

재생에너지의 전력계통 수용 증대를 위한 ESS 운영방안

Operation Plan of ESS for Increase of Acceptable Product of Renewable Energy to Power System

김 영 환* · 명 호 산** · 강 남 호*** · 이 창 우§ · 김 민 재§ · 김 세 호†

(Yeong-Hwan Kim · Ho-San Myung · Nam-Ho Kang · Chang-Woo Lee · Min-Jae Kim · Se-Ho Kim)

Abstract - This paper proposed a method of energy storage system (ESS) operation to increase acceptable production of renewable energy (RE). We analyzed the rebound effect that does not show a demand increase even if the capacity of the ESS is increased and considered the charging time by analyzing the time when the output limit is most generated. The rebound effect was mitigated by adjusting the discharging time of the ESS, and the effect of the increase of acceptable production of the renewable energy was analyzed by adjusting the charging time.

Key Words : RE (Renewable Energy), Wind power, ESS (Energy Storage System), Rebound effect, Power system, Acceptable production

1. 서 론

우리나라는 신재생에너지의 설비용량을 2030년까지 전체 전력 설비의 20%까지 끌어올리는 로드맵을 제시하였고, 제주지역 역시 “Carbon free Island 2030”의 일환으로 2030년까지 제주지역의 전력을 재생에너지로 100%충당한다는 목표를 세워, 재생에너지의 보급 및 확대를 본격적으로 추진하고 있다.

하지만 몇몇 유럽 국가에서는 재생에너지의 점유율이 이미 20%를 초과하여 운영되고 있으며 신재생전원의 불확실하고 간헐적인 특성으로 인해 야기되는 전력수급조절, 송전망혼잡과 같은 매우 중요한 계통운영상의 문제점들이 제기되고 있다. 이러한 문제 등으로 인해 유럽 몇몇 국가에서 재생발전의 출력제약을 의무화시키고 있다[1].

특히, 제주지역의 경우는 독립된 계통으로 풍력발전량이 증가됨에 따라 이미 중앙급전 발전기와 제주-육지 간 연계선로의 출력 조정만으로는 수요와 공급을 맞추기 힘들어 결국 재생에너지의 출력을 제약시키는 사례가 다수 발생하고 있어 재생발전설비 운영자와 계통운영자로 하여금 운영 및 계획 수립에 상당한 어려움을 주고 있으며, 재생에너지 보급계획 수립에도 걸림돌이 되고 있는 상황이다[2].

현재 계통운영자들은 ESS를 통하여 주파수조정, 전압관리, 예

비력 서비스 등 보조서비스를 제공하고 있다. 그리고 재생에너지와 연계하여 전력부하이동 및 최대부하 감소 등을 통한 재생에너지 출력안정화 방안을 활용하고 있다[3].

본 논문에서는 이러한 재생에너지의 출력 안정화와 더불어 재생에너지의 수용증대를 위한 에너지저장장치(ESS)의 충/방전 운영방안을 제시하였다. ESS의 용량을 증가시키더라도 수요증대효과가 나타나지 않는 리바운드효과에 대하여 분석해 보았고, 출력 제한이 가장 많이 발생할 가능성이 있는 시간에 대해 분석하였다. 그리고 ESS의 방전시간을 조정하여 리바운드 효과를 완화시켰고, 충/방 전시간의 조정을 통하여 재생에너지의 수용증대효과를 분석하였다.

2. 재생에너지의 수용 증대를 위한 ESS 운영 방안

2.1 제주지역 전력계통의 재생에너지 수용능력

계통수요와 발전설비의 최소발전량 P_{min} 한계용량이 재생에너지의 발전량보다 작다면 전력망에서는 재생에너지를 더 이상 받아들일 수 없어 출력을 제약해야만 하는 상황이 발생한다. 제주지역의 전력계통이 재생에너지를 수용할 수 있는 한계용량은 그림 1과 같이 나타난다[4].

$$\text{한계용량} = \text{계통수요} - \text{최소발전량} \quad (1)$$

식 (1)은 재생에너지의 한계용량을 나타낸 식이며, 재생에너지의 발전량이 계통수요와 최소발전량의 차보다 크게 된다면 한계용량을 넘게 되어 출력제약이 발생하게 된다. 이처럼 수요와 공급의 불균형으로 인하여 한국전력거래소(KPX)가 풍력발전단지의

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Jeju National University, Korea.

E-mail: hosk@jejunu.ac.kr

* Dept. of New Energy Market Development, KPX

** Dept. of Wind Power Development, SK D&D

*** Jeju Branch Office, KPX

§ Dept. of Electrical Engineering, Jeju National University, Korea

Received : June 7, 2018; Accepted : October 24, 2018

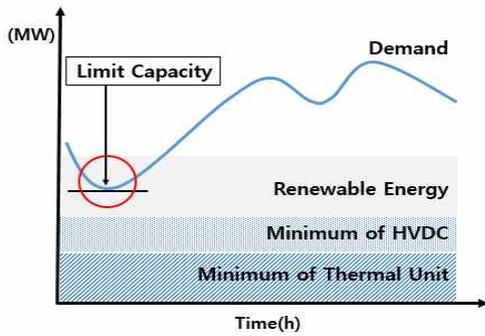


그림 1 재생에너지의 한계용량

Fig. 1 Capacity limit of RE

표 1 풍력발전의 발전량 제약 횟수

Table 1 Count of constraint production of W/P

Year	2015	2016	2017
Count	3	6	18

출력을 제약시킨 횟수를 Table 1에서 나타내었다. 2015년 처음으로 출력제약이 발생하여, 2017년까지 지속적으로 제약의 횟수가 증가하였음을 알 수 있으며, 2017년 풍력발전의 설비용량이 267 MW에서 출력제약이 18회 발생하였다[2].

2.2 부하평준화 및 수익 증대를 위한 ESS 운영

ESS는 경부하 시간에 충전을 하고, 최대부하시간에 방전을 하는 운영을 통하여 전력단가의 차이로 인한 수익을 얻을 수 있다 [5].

현재 제주지역의 풍력 연계형 ESS의 운영 또한 이와 같이 부하평준화 및 수익증대를 위하여 충전시간은 경부하시간인 1시부터 ESS의 용량범위 내에서 순차적으로 균등 충전을 하고 있고, 방전시간의 경우 현재 가중치 적용시간인 최대수요발생 3시간 동안 균등하게 방전하고 있다.

2.2.1. ESS의 충전

ESS의 충전시간대의 충전은 식 (2)와 같이 ESS의 용량을 각 충전시간으로 나누어 각각의 시간에 대한 충전에너지를 산정한다.

$$\frac{\omega B}{t_c} = C \quad (0 \leq \omega \leq 1) \quad (2)$$

여기서 ω 는 충전효율, B는 ESS의 용량, C는 충전용량, t_c 는 충전시간을 의미한다.

2.2.2 ESS의 방전

ESS의 방전은 식 (3)과 같이 에너지저장장치에 저장된 충전에너지에 방전효율 $\alpha (\alpha \leq \omega \leq 1)$ 를 곱하고, 이를 방전시간으로 나누어 각각의 시간에 대한 방전에너지를 산정한다.

$$C_d = \frac{\alpha \times \omega B}{t_d} \quad (\alpha \leq \omega \leq 1) \quad (3)$$

여기서 α 는 방전효율, C_d 는 방전용량, t_d 는 방전시간을 의미한다.

충전시간 동안 $C_c(t)$ 의 합이 $\omega \cdot B$ 와 같아질 때 충전을 종료하며, $C_d(t)$ 의 합이 $\alpha \cdot \omega \cdot B$ 와 같아질 때 방전을 종료한다[6].

2.3 재생에너지 수용증대를 위한 ESS 운영

재생에너지의 수용증대를 위한 ESS용량 및 충/방전시간의 결정을 위해서는 기존의 수익증대를 위한 ESS의 충/방전과 다른 운영 방안이 필요하며, 재생에너지의 수용성을 증대시키기 위한 전략을 그림 2에서 나타내었다. 우선 수요와 공급의 균형을 위하여 제주-육지 간의 연계선로(HVDC)와 중앙급전 발전설비의 증/감발로 균형을 맞추었고, 출력의 제약이 발생할 경우 ESS 충/방전을 실시하였다.

재생에너지의 수용증대를 위한 ESS의 운영전략은 다음과 같다.

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

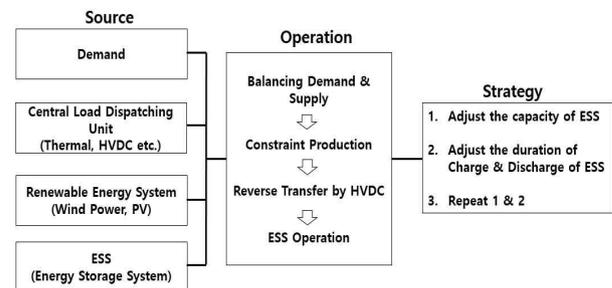


그림 2 재생에너지 발전량 수용 증대 방안

Fig. 2 Method of increasing acceptable production of RE

2.4 리바운드 효과에 의한 수용증대 제한

충전시간동안 재생에너지의 한계용량이 늘어나 재생에너지의 수용 증대가 가능하였지만, 방전시간에는 재생에너지 발전량에 ESS의 방전용량까지 합쳐지면서 또 다른 한계용량에 부딪혀 ESS를 통한 수용 증대 효과를 상쇄하는 경우가 발생하는데, 이러한 경우가 ESS의 충/방전에 의한 재생에너지 한계용량의 리바운드 효과라고 할 수 있다[7].

ESS의 방전시간의 조정을 통하여 피크시간동안 ESS의 출력을 분산시킴으로써 리바운드 효과를 완화시킬 수 있다.

재생에너지의 출력제한이 일어나는 특정일에 대하여 다음과 같은 ESS 충/방전 운영을 통해 리바운드효과를 설명하고자 한다.

충전시간	1시~6시 충전 / 18~21시 방전
ESS 용량	풍력발전설비용량×(%) (5% 단위로 증가)

ESS의 용량을 재생에너지 설치용량의 5%에서 25%까지 증가시켜 분석해본 결과 그림 3의 예와 같이 재생에너지의 25%용량의 ESS보다 20%용량의 ESS에서 더 많은 증대효과가 나타났으며, 그 이상 ESS 용량을 증가시켜도 더 이상 수용증대효과가 나타나지 않았다.

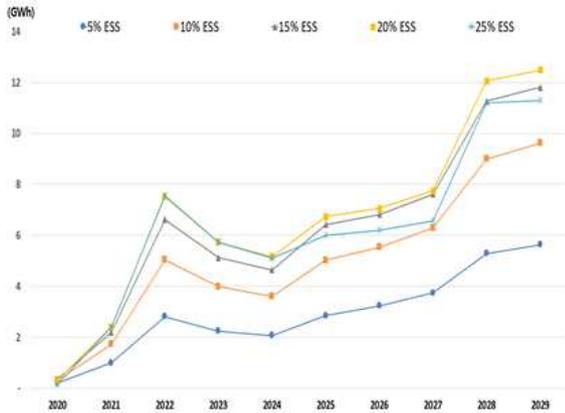


그림 3 리바운드효과가 나타나는 ESS의 용량 분석
Fig. 3 Analysis of ESS capacity with rebound effect

ESS의 방전에 의한 리바운드효과를 더 자세히 알아보기 위하여 재생에너지의 20%와 30%의 ESS용량을 비교한 결과 그림 4에서와 같이 20%의 용량에서는 방전시간동안 (-)의 발전량이 발생하지 않았으나, 30%의 경우에는 방전시간인 18시부터 21시 사이에 (-)발전량이 발생하여 발전량의 제약되는 결과가 나타났다.



그림 4 ESS의 방전에 의한 리바운드효과
Fig. 4 Rebound effect by discharge of ESS

2.5 ESS의 충/방전시간 조정에 의한 재생에너지 수용 증대

2.5.1 충전시간의 조정

재생에너지가 급격히 늘어나는 경우 각 시 구간에서 제약되는 재생에너지의 발전량을 그림 5에서와 같이 예상해 보았다. 풍력발전만을 고려하였을 경우, 풍력발전의 이용률이 높고, 경부하

시간대인 새벽 1시부터 6시까지 ESS의 충전을 고려하는 것이 바람직하나, 10시에서 17시 사이에 풍력발전의 발전량에 태양광의 발전량이 합쳐지면서 더 많은 출력의 제약이 발생하게 된다. 따라서 태양광의 점유율이 높아질 경우 출력 제약이 급격히 증가하는 10시부터 17시사이의 ESS의 충전을 고려해야 할 것으로 판단된다.

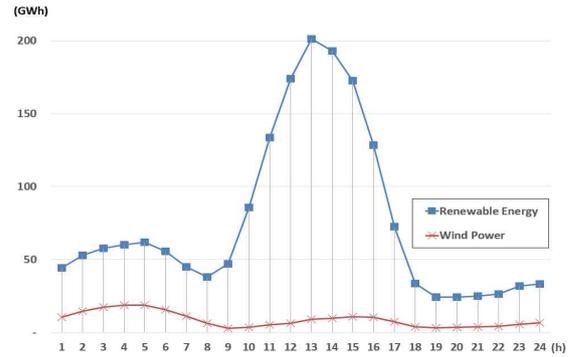


그림 5 시간에 따른 재생에너지의 발전량 분석
Fig. 5 Analysis production of RE by hour

2.5.2 방전시간의 조정

ESS 방전시간을 조정하여 그림 6에서와 같이 방전시간동안의 출력제약을 줄인 결과 방전시간동안 제약되는 발전량이 145 MWh에서 0 MWh로 줄어들며 리바운드효과와 완화가 나타났다.

- 기존 : 3시간(REC 가중치 적용시간)_18시~21시
- 변경 : 6시간(최대부하시간대 이용)_18시~24시

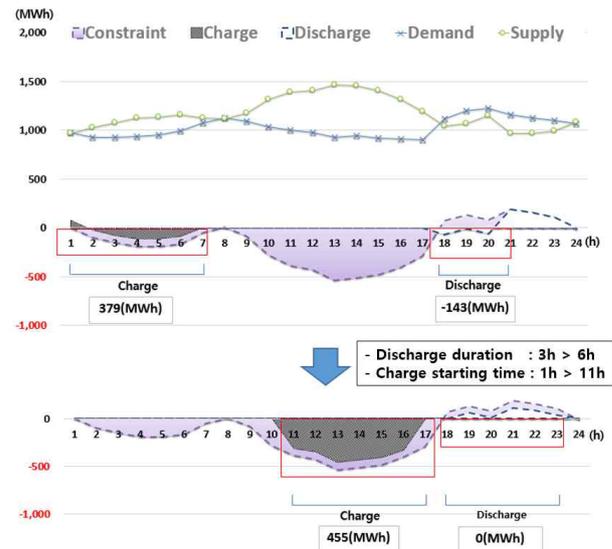


그림 6 ESS 충/방전시간 조정에 의한 재생에너지 수용증대
Fig. 6 Increasing of acceptable product of RE by adjusting of ESS charge/discharge time

3. ESS의 운영에 따른 재생에너지 수용 증대효과 분석

3.1 재생에너지 수용능력 한계로 인한 출력제한 분석

2020년 8760시간 동안의 계통수요와 공급의 불균형으로 인하여 제약되는 재생에너지의 발전량을 분석한 결과를 그림 7에 나타내었다. 수요와 공급의 차이가 (-)가 되는 구간이 출력제약이 발생하는 구간이며, 연간 639회, 46GWh의 재생에너지의 제약이 예상된다.

2020년부터 2029년까지 재생에너지의 발전량과 제주계통의 수용능력 한계로 인하여 제약되는 발전량을 분석한 결과는 표 2와 같다.

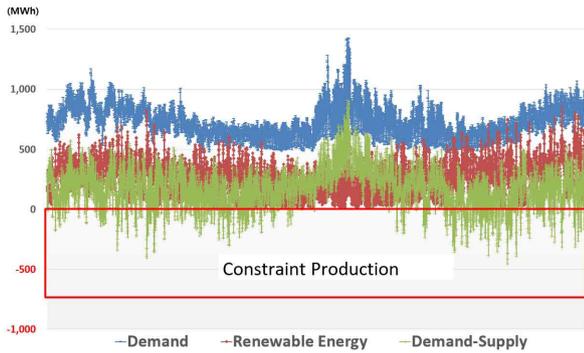


그림 7 2020년 신재생에너지의 제약 발전량 분석
Fig. 7 Analysis of constraint production of RES_2020

표 2 재생에너지의 총 발전량 및 제약량 분석

Table 2 Analysis of Constraint Production of RE

Year	Total Product of RE(GWh)	Constraint Production of RE(GWh)	Rate (%)
2020	1,882	111	6
2021	2,375	222	9
2022	3,047	519	17
2023	3,234	530	16
2024	3,388	510	15
2025	4,057	876	22
2026	4,537	1,140	25
2027	5,017	1,401	28
2028	5,497	1,626	30
2029	5,977	1,820	30

2020년에는 재생에너지 발전량의 약 6%의 발전량 제약이 예상되고, 수요대비 재생에너지 설비용량의 급격한 증가로 인하여 2029년에는 재생에너지의 발전량의 약 30%까지 제약될 것으로 예상된다.

3.2 리바운드효과에 의한 ESS용량 및 재생에너지 수용제한

경부하시간대인 새벽시간을 이용하여 6시간 충전하였고, 최대

부하시간대에 3시간 방전하여, 5% 단위로 ESS의 용량을 증가시켜 본 결과 그림 8에서와 같이 리바운드효과에 의한 수용의 제한이 나타났다. 재생에너지 용량의 15% ESS를 이용할 경우 약 330 MWh의 재생에너지를 최대로 더 수용할 수 있었다. 하지만 30% ESS 이상부터는 리바운드효과로 인하여 수용증대 가능량이 (-)값으로 나타나 오히려 출력이 제약되는 현상이 발생하였다. 이는 ESS에 의한 재생에너지 수용 증대 효과를 볼 수 없음을 의미한다.

리바운드 효과에 의한 ESS 한계설치용량	25%
------------------------	-----

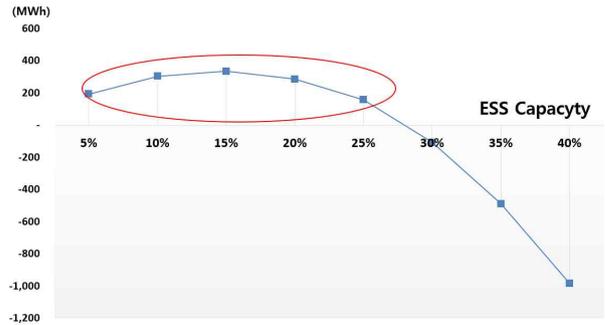


그림 8 리바운드 효과에 의한 수용 증대 제한
Fig. 8 Restriction of increase of acceptable production by rebound effect

3.3 ESS의 방전시간 조정에 따른 재생에너지 수용능력 증대효과 분석

표 3은 ESS의 방전시간에 따른 재생에너지 발전량 수용 증대 효과를 분석한 결과이다.

방전시간에 따른 신재생에너지 최대 수용 증대 가능량을 분석한 결과 방전시간이 6시간일 경우 리바운드효과와 완화로 인하여 수용가능한 발전량이 가장 많이 증가하였고, 방전시간에 따라 최대 수용 증대 효과가 나타나는 ESS의 설치용량은 재생에너지 설치용량의 15%~25%로 나타났다.

3.4 ESS의 충전시간 조정에 따른 재생에너지 수용증대효과 분석

충전시간의 조정에 따른 재생에너지의 수용능력 증대효과를 분석하기 위하여 ESS의 운영을 표 4와 같이 설정한 후 분석해본 결과 그림 9에서와 같이 재생에너지 설비용량의 25%의 ESS에서 가장 많은 재생에너지 증대효과를 볼 수 있었으며, 가능량은 약 17 GWh~60 GWh로 나타났다.

수용증대효과가 가장 많이 나타난 재생에너지설비용량의 25% ESS의 운영에 따른 재생에너지의 수용증대 가능량을 표 5에 나타내었다.

재생에너지의 연간 총 생산량에 대한 수용증대 가능예상량을 비교해 본 결과 총 발전량의 약 1%~1.4%의 발전량이 수용 증대

표 3 ESS의 방전시간에 따른 신재생에너지의 증대가능 발전량 분석

Table 3 Analysis of Enhancement of RE by discharge duration of ESS

Year		2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
3h	Enhancement (GWh)	0.33	2.39	7.56	5.73	5.16	6.73	7.05	7.74	12.05	12.49
	ESS Capacity (%)	15	20	25	20	20	20	20	20	20	20
4h	Enhancement (GWh)	0.24	2.25	7.66	5.11	4.40	6.61	6.50	7.35	11.89	12.15
	ESS Capacity (%)	10	20	25	25	20	20	20	20	20	20
5h	Enhancement (GWh)	0.39	2.27	7.88	5.17	4.27	6.70	6.65	7.75	11.07	17.17
	ESS Capacity (%)	15	20	25	25	15	15	15	15	15	25
6h	Enhancement (GWh)	0.42	2.67	8.52	6.28	5.20	7.70	7.37	8.59	13.17	19.87
	ESS Capacity (%)	15	25	25	25	25	20	20	20	25	25

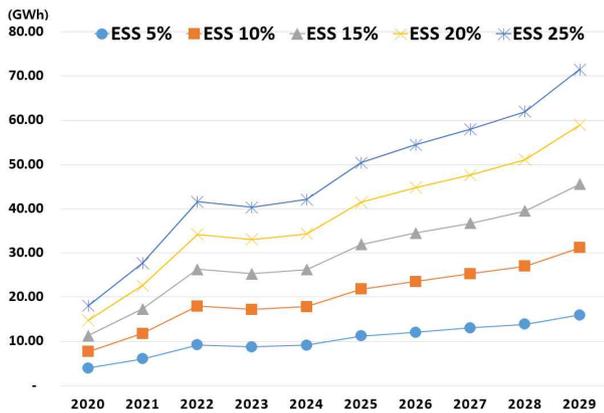


그림 9 ESS의 용량과 충전시간에 따른 재생에너지의 수용 가능 발전량 분석

Fig. 9 Analysis of increased acceptable production of RE by capacity & Charging time of ESS

표 4 재생에너지 수용증대를 위한 ESS 운영

Table 4 Operation of ESS for increasing of acceptable production of RE

ESS용량	5%~25% (수용증대효과가 나타나는 용량)	
방전시간	최대부하 시간대 6시간(리바운드효과 완화)	
충전시간	기존	1시부터 충전(경부하 시간)
	변경	10시 부터 충전(출력제한 발생시간)

가능할 것으로 나타났다.

ESS의 운영에 따른 재생에너지의 수용증대효과를 분석하여 요약하면 다음과 같다.

- (1) 태양광의 점유율이 높아질 경우 출력 제약이 급격히 증가하는 10시부터 17시까지 출력제약이 급증하는 것으로 나타났다. 현재는 풍력발전의 이용률이 높고, 경부하시간대인 새벽 시간대에 ESS의 충전 실시하지만, 향후 태양광 설비가 증가할 경우 10시부터 17시까지의 충전을 고려해야 한다.
- (2) ESS 충/방전 운영으로 수용 증대효과가 나타나는 ESS의 용

표 5 25%의 ESS를 통한 재생에너지 수용 증대 효과

Table 5 Effect of increasing acceptable production of RE through 25% ESS

Year	Total Production (A)(GWh)	Constraint Production (B)(GWh)	Enhancement (C)(GWh)
2020	1,882	111	18.01
2021	2,375	222	27.65
2022	3,047	519	41.58
2023	3,234	530	40.32
2024	3,388	510	42.03
2025	4,057	876	50.39
2026	4,537	1,140	54.45
2027	5,017	1,401	57.96
2028	5,497	1,626	61.96
2029	5,977	1,820	71.45

량은 재생에너지 설치용량의 25%이며, 그 이상은 리바운드 효과에 의해 증대효과가 나타나지 않았다.

- (3) ESS의 운영으로는 6시간 방전 운전에서 재생에너지의 최대 수용 증대 효과가 나타났으며, 한계용량이 많이 발생하는 시간대로 충전을 실시할 경우 재생에너지의 25%의 용량에서 가장 많은 수용 증대 효과가 나타났으며, 총 발전량의 1.0%~1.4% 정도의 재생에너지 발전량을 계통으로 수용 증대시킬 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 발전차액에 의한 수익증대와 부하평준화를 위한 ESS의 충/방전 운영을 할 경우 발생할 수 있는 리바운드 효과에 대하여 분석하였다. 그리고 ESS의 충/방전 시간을 조정하여 리바운드효과와 완화 및 재생에너지의 수용 증대 방안을 제시해 보았다.

현재 제주도의 계획대로 재생에너지가 보급된다면 2020년부터 2029년까지 재생에너지의 발전량은 총 재생에너지의 발전량의 30%까지 제약될 것으로 예상된다. 하지만 ESS 충/방전 시간 조정만으로도 현재 수용 증대가 가능한 재생에너지의 발전량은 연간 18GWh~71.45GWh의 수용증대 효과가 있을 것으로 예상된다. 25%의 용량에서는 오히려 출력제한 향후 대규모 해상풍력발전단지, 태양광발전단지의 증가로 인하여 계통의 불확실성이 더욱 커질 것으로 예상된다. ESS는 부하이동 및 출력안정화를 통하여 예비력으로 사용될 수 있을 것이며, 첨두부하를 담당할 수도 있어 재생에너지를 급전가능한 안정적인 전력 공급원으로 만들 수 있는 솔루션으로 활용될 수 있어 제주지역 역시 대규모의 ESS의 설치 및 적용확대를 모색하고 있다. 하지만 제주계통의 전체적인 ESS의 설치 용량의 설정을 위해서 재생에너지의 설비용량의 25%의 용량에서는 오히려 출력제한이 증가하는 추세로 돌아선다는 점이 고려되어야 할 것이다.

향후 신재생에너지의 설치 증가로 인하여 제약되는 발전량이 많아질 것이다. 더 많은 재생에너지의 수용증대를 위해서는 ESS의 설치와 더불어 전력연계선의 역송 기능강화 및 용량의 증대 또한 필요할 것이며, 수용증대능력 확대를 위한 시설 및 운영 계획 등 조속히 강구되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

“이 논문은 제주대학교 학술연구지원사업에 의하여 연구되었음.”

References

- [1] L. Varelli, “Challenge in load balance due to renewable energy sources penetration: The possible role of energy storage technologies relative to the Italian case”, *Energy* 93, pp. 393-405, 2015
- [2] H.S. Myung, H.C. Kim, N.H. Kang, Y.H. Kim, S.H. Kim, “Analysis of the Load Contribution of Wind Power and Photovoltaic Power to Power System in Jeju”, *KSES*, Vol. 38 pp. 13-24, 02.2018
- [3] “Electric energy technology option”, *EPRI*, Palo Alto, CA, 12.2010
- [4] Y.H. Kim, S.H. Kim, “Increasing Effect Analysis of the Wind Power Limit Using Energy Storage System in Jeju-Korea”, *KSES*, Vol. 34, pp. 81-90, 01.2014.
- [5] Yasser Moustfa Atwa, E.F. El0 Saadany, “Optimall Allocation of ESS in Distribution Systems With a High Penetration of Wind Energy”, *IEEE*, Vol. 25, No. 4, 2010

- [6] Davide Andrea, “Batory Management Systems for Large Lithium-ion Battery Packs”, *ARTECH HOUSE*, pp. 18-19.
- [7] Hamideh Bitaraf, “Reducing Curtailed wind Energy Through Energy Storage and Demand Response”, *IEEE*, Vol. 9, pp. 228-236, Jan. 2018

저 자 소 개



김 영 환 (Yeong-Hwan Kim)

1989년 인하대학교 전자계산학과 졸업. 2006년 제주대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010 동 대학원 전기공학과 수료(박사). 현재 한국전력거래소 신시장개발처 기후신재생전략팀 팀장으로 근무 중.
E-mail: yhwan1129@kpx.or.kr



명 호 산 (Ho-San Myung)

2010년 제주대학교 전기공학과 졸업. 2013년 동 대학원 풍력특성화협동과정 졸업(석사). 2018년 동 대학원 전기공학과 수료(박사). 현재 에스케이디앤디 풍력사업단 O&M part 대리리 근무 중.
E-mail: hsmyoung@sk.com



강 남 호 (Nam-Ho Kang)

2010년 제주대학교 전기공학과 졸업. 현재 한국전력거래소 제주지사 관제센터 대리리 근무 중.
E-mail: k84@kpx.or.kr



이 창 우 (Chang-Woo Lee)

2018년 제주대학교 전기공학과 졸업. 2018년~현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정 중.
E-mail: leecw@jejunu.ac.kr



김민재 (Min-Jae Kim)

2018년 제주대학교 전기공학과 졸업. 2018년~현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정 중.
E-mail: kimm@jejunu.ac.kr



김세호 (Se-Ho Kim)

1983년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1985년 동대학원 전기공학원 졸업(석사). 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993년~현재 제주대학교 전기공학과 교수로 재직 중.
E-mail: hosk@jejunu.ac.kr