



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

碩士學位論文

에너지 저장장치에 의한 제주지역  
풍력발전 한계용량 효과 분석

濟州大學校 大學院

風力特性化協同科程

明 昊 珊

2013 年 02 月

# 에너지저장장치에 의한 제주지역 풍력발전 한계용량 효과 분석

指導教授 金 世 鎬

明 昊 珊

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2013 年 02 月

明昊珊의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ (印)

委 員 \_\_\_\_\_ (印)

委 員 \_\_\_\_\_ (印)

濟州大學校 大學院

2013 年 02 月

# Analysis on Effect of the Operational Limit of Wind Power in Jeju by the Large Scale ESS

Ho-San Myung  
(Supervised by professor Se-Ho Kim)

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

Multidisciplinary Graduate School Program for Wind Energy  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2013. 02.

# 목 차

그림 목 차 .....	iv
표 목 차 .....	v
SUMMARY .....	vi
I. 서론 .....	1
II. 제주지역 풍력발전 한계용량 산정 및 에너지저장장치 .....	3
2.1 제주지역 계통현황 .....	3
2.2 제주지역 풍력발전 한계용량 검토 .....	5
1) 제주지역 풍력발전 이용률 분석 .....	6
2) 제주계통 풍력발전 운전한계용량 산정방안 .....	7
3) 제주계통 풍력발전 운전한계용량 산정 .....	8
2.3 대용량 에너지저장장치 .....	9
1) 에너지저장장치의 종류 및 분류 .....	9
2) 에너지저장장치의 운용 및 활용 .....	11
3) 에너지저장장치를 통한 한계용량 증대방안 .....	12
III. 대용량 에너지저장장치에 의한 풍력발전 한계용량 효과 분석 .....	14
3.1 한계용량 증대를 위한 에너지저장장치의 운용 .....	14
1) 풍력발전 출력제한량 분석 .....	14
(1) HVDC운전조건 설정 .....	14
(2) 풍력발전의 이용률이 23.4%일 경우 .....	15
(3) 풍력발전의 이용률이 30%일 경우 .....	17
2) 운전한계용량 증대를 위한 배터리의 운용 .....	20
3.2 대용량 에너지저장장치에 의한 한계용량 효과분석 .....	22
1) 에너지저장장치의 운용 검토 .....	22

2) 한계용량증대효과 검토 .....	24
3) 출력제한 패턴 별 에너지저장장치 운용 검토 .....	24
(1) 24시간동안의 에너지저장장치 운용 .....	25
(2) 48시간동안의 에너지저장장치 운용 .....	25
4) 출력제한 감소량 검토 .....	28
(1) 에너지저장장치 용량 780MWh(풍력발전 설비용량의 10%) .....	29
(2) 에너지저장장치 용량 1560MWh(풍력발전 설비용량의 20%) .....	30
(3) 에너지저장장치 용량 2340MWh(풍력발전 설비용량의 30%) .....	31
5) 결과 및 고찰 .....	32
<b>IV. 결론 .....</b>	<b>35</b>
<b>참 고 문 헌 .....</b>	<b>37</b>

## 그림 목 차

그림 1 제주도 지역별 발전설비 종류 및 용량 .....	3
그림 2 최소발전량 기준 풍력한계용량 산정 개념도 .....	8
그림 3 에너지 효율과 기대수명에 따른 에너지 저장장치 기술의 분포 .....	10
그림 4 전력저장장치를 이용한 한계용량 증대방안(저장 전) .....	13
그림 5 전력저장장치를 이용한 한계용량 증대방안(저장 후) .....	13
그림 6 이용률이 23.4%경우 HVDC#3 설치 전/후 제한되는 풍력발전량 비교 ...	16
그림 7 이용률이 30%경우 HVDC#3 설치 전/후 제한되는 풍력발전량 비교 .....	18
그림 8 이용률이 23.4%, 설비용량이 1300MW일 경우 제한되는 풍력발전량 .....	18
그림 9 이용률이 23.4%, 설비용량이 2000MW일 경우 제한되는 풍력발전량 .....	19
그림 10 이용률이 30%, 설비용량이 1300MW일 경우 제한되는 풍력발전량 .....	19
그림 11 이용률이 30%, 설비용량이 2000MW일 경우 제한되는 풍력발전량 .....	20
그림 12 한계용량 증대를 고려한 에너지저장장치 운용 flow chart .....	23
그림 13 에너지저장장치에 의한 한계용량 증대효과 .....	24
그림 14 전력수요예측을 통한 에너지저장장치의 운용 .....	25
그림 15 48시간동안의 에너지저장장치의 운용 .....	26
그림 16 48시간동안의 에너지저장장치의 운용 (저장장치용량증가) .....	26
그림 17 HVDC 역송 가능량 침범횟수(에너지저장장치 용량이 풍력발전설비의 10%일 경우) .....	27
그림 18 HVDC 역송 가능량 침범횟수(에너지저장장치 용량이 풍력발전설비의 20%일 경우) .....	28
그림 19 HVDC 역송 가능량 침범횟수(에너지저장장치 용량이 풍력발전설비의 30%일 경우) .....	28
그림 20 780MWh 에너지저장장치 운용 시 풍력발전의 출력 제한량 비교 (HVDC#3 설치 전) .....	29
그림 21 780MWh 에너지저장장치 운용 시 풍력발전의 출력 제한량 비교 (HVDC#3 설치 후) .....	30

그림 22 1560MWh 에너지저장장치 운용 시 풍력발전의 출력 제한량 비교 (HVDC#3 설치 전) .....	30
그림 23 1560MWh 에너지저장장치 운용 시 풍력발전의 출력 제한량 비교 (HVDC#3 설치 후) .....	31
그림 24 2340MWh 에너지저장장치 운용 시 풍력발전의 출력 제한량 비교 (HVDC#3 설치 전) .....	31
그림 25 2340MWh 에너지저장장치 운용 시 풍력발전의 출력 제한량 비교 (HVDC#3 설치 후) .....	32



## 표 목 차

표 1 제주지역의 발전설비 현황 .....	4
표 2 제주지역 기설치 및 설치예정 HVDC용량 .....	4
표 3 제5차 전력수급계획 상의 최대·최저수요 .....	4
표 4 제주지역 풍력발전 현황 .....	5
표 5 제주지역의 풍력발전기 설치 구역별 풍력발전량 및 이용률 예측 .....	6
표 6 제주지역 풍력발전 운전한계용량 산정 .....	9
표 7 에너지저장장치의 기술 및 용도 .....	10
표 8 에너지저장장치 활용방안 .....	12
표 9 HVDC 운전조건 설정 .....	15
표 10 이용률이 23.4%경우 HVDC#3 설치 전/후 제한되는 풍력발전량 비교 .....	16
표 11 이용률이 30%경우 HVDC#3 설치 전/후 제한되는 풍력발전량 비교 .....	17
표 12 에너지저장장치에 의한 한계용량 증대량 .....	24
표 13 HVDC#3 미운영시 에너지저장장치의 용량에 따른 출력제한 감소량 비교 .....	33
표 14 HVDC#3 운영 시 에너지저장장치의 용량에 따른 출력제한 감소량 비교 .....	33

# SUMMARY

The wind power is the fastest-growing renewable energy source and the penetration of wind power into power system network has been increasing in the recent years. As a result of this, there have been serious concerns over reliable and satisfactory operation of the power system.

Especially, variability of wind energy can negatively affect to power system network and increasing penetration of wind power causes penetration limit of wind power.

Energy Storage System installed within a power system can be provided by a range of technologies and can add value in a variety of ways. Income may be derived from an ESS by charging it when the local electricity value is low and discharging it when the value is high. If, at some times, the grid at the point of connection of the embedded renewable generation cannot absorb the entire output of the generator.

This paper presents the analysis of penetration limit of wind power and the analysis of effect on increasing maximum penetration limit of wind power by using large scale ESS when large scale wind farm is installed in Jeju.

# I. 서 론

전 세계적인 환경에 대한 관심은 전력산업에도 큰 변화를 가져왔다. 환경 친화적인 신재생에너지원의 계통 연계를 위해 많은 연구, 투자가 진행되어 왔으며 유럽 등지에는 이미 국가 전력 수요의 상당부분을 풍력발전이 감당하고 있다.

최근 글로벌 경제 위기는 풍력업계의 불황으로 이어져 잠시 주춤하기도 하였지만 최근 해상풍력시장의 성장을 기반으로 풍력단지가 대용량 대규모화 되어감에 따라 다시금 풍력발전의 급격한 성장이 기대되고 있다. 우리나라 역시 서해안 약 2GW 해상풍력발전단지 건설이 계획되는 등 풍력발전의 성장세는 지속될 예정이다.

그러나 풍력발전은 기술특성 및 생산된 전력의 수송 배분을 그리고 양질의 전력공급을 위해서는 기존의 전력계통에 안정적으로 연계 운전되어야 한다. 특히 제주지역과 같이 고립된 지역에서는 지역 내 발전설비와 연결된 전력계통 및 육지부와 연결된 HVDC 전력계통에서 수용 가능한 용량 검토가 매우 중요하므로 풍력발전 확대에 따른 전력계통상의 운전한계용량을 사전 검토하여 최적의 풍력발전설비 보급목표를 설정할 필요가 있다.

제주와 유사한 소규모 계통에서의 풍력발전 점유율 제한 규정을 살펴보면 그리스의 크레타 섬의 경우 제주와 계통규모가 유사하며 Public Power Corporation(PCC)에서 풍력발전의 점유 용량을 순시부하의 30%로 제한하고 있으며, 아일랜드 역시 순시 부하의 30%를 넘지 않도록 풍력발전량을 제한하고 있다. 하지만 제주도는 좋은 풍황 조건으로 이를 연구하고 개발하려는 각종 기관 및 연구단체 그리고 풍력사업자로 하여금 많은 관심을 받고 있고, 제주도 역시 풍력발전사업허가 및 지구지정 등에 관한 조례를 제정하여 대규모의 풍력발전단지 육성을 위한 육·해상풍력발전지구지정을 검토하고 있으며, 풍력산업을 미래 제주의 신 성장 동력 산업으로 발전시켜 나가기 위하여 약 2GW의 해상풍력발전단지를 추가하여 “카본프리 아일랜드 제주”를 조성하려 하고 있다. 이러한 점은 위의 크레타 섬 혹은 아일랜드의 사례의 점유율과 비교하여 볼 때 과도한 측면이 있다. 풍력발전의 점유율 증가는 제주지역의 전력계통의 안전도 및 안정도 측면에 있어서도 악영향

을 줄 것이고, 이에 따라 풍력발전량의 제한은 반드시 필요할 것이다. 하지만 이런 식의 제한은 해당지역의 좋은 풍황 사용 제한 및 발전사업자의 사업기회 또한 제한하게 될 것이다[1][2].

전력계통이 정적 안정도 측면에서 취약할 때, 계통에 분포되어 있는 Energy Storage System을 통해 계통에 유효 및 무효전력을 공급하는 것은 안정도 수준 유지에 아주 효과적일 수 있다. 배터리 전력저장 시스템은 기존의 FACTS (Flexible AC Transmission Systems) 설비 중 STATCOM (Static Synchronous Compensator) 기능에 유효전력의 양방향 입출력이 가능한 형태의 설비라 할 수 있다. 따라서 배터리 전력저장 시스템이 설치된 위치에 따라 정적인 전압안정도 여유를 확보하는 데 있어 기존의 순동 무효전력 공급 장치보다 더 효과적일 수 있다. 또한 심각한 계통 상태에서 시스템의 운전점 확보를 위해 적용되는 마지막 제어 수단에 해당하는 부하 차단(load shedding)의 적용이 필요할 때 SPS (system protection schemes)의 하나의 제어 수단으로써 어느 정도 기간 동안 효과적인 위치에 있는 ESS의 출력을 증가함으로써 부하 차단량을 최소화할 수 있다. 다음으로 건전상태 운영 시 계통 운전 효율의 척도라 할 수 있는 손실 최소화의 목적을 위해 배터리전력저장 시스템에 저장된 에너지와 무효전력 출력이 활용될 수 있다. 또한 그 외의 정적인 안정도, 장주기 충/방전 및 전력시장 측면에서의 다양한 목적을 위한 대용량 배터리 전력저장 시스템 활용이 가능하다[3].

본 논문에서는 제주지역의 수요예측, 풍력예측 그리고 발전배분을 통하여 제주지역의 풍력발전 운전한계용량을 검토해보았고, 풍력발전의 운전한계용량 증대량 검토를 위하여 HVDC의 운영 시와 미 운영 시 출력 제한량을 비교해 보았고, 대용량 저장장치를 이용하여 풍력발전의 한계용량이 얼마만큼 증대할 수 있는지를 분석하여 보았다.

## II. 제주지역 풍력발전 한계용량 산정 및 에너지저장장치

### 2.1 제주지역 계통현황

그림 1은 제주지역 내 발전 설비 종류 및 용량을 나타내고 있으며 제주지역 총 전력공급용량은 2011년 기준 833MW로 내연기관발전기 2기, 기력발전기 4기, Gas Turbine 발전기 1기, 복합발전기 1기 및 해저연계선 2선으로 구성된다[1].

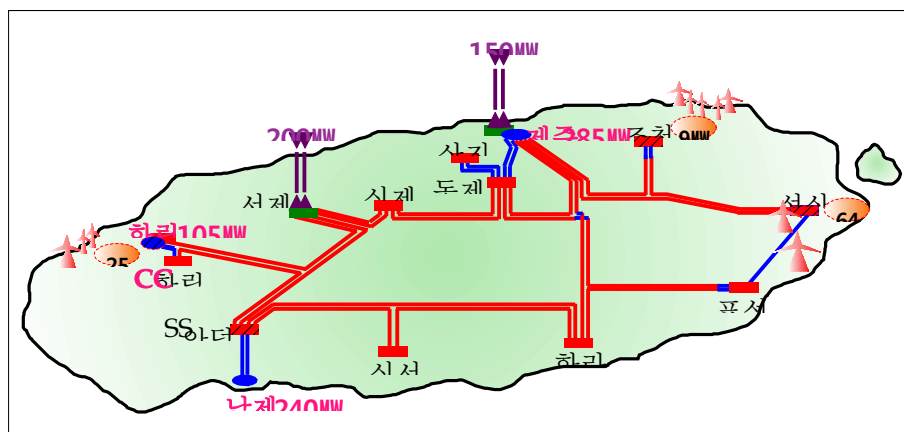


그림 1 제주도 지역별 발전설비 종류 및 용량

표 1은 제주지역의 발전설비를 나타내고 있으며, 표 2는 제주지역에 기설치 및 설치 예정인 HVDC의 용량을 나타낸 것이다. 최근 발생하고 있는 전력부족 사태에 대비하여 2013년 폐지예정이었던 제주G/T#3가 2018년 1월까지로 폐지가 연기되었으며, 동기조상기로 쓰였던 제주 G/T#1,#2 또한 발전기로의 전환이 검토되고 있다[1].

표 1 제주지역의 발전설비 현황

설비명		설비용량 (MW)	최소발전력 (MW)	증감발률 (MW/min)	비고
제주내연	#1	40	28	1.2	
	#2	40	27	1.2	
남제주내연	#1	20	7	0.3	'12.02 폐지
	#2	20	7	0.3	'12.02 폐지
남제주화력	#3	100	56	5	
	#4	100	55	5	
제주화력	#2	75	46	1	
	#3	75	46	1	
한림C/C		105	41	8.7	
제주G/T#3		55	16	5	'18.01 폐지예정
합계		630	307	28.7	-

표 2 제주지역 기설치 및 설치예정 HVDC용량

설비명		설비용량 (MW)	비고
HVDC	#1	300 (150MW×2pole)	기설 운전 중
	#2	400 (200MW×2pole)	'12. 6준공
	#3	200 (200MW×1pole)	'16.06 준공예정

표 3은 2013년부터 2024년까지의 제주지역 계통수요를 나타낸 것으로 최대수요는 제5차 전력수급계획의 전력수요예측을 참조하였으며, 최저수요는 2010년 제주지역의 실제 전력수요 데이터와 5차 전력수급계획 상의 최대 목표 수요 증가율을 반영하여 매해 약4%씩 증가하는 것으로 산정하였다.

표 3 제5차 전력수급계획 상의 최대·최저수요

년도	최저수요(MW)		최대수요(MW)			
	목표	증가율	목표	증가율(%)	기준(BAU)	증가율(%)
2013	350	-	675	-	708	-
2014	363	3.70	700	3.70	750	5.93
2015	378	4.00	728	4.00	791	5.47
2016	393	3.98	757	3.98	829	4.80
2017	408	3.83	786	3.83	866	4.36
2018	424	3.94	817	3.94	905	4.50
2019	439	3.79	848	3.79	942	4.09
2020	456	3.66	879	3.66	980	4.03
2021	472	3.64	911	3.64	1,017	3.78
2022	489	3.51	943	3.51	1,054	3.64
2023	506	3.39	975	3.39	1,091	3.51
2024	522	3.28	1,007	3.28	1,126	3.21

표 4는 현재까지 제주지역에 설치된 풍력발전의 설비용량을 나타낸 것으로 현재까지 제주지역의 풍력발전의 설비용량은 약 106MW로 전체 전력설비 대비 그 점유율이 그다지 높지만 향후 제주도는 2019년도 까지 육상 약300MW , 해상 약 1000MW의 풍력발전기 설치를 목표로 하고 있어 풍력발전의 점유율은 상당히 증가할 것으로 예상된다.

이처럼 제주지역에 향후 대규모 해상 풍력발전단지가 건설될 예정이다. 제주해상의 풍부한 바람자원에 의해 생산되는 전력은 제주지역에서만 사용할 것이 아니라 국가적인 에너지자원으로써 제주 - 육지 간 양방향 전력계통 운영방식으로 전환할 필요성이 증대되고 있으며, 이를 위해서는 불안정한 대규모 풍력전원의 안정성 유지 및 제주지역 생산전력을 안정적으로 송출하기 위한 설비 확충이 필요하며, 제주지역 전력수요는 발전설비와 신재생에서 부족한 부분을 HVDC로 수전하고 수요를 초과하는 부분은 육지부로 송출함으로서 발전설비, 신재생, HVDC 가동률을 모두 최적화 상태로 유지함과 동시에 불확실 요인에 의한 전력 부족 사태에 효율적으로 대응 할 수 있을 것이다[1].

표 4 제주지역 풍력발전 현황

단지명	설비용량(MW)
행원풍력	10.55
신창풍력	1.7
월정풍력	1.5
한경풍력	21
성산풍력	20
삼달풍력	33
가시리풍력	15
김녕풍력	1.5
월정풍력	2.0
합계	106.25

## 2.2 제주지역 풍력발전 한계용량 검토

제주지역의 풍력발전의 특성 및 한계용량 산정을 위하여 제주지역의 2010년 풍력발전 출력 데이터를 사용하였다.

### 1) 제주지역 풍력발전 이용률 분석

풍력발전의 이용률은 풍력발전량의 설비용량 대비 발전된 시간만큼의 발전량을 나타낸 것으로 일정 설비용량의 풍력발전기가 얼마만큼 발전량을 출력하는지 발전실적을 알아보는 척도가 되며, 풍력발전의 이용률은 다음과 같이 구할 수 있다[4].

$$\text{이용률} = \frac{\text{풍력발전량}}{\text{설비용량} \times \text{발전시간}} \times 100(\%) \quad (1)$$

제주지역의 2010년 기준 풍력발전의 연간 평균 이용률을 분석하여 살펴본 결과 제주지역 풍력발전의 연간 이용률은 약 23.4%으로 나타나고 있다. 이용률에 영향을 주는 요인은 크게 환경측면과 설비측면이 있다[5]. 따라서 향후 신규 육상풍력발전기의 설치 및 노후 시설 교체와 육상보다 이용률이 좋은 해상풍력 단지의 건설을 통하여 제주지역의 연간 풍력발전 이용률은 훨씬 높아 질 것으로 예상된다.

표 5는 예상발전량과 평균풍속, 예상 이용률을 보여준다. Repower의 5MW 시스템을 이용하였으며, 후류의 영향을 최대한 덜 받게 하기 위하여 주 풍향에 대한 이격거리를 7D×5D (D : 회전자 지름)로 적용하여 분석하였다. 제주지역의 풍속은 전반적으로 8.0 m/s로 높은 풍속을 보이고 있으며, 예상 이용률도 평균적으로 35%이상을 웃돌고 있다. 실제 해상풍력단지를 개발할 경우 더 많은 인자가 고려되어 설계되어 지므로 더 높은 이용률을 기대할 수 있을 것이다[6].

표 5 제주지역의 풍력발전기 설치 구역별 풍력발전량 및 이용률 예측

구역	용량(MW)	기수(대)	연간 발전량(MW/년)	평균풍속(m/s)	예상 이용률(%)
1구역 (북동부)	660	132	2,279,393	8.3	37.3
2구역 (북서부)	650	130	1,966,132	7.9	35.6
3구역 (남서부)	610	122	1,975,983	8.1	36.4
4구역 (남동부)	535	107	1,602,125	7.7	33.4
합계	2,455	491	7,823,633	8.0	35.7



## 2) 제주계통 풍력발전 운전한계용량 산정방안

송전설비 및 부하크기 등 전력계통의 상황과 풍력발전기의 출력특성 및 제어 전략에 따라 풍력발전의 한계용량은 다르게 산정될 것이다.

일반적으로 섬 지역은 육지로 분리되어 있으며 연계선 이외에 부하를 담당하는 발전설비가 작아, 계통운영에 취약하다. 아이러니하게도 풍력사업 입지조건에 탁월한 지역이 대부분 도서지역이나 해안가 등 전력계통 규모가 작거나 계통이 취약한 지역이다[5]. 즉, 풍력발전을 포함하는 계통의 경우 대부분 계통규모가 작거나 취약하다는 것이다. 따라서 계통안정운영을 위한 풍력발전의 한계용량 산정이 필요하며 풍력발전의 계통연계 기준에 대한 자료를 제시해야 할 것이다[7].

풍력발전의 한계용량 산정방법으로는 기존 발전기의 최소발전량 기준 한계용량 산정, 풍력발전기의 출력 증감발률을 고려한 한계용량 산정, 동적 안정도 한계 기준 한계용량 산정이 있으며, 최종적인 풍력한계용량 산정은 위에서 검토된 각각의 한계용량 중에서 최소의 값을 선택하여 얻을 수 있다[8].

제주지역의 한계용량을 산정하기 위한 방법으로는 기존 발전기의 최소발전량 기준 한계용량 산정의 방법을 이용하였으며, 이 방법은 현재 그리스의 많은 섬 계통에 풍력발전기를 다수 설치하면서 실제 적용중인 기준 중 ‘Technical minimum’에 관한 내용이다. 그리스에서는 풍력발전의 건설을 제한하지는 않되 상황에 따라 풍력발전단지의 출력조정 등을 통해 문제를 해결한다. 최근 우리나라에서도 풍력발전기의 계통연계기준을 제시함으로써 신규로 설치되는 풍력발전기에 한하여 출력조정 등의 기준을 준수토록 하고 있다. 이에 풍력발전 사업자는 계통 운영자의 임의의 유효전력 급전시시에 따라 풍력발전 단지의 유효전력 출력을 조정할 수 있어야 한다. 하지만 최근 신규 건설되는 풍력발전에 비해 기존 발전설비용량이 훨씬 많기 때문에 그리스에서와 같이 출력조정을 통한 풍력설비의 증설에는 무리가 있을 것으로 판단된다. 이에 따라 기존 발전기의 최소발전량을 고려한 풍력발전의 한계용량 산정에 대해 검토가 필요하다. 그림 2는 최소발전량을 고려할 때 풍력발전 한계용량 산정에 대한 개념도를 나타낸 것이다. 연계선 및 기존 발전기의 최소발전량은 계통에서 유지되는 최소한의 발전력으로 더 이상 줄일 수 없는 양이다. 따라서 계통에서 최저부하와 풍력발전의 최대출력이 겹치는 순간이 오면 계통부하보다 공급되는 발전력이 많게 되는 상황이 발생할

수 있다. 이런 상황을 방지하기 위해 최소발전량을 기준으로 풍력발전의 한계용량을 산정한다[7].

$$\sum P_{\max, wind} \leq \sum P_{\min, load} - \sum P_{\min, sys} \quad (2)$$

여기서,  $\sum P_{\max, wind}$  : 풍력발전의 한계용량

$\sum P_{\min, load}$  : 최저수요

$\sum P_{\min, sys}$  : 최저 발전량

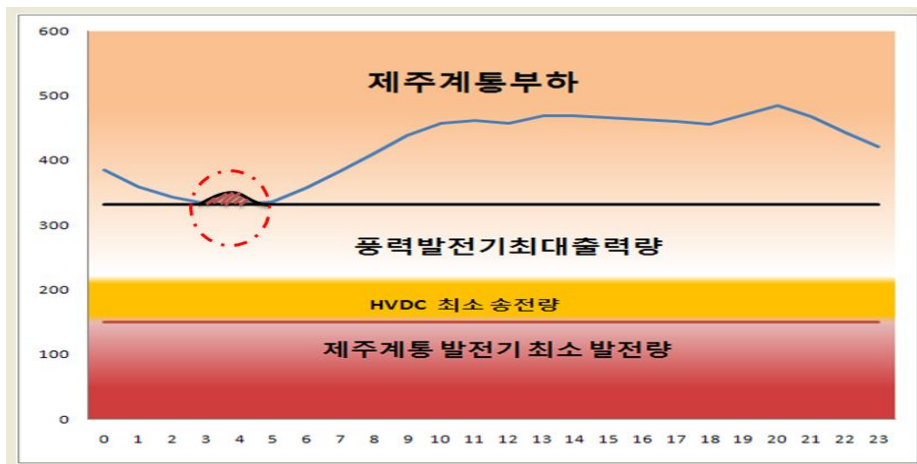


그림 2 최소발전량 기준 풍력한계용량 산정 개념도

### 3) 제주계통 풍력발전 운전한계용량 산정

풍력발전 한계용량 산정방법에서 언급한바와 같이 연계선 및 기존 발전기의 최소발전량은 계통에서 유지되는 최소한의 발전력으로 더 이상 줄일 수 없는 양이다. 따라서 계통에서 최저부하와 풍력발전의 최대출력이 겹치는 순간이 오면 계통부하보다 공급되는 발전력이 많게 되는 상황이 발생할 수 있다. 이런 상황을 방지하기 위해 최소발전량을 기준으로 풍력발전의 한계용량을 산정하며, 최소부하제약을 만족하는 풍력발전 최대용량의 산정식은 다음과 같다.

$$P_{\text{풍력}} \leq P_{\text{최저부하}} - (P_{\text{발전기 최소출력}} + P_{\text{HVDC최소(1)}}) + P_{\text{HVDC최대(2,3)}} \quad (6)$$

표 6은 표 1에서의 제주지역 발전기의 증감발률과 HVDC의 완충용량 그리고 풍력발전의 10분 변동률 등을 고려하여 운전한계용량을 산정해 본 결과이며, 최소발전조건은 기력 3대운영, HVDC #2,#3 양방향 송전가능최저부하 증가율 0.0364 제5차 전력수급계획 최대수요증가율 반영하여 산정하였다[1].

표 6 제주지역 풍력발전 운전한계용량 산정

산정기준		연도								
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
발전기 최저출력 제약		355	368	381	396	411	626	642	658	674
예비력 증감발률 제약	최대부하	533	558	583	611	640	869	900	931	962
	최저부하	355	368	381	396	411	626	642	658	674

### 2.3 대응량 에너지저장장치

#### 1) 에너지저장장치의 종류 및 분류

에너지저장장치의 종류를 그림 3에 표시하였으며, 보이는 바와 같이 다양한 에너지 저장장치 중에는 전력망의 요구사항을 만족시킬 수 있는 장치들은 저장밀도가 높고 장시간의 방전이 가능한 양수발전, CAES, Redox flow, NaS, 개량형 Lead-Acid, Lithium-ion배터리 등이 있다[3].

표 7은 에너지저장장치 별 저장지속 시간 및 용도를 나타낸 것이다[9][10].

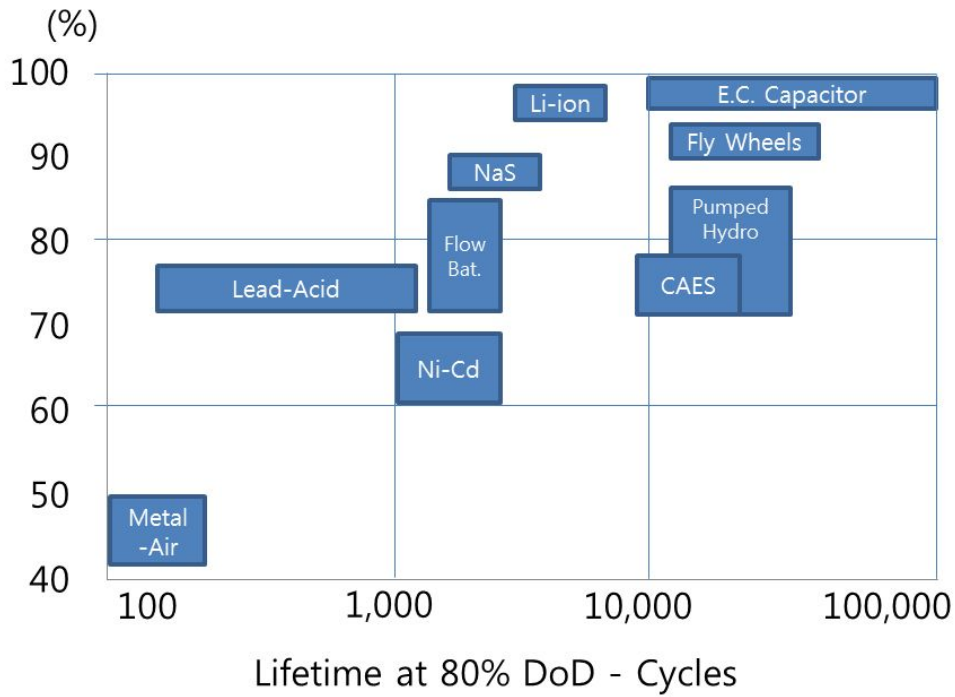


그림 3 에너지 효율과 기대수명에 따른 에너지저장장치 기술의 분포

표 7 에너지저장장치의 기술 및 용도

Full Power Duration of Storage	Application of Storage and Possible Replacement of Conventional Electricity System Controls.	Biomass	Hydrogen, Electrolysis + Fuel Cell	Large Hydro	Compressed Air Energy Storage (CAES)	Heat or Cold Store + Heat Pump	Pumped Hydro	Redox Flow Cells	New and Old battery Technologies	Flywheel	SMES	Supercapacitor	Conventional Capacitor or inductor
		4 Months	Annual smoothing of load, PV, wind and small hydro.	√	√	√							
3 Weeks	Smoothing weather effects: load, PV, wind, small hydro.	√	√	√									
3 Days	Weekly smoothing of loads and most weather variation	√	√	√	√	√	√	√					
8 Hours	Daily load cycle, PV, wind, Transmission line repair.	√	√	√	√	√	√	√	√				
2 Hours	Peak load lopping, standing reserve, wind power smoothing. Minimisation of NETA of similar trading Penalties.	√	√	√	√	√	√	√	√				
20 Minutes	Spinning reserve, wind power smoothing, clouds on PV		√	√	√	√	√	√	√	√			
3Minute	Spinning reserve, wind power smoothing of gusts.		√				√	√	√	√			
20 Seconds	Line of local faults. Voltage and frequency control. Governor Controlled generation.								√	√	√	√	√

## 2) 에너지저장장치의 운용 및 활용

대용량 에너지 저장장치는 세 가지의 주요 운용 카테고리 분류할 수 있다.

- 전력품질유지 : 이러한 용도로 사용되는 에너지 저장장치 내에 저장된 에너지는 전송되는 전력의 품질을 보장하기 위하여 오로지 수 초 혹은 그 이하의 시간 동안만 사용된다,
- 완충 혹은 비상 시 충전 : 이러한 용도로 사용되는 에너지 저장장치에 저장된 에너지는 하나의 발전원에서 다른 발전 원으로 전환 시 지속적인 서비스(무정전)를 위하여 수초에서 수분동안 사용될 수 있다.
- 계통 관리 : 이러한 용도 내의 저장 시스템은 발전과 소비사이의 비동조화를 위해 사용된다. 전형적인 용도는 off- peak 시간동안 에너지 저장장치에 저장을 하고, peak 시간 동안 에너지 저장장치에 충전된 에너지를 방전하여 사용하는 부하평준화의 용도이다.

특히 전력시스템에서의 에너지저장장치의 적용성은 방전 주기에 따라 장 주기 및 단 주기적인 역할로 구분될 수 있다. 에너지저장장치의 장기적인 운영은 주로 발전과 에너지 사용의 이동이 주된 목적을 갖고 에너지원으로 활용하는 것으로 이를 위해 일반적으로 1일에 한 주기의 긴 충전기간과 방전기간을 갖도록 수행된다. 단기적인 운영은 에너지 저장장치를 전력망에서의 전원으로써 응용하는 것으로 수초에서 수분의 기간으로 비교적 짧은 충/방전 기간을 갖도록 운영하며 하루에 많은 충/방전 주기를 갖는다.

단기적인 운영 전략에 해당하는 주파수 및 전압조절, 전력 품질개선, 신재생에너지원 출력변동성 개선 뿐 만 아니라 첨두부하 완화와 부하 평준화를 위한 장기적인 응용의 에너지 저장장치의 성능 기준은 각 시스템의 요구에 따라 달라진다. 일반적으로 가장 중요한 요건은 저렴한 비용과 유연한 디자인, 입증된 배터리기술 그리고 안정적인 성능을 필요로 한다. 표 8은 발전 및 송배전망과 소비자에 이르기까지 전 계통에 대한 에너지저장장치의 다양한 응용방안을 나타낸다 [3][9].

표 8 에너지저장장치 활용방안

활용구분	활용방안		활용내용
발전	1	에너지원	발전원으로서 부가서비스시장과 전력도매시장에 입찰
	2	신재생에너지원의 특성개선	발전 에너지원으로 분산전원망에 부가서비스를 제공 및 출력변동특성 개선지원
송배전	3	고정형태의 송전 망운영개선 장치	송전망 역률개선 및 송전망 확충 계획의 지원
	4	이동형태의 송전 망운영 개선 장치	송배전망 운영 개선을 위한 이동형 에너지저장 장치
	5	분산형태의 에너지 저장장치	증가하는 부하에 대한 공급 신뢰성 향상 및 송 배전망지원과 보조서비스를 위한 중앙관리 모듈 시스템
	6	에너지 공급 업체의 운영 개선	거주부지용 저장장치는 효율적인 배전망을 위해 집계하고 중심에서 관리
소비자	7	상업용/산업용 전력 품질/정전관리	상/산업용 소비자의 전력품질 및 정전관리를 위한 에너지저장장치
	8	상업용/산업용 에너지관리	상/산업용 소비자의 에너지관리를 위한 에너지 저장장치(피크부하관리)
	9	가정용 에너지관리	전력요금을 줄이기 위한 저장장치
	10	가정용 에너지 백업장치	가정용/사무실용 백업전원장치

### 3) 에너지저장장치를 통한 한계용량 증대방안

제주지역 풍력발전 수용한계에 절대적인 영향을 미치는 요소는 최저수요수준과 연계선 용통전력으로 나타난다. 따라서 한계용량을 증대하기 위해서는 수요수준을 높이거나 제주에서 육지로의 역송이 가능한 추가적인 연계선의 건설이 필요하다 할 수 있겠다.

그림 4과 그림 5은 전력저장장치를 이용하여 한계용량을 증대하는 방안을 대략적으로 나타낸 것으로 최저수요 시 풍력에너지를 양수발전 혹은 G/T의 압축 공기 등 다른 형태의 에너지로 저장할 수도 있지만 이러한 시설이 없는 제주의 경우 최저수요 시 풍력을 전력저장장치에 충전시킴으로써 전력수요를 증대시켜 한계용량의 증대가 가능하다[1].

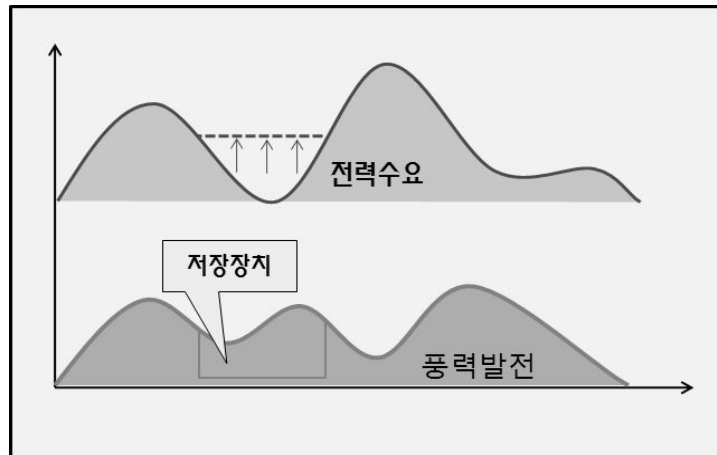


그림 4 전력저장장치를 이용한 한계용량 증대방안  
(저장 전)

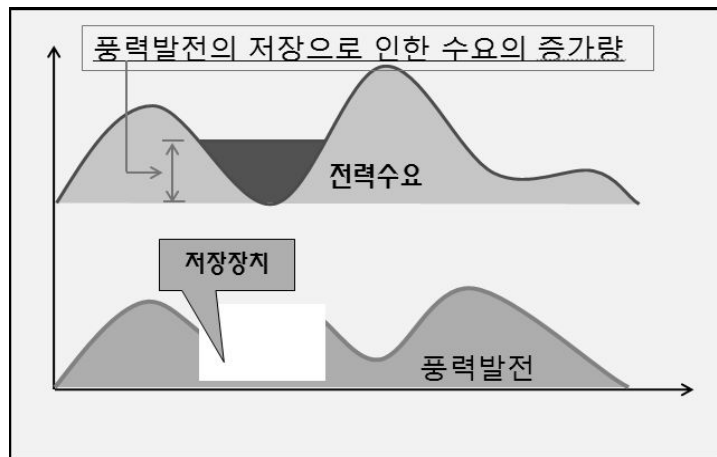


그림 5 전력저장장치를 이용한 한계용량 증대방안  
(저장 후)

### Ⅲ. 대용량 에너지저장장치에 의한 풍력발전 한계용량 효과 분석

#### 3.1 한계용량 증대를 위한 에너지저장장치의 운용

제주지역 풍력발전 수용한계에 절대적인 영향을 미치는 요소는 최저수요 수준과 연계선이라고 할 수 있다. 그러므로 제주지역 풍력발전 운전한계용량의 증대를 위해서는 최저수요 수준의 향상 풍력의 간헐성을 완충하는 방법이 있다. 다시 말해 급전이 가능한 자원으로 만드는 것이다. 제주지역은 독립된 지역으로 그 수요가 한정되어 있어 일정량 이상의 최저 수요 수준 향상은 어려운 실정이다. 하지만 최근 설치된 역송 가능한 HVDC의 설치를 통하여 한계용량이 어느 정도 증가하는 것으로 검토되고 있으며, 대용량 에너지 저장장치에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있어, 대용량 에너지저장장치를 통하여 풍력발전의 운전한계용량이 증대될 것으로 예상된다. 그리고 향후 2020년 이후로는 대용량 에너지저장장치 중 활용가치가 가장 높은 배터리의 가격이 현재의 약 4분의 1 가량으로 상당히 줄어들 것으로 예상되어 제주지역 운전한계용량 증대에 더 많은 기여를 할 수 있을 것으로 예상된다.

##### 1) 풍력발전 출력제한량 분석

한계용량에 의한 풍력발전 출력제한량 분석을 위하여 제주지역의 수요와 공급을 시간별로 나누고, 풍력발전의 이용률을 2010년의 평균이용률 23.4%를 적용하였을 경우와 해상풍력을 고려한 미래의 풍력발전 이용률 30%를 적용하였을 경우 발생하는 풍력발전 출력제한량을 HVDC설치 전 후로 하여 어느 정도 차이가 나는지 비교해 보았다.



(1) HVDC운전조건 설정

표 13은 HVDC의 운전조건의 설정을 나타낸 것으로, HVDC#1,#2,#3 모두 출력 증감발률이 0.1~9.9MW/sec(수동)으로 충분히 빠른 정주파수 모드로 운전하는 것으로 가정한다. 표에서의 (+)부호는 육지에서 제주도로의 전력 송전을 의미하고, (-)부호는 반대로인 제주도에서 육지로의 전력 송전을 의미한다[1].

표 9 HVDC 운전조건 설정

HVDC 운전 조합		HVDC #1 (기설)	HVDC #1 + HVDC #2	HVDC #1 + HVDC #2 + HVDC #3
최대 송전용량	HVDC #1	150MW	150MW	150MW
	HVDC #2	×	250MW	250MW
	HVDC #3	×	×	200MW
	합계	150MW	400MW	600MW
최소 송전용량	HVDC #1	40MW	40MW	40MW
	HVDC #2	×	-200MW	-200MW
	HVDC #3	×	×	-200MW
	합계	40MW	-160MW	-360MW
운전 모드	HVDC #1	정주파수 모드	정주파수 모드	정전력 모드
	HVDC #2	×	정주파수 모드	정주파수 모드
	HVDC #3	×	×	정주파수 모드

(2) 풍력발전의 이용률이 23.4%일 경우

2010년 한 해 동안의 제주지역 풍력발전 데이터를 조사해 본 결과 제주지역 풍력발전 평균 이용률은 약 23.4%로 나타났다. 표 10는 제주지역 풍력발전의 평균 이용률이 23.4%일 경우 제주지역에 설치할 풍력발전의 설비용량에 시간별 이용률을 적용하여 제한되는 풍력발전을 분석한 것으로, HVDC#3 설치 전과 설치 후로 비교하여 나타낸 것이며, 아래의 식은 시간별 출력제한량을 산출하기 위한 식으로 값이 0보다 작을 경우 출력제한이 발생된다.

$$P_{load}(h) - C_{wind} \times CF(h) + P_{G.min}(h) - HVDC_{riv}(h) = 0 \quad (9)$$

여기서,  $P_{load}(h)$ 는 제주계통의 시간당 평균 수요를 나타내며,  $C_{wind}$ 는 풍력발전의 설비용량,  $CF(h)$ 는 시간당 풍력발전 평균 이용률,  $P_{G.min}(h)$ 는 제주지역 발전

설비의 최소발전 그리고  $HVDC_{riv}(h)$ 는 HVDC를 통한 전력조류의 역송량을 나타낸다.

표 10 이용률이 23.4%경우 HVDC#3 설치 전/후 제한되는 풍력발전량 비교

풍력발전 설비용량 (MW)	HVDC#3 설치 전			HVDC#3 설치 후		
	출력제한 빈도수(회)	제한되는 출력량(MW)	비율(%)	출력제한 빈도수(회)	제한되는 출력량(KW)	비율(%)
371	0	0	0	0	0	0
571	1	16.76	0.0014	0	0	0
800	313	17,485.56	1.07	0	0	0
1100	1049	148,537.34	6.58	294	21,531.62	0.95
1200	1187	196,900.06	8.00	448	41,810.88	1.70
1300	1308	247,842.49	9.30	561	67,685.91	2.54
1400	1439	300,452.88	10.46	669	972,883.41	3.39
1500	1397	312,447.82	10.16	689	109,416.85	3.56
1600	1500	362,308.40	11.04	780	141,063.78	4.30
1700	1567	411,841.41	11.81	844	174,298.36	5.00
1800	1501	408,504.06	11.07	831	179,337.37	4.86
1900	1546	452,041.00	11.60	904	210,788.25	5.41
2000	1459	436,917.58	10.65	857	208,303.83	5.08

그림 6은 이용률이 23.4%일 경우 HVDC#3의 설치 전과 설치 후 제한되는 풍력발전량의 나타낸 것으로 전력 조류 역송의 한계로 인하여 제한되는 출력량의 차가 점차 줄어드는 것 볼 수 있다. 이용률 23.4%에서 HVDC#3 설치 전 설치 후의 제한되는 풍력발전량은 약 10%의 차이 발생한다.

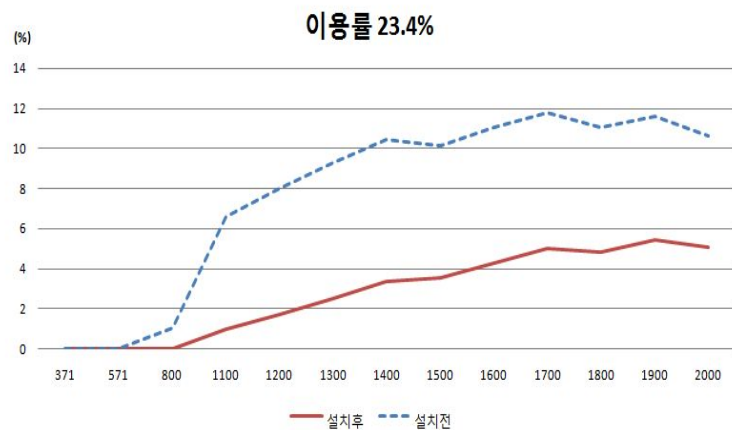


그림 6 이용률이 23.4%경우 HVDC#3 설치 전/후 제한되는 풍력발전량 비교

(3) 풍력발전의 이용률이 30%일 경우

제주지역 해상에 약 2GW의 풍력발전기가 설치될 경우 평균이용률은 약 35% 이상으로 증가할 것으로 예상되므로 23.4%의 평균 이용률을 30%로 보정하였고, 식(9)를 통해 풍력발전의 평균 이용률이 30%가 될 경우 풍력발전의 출력 제한량을 분석하여 보았다. 표 11은 제주지역 풍력발전의 이용률이 30%일 경우 HVDC#3설치전과 설치 후 제한되는 풍력발전량을 비교한 것이다. 그림 7은 이용률 30%에서 HVDC#3 설치 전 설치 후의 제한되는 풍력발전량 약 6%의 차이가 발생한다.

이용률이 약 6.6% 증가할 경우 제한되는 풍력발전의 출력량은 설치 전 약 9~10% 증가하였고, 설치 후에는 약 7~8%증가 증가한다.

표 11 이용률이 30%경우 HVDC#3 설치 전/후 제한되는 풍력발전량 비교

풍력발전 설비용량 (MW)	HVDC#3 설치 전			HVDC#3 설치 후		
	출력제한 빈도수(회)	제한되는 출력량(MW)	비율(%)	출력제한 빈도수(회)	제한되는 출력량(KW)	비율(%)
371	0	0	0	0	0	0
571	212	9,067.61	0.60	0	0	0
800	940	120,361.59	5.73	220	12,160,515	0.59
1100	1833	434,433.45	15.03	935	163,095,586	5.64
1200	1984	533,667.79	16.92	1108	228,448,324	7.24
1300	2109	634,949.05	18.59	1255	300,187,393	8.79
1400	2221	737,147.63	20.04	1420	376,889,046	10.24
1500	2199	775,020.07	19.66	1442	414,641,030	10.52
1600	2266	871,424.60	20.72	1543	492,245,075	11.71
1700	2328	966,357.44	21.63	1629	510,765,575	12.78
1800	2266	981,723.55	20.75	1609	594,104,743	12.56
1900	2311	1,067,700.50	21.38	1687	668,106,881	13.38
2000	2238	1,064,940.15	20.26	1644	677,540,492	12.89

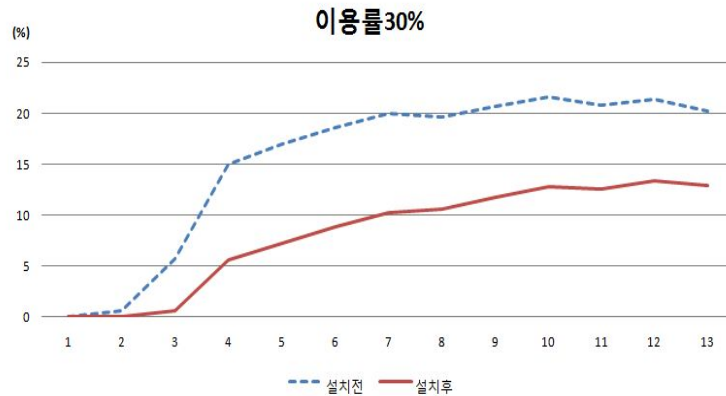


그림 7 이용률이 30%경우 HVDC#3 설치 전/후  
제한되는 풍력발전량 비교

그림 8 ~ 그림 11은 HVDC#3 설치될 경우 2020년과 2030년 이용률이 각각 23.4%, 30%일 경우 제한되는 풍력발전량을 나타낸 것이다. 그림 8은 2010년의 제주지역 풍력발전 평균 이용률인 23.4%와 2020년 설치예정인 풍력발전의 설비용량인 1300MW를 적용할 경우의 풍력발전 출력 제한량을 나타낸 것이고, 그림 9는 2030년 설치예정인 풍력발전의 설비용량인 2000MW를 적용할 경우의 풍력발전 출력 제한량을 나타낸 것이다. 설비용량의 증가로 제한되는 풍력발전의 출력량이 증가하는 것을 볼 수 있다.

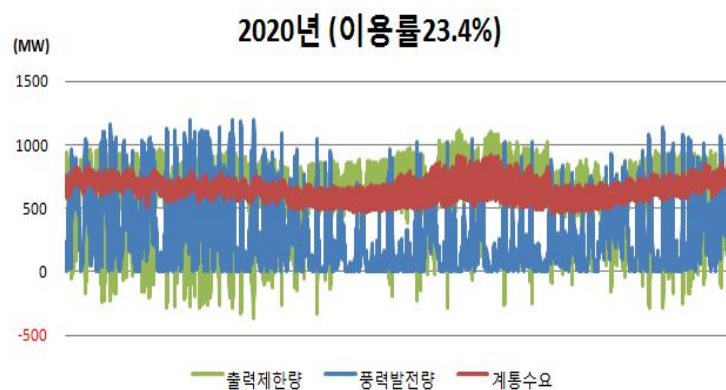


그림 8 이용률이 23.4%, 설비용량이 1300MW일 경우  
제한되는 풍력발전량

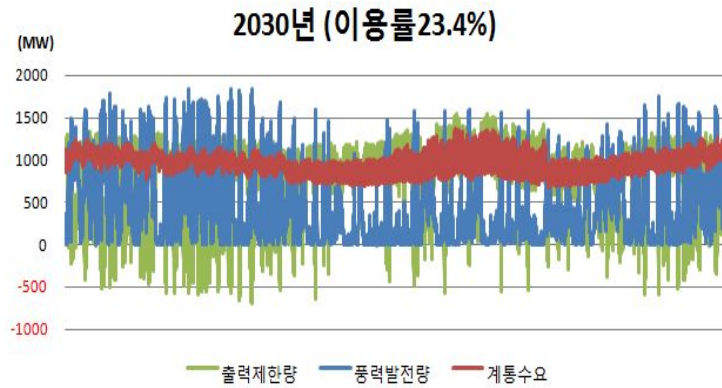


그림 9 이용률이 23.4%, 설비용량이 2000MW일 경우  
제한되는 풍력발전량

그림 10는 향후 해상 풍력이 증가할 경우 이용률이 증가할 것으로 기대되므로 이용률을 약 30%로 가정하고 2020년 설치예정인 풍력발전의 설비용량인 1300MW를 적용할 경우의 풍력발전 출력 제한량을 나타낸 것이고, 그림 11은 2030년 설치예정인 풍력발전의 설비용량인 2000MW를 적용할 경우의 풍력발전 출력 제한량을 나타낸 것이다. 설비용량의 증가로 제한되는 풍력발전의 출력량이 증가하는 것을 볼 수 있으며, 이용률의 증가로 인하여 그림 8과 9에서 제한되는 풍력발전의 출력량보다 많은 양의 풍력발전의 출력량이 제한되는 것을 볼 수 있다.

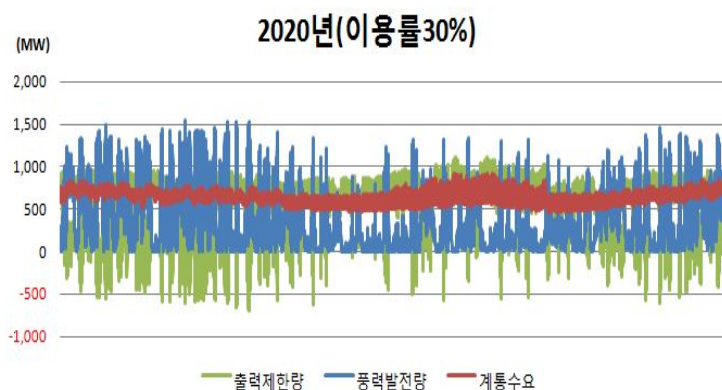


그림 10 이용률이 30%, 설비용량이 1300MW일 경우  
제한되는 풍력발전량

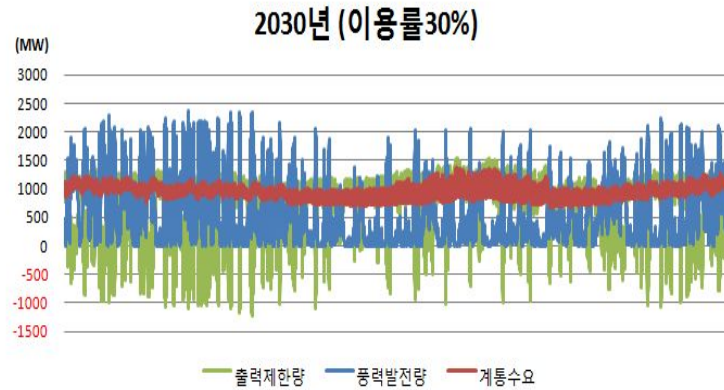


그림 11 이용률이 30%, 설비용량이 2000MW일 경우  
제한되는 풍력발전량

## 2) 운전한계용량 증대를 위한 배터리의 운용

대용량 에너지저장장치를 이용하여 제주지역의 한계용량을 증가 시키고 제한되는 풍력발전의 출력을 얼마만큼 감소시킬 수 있는지를 분석해 보았다. 에너지 저장장치의 운용방법으로는 전력수요에 의한 운용으로 전력 사용량이 적은 새벽시간을 이용하여 충전하고 전력수요가 많은 낮 혹은 저녁시간 동안의 방전을 통해 peak부를 낮추는 방법으로 에너지 저장장치를 운영해 보았고, 또한 풍력발전을 고려 후 출력이 제한되는 구간에서 방전하는 방법으로 에너지 저장장치를 운용해 보았다.

기본적인 배터리의 특성에 따른 충/방전 운용은 다음의 식을 따르기로 한다.

에너지 저장장치는 초기의 전기적 에너지로부터 충전을 시작한다.  $C_{sr}^{ini}$  는 초기에너지,  $w(0 \leq w \leq 1)$ 는 방전효율, 그리고  $C_{sr}^{max}$  는 최대 저장 에너지를 나타낸다.

$$C_{sr}^{ini} = w \cdot C_{sr}^{max} \quad (10)$$

다음은 충/방전 제약과 인버터 용량 제한을 나타낸 것이다.  $C_{src}(t)$ 는 (t)시간 동안에 충전을 위해 사용된 에너지이고,  $C_{srd}(t)$ 는 (t)시간동안에 방전에 사용된

에너지이고, 식 (10)과 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.  $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$ 는 충전을 위한 효율이다. 모든 이 논문에서 사용된 에너지 저장장치의 효율 또한  $\alpha$ 에 통합된다.  $P_{inv}(t)$ 는 t시간 동안 인버터로 부터의 출력이다.

$$C_{src}(t) = \int \alpha P_{inv}(t) dt \quad (11)$$

$$C_{srd}(t) = \int P_{inv}(t) dt \quad (12)$$

t시간 동안 에너지 저장을 위한 이산적 표현은 식 (12)과 같다.

$$C_{sr}(t) = C_{sr}(t-1) + C_{src}(t) - C_{srd}(t) \quad (13)$$

식 (13), (14), (15)은 충/방전을 위한 제약을 나타내고 있다. 식 (19)에서와 같이 모든 시간 t에 대하여 에너지 저장장치의 충전량은 충전용량의 최소값보다는 크고, 최대값보다는 작아야 한다. 식(14), (15)은  $k(w \leq k \leq 1)$ 와  $w$ 는 각각 충전효율과 방전효율을 나타낸다.  $k \cdot C_{sr}^{max}$ ,  $w \cdot C_{sr}^{max}$  그리고  $C_{sr}^{min}$ 는 각각 충전 종료시간에서 경계 에너지보다 낮고, 방전 종료시간 및 최소 저장에너지의 경계 에너지보다 높다.

$t_c$ 와  $t_d$ 는 각각 충전과 방전 종료시간을 나타낸다. 충전은  $C_{sr}(t)$ 가  $k \cdot C_{sr}^{max}$ 까지 증가 혹은 그 이상일 때 종료하며, 반대로 방전은  $C_{sr}(t)$ 가  $w \cdot C_{sr}^{max}$ 까지 감소 혹은 그 이하가 될 때 종료한다. 예측하지 못한 사고에 대비해 충분한 예비전력을 보장하기 위해  $w \cdot C_{sr}^{max}$ 를 고려하여야한다[11].

$$C_{sr}^{min} \leq C_{sr}(t) \leq C_{sr}^{max} \quad (14)$$

$$k \cdot C_{sr}^{min} \leq C_{sr}(t_c) \leq C_{sr}^{max} \quad (15)$$

$$C_{sr}^{\min} \leq C_{sr}(t_d) \leq w \cdot C_{sr}^{\max} \quad (16)$$

위와 같은 제한을 이용하여 에너지 저장장치의 충/방전 운용을 하였다. 에너지 저장장치의 충전 효율은 에너지저장장치의 전압특성 및 방전특성을 고려하여 에너지저장장치 용량의 80%를 적용하였으며, 충전시간은 6시간 방전시간은 9시간으로 설정하여 에너지저장장치를 운용하였다.

### 3.2 대용량 에너지저장장치에 의한 한계용량 효과분석

한계용량 효과분석을 위하여 에너지저장장치의 용량은 2019년 풍력발전의 설비용량인 1300MW를 기준으로 발전량을 예측한 후 풍력발전의 설비용량의 10%인 780MWh와 20%인 1560MWh를 적용하여 에너지저장장치 운용을 해 보았으며, 한계용량 증대량을 HVDC 설치 전 후로 비교 분석해 보았다.

#### 1) 에너지저장장치의 운용 검토

에너지저장장치의 운용은 그림 6에서의 flow chart에서 나타나듯이 수요가 공급을 초과할 시에는 발전량 및 HVDC를 통한 공급량을 증대 시키며, 풍력발전의 점유율 증가로 인하여 공급이 수요에 비해 과다해져 풍력발전의 한계용량이 발생할 경우 HVDC를 통한 역송을 고려하였다. 그리고 발전량이 HVDC를 통한 역송 가능량을 초과 할 경우 대용량 에너지저장장치의 운용을 통하여 한계용량이 증대될 수 있도록 설계하여 보았다.



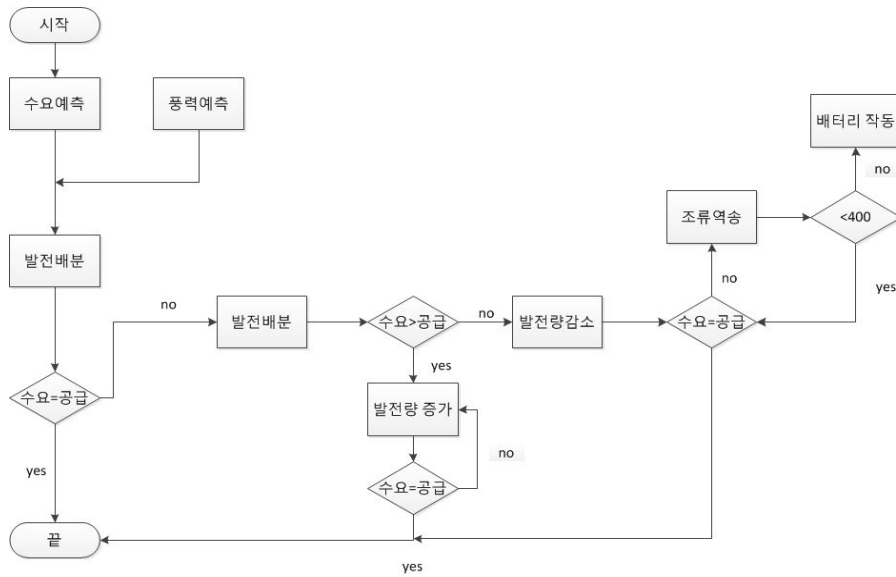


그림 12 한계용량 증대를 고려한 에너지저장장치 운용 flow chart

효율적인 계통운영을 이용한 충/방전 운용 외에 한계용량증대를 목적으로 하는 에너지저장장치 운용을 위한 충전식은 아래와 같다. HVDC를 통한 역송의 범위를 침범하지 않기 위해 충전 한계점을 정하여 충전 제어를 하였다.

$$\left(\sum_{h=1}^n P_t(h) - C_{BATT}\right) \div t_c = C_{Chr,lim}(h) \quad (17)$$

$$P_t(h) - C_{Chr,lim}(h) = C_{Chr}(h) \quad (18)$$

여기서,  $P_t(h)$ 는 운전 한계용량을 초과하는 발전량,  $C_{BATT}$ 는 에너지저장장치의 용량,  $T_c$ 는 충전시간,  $C_{Chr,lim}(h)$ 은 충전한계점,  $C_{Chr}(h)$ 는 시간당 충전량을 나타낸 것이다.

$P_t(h)$ 의 편차가 심한 상황에서는 몇몇 충전 구간에서 방전을 해야 할 경우가 발생할 수 있으므로, 그 구간을 최소 충전량으로 임의 지정 혹은 충전구간에서 제외한 후 나머지 구간에 대해 충전량을 재 산정 하였다.

## 2) 한계용량증대효과 검토

표 12는 에너지저장장치를 이용하여 하여 한계용량을 증대 시켰을 경우를 나타낸 것으로 2020년 예측 수요를 바탕으로 최저부하의 한계용량에서 에너지저장장치를 이용하여 한계용량을 증대시킬 경우의 한계용량 증대량을 나타낸 것이다.

표 12 에너지저장장치에 의한 한계용량 증대량

단위 : MW	한계용량	에너지저장장치용량	한계용량 증대량
2020년	674	130	61

그림 13은 한계용량 증대효과를 나타낸 그림으로 한계용량은 에너지저장장치의 용량만큼 증대되는 것이 아니라 그림 13에서와 같이 1번에서 2번으로 이동하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 에너지저장장치의 충전 특성상 6시간 이후 2번과 같은 한계용량이 존재하기 때문이다.

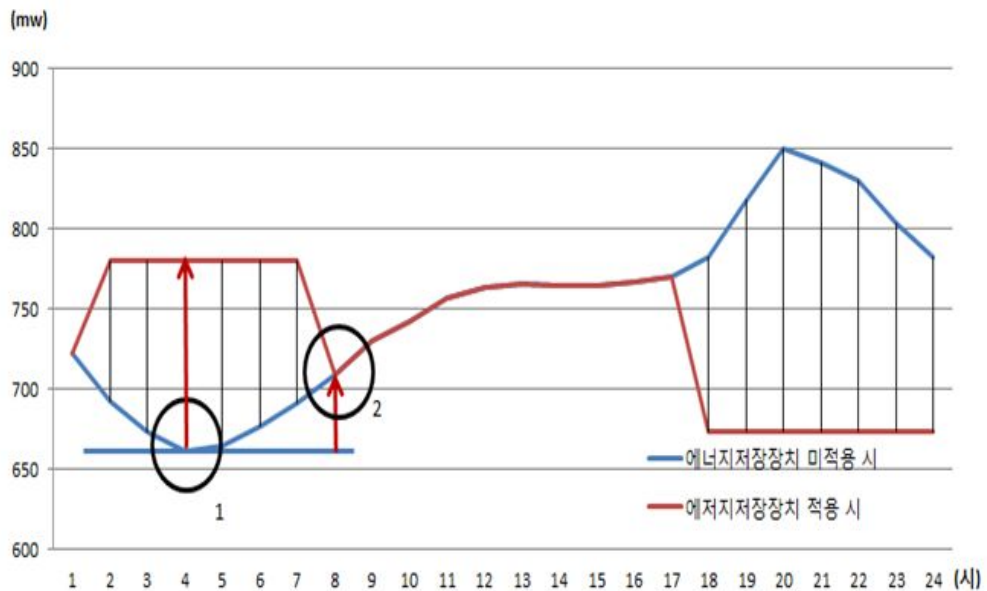


그림 13 에너지저장장치에 의한 한계용량 증대효과

### 3) 출력제한 패턴 별 에너지저장장치 운용 검토

에너지저장장치를 이용하여 최저수요 시 충전, 최대 수요 시의 방전의 운용을 기반으로 하는 한계용량 증대방안 및 효과를 검토해보았으며, 수요 패턴 및 발전량 패턴을 분석하여 에너지 저장장치의 용량을 증가시킬 경우 얼마만큼의 출력 제한이 감소될 수 있는지를 검토해 보았다.

#### (1) 24시간동안의 에너지저장장치 운용

에너지저장장치의 운용은 수요 및 풍력발전량의 패턴에 따라 그 운용시간을 24시간, 48시간 혹은 그 이상으로 나눌 수 있다. 그림 13은 출력제한이 걸리는 부분이 6시간 이내일 경우 1일 동안 에너지저장장치의 모든 용량을 충/방전하는 운용으로, 에너지저장장치의 운용을 새벽시간 최저부하 시 충전, 저녁시간 최대부하 시 방전을 하는 방식으로 운용한다.

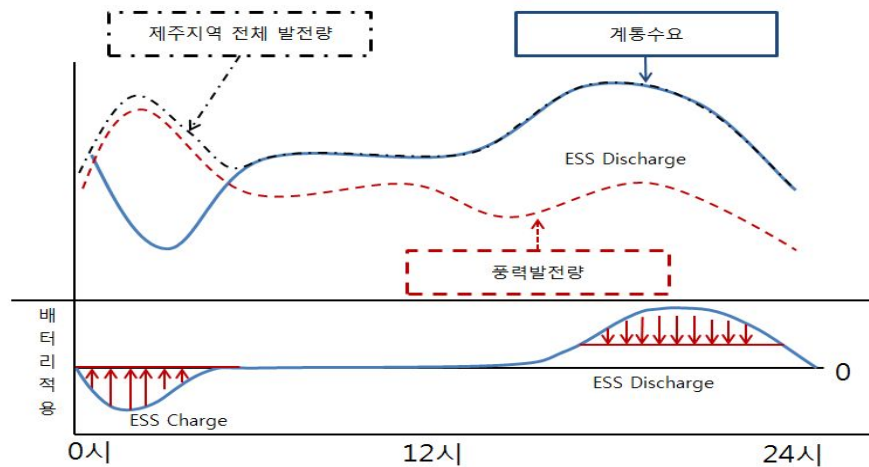


그림 14 전력수요예측을 통한 에너지저장장치의 운용

#### (2) 48시간동안의 에너지저장장치 운용

그림 14에서와 같이 풍력의 이용률이 높은 경우 수요를 초과하는 한계용량이 장시간 발생 될 수도 있으며, 이러한 경우 에너지저장장치의 특성을 고려하여 적정 충전구간을 정한 후 충전하고 더불어 풍력발전의 출력제한을 병행하여 수요와 공급의 양을 맞춰야 할 것이다.

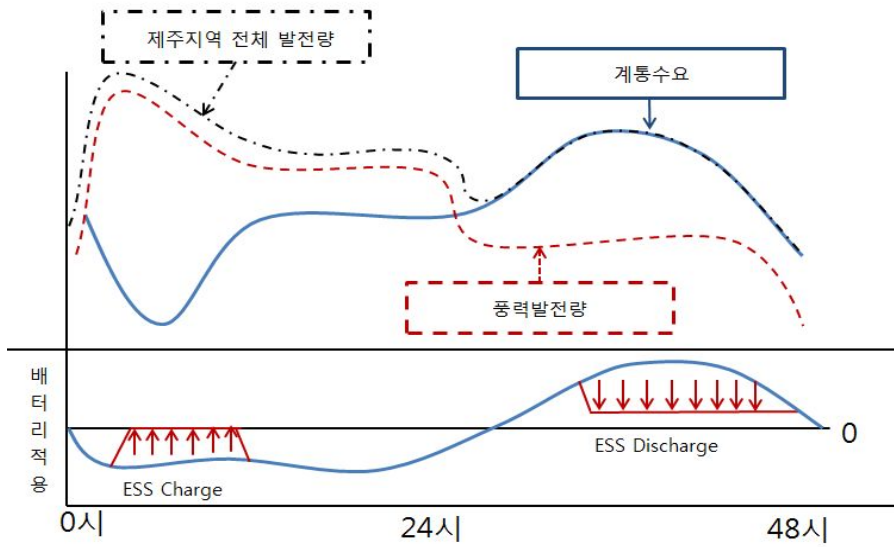


그림 15 48시간동안의 에너지저장장치의 운용

그림 15는 에너지 저장장치의 용량을 증가 시켰을 경우를 나타낸 것으로 출력 제한이 감소하긴 하나 출력제한이 걸리지 않는 부분에서 충전이 되는 현상이 발생하게 되어 비효율적인 운용을 할 수도 있다.

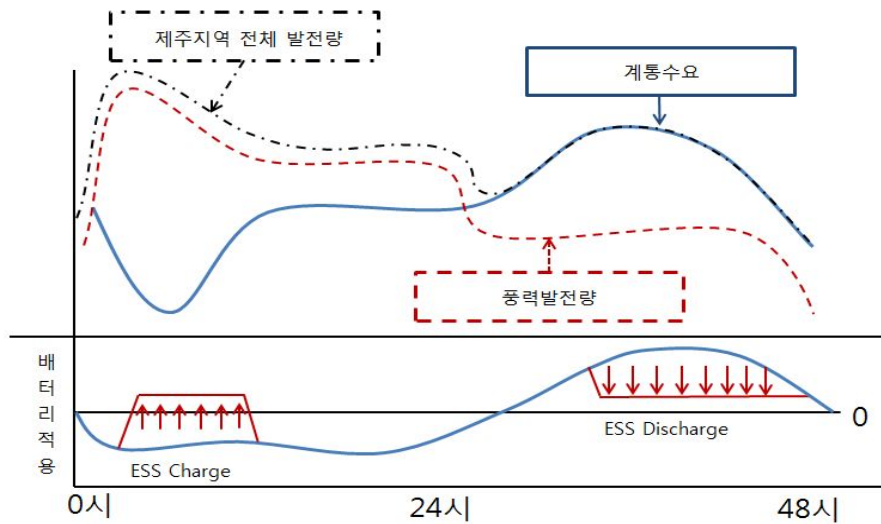


그림 16 48시간동안의 에너지저장장치의 운용 (저장장치용량증가)

위의 그림과 같은 비효율적인 운용을 피하기 위하여, 그림 17 ~ 그림 19과 같이 에너지저장장치의 용량이 풍력발전 설비의 10%, 20% 그리고 30%일 경우 HVDC의 역송 가능량을 침범하는 횟수를 나타내 보았다.

한계용량 증대를 위한 수요와 발전량의 패턴 분석과 에너지저장장치의 운용 방법을 고려하여 에너지저장장치의 충/방전 가능 횟수를 10%일 경우 약 110회로 보았을 경우 에너지저장장치 용량을 10%로 산정 시 침범횟수는 12회로 전체 충전 횟수의 10.9%로 나타났고, 20%로 산정 시에는 37회 가량 침범하여 전체 충전 횟수의 약 31%를 차지하는 것으로 나타났다. 그리고 30%로 산정 시에는 51회 가량 침범하여 전체 충전 횟수의 약 43.4%를 차지하는 것으로 나타났다. 따라서 에너지저장장치의 충전시간을 6시간으로 고려하여 에너지저장장치를 운용했을 경우 HVDC의 역송량을 침범하지 않는 영역에서 에너지저장장치를 운용하기 위해서는 에너지저장장치 용량을 풍력발전기 설비용량의 30%까지가 적당 할 것으로 판단된다.

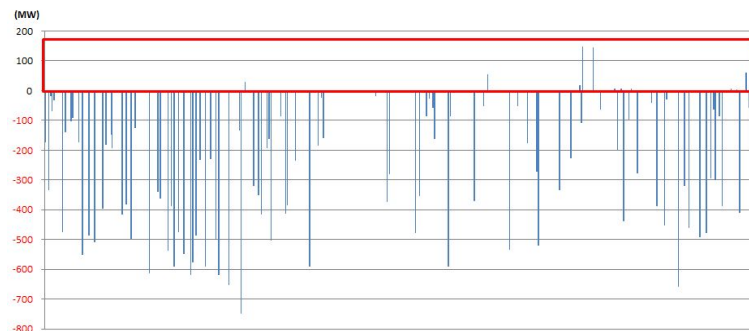


그림 17 HVDC 역송 가능량 침범횟수  
(에너지저장장치 용량이 풍력발전설비의 10%일 경우)

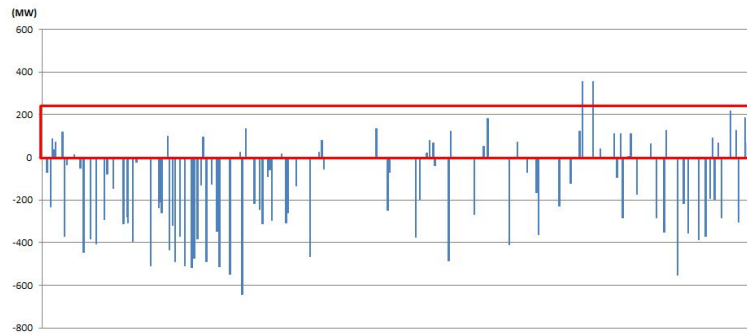


그림 18 HVDC 역송 가능량 침범횟수  
(에너지저장장치 용량이 풍력발전설비의 20%일 경우)

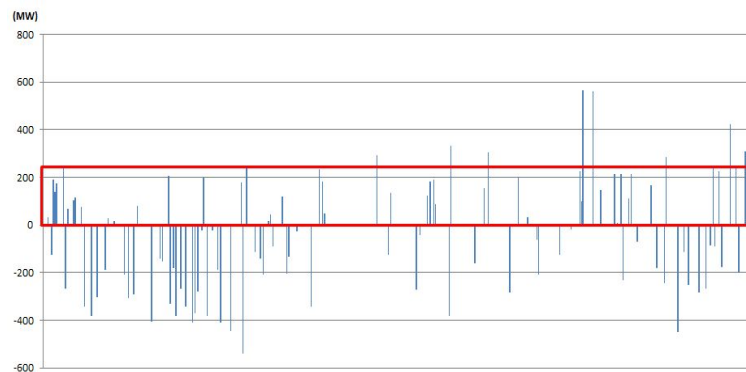


그림 19 HVDC 역송 가능량 침범횟수  
(에너지저장장치 용량이 풍력발전설비의 30%일 경우)

에너지 저장장치를 통한 방전에 있어서도 에너지저장장치의 용량이 증가하여 방전구간의 부하를 더욱 절감 시키더라도 방전구간에 한계가 있어 또 다른 침두 부하가 존재하게 된다. 따라서 침두부하를 더욱 낮추기 위해서는 에너지 저장장치의 용량증가와 더불어 대용량 저장장치의 방전특성 개선이 필요할 것으로 판단된다.

#### 4) 출력제한 감소량 검토

에너지저장장치 운영방법을 토대로 780MWh의 에너지저장장치 운용 시 출력제한 감소량과 1560MWh에서의 출력제한 감소량, 그리고 2340MWh에서의 출력제한 감소량을 검토해보았으며, 이를 다시 HVDC#3 설치 전과 설치 후로 나누어

검토해 봄으로써 제주지역 풍력발전 출력제한 감소에 어느 정도의 기여를 할 수 있는지를 평가해 보았다.

(1) 에너지저장장치 용량 780MWh(풍력발전 설비용량의 10%)

그림 20은 HVDC #3 설치 전 용량이 780MWh인 에너지저장장치를 운용할 경우를 나타낸 것으로, 역송량을 침범하지 않는 범위에서 에너지저장장치를 통하여 감소시킬 수 있는 출력 제한량은 약 83,110.79MWh이었고, 에너지저장장치를 운용하였을 때 제한되는 풍력발전 출력량은 약 551,838.25MWh로 줄어들었다.

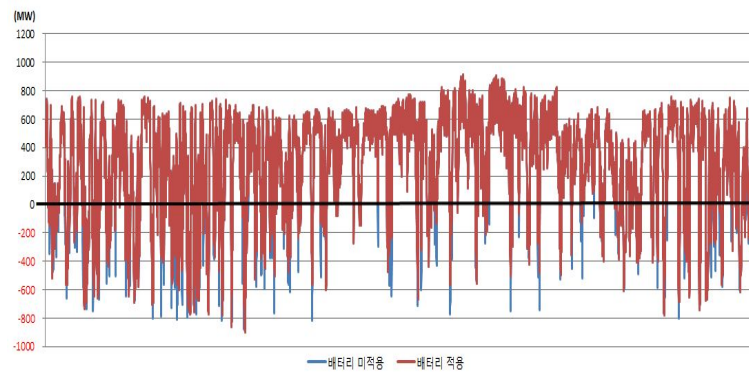


그림 20 780MWh 에너지저장장치 운용 시 풍력발전의 출력 제한량 비교 (HVDC#3 설치 전)

그림 21은 HVDC #3 설치 후 용량이 780MWh인 에너지저장장치를 운용할 경우를 나타낸 것으로, 역송량을 침범하지 않는 범위에서 에너지저장장치를 통하여 감소시킬 수 있는 출력 제한량은 약 63,508.81MWh이었고, 에너지저장장치를 운용하였을 때 제한되는 풍력발전 출력량은 약 236,678.579MWh로 줄어들었다.



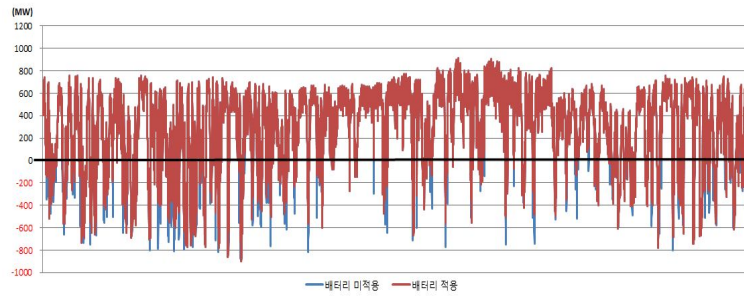


그림 21 780MWh 에너지저장장치 운용 시 풍력발전의 출력 제한량 비교 (HVDC#3 설치 후)

(2) 에너지저장장치 용량 1560MWh(풍력발전 설비용량의 20%)

그림 22는 HVDC #3 설치 전 용량이 1560MWh인 에너지저장장치를 운용할 경우를 나타낸 것으로, 역송량을 침범하지 않는 범위에서 에너지저장장치를 통하여 감소시킬 수 있는 출력 제한량은 약120,500.21MWh로 에너지저장장치를 운용하였을 때 제한되는 풍력발전 출력량은 에너지저장장치 미적용 시 보다 약 18.9%가량 감소하였다.

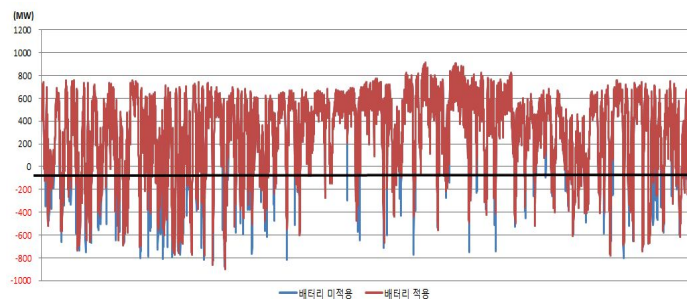


그림 22 1560MWh 에너지저장장치 운용 시 풍력발전의 출력 제한량 비교 (HVDC#3 설치 전)

그림 23은 HVDC #3 설치 후 용량이 1560MWh인 에너지저장장치를 운용할 경우를 나타낸 것으로, 역송량을 침범하지 않는 범위에서 에너지저장장치를 통하여 감소시킬 수 있는 출력 제한량은 약127,642.47MWh로 HVDC#3 설치 시 에너지저장장치를 운용하였을 때 제한되는 풍력발전 출력량은 에너지저장장치 미적용 시 보다 약 42.52%가량 감소하였다.



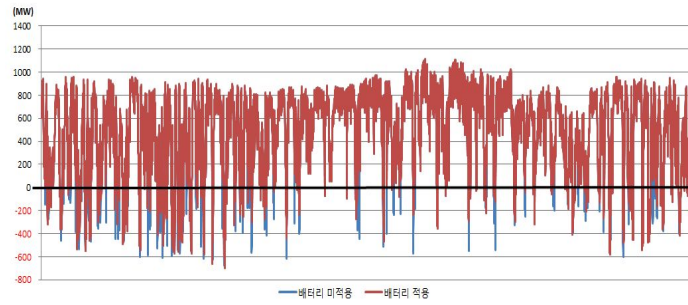


그림 23 1560MWh 에너지저장장치 운용 시  
풍력발전의 출력 제한량 비교 (HVDC#3 설치 후)

(3) 에너지저장장치 용량 2340MWh(풍력발전 설비용량의 30%)

그림 24은 HVDC #3 설치 전 용량이 2340MWh인 배터리를 운용할 경우를 나타낸 것으로, 역송량을 침범하지 않는 범위에서 배터리를 통하여 감소시킬 수 있는 출력 제한량은 약 161,137,69MWh로 에너지저장장치를 운용하였을 때 제한되는 풍력발전 출력량은 에너지저장장치 미적용 시 보다 약 25.38%가량 감소하였다.

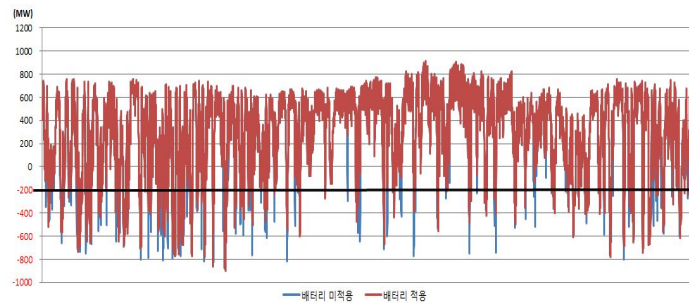


그림 24 2340MWh 에너지저장장치 운용 시  
풍력발전의 출력 제한량 비교 (HVDC#3 설치 전)

그림 42는 HVDC #3 설치 후 용량이 2340MWh인 에너지저장장치를 운용할 경우를 나타낸 것으로, 역송량을 침범하지 않는 범위에서 에너지저장장치를 통하여 감소시킬 수 있는 출력 제한량은 약 142,819.89MWh로 HVDC#3 설치 시 에너지저장장치를 운용하였을 때 제한되는 풍력발전 출력량은 에너지저장장치 미적용 시 보다 약 47.58%가량 감소하였다.

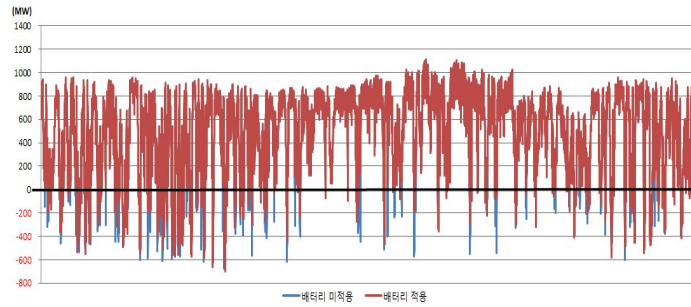


그림 25 2340MWh 에너지저장장치 운용 시  
풍력발전의 출력 제한량 비교 (HVDC#3 설치 후)

### 5) 결과 및 고찰

전력수요와 풍력발전의 예측 및 발전량 배분을 통하여 풍력발전 운전 한계용량을 알아보았고, HVDC를 통한 전력 조류 역송 후의 출력제한량과 에너지저장장치 운용을 통한 풍력발전 출력 제한 감소량에 대하여 분석해 보았다. 풍력발전의 설비용량이 1300MW일 경우를 분석결과 아래의 표와 같이 에너지저장장치 용량에 따라 각각 83.1GWh(10%의 경우), 146.7GWh(20%의 경우)로 증가하는 것을 알 수 있었다. HVDC의 설치 전 후의 차이는 HVDC를 통해 다량의 제한되는 풍력발전량이 감소되어 에너지저장장치의 운용구간이 줄어들었고, 따라서 감소되는 출력 제한량은 감소되는 것으로 나타났다.

표 13와 표 14은 HVDC#3의 운영 시와 미운영 시 에너지저장장치를 운용하였을 때 감소 가능한 풍력발전의 출력 제한량을 나타낸 것으로 출력 제한량을 감소시킨 후에도 출력제한은 남아있는 것으로 나타나고 있다.

표 13 HVDC#3 미운영시 에너지저장장치의 용량에 따른 출력제한 감소량 비교

풍력발전설 비용량 1300MW	한계용량 증대량 비교			
	HVDC#3 미운영 시	에너지저장장치 용량(MWh)		
		780	1560	2340
출력제한량 (GWh)	634.9	566.85	514.45	473.81
전체풍력발 전량에 대한 제한되는 풍력발전량 의 비율(%)	18.59	16.59	15.06	13.87

표 14 HVDC#3 운영 시 에너지저장장치의 용량에 따른 출력제한 감소량 비교

풍력발전설 비용량 1300MW	한계용량 증대량 비교			
	HVDC#3 운영 시	에너지저장장치 용량(MWh)		
		780	1560	2340
출력제한량 (GWh)	300.19	246.83	172.54	157.37
전체풍력발 전량에 대한 제한되는 풍력발전량 의 비율(%)	8.79	7.22	5.05	4.61

지금까지의 내용을 살펴본 바에 의하면 HVDC의 역송을 통하여 1년간 약 300GWh이상의 출력 제한량 감소가 나타나는 것을 알 수 있었고, 풍력발전기 설비용량의 약 30%의 에너지저장장치의 운용을 통해 출력제한량을 감소시킬 경우 전체 풍력발전의 약 4.6% 출력 제한량 감소 효과가 나타나는 것을 알 수 있었다.

풍력발전 설비용량이 약 1300MW일 경우 HVDC#3가 설치되기 전 제한되는 풍력발전 출력량은 전체 발전량의 약 18%이고, 그 중 에너지저장장치 이용 시

2~5%의 출력 제한량의 감소 가능하며, HVDC#3가 운영된 후에는 약 9%의 한계용량이 증대 가능하다. 그리고 HVDC#3와 에너지저장장치를 병행하여 사용할 경우 약 12%~ 14% 정도의 출력 제한량 감소 효과가 나타난다.

그러나 제주지역의 한계용량 증대방안으로 HVDC가 추가 건설 된다면 그 가동률은 9.75%정도이다. HVDC를 한계용량 증대방안으로 뿐만 아닌 육지로 부터의 전력전송에 이용 할 수 있지만, HVDC#3까지 건설 시 HVDC로 부터의 전력의존이 너무 커져, 육지부의 전력부족 시 제주지역에 과급될 영향이 커질 것이다. HVDC의 증설은 제주지역의 전력자립도를 해치는 요인이 될 수도 있으므로 신중히 검토되고 고려되어야 할 것이다.

수요 및 발전 패턴을 분석해 보았을 때 에너지저장장치가 한계용량 증대방안으로 사용될 경우 약 110회 이상의 운용이 가능하며, 전체발전량의 5%가량의 한계용량 증대효과를 가져올 수 있을 것으로 기대된다. 뿐만 아니라 에너지저장장치의 운용으로 한계용량 증대를 위한 운용과 부하 평준화를 위한 운용을 병행하여 효율적이고 탄력적으로 운용한다면, 제주지역의 안정적인 전력공급 및 계통운영에 크게 기여 할 수 있으며 한계용량 증대로 인한 부가가치도 창출할 수 있을 것으로 사료된다.

## IV. 결론

본 논문에는 고립된 제주지역의 전력계통에 풍력발전의 점유율이 급격히 증가할 시 발생할 수 있는 풍력발전의 운전한계용량을 산정해 보았고, 운전한계용량으로 인한 출력 제한량을 검토해 보았으며, 한계용량증대를 통한 출력 제한량 감소 방안을 검토해 보았다. 2013년부터 2030년까지의 수요예측과 풍력발전량 예측 그리고 제주지역의 계통현황을 반영하여 2013년부터 2020년까지 제주지역의 풍력발전 운전한계용량을 산정해 보았으며, 2020년과 2030년의 이용률에 따른 출력 제한량을 검토해 보았다. 그리고 풍력발전의 설비용량이 1300MW 일 때 HVDC#3가 운영될 경우와 대응량 저장장치가 운용될 경우의 용량별 한계용량 증대효과를 검토해 보았다.

다음은 본 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다.

### 1) 제주지역 풍력발전 운전한계용량

연계선 및 기존 발전기의 최소발전량은 계통에서 유지되는 최소한의 발전력으로 더 이상 줄일 수 없는 양이므로 계통에서 최저부하와 풍력발전의 출력이 겹치는 순간이 오면 계통부하보다 공급되는 발전력이 많게 되는 상황이 발생할 수 있어 이런 상황을 방지하기 위하여 제주지역의 최소발전량을 기준으로 풍력발전의 한계용량을 산정할 수 있었다. 이처럼 제주지역은 독립된 계통으로 풍력발전의 한계용량 산정 시 최저수요 및 연계선의 영향을 많이 받으나, 육지지역의 경우 변전소 별로 허용 가능한 풍력발전의 한계용량과 전선의 허용용량 등을 고려하여 풍력발전의 한계용량을 산정할 필요가 있다.

### 2) 에너지저장장치에 의한 한계용량효과 분석

제주지역 풍력발전 수용한계에 절대적인 영향을 미치는 요소는 최저수요 수준과 HVDC라고 할 수 있다. 그러므로 제주지역 풍력발전 운전한계용량을 증대를 위해서는 최저수요 수준의 향상 및 풍력의 간헐성을 완충하는 방법이 있다. 다시

말해 급전이 가능한 자원으로 만드는 것이다.

향 후 제주지역에 설치될 HVDC#3의가 설치된 후 제한되는 풍력발전량이 상당히 감소하는 것을 알 수 있다. 수요증가는 미비하나 풍력발전의 설비용량의 증가가 급속히 이루어질 경우 역송이 가능한 HVDC의 추가 건설이 필요하나 한계용량 증대를 위해 HVDC를 설치할 경우 가동률 미비하며, 전력공급의 용도로 사용하게 될 시에는 약 1100MW의 전력공급 설비 중 600MW를 HVDC가 담당하게 된다. 이는 50%이상의 전력을 육지부에 의존하게 되는 것으로 제주지역의 전력수급자립도를 악화시켜 비상 시 제주지역의 전력공급 대처능력을 악화시키는 결과를 초래할 수도 있다.

대용량 에너지저장장치를 통해 증대되는 한계용량은 제주지역 전체 발전량에 비해 상당히 미비하다. 하지만 배터리의 장주기 충/방전 특성에 대한 연구가 계속해서 진행된다면, 제주지역의 풍력한계용량이 더욱 증대될 것이며, 출력제한량 또한 다량 감소될 것으로 기대된다. 그리고 대용량 저장장치는 침투부하를 완화시킬 뿐 아니라 부하 평준화에 큰 기여를 할 수 있으며, 빠른 응답특성을 가지고 있어 추가적인 예비력 확보가 가능하며 추가적인 발전기의 기동 및 건설을 줄임으로써 경제적으로도 많은 도움이 될 수 있어 이러한 운용을 한계운전 증대를 위한 운용과 병행 할 수 있는 운용이 계속해서 연구되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] 제주특별자치도, “안정적 전력공급방안 및 풍력발전 한계용량 증대방안 조사”, 2012. 02.
- [2] 문승일, “제주도 풍력발전의 한계운전 용량 산정과 활성화 방안”, 대한전기학회, 전기의 세계57권 제4호, 2008, pp.67~73
- [3] 송화창, 전력계통에서의 대용량 배터리 시스템의 장 주기 운용 방안, 2012.06. 전기의 세계 제61권 제4호
- [4] 고경남, 허종철 공역, “풍력공학 입문”, 문운당, 2002
- [5] 신용선, 우리나라 태양광과 풍력발전 현황 및 이용률 분석, 2011.10. 대한전기학회 전력기술부분 추계학술대회 논문집
- [6] 제주특별자치도, “제주해역의 풍력개발 입지환경 기초조사 및 분석”, 2012. 02.
- [7] Gilbert M. Masters, “WIND POWER SYSTEMS”, Renewable and Efficient Electric Power Systems, John Wiley & Sons, Inc., 2004, pp.307~383
- [8] 김형택, “풍력발전의 출력제한을 고려한 설비용량 증설 방안” 제주대학교 대학원, 석사학위 논문, 2011. 12.
- [9] H. Ibrahim, “Energy storage system - Charateristic and comparisons”, “Renewable and Sustainable Energy Reviews”, 12. 2008 / pp1243

- [10] John P.Barton and David G. Infield, Energy Storage and Its Use With Intermittent Renewable Energy, 2004.06, IEEE, p.441 ~ p. 448 Vol.19
- [11] Senjyu, T, “A technique for thermal and energy storage system unit commitment”, Power Engineering Society General Meeting, 2004, IEEE, p.601 ~ p. 606 Vol.1
- [12] 지식경제부, 제5차 전력수급기본계획, 2010.
- [13] 전력거래소, “제주지역 운영예비력 산정기준 연구(최종보고서)”, 2011. 04.



## 감사의 글

부푼 꿈을 안고 대학원에 들어와 꿈을 꾸며 살아 온지도 어느덧 2년의 세월이 흘러 아쉬운 졸업만을 남겨두고 있습니다. 아직은 이루어야 할 꿈이 많고, 좋은 사람들을 계속 보고 싶기에 이 아쉬움은 더욱 커지는 듯합니다.

우선 석사과정동안 부족한 저를 물심양면으로 지도해 주시고, 격려해주신 김세호 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 항상 자신의 제자라 생각하시고 지도와 격려를 아끼지 않으시며 크신 사랑 주신 좌종근 교수님, 오정보 교수님, 이개명 교수님, 김일환 교수님, 김호찬 교수님, 김호민 교수님께 진심으로 감사드립니다. 앞으로도 크신 가르침 가슴 깊이 새겨 열심히 살아가도록 하겠습니다. 저희 풍력대학원생 위해 언제나 앞장서주시고 항상 지켜봐주시는 허종철 교수님 그리고 풍력대학원 교수님들께도 감사의 말을 전합니다. 풍력대학원 행정실에서 저희를 위해 고생해 주시는 김익선 행정실장님, 이창립 선생님, 김봄솔 선생님, 이수미 선생님께 감사드립니다. 그리고 전기공학과를 위해 힘써 주시는 강지훈, 김윤희 조교선생님께도 감사드립니다. 풍력대학원 1기 선배님들 그리고 경민이를 비롯한 우리 2기 동기들 그리고 동우를 비롯한 후배님들께도 감사드립니다. 항상 웃으며 조언과 격려 아낌없이 주신 김도진 선배님, 부창진 선배님 감사드립니다. 계통연구실 선배님이자 저의 멘토를 자청해주신 형택이 형, 민이 형께 진심으로 감사드립니다. 나의 대학원 생활을 운택하게 해준 지형, 수형, 진이, 승현 그리고 대학원 생활동안 쉼터와 같았던 나의 오랜 벗 용준, 승준, 정훈, 주은, 승민, 성욱, 경표에게 항상 고마움과 감사함을 느낍니다. 그리고 제가 미처 언급하지 못한 사람들에게 감사하다는 말을 전합니다. 마지막으로 언제나 저를 믿고 묵묵히 지켜봐 주시며 헌신적으로 도와주신 아버지, 어머니, 누나 그리고 우리 동생에게 고맙고 사랑한다는 말을 전합니다. 앞으로 크신 가르침과 사랑을 바탕으로 열심히 그리고 베풀며 살아가도록 하겠습니다.

2012년 12월

명호산 올림