

# 재생에너지 출력제약을 고려한 에너지저장장치 운영방안 및 용량 산정

김영민<sup>1</sup> · 손범석<sup>1</sup> · 김세호<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>제주대학교 대학원 전기공학전공, 석사과정

<sup>2</sup>제주대학교 전기에너지공학과, 교수

## Operation Planing and Capacity Calculation of Energy Storage Systems Considering Curtailment of Renewable Energy

Kim Youngmin<sup>1</sup> · Son Beomseok<sup>1</sup> · Kim Se Ho<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>MS Candidate, Dept of Electrical Engineering, Jeju National University

<sup>2</sup>Professor, Dept of Electrical Energy Engineering, Jeju National University

†Corresponding author: [hosk@jeju.ac.kr](mailto:hosk@jeju.ac.kr)

### Abstract

This paper introduces operation planning and capacity calculation through combining of short-duration and long-duration energy storage systems (ESSs) for reducing curtailment. Because curtailment is related to time, a photovoltaic (PV) output occurs, short-duration ESS has a limitation for reducing curtailment; and capacity of long-duration ESS can be overestimated. We show a combination of short-duration battery energy storage system (BESS) and long-duration pumped storage hydro (PSH) to reduce curtailment as minimizing capacity. A combination of BESS and PSH is applied to small-scale grids with a high penetration of variable renewable energy. To find the effect of an input order of two types of ESSs, several case studies are conducted, and results are compared when the short-duration and long-duration of ESS are combined. If PSH is put in first, curtailment can be further reduced with less capacity.

**Keywords:** 재생에너지(Variable renewable energy), 풍력 발전(Wind power), 에너지저장장치(Energy storage system), 출력제약(Curtailment), 양수발전(Pumped storage hydro)

### 기호 및 약어 설명

$ESS_{primary}$	: 선 투입되는 ESS 총전량[MWh]
$ESS_{secondary}$	: 후 투입되는 ESS 총전량[MWh]
$ESS_{primary,max}$	: 선 투입되는 ESS 최대 출력[MW]
$ESS_{secondary,max}$	: 후 투입되는 ESS 최대 출력[MW]
$ESS_{primary,min}$	: 선 투입되는 ESS 최소 출력[MW]



Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.43, No.2, pp.1-12, April 2023  
<https://doi.org/10.7836/kjes.2023.43.2.001>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 27 January 2023

Revised: 15 February 2023

Accepted: 16 February 2023

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- $ESS_{secondary, min}$  : 후 투입되는 ESS 최소 출력[MW]
- $B(t)$  : 출력제약량[MWh]
- $B'(t)$  : 선 투입되는 ESS 충전되는 전력[MWh]
- $C(t)$  :  $ESS_{primary}$  충전 후 남은 출력제약량[MWh]
- $C'(t)$  : 후 투입되는 ESS 충전되는 전력[MWh]
- $t$  : 시간[h]
- $Cap\_ESS$  : ESS 용량[MW]
- $Cap\_BESS$  : BESS 용량[MW]
- $Cap\_PSH$  : PSH 용량[MW]

## 1. 서론

전 세계적으로 지구 온난화 및 화석연료 고갈에 대한 문제로 탄소배출을 감소시키려고 하고 있으며, 탄소중립에 초점을 맞춰 화석연료 사용을 줄이고 신재생에너지 설비 보급을 늘리고 있다. 신재생에너지 자원 중 태양광은 일사량에 큰 영향을 받기 때문에 일출 시간부터 일몰 시간까지의 출력이 높으며 특정 시간대에 출력이 집중되어 있다. 그러므로 재생에너지 출력이 한계용량을 넘으면 중앙급전 발전기의 출력을 감발하거나 출력제한을 통해 재생에너지의 출력 조절을 해야한다<sup>1)</sup>. 하지만 계통 수요보다 재생에너지 발전량이 많아 중앙급전 발전기의 출력을 줄이거나 다른 지역으로 송전하지 못하면 출력제약은 불가피하다. 예를 들어 재생에너지 점유율이 높은 덴마크, 독일, 아일랜드, 이탈리아, 포르투갈 등은 출력제약 사례들이 이미 발생하고 있다<sup>2)</sup>.

한국은 기후 위기로부터 안전하고 지속 가능한 탄소중립 사회 실현을 위해 ‘2050 탄소중립 시나리오’를 계획하고 있다. 2050년까지 탄소 순 배출량 0 달성과 2030년까지 2018년 대비 탄소배출 40% 감축을 목표로 하여 신재생에너지 비중을 계획적으로 증가시키고 있고, 반면 화석연료 사용은 점차 줄이고 있다. 제주 지역은 재생에너지 점유율이 높은 독립 계통으로 Carbon Free Island 2030을 통해 2030년까지 신재생에너지만으로 전력 수요를 충당하려고 한다. 하지만 2015년에 처음으로 발생한 출력제약 이후 매년 출력제약 횟수와 출력제약량은 증가하고 있다. 그러나 HVDC (High Voltage Direct Current) 역송으로 2021년에는 출력제약 횟수와 출력제약량은 감소하였다. HVDC를 추가 건설하여 출력제약량을 줄이려 하고 있고, 2023년 말 완공 예정이다.

출력제약 완화는 계통 운영자나 재생에너지 발전사업자에게 중요한 문제이다. 하지만 매년 증가하는 풍력발전으로 출력제약량은 기하급수적인 증가가 예상된다<sup>2)</sup>. 출력제약량 증가는 재생에너지 수용성을 낮추고 재생에너지 투자 위축 및 전력 공급 불안정을 초래한다. 현재, 리튬이온 기반의 ESS (Energy Storage System)를 통해 출력제약을 줄이고 전력 수급 균형을 맞출 수 있다.

출력제약을 최소화할 수 있는 4, 6, 8시간 등의 운용 주기를 갖는 ESS의 경제성 비교는 기존 ESS 용량을 산정

하는 방법의 하나다. 그러나 이와 같은 방법은 출력이 낮고 짧은 운용 주기를 가진 ESS 용량이 산정되는 문제와 단주기 ESS만을 사용하면 완화할 수 있는 출력제약이 제한된다는 문제가 있다. 또한 출력제약 최소화는 비효율적이며, 출력제약률을 3%로 제한하는 사례가 존재한다. 하지만 출력제약률을 3%로 제한하는 구체적인 실행 방안은 제시되어있지 않다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 출력제약률을 제한할 수 있는 단주기와 장주기 ESS의 조합을 소개한다. 단주기 에너지저장장치로서 리튬이온 BESS(Battery Energy Storage System)와 장주기 에너지저장장치로서 PSH (Pumped Storage Hydro)의 특성을 고려한 BESS와 PSH의 운영방안에 따라 재생에너지 출력제약률을 3%로 제한할 수 있는 ESS의 용량 산정을 제시한다. PSH는 전통적인 ESS 기술 중 하나이며, 재생에너지 보급 확산에 따라 중요성이 커지고 있다<sup>3)</sup>. PSH의 최신 기술인 가변속 PSH는 유연성을 더욱 향상시켜 재생에너지 수용 능력을 증대시킬 수 있고, 이러한 기술은 100 MW 이하의 소규모 PSH에 적용할 수 있으며, 현재 오스트리아와 스위스에서 가동 중이다<sup>4)</sup>. 또한 국내에서는 현재 4.7 GW 규모의 PSH를 2036년까지 6.5 GW로 증설과 재생에너지 보급 확산에 따라 유연성 자원으로써 소규모 PSH를 이용한 재생에너지 변동성 대응을 계획하고 있다<sup>5)</sup>.

## 2. ESS의 운영방안 및 용량 산정

### 2.1 재생에너지의 출력제약 사례 분석

출력제약은 송전용량 부족 및 전력 수급 균형 등을 위해 실시되며 풍력과 태양광의 보급이 증가함에 따라 해외 여러 국가에서는 이미 십여 년 전에 출력제약 사례들이 나타났다<sup>6)</sup>. ESS 설치나 지역 간 계통 연계, 선로 용량 증설 및 제도적인 측면으로 출력제약을 줄일 수 있으며, 계통 유연성 확보와 밀접한 관련을 보인다<sup>7)</sup>. 따라서 출력제약을 줄이기 위해서는 수요자원이나 응답성이 빠른 BESS나 PSH와 같은 유연성 자원의 확보가 중요하다. 현재는 FR (Frequency Regulation) ESS를 사용하여 재생에너지의 출력 변동을 줄이거나 4시간 이하의 리튬이온 BESS 및 지역 간 연계선을 통해 출력제약을 완화하고 있다. 하지만 출력제약이 많이 발생한다면 100% 줄이는 것보다는 일정 수준으로 제한하는 것이 최적의 방안일 수 있다<sup>8)</sup>. 독일 정부는 2017년부터 재생에너지 발전 사업자들의 소득은 유지하며, 계통 개발 비용을 최소화하기 위해 ‘3% Curtailment Rule’을 시행하였다<sup>9)</sup>.

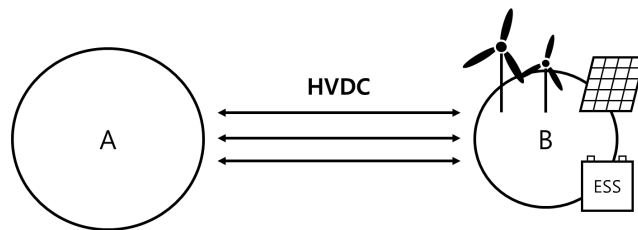


Fig. 1 Overview of small-grid

Fig. 1은 시뮬레이션을 진행한 소규모 계통 B를 간략히 보여준다. B 지역은 계통의 규모 대비 단위 발전설비의 용량이 크며, 현재 급격하게 재생에너지 보급을 늘리고 있다. 여름철에는 오후부터 피크 부하가 발생하고, 겨울철에는 늦은 저녁부터 피크 부하가 나타난다. 높은 태양광 비중으로 일조시간에 태양광 발전량이 증가하지만, 전력수요는 크게 증가하지 않아 일조시간의 출력제약량이 증가하고 있다. 현재는 HVDC를 통해 A 지역으로 잉여전력을 송전하며 출력제약량을 완화하고 있다. 하지만 점유율이 높아짐에 따라 HVDC만으로 출력제약을 완화하는 데는 한계가 있을 것으로 예상된다.

기존 연구에서는 4, 6, 8시간 등의 리튬 이온 BESS를 사용하여 출력제약을 최소화할 수 있는 용량을 산정하거나 경제성 분석을 통해 가장 경제적인 ESS를 제시하였다. 하지만 이와 같은 방법은 출력제약을 최소화하는 것은 비효율적이라는 문제와 ESS의 경제성 분석은 작은 용량과 짧은 운용 주기의 리튬 이온 BESS를 선정하게 된다는 문제가 있다<sup>8,10</sup>. 또한 리튬 이온 배터리와 같은 최신 기술의 ESS는 최대 4시간의 운용 주기를 갖기 때문에 출력제약을 완화하기에는 한계가 있어 장주기 저장장치가 필요할 것으로 예상된다<sup>11</sup>.

본 논문에서는 단주기 에너지저장장치로써 리튬 이온 BESS와 장주기 에너지저장장치로써 PSH를 조합하였고, 두 ESS의 출력 특성을 고려한 운영방안과 출력제약률을 3%로 제한할 수 있는 최소 용량을 산정한다.

## 2.2 BESS와 PSH의 운영방안

운영방안에 따라 BESS와 PSH의 출력 특성으로 인해 출력제약 완화 효과는 달라질 수 있다. Fig. 2는 BESS와 PSH의 운전 범위 설정을 보여준다. BESS는 0% ~ 100%의 운전 범위를 갖는 리튬 이온 배터리를 적용하였으며, 4시간의 운용 주기로 설정했다. PSH는 출력조정 능력이 좋으며 펌핑, 발전모드의 운전 범위가 넓은 가변속 PSH를 적용했다. 펌핑모드에서는 70% ~ 100%의 운전 범위를 갖고, 발전모드에서는 40% ~ 100%의 운전 범위를 갖는다. PSH의 운용 주기는 8시간으로 설정한다<sup>12</sup>. 또한 실제 ESS는 운전 범위를 최대 80 ~ 90%로 설정하지만, 논문 해석상 80%의 운전 범위를 100%로 고려하여 분석하였다.

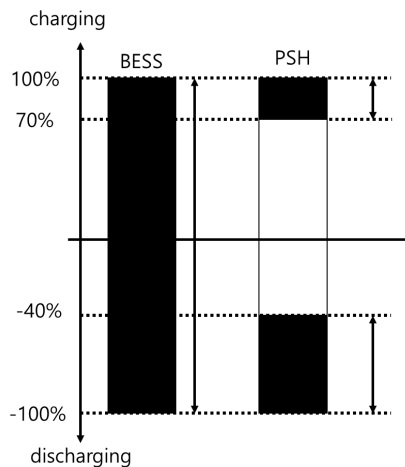


Fig. 2 Power range of ESSs

출력제약량 완화 효과는 ESS의 운영방안에 따라 달라질 수 있다. 운영방안은 BESS를 먼저 투입하는 방안과 PSH를 먼저 투입하는 방안이 있다. BESS 선 투입 시와 PSH 선 투입 시의 출력제약 감소 효과를 BESS와 PSH의 비중에 따라 분석하였다. BESS 선 투입 시는 BESS에 잉여전력을 먼저 충전하고 남은 전력을 PSH에 충전시켜 출력제약량을 완화한다. PSH 선 투입 시는 PSH에 잉여전력을 먼저 충전하고 남은 전력을 BESS에 충전하여 출력제약량을 완화한다. PSH는 70 ~ 100%의 운전 범위를 가져 충전할 수 있는 전력의 범위가 좁다. 운영방안에 따라 출력제약 완화를 위한 ESS 충전 모델링은 다음과 같다.

$$ESS_{primary}(t) = B'(t) + ESS_{primary}(t-1) \tag{1}$$

$$ESS_{secondary}(t) = C'(t) + ESS_{secondary}(t-1) \tag{2}$$

$$B'(t) = \begin{cases} \max(ESS_{primary, min}, \min(B(t), ESS_{primary, max})) & \text{if } B(t) \geq ESS_{primary, min} \\ 0 & \text{if } B(t) < ESS_{primary, min} \end{cases} \tag{3}$$

$$C'(t) = \begin{cases} \max(ESS_{secondary, min}, \min(C(t), ESS_{secondary, max})) & \text{if } C(t) \geq ESS_{secondary, min} \\ 0 & \text{if } C(t) < ESS_{secondary, min} \end{cases} \tag{4}$$

$$C(t) = B(t) - B'(t) \tag{5}$$

ESS의 운영방안은 투입 순서에 따라 달라질 수 있으므로 먼저 투입되는 ESS를  $ESS_{primary}$ 로 표현하고 다음 투입되는 ESS를  $ESS_{secondary}$ 로 표현한다. 식(1), (2)는 선 투입되는 ESS에 충전되는 에너지양과 후 투입되는 ESS에 충전되는 에너지양을 표현한다. 식(3), (4)는 출력제약량이 ESS의 운전 범위 안에 들면 식(1), (2)를 통하여 출력제약량을 ESS에 충전한다. 또한 BESS와 PSH의 비중에 따라 출력제약 완화 효과를 분석하기 위해 BESS의 비중을 0 ~ 100%로 높이고 PSH의 비중을 100 ~ 0%로 낮추며 출력제약 완화 효과를 분석하였다. BESS와 PSH의 합산 비중은 100%이며, BESS 선 투입 시와 PSH 선 투입 시를 비교하였다.

### 2.3 출력제약률을 고려한 용량 산정 방안

ESS의 용량 산정은 ESS의 운영방안에 따라 달라질 수 있다. 앞서 제시된 ESS의 운영방안에 따라 출력제약률을 3%로 제한할 수 있는 용량 산정 방법은 Fig. 3과 같다.

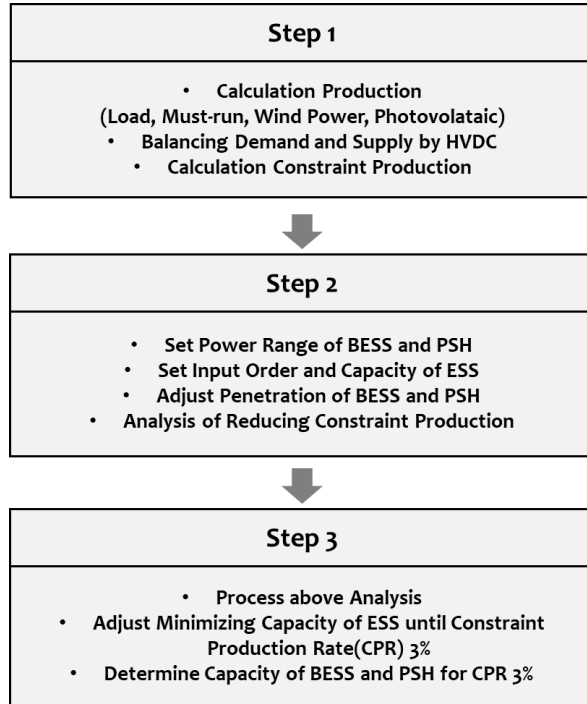


Fig. 3 Process of capacity calculation of ESS

(1) Step 1

출력제약량을 계산하기 위해 수요를 예측한 뒤, 수요에 따른 필수 운전 발전기(Must-run)의 대수를 결정하고, 필수 운전 발전기와 HVDC를 최소 운전으로 설정한다. 그리고 풍력과 태양광 발전량을 예측하고 출력제약이 발생하면 HVDC를 통해 전력 수급을 조절한다. 부하추종 운전을 하지 않는 경직성 전원은 고려되지 않았다.

(2) Step 2

BESS와 PSH의 운전 범위를 설정하고 ESS의 용량과 선 투입되는 ESS를 결정한다. ESS는 BESS와 PSH의 합산 용량이며, BESS와 PSH의 비중을 조정하며 출력제약완화 효과를 비교한다. BESS 선 투입 시와 PSH 선 투입 시에 대해 분석한다. 식(6)은 ESS의 용량을 나타내며 BESS와 PSH의 합계이다.

$$Cap\_ESS = Cap\_BESS + Cap\_PSH \tag{6}$$

(3) Step 3

위의 방법을 진행하고 출력제약률을 3%로 제한할 수 있는 ESS 최저 용량을 산정한다. BESS와 PSH 비중에 따른 출력제약 완화를 분석하고, 출력제약을 최대도 완화하는 BESS와 PSH의 비중을 찾아 BESS와 PSH의 최저 용량을 도출한다.

### 3. 사례 연구

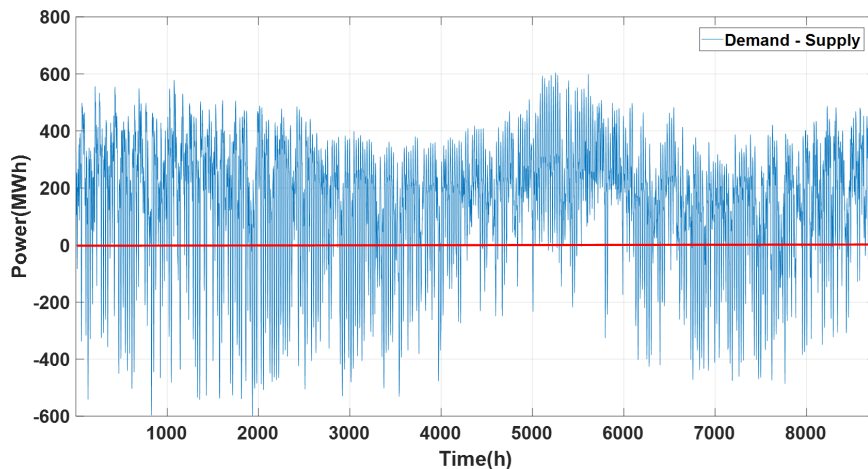
#### 3.1 소규모 계통의 출력제약 분석

사례 연구가 진행된 소규모 계통 B 지역의 연간 전력수요, 최대수요 및 재생에너지(VRE)와 HVDC 설비용량을 Table 1에 나타내었다. HVDC #1, 2, 3은 소규모 계통 B와 A 지역을 연결하는 3개의 연계선이다. 재생에너지 점유율 증가에 따른 영향을 알아보기 위해 수요, 풍력(WP)과 태양광(PV)이 증가하는 B 지역의 Case 5개를 분석했다. 하지만 수요에 따라 필수 운전 발전기의 최소송전 용량은 증가하지만, 기저부하에 대한 증설은 고려되지 않았다. 사례 연구에서 분석된 시간 단위는 1시간이다.

**Table 1** Status of cases in small-grid B

Classification	Load [GWh]	Peak Load [MW]	Capacity of VRE [MW]		HVDC [MW]		
			WP	PV	#1	#2	#3
Case 1	6202	1047	466	791	150	250	200
Case 2	6877	1161	651	924	150	250	200
Case 3	7416	1252	926	1008	150	250	200
Case 4	7455	1259	1111	1081	150	250	200
Case 5	7976	1347	1511	1204	150	250	200

Fig. 4는 Case 1의 8,760시간의 수요와 공급의 차를 나타냈다. (-)의 값은 출력제약량이며, (+)의 값은 중앙급 전 발전기나 HVDC를 통해 전력을 공급하거나 재생에너지 발전량을 공급할 수 있는 전력량을 나타낸다. Case 1은 HVDC를 통해 출력제약량을 완화할 수 있다. 하지만 출력제약량이 많아진다면 다른 유연성 자원이 필요하다.



**Fig. 4.** Analysis of constraint production hourly in Case 1

Fig. 5는 Case 별 시간에 대한 출력제약량 합계를 보여준다. 태양광 출력이 높은 10시부터 17시 사이에 많은 출력제약량이 발생하고 있다. Case 1은 13시에 가장 많은 출력제약량 합계를 보이고 있으며, 약 4 GWh의 출력 제약이 발생하였다. Case 4부터 경부하 시간대에 출력제약량이 발생하기 시작한다. Case 5의 경우는 10 ~ 17시 사이에 약 84.6%의 출력제약량이 몰려있고, 12시부터 15시 사이에는 약 59%의 출력제약량이 집중되어 있다. 이 경우 무한대 용량을 갖는 4시간 주기의 BESS를 사용하면 출력제약량을 최대 59% 줄일 수 있고, 8시간 주기의 PSH를 사용하면 최대 84.6% 줄일 수 있다는 것을 의미한다.

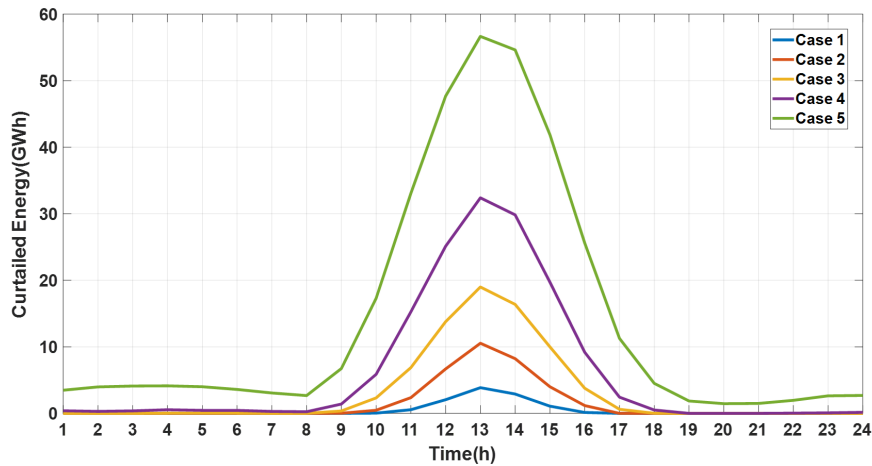


Fig. 5 Amount of hourly constraint production

Table 2 Analysis of constraint production by each case

Classification	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Penetration of VRE	30%	35%	40%	45%	50%
VRE Production [GWh]	1,888	2,385	2,972	3,343	4,060
Constraint Production [GWh]	10	33	73	145	340
Constraint Production Rate [%]	0.6	1.4	2.4	4.3	8.4

Table 2는 Case 별 재생에너지 점유율, 재생에너지 발전량, 출력제약을 분석한 결과이다. HVDC 역송은 최대 400 MW를 적용하였다. 출력제약률은 출력제약량을 재생에너지 발전량으로 나누고 100%를 곱한 값이다. Case 별로 30 ~ 50%의 재생에너지 점유율을 가지고 있다. Case 5의 점유율은 Case 1에 비해 약 1.7배 수준이지만, 출력제약량은 34배이다. 점유율이 높아짐에 따라 출력제약량은 지수함수의 형태로 증가하였다. 45% 이상의 재생에너지 점유율을 갖는 Case 4, 5는 출력제약률이 4.3%를 넘는다. 점유율이 45%이상일 경우에는 출력제약을 완화하기 위해 ESS의 필요성이 대두된다.



### 3.2 ESS의 운영방안에 따른 출력제약량 분석

점유율이 40% 미만일 경우에는 HVDC를 통해 출력제약률을 3%까지 완화할 수 있다. 재생에너지 점유율이 40% 이상인 Case 4,5는 HVDC만으로 출력제약률을 3%로 제한하기 어려워 ESS를 통해 출력제약을 완화할 수 있다.

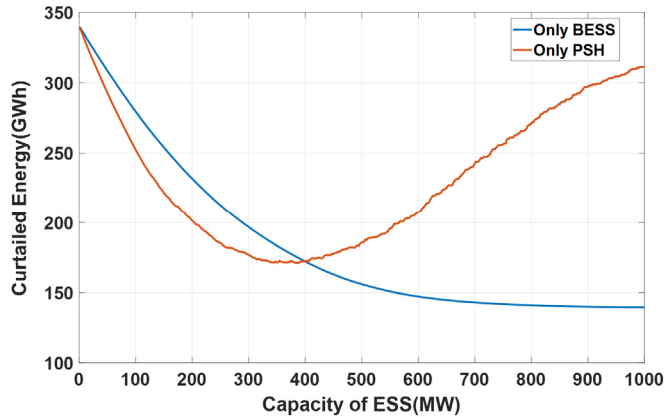


Fig. 6 Analysis of constraint production by a single ESS

Fig. 6은 재생에너지 점유율 50%를 넘는 Case 5에서 단일 ESS를 사용하였을 경우의 출력제약량을 보여준다. BESS만 사용하였을 경우는 BESS의 용량이 커짐에 따라 출력제약량은 감소하였다. 하지만 600 MW 이상이면 출력제약량 감소는 60%에서 수렴하고 출력제약 완화 효과는 크게 늘지 않았다. 이러한 한계는 짧은 시간 동안만 충전하여 출력제약량을 완화하기 때문에 나타나는 결과이다. PSH만 사용하였을 경우는 약 400 MW의 용량까지는 출력제약량 감소 폭이 BESS보다 컸지만, 그 이상에서는 출력제약량이 증가하였다. 이는 PSH의 충전 범위가 좁아 PSH의 용량이 커짐에 따라 충전할 수 있는 전력의 제한이 생기기 때문이다. 300 MW 용량의 PSH를 사용한다면 출력제약량의 최대 50%까지 완화할 수 있었다.

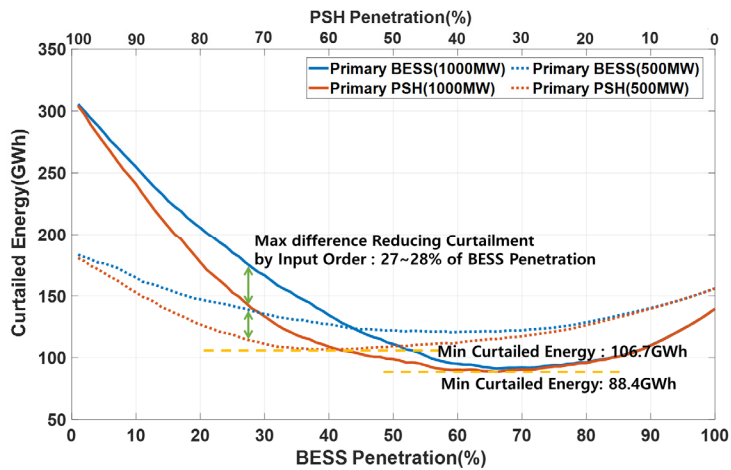


Fig. 7 Analysis of constraint production by input order and penetration of ESSs

Fig. 7은 BESS와 PSH 투입 순서에 따른 출력제약량을 보여준다. ESS의 합산 용량이 500 MW일 때와 1000 MW일 때, ESS의 투입 순서에 따른 출력제약량을 BESS와 PSH의 비중을 달리하여 나타내었다. PSH를 선 투입 하면 1000 MW 용량에서 BESS 선 투입 시보다 최대 33.3 GWh의 출력제약량을 완화하였다. 이러한 차이는 BESS의 비중이 28%일 때 가장 컸다. 또한 출력제약 완화 효과는 BESS의 비중이 66%일 때 가장 컸다. 500 MW 용량에서는 PSH 선 투입하면 BESS 선 투입 시보다 최대 24.6 GWh의 출력제약량을 완화하였고, BESS의 비중 이 27%일 때 가장 큰 차이를 보였다. 그리고 출력제약 완화 효과는 BESS의 비중이 39%일 때 가장 컸다.

**Table 3** Comparison of constraint energy by input order and penetration of ESSs

Classification	ESS Penetration (BESS:PSH)	Curtailed Energy (GWh)					
		Primary BESS			Primary PSH		
		Capacity of ESS					
		100 MW	500 MW	1000 MW	100 MW	500 MW	1000 MW
Case 4	25:75	90.8	58.2	58.2	89.0	36.2	52.8
	50:50	92.6	32.5	32.0	91.6	22.1	30.4
	75:25	95.5	25.0	20.6	95.3	23.4	20.6
Case 5	25:75	257.8	141.9	185.1	256.7	118.8	152.7
	50:50	263.8	122.2	111.0	263.2	109.4	98.8
	75:25	271.0	124.3	94.0	270.7	121.2	92.9

Table 3은 운영방안, ESS 용량, BESS와 PSH 비중에 따른 출력제약량을 나타낸다. Case 5의 합산 용량이 500 MW일 때는 PSH를 선 투입하면 25%의 BESS 비중에서 118.8 GWh의 출력제약량이 발생하였고, BESS를 선 투입하였을 경우와 비교하면 약 23.1 GWh의 출력제약량이 더 감소하였다. 또한 500 MW일 경우에는 BESS 선 투입 시 BESS의 비중이 높을수록 출력제약량이 적게 계산됐고, PSH 선 투입 시에는 BESS의 비중이 약 40%에서 출력제약량이 최소가 됐다. Case 4와 Case 5에서 PSH를 선 투입할 경우 출력제약량이 더 낮음을 확인할 수 있다. ESS의 용량이 500 MW일 경우에 PSH 선 투입 시는 BESS 선 투입 시보다 출력제약량 완화 차이가 0 ~ 22 GWh까지 나타났고, 1000 MW일 경우에는 0 ~ 32.4 GWh까지 나타났다. ESS의 용량이 작으면 투입 순서에 따른 출력제약 완화 효과가 크지 않았다. 그러나 ESS의 용량이 커지고 출력제약량이 많아질수록 PSH 선 투입 시에 BESS 투입 시보다 더 많은 출력제약 완화를 확인했다.

### 3.3 출력제약률을 3%로 제한하는 ESS의 용량 선정

Table 4는 Case 4와 Case 5에서 ESS 투입 순서에 따라 출력제약률 3%로 제한할 수 있는 ESS의 최소 용량을 나타낸다. 출력제약률은 ESS로 완화된 출력제약량을 Table 2에서 계산된 재생에너지와 ESS로 완화된 출력제약량의 합계로 나누고 100을 곱한 값이다. Case 4는 ESS 투입 순서에 따른 BESS와 PSH의 용량이 비슷하게 산

정됐다. Case 5에서는 PSH 선 투입하면 BESS 선 투입 시보다 14% 더 적은 용량으로 출력제약률 3%로 제한할 수 있다.

**Table 4** Comparison of capacity calculation of ESSs by input order

Classification	Input order	Capacity of BESS [MW]	Capacity of PSH [MW]
Case 4	Primary BESS	4	69
	Primary PSH	3	70
Case 5	Primary BESS	246	202
	Primary PSH	143	244

#### 4. 결론

본 논문에서는 단일 ESS의 출력제약 완화를 확인하고 단주기 BESS와 장주기 PSH의 조합을 소개하였으며, 두 ESS의 운영방안을 제시하였다. 또한 운영방안 및 BESS와 PSH의 비중에 따른 출력제약 완화 효과를 확인하였다. 재생에너지의 변동성으로 인해 1 ~ 2%의 출력제약률은 불가피하며, 3%를 넘는 출력제약률은 재생에너지 발전사업자들의 수익성을 많이 악화시킬 것이다. 따라서 선택적 출력제약률을 통해 발전사업자와 계통 운영자가 만족하는 방안을 찾을 수 있으며, 두 종류의 ESS를 조합하여 출력제약률을 3%로 제한할 수 있는 ESS의 최저 용량을 산정하였다.

단일 ESS는 출력제약 완화에 한계가 있으나 단주기 BESS와 장주기 PSH의 조합은 서로의 한계를 보완했고, PSH를 선 투입하는 운영방안이 출력제약 완화에 효과적이다. 또한 ESS의 용량이 커질수록 BESS의 높은 비중을 갖는 경우 출력제약 완화 효과가 컸다. 두 종류의 ESS를 조합하고 선택적 출력제약률을 달성하는 방안은 안정적인 계통 운영에 도움이 될 것이라 사료된다.

현재 리튬 이온 BESS와 장주기 ESS 기술들은 현재 개발단계에 있으며 빠르게 발전하고 있다. ESS 기술들이 상용화되는 시간보다 재생에너지의 점유율이 빠르게 상승한다면 출력제약을 줄이기 위해 본 논문을 활용할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 두 종류의 ESS에 대한 경제성 분석을 포함하지 않았기 때문에 향후 연구에서는 이를 고려한 연구도 필요하다고 생각한다. 또한 충전 범위를 100%로 설정하였으나, 충전 범위에 따라 산정된 ESS의 용량은 늘어날 수 있다.

#### 후기

이 논문은 2022학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

## REFERENCES

1. Kim, Y. H., Myung, H. S., Kang, N. H., Lee, C. W., Kim, M. J., and Kim, S. H., Operation Plan of ESS for Increase of Acceptable Product of Renewable Energy to Power System, *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 67, No. 11, pp. 1401-1407, 2018, <https://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.11.1401>.
2. Yasuda, Y., Flynn, D., Lew, D., Bird, L., Focione, A., Martin-Martinez, S., Carlini, E. M., Lazaro, E. G., McCann, J., Estanqueiro, A., Higgins, P., Menemenlis, N., Holttinen, H., and Smith, J. C., International Comparison of Wind and Solar Curtailment Ratio, *Wind Intergration Workshop*, October 2015, Brussels, Belgium.
3. Ye, H., Zhang, L., Yang, M., Liang, G., Liu, S., Li, G., Tsang, W., and Xie, H., Variable-speed Pumped Hydro Storage Technology: Overview, Solutions and Case Studies, *6<sup>th</sup> International Conference on Power and Renewable Energy*, pp. 1273-1278, September 2021, Shanghai, China,
4. Nobile, E., Sari, G., and Schwery, A., Variable Speed Hydro Pumped Storage as Flexible Enabler of Intermittent Renewable Penetration, *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-5, August 2018, Portland, USA, <https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8586238>.
5. MOTIE, 10th Basic Plan for Long-term Electricity Supply and Demand, 2023.
6. Bird, L., Lew, D., Milligan, M., Carlini, E. M., Estanqueiro, A., Flynn, D., Gomez-Lazaro, E., Holttinen, H., Menemenlis, N., Orths, A., Erikson, P. B., Smith, J. C., Soder, L., Sorensen, P., Altiparmakis, A., Yasuda, Y., and Miller, J., Wind and Solar Energy Curtailment: A Review of International Experience, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 65, pp. 577-586, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.082>.
7. Bunodiére, A. and Lee, H. S., Renewable Energy Curtailment: Prediction Using a Logic-Based Forecasting Method and Mitigation Measures in Kyushu, Japan, *Energies*, Vol. 13, No. 18, 4703, 2020, <https://doi.org/10.3390/en13184703>.
8. Jacobsen, H. K. and Schroder, S. T., Curtailment of Renewable Generation: Economic Optimality and Incentives, *Energy Policy*, Vol. 49, pp. 663-675, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.07.004>.
9. Furusawa, K., Brunekreeft, G., and Hattori, T., Constrained Connection For Distributed Generation by DSOs in European Countries, *Bremen Energy Working Papers*, No. 28, 2019, <http://hdl.handle.net/10419/194181>.
10. Jeon, W. Y., Kim, J. Y., and Lee, S. W., Establishing an Efficient Low-Carbon Power System by Reducing Curtailment of Renewable Energy using ESS - The Case of Jeju Island in 2025 -, *Journal of Climate Change Research*, Vol. 13, No. 1, pp. 1-9, 2022, <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2022.13.1.001>.
11. Albertus, P., Manser, J. S., and Litzelman, S., Long-Duration Electricity Storage Applications, *Economics, and Technologies, Joule*, Vol. 4, No. 1, pp. 21-32, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.11.009>.
12. Kim, W. J., Lee, Y. S., Kim, S. E., Jeong, H. S., and Chun, Y. H., Analysis on The Contribution of Adjustable Speed Pumped Storage Generator in Power System Operation, *Conference of The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 253-254, October 2020, Jeju, Korea.