하였음을 증명하는 공급인증서로, MWh 단위를 기준으로 발급되며 공급의무자는 부여받은 공급 의무량에 대해 REC를 구매하여 충당할 수 있다^[1].

단독으로 운전하는 태양광발전기의 경우에는 설비용량과 설치위치에 따라 REC 가중치가 0.7부터 1.5까지 차등하여 부과된다. BESS와 연계된 태양광발전기의 경우에는 2019년 5.0, 2020년 4.0로 가중치가 감소하여 적용된다. REC 가중치는 기술개발 및 산업 활성화에 미치는 영향, 발전원가, 가용잠재량 등의 상황에 따라 3년마다 조정될 예정이다^[1]. Table 1은 태양광에너지의 설치유형과 설비용량에 따른 REC 가중치를 보여준다. REC 가중치는 발전량 1 MWh당 1 REC로 적용되며, 해당되는 가중치를 곱하여 최종 REC를 부여받게 된다. 단, 가중치 5.0을 적용 받기 위해서는 10시~16시에 충전하고, 16시부터 다음 날 10시까지는 방전을 하여야 한다.

신재생에너지와 연계된 에너지저장장치 용량 산정에 대한 연구는 사용목적에 따라 여러 방향으로 진행되고 있다.

즉, 신재생에너지의 변동성을 완화시키기 위하여 설치하거나 또는 발전량 예측의 오차를 보완하기 위하여 설치하기도 한다^[3~6]. 최근 국내 정책을 고려하여 에너지저장장치 용량을 산정한 연구가 발표되고 있지만^[7~11], 이들 대부분이 특정 지역 또는 특정 용량에 한정되어 있어서 이를 일반화하여 모든 태양광발전소에 적용하기에는 무리가 따른다.

본 연구에서는 천리안 일사량과 비교가 가능한 전국의 발전소 219개소의 BESS 연계시 경제성 예측을 위해 연평균 일사량이 최저, 평균, 최대인 제주, 경남, 전남의 발전소의 BESS 연계시 경제성평가를 수행하여 비교 분석하였다. 즉, BESS의 충·방전량을 조절하는 인버터(PCS)와 BESS의 용량별 균등화발전원가(LCOE)를 산정하고 LCOE가 최저가 되는 PCS 용량과 BESS 용량을 최적용량으로 판정하였다. 또한 BESS 설치단가와 향후 REC 가중치의 하향조정에 따른 민감도를 태양광발전기 단독운전의 경우와 비교·평가하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 전국 태양광발전량

전국 태양광발전소의 시간별 발전량은 한국전력거래소(KPX)의 2016년도 전력거래량 자료를 이용하였다. 2016년말 기준 KPX와 거래중인 태양광발전소는 총 1,450개소이다. 에너지저장장치 충전 시간대에는 태양광발전소의 설치 유형과 설비 용량에 상관없이 발전량은 BESS 연계 가중치를 적용 받으나 충전 시간 이외에 발전량은 태양광발전소의 설치 유형과 설비 용량에 따라 가중치를 다르게 적용 받게 된다. 본 논문에서는 국내의 태양광 발전소 중 약 80%인 1,149개소에 해당하는 100 kW 초과 3 MW 이하인 REC 가중치 1.0을 적용받는 일반부지에 설치된 발전소를 경제성 평가를 위한 BESS 연계대상 발전소로 선정하여 연구하였다.

본 연구에서는 이 중 상세주소가 확인되어 해당 지점의 천리안 일사량과 비교가 가능한 태양광발전소 219지점을 분석대상으로 선정하였다(Fig. 1). 단, KPX 발전량은 자가 소비를 제외한 시간별 거래량 자료이나, 본 연구에서는 이

Table 1. REC Weight Factor for Solar Energy

REC Weight Factor	Subject Energy and Criteria	
	Installation Type	Details
1.2	Installed in general ground	Less than 100 kW
1.0		From 100 kW
0.7		Exceeding 3 MW
0.7	Installed in forest	-
1.5	Used in existing facilities such as building	3 MW of less
1.0		Exceeding 3 MW
1.5	Installed afloat on the water surface, such as on a reservoir, etc	
1.0	Transaction of electrical power through private power generation facilities	
5.0	BESS (linked to solar power generation)	'19
4.0		'20

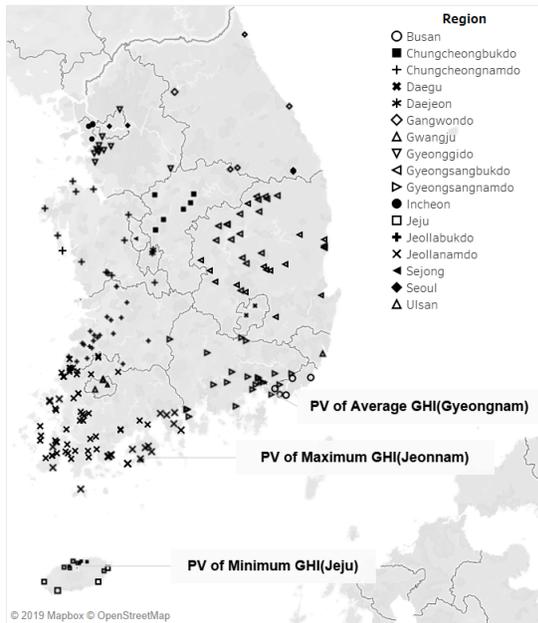


Fig. 1. National PV for Interpretation

를 실제 발전량이라고 가정하였다.

본 논문에서는 태양광발전소를 신규로 설치하거나 태양광발전기만 단독 설치된 경우를 대상으로 하였으며, 발전량은 설치년도를 기준으로 연간 0.8%의 성능감소가 발생한다고 가정하였다^[12]. 만일 분석대상 태양광발전소 중 2013년도에 설치된 경우에는 3년이 경과하였으므로 연도별 발전량을 아래 식으로 보정하였다.

$$P_{2013} = P_{2016} \cdot (1 - 0.008)^{-3} \quad (1)$$

여기서, P_{2013} 과 P_{2016} 는 각각 2013년도와 2016년도의 발전량이다.

2.2 전국 수평면 전일사량

전국 태양광발전소의 시간별 발전량 자료의 정상성을 판정하기 위해서는 해당 위치에서의 시간별 수평면 전일사량 자료가 필요하지만, 국내 수평면 전일사량의 측정지점은 22개소에 불과하다^[13].

본 연구에서는 1 km 공간해상도와 15분의 시간해상도로 한반도 전역의 일사량을 생산하고 있는 한국에너지기술연구원의 천리안 위성영상 기반 일사량 데이터베이스를 이용

하였다. 천리안 일사량은 UASIBS-KIER Model(University of Arizona Solar Irradiance Based on Satellite - Korea Institute of Energy Research)로 산출하며 지상의 국가 참조표준 측정자료와의 비교분석을 통해 높은 정확도와 신뢰도를 가짐이 확인되었다^[14,15].

2.3 PV+BESS 경제성 분석

PV+BESS 시스템의 경제성 분석시 미래 REC 가중치와 배터리의 설치단가의 하락에 따른 영향을 고려하여 식 (2)와 같이 LCOE를 산정하였다^[12]. 또한 태양광 단일운전을 기준으로 BESS 연계시 경제성을 확보할 수 있는 최저 REC 가중치도 산정하였다. LCOE 산정시 연도별로 불규칙한 발전량과 제반 소요비용(건설비, 연료비, 유지보수비 등)을 화폐의 시간적 가치를 고려하기 위해 순현재가치(NPV; Net Present Value)로 환산함으로써 연도별로 균일화하였다.

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{i=1}^T \frac{OPEX}{(1+r)^i}}{\sum_{i=1}^T \frac{(1-d)^i \times P_i}{(1+r)^i}} \quad (2)$$

여기서, CAPEX는 설비비용, OPEX는 유지보수비용, P_i 는 연도별 태양광 발전량, d 는 성능 감소율, r 은 할인율을 의미한다.

PV+BESS 시스템의 경제성 분석을 위한 전제조건을 PV^[12], 배터리^[17,18], PCS^[19]로 나누어 Table 2에 정리하였다. 배터리는 리튬이온배터리로 가정하였으며 수명은 배터리 보증기간 인 15년^[16]으로, 태양광발전기의 수명은 20년^[12]으로 가정하였기 때문에 BESS가 가동하지 않는 최종 5년간은 태양광발전기를 단독 운전하는 것으로 판단하였다.

Table 2. Prerequisites for LCOE Analysis

	PV	BESS	PCS
CAPEX (₩/kW)	1,600,000	500,000	290,000
OPEX (₩/kW)	CAPEX 2%	CAPEX 3%	CAPEX 3%
Discount rate (%)	5.5	5.5	5.5
Performance degradation factor (%)	0.8%/year	2.0%/year	-
Charge/discharge efficiency (%)	-	95%	-
Life (year)	20	15	15

2.4 경제성 민감도 평가

태양광 일사량은 구름의 영향으로 지역적인 편차가 크다. 따라서 지역별 일사량에 따른 편차를 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 1 MW 이상인 전국 태양광 발전소 가운데 수평면 전일사량(GHI)이 최저, 평균, 최대를 나타내는 제주, 경남, 전남 소재의 태양광 발전소를 참조사례로 선정하였다.

경제성 영향인자의 민감도 평가를 위해 상기 참조 태양광 발전소에 Table 2의 전제조건을 부과하되 각각 PCS 용량, BESS 용량과 REC 가중치를 변화시켜가며 LCOE를 계산하였다. 즉, PCS 용량은 태양광발전기 용량의 0.1배부터 0.8배까지, BESS 용량은 태양광발전기 용량의 1.0배부터 5.0배까지 0.1배 간격으로 분석하였고, REC 가중치는 1.0부터 5.0까지 0.5 간격으로 민감도를 평가하였다.

3. 결과 및 토의

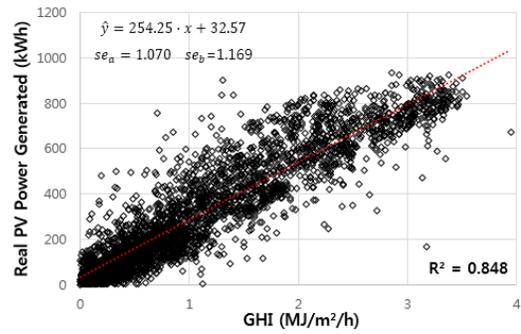
3.1 태양광발전량 정상성 검증

태양광발전소 발전량의 정상성(BESS 연계 여부) 검증에 사용된 시간별 발전량과 수평면 전일사량 자료는 모두 값이 0 이상일 때를 유효하다고 판정하였다. Table 3에 제시한 제주, 경남, 전남 참조사례의 경우 8,760시간 중 각각 3,290, 3,447, 3,419시간이 유효자료로 판정되었으며, 정상성 판단을 위해 회귀분석을 통한 상관성 분석을 수행하였다.

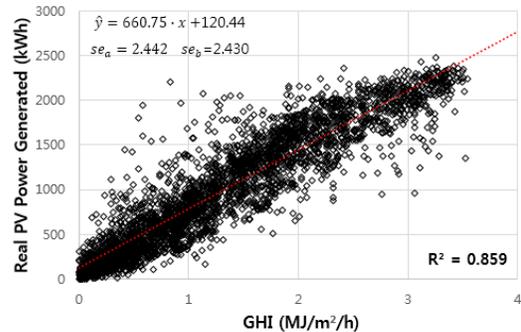
Fig. 2와 같이 제주, 경남, 전남의 발전량과 일사량의 상관도는 각각 0.85, 0.86, 0.89로 평가되었다. 일반적으로 상관성의 척도로서 선형회귀분석의 결정계수 R²의 값이 1에 가까울수록 유의미한 상관성이 있다고 판단한다. 따라서 태양광발전량과 천리안 일사량은 선형적인 상관성이 높

Table 3. PV of Regional Reference

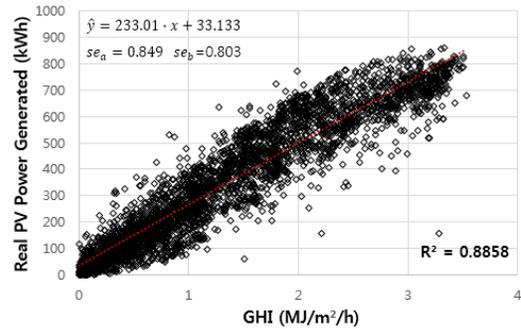
PV	Facility Capacity (MW)	Capacity Factor (%)	GHI (MJ/m ² /y)	Install year
Jeju	1,092	11.8	3,796	2012
Gyeongnam	2,966	13.7	4,541	2013
Jeonnam	1,000	14.8	4,808	2010



(a) PV of minimum GHI (Jeju)



(b) PV of average GHI (Gyeongnam)



(c) PV of maximum GHI (Jeonnam)

Fig. 2. Correlation between PV and GHI

으므로 태양광발전량 자료의 정상성이 검증된 것으로 판단할 수 있다.

3.2 PV+BESS 경제성 분석

BESS 연계에 따른 경제성 확보의 판단기준은 PV 단독운전의 LCOE 보다 낮은 경우로 판단할 수 있다. 이 경우 연평균 일사량이 최저, 평균, 최대를 나타내는 제주, 경남, 전남 참조사례에서 PV 단독운전의 LCOE는 각각 155.8원/kWh, 135.3원/kWh, 122.7원/kWh이다.

REC 가중치에 따른 PV 용량 대비 PCS 용량비 및 BESS

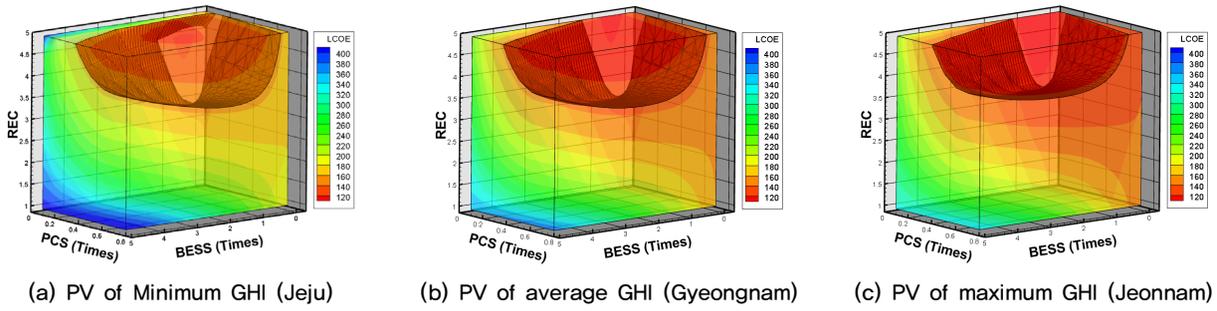


Fig. 3. LCOE of PV-BESS by REC weight, PCS and BESS capacity

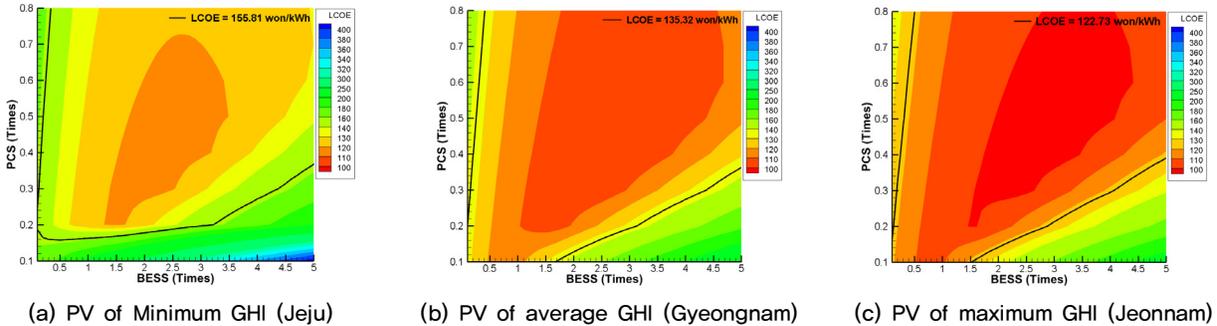


Fig. 4. LCOE of PV-BESS by PCS and BESS capacity with REC weight 5.0

용량비의 LCOE 산출결과를 Fig. 3과 같이 3차원 곡면으로 나타내었다. 즉, 경제성 판단 기준이 되는 곡면은 PV 단독운전의 LCOE와 동일한 값을 가지는 빨간색으로 표시된 상부의 오목한 포물곡면이며, 그 곡면의 상부에 포함되면 경제성 확보가 가능하다.

Fig. 4는 2019년 현재 REC 가중치가 5.0일 때 PV 용량 대비 PCS 및 BESS 용량비에 따른 LCOE를 도시한 것으로 Fig. 3의 최상부 수평단면에 해당한다. 경제성 판단의 기준이 되는 단독운전 PV의 LCOE를 검은색 실선으로 표시하였다. 현재의 REC 가중치 5.0에서는 BESS를 연계함으로써 경제성 확보가 가능하며, 가장 경제성이 높은 최적용량은 PCS 및 BESS 용량이 PV 용량대비 최저 전일사량을 가지는 제주의 경우 0.4배, 2.4배, 평균인 경남의 경우 0.4배, 2.7배, 최대인 전남의 경우 0.4배, 2.8배인 것으로 나타났다.

3.3 PV+BESS 최적용량 분석

2019년 현재 REC 가중치 5.0을 적용할 경우의 BESS 최적용량을 분석하기 위하여 제주, 경남, 전남의 참조사례

(Fig. 4)에서 PCS 용량비 0.4배가 최적임이 확인되었기 때문에 PCS 최적용량을 PV 용량의 0.4배로 고정하였다.

Fig. 5는 2010년부터 2014년 5년간 신규 설치된 전국 태양광발전소 85개소에 대해 PV 용량 대비 BESS 최적용량을 계산하여 산포도를 그리고 직선으로 회귀 분석한 결과이다. 그래프에서 확인되었듯이 PV 용량과 BESS 최적용량은 명확한 선형적 상관성이 나타났다. 따라서 REC 가중치 5.0이고 PCS 용량비 0.4배일 때 BESS 최적용량은 PV 용량의 2.74배인 것으로 분석되었다. 참고로 그래프에서 se_a

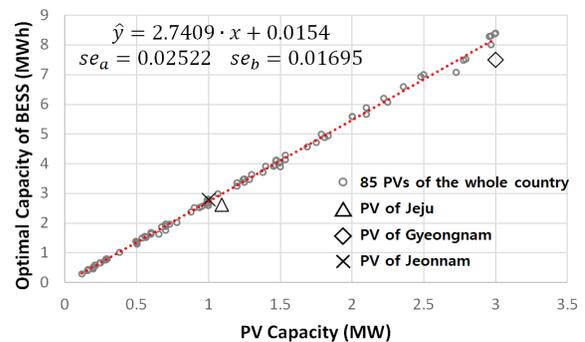


Fig. 5. Correlation between PV capacity and optimal capacity of BESS when PCS capacity ratio is 0.4

와 se_b 는 각각 회귀 분석시 절편과 기울기의 표준오차이다.

회귀분석 결과가 의미하는 바는, BESS 최적용량은 일사량 조건에 큰 영향이 없이 전국적으로 일정한 비율(2.7)이라는 것이다. 참고로 Fig. 5에 일사량 전국 최저, 평균, 최고인 제주, 경남, 전남을 별도로 표시하였다.

3.4 REC 가중치 민감도 분석

PV+BESS 시스템에 적용되는 REC 가중치는 향후 지속적으로 하향조정될 예정이다. REC 가중치의 단계별 하향 조정에 따라 경제성이 확보될 수 있는 PCS와 BESS의 최적 용량에 대한 민감도 평가 결과를 Table 4에 제시하였다.

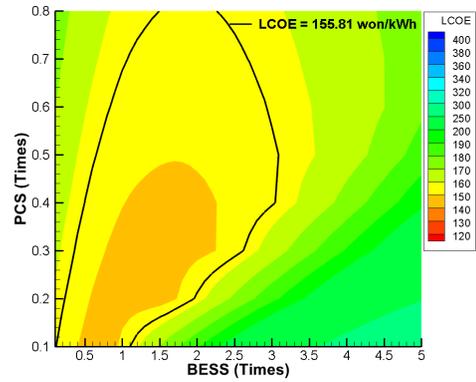
제주, 경남, 전남의 경우, 경제성이 확보되는 REC 가중

Table 4. Optimal capacity of PCS and BESS by REC weight factor

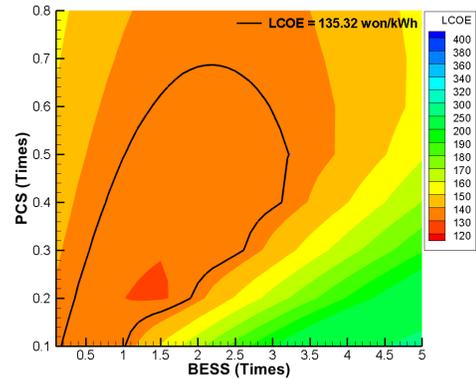
PV	REC Weight Factor	LCOE (₩/kWh)	Capacity ratio (/PV)		Economic Present
			PCS	BESS	
Jeju	5.0	116.91	0.4	2.4	○
	4.5	125.80	0.3	1.9	○
	4.0	135.78	0.3	1.8	○
	3.5	145.82	0.2	1.3	○
	3.0	154.34	0.1	0.6	○
	2.5	159.14	0.1	0.1	×
	2.0	160.69	0.1	0.1	×
	1.5	162.27	0.1	0.1	×
	1.0	163.89	0.1	0.1	×
Gyeongnam	5.0	101.95	0.4	2.7	○
	4.5	110.43	0.4	2.6	○
	4.0	119.69	0.3	2.1	○
	3.5	129.17	0.2	1.4	○
	3.0	136.32	0.1	0.6	×
	2.5	138.68	0.1	0.1	×
	2.0	139.88	0.1	0.1	×
Jeonnam	5.0	96.74	0.4	2.8	○
	4.5	104.60	0.3	2.2	○
	4.0	112.93	0.3	2.1	○
	3.5	120.50	0.1	0.7	○
	3.0	125.10	0.1	0.1	×
	2.5	126.07	0.1	0.1	×
	2.0	127.06	0.1	0.1	×
Jeonnam	1.5	128.07	0.1	0.1	×
	1.0	129.09	0.1	0.1	×

치 최저값은 각각 3.0, 3.5, 3.5로 분석되었으며, REC 가중치가 감소함에 따라 PCS와 BESS의 최적용량도 감소하는 경향이 나타난다. 만일 2020년에 PV+BESS 시스템을 설치하는 경우라면 제주의 경우 PCS와 BESS 최적용량은 PV 용량의 각각 0.3배와 1.8배로, 이는 2019년의 최적용량에 비해 75% 수준으로 줄어들게 되는 것이다.

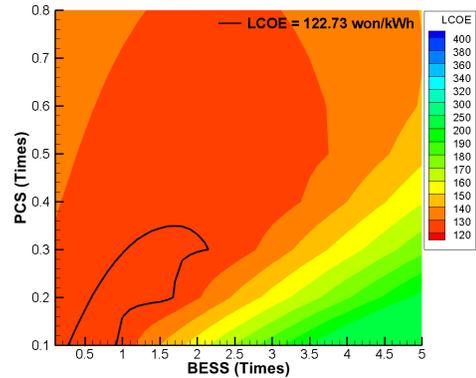
Fig. 6은 REC 가중치가 3.5로 하향조정 되었을때의 PCS



(a) PV of minimum GHI (Jeju)



(b) PV of average GHI (Gyeongnam)



(c) PV of maximum GHI (Jeonnam)

Fig. 6. LCOE of PV-BESS by PCS and BESS capacity with REC weight 3.5

및 BESS 용량에 따른 LCOE 민감도 평가결과이다. 경제성이 확보되는 PCS 및 BESS 용량조합의 범위는 제주가 가장 넓고 그 다음으로 경남, 전남으로 분석되었다. 이 순위는 일사량 순위와 상관성이 매우 크다. 즉, 일사량이 전국 최저수준인 제주는 타지역에 비하여 PV 발전에 의한 수익성이 낮기 때문에 BESS에 의한 수익성 상승효과가 크므로 용량범위가 넓게 나타난 것이다. REC 가중치 3.5인 경우의 최적용량은 PV 용량 대비 PCS 0.2, BESS 1~1.5인 것으로 분석되었다.

4. 결론

본 연구는 태양광발전기 연계형 배터리 에너지저장장치의 보급 확대를 위해 REC 가중치가 높게 설정된 상황에서 PV+BESS 시스템의 수익성을 최대화하기 위한 PCS와 BESS의 최적용량을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 전국 태양광발전소 219개소의 시계열 발전량을 이용한 분석으로부터 PCS와 BESS의 최적용량은 PV 용량의 각각 0.4배, 2.7배인 것으로 분석되었다. 단, 이는 REC 가중치 5.0일 경우이며, 일사량 조건에 따른 변동은 크지 않은 것으로 나타났다.
- 2) 현재의 REC 가중치 5.0은 PV+BESS 시스템의 수익성을 보장하기 위해 상당히 높게 설정되었기 때문에 대부분의 PCS, BESS 용량조합에서 경제성이 확보되는 것으로 분석되었다. 그러나 2020년부터 REC 가중치가 4.0으로 하향 조정되면 최적용량은 2019년의 75% 수준으로 감소하는 것으로 분석되었다.
- 3) 전국적으로 일사량이 최저, 평균, 최고인 제주, 경남, 전남 참조사례로부터, 일사량이 낮을수록 BESS 연계에 의한 경제성 향상 효과가 크다는 것을 확인하였다. 또한 REC 가중치가 3.5 이하로 조정될 경우 PV 단독운전 대비 경제적 이득은 없어지는 것으로 예측되었다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업을 재원으로 수행한 연구과제(B9-2414)의 결과입니다.

References

- [1] Korea Energy Agency, 2017, "The Regulation on the issuance of renewable energy certificate and the operation of the certificate market", Renewable Energy Center, Vol. 6.
- [2] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019, "Announcement of the cause and safety measures ESS accidents", Press Release (2019.6.10.).
- [3] Vdovina, E., 2018, "Optimal sizing of PV, battery storage for Vava'u island distribution network", IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), pp. 1-5.
- [4] Sandhu, K.S. and Mahesh, A., 2016, "A new approach of sizing battery energy storage system for smoothing the power fluctuations of a PV/Wind hybrid system", Int. J. Energy Res., **40**, 1221-1234.
- [5] Moghaddam, I.N., Chowdhury, B.H. and Mohajeryami, S., 2017, "Predictive operation and optimal sizing of battery energy storage with high wind energy penetration", IEEE Trans. Ind. Electron., **65**(8), 6686-6695.
- [6] Brekken, T.K.A., Yokochi, A., Jouanne, A. von, Yen, Z.Z., Hapke, H.M., and Halamay, D.A., 2011, "Optimal energy storage sizing and control for wind power applications", IEEE Trans. Sustain. Energy, **2**(1), 69-77.
- [7] Baek, M.K., Park, J.B., Son, S.Y., Shin, H.S., and Park, Y.G., 2018, "A study of optimum capacity of battery energy storage system linked PV", Trans. Korean. Inst. Elect. Eng., **67**(1), 38-45.
- [8] Lee, S.W., Kim, H.T., Shin, H.S., Kim, T.H., and Kim, W., 2018, "A study on the estimation of optimal ESS capacity considering REC weighting scheme", Trans. Korean. Inst. Elect. Eng., **67**(8), 1009-1018.
- [9] Lee, Y.J., Kim, S.Y., and Han, S.K., 2018, "A study on the energy saving capacity of solar power generation system using economic evaluation", Trans. Korean. Inst. Elect. Eng., **67**(1), 21-26.

- [10] Choi, Y.S., and Na, S.Y., 2018, "A study on the optimal operation according to appropriate PCS and battery capacity estimation of PV-BESS system", *Trans. Korean Inst. Elect. Eng.*, **67**(9), 1174-1180.
- [11] Oh, S.M., Kong, J.H., Lee, W.J., and Jung, J.S., 2018, "Development of optimal energy storage system sizing algorithm for photovoltaic supplier in South Korea", 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 1-5.
- [12] Korea Power Exchange, 2018, "A study on estimation of LCOE", KPX Research Report.
- [13] Korea Meteorological Administration (KMA), <http://www.kma.go.kr/>
- [14] Kim, C.K., Kim, H.G., Kang, Y.H., and Yun, C.Y., 2017, "Toward improved solar irradiance forecasts: comparison of the global horizontal irradiances derived from the COMS satellite imagery over the Korean Peninsula", *Pure Appl. Geophys.*, **174**(7), 2773-2792.
- [15] Kim, C.K., Kim, H.G., Kang, Y.H., Yun, C.Y., and Kim, S.Y., 2019, "Probabilistic prediction of direct normal irradiance derived from global horizontal irradiance over the Korean Peninsula by using Monte-Carlo simulation", *Solar Energy*, **180**, 63-74.
- [16] E-MAX POWER, <http://emaxpower.co.kr>
- [17] IEA, 2014, "Energy technology perspectives 2014- Harnessing electricity's potential", International Energy Agency.
- [18] IRENA, 2017, "Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030", International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [19] Ahn, J.K., 2017, "A study on power system flexibility enhancement for dissemination of new and renewable energy", KEEI Research Report 17(06).