



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

재생에너지 출력제약 완화를 위한
스토리지 믹스 분석 및 용량 산정

김영민

제주대학교 대학원

에너지응용시스템학부 전기공학전공

2023년 08월

재생에너지 출력제약 완화를 위한 스토리지 믹스 분석 및 용량 산정

이 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함

김 영 민

제주대학교 대학원

에너지응용시스템학부 전기공학전공

지도교수 김 세 호

김영민의 공학 석사학위 논문을 인준함

2023년 06월

심사위원장 진 영 규 (印)

위 원 이 개 명 (印)

위 원 김 세 호 (印)

목 차

그림 목차	ii
표 목차	iii
기호 및 약어 설명	iv
국문초록	v
I. 서론	1
II. 출력제약 분석 및 스토리지 믹스	
2.1 재생에너지 출력제약 사례 분석	3
2.2 스토리지 믹스 및 ESS 종류	6
III. 스토리지 믹스 운영방안 및 용량 산정 방안	
3.1 재생에너지 출력제약 분석 과정	11
3.2 스토리지 운영방안에 따른 출력제약 완화 분석 모델링	13
3.3 출력제약률을 고려한 ESS 용량 산정 방안	17
IV. 스토리지 믹스의 출력제약 완화 분석 및 용량 산정	
4.1 재생에너지 비중이 높은 계통에서 출력제약 분석	19
4.2 스토리지 운영방안에 따른 출력제약 완화 분석	23
4.3 출력제약률을 3%로 제한하는 ESS 용량 산정	32
V. 결과 고찰	34
VI. 결론	35
참고문헌	37
영문초록	41

그림 목 차

Fig. 1 Hourly average power load patterns	3
Fig. 2 Illustration of curtailment due to decrease in net-load	4
Fig. 3 Amount of hourly curtailment in Jeju	6
Fig. 4 Process of curtailment analysis	11
Fig. 5 Example of curtailment analysis	12
Fig. 6 Operating range of ESS	14
Fig. 7 Curtailment reduction and peak shaving through ESS when curtailment occurs; (a) flatted net-load, (b) charging/discharging power of ESS	16
Fig. 8 Process of ESS capacity calculation	17
Fig. 9 Illustration of A grid	19
Fig. 10 Analysis of consecutive curtailment by cases	22
Fig. 11 Amount of hourly curtailment	22
Fig. 12 Analysis of curtailment reduction by a single ESS	24
Fig. 13 Analysis of curtailment reduction by a single ESS	24
Fig. 14 Analysis of curtailment reduction by a single ESS	25
Fig. 15 Analysis of curtailment reduction by a single ESS	26
Fig. 16 Comparison of curtailment reduction by dispatch order and penetration	27
Fig. 17 Comparison of curtailment reduction by dispatch order and penetration	28
Fig. 18 Comparison of curtailment reduction by dispatch order and penetration	28
Fig. 19 Comparison of curtailment reduction by dispatch order and penetration	29

표 목 차

Table 1 Status of the curtailment in Jeju	5
Table 2 Technical characteristics of the ESS	8
Table 3 Advantages and disadvantages of ESS	9
Table 4 Power configuration status by cases	20
Table 5 Analysis of VRE production and curtailment by cases	21
Table 6 Minimum curtailment and ESS penetration by operation planning	30
Table 7 The maximum difference in curtailment reduction by dispatch order and the BESS and PSH penetration at that time	32
Table 8 Comparison of ESS capacity calculation by dispatch order	33

기호 및 약어 설명

$B(t)$:	출력제약[MW]
$Load(t)$:	전력수요[MW]
$WP(t)$:	풍력발전 출력[MW]
$PV(t)$:	태양광발전 출력[MW]
$Must_Run(t)$:	필수운전발전기 최소 출력[MW]
$HVDC(t)$:	HVDC 출력[MW]
$A(t)$:	수요와 공급 차의 양의 값[MW]
CP	:	연간 출력제약량[MWh]
$ESS_{primary}(t)$:	선 투입되는 ESS 충전량[MWh]
$ESS_{secondary}(t)$:	후 투입되는 ESS 충전량[MWh]
$P_{primary}^{char/dischar}(t)$:	선 투입되는 ESS에 충·방전가능량[MW]
$P_{secondary}^{char/dischar}(t)$:	후 투입되는 ESS에 충·방전가능량[MW]
$ESS_{primary}^{char_max/min}$:	선 투입되는 ESS 충전 시 최대·최소 운전범위[MW]
$ESS_{secondary}^{char_max/min}$:	후 투입되는 ESS 충전 시 최대·최소 운전범위[MW]
$ESS_{primary}^{dischar_max/min}$:	선 투입되는 ESS 방전 시 최대·최소 운전범위[MW]
$ESS_{secondary}^{dischar_max/min}$:	후 투입되는 ESS 방전 시 최대·최소 운전범위[MW]
$B'(t)$:	선 투입되는 ESS로 인해 완화된 출력제약[MW]
$A'(t)$:	ESS 방전가능한 출력[MW]
CPR	:	완화된 출력제약량[MWh]
ESS_cap	:	ESS 합산 용량[MW]
$BESS_cap$:	BESS 용량[MW]
PSH_cap	:	PSH 용량[MW]
$CPRatio$:	완화된 연간 출력제약률[%]
WP	:	연간 풍력 발전량[MWh]
PV	:	연간 태양광 발전량[MWh]
t	:	시간[h]

재생에너지 출력제약 완화를 위한 스토리지 믹스 분석 및 용량 산정

김 영 민

제주대학교 대학원
에너지융용시스템학부 전기공학전공

요약

기후 위기에 대한 세계적인 관심이 높아짐에 따라 화석연료 사용을 줄이고 태양광 및 풍력 같은 재생에너지의 보급이 증가하고 있다. 그러나 재생에너지 설비의 증가는 출력제약 문제를 발생시킨다. 출력제약은 전력수급 균형에 부정적인 영향을 미치고 재생에너지 발전사업자들의 수익을 감소시킨다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 유연성 자원인 ESS (Energy Storage System) 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 과도한 유연성 확보는 경제성을 악화시킬 수 있으므로 적절한 유연성을 제공하기 위한 스토리지 믹스 계획의 수립이 필요하다.

본 논문에서는 출력제약 완화를 위해 단주기 리튬이온 BESS (Battery Energy Storage System)와 장주기 PSH (Pumped Storage Hydro)를 조합한 스토리지 믹스를 소개한다. ESS 투입순서에 따른 운영방안의 출력제약 완화 효과를 비교하고 용량 산정 방법을 제시한다. 재생에너지 설비가 급증하는 계통에 적용시켜 분석하였다.

리튬이온 BESS와 PSH의 조합은 단일 ESS보다 더 높은 유연성을 제공하였으며, 특히 PSH 선 투입 시에 더 작은 용량으로 더 큰 출력제약 완화 효과를 확인하였다.

I. 서론

전 세계적으로 탄소중립을 계획하고 있으며, 에너지 전환과 기술 개발을 추진하고 있다. 이에 따라 여러 국가에서 화석연료 사용을 줄이고, 풍력 및 태양광 등의 재생에너지 보급이 증가하고 있다[1][2]. 하지만 보급이 늘어남에 따라 재생에너지 발전량을 제한하는 출력제약 문제가 발생하고 있다[3-7]. 재생에너지 점유율이 높은 해외 국가들은 이미 출력제약 문제가 발생하였고[8], 국가 간 연계선 및 ESS (Energy Storage System) 등에 투자를 통해 해결하며 재생에너지 수용성을 높이고 있다[1][2][9]. 또한 독일에서는 높은 투자 비용을 줄이고 수용성을 높이기 위해 출력제약률을 3%로 제한한 사례가 존재한다[8].

국내에는 '2050 탄소 중립 시나리오'와 '국가 온실가스 감축목표(NDC)'를 통해 온실가스 배출을 줄이며, 탄소 중립을 실현하려 한다. 제주지역은 'Carbon Free Island 2030' 계획으로 2030년까지 도내 전력수요 100%를 재생에너지로 공급하려 한다. 이에 따라 재생에너지 설비가 증가하며, 해외사례와 마찬가지로 출력제약 문제를 겪고 있다. 이를 해결하기 위해 HVDC (High Voltage Direct Current) 및 ESS를 설치하려 한다.

출력제약을 완화하기 위한 다양한 유형의 ESS 연구가 진행되고 있다[1][7][10-12]. 계통 유연성의 과도한 확보는 경제성을 악화시키기 때문에 적절한 유연성 제공을 위한 스토리지 믹스 계획이 수립되어야 한다[13]. 수요반응(Demand Response), P2X(Power to X) 기술 등에 따라 계통 유연성은 달라질 수 있으며, 현재 ESS 보급 또한 미래 투자될 ESS 요구 조건에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 이유로 ESS는 기술에 따라 설비 비용, 수명, 효율, 입지 조건 등이 달라서 어느 하나에 의존해서는 안 되며 여러 포트폴리오를 수립하여 추후 적정 수준으로 보급될 수 있도록 계획하여야 한다[14]. 따라서 다양한 ESS를 조합한 스토리지 믹스가 고려되고 있고 해외에서는 기존의 설치된 PSH (Pumped Storage Hydro) 설비에 BESS (Battery Energy Storage System)를 추가하는 방식으로 스토리지 믹스 계획을 수립하고 있다[13]. 그리고 국내의 제10차 전력수급기본계획상에서는 변동성 대응 및 신뢰도 유지 등을 위해 BESS

및 소규모 PSH 등이 고려되고 있다[15]. 또한 제5차 신재생에너지 기본계획은 재생에너지 출력제약을 완화하기 위해 저장 기술별 적정 조합에 대한 스토리지 믹스 계획 수립을 언급하였다[16]. 그럼에도 이를 위한 스토리지 믹스 연구는 미비한 상황이다.

본 논문은 출력제약 완화를 위해 단주기 리튬이온 BESS와 장주기 PSH를 조합한 스토리지 믹스를 소개한다. 소개된 스토리지 믹스는 재생에너지 수용 증대를 위한 운영방안이 고려되었다[17]. 출력제약이 집중되는 시간대에 충전 및 펌핑하여 수용성을 높이고 피크 수요 시간대에는 방전 및 발전하여 피크 수요를 저감한다. 그리고 BESS와 PSH 투입순서에 따른 출력제약 완화 효과를 비교하였다. 또한 BESS와 PSH 비중에 따라 출력제약 완화를 비교하였고, 출력제약률을 3%로 제한하는 최소 용량을 산정하였다. 스토리지 믹스의 출력제약 완화 효과를 분석하기 위해 재생에너지 보급이 급증하는 계통에 적용하여 사례 연구를 진행하였다.

II. 출력제약 분석 및 스토리지 믹스

2.1 재생에너지 출력제약 사례 분석

일일 전력수요는 지역과 계절, 기상 조건 등에 따라 달라질 수 있다. 출력제약이 발생한 제주지역의 일반적인 주중 전력수요는 06시 이후로 증가한다. 그리고 18시에서 21시 사이에 피크 수요가 발생한 뒤, 22시 이후 낮아지는 경향이 있다. Fig. 1은 제주지역의 계절별 일일 평균 전력수요 패턴을 보여준다. 봄(3~5월)은 전력수요가 낮고 태양광 출력이 높은 일조 시간대에 출력제약이 빈번하게 발생한다. 여름(6~8월)은 전력수요가 높고 장마 및 태풍 등에 영향으로 재생에너지 발전량이 적어서 출력제약 발생이 적다. 가을(9~11월)은 봄과 비슷하게 재생에너지 출력이 높고 전력수요가 낮은 일조시간 때에 출력제약이 발생한다. 겨울(12~2월)은 여름철과 유사하게 전력수요가 높아 출력제약 발생 빈도가 낮다.

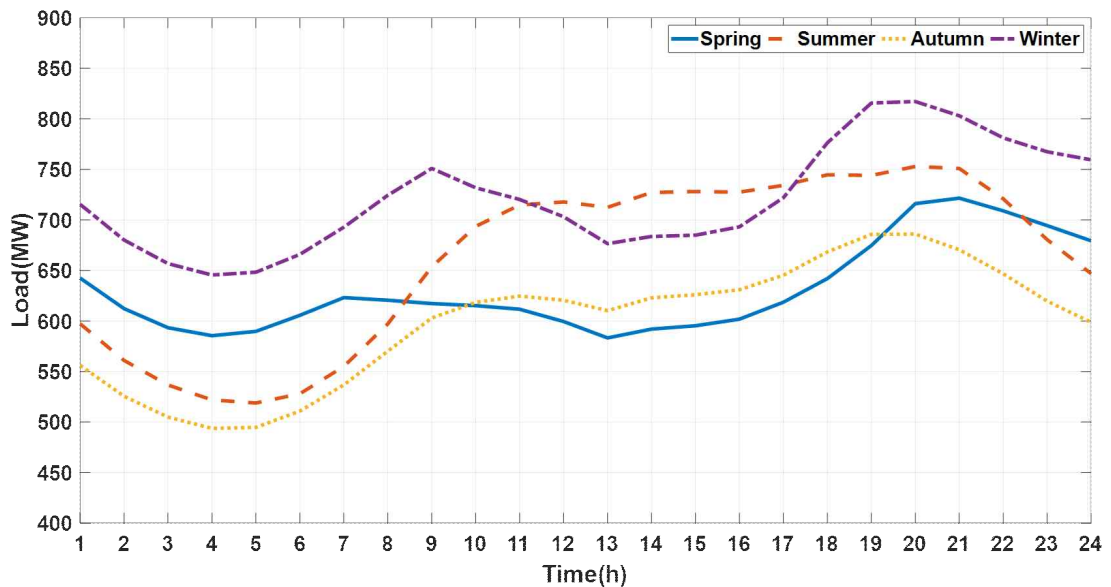


Fig. 1 Hourly average power load patterns

제주지역은 ‘Carbon Free Island 2030’ 계획으로 재생에너지 설비가 빠르게 보급되고 있다. 이에 따라 전력 공급자가 실제로 생산해야 하는 순수요의 패턴이 달라지고 있다. 또한 태양광 설비의 확산으로 일조시간 내에 순수요가 낮아지는 Duck Curve 현상이 발생하고 있다[18]. 이러한 Duck Curve 현상이 심해진다면 재생에너지 출력제약과 같은 문제가 발생할 수 있다.

출력제약은 중앙급전 발전원의 한계, 송전 제약, 재생에너지의 불확실성 등으로 인해 발생한다[3][19][20]. 따라서 전력수요가 낮은 시간대에 재생에너지 출력이 증가하여 중앙급전 발전기의 출력을 감발하거나, 전력을 다른 지역으로 송전하지 못하면 재생에너지 출력을 감발해야 하는 출력제약이 시행된다. 출력제약은 계통의 안정성을 해치고, 재생에너지 발전사업자의 수익을 감소시켜 재생에너지 보급에 악영향을 미칠 수 있다.

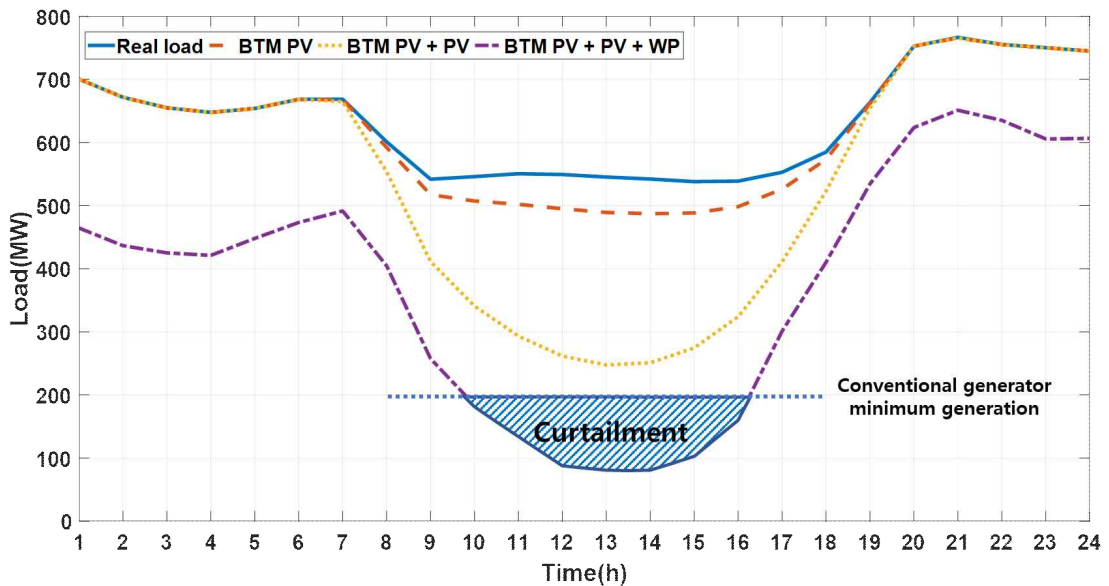


Fig. 2 Illustration of curtailment due to decrease in net-load

Fig. 2는 전력수요가 낮은 봄철에 재생에너지 출력으로 인해 출력제약이 발생한 제주 사례를 보여준다. 태양광 출력으로 인해 순수요가 07시부터 급감하였고, 전통적인 발전원의 최소 발전량까지 감소하여 10시부터 16시까지 출력제약이 발생하였다. 추후 BTM (Behind the Meter) 태양광 및 풍력 등의 재생에너지

보급이 확산되면 위와 같은 출력제약 사례가 빈번하게 발생할 것으로 예상된다. 출력제약 문제는 계통 안정성과 발전사업자의 수익을 해친다. 따라서 ESS를 활용하여 재생에너지 초과 발전을 수용하고 피크 시간대에 방전하며 순수요를 평탄화시키는 안정적인 계통 운영이 고려될 수 있다.

Table 1 Status of the curtailment in Jeju

Year	Load [GWh]	VRE Capacity [MW]		Curtailment amount [MWh]	Curtailment count
		WP	PV		
2015	4,430	221	76	152	3
2016	4,738	271	93	252	6
2017	5,014	273	125	1,300	14
2018	5,273	267	185	1,366	15
2019	5,374	290	294	9,223	46
2020	5,373	295	420	19,449	77
2021	5,688	295	526	12,016	64

Table 1은 제주지역의 재생에너지 설비 증가에 따른 출력제약 증가를 나타낸다. 재생에너지 보급확산에 따라 2015년 첫 출력제약 사례 이후로 출력제약량과 횟수는 증가하고 있다. 2021년에는 HVDC를 통해 제주지역의 잉여전력을 육지로 역송하여 출력제약량이 다소 감소하였다. 하지만 앞으로 재생에너지 보급이 증가한다면 HVDC 역송으로 인한 출력제약 완화는 한계가 있을 것으로 예상된다.

Fig. 3은 제주지역의 2015년부터 2022년까지 연간 시간대별 출력제약량 합계를 보여준다. 출력제약량은 재생에너지 보급이 많은 2022년으로 갈수록 증가한다. 첫 출력제약 사례는 경부하 시간대인 01시부터 06시 사이에 발생하였으나, 현재는 태양광 출력이 높은 일조 시간대에 빈번하게 일어나고 있다. 예를 들어 2022년에는 12시~15시에 연간 출력제약량의 72.5%, 10~17시에는 98.3%가 집중되어있다. 또한 8년간 시간대별 출력제약량 합산은 12시~15시에 73.5%, 10시~17시에는 95.3%가 발생하였다. 따라서 태양광 출력이 집중되는 10시부터

17시에 발생하는 출력제약에 대한 대응이 필요하다.

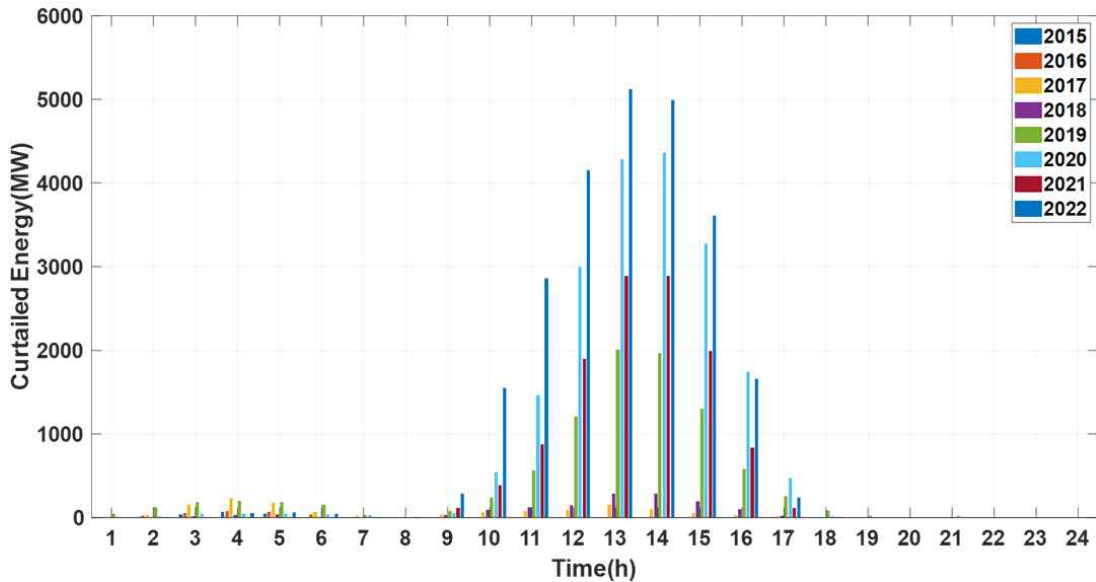


Fig. 3 Amount of hourly curtailment in Jeju

추후 재생에너지 보급이 많이 된다면 출력제약량이 더욱 증가하며, 장주기에 걸쳐서 발생할 것으로 예상된다. 이에 따라 HVDC를 건설 중이고, ESS가 설치될 예정이다. 또한 출력제약에 대응하기 위해 PSH 및 BESS 등의 유연성 자원이 조합된 기술별 적정 스토리지 믹스가 고려되고 있다[15]. 하지만 출력제약 완화를 위한 스토리지 믹스 연구는 현재 미비하다.

2.2 스토리지 믹스 및 ESS 종류

현재 스토리지 믹스에 대한 표준 정의는 정해져 있지 않다[13]. 하지만 해외 국가들은 기존 설치된 BESS와 PSH를 중심으로 유연성 자원의 계획을 고려하고 있다. 이러한 스토리지 믹스 수립 시에 사용되는 방법론은 다소 차이가 있으나, 장·단기적인 관점에서 결정되고 있다. 장기적인 관점에서는 시나리오에 따라 투입될 ESS 종류와 시점을 결정하고, 단기적으로는 경제적 분석을 통한 자원의 급전 결과를 결정하는 모델을 사용한다[13].

영국은 전력수요의 3분의 1 이상을 재생에너지 발전원이 충당하고 있다. 현재 약 4GW의 ESS가 설치되었으며, 그중에서 PSH는 3GW, 리튬이온 BESS는 1GW를 차지하고 있다[21]. 하지만 기존의 설치된 PSH보다는 리튬이온 BESS의 보급이 활발하게 진행되고 있다. 호주는 태양광 보급이 활발히 진행 중이며 재생에너지 변동성 대응, 관성 제공, 주파수 제어, 블랙 스타트 등을 위해 PSH를 활용하고 있으며, 현재 1.6GW의 양수발전이 설치되었고, 앞으로 2GW가 추가될 예정이다[22]. 또한 전압, 주파수 제어, 피크 저감 및 변동성에 대응하기 위해 BESS를 설치하고 있으며, 앞으로 1268MW 이상의 BESS가 설치될 예정이다[23]. 미국 또한 많은 종류의 ESS가 설치되고 있다. 2021년 기준 양수발전 설비가 약 92%를 차지하고 BESS가 약 3%를 차지하고 있으나, 연간 설치되는 BESS가 64%로 가장 높은 수준이다[24]. 따라서 해외 국가들은 기존의 PSH에 BESS를 추가로 설비하며, 재생에너지 변동성에 대응하고 있다.

국내에서는 재생에너지를 효율적으로 저장 및 활용하기 위한 기술별 적정 스토리지 믹스 계획 수립을 목표로 하고 있다[16]. 현재는 계통 안정화를 위한 단주기 ESS를 통해 주파수, 전압 조정 및 재생에너지 변동성에 대응하고 있다. 하지만 재생에너지 보급이 늘어난다면 단주기와 장주기 출력제약에 대한 대책이 필요하다. 따라서 재생에너지 변동성에 대응하기 위해 단주기 BESS 및 장주기 PSH 등의 유연성 자원 설치를 계획한다[16]. 이에 따라 ESS의 지속 시간과 기술적 특성을 고려한 스토리지 믹스가 필요하다.

ESS는 재생에너지 발전량이 많을 때 에너지를 저장해두고 피크 부하 시에 방전함으로써 계통 안정성을 유지할 수 있다[19]. 따라서 충·방전을 통해 출력제약 문제를 해결할 수 있다[20]. 해외 국가들은 다양한 종류의 ESS를 연구하고 있다.

Table 2 Technical characteristics of the ESS

Component		PSH	Lithium-ion BESS	CAES	NaS BESS
Operating Range [%]	Discharging	40~100[25]	0~100	0~100[4]	0~100
	Charging	70~100[25]			
Operating Efficiency [%]		70~87[3]	90~95[26]	40~75[3][26]	75~90[3]
Lifetime [year]		30~60[2]	5~15[1]	20~40[3]	5~20[3]
Suitable Depth of Discharge [%]		≤100[26]	80[26]	≤100[26]	90[27]
Discharging Time [h]		1~24+[3]	<6[1]	1~24+[3]	Seconds~hours[3]

Table 2는 대표적인 ESS들의 기술적인 특성을 나타낸다. PSH는 가장 성숙한 저장장치이며, 100년이 넘는 기술이다. 경부하 시간대의 저렴한 전력을 이용하여 하부담이나 저수지에 있는 물을 상부담이나 저수지로 저장한다. 그 후 피크 수요시간대에 물을 하부로 방출하며 전력을 생산한다. 이러한 운영으로 수익성을 얻을 수 있지만, 예비력 확보를 통한 신뢰도 유지를 위해 경제성이 확보되지 않더라도 운영된다[27].

리튬이온 BESS는 리튬이라는 이온을 이용하여 전기를 저장하고 공급할 수 있다. 양극에 있는 리튬 이온이 음극으로 가며 전기를 충전하고, 음극에서 양극으로 이동하며 전기를 생성한다.

압축 공기 에너지 저장 장치(CAES)는 잉여전력으로 공기를 압축해 지하 탱크나 동굴에 저장한다. 그리고 피크 부하 시간대에 압축된 공기로 터빈을 돌리며 전력을 생산할 수 있다.

나트륨-황(NaS) BESS는 나트륨과 황의 화학반응을 통해 전기가 생성된다. 나트륨이 양극에서 음극으로 이동하며 전기를 저장하고, 반대로 음극에서 양극으로 움직이며 전기를 방전한다. 특히 주요 소재인 나트륨과 황은 지구상에 널리 분포되어 있어 소재 제약에서 벗어난다.

Table 3 Advantages and disadvantages of ESS[12]

Component	Advantage	Disadvantage
PSH	the most mature, long lifetime, low maintenance costs	large unit size, high capital cost, terrain constraints
Lithium-ion BESS	high energy density, fast reaction speed, low self-discharge rate, long cycle life, high reliability	require working temperature, need overcharge protection
CAES	long lifetime, fast reaction speed, environment friendly	high requirements for geographical environment, low round trip efficiency
NaS BESS	high energy density, low self-discharge rate, fast reaction	high internal resistance, sodium corrosion, an additional system for high-temperature heating

Table 3은 ESS들의 장단점을 나타낸다. 그중에서 현재 리튬이온 BESS의 보급이 가장 활발하게 이루어지고 있고, PSH의 누적 용량이 가장 크다.

- 리튬이온 BESS

높은 에너지밀도와 효율을 갖고 매우 빠른 응답속도를 갖는다. 하지만 화재의 위험성, 짧은 지속 시간과 높은 가격이 단점으로 꼽힌다. 하지만 전기자동차 보급 증가와 함께 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이에 따라 미래에는 가격이 크게 감소할 것으로 예상된다.

- PSH

가장 성숙한 기술의 ESS이며, 긴 수명과 저장 시간을 갖는다. 또한 대용량의 에너지를 저장할 수 있으며, 다른 ESS에 비해 가격이 상대적으로 저렴하다. 그리고 최신 기술의 가변속 PSH는 높은 유연성을 제공할 수 있고 100MW 이하에 적용가능하다[28]. 하지만 가장 큰 단점으로는 긴 건설 기간과 환경적 요인으로 입지에 제약을 갖는다.

- NaS BESS

상대적으로 높은 에너지밀도와 효율을 가지며 대용량, 장주기로써 계통규모 ESS의 적합한 특징을 갖는다. 하지만 작동 온도가 높아 고온을 가해주어야 한다는 점과 상대적으로 낮은 수명 및 높은 유지보수 비용이 단점이다.

- CAES

지하 동굴이나 탱크에 공기를 압축하여 저장한 공기를 방출하며 전력을 공급하는 ESS이다. 상대적으로 낮은 비용과 대용량의 장주기 ESS로 전력 계통 규모에 적합하다. 하지만 낮은 효율과 기계 장비를 설치할 수 있는 충분한 공간이 필요하며, 탱크를 설치할 수 있는 지하 동굴 등이 필요한 입지 제약이 큰 단점이다.

경제성을 악화시키는 계통 유연성의 과도한 확보를 피하고, 적절한 유연성을 제공하기 위한 스토리지 믹스 계획이 수립되어야 한다. 위와 같이 ESS는 기술에 따라 설비 비용, 수명, 효율, 입지 조건 등이 달라서 어느 ESS에만 의존해서는 안 된다. 따라서 여러 포트폴리오를 수립하고 추후 적정 수준의 유연성을 제공할수 있도록 ESS 보급이 계획되어야 한다.

Ⅲ. 스토리지 믹스 운영방안 및 용량 산정 방안

3.1 재생에너지 출력제약 분석 과정

재생에너지 출력제약을 분석하기 위해 전력수요와 태양광, 풍력, 필수 운전 발전기, HVDC 발전량을 계산한다. 단, 재생에너지 설비는 태양광과 풍력만 고려하였다. Fig. 4는 출력제약 계산 과정을 보여준다.

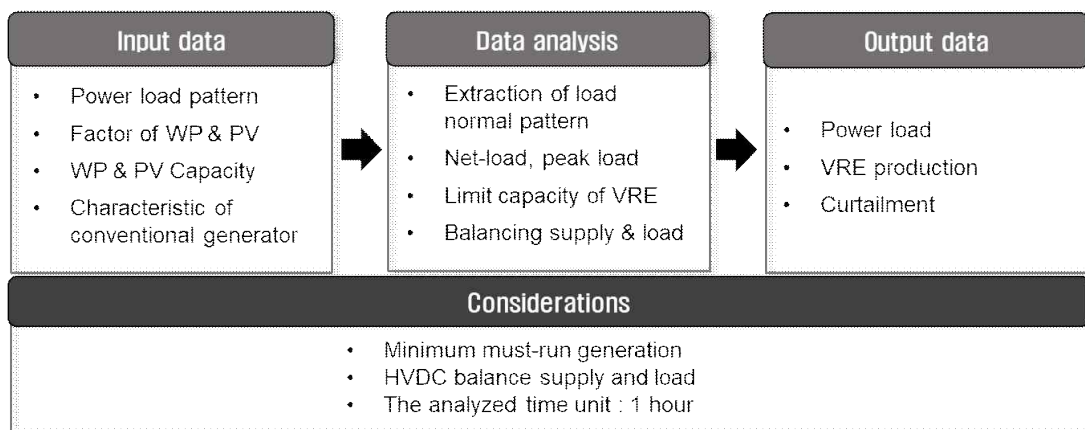


Fig. 4 Process of curtailment analysis

먼저 전력수요의 정규패턴을 분석하고, 사례 연구 계통의 전력수요 증분 비를 대입하여 전력수요를 계산한다. 재생에너지 발전량을 산정하기 위해 태양광과 풍력 설비의 이용률을 사례 연구 계통의 설비용량에 대입한다. 그리고 계산된 전력수요를 기반으로 필수 운전 발전기의 최소 운전량을 적용하고, 전력수급 균형을 맞출 수 있는 HVDC 운전을 고려한다. 전력수요에 비해 재생에너지 발전량이 많다면 HVDC를 통해 다른 지역으로 송전하고, 발전량이 부족하다면 다른 지역으로부터 전력을 공급받을 수 있다.

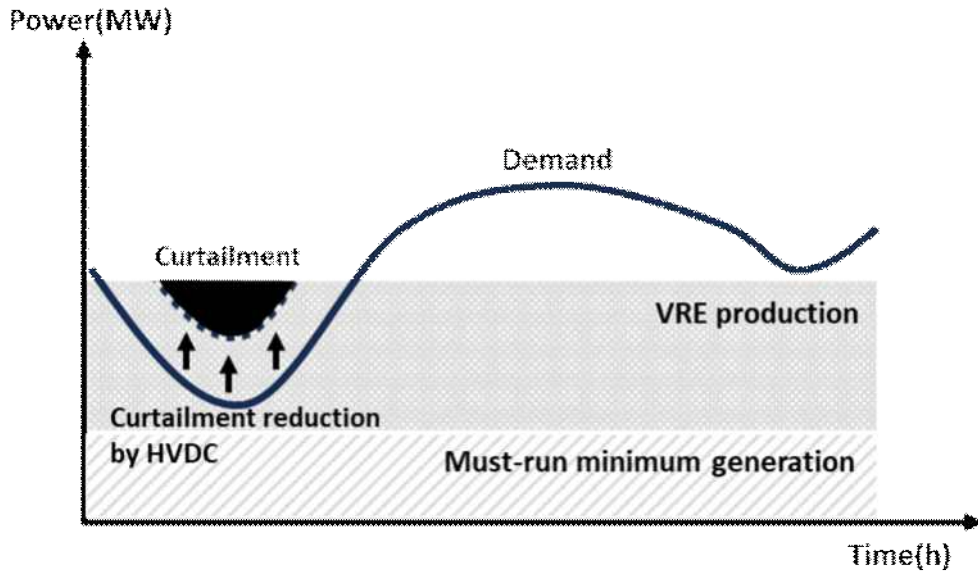


Fig. 5 Example of curtailment analysis

Fig. 5는 재생에너지 발전량이 전력수요를 초과하여 발생한 출력제약을 보여준다. 먼저 분석 대상의 전력수요, 재생에너지 발전량, 필수 운전 발전기 출력을 계산한다. 그리고 전력수요에 태양광, 풍력, 필수 운전 발전기 최소 운전량을 뺀 뒤 HVDC 운전을 고려하여 출력제약량을 계산한다.

다음은 단위 시간별과 연간 출력제약량을 계산하는 간략한 식이다.

$$B(t) = -\min(\text{Load}(t) - \text{WP}(t) - \text{PV}(t) - \text{Must_Run}(t) - \text{HVDC}(t), 0) \quad (1)$$

$$A(t) = \max(\text{Load}(t) - \text{WP}(t) - \text{PV}(t) - \text{Must_Run}(t) - \text{HVDC}(t), 0) \quad (2)$$

$$CP = \sum_{t=1}^{8,760} B(t) \quad (3)$$

식 (1)에서 전력수요, 풍력 출력, 태양광 출력, 필수 운전 발전기, HVDC 운전을 고려하여 단위 시간별 출력제약량을 계산한다. 음의 값으로 계산되기 때문에 해석의 편의를 위해서 (-)를 곱해 양(+)의 값으로 바꾼다. 필수 운전 발전기는 재생에너지 수용성을 높이기 위해 최소 송전으로 설정하고, HVDC는 전력 수급균형을 고려하여 운전하게 된다. 식 (2)는 전력수요와 공급의 차이에서

양(+)¹의 값만 계산한다. 이는 출력제약이 발생하지 않는 단위 시간에서 ESS를 방전하며 피크 수요를 저감하기 위함이다. 식 (3)은 식 (1)에서 계산된 시간대별 출력제약량의 합산으로 연간 출력제약량의 합계이다.

3.2 스토리지 운영방안에 따른 출력제약 완화 분석 모델링

BESS는 응답속도가 빠르지만, 투자 비용이 높고 지속 시간이 짧다는 한계가 있다. 반면에 PSH는 지속 시간이 길고 대용량의 전력을 저장할 수 있다[28]. 따라서 본 논문에서는 BESS의 높은 투자 비용의 부담을 줄이고, 장시간 출력제약에 대응하기 위해 BESS와 PSH를 조합한다. 이에 따라 두 ESS를 조합한 스토리지 믹스의 출력제약 완화 효과를 분석한다.

현재 국내의 재생에너지 연계 ESS는 충전량을 피크 수요시간대에 방전하여 REC (Renewable Energy Certificate) 가중치를 받는다[29]. 따라서 피크 수요를 저감하여 계통 안정화에 기여할 수 있다. 하지만 본 논문에서는 기존의 수익 증대를 위한 ESS 운영방안이 아닌 재생에너지 수용 증대를 위한 운영이 고려되었다[17]. 출력제약이 집중되는 시간대를 설정하여 ESS를 충전하고, 피크 수요시간대인 18시부터 방전하며 피크 수요를 저감한다. 하지만 장시간의 출력제약이 발생하여 익일의 충전 시간까지 방전하지 못한다면 재생에너지 수용을 높이기 위해 충전량이 0으로 된다는 가정을 하였다.

단주기와 장주기 ESS 조합은 운영방안에 따라 출력제약 완화 효과가 달라진다. 운영방안은 단주기 ESS 선 투입과 장주기 ESS를 선 투입하는 방안이 있다. 단주기 ESS가 선 투입되면 장주기 ESS가 보조적으로 사용되고, 장주기 ESS가 선 투입되면 단주기 ESS가 보조적으로 사용된다. 예를 들어 단주기 ESS를 먼저 투입하면 단위 시간별로 단주기 ESS에 먼저 잉여전력을 충전하여 출력제약을 완화하고, 남은 잉여전력을 장주기 ESS에 충전하여 출력제약량을 완화한다. 반대로 장주기 ESS를 먼저 투입하면 장주기 ESS에 먼저 잉여전력을 충전하여 출력제약을 완화하고 남은 잉여전력을 단주기 ESS를 충전하여 출력제약을 완화한다. 이는 방전하며 피크 저감 시에도 동일하다.

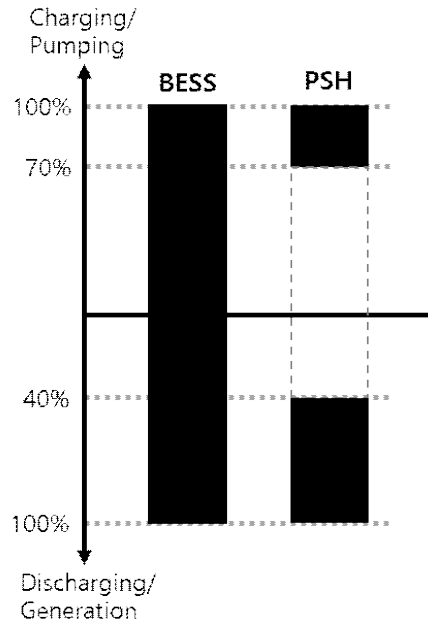


Fig. 6 Operating range of ESS

단주기 ESS로써 리튬이온 BESS와 장주기 ESS로써 PSH의 특성을 고려하여 분석을 진행한다. Fig. 6은 BESS와 PSH의 충·방전 운전범위를 나타낸다. BESS는 출력의 100% 범위에서 충·방전이 가능하고, PSH는 70~100%에서 양수 모드, 40~100%에서 펌핑 모드로 동작할 수 있다. 또한 리튬이온 BESS는 정격출력으로 4시간의 충·방전이 가능하고, PSH는 8시간의 펌핑·발전 모드로 운전할 수 있게 설정하였다. 그리고 리튬이온 BESS의 최대 충전 범위는 90%로 설정하고, PSH는 용량의 100%를 펌핑·발전할 수 있다. ESS 운영방안에 따라 출력제약 완화 및 피크 저감을 위한 모델링은 다음과 같다.

$$ESS_{primary}(t) = P_{primary}^{char}(t) + ESS_{primary}(t-1) \quad (4)$$

$$ESS_{secondary}(t) = P_{secondary}^{char}(t) + ESS_{secondary}(t-1) \quad (5)$$

식 (4), (5)는 ESS 운영방안에 따라 충전되는 출력제약량을 나타낸다.

$$P_{primary}^{char}(t) = \begin{cases} \min(B(t), ESS_{primary}^{char-max}) & \text{if } B(t) \geq ESS_{primary}^{char-min} \\ 0 & \text{if } B(t) < ESS_{primary}^{char-min} \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{secondary}^{char}(t) = \begin{cases} \min(B'(t), ESS_{secondary}^{char-max}) & \text{if } B'(t) \geq ESS_{secondary}^{char-min} \\ 0 & \text{if } B'(t) < ESS_{secondary}^{char-min} \end{cases} \quad (7)$$

식 (6), (7)은 ESS 충전 시에 운전범위에 드는 출력제약량을 계산한다.

$$B'(t) = B(t) - P_{primary}^{char}(t) \quad (8)$$

$$CPR = \sum_{t=1}^{8,760} (P_{primary}^{char}(t) + P_{secondary}^{dischar}(t)) \quad (9)$$

식 (8)은 선 투입되는 ESS를 통해 완화된 출력제약량을 나타낸다. 식 (9)는 ESS로 인해 완화된 연간 출력제약량을 나타낸다.

$$ESS_{primary}(t) = -P_{primary}^{dischar}(t) + ESS_{primary}(t-1) \quad (10)$$

$$ESS_{secondary}(t) = -P_{secondary}^{dischar}(t) + ESS_{secondary}(t-1) \quad (11)$$

식 (10), (11)은 ESS의 방전 후에 남은 충전량을 나타내고, 효율을 고려한 충전량까지 방전할 수 있다.

$$P_{primary}^{dischar}(t) = \begin{cases} \min(A(t), E_{primary}^{dischar-max}) & \text{if } A(t) \geq ESS_{primary}^{dischar-min} \\ 0 & \text{if } A(t) < ESS_{primary}^{dischar-min} \end{cases} \quad (12)$$

$$P_{secondary}^{dischar}(t) = \begin{cases} \min(A'(t), ESS_{secondary}^{dischar-max}) & \text{if } A'(t) \geq ESS_{secondary}^{dischar-min} \\ 0 & \text{if } A'(t) < ESS_{secondary}^{dischar-min} \end{cases} \quad (13)$$

식 (12), (13)은 ESS 운전범위에 드는 방전가능량을 계산한다.

$$A'(t) = A(t) - P_{primary}^{dischar}(t) \quad (14)$$

식(14)는 먼저 방전된 ESS에 의해 낮아진 피크 수요로 이해할 수 있다.

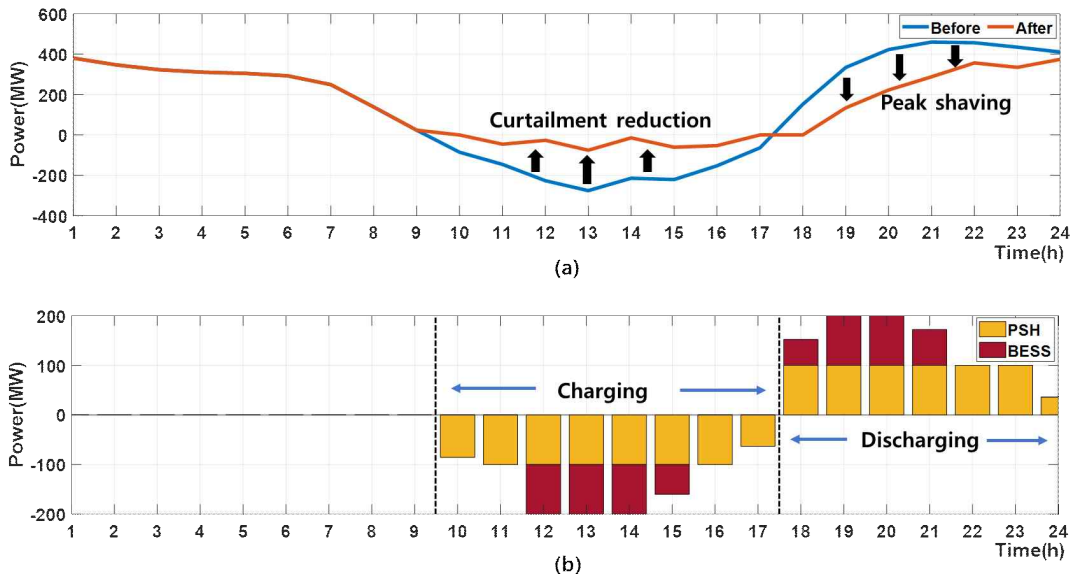


Fig. 7 Curtailment reduction and peak shaving through ESS when curtailment occurs; (a) flattened net-load, (b) charging/discharging power of ESS

Fig. 7은 앞서 제시된 ESS 충·방전에 따른 순수요 변화를 나타낸다. (a)에서 음(-)의 값은 출력제약을 의미한다. 순수요가 10시부터 17시까지 0보다 작아지며 출력제약이 발생하였다. 이에 따라 출력제약을 완화하기 위해 충전하고, 18시부터 방전하며 피크 수요를 감소시켰다. 따라서 ESS 충·방전 후에는 순수요가 완만한 형태로 바뀌었다.

3.3 출력제약률을 고려한 ESS 용량 산정 방안

Fig. 8은 출력제약률을 3%로 제한하는 ESS 최소 용량 산정 과정이다. 독일 사례[9]를 참고하여 연간 출력제약률을 3%로 제한할 수 있는 ESS 용량을 산정한다.

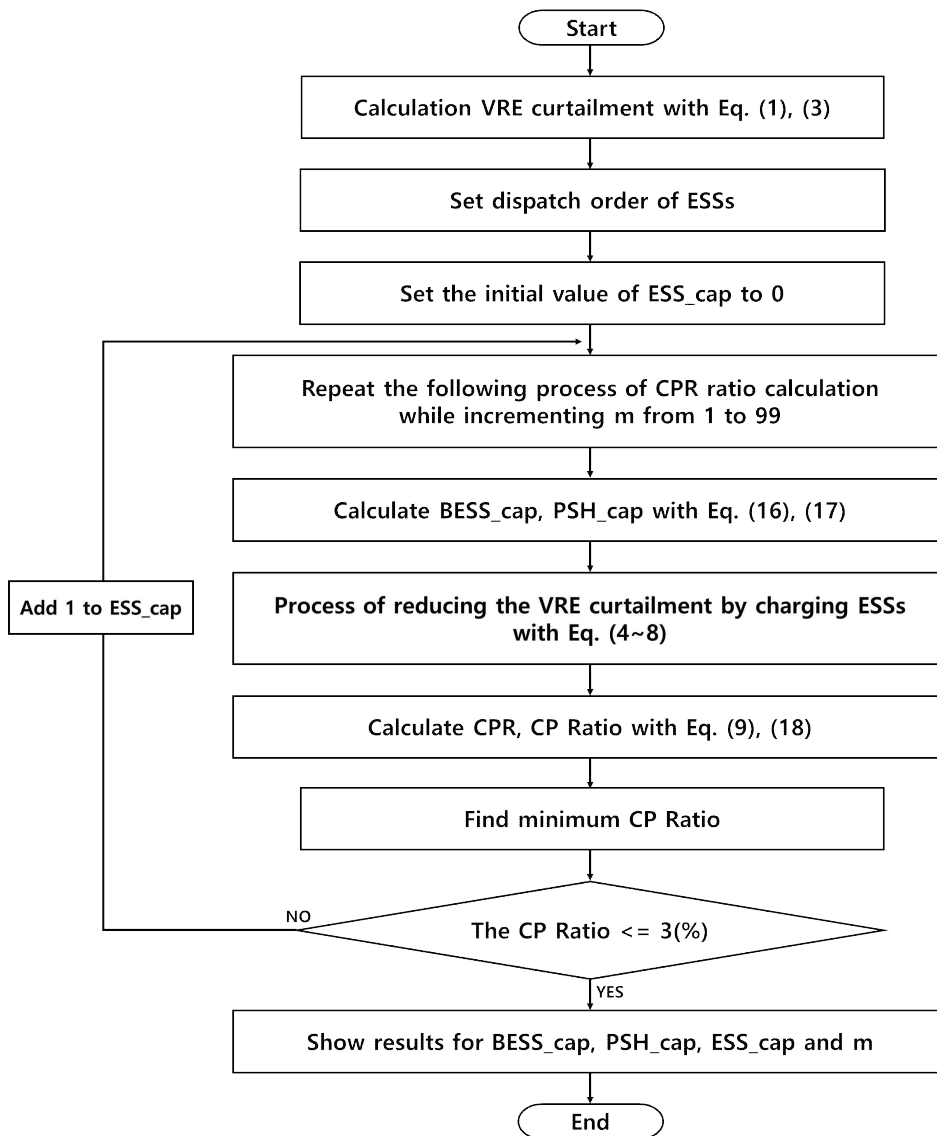


Fig. 8 Process of ESS capacity calculation

$$ESS_cap = BESS_cap + PSH_cap \quad (15)$$

식 (15)는 ESS 용량이 BESS와 PSH의 합계임을 나타낸다.

$$BESS_cap = m * ESS_cap / 100 \quad (16)$$

$$PSH_cap = (100 - m) * ESS_cap / 100 \quad (17)$$

식 (16), (17)에서 BESS와 PSH의 용량은 ESS와 비중 m 을 통해 계산된다. 비중 m 은 1에서부터 99까지 증가한다. 따라서 BESS와 PSH 비중의 합은 100%이다. BESS와 PSH 비중에 따라 출력제약 완화 효과는 달라지기 때문에 완화 효과가 가장 큰 비중을 찾기 위함이다. 이를 통해 용량 산정 시에는 ESS 비중에 따라 출력제약률을 3%로 완화하는 최소 용량을 계산한다.

$$CPRatio = (CP - CPR) / (WP + PV + CPR) * 100 \quad (18)$$

식 (18)은 완화된 연간 출력제약률이며, 출력제약량을 ESS에 충전함에 따라 수용된 재생에너지 발전량으로 나눈 값에 100을 곱해 계산한다. 초과 발전된 재생에너지를 ESS에 충전함에 따라 수용하였기 때문에 재생에너지 발전량이 늘어났다고 이해할 수 있다.

따라서 BESS와 PSH 비중에 따라 출력제약량을 최대로 완화하는 비중 m 을 찾고, 그때의 출력제약률이 3%로 제한될 때까지 ESS 용량을 1씩 증가시킨다. 마지막으로 출력제약률을 3%로 만족시키는 ESS 용량이 결정되면, 출력제약 완화 효과가 최대인 BESS와 PSH의 최소 용량을 산정한다.

IV. 스토리지 믹스의 출력제약 완화 분석 및 용량 산정

단주기와 장주기 ESS의 투입순서에 따른 출력제약 완화를 분석하기 위해서 재생에너지 설비가 급증하는 A 계통에서 사례 연구를 진행한다. Fig. 9는 사례 연구가 진행된 A 계통을 간략하게 나타낸다. 중앙급전 발전기, 풍력과 태양광을 통해 전력을 공급한다. 또한 연계선을 통해 다른 계통과 연계되어 있다.

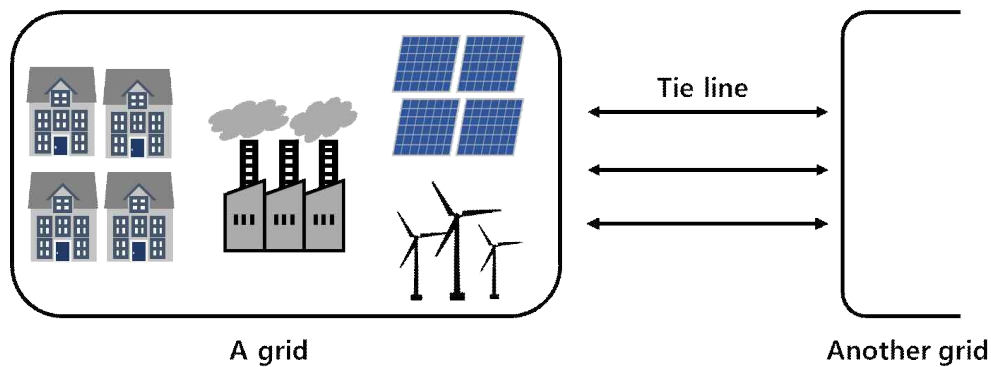


Fig. 9 Illustration of A grid

A 지역은 계통 규모 대비 발전설비의 용량이 크며, HVDC를 통해 다른 지역과 전력을 주고받을 수 있다. 하지만 재생에너지 설비 급증으로 인해 출력제약 사례가 나타나고 있다. 이에 따라 연계선을 통해 완화하고 있지만, 재생에너지 보급이 더 늘어난다면 연계선으로는 한계가 있을 것으로 예상된다.

4.1 재생에너지 비중이 높은 계통에서 출력제약 분석

재생에너지 보급에 따른 영향을 분석하기 위해 전력수요가 증가함에 따라 태양광과 풍력 설비가 늘어나는 7개의 Case를 구성한다. 이때 재생에너지 설비에는 태양광과 풍력만 포함한다. 또한 부하추종을 하지 않는 발전원은 고려되지 않았다. 분석된 시간 단위는 1시간이다.

Table 4 Power configuration status by cases

Case	Load [GWh]	Peak load [MW]	VRE capacity [MW]	
			WP	PV
Case 1	6,108	1,031	416	599
Case 2	6,301	1,064	466	791
Case 3	6,924	1,169	660	924
Case 4	7,350	1,241	926	1,008
Case 5	7,484	1,236	1,111	1,081
Case 6	7,923	1,338	1,465	1,185
Case 7	8,220	1,405	1,765	1,335

Table 4는 사례 연구가 진행된 A 계통의 연간 전력수요, 최대수요와 발전설비용량을 나타낸다. Case 단계별로 수요와 최대수요가 늘며, 풍력과 태양광 설비가 증가한다. 증가하는 수요를 충당할 수 있는 재생에너지 설비용량이 고려되었다. 또한 A 계통에서 다른 계통으로 전력을 송수전할 수 있는 HVDC가 고려되었으며, 설비용량은 600MW이다. 출력제약 완화를 위해 최대 400MW까지 송전할 수 있다. 그리고 계통에 관성이나 기저 부하를 제공할 수 있는 전통적인 발전원은 910MW로 고려되었다.

앞서 제시된 A 계통의 Case 별 재생에너지 발전량과 출력제약을 분석하였다. 재생에너지 점유율은 재생에너지 발전량을 전력수요로 나누고 100을 곱한 값이다. 식 (1), (3)에 따라 시간대별과 연간 출력제약량을 계산하고, 출력제약률은 연간 출력제약량을 재생에너지 발전량으로 나누고 100을 곱하여 산정한다.

Table 5 Analysis of VRE production and curtailment by cases

Case	VRE penetration [%]	VRE production [GWh]	Curtailment [MWh]	Curtailment rate [%]
Case 1	25	1,552	2,515	0.2
Case 2	30	1,891	8,181	0.4
Case 3	35	2,403	28,205	1.2
Case 4	40	2,966	65,404	2.2
Case 5	45	3,346	121,693	3.5
Case 6	50	3,995	259,872	6.1
Case 7	55	4,513	516,189	10.3

Table 5는 각 Case의 재생에너지 점유율과 발전량, 출력제약을 분석한 결과이다. 출력제약은 재생에너지의 초과 발전량만 고려되었다. 재생에너지 점유율은 Case 단계별로 재생에너지 발전량 증가에 따라 25%에서 55%까지 증가하고, 이에 따라 출력제약량과 출력제약률도 늘어난다. Case 7은 Case 1보다 재생에너지 점유율과 재생에너지 발전량이 약 3배 수준이지만, 출력제약량은 약 205배, 출력제약률은 약 50배로 계산되었다.

Fig. 10은 Case 1에서 Case 7까지의 연속적인 출력제약 발생 시간에 대한 빈도를 보여준다. x축은 연속적으로 일어나는 출력제약 발생 시간, y축은 연속적으로 출력제약이 일어나는 시간의 횟수를 나타낸다. 2시간 이상 연속적으로 출력제약이 발생한 경우부터 나타내었다. Case 1은 연속적으로 출력제약이 일어나는 시간은 최대 5시간이다. Case 7로 갈수록 연속적으로 출력제약이 발생하는 시간은 늘어나며, 횟수도 증가한다. 또한 발생 횟수가 적어 Fig. 10에 표기하지 않았지만, 30시간 이상인 경우도 존재하였다. 37시간, 39시간, 48시간에서 각 1회씩 발생하였다. 이는 재생에너지 보급이 늘어날수록 장시간의 출력제약이 발생하기 때문에 장주기 지속 시간을 가진 ESS가 필요하다는 것을 의미한다.

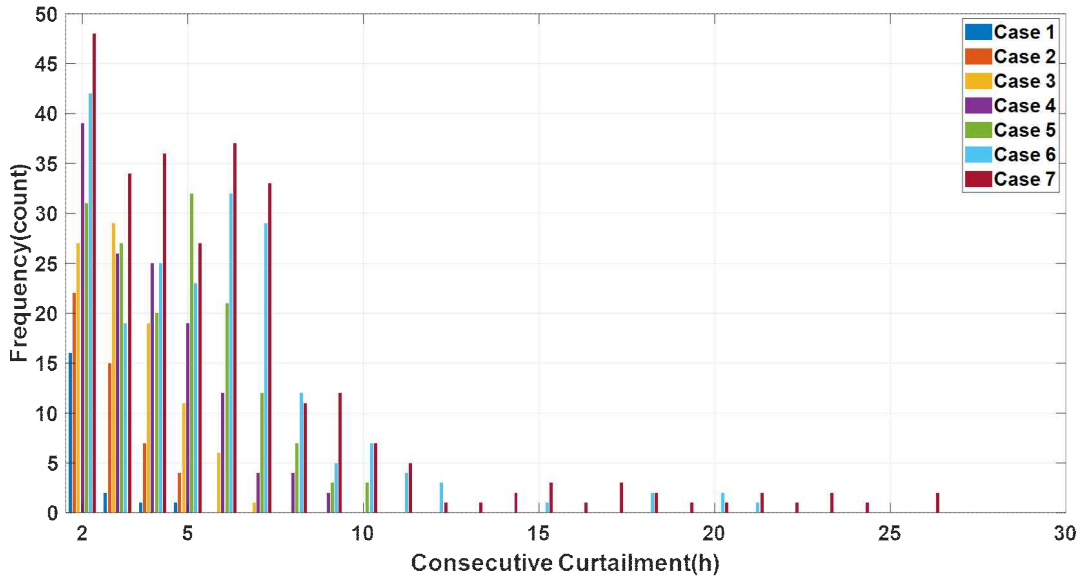


Fig. 10 Analysis of consecutive curtailment by cases

Fig. 11은 각 Case에 따른 시간대별 출력제약량 합계를 보여준다. Case 1은 HVDC 역송을 통해 출력제약을 크게 완화할 수 있어 뚜렷한 출력제약 패턴을 보이지 않는다. 그러나 Case 2에서 Case 7까지는 일조시간에 집중된 출력제약 패턴이 발생한다.

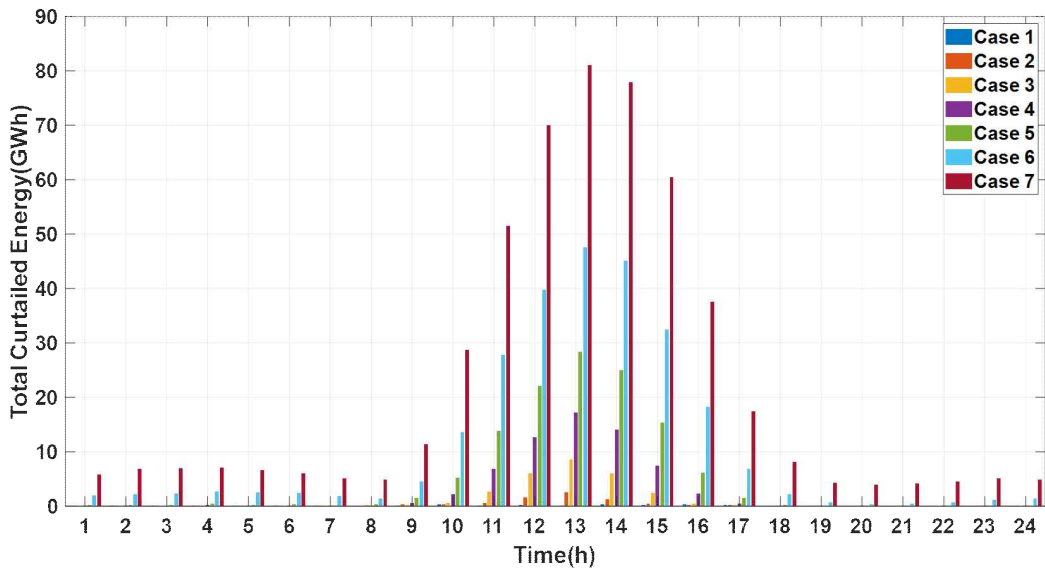


Fig. 11 Amount of hourly curtailment

Case 2는 10시부터 17시까지의 시간대에서 출력제약량의 87.7%가 나타났고, 12~15시에는 71.6%가 발생한다. Case 7에서는 10시부터 17시까지의 시간대에서 80.6%의 출력제약량이 집중되고, 12시부터 15시까지는 54.7%가 나타난다. Case 단계가 높아질수록 모든 시간대에서 출력제약량이 증가했으며, 특히 Case 7의 시간대별 출력제약량은 다른 Case에 비해 매우 높은 수준이다. 태양광 출력이 높은 10시부터 17시까지의 시간대에 많은 출력제약량이 발생하며, 그 중심인 12~15시에 집중되어있다. 이에 따라 BESS의 충전 시간을 12시부터 15시로 설정하고, PSH는 10시부터 17시에 펌핑하며 출력제약을 완화하도록 하였다.

4.2 스토리지 운영방안에 따른 출력제약 완화 분석

A 계통에서 재생에너지 점유율이 35% 이하인 Case 1~3은 HVDC를 통해 출력제약을 약 1.2%까지 완화할 수 있었다. 하지만 재생에너지 점유율이 35%를 초과하는 Case 4~7은 HVDC로 출력제약을 완화하기에 한계가 있다. 따라서 ESS를 활용하여 출력제약 완화 효과를 분석한다.

먼저 단일 ESS 투입 시에 출력제약 완화 한계를 분석하기 위해 BESS와 PSH를 단독으로 투입하고 용량을 증대시키며, 완화된 출력제약량을 분석한다. 그 후 단일 ESS 투입 시 출력제약완화 효과가 가장 큰 최소 용량을 선정하고 BESS와 PSH 조합과 완화 효과를 비교한다. 이와 같은 ESS 용량은 현실적이지 않지만 단일 ESS의 한계를 분석하기 위해 용량을 증가시키며 분석하였다.

Fig. 12~15는 Case 4~7에서 BESS와 PSH를 단독으로 투입할 때 용량을 증대시키며 출력제약 완화 효과를 비교하였다. Case 4에서 PSH만 투입하여 출력제약을 완화하면 약 200MW의 용량에서 출력제약의 61.1%를 감소시켰다. 하지만 이후 용량이 증가하며 완화 효과가 감소하는데, 이는 PSH의 출력 조절 범위로 인한 한계로 발생하는 결과이다. 또한 BESS 투입 시에는 약 400MW에서 출력제약을 77.1%까지 줄일 수 있었다. 하지만 더 이상 용량이 커져도 BESS의 짧은 지속 시간으로 인해 완화 효과는 증가하지 않았다.

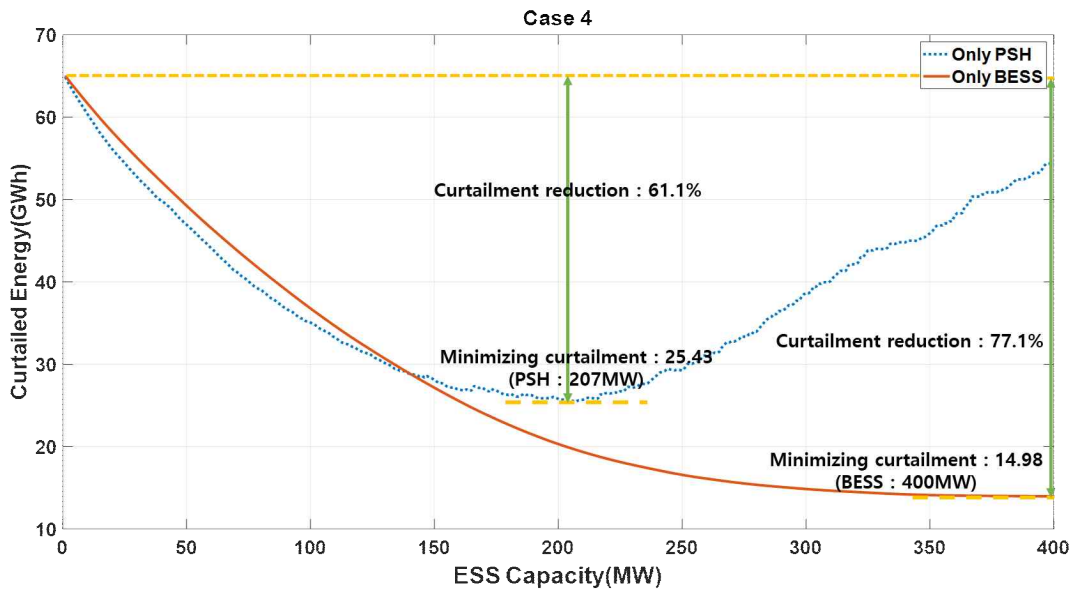


Fig. 12 Analysis of curtailment reduction by a single ESS

Case 5는 PSH 투입 시에 약 250MW에서 57.1%를 저감하였다. BESS 투입 시에는 약 550MW에서 74.5%까지 완화하며 가장 큰 출력제약 완화 효과를 보인다.

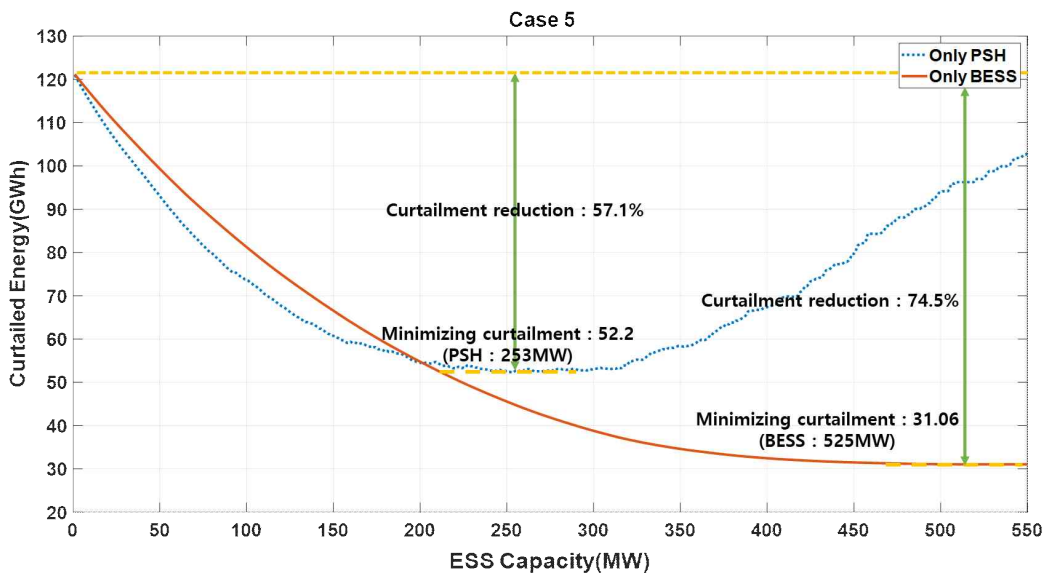


Fig. 13 Analysis of curtailment reduction by a single ESS

Case 6에서는 PSH 투입 시에 약 300MW에서 53.8%를 완화하였고, BESS 투입 시는 약 800MW의 용량에서 63.4%까지 출력제약을 완화하였다. 그러나 출력제약량과 출력제약 발생 시간도 길어져서 두 용량이 약 2.7배 차이임에도 출력제약 완화 효과는 큰 차이가 나지 않는다.

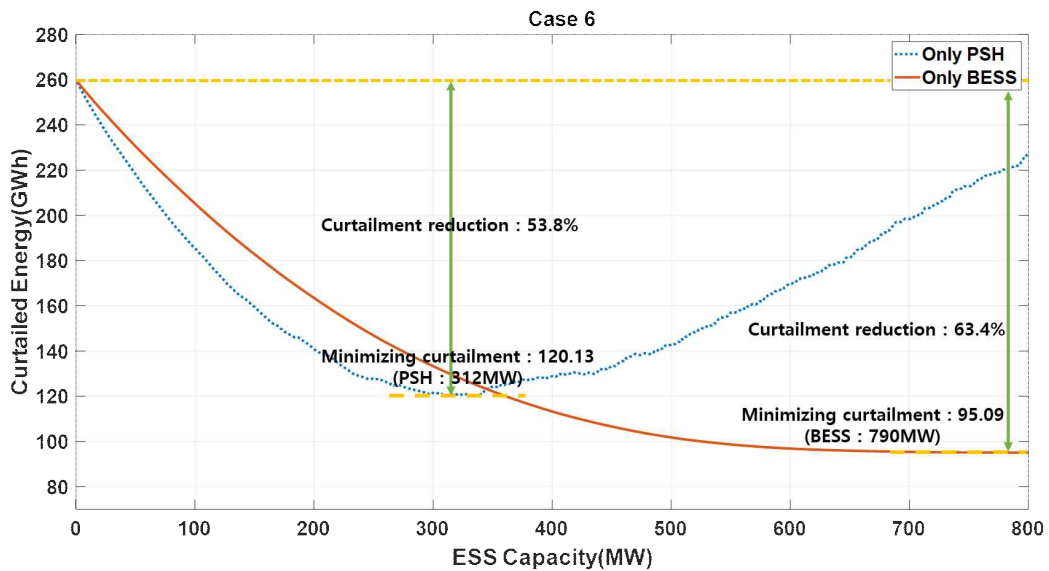


Fig. 14 Analysis of curtailment reduction by a single ESS

이러한 결과는 Case 7에서 더욱 선명하게 나타났다. PSH 투입 시에 약 450MW, BESS 투입 시에는 약 1100MW에서 최대 효과가 있다. 하지만 ESS 용량은 약 2.5배이지만 출력제약은 48.8%, 54.7%만큼 완화하여 용량에 비해 큰 차이를 보이지 않는다.

결론적으로 분석된 Case에서 단일 ESS는 일정 용량에 도달하자 출력제약량 완화 효과가 감소하거나 수렴하는 것으로 나타났다. 또한 일정 용량까지는 PSH가 더 높은 유연성을 제공했지만, 이후에는 BESS가 더 많은 출력제약을 수용하였다. 이후 단일 ESS 투입 시에 출력제약 완화 효과가 감소하거나 수렴하는 용량에서 스토리지 믹스를 조합하여 단일 ESS와 완화 효과를 비교하였다.

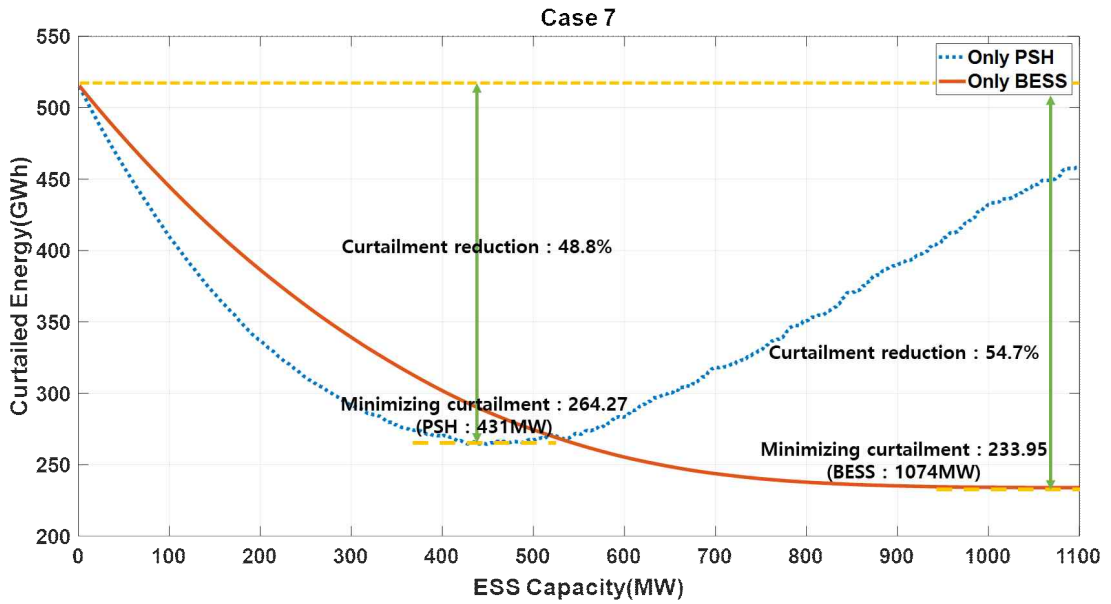


Fig. 15 Analysis of curtailment reduction by a single ESS

Fig. 16~19는 Case 별 운영방안에 따라 BESS와 PSH 비중에 따른 출력제약 완화 효과를 보여준다. Case 4는 ESS의 용량이 200MW와 400MW에서 출력제약 완화 효과를 분석하였다. 200MW에서 BESS의 비중이 40%일 때 출력제약 완화가 가장 크게 나타났다. 400MW 용량일 때는 PSH의 비중이 43%일 때 가장 큰 효과가 나타났다. 또한 운영방안에 따른 출력제약 완화 차이는 BESS 비중이 30~33%에서 가장 크게 나타났다.

Case 5는 250MW와 550MW 용량에서 분석을 진행하였다. 250MW 용량에서 BESS 비중이 41%, PSH 비중이 59%일 때, 550MW에서는 BESS의 비중이 64%, PSH의 비중이 36%일 때 출력제약 완화량이 가장 컸다. 운영방안에 따른 출력제약 완화 차이는 BESS 비중이 25~28%에서 가장 컸다.

Case 6은 ESS 용량이 300MW, 800MW에서 분석하였다. 300MW 용량일 경우에 BESS 비중이 32%, PSH 비중이 68%일 때 출력제약 완화 효과가 가장 컸고, 800MW 용량일 때는 BESS 비중이 67%, PSH 비중이 33%일 때 가장 효과적이었다. 그리고 BESS 비중이 28~33%일 때 운영방안에 따른 차이가 가장 컸다.

Case 7은 450MW, 1100MW에서 분석이 진행되었다. 450MW일 때 BESS의

비중이 34%, PSH 비중이 66%일 때, 1100MW에서는 BESS의 비중이 62%, PSH의 비중이 38%일 때 출력제약 완화 효과가 컸다.

결론적으로 PSH 선 투입 시에 더 높은 유연성을 제공하였다. 또한 최대 출력제약 완화를 위한 BESS와 PSH 비중은 Case마다 일정 범위에서 보였다. 비교된 두 용량 중 작은 용량일 경우에 BESS 비중이 32~40%, PSH 비중이 60~68%일 때 출력제약 완화가 가장 컸다. 큰 용량일 경우에는 BESS 비중이 57~67%, PSH 비중이 33~43%일 때 큰 효과가 있었다. ESS 용량이 늘어날수록 BESS 비중이 커졌다. 이는 태양광 출력이 12~15시에 몰려 있고, PSH의 출력 조절 범위의 한계로 분석된다. 그리고 운영방안에 따른 출력제약 완화 차이는 BESS의 비중이 26~29%에서 가장 컸다.

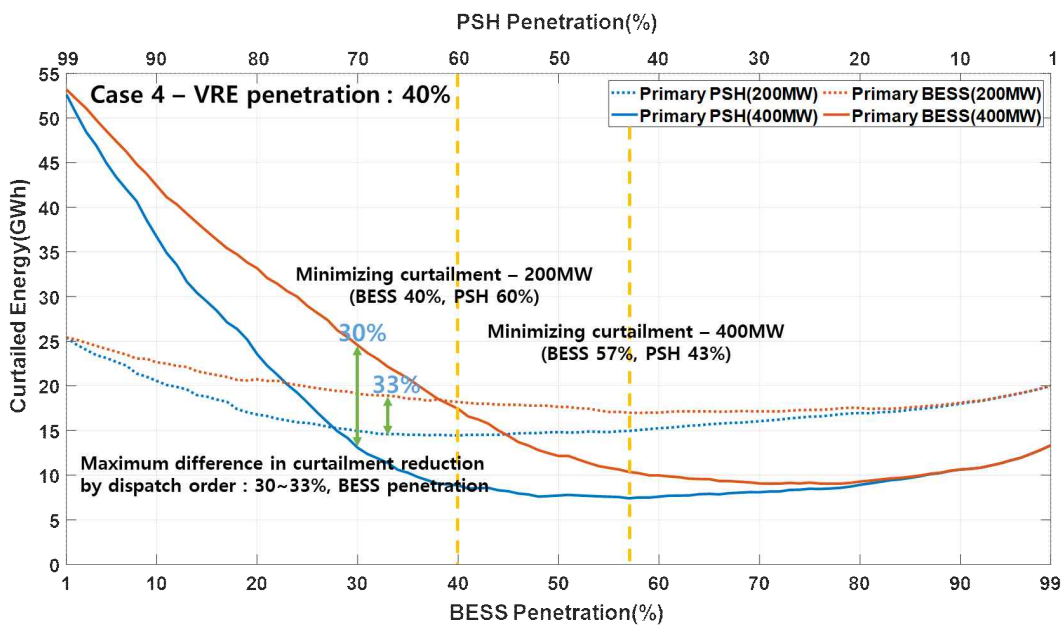


Fig. 16 Comparison of curtailment reduction by dispatch order and penetration

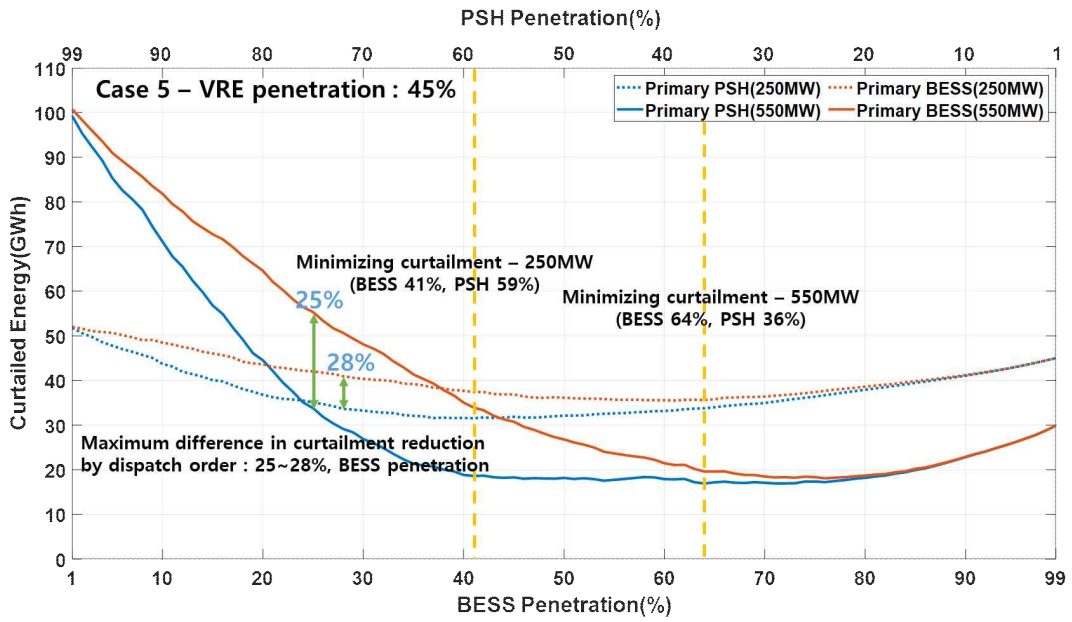


Fig. 17 Comparison of curtailment reduction by dispatch order and penetration

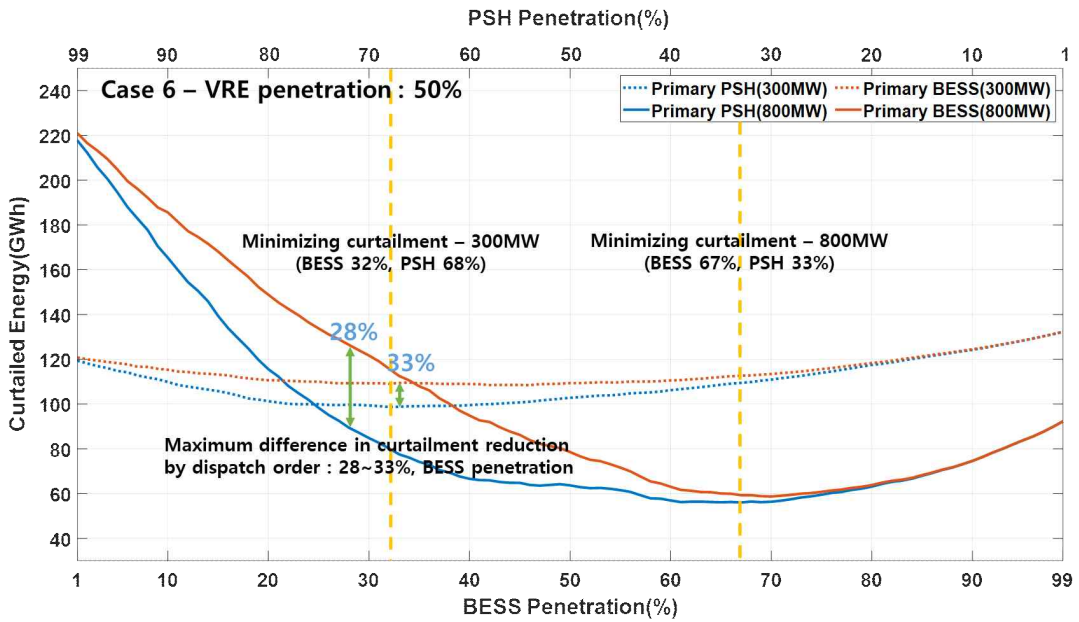


Fig. 18 Comparison of curtailment reduction by dispatch order and penetration

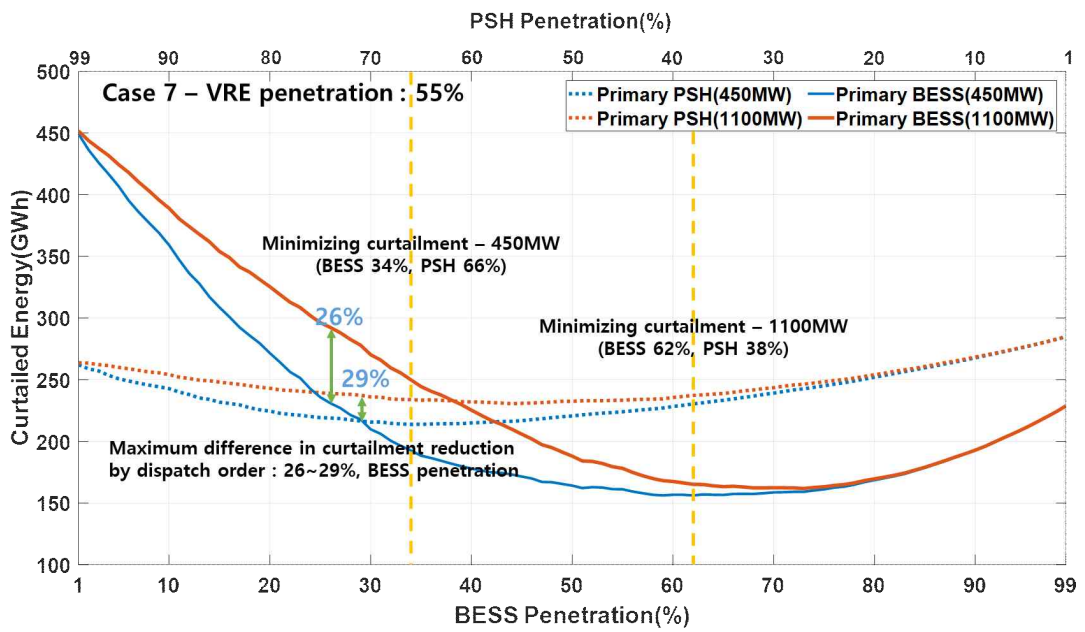


Fig. 19 Comparison of curtailment reduction by dispatch order and penetration

Table 6 Minimum curtailment and ESS penetration by operation planning

Dispatch order	Case	Case 4		Case 5	
	ESS Capacity[MW]	200	400	250	550
Primary PSH	Minimum Curtailed Energy [GWh]	14.4	7.4	31.5	16.9
	BESS : PSH Penetration[%]	40 : 60	57 : 43	41 : 59	64 : 36
Primary BESS	Minimum Curtailed Energy [GWh]	17.0	9.0	35.5	18.1
	BESS : PSH Penetration[%]	58 : 42	77 : 23	61 : 39	76 : 24
Dispatch order	Case	Case 6		Case 7	
	ESS Capacity[MW]	300	800	450	1100
Primary PSH	Minimum Curtailed Energy [GWh]	98.7	56.1	213.8	156.2
	BESS : PSH Penetration[%]	32 : 68	67 : 33	34 : 66	62 : 38
Primary BESS	Minimum Curtailed Energy [GWh]	108.5	58.7	230.6	161.8
	BESS : PSH Penetration[%]	46 : 54	70 : 30	44 : 56	73 : 27

Table 6은 Fig. 21~24에서 분석된 Case 별로 ESS 운영방안에 따른 용량별 최소 출력제약량과 그때의 BESS와 PSH의 비중을 나타낸다.

Case 4는 ESS를 투입하지 않는다면 65.4GWh의 출력제약량이 발생하지만 200MW 용량의 ESS가 투입된다면 PSH를 선 투입하였을 시에 BESS 비중이 40%, PSH 비중이 60%일 때 출력제약량은 14.4GWh로 78%까지 완화되었다. 반대로 BESS가 선 투입된다면 BESS 비중이 58%, PSH 비중이 42%일 때, 완화된 출력제약량은 17.0GWh로 최대 74%를 줄일 수 있었다. 400MW 용량의 ESS를 투입한다면 PSH 선 투입 시에 BESS 비중이 57%, PSH 비중이 43%일 때 7.4GWh까지 출력제약을 완화하며 93.9%를 줄일 수 있고, BESS를 선 투입한다면 BESS 비중이 77%이고 PSH 비중이 23%일 때, 출력제약량을 88.7%까지 완화할 수 있다.

Case 5는 121.7GWh 출력제약량이 발생하는 상황에서 250MW 용량의 ESS를

투입하면 PSH를 선 투입 시에 BESS의 비중이 41%이고 PSH의 비중이 59%일 때, 74.1%의 출력제약을 완화하였다. BESS를 선 투입한다면 BESS 비중이 61%이고 PSH 비중이 39%에서 출력제약량을 70.8%까지 완화할 수 있다. 550MW의 ESS를 투입하면 PSH 선 투입 시에 BESS 비중이 64%, PSH 비중이 36%일 때 출력제약량을 16.9GWh까지 완화하였고, 86.1%까지 줄였다. BESS 선 투입 시에는 BESS의 비중이 76%, PSH의 비중이 24%일 경우에 출력제약량을 18.1GWh까지 완화하였고, 85.1%를 줄일 수 있었다.

Case 6은 출력제약량이 259.9GWh 수준으로 발생하고 300MW 용량의 ESS를 투입하면 PSH 선 투입 시에 BESS가 32%이고 PSH는 68%일 때, 출력제약 완화효과가 최대였고 62.0%를 줄였다. BESS 선 투입 시에는 BESS가 46%이고 PSH가 54%일 때, 108.5GWh까지 완화하였고, 58.3%까지 줄였다. 800MW 용량의 ESS를 투입하면 PSH 선 투입 시에 BESS 비중이 67%이고 PSH 비중이 33%일 때 출력제약량을 56.1GWh까지 완화하였고, 78.5%까지 줄일 수 있었다. BESS 선 투입한다면 BESS 비중이 70%이고 PSH 비중이 30%일 때 출력제약을 77.4%까지 줄였다.

Case 7은 516.2GWh의 출력제약량이 발생하는 상황에서 450MW 용량의 ESS를 활용하여 PSH를 선 투입하면 BESS 비중이 34%, PSH 비중이 66%일 때 완화된 출력제약량은 213.8GWh로 58.6%까지 완화할 수 있다. BESS를 선 투입하면 BESS 비중 66%, PSH 비중 34%일 때, 출력제약량은 230.6GWh이며 55.3%까지 완화하였다. 1100MW 용량의 ESS를 활용하여 PSH를 선 투입한다면 BESS 62%, PSH 38%일 때 출력제약량을 69.7%까지 줄일 수 있었고, BESS 투입 시에는 BESS 73%, PSH 27%일 때 68.7%까지 줄일 수 있었다.

단일 ESS와 비교 시에 스토리지 믹스는 출력제약 완화 효과가 더 컸다. 동일 용량에서 스토리지 믹스 시에 약 30% 더 많은 출력제약 완화 효과를 보였다.

Table 7 The maximum difference in curtailment reduction by dispatch order and the BESS and PSH penetration at that time

Case	Case 4		Case 5		Case 6		Case 7	
ESS Capacity [MW]	200	400	250	550	300	800	450	1100
Maximum Difference in Curtailment Reduction [GWh]	4.3	11.5	7.3	21.5	10.6	37.0	20.8	61.4
BESS : PSH Penetration[%]	33:67	30:70	28:72	25:75	33:67	28:72	29:71	26:74

Table 7은 Fig. 21~24에서 운영방안에 따라 출력제약 완화 최대 차이와 그때의 ESS 비중을 나타낸다. PSH 선 투입 시에 모든 Case에서 출력제약량 완화 효과가 컸다. 그리고 운영방안에 따라 가장 큰 차이가 나타난 비중은 BESS가 25~33%이고 PSH가 67~75%일 때이다.

4.3 출력제약률을 3%로 제한하는 ESS 용량 산정

Case 5~7에서 단주기와 장주기 ESS를 투입하여 출력제약률을 3%로 제한할 수 있는 ESS 용량 산정을 진행하였다. 앞서 제시된 BESS와 PSH의 투입순서에 따른 운영방안을 고려하여 산정하였다. BESS 선 투입 시와 PSH 선 투입 시의 출력제약률을 3%로 제한할 수 있는 ESS의 최소 용량을 산정하였고, 투입순서에 따라 산정된 ESS 최소 용량과 비중을 비교하였다.

Table 8는 운영방안에 따라 출력제약률을 3%로 제한할 수 있는 최소 용량 산정 결과를 나타낸다. 앞서 계산된 출력제약률이 3% 이상인 Case 5 ~ 7에서 용량을 산정하였다. 그러나 Case 7은 4시간 지속 시간의 리튬이온 BESS와 8시간 지속 시간의 PSH 용량을 아무리 증대시켜도 다른 Case들에 비해 경부하 시간대에도 출력제약이 많이 발생하여 출력제약률을 3%로 제한하는 용량이

산정되지 못하였다. 이는 장주기 ESS 필요성을 나타낸다.

Table 8 Comparison of ESS capacity calculation by dispatch order

Dispatch order	ESS capacity [MW]	Case 5	Case 6	Case 7
Primary PSH	BESS	3	63	-
	PSH	32	162	-
	Total	35	225	-
Primary BESS	BESS	0	78	-
	PSH	35	167	-
	Total	35	245	-

Case 5는 PSH 선 투입 시에 BESS와 PSH 비중은 1%, 99%로 장주기 PSH가 높은 비중을 차지한다. 하지만 BESS 선 투입 시에는 BESS 비중은 0%, PSH 비중은 100%로 PSH만으로 출력제약률을 3%로 제한하였다. 출력제약률이 3.5%이기 때문에 목표로 설정한 3%까지 완화할 출력제약량이 상대적으로 적어서 작은 ESS 용량이 산정되었다. 또한 ESS 용량이 작기 때문에 PSH 비중이 높게 계산되었다.

Case 6은 PSH 선 투입 시에 BESS 선 투입 시보다 약 8% 적은 용량으로 출력제약률을 3%로 제한할 수 있었다. 리튬이온 BESS와 PSH의 비중이 28%, 72%일 때 출력제약률을 3%로 제한할 수 있는 최소 용량이 산정되었으며, 그 용량은 BESS가 63MW, PSH는 162MW이다. BESS 선 투입 시에는 BESS 비중이 32%, PSH 비중이 68%로 각 78MW, 167MW가 산정되었다. BESS와 PSH의 비중이 약 30%, 70%일 때 출력제약 완화 효과가 가장 크며, 최소 용량이 산정되었다.

V. 결과 고찰

단일 ESS와 비교하여 스토리지 믹스 시에는 출력제약 완화 효과가 최대 30% 증가하였다. 이러한 결과는 스토리지 믹스가 더 낮은 에너지 용량을 수용할 수 있음에도 불구하고 단시간과 장시간의 필요한 유연성을 적절히 제공하기 때문이다. 단일 ESS 투입 시에 PSH의 완화 효과가 컸던 용량에서는 최대 30%까지 높았고, 그때의 BESS 비중은 32~40%, PSH 비중은 60~68%를 보였다. 반대로 BESS의 완화 효과가 컸던 용량에서는 최대 28%까지 출력제약 완화가 컸다. 그때의 BESS 비중이 57~67%이고, PSH 비중은 33~43%이었다. 결국 ESS 용량이 커질수록 BESS 비중이 증가하였다. 이러한 결과는 12시~15시에 집중된 태양광 출력과 PSH의 출력 조절 한계 때문에 BESS의 비중이 늘어난 것으로 확인되었다. 따라서 재생에너지 보급이 많이 될 때 스토리지 믹스가 고려된다면 BESS 비중이 약 35%, PSH 비중이 약 65%일 때 높은 완화 효과를 제공할 것이다. 이 비중은 Case 별로 완화 효과가 큰 BESS와 PSH의 평균 비중이다.

본 논문에서는 리튬이온 BESS와 PSH의 경제성을 직접적으로 비교하며 용량 산정을 진행하지 않았다. 하지만 BESS는 PSH보다 높은 투자 비용이 들고, 두 ESS는 용량이 증가할수록 비용도 증가한다. 출력제약 완화를 위한 스토리지 믹스 시에 ESS 용량이 늘어남에 따라 BESS와 PSH 비중이 유사한 패턴을 보였다. 따라서 산정된 ESS의 최소 용량이 가장 경제적인 선택이라고 보았다. 또한 BESS와 PSH의 선 투입 시만 비교하였지만, 동시 투입의 운영방안도 고려되었다. 하지만 PSH 선 투입하고 BESS의 보조적인 운영이 단위 시간별 출력제약 완화 효과가 크게 나타났다.

VI. 결론

본 논문에서는 출력제약을 완화하기 위한 단주기와 장주기 ESS의 Storage Mix를 소개하였다. 사례 연구는 재생에너지 보급이 증가하고 있는 계통에서 진행되었다. 따라서 25~55%의 재생에너지 점유율을 갖는 Case를 구성하였다. 재생에너지 보급으로 인한 출력제약을 분석하고, 단일 ESS의 완화 한계를 확인하였다. 이에 따라 단주기와 장주기 ESS 투입순서에 따른 운영방안과 용량 비중에 따른 출력제약 완화 효과를 비교하였다. 마지막으로 단주기와 장주기 ESS를 조합하여 출력제약률을 3%로 제한할 수 있는 최소 용량을 산정하였다.

재생에너지 보급이 증가함에 따라 출력제약량과 횟수가 증가하며, 연속적인 출력제약 발생 시간이 길어진 것을 확인하였다. 이러한 계통 상황에서 단일 ESS로는 출력제약 완화에 한계가 있었다. 특히 연속적인 출력제약 발생 시간이 증가하기 때문에 리튬이온 BESS만으로는 출력제약을 완화가 어려웠고, PSH는 출력 조절의 제약으로 인해 일정 용량 이상에서 완화 효과가 감소하였다. 그러나 리튬이온 BESS와 PSH를 조합한다면 동일 용량에서 더 높은 유연성을 제공하였다. 또한 분석된 Case에서 출력제약 완화 효과는 BESS의 비중이 약 35%, PSH의 비중이 약 65%일 때 가장 컸다.

본 논문은 스토리지 믹스 구성 시에 리튬이온 BESS와 PSH만 고려되었다. 하지만 실제 계획 수립 시에는 다양한 ESS의 투자 비용, 수명, 유지보수비용, 에너지 저장 효율, 입지 제약 등이 비교되어 선정되어야 한다. 따라서 향후 연구에서는 여러 ESS 기술들을 바탕으로 고려되어야 한다.

또한 장시간의 출력제약이 발생하여 충전 시간대까지 ESS를 방전하지 못하는 경우에는 익일의 재생에너지 수용을 증대시키기 위해 충전량을 0으로 초기화하였다. 그러나 분석 결과, 이러한 경우는 미비하였고 계통 관성 및 운영 예비력 제공 등을 위해 장시간 에너지를 저장하는 기존의 PSH 운영은 이용률을 낮추어 경제성을 해칠 수 있다. 따라서 추후 출력제약이 많이 발생하는 상황에서는 하루 단위의 펌핑·발전 운영이 고려될 수 있다.

또한 본 연구는 1시간 단위의 분석이 진행되었기 때문에 재생에너지의 변동성

및 BESS와 PSH의 응답속도를 제대로 반영하지 못한 점도 존재한다. 따라서 추후 5분, 15분, 30분과 같은 더 작은 시간 단위의 분석이 필요하다.

재생에너지 보급이 급증하는 상황에서는 안정적인 계통 운영을 위해 ESS가 필요하며, 과도한 용량은 경제성을 해칠 수 있다. 따라서 적절한 ESS를 조합하여 적정 스토리지 믹스를 구성한다면 계통 운영의 경제성 확보와 적절한 유연성을 제공할 수 있다. 향후 연구에서는 경제급전 및 보조 서비스 등을 반영하여 실시간 충·방전이 고려된다면 더욱 적절한 스토리지 믹스를 구성할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. G. Caralis, T. Christakopoulos, S. Karellas, Z. Gao, "Analysis of energy storage systems to exploit wind energy curtailment in Crete," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 103, 2019, pp. 122-139, doi: 10.1016/j.rser.2018.12.017.
2. A.A. Solomon, D. Bogdanov, C. Breyer, "Curtailment-storage-penetration nexus in the energy transition", *Applied Energy*, vol 235, 2019, pp. 1351-1368, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.11.069.
3. A. Soroudi, "Energy storage planning for resiliency enhancement against renewable energy curtailment," *IET International Conference on Resilience of Transmission and Distribution Networks (RTDN 2017)*, Birmingham, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1049/cp.2017.0330.
4. H. Bitaraf & S. Rahman, "Reducing Curtailed Wind Energy Through Energy Storage and Demand Response," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 228-236, Jan. 2018, doi: 10.1109/TSTE.2017.2724546.
5. H.K. Jacobsen & S.T. Schröder, "Curtailment of renewable generation: Economic optimality and incentives," *Energy Policy*, vol. 49, 2012, pp. 663-675, doi: 10.1016/j.enpol.2012.07.004.
6. E. O'Shaughnessy, J.R. Cruce, K. Xu, "Too much of a good thing? Global trends in the curtailment of solar PV," *Solar Energy*, vol. 208, 2020, pp. 1068-1077, doi: 10.1016/j.solener.2020.08.075.
7. A. Soroudi, "Energy storage planning for resiliency enhancement against renewable energy curtailment," *IET International conference on resilience of Transmission and distribution networks*, Birmingham, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1049/cp.2017.0330.

8. K. Furusawa, G. Brunekreeft, T. Hattori, “Constrained connection for distributed generation by DSOs in European countries,” *Bremen Energy Working Papers*, no. 28, 2019, pp. 1-27.
9. L. Bird, D. Lew, M. Milligan, E. M. Carlini, A. Estanqueiro, D. Flynn, E. Gomez-Lazaro, H. Holttinen, N. Menemenlis, A. Orths, P.B. Eriksen, J.C. Smith, L. Soder, P. Sorensen, A. Altiparmakis, Y. Yasuda, J. Miller, “Wind and Solar energy Curtailment : A Review of International Experience,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, 2016, pp. 577-586, doi: 10.1016/j.rser.2016.06.082.
10. C. Zhang, Y.L. Wei, P.F. Cao, M.C. Lin, “Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, part 3, 2018, pp. 3091-3106, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.030.
11. A.A. Solomon, D. Faiman, G. Meron, “Properties and uses of storage for enhancing the grid penetration of very large photovoltaic systems,” *Energy Policy*, vol. 38, issue 9, 2010, pp. 5208-5222, doi: 10.1016/j.enpol.2010.05.006.
12. Z. Zhang, T. Ding, Q. Zhou, Y. Sun, M. Qu, Z. Zeng, Y. Ju, L. Li, K. Wang, F. Chi, “A review of technologies and applications on versatile energy storage systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 148, 2021, pp. 1-31, doi: 10.1016/j.rser.2021.111263.
13. 한전 경영연구원, “KEMRI 전력경제 REVIEW,” no. 11, 2022.
14. 이상균, 여세동, “해수 양수발전 기술 현황 및 미래 전망,” *전기저널*, 2023년 05월 12일.
15. 산업통상자원부, “제5차 신재생에너지 기본계획(2020~2034),” 2020.
16. 산업통상자원부, “제10차 전력수급기본계획(2022~2036),” 2023.
17. Y. Kim, H. Myung, N. Kang, C. Lee, M. Kim, S. Kim, “Operation plan of ESS of increase of acceptance product of renewable energy to power system,” *The Transaction of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 67, no. 11, 2018, pp. 1401-1407.

18. P. Denhom, M. O'Connell, G. Brinkman, J. Jorgenson, "Overgeneration from solar energy in california," *National Renewable Energy Laboratory*, 2015.
19. W. Jeon, J. Kim, S. Lee, "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, 2022, pp. 1-9.
20. P. Denholm, "Energy storage to reduce renewable energy curtailment," *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, USA, 2012, pp. 1-4, doi: 10.1109/PESGM.2012.6345450.
21. S. Kelly, "United Kingdom – Europe, Pumped Storage Hydropower international Forum," September, 2021.
22. GE Renewable Energy, Pumped Hydro Storage in Australia, General Electric Company, November, 2020.
23. Mordr Intelligence, "Australia Energy Storage Systems (ESS) Market Size & Share Analysis – Growth Trends & Forecasts (2023 – 2028)," Globe Newswire, March, 2023.
24. Center for Sustainable Systems, University of Michigan, "U.S. Grid Energy Storage Factsheets." No. CSS15-17, 2022.
25. W. Kim, Y. Lee, S. Kim, H. Jeong, Y. Chun, "Analysis on the contribution of adjustable speed pumped storage generator in power system operation," *Conference of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Jeju, Korea, 2020, pp. 253-254.
26. J. Elio, P. Phelan, R. Villalobos, R. J. Milcarek, "A review of energy storage technologies for demand-side management in industrial facilities," *Journal of Cleaner Production*, vol. 307, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127322.
27. H. Jang, D. Lee, Y. Wi, S. Joo, "Preliminary study on analysis of renewable energy curtailment mitigation using pumped hydro power." *Conference of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Busan, Korea, 2020, pp. 418-419.

28. E. Nobile, G. Sari, A. Schwery, "Variable Speed Hydro Pumped Storage as Flexible Enabler of Intermittent Renewable Penetration," *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Portland, OR, USA, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2018.8586238.
29. B. Kim, K. Kwag, T. Kim, H. Shin, W. Kim, "A study on the estimation of optimal ESS capacity considering resource scheduling and commitment," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 70, no. 3, 2021, pp. 447~456, doi: 10.5370/KIEE.2021.70.3.447.

Analysis of Storage Mix and Capacity Calculation for Reducing Variable Renewable Energy Curtailment

Youngmin Kim

Faculty of Applied Energy System
Electrical Engineering Major
The Graduate School
Jeju National University

Abstract

The world is increasingly interested in climate change, therefore it is reducing the use of fossil fuels and increasing the supply of variable renewable energy (VRE). However, the VRE increases have led to curtailment. The curtailment disrupts the balance of power supply and load and compromises grid stability, reducing profits for VRE developers. The amount and frequency of the curtailment have been increasing with the share of VRE, especially during periods of high solar output. Therefore, the need for energy storage systems (ESS) has been emphasized, and analyses of ESS have been actively pursued to alleviate the curtailment.

However, cost-based economic analyses tend to calculate smaller capacity ESS, which not be adequate for reducing the curtailment. The main ESS resources are lithium-ion battery storage system (BESS) and pumped storage hydro (PSH). From the perspective of reducing the curtailment, lithium-ion BESS has limitations in reducing the curtailment due to its short-duration, and the capacity of PSH can be overestimated.

This paper introduces a storage mix of short-duration and long-duration ESS combinations to reduce curtailment. Lithium-ion BESS as a short-duration ESS and PSH as a long-duration ESS are combined and the operation planning and capacity

calculation based on dispatch order of the storage mix are presented. This paper also analyzes the effect of the penetration of the two types of ESS on reducing curtailment. The effectiveness of the proposed storage mix in reducing curtailment is confirmed by applying it to grid with high penetration of VRE.

The combination of short-duration and long-duration ESS increases grid flexibility and VRE acceptance compared to using a single ESS. In addition, the primary order of long-duration ESS results in greater curtailment reduction with a smaller capacity.