



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

박사학위논문

국내 태양광 발전 에너지 저장장치 경제성 분석과
최적용량 평가에 관한 연구

A Study on Optimal Capacity Evaluation and
Economic Analysis of Energy Storage Systems
in Domestic Photovoltaic Power Generation

이 영 훈

한양대학교 대학원

2022년 8월

박사학위논문

국내 태양광 발전 에너지 저장장치 경제성 분석과
최적용량 평가에 관한 연구

A Study on Optimal Capacity Evaluation and
Economic Analysis of Energy Storage Systems
in Domestic Photovoltaic Power Generation

지도교수 성 태 현

이 논문을 공학 박사학위논문으로 제출합니다.

2022년 8월

한양대학교 대학원

전기공학과

이영훈

이 논문을 이영훈의 박사학위 논문으로 인준함

2022년 8월

심사위원장 : 고 광 철



심사위원 : 한 태 희



심사위원 : 김 영 범



심사위원 : 정 인 화



심사위원 : 성 태 현



한양대학교 대학원

목 차

그림 목차	iii
표 목차	v
국문 요지	vii
제1장 서 론	1
제1절 연구 배경 및 필요성	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 필요성	3
제2절 연구 동향	5
제3절 연구 목표 및 논문구성	8
3.1 연구 목표	8
3.2 논문 구성	9
제2장 이론적 배경 및 신재생에너지 정책	11
제1절 이론적 배경	11
1.1 태양광(PV) 발전	11
1.1.1 태양광에너지 스펙트럼	11
1.1.2 태양광(PV)의 발전원리	13
1.1.3 태양광발전 시스템 구조 및 종류	19
1.1.4 태양광발전 시스템 구성	23
1.2 에너지저장시스템(ESS)	26
1.2.1 에너지저장장치(ESS) 개요	26
1.2.2 에너지 저장 범위 및 저장 목적	27
1.2.3 에너지저장시스템(ESS) 도입의 필요성	28
1.2.4 에너지저장시스템(ESS)의 종류 및 특징	29
1.2.5 리튬배터리의 시장전망	35

1.2.6 에너지저장시스템(ESS) 구성방식	36
1.2.7 국내 PV 연계 ESS 보급 및 운영	37
제2절 신재생에너지 정책	40
2.1 신재생에너지 공급의무화제도(RPS)	40
2.2 신재생에너지 공급인증서(REC)	41
2.3 신재생에너지 공급인증서(REC) 가중치	42
2.4 신재생에너지 국제동향	44
제3장 연구방법	48
제1절 조사대상 및 방법	48
1.1 조사대상 선정	48
1.2 PV-BESS 시스템 경제성 분석 방법	48
1.3 경제성 민감도 평가	50
제4장 연구내용 및 분석 결과	52
제1절 연구내용	52
1.1 태양광 발전량 정상성 검증	52
제2절 PV-BESS 경제성 분석	61
2.1 REC 가중치에 따른 LCOE분석(제주)	63
2.2 REC 가중치에 따른 LCOE분석(경북)	68
2.3 REC 가중치에 따른 LCOE분석(전남)	73
제3절 PV-BESS 최적용량 분석	78
제4절 경제성 민감도 분석	80
4.1 REC 가중치에 따른 경제성 분석	80
4.2 BESS 비용에 따른 경제성 분석	84
제5장 결 론	87
참고문헌	89
Abstract	94
감사의 글	96

그림 목차

[그림 II-1] 태양광선의 스펙트럼[9]	12
[그림 II-2] P-N 접합 태양전지	13
[그림 II-3] 태양전지(solar cell)의 다이오드 모델	17
[그림 II-4] 태양전지 V-I 특성곡선	18
[그림 II-5] MPPT 회로 구성	19
[그림 II-6] 태양광 모듈 제조 과정	20
[그림 II-7] 태양광 모듈의 구조	20
[그림 II-8] 계통연계 집중형 태양광발전 기본 구성도	23
[그림 II-9] 인버터의 배열방식	25
[그림 II-10] 리튬이온 배터리 시장가격 전망	35
[그림 II-11] ESS 구성	36
[그림 II-12] 특정 날짜 한국의 연도별 태양광 출력 곡선	39
[그림 II-13] 한국의 일별 이용 곡선 변동(2018년)	39
[그림 II-14] 신재생에너지 공급의무화 제도	40
[그림 II-15] 신재생에너지 연도별 공급의무량 비율	41
[그림 II-16] 신재생에너지 공급인증서 발급 및 거래절차	42
[그림 IV-1] PV와 일사량의 상관관계(제주)	57
[그림 IV-2] PV와 일사량의 상관관계(경북)	59
[그림 IV-3] PV와 일사량의 상관관계(전남)	61
[그림 IV-4] REC 가중치에 따른 PCS 및 BESS 용량별 LCOE(제주)	63
[그림 IV-5] REC 가중치 5.0 PCS 및 BESS 용량비(제주)	66
[그림 IV-6] REC 가중치 4.5 PCS 및 BESS 용량비(제주)	66
[그림 IV-7] REC 가중치 4.0 PCS 및 BESS 용량비(제주)	67
[그림 IV-8] REC 가중치 3.5 PCS 및 BESS 용량비(제주)	67

[그림 IV-9] REC 가중치에 따른 PCS 및 BESS 용량별 LCOE(경북)	68
[그림 IV-10] REC 가중치 5.0 PCS 및 BESS 용량비(경북)	71
[그림 IV-11] REC 가중치 4.5 PCS 및 BESS 용량비(경북)	71
[그림 IV-12] REC 가중치 4.0 PCS 및 BESS 용량비(경북)	72
[그림 IV-13] REC 가중치 3.5 PCS 및 BESS 용량비(경북)	72
[그림 IV-14] REC 가중치에 따른 PCS 및 BESS 용량별 LCOE(전남) ·	73
[그림 IV-15] REC 가중치 5.0 PCS 및 BESS 용량비(전남)	76
[그림 IV-16] REC 가중치 4.5 PCS 및 BESS 용량비(전남)	76
[그림 IV-17] REC 가중치 4.0 PCS 및 BESS 용량비(전남)	77
[그림 IV-18] REC 가중치 3.5 PCS 및 BESS 용량비(전남)	77
[그림 IV-19] PV 용량과 최적 BESS 용량 상관관계	79
[그림 IV-20] REC 가중치 3.5 PCS 및 BESS 용량비(제주)	82
[그림 IV-21] REC 가중치 3.5 PCS 및 BESS 용량비(경북)	83
[그림 IV-22] REC 가중치 3.5 PCS 및 BESS 용량비(전남)	83

표 목차

<표 II-1> 태양전지 종류별 효율 및 특징	22
<표 II-2> 저장방식에 따른 에너지저장기술의 분류	30
<표 II-3> 생산 에너지 및 용도에 따른 에너지저장기술	31
<표 II-4> ESS 글로벌 시장 수요	32
<표 II-5> 국가별 ESS-LIB 수요	33
<표 II-6> 용도별 ESS-LIB 수요	34
<표 II-7> 국내 ESS 보급률(2020)	38
<표 II-8> 태양광에너지의 공급인증서 가중치	43
<표 II-9> 교토의정서 및 파리기후협약 비교	44
<표 II-10> 주요국가 온실가스 저감 이행목표 및 이행방법	46
<표 II-11> RPS 및 FIT 시행 국가	47
<표 III-1> LCOE 함수 설명	49
<표 III-2> LCOE 전제조건	51
<표 IV-1> 2018년 지역별 일사량	53
<표 IV-2> 2018년 신규 태양광발전소 설비용량 및 개소	54
<표 IV-3> 2018년 지역별 태양광 발전소 발전량	55
<표 IV-4> 2018년 월별 일사량 및 발전량(제주)	56
<표 IV-5> 2018년 월별 일사량 및 발전량(경북)	58
<표 IV-6> 2018년 월별 일사량 및 발전량(전남)	60
<표 IV-7> LCOE 전제조건	62
<표 IV-8> REC 가중치 5.0 일 때 LCOE(제주)	65
<표 IV-9> REC 가중치 5.0 일 때 LCOE(경북)	70
<표 IV-10> REC 가중치 5.0 일 때 LCOE(전남)	75
<표 IV-11> BESS 연계 시 가장 경제성이 높은 BESS 최적용량 분석	80

<표 IV-12> 지역별 REC 가중치에 따른 경제성 평가	81
<표 IV-13> 리튬이온 배터리 가격 변경 팩터	84
<표 IV-14> 설치비에 절감으로 인한 PV-BESS LCOE(제주)	85
<표 IV-15> 설치비에 절감으로 인한 PV-BESS LCOE(경북)	85
<표 IV-16> 설치비에 절감으로 인한 PV-BESS LCOE(전남)	86



국문 요지

태양광(PV) 시스템과 연계된 배터리 에너지 저장 시스템(BESS)에 대한 재생 에너지 인증서(REC)의 가중치가 적용되는 상황에서, BESS의 최적 용량을 평가하여 이익을 극대화하고 향후 지원 정책의 변화에 대비할 필요가 있다. 또한 BESS 보급이 확산됨에 따라 설치비용 등이 안정화될 것이라는 분석에 기반을 두어 신재생에너지공급인증서 가중치는 점차 감소할 것으로 예상된다. 이러한 보급사업과 지원정책에도 불구하고 에너지저장장치 설비 투자에 대한 경제성 확보의 불확실성은 에너지저장장치의 전국적인 보급을 제약하는 원인 중 하나로 작용하고 있다. 정책적으로 REC 가중치가 감소하는 방향으로 갈려고 하는데 REC 감소에 따른 최적용량 산정 및 경제성 비교 평가를 통해 태양광 연계 에너지저장장치 정책의 건전한 성장을 유도하여 시장 확대 및 보급에 중요한 역할을 하고자 한다.

본 연구의 목적은 국내에서 운영되고 있는 태양광발전의 발전성능 데이터를 기반으로 PV-ESS 시스템의 경제성 평가를 분석하고 에너지 저장시스템의 최적 용량을 산정하는 것이다. 제주, 경북, 전남의 태양광발전시설을 대상으로 하였으며, 이 지역의 태양광발전시설은 일반 부지에 설치되는 것으로 가정하여 연구를 진행하였다. LCOE(Levelized Cost of Energy)는 전국 태양광 발전소의 시간당 발전 데이터와 충/방전 지침을 사용하여 다양한 조건에 대해 계산되었다. 그 결과 현재 REC 가중치 5.0하에서 BESS의 최적 용량은 전국 태양광 용량의 2.8배인 것으로 결정되었다. 전국 최저, 평균, 최고 일사량을 갖는 제주, 경북, 전남의 참고사례에서는 일사량이 낮을수록 BESS 연계에 의한 경제적 편익이 높은 것으로 확인되었다. 향후 REC 가중치를 낮추면 BESS의 최적 용량도 감소하게 된다. 추후 REC 가중치 감소 정책에 이러한 결과가 반영

되어 PV-BESS 연계 정책의 건전한 성장을 유도하여 시장 확대 및 보급에 활용할 수 있으며 정부 정책에 기반을 두어 보급이 확대되고 있는 지상 태양광 발전의 발전단가(LCOE)를 일사량 및 REC가중치를 통해 분석결과를 제시함으로서 신재생에너지 시장의 투명성을 제고하고 관련정책수립에 기여하고자 한다.



제1장 서론

제 1절 연구 배경 및 필요성

1.1 연구 배경

파리협정으로 새로운 기후체제가 수립되고 지구온난화 수준을 줄이기 위한 논의가 이루어지면서 국제사회는 2100년까지 지구 평균기온 상승이 1.5℃를 넘지 않도록 국제적 합의에 이르렀다. 이에 따라 120개국 이상 한국과 중국을 비롯한 유럽연합, 미국, 일본 등은 금세기 중반까지 탄소중립을 목표로 하고 있다. EU는 2050년까지 탄소중립 목표를 달성하기 위해 연간 감축계수를 2021년부터 1.74%에서 2.2%로 높하기로 결정하였다. 바이오매스, 재생에너지 등 가용한 기술을 모두 적용하면 탄소배출량을 줄일 수 있다. 특히, EU 전환 부문에서만 2005년부터 2016년 사이에 4억 4,900만 톤이 감소했으며, 그 중 81.3%가 탄소 중립으로 이어지는 주요 요인인 재생 에너지에 의한 것이다. 또한 McKinsey(2010)는 글로벌 온실가스 감축비용곡선을 이용하여 효과적인 저탄소 발전전략을 수립하고 태양광과 같은 재생에너지의 감축잠재력이 높다고 제안하였다. 탄소 중립을 위한 중요한 수단 중 하나는 재생 가능 에너지의 공급을 확대하는 것이다. 전 세계는 화석 에너지의 비율을 낮추면서 태양광과 같은 지속 가능한 재생 에너지의 비율을 높이는 에너지 전환을 촉진하는 전략을 구현하여 재생 에너지의 역할을 증가시키고 있다. KEA 에너지 편람(KEA, 2020)에 따르면, 에너지 효율 향상(37%)과 신재생 에너지 공급(32%)은 이산화탄소 배출량을 줄이는 중요하다고 설명한다.

우리나라도 탄소중립 목표 달성을 위한 주요 수단으로 재생에너지를 활용하기 위한 다양한 정책과 계획을 제시함으로써 재생에너지 확대를 지원하고 있다. 우리나라는 2017년 제정된 '재생에너지 3020'[1]을 통해 2030년까지 신재생에너지 발전 비중을 20%까지 높이고 신규 설비의 95% 이상을 태양광 등

청정에너지로 공급한다는 목표를 세웠다. 최근 '제9차 전력수급기본계획'은 한국판 그린뉴딜을 반영해 2034년 태양광 발전 공급 목표를 45.6GW로, 2025년 태양광 발전 중간 목표를 21.4GW에서 33.5GW로 상향 조정하였다. 이를 위해 우리나라는 전력수급 및 설비 예비율을 조정하고 예비설비를 반영하여 출력변동성에 대응하는 등 신재생에너지 확대에 따른 변동성에 대응할 계획이다. 또한 '제5차 신재생에너지 기본계획' 분야에서는 '제9차 전력수급기본계획'에 따라 2034년까지 신재생에너지 발전 비중을 2034년까지 22.2%로 설정하여 태양광발전 확대를 통해 2050년 탄소중립을 달성하도록 하였다.

지금까지 신재생에너지 확대에 중점을 두었지만, 향후 신재생에너지 정책은 전력계통의 전력품질 향상과 생산된 전력의 안정적 공급에 초점이 맞춰질 것으로 예상된다. 신재생에너지의 계통 공급으로 인해 다양한 문제들이 나타나고 있다. 기존 발전소의 감발 운전으로 인한 계통 감지 비용 증가와 신재생발전원의 동시 발전으로 인한 계통 혼잡 발생으로 인한 계통 혼잡 문제를 보완하기 위해 시스템 설비 보완이 필요한 문제점이 제기되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 재생에너지 시간이동을 통해 전력이 생산되지 않는 시간에 시스템에 전력을 공급하는 배터리 에너지 저장 시스템(ESS, Energy Storage System)이 필요하다.

대표적인 에너지 저장장치인 납축전지는 검증된 기술로 평가받고 있으나, 수명이 제한되어 있고, 대용량화하기 위해서는 기술 및 비용 면에서 많은 한계가 있다. 최근 리튬이온전지의 급속한 기술발전으로 원가절감이 이루어지고 리튬이온전지는 계통연계 대용량으로 활용되고 있으며, 배터리 ESS가 실제 시스템에 적용되기 시작하고 있다. 특히 우리나라의 스마트그리드 정책에 적용된 리튬이온전지는 다양한 용도에 적용이 용이하다는 장점이 있어 에너지 저장장치로 평가받고 있다. 최근에는 신재생에너지의 출력 불균형을 완화하고 전력 품질 문제를 해결하기 위한 대안으로 리튬이온 배터리를 이용한 에너지

저장 기술이 확대되고 있다.

1.2 연구 필요성

삶의 질이 향상되고 소득이 증가함에 따라 화석에너지를 대체할 수 있는 재생에너지의 중요성이 강조되고 있다. 매년 증가하는 전력수요와 함께 신재생에너지의 불안정성에 대한 전력부하관리 및 피크관리 대책에 대한 요구가 높아지고 있다. 대안으로 전력 피크 관리를 위한 효과적인 에너지 저장 장치 기술이 제안되었다. ESS는 잉여전력을 저장해 피크타임에 사용할 수 있도록 하는 전력공급 장치다. 저부하에서 전력을 저장하고 과부하 시 부하 평준화를 통해 전력 운용을 최적화한다. 일본, 미국 등 선진국은 일찍부터 전력부하관리의 중요성을 인식하고 전력수급 안정을 위한 ESS산업 육성을 위한 수급지원 정책을 추진하고 있다.

일본의 전력시장은 지리적으로 10개 지역으로 구분되며, 각 지역은 수직계열화 된 대형 전력회사인 종합전력회사로 발전, 송전, 배전, 전력판매를 독점하고 있다. 일본은 2012년 7월까지 RPS 제도를 도입했지만 후쿠시마 원전사고 이후 신재생에너지의 필요성이 강조되었다. 후쿠시마 원전사고 이후 가정용 태양광 발전에서 잉여 전력을 모두 구매하는 제도를 시행하고 있다. 2030년에는 신재생에너지 발전 비중을 22~25%로 늘리고, 특히 안정적으로 운영할 수 있는 바이오에너지, 지열, 수력발전에 집중할 예정이다. 태양광과 풍력은 비용을 절감하면서 국민의 부담을 줄이는 방안을 검토·시행할 계획이다. 후쿠시마 원전사고 이후 원전 비중이 줄어들면서 2017년 기준 ESS의 설치 규모는 1,200MWh로 가정용 ESS 시장을 주도하고 있다. 일본은 가정용 ESS 시장을 성장시키겠다는 정책을 펼치고 있으며 최근 대규모 ESS 사업은 주로 신재생에너지 연계, 전력부하 이동, 주파수 조정 등을 목적으로 하고 있다.

미국에서는 주마다 재생 에너지 정책이 다르다. 전기요금제도는 전력시장경

제의 경쟁체제에 능동적으로 의존하기 때문에 당연히 전력망 형평성에 가까운 전력요금 제도를 갖게 된다. 2000년과 비교하여 2016년 미국의 비수력 재생 에너지 발전량의 약 51.6%가 RPS 시스템을 통해 공급되었습니다. 2030년까지 전체 전력소비량의 10%를 차지할 것으로 예상된다. 신재생에너지와 연계된 ESS지원정책은 TAX 인센티브, FIT와 결합된 자가소비, 보조금지원, RPS제도, 시간대별 전기가격차등화, ESS의무화 등 크게 6가지로 구분 할 수 있다.

중국은 1990년대 초반부터 전력난이 시작되어 2000년부터 전력사용량이 급격히 증가하였다. 이에 따라 중국정부는 전력산업 개편에 착수하였고, 전력부족 문제를 해결하기 위해 전력 수급 문제, 전력 인프라 및 신재생 에너지 도입 등 다양한 노력을 통해 전력수급이 안정되었다. 2006년부터 기후변화 대응 및 대기오염 문제 해결, 전기요금 개혁, 에너지 효율 개선, 신재생에너지 도입 및 지원 확대 등의 정책이 추진되었다. 제13차 5개년 계획을 통해 녹색성장을 목표로 과학기술혁신과 신재생에너지 확대에 대한 정부의 지원을 강화하고 있다. 2020년까지 신재생에너지 비중을 15% 확대 및 에너지 생산목표(수력 380GW, 태양광 150GW, 풍력 250GW 등)로 하였고 FIT, RPS 지원, 세금 혜택, 보조금 등을 지원하고 있다.

우리나라도 이러한 추세에 따라 ESS 보급을 계획하고 있으며 한국에너지공단 신재생에너지 센터는 2017년 3월 21일부터 시행한 ‘신재생에너지 공급인증서 발급 및 거래시장 운영에 관한 규칙’에 따라서 태양광발전시설에서 공급되어 ESS에 저장되었다가 계통으로 방전(전송)된 전력량에만 REC 가중치 5.0을 부여하기로 하였다.[2] 또한 우리나라 관련법령에 따르면 환경, 기술개발 및 산업 활성화에 미치는 영향, 발전비용, 기존 잠재력 등에 따라 3년마다 가중치를 조정하고 있으며, ESS 보급이 확산되면서 설치비가 안정화될 것이라는 분석을 바탕으로 REC 가중치는 점차 줄어들 전망이다.

정부의 보급사업 및 지원정책에도 불구하고 ESS 설비투자의 경제성 확보에

대한 불확실성은 ESS 공급을 제한하는 요인 중 하나이다. ESS 공급계획에서는 태양광 ESS 연계 발전으로 인한 발전사업자의 비용 증가에 대한 상세한 경제성 분석과 실효성 있는 도입에 대한 연구가 필요하다. ESS를 태양광발전에 연결하는 경우 LCOE를 분석하여 최적의 경제성을 확보할 수 있는 ESS 설비용량을 선택하여야 한다. 또한, 태양광 및 ESS 연계 지원 정책의 효과를 분석하기 위해서는 REC 가중치 감소, ESS 설치비 절감, 태양광 단독 및 ESS 연계 발전 시 경제성을 비교 검토해야 한다.

제 2절 연구 동향

태양광발전과 에너지저장시스템(ESS)의 경제성 평가 및 최적 용량에 대한 주요 선행연구를 고찰한 결과, 주로 특정 지역의 태양광발전소를 대상으로 하였거나, 특정 건물에 설치된 태양광발전시스템에 대한 연구가 주를 이루고 있다.

기술 수준이 성숙된 4가지 종류의 에너지저장장치(리튬이온 전지, 나트륨황 전지, 납축전지, 레독스 플로우 전지)에 대한 경제성 평가를 통해 여러 에너지 기술간 경제성을 비교하고, 시간의 경과에 의한 기술 변화를 경제성 평가에 반영하여 투자의 불확실성을 감소시키고, 에너지저장장치의 경제성을 증가시키기 위한 기술개발 방향성 제안하였다. 또한 시장 확대와 기술 발전을 반영하여 ESS 투자의 기회비용을 줄이기 위해 다양한 기술의 경제성 평가를 비교할 필요가 있다.[3]

풍부한 일사량과 자가발전시스템을 갖춘 흑산도를 연구대상으로 하여 흑산도에서 운영 중인 4MW 내연발전소의 발전량 중 10%를 PV와 ESS복합시스템에 의해 우선적으로 공급한다는 전제하에 복합시스템의 용량을 산정하고, 관련된 환경적 편익·비용 등과 같은 사회적 요소들도 포함해서 경제성 분석을

소개하였다. 한계점은 분석기간 동안의 입력변수들에 대해 시뮬레이션에 의한 추정치를 적용하지 않고 과거 흑산도에서의 경험적 데이터를 활용해서 분석한 점이다.[4]

2016년 3월 도입된 ‘에너지저장장치(ESS) 충전전력 할인요금제’를 적용하여 연간 전기요금 절감금액을 산정한 후, 산정된 절감금액을 이용하여 최적의 BESS 용량의 경제성 평가를 제안하였다.[5]

순현재 가치분석을 통해 에너지저장장치 연계된 태양광발전시스템의 경제성 분석하여 특정 PV 시스템 용량 대비 ESS 설치비용을 전제로 최적 용량을 결정하는 문제를 연구하였다. 에너지 저장장치의 가격 하락을 고려한 분석 결과, kWh당 78만원 이하로 떨어지면 태양광 발전 시스템을 효율적으로 충전할 수 있는 용량 내에서 경제적 이익을 창출할 수 있는 것으로 분석하였다. 또한 가중치가 변화에 따른 경제적 분석이 추가적으로 검토되어야 한다.[6]

REC 가중치를 이용하여 기존 설치된 100kW 태양광 발전에 BESS를 연결하기 위한 경제성 평가를 수행하였으며, BESS 용량별 경제성 평가를 반복하여 최적의 BESS 용량을 선정하였다. 또한 REC 가격과 배터리 단가에 대한 민감도 분석을 통해 경제성을 비교하였다. 하지만 PV 설비 용량, PV 출력 패턴, 초기 PCS 설정에 따라 C-rate가 변경될 수 있으므로 추가적인 분석이 필요하다.[7]

광주광역시에 설치된 태양광 및 BESS 연계시스템에서 REC와 SMP를 분석하여 REC 가중치 5.0을 적용하고 SMP 가격변동에 따라 최적의 BESS 충·방전 계획을 활용하여 PCS의 용량별 경제성 및 수익성 극대화 및 배터리 비교를 통해 최적 용량을 산정하여 PV-BESS 시스템의 경제성을 평가하는 연구이다.[8]

제주도에 지역에 설치된 PV 발전소 대상으로 ESS 인센티브 정책을 반영하여 REC 가중치 변화에 따른 예상 시나리오 개발 및 전력 판매 수익 극대화를

위한 최적의 ESS 용량 산정에 대한 연구를 발표하였다. 그러나 장기적 관점에서 보면 현재의 인센티브 정책으로 인해 재생에너지의 용량이 커질수록 실제 전력수요의 변동성은 커진다. 향후 ESS 단가가 인하되고 신재생발전기와 연계가 활성화되면 이에 대응하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.[9]

현재 가동 중인 LG하우시스 울산 공장 내 태양광 발전소를 대상으로 에너지저장장치와 배터리와 PCS의 최적 용량을 산정하고 경제성을 분석하여 정부 지원책이 적용된 최적의 설비기준을 제시하였다. 또한 태양광발전 단독설비 경제성과 에너지저장장치 연계발전 설비 경제성을 내부수익률 기법으로 비교하여 경제성을 분석하였다.[10]

PV연계 ESS에 대하여 ESS 수익성에 영향을 주는 REC 가격의 불확실성과 PV발전 불확실성에 대한 영향, ESS 충전량 제한정책이 ESS 사업자에 미치는 영향에 대하여 분석을 통하여 PV 발전용량에 대비한 ESS 설치용량을 선정하는 연구를 하였다. 또한 ESS 운영의 경제성 핵심요소에 대한 도출과 이의 변화를 시나리오로 분석하여 사업자의 현실적인 운영과 투자방향 및 효율적인 ESS 운영에 대하여 제시하였으며, PV 발전량과 비교하여 과잉으로 투자된 ESS의 판단 및 다른 용도로 활용하여 새로운 수익 방향을 제시하였다.[11]

선행 연구들을 살펴보면 국내 정책을 고려하여 에너지 저장장치 용량을 산정하는 연구들이 발표되었지만, 이들 대부분의 연구들은 특정 지역, 특정 용량, 특정 REC 가중치를 기반으로 최적의 BESS 용량을 계산 및 경제성을 분석을 하여 모든 지역에 일반화하여 적용하기는 힘들다.

제 3절 연구 목표 및 논문 구성

3.1 연구 목표

2016년에는 국내 에너지저장시스템 보급을 촉진하기 위해 '공급인증서 발급 및 거래시장 운영에 관한 규칙'을 발표하였다. 이에 따라 에너지저장장치 신규 설치용량은 2016년 207MWh, 2017년 723MWh, 2018년 3,632MWh로 급격히 증가하고 있다. 신재생에너지 보급 확대와 관련해 신재생에너지 보조금 상승에 따른 전기요금 인상에 대한 우려가 있을 수 있다.

제8차 전력수급기본계획에서는 2030년까지 신재생에너지 균등화발전비용(LCOE)을 35.5% 절감하고 전기요금 인상률을 10.9% 억제하는 목표를 제시하였다. 균등화발전비용 목표치에 미치지 못할 경우 전기요금 인상으로 이어져 장기적으로 신재생에너지 보급 확대에 걸림돌로 작용할 수 있다. 그러나 신재생에너지 균등화발전비용에 대한 신뢰할 수 있고 지속적인 정보가 아직 제공되지 않아 신재생에너지의 경제성과 공급확대 필요성에 대한 사회적 공감대 형성되기 어렵다. 신재생에너지의 중장기 균등화발전비용을 예측하기 위해서는 먼저 신뢰성 있는 방법론과 비용결정요인에 대한 신뢰성 있는 연구를 기반으로 한 분석시스템의 구축이 필요하다. 신재생에너지 발전 비용에 영향을 미치는 요인은 다양하며 이를 객관적으로 조사하여 제시할 필요가 있다.

본 연구는 기존의 연구가 주로 특정 지역, 특정 REC 가중치의 태양광발전 데이터를 토대로 BESS 연계 시 경제성 평가 및 최적 용량을 분석한 것에 비해 연평균 일사량이 최저 지역인 제주, 평균 지역인 경북, 최대 지역인 전남의 발전소의 선정하여 BESS의 충·방전량을 제어하는 PCS와 BESS의 용량별 균등발전비용을 계산하여 균등화발전비용이 가장 낮은 PCS 및 BESS 용량을 최적용량으로 분석하였다. 또한 BESS 설치비 감소 및 REC 가중치 감소에 따른 태양광발전 단독운전의 경우와 비교하여 경제성을 분석하였다.

따라서 연구결과의 지역적 제한 없이 보다 일반화된 연구를 제시하였다는 점에서 연구의 의의를 찾을 수 있다.

3.2 논문 구성

본 논문에서는 국내 일사량이 최저, 평균, 최대인 지역의 태양광 발전시스템에 대해 BESS 연계 시 에너지저장장치의 최적 설비용량 산정하고 이를 통해 경제성 평가하는 과정을 기술하였다.

제2장은 태양광발전의 이론적배경과 발전원리, 스트링구성을 기술하였다. 또한 우리나라에서 적용하고 있는 태양광발전의 분산형 연계기술기준에 적합한 계통연계도가 포함된 태양광발전 계통도를 소개하였다.

ESS의 종류와 기능, 목적에 대해서 기술하였다. 에너지 사용에 대한 환경변화에 따라서 ESS도입의 필요성에 대해서 필요한 시기임을 기술하였으며, 에너지저장장치의 기술 분야별로 분류하여 상세설명을 하였다. 또한 ESS의 글로벌 시장 수요와 전망을 조사하였다. 태양광발전과 연계된 ESS의 시스템을 소개하였다. ESS에서 가장 중요한 부분인 리튬이온 배터리에 대해서 자세한 설명과 종류를 나열하였으며 리튬이온 배터리의 시장가격전망을 조사하여 경제성 평가에서 민감도를 조사하였다.

신재생에너지의 기술동향을 파악하기 위해서 RPS시스템에서 정한 종류별 REC가중치를 소개하였고, 각각의 에너지원별 비중목표를 년도 별로 구분하여 조사하였다. 여기서 태양광발전의 년 평균 증가율이 제일 큰 것으로 나타났다. 또한 신재생에너지의 국제동향을 살펴보았으며 선진각국의 동향과 국제협약에서 약속한 이행목표와 이행방법을 파악하였다.

제3장은 2018년도 일사량과 전력거래량을 자료로 이용하여 일반 부지에 설치된 발전소를 BESS 연계 대상으로 선정하여 PV-BESS 시스템의 경제성 분

석 시 태양광 단일 시스템 LCOE를 기준으로 경제성을 분석 평가하였다. 또한 REC 가중치 하락과 BESS 설치비용 감소에 따른 민간도 평가를 하였다.

제4장은 국내 일사량 최저, 평균, 최고 지역(제주, 경북, 전남) 각각에 대해 REC 가중치에 따른 PCS 및 BESS의 최적 용량 산정, REC 가중치에 따른 경제성 분석 결과를 제시하였다.

제5장은 본 연구의 결론으로서 주요 연구결과를 요약하여 제시하였으며, 본 연구의 한계점 및 후속연구를 위한 제언을 간략히 제시하였다.



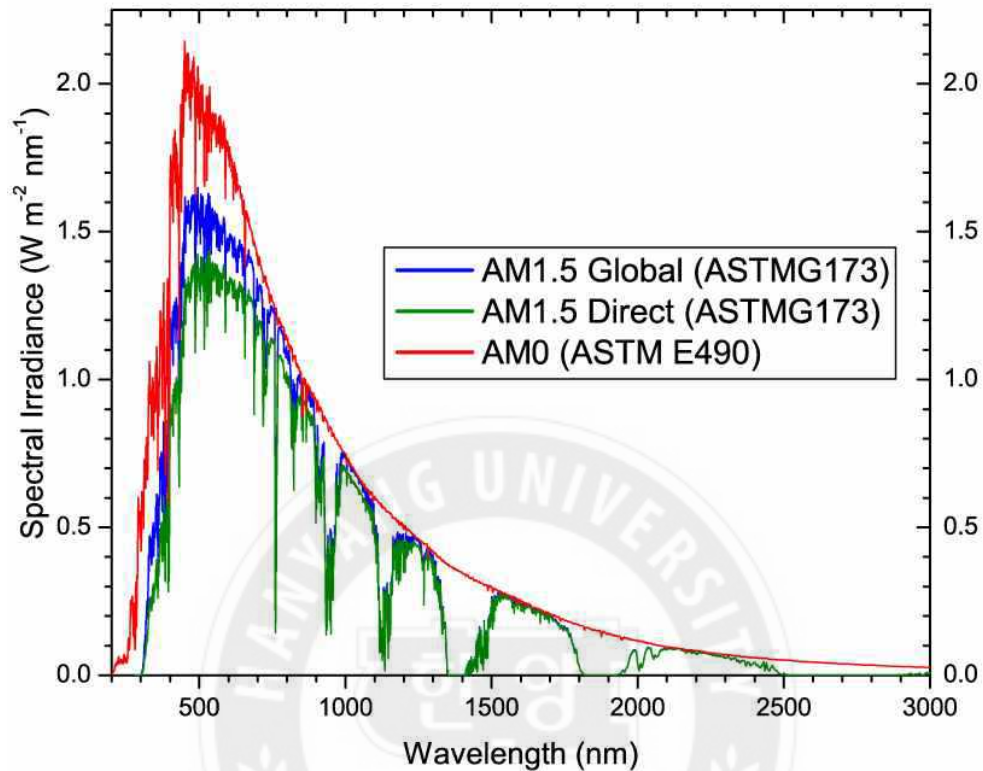
제2장 이론적 배경 및 신재생에너지 정책

제1절 이론적 배경

1.1 태양광(PV) 발전

1.1.1 태양광에너지 스펙트럼

태양광발전(PV) 시스템에서 방출되는 태양에너지(solar energy)가 지구에서 약 1억 5천만 킬로미터 떨어진 지구에 도달하면 에너지 밀도(energy density)는 약 $1,366 \text{ W/m}^2$ 이다. 전자기적으로 표현하면 주파수가 많은 평면파의 집합이다. 태양에너지는 태양표면에서 방출되는 $6,000^\circ\text{K}$ 의 흑체 복사 에너지의 출력 밀도로 적외선, 자외선, X선을 포함한다. 태양광발전에 사용되는 태양광 스펙트럼은 $390 \sim 700 \text{ nm}$ 의 가시광선을 태양광 모듈에 입사시켜 에너지 변환을 일으킨다.[12] [그림 II-1]은 태양광선의 스펙트럼으로서 파장에 따른 스펙트럼 복사량의 변화를 보여주고 있다.



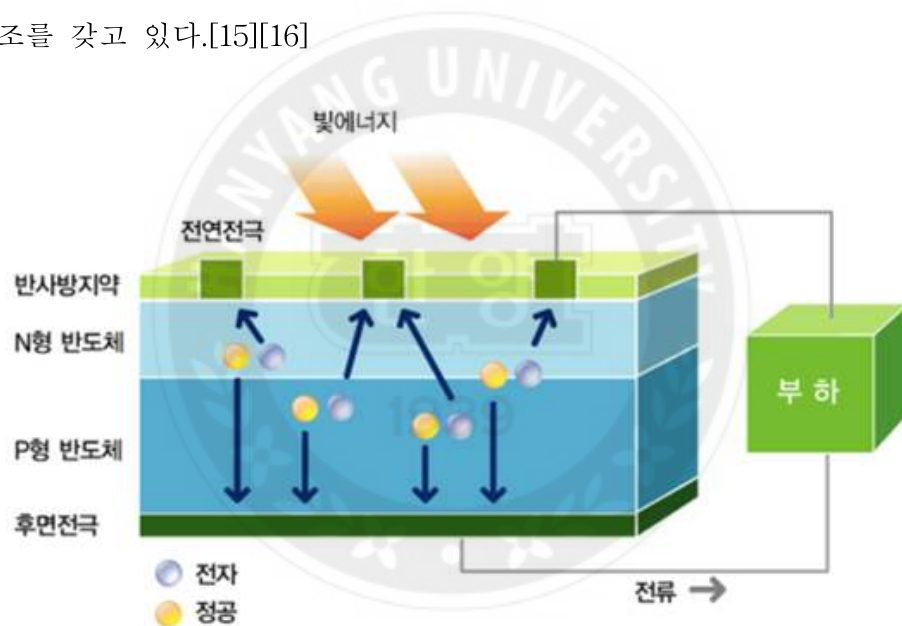
[그림 II-1] 태양광선의 스펙트럼[13]

흑체는 온도에 따라 다른 파장의 전자파를 방출하는 성질을 가지고 있다. 빨간색 실선은 가시광선 영역에서 에너지 밀도가 가장 높다. 지구에 도달하는 태양광은 5,250°K의 방사 스펙트럼을 갖는 다양한 파장의 전자파의 성질을 가지므로 에너지 밀도가 대기에서 가장 높고 대기를 통과하면서 에너지가 감소된다. 적색 선은 AM 0에서 대기를 통과한 스펙트럼으로 전자파는 오존, 공기, 가스, 수증기 등의 물질에 흡수되는 성질을 가지고 있어 에너지 강도가 낮아진다. 지표면의 태양 스펙트럼은 AM 1.5의 선을 보여준다. 이와 같이 다양한 요인에 의해 지구에 도달하는 태양에너지의 세기가 낮아지게 된다. 일부 연구자들이 연구한 내용은 다음과 같은 요인에 의해 태양광발전에 적용되는 에너

지의 주요 요인이다. 기상 요인인 온도와 풍속, 지리학적 요인인 위도와 고도가 태양광발전의 출력에 영향을 미친다.[14]

1.1.2 태양광(PV)의 발전원리

태양전지는 태양의 빛 에너지를 전기에너지로 변환하는 장치로 태양광 발전 시스템의 핵심 부품이다. 태양전지는 P-N 접합으로 이루어진 반도체 소자로 광기전력 효과(photovoltaic effect)와 광전류 효과(photocurrent effect)를 이용한 구조를 갖고 있다.[15][16]



[그림 II-2] P-N 접합 태양전지[17]

광기전력 효과를 일으키기 위해서는 태양광을 받는 면이 넓어야 하며, 입사되는 태양광을 반사시키지 않고 배터리에 에너지를 전달하기 위해 반사 코팅을 해야 한다. P-N 접합에 광자가 입사하여 상부 N형 표면층에 전자-정공 쌍을 만들고 전자는 상부 전극으로, 정공은 하부 전극으로 이동하여 두 전극 간

에 광기전력이 발생한다. 기본적인 태양전지는 [그림 II-2]과 같다.[13] 태양전지의 출력은 태양전지에 입사하는 에너지의 양에 비례한다. 고효율 태양전지인 갈륨비소반도체(GaAs)는 이론상 한계는 28.5%이지만 연구단계에서는 24.7%를 달성했고 양산 규모에서는 20%의 효율을 보인다. 결정질 실리콘 태양전지는 이론적인 효율이 28%이지만 연구단계에서는 24.2%, 양산단계에서는 18~20%의 효율이 보고되고 있다.[18] 한편, 태양전지의 에너지 변환 효율은 태양전지에 입사되는 에너지에 대한 태양전지의 전기 출력을 백분율로 나타낸 것이며, 다음 식으로 표현된다.

$$\eta = \frac{\text{태양전지의 전기적출력}}{\text{태양전지에 입사된 에너지}} \times 100[\%]$$

출력 효율의 기준을 정립하기 위해 국제전기표준위원회 IEC TC-82에 서 지상 태양전지에 대해 기단 지수 A.M(air mass) 1.5, 주위 온도 25℃, 태양열 출력밀도 1,000W/m²인 태양광에너지의 백분율로 나타낸 것을 공칭효율(nominal efficiency)이라 정의한다. 이와 같이 측정된 효율은 상용 제품에 적용되며, 최대 출력점 전류 I_{\max} , 최대 출력점 전압 V_{\max} , 단락 전류 I_{sc} , 개방 전압 V_{oc} 로 태양전지의 성능지수가 표현된다. 단락전류(I_{sc})와 광발생전류(I_L)는 거의 같으며, 태양전지의 P-N 접합에 빛이 입사되면 광생성 캐리어는 전류의 방향과 반대 방향으로 흐르고, 단자전압과 전류의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{sc} = I_L - I_0 \left\{ \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right\}$$

여기서, 역포화 전류에서 I_o 는 P-N 접합 양단의 확산정수와 소수 담체에 의해 결정되는 정수이고, T는 절대온도, k는 볼츠만 상수, n은 전자밀도이다. 태양광 발전에서 광전류가 발생될 때 태양전지 양단의 전압을 개방전압(V_{oc})이라 하며 다음과 같이 표현된다.

$$V_{oc} = \frac{nkT}{e} \ln \left\{ \left(\frac{I_{sc}}{I_L} \right) + 1 \right\}$$

I_{sc} 는 태양전지 모델링에서 직렬저항과 병렬저항을 무시했을 때 입사광의 크기에 비례하는 값이다. V_{oc} 는 역포화 전류 I_o 가 I_{sc} 에 비해 무시할 수 있을 때 입사광의 크기에 비례한다. 한편, 태양전지의 I-V 곡선에서 유효하게 사용되는 전압과 전류는 가장 높은 지점에서 출력을 내는 V_{max} 와 I_{max} 값으로 다음과 같이 정의된다.

$$V_{mpp} = \frac{kT}{e} \ln \left\{ \frac{1 + \left(\frac{I_L}{I_{sc}} \right)}{1 + \left(\frac{eV}{kT} \right)} \right\} \cong V_{oc} - \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{eV}{kT} \right)$$

$$I_{mpp} = I_{sc} \left(\frac{eV}{kT} \right) \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \cong I_L \left(1 - \frac{1}{\left(\frac{eV}{kT} \right)} \right)$$

태양전지의 공칭 효율을 측정하기 위해 자연광과 유사한 스펙트럼을 갖는 솔라 시뮬레이터(solar simulator)가 사용된다. 입사광과 측정된 최대 출력점 $P(I_{max}, V_{max})$ 와 I_{sc} , V_{oc} 를 구하면 유효 수광 면적을 $S[cm^2]$ 로 가정하여 공칭

변환 효율을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\eta_{\text{module}} &= \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{P \times S} \times 100 = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{100 [mW/cm^2]} \times 100 \\ &= V_{oc} \times I_{sc} [mA/cm^2] \times FF\end{aligned}$$

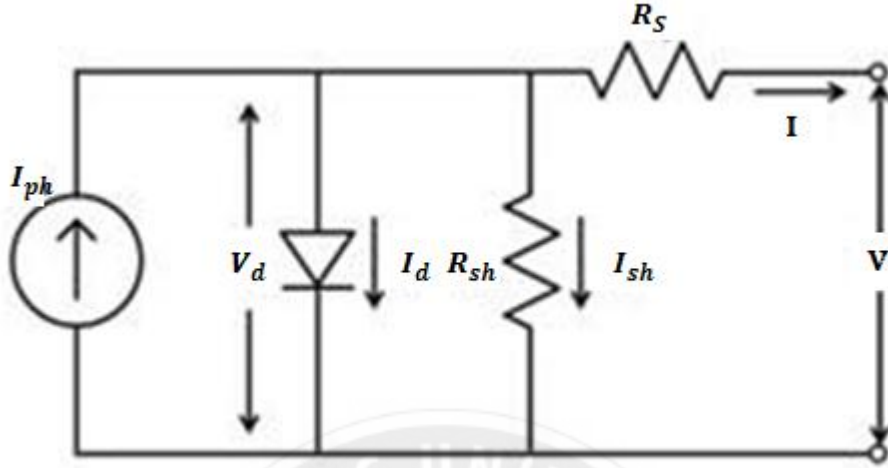
여기서 FF는 Fill factor를 나타내는 것으로 태양전지의 효율과 품질에 영향을 미치며, 빛을 가했을 때 I-V 곡선의 형태가 정사각형에 가까운 정도를 나타내기도 한다.[19]

$$FF = \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

시험광을 조사하여 단자에 나타나는 단락 전류(I_{sc})와 개방 전압(V_{oc})을 측정함으로써 태양 전지 효율의 측정할 수 있다. 이 때 최대 출력점 P_{mpp} 는 다음과 같이 표현된다.

$$P_{mpp} = I_{mpp} \times V_{mpp} = I_L \left\{ 1 - \frac{1}{\left(\frac{eV}{kT} \right)} \right\} \times \left\{ V_{oc} - \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{eV}{kT} \right) \right\}$$

또한, 태양전지는 큰 의미에서 다이오드라고 가정할 수 있으므로, 태양광 전류원과 다이오드의 개념을 이용하여 [그림 II-3]와 같은 등가회로로 만들 수 있다. 또한 등가회로는 다음 식으로 나타낼 수 있다.



[그림 II-3] 태양전지(solar cell)의 다이오드 모델

$$I = I_{sc} - I_d - I_{sh}$$

$$I_d = I_s \exp\left(\frac{qV_d}{nkT}\right)$$

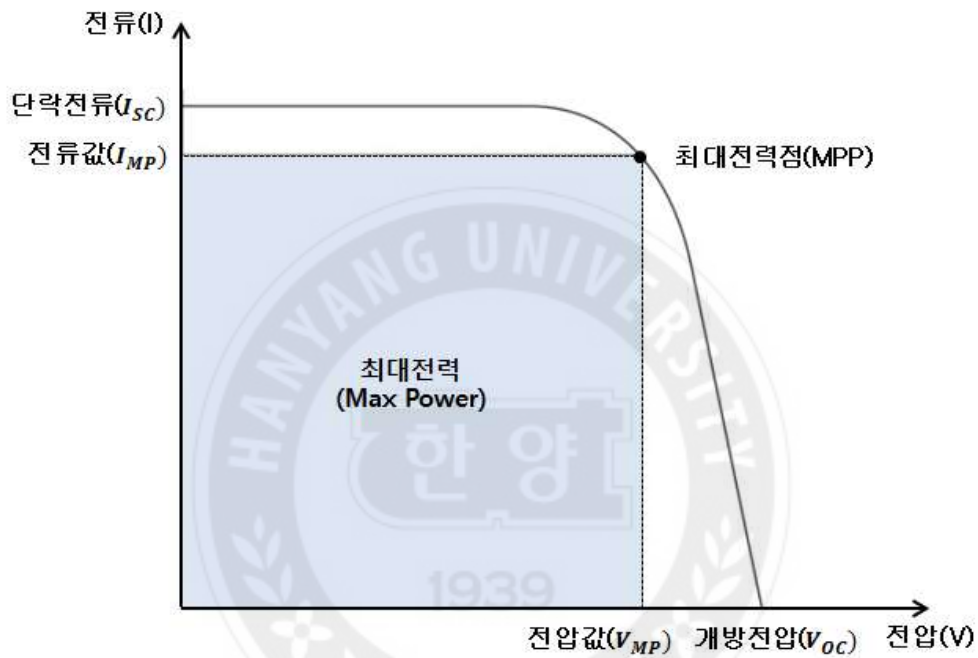
$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}}$$

이상적인 태양전지에서는 직렬저항과 병렬저항을 무시하므로 최대출력전압은 개방전압과 같게 하고 최대출력전류는 단락 전류와 동일한 값을 가진다.

$$I_{ph} \cong I_{sc}$$

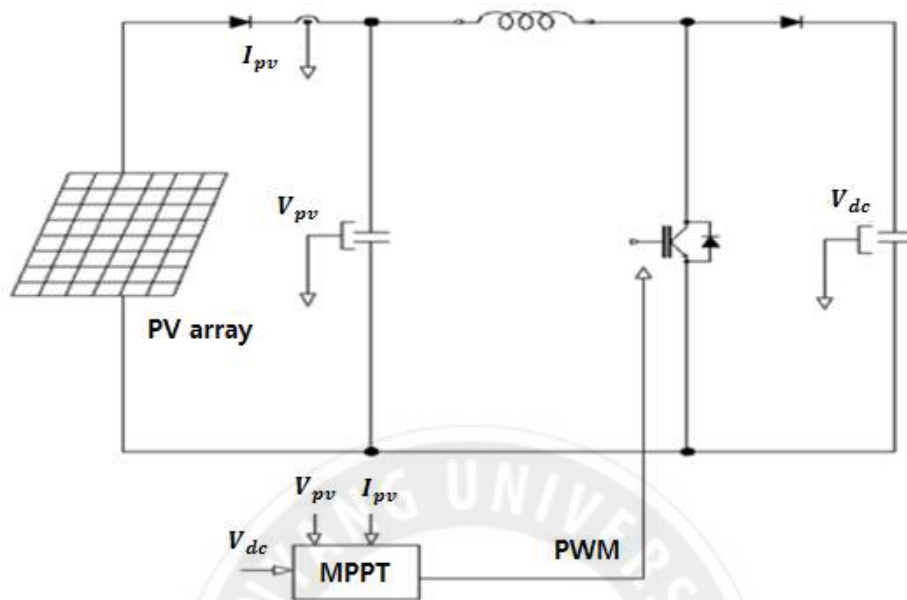
I-V 곡선에서 전류와 전압의 곱이 최대가 되는 지점에서 태양전지의 최대

전력점(Maximum Power Point, MPP)을 구할 수 있다. 최대 출력지점은 직렬 저항과 병렬저항 성분에 의해 변경될 수 있다. 태양전지가 실제로 전력을 생산할 때의 I-V 곡선은 [그림 II-4]와 같다.



[그림 II-4] 태양전지 V-I 특성곡선

태양전지에서 출력된 전력은 I-V 곡선을 통해 최대 전류, 최대 전압, 최대 전력 특성으로 나타낼 수 있고 전류와 전압의 곱이 최대가 되는 지점을 최대 전력점(Maximum Power Point, MPP)이라고 하며 이론상 최대전압의 80%지점이다.



[그림 II-5] MPPT 회로구성

1.1.3 태양광발전 시스템 구조 및 종류

태양광 모듈은 직렬 또는 병렬로 연결된 태양전지와 이를 보호하기 위한 유리, 외부 수분 밀봉재(Ethyl Vinyl Acetate, EVA), 및 불순물의 침투를 방지하는 백시트(back sheet)로 구성된다. 태양광 모듈의 제조 공정은 [그림 II-6]과 같다.



[그림 II-6] 태양광 모듈 제조 과정



[그림 II-7] 태양광 모듈의 구조

출처 : Trina Solar

태양전지는 빛을 흡수하는 물질의 종류에 따라 유기계, 화합물반도체계, 실리콘계 태양전지로 나눌 수 있다. 결정질 실리콘 태양전지는 상용화가 가장 먼저 되어 태양광발전 시장의 90% 이상을 점유하고 있으며, 박막형 태양전지(CdTe, CIGS 등)는 약 7%의 시장 점유율을 기록하고 있다. 유기태양전지 및 염료감응형 태양전지는 모바일 기기, BIPV(Building Integrated Photovoltaic) 등 다양하게 활용될 수 있어 지속적으로 연구되고 있다. 최근 기존의 실리콘 태양전지를 대체할 수 있는 태양전지로 페로브스카이트를 이용한 태양전지가 각광을 받고 연구를 진행하고 있다.



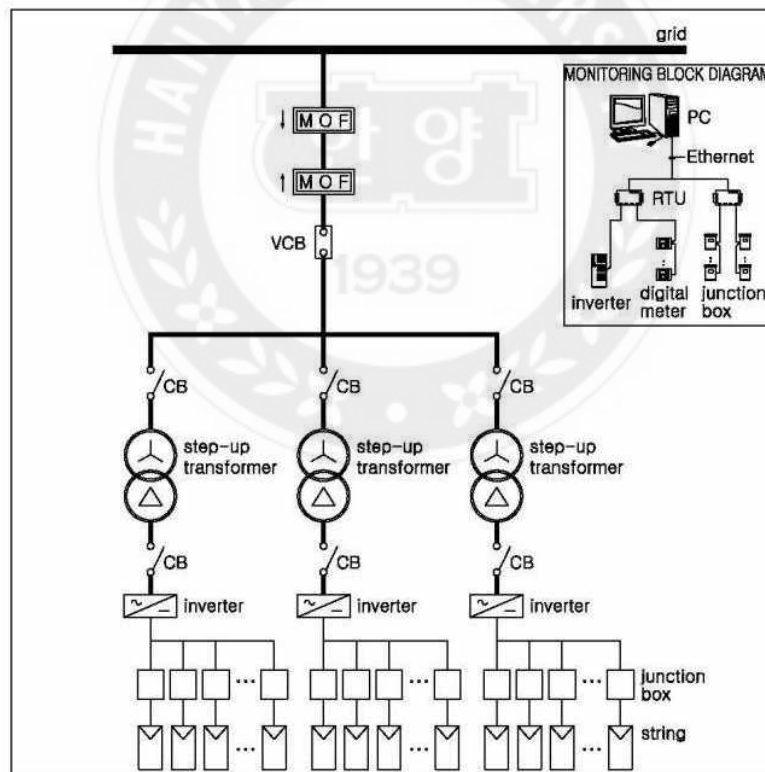
<표 II-1> 태양전지 특징 및 효율

종류			특징	변화효율	단계
실리콘계	결정계	단결정	<ul style="list-style-type: none"> · 200μm 정도의 단결정 Si 기판 이용 · 장점 : 신뢰성, 성능 · 과제 : 경제적인 가격 	~20%	실용화
		다결정	<ul style="list-style-type: none"> · 다결정 기판 이용 · 장점 : 단결정보다 경제적 · 과제 : 단결정보다 낮은 효율 	~15%	실용화
	박막계		<ul style="list-style-type: none"> · 미세결정 박막, a-Si을 기판 위에 형성 · 장점 : 대면적 양산 가능 · 과제 : 낮은 효율 	~9% (비정질)	실용화
화합물질계	CIGS계		<ul style="list-style-type: none"> · SE, In, Cu 등을 원료로 사용하는 박막형 · 장점 : 저가격, 자원절약 · 과제 : In의 자원수급 	~14%	실용화
	CdTe계		<ul style="list-style-type: none"> · Te, Cd을 원료로 사용하는 박막형 · 장점 : 저가격, 자원절약 · 과제 : Cd의 유해성 	~13%	실용화
	집광계		<ul style="list-style-type: none"> · 다접합 집광기술 사용 · 장점 : 초고성능 · 과제 : 경제적인 가격 	~38% (셀 효율)	연구단계
유기계	염료감응		<ul style="list-style-type: none"> · TiO₂에 흡착된 염료가 광을 흡수하여 발전 · 장점 : 저가격화 가능성 · 과제 : 내구성, 고효율화 	~14% (셀 효율)	연구단계
	유기박막		<ul style="list-style-type: none"> · 유기반도체를 이용하는 박막형 · 장점 : 저가격화 가능성 · 과제 : 고효율화, 내구성 	~12% (셀 효율)	연구단계

출처 : Vacuum magazine v.3 no.2 , 2016년, pp.29 - 32

1.1.4 태양광발전 시스템 구성

계통 연계형 태양광 발전 시스템은 태양광으로부터 빛 에너지를 받아 직류 전기를 생산하는 태양광 모듈, 각 스트링을 단위 그룹으로 모아주는 집합 패널, 직류를 교류로 변환하여 계통에 연결하는 인버터로 구성된다. 그리고 저압으로 변환된 전력을 승압변압기를 통해 계통에 적합한 전압으로 맞춘 후 단방향 시스템으로 계통에 연결된다. 계통을 감시하고 데이터를 수집하는 모니터링 설비는 250kW 이상에서는 반드시 설치하여야 한다.[20] 다음 [그림 II-8]은 계통연계 태양광 시스템의 기본 구성을 보여준다.

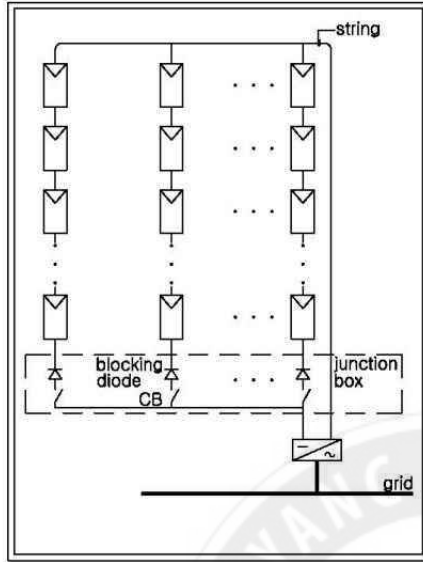


[그림 II-8] 계통연계 집중형 태양광발전 기본 구성도

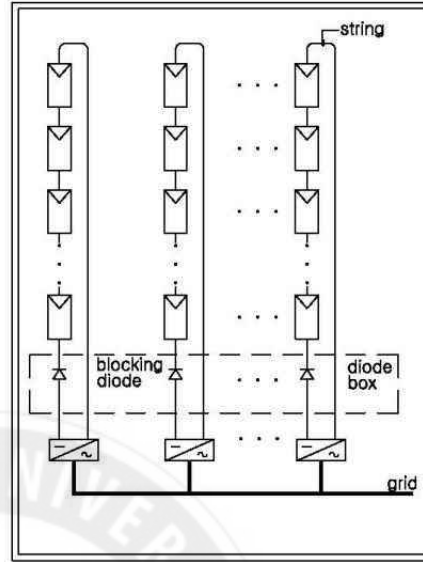
태양광발전 시스템 구축 시 고려해야 할 사항은 태양광 입사각, 모듈의 경사각, 모듈 간 불일치 전원 간선 케이블의 굵기, 미세 차광, 적용 기기의 효율, 인버터 방식 등이다.[21] 특히 인버터 방식은 다른 요인에 비해 전체 시스템 구성에 더 큰 영향을 미친다. 인버터 방식에 따라 전원 간선과 케이블의 종류와 두께가 다르기 때문에 전체 공사비에 영향을 줄 수 있는 요인이다.

인버터 방식은 [그림 II-9]와 같이 분류할 수 있다. [그림 II-9](a)의 중앙집중형 인버터는 스트링마다 블로킹 다이오드(blocking diode)가 있어 스트링에 음영을 생겼을 때 이를 우회하여 다른 스트링에 영향을 주지 않고 각 스트링의 과전류로 인한 사고를 방지하기 위해 배선반에는 차단기가 설치되어 있다. 중앙집중식 인버터 방식은 수십 kW에서 MW급 태양광 발전소에 적용한다.

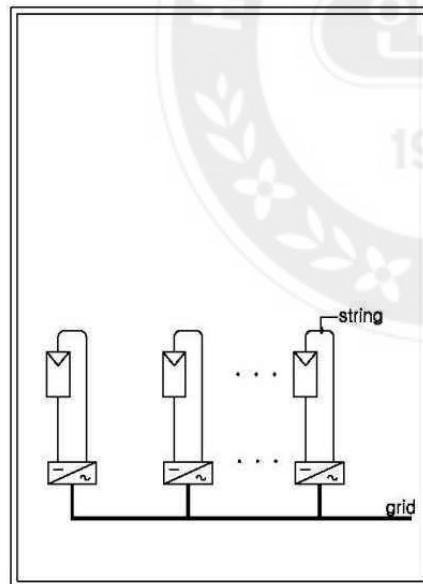
[그림 II-9](b)의 스트링 인버터는 각 스트링에 인버터를 적용한 것이다. 부분적인 음영이 있는 발전소에 적용되며 음영이 생긴 스트링은 다른 스트링에 악영향을 미치고 발전을 정지시킨다. 인버터 기동 전압의 범위가 넓고 스트링의 직렬 모듈(module) 수가 줄어들 수 있으므로 태양광발전소의 위치에 따라 개방 단자전압이 750 VDC를 초과하면 인축에 위험을 초래하여 개방단자 전압을 조절한다. 또한, 안전 규정을 준수하기 위해 스트링 인버터가 적용된다.[22] [그림 II-9](c)는 모듈 1에 인버터를 내장하는 방식을 나타낸다. DC/AC 인버터가 많아 관리하기 어렵지만 모듈 불일치 및 미세한 음영으로 인한 발전 손실을 줄이는 방법이다. [그림 II-9](d)는 DC-DC Converter를 통해 각 스트링의 전압을 모듈 방식으로 제어하여 DC 모선에 공급하고, 내장된 인버터를 DC-AC로 변환하는 인버터이다. 이 방식은 DC-DC Converter를 대체하며 유지보수가 용이한 인버터 방식이다.[23]



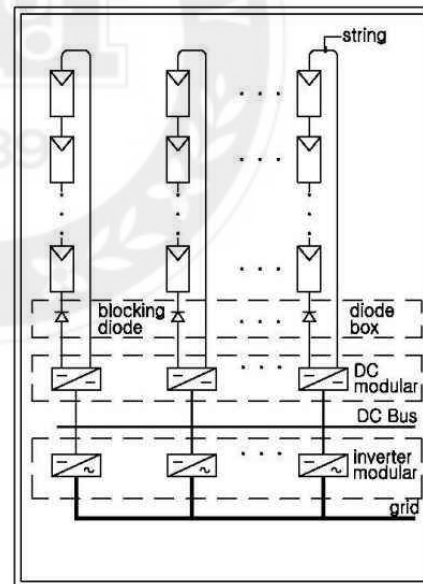
(a) 중앙집중식 인버터



(b) 스티링 인버터



(c) 모듈 인버터



(d) 모듈러 방식 인버터

[그림 II-9] 인버터의 배열방식

1.2 에너지저장시스템(Energy Storage System, ESS)

1.2.1 에너지저장장치(ESS) 개요

대규모 전력계통에서는 전력수요를 예측하기 어렵고, 이를 추종하여 전력원의 출력을 조정하기 때문에 많은 전력설비의 증설 및 운영비용에 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 형태의 전기에너지 저장장치가 발전되고 있다. 스마트그리드(Smart Grid)를 중심으로 에너지 사용과 저장의 효율성과 전기에너지의 품질을 극대화 할 수 있는 배터리 ESS의 개발이 빠르게 진행되고 있다. 배터리ESS는 소비자, 송배전, 발전 등 전력의 소비, 수송, 생산 등 계통 전반에 걸쳐서 적용될 수 있다. 특히, 배터리 기술이 더욱 발전되어 배터리 가격이 하락하면 전력계통 전반에 걸쳐 사용될 수 있어 계통운영자와 ESS 소유자 모두에게 이익이 될 것으로 기대된다. 전력계통에 연결된 ESS는 크게 3가지 방식으로 사용된다.

첫째, 예비력공급(Ancillary power service)과 수요관리자원(Demand Response Resource)으로 사용하여 양수발전을 대체하는 데 사용 할 수 있다.

둘째, 주파수조정(Frequency Response) 보조서비스에 활용함으로써 실시간으로 변하는 주파수에 ESS의 빠른 충·방전특성을 이용하여 실시간으로 변하는 계통주파수를 조정하는데 사용 할 수 있다.

셋째, 비상발전기를 대체하여 사고로 인하여 즉각적인 전력 공급이 필요할 때 사용할 수 있다.[24] 한편, 태양광 발전과 연계된 에너지 저장장치는 태양광 발전으로 생산된 전력을 에너지 저장장치에 저장했다가 지정된 시간에 전력계통으로 방전하는 시스템을 의미한다. 에너지 저장장치는 배터리, BMS, PCS 등으로 구성되어 있다.

1.2.2 에너지 저장 범위 및 저장 목적

대규모 전력계통에서는 전력수요를 예측하기 어렵고, 이를 추종하여 발전원의 출력을 조절하기 위해서는 많은 전력설비의 증설과 운영비용이 소요되는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 형태의 전기 에너지 저장 장치가 고안되었다. 최근 선진국을 중심으로 스마트그리드를 에너지 사용, 저장의 효율성 및 전기에너지의 품질을 극대화할 수 있는 배터리 ESS에 대한 관심과 기술개발이 빠르게 진행되고 있다. 배터리 ESS(Energy Storage System)는 생산된 전력을 저장하고 필요한 시기에 방전하는 장치다.[25] 즉, 발전소에서 생산된 전력을 대형 2차 전지에 저장하고 필요할 때 추가 전력을 전송하여 에너지 효율을 높이는 시스템이다. 특히 태양광발전의 경우 일조량이 일정하지 않고 지속 가능한 전력 공급에 한계가 있다. 따라서 ESS 시스템의 활용에 따라 전기를 저장하는 것은 필수적이다. 전기가 생산되는 곳과 소비되는 곳 사이의 거리가 멀기 때문에 전력 시스템은 생산, 송전, 배전의 단계를 거친다. 이러한 중앙집중식 전력시스템 문제를 해결하기 위해 분산전력의 특성을 지닌 스마트그리드가 개발되었다.[26][27]

배터리 ESS는 발전 레벨, 송배전 레벨, 소비자 등 전력 생산, 운송, 소비 등 계층 전반에 적용될 수 있다. 특히, 배터리 기술이 더욱 발전되어 배터리 가격이 하락하면 전력계통 전반에 걸쳐 사용될 수 있어 ESS 소유자와 시스템 사업자 모두에게 이익이 될 것으로 기대된다.

한편, 신재생에너지 보급 확대로 전력망 안정성 및 전력 품질 문제가 제기되고 있다. 신재생에너지의 가장 큰 단점은 풍력, 태양광 등 기후변화에 따라 전력 발전량이 크게 달라진다는 점이다. 또한, 신재생에너지 발전으로 생산된 전력의 경우 전압과 주파수가 일정하지 않아 전력품질에 문제가 있다. 신재생에너지의 활용을 확대하고 문제를 해결하기 위해 에너지 저장 기술의 필요성

이 대두되고 있다.[28] ESS는 신재생에너지의 전력품질 향상을 위한 필수설비로 적용되고 있다. 특히 풍력, 태양광 등 출력변수가 큰 신재생에너지에 에너지저장장치를 적용하면 전력품질 향상 및 출력 안정화가 가능하다.

1.2.3 에너지저장시스템(ESS) 도입의 필요성

에너지 중 전기에너지는 다른 에너지보다 발전된 에너지로 분류되어 사용이 간편하고 취급이 편리하다. 그러나 전기는 생산과 소비가 동시에 일어나는 특징이 있다. 따라서 생산, 소비, 운송의 전 과정에서 균형이 있어야 한다. 생산과 소비의 균형이 깨지면 정전과 시스템 붕괴의 위험이 있다. 이를 고려하여 전력계통은 최대수요에 따른 용량을 설치한다. 이러한 관점에서 최대수요(maximum demand)에 대한 수요를 충족시키기 위해서는 과도한 설비 투자와 유지보수 비용 등 많은 자원이 낭비된다. 또한, 탈원전 계획 및 대용량 발전소 건설로 인해 환경문제가 발생하고 있으며, 송전설비 건설에 필요한 기존 토지 확보에도 어려움을 겪고 있다. 화석연료의 과도한 사용으로 지구온난화가 계속 심화되고 있으며 이를 보완하기 위한 신재생에너지의 개발 및 설치가 활발히 진행되고 있다. 그러나 신재생에너지의 균일하지 못한 전력생산은 전력계통의 안정성에 악영향을 미치게 된다. 에너지저장장치는 적절한 전력을 공급하고 안정성을 유지하는 기술이다. 2017년 우리나라의 신재생에너지 발전비율은 7%대에 머물러 있어 계통에 직접적인 영향을 미치지 않지만 3020계획에 의해 2030년까지 신재생에너지 비율을 약 20%까지 늘리는 계획을 하고 있다.

따라서 이에 대한 대책이 필요한 시점이라고 판단된다. 전력수요는 지속적으로 증가하고 있으며 이에 따른 설비증설도 필요하지만 환경문제와 원전 기피로 어려움을 겪고 있는 상황에서 신재생에너지의 확충이 필요하다. 한편, 주요 국가 ESS 관련 정책 동향을 살펴보면, <표 II-3>에 제시한 바와 같다. 먼

저, 미국의 경우 RPS ESS 포함, 세제 혜택, ESS 설치 의무화 등 정부 차원의 많은 정책을 추진하고 있다. 중국은 13차 5개년 중장기 계획에 ESS를 포함시켰으며, 연구 및 지원 단계에 있다. 일본은 설치 보조금 지원, FIT 지원, 세제 혜택 등을 제공하고 있는데, 대지진 이후 정책에 따라 비상전원 확보로 이해할 수 있다. 호주는 16년 대정전 사태 이후 안정성 있는 에너지 정책을 추진하고 있다. 이에 따라 세계 최대 규모(100MWh) ESS를 구축한 바 있다. 프랑스의 경우 태양광발전 자가 소비용 ESS 설치비용을 지원하고 있으며, 원자력 발전 축소 정책에 따른 신재생에너지 확대한 바 있다.

1.2.4 에너지저장시스템(ESS)의 종류 및 특징

에너지 저장 기술은 생산된 에너지에 따라 크게 축전방식과 축열방식으로 구분되며, 저장 방식에 따라 화학적, 물리적, 전자기적 방식으로 분류된다. 또한 에너지 방출 지속시간에 따라 장주기와 단주기로 구분된다. 에너지 저장의 종류에 따른 분류에는 물리적인 방식의 대표사례로 양수발전과 압축공기 저장이 있다. 대용량 저장에 적합하지만 설치 장소의 지리적 환경에 따라 제한되는 특성이 있다. 화학적 방식에는 리튬이온 배터리, 나트륨황 배터리, 플로우 배터리 등이 있다. 에너지 저장 시스템의 지속 시간에 따른 분류에서 짧은 주기는 일반적으로 4시간 이내에 전력 공급의 균형을 맞추는 것을 목표로 한다. 대표적인 예로는 고출력, 고효율 및 빠른 응답시간 특성을 가진 리튬이온 배터리와 플라이 휠이 있다. 야간에 잉여전력을 저장했다가 피크시간에 방전할 목적으로 하는 장주기 에너지저장시스템은 보통 10시간 정도 지속할 수 있으며 고용량, 저비용 특성을 지닌 나트륨 유황전지와 플로우 전지가 있다.

<표 II-2> 저장방식에 따른 에너지저장기술의 분류

전기저장방식	에너지저장시스템 종류
물리적 저장	<ul style="list-style-type: none"> · 양수발전(PHS, Pumped Hydro Storage) · 압축공기저장장치(CAES, Compressed Air Energy Storage) · 플라이휠(Flywheels)
화학적 저장	<ul style="list-style-type: none"> · 리튬이온전지(LiB, Li-ion Battery) · 나트륨황전지(NaS) · 납축전지(Lead-Acid) · 흐름전지(RFB, Redox Flow Battery)
전자기적 저장	<ul style="list-style-type: none"> · 슈퍼커패시터(Super-Capacitor) · 초전도에너지저장(SMES, Superconduction Magnetic Energy Storage)

출처 : IEA(2014) 및 DOE(2013) 자료

<표 II-3> 생산 에너지 및 용도에 따른 에너지저장기술

저장기술	생산 에너지	용도	설치장소	효율 (%)	초기투자비용 (US\$/kW)
양수발전	전기	장주기	공급	50~85	500~4,600
CAES	전기	장주기	공급	20~70	500~1,500
배터리	전기	단주기	공급/수요	75~95	300~3,500
수소저장	전기	장주기	공급/수요	22~50	500~750
Flywheels	전기	단주기	송전/배전	90~95	130~500
슈퍼커패시터	전기	단주기	송전/배전	90~95	130~515
SMES	전기	단주기	송전/배전	90~95	130~515
UTES	열	장주기	공급	50~90	3,400~4,500
Pit 저장	열	중열 저장	공급	50~90	100~300
화학열저장	열	저·중·고열 저장	공급/수요	80~90	1,000~3,000
Molten salts	열	고열 저장	공급	40~93	400~700
Solid media	열	중온 저장	수요	50~90	300~500
빙축열	열	저온 저장	수요	75~90	6,000~15,000
온수저장(가정)	열	중온 저장	수요	50~90	
냉수저장	열	저온 저장	수요	50~90	300~600

출처 : IEA, TechnologyRoadmap-Energy Storage, 2014

전 세계적으로 다양한 ESS 기술이 적용되어 운영되고 있으며 리튬이온 배터리가 ESS 시장을 주도할 전망이다. 리튬이온 배터리는 에너지 저장 밀도가 높으며 지속적인 기술개발과 시장 경쟁에 직면하여 생산 비용이 감소할 것으로 예상된다. <표 II-3>는 각 ESS 기술별로 수요를 비교한다.[29]

<표 II-4> ESS 글로벌 시장 수요

[단위 : MWh]

종류	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	연간 증가
LIB	755	1,698	3,721	7,569	11,420	97.2%
NaS	160	420	620	800	925	55.1%
Flow	130	630	950	1,320	1,569	86.4%
Lead-Acid	1,640	1,980	1,920	1,800	1,620	-0.3%
Others	1,512	1,972	2,231	2,566	3,766	25.6%
Total	4,197	6,700	9,442	14,055	19,300	46.4%

출처 : 이현구, 태양광발전과 연계된 ESS의 용량산정을 위한 설계알고리즘

앞서 살펴본 바와 같이 LIB가 시장을 주도하고 있으며, 덧붙여서 레독스 흐름 전지는 긴 수명과 확장성이라는 장점으로 인해 크게 성장할 것으로 예상된다. ESS-LIB 시장은 미국, 중국, 일본이 국가별로 주도하고 있으며, 국가별 수요는 <표 II-5>과 같다.[30]

<표 II-5> 국가별 ESS-LIB 수요

[단위 : MWh]

구분	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	연간증가
미국	196.3	443.3	978.7	1,998.4	3,026.5	98.2%
일본	146.5	295.5	651.3	1,324.6	2,009.8	92.5%
중국	155.5	354.8	777.7	1,582.1	2,409.7	98.4%
유럽	129.8	293.7	643.8	1,317.2	1,987.2	97.6%
한국	40.1	86.7	193.6	385.9	582.5	95.2%
기타	86.8	224.0	476.2	961.3	1,404.6	100.6
Total	755	1,698	3,721.3	7,569.5	11,420.3	97.08%

출처 : 이현구, 태양광발전과 연계된 ESS의 용량산정을 위한 설계알고리즘

ESS의 궁극적인 목적은 전력계통에 안정적으로 전력을 공급하는 목적이 있기 때문에 전력용 ESS-LIB의 용도별 구분을 보면 다음 <표 II-6>과 같다.[30]

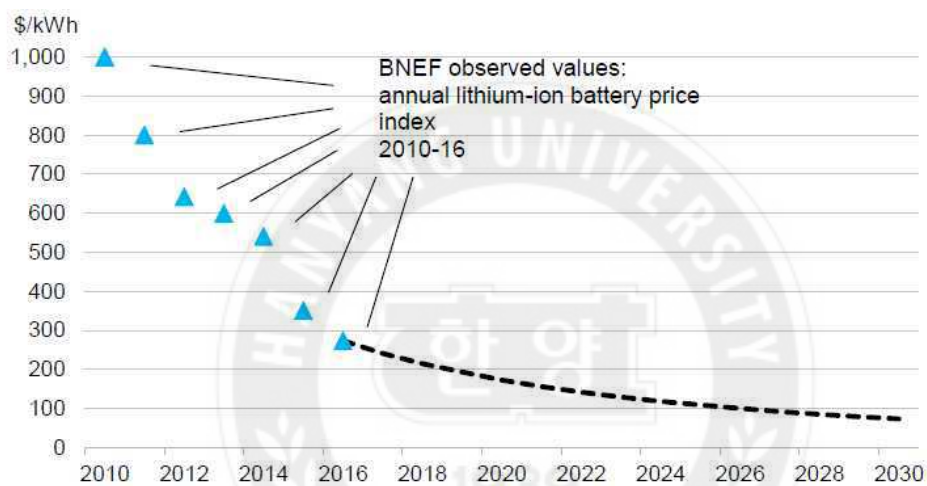
<표 II-6> 용도별 ESS-LIB 수요

[단위 : MWh]

구분	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	연간증가
주파수조정	239	470	973	1,636	2,662	86.2%
신재생안정	102	242	588	1,2232	2,353	119.1%
피크절감	414	986	2,160	4,624	6,405	98.3%
Total	755	1,698	3,721	7,492	11,420	100.0%

1.2.5 리튬배터리의 시장전망

배터리는 ESS의 70~80%를 차지하기 때문에 ESS 설비 보급이 어렵다. 그러나 배터리의 시장가격은 다양한 소재의 전극 및 분리막 응용기술의 발달과 생산규모의 확대로 지속적으로 하락하고 있다. 시장 규모와 배터리 가격 전망은 아래 [그림 II-10]과 같다.

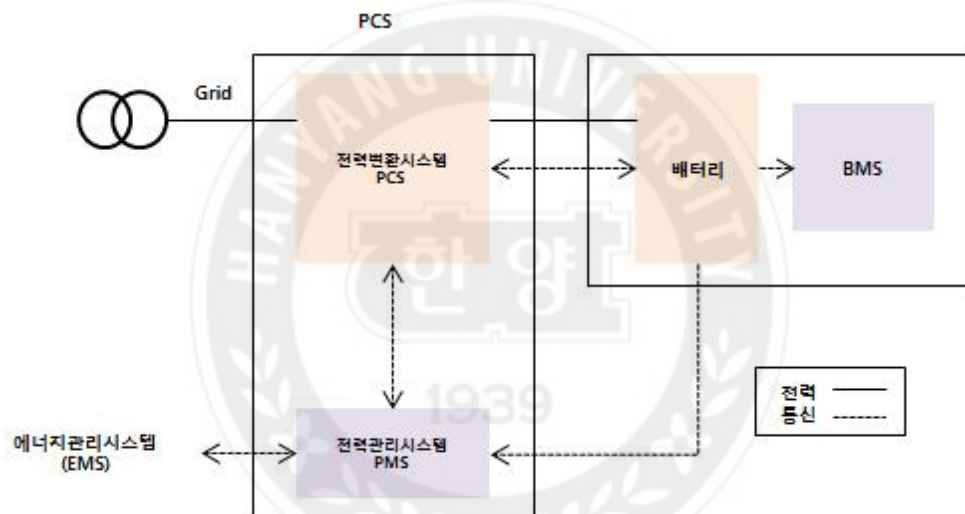


[그림 II-10] 리튬이온 배터리 시장가격 전망

리튬이온 배터리의 시장은 제조기술의 발전과 Cell 화학의 기술향상을 통해 규모의 경제를 달성하고 있으며, 경제성 한계선인 100\$/kWh에 도달할 것으로 예상된다. 2030년에는 70\$/kWh 가격으로 하락할 것으로 예상된다.[31]

1.2.6 에너지저장시스템(ESS) 구성방식

ESS는 크게 배터리 시스템과 배터리 관리 시스템(BMS)으로 구성되며, 배터리 관리 시스템은 배터리의 충·방전 제어와 배터리 상태 관리를 담당한다. 또한 발전된 전력은 계통 및 부하 특성에 따라 전력의 전압과 주파수를 변환하여 관리하는 PCS(Power Conditioning System)와 에너지 저장 시스템을 모니터링하고 제어하는 EMS(Energy Management System)를 포함한다.



[그림 II-11] ESS 구성

출처 : 산업통상자원부

ESS의 전력변환장치(PCS)는 저장과 사용의 특성이 다르기 때문에 전력을 실제로 사용할 수 있도록 특성을 변환하는 장치이다.

PCS는 발전원에서 생산한 전력을 배터리에 충전 또는 방전하여 사용하기 위해 전기의 특성(전압, 주파수, AC/DC)을 변환하는 시스템이다. 또한 배터리의 과충전, 과방전 및 고온에 대비하는 보호 시스템을 가지고 있다.

EMS(Energy Management System)는 ESS의 운전 및 충·방전 상태, 배터리의 SOH, SOC 등을 모니터링하고 PCS를 운영 환경에 맞게 적절히 제어하는 기능을 가지고 있다.

BMS(Battery Management System)는 외부 인터페이스를 통해 배터리의 충전 상태를 전송하고, 과방전, 과충전 방지 등 배터리 수명 예측 및 셀 용량 보호를 위한 제어 및 관리 기능을 수행한다. 또한 BMS는 배터리 성능과 관련된 핵심 기술로 SOC/SOH 관리 및 배터리 보호(열 관리, 저항 측정, 셀 온도 및 전압 측정 등 다양한 진단) 등 배터리 상태 모니터링 기능도 수행한다.

1.2.7 국내 PV 연계 ESS 보급 및 운영

최근 국내에서는 태양광발전에 의해 공급되는 가변 전력의 특성으로 인한 시스템 운용 제약을 완화하기 위해 ESS가 도입되고 있다. ESS는 위치 제약이 있는 양수형 발전에 비해 위치 제약이 없고 소규모로 설치할 수 있는 고성능 축전지를 사용하여 수요 현장에 설치할 수 있다.

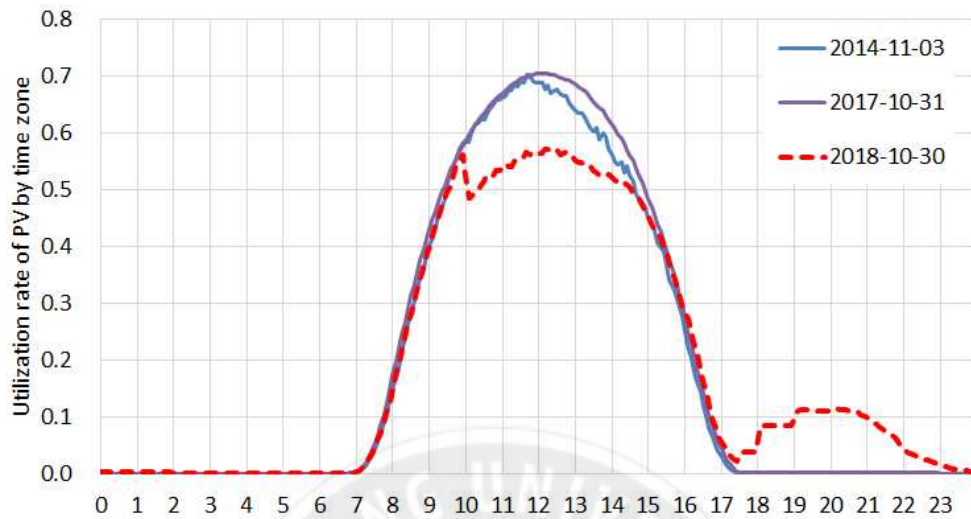
<표 II-7>에 제시한 바와 같이 국내 ESS는 2013년 30MWh(30개소)에서 2020년 4,773MWh(1,490개소)로 증가했으며 이 중 태양광 연계 ESS는 1,587MWh(754개소)를 설치했다.[32] 특히 2018년에는 전체 공급량의 76%가 집중적으로 분배되었다. 정부의 ESS 공급 전력에 대한 REC 이슈에 가중치를 부여하는 정부의 태양광-ESS 지원정책으로 사업자 수익성이 개선됐기 때문이다. 태양광-ESS 보급에 따라 전력 교환을 통해 판매되는 태양광 및 태양광-ESS 업체의 발전 출력 패턴에 큰 변화가 있다. 2014년부터 2017년까지 태양광 출력만 대부분 공급하였으나, 2018년부터 태양광-ESS의 급격한 증가에 따라 태양광 충전으로 인한 시스템 공급이 충전시간인 10시에 감소하고 저녁에는 ESS를 통해 전력이 공급된다.

<표 II-7> 국내 ESS 보급률(2020)

항목	신재생에너지 연계			수요측면 관리			총합
	태양광	풍력	합계	피크감소	비상	합계	
발전소 수	754	24	778	657	55	712	1,490
용량(MWh)	1,587	272	1,859	2,757	157	2,914	4,773

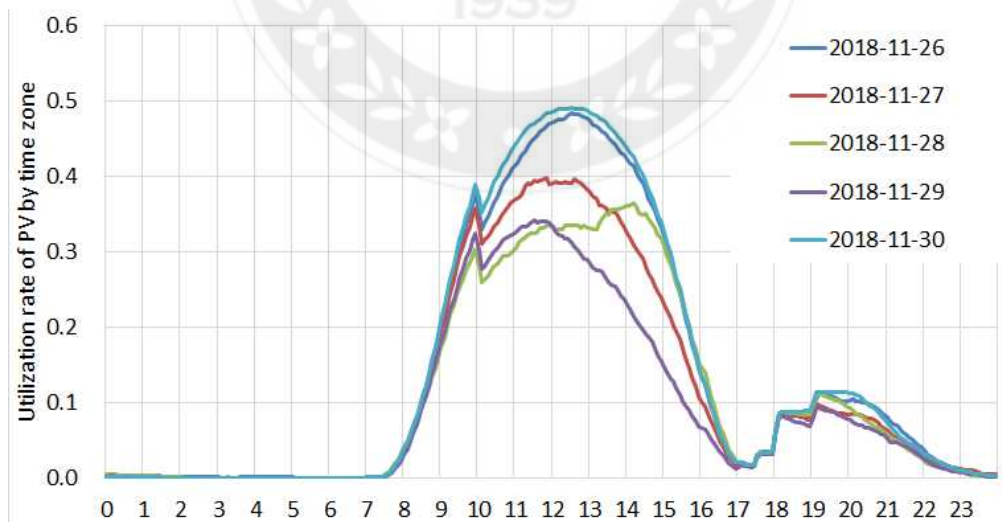
출처 : Korea Electrical Safety Corp, MOTIE

[그림 II-12]에 제시한 바와 같이 PV 용량 대비 70% 출력에서 57% 출력으로 최대 출력 기준으로 20% 감소하였다. 즉, 배전망의 부담이 경감되었다. PV-ESS는 태양광 발전량이 가장 높은 10시부터 16시까지 생산된 전력을 저장했다가 태양광발전이 없는 저녁에 전력을 생산하는 방식이다. 2017-2020 데이터를 기반으로 계산할 때 6시간의 PV 발전은 일일 발전의 약 75%를 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 1일 발전량의 75%를 최대 충전가능 전력량과 ESS에 저장할 수 있는 전력량으로 산정하였다.



[그림 II-12] 특정 날짜 한국의 연도별 태양광 출력 곡선

현재 우리나라의 태양광 충전 방식은 [그림 II-13]와 같이 오전 10시부터 시작돼 ESS가 설치된 태양광발전이 동시에 충전돼 급격한 출력변동이 발생하고 있다. 따라서 이를 개선하기 위한 충전 제어 방법이 필요하다.

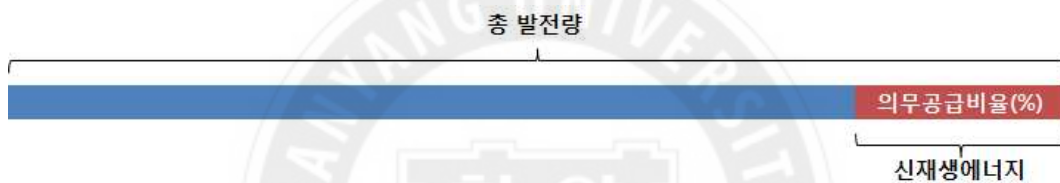


[그림 II-13] 한국의 일별 이용 곡선 변동(2018년)

제2절 신재생에너지 정책

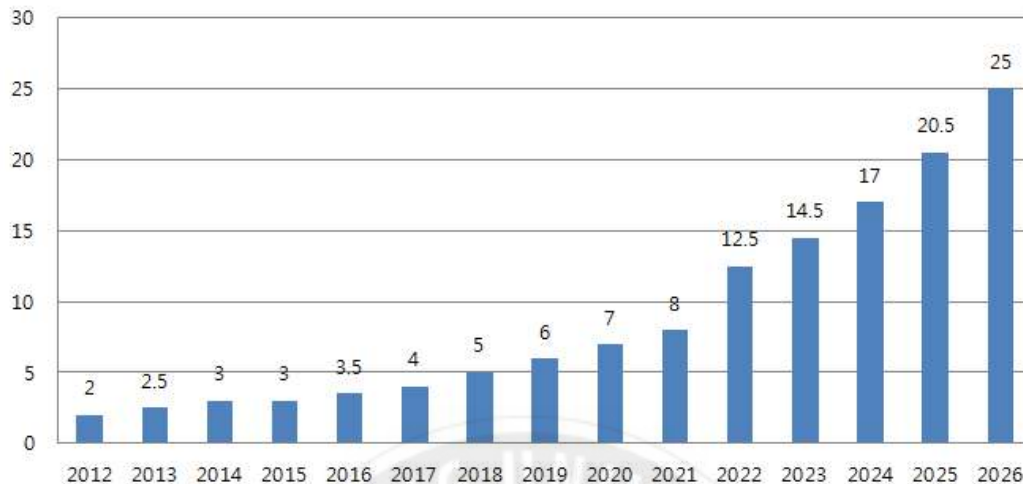
2.1 신재생에너지 공급의무화 제도(RPS)

현재 전 세계적으로 매년 신규 에너지 저장장치의 설치가 증가하고 있으며, 전력망의 안정성을 확보하기 위한 미국, 유럽 등 주요 국가의 정책지원 확대로 빠른 성장이 예상된다. 한국의 RPS 제도는 신·재생에너지 설비를 제외한 50만kW 이상의 발전설비를 보유한 발전사업자(공급의무자)에게 총 발전량의 일정비율을 신·재생에너지를 이용하여 공급하는 것을 의무화한 제도를 의미한다.



[그림 II-14] 신재생에너지 공급의무화 제도

정부는 신재생에너지 보급 확대를 위해 2012년 1월 1일부터 50만kW 이상의 발전설비(신재생에너지 설비 제외)를 보유한 대형 발전사업자들에게 총 발전량의 일정량을 신재생에너지로 공급하도록 신재생에너지 공급의무화제도(Renewable Portfolio Standard, RPS)를 도입하였다. 공급의무량은 공급의무자가 연도별 신재생에너지 시스템을 이용하여 공급하는 발전량으로 공급의무자 개별 신재생에너지 발전량을 제외한 총발전량과 연도별 공급의무량 비율에 따라 정해진다. [그림 II-15]에 신재생에너지 연도별 공급의무량 비율을 2012년부터 올해 2026까지 도표화하였다.



[그림 II-15] 신재생에너지 연도별 공급의무량 비율

또한, 공급의무량 비율은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{공급의무량} = \text{공급의무자의 총 발전량(신재생에너지 발전량 제외)} \times \text{의무공급량비율(\%)}$$

산업통상자원부 ‘신재생에너지 3020 이행 계획안’에 따르면, 연간 공급의무량은 2030년까지 신재생에너지 20% 보급을 목표로 하고 있다. 2022년 이후 공급의무자는 신재생에너지 발전량을 제외한 총 발전량의 10% 이상을 신재생에너지로 발전해야 하며, 이를 이행하지 않으면 과태료가 부과된다.

2.2 신재생에너지 공급인증서(REC)

신재생에너지 공급인증서(Renewable Energy Certificate, REC)는 발전사업자(공급의무자)가 신재생에너지 설비를 이용하여 전기를 생산·공급하였음을

증명하는 인증서를 말하며, 공급의무자는 공급의무량에 대해 신·재생에너지공급인증서를 구매하여 충당할 수 있다. REC는 공급인증서 발급 대상 발전설비에서 공급되는 전력량에 에너지원별 가중치를 적용하여 신·재생에너지 설비를 이용하여 전력을 생산·공급하였음을 증명하는 공급인증서로 MWh 단위를 기준으로 발급된다. 단독으로 운행 중인 태양광 발전의 경우에는 설치위치 및 설비용량에 따라 REC 가중치 0.7에서 1.5까지 부과된다. 발급된 REC는 발급 받은 날로부터 3년 이내에 거래 가능하다.[33]



[그림 II-16] 신재생에너지 공급인증서 발급 및 거래절차

출처 : 재생에너지 클라우드 플랫폼

2.3 신재생에너지 공급인증서(REC) 가중치

REC가중치는 산업통상자원부가 발전원가, 기술개발, 환경영향, 정책의 방향 등 산업 활성화에 영향을 미치는 요소를 고려하여 발전소에 혜택을 주는 방식이다. 2017년 3월 한국에너지공단에서 공고한 공급인증서 가중치를 보시면 일반 부지나 임야 건축물 이용에 따라서 각각 가중치는 달라지며, 태양광 발전 설비 ESS 연계 시 REC 가중치 5.0을 적용하고 있다.

<표 II-8> 태양광설비 공급인증서 가중치

전원	대상에너지 및 기준		REC 가중치
	대상에너지 및 기준	세부기준	
태양광	일반부지 (임야 제외)	100kW 미만	1.2
		100kW 부터	1.0
		3,000kW 초과부터	0.7
	임야		0.7
	건축물 이용	3,000kW 이하	1.5
		3,000kW 초과부터	1.0
	수상태양광		1.5
	자가용 태양광		1.0
ESS	태양광 발전설비 연계		5.0

2.4 신재생에너지 국제동향

지구온난화 대책의 일환으로 시작된 온실가스 감축을 위한 국제적 노력은 2005년 2월 국제협정으로 체결된 교토의정서의 정식 발효를 시작으로 활발히 추진되었으나 미국은 온실가스 최대 배출국인 중국과 러시아가 불참을 선언함으로써 협약은 유명무실해졌다. 그 후 국제기구의 노력을 통해 주요 당사국들이 온실가스 감축 노력에 동참하는 파리기후협약을 체결하게 되었습니다. 교토의정서와 파리기후협약 성격은 전혀 다르다.[34]

<표 II-9> 교토의정서 및 파리기후협약 비교

구분	교토의정서		파리기후협약
체결년도	1997년		2015년
적용시기	1차	2008년 ~ 2012년	2021년 ~
	2차	2013년 ~ 2020년	
참여국	주요선진국(38개국)		모든 당사자(197개국+EU)
주요내용	온실가스총량을 1990년 수준보다 평균 5.2% 감축		지구 평균온도 상승을 산업화 이전과 비교하여 1.5℃까지 제한
비고	선진국에만 온실가스 감축 부여		<ul style="list-style-type: none"> • 2020년부터 개발도상국의 기후변화 대처 사업에 1,000억 달러 지원 • 2023년부터 5년마다 탄소감축 상황보고

<표 II-9>에서와 같이 온실가스 감축 노력은 글로벌 프로젝트로 확인되었다고 할 수 있다. 국가별 온실가스 감축량은 각국이 제출한 자발적 감축목표를 인정하나 5년마다 증가목표를 제출하며, 2023년부터는 5년마다 추진보고서 제출을 의무화하고 있다. 진행 상황을 긴밀하게 관리하기 위해 국제적 차원에서 포괄적인 이행 점검 시스템을 도입하기로 합의 하였다. 각국의 정책방향은 <표 II-10>와 같다. <표 II-11>은 OECD 국가와 비OECD 국가의 기본 신재생에너지 정책에 대해 RPS 및 FIT 제도를 시행하고 있는 국가를 나타내었다.



<표 II-10> 주요국가 온실가스저감 이행목표 및 이행방법

해당국가	이행목표	이행방법
미국	2025년까지 2005년 대비 26~28%의 온실가스 감축	<ul style="list-style-type: none"> · 2030년까지 신재생에너지 비중 28% · 재생에너지 연계 ESS도입 시 10~30% 세액공제 · 전기자동차 구입 시 세제혜택, 환급 · 전기자동차 충전소 설치 인센티브 · 스마트 그리드 투자보조프로그램 · 스마트 그리드 실증 프로그램도입
중국	2030년 GDP단위당 2005년 대비 60~65% 줄이기로 계획	<ul style="list-style-type: none"> · 2020년까지 PV 150GW, WT 250GW · 신재생비중 2020년15%, 2030년20% · 전기차 2020년까지 500만대보급 · 전기차 1,000억 위안 투입(2020까지) · 제로에너지빌딩 보조금지원 · 스마트그리드 개발계획(2009~2020)
일본	2030년까지2013년 대비 26%의 온실가스 감축	<ul style="list-style-type: none"> · 신재생비중 22~24% · 태양광풍력연계 ESS용량이 10kWh 이상인 경우 비용보조 · 전기차 도입 시 최고 139만엔 보조금 · 제로에너지빌딩, 제로에너지주택 등
유럽연합	2030년까지 1990년 대비 40%의 온실가스 감축	<ul style="list-style-type: none"> · EU에너지동맹구축 · 자동차 배출가스규제 · 제로에너지빌딩 성능지침마련
한국	2030년 BAU 대비 37% 감축	<ul style="list-style-type: none"> · 신재생비중 2030년 20% 달성 · 태양광·풍력연계 ESS에 REC가중치 부여 · 재생에너지와 결합된 전지차 충전소 활성화 지원

<표 II-11> RPS 및 FIT 시행 국가

정책	OECD 국가	비 OECD 국가
RPS	벨기에, 호주, 헝가리, 스웨덴, 영국, 에스토니아, 아일랜드, 덴마크, 이탈리아, 한국, 일본, 네덜란드, 미국, 노르웨이	인도, 마다가스카르, 루마니아 브라질
FIT	캐나다, 오스트리아, 호주, 폴란드, 독일, 덴마크, 핀란드, 에스토니아, 스위스, 포르투갈, 영국, 그리스, 헝가리, 네덜란드, 이탈리아, 일본, 한국, 스페인, 라트비아, 아일랜드, 슬로바키아, 룩셈부르크, 터키, 프랑스	아르메니아, 아르헨티나, 보스니아헤르코비나, 불가리아, 중국, 볼리비아, 벨라루스, 알제리, 키프로스, 콜롬비아, 에콰도르, 크로아티아, 이집트, 인도, 인도네시아, 요르단, 케냐, 카자흐스탄, 나이지리아, 몰타, 몬테네그로, 모리셔스, 말레이시아, 필리핀, 리투아니아, 파키스탄, 태국, 우간다, 튀니지, 베트남, 우크라이나, 우루과이, 남아프리카공화국
정책 미 시행국	체코, 슬로베니아, 멕시코, 뉴질랜드, 칠레, 아이슬란드	아제르바이잔, 알바니아, 페루, 부르키나파소, 몽골, 방글라데시, 바베이도스, 벨리즈, 이란, 보츠와나, 브루나이, 코스타리카, 도미니카, 온두라스, 싱가포르, 캄보디아, 파나마, 스리랑카, 몰도바, 니카라과, 모로코, 예멘, 러시아, 말라위, 르완다, 사우디, 엘살바도르, 모잠비크, 과테말라, 잠비아, 타지키스탄, 베네수엘라

제3장 연구방법

제1절 조사대상 및 방법

1.1 조사대상 선정

전국 태양광발전소의 시간별 발전량은 한국전력거래소(KPX)의 2018년도 전력거래량 자료를 이용하였다. 2018년 말 KPX와 거래중인 태양광 발전소는 총 9,638개소이다. 에너지 저장장치 충전 시 발전량은 태양광 발전소의 설비용량 및 설치형태에 관계없이 ESS 연동 가중치로 적용됩니다. 본 논문에서는 국내 태양광 발전소의 약 80%에 해당하는 100kW 이상 3MW 미만의 REC 가중치 1.0인 일반 부지에 설치되는 발전소를 BESS 연계 발전소로 선정하여 경제성 평가 및 최적용량을 연구하였다.

1.2 PV-BESS 시스템 경제성 분석 방법

2018년 지역별 신규 태양광발전소 설비용량과 지역별 일사량을 통하여 PV-BESS 연계 시 경제성 예측 분석 및 최적용량 BESS를 선정하고자 합니다. PV-BESS 시스템의 경제성 분석 시 태양광 단일 시스템 LCOE를 기준으로 BESS 연계 시 경제성을 확보할 수 있는 REC 가중치별 LCOE를 선정합니다. 또한 PV-BESS 연계 시 경제성을 확보할 수 있는 최저 REC 가중치를 선정하고자 합니다.

균등화발전원가(LCOE)는 발전원에 의한 발전비용을 평가하기 위한 값으로, 전력을 생산하는 준비 단계부터 생산 이후 단계까지 모든 비용을 감안해 책정하는 단위 전력당 발전 비용을 뜻하며, 해당 발전기의 수명기간 전체에 걸친 평균적인 발전원가를 의미합니다. 또한 발전량이 많을수록 균등화 발전원가는 감소하는 것을 알 수 있습니다.[35]

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{n=1}^T \frac{OPEX}{(1+r)^n}}{\sum_{n=1}^T \frac{(1-d)^n \times P}{(1+r)^n}}$$

<표 III-1> LCOE 함수 설명

구분		설명
CAPEX	초기투자비용(원/kW)	기자재비, 건설/시공비, 간접비
OPEX	유지보수비용(원/kW)	수리 및 관리, 보험료
r	할인율(%)	미래의 비용과 편익을 현재가치로 환산하기 위해 적용하는 값. 기획재정부(4.5%)
T	설비수명(Years)	설비의 안전성, 경제성 및 신뢰성을 유지하면서 본래의 설계목적에 부합되는 기능을 다하기 까지의 시간. 업체에서 보증하는 기간
d	성능감소율(%)	설비사용에 의한 열화현상 등 여러 요인에 의해 최초 보증된 성능이 시간이 지남에 따라 저하되는 특성

초기투자비용은 자재비나, 건설/시공비, 간접비를 말하며 유지보수비용은 수리 및 관리, 보험료가 해당됩니다. 할인율은 미래의 비용과 편익을 현재가치로 환산하기 위해 적용하는 값이고, 수명은 본래의 설계목적에 부합되는 기능을 다하기까지의 시간을 말합니다. 성능감소율은 최초 보증된 성능이 시간에 지남에 따라 저하되는 특성을 말하고 있습니다.

태양광 시스템의 발전량은 태양광시스템 용량에 일사량과 손실계수를 곱한 값입니다. 손실계수는 외적요인에 의해 발생하는 일정한 발전량의 손실을 말하며 계절과 지역에 따라 차이가 있기 때문에 연중 손실계수는 0.85가 사용되는 것이 일반적이다.

$$\text{발전량} = \text{태양광 시스템 용량} \times \text{일사량} \times \text{손실계수}$$

PV-BESS 시스템의 경우 경제성 확보를 위해 REC 가중치 분석이 필요하다. 이에 BESS 설치 유무에 따른 경제성을 분석하고 REC 가중치 감소에 따라 경제성이 발생하는 BESS의 최소 설치비용을 산정하고자 하였다. 한편, REC 가중치를 고려하여 BESS의 최적 용량을 계산하기 위해서는 BESS의 용량 변화에 따른 경제성 분석이 필요하므로 LCOE를 계산하여 진행하였다. 또한 태양광 단독운전을 기준으로 BESS와 연결 시 경제성을 확보할 수 있는 최저 REC 가중치도 계산하였다.

1.3 경제성 민감도 평가

본 연구에서는 REC 가중치 감소와 BESS 설치비용 하락에 따른 경제성 분석을 LCOE를 이용하였으며, 이를 단독으로 가동되는 PV의 LCOE와 상호 비교를 통해 경제성을 분석하였다. 1MW 이상인 전국 태양광 발전소 가운데 연평균 일사량이 최저, 평균, 최대를 나타내는 제주, 경북, 전남 지역의 태양광 발전소를 사례로 선정하였다. 경제적 요인에 영향을 미치는 요인의 민감도를 평가하기 위해 기준 태양광 발전소에 부과되는 전제 조건으로 PCS 용량, BESS 용량 및 REC 가중치를 각각 변경하여 LCOE를 계산하였다. 즉, PCS 용량은 태양광발전용량의 0.1배부터 0.8배까지, BESS 용량은 태양광발전용량

의 1.0배부터 5.0배까지 0.1배 간격으로, REC 가중치는 5.0부터 1.0까지 0.5단계로 분석하였다. 경제성 분석을 위한 태양광 전제조건은 태양광 발전 균등화 비용에 관한 연구 자료인 2018년 산업통상자원부 백서를 사용하였다.

<표 III-2> LCOE 전제조건

구분		PV단독	PV-BESS 연계 시		
		PV	PV	BESS	PCS
CAPEX	초기투자비용(원/kw)	1,659,000	1,659,000	500,000	290,000
OPEX	유지보수비용(원/kW)	CAPEX 3%	CAPEX 3%	CAPEX 3%	CAPEX 2%
r	할인율(%)	4.5	4.5	4.5	4.5
T	설비수명(Years)	20	20	15	15
d	성능감소율	0.6	0.6	0.6	1.9

또한 PV-BESS 연계 시 경제성 없는 REC 가중치에서는 BESS 비용을 변화시켜 LCOE를 계산하였다.

제4장 연구내용 및 분석 결과

제1절 연구내용

1.1 태양광 발전량 정상성 검증

태양광 발전은 일사량에 따라 발전량이 결정된다. 본 논문에서는 전국에서 일사량이 최대, 최소, 평균인 지역을 선정하여 2018년 월별 일사량 자료를 통하여 태양광 발전량을 산정하였다. 태양광발전소 발전량의 정상성(BESS 연계 여부) 검증에 사용된 시간별 발전량과 일사량 자료는 모두 값이 0 이상일 때를 유효하다고 판정하였다. 정상성 판단을 위해 회귀분석을 통한 상관성 분석을 수행하였다.



<표 IV-1> 2018년 지역별 일사량[kWh/m²/day]

지역	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
전남	2.32	3.13	4.06	5.03	5.37	4.91	4.5	4.82	4.18	3.74	2.6	2.07	3.89
경남	2.72	3.39	4.13	4.93	5.19	4.67	4.3	4.31	3.89	3.71	2.79	2.52	3.88
부산	2.61	3.23	3.86	4.68	5.04	4.67	4.28	4.43	3.69	3.48	2.69	2.39	3.75
충남	2.30	3.13	3.96	4.85	5.31	5.02	4.06	4.31	4.03	3.45	2.32	1.97	3.72
대전	2.32	3.11	3.92	4.85	5.19	4.83	4.17	4.32	3.87	3.44	2.42	2.04	3.72
경북	2.51	3.14	3.82	4.79	5.14	4.83	4.18	4.14	3.57	3.35	2.62	2.33	3.72
광주	2.32	3.08	3.92	4.83	5.16	4.64	4.09	4.22	3.90	3.56	2.51	2.08	3.69
대구	2.36	3.05	3.87	4.73	5.08	4.72	4.12	4.01	3.59	3.32	2.44	2.17	3.62
경북	2.24	2.97	3.79	4.73	5.15	4.81	4.05	4.11	3.77	3.27	2.35	2.05	3.62
충북	2.24	3.03	3.72	4.68	5.16	4.86	4.04	4.14	3.79	3.28	2.24	1.93	3.61
강원	2.14	2.92	3.72	4.61	5.08	5.05	4.04	4.23	3.83	3.06	2.12	1.82	3.54
제주	1.44	2.36	3.45	4.62	5.12	4.72	4.92	4.62	3.83	3.37	2.21	1.48	3.52
전북	2.14	2.83	3.63	4.63	4.95	4.64	3.95	4.02	3.72	3.33	2.27	1.91	3.51
서울	2.01	2.77	3.51	4.37	4.72	4.42	3.31	3.58	3.55	3.07	2.06	1.74	3.28

본 연구에서는 제주, 경북, 전남 지역 PV를 대상으로 하였으며, 이 지역 PV가 일반 부지에 설치된 것으로 가정하고 설비 용량에 따른 가중치를 적용하여 연구를 진행하였다. 일반부지에 설치된 발전소를 경제성 평가하기 위한 BESS 연계대상 발전소로 선정하여 연구하였다. 이 가운데 상세 주소가 확인되어 해당 지점의 일사량과 비교가 가능한 태양광발전소를 분석대상으로 선정하였다.

<표 IV-2> 2018년 신규 태양광발전소 설비용량 및 개소

	서울	부산	대구	광주	대전	울산	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	제주
설비용량 (MW)	4	14	7	33	3	8	165	244	106	253	978	466	258	140	58
발전소 개수	72	59	60	157	64	34	1,025	878	529	1,162	2,219	1,255	1,105	693	19

분석 대상 태양광발전 설비는 용량 기준으로 하여 발전량을 식으로 산정하였고 2018년 태양광 발전량을 월별로 구분하였다.

$$\text{발전량} = \text{태양광 시스템 용량} \times \text{일사량} \times \text{손실계수}$$

손실계수는 외적요인에 의해 발생하는 일정한 발전량의 손실을 말하며 계절과 지역에 따라 차이가 있기 때문에 연중 손실계수는 0.85가 사용되는 것이 일반적이다.

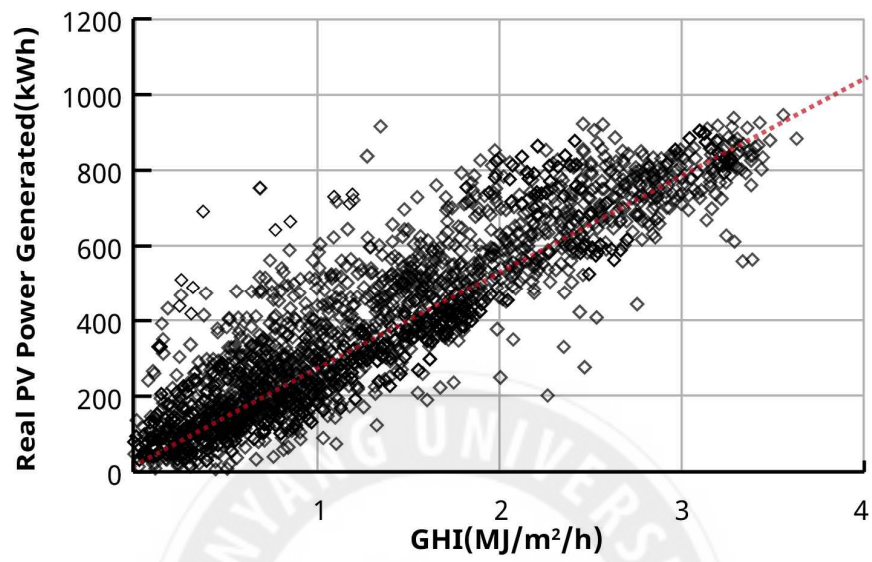
<표 IV-3> 2018년 지역별 태양광 발전소 발전량[MWh]

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
서울	1,976.2	2,447.2	2,703.7	2,901.9	3,122.1	3,279.5	3,115	3,172.3	3,110.8	3,164.9	2,257.3	2,319.2
부산	6,668.1	7,651.4	8,590.1	9,437.3	9,190.0	8,709.7	10,061.6	9,102.3	6,359.4	8,406.6	6,842.9	6,536.5
대구	4,061.1	4,182.8	4,988.2	5,466.3	5,482.4	5,397.8	5,589.0	5,286.4	4,200.0	5,250.4	3,957.6	3,972.9
인천	3,584.6	4,244.7	4,987.5	5,464.6	5,747.3	6,086.1	6,500.1	6,281.4	5,851.9	5,816.5	4,106.5	4,325.0
광주	6,515.4	7,047.6	11,542.0	12,880.6	12,543.5	13,746.8	14,818.9	13,501.8	11,899.4	13,152.9	10,203.4	9,243.8
대전	1,231.0	1,677.2	2,034.7	2,293.1	2,517.7	2,630.5	2,596.6	2,425.6	2,232.6	2,214.3	1,624.6	1,637.1
울산	2,431.7	2,674.0	2,930.4	3,324.7	3,220.0	3,236.6	3,486.3	3,544.4	2,392.3	3,361.7	2,715.1	2,597.9
세종	1,627.8	2,281.7	2,894.2	3,268.1	3,424.3	3,621.7	3,839.0	3,436.1	3,100.0	3,149.6	2,299.5	2,419.1
경기	20,014.2	27,312.7	32,851.3	36,366.7	39,050.4	41,850.4	42,816.6	42,361.6	40,668	40,788.4	31,118.5	32,011.1
강원	29,138.3	38,177.3	44,226.3	50,498	53,227.8	57,215.9	54,575.1	51,541.9	52,961.3	55,397.7	41,480.2	46,436.4
충북	18,924.6	26,065.5	31,092.2	34,903.4	36,957	38,973.2	39,702.1	36,588.9	33,670.3	34,838.9	27,006.9	27,291.1
충남	49,723.7	67,625.9	81,869.2	88,824.6	91,441.4	94,601.4	102,687	95,302.0	90,710.1	94,479.2	68,832.7	68,990.9
전북	66,785.4	84,253.1	109,981	120,086	122,745	130,521	145,129	134,967	124,368	131,033.5	102,684	95,772.1
전남	93,868	103,623	138,537	151,337	144,640	157,727	170,649	156,826	134,785	160,726	130,708	108,129
경북	54,891.4	65,128.7	74,757.7	83,322.6	83,565.6	83,064.1	87,449.8	80,996.4	69,937.6	85,436.7	64,897.3	67,793.5
경남	34,693.4	37,759.2	45,064.4	48,840.2	48,118.2	48,380.7	52,371.9	48,342.2	39,563.5	51,647.8	41,249.9	40,232.7
제주	8,102.28	9,870.3	14,409.3	16,332.8	14,104.7	15,300.0	17,027.2	16,997.3	14,007.6	18,248.9	15,990.0	10,328.4

PV-BESS 경제성 분석에 앞서 [그림 IV-1]에 제시한 바와 같이, 제주, 경북, 전남의 발전량과 일사량의 상관성을 평가하였다.

<표 IV-4> 2018년 월별 일사량 및 발전량(제주)

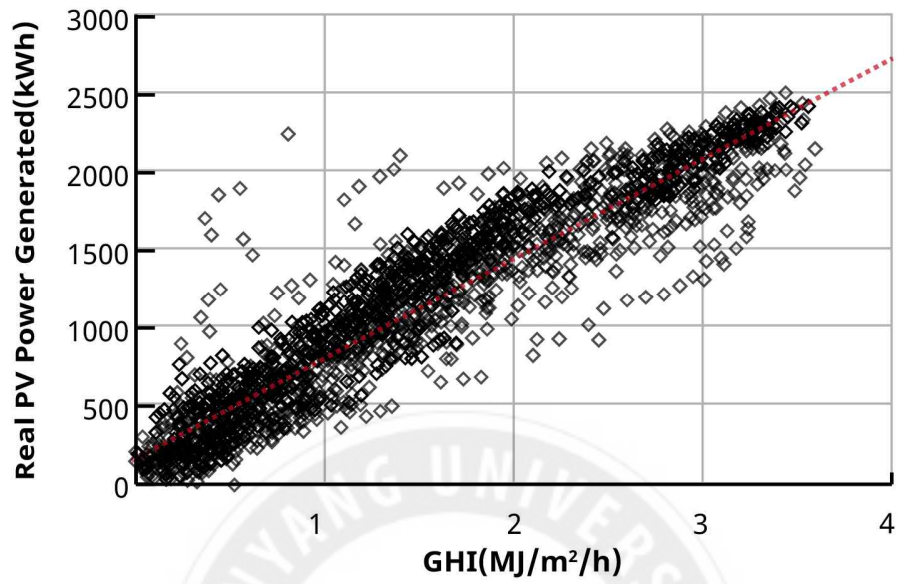
연월	월간 총 발전시간	월 평균 일사량 (MJ/m ²)	일 평균 일사량 (MJ/m ²)	일 평균 발전시간	총 발전량	일 평균 발전량 (MWh)
2018.1	111.6	150.58	1.35	3.6	8,102.28	2.11
2018.2	137.9	248.8	1.63	4.9	9,870.36	2.84
2018.3	193.3	426.93	2.21	6.2	14,409.39	3.75
2018.4	203.7	515.4	2.45	6.8	16,332.82	4.39
2018.5	144.8	451.38	3.12	4.7	14,104.74	3.67
2018.6	208.8	525.16	2.43	7.0	15,300.08	4.11
2018.7	272.9	622.74	2.28	8.8	17,027.22	4.43
2018.8	297.6	601.57	2.02	9.6	16,997.35	4.42
2018.9	166.3	394.68	2.30	5.5	14,007.63	3.77
2018.10	220.6	390.77	1.77	7.1	18,248.9	4.75
2018.11	190.4	292.36	1.49	6.3	15,990.08	4.30
2018.12	89.7	158.62	1.77	2.9	10,328.44	2.69



[그림 IV-1] PV와 일사량의 상관관계(제주)

<표 IV-5> 2018년 월별 일사량 및 발전량(경북)

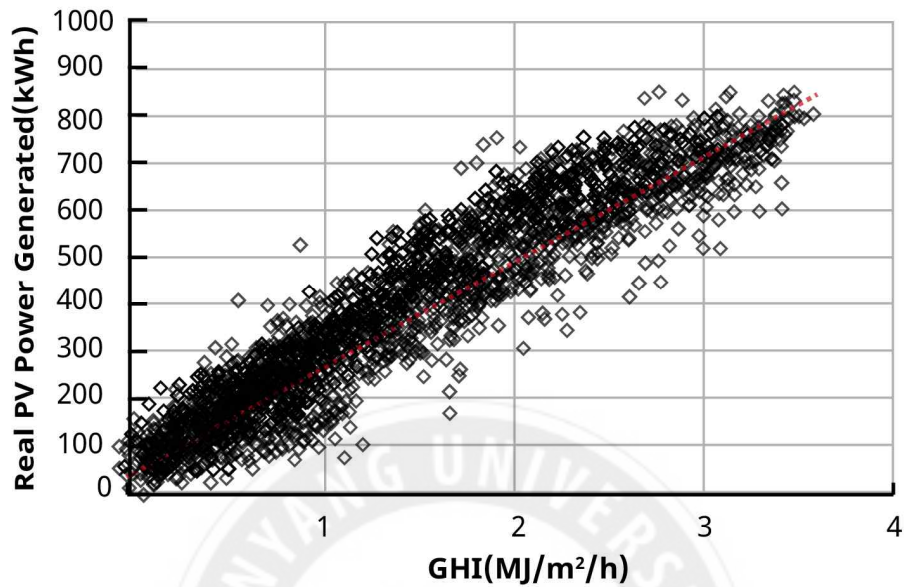
연월	월간 총 발전시간	월 평균 일사량 (MJ/m2)	일 평균 일사량 (MJ/m2)	일 평균 발전시간 (h)	총 발전량	일 평균 발전량 (MWh)
2018.1	205	190.59	0.93	6.6	54,891.43	2.60
2018.2	197	215.01	1.09	7.0	65,128.77	3.42
2018.3	210.6	273.81	1.30	6.8	74,757.7	3.55
2018.4	247.6	529.12	2.14	8.3	83,322.69	4.08
2018.5	198.1	520.32	2.63	6.4	83,565.96	3.96
2018.6	179.5	510.33	2.84	6.0	83,064.18	4.07
2018.7	228.8	572.11	2.50	7.4	87,449.87	4.15
2018.8	208.9	505.17	2.42	6.7	80,996.44	3.84
2018.9	112.8	331.02	2.93	3.8	69,937.67	3.43
2018.10	204.6	396.81	1.94	6.6	85,436.74	4.05
2018.11	166.7	283.41	1.70	5.6	64,897.32	3.18
2018.12	170.1	256.42	1.51	5.5	67,793.5	3.22



[그림 IV-2] PV와 일사량의 상관관계(경북)

<표 IV-6> 2018년 월별 일사량 및 발전량(전남)

연월	월간 총 발전시간	월 평균 일사량 (MJ/m2)	일 평균 일사량 (MJ/m2)	일 평균 발전시간	총 발전량	일 평균 발전량 (MWh)
2018.1	166	238.42	1.44	5.4	93,868	3.53
2018.2	167.9	266.79	1.59	6.0	103,623.53	4.31
2018.3	196.1	383.44	1.96	6.3	138,537.47	5.21
2018.4	219.3	482.24	2.20	7.3	151,337.95	5.88
2018.5	167.8	532.37	3.17	5.4	144,640.98	5.44
2018.6	212.3	624.44	2.94	7.1	157,727.8	6.13
2018.7	268.6	673.26	2.51	8.7	170,649.1	6.42
2018.8	245.1	573.11	2.34	7.9	156,826.2	5.90
2018.9	175.6	454.79	2.59	5.9	134,785.14	5.24
2018.10	237.3	437.14	1.84	7.7	160,726.15	6.04
2018.11	198.7	319.95	1.61	6.6	130,708.88	5.08
2018.12	142.8	233.59	1.64	4.6	108,129.5	4.07



[그림 IV-3] PV와 일사량의 상관관계(전남)

그 결과 상관계수는 각각 0.88, 0.84, 0.90으로 평가되었다. 따라서 본 연구의 분석결과에서 보는 바와 같이, 태양광 발전량과 해당 지역 일사량은 선형적인 상관성이 높게 나타났으며, 본 연구에서 활용한 태양광 발전량 자료의 정상성이 확인되었다.

제2절 PV-BESS 경제성 분석

한편, PV-BESS 연계 시 경제성 확보의 판단기준은 태양광발전 단독운전의 LCOE 보다 낮은 경우로 분석할 수 있다. 앞서 3장에서 제시한 LCOE 계산식 및 2018년 산업통사자원부의 신재생에너지 백서를 참조하여 전제조건을 토대로 LCOE값을 산출하여 비교 분석 하였다.

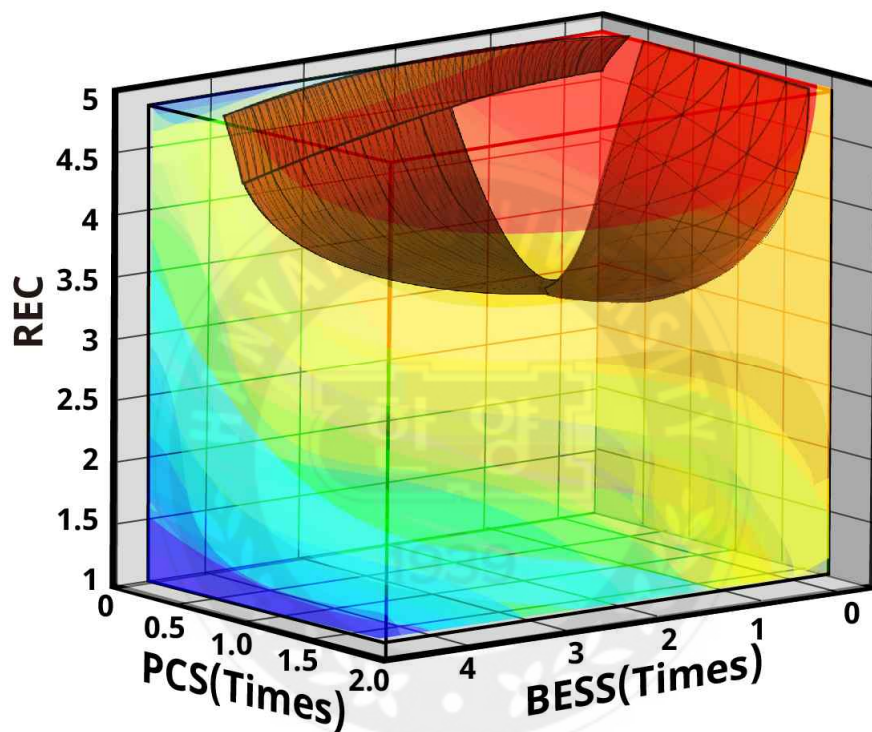
$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{n=1}^T \frac{OPEX}{(1+r)^n}}{\sum_{n=1}^T \frac{(1-d)^n \times P}{(1+r)^n}}$$

<표 IV-7> LCOE 전제조건

구분		PV단독	PV-BESS 연계 시		
		PV	PV	BESS	PCS
CAPEX	초기투자비용(원/kw)	1,659,000	1,659,000	500,000	290,000
OPEX	유지보수비용(원/kW)	CAPEX 3%	CAPEX 3%	CAPEX 3%	CAPEX 2%
r	할인율(%)	4.5	4.5	4.5	4.5
T	설비수명(Years)	20	20	15	15
d	성능감소율	0.6	0.6	0.6	1.9

2.1 REC 가중치에 따른 LCOE 분석(제주)

제주 지역의 REC 가중치에 따른 PV 용량 대비 PCS 및 BESS 용량비의 LCOE 분석결과를 [그림 IV-4]와 같이 3차원 곡면으로 나타내었다.



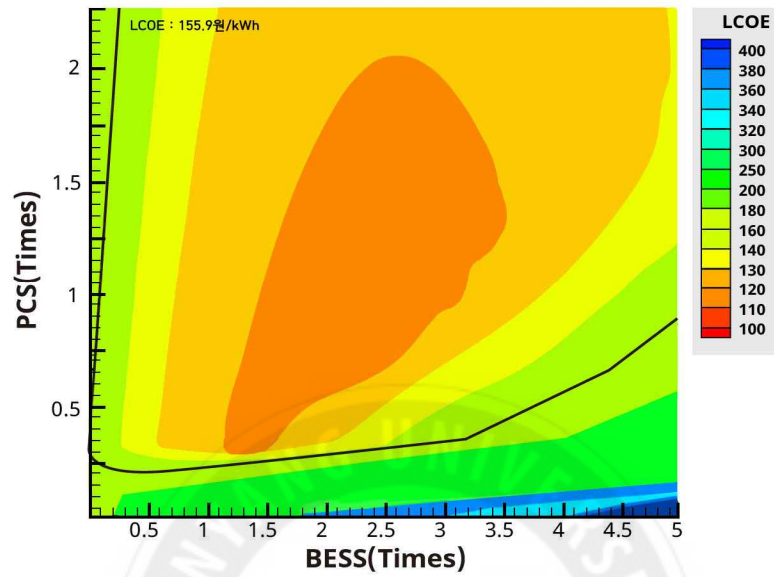
[그림 IV-4] REC 가중치에 따른 PCS 및 BESS 용량별 LCOE(제주)

BESS 연계에 따른 경제성 확보의 판단기준은 태양광발전 단독 시스템의 LCOE 보다 낮은 경우로 판단할 수 있다. 제주 지역의 태양광발전 단독 시스템일 경우의 LCOE는 155.9원/kWh으로 분석되었습니다. 경제성 확보의 판단 기준이 되는 태양광발전 단독 시스템의 LCOE는 빨간색으로 표현한 상부의 곡면이며 그 곡면의 상부에 포함되면 경제성이 있다고 분석하였다. REC가중치에 따른 PV 용량대비 PCS 및 BESS 용량비에 따른 LCOE는 <표 IV-8>로 나타나며 [그림 IV-4] 수평단면으로 분석되었다.

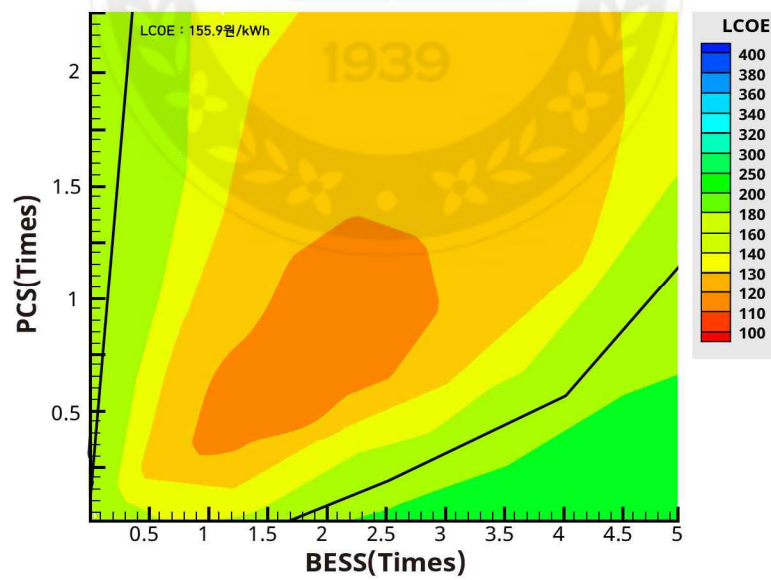


<표 IV-8> REC 가중치 5.0일 때 LCOE(제주)

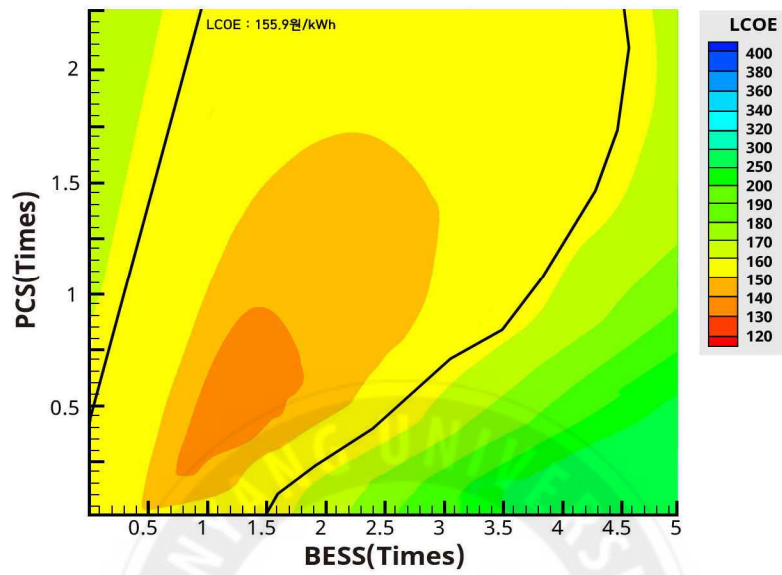
		BESS									
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
P C S	0.1	251.14	256.1	284.55	297.26	325.49	342.52	361.89	385.47	401.45	408.15
	0.2	208.42	204.69	200.78	198.15	224.78	234.1	258.89	337.81	351.58	378.51
	0.3	168.46	162.18	158.74	157.62	183.45	218.54	256.32	304.98	315.24	335.14
	0.4	139.13	129.69	119.92	138.61	167.12	186.32	204.29	248.32	279.32	297.98
	0.5	138.67	128.78	119.15	135.69	160.18	141.89	157.15	207.25	237.75	253.78
	0.6	138.01	128.12	119.22	125.87	153.15	138.93	144.23	194.25	215.55	214.58
	0.7	137.96	127.68	119.12	118.41	119.21	134.12	139.69	168.15	189.12	192.14
	0.8	137.22	127.15	119.32	118.22	118.32	124.89	137.58	159.45	175.96	187.22
	0.9	136.17	126.14	119.74	117.57	117.51	120.48	134.15	144.89	159.78	176.36
	1	135.12	125.32	119.2	117.99	117.54	118.51	128.14	135.32	140.74	162.14
	1.1	135.78	124.51	119.65	118.25	117.59	118.33	126.89	132.11	139.55	151.77
	1.2	139.48	125.87	119.32	117.59	117.77	117.23	124.28	130.17	138.14	148.94
	1.3	142.36	126.12	121.18	119.14	117.98	117.78	119.98	127.12	137.15	138.45
	1.4	147.47	126.89	122.37	119.25	118.12	118.43	119.25	124.23	136.71	137.14
	1.5	148.62	127.15	123.75	119.29	118.44	118.5	119.66	123.88	133.14	136.79
	1.6	149.57	127.55	124.51	119.35	118.57	118.78	120.78	122.14	129.77	135.77
	1.7	150.86	128.1	125.97	119.87	118.87	119.14	121.01	121.39	128.55	135.32
	1.8	151.53	128.67	126.62	119.98	118.96	119.32	121.87	121.15	125.87	134.99
	1.9	152.14	129.24	127.12	121.48	119.11	121.1	122.72	123.54	123.14	134.41
	2	152.98	129.75	127.85	123.92	119.42	122.14	123.15	125.78	125.47	133.74
	2.1	153.24	130.12	128.41	124.27	119.57	122.95	123.68	127.45	126.87	132.36
	2.2	154.57	131.59	129.1	125.55	122.41	123.14	124.77	126.35	128.12	131.94



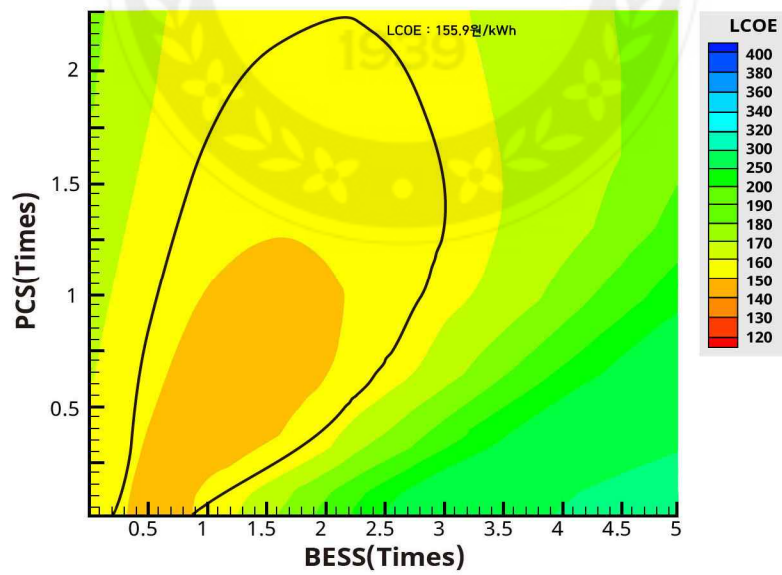
[그림 IV-5] REC 가중치 5.0 PCS 및 BESS 용량비(제주)



[그림 IV-6] REC 가중치 4.5 PCS 및 BESS 용량비(제주)



[그림 IV-7] REC 가중치 4.0 PCS 및 BESS 용량비(제주)

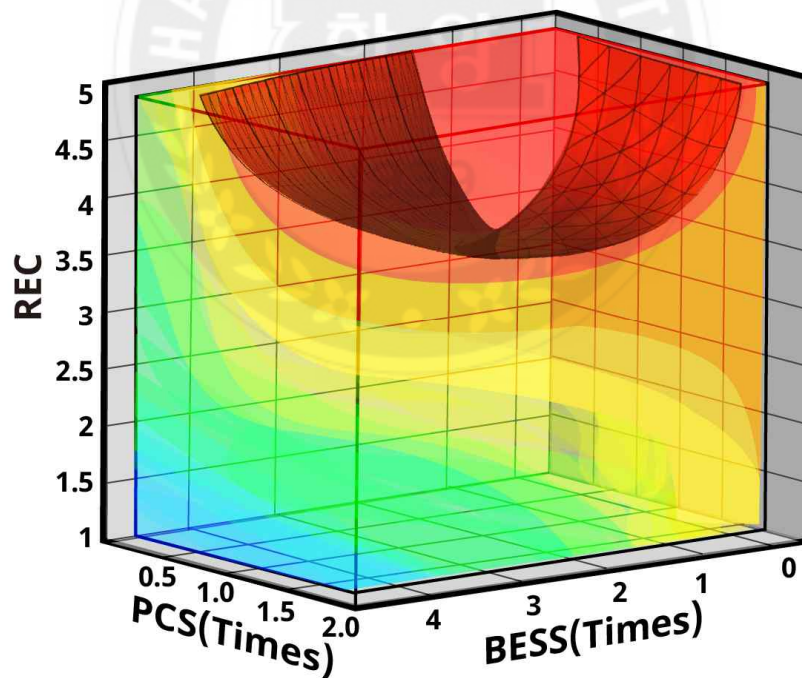


[그림 IV-8] REC 가중치 3.5 PCS 및 BESS 용량비(제주)

REC 가중치가 5.0일 때 경제성 판단 기준이 되는 PV 단독 시스템 LCOE를 실선으로 표현하면 아래그림으로 나타낼 수 있으며 BESS 연계 시 실선의 내부에 해당하는 LCOE일 경우 경제성 확보가 가능하다고 분석하였습니다. REC 가중치 5.0에서 가장 경제성이 높은 PCS, BESS용량 비는 LCOE가 가장 작은 경우이며, 117.5원/kWh으로, 그때의 PCS, BESS 최적용량 비는 제주 PCS 0.8 배, BESS 2.6배로 분석되었다.

2.2 REC 가중치에 따른 LCOE 분석(경북)

경북 지역의 REC 가중치에 따른 PV 용량 대비 PCS 및 BESS 용량비의 LCOE 분석결과를 [그림 IV-9]와 같이 3차원 곡면으로 나타내었다.



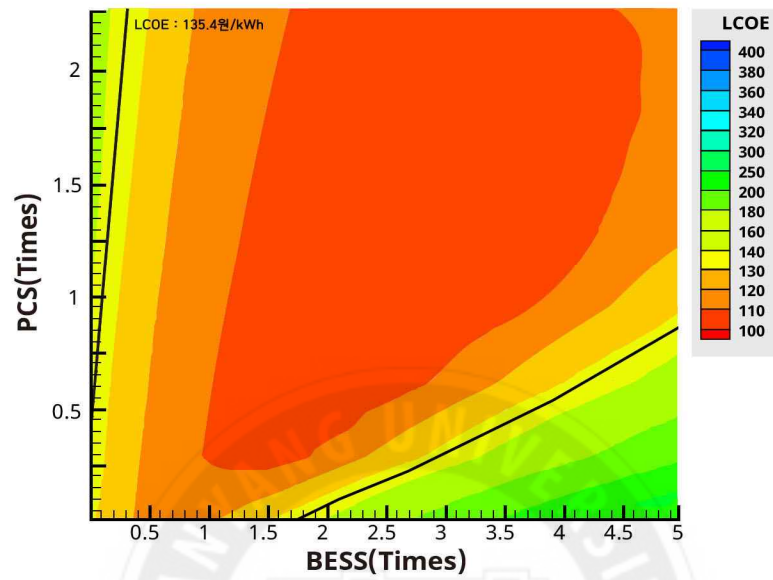
[그림 IV-9] REC 가중치에 따른 PCS 및 BESS 용량별 LCOE(경북)

BESS 연계에 따른 경제성 확보의 판단기준은 태양광발전 단독 시스템의 LCOE 보다 낮은 경우로 판단할 수 있다. 경북 지역의 태양광발전 단독 시스템일 경우의 LCOE는 135.4원/kWh으로 분석되었습니다. 경제성 확보의 판단 기준이 되는 태양광발전 단독 시스템의 LCOE는 빨간색으로 표현한 상부의 곡면이며 그 곡면의 상부에 포함되면 경제성이 있다고 분석하였다. REC가중치에 따른 PV 용량대비 PCS 및 BESS 용량비에 따른 LCOE는 <표 IV-9>로 나타나며 [그림 IV-9] 수평단면으로 분석되었다.

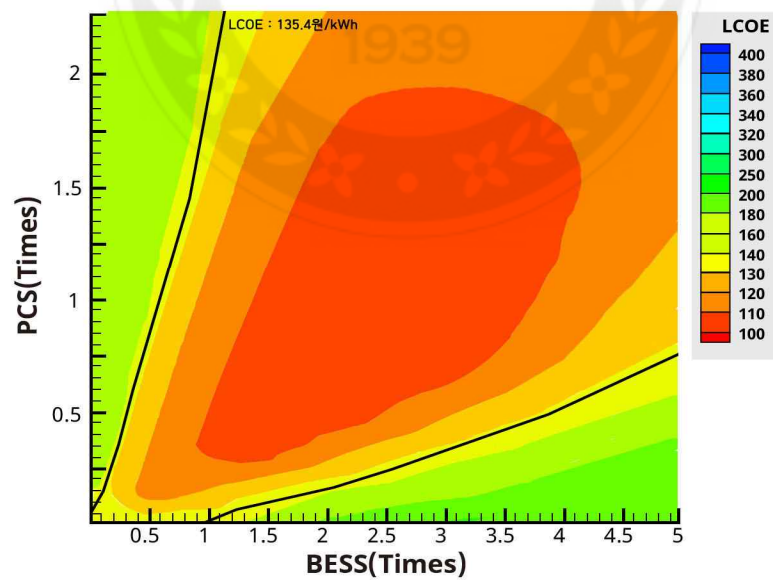


<표 IV-9> REC 가중치가 5.0 기준 LCOE(경북)

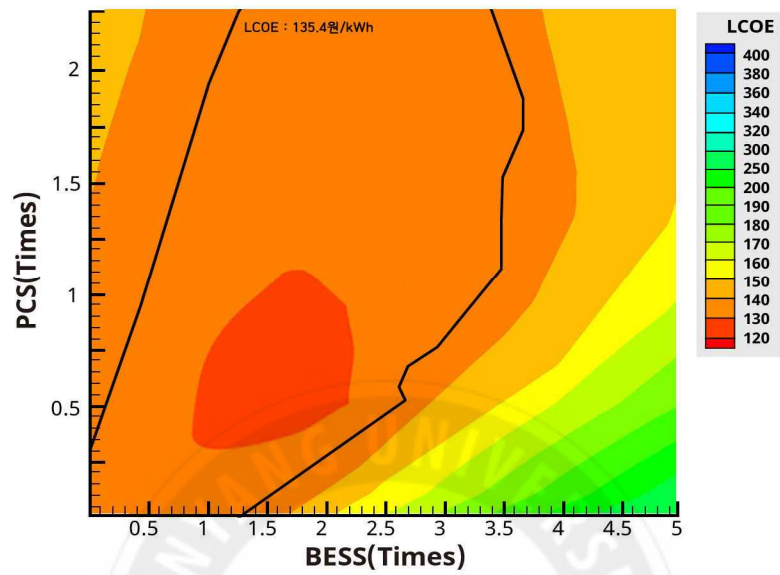
		BESS									
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
P C S	0.1	121.52	123.53	135.75	158.92	169.56	178.74	186.09	210.18	227.49	238.51
	0.2	115.44	118.95	127.33	135.64	147.05	157.65	169.31	201.05	212.61	217.92
	0.3	110.87	111.15	112.12	128.15	135.58	148.14	157.67	192.85	192.58	209.48
	0.4	114.12	109.02	108.9	109.88	110.52	137.77	142.11	185.71	189.01	205.92
	0.5	115.12	111.15	107.63	106.19	106.18	135.68	139.32	162.25	167.17	171.48
	0.6	117.33	111.42	107.23	105.92	105.77	127.36	135.21	151.01	159.99	162.19
	0.7	119.57	112.25	106.95	105.51	105.51	105.15	135.7	146.44	153.17	154.11
	0.8	120.41	112.83	106.69	104.52	104.18	104.22	124.21	137.28	142.75	148.09
	0.9	121.07	113.84	106.01	104.61	103.42	104.12	105.12	135.44	137.47	142.44
	1	122.24	114.25	105.26	104.72	104.13	105.2	105.59	116.19	135.04	137.85
	1.1	122.74	115.78	105.91	104.95	105.29	105.57	106.31	106.41	129.12	135.55
	1.2	123.58	116.43	106.41	105.52	105.47	106.37	106.76	107.25	126.58	133.43
	1.3	124.21	116.96	106.89	105.9	106.52	106.95	106.9	107.55	108.19	131.94
	1.4	124.25	117.12	107.15	106.32	106.15	107.14	107.11	107.89	108.82	130.01
	1.5	124.9	117.55	107.85	106.54	106.84	107.82	107.78	108.22	109.48	129.58
	1.6	125.31	118.47	108.17	106.91	107.35	108.17	108.22	108.9	109.99	127.92
	1.7	125.87	118.8	108.85	107.25	107.96	108.47	108.81	109.01	110.31	127.25
	1.8	126.22	119.12	109.66	107.85	108.42	109.56	109.2	109.76	110.8	126.87
	1.9	126.89	120.55	111.72	108.28	108.88	109.47	110.11	110.42	111.25	126.02
	2	127.39	122.89	115.12	108.94	109.15	110.12	110.88	110.88	112.84	125.91
	2.1	128.92	125.12	120.96	109.23	109.72	110.84	111.02	111.12	119.41	124.12
	2.2	129.77	128.87	125.55	109.84	110.78	111.36	111.71	112.87	118.58	122.74



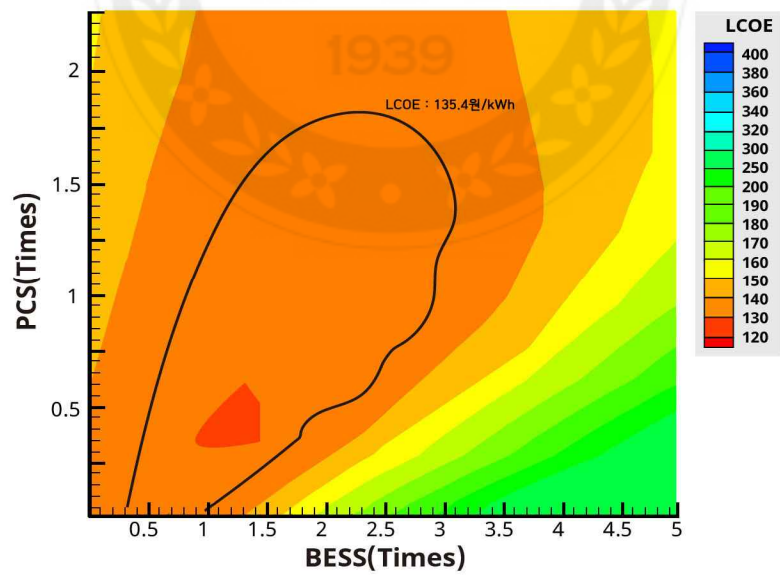
[그림 IV-10] REC 가중치 5.0 PCS 및 BESS 용량비(경북)



[그림 IV-11] REC 가중치 4.5 PCS 및 BESS 용량비(경북)



[그림 IV-12] REC 가중치 4.0 PCS 및 BESS 용량비(경북)

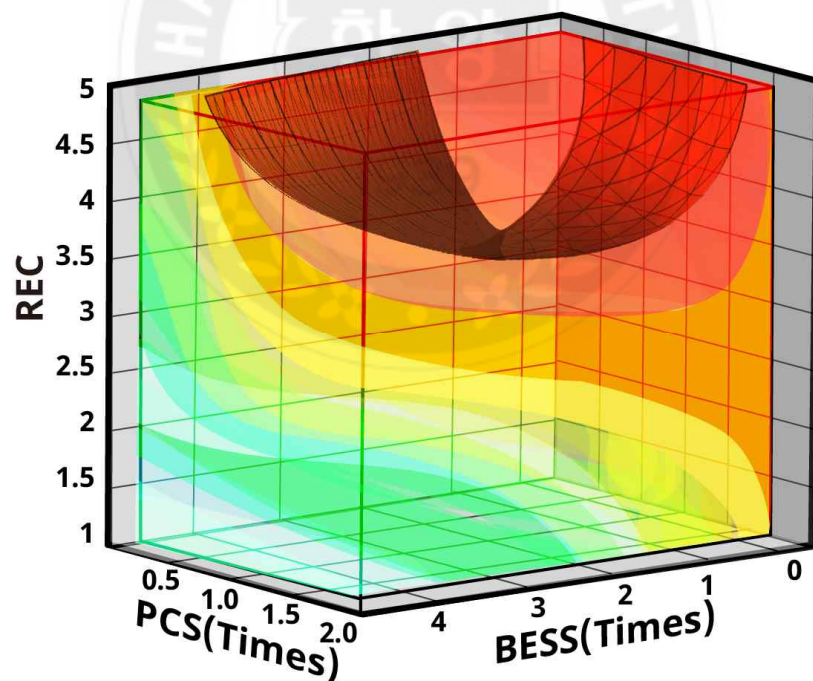


[그림 IV-13] REC 가중치 3.5 PCS 및 BESS 용량비(경북)

REC 가중치가 5.0일 때 경제성 판단 기준이 되는 PV 단독 시스템 LCOE를 실선으로 표현하면 아래그림으로 나타낼 수 있으며 BESS 연계 시 실선의 내부에 해당하는 LCOE일 경우 경제성 확보가 가능하다고 분석하였다. REC 가중치 5.0에서 가장 경제성이 높은 PCS, BESS용량 비는 LCOE가 가장 작은 경우이며, 103.95원/kWh으로, 그때의 PCS, BESS 최적용량 비는 PCS 0.8배, BESS 2.8배로 분석되었다.

2.3 REC 가중치에 따른 LCOE 분석(전남)

전남 지역의 REC 가중치에 따른 PV 용량 대비 PCS 및 BESS 용량비의 LCOE 분석결과를 [그림 IV-14]와 같이 3차원 곡면으로 나타내었다.



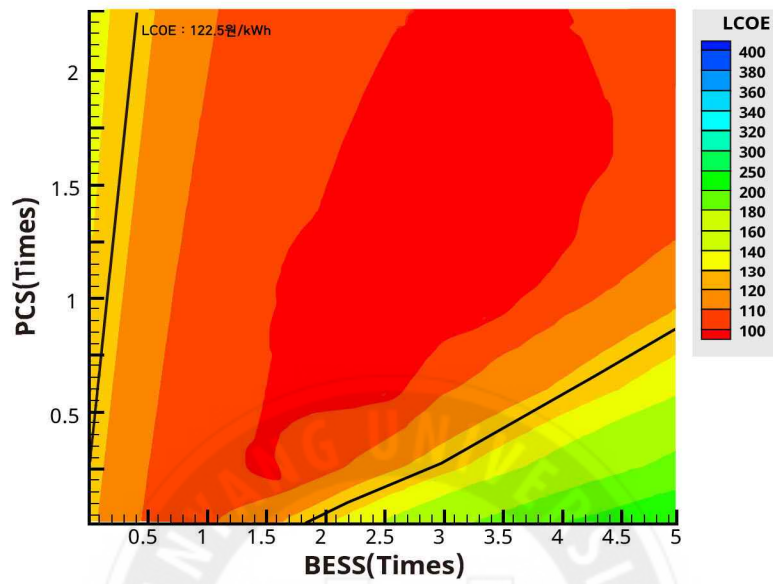
[그림 IV-14] REC 가중치에 따른 PCS 및 BESS 용량별 LCOE(전남)

BESS 연계에 따른 경제성 확보의 판단기준은 태양광발전 단독 시스템의 LCOE 보다 낮은 경우로 판단할 수 있다. 전남 지역의 태양광발전 단독 시스템일 경우의 LCOE는 122.5원/kWh으로 분석되었습니다. 경제성 확보의 판단 기준이 되는 태양광발전 단독 시스템의 LCOE는 빨간색으로 표현한 상부의 곡면이며 그 곡면의 상부에 포함되면 경제성이 있다고 분석하였다. REC가중치에 따른 PV 용량대비 PCS 및 BESS 용량비에 따른 LCOE는 <표 IV-10>로 나타나며 [그림 IV-14] 수평단면으로 분석되었다.

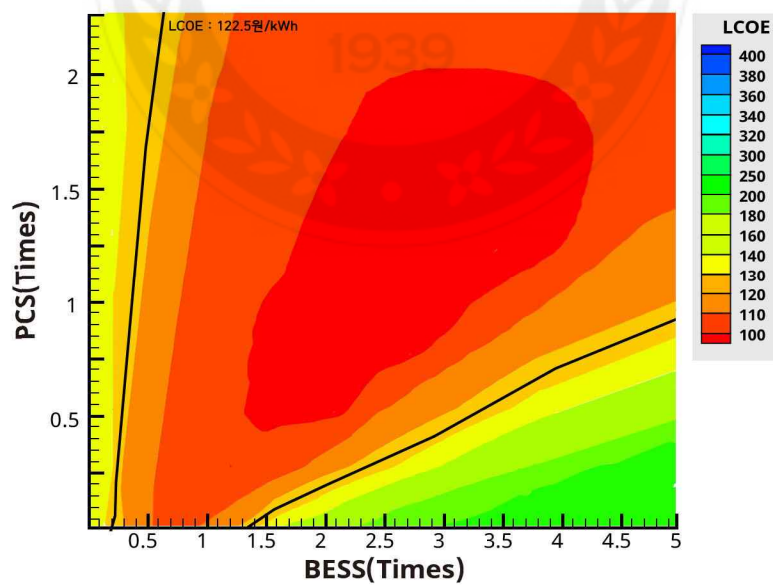


<표 IV-10> REC 가중치가 5.0 기준 LCOE(전남)

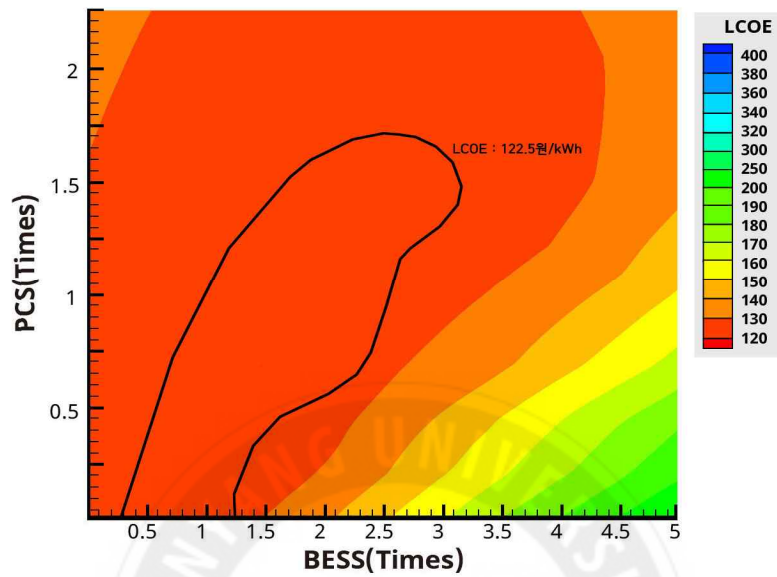
		BESS									
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
P C S	0.1	120.31	121.68	122.72	129.57	135.67	151.12	176.43	207.74	237.37	251.15
	0.2	120.13	120.49	121.58	122.74	131.12	144.67	169.79	201.99	225.97	236.96
	0.3	119.88	119.91	115.49	118.73	127.06	136.18	158.92	195.13	211.96	219.28
	0.4	119.32	112.51	108.91	112.89	122.77	131.09	147.71	189.86	197.23	201.7
	0.5	118.59	110.85	104.52	107.01	115.61	122.78	140.81	177.21	182.9	189.07
	0.6	117.99	107.09	103.95	103.12	106.96	118.61	131.6	140.92	145.06	151.82
	0.7	117.15	105.18	103.21	100.98	101.44	105.88	122.81	132.33	140.82	142.57
	0.8	116.89	104.55	102.51	99.16	97.12	99.24	109.65	122.83	131.67	134.79
	0.9	116.35	103.9	102.67	100.55	99.87	99.45	107.61	111.52	122.85	129.88
	1	115.88	102.12	103.33	101.82	101.17	100.21	106.88	110.78	115.52	122.87
	1.1	115.11	107.56	103.79	103.91	102.33	101.51	106.31	109.68	112.96	119.16
	1.2	114.78	108.12	104.58	104.57	103.75	102.22	105.6	107.12	111.08	116.7
	1.3	114.69	108.58	106.99	105.13	104.31	103.16	104.12	106.69	110.28	114.08
	1.4	114.21	110.25	106.12	106.95	104.13	103.85	105.71	107.88	109.58	110.16
	1.5	113.84	111.56	108.95	107.65	105.95	104.22	106.17	107.23	108.55	111.78
	1.6	112.97	113.12	109.99	107.9	106.91	104.88	107.91	108.66	107.13	112.11
	1.7	112.65	114.56	110.51	108.31	106.94	105.71	108.92	109.93	108.89	112.5
	1.8	112.21	115.11	111.15	108.88	108.97	106.9	108.61	109.61	108.27	113.31
	1.9	111.57	116.95	113.77	109.51	109.14	107.58	109.84	110.97	109.89	113.97
	2	110.87	117.61	114.19	109.84	110.95	108.51	109.44	111.77	110.33	114.57
	2.1	110.25	118.9	115.67	110.55	111.11	109.77	110.97	112.55	112.77	115.21
	2.2	109.51	119.56	116.15	111.18	112.61	110.59	111.44	112.68	114.57	115.9



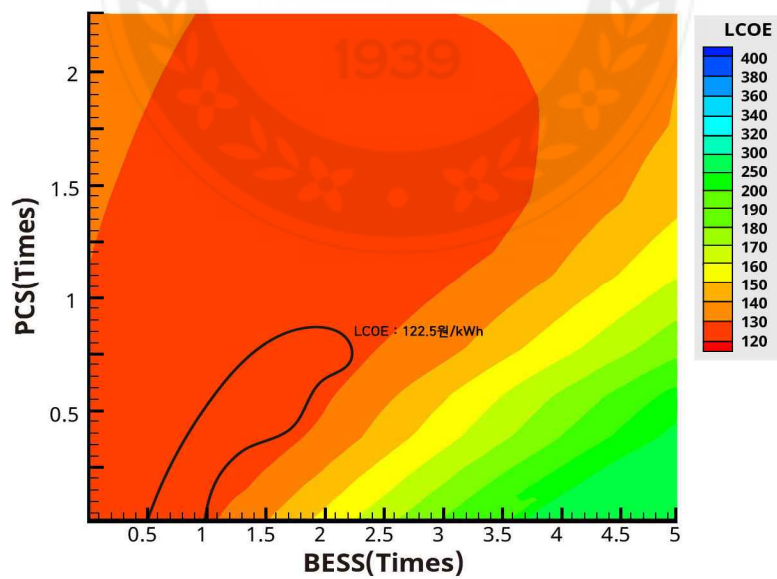
[그림 IV-15] REC 가중치 5.0 PCS 및 BESS 용량비(전남)



[그림 IV-16] REC 가중치 4.5 PCS 및 BESS 용량비(전남)



[그림 IV-17] REC 가중치 4.0 PCS 및 BESS 용량비(전남)

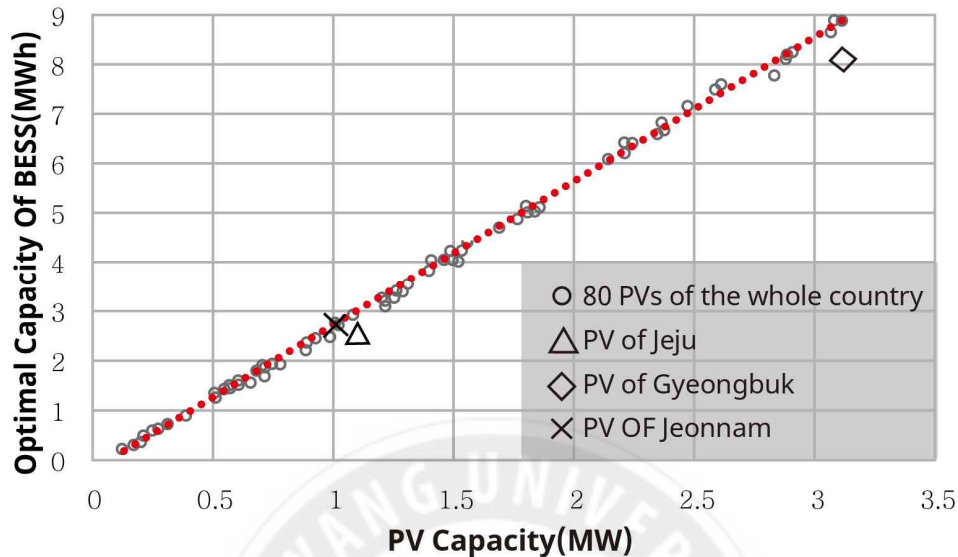


[그림 IV-18] REC 가중치 3.5 PCS 및 BESS 용량비(전남)

REC 가중치가 5.0일 때 경제성 판단 기준이 되는 PV 단독 시스템 LCOE를 실선으로 표현하면 아래그림으로 나타낼 수 있으며 BESS 연계 시 실선의 내부에 해당하는 LCOE일 경우 경제성 확보가 가능하다고 분석하였다. REC 가중치 5.0에서 가장 경제성이 높은 PCS, BESS용량 비는 LCOE가 가장 작은 경우이며, 98.72원/kWh으로, 그때의 PCS, BESS 최적용량 비는 PCS 0.8배, BESS 2.9배로 분석되었다.

제3절 PV-BESS 최적용량 분석

REC 가중치 5.0일 경우 BESS의 최적용량을 분석하기 위하여 앞서 제주, 경북, 전남의 참조사례에서 PCS 용량비 약 0.9~1.0배가 최적용량임이 분석되었기 때문에 PCS 최적용량을 태양광발전 용량의 1.0배로 고정하였다. [그림 IV-10]은 2018년 신규 설치된 전국 태양광발전소 80개소에 대해 태양광발전 용량 대비 BESS 최적용량을 계산하여 분석하고 회귀분석 결과이다. 그래프에서 확인되듯이 PV 용량과 BESS 최적용량은 선형적 상관성이 나타났다. 따라서 REC 가중치 5.0이고 PCS 용량비가 1.0배일 때 BESS 최적용량은 태양광발전 용량의 약 2.8배인 것으로 분석되었다.



[그림 IV-19] PV 용량과 최적 BESS용량 상관관계

위 그래프 결과가 의미하는 바는, BESS 최적용량은 일사량 조건에 큰 영향이 없이 전국적으로 일정한 비율(약 2.8)이라는 것을 의미한다. 참고로 일사량 최저-제주, 평균-경북, 최고-전남을 별도로 표시하였다. 본 연구에서는 앞서 분석한 전국 태양광발전 BESS 연계 시 가장 경제성이 높은 BESS 최적용량 분석결과 외 본 연구 조사대상 3개 지역에 대해 REC 가중치 5.0 기준 BESS 연계 시 가장 경제성이 높은 BESS 최적용량을 분석하였으며, 그 결과를 <표 IV-11>에 제시하였다. <표 IV-11>에서 보는 바와 같이, 제주도의 경우 PV 용량 대비 BESS 용량이 2.6배 일 때 LCOE값이 117.51원/kWh로서 가장 낮은 값을 보여주었다. 경상북도의 경우 PV 용량 대비 BESS 용량이 2.8배 일 때 LCOE값이 103.95원/kWh로서 가장 낮은 값을 보여주었다. 한편, 전라남도의 경우 PV 용량 대비 BESS 용량이 2.9배 일 때 LCOE값이 98.72원/kWh으로 나타남으로써 가장 낮은 값을 보여주었다.

<표 IV-11> BESS 연계 시 가장 경제성이 높은 BESS 최적용량 분석

지역	REC 가중치	LCOE(원/kWh)	PV 용량대비 BESS	PV 단독 LCOE
제주	5.0	117.51	2.6	155.9
경북	5.0	103.95	2.8	135.4
전남	5.0	98.72	2.9	122.5

제4절 REC 가중치 민감도 분석

4.1 REC 가중치 감소별 경제성 분석

PV-BESS 시스템에 적용되는 REC 가중치는 향후 지속적으로 낮아질 예정이다. <표 IV-12>에 REC 가중치의 단계별 감소에 따라 경제성이 확보될 수 있는 PCS 및 BESS의 최적용량에 대한 민감도 평가 결과를 분석하였다. 경제성이 보장되는 REC 가중치 최저값은 각각 제주 3.5 경북 3.5 전남 3.0로 분석되었으며, REC 가중치가 감소함에 따라 PCS 및 BESS의 최적용량도 감소하는 경향이 나타난다. 만일 REC 가중치 4.0일 때 PV-BESS 시스템을 설치하는 경우라면 제주의 경우 PCS와 BESS 최적용량은 태양광발전 용량의 각각 0.6배와 1.9배로, 이는 REC 가중치 5.0 BESS 최적용량에 비해 75%로 줄어들게 되는 것이다.

<표 IV-12> 지역별 REC 가중치에 따른 경제성 평가

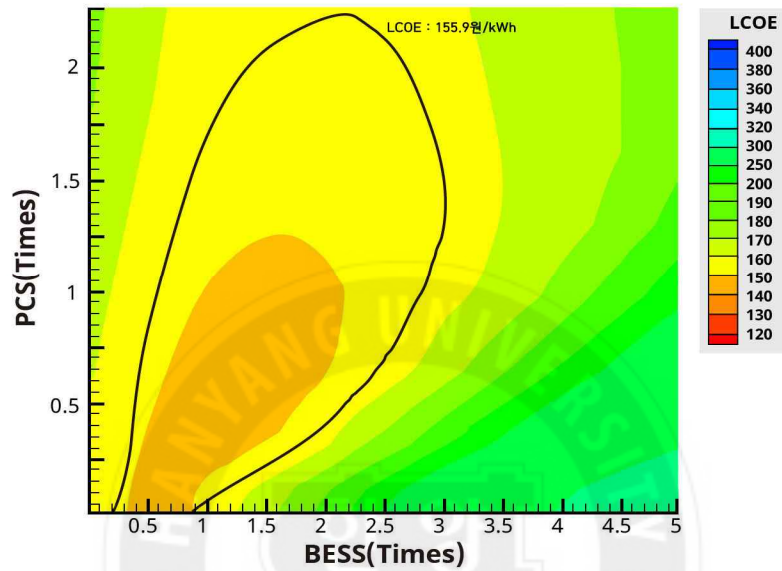
지역	REC 가중치	LCOE(원/kWh)	Capacity ratio(PV)		경제성평가
			PCS	BESS	
제주	5.0	117.51	0.8	2.6	○
	4.5	126.60	0.7	2.3	○
	4.0	137.78	0.6	1.9	○
	3.5	148.82	0.5	1.3	○
	3.0	156.94	0.4	0.6	×
	2.5	159.71	0.3	0.1	×
	2.0	160.69	0.2	0.1	×
	1.5	162.27	0.1	0.1	×
	1.0	163.89	0.1	0.1	×
경북	5.0	103.95	0.8	2.8	○
	4.5	112.43	0.7	2.6	○
	4.0	120.69	0.6	2.1	○
	3.5	126.17	0.5	1.4	○
	3.0	136.32	0.4	0.6	×
	2.5	138.68	0.3	0.1	×
	2.0	139.88	0.2	0.1	×
	1.5	141.09	0.1	0.1	×
	1.0	142.33	0.1	0.1	×
전남	5.0	98.72	0.8	2.9	○
	4.5	104.50	0.7	2.5	○
	4.0	112.93	0.6	2.1	○
	3.5	117.50	0.5	0.7	○
	3.0	122.10	0.4	0.1	○
	2.5	125.07	0.3	0.1	×
	2.0	127.06	0.2	0.1	×
	1.5	128.07	0.1	0.1	×
	1.0	129.09	0.1	0.1	×

155.9

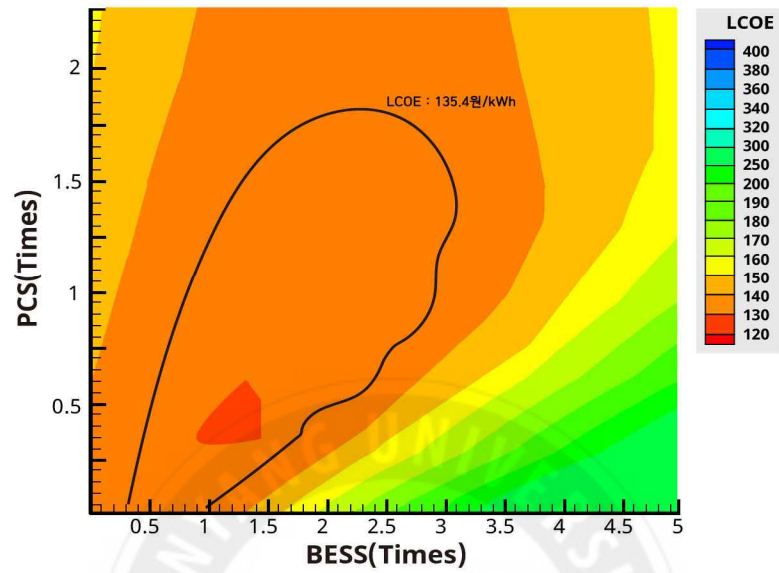
135.4

122.5

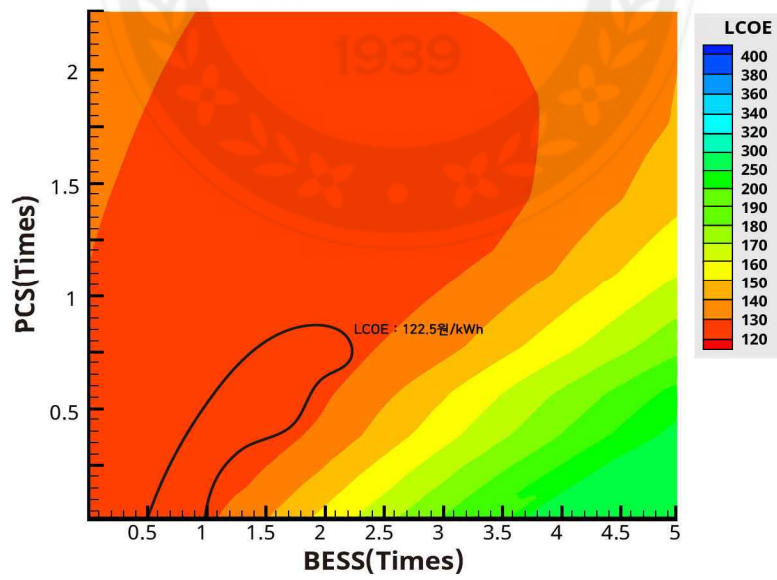
[그림 IV-20]~[그림 IV-22]은 REC 가중치가 3.5로 하향조정 되었을 때의 PCS 및 BESS 용량에 따른 각 지역의 LCOE 민감도 평가결과이다.



[그림 IV-20] REC 가중치가 3.5 PV의 PCS 및 BESS 용량비(제주)



[그림 IV-21] REC 가중치가 3.5 PV의 PCS 및 BESS 용량비(경북)



[그림 IV-22] REC 가중치가 3.5 PV의 PCS 및 BESS 용량비(전남)

경제성이 보장되는 PCS 및 BESS 용량 범위의 면적은 제주, 경북, 전남 순으로 분석되었다. 이 범위의 면적은 일사량과 상관관계가 있다. 전국에서 일사량이 가장 낮은 제주는 다른 지역에 비해 태양광 발전 수익성이 낮아 BESS에 의한 수익성 증대 효과가 커서 용량범위가 넓다.

4.2 BESS 비용 감소별 경제성 분석

경제성분석에서 민감도에 관계되는 것은 BESS의 배터리 가격이다. BESS 용량 계산에서 중요한 변수는 배터리의 가격이므로 리튬이온 배터리 가격을 조사하여 <표 IV-13>과 같이 나타내었다. BESS 금액은 시장 규모의 확대와 기술 발전으로 매년 큰 폭으로 가격이 감소하고 있으며 가격이 하락률을 예측한 선행연구를 참조하였다. <표 IV-13>에서와 같이 BESS의 경우 매년 5~7%의 비율로 가격이 하락하고 있다.

<표 IV-13> 리튬이온 배터리 가격 변경 팩터[\$/kWh]

연도구분	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
기준 팩터	302	282	262	245	228	212	197
18년 기준 가격 하락 비율	1	0.93	0.87	0.81	0.75	0.70	0.65

제주의 경우 <표 IV-12>에서 보는 바와 같이, BESS와 PCS 설치비용의 변동이 없다면 REC 가중치가 3.5까지는 태양광발전 단독보다 BESS를 연계해서 운영하는 것이 경제성이 높은 것으로 분석되었다. 한편, REC 가중치가 3.0, 2.5, 2.0로 감소하는 경우, 설치비용을 변화시킴으로써 LCOE를 산정하였다.

<표 IV-14> 설치비에 절감으로 인한 PV-BESS LCOE(제주)

	REC 가중치 3.0	REC 가중치 2.5	REC 가중치 2.0
설치비용 90%	156.1	158.7	159.4
설치비용 80%	155.3	157.2	157.9
설치비용 70%	-	155.9	156.2
설치비용 60%	-	-	154.8

분석결과, REC 가중치가 3.0으로 감소하는 경우에는 BESS와 PCS 설치비용이 현재 연구에 사용된 설치비용의 80%로 감소하는 경우 경제성이 발생하였다.

<표 IV-15> 설치비에 절감으로 인한 PV-BESS LCOE(경북)

	REC 가중치 3.0	REC 가중치 2.5	REC 가중치 2.0
설치비용 90%	135.9	137.5	139.1
설치비용 80%	135.1	136.1	138.5
설치비용 70%	-	135.2	137.3
설치비용 60%	-	-	135.3

분석결과, REC 가중치가 3.0으로 감소하는 경우에는 BESS와 PCS 설치비용이 현재 연구에 사용된 설치비용의 80%로 감소하는 경우 경제성이 발생하였다.

<표 IV-16> 설치비에 절감으로 인한 PV-BESS LCOE(전남)

	REC 가중치 2.5	REC 가중치 2.0	REC 가중치 1.5
설치비용 90%	124.5	126.8	127.3
설치비용 80%	123.9	125.4	126.5
설치비용 70%	122.2	123.3	124.9
설치비용 60%	-	122.1	122.4
설치비용 50%	-	-	121.6

분석결과, REC 가중치가 2.5로 감소하는 경우에는 BESS와 PCS 설치비용이 현재 연구에 사용된 설치비용의 70%로 감소하는 경우 경제성이 발생하였다. 설비용량의 비중이 작을수록 큰 설치비 감소가 있어야 경제성이 있는 것으로 분석되었다. 우리나라의 전력시장은 일본, 미국 등 선진국의 시장규모에 비해 규모가 작고, 정부정책에 따라 전기요금의 생산단가는 소비자 요금보다 낮다. 따라서 신재생에너지의 보급과 활성화는 정부의 정책적 고려 없이는 이루어 질 수 없다.

제5장 결 론

본 연구에서는 실제 국내에서 가동 중인 태양광발전(PV)의 발전량 실적자료를 토대로 하여 국내 주요 3개 지역(제주, 경북, 전남)을 대상으로 PV-ESS 시스템에 대한 경제성 평가를 수행하고, 이를 통해 에너지저장시스템(ESS)의 최적의 설비 용량을 산정하는데 목적이 있다. 이를 위해 실제 가동 중인 PV의 2018년도 KPX 거래량을 이용하여 연구를 진행하였다. 일사량에 따른 PCS와 BESS의 최적용량을 산정하기 위해서 PV가 설치된 위치의 일사량을 비교하여 최저, 최대, 평균값의 일사량을 가지는 PV를 선정하여 진행하였다. 경제성 분석을 위한 PV 전제조건은 태양광 발전 균등화 비용에 대한 연구 자료인 한국전력거래소 자료를 활용하여 본 연구에서는 2018년도 기준 PV의 설치비용을 1,600천원/kW으로 가정하였고, OPEX의 경우 CAPEX의 2%로 가정하여 분석을 수행하였다. PV-BESS 시스템의 경제성 분석을 위한 전제조건을 PV, 배터리, PCS로 나누어 LCOE값을 평가하였다. 조사대상 지역 태양광 발전소에 대해 REC 가중치를 5.0과 3.5로 설정하였고, PCS 용량은 PV 용량의 0.1배에서 2.0배까지, BESS 용량은 PV 용량의 0.5배에서 5.0배 범위에 대해 3개 지역 PV에 대하여 MATLAB 프로그램을 활용하여 각각의 REC 가중치의 경우를 가정하여 허용 가능한 PCS용량과 BESS 용량을 분석하였다.

그 결과 다음과 같은 주요 결과를 도출하였다.

1. REC 가중치 5.0일 때, PCS 및 BESS의 최적용량은 제주는 PV용량대비 2.6배, 경북은 PV용량대비 2.8배, 전남은 PV용량대비 2.9배로 분석되었다. 또한 일사량 조건에 따른 변동은 크지 않은 것으로 나타났다.
2. 전국적으로 일사량이 최저, 평균, 최고인 제주, 경북, 전남 참조사례로부터, 일사량이 낮을수록 BESS 연계에 의한 경제성 향상 효과가 크다는 것을 확인하였다. REC 가중치가 제주 3.0, 경북 3.5, 전남 3.5 이하로 조

정될 경우 PV 단독운전 대비 경제적 이득은 없어지는 것으로 예측되었다. 그리고 현재 설치비의 80%로 감소하는 경우 경제성이 있는 것으로 분석되었다.

3. REC 가중치 5.0은 PV-BESS 시스템의 수익성을 보장하기 위해 상당히 높게 설정되었기 때문에 대부분의 PCS, BESS 용량조합에서 경제성이 확보되는 것으로 분석되었다. REC 가중치 5.0에서 4.0으로 감소될 때 제주지역 BESS의 최적용량은 REC 가중치 5.0 대비 75% 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구는 기존의 연구가 주로 특정 지역에 대한 태양광발전 자료를 토대로 ESS 경제성 평가 및 최적 용량을 분석한 것에 비해 태양광발전소가 위치한 전국의 모든 지역을 조사하고 일조량을 통해 일조량이 최대인 지역, 평균지역, 최소인 지역을 선정함으로써 3개 지역에 대한 분석을 통해 국내 전체 태양광 발전소에 대한 대표성을 확보하고자 하였다. 따라서 연구결과의 지역적 제한 없이 보다 일반화된 연구를 제시하였다는 점에서 연구의 의의를 찾을 수 있다. 현재 정부 정책에 기반을 두어 보급이 확대되고 있는 지상 태양광 발전의 발전단가(LCOE)를 일사량 및 REC가중치를 통해 분석결과를 제시함으로써 신재생에너지 시장의 투명성을 제고하고 관련정책수립에 기여하고자 한다. 추후 REC 가중치 감소 정책에 이러한 결과가 반영되어 PV-BESS 연계 정책의 건전한 성장을 유도하여 시장 확대 및 보급에 활용할 수 있다.

참고문헌

- [1] 산업통상자원부, 법률 제 14670 호 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법(신재생에너지법)」, 시행 2017.09.22.
- [2] MOTIE, “Guidelines for management and operation for supply obligation of renewable energy and fuel mix.: (appendix 2) weight by renewable energy source,” 2016.
- [3] 최재훈. 에너지 저장 장치의 기술 경제적 가치 분석. 서강대학교 기술경영전문대학원 석사학위논문, 2014.
- [4] 허남욱, 김경남, 이관영. 도서지역의 태양광과 에너지저장시스템을 활용한 경제성 분석: 흑산도의 사례 연구. 한국도서연구, 26(3), 41-62, 2014.
- [5] 백자현. 유전자알고리즘을 활용한 BESS의 용량 최적화 및 경제성 평가에 관한 연구. 상명대학교 대학원 석사학위논문, 2017.
- [6] 이여진, 김성열, 한세경. 경제성 평가를 통한 태양광발전시스템 연계형 에너지저장장치 용량 선정에 관한 연구. 전기학회논문지. 67(1), 21-26, 2018.
- [7] 백민규, 박종배, 손성용, 신하상, 박용기. 태양광 연계형 배터리 에너지 저장장치의 최적 용량 산정. 전기학회논문지. 67(1), 38-45, 2018.
- [8] 최윤석, 나승유. PV-BESS 시스템의 적정 PCS, 배터리용량 산정에 따른 최적 운영에 관한 연구. 한국전기학회논문지. 67(9), 1174-1180, 2018.
- [9] 이성우, 김형태, 신한솔, 김태현, 김욱. REC 가중치를 고려한 최적 ESS 용량 산정에 관한 연구. 전기학회논문지. 67(8), 1009-1018, 2018.
- [10] 강민수. 태양광연계 에너지저장장치(ESS) 최적 용량산출 모델을 통한 경제성 분석. 서울시립대학교 도시과학대학원 석사학위논문, 2018.

- [11] 김창수, 최상봉. PV연계형 ESS의 설치 규모에 따른 수익영향. Current Photovoltaic Research. 8(3), 86-93, 2020.
- [12] 윤경훈. “태양광개론” (<http://www.pvcdeducation.org/pvcdrom>), 2012.9
- [13] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Spectrum.png
- [14] 차왕철, 조욱래, 박정호, 김재철 “온도 및 풍속이 태양광발전예에 미치는 영향분석”, 한국조명.전기설비학회 학술대회논문집, Vol. 2014, No. 5, 2014.
- [15] 이준신, 김경해, “태양전지공학”, 출판지 : 도서출판 그린, 2007.
- [16] 고재우, 윤나리, 민용기, 정태희, 원창섭, 안형근. 태양광 모듈의 구조디자인과 설치각도에 따른 출력예측. 전기학회논문지. 62(3), 371-375, 2013.
- [17] <https://www.imagesco.com/articles/photovoltaic/photovoltaic-pg4.html>
- [18] 濱川圭弘, 한동순, “태양전지”, 주식회사 신기술정보, 2007. 2
- [19] S.M. Oh, J. H. Kong, W. J. Lee & J. S. Jung, “Development of Optimal Energy Storage System Sizing Algorithm for Photovoltaic Supplier in South Korea”, IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), pp. 1-5, (2018).
- [20] www.knrec.or.kr 한국에너지공단 신재생에너지 센터, 태양광기술기준
- [21] G. Notton, V. Lazarov, L. Stoyanov, “Optimal sizing of grid-connected PV systems for various PV module technologies and inclinations, inverter efficiency characteristics and location”, Renewable Energy 35(2010) pp541-554.
- [22] 지식경제부, “전기설비기술기준의 판단기준(지식경제부 공고 제2013-101호)”, 2013.3.20

- [23] Enrique Romero-Cadaval, Giovanni Spagnuolo, Leopoldo, Carlos-Anderes Ramos-Paja, Teuvvo Suntio, Weidong-Michael Xiao, "Grid-Connected Photovoltaic Generation Plants" in IEEE Industrial Electronics Magazine, Digital Object Identifier
- [24] Hyun-Gu LEE, Design Algorithm for Estimating the Capacity of ESS Connected with Photovoltaics. Doctoral thesis, Konkuk University, 2019.
- [25] Chung, M.H. Modelling of Solar Irradiance Forecasting using Local Meteorological Data. KIEAE J. 17, 273-278, 2017.
- [26] Jo, D.K.; Kang, Y.H. A Study on the Solar Radiation Estimation of 16 Areas in Korea Using Cloud Cover. J. Korean Sol. Energy Soc. 30, 15 - 21, 2010.
- [27] Wi, Y.M.; Jo, H.C.; Lee, J.H. Economic Comparison of Wind Power Curtailment and ESS Operation for Mitigating Wind Power Forecasting Error. KIEE J. 2018, 67, 158 - 164.
- [28] 이영기. "ESS 국내외 기술 및 정책 동향", 한국전지산업진흥회, 2016
- [29] IRS Global, "글로벌 에너지저장장치(ESS)시장규모 및 수요전망 심층분석", 2017.1
- [30] IRS Global, "글로벌 에너지저장장치(ESS)시장규모 및 수요전망 심층분석", 2017.1
- [31] Claire Curry, "Lithium-ion Battery Costs and Market", Bloomberg New Energy Finance, 2017.6.5.
- [32] Kim, S.S. A Study on the Profit Analysis of PV Power Generation Based on Economic Assessment of Newly-built Building ESS. Ph.D. Thesis, Konkook University, Seoul, Korea, 2019.

- [33] 공급인증서 발급 및 거래시장 운영에 관한 규칙, 신재생에너지센터 공고 2017-6호
- [34] 한국에너지공단, “2018년도 KEA에너지편람”, 2018. 5
- [35] Korea Power Exchange, 2018, “A study on estimation of LCOE”, KPX Research Report.
- [36] 최재훈. 에너지 저장 장치의 기술 경제적 가치 분석. 서강대학교 기술경영전문대학원 석사학위논문, 2014.
- [37] 허남욱, 김경남, 이관영. 도서지역의 태양광과 에너지저장시스템을 활용한 경제성 분석: 흑산도의 사례 연구. 한국도서연구, 26(3), 41-62, 2014.
- [38] 백자현. 유전자알고리즘을 활용한 BESS의 용량 최적화 및 경제성 평가에 관한 연구. 상명대학교 대학원 석사학위논문, 2017.
- [39] 이주광. 주파수조정용 ESS의 성능 및 경제성평가 알고리즘에 관한 연구. 한국기술교육대학교 대학원 박사학위논문, 2017.
- [40] 이여진, 김성열, 한세경. 경제성 평가를 통한 태양광발전시스템 연계형 에너지저장장치 용량 선정에 관한 연구. 전기학회논문지. 67(1), 21-26, 2018.
- [41] 백민규, 박종배, 손성용, 신하상, 박용기. 태양광 연계형 배터리 에너지 저장장치의 최적 용량 산정. 전기학회논문지. 67(1), 38-45, 2018.
- [42] 최윤석, 나승유. PV-BESS 시스템의 적정 PCS, 배터리용량 산정에 따른 최적 운영에 관한 연구. 한국전기학회논문지. 67(9), 1174-1180, 2018.
- [43] 이성우, 김형태, 신한솔, 김태현, 김욱. REC 가중치를 고려한 최적 ESS 용량 산정에 관한 연구. 전기학회논문지. 67(8), 1009-1018, 2018.

- [44] S.M. Oh, J. H. Kong, W. J. Lee & J. S. Jung, "Development of Optimal Energy Storage System Sizing Algorithm for Photovoltaic Supplier in South Korea", IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), pp. 1-5, (2018).
- [45] 이혜진, 최정원. 대학건물의 전력소비패턴 분석을 통한 태양광, ESS 적정 용량 산정 및 경제적 효과 분석. 한국산업융합학회논문집. 21(5), 207-217, 2018.
- [46] 송정용, 허창수. 재사용 ESS를 위한 리튬 배터리 덴드라이트 보호 알고리즘 제안. 전기전자재료학회논문지. 31(6), 422-426, 2018.
- [47] 이루다. 제로에너지주택 실측데이터기반 PV연계 ESS 최적용량 산출 연구. 한밭대학교 대학원 석사학위논문, 2018.
- [48] 강민수. 태양광연계 에너지저장장치(ESS) 최적 용량산출 모델을 통한 경제성 분석. 서울시립대학교 도시과학대학원 석사학위논문, 2018.
- [49] 김성수. 신축 건물의 ESS와 연계한 태양광발전 수익률 분석에 대한 연구. 건국대학교 대학원 박사학위논문, 2019.
- [50] 김하양. 태양광발전기와 연계된 에너지저장장치 경제성 평가를 통한 최적 용량 산정 연구. 아주대학교 대학원 석사학위논문, 2019.
- [51] 이현구. 태양광발전과 연계된 ESS의 용량산정을 위한 설계알고리즘. 건국대학교 대학원 박사학위논문, 2019.
- [52] 김창수, 최상봉. PV연계형 ESS의 설치 규모에 따른 수익영향. Current Photovoltaic Research. 8(3), 86-93, 2020.

Abstract

In a situation where the weight of the Renewable Energy Certificate (REC) for the battery energy storage system (BESS) linked to the photovoltaic (PV) system is applied, the optimal capacity of the BESS is evaluated to maximize profits and respond to changes in future support policies. You need to be prepared. In addition, based on the analysis that installation costs will be stabilized as the BESS spreads, the weight of the new and renewable energy supply certificate is expected to gradually decrease. Despite these dissemination projects and support policies, the uncertainty of securing economic feasibility for energy storage equipment investment is acting as one of the reasons limiting the nationwide distribution of energy storage equipment. As a policy, we are going in the direction of decreasing REC weight, and we want to play an important role in expanding and disseminating the market by inducing the healthy growth of solar energy storage device policies through the calculation of optimal capacity according to the reduction of RECs and comparative evaluation of economic feasibility.

The purpose of this study is to analyze the economic evaluation of the PV-ESS system and to calculate the optimal capacity of the energy storage system based on the power generation performance data of photovoltaic power generation operated in Korea. The solar power generation facilities in Jeju, Gyeongbuk and Jeonnam were targeted, and the study was conducted assuming that the solar power generation

facilities in these areas were installed on general sites. The Levelized Cost of Energy (LCOE) was calculated for a variety of conditions using hourly generation data and charge/discharge guidelines from solar power plants across the country. As a result, under the current REC weight of 5.0, the optimal capacity of BESS was determined to be 2.8 times the national solar capacity. In the reference cases of Jeju, Gyeongbuk and Jeonnam, which have the lowest, average, and highest insolation in the country, it was confirmed that the lower the amount of insolation, the higher the economic benefit from BESS connection. If the REC weight is lowered in the future, the optimal capacity of the BESS will also decrease. These results can be reflected in the REC weight reduction policy in the future to induce healthy growth of the PV-BESS linkage policy, which can be used for market expansion and dissemination.

감사의 글

이제 대학원 생활을 마무리 하며 새로운 시작에 앞서 제가 이 자리에 있기 까지 항상 저를 사랑해주시고 격려해 주시는 분들을 위해 감사의 말을 전하고자 합니다.

세계의 흐름에 대한 변화에 대처할 수 있도록 통찰력을 키워주시고 나아가 누구보다도 학업과 지혜를 아낌없이 주셔서 학위 논문을 무사히 마무리 할 수 있도록 지원해주신 성태현 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다. 학위 논문 내용을 더 유익하게 정리할 수 있도록 핵심적인 개선 방향을 제시해주신 고광철 교수님 감사드립니다. 면밀하게 논문을 심사해주시고 학위 취득 후에도 더 정진해야 할 연구 방향등을 조언해 주신 김영범 교수님 감사합니다. 어려움이 있을 때 따뜻한 격려와 진심어린 조언을 해주신 한태희 교수님 감사합니다. 부족하지만 학위 논문을 무사히 마무리할 수 있도록 아낌없이 지원해주시고 많은 조언을 해주신 정인화 교수님께 감사드립니다. 여러 교수님들께서 아낌없이 주신 가르침을 잊지 않겠습니다.

업무와 학업을 병행하여 무사히 학위 논문을 마무리 할 수 있도록 많은 조언과 도움을 주신 한전KDN 동남ENG사업팀 박성수 팀장님께 감사의 말씀을 드립니다.

언제나 믿어주시고 바른길로 나갈 수 있도록 격려와 지원을 아끼지 않으시고 항상 사랑을 베풀어 주신 존경하는 아버지 이성권님, 어머니 서선임님, 장모님 한향숙님께 이 논문을 바치며 존경을 담아 진심으로 감사를 드립니다.

마지막으로 늘 곁에서 힘이 되어주고 응원해주는 사랑하는 아내 박윤미님께 사랑과 감사의 말을 전합니다. 학문에 대한 조그만 발걸음이 초석이 되어 사랑하는 딸 은우, 서우의 앞날에 커다란 결실로 맺어지길 간절히 기원합니다.

연구 윤리 서약서

본인은 한양대학교 대학원생으로서 이 학위논문 작성 과정에서 다음과 같이 연구 윤리의 기본 원칙을 준수하였음을 서약합니다.

첫째, 지도교수의 지도를 받아 정직하고 엄정한 연구를 수행하여 학위논문을 작성한다.

둘째, 논문 작성시 위조, 변조, 표절 등 학문적 진실성을 훼손하는 어떤 연구 부정행위도 하지 않는다.

셋째, 논문 작성시 논문유사도 검증시스템 "카피킬러"등을 거쳐야 한다.

2022년06월08일

학위명 : 박사

학과 : 전기공학과

지도교수 : 성태현

성명 : 이영훈

이영훈

한 양 대 학 교 대 학 원 장 귀 하

Declaration of Ethical Conduct in Research

I, as a graduate student of Hanyang University, hereby declare that I have abided by the following Code of Research Ethics while writing this dissertation thesis, during my degree program.

"First, I have strived to be honest in my conduct, to produce valid and reliable research conforming with the guidance of my thesis supervisor, and I affirm that my thesis contains honest, fair and reasonable conclusions based on my own careful research under the guidance of my thesis supervisor.

Second, I have not committed any acts that may discredit or damage the credibility of my research. These include, but are not limited to : falsification, distortion of research findings or plagiarism.

Third, I need to go through with Copykiller Program(Internet-based Plagiarism-prevention service) before submitting a thesis."

JUNE 08, 2022

Degree : Doctor
Department : DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Thesis Supervisor : Tae-Hyun Sung
Name : LEE YOUNGHUN


Signature