



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](#)

석사학위논문

최소 출력 제약을 위한  
재생에너지 발전 비율 산정

제주대학교 대학원

에너지응용시스템학부 전기공학전공

이 창 우

2020년 02월






# 최소 출력 제약을 위한 재생에너지 발전 비율 산정

지도교수 김 세 호

이 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함

2019년 12월

이창우의 공학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 金 - 煥   
위 원 金 鎬 民   
위 원 金 世 鎬 

제주대학교 대학원

2019년 12월

Estimation of Renewable Energy  
Power Generation Ratio for  
Minimum Output Curtailments

Chang Woo Lee  
(Supervised by professor Se Ho Kim)

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

FACULTY OF APPLIED ENERGY SYSTEM  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2019. 12.

- i -

# 목 차

그림 목차 .....	iv
표 목차 .....	vi
SUMMARY .....	vii
1. 서 론 .....	1
2. 재생에너지 발전비율 산정 방안 .....	3
2.1 재생에너지 비율 산정의 필요성 .....	3
2.2 재생에너지 한계용량 .....	4
2.2.1 재생에너지 한계용량 분석 .....	4
2.2.2 재생에너지 운전한계용량 산정 .....	5
2.3 출력제한 사례 분석 .....	6
2.4 재생에너지의 비율 산정 방법 .....	7
2.5 ESS 연계 방안 .....	9
2.5.1 ESS의 활용 .....	9
2.5.2 ESS의 운영 .....	10
3. 컴퓨터 분석 .....	12
3.1 모델 전력계통 .....	12
3.1.1 전력설비 현황 .....	12
3.1.2 계통수요 현황 .....	12
3.1.3 재생에너지의 부하분담 분석 .....	13
3.2 모델의 용량 산정 .....	14
3.3 출력 제약 최소화를 위한 발전 비율 산정 .....	16

3.3.1	2020년 (WP+PV 점유율 30%) .....	17
3.3.2	2025년 (WP+PV 점유율 54%) .....	19
3.3.3	2030년 (WP+PV 점유율 77%) .....	21
3.4	ESS를 이용한 연계 효과 분석 .....	23
3.5	결과 고찰 .....	24
4.	결 론 .....	26
	참 고 문 헌 .....	27

## 그림 목차

Fig. 1	Amount of power curtailments due to penetration of WP and PV	3
Fig. 2	Capacity limit of renewable energy	5
Fig. 3	Minimum output curtailments ratio flow chart	8
Fig. 4	Method of increasing acceptable production of RE	11
Fig. 5	Curtailment of WP and PV power generation in 2020	17
Fig. 6	The output curtailments by penetration in 2020	18
Fig. 7	Curtailments of WP and PV power generation in 2025	19
Fig. 8	The output curtailments by penetration in 2025	20
Fig. 9	Curtailments of WP and PV power generation in 2030	21
Fig. 10	The output Curtailments by penetration in 2030	22

## 표 목 차

Table 1. Analysis method result of CAISO .....	4
Table 2. Status of the curtailment of WP in Jeju .....	6
Table 3. Order of the U.S. system operators curtailment .....	7
Table 4. Current status of supply facilities in Jeju .....	12
Table 5. Power demand in Jeju .....	13
Table 6. WP and PV power generation, penetration in Jeju .....	13
Table 7. Seasonal penetration of WP and PV generation .....	14
Table 8. Estimated of demand, WP and PV power generation, penetration ·	15
Table 9. Curtailments of supply plan and computer analysis in 2020 .....	17
Table 10. Curtailments of supply plan and computer analysis in 2025 .....	19
Table 11. Curtailments of supply plan and computer analysis in 2030 .....	21
Table 12. Increased capacity of renewable energy with ESS capacity .....	23
Table 13. Computer analysis result value .....	24
Table 14. Power generation of supply plan and computer analysis .....	25



## SUMMARY

The renewable energy resources have been attracting public attention because of environment problems like global warming effect. Although the renewable energy has been constructed rapidly over the world, this uncontrolled power sources can cause a problem of grid stability such as unbalance situation between electricity supplement and demand load.

Especially, variability of renewable energy can negatively affect to power system and increasing penetration of renewable energy causes penetration limit of renewable energy. The grid operator has curtailed renewable energy to maintain stable grid conditions.

From this view point, this thesis is analyzed for wind and solar power generation ratios comparing with power load to minimize the limitation of grid connection clean energy. Also, it presents curtailed renewable energy depending on the ratio between wind and solar power generation. In addition, the application of energy storage system devices was also considered to maximize the use of renewable energy.

# 1. 서 론

전 세계는 지금 글로벌 기후변화에 대한 관심이 높아지면서 화석연료를 대체할 수 있는 재생에너지에 대한 관심이 증가하고 있다. 그 결과 풍력발전(Wind Power, WP)과 태양광발전(Photovoltaic Power, PV)을 포함하는 재생에너지에 대해 투자를 확대하고 있으며, 우리나라 역시 2030년까지 재생에너지 점유율을 전체 전력 설비의 20%까지 끌어올리는 계획을 세웠다.

제주특별자치도는 재생에너지 설비용량을 점차 늘려 2030년까지 제주지역에서 사용되는 전력을 모두 재생에너지로 소비하는 “Carbon Free Island 2030” 계획을 이행 중이다. 제주도는 좋은 풍황 조건으로 인해 이를 연구·개발하려는 각종 기관 및 연구단체와 풍력 사업자로 하여금 많은 관심을 받고 있으며, 풍력발전 사업허가 및 지구지정 등에 관한 조례를 제정하여 대규모의 풍력발전단지 육성을 위한 육상과 해상풍력발전 지구지정을 검토하고 있으며, 풍력산업을 미래 제주의 신성장 동력산업으로 발전시켜 나가기 위해 노력하고 있다[1].

하지만 재생에너지 산업의 발전은 설비용량 증가로 재생에너지 점유율 상승을 야기한다. 그리고 점유율 상승은 재생에너지의 간헐적 특성으로 출력이 일정치 않아 발전량 예측이 어렵고, 전력계통 신뢰도 측면에 있어 악영향을 끼친다. 그 결과 계통운영자는 전력계통의 안정을 위한 방법으로 출력제한을 지시한다[2][3]. 이미 제주에서는 재생에너지의 점유율 상승으로 전력계통에 악영향을 끼치고 있으며, 2015년을 시작으로 2019년까지 출력 제한 사례가 증가하고 있다. 해외에서는 출력 제한을 줄이고 재생에너지의 수용 증대를 위해 다양한 연구를 하고 있다.

캘리포니아 독립 계통 운영 기관인 CAISO(California ISO)는 출력 제한을 줄이기 위해 텍사스 지역에 최적의 발전 비율을 분석하였다. 분석내용은 전력수요에 대한 재생에너지의 발전 점유율 내에서 풍력 및 태양광의 발전 비율을 달리하여 출력 제약 양을 산정하고, 최적의 발전 비율을 분석하였다[4].

본 논문에서는 재생에너지의 출력 제한을 줄임과 동시에 전력계통의 재생에너지 수용 증대를 위한 방안을 제시한다. 출력 제한을 최소화하는 재생에너지 발전 비율을 산정하기 위해 제주 지역 사례를 참고하였다. 전력수요와 재생에너지의 발전량 데이터를

이용하여 풍력과 태양광의 발전 비율과 설비용량을 연구하였으며, 재생에너지의 점유율 단계에 따른 풍력 및 태양광의 발전 비율을 분석하였다. 그리고 ESS(Energy Storage System, 에너지저장장치)를 통한 개선 효과를 분석하였다.

## 2. 재생에너지 발전비율 산정 방안

본 장에서는 전력계통으로 재생에너지의 수용성 증대를 위해 재생에너지 발전 비율 산정의 필요성과 재생에너지 발전 비율 산정 방법을 제안하고자, 재생에너지의 한계용량 분석 및 산정과 출력 제한 사례, ESS 연계 효과를 분석하였다.

### 2.1 재생에너지 비율 산정의 필요성

CAISO는 2050년의 미국 텍사스 지역 전력수요에 대해 풍력 및 태양광의 55% 발전 점유율 내에서 풍력과 태양광의 발전 비율에 따른 출력 제약 양 분석을 수행했으며 이에 대한 결과 값을 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. [4]. 그래프에서 실선은 풍력 및 태양광의 발전 비율에 따른 출력 제약 양을 나타내며 Equal Mix(Left dotted line)와 Curtailment-Minimizing Mix(Middle dotted line), 마지막으로 Wind Vision Mix(Right dotted line)는 3가지의 풍력 및 태양광의 발전비율 시나리오를 나타낸다. 실선과 3가지의 시나리오 점선이 만나는 점은 시나리오에 대한 출력 제약 양을 의미한다.

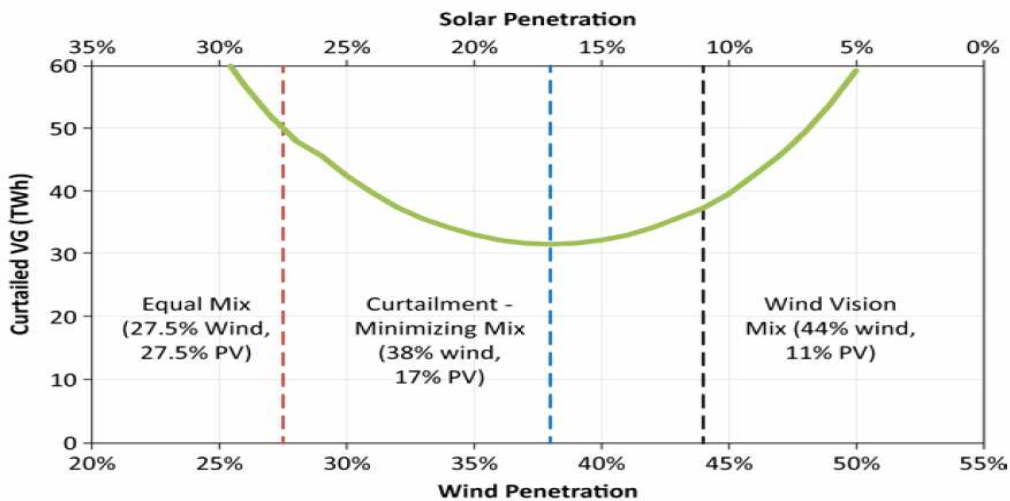


Fig. 1 Amount of power curtailments due to penetration of WP and PV

**Table 1** Analysis method result of CAISO

Scenario	Power generation ratio of WP and PV(%)	Curtailment amount(TWh)
Equal Mix	27.5:27.5	50.0
Curtailment-Minimizing Mix	38:17	38.0
Wind Vision Mix	44:11	30.7

Equal Mix와 Wind Vision Mix의 출력 제약 양은 각각 50 TWh와 38 TWh이며, 최소 출력 제약 양을 갖는 Curtailment-Minimizing Mix의 출력 제약 양은 30.7 TWh로 분석되었다. 이때, 수요대비 풍력 및 태양광의 발전 점유율 내에서 최소 출력 제약 양을 가지는 발전 비율은 2.2:1이다. 이처럼 출력 제약 양은 재생에너지의 발전 비율에 따라 출력 제약 양이 다름을 확인 할 수 있다.

CAISO의 분석과 같이 풍력과 태양광의 발전 비율 분석을 통해 재생에너지의 불필요한 출력 제한 사례를 줄이며, 동시에 전력계통으로 재생에너지의 수용 증대가 가능하다.

## 2.2 재생에너지 한계용량

### 2.2.1 재생에너지 한계용량 분석

전력계통은 재생에너지의 발전량이 증가하여 수요보다 공급이 더 많아지는 경우가 발생할 수 있으며 전력계통은 불안정한 상황이 된다. 따라서 이와 같은 불안정한 상황을 해결하기 위해 전력조류가 육지에서 제주로가 아닌 제주에서 육지부로 전력 역송전과 같은 양방향 HVDC(high-voltage, direct current, 초고압 직류송전)시설이 필요할 것이다. 하지만 육지부로의 전력 역송전도 한계가 있으므로 전력계통에 연계된 재생에너지의 적정 용량을 산정하여 재생에너지의 출력을 제한시켜야만 한다.

제주지역의 재생에너지 발전량 점유율은 높은 수준의 점유율로 2016년부터 2018년까지 모두 10%가 넘는 점유율을 보였다. 제주특별자치도의 “Carbon Free Island 2030” 계획으로 앞으로 재생에너지 설비는 늘어날 것으로 예상되며, 그

결과 재생에너지 점유율도 높아질 것으로 예상된다.

재생에너지 발전은 간헐적인 특징으로 인해 발전량 예측이 어려워 발전계획 수립에 있어 계통운영자들에게 많은 어려움을 주고 있으며 안정적인 계통 운영을 위해선 재생에너지의 한계용량을 분석할 필요가 있다.

재생에너지의 한계용량은 최소부하(발전기 최저출력) 제약을 만족하는 최대용량과 예비력 증감발출을 만족하는 최대용량, 대용량 단위기 1기 고장에도 안정한 최대용량, 그리고 정상 시 주파수 변동에도 안정한 최대용량 중에 최솟값으로 정해지며 통상적으로 발전기 최저출력제약 및 최소 부하에서 결정된다. 최소발전량 기준 재생에너지 한계용량 산정 개념도는 Fig. 2와 같다[1].

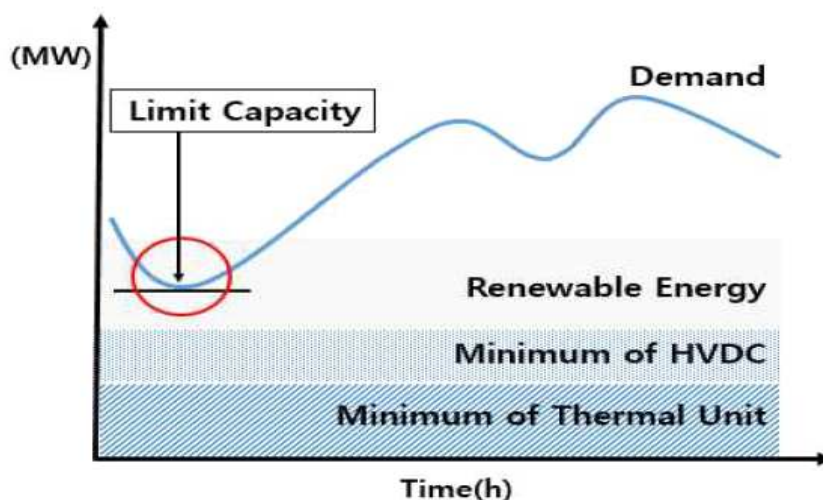


Fig. 2 Capacity limit of renewable energy

### 2.2.2 재생에너지 운전 한계용량 산정

재생에너지 한계용량 분석에서 언급한 바와 같이 HVDC 및 일반 발전기의 최소발전량은 전력계통에서 유지되는 최소한의 발전력으로 더 이상 줄일 수 없는 양이다. 결과적으로 전력계통에서는 최소부하와 재생에너지의 최대출력이 겹치는 순간이 오면 계통 부하보다 공급되는 발전력이 많게 되는 상황이 발생할 수 있다. 이런 상황을 방지하기 위해 계통운영자는 최소발전량을 기준으로 재생에너지 발전의 한계용량을 산정하여야 한다. 최소부하제약을 만족하는 재생에너지의 최

대용량 산정 방식은 식(1)과 같다[5].

$$P_{\text{재생에너지}} \leq P_{\text{최저부하}} - (P_{\text{발전기 최소출력}} + P_{\text{HVDC 최소(1)}}) + P_{\text{HVDC 최대(2,3)}} \quad (1)$$

### 2.3 출력제한 사례 분석

계통운영자는 안정적인 계통 운영을 위해 전력 계통에서 수용할 수 있는 용량보다 재생에너지의 공급이 많아지는 상황이 발생하면 재생에너지의 출력을 제한한다.

전력계통에서 재생에너지 발전이 한계용량에 도달하여 풍력발전의 출력을 제한한 사례를 Table 2에 나타내었다. 매년 풍력발전의 출력 제한 횟수와 출력 제한 양은 증가하고 있다. 풍력발전의 출력 제한은 2015년과 2016년 단 1차례를 제외하고 경부하 시간대인 새벽 시간에 풍력발전의 공급과잉으로 인하여 출력의 제한이 발생하였으나, 2017년 이후 낮에 태양광 발전의 공급과잉으로 풍력발전의 출력을 제한하는 사례가 발생하고 있다.

재생에너지 증가에 의한 출력 제한 사례는 해외 각지에서도 발생하고 있으며, 계통운영자는 설정된 기준에 따라 출력 제한의 순서를 결정하고 있다. 순서를 결정하는 기준은 다양하며, 그 기준은 종종 출력 제한 사유에 의해 결정되고 있다.

**Table 2** Status of the curtailment of WP in Jeju

Year	Curtailment count	①Curtailment amount(MWh)	②Total power generation (MWh)	Ratio(%) ①/②×100
2015	3	152	352,203	0.04
2016	6	252	470,376	0.05
2017	16	1,301	541,526	0.24
2018	17	1,347	538,996	0.25
2019.3.25	7	1,283	191,085	0.67
Total	49	4,335	2,093	0.21

미국 계통운영자의 출력 제한의 순서를 Table 3에 나타내었다. 전형적으로 혼

잡에 의한 출력 제한은 그 제한의 완화에 가장 효과적인 발전기를 기본으로 하고 있으며, 많은 기구와 계통 운영자들이 계약과 풍력발전의 경제성을 기본으로 하여 제한을 결정하고 있다[6].

**Table 3** Order of the U.S. system operators curtailment

Utility	Curtailment order
CAISO	Generator of most effective in relieving congestion.
MISO	Generators that are most impact congestion and firm transmission service.
SPP	Wind generators of the contribution 5% or greater to a curtailment (divided equally).
ISO-NE	Pro-rated equally among effected generator that self-Scheduled in day-ahead market.
AESO	Most expensive energy including wind (if transmission curtailment).
PSCO	Cost of the generators as well as contractual issues.
Hawaii	Reverse installation order(cause of directly attribution is not applied). If at least 60% of annual estimation energy product over 4years, curtailment will be priority(loss of priory on installation year). Subject Exception: FIT project, net-metered PV.

#### 2.4 재생에너지의 비율 산정 방법

본 장에서는 전력계통으로 재생에너지의 수용 증대와 함께 출력 제한을 줄이기 위해 해당 연도의 수요 대비 풍력과 태양광 발전의 점유율 내에서 출력 제한이 최소화되는 비율분석 방법을 제시하고자 한다. 방법은 다음과 같다.



STEP 1: 풍력 및 태양광발전의 전체 점유율 산정

분석하고자 하는 해당연도의 수요 대비 풍력 및 태양광발전의 점유율을 산정한다. 해당연도의 수요예측과 풍력 및 태양광의 발전량을 분석하여, 수요 대비 풍력 및 태양광발전의 점유율을 분석한다. 점유율  $Z$  산정 방식은 식 (2)와 같다.

$$Z = \frac{WP\text{Power Generation} + PV\text{Power Generation}(kWh)}{Demand(kWh)} \quad (2)$$

여기서,  $Z$ : 수요대비 재생에너지의 점유율

STEP 2: 풍력 및 태양광 발전의 개별 점유율 산정

해당연도의 점유율  $Z$ 에 대하여, 풍력 및 태양광의 발전비율을 재분배하는 단계이다. 풍력 및 태양광의 점유율 재분배 순서도와 산정식을 Fig. 3과 식 (3)에 나타내었다.

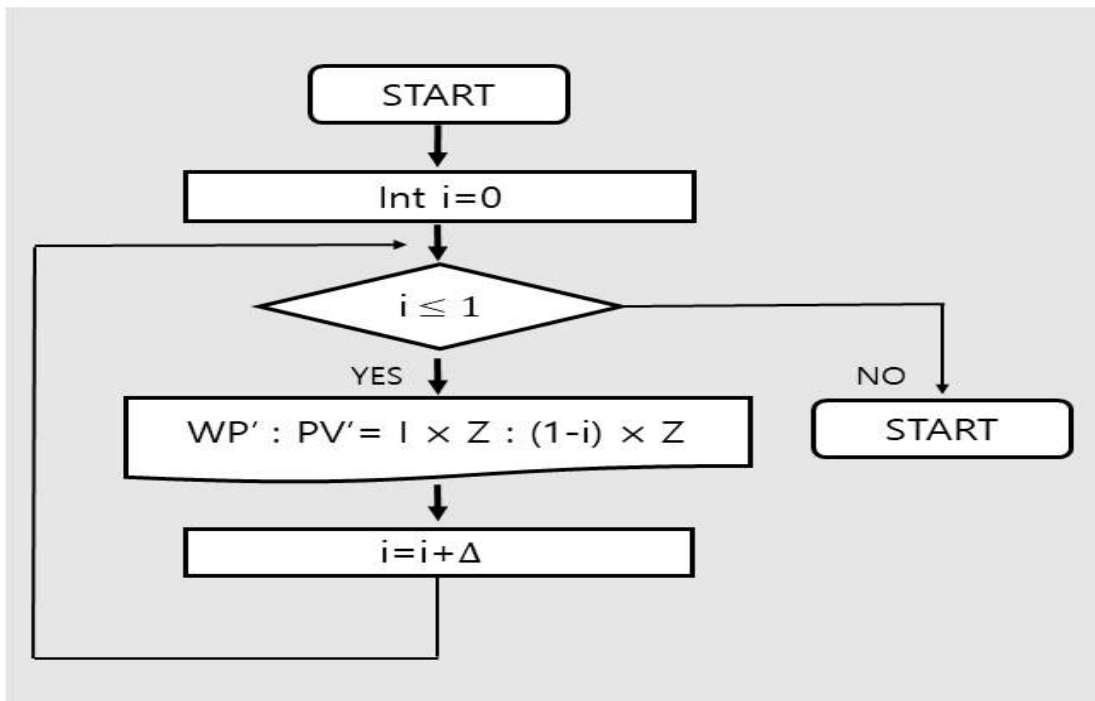


Fig. 3 Minimum output curtailment ratio flow chart

여기서, WP: 수요대비 풍력발전 점유율  
 PV: 수요대비 태양광발전 점유율  
 $\Delta$  : 점유율 증분량(단,  $0 \leq \Delta < 1$ )

$$WP: PV = Z - \Delta Z_n : \Delta Z_n \quad (3)$$

여기서, Z: 수요대비 재생에너지의 점유율  
 $\Delta$ : 점유율 증분량( $0 \leq \Delta \leq 1$ )

보다 정확한 분석을 위해 점유율 증분량 분배 순서는 다음과 같다.

- (1) 풍력과 태양광 발전의 점유율 증분량, 즉  $\Delta$ 의 크기는 첫 단계에서 점유율×10%로 하여 최저 출력 제약 양을 갖는 풍력 및 태양광의 비율 도출
- (2) 1번에서 나온 비율에서  $\Delta$ 의 크기를 1%로 하여 다시 차등 분배하여, 정확한 최적 비율 도출

### STEP 3: 출력 제한 양 산정 및 최적 비율 도출

풍력 및 태양광의 재분배 비율에 따라 출력 제약 양을 비교하고, 최소 출력 제약 양을 도출하는 단계이다. 최소 출력 제약 양에 해당하는 풍력 및 태양광 발전의 비율이 최적 비율이 된다.

## 2.5 ESS 연계 효과 분석

### 2.5.1 ESS의 활용

재생에너지 발전설비와 함께 ESS를 연계한다면 전력계통 측면에서 재생에너지의 수용성 증대와 출력 제한을 줄일 수 있다. ESS는 생산된 전력을 저장해 뒀다가 피크시간대의 원활한 전력 공급에 기여함과 동시에 추가적인 REC(Renewable Energy Certificates, 신재생에너지 발전을 통한 에너지 발전 증명서) 가중치를 부

여받을 수 있다. 2019년 풍력 발전 연계 ESS의 REC가중치는 4.5배, 태양광 발전 연계 ESS의 REC 가중치는 5.0배까지 획득하여 추가 수익을 확보하게 된다. 이는 신재생에너지의 안정적 전력 생산능력 제고와 함께 추가적인 대규모 재생에너지 발전단지 구축을 통한 전력 공급 능력 증대 및 전력 공급 가격에 대한 안정성 확보가 가능해질 것이다.

ESS의 세 가지 주요 활용 분류는 다음과 같다.

- (1) 전력품질유지: 전력품질유지의 용도로 사용되는 ESS 내에 저장된 에너지는 전송되는 전력의 품질을 보장하기 위해 오직 수 초 혹은 그 이하의 시간 동안만 사용된다.
- (2) 완충 혹은 비상 시 충전: 완충 혹은 비상 시 충전의 용도로 사용되는 ESS에 저장된 에너지는 하나의 발전원에서 다른 발전원으로 전환 할 시 안정적인 계통운동을 위해 수초에서 수분동안 사용될 수 있다.
- (3) 계통 관리: 계통 관리의 용도 내의 ESS는 발전과 소비사이의 비동조화를 위해 사용되며 전형적인 용도는 off-peak 시간동안의 ESS에 저장하고, peak시간 동안 ESS에 충전된 에너지를 방전하여 사용하는 부하평준화의 용도로 사용 가능하다.

특히 전력 시스템에서 ESS의 적용성은 방전 주기에 따라 장/단 주기적인 역할로 구분될 수 있다. ESS의 장기적 운영은 주로 발전과 에너지 사용의 이동이 주된 목적을 갖고 에너지원으로 활용하는 것으로 이를 위해 일반적으로 1일에 한 주기의 긴 충전 기간과 방전 기간을 갖도록 수행된다. 단기적인 운영은 ESS를 전력망에서 전원으로 응용하는 것으로 수초에서 수분의 기간으로 비교적 짧은 충/방전의 기간을 갖도록 운영한다. 그 결과 ESS의 단기적 운영은 하루에 많은 충/방전의 횟수를 보인다[1].

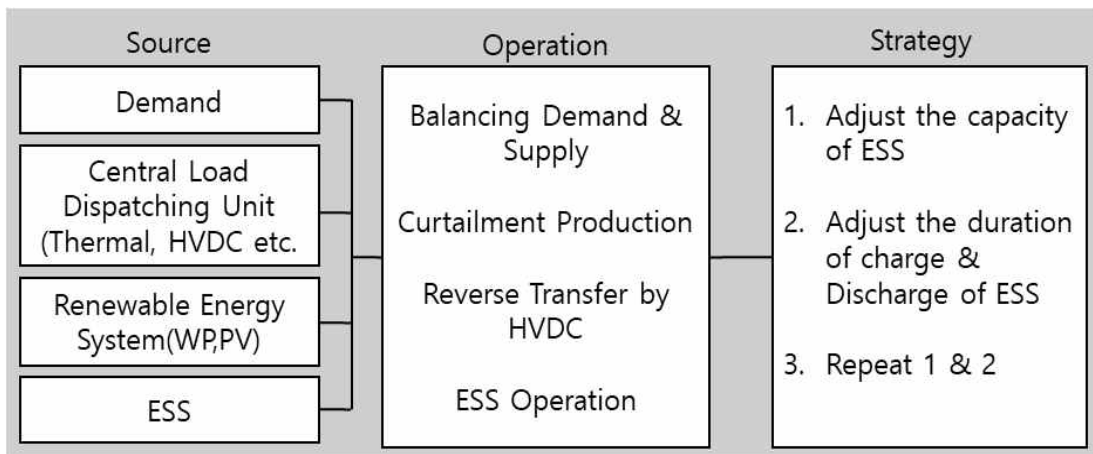
### 2.5.2 ESS의 운영

재생에너지의 수용 증대를 위한 ESS 용량 및 충/방전 시간의 결정을 위해서는 기존의 수익증대를 위한 ESS의 충/방전과 다른 운영 방안이 필요하다. 재생에너

지의 수용 증대를 위한 전략을 Fig. 4에 나타내었다. 우선 수요와 공급의 균형을 위하여 제주-육지 간에 HVDC와 중앙급전 발전설비의 증/감발로 균형을 맞추었고, 출력의 제약이 발생할 경우 ESS 충/방전을 실시하였다.

재생에너지의 수용증대를 위한 ESS의 운영전략은 다음과 같다[7].

- (1)ESS의 용량 설정
- (2)ESS의 충/방전시간 설정
- (3)1번과 2번의 반복실행



**Fig. 4** Method of increasing acceptable production of RE

### 3. 컴퓨터 분석

본 장에서는 출력 제한을 최소화하는 재생에너지 발전 비율을 산정하기 위해 제주지역의 전력수요, 재생에너지 예상 발전량을 이용하여 풍력과 태양광의 최적 발전 비율과 설비 용량을 분석하였다. 다음으로 ESS를 이용하여 재생에너지 수용 증대 효과를 분석하고자 한다.

#### 3.1 모델 전력계통

##### 3.1.1 전력설비 현황

2018년 기준 제주지역의 공급설비 현황을 Table 4에 나타내었다. 공급설비용량은 총 1612.2 MW로 화력이 약 36%로 가장 많은 점유율을 나타내고 있으며, HVDC가 약 25%를 차지하고 있으며, LNG 11.6%, 풍력발전 및 태양광발전의 점유율은 각각 16.5%, 10.4%를 차지하고 있다.

**Table 4** Current status of supply facilities in Jeju

Facility	Installed capacity(MW)	Capacity ratio(%)
Thermal	590.0	36.6
HVDC	400.0	24.9
LNG	187.4	11.6
WP	266.4	16.5
PV	168.4	10.4
Total	1612.2	100.0

##### 3.1.2 계통수요 현황

2016년부터 2018년까지 제주지역 계통수요 현황을 Table 5에 나타내었다. 제주지역의 전기차 보급과 2012년부터 매년 만 명 이상의 인구증가로 인해 매년 전력수요는 늘어나고 있으며 전년 대비 5.8%와 4.7%의 전력수요 증가율을 보인다.

**Table 5** Power demand in Jeju

Year	Demand(GWh)	Increasing ratio(%)
2016	5,127	-
2017	5,422	5.8
2018	5,675	4.7

### 3.1.3 재생에너지의 부하분담 분석

제주지역의 풍력 및 태양광발전의 점유율을 Table 6에 나타내었다. 풍력발전 점유율은 2017년 10%로 가장 높은 점유율을 보였으며, 태양광발전 점유율은 2018년 3%의 가장 높은 점유율을 나타내었다.

**Table 6** WP and PV power generation, penetration in Jeju

Year	Demand (GWh)	WP		PV	
		Product (GWh)	Penetration (%)	Product (GWh)	Penetration (%)
2016	5,128	470.3	9.2	89.3	1.7
2017	5,422	541.2	10.0	140.8	2.6
2018	5,676	538.7	9.5	168.4	3.0

풍력 및 태양광발전의 계절별 점유율 Table 7에 나타내었다. 풍력발전 점유율은 2016년부터 2018년까지의 겨울 모두 10% 이상의 높은 점유율을 보인다. 태양광발전은 발전 점유율이 풍력과 비교해 미비한 점유율을 보이며, 계절별 뚜렷한 특징을 보이고 있지 않다.

**Table 7** Seasonal penetration of WP and PV generation

Year	Season (month)	Demand (GWh)	WP		PV	
			Product (GWh)	Penetration (%)	Product (GWh)	Penetration (%)
2016	Spring(3,4,5)	1,219	102.5	8.4	28.1	2.3
	Summer(6,7,8)	1,335	59.1	4.4	26.0	1.9
	Fall(9,10,11)	1,175	115.9	9.9	70.4	6.0
	Winter(1,2,12)	1,399	192.7	13.8	16.7	1.2
2017	Spring(3,4,5)	1,283	123.0	9.6	41.9	3.3
	Summer(6,7,8)	1,429	64.6	4.5	39.8	2.8
	Fall(9,10,11)	1,243	135.2	10.9	34.0	2.7
	Winter(1,2,12)	1,468	218.5	14.9	25.0	1.7
2018	Spring(3,4,5)	1,338	139.3	10.4	44.8	3.3
	Summer(6,7,8)	1,498	88.0	5.9	49.0	3.3
	Fall(9,10,11)	1,282	109.6	8.5	46.9	3.7
	Winter(1,2,12)	1,558	201.8	13.0	27.8	1.8

### 3.2 모델 용량 산정

본 논문에서는 2020년부터 2030년까지 풍력 및 태양광의 최소 출력 제한 비율을 분석하기 위해 해당연도의 예상 수요와 풍력 및 태양광의 예상 발전량을 산정하였다. 예상 수요는 ‘제 8차 전력수급 기본 계획’을 참고하였고, 설비용량은 ‘CFI 2030 정책의 제8차 국가 전력수급 기본계획 반영 근거 마련’ 보고서를 참고하였다[8]. 풍력 및 태양광의 예상 발전량은 2018년의 제주지역의 실제 풍력 및 태양광발전의 이용률을 이용하여 산정하였으며 이용률 산정 방식은 식 (4)와 같다[9].

$$\text{이용률} = \frac{\text{발전량}}{\text{설비용량} \times \text{발전시간}} \times 100(\%) \quad (4)$$

연도별 예상 수요와 풍력 및 태양광의 예상 발전량, 수요대비 풍력 및 태양광 발전의 점유율은 Table 8과 같다.

**Table 8** Estimated of demand, WP and PV power generation, penetration

Year	Demand(GWh)	WP(MW)	PV(MW)	Penetration(%)
2020	5,699	1,238	473	30
2021	5,969	1,551	603	36
2022	6,212	2,113	713	45
2023	6,454	2,315	820	49
2024	6,696	2,517	910	51
2025	6,935	2,719	1,000	54
2026	7,171	3,126	1,082	59
2027	7,403	3,533	1,164	63
2028	7,631	3,939	1,247	68
2029	7,853	4,346	1,329	72
2030	8,068	4,752	1,411	76



### 3.3 출력 제약 최소화 비율 산정

분석 대상의 용량 산정에서 2020년에서 2030년까지의 예상 수요, 풍력 및 태양광의 발전량을 산정하였고 수요대비 풍력 및 태양광의 점유율을 산출하였다. 산출된 점유율 내에서 Fig. 3의 점유율 재분배 순서도와 식(3)의 점유율 재분배 산정식을 이용하여 풍력 및 태양광의 비율을 달리하여 최소 출력 제한 비율을 분석하였다. (단, 중앙급전발전기, HVDC를 통한 역송량, 기타 재생에너지의 발전량은 무시하였다.)

풍력 및 태양광의 점유율 증분량, 즉  $\Delta$ 의 크기는 점유율 $\times$ 10%로 하여 분배하여 분석한 후, 더 정확한 비율을 산정하기 위해 최소 비율에서  $\Delta$ 의 크기를 1%로 차등 분배하여 최소 출력 제한을 갖는 풍력 및 태양광의 발전 비율을 분석하였다.

추가로 ‘CFI 2030 정책의 제8차 국가 전력수급 기본계획 반영 근거 마련’ 보고서의 발전설비 계획에 대한 출력 제약 양과 본 논문에서 분석 방법의 출력 제약 양을 비교 분석하였다.

### 3.3.1 2020년 (WP+PV 점유율 30%)

분석 결과, 2020년의 전력수요에 대한 풍력 및 태양광발전의 점유율은 30%로 확인되었으며 30% 점유율 내에서 최소 출력 제약 양을 갖는 풍력 및 태양광의 발전 비율을 Fig. 5에 나타내었다. 최적 비율은 WP:PV = 25%:5% (5.00:1)이며 이때 해당하는 출력 제약 양은 3.3 GWh로 분석되었다.

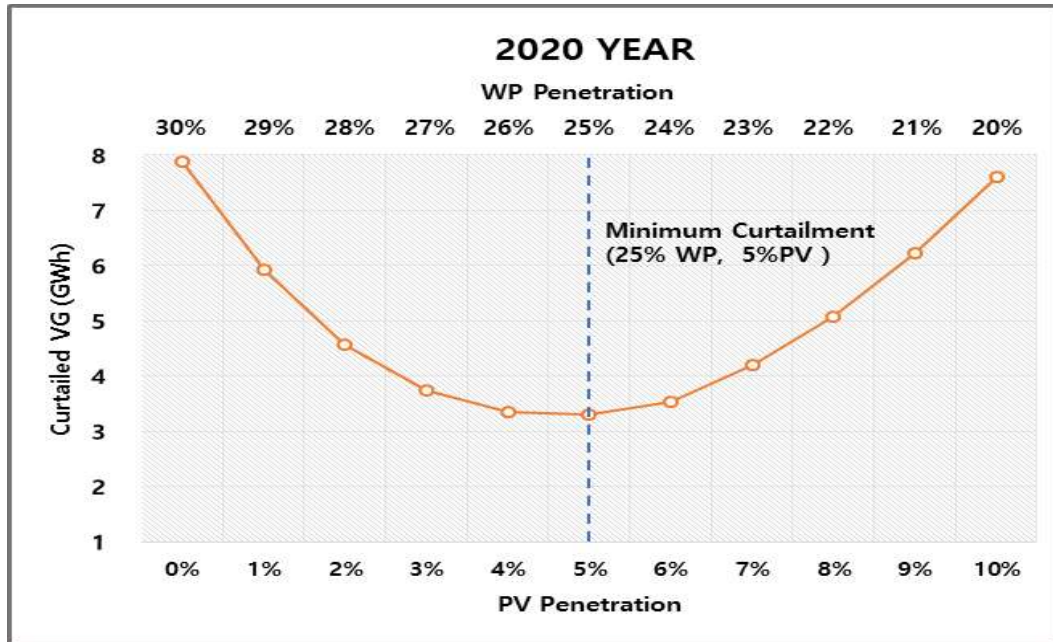


Fig. 5 Curtailments of WP and PV power generation in 2020

컴퓨터 분석의 출력 제약 양과 보고서를 토대로 산정한 출력 제약 양을 비교한 결과를 Table 9에 나타내었다. 분석 결과 2020년에 컴퓨터 분석의 발전 비율로 발전하였을 시 총 2.1 GWh의 출력 제약 양을 줄일 수 있다.

Table 9 Curtailments of supply plan and computer analysis in 2020

Year	①Supply plan (GWh)	②Computer analysis(GWh)	①-② (GWh)
2020	5.4	3.3	2.1

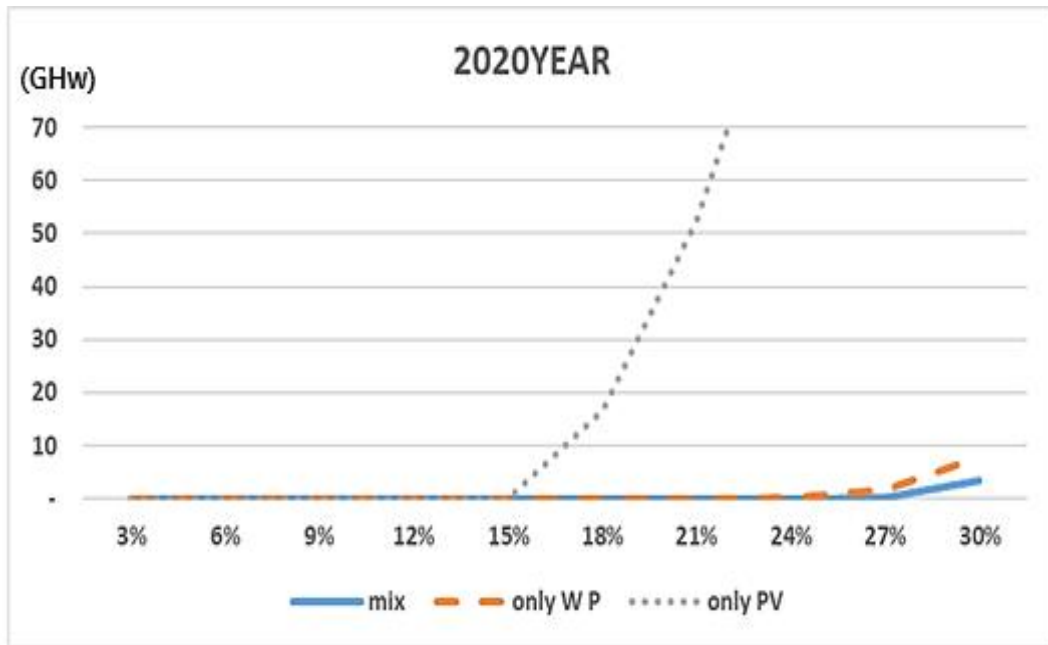


Fig. 6 The output curtailments by penetration in 2020

Fig. 6은 2020년 점유율에 따른 독립적인 풍력과 태양광 발전의 출력 제약 양과 컴퓨터 분석 결과로 얻은 최적 비율 출력 제약 양을 비교 분석한 그래프이다. Fig. 6에서 보듯이 독립적인 풍력 및 태양광발전의 출력 제약 양보다 최적 비율의 출력 제약 양이 적음을 확인 할 수 있다.

분석 결과 2020년은 재생에너지의 점유율에 대해서 풍력에 점유율이 높게 분석되어 30% 점유율에서 최적 비율의 출력 제약 양과 독립적인 풍력발전의 출력 제약 양은 2.38배의 차이를 보였으며, 독립적인 태양광발전의 경우 풍력발전과 반대로 다른 년도에 비해 재생에너지의 점유율에 대해서 태양광에 점유율이 낮게 분석되어 최적 비율의 출력 제약 양과 독립적인 태양광발전의 출력 제약 양은 76.36배의 차이를 보였다.

### 3.3.2 2025년 (WP+PV 점유율 54%)

분석 결과, 2025년의 전력수요에 대한 풍력 및 태양광발전의 점유율은 54%로 확인되었으며 54% 점유율 내에서 최소 출력 제약 양을 갖는 풍력 및 태양광의 발전 비율을 Fig. 7에 나타내었다. 최적 비율은 WP:PV = 38%:16% (2.38:1)이며 이때 해당하는 출력 제약 양은 283.3 GWh로 분석되었다.

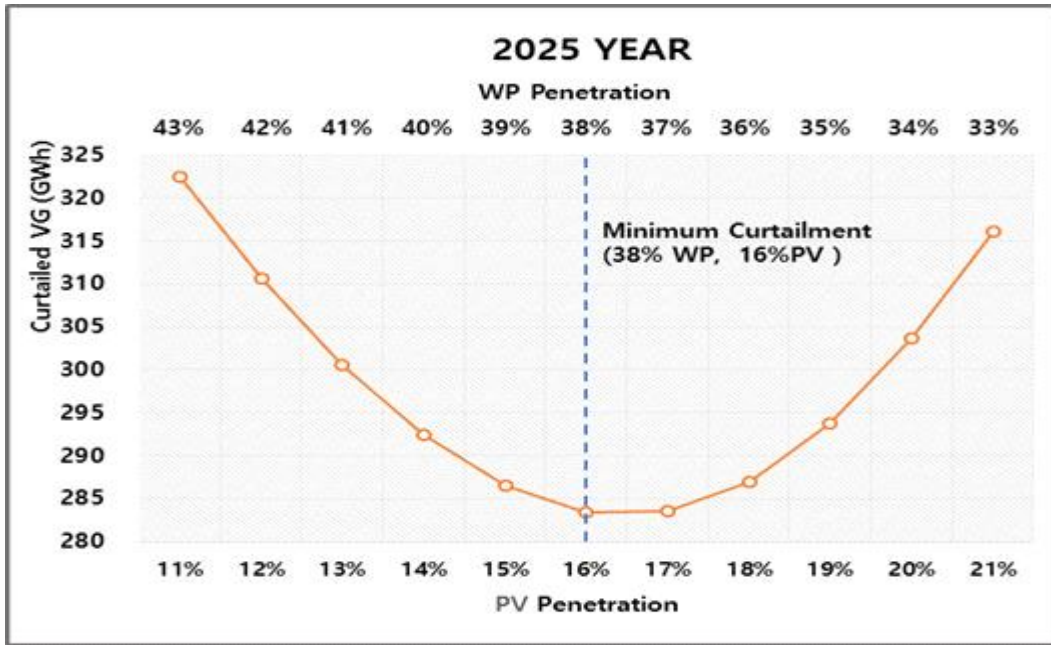


Fig. 7 Curtailments of WP and PV power generation in 2025

컴퓨터 분석의 출력 제약 양과 보고서를 토대로 산정한 출력 제약 양을 비교한 결과를 Table 10에 나타내었다. 분석 결과 2025년에 컴퓨터 분석의 발전 비율로 발전하였을 시 총 22.4 GWh의 출력 제약 양을 줄일 수 있다.

Table 10 Curtailments of supply plan and computer analysis in 2025

Year	①Supply Plan (GWh)	②Computer Analysis(GWh)	①-② (GWh)
2024	312.4	283.3	29.1

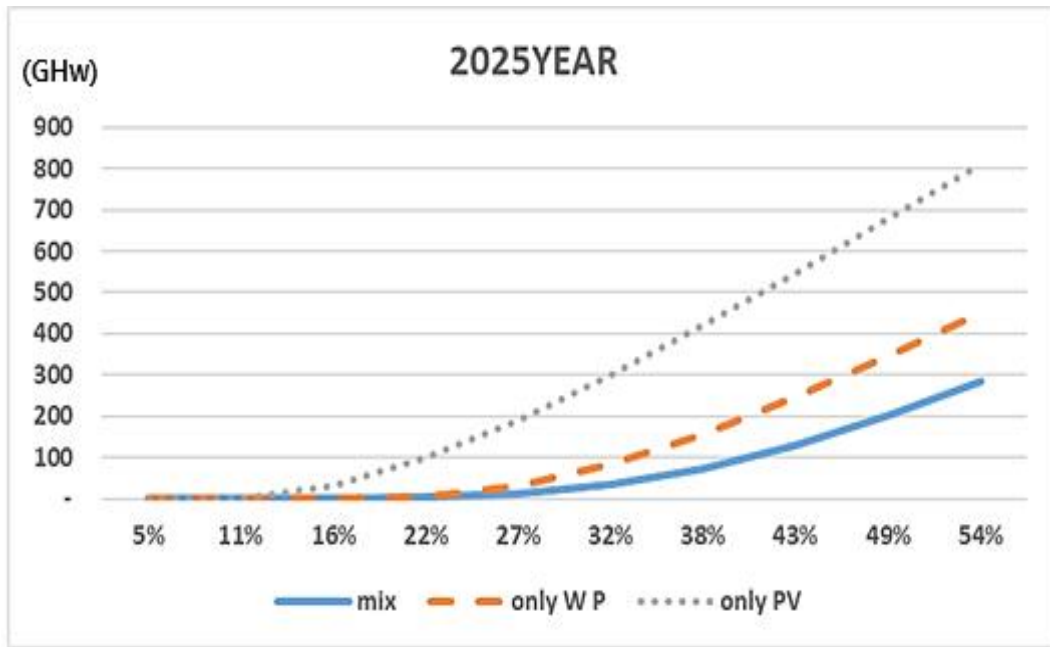


Fig. 8 The output curtailments by penetration in 2025

Fig. 8은 2025년 점유율에 따른 독립적인 풍력과 태양광 발전의 출력 제약 양과 컴퓨터 분석 결과로 얻은 최적 비율 출력 제약 양을 비교 분석한 그래프이다.

분석 결과 2025년의 점유율 54%에서 컴퓨터 분석 결과로 얻은 최적 비율의 출력 제약 양과 독립적인 풍력발전의 출력 제약 양은 2020년에 비해 줄어든 1.58배의 차이를 보였으며, 독립적인 태양광발전의 경우 컴퓨터 분석 결과로 얻은 최적 비율의 출력 제약 양과 독립적인 태양광발전의 출력 제약 양은 2.87배의 차이를 보였다.

### 3.3.3 2030년 (WP+PV 점유율 77%)

분석 결과, 2030년의 전력수요에 대한 풍력 및 태양광발전의 점유율은 77%로 확인되었으며 77% 점유율 내에서 최소 출력 제약 양을 갖는 풍력 및 태양광의 발전 비율을 Fig. 9에 나타내었다. 최적 비율은 WP:PV = 53%:24% (2.21:1)이며 이때 해당하는 출력 제약 양은 1,278.90 GWh로 분석되었다.

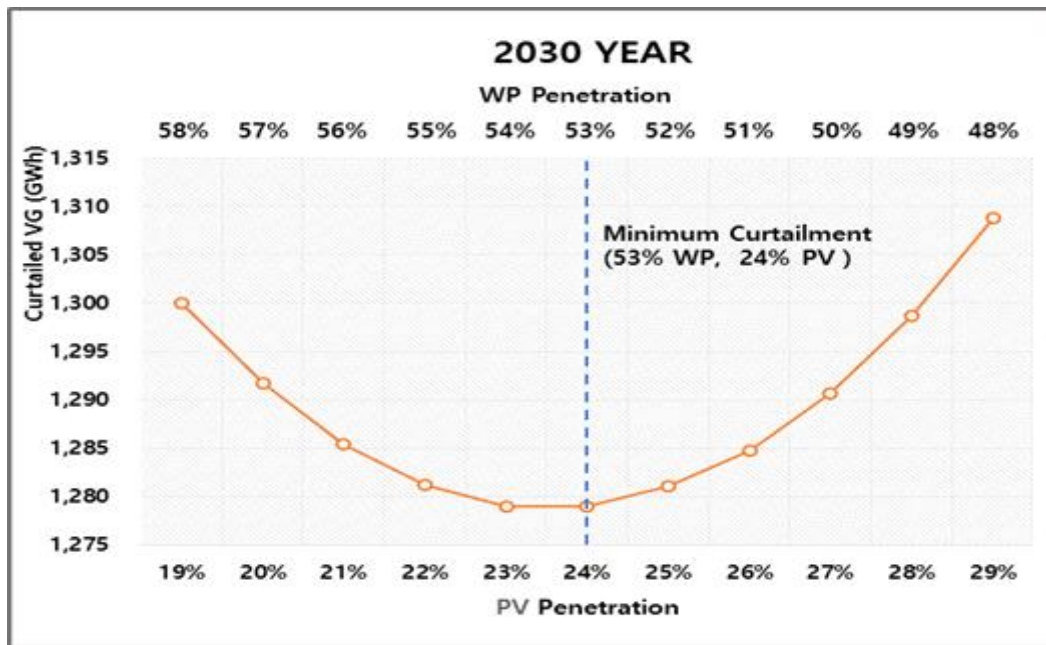


Fig. 9 Curtailments of WP and PV power generation in 2030

컴퓨터 분석의 출력 제약 양과 보고서를 토대로 산정한 출력 제약 양을 비교한 결과를 Table 11에 나타내었다. 분석결과 2030년에 컴퓨터 분석의 발전 비율로 발전 하였을 시 총 101 GWh의 출력 제약 양을 줄일 수 있다.

Table 11 Curtailments of supply plan and computer analysis in 2028

Year	①Supply Plan (GWh)	②Computer Analysis(GWh)	①-② (GWh)
2028	1,379.90	1,278.90	101

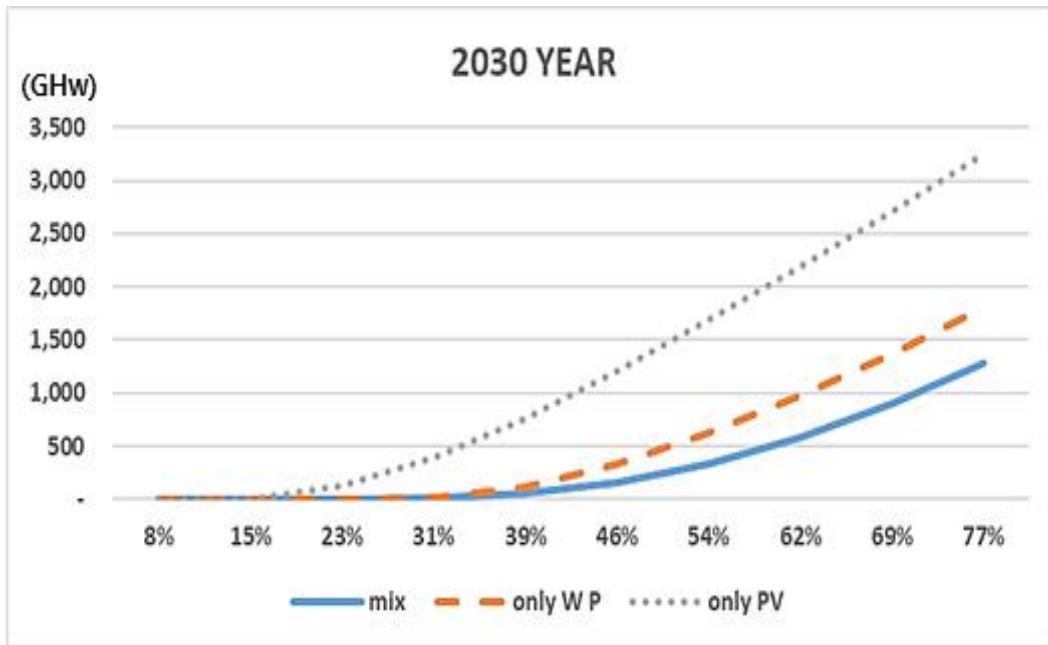


Fig. 10 The output curtailments by penetration in 2030

Fig. 10은 2030년 점유율에 따른 독립적인 풍력과 태양광 발전의 출력 제약 양과 컴퓨터 분석 결과로 얻은 최적 비율 출력 제약 양을 비교 분석한 그래프이다. Fig. 10에서 보듯이 독립적인 풍력 및 태양광발전의 출력 제약 양보다 최적 비율의 출력 제약 양이 적음을 확인 할 수 있다.

분석 결과 2030년의 점유율 77%에서 컴퓨터 분석 결과로 얻은 최적 비율의 출력 제약 양과 독립적인 풍력발전의 출력 제약 양은 1.40배의 차이를 보였으며, 독립적인 태양광발전의 경우 컴퓨터 분석 결과로 얻은 최적 비율의 출력 제약 양과 독립적인 태양광발전의 출력 제약 양은 2.55배의 차이를 보였다.

### 3.4 ESS를 이용한 효과 분석

수요에 대한 풍력 및 태양광의 발전 점유율 내에서 최소 출력 제약 양을 갖는 비율을 분석하였다. 분석한 최소 출력 제약 양에 ESS를 연계하여 재생에너지의 수용 증대 효과를 분석해 보았다. ESS의 용량은 최소 출력 제약 양을 가지는 설비용량의 5%에서 20%의 용량으로 설정하였으며, 충전 시간은 6시간 방전 시간으로 9시간으로 운영하였다. (단 충전효율은 100%로 설정하였다.)

ESS의 용량에 따른 재생에너지의 수용 증대 양을 Table 12에 나타내었다. ESS운영에 따른 수용 증대되는 용량은 최소 0.34 GWh에서 최대 102.72 GWh이다.

**Table 12** Increased capacity of renewable energy with ESS capacity

Year	Curtailment amount(GWh)	Enhancement(GWh)			
		ESS 5%	ESS 10%	ESS 15%	ESS 20%
2020	3.3	0.34	0.65	0.93	1.6
2021	22.5	1.24	2.34	3.31	4.07
2022	100.1	4.71	8.79	12.30	15.21
2023	164.2	7.31	13.71	19.26	23.91
2024	207.9	8.05	15	20.99	25.92
2025	283.3	10.18	18.94	26.40	32.69
2026	434.2	14.54	27.49	38.632	48.02
2027	585.5	17.81	33.32	46.50	57.71
2028	801.7	22.23	41.98	59.6	75.1
2029	1,004	25.07	47.64	69.75	84.94
2030	1,278.9	30.17	57.25	81.23	102.72



### 3.5 결과 고찰

제주지역의 사례를 참고하여 2020년에서 2030년까지 예상 수요, 풍력 및 태양광발전의 예상 발전량을 통해 점유율을 산정하고, 산정된 점유율 내에서 풍력 및 태양광발전의 비율을 달리하여 최소 출력 제약 양을 가지는 비율을 분석하였다. 그리고 ESS를 연계하여 재생에너지의 수용 증대 효과도 분석하였다.

분석 결과를 Table 13에 나타내었다. 2020년에 최소 출력 제약 양을 갖는 풍력 및 태양광의 발전 비율은 5:1의 비율을 보였으나, 점차 풍력의 비율이 줄어들어 2030년에는 2.2:1의 비율로 분석되었다.

**Table 13** Computer analysis result value

Year	Penetration (%)	Minimum curtailments amount (GWh)	Minimum curtailments of WP and PV ratio (%)	Increased capacity for ESS(GWh)
2020	30	3.3	25 : 5	0.34 ~ 1.60
2021	36	22.5	28 : 8	1.24 ~ 4.07
2022	45	100.1	32 : 13	4.71 ~ 15.21
2023	49	164.2	32 : 13	7.31 ~ 23.91
2024	51	207.9	36 : 15	8.05 ~ 25.92
2025	54	283.3	38 : 16	10.18 ~ 32.69
2026	59	434.2	41 : 18	14.54 ~ 48.02
2027	63	585.5	44 : 19	17.81 ~ 57.71
2028	68	801.7	47 : 21	22.23 ~ 75.10
2029	72	1,004	50 : 22	25.07 ~ 84.94
2030	77	1,278.9	53 : 24	30.17 ~ 102.72

최소 출력 제약 양을 갖는 풍력 및 태양광의 발전 비율을 가지고 산정한 설비용량을 Table 14에 나타내었다. 컴퓨터 분석 결과 2020년에는 풍력발전과 태양광발전의 설비용량 비율은 2.47:1이었으나, 2030년에는 1.09:1로 약 1:1의 가까운

설비용량 비율을 보였다. 하지만 2018년 태양광 발전 설비용량은 168.4 MW에서 2030년에 약 11.5배의 1,936 MW의 태양광 설비가 추가로 설치되기에는 제주지역의 토지면적과 주민 수용성 등의 이유로 어려워 보인다.

**Table 14** Power generation of supply plan and computer analysis

Year	Supply plan installed capacity(MW)		WP and PV of ratio	Computer analysis installed capacity(MW)		WP and PV of ratio
	WP	PV		WP	PV	
2020	612	473	1.29:1	705	285	2.47:1
2021	767	603	1.27:1	826	477	1.73:1
2022	1,045	713	1.47:1	983	808	1.22:1
2023	1,145	820	1.60:1	1,085	968	1.12:1
2024	1,245	910	1.37:1	1,192	1,004	1.19:1
2025	1,345	1,000	1.35:1	1,303	1,110	1.17:1
2026	1,546	1,082	1.43:1	1,454	1,291	1.13:1
2027	1,747	1,164	1.50:1	1,611	1,406	1.15:1
2028	1,948	1,247	1.56:1	1,774	1,602	1.11:1
2029	2,140	1,329	1.62:1	1,942	1,728	1.12:1
2030	2,350	1,411	1.67:1	2,115	1,936	1.09:1

## 4. 결론

현재 제주 전력계통은 잦은 출력 제한 사례가 발생하고 있으며, 그 빈도수는 점점 늘어나고 추세이다. 더 나아가 재생에너지 보급계획이 확대된다면, 출력 제한 사례는 현재보다 늘어날 것으로 예상된다.

본 논문에서는 제주지역의 사례를 참고해 최소 출력 제약 양을 갖는 풍력 및 태양광 발전 비율과 설비용량을 제시하였고, ESS 운영을 통해 풍력 및 태양광발전의 수용 증대 용량을 분석하였다.

- (1) 제주지역의 재생에너지 점유율은 “Carbon Free Island 2030” 정책으로 인해 매년 증가 할 것이며, 그로 인해 출력 제한 사례가 증가 할 것이다.
- (2) 수요에 대한 풍력 및 태양광의 발전 비율은 2020년 5:1의 비율이었으나, 2030년에는 2.2:1의 비율로 수렴함을 확인할 수 있었다.
- (3) ESS 운영을 통해 풍력 및 태양광 발전의 수용 증대 용량을 분석하였으며, 2030년 최대 102.72 GWh의 용량이 수용 증대됨을 확인할 수 있었다.
- (4) 최적의 풍력 및 태양광발전 비율로 산정된 설비용량 비율은 2020년 2.47:1 비율이었으나, 2030년에는 1.09:1의 설비용량 비율을 확인할 수 있었다.
- (5) 재생에너지의 발전 점유율 단계에 따른 풍력 및 태양광의 발전 비율 분석을 통하여 단계별 풍력 및 태양광의 출력 제약 양과 최적의 발전 비율을 분석하였다.

향후 안정적인 전력계통 운영을 위해 ESS 및 V2G 기술 융합이 필요하며, 이에 따른 분석이 필요로 할 것이다. 또한 기저 발전기 및 기타 재생에너지까지 고려한 분석과 HVDC를 통해 육지로의 역송진을 고려한 분석, 육상풍력과 해상풍력의 이용률을 나누어 분석한다면 보다 정확한 결과값을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

앞으로 지능형 관제 시스템을 구축하여 모든 에너지원에 대한 통합 운영과 환경 파괴를 최소화하는 신재생에너지 건설방안 등의 분석이 필요할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] Ho-San Myung, “Analysis on Effect of the Operational Limit of Wind Power in Jeju by the Large Scale ESS,” Jeju National University Master’s Thesis, Feb. 2013.
- [2] Ho-San Myung, Se-Ho Kim, “The study on the Method of Distribution of output according to Power Limit of Renewable Energy,” IKEEE, Vol. 23, No. 1, pp. 173-180, 2019.
- [3] Chang-Woo Lee, Min-Jae Kim, Se-Ho Kim, “Minimization of Renewable Energy Output Limits and Reduction Methods,” KIIEE, 2019.
- [4] P. Denholm, T. Mai, “Timescales of Energy Storage Needed for Reducing Renewable Energy Curtailment,” Renewable energy, Vol. 130, pp. 388-399, 2019
- [5] Power System Requirements for Wind Power, Hannele Holttinen and Ritava Hirvonen, Wind power in Power systems, 2005.
- [6] Yeong-Hwan Kim, Se-Ho Kim “Increasing Effect Analysis of the Wind Power Limit Using Energy Storage System in Jeju-Korea,” KSES, Vol. 34, pp. 81-90, Jan. 2014.
- [7] Yeong-Hwan Kim, Ho-San Myung, Nam-Ho Kang, Chang-Woo Lee, Min-Jae Kim, Se-Ho Kim, “Operation Plan of ESS for Increase of Acceptable Product of Renewable Energy to Power System,” KIEE, Vol. 67, pp. 1401-1407, Nov. 2018.
- [8] 산업통상자원부, “제8차 전력수급기본계획,” 2017
- [9] 제주특별자치도, “CFI 2030 정책의 제8차 국가전력수급기본계획 반영근거 마련,” 2017
- [10] 전력거래소, “제주지역 운영예비력 산정기준 연구,” 2011
- [11] Chang-Woo Lee, Min-Jae Kim, Se-Ho Kim, “Analysis of the ratio of Wind and Solar Power with Minimum Power Limit,” Proc. of Jeju

- Conference on IT & Power Engineering 2019, pp. 49-51, 2019.
- [12] 한국전력거래소, “제주지역 비중양급전 발전기 품질측정 및 계통영향 분석 연구,” 2005
- [13] IRENA, “Innovation Landscape For A Renewable-Powered Future,” pp. 66-70, Feb. 2019
- [14] Hannele Holttinen and Ritava Hirvonen, “Power System Requirements for Wind Power,” John Wiley and Sons, 2005
- [15] Giz, “Variable Renewable Energy Forecasting - Integration into Electricity Grids and Markets,” 2015
- [16] NREL, “Wind and Solar Energy Curtailment : Experience and Practice in the United States,” pp. 16-27, Mar. 2014

## 감사의 글

부품 꿈을 가지며 27살 3월에 계통연구실에 들어와 2년이라는 시간이 흘러 석사과정을 마무리하는 날이 되었습니다. 연구실 생활을 하며 돈으로도 살 수 없는 좋은 경험을 하게 되어 매우 뿌듯한 감정을 느끼며, 부족한 제가 석사 학위를 받을 수 있었습니다. 제가 마무리를 하는 데 있어 응원해 주시고 도움을 주신 분들과 고마움을 표현을 하고자 감사의 글을 작성합니다.

먼저 학부와 대학원 생활에서 저에게 항상 물심양면으로 지도해 주시며, 진정한 가르침을 주신 김세호 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 교수님의 지도와 감사함을 잊지 않고 항상 감사한 마음을 가지며 살아가겠습니다. 그리고 전기공학과에 입학에서부터 석사과정을 마무리하는데 있어 큰 도움을 주신 따뜻한 조언을 많이 해주신 이개명 교수님과 항상 많은 관심을 가져주신 김일환 교수님, 좋은 말씀으로 많은 가르침을 주신 김호찬 교수님, 김호민 교수님, 진영규 교수님께 진심으로 감사의 말씀 드립니다.

제가 연구실 생활을 하는데 있어 항상 부족한 저에게 따뜻한 격려와 힘이 되어주신 전력거래소 김영환 본부장님께 감사드리며, 김형철 차장님께도 감사하다는 말씀드리고 싶습니다. 그리고 가까이에서 부족한 저에게 가장 든든한 버팀목이 되어주신 호산이 형과 동기이자 동생이지만 연구실에서 동고동락하며 항상 든든하고 배울 게 많았던 민재에게 진심으로 감사합니다. 그리고 낯선 환경에서도 잘 적응하려고 하고 묵묵히 본인의 일을 열심히 하는 착한 동생 군호에게도 감사의 말을 전합니다. 또한 제가 석사과정을 잘 마무리할 수 있도록 도와주시며, 관심 가져주신 진홍이형과 항상 따뜻한 말과 궁금증을 해결해 주신 상헌이형과 지형이형, 항상 챙겨주신 과사무실의 태형이형, 경훈이형, 정민이와 현준이에게 너무나도 감사드립니다. 그리고 전기공학과에 있어 없어선 안 되며, 졸업 후에도 항상 궁금증과 아낌없는 조언을 해준 민혁이형께 감사의 말을 전합니다. 그리고 제가 힘들고 속상할 때 옆에서 항상 큰 힘이 되어준, 같이 있으면 시간은 줄 모르게 즐거운 내 친구 원진, 봉준, 종만, 상록, 동건, 기범이까지 정말 고맙고 평생 옆에서 힘든 일 도와주며, 즐거운 일에는 함께 즐거워하는 친구가 되었으면 좋겠다는 말을 전하고 싶습니다.

사랑하고 감사한 내 가족, 속 썩이는 막내아들에게 아낌없는 응원과 사랑을 주신 아버지와 어머니 항상 부모님의 아들로 태어났다는 사실에 감사하며, 하루하루 최선을 다하며 살겠습니다. 그리고 손자에 말이라면 무조건 맞고 착하다고 말씀해주시는 할아버지와 할머니, 마지막으로 부족하고 철없는 막내동생을 항상 이해해주고 많은 도움을 준 누나 세 명과 그 옆에서 함께 응원해주는 매형 두 분께도 진심으로 감사드립니다. 앞으로 사회에 나가서 열심히 일하며 부모님께 효도하고 매형과 누나 그리고 이쁜 우리 조카들에게도 의젓한 처남, 착한 막내 동생, 든든한 외삼촌이 될 수 있도록 바르고 착하게 살며, 다른 사람들에게 베풀며 나아가도록 하겠습니다.

그밖에 미처 언급하지 못한 분들 포함해서 감사하다는 말씀드리며, 대학원에서 배우고 느낀 가르침과 사랑을 바탕으로 사회에 이바지하며 살아가겠습니다. 다시 한번 감사합니다.

2019년 12월 24일

이창우 드림