



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](#)

碩士學位論文

동북·북촌 풍력발전단지 연계형
에너지저장시스템 경제성 분석

濟州大學校 産業大學院

電氣工學科

李承煥

2019 年 8 月

동북·북촌 풍력발전단지 연계형 에너지저장시스템 경제성 분석

指導教授 李 開 明

李 承 煥

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2019 年 8 月

李承煥의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

審査委員長

김 호 찬



委 員

김 세 호



委 員

이 개 영



濟州大學校 産業大學院

2019 年 8 月



Economic Analysis of an Energy Storage
System Connected with the Dongbok-Bukchon
Wind Farm

Seung-Hwan Lee
(Supervised by Professor Gae-Myoung Lee)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE

Department of Electrical Engineering
Graduate School of industry
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2019. 8.

- i -

목 차

그림 목 차	iii
표 목 차	v
SUMMARY	vi
I. 서 론	1
II. 제주지역 풍력발전단지 연계형 에너지저장시스템 운영 현황	3
2.1 ESS 사업 비즈니스 구조	3
2.2 SMP 및 REC 가격	5
2.3 제주지역 풍력발전단지 ESS 설비 현황	14
2.4 동북·북촌 풍력발전단지 ESS 설비 현황	15
III. 에너지저장시스템 경제성 분석	17
3.1 동북·북촌 풍력발전단지 ESS 운영실적	17
3.2 2017~2018년 동북·북촌 풍력발전단지 매출 비교	20
3.3 ESS 경제성 분석	27
3.4 결과 및 고찰	33
IV. 결 론	34
참 고 문 헌	35

그림 목 차

그림 1 ESS 비즈니스 운영 구조	3
그림 2 ESS 도입으로 전력계통 운영안정화에 기여	4
그림 3 신재생에너지 공급의무화 제도 추진체계	6
그림 4 2017~2018년 SMP 변화	7
그림 5 2017~2018년 국제유가 변화	8
그림 6 국제유가 및 SMP 관계(3개월 시차 적용)	8
그림 7 2017년 육지 REC 현물시장 가격변화	11
그림 8 2018년 육지 REC 현물시장 가격변화	11
그림 9 2017년 제주 REC 현물시장 가격변화	12
그림 10 2018년 제주 REC 현물시장 가격변화	12
그림 11 동북·북촌 풍력발전단지 풍력발전기 배치도	15
그림 12 동북·북촌 풍력발전단지 ESS 계통 연계	16
그림 13 2017년 동북·북촌 풍력발전단지 ESS 충·방전량 및 효율	17
그림 14 2017년 동북·북촌 풍력발전단지 발전량 및 ESS 충·방전량	18
그림 15 2018년 동북·북촌 풍력발전단지 ESS 충·방전량 및 효율	19
그림 16 2018년 동북·북촌 풍력발전단지 발전량 및 ESS 충·방전량	19
그림 17 2017년 동북·북촌 풍력발전단지 발전량 및 REC 비교	20
그림 18 2018년 동북·북촌 풍력발전단지 발전량 및 REC 비교	21
그림 19 2017년 동북·북촌 풍력발전단지 매출 비교	23
그림 20 2018년 동북·북촌 풍력발전단지 매출 비교	23
그림 21 2017년 동북·북촌 풍력발전단지 매출 비교(풍력/ESS 구분)	24
그림 22 2018년 동북·북촌 풍력발전단지 매출 비교(풍력/ESS 구분)	24
그림 23 2017년 동북·북촌 풍력발전단지 SMP 매출 비교	25
그림 24 2018년 동북·북촌 풍력발전단지 SMP 매출 비교	25
그림 25 2017년 동북·북촌 풍력발전단지 REC 매출 비교	26
그림 26 2018년 동북·북촌 풍력발전단지 REC 매출 비교	26

그림 27 2017~2018년 동북·북촌 풍력발전단지 BAT 사용 현황	28
그림 28 동북·북촌 풍력발전단지 BAT 사용 현황(1년 환산, 내림차순 정렬) ..	29
그림 29 BAT 열화율 예측 비교	30
그림 30 ESS 도입에 따른 2017~2018년 동북·북촌 풍력발전단지 발전량 및 매출 비교 ..	33

표 목 차

표 1 연도별 RPS 공급의무량	5
표 2 2017~2018년 국제유가 및 SMP 변화	9
표 3 신재생에너지원별 REC 가중치	10
표 4 제주지역 ESS 구축 풍력발전단지 현황	14
표 5 2017~2018년 동북·북촌 풍력발전단지 발전량 및 REC	21
표 6 2017~2018년 SMP 및 REC 평균가격	22
표 7 2017~2018년 동북·북촌 풍력발전단지 매출 비교	23
표 8 경제성 분석을 위한 SMP 및 REC 가격 예측	27
표 9 2017~2018년 ESS 운영실적에 따른 년차별 BAT 열화량 및 열화율 예측 ..	30
표 10 상업운전 기간 경제성 분석 비교	32
표 11 ESS 도입에 따른 2017~2018년 발전량 및 매출 비교	33

SUMMARY

Korean Government implemented a Renewable Portfolio System(RPS) which obligates the electricity generation companies with capacity of more than 500 MW to supply a certain percentage of electricity energy generated by renewable sources.

Energy storage systems(ESS) connected with wind power generation are basic facility that can help to maintain balance of supply and demand in the electric grid, and are utilized in various fields related to its energy efficiency improvement and stable operation. Electric energy generated by the wind farm and stored in the battery at the light load time can be released at the peak load time, which can give additional revenue to the wind farm owner. The wind farm owners will earn revenue from the electricity sales sold by more expensive System Marginal Price(SMP) at the peak time and from the Renewable Energy Certificate(REC) transaction with additional weighting factor.

This paper analyzed the economic feasibility of Jeju Energy Corporation's Dongbok-Bukchon Wind Farm connected with ESS based on two years commercial operation. It was shown that the energy conversion efficiency of the Battery(BAT) between charging and discharging was 93% at the terminals of Energy Management System(EMS) and 90% at the terminals of Vacuum Circuit Breaker(VCB). After operating the ESS for two years, it was found that the generated electric energy decreased by 1,052MWh (0.99%) due to the loss of BAT charging and discharging, but the revenue increased by 2,855 million won(10.88%).

I. 서 론

우리나라는 2012년부터 50만kW 이상의 발전설비를 가지고 있는 발전사업자에게 총발전량의 일정 비율 이상을 의무적으로 신재생에너지원으로 발전해서 공급하도록 하는 신재생에너지 공급의무화제도(Renewable Portfolio System, RPS)를 시행하고 있다[1].

풍력발전시설에 에너지저장시스템(Energy Storage System, ESS)을 연계하면 계통한계가격(System Marginal Price, SMP)이 낮은 시간에 풍력발전기가 발전한 전기에너지를 사용하여 ESS를 충전하고 SMP가 높은 Peak 시간에 전력계통으로 방전함으로써 풍력발전기가 생산한 전기에너지를 높은 SMP로 판매할 수 있을 뿐만 아니라 ESS 활용에 따른 추가적인 신재생에너지 공급인증서(Renewable Energy Certificate, REC)를 인정받을 수 있다. ESS에 대한 REC 가중치는 2015년 3월부터 시행하고 있으며 산업통상자원부 “신·재생에너지 공급의무화제도 및 연료 혼합의무화제도 관리 운영지침”에 따라 풍력설비 연계 ESS설비 연계시점을 기준으로 2015년 5.5, 2016년 5.0, 2017~2019년 4.5, 2020년 4.0을 적용하고 있다[2].

신재생에너지 발전사업자는 RPS 공급인증서 발급 대상 설비에서 거래 시간별로 전력계통에 공급하는 전기에너지를 SMP로 판매하여 매출을 얻게 되며, 또한 공급한 전체 전기에너지에 대해 가중치를 곱하여 MWh 단위로 발급되는 REC를 판매하여 추가 매출을 얻게 된다[3].

제주에서는 총 5개 풍력발전단지에 배터리(Battery, BAT) 기준으로 41.5MWh 규모의 ESS가 설치 및 운영되고 있다. 2015년 한국남부발전이 8MW(2MW×4기) 성산풍력 2단계에 전력변환장치(Power Conversion System, PCS) 2MW, BAT 8MWh의 ESS를 설치한 것을 시작으로 같은 해 제주특별자치도에 의해 3MW 1기 연안풍력에 PCS 1MW, BAT 0.5MWh가 설치되어 풍력발전 출력안정 의무화를 위한 실증 사업이 추진되었다. 2016년에는 한국중부발전에 의해 21MW(3MW×7기) 상명풍력에 PCS 2MW, BAT 6MWh가 설치되었다. 제주에너지공사는 공모 사업을 통해 15MW(1.5MW×7기, 0.75MW×6기) 가시리국산화풍력에 PCS 3MW,

BAT 9MWh 및 30MW(2MW×15기) 동북·북촌풍력에 PCS 6MW, BAT 18MWh가 설치되었다[4].

이 논문에서는 제주에너지공사 동북·북촌 풍력발전에 연계된 ESS의 2017년과 2018년 운영실적과 데이터를 바탕으로 풍력 발전량과 ESS 방전량에 따른 전기에너지 SMP 판매금액과 REC 실적에 따른 매출을 분석하였다. 또한, ESS 사용률을 기반으로 BAT의 열화율을 보다 정확하게 적용할 수 있는 방안을 고안하였으며, 이 방안을 적용하여 ESS를 보증기간(15년간) 운영을 포함하여 풍력발전 상업운전 20년간의 경제성을 비교·분석하였다.

II. 제주지역 풍력발전단지 연계형 에너지저장시스템 운영 현황

2.1 ESS 사업 비즈니스 구조

2.1.1 풍력연계형 ESS의 구성

ESS는 에너지 공급과 수요의 균형을 유지해주는 기본 설비로서 에너지 효율 향상과 전력 계통의 안정적 운영을 위해 다양한 분야에 활용된다. 최근 정부의 “2030 에너지 신산업 확산 정책”은 온실가스 감축 등 신기후체제에 선제적으로 대응하고 온실가스 감축 의무를 새로운 성장 동력으로 전환하여 일자리 창출과 더불어 경제성장을 이끄는 새로운 과제로 떠오르고 있다.

풍력발전단지 연계형 ESS는 그림 1과 같이 경부하 시간 등에 전력을 BAT에 저장하고 BAT에 저장된 전력을 peak 시간에 전력계통에 방전하는 부하 이동 설비로 신재생에너지 발전사업자의 추가 매출 확보에 많이 사용된다. 즉, 전력수요가 낮은 심야시간에 충전한 뒤 전력수요가 높은 peak 시간대에 방전함으로써 peak 시간대에 방전한 전력량만큼 전력거래소가 SMP로 정산하고 가중치가 적용된 REC를 발급받아 판매하여 추가 매출이 발생한다.

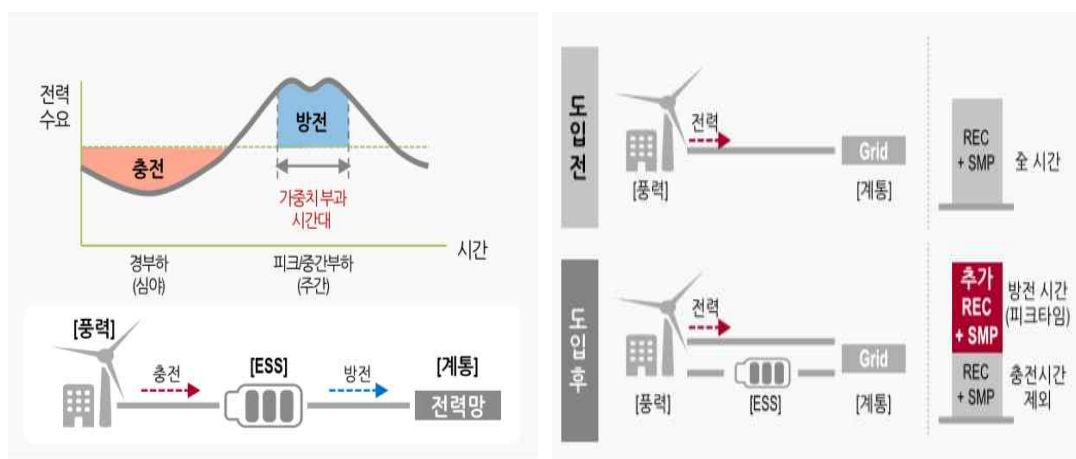


그림 1 ESS 비즈니스 운영 구조

2.1.2 풍력발전단지 연계형 ESS와 전력계통 운영과의 관계

풍력발전단지와 연계한 ESS는 그림 2와 같이 예비력이 남아도는 전력계통의 저부하 시간에 풍력발전기가 생산하는 전기에너지를 계통으로 보내지 않고 BAT 충전에 사용하고 peak 시간에 BAT에 저장된 전기에너지를 전력계통으로 공급함으로써 전력계통 운영안정화에도 기여하게 된다. ESS는 수용반응 절감, 주파수 조정, 신재생에너지 출력안정화 및 전기품질 개선, 피크부하 분산 및 부하율 개선, 독립형 마이크로그리드 등 다양한 분야에도 활용되고 있다[5].

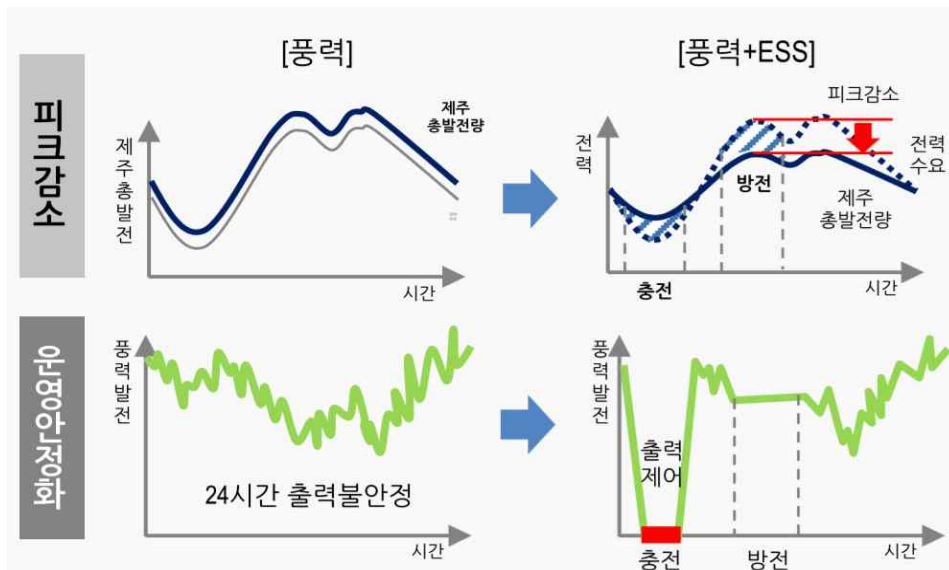


그림 2 ESS 도입으로 전력계통 운영안정화에 기여

2.2 SMP 및 REC 가격

2.2.1 신재생에너지 공급의무화제도

RPS는 신재생에너지 설비를 제외하여 50MW 이상의 발전설비를 가지고 있는 발전사업자(공급의무자)에게 총발전량의 일정 비율 이상을 신재생에너지원으로 발전해서 공급하도록 의무화하는 제도이다.

2018년 기준으로 공급의무자는 총 21개사로 한국수력원자력, 남동발전, 중부발전, 서부발전, 남부발전, 동서발전, 지역난방공사, 수자원공사, SK E&S, GS EPS, GS 파워, 포스코에너지, 씨지엔올춘전력, 평택에너지서비스, 대륜발전, 에스파워, 포천파워, 동두천드림파워, 파주에너지서비스, GS동해전력, 포천민자발전이다.

공급의무량은 태양광, 풍력, 바이오, 연료전지, 조력 등 에너지원을 대상으로 공급의무자의 총발전량에 의무비율을 적용하여 산출된다. 또한, 공급의무량은 2012년 총발전량이 2%에서 2023년 이후 10% 이내로 정하고 있으며, 2012년부터 2019년까지 산업통상자원부에서 고시한 연도별 공급의무량 표 1과 같다.

표 1 연도별 RPS 공급의무량

해당년도	2012년	2013년	2014년	2015년	2016년	2017년
비율(%)	2.0	2.5	3.0	3.0	3.5	4.0
공급의무량(천REC)	6,420	9,210	11,577	12,375	15,081	17,039
해당년도	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년	2013년 이후
비율(%)	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
공급의무량(천REC)	21,999	26,958	-	-	-	-

공급의무자는 할당받은 의무공급량에 대하여 REC를 확보하여 이를 정부에 제출함으로써 이행하게 되며, REC를 확보하는 방법으로는 신재생에너지 발전소를 건설하여 직접 REC를 자체 조달하는 방법과 현물시장을 통한 거래를 통해 구매하거나 계약거래를 통해 확보하며 RPS 추진체계는 그림 3과 같다.



그림 3 신재생에너지 공급의무화 제도 추진체계

2.2.2 2017~2018년 SMP

SMP는 거래 시간별로 발전기에서 생산되는 전력량에 대해 적용하는 전력시장 가격(원/kWh)으로 전력생산에 참여한 일반발전기 중 변동비가 가장 높은 발전기의 변동비로 결정된다.

2017년과 2018년 육지(제주 지역을 제외한 지역) SMP는 그림 4와 같이 kWh당 86.1원에서 시작하여 최대 109.3원까지 완만한 상승세를 유지하였으며, 제주 SMP는 kWh당 106.1원에서 시작하여 최대 171.7원까지 상승하였다. 이 기간 SMP 가중평균은 2017년 육지 81.39원, 제주 119.72원으로 38.33원이 가격차를 형성하였으며, 2018년에는 육지 94.64원, 제주 146.69원으로 52.05원이 가격차를 형성하였다. 육지와 제주의 가격 차이는 전력시장운영규칙의 RPS 의무행비용 보전기준에 따라 REC 가격을 육지와 제주로 구분하고 REC 가중치를 적용하여 계산하는 데 영향을 주게 된다.

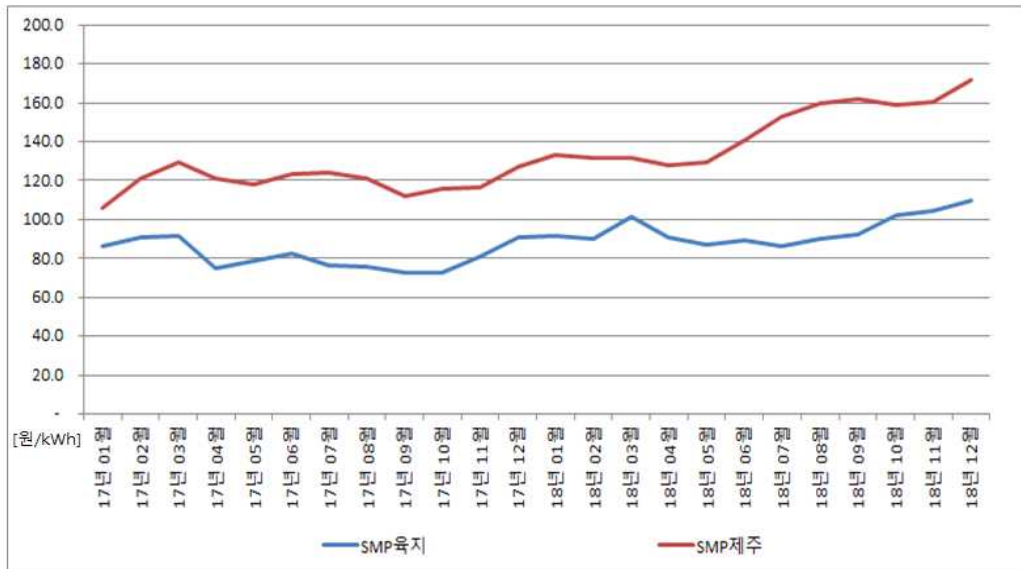


그림 4 2017~2018년 SMP 변화

SMP와 국제유가 변화를 비교해 보면 그림 5와 같이 2017년과 2018년 두바이 유 기준 국제유가는 배럴당 50달러대에서 시작하여 최소 46.5달러 하락 이후 완만한 상승세를 거쳐 최대 79.4달러까지 상승한 이후 하락하였다.

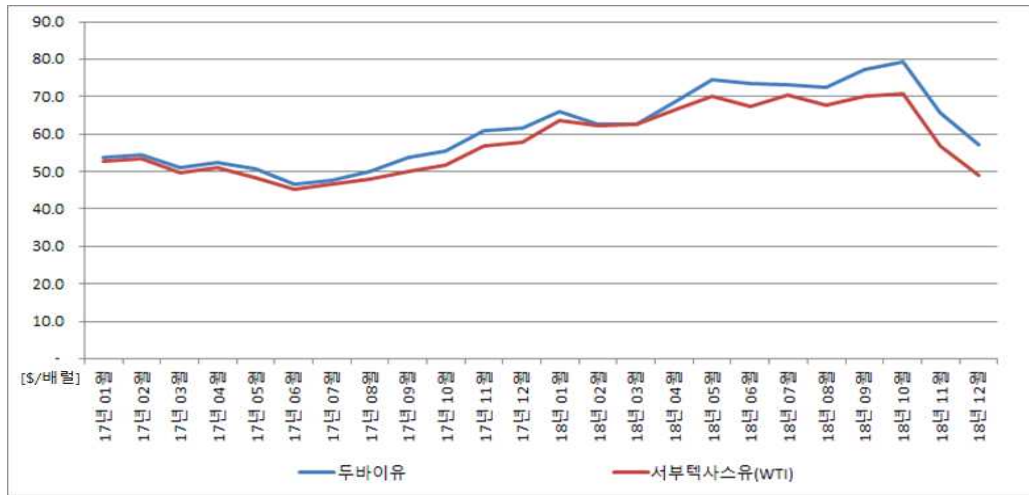


그림 5 2017~2018년 국제유가 변화

2016년 10월부터 2년간 두바이유 변화에 약 3개월의 시차를 두고 2017년 1월부터 2년간 제주 SMP의 변화와 비교하였을 경우 높은 상관관계를 보이는 것을 그림 6과 표 2와 같이 확인할 수 있다.



그림 6 국제유가 및 SMP 관계(3개월 시차 적용)

표 2 2017~2018년 국제유가 및 SMP 변화

구분	두바이유 [\$/배럴]	서부텍사스유(WTI) [\$/배럴]	SMP육지 [원/kWh]	SMP제주 [원/kWh]
17년 01월	53.7	52.6	86.1	106.1
17년 02월	54.4	53.5	90.8	121.2
17년 03월	51.2	49.7	91.7	129.7
17년 04월	52.3	51.1	74.9	121.1
17년 05월	50.7	48.5	78.8	117.9
17년 06월	46.5	45.2	82.3	123.5
17년 07월	47.6	46.7	76.3	123.9
17년 08월	50.2	48.1	75.9	120.7
17년 09월	53.7	49.9	72.8	111.9
17년 10월	55.5	51.6	72.4	116.0
17년 11월	60.8	56.7	81.2	116.6
17년 12월	61.6	58.0	90.4	126.9
18년 01월	66.2	63.7	91.8	133.5
18년 02월	62.7	62.2	90.3	131.3
18년 03월	62.7	62.7	101.2	131.8
18년 04월	68.3	66.3	90.5	127.7
18년 05월	74.4	70.0	87.2	129.1
18년 06월	73.6	67.3	89.3	140.3
18년 07월	73.1	70.5	86.6	153.2
18년 08월	72.5	67.9	90.3	159.7
18년 09월	77.2	70.1	92.1	161.7
18년 10월	79.4	70.8	101.8	159.0
18년 11월	65.6	56.7	104.6	160.1
18년 12월	57.3	49.0	109.3	171.7

2.2.3 2017~2018년 REC 현물시장 가격

REC는 공급인증서 발급 대상 설비에서 공급되는 전력량에 가중치를 곱하여 MWh 단위를 기준으로 발급되며 발전사업자가 신재생에너지 설비를 이용하여 전기를 생산·공급하였음을 증명하는 인증서로 공급의무량에 대해 REC를 구매하여 충당할 수 있다. 즉, 공급의무자가 직접 신재생에너지 설비를 구축하여 발급 대상 설비 확인을 거쳐 공급의무량의 전기를 생산·공급하거나 공급의무량을 채우지 못할 경우에는 공급의무자가 아닌 발전사업자의 REC를 거래시장을 통해 구매하여 공급의무량을 충당하게 된다. 정부에서는 다양한 신재생에너지 산업 육성과 연계하여 신재생에너지원별 REC 가중치를 표 3과 같이 적용하고 있다.

표 3 신재생에너지원별 REC 가중치

[2019. 3월기준]

구분	REC 가중치	대상에너지 및 기준	
		설치유형	세부기준
태양광 에너지	1.2	일반부지에 설치하는 경우	100kw미만
	1.0		100kW부터
	0.7		3,000kW초과부터
	0.7	임야에 설치하는 경우	-
	1.5	건축물 등 기존 시설물을 이용하는 경우	3,000kW이하
	1.0		3,000kW초과부터
	1.5	유지 등의 수면에 부유하여 설치하는 경우	
	1.0	자가용 발전설비를 통해 전력을 거래하는 경우	
	5.0	ESS설비(태양광설비 연계)	'18년, '19년
	4.0		'20년
기타 신·재생 에너지	0.25	IGCC, 부생가스, 폐기물에너지, Bio-SRF	
	0.5	매립지가스, 목재펠릿, 목재칩	
	1.0	수력, 육상풍력, 조력(방조제 有), 기타 바이오에너지(바이오중유, 바이오가스 등), 자가용 발전설비를 통해 전력을 거래하는 경우	
	1.0~2.5	지열, 조력(방조제 無)	고정형
			변동형
	1.5	수열, 미이용 산림바이오매스 혼소설비	
	2.0	연료전지, 조류, 미이용 산림바이오매스(바이오에너지 전소설비만 적용)	
	2.0	해상풍력	연계거리 5km이하
	2.5		연계거리 5km초과 10km이하
	3.0		연계거리 10km초과 15km이하
	3.5		연계거리 15km초과
4.5	ESS설비(풍력설비 연계)	'18년, '19년	
4.0		'20년	

신재생에너지 사업자에게 발급되는 REC는 현물시장과 계약시장 등을 통해 거래된다. 현물시장이 태양광과 비태양광이 통합되고 양방향 거래시스템이 정착되면서 육지 REC 현물시장 가격은 그림 7과 같이 12만원 수준을 유지하다가 2017년 말 10만원 수준으로 하락 이후 2018년 말에는 그림 8과 같이 8만원까지 추가 하락하였다[6].

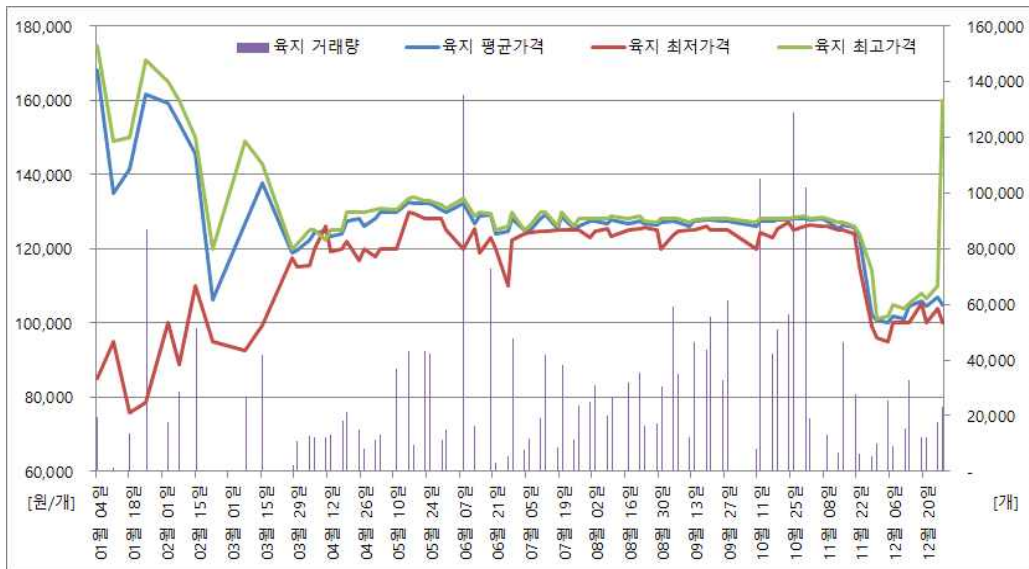


그림 7 2017년 육지 REC 현물시장 가격변화

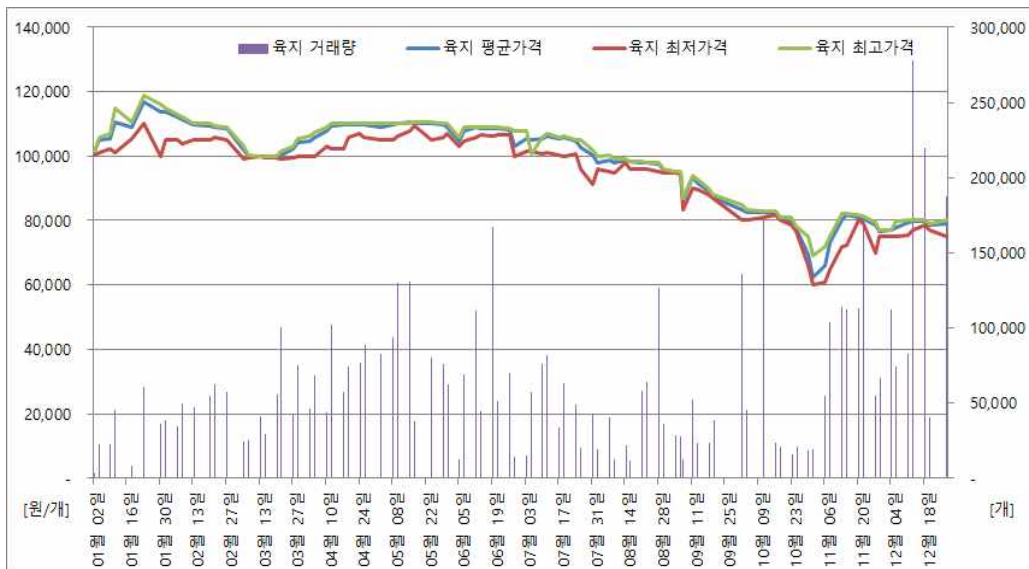


그림 8 2018년 육지 REC 현물시장 가격변화

제주 REC 현물시장 가격은 육지 REC와 달리 최대가격과 최저가격의 차이를 보이면서 2017년에는 그림 9와 같이 11만원 수준을 유지하다가 2018년에는 그림 10과 같이 4만원까지 하락하였다[6].

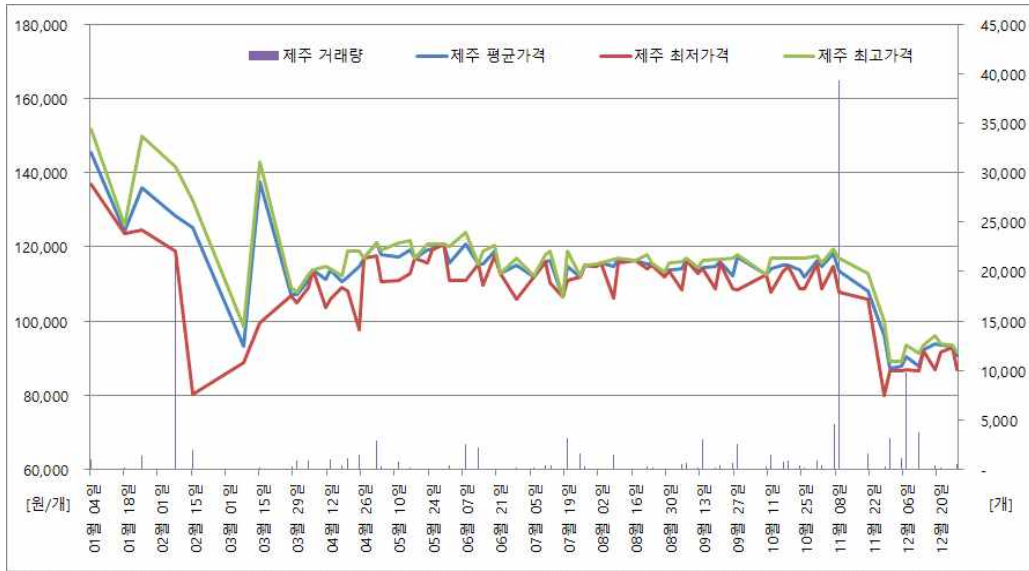


그림 9 2017년 제주 REC 현물시장 가격변화

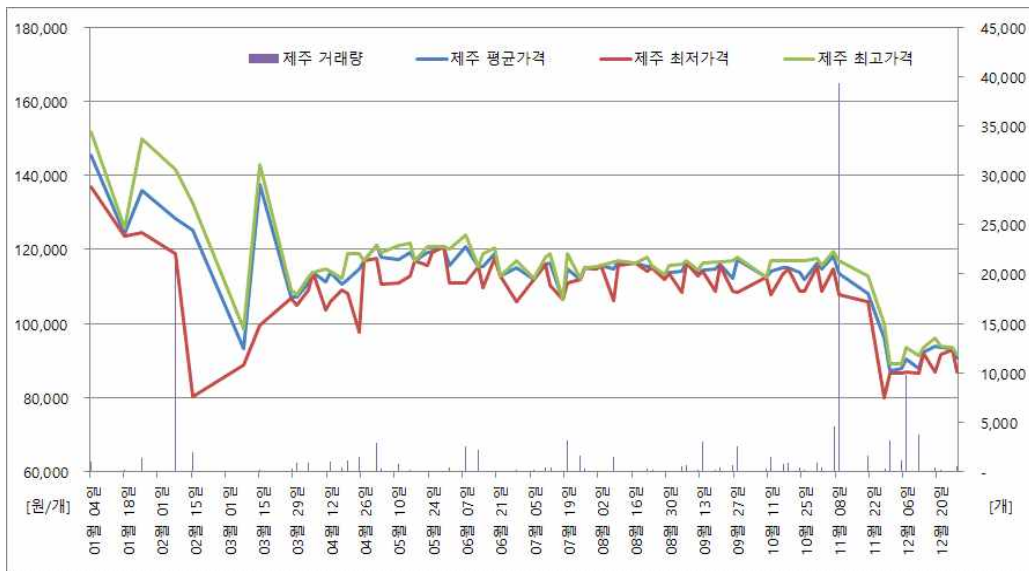


그림 10 2018년 제주 REC 현물시장 가격변화

2.2.4 REC 기준가격

REC 기준가격은 발전소 소재지 기준으로 육지와 제주 지역을 구분하여 산정한다. 이때 SMP는 육지 및 제주 각각의 전년도 가중평균 계통한계가격을 적용하게 되며 제주 소재 발전소에 대한 REC 기준가격 계산 식은 다음과 같다[3].

$$\text{기준가격}_{\text{제주}} = \text{기준가격}_{\text{육지}} - \{(SMP_{\text{제주}} - SMP_{\text{육지}}) \div \text{가중치} \times 1,000 \times 0.9\} \quad (1)$$

여기서, 기준가격_{육지} : 육지 소재 발전소를 대상으로 하여 산정한 기준가격

SMP_{육지} : 육지의 전년도 가중평균 계통한계가격

SMP_{제주} : 제주의 전년도 가중평균 계통한계가격

2018년 9월에 신재생 원스톱 사업정보 통합포털에 공지된 2017년도 REC 기준가격은 104,688원/REC이다[6]. 계산 식 (1)을 통해 기준가격 제주를 가중치에 따라 계산하면 풍력발전으로 발급되는 가중치 1.0의 REC 가격은 70,191원/REC이며 ESS 방전으로 발급되는 가중치 5.0의 REC 가격은 97,789원/REC이다.

2.3 제주 지역 풍력발전단지 ESS 설비 현황

정부의 신재생에너지 확대 정책과 RPS 제도 개선에 맞춰 신재생에너지 연계 ESS에 대한 REC 가중치 지원으로 ESS는 확대 보급되기 시작하였다. REC 가중치는 2015년 5.5를 부여하기 시작하여 2016년 5.0, 2017~2019년 4.5, 2020년 4.0을 부여하고 있다.

제주 지역에서는 2015년에 (주)한국남부발전의 성산풍력 2단계 발전단지에 BAT 기준 8MWh ESS가 처음 도입된 이후 2016년에는 (주)한국중부발전의 상명풍력에 6MWh, 제주에너지공사의 동북·북촌풍력에 18MWh와 가시리국산화풍력에 9MWh의 ESS 설비가 구축되었다. 또한 제주특별자치도에서는 풍력발전의 출력 안정화 실증 연구를 위해 행원연안풍력에 0.5MWh의 ESS 설비를 구축하여 운영 중이다. 제주 지역 ESS 구축 풍력발전단지의 세부내용은 표 4와 같다.

표 4 제주지역 ESS 구축 풍력발전단지 현황

구분	성산풍력	상명풍력	동북·북촌풍력	가시리국산화풍력	행원연안풍력	
구축기관	남부발전	중부발전	제주에너지공사	제주에너지공사	제주특별자치도	
소재지	성산읍 수산리	한림읍 금악리	구좌읍 동북리	표선면 가시리	구좌읍 행원리	
풍력설비용량	20MW	21MW	30MW	15MW	3MW	
풍력기수	10기	7기	15기	13기	1기	
계통연계전압	22.9kV	22.9kV	154kV	22.9kV	22.9kV	
ESS	P C S	2MW	2MW	6MW	3MW	1MW
	배터리	8MWh	6MWh	18MWh	9MWh	0.5MWh
	REC가중치	5.5배(육지)	5.0배(제주)	5.0배(제주)	5.0배(육지)	5.0배(제주)
	구축년도	2015년	2016년	2016년	2016년	2016년

2.4 동북·북촌 풍력발전단지 ESS 설비 현황

제주에너지공사는 신재생에너지 보급 확대를 위해 제주에너지공사 소유의 동북·북촌 풍력발전단지와 가시리 국산화풍력발전단지 내에 별도의 자체 투자 없이 민간과 지방공기업이 협력하여 추진하는 ‘공유형 수익모델’(Public-Private-Partnership, PPP)에 기반한 공모사업을 진행하여 ESS를 구축하는 모델을 만들었다[7]. ESS 설치를 통해 풍력발전기의 불규칙한 출력을 양질의 전력으로 변환·공급함으로써 풍력에너지의 활용도를 높일 뿐만 아니라 제주지역 전력계통 안정화에 기여하고 있다. 이를 계기로 신재생에너지 연계 ESS 도입을 확산하고 나아가 ‘Carbon Free Island 2030’ 비전 달성에 도움이 될 것으로 기대하고 있다.

동북·북촌 풍력발전단지는 제주특별자치도 구좌읍 동북리와 북촌리 일대에 위치하고 있다. 2015년 8월에 준공된 발전단지는 그림 11과 같이 2MW 용량의 (주)한진산업 HJWT2000 풍력발전기 15기(1~15호기)로 구성되어 있다. 각 호기에서 생산되는 전력은 내부 지중선로를 통해 북촌리에 설치된 154kV 동북·북촌 변전소로 모이고 한국전력의 조천변전소로 송전하고 있다[8].

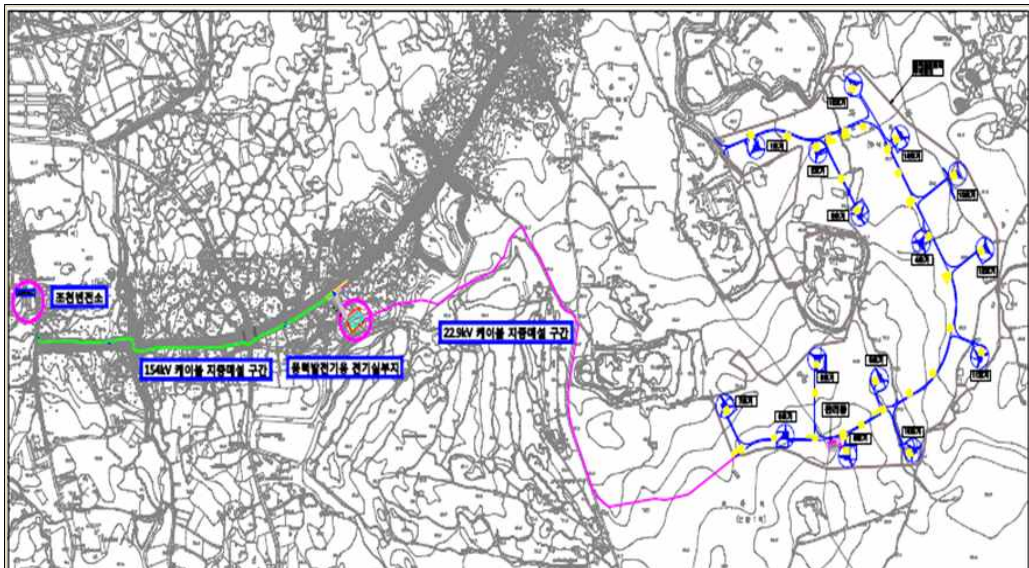


그림 11 동북·북촌 풍력발전단지 풍력발전기 배치도

동북·북촌 풍력발전단지 연계형 ESS는 PCS 6MW와 BAT 18MWh로 2016년 12월에 준공되었다. ESS는 그림 12와 같이 풍력발전 주 모선의 연계를 위해 22.9kV 3.6MVA의 4권선 변압기 2기가 적용되었으며 충·방전 계량을 위해 ESS 전용 계기용변성기(Metering Out Fit, MOF)를 설치하였다. 에너지관리시스템(Energy Management System, EMS)은 ESS의 운영 정보를 수집·관리하여 최적화된 제어 알고리즘으로 풍력발전기의 발전 전력을 감시하여 풍력발전기의 발전 전력을 충전할 수 있도록 제어하고 Peak 시간대 효율적이고 안정적인 방전에 대응한다[4].

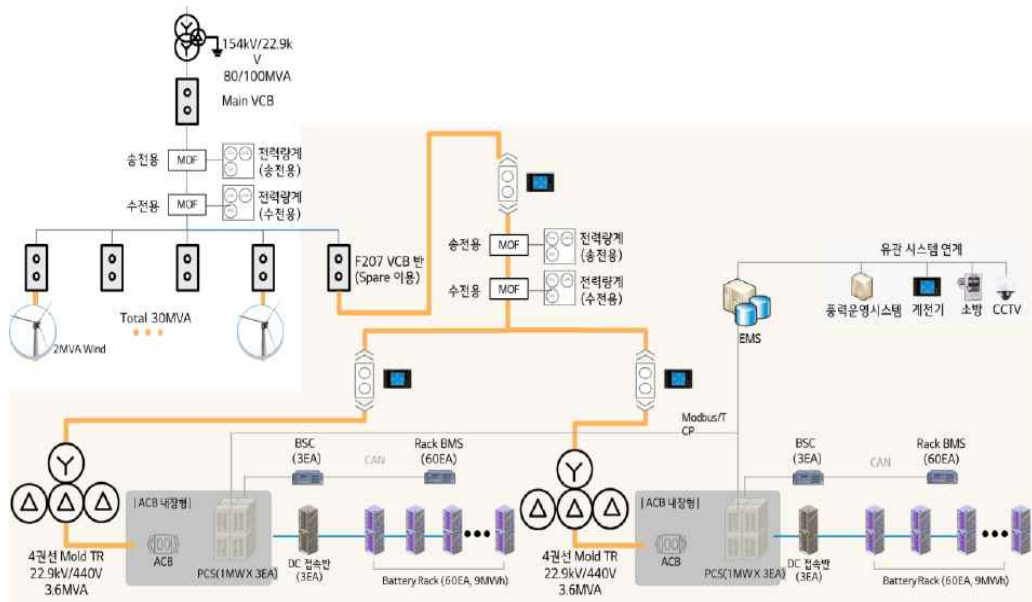


그림 12 동북·북촌 풍력발전단지 ESS 계통 연계

Ⅲ. 에너지저장시스템 경제성 분석

3.1 동북·북촌 풍력발전단지 ESS 운영실적

2017년 동북·북촌 풍력발전단지에서 풍력발전의 운영실적은 53,611MWh이다. 그림 13에서 보면 ESS의 운영실적으로 EMS에서 계측된 ESS의 충전량은 5,735MWh이며 방전량은 5,334MWh로 충전과 방전에 따른 효율은 93.0%이다. 또한 변압기와 진공차단기(Vacuum Circuit Breaker, VCB) 등을 거치는 과정 동안의 변환손실 거쳐 VCB 지점에서 계측된 충전량은 5,873MWh, 방전량은 5,289MWh로 VCB 기준 종합효율은 90%이다. ESS 보증 종합효율 87.6%보다 2.4% 높게 나타났다. 이를 통해 내부변환 손실은 3.0%로 예측할 수 있다.

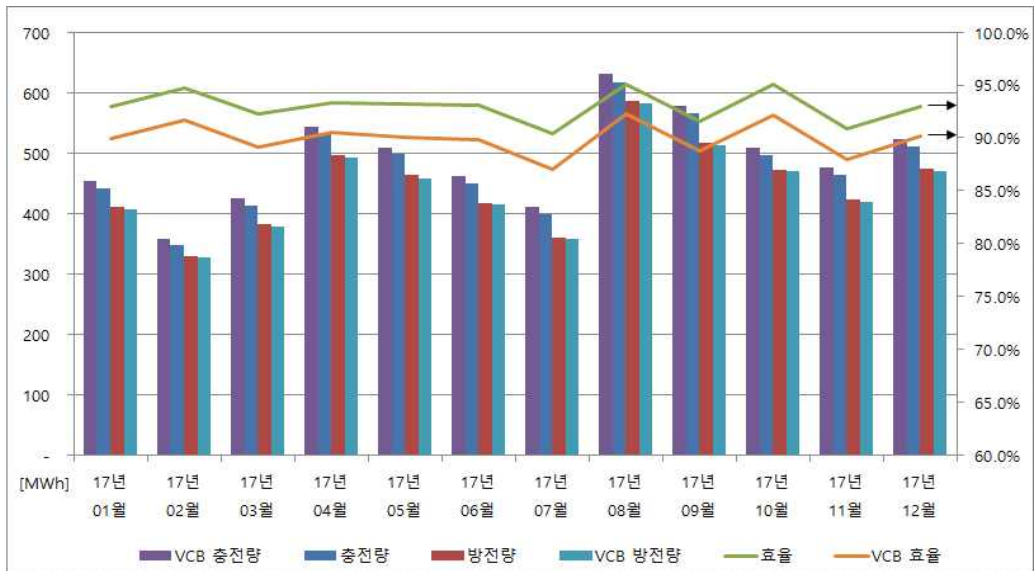


그림 13 2017년 동북·북촌발전단지 ESS 총·방전량 및 효율

풍력발전량은 우리나라 계절 특성에 맞게 북서풍이 강한 겨울철인 1월과 2월, 12월 높게 나타나다가 바람이 적어지는 여름철에는 발전량이 감소한다. 하지만 ESS 운영은 그림 14와 같이 풍력 발전량과 ESS 방전시간에 따라 다르게 나타났다. 이는 풍력발전에서 생산된 전력을 ESS에 우선 충전하고 계절별 peak 시간에 대응하여 방전하기 때문에 나타나는 현상이다.



그림 14 2017년 동북·북촌 풍력발전단지 발전량 및 ESS 총·방전량

2018년 동북·북촌 풍력발전단지에서 풍력발전의 운영실적은 5,278MWh이다. 그림 15에서 보면 ESS의 충전량은 5,837MWh, 방전량은 5,424MWh로 충전과 방전에 따른 효율은 92.9%로 2017년과 유사하다. VCB 지점에서 충전량은 5,976 MWh, 방전량은 5,377MWh로 VCB 기준 종합효율은 90.0%로 2017년과 같다.

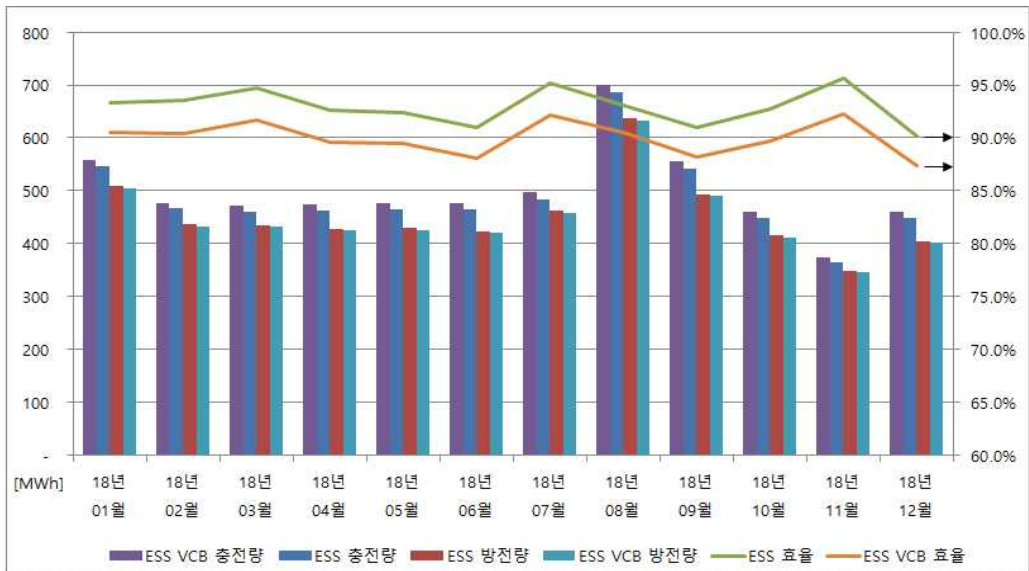


그림 15 2018년 동북·북촌 풍력발전단지 ESS 총·방전량 및 효율

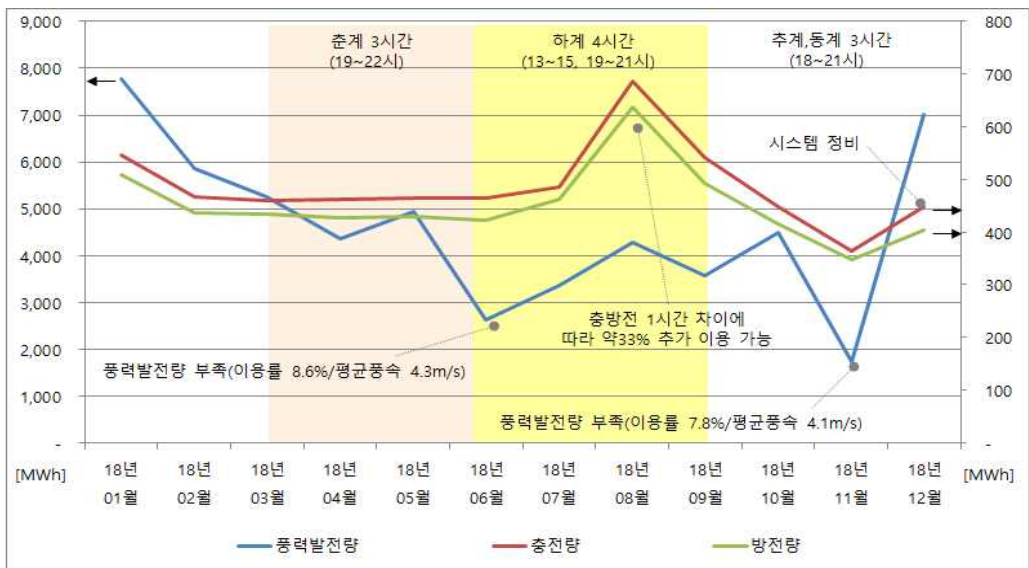


그림 16 2018년 동북·북촌 풍력발전단지 발전량 및 ESS 총·방전량

3.2 2017~2018년 동북·북촌 풍력발전단지 매출 비교

그림 17과 그림 18은 2017년과 2018년의 월별 발전량과 REC 인정량을 ESS가 있는 경우와 없는 경우를 비교하였으며, 표 5로 연간 운영실적을 정리하였다. 2017년 ESS 운영실적에 따라 동북·북촌 풍력발전단지에서 생산되어 판매된 전력량은 47,065MWh와 ESS 방전량 5,219MWh를 합하여 총 52,284MWh이다. REC는 풍력발전에서 47,065개, ESS에서 26,096개를 발급받았다. 참고로 ESS가 없을 경우 풍력발전에서 판매된 전력량은 ESS의 종합효율을 역으로 적용할 경우 52,806MWh로 예측할 수 있다. 2018년 ESS 운영실적에 따라 동북·북촌 풍력발전단지에서 생산되어 판매된 전력량은 47,835MWh와 ESS 방전량 5,299 MWh를 합하여 총 53,135MWh이다. REC는 풍력발전에서 47,835개, ESS에서 26,496개를 발급받았다. ESS가 없을 경우 풍력발전에서 판매된 전력량은 ESS의 종합효율을 역으로 적용할 경우 53,665MWh로 예측할 수 있다.

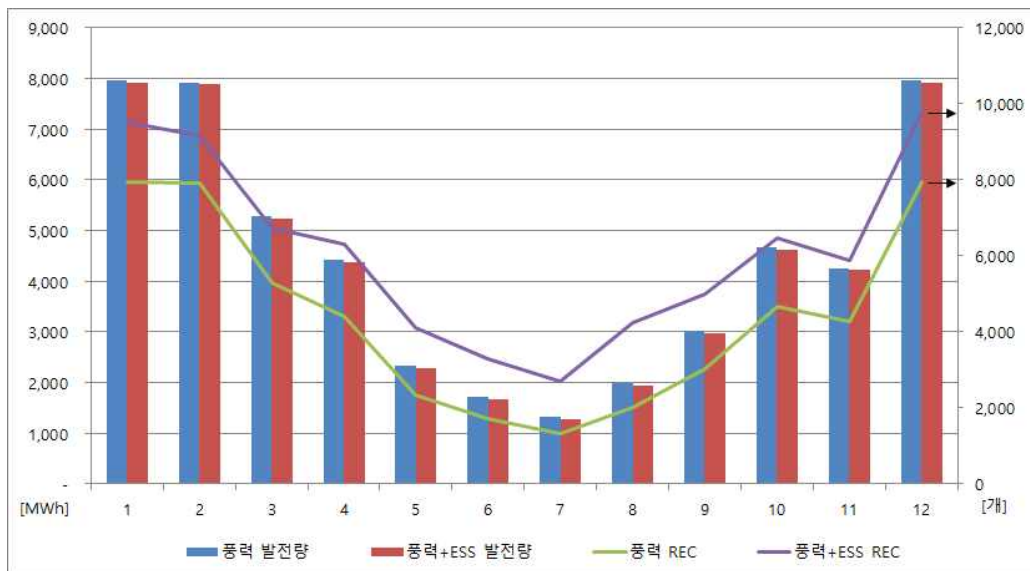


그림 17 2017년 동북·북촌 풍력발전단지 발전량 및 REC 비교

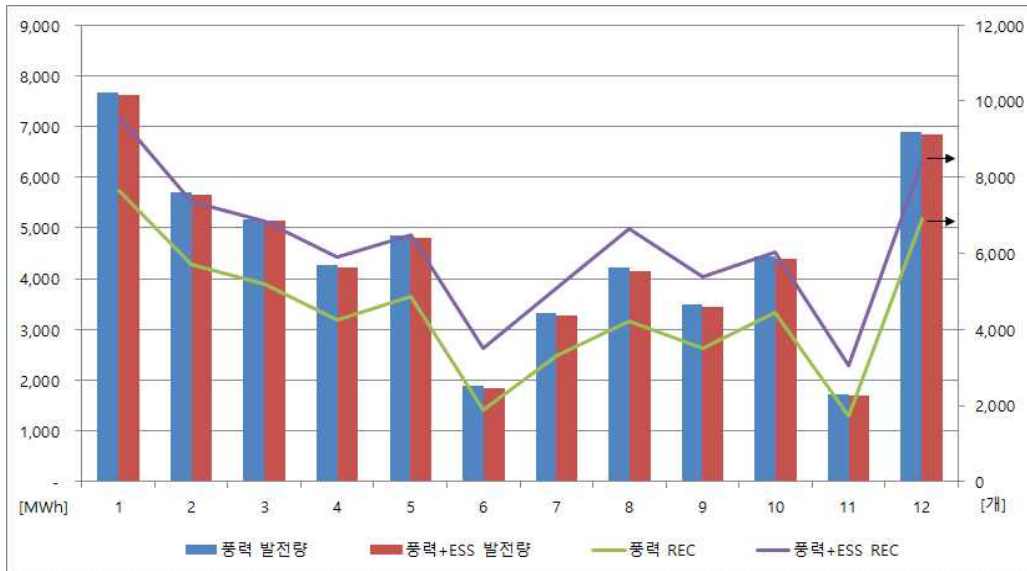


그림 18 2018년 동북·북촌 풍력발전단지 발전량 및 REC 비교

표 5 2017~2018년 동북·북촌 풍력발전단지 발전량 및 REC

구분	풍력발전량 (ESS 없을 경우)	풍력발전 연계 ESS 발전량 및 REC 인정량					
		발전량 [MWh]			REC [개]		
		풍력	ESS	소계	풍력	ESS	소계
2017년	52,806	47,065	5,219	52,284	47,065	26,096	73,161
2018년	53,665	47,835	5,299	53,135	47,835	26,496	74,331

2017년과 2018년 기간 동안 인정된 REC를 현물시장을 통해 매월 평균가격으로 거래 되었을 경우 2017년 동북·북촌 풍력발전단지의 매출은 SMP 매출 6,234백만원(41.8%)과 REC 매출 8,665백만원(58.2%)으로 총 14,899백만원이다. REC 매출이 SMP 매출보다 2,431백만원으로 16.3%가 높게 나타났다. 2018년은 SMP 매출 7,728백만원(54.4%)과 REC 매출 6,480백만원(45.6%)으로 총 14,209백만원이다 2017년도와 비교하여 SMP 매출이 REC 매출보다 1,248백만원으로 8.8%가 높게 나타났다.

표 6 2017~2018년 SMP 및 REC 평균가격

구분	평균 SMP [원/kWh]		평균 REC [원/개]		
	육지	제주	육지	제주	
				가중치 1.0	가중치 5.0
2017년	81.1	119.6	130,505	115,634	123,577
2018년	94.6	146.6	98,820	72,303	108,179

표 7에서 보면 2017년 풍력발전 매출은 SMP와 원래 풍력발전에서 발생하는 가중치 1.0 REC로 11,699백만원(78.5%)이며, ESS 매출은 가중치 5.0 REC로 3,200백만원(21.5%)이다. 2017년 풍력발전 매출이 ESS 매출보다 8,499백만원으로 57.0%가 높게 나타났다. 2018년 풍력발전 매출은 11,324백만원(79.7%)이며, ESS 매출은 2,885백만원(20.3%)으로 풍력발전 매출이 ESS 매출보다 8,440백만원으로 59.4%가 높게 나타났다. 동북·북촌 풍력발전단지 ESS 운영실적에 따른 매출에 대하여는 그림 19부터 그림 26까지 풍력 매출과 ESS 매출로 구분하고 SMP와 REC로 매출로 구분하여 비교하였다.

표 7 2017~2018년 동북·북촌 풍력발전단지 매출 비교

[단위 : 백만원]

구분	풍력			풍력 + ESS				
	합계	SMP	REC	합계	SMP	REC	풍력	ESS
2017년	12,422	6,296	6,126	14,899	6,234	8,665	11,699	3,200
2018년	11,830	7,806	4,024	14,209	7,728	6,480	11,324	2,885

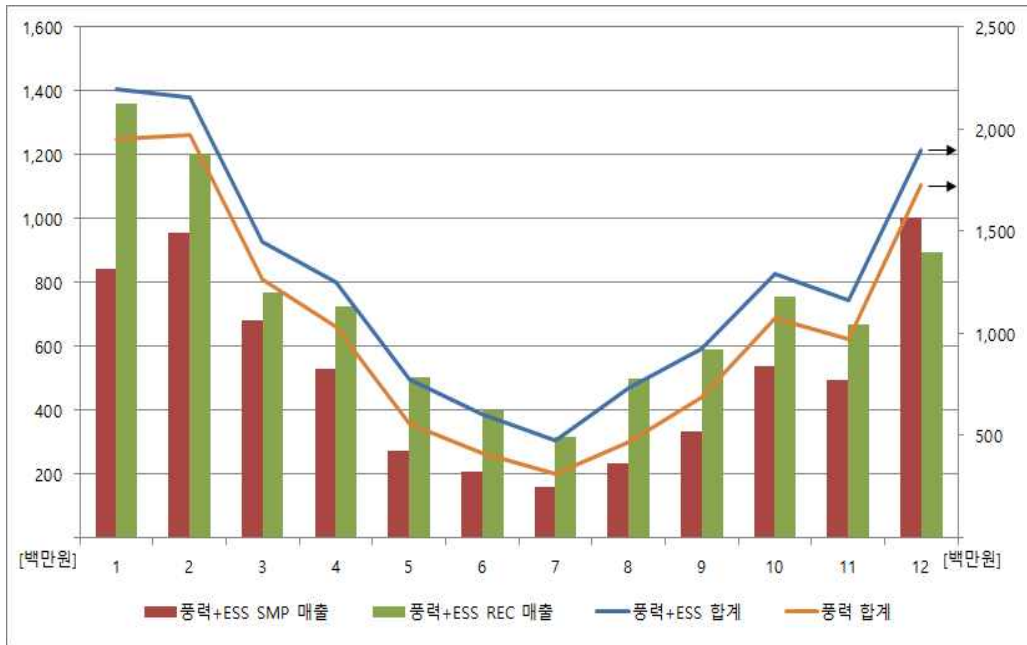


그림 19 2017년 동북·북촌 풍력발전단지 매출 비교

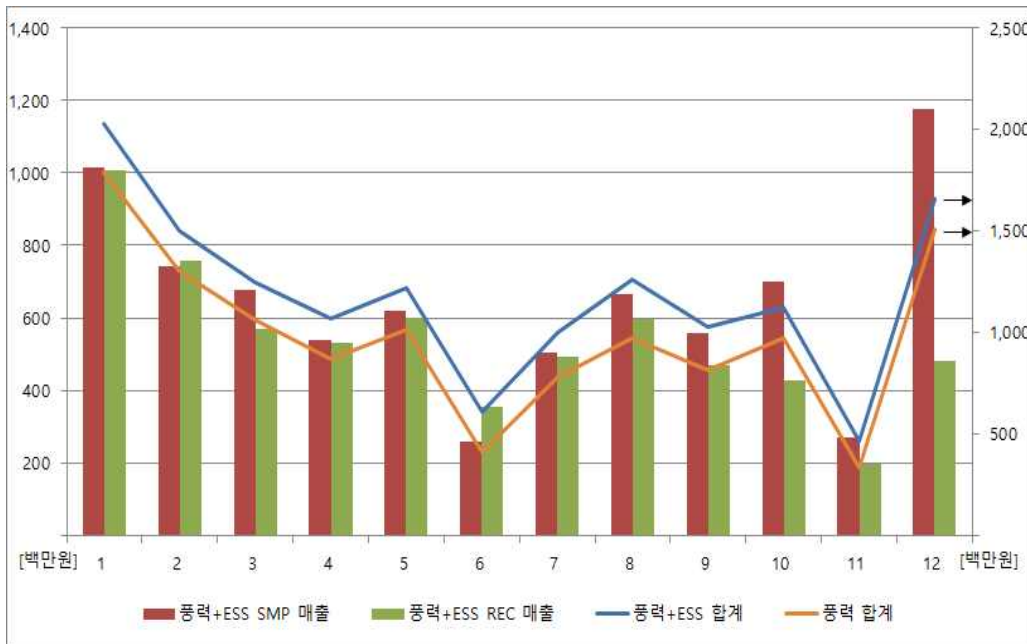


그림 20 2018년 동북·북촌 풍력발전단지 매출 비교

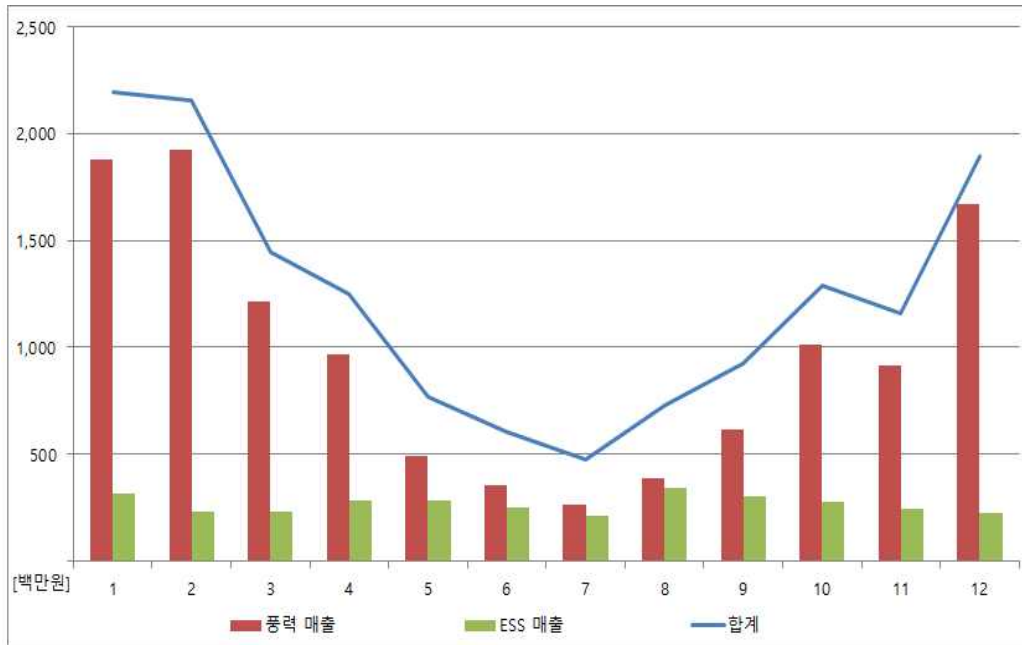


그림 21 2017년 동북·북촌 풍력발전단지 매출 비교(풍력/ESS 구분)

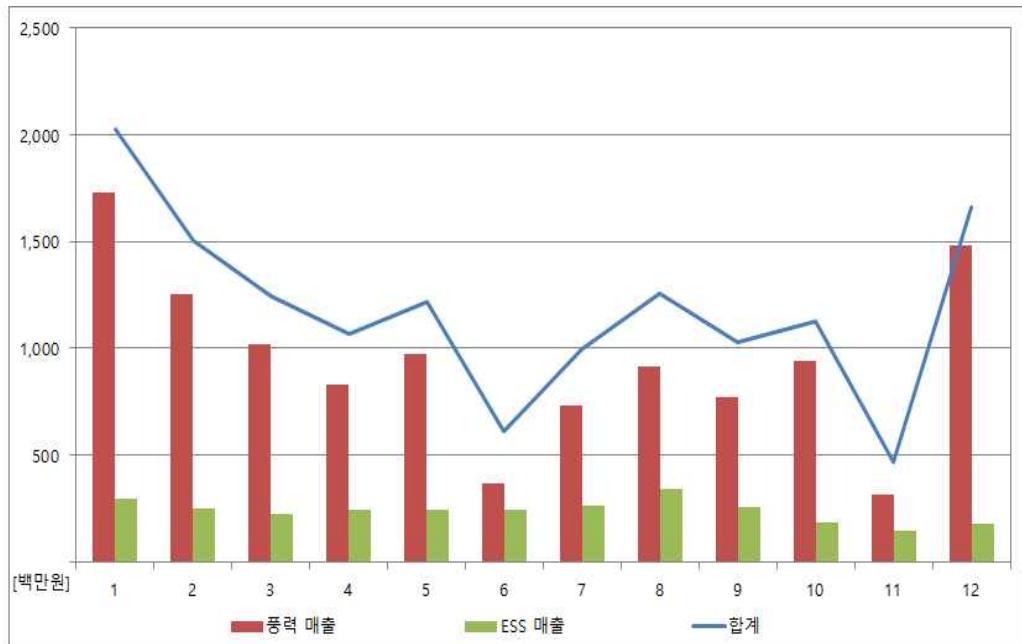


그림 22 2018년 동북·북촌 풍력발전단지 매출 비교(풍력/ESS 구분)

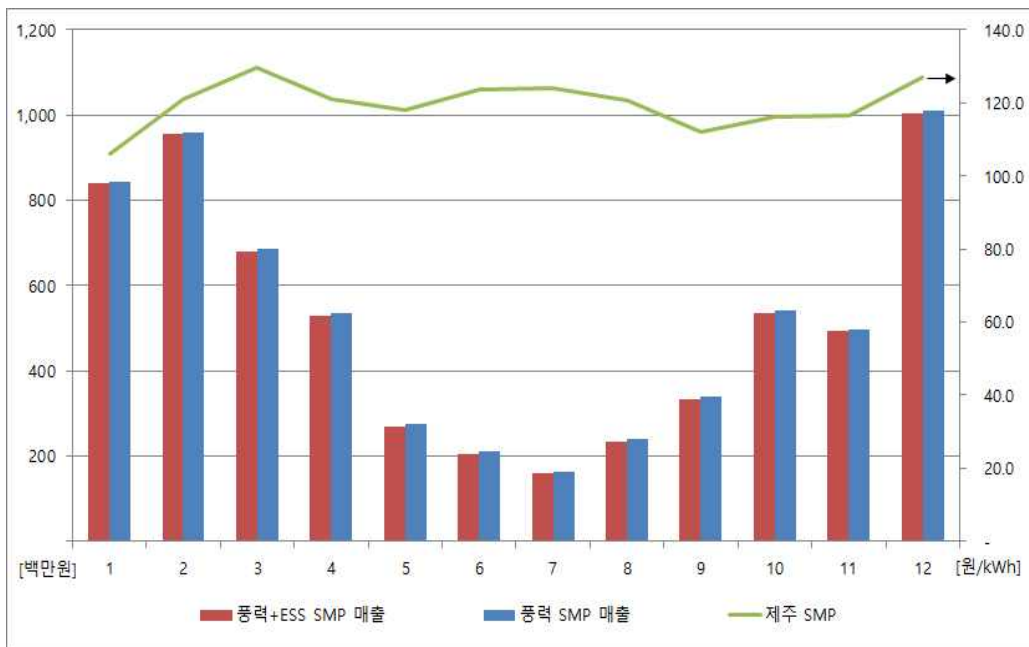


그림 23 2017년 동북·북촌 풍력발전단지 SMP 매출 비교

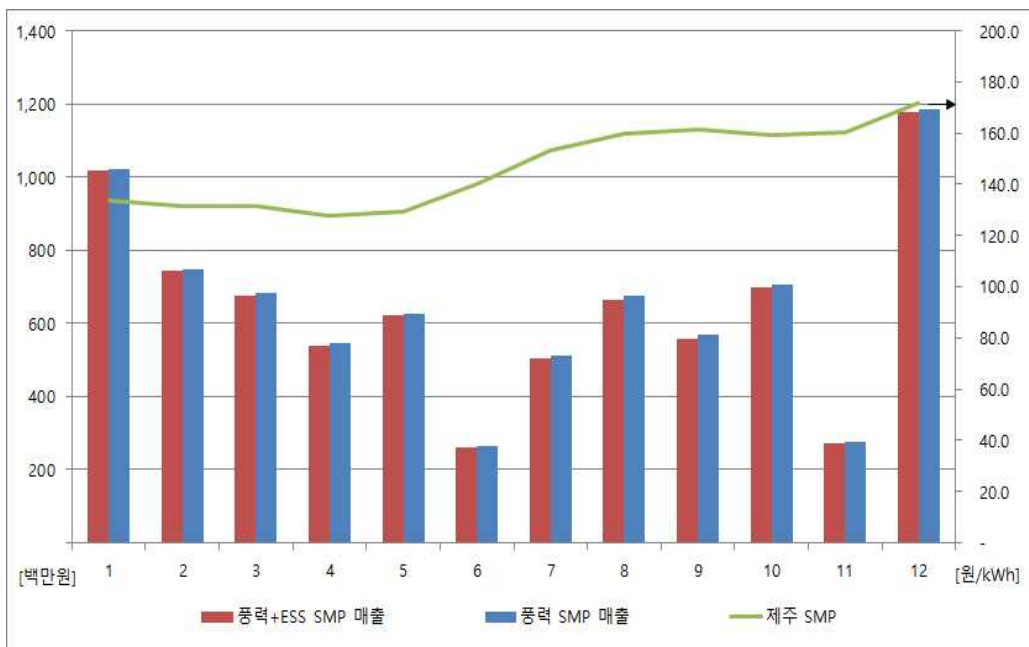


그림 24 2018년 동북·북촌 풍력발전단지 SMP 매출 비교

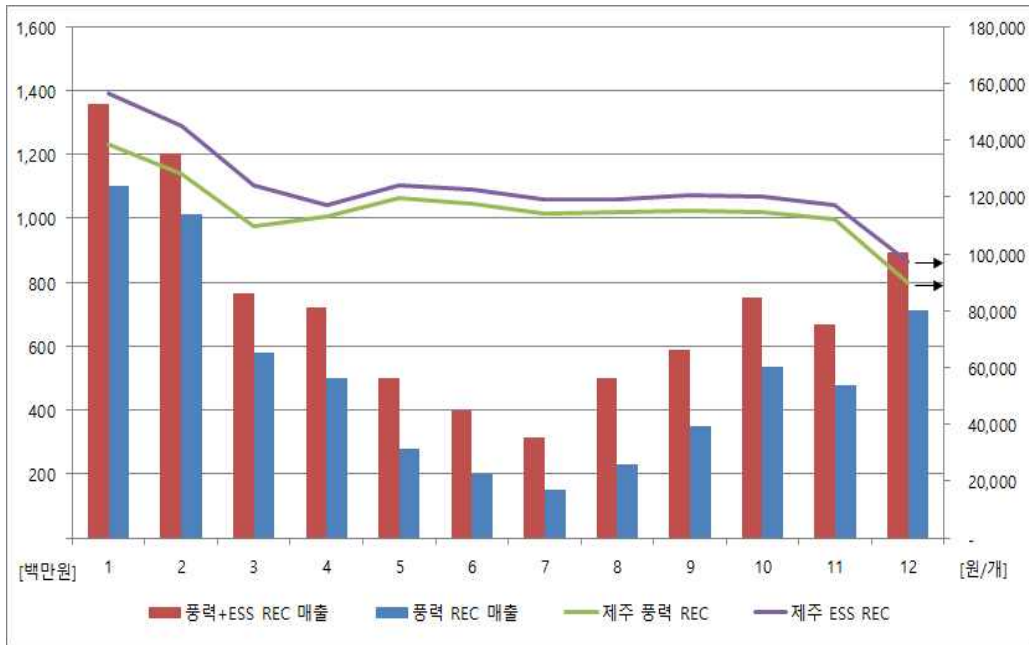


그림 25 2017년 동북·북촌 풍력발전단지 REC 매출 비교

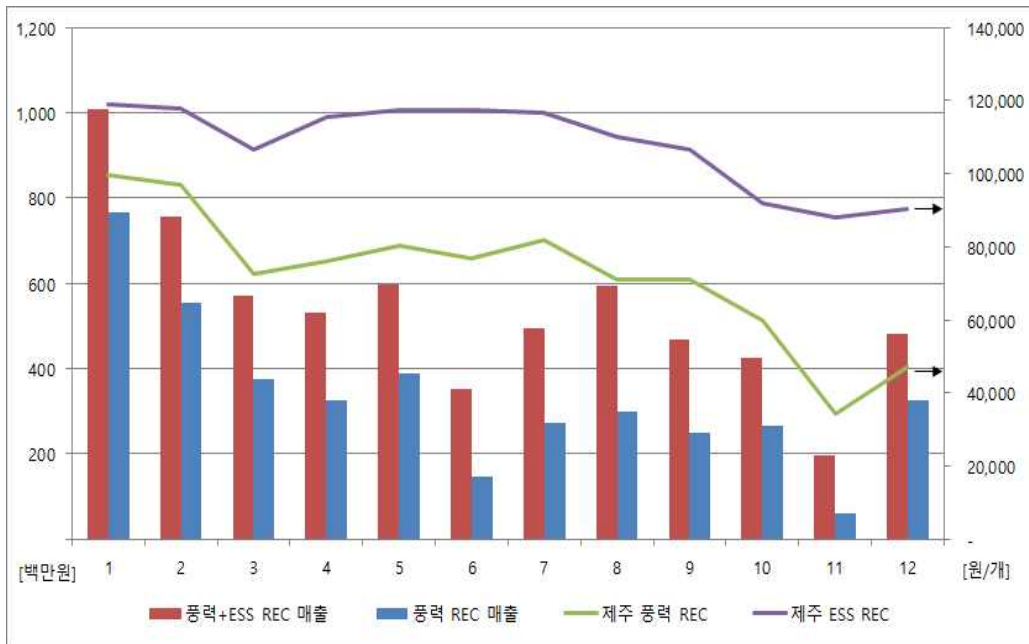


그림 26 2018년 동북·북촌 풍력발전단지 REC 매출 비교

3.3 ESS 경제성 분석

3.3.1 경제성 분석 기준

경제성 분석을 위해 동북·북촌 풍력발전단지의 2016년부터 2018년까지 생산된 실제 발전량과 REC 인정량을 기준으로 풍력발전은 20년간, ESS는 15년간의 상업운전 기간 발전량과 REC 인정량을 예측하였으며 분석기간은 20년까지로 전제하였다[9-11].

SMP와 REC 가격은 표 8과 같이 2016년부터 2018년까지 3년간 평균값으로 SMP 제주가격은 119.39원/kWh를 적용하였으며, REC 제주가격은 3년간 비태양광 REC 현물시장 가격에 육지 SMP와 제주 SMP 차이를 계산 식 (1)로 REC 기준가격 제주를 계산하여 64,131원/REC으로 산정하고, ESS에 대한 가중치 5.0 REC 가격은 89,389원/REC을 산정하여 분석기간 동일가격으로 적용하였다.

표 8 경제성 분석을 위한 SMP 및 REC 가격 예측

구분	SMP [원/kWh]		REC [원/개]		
	육지	제주	기준가격 (고시)	제주 (가중치 1.0)	ESS (가중치 5.0)
2016년도	76.91	91.77	86,508	73,134	83,833
2017년도	81.39	119.72	104,688	70,191	97,789
2018년도	94.64	146.69	95,913	49,068	86,544
평균	84.31	119.39	95,703	64,131	89,389

공사비는 실제 투입된 공사비를 기준으로 풍력발전 63,000백만원과 ESS 9,300백만원을 적용하였다. 금융비용은 풍력발전의 경우 자기자본 8,000백만원(12.7%)과 금융차입 55,000백만원(87.3%), ESS는 자기자본 1,860백만원(20%)과 금융차입 7,440백만원(80%)으로 이자율은 3.6%, 2년 거치 8년 분할상환 조건으로 적용하였다. 운영비에는 유지보수비, 인건비, 마을지원금, 공유재산대부료, 이익공유화 기부금 등을 적용한 결과 ESS를 설치하였을 경우 전체 공사비의 약 3.5%를 차

지하는 것으로 나타났다. 또한 물가인상률 3.0%와 기준할인율 5.0%를 적용하였다[12,13].

BAT 열화율은 성능보증 기간(End of Life, EOL) 15년 후 71.10%를 기준으로 2017년과 2018년 운영기간 동안 ESS 방전량을 적용하여 예측하였다. 또한 동북·북촌 풍력발전단지의 BAT 전체용량은 BAT의 충·방전특성(State Of Charge, SOC)을 고려하여 19.96MWh가 설치되어 있다[4]. ESS 운영은 BAT의 SOC를 고려하여 PCS를 통한 방전 시간을 기준으로 춘계, 추계, 동계는 최대 3시간과 하계(6월 7일~9월 20일)는 2시간씩(13~15시, 19~21시) 최대 4시간을 운영하고 있다. 그림 27은 2017~2018년 동북·북촌 풍력발전단지에 연계된 ESS의 BAT 사용 현황이다.

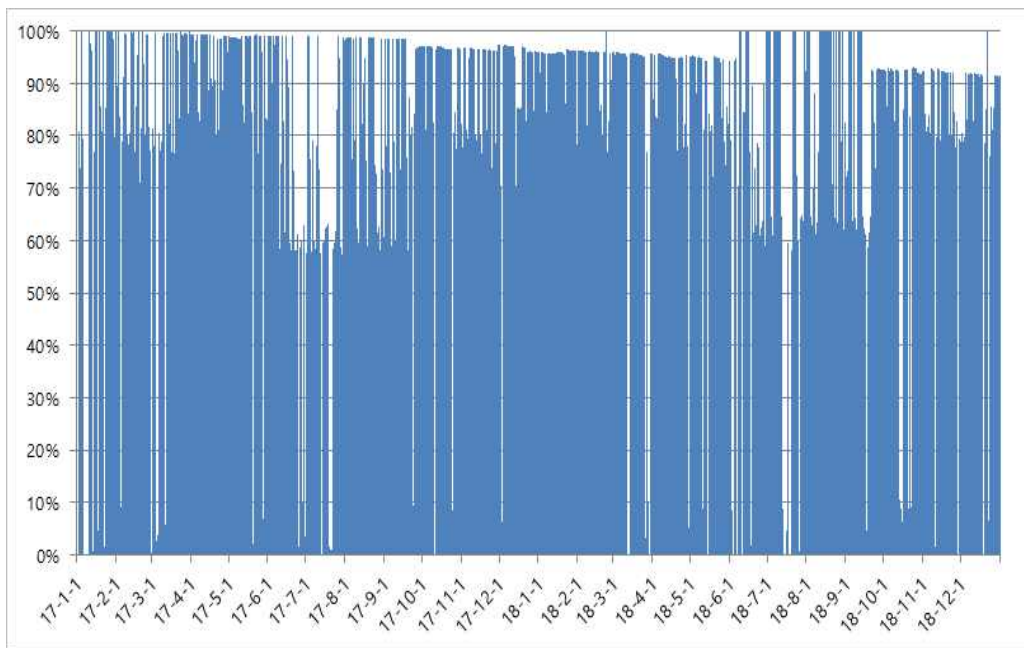


그림 27 2017~2018년 동북·북촌 풍력발전단지 BAT 사용 현황

그림 28은 동북·북촌 풍력발전단지에 연계된 ESS의 BAT 사용 현황을 1년 기준으로 환산하여 내림차순으로 정렬하였다.

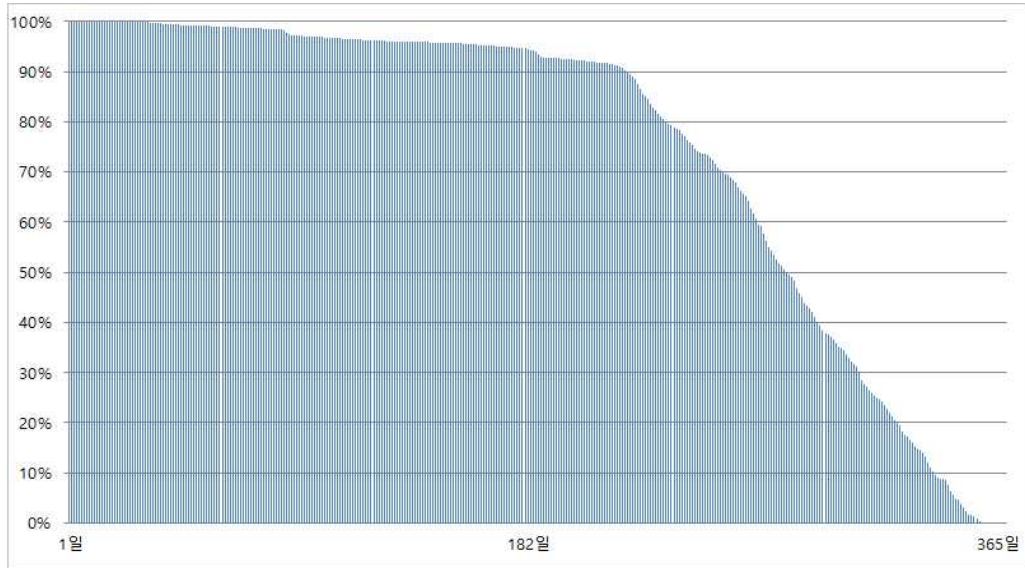


그림 28 동북·북촌풍력발전단지 BAT 사용 현황(1년 환산, 내림차순 정렬)

열화율 예측을 위한 BAT 열화량 계산 식은 다음과 같다.

연도별 BAT의 열화량

$$AL(y) = \sum_{d=1}^{365} (E_d - E_{soc}(y)) \quad (2)$$

$$E_{soc}(y) = TC_{bat} (1 - (y - 2017) \cdot AR_{bat}) \quad (3)$$

여기서, E_d : 2017, 2018년 운영실적 사례로 부터 추출된 일별 BAT의 방전량

$E_{soc}(y)$: 성능보증서의 열화를 고려한 연도별 BAT의 최대방전량

(춘계·추계·동계 : 3시간, 하계 : 4시간)

y : 연도

TC_{bat} : BAT의 전체용량

AR_{bat} : 성능보증기간의 연도별 BAT 열화율(균등 적용)

ESS 운영 1년 차에는 BAT 손실이 없는 것으로 가정하여 계산 식 (2)와 (3)을 사용하여 2017년과 2018년 동북·북촌 풍력발전단지에 연계된 ESS의 운영실적에 따라 연도별 BAT의 열화량과 열화율을 예측하여 표 9와 그림 29로 나타냈다.

표 9 2017~2018년 ESS 운영실적에 따른 년차별 BAT 열화량 및 열화율 예측

구분	2017년 (1년차)	2018년 (2년차)	2019년 (3년차)	2020년 (4년차)	2021년 (5년차)
열화량 AL [MWh]	-	18.686	39.711	86.545	150.905
열화율 [%]	-	0.32	0.69	1.50	2.61
구분	2022년 (6년차)	2023년 (7년차)	2024년 (8년차)	(2025년) (9년차)	2026년 (10년차)
열화량 AL [MWh]	226.807	309.250	401.001	500.147	606.913
열화율 [%]	3.92	5.35	6.93	8.65	10.49
구분	2027년 (11년차)	2028년 (12년차)	2029년 (13년차)	2030년 (14년차)	2031년 (15년차)
열화량 AL [MWh]	720.427	837.437	955.649	1074.429	1194.682
열화율 [%]	12.45	14.48	16.52	18.57	20.65

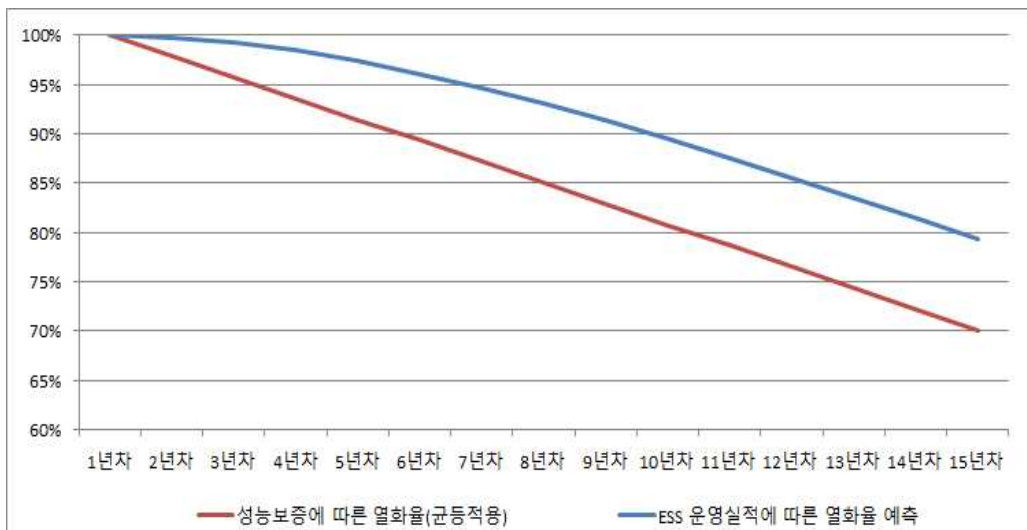


그림 29 BAT 열화율 예측 비교

또한 경제성 검토에 보편적으로 이용되고 있는 순현재가치, 비용편익비, 내부 수익률 분석 방법으로 비교해 보았다[13]. 순현재가치(Net Present Value, NPV)는 지정된 이율에 대해 투자의 현금흐름에 대한 등가 지급액과 등가 수입액의 차이를 나타내는 현시점에서의 순 등가액이다.

순현재가치

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \quad (4)$$

여기서, B_t : t기의 편익(현금유입)

C_t : t기의 비용(현금유출)

r : 기준할인율

비용편익비(Benefit Cost ratio, B/C)는 비용의 현재가치에 대한 편익의 현재가치 비율을 말한다. 어느 시점으로 할인된 편익과 비용의 비율로서 NPV와 같이 산출되며, 일반적으로 B/C는 1.0보다 크면 경제성 측면에서 사업성이 높은 것으로 평가된다.

비용편익비

$$B/C \text{ ratio} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (5)$$

내부 수익률(Internal Rate of Return, IRR)은 편익과 비용의 현재가치로 환산된 값이 같아지는 할인율 R을 구하는 방법으로 사업의 시행으로 인한 순현재가치를 0으로 만드는 할인율이다. 내부수익률이 사회적 할인율보다 크면 경제성이 있다고 판단한다.

3.3.2 경제성 분석 비교

표 10을 보면 상업운전 20년 기간 동안 풍력발전만 운영할 때와 비교하여 풍력발전단지 연계형 ESS를 운영할 경우 표 9의 BAT 열화율을 적용하여 계산한 ESS 방전량 72,429MWh을 제외하면 상업운전 20년 기간 전체 풍력 발전량은 1,065,846MWh에서 937,036MWh로 129,810MWh(12.18%)의 발전량이 감소하지만 REC는 1,065,846개에서 1,298,183개로 232,337개(21.80%) REC를 추가로 발급받는 것으로 분석됐다. 그 결과 20년간 전체 매출액은 199,087백만원에서 208,009백만원으로 8,922백만원(4.48%)이 증가하는 것으로 나타났다. 경제성 분석 방법에 따라 NPV는 14,959~8,694백만원(> 0), B/C는 1.25~1.12(> 1.0), IRR은 7.92~6.59%(> 5.0%)로 풍력발전만 운영할 때와 풍력발전단지 연계형 ESS를 운영할 경우 모두 경제성 평가에서는 양호한 것으로 나타났다.

표 10 상업운전 기간 경제성 분석 비교

구분	풍력	풍력 + ESS
공사비	63,000백만원	72,300백만원
풍력 발전량	1,065,846MWh	937,036MWh
ESS 방전량	-	72,429MWh
REC 발급량	1,065,846개	1,298,183개
매출액	199,087백만원	208,009백만원
NPV	14,959백만원	8,694백만원
B/C	1.25	1.12
IRR	7.92%	6.59%
자본회수기간	10년	11년

3.4 결과 및 고찰

본 논문에서는 제주에너지공사의 동북·북촌 풍력발전단지에 연계되어 운영되고 있는 ESS 운영실적과 매출을 비교해 보았다. 동북·북촌 풍력발전단지에 ESS가 설치되어 2017년과 2018년 상업운전으로 생산한 발전량 및 REC 인정량에 따른 매출은 표 11 및 그림 30과 같다. 2년간 ESS 운영실적을 통해 BAT 충·방전에 따른 발전량은 1,052MWh(0.99%) 감소하지만, 매출은 2,855백만원(10.88%) 증가하였다.

표 11 ESS 도입에 따른 2017~2018년 발전량 및 매출 비교

구분	발전량 [MWh]			매출 [백만원]		
	풍력	풍력 + ESS	차이	풍력	풍력 + ESS	차이
2017년	52,806	52,284	-522	14,422,274	14,898,596	476
2018년	53,665	53,135	-530	11,830,183	14,208,846	2,379
합계	106,471	105,419	-1,052	26,252,457	29,107,442	2,855

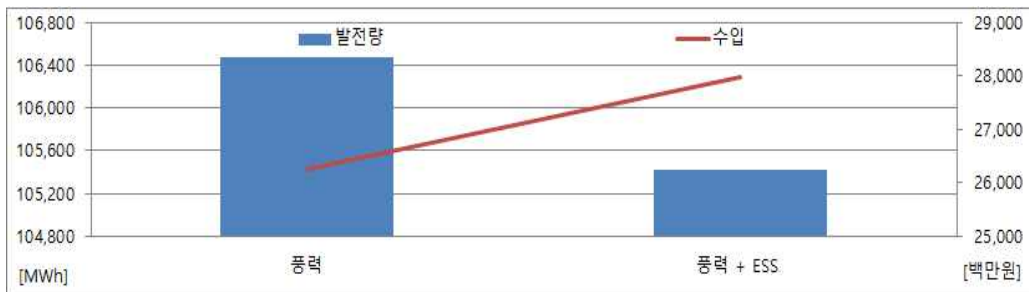


그림 30 ESS 도입에 따른 2017~2018년 동북·북촌 풍력발전단지 발전량 및 매출 비교

경제성 분석 비교는 풍력 발전량 및 ESS 방전량과 이에 따른 REC 기준가격 계산을 통한 SMP 및 REC 가격과 BAT 열화율을 예측하여 적용한 결과이다. 즉, 풍력발전단지에 ESS 연계하여 운영하면 발전사업자에게 매출이 늘어나는 효과를 기대할 수 있다. 더욱 정확한 경제성 분석을 위해서는 SMP와 REC 가격, BAT 열화에 대한 보다 정확한 분석과 예측이 필요하다.

IV. 결 론

본 논문에서는 제주에너지공사의 동북·북촌 풍력발전단지에 연계되어 운영되고 있는 ESS의 경제성을 분석하였다. 동북·북촌 풍력발전단지에 ESS가 설치되어 2017년과 2018년 실제 생산한 발전량과 REC 인정량을 기본 데이터로 하여 20년간의 경제성을 비교·분석하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) ESS 충·방전 효율은 BAT 입·출력단 계측지점에서는 93%, VCB 계측지점에서는 90%로 나타났다.

2) 2017과 2018년 ESS 운영실적을 분석한 결과 ESS 도입에 따라 BAT 충·방전 손실이 발생하여 판매되는 전기에너지량은 감소하였지만, ESS 추가 가중치 적용에 따라 REC 인정량이 증가함으로써 전체 매출은 늘어났다.

3) ESS 사용패턴을 고려한 BAT 열화율은 성능보증서의 열화율보다 감소하는 것으로 예측되었다.

위와 같은 분석 결과 풍력발전단지 연계형 ESS의 경제성을 더욱 개선하기 위해서는 ESS 방전으로 전력계통에 공급되는 전기에너지 실적에 가중치를 적용하여 발급되는 REC에 대하여 육지와 제주를 동일하게 적용하는 방안 등의 RPS 제도 개선 검토가 필요하다고 사료된다. 또한, 전력운영 시장에 따른 SMP와 REC 가격 그리고 ESS 운영에 따른 BAT 열화에 대하여도 정확한 예측 연구를 통한 경제성 분석 방법을 도출해 볼 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] 한국에너지공단 신재생에너지센터, “공급의무화(RPS) 제공 설명 및 안내”, <https://www.knrec.or.kr/business/rps_guide.aspx>.
- [2] 산업통상자원부, 신재생에너지 공급의무화제도 및 연료 혼합의무화제도 관리·운영 지침, 2019.
- [3] 전력거래소, 비용평가 세부운영규정, 2019.
- [4] LG CNS, 풍력발전 연계형 에너지저장장치 설치제안 공모사업 기술제안서, 2016.
- [5] 한국스마트그리드협회, 국내 ESS R&D 및 실증사업의 시험인증/적용표준 현황 보고서, 2016.
- [6] 전력거래소·한국전력공사·한국에너지공단, “신재생 원스톱 사업정보 통합포털”, <<http://onerec.kmos.kr>>.
- [7] LG CNS, “보도자료-제주에너지공사와 민간 투자·운영 기반 수익공유형 사업 모델 적용”, <<https://www.lgcns.co.kr/Views/News>>
- [8] 제주특별자치도, 동북·북촌 풍력발전단지 조성사업 공유재산 영구시설물 축조 동의안, 2016.
- [9] 제주에너지공사. 2016년도 결산보고서, 2017.
- [10] 제주에너지공사. 2017년도 결산보고서, 2018.
- [11] 제주에너지공사. 2018년도 결산보고서, 2019.
- [12] 제주특별자치도, 강정마을 해상풍력발전 보급사업 경제성 분석, 2016.
- [13] 지방공기업평가원, 동북풍력발전단지조성사업 2단계 타당성 분석 및 채원조달방안, 2015.
- [14] 강상현, 동북·북촌 풍력발전단지 출력 변동 저감을 위한 ESS 용량 산정, 제주대학교 석사학위논문, 2017.
- [15] 이창협, 제주지역 풍력발전단지 에너지저장시스템 운영 및 수익증대 방안에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, 2016.