



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](#)

碩士學位論文

동북·북촌 풍력발전단지 출력 변동
저감을 위한 ESS 용량 산정

濟州大學校 産業大學院

風力工學科

姜 尙 賢

2017 年 8 月

동북·북촌 풍력발전단지 출력 변동
저감을 위한 ESS 용량 산정

指導教授 金 一 煥

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2017 年 8 月

姜尙賢의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ ①

委 員 _____ ①

委 員 _____ ①

濟州大學校 産業大學院

2017 年 8 月

Analyzing the Capacity of an ESS for
Mitigating the Fluctuations in the
Dongbok·Bukchon Wind Farm

Sang-Hyun Kang
(Supervised by professor Eel-Hwan Kim)

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

Department of Wind Energy Engineering
Graduate School of industry
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2017. 8.

- i -

목 차

그림 목차	iii
표 목차	iv
SUMMARY	v
1. 서 론	1
2. 동북·북촌 풍력발전단지 분당 변동률 분석	3
2.1 동북·북촌 풍력발전단지 현황	3
2.2 월별 분당 변동률 분석	3
3. 동북·북촌 풍력발전단지 ESS 용량 산정	22
3.1 분당 변동률 1% 기준	23
3.2 분당 변동률 5% 기준	25
3.3 분당 변동률 10% 기준	27
4. 결과 및 고찰	29
5. 결 론	31
참 고 문 헌	32

그림 목 차

그림 1 최대부하 시간 방전과 출력변동 저감을 위한 ESS 운용 방안	2
그림 2 2015년 11월 풍력발전 출력 및 분당 변동률	5
그림 3 2015년 11월 6일 10분 평균 풍속	5
그림 4 2015년 12월 풍력발전 출력 및 분당 변동률	6
그림 5 2015년 12월 3일 풍력발전설비 에러리스트	7
그림 6 2016년 1월 풍력발전 출력 및 분당 변동률	8
그림 7 2016년 2월 풍력발전 출력 및 분당 변동률	9
그림 8 2016년 3월 풍력발전 출력 및 분당 변동률	10
그림 9 2016년 4월 풍력발전 출력 및 분당 변동률	11
그림 10 2016년 5월 풍력발전 출력 및 분당 변동률	12
그림 11 2016년 6월 풍력발전 출력 및 분당 변동률	13
그림 12 2016년 7월 풍력발전 출력 및 분당 변동률	14
그림 13 2016년 7월 3일 10분 평균 풍속	15
그림 14 2016년 8월 풍력발전 출력 및 분당 변동률	16
그림 15 2016년 9월 풍력발전 출력 및 분당 변동률	17
그림 16 2016년 10월 풍력발전 출력 및 분당 변동률	18
그림 17 출력 계량점	22
그림 18 분당 변동률 1% 기준	24
그림 19 분당 변동률 5% 기준	26
그림 20 분당 변동률 10% 기준	28
그림 21 동북·북촌 풍력발전단지 ESS 구성도	29

표 목 차

표 1 동북·북촌 풍력발전단지 현황	3
표 2 동북·북촌 풍력발전단지 이용률 및 분당 변동률	19
표 3 동북·북촌 풍력발전단지 최대 분당 변동률 분석 결과	20
표 4 분당 변동률 제한치에 따른 ESS 용량	29
표 5 동북·북촌 풍력발전단지 ESS 세부 구성	30
표 6 ESS 비용 분석	30

SUMMARY

Many wind farms have been installed in Jeju. Wind power is, by nature, intermittent, so the power output from wind turbines may cause fluctuations in voltage and frequency to the power grid. The fluctuations in wind power output can be mitigated by use of an Energy Storage System (ESS).

This paper analyzes the capacity of an ESS for mitigating the fluctuations in the output power of the 30 MW Dongbok·Bukchon wind farm. The actual data for the output power of the Dongbok·Bukchon wind farm from November 2015 to October 2016 were used. The factors affecting the fluctuation rate of the wind power output were analyzed. These are the wind and the status of the wind turbine generator (WTG).

This paper proposes the capacity of the ESS, comprising a power conversion system (PCS) and a battery, needed to mitigate the fluctuations in output power from the Dongbok·Bukchon wind farm. The simulation was carried out by using the Matlab program using measured data from the Dongbok·Bukchon wind farm. The results indicate three situations in which the limit will be less than 1%, 5% and 10%, respectively.

1. 서 론

1992년에 체결된 유엔 기후변화협약은 전 세계적으로 신재생에너지에 대한 관심을 크게 높이는 계기가 되었다. 국내에서도 신재생에너지 개발을 위해 많은 노력을 기울이는 중이다. 정부는 제2차 에너지기본계획에서 2035년까지 신재생에너지 보급 목표로 11%, 제4차 신재생에너지 기본계획에서는 2012년 2.2%를 차지하는 풍력을 2035년까지 18.2%까지 육성하는 목표를 설정하고 있다[1][2]. 2015년 11월 파리 기후변화협약 총회에서는 제주를 신재생에너지로 100% 보급하는 ‘카본 프리 아일랜드’로 조성한다는 계획을 발표했다[3].

제주는 바람자원이 우수하여 신재생에너지원 중에서 풍력발전이 매우 각광받는 지역이다. 2015년 현재 제주에서 풍력, 태양광, 폐기물, 소수력 등 신재생에너지발전설비는 화력을 포함한 총 발전설비용량 중 33.5% (296.8 MW)로 구성되어 있으며 풍력이 72.6% (215.6 MW)로 대부분을 차지한다[4]. 제주특별자치도에서는 2011년에 발표한 제2차 국제자유도시종합계획에 해상풍력 조성사업을 포함했고 2012년에 제4차 제주에너지계획, 풍력발전종합관리계획을 수립하여 “카본 프리 아일랜드 제주 by 2030” 비전을 지향하고 있다. 이에 따라 2030년까지 육상풍력 450 MW, 해상풍력 1,950 MW 총 2.35 GW를 구축하는 계획을 수립했다.

제주특별자치도의 정책 목표 달성을 위해 풍력발전 용량이 지속적으로 증가한다면 고립된 전력계통과 더불어 간헐적인 출력과 난류 등에 의해 출력이 불안정하여 전력계통에 악영향을 끼칠 수 있다. 계통 안정도를 위해서는 풍력발전의 불안정한 출력의 보완이 필요하고 “제주특별자치도 풍력발전사업 허가 및 지구 지정 등에 관한 조례”에서 전력계통 안정 및 발전출력 신뢰도 향상을 위해 ESS (Energy Storage System) 설치를 요구할 수 있으며, 세부사항은 고시로 정하도록 명시하고 있다[5]. 제주특별자치도에서는 “풍력발전설비 출력안정용 에너지저장장치 시범구축사업”으로 2015년부터 3 MW 연안 풍력발전설비에 ESS 설비 (PCS 1.0 MW, 배터리 0.5 MWh) 실증사업을 진행하고 있다[6].

산업통상자원부 고시 제 2017-2호 “신·재생에너지 공급의무화제도 및 연료 혼합의무화제도 관리·운영지침”에서는 ESS 보급 장려를 위해 풍력설비와 연계된

ESS의 경우 풍력발전을 통해 생산된 에너지를 충전하여 최대부하 시간에 방전할 경우 공급인증서 가중치를 풍력설비에 연계시기 기준으로 2015년 5.5, 2016년 5.0, 2017년 4.5를 적용하고 있다[7].

따라서 향후 풍력발전단지 운용 시 ESS를 이용하여 출력 변동 저감과 경제성을 동시에 고려한다면 그림 1과 같이 출력안정화에 필요한 ESS 용량을 산정하여 할당하고 이를 제외한 배터리 용량은 최대부하 시간에 방전하여 REC (Renewable Energy Certificate) 가중치를 적용받음으로써 수익을 확보할 수 있다.

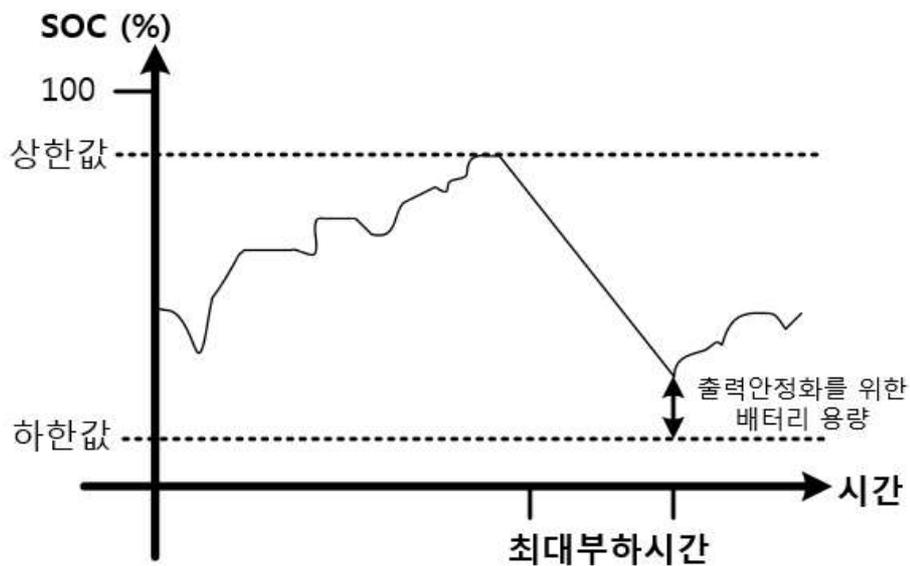


그림 1 최대부하 시간 방전과 출력변동 저감을 위한 ESS 운용 방안

본 논문에서는 2015년 11월부터 2016년 10월까지 동북·북촌풍력발전단지 실제 2초 주기 출력 데이터와 단지 내 기상탑 데이터를 활용하여 월별 분당 변동률과 풍속 변화를 분석했다. Matlab을 이용한 컴퓨터 해석을 통해 램프 비율 제어 수행 시 필요한 용량을 산정했는데 분당 변동률을 1%, 5%, 10%로 제한할 경우 동북·북촌풍력발전단지 출력 변동 저감을 위한 ESS 용량을 제시한다.

2. 동북·북촌 풍력발전단지 분당 변동률 분석

2.1 동북·북촌 풍력발전단지 현황

동북·북촌 풍력발전단지는 제주에너지공사가 풍력자원의 공공적 관리 정책에 부응하고자 제주시 구좌읍 동북리 산 56번지 일대에 조성되었고 2014년 8월에 착공하여 2015년 8월에 준공했고 표 1과 같이 총 30 MW 용량으로 2 MW 풍력발전설비 15기가 설치되었다.

표 1 동북·북촌 풍력발전단지 현황

풍력발전단지 현황	
용량	30 MW
대수	2 MW, 15기
풍력발전설비 제원	
타입	수평축, Up-wind
정격용량	2 MW
클래스	IEC II -A
발전기 타입	DFIG (Doubly Fed Induction Generator)
정격 RPM	1,440 rpm

2.2 월별 분당 변동률 분석

본 논문에서는 2015년 11월부터 2016년 10월까지 2초 주기의 동북·북촌 풍력발전단지 출력 데이터를 통하여 분당 변동률을 분석했다. 분당 변동률 계산에 사용된 식은 [8]-[10]을 참고하여 식 (1)과 같이 계산했으며, 모든 시점에 적용될 수 있도록 2초 주기로 이동하여 계산했다.

$$f_r = \frac{f_{\max}(P_{t-58} : P_t) - f_{\min}(P_{t-58} : P_t)}{C_w} \times 100 \quad (1)$$

(단 t 는 2초 주기일 때)

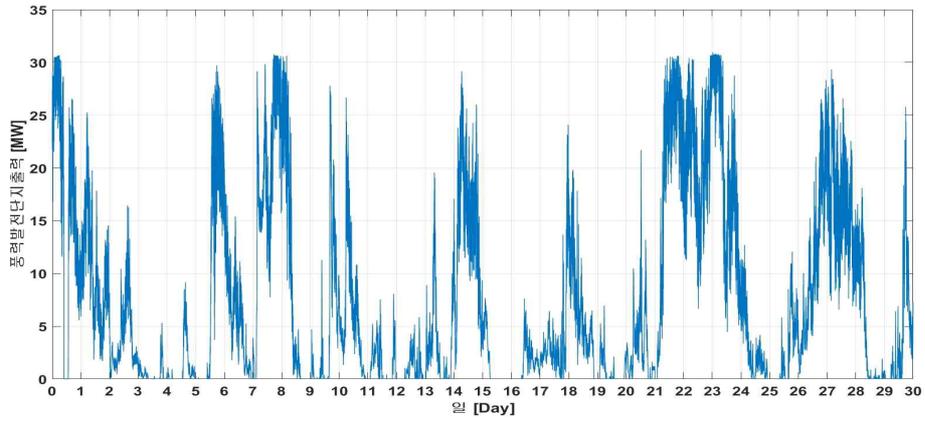
여기서, f_r : 풍력발전 출력 분당 변동률

$f_{\max}(P_{t-58} : P_t)$: $t-58$ 부터 t 초까지의 풍력발전 출력 최대치 [MW]

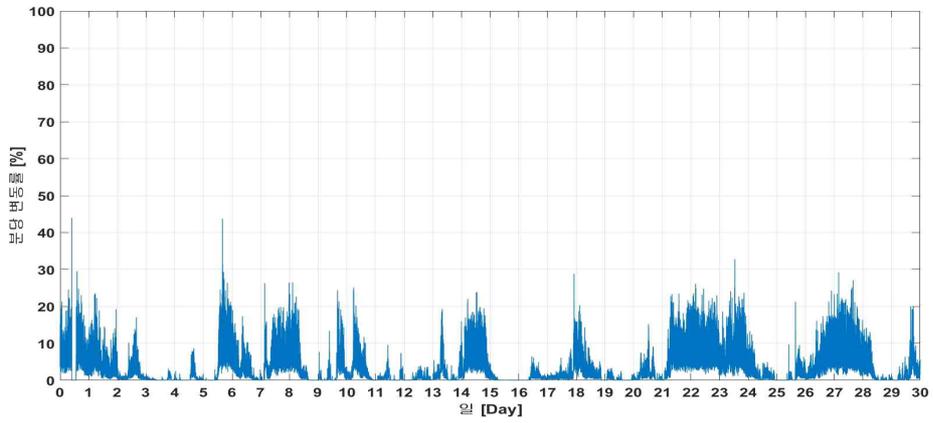
$f_{\min}(P_{t-58} : P_t)$: $t-58$ 부터 t 초까지의 풍력발전 출력 최소치 [MW]

C_w : 풍력발전단지 용량 [MW]

그림 2(a)는 2015년 11월의 동북·북촌 풍력발전단지의 출력이며 해당 월의 이용률은 17.5%를 기록했다. 그림 2(b)는 그림 2(a)의 출력에 대한 2초 주기 분당 변동률 계산 결과를 나타낸다. 이때 최대 분당 변동률은 11월 6일에 43.9%를 기록했으며, 월평균 분당 변동률은 3.8%로 나타났다. 그림 3은 11월 6일 10분 평균 풍속을 나타낸다. 20시 00분~20시 10분 8.8 m/s, 20시 10분~20시 20분 15.1 m/s, 20시 20분~20시 30분 8.6 m/s를 기록했고 20시 20분~20시 30분 사이에 측정된 최고풍속은 15.2 m/s이고 최저풍속은 3.3 m/s로 11.9 m/s의 차이가 발생하면서 풍속의 급격한 변화가 있었음을 알 수 있다.



(a) 풍력발전 출력



(b) 분당 변동률

그림 2 2015년 11월 풍력발전 출력 및 분당 변동률

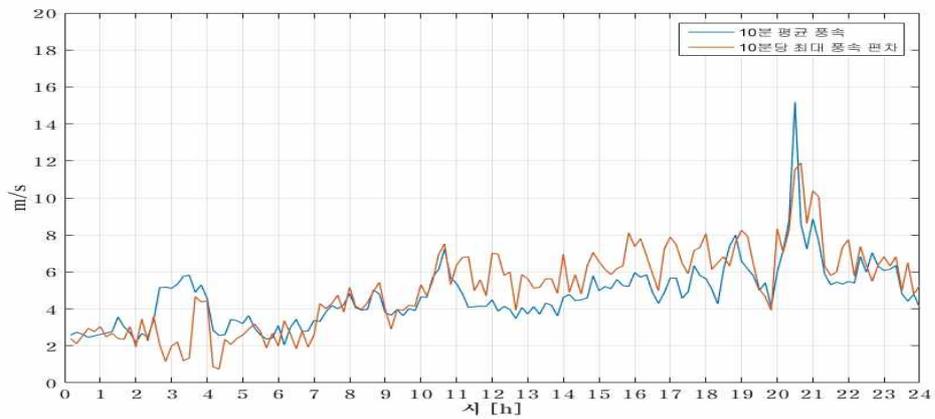
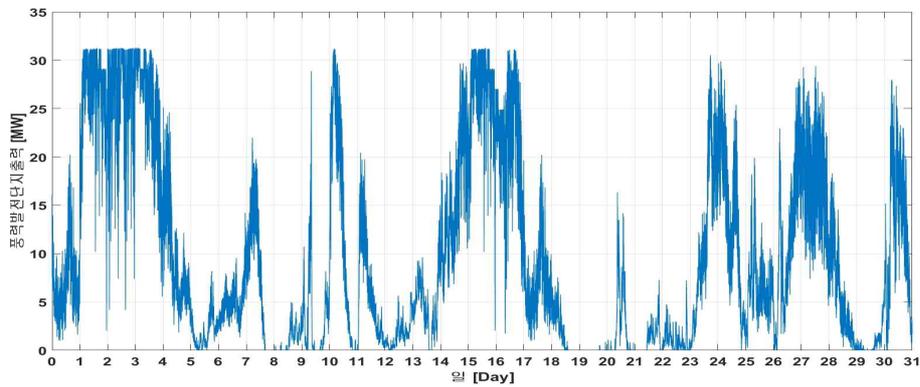
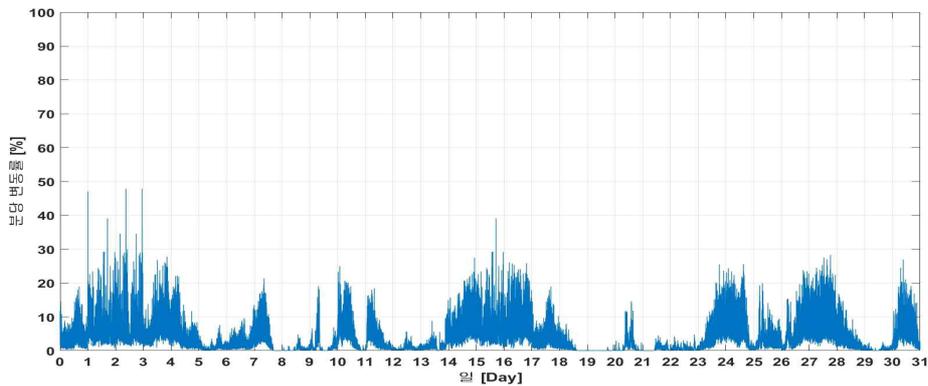


그림 3 2015년 11월 6일 10분 평균 풍속

그림 4(a)는 2015년 12월의 동북·북촌 풍력발전단지의 출력이며 해당 월의 이용률은 28.6%를 기록했다. 그림 4(b)는 그림 4(a)의 출력에 대한 2초 주기 분당 변동률 계산 결과를 나타낸다. 이때 최대 분당 변동률은 12월 3일에 47.9%를 기록했으며, 월평균 분당 변동률은 3.2%로 나타났다. 12월 3일은 풍력발전설비 cut-out 풍속인 25.0 m/s를 넘는 경우가 있었고 그림 5와 같이 풍력발전설비는 3초 평균 풍속이 27.0 m/s 이상이면 발생하는 에러인 'Wind >> max'에 의해 정지되거나 급격한 풍속 변화로 발전기 회전이 제한 속도보다 높은 경우 발생하는 에러인 '(G)oversp. operation' 등으로 정지되었다. 강풍에서 풍력발전설비들은 정격으로 회전하다가 돌풍 등에 의해 자동으로 정지됨으로써 분당 변동률에 영향을 주었다.



(a) 풍력발전 출력



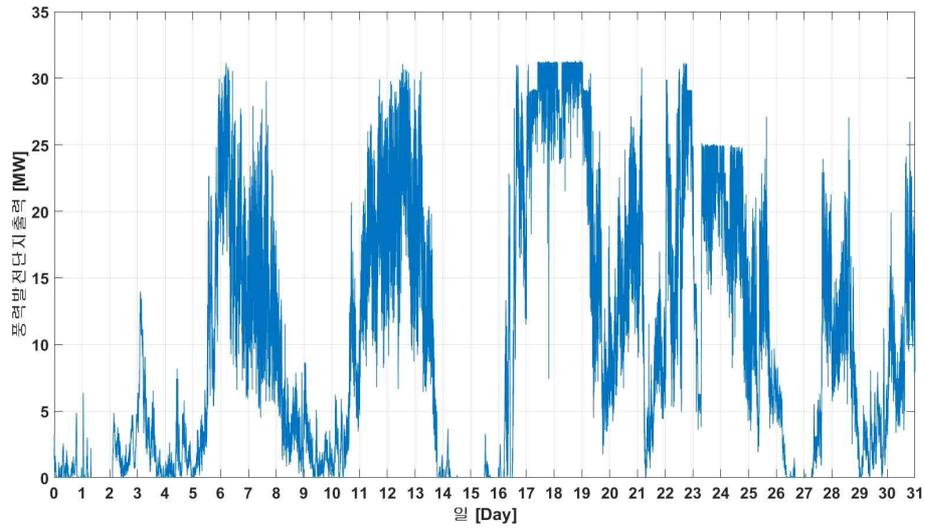
(b) 분당 변동률

그림 4 2015년 12월 풍력발전 출력 및 분당 변동률

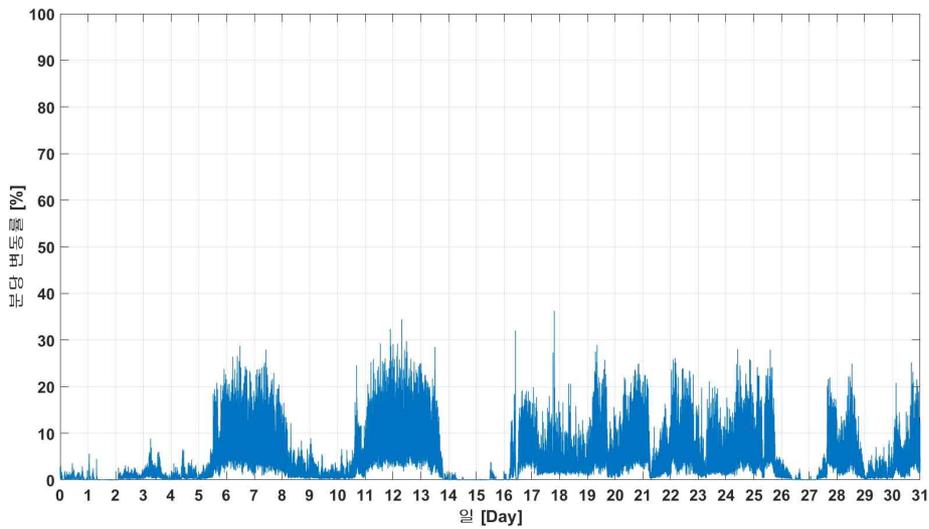
Set Time	Clear Time	Status code	Description
2015-12-03 .335#01 오후 08:31	2015-12-03 .335#02 오후 08:31 0		System OK
2015-12-03 .405 오후 08:30:55	2015-12-03 .305 오후 08:31:16	251	Wind >> max.
2015-12-03 .405 오후 08:30:40	2015-12-03 .705 오후 08:30:52	251	Wind >> max.
2015-12-03 .735#01 오후 07:48	2015-12-03 .735#02 오후 07:48 0		System OK
2015-12-03 .405 오후 07:48:18	2015-12-03 .705 오후 07:48:41	251	Wind >> max.
2015-12-03 .495#01 오후 07:33	2015-12-03 .495#02 오후 07:33 0		System OK
2015-12-03 .405 오후 07:33:31	2015-12-03 .405 오후 07:33:44	251	Wind >> max.
2015-12-03 .555#01 오후 07:25	2015-12-03 .555#02 오후 07:25 0		System OK
2015-12-03 .405 오후 07:25:19	2015-12-03 .005 오후 07:25:35	251	Wind >> max.
2015-12-03 .855#01 오후 07:09	2015-12-03 .855#02 오후 07:09 0		System OK
2015-12-03 .505 오후 07:09:08	2015-12-03 .405 오후 07:09:29	251	Wind >> max.
2015-12-03 .035#01 오후 06:47	2015-12-03 .035#02 오후 06:47 0		System OK
2015-12-03 .405 오후 06:47:18	2015-12-03 .006 오후 06:47:43	251	Wind >> max.
2015-12-03 .435#01 오후 02:11	2015-12-03 .435#02 오후 02:11 0		System OK
2015-12-03 .405 오후 02:11:23	2015-12-03 .405 오후 02:11:30	251	Wind >> max.
2015-12-03 .435#01 오후 02:10	2015-12-03 .435#02 오후 02:10 0		System OK
2015-12-03 .405 오후 02:10:10	2015-12-03 .405 오후 02:10:21	251	Wind >> max.
2015-12-03 .405 오후 02:09:59	2015-12-03 .405 오후 02:10:01	251	Wind >> max.
2015-12-03 .735#01 오후 01:24	2015-12-03 .735#02 오후 01:24 0		System OK
2015-12-03 .405 오후 01:24:17	2015-12-03 .405 오후 01:24:20	251	Wind >> max.
2015-12-03 .955#01 오후 12:18	2015-12-03 .955#02 오후 12:18 0		System OK
2015-12-03 .505 오후 12:18:24	2015-12-03 .405 오후 12:18:27	251	Wind >> max.
2015-12-03 .405 오후 12:18:08	2015-12-03 .405 오후 12:18:13	251	Wind >> max.
2015-12-03 .155#01 오전 08:11	2015-12-03 .155#02 오전 08:11 0		System OK
2015-12-03 .985 오전 08:08:35	2015-12-03 .122#03 오전 08:11 311		Rotor overspeed
2015-12-03 .808 오전 08:08:35	2015-12-03 .122#02 오전 08:11 346		(G)oversp. operation
2015-12-03 .805 오전 08:08:35	2015-12-03 .122#01 오전 08:11 312		(G) overspeed

그림 5 2015년 12월 3일 풍력발전설비 에러리스트

그림 6(a)는 2016년 1월의 동북·북촌 풍력발전단지의 출력이며 해당 월의 이용률은 34.0%를 기록했다. 그림 6(b)는 그림 6(a)의 출력에 대한 2초 주기 분당 변동률 계산 결과를 나타낸다. 이때 최대 분당 변동률은 1월 18일에 36.3%를 기록했으며, 월평균 분당 변동률은 4.2%로 나타났다. 1월 18일 일평균 풍속은 16.0 m/s으로 풍력발전설비 정격풍속인 12.5 m/s 이상으로 기록되었다.



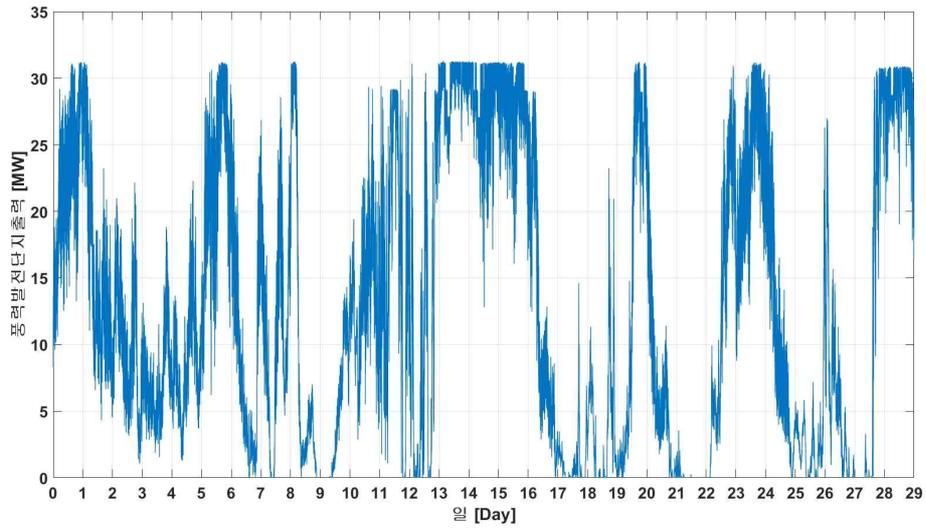
(a) 풍력발전 출력



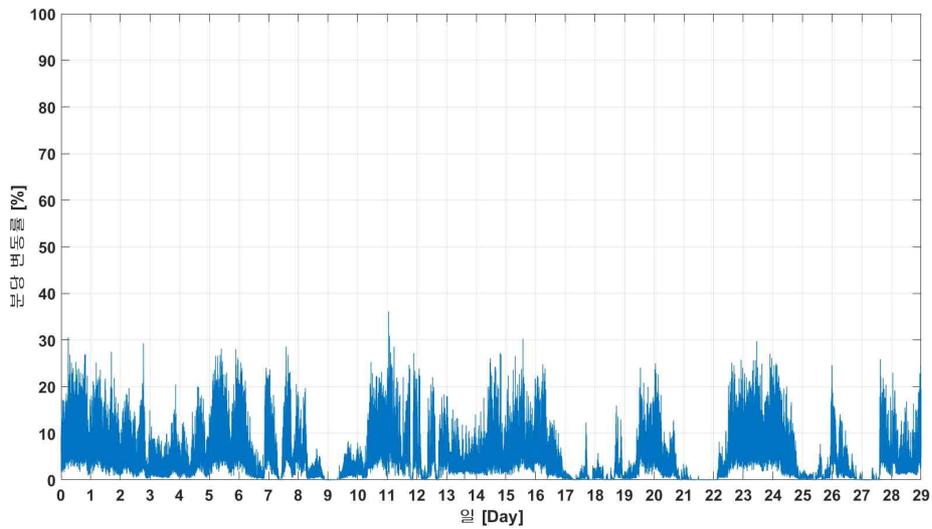
(b) 분당 변동률

그림 6 2016년 1월 풍력발전 출력 및 분당 변동률

그림 7(a)는 2016년 2월의 동북·북촌 풍력발전단지의 출력이며 해당 월의 이용률은 42.8%를 기록했다. 그림 7(b)는 그림 7(a)의 출력에 대한 2초 주기 분당 변동률 계산 결과를 나타낸다. 이때 최대 분당 변동률은 2월 12일에 36.1%를 기록했으며, 월평균 분당 변동률은 4.7%로 나타났다.



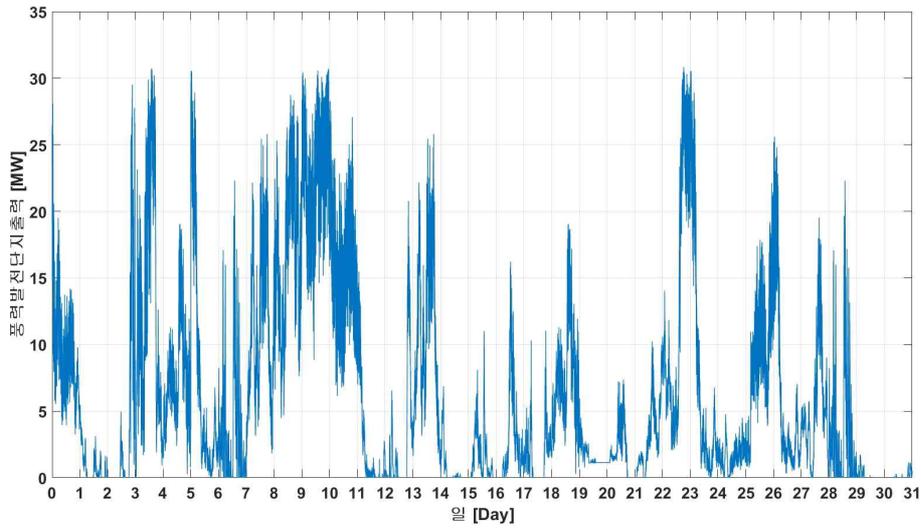
(a) 풍력발전 출력



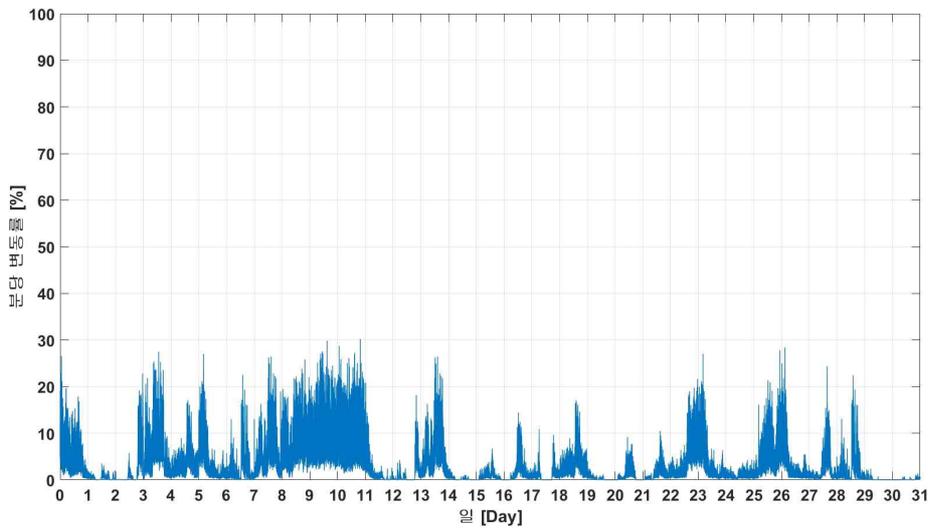
(b) 분당 변동률

그림 7 2016년 2월 풍력발전 출력 및 분당 변동률

그림 8(a)는 2016년 3월의 동북·북촌 풍력발전단지의 출력이며 해당 월의 이용률은 19.8%를 기록했다. 그림 8(b)는 그림 8(a)의 출력에 대한 2초 주기 분당 변동률 계산 결과를 나타낸다. 이때 최대 분당 변동률은 3월 11일에 30.2%를 기록했으며, 월평균 분당 변동률은 2.9%로 나타났다.



(a) 풍력발전 출력

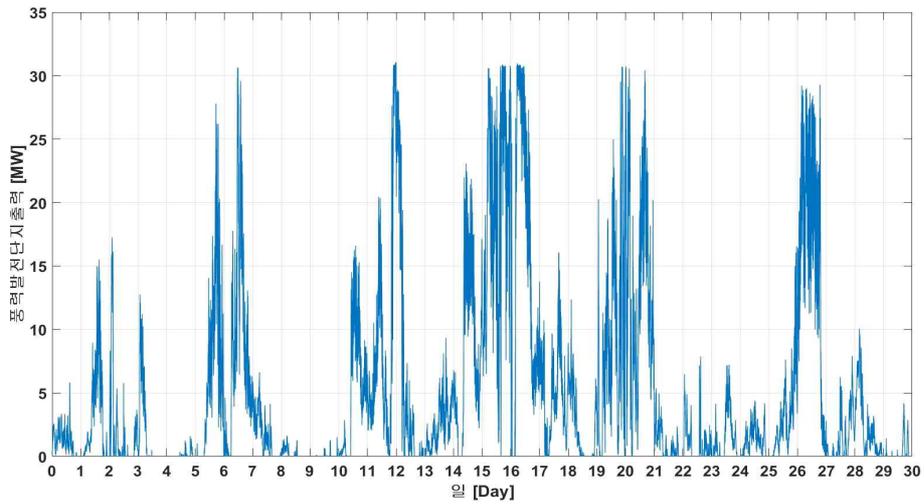


(b) 분당 변동률

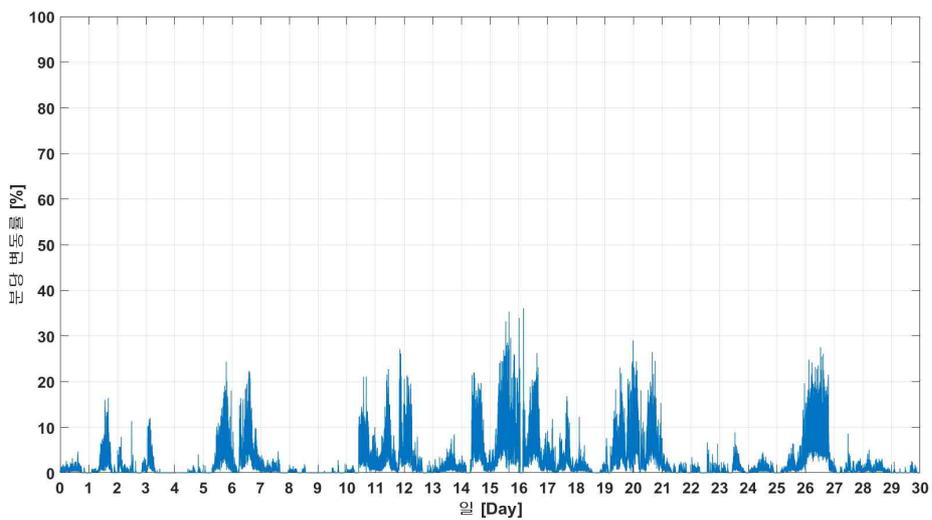
그림 8 2016년 3월 풍력발전 출력 및 분당 변동률

그림 9(a)는 2016년 4월의 동북·북촌 풍력발전단지의 출력이며 해당 월의 이용률은 16.1%를 기록했다. 그림 9(b)는 그림 9(a)의 출력에 대한 2초 주기 분당 변동률 계산 결과를 나타낸다. 이때 최대 분당 변동률은 4월 17일에 36.1%를 기록했으며, 월평균 분당 변동률은 2.2%로 나타났다. 4월 17일에는 풍력발전설비가

메인샤프트 방향 또는 직각 방향으로 진동이 감지되는 경우 발생하는 ‘WP4084 xxx’에러에 의해 풍력발전설비가 정지되고 일정 시간이 지나면 자동으로 리셋 되는 경우가 있었다.



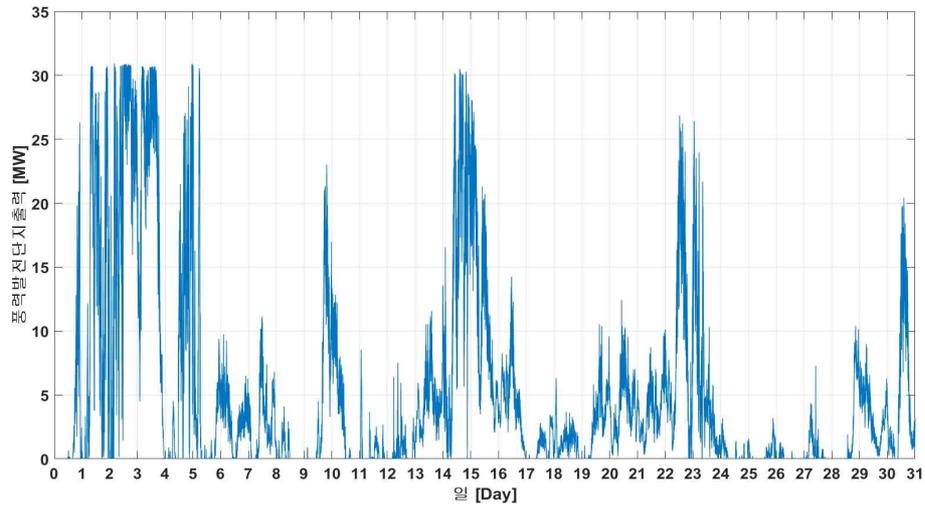
(a) 풍력발전 출력



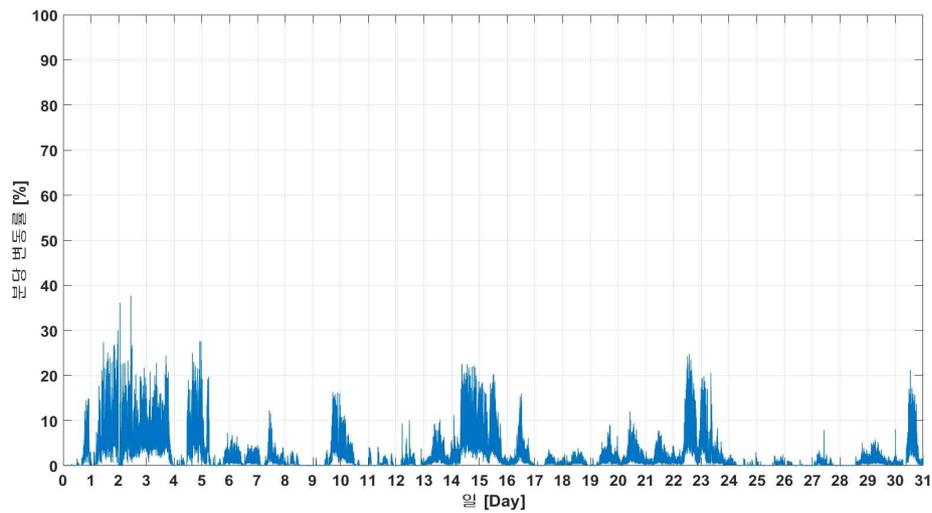
(b) 분당 변동률

그림 9 2016년 4월 풍력발전 출력 및 분당 변동률

그림 10(a)는 2016년 5월의 동북·북촌 풍력발전단지의 출력이며 해당 월의 이용률은 16.1%를 기록했다. 그림 10(b)는 그림 10(a)의 출력에 대한 2초 주기 분당 변동률 계산 결과를 나타낸다. 이때 최대 분당 변동률은 5월 3일에 37.7%를 기록했으며, 월평균 분당 변동률은 2.2%로 나타났다.



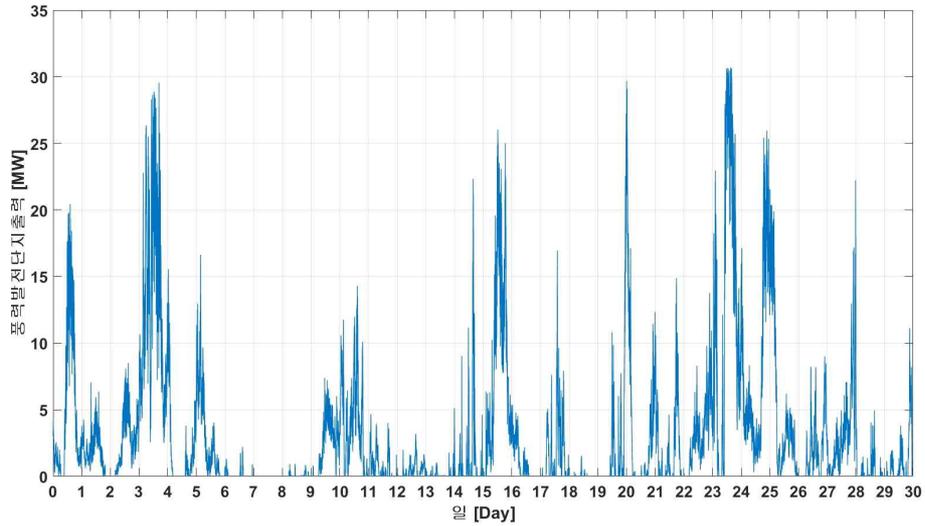
(a) 풍력발전 출력



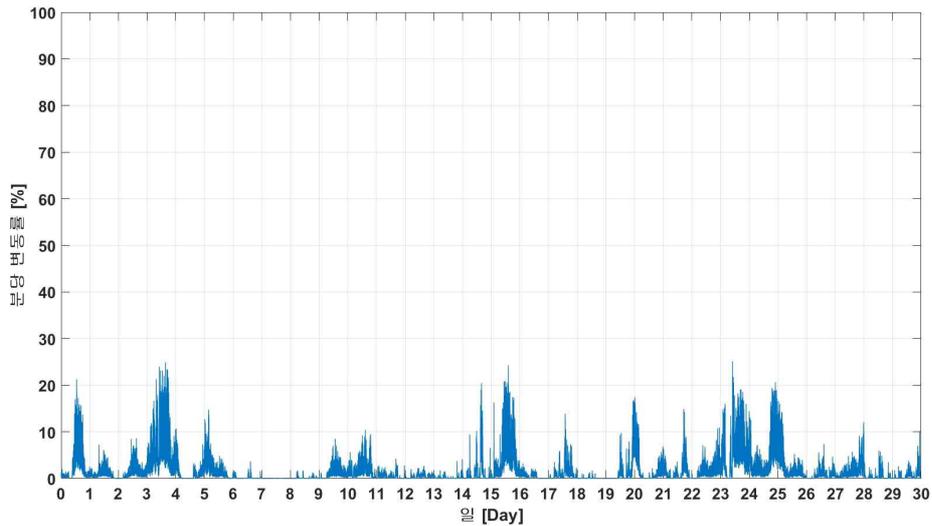
(b) 분당 변동률

그림 10 2016년 5월 풍력발전 출력 및 분당 변동률

그림 11(a)는 2016년 6월의 동북·북촌 풍력발전단지의 출력이며 해당 월의 이용률은 9.9%를 기록했다. 그림 11(b)는 그림 11(a)의 출력에 대한 2초 주기 분당 변동률 계산 결과를 나타낸다. 이때 최대 분당 변동률은 6월 24일에 25.1%를 기록했으며, 월평균 분당 변동률은 2.0%로 나타났다.



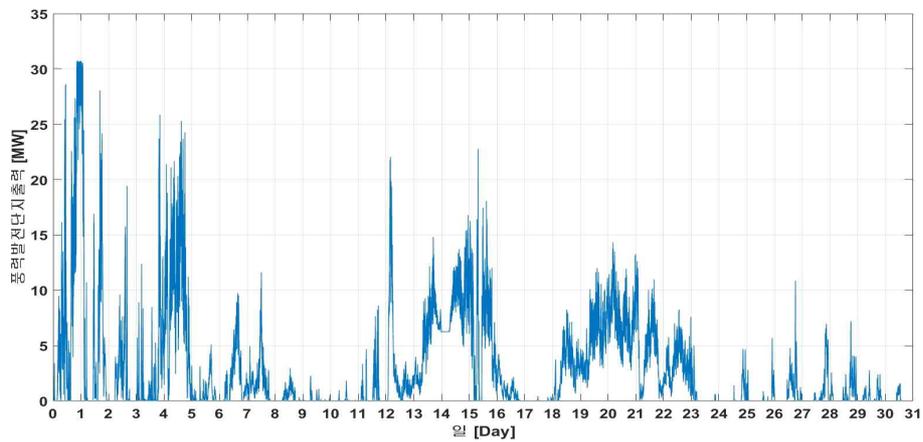
(a) 풍력발전 출력



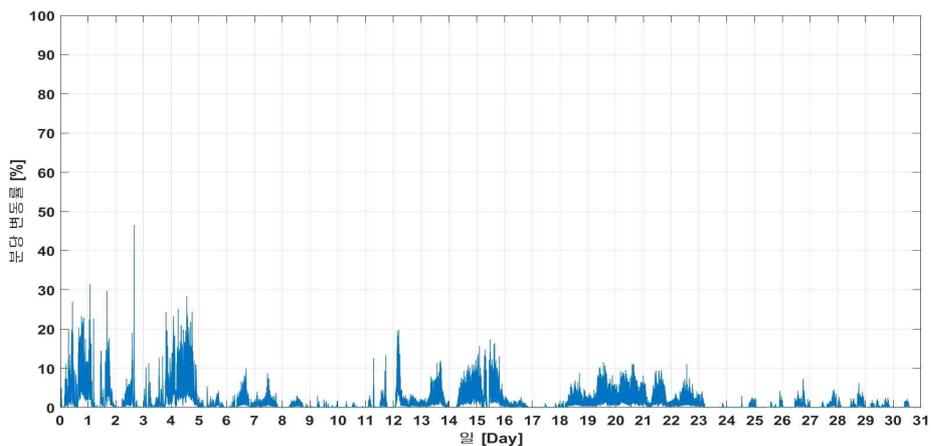
(b) 분당 변동률

그림 11 2016년 6월 풍력발전 출력 및 분당 변동률

그림 12(a)는 2016년 7월의 동북·북촌 풍력발전단지의 출력이며 해당 월의 이용률은 8.9%를 기록했다. 그림 12(b)는 그림 12(a)의 출력에 대한 2초 주기 분당 변동률 계산 결과를 나타낸다. 이때 최대 분당 변동률은 7월 3일에 46.8%를 기록했으며, 월평균 분당 변동률은 1.4%로 나타났다. 그림 13과 같이 7월 3일 평균 풍속은 3.6 m/s이고 14시 00분~14시 10분 사이에 최고풍속과 최저풍속의 차이는 9.8 m/s를 기록했다. 15시 50분~16시 00분에는 3.1 m/s로 cut-in 풍속인 3.5 m/s보다 낮았으나 16시 00분~16시 10분에는 8.6 m/s로 증가되었다.



(a) 풍력발전 출력



(b) 분당 변동률

그림 12 2016년 7월 풍력발전 출력 및 분당 변동률

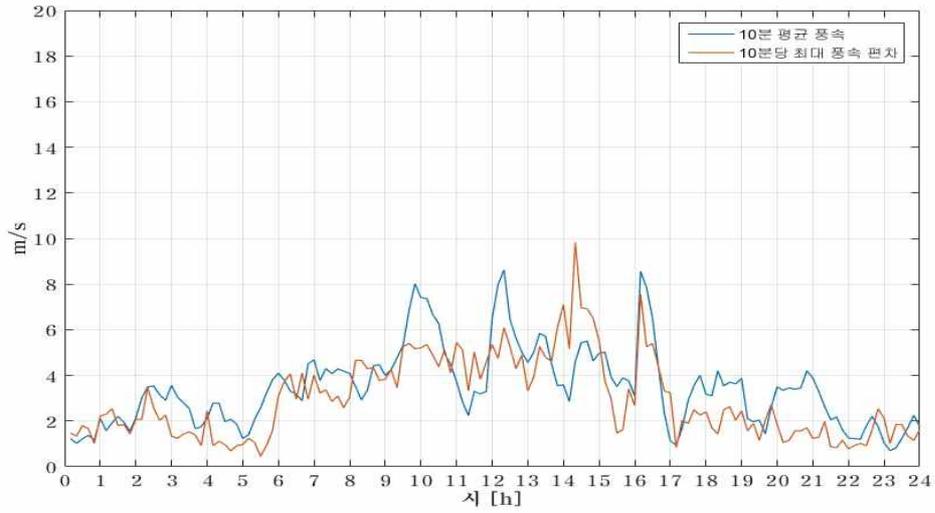
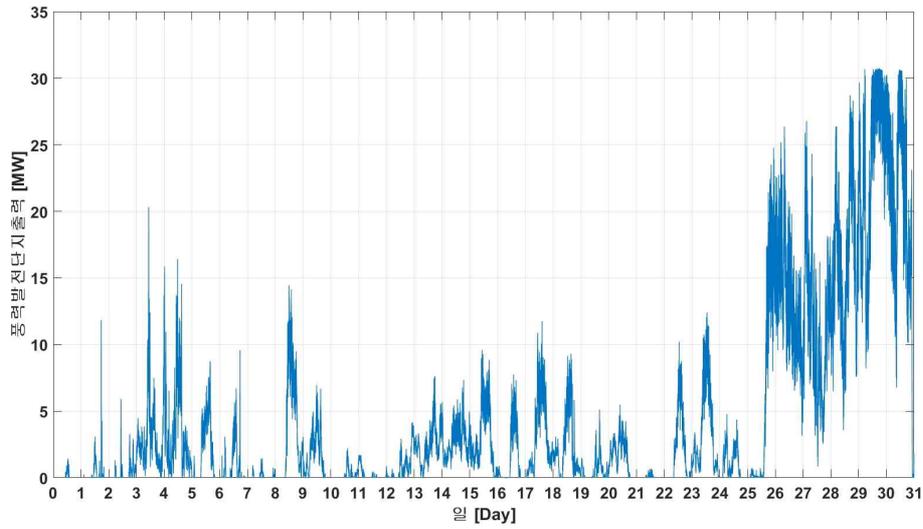
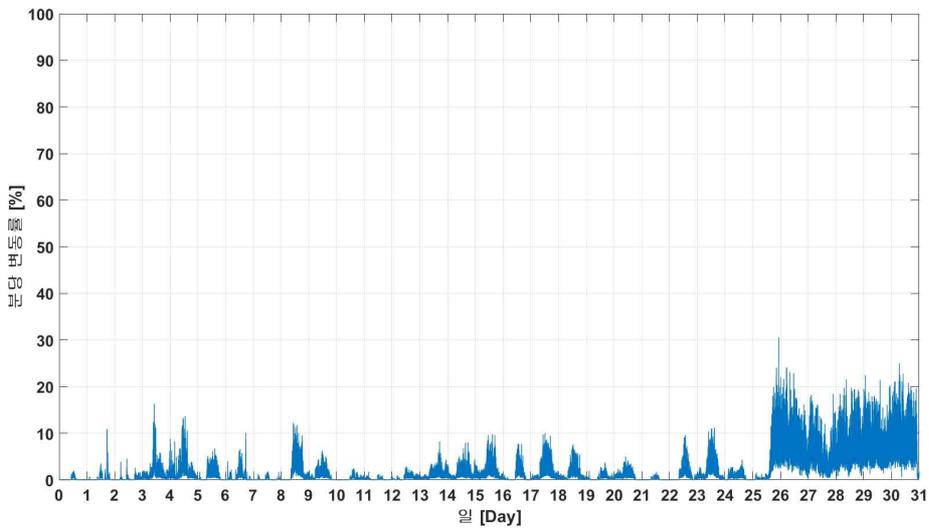


그림 13 2016년 7월 3일 10분 평균 풍속

그림 14(a)는 2016년 8월의 동북·북촌 풍력발전단지의 출력이며 해당 월의 이용률은 13.7%를 기록했다. 그림 14(b)는 그림 14(a)의 출력에 대한 2초 주기 분당 변동률 계산 결과를 나타낸다. 이때 최대 분당 변동률은 8월 26일에 30.5%를 기록했으며, 월평균 분당 변동률은 3.2%로 나타났다.



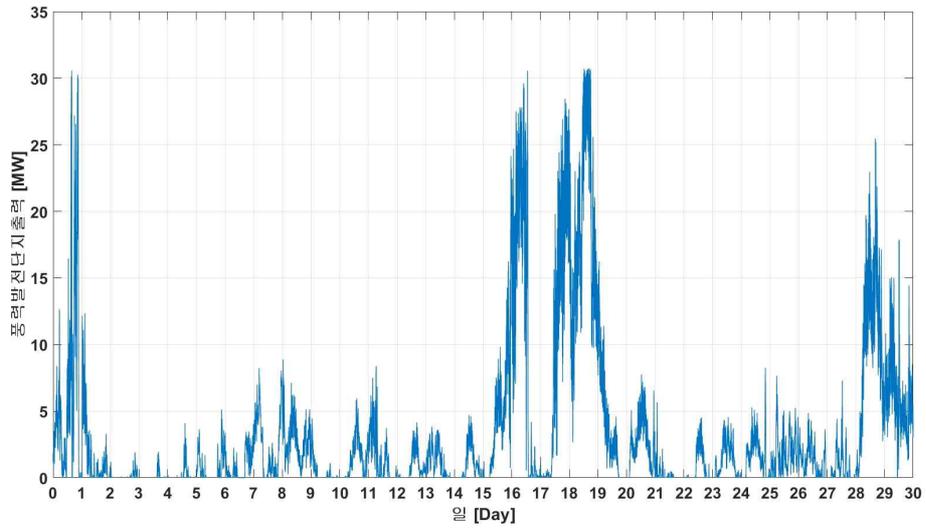
(a) 풍력발전 출력



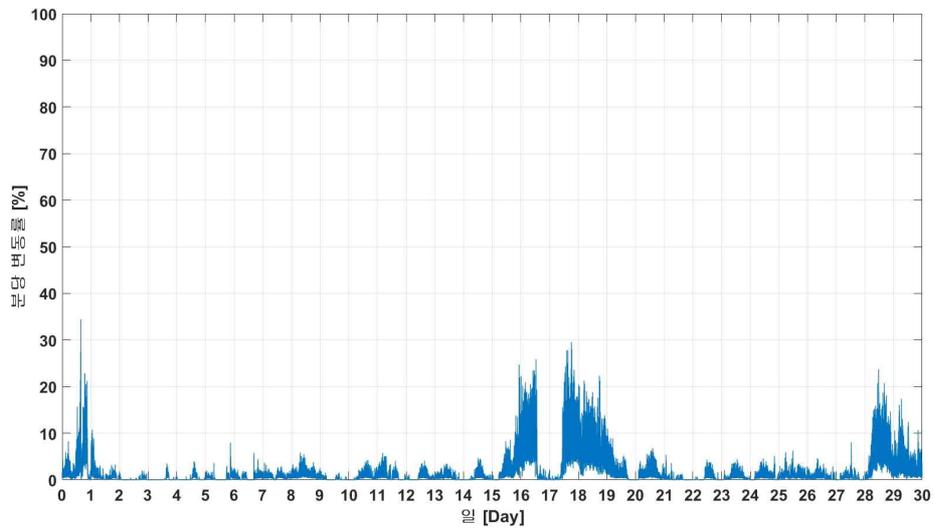
(b) 분당 변동률

그림 14 2016년 8월 풍력발전 출력 및 분당 변동률

그림 15(a)는 2016년 9월의 동북·북춘 풍력발전단지의 출력이며 해당 월의 이용률은 10.2%를 기록했다. 그림 15(b)는 그림 15(a)의 출력에 대한 2초 주기 분당 변동률 계산 결과를 나타낸다. 이때 최대 분당 변동률은 9월 1일에 34.4%를 기록했으며, 월평균 분당 변동률은 2.6%로 나타났다.



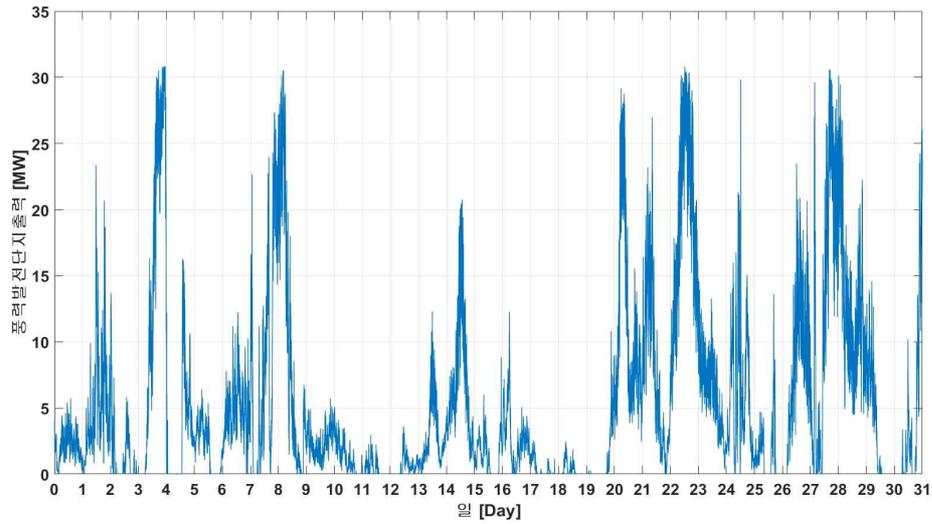
(a) 풍력발전 출력



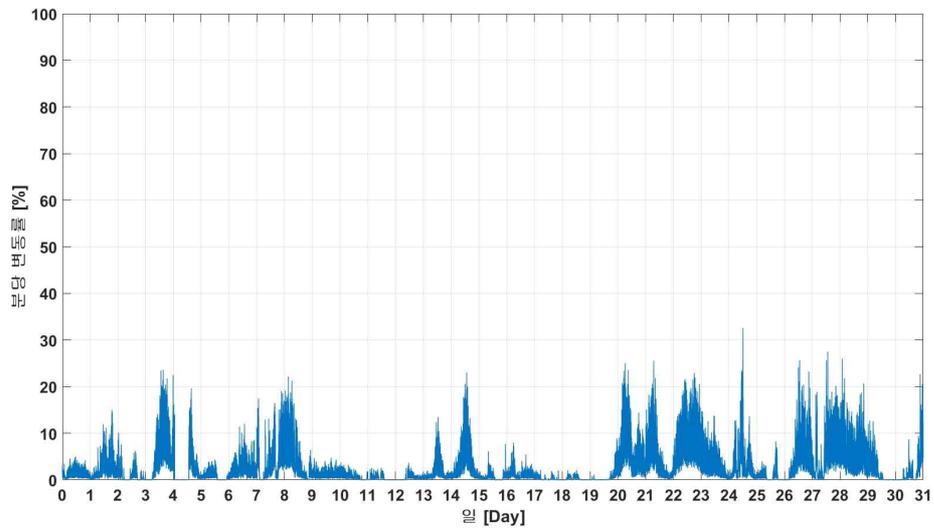
(b) 분당 변동률

그림 15 2016년 9월 풍력발전 출력 및 분당 변동률

그림 16(a)는 2016년 10월의 동북·북촌 풍력발전단지의 출력이며 해당 월의 이용률은 17.0%를 기록했다. 그림 16(b)는 그림 16(a)의 출력에 대한 2초 주기 분당 변동률 계산 결과를 나타낸다. 이때 최대 분당 변동률은 10월 25일에 32.6%를 기록했으며, 월평균 분당 변동률은 2.3%로 나타났다.



(a) 풍력발전 출력



(b) 분당 변동률

그림 16 2016년 10월 풍력발전 출력 및 분당 변동률

표 2는 2015년 11월부터 2016년 10월까지 1년간 동북·북촌 풍력발전단지의 이용률과 분당 변동률 분석 결과를 나타낸다. 월평균 분당 변동률은 1.4~4.7%를 기록했고 2015년 11월부터 2016년 2월까지 이용률이 높았을 때 월평균 분당 변동률이 다른 기간에 비해 비교적 높게 나타났고 2016년 8월은 이용률은 높지는 않았으나 8월 27일부터 8월 31일까지 일평균 풍속이 10.0 m/s를 넘으면서 특정

기간 출력이 높을 때 분당 변동률이 높게 나타났다. 월평균 분당 변동률은 5.0% 이상을 기록한 적이 없었으나 최대 분당 변동률은 25.1~47.9%까지 나타나면서 특정시간에 출력 변동이 컸음을 알 수 있다.

표 2 동북·북촌 풍력발전단지 이용률 및 분당 변동률

구분	이용률 (%)	월평균 분당 변동률 (%)	최대 분당 변동률 (%)
2015년 11월	17.5	3.2	43.9
2015년 12월	28.6	3.8	47.9
2016년 1월	34.0	4.2	36.3
2016년 2월	42.8	4.7	36.1
2016년 3월	19.8	2.9	30.2
2016년 4월	16.1	2.2	36.1
2016년 5월	16.1	2.2	37.7
2016년 6월	9.9	2.0	25.1
2016년 7월	8.9	1.4	46.8
2016년 8월	13.7	3.2	30.5
2016년 9월	10.2	2.6	34.4
2016년 10월	17.0	2.4	32.6

표 3은 최대 분당 변동률이 높았던 2015년 11월 6일, 2015년 12월 3일, 2016년 7월 3일 당시 풍속 및 풍력발전설비 상태를 나타낸다. 2015년 11월 6일은 20시 00분~20시 30분 사이에는 8.8 m/s이었던 풍속이 15.2 m/s로 증가되었다. 최대 분당 변동률 47.9%로 가장 높은 수치를 기록했던 2015년 12월 3일은 풍속이 cut-out 풍속인 25.0 m/s를 초과하는 바람이 불면서 풍력발전설비들이 정지 및 자동 리셋을 반복했다. 2016년 7월 3일은 14시 00분~14시 10분 평균풍속은 4.6 m/s였으나 최고풍속과 최저풍속의 차이는 9.8 m/s를 기록했다. 15시 50분~16시

10분에는 발전을 하지 않는 풍속 3.1 m/s에서 8.6 m/s로 급격히 증가함으로써 분당 변동률이 높게 나타났음을 알 수 있다. 풍력발전 출력은 식 (2)와 같이 풍속의 3제곱에 비례함으로써 풍속에 많은 영향을 받는다[11]-[15].

표 3 동북·북촌 풍력발전단지 최대 분당 변동률 분석 결과

구분	최대 분당 변동률(%)	분석 결과
2015년 11월 6일	43.9	20:00~20:10 : 풍속 8.8 m/s 20:10~20:20 : 풍속 15.2 m/s → 풍속의 급격한 변화가 있는 경우
2015년 12월 3일	47.9	풍속이 25.0 m/s를 넘어서는 강풍과 돌풍 등으로 풍력발전설비는 ‘oversp. operation’와 ‘Wind >> max’ 에러로 정지 및 리셋 반복됨 → 강풍에서 풍력발전설비가 자동 정지하는 경우
2016년 7월 3일	46.8	14:00~14:10 : 풍속편차(최고치-최저치) 9.8 m/s 15:50~16:10 : 풍속 3.1 m/s에서 8.6 m/s으로 증가 → 풍속의 급격한 변화가 있는 경우

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p(\beta, \lambda) \quad (2)$$

여기서, P : 풍력발전 출력 [W]

ρ : 공기밀도 [kg/m^3]

A : 회전면적 [m^2]

V : 풍속 [m/s]

C_p : 출력계수

β : 블레이드 피치각 [rad]

λ : 주속비

따라서 동북·북촌 풍력발전단지 내 분당 변동률이 높게 나타났던 원인은 풍속의 급격한 변화와 강풍에서 정격출력으로 운전되고 있던 풍력발전설비들이 자동 정지되는 경우로 분류할 수 있었다.

3. 동북·북촌 풍력발전단지 ESS 용량 산정

본 논문에서는 동북·북촌 풍력발전단지의 출력 변동 저감을 위한 ESS 용량을 산정하기 위해 1년간 분석한 분당 분당변동률 중 최대 분당 변동률을 기록하여 변동이 가장 심했던 구간인 2015년 12월 2일 12시부터 3일 12시를 기준으로 24시간 컴퓨터 모의 해석을 수행했다.

컴퓨터 해석은 식 (3)-(5)와 같이 분당 변동률 개선을 위해 샘플링 타임을 기준으로 풍력발전단지 출력의 기울기를 ESS의 충·방전을 통해 제어하는 램프 비율 제어 알고리즘을 사용했다[16][17]. 알고리즘의 상세 동작은 제주 행원 연안풍력 실증 시 사용된 배터리의 SOC (State of Charge)를 추종하며 풍력발전단지의 출력을 제어하는 알고리즘과 동일하게 적용했다[18].

컴퓨터 해석 시 PCS (Power Conversion System)와 배터리의 SOC 제한치를 두지 않고 해석하여, PCS는 출력의 절대치의 최대치로 산정했다. 배터리는 현재 동북·북촌 풍력발전단지에 설치되어 있는 배터리 용량인 18.0 MWh 기준으로 SOC 최대치와 최소치의 차를 통해 용량을 산정했다. 초기 SOC는 충·방전을 고려하여 0.5로 가정했다. 이때 식(4)의 L 이 나타내는 제한 분당 변동률의 경우 현재 명확한 기준이 없으므로 1%, 5%, 10%로 구분했다. 컴퓨터 해석 결과는 풍력발전 출력, 합성 출력, ESS 출력으로 나타냈으며 계량점은 그림 17와 같다.

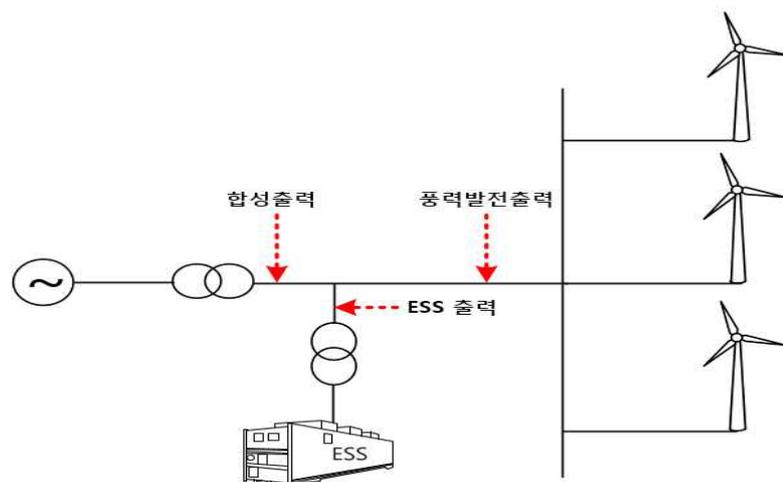


그림 17 출력 계량점

$$\Delta P = P_t - (P_{t-t_s} + E_{t-t_s}) \quad (3)$$

$$R_t = L \times \frac{1}{100} \times C_w / (60/t_s) \quad (4)$$

$$E_t = \begin{cases} \Delta P - R_t, & \frac{\Delta P}{t_s} > R_t \\ \Delta P + R_t, & \frac{\Delta P}{t_s} < -R_t \\ 0, & -R_t \leq \frac{\Delta P}{t_s} \leq R_t \end{cases} \quad (5)$$

여기서, ΔP : 샘플링 시간 동안 출력변화량 [MW]

P_t : t 초에서의 풍력발전 출력

t_s : 샘플링 시간 (2초)

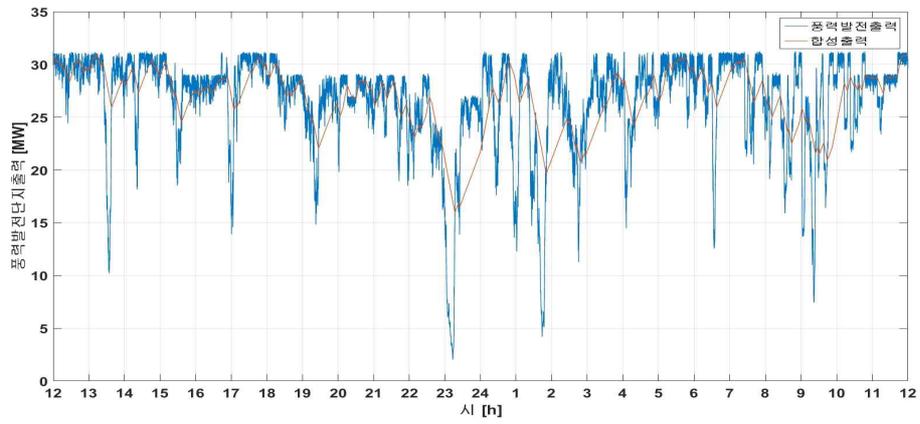
R_t : 풍력발전 출력 기울기 제한치 [MW]

L : 출력변동 제한률 [%]

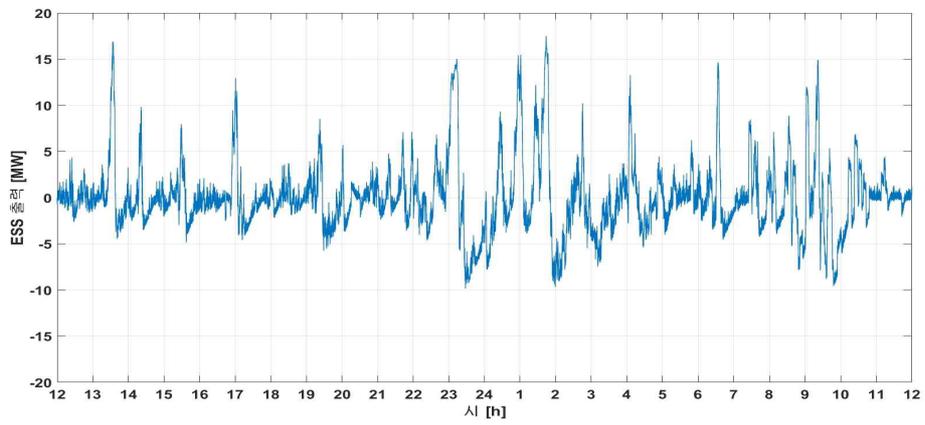
E_t : t 초에서의 ESS 출력 [MW]

3.1 분당 변동률 1% 기준

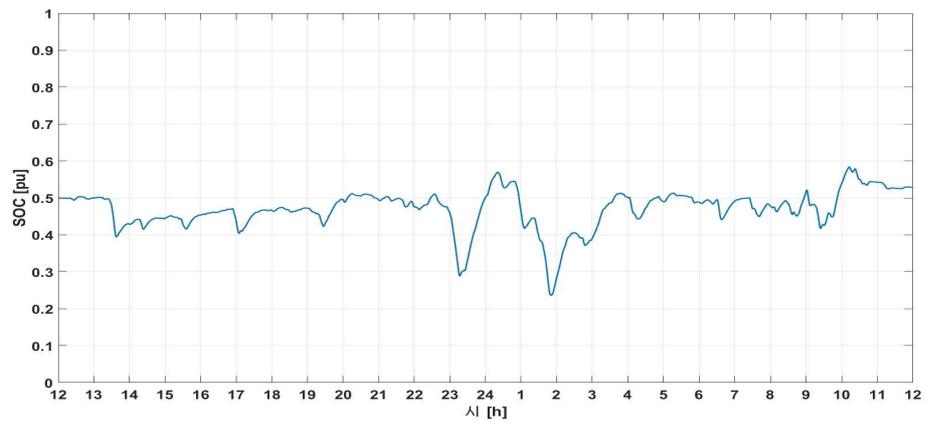
그림 18(a)는 분당 변동률 제한을 1%로 했을 때 동북·북촌 풍력발전단지의 출력과 ESS 합성 출력을 각각 나타낸다. 전체적으로 분당 변동률을 1%로 제한했기 때문에 합성 출력이 상당히 안정화되었음을 확인할 수 있다. 그림 18(b)는 ESS 출력으로 약 12월 3일 1시 40분경 최대 17.5 MW의 출력을 기록했다. 그림 18(c)는 ESS 출력에 따른 1.0 MWh 배터리 기준 SOC를 나타내며, SOC의 최대치와 최소치의 차로 산정했을 때 6.3 MWh의 배터리 용량이 요구되었다.



(a) 풍력발전 출력 및 ESS 합성 출력



(b) ESS 출력



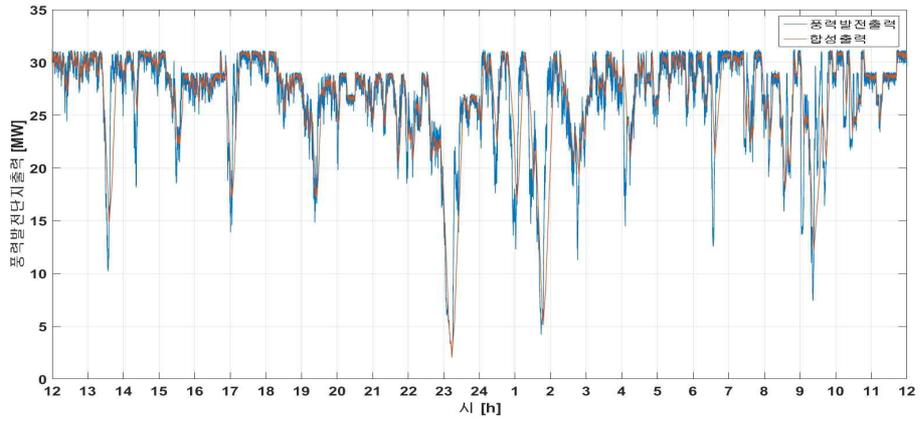
(c) SOC

그림 18 분당 변동률 1% 기준

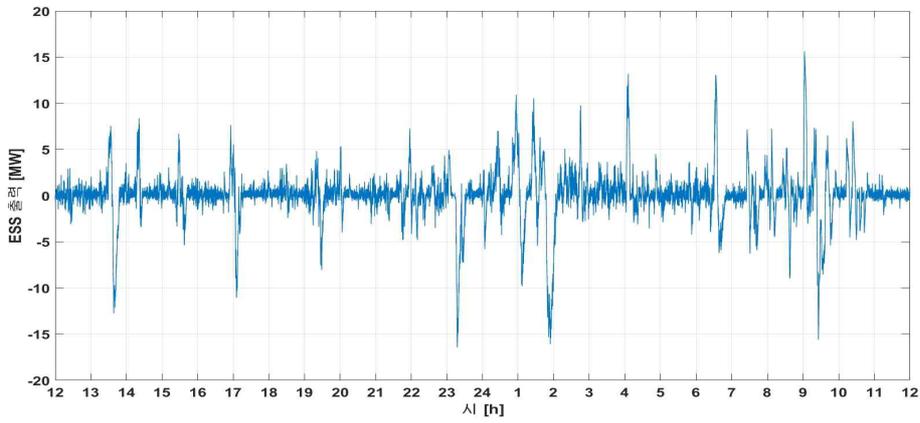
3.2 분당 변동률 5% 기준

그림 19(a)는 분당 변동률 제한을 5%로 했을 때 동북·북촌 풍력발전단지의 출력과 ESS 합성 출력을 나타낸다. 합성 출력은 안정화되었음을 확인할 수 있으나 그림 18(a)와 비교했을 때 합성 출력의 기울기는 큰 폭으로 나타났다.

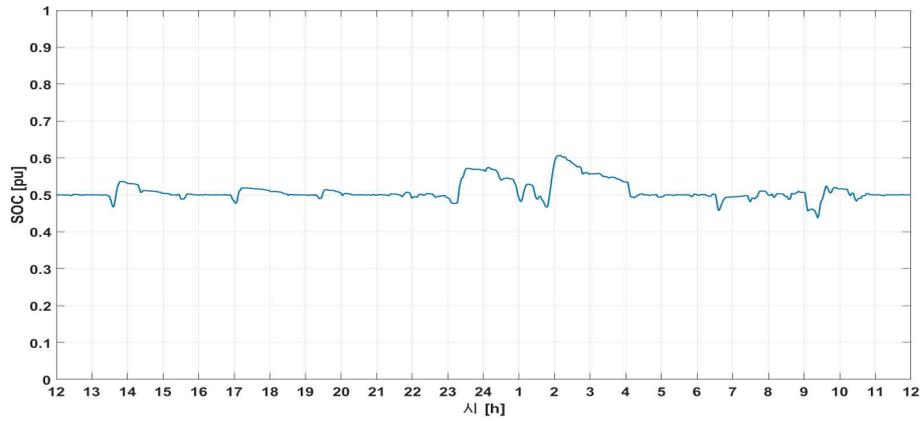
그림 19(b)는 ESS 출력으로 약 2일 23시 10분경 최대 -16.4 MW의 출력을 기록한 것을 확인할 수 있다. 그림 19(c)는 ESS 출력에 따른 SOC를 나타내며, 분당 변동률 1% 기준과 동일한 방법을 적용하면 3.0 MWh의 배터리 용량이 요구되었다.



(a) 풍력발전 출력 및 ESS 합성 출력



(b) ESS 출력



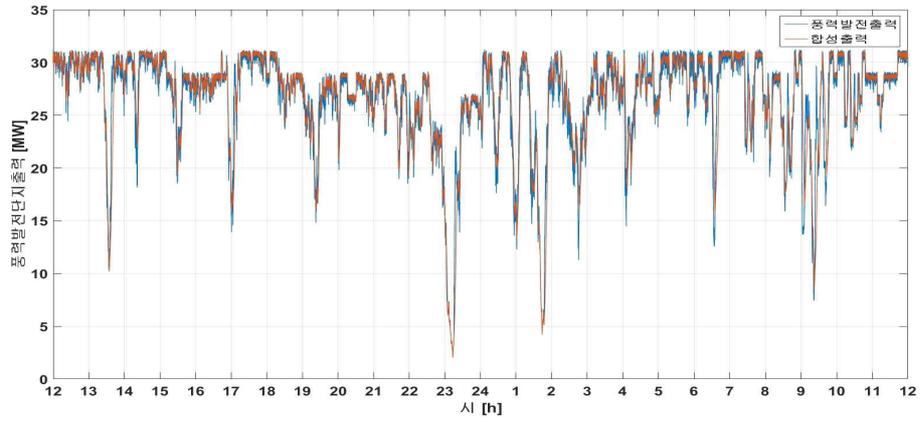
(c) SOC

그림 19 분당 변동률 5% 기준

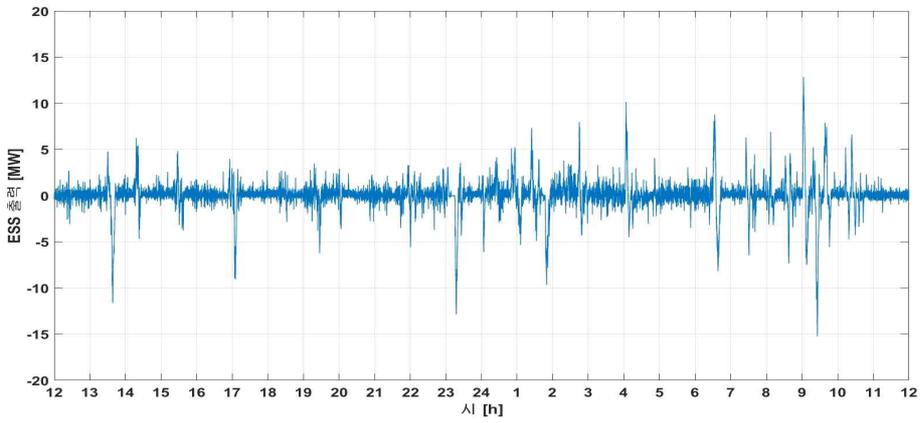
3.3 분당 변동률 10% 기준

그림 20(a)는 분당 변동률 제한을 10%로 했을 때 동북·북촌 풍력발전단지의 출력과 ESS 합성 출력을 나타낸다. 분당 변동률을 10%로 제한하여 합성 출력이 안정화되었으나 그림 18(a)와 그림 19(a)에 비해 기울기가 큰 폭임을 확인할 수 있다.

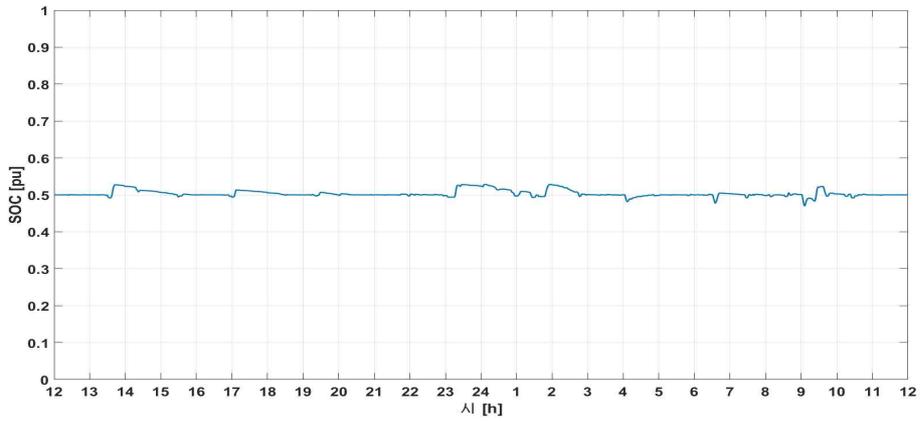
그림 20(b)는 ESS 출력으로 약 9시 20분경 최대 -15.2 MW의 출력을 기록했다. 그림 20(c)는 ESS 출력에 따른 18.0 MWh 배터리 기준 SOC를 나타내며, 분당 변동률 1% 기준과 동일한 방법으로 산정했을 때, 1.0 MWh의 배터리 용량이 요구되었다.



(a) 풍력발전 출력 및 ESS 합성 출력



(b) ESS 출력



(c) SOC

그림 20 분당 변동률 10% 기준

4. 결과 및 고찰

동북·북촌 풍력발전단지의 분당 변동률 제한에 따른 컴퓨터 해석 결과는 표 4와 같다. ESS 최대 출력을 통해 산정한 PCS 용량은 분당 변동률 제한치에 따라 약 1 MW 차이를 보이며, 요구되는 배터리 용량은 구간별 약 2.0~3.3 MWh의 차이가 있었다.

표 4 분당 변동률 제한치에 따른 ESS 용량

구분	PCS (MW)	배터리 (MWh)
1%	17.5	6.3
5%	16.4	3.0
10%	15.2	1.0

2016년 12월에 준공된 동북·북촌 풍력발전단지 ESS 구성은 그림 39와 같이 PCS 6.0 MW, 배터리 18.0 MWh가 설치되어 운용되고 있다.

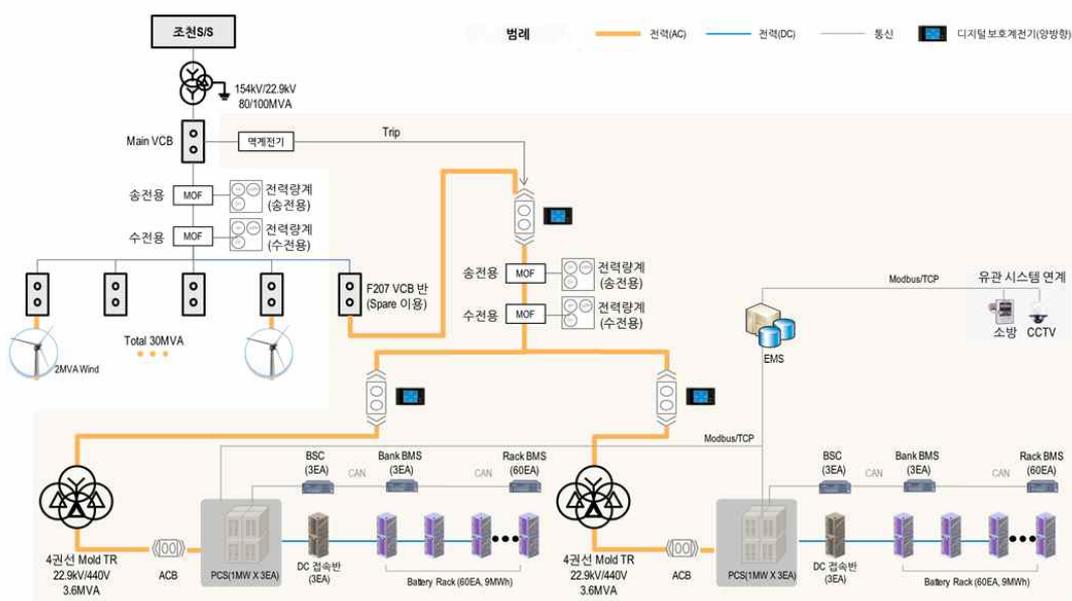


그림 21 동북·북촌 풍력발전단지 ESS 구성도

동북·북촌 풍력발전단지 ESS 세부 구성은 표 5와 같다. PCS는 3-Level Topology IGBT 인버터 6.0 MW, 배터리는 리튬 이온 타입으로 18 MWh가 설치되어 있다. 동북·북촌 풍력발전단지 ESS는 최대부하 시간에 방전하여 REC 가중치 5를 적용받는 사업모델로서 출력 변동 저감을 위한 충·방전을 수행하고 있지 않다.

표 5 동북·북촌 풍력발전단지 ESS 세부 구성

구분	세부 구성 및 수량	용량
PCS	3-Level Topology IGBT 인버터	6 MW
배터리	Li-ion (Polymer) 배터리 랙 120 EA	18 MWh

표 6은 ESS에서 PCS, 배터리, 공사비에 대한 비용분석을 나타낸다[19]. PCS는 1~2억원/MW, 배터리는 5~10억원/MWh로 배터리는 PCS의 5배에 가까운 단가를 가지고 있다. 향후 “제주 풍력 고시”에서 명시하는 분당 변동률 제한에 따라 동북·북촌 풍력발전단지 ESS를 기존 REC 확보를 위한 최대부하 시간 방전과 더불어 출력 변동 저감을 동시에 수행한다면 고가인 배터리의 추가적인 설치가 필요하지 않고 공사비도 절감할 수 있기 때문에 경제적으로 운용할 수 있을 것으로 여겨진다.

표 6 ESS 비용 분석

구분	단가	수량
PCS	1~2억원 (1 MW)	1 MW
배터리	5~10억원 (1 MWh)	1 MWh
공사비	0.5억원	

4. 결 론

본 논문에서는 2015년 11월부터 2016년 10월까지 동북·북촌 풍력발전단지의 실제 2초 주기 출력 데이터를 통해 분당 변동률과 변동 원인을 분석하였고, 최대 분당 변동률이 가장 높았던 2015년 12월 3일을 기준으로 컴퓨터 해석을 통해 출력 변동 저감을 위한 ESS 용량을 제한 비율에 따라 산정했다. ESS 연계 운전 제어 시 행원 연안풍력 출력안정화 시범사업에 적용하였던 알고리즘을 적용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 월평균 분당 변동률은 전체적으로 1.4~4.7%였고 월평균 분당 변동률은 이용률(출력)이 높을 때와 특정 기간 풍속이 높았을 때 나타났다.
- (2) 최대 분당 변동률이 40%를 초과한 경우는 3회가 있었고 강풍에서 풍력발전설비가 정격출력 운전 중 갑자기 정지되는 경우와 풍속이 급격하게 변화하는 경우에 최대 분당 변동률이 높게 나타났다.
- (3) ESS 연계 운전 시 PCS 용량은 컴퓨터 해석 결과 분당 변동률 제한치에 따라 15.2~17.5 MW가 필요했고, 배터리는 1.0~6.3 MWh 용량이 필요한 것으로 나타났다.

이상과 같은 결과들을 종합해보면 PCS는 분당 변동률 제한치 구간별로 1 MW의 차이를 보였으며, 3가지 사례 모두 단지 용량의 약 50% 이상 필요한 것으로 나타났다. 배터리는 구간별 약 2.0~3.3 MWh의 차이를 보였고 향후 “제주 풍력 고시”에 따라 요구되는 용량이 달라질 수 있음을 나타냈다.

따라서 분당 변동률 제한치에 따라 제시한 ESS 용량을 바탕으로 향후 동북·북촌 풍력발전단지를 운용한다면, REC 가중치 확보를 위한 최대부하 시간 방전 뿐만 아니라 출력 변동 저감도 수행할 수 있어 제주 계통 안정화에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 산업통상자원부, “제2차 에너지기본계획”, 2012.
- [2] 산업통상자원부, “제4차 신재생에너지 기본계획”, 2014.
- [3] “제주도 전기차+신재생에너지 100% 보급”, <제주의 소리>, 2015.12.01., <<http://www.jejusori.net/?mod=news&act=articleView&idxno=170220>>.
- [4] 전력거래소, “2015년 제주지역 계통운영 실적”, 2016.
- [5] 제주특별자치도, “제주특별자치도 풍력발전사업 허가 및 지구 지정 등에 관한 조례”, 2011.
- [6] 제주특별자치도, “풍력발전설비 출력안정용 에너지저장장치 시범구축사업 공고” 제주특별자치도 제2015-1115호, 2015.
- [7] 산업통상자원부, “신·재생에너지 공급의무화제도 및 연료 혼합의무화제도 관리운영지침”, 산업통상자원부 고시 제 2016-171호, 2016.
- [8] G. Koshimizu, T. Numata, K. Yoshimoto, H. Hasuike, and T. Shibata, “Subaru Project: Application of Energy Storage for Stabilization of Wind Power in Power Systems”, ESA 2005 Annual meeting Conf. Energy Storage Association, Toronto, Canada, 2005.
- [9] G. Koshimizu, T. Numata, K. Yoshimoto, H. Hasuike, and T. Shibata, “Subaru Project: Analysis of Field test results for Stabilization of 30.6 MW Wind Farm with Energy storage” Electrical Energy Storage Applications and Technologies 2007 Conf. Energy Storage Association, San Francisco, USA, 2007.
- [10] K. Yoshimoto, T. Nanahara, G. Koshimizu, and T. Uchida, “New Control Method for Regulating State-of-Charge of a Battery in Hybrid Wind Power/Battery Energy Storage System”, Proceedings of 2006 IEEE PES Power Systems Conference & Exposition, October, pp.1244-1251, 2006.
- [11] 牛山泉 원저, 고경남·허종철 공역, “풍력공학입문”, 문운당, 2006.

- [12] R.E Wilson and P.B.S.Lissaman, Aerodynamics of Wind Power Machines, National Science Foundation, RANN, Grant No. G1-41840, Oregon State University, Corvallis, OR, 1974.
- [13] V. Nelson, Wind Energy and Wind Turbines, Alternative Energy Institute, West Texas A&M University.
- [14] L. L. Freris(ed), Wind Energy Conversion System, Prentice Hall, 1990.
- [15] D. Le Gourieres, Wind Power Plants, Theory and Design, Pergamon Press, Oxford, 1982.
- [16] A. Esmaili and A. Nasiri, “Power smoothing and power ramp control for wind energy using energy storage”, 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2011.
- [17] Duehee Lee, Joonhyun Kim, and Ross Baldick, “Stochastic Optimal Control of the Storage System to Limit Ramp Rates of Wind Power Output”, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, No. 4, pp2256-2265, 201.
- [18] 포스코 ICT, 신재생 발전기 출력 제어 장치 및 방법, 특허명세서, 10-1514886, 2015.
- [19] 전력거래소, “Smart Grid 활성화 및 전력수급 안정을 위한 BESS 도입방안 연구”, 2013.

감사의 글

대학원을 다니면서 비단 학업 뿐만 아니라 인생공부를 한 시간이었다고 생각이 듭니다. 대학교를 졸업하고 회사에 다니면서 느끼지 못했던 부분에 대해 대학원에서 공부하고 논문을 쓰면서 주변도 되돌아보는 계기가 됐습니다.

대학원 수업을 받고 논문을 마무리하기까지 부족한 저에게 도움을 주신 많은 분들께 감사의 말을 전하고자 이 글을 올립니다.

열정적으로 격려를 아끼지 않고 이끌어 주신 김일환 교수님께 감사 드립니다. 교수님으로서, 선배로서 깊은 조언을 해주신 김호민 교수님, 꼼꼼하게 논문 심사 해주신 김호찬 교수님과 여러 방면으로 도와주신 김세호 교수님, 오성보 교수님, 이개명 교수님, 진영규 교수님 감사합니다.

풍력의 산증인이신 허종철 교수님, 논문 심사를 해 주시고 항상 격려해 주시는 고경남 교수님과 수업을 열정적으로 해주신 김범석 교수님, 양경부 교수님께도 감사 드립니다.

전력전자연구실 양승무 박사님, 대현, 민혁, 기훈, 성훈 모두 감사합니다. 항상 노력하고 성실한 상현이에게도 깊은 감사 드립니다.

대학원에서 공부할 수 있도록 지원해 주신 제주에너지공사 김태익 사장님 이하 모든 직원 분들과 같은 팀에서 힘이 돼 주신 임경은 대리님, 양기훈 주임님께 감사 드립니다.

항상 당신보다 자식 걱정하시는 어머니, 아버지를 비롯한 형, 누나, 조카들과 행복한 가정에 대해 알게 해주신 장모님과 장인어른, 그리고 든든한 처남 명철이 모두 감사합니다.

마지막으로 우리 쌍둥이 서은, 서현이와 아내 손아영에게 항상 고맙고 사랑하다는 말을 전합니다.

2017년 6월

강상현 올림