



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

풍력발전단지의 유효전력 증발률
조정을 위한 BESS 용량 산정

濟州大學校 大學院

風力特性化協同課程

秦 炅 敏

2013 年 8 月

풍력발전단지의 유효전력 증발률 조정을 위한 BESS 용량 산정

指導教授 金 一 煥

秦 炅 敏

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2013 年 8 月

秦炅敏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 大學院

2013 年 8 月

Determination of BESS capacity for
regulating the rate limit of wind farm output

Jin Kyung-Min
(Supervised by professor Eel-Hwan Kim)

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

GRADUATE SCHOOL OF SPECIALIZED WIND ENERGY
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2013. 8.

목 차

그림 목차	ii
표 목차	iv
SUMMARY	v
1. 서 론	1
2. 풍력출력 특성	3
2.1 풍력발전단지의 출력 특성	3
2.2 풍력출력의 계통운영 기준	4
3. 모델링과 제어	6
3.1 시스템 모델링	6
3.2 시스템 제어	8
4. 시뮬레이션 및 분석	14
4.1 풍력 최대출력변동 기준 BESS 용량 산정	14
4.2 제주계통의 주파수 운전 기준에 의한 BESS 용량 산정	25
4.3 신재생발전기 계통연계기준 BESS 용량 산정	32
4.4 시뮬레이션 결과 및 고찰	38
5. 결 론	40
참 고 문 헌	42

그림 목 차

Fig. 1 Wind speed spectrum	3
Fig. 2 Probability distribution curves of the power fluctuation of wind farms	4
Fig. 3 Simplified mechanism of wind turbine	6
Fig. 4 Discharging curves of CGR 17500	7
Fig. 5 Discharging curves of estimated model battery	8
Fig. 6 Simplified wind farm model as current source	9
Fig. 7 Wind farm's output power - real power(upper), simplified model power(lower)	9
Fig. 8 Power reference and noise pass through LPF	10
Fig. 9 Block diagram of smoothing control	10
Fig. 10 Block diagram of smoothing control with SOC feedback	11
Fig. 11 Protection against step fluctuation	12
Fig. 12 Sequence for ramp output	12
Fig. 13 SOC control for each bank	13
Fig. 14 SOC curves for four banks	13
Fig. 15 Minimum capacity of BESS for smoothing control	15
Fig. 16 Maximum power fluctuation in Sung-San wind farm	16
Fig. 17 Power fluctuation in Sung-San wind farm in Dec 9th 2012 (moving average 30min)	17
Fig. 18 Wave forms of power and SOC in Sung-San wind farm with BESS for smoothing control	18
Fig. 19 Power fluctuation in Sung-San wind farm with BESS	18
Fig. 20 Maximum power fluctuation in Han-Geong wind farm	19
Fig. 21 Power fluctuation in Sung-San wind farm in Dec 6th 2012 (moving average 10min)	20
Fig. 22 Wave forms of power and SOC in Han-Geong wind farm with BESS for smoothing control	21
Fig. 23 Power fluctuation in Han-Geong wind farm with BESS	21
Fig. 24 Maximum power fluctuation in Sam-Dal wind farm	22
Fig. 25 Power fluctuation in Sam-Dal wind farm in Dec 9th 2012 (moving average 30min)	23

Fig. 26 Wave forms of power and SOC in Sam-Dal wind farm with BESS for smoothing control	24
Fig. 27 Power fluctuation in Sam-Dal wind farm with BESS	25
Fig. 28 Power output in Sam-Dal wind farm (Feb 1st 2013 06:15~06:25) ..	26
Fig. 29 Protection against step fluctuation	27
Fig. 30 Power compensation by BESS in Sung-San wind farm	27
Fig. 31 Power compensation by BESS in Han-Geong wind farm	29
Fig. 32 Zoom of power fluctuation in Sam-Dal wind farm	30
Fig. 33 Zoom of power fluctuation with BESS in Sam-Dal wind farm	31
Fig. 34 Power compensation by BESS in Sam-Dal wind farm	31
Fig. 35 Power output in Sung-San wind farm (16:00~17:00 Dec 9th 2012) ..	33
Fig. 36 Output of power and SOC in Sung-San wind farm with BESS based on grid code	34
Fig. 37 Power output in Han-Geong wind farm (14:00~15:00 Dec 6th 2012) 35	
Fig. 38 Output of power and SOC in Han-Geong wind farm with BESS based on grid code	36
Fig. 39 Power output in Sam-Dal wind farm (18:00~19:00 Dec 9th 2012)	37
Fig. 40 Output of power and SOC in Sam-Dal wind farm with BESS based on grid code	38

표 목 차

Table. 1 Over fluctuated power in Sam-Dal wind farm	26
Table. 2 Data analysis of Sam-Dal wind farm power (Feb 9th 2013)	30
Table. 3 Data analysis of Sung-San wind farm (Dec 9th 2012)	33
Table. 4 Data analysis in Han-Geong wind farm (Dec 6th 2012)	35
Table. 5 Data analysis in Sam-Dal wind farm (Dec 9th 2012)	37
Table. 6 BESS capacity and characteristics of control methods	39

SUMMARY

This paper analyzes the determination of BESS capacity for regulating the output of wind farms in Jeju Island. In the simulation, actual data from three wind farms in Jeju Island were used from December 2012 to February 2013.

To verify the effectiveness of the proposed method, three kinds of simulation have been carried out.

- 1) to mitigate the power fluctuation of wind farm
- 2) to satisfy the operation rule of Jeju island power system
- 3) to satisfy the grid code for connecting the grid with the determined BESS capacity for Sung-San, Han-Geong and Sam-Dal wind farms located in Jeju Island, respectively

In the simulation results, the smoothing effect and the limit rate of wind power output were satisfied

Finally, the conclusion was followed as the final chapter to inform the advantages of methods respectively and it will prove why BESS should be installed to wind farms to keep the grid code for renewable energy sources efficiently.

1. 서 론

19세기 말 덴마크를 중심으로 풍력발전에 대한 연구와 개발이 시작된 이후로 현재 풍력발전은 그저 무한한 바람이라는 에너지를 사용하는 것만이 아닌 화석 연료를 대체할 수 있는 수단으로 자리를 잡아가고 있다. 이러한 바람 에너지, 즉 풍력을 활용하여 전기를 생산하는 것은 공기에 역학, 그에 의하여 생성되는 회전력 그리고 회전자계를 이용한 전력 생산 및 전력 계통으로의 송전과 높아지는 타워를 지지하기 위한 하중 계산 및 기반 건설 등의 복합적인 분야의 학문이 취합되어져서 이루어지는 하나에 거대한 복합 학문의 결실이라고 볼 수 있다 [1].

풍력발전이 이미 활발히 사용되어지는 유럽의 경우 바람이 강하게 부는 경우는 자주 없으나 변화가 거의 없는 꾸준한 바람이 불어서 풍력발전으로 생산되는 전력의 품질이 계통에 큰 영향을 미치지 않고 부드럽게 흐를 수 있는 환경을 갖고 있다[2]. 또한 슈퍼그리드라는 전력망 연계 방식에 의하여 EU 각국의 전력망이 모두 연계되어 있기 때문에 풍력발전에 의한 전력 생산량을 증가시키더라도 그 출력량의 변화에 쉽게 대응이 가능하다는 특징을 가지고 있다[3][4]. 하지만 국내의 경우 지리적인 문제로 인하여 인접한 국가와의 전력망 연계가 힘들고 또한 바람이 각 계절마다 특성을 달리하면서 강한 난류를 포함하고 있기 때문에 풍력 발전에 의하여 생산되는 전기적인 출력의 변동이 상대적으로 크고 풍력발전단지의 총 설비 용량이 증가할수록 인접한 전력계통에 여러 문제를 야기할 수 있다[5][6][7][8].

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 풍력발전단지에 에너지 저장장치를 연계하여 풍력에 의한 전기적 출력의 변동을 전력계통이 수용가능 할 수 있게 하는 방안을 제안하였다. 에너지 저장장치에 의한 출력 변동의 완화정도를 확인하기 위하여 현재 제주도내에서 운전 중인 성산, 행원, 한경 풍력발전단지의 2012년 12월부터 2013년 2월까지의 출력데이터를 사용하였고, 아래의 3가지의 경우를 기초하여 에너지 저장장치의 용량 및 제어 기법을 고려하였다.

1) 출력변동 완화를 위한 에너지 저장장치의 최적용량 산정 및 제어

- 2) 제주의 분산발전원으로써 운전을 위한 에너지 저장장치 설치
- 3) 신재생발전기 계통연계기준을 지키기 위한 에너지 저장장치 설치

현재 국내에서 운전 중인 풍력발전단지는 신재생발전기 계통연계기준을 만족할 수 있어야 되나 이러한 규정에 의하여 발전기의 출력을 제약할 경우 발전사업자 입장에서는 손실을 발생시키는 것이기 때문에 에너지 저장장치를 활용하여 계통에 영향을 끼칠 수 있는 변동을 제약하는 것뿐만 아니라 계통연계기준을 만족시키는 것 역시 중요하다고 볼 수 있다.

본 논문의 시뮬레이션을 위하여 PSCAD/EMTDC 프로그램을 사용하였고 시뮬레이션에 이용되어진 데이터들은 MATLAB을 사용하여 분석되어졌다.

2. 풍력출력 특성

2.1 풍력발전단지의 출력 특성

그림 1은 풍속에 스펙트럼을 보여주고 있는데 크게 세 구간에서 높은 주파수 변동을 보여주는 것을 볼 수 있다[9]. 1분 구간에서 보여주는 주파수 변동은 난류 성분을 4일 구간과 1년 구간에서 보여주는 주파수 변동은 중관 기상학(Synoptic meteorology)적인 성분의 주파수 변동을 보여주는 것이다. 이 스펙트럼에 의거하여 대부분 풍속의 평균을 구할 때는 변동 성분이 거의 없는 10분~1시간 사이에서 구하게 된다. 또한 이 구간에서 구한 풍력 발전 출력의 평균값을 실제 풍속 값에서 제거할 경우 단주기 성분의 풍력발전 단지 출력을 분석할 수 있게 된다.

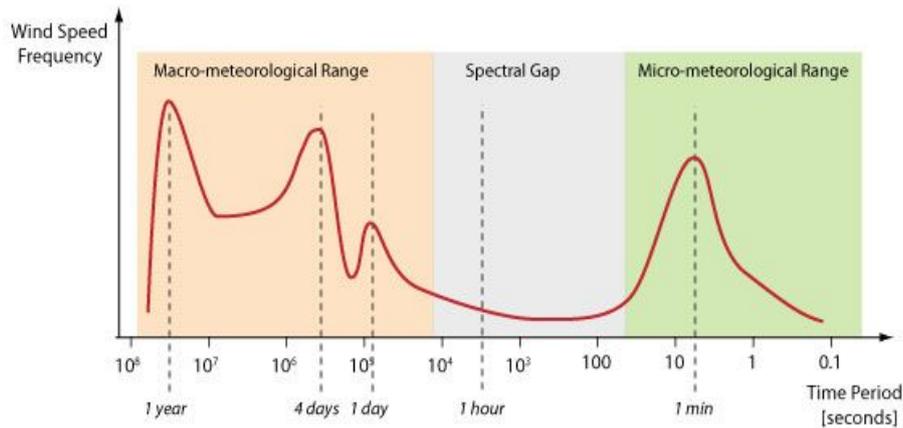


Fig. 1 Wind speed spectrum

그림 2는 2012년 12월부터 2013년 2월까지 제주도내에 있는 성산, 한경, 삼달 풍력발전단지의 30분 평균 풍속을 기준으로한 단주기 풍력발전 출력 변동량을 나타낸다. 이러한 단주기 출력 변동은 전력계통에 여러 문제를 야기할 수 있기 때문에 전체 전력 사용량 중 풍력발전에 의한 공급량이 증가하면 할수록 반드시 줄여야만 한다.

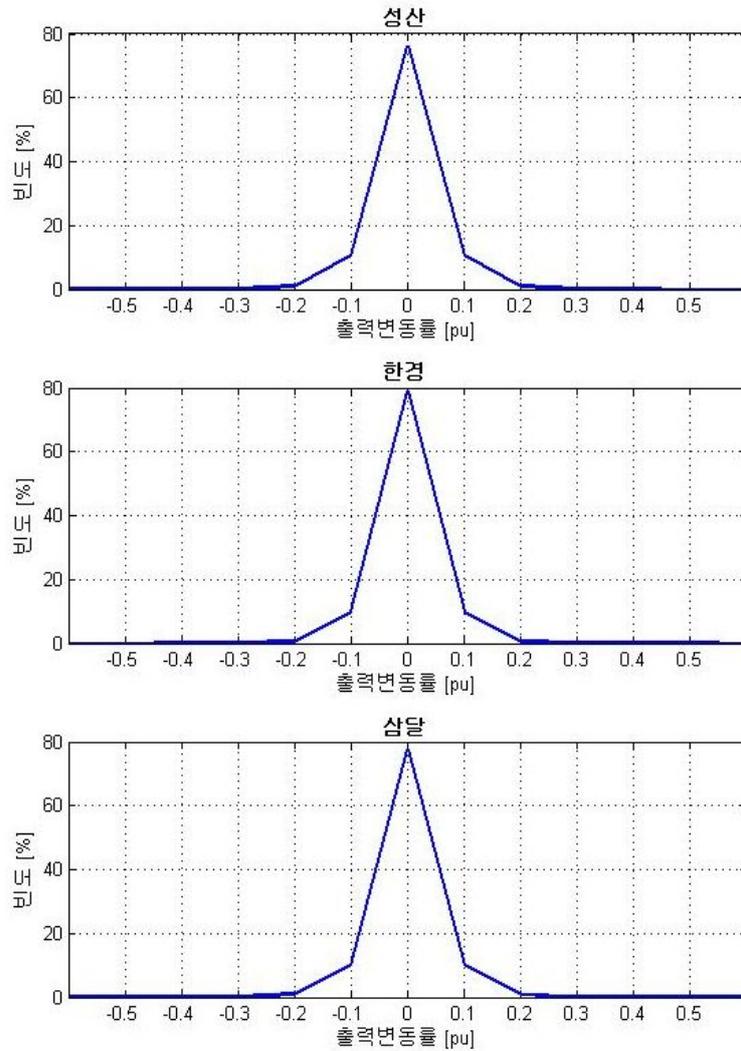


Fig. 2 Probability distribution curves of the power fluctuation of wind farms

2.2 풍력출력의 계통운영 기준

현재 우리나라에 설치된 풍력발전단지들은 “신재생발전기 계통연계기준”을 준수하여 운전하여야 한다[10]. 이 기준에서 보면 풍력발전기는 전력계통의 안정적인 운영을 위하여 중대한 계통고장 발생 시나 전력시장 운영 비상시 급전지시 절차를 준용하여 사전 유효전력을 제어할 수 있도록 하여야 한다는 내용이 있다. 즉,

전력계통의 안정성을 위하여 유효전력의 출력을 다음에 경우를 대비하여 조절할 수 있어야 한다.

- 1) 급감발 조정 : 유효전력의 출력은 5초 이내에 정격출력의 20%까지로 감발할 수 있어야 한다.
- 2) 주파수 조정 : 계통주파수 함수에 따라 발전기의 유효전력 출력은 자동조정이 가능해야 한다.
- 3) 출력의 상한 조정 : 출력상한은 10분 평균값으로 측정된 유효전력 발전량이 규정된 값을 초과하지 않도록 조정 가능해야 한다.
- 4) 유효전력 증발률 조정 : 유효전력 출력의 증발률 속도를 정격의 10%/분까지 제한하는 것이 가능해야 한다.

이러한 유효전력 제어능력 성능유지를 위하여 풍력발전단지는 시스템적으로 출력을 억제할 수 있도록 되어있다. 하지만 이러한 조건 중 4)번 같은 경우 시스템적으로 억제하기 위하여서는 Droop 제어 혹은 부가적인 에너지 저장장치를 이용하여야 하는데 Droop 운전의 경우 현재 풍속에서 얻을 수 있는 최대 출력을 얻지 못하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 에너지 저장장치를 활용하여 에너지를 저장하였다 추후 방전시킬 경우 자체적으로 출력을 억제함으로써 발생하는 손실을 없앨 수 있게 된다[11][12].

3. 모델링과 제어

3.1 시스템 모델링

1) WTGS 모델링

WTGS(Wind Turbine Generator System)는 바람이 갖는 에너지를 기계적 회전력으로 변환하는 회전날개(Blade), 회전력을 증폭시켜주는 기어박스(Gear Box), 회전력을 전기에너지로 변환시키는 발전기(Generator)의 순서로 에너지에 변환이 이루어진다.

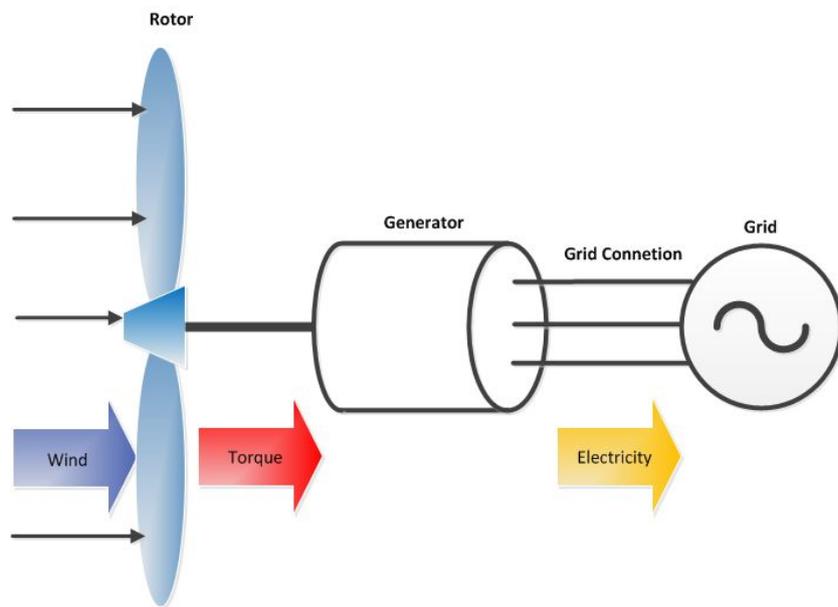


Fig. 3 Simplified mechanism of wind turbine

본 논문에서는 기계적인 메커니즘은 모두 Look-up Table화하여 풍력발전기 및 단지를 이상적인 전류원으로 만들되 그 출력데이터는 실제 풍력발전단지에서 발생하였던 출력과 비슷하도록 설계하였다.

2) BESS 모델링

시뮬레이션을 위해 만들어진 배터리는 Shepherd nonlinear battery model과 Panasonic CGR 17500 Li-ion 배터리의 방전곡선을 참고하여 만들었다[13][14]. 배터리의 비선형적인 충·방전 특성은 지수함수를 포함한 비선형방정식으로 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$E = E_0 - k \cdot \frac{Q \cdot i \cdot t}{Q - i \cdot t} + A \cdot \exp(-B \cdot i \cdot t) - R \cdot i \quad (1)$$

여기서,

- E : 배터리 단자전압 [V]
- E₀ : 배터리 기준전압 [V]
- A : 지수함수의 계수 [V]
- B : 지수함수 역 시정수 [Ah⁻¹]
- Q : 배터리 용량 [Ah]
- k : 분극 상수 [V/Ah]
- R : 내부 직렬 저항 [Ω]
- i : 배터리 방전전류 [A]
- t : 방전 시간 [h]

그림 4와 그림 5는 실제 배터리의 방전곡선과 수식에 의하여 만들어진 배터리의 방전 곡선을 보여준다.

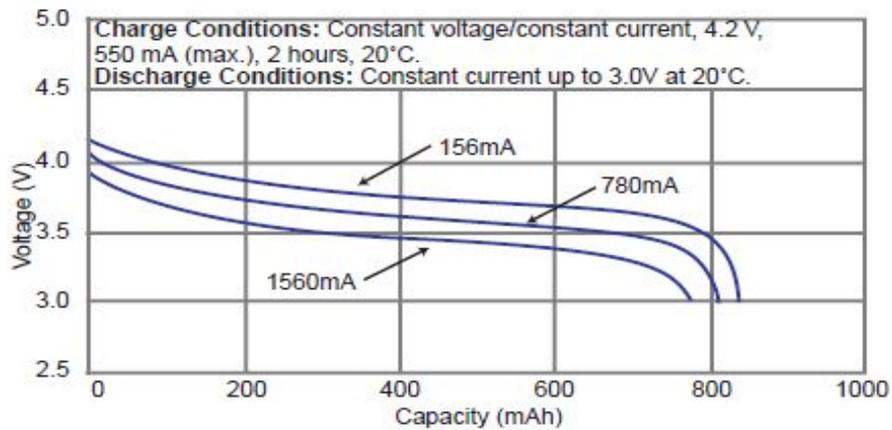


Fig. 4 Discharging curves of CGR 17500

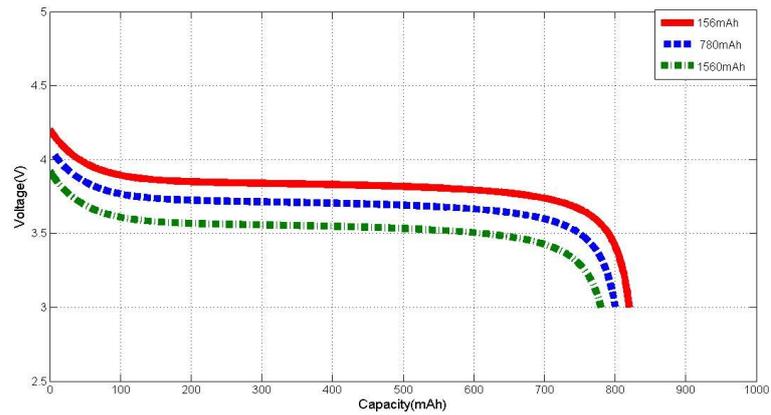


Fig. 5 Discharging curves of estimated model battery

위의 두 그래프를 보면 유사한 방전 특성을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 또한 컨버터 시스템의 모델은 유·무효전력의 제어가 가능한 전류원으로 등가 변환하여 모델링 하였다.

3.2 시스템 제어

1) WTGS 제어

국내에 설치되어 운전 중인 풍력발전기들은 신재생에너지 계통연계기준에 따라 지상 0.95~진상 0.95의 역률을 유지하여야 한다. 또한 현재 운전되어지는 풍력발전단지들이 생성하는 유효전력들은 모두 계통에서 흡수하도록 하고 있으므로 풍속에 따라 정격풍속 이하에서는 최대 토크제어를 정격풍속 이상에서는 정 출력 제어를 하여 최대 유효전력만을 생성해내면 된다.

본 논문에서는 시뮬레이션의 원활함을 위하여 풍력발전단지를 하나의 전류원으로 등가 모델링하여 출력의 변동에 따라 유효전력의 값이 변동하도록 하였다. 그림 7은 모델링되어진 풍력발전단지의 출력과 실제 풍력발전단지의 출력을 비교한 값이다.

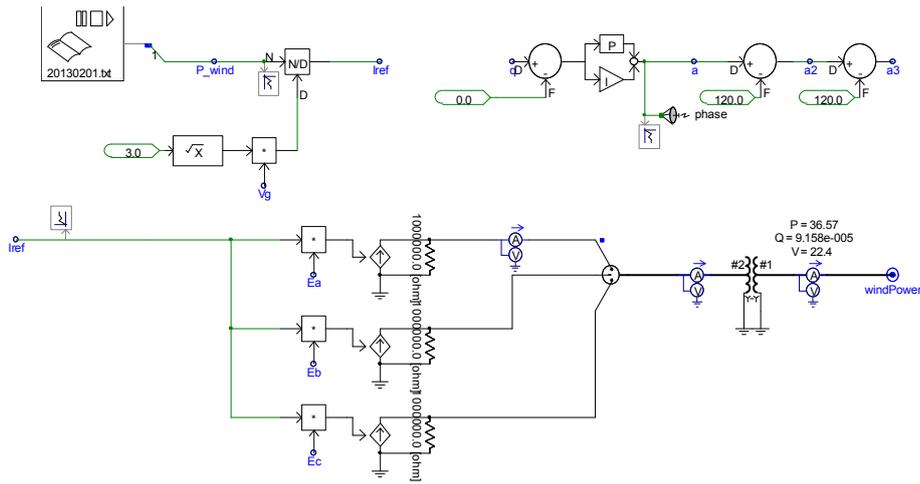


Fig. 6 Simplified wind farm model as current source

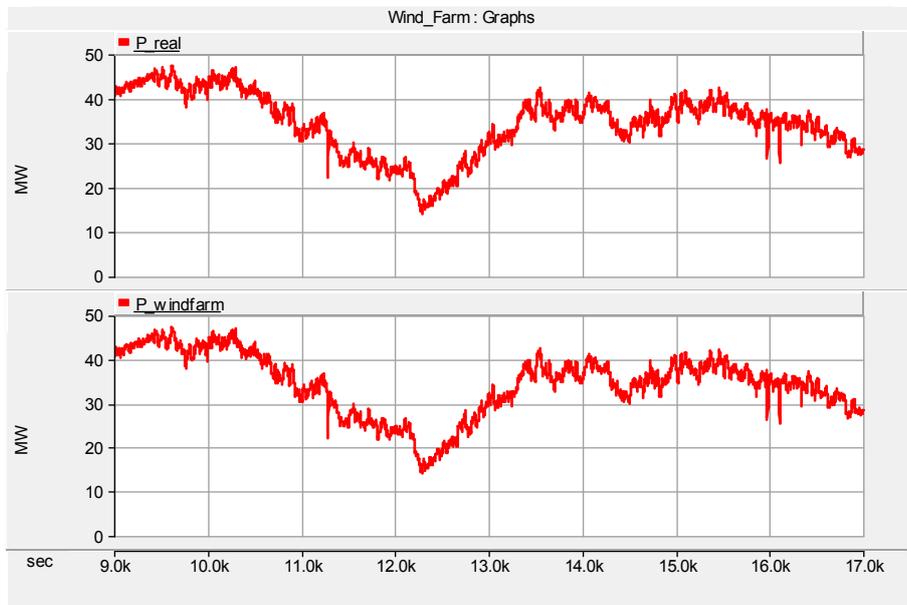


Fig. 7 Wind farm's output power - real power(upper),
simplified model power(lower)

2) BESS 제어

BESS 제어의 경우 크게 3가지 방법을 이용하여 풍력발전 출력보상 및 배터리의 충전 용량(SOC : State of Charge)을 일정수준 유지할 수 있도록 하였다.

a. 평활화 제어

풍속 변화에 따라 변동하는 풍력발전출력의 단주기 성분을 제거하는 제어 방식으로, 제거하고 싶은 단주기 성분에 차단 주파수를 시정수로 삼은 LPF(Low Pass Filter)를 이용하여 BESS 제어 시 출력 레퍼런스를 만들어내게 된다.

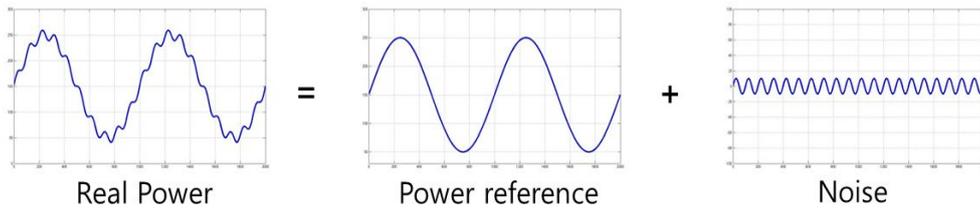


Fig. 8 Power reference and noise pass through LPF

그림 9는 기본적인 평활화제어의 알고리즘으로 LPF를 통과한 출력 기준값을 이상적인 풍력발전단지와 BESS의 합성출력이라 가정하여 출력 기준에서 실제 출력 값을 빼 값이 BESS에 요구되어지는 출력인 배터리 출력이 되도록 하였다.

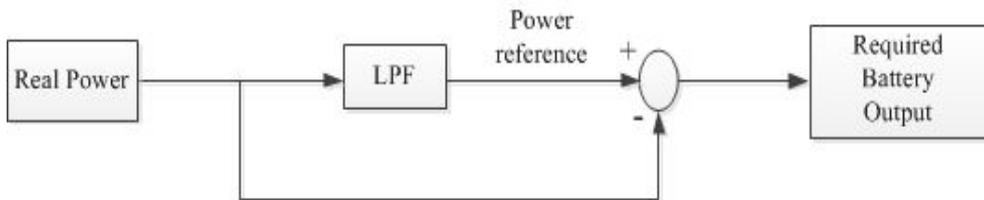


Fig. 9 Block diagram of smoothing control

실제 BESS의 경우 자신이 갖고 있는 충전 전하량에 의하여 충·방전 한계 값이 결정되어지기 때문에 지속적인 평활화 제어를 위해서는 배터리의 SOC를 항상 일정한 범위 내에서 제어하도록 궤환 제어(Feedback control)를 해야 할 필요가 있다[15].

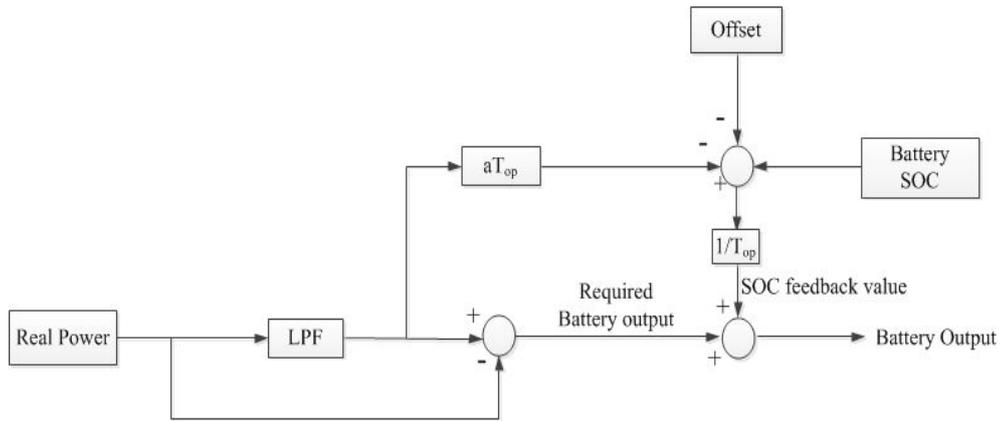


Fig. 10 Block diagram of smoothing control with SOC feedback

그림 10의 블록도는 기존의 평활화 제어 알고리즘에 SOC 제어를 추가한 시퀀스를 보여준다. 위와 같은 제어를 사용할 경우 안정적인 SOC 범위 내에서의 BESS 합성 출력과 요구되어지는 배터리 출력은 같게 되나 SOC가 안정범위보다 증가 혹은 감소될 경우 일정범위를 계속 유지하기 위해서 BESS의 충·방전 값을 유동적으로 변화시키게 된다.

여기서, T_{op} 는 평활화 시정수이고 α 는 배터리 출력 레퍼런스 값을 SOC와 비교하기 위한 변환 계수이며, $Offset$ 은 SOC의 여유분을 남기기 위한 상수이다.

$$\alpha = (C - 2 \cdot C \cdot M) / (T_{op} \cdot P_{wf}) \quad (3)$$

$$Offset = M \cdot C \quad (4)$$

- C : 배터리용량 [MWh]
- M : 배터리 SOC 여유분 [pu]
- P_{wf} : 풍력발전단지 정격출력 [MW]

b. 출력보상제어

개별 풍력발전기 혹은 풍력발전단지가 내부 혹은 외부적인 문제로 인하여 전력계통에서 탈락되었을 경우 풍력발전단지의 출력은 스텝함수와 같은 형태를 갖

게 되며 이러한 출력의 변동은 독립전원계통의 주 발전기의 출력 증·감발률을 넘는 변동을 갖게 되는 경우가 생길 수 있게 된다.

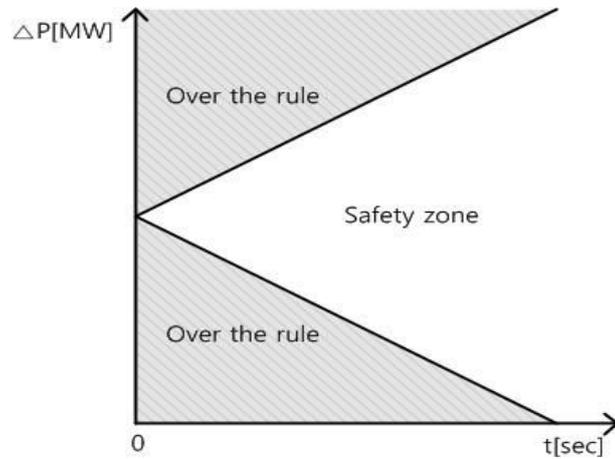


Fig. 11 Protection against step fluctuation

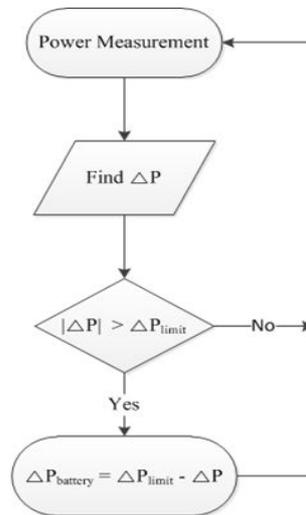


Fig. 12 Sequence for ramp output

그림 12는 그림 11과 같은 출력의 변동을 억제하기 위하여 풍력발전단지에서 스텝 변화를 일으키거나 주 발전기의 출력 증·감발률을 넘는 출력의 변동이 감지 되었을 때 BESS에서 최대 한계 변동 값인 ΔP_{limit} 이상의 출력 변동을 보상하도록 하는 시퀀스이다.

c. 균등제어

대용량 BESS 시스템을 구성하기 위하여 다수의 뱅크를 사용할 경우 유지보수에 효율성 증대 및 한 개의 뱅크가 고장 났을 경우에도 최대 사용 용량을 줄이면서 운전이 가능하다는 것과 구동효율이 증가하게 된다는 이점이 있다. 그러나 같은 용량으로 모든 뱅크의 배터리 용량을 산정하여도 균등하게 충·방전이 되는 것은 불가능하기 때문에 각 뱅크의 균등 제어를 시행하여 BESS의 용량 부담을 맞춰주어야 한다. 따라서 메인 제어부에서는 각 BESS의 SOC를 상시 체크하여 균등하게 충·방전이 될 수 있도록 제어를 하여야 한다.

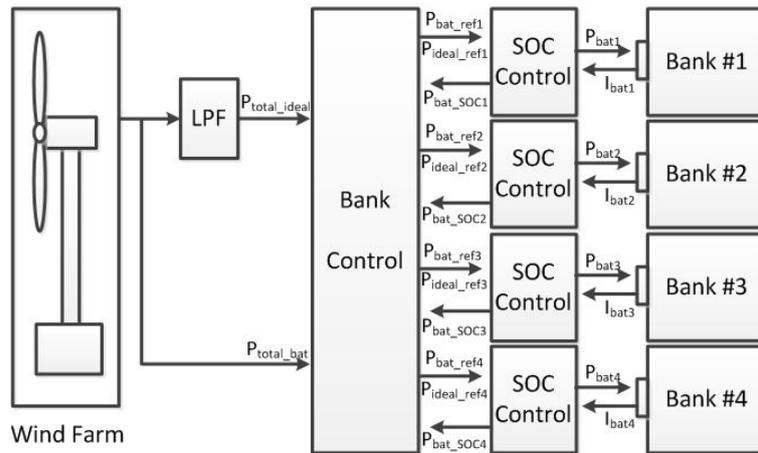


Fig. 13 SOC control for each bank

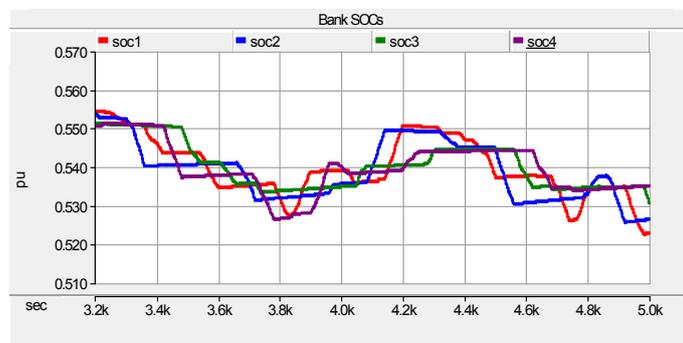


Fig. 14 SOC curves for four banks

4. 시뮬레이션 및 분석

현재 제주계통에 연결된 풍력 발전단지는 신재생발전기 계통연계기준에 맞춰서 운전을 하도록 되어있다. 하지만 제주 계통에 연결되어서 분산전원으로써 사용되어지고 있는 만큼 분산전원으로써의 역할 수행도 병행하여서 운전되어야 한다고 볼 수 있다. 본 논문에서는 이러한 두 가지 규정 및 일본 NEDO(New Energy Development Organization)에서 Redox Flow 배터리를 이용하여 수행한 “풍력발전 전력계통 안정화등 기술개발” 프로젝트와 유사한 방법으로 단지 출력을 안정화하였을 때를 포함한 세 가지 방법으로 시뮬레이션을 수행한 후 이에 대한 장·단점에 대하여 비교하였다.

4.1 풍력 최대출력변동 기준 BESS 용량 산정

일본 NEDO에서 진행한 “풍력발전 전력계통 안정화등 기술개발” 프로젝트는 일본 홋카이도의 토마마에 위치한 30,600kW의 풍력발전단지에 Redox flow 전지를 이용하여 풍력발전단지 출력을 안정화하기 위한 최적의 전지시스템을 찾기 위하여 3년여 기간(2004년~2006년)동안 진행된 프로젝트이다[16]. 이 프로젝트에서는 BESS의 평활화제어 시정수를 찾기 위하여 각 시정수 구간마다(1분, 10분, 20분, 30분, 60분)의 실제 풍력발전단지의 출력 값에 대한 최대 출력변동률을 구하여 이러한 최대 출력변동이 평활화 되어지는 시간을 평활화 제어를 위한 시정수로써 사용하였다.

평활화 시정수를 구하였을 경우 BESS의 용량은 그림15를 기준으로 하여서 계산되어 진다. BESS의 용량은 풍력발전단지가 정격출력에서 0으로 급격히 떨어질 경우 P_{wf}/T_{op} 의 기울기를 유지하면서 합성출력이 감소되도록 하여야 함으로 식(5)에 의하여 최소 BESS용량 C_{min} 을 구할 수 있다.

$$C_{min} = \frac{P_{wf} \cdot T_{op}}{2} \quad (5)$$

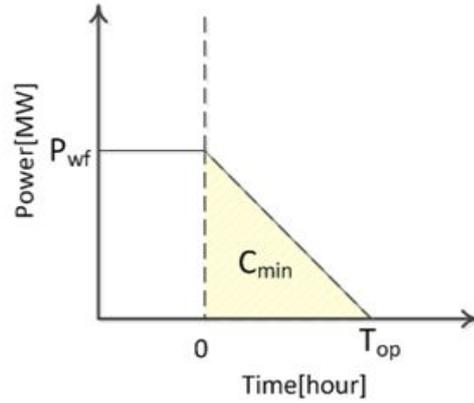


Fig. 15 Minimum capacity of BESS for smoothing control

또한 구해진 최소 BESS 용량을 이용하여 계산된 전지 출력 요구치와 비교하여 사용 가능한 최대 C-rate을 넘지 않도록 설계되었을 경우 BESS의 용량은 최소용량과 같은 크기를 가지게 된다. 본 논문에 사용된 배터리의 경우 최대 C-rate을 10C로 가정하였기 때문에 최대 배터리 출력 요구치 P_{bat_max} 를 최소배터리용량으로 나누었을 때 그 값이 10C보다 클 경우 배터리의 용량을 증가 시켜서 사용하도록 하였다.

$$C_{rate-max} = \frac{P_{bat_max}}{C_{min}} \quad (6)$$

$$C = \begin{cases} C_{min} & (C_{rate-max} \leq 10) \\ 0.1 \times P_{bat_max} & (C_{rate-max} > 10) \end{cases} \quad (7)$$

아래의 절에서는 위의 방법으로 이동평균을 이용하여 세 풍력발전단지의 평활화 시정수를 구하고 그 시정수를 이용하여 배터리 용량 및 출력 평활화 제어를 한 후 그 결과에 대하여 기술하였다.

1) 성산풍력발전단지

성산풍력발전단지는 한국남부발전이 운영하는 단지로써 현재 VESTAS사의 DFIG 2MW급 풍력발전기 10기로 구성되어져있다. 그림 16은 해당 데이터 구간 내에서 출력 변동이 가장 심하였던 3일에 대하여 각 기준시간 마다에 최대 출력 변동을 보여준다.

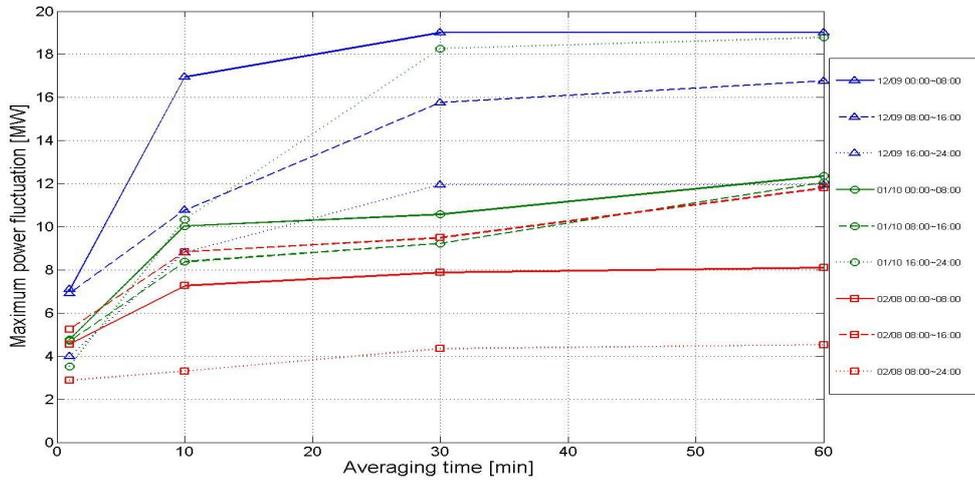


Fig. 16 Maximum power fluctuation in Sung-San wind farm

여기서 대부분의 최대 출력 변동 폭은 30분에서 포화가 되는 것을 볼 수 있다. 즉, BESS의 평활화 제어를 위한 평활화 시정수를 30분으로 둘 경우 최대 출력 변동을 일으키는 고주파 요소의 출력을 대부분 제거 할 수 있게 될 것을 예측할 수 있다.

그림 17은 30분 간격으로 이동평균을 수행하였을 때 최대 출력 변동 폭이 가장 컸던 2012년 12월 9일의 기준 값에 대한 출력 변동 값을 보여준다. 이 그래프에서 보이는 풍력발전단지의 출력 변동은 같은 곧 BESS에서 제거 해줘야하는 고조파 성분으로 볼 수 있으며 $\pm 0.2pu$ 즉, $-4MW \sim 4MW$ 내에서 출력 변동이 이루어지므로 BESS의 컨버터 용량은 여유분을 뒀서 5MW급으로 선정하면 될 것으로 볼 수 있다.

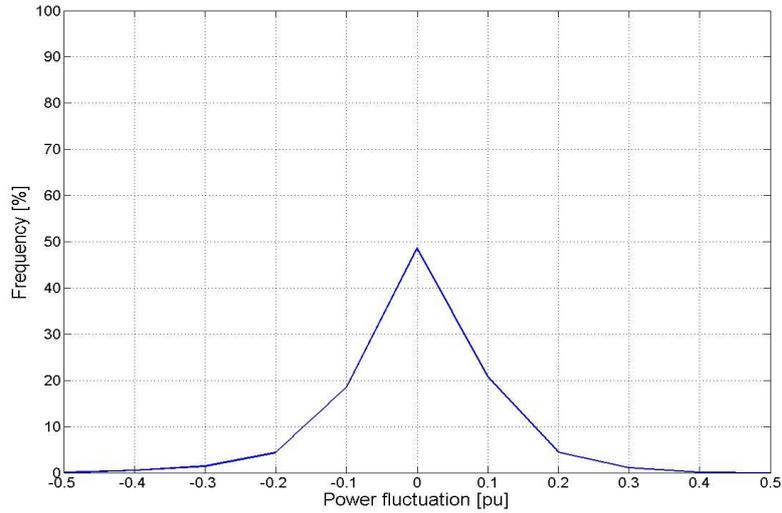


Fig. 17 Power fluctuation in Sung-San wind farm in Dec 9th
2012 (moving average 30min)

성산풍력발전단지의 평활화 제어를 위한 BESS 용량을 산정 시 평활화 시정수를 30분(1800초)로 잡을 경우, 식(5)에 의하여 구하여지는 필요한 최소 BESS의 용량은 식(8)과 같다.

$$C_{\min} = \frac{20[MW] \cdot \frac{30}{60}[h]}{2} = 5[MWh] \quad (8)$$

최대 BESS의 출력은 5MW이므로 BESS의 최대 충·방전 C-rate은 식(6)에 의하여 식(9)와 같이 값을 구할 수 있다.

$$C_{rate-\max} = \frac{5[MW]}{5[MWh]} = 1[C] \quad (9)$$

최대 방전율이 10C를 넘지 않으므로 BESS의 용량은 5MWh로 산정할 수 있다. 그림 18과 그림 19는 구해진 BESS의 용량과 평활화 시정수를 넣어서 풍력발전단지의 출력을 BESS로 어느 정도 잡을 수 있는지 시뮬레이션을 구현한 결

과이다.

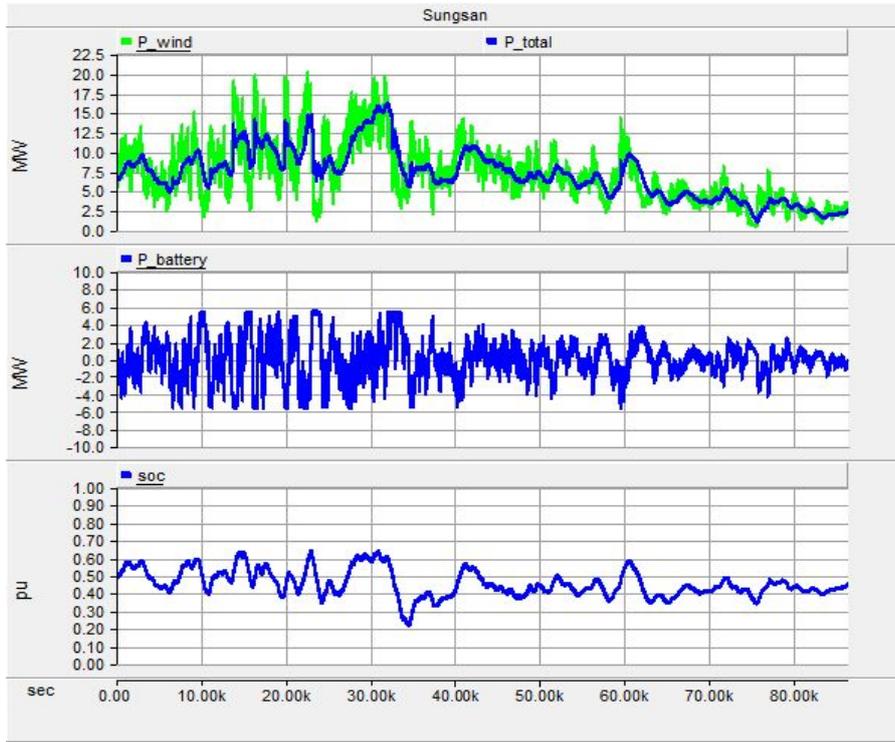


Fig. 18 Wave forms of power and SOC in Sung-San wind farm with BESS for smoothing control

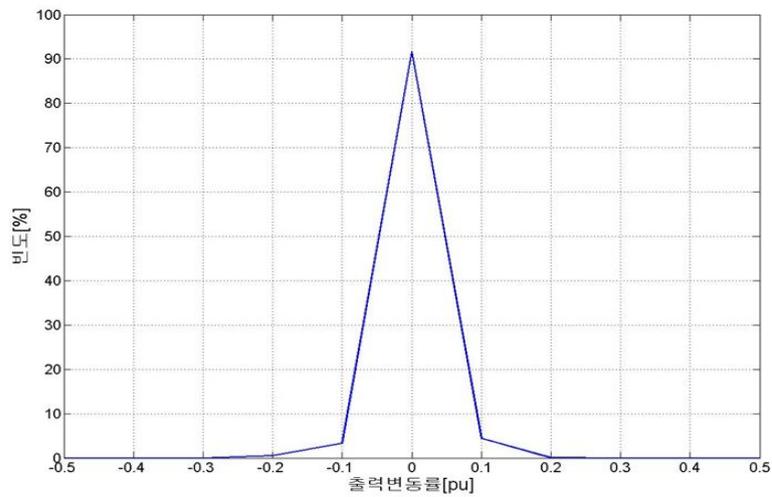


Fig. 19 Power fluctuation in Sung-San wind farm with BESS

그림 19에서 풍력발전단지의 출력변동은 $\pm 0.05pu$ 내에서 90%이상 이루어졌다는 것을 알 수 있다. 그림 15와 비교하면 50%이상의 출력변동이 사라졌다는 것을 알 수 있다.

2) 한경풍력발전단지

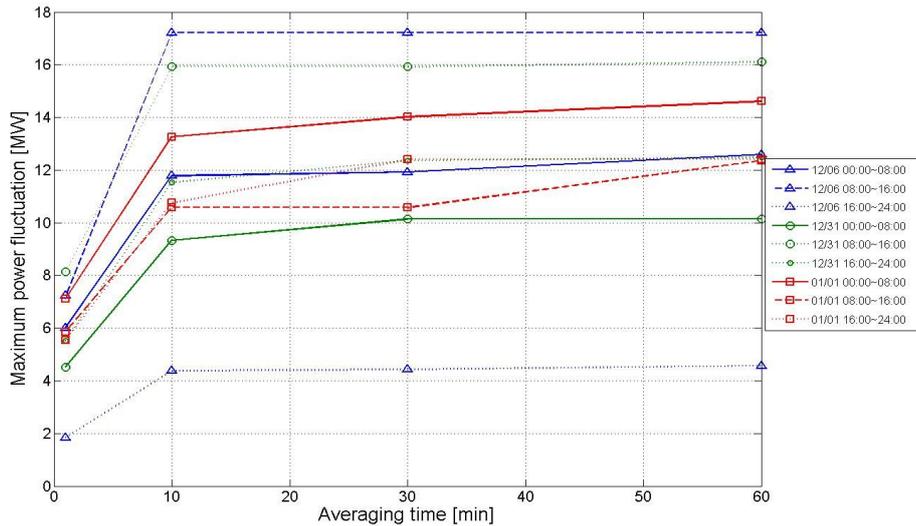


Fig. 20 Maximum power fluctuation in Han-Geong wind farm

한경풍력발전단지는 한국남부발전이 운영하고 있는 1.5MW 풍력발전기 4기, 3MW 5기의 총 21MW의 설비용량을 갖추고 있는 풍력발전단지이다. 그림 20은 해당 데이터 구간 내에서 출력 변동이 가장 심하였던 3일에 대하여 각 기준시간마다에 최대 출력 변동을 보여주며 대부분의 최대 출력 변동은 기준시간 10분에서 포화가 되는 것을 볼 수 있다. 즉, BESS의 평활화 제어를 위한 평활화 시정수를 10분으로 둘 경우 최대 출력 변동을 일으키는 고주파 요소의 출력을 대부분 제거 할 수 있다는 것을 예측할 수 있다.

그림 21은 10분 간격으로 이동평균을 수행하였을 때 최대 출력 변동 폭이 가장 컸던 2012년 12월 6일의 기준 값에 대한 출력 변동 값을 보여준다. 이 그래프에서 보이는 풍력발전단지의 출력 변동은 같은 곧 BESS에서 제거 해줘야하는

고조파 성분으로 $\pm 0.3\text{pu}$ 즉, $-6.3\text{MW}\sim 6.3\text{MW}$ 내에서 출력 변동이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 따라서 BESS의 컨버터 용량은 여유분을 뒀서 6.5MW급으로 선정하면 될 것이다.

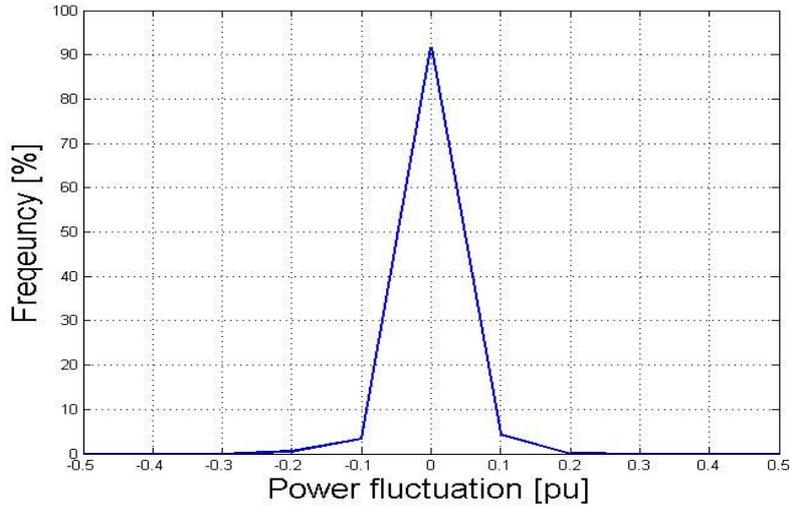


Fig. 21 Power fluctuation in Sung-San wind farm in Dec 6th 2012 (moving average 10min)

한경 풍력 발전단지의 BESS 용량을 산정하기 위한 평활화 시정수를 10분(600초)로 잡을 경우 식(5)에 의하여 구하여지는 필요한 최소 BESS의 용량은 식(10)과 같다.

$$C_{\min} = \frac{21[\text{MW}] \cdot \frac{10}{60}[\text{h}]}{2} = 1.75[\text{MWh}] \quad (10)$$

최대 BESS의 출력은 6.5MW이므로 BESS의 최대 충·방전 C-rate은 식(6)에 의하여 식(11)과 같게 된다.

$$C_{\text{rate-max}} = \frac{6.5[\text{MW}]}{1.75[\text{MWh}]} = 3.7[\text{C}] \quad (11)$$

최대 방전율이 10C를 넘지 않으므로 BESS의 용량은 1.75MWh로 산정할 수 있다.

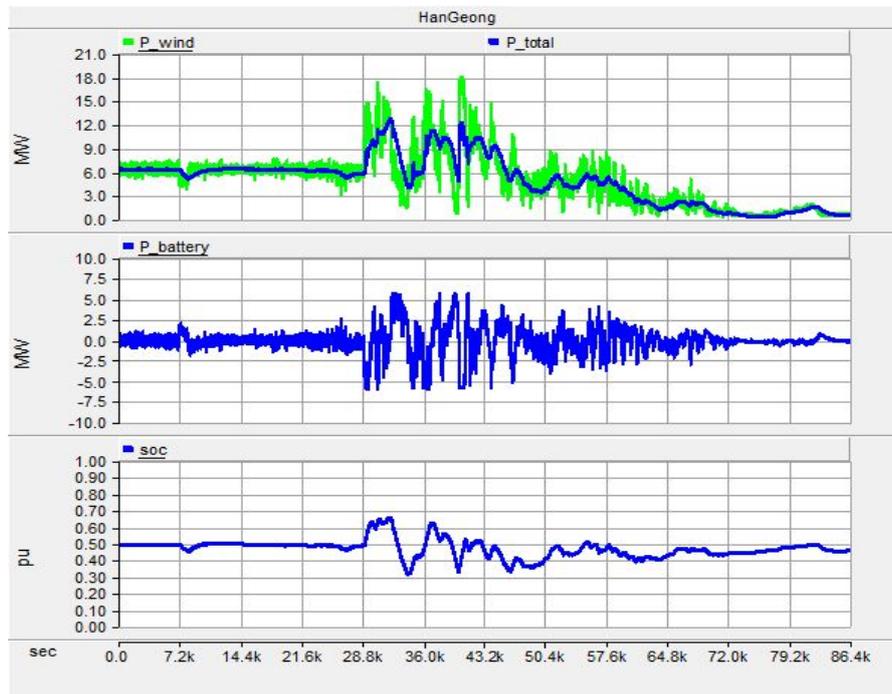


Fig. 22 Wave forms of power and SOC in Han-Geong wind farm with BESS for smoothing control

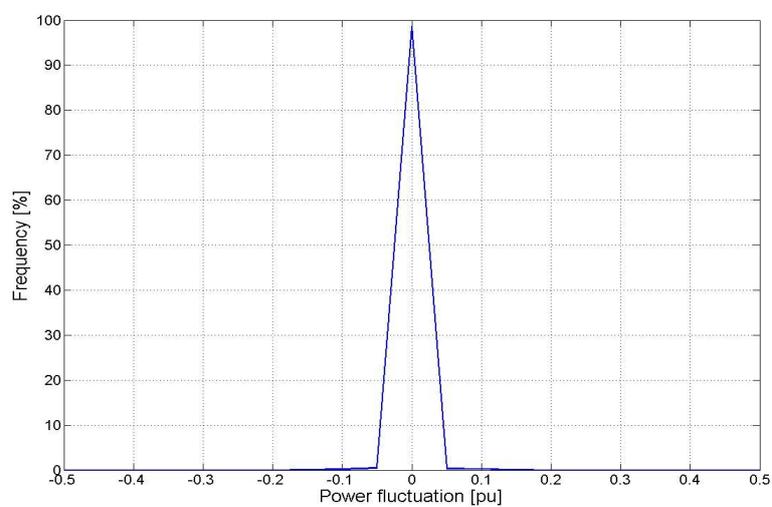


Fig. 23 Power fluctuation in Han-Geong wind farm with BESS

그림 23에서 풍력발전단지의 출력변동은 $\pm 0.05pu$ 내에서 99%이상 이루어졌다는 것을 볼 수 있고 그림 21과 비교하면 30%이상의 출력변동이 사라졌다는 것을 알 수 있다.

3) 삼달풍력발전단지

삼달풍력발전단지는 한신에너지가 운영하고 있으며 VESTAS사의 3MW 풍력발전기 11기로 구성되어 총 설비용량이 33MW인 풍력발전단지이다. 그림 24는 해당 데이터 구간 내에서 삼달 풍력 단지의 출력 변동이 가장 심하였던 3일에 대하여 각 기준시간 마다에 최대 출력 변동을 보여준다.

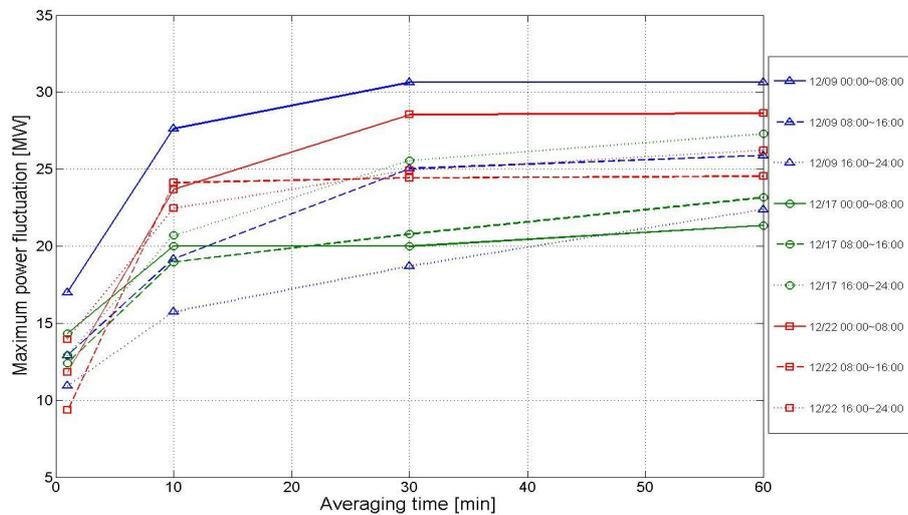


Fig. 24 Maximum power fluctuation in Sam-Dal wind farm

위의 그림 24의 그래프에서 대부분의 최대 출력 변동 폭은 기준시간 30분에서 포화가 되는 것을 볼 수 있다. 즉, BESS의 평활화 제어를 위한 평활화 시정수를 30분으로 둘 경우 최대 출력 변동을 일으키는 고주파 요소의 출력을 대부분 제거 할 수 있다는 것을 예측할 수 있다.

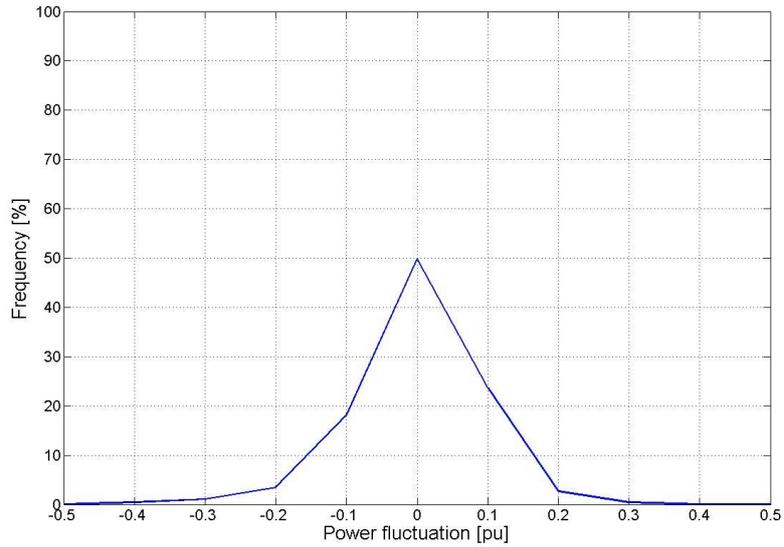


Fig. 25 Power fluctuation in Sam-Dal wind farm in Dec 9th 2012
(moving average 30min)

그림 25는 30분 간격으로 이동평균을 수행하였을 때 최대 출력 변동 폭이 가장 컸던 2012년 12월 9일의 기준 값에 대한 출력 변동 값을 보여준다. 이 그래프에서 보이는 풍력발전단지의 출력 변동은 같은 곧 BESS에서 제거 해줘야하는 고조파 성분으로 $\pm 0.5pu$ 즉, $-16.5MW \sim 16.5MW$ 내에서 출력 변동이 이루어지므로 BESS의 컨버터 용량은 여유분을 뒀서 17MW급으로 선정하면 될 것으로 볼 수 있다.

삼달 풍력 발전단지의 평활화 제어를 위한 BESS 용량을 산정하기 위한 평활화 시정수를 30분(1800초)로 잡을 경우 식(5)에 의하여 구하여지는 필요한 최소 BESS의 용량은

$$C_{\min} = \frac{33[MW] \cdot \frac{30}{60}[h]}{2} = 8.25[MWh] \quad (12)$$

최대 BESS의 출력은 16.5MW이므로 BESS의 최대 충·방전 C-rate은 식(6)에 의하여 식(13)과 같게 된다.

$$C_{rate-max} = \frac{16.5[MW]}{8.25[MWh]} = 2[C] \quad (13)$$

최대 방전율이 10C를 넘지 않으므로 BESS의 용량은 8.25MWh로 산정할 수 있다. 그림 26과 그림 27은 구해진 BESS의 용량과 평활화 시정수를 넣어서 동일 풍력발전단지의 출력을 BESS로 어느 정도 잡을 수 있는지 시뮬레이션 한 결과이다.

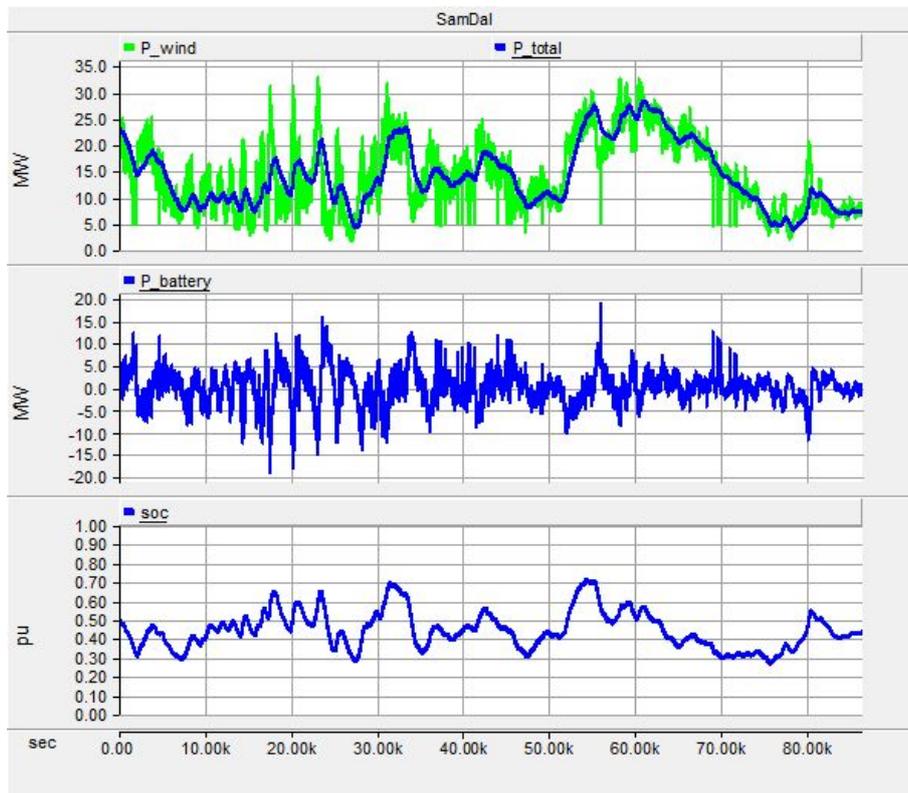


Fig. 26 Wave forms of power and SOC in Sam-Dal wind farm with BESS for smoothing control

그림 27에서 풍력발전단지의 출력변동은 $\pm 0.05pu$ 내에서 90%이상 이루어졌다는 것을 알 수 있다. 그림 25와 비교하면 40%이상의 출력변동이 사라졌다는 것을 알 수 있다.

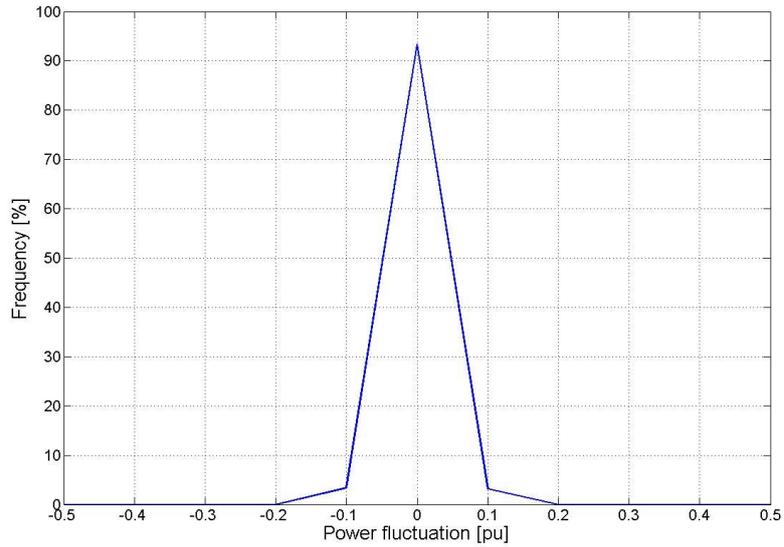


Fig. 27 Power fluctuation in Sam-Dal wind farm with BESS

4.2 제주계통의 주파수 운전 기준에 의한 BESS 용량 산정

HVDC가 연계되어 본토에서 전력을 공급받을 수 없을 경우 제주 계통에 주파수 제어는 남부발전의 기력 3,4호기가 담당하게 되고 이 두 발전기의 출력 증발률은 최대 분당 10MW/min 까지 가능하도록 되어있다[17]. 따라서 제주 계통에 연결되어진 분산전원의 경우 분당 10MW 이상의 감발률을 보이면 안 되는데, 풍력발전기가 많이 설치되어진 단지들은 풍속에 의한 출력 변동 역시 상대적으로 증가하여 순간적으로 분당 10MW 이상의 출력 감소를 보여주게 될 우려가 있다. 그림 28은 삼달 풍력발전단지의 2013년 2월 1일에 발생하였던 일부 구간동안의 출력 그래프이며 표 1과 같은 시간대에 분당 10MW이상의 출력 변동을 일으켰었다는 것을 알 수 있다.

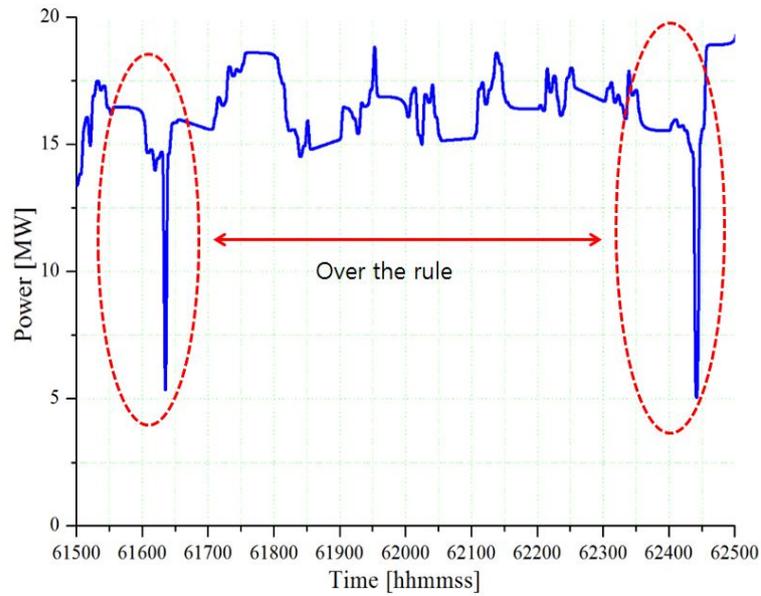


Fig. 28 Power output in Sam-Dal wind farm
(Feb 1st 2013 06:15~06:25)

Table. 1 Over fluctuated power in Sam-Dal wind farm

Start time [hh:mm:ss]	End time [hh:mm:ss]	Highest power [MW]	Lowest power [MW]
05:38:28	05:39:14	15.5	5.1
05:57:08	05:58:06	15.6	5.1
06:15:34	06:16:34	17.5	5.0
06:23:40	06:24:40	17.9	5.1

이러한 풍력 발전단지의 출력 변동을 막기 위하여 배터리의 제어를 출력 감발률을 기준으로 하여 설계할 경우 그림 29와 같은 합성출력을 만들 수 있어야 한다. 여기서 단시간동안 최대 10C까지 배터리의 출력을 끌어 올릴 수 있다면 BESS의 총 용량은 풍력발전단지 용량의 10%로써 제한 가능 하게 된다.

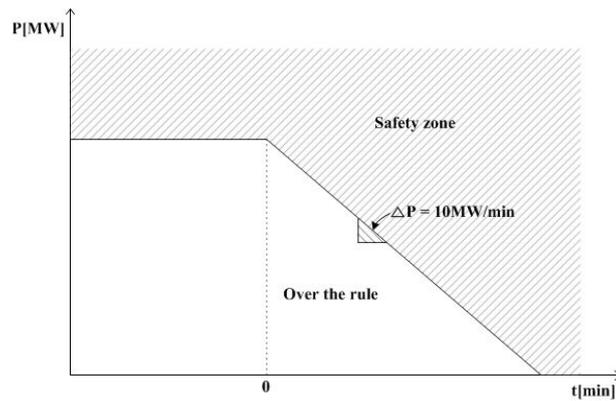


Fig. 29 Protection against step fluctuation

1) 성산풍력발전단지

성산풍력발전단지의 2012년 12월부터 2013년 2월까지의 데이터를 분석한 결과 분당 10MW를 넘어서는 출력 변화가 나타난 적이 없는 것으로 확인되었다. 이러한 출력 변화가 없었던 이유로는 풍력발전기의 직경은 크지만 단지의 용량이 20MW 밖에 되지 않아서 큰 감발률을 보일 상황이 없었던 것으로 사료된다.

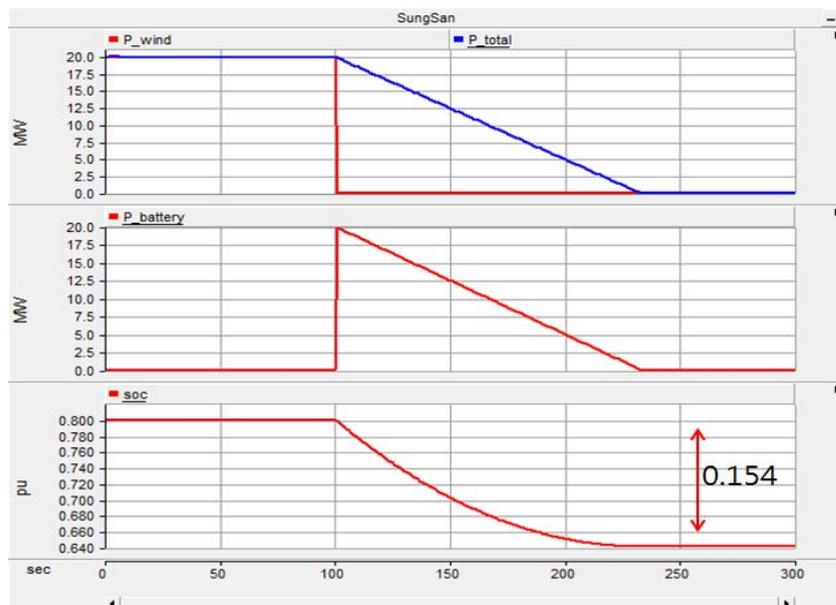


Fig. 30 Power compensation by BESS in Sung-San wind farm

실제 데이터 내에서 출력을 안정화할 구간이 없었기 때문에 정격 출력도중 단 지탈락시를 대비하는 시뮬레이션만을 진행하였는데 그 결과는 그림 30과 같다. 단지용량의 10% BESS를 사용하였으므로 C_{bat} 은 2MWh가 되고 분당 10MW의 기울기보다 여유분을 주기 위하여 시뮬레이션 내에서는 분당 9MW의 기울기를 갖도록 하였다. 정격 출력에서 탈락하였을 때 필요한 BESS의 방전 용량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{discharge} = \frac{P_{wf} \cdot T_{discharge}}{2 \cdot 60} = \frac{P_{wf}^2}{120 \cdot a_{discharge}} \quad (14)$$

$C_{discharge}$: 배터리 방전용량 [MWh]
 $T_{discharge}$: 총 방전 시간 [min]
 $a_{discharge}$: 방전 기울기 [MW/min]

성산의 경우 P_{wf} 는 20MW, $a_{discharge}$ 는 9MW/h 이므로 필요한 방전 용량은

$$C_{discharge} = \frac{20^2}{120 \cdot 9} = 0.37 \quad (15)$$

따라서 방전에 의하여 감소되는 SOC양은

$$\frac{C_{discharge}}{C} = \frac{0.37}{2} = 0.185 \quad (16)$$

배터리의 특성이 비선형적인 성질을 갖고 있기 때문에 방전된 SOC의 값이 약 간에 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

2) 한경풍력발전단지

한경풍력발전단지 역시 성산풍력발전단지와 같이 분당 10MW를 넘어서는 출

력 변화가 나타난 적이 없는 것으로 확인되었다. 실제 데이터 내에서 출력을 안정화할 구간이 없었기 때문에 정격 출력도중 단지 탈락시를 대비하는 시뮬레이션만을 진행하였고 그 결과는 그림 31과 같다.

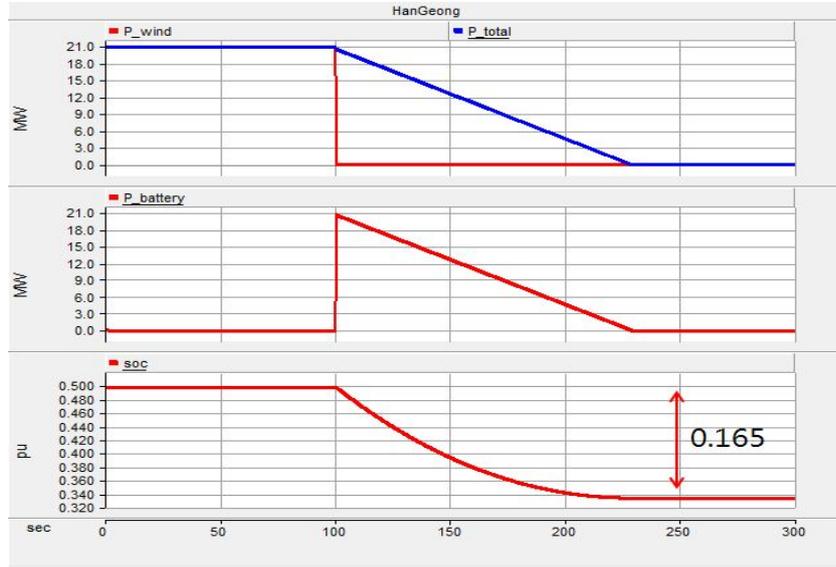


Fig. 31 Power compensation by BESS in Han-Geong wind farm

여기서 단지용량의 10% BESS를 사용하였으므로 C_{bat} 은 2.1MWh가 되고 분당 10MW의 기울기보다 여유분을 주기 위하여 시뮬레이션 내에서는 분당 9MW의 기울기를 갖도록 하였다.

한경의 경우 P_{wf} 는 21MW, $a_{discharge}$ 는 9MW/h 이므로 필요한 방전 용량은 식 (14)에 의하여 식(17)과 같다.

$$C_{discharge} = \frac{21^2}{120 \cdot 9} = 0.408 \quad (17)$$

따라서 방전에 의하여 감소되는 SOC양은 식(18)과 같다.

$$\frac{C_{discharge}}{C} = \frac{0.408}{2.1} = 0.194 \quad (18)$$

배터리의 특성이 비선형적인 성질을 갖고 있기 때문에 방전된 SOC의 값이 약
간에 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

3) 삼달풍력발전단지

삼달풍력발전단지의 경우 다른 두 풍력발전단지에 비하여 단지용량이 크기 때
문에 일정 구간에서는 표 2와같이 분당 10MW를 넘는 출력 변동이 간헐적으로
발생하였던 것을 볼 수 있었다.

Table. 2 Data analysis of Sam-Dal wind farm power
(Feb 9th 2013)

Start time [hh:mm:ss]	End time [hh:mm:ss]	Highest power [MW]	Lowest power [MW]
23:22:38	23:23:38	14.9	4.9
23:26:56	23:27:56	15.7	4.9

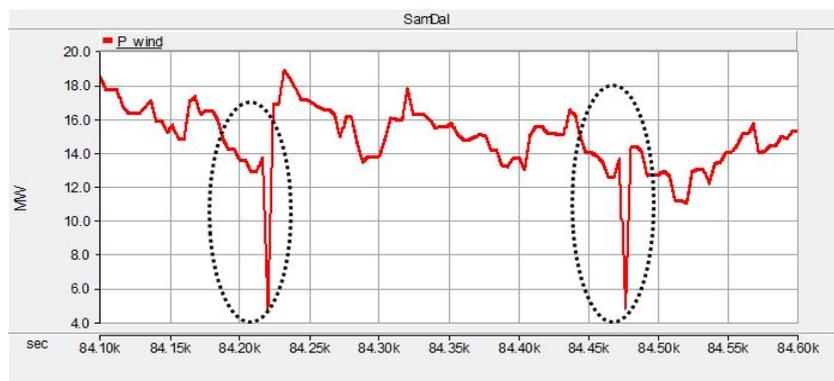


Fig. 32 Zoom of power fluctuation in Sam-Dal wind farm

그림 32와 같이 특정기간 동안의 출력 변동을 잡기 위하여 BESS를 사용할
경우 평활화 제어를 위하여 사용되어질 때보다 요구되는 BESS의 출력이 줄어들
게 되어 더 적은 용량의 BESS로도 효율적으로 단지의 출력 변동을 잡을 수 있
게 된다.

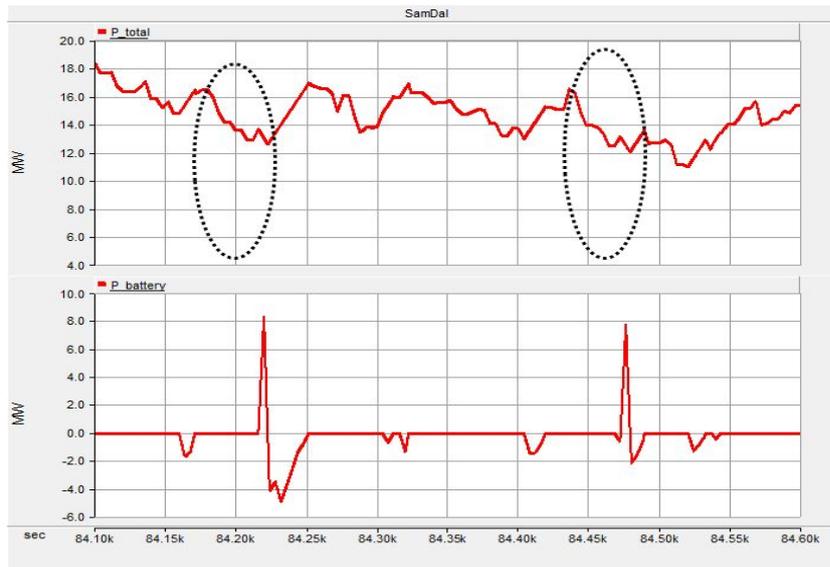


Fig. 33 Zoom of power fluctuation with BESS in Sam-Dal wind farm

삼달 풍력 발전 단지가 정격 출력 도중 타락하였을 경우에 대한 시뮬레이션 상황과 그 결과는 그림 34와 같다.

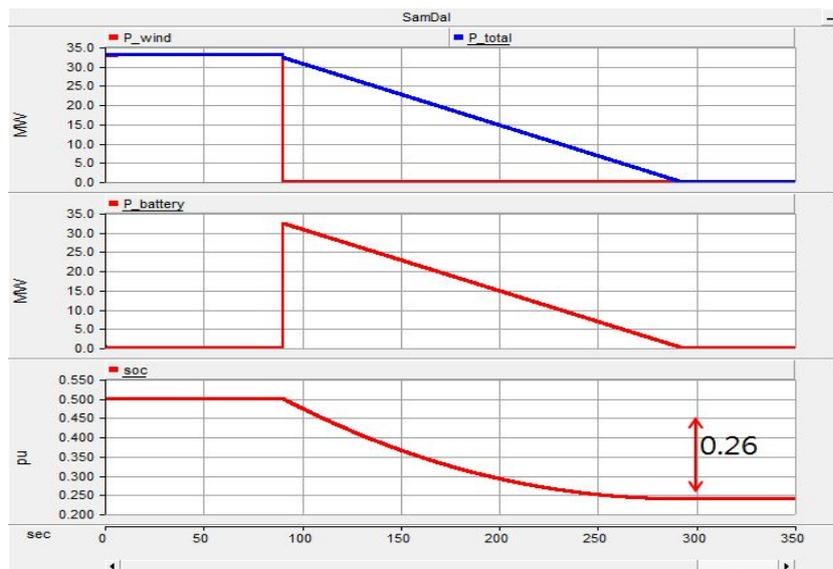


Fig. 34 Power compensation by BESS in Sam-Dal wind farm

여기서 단지의 10% 용량의 BESS를 사용하였으므로 P_{wf} 는 33MW, C_{bat} 은

3.3MWh, $a_{\text{discharge}}$ 는 9MW/h 이므로 필요한 방전 용량은 식(14)에 의하여 식(19)와 같다.

$$C_{\text{discharge}} = \frac{33^2}{120 \cdot 9} = 1.01 \quad (19)$$

따라서 방전에 의하여 감소되는 SOC양은 식(20)과 같다.

$$\frac{C_{\text{discharge}}}{C} = \frac{1.01}{3.3} = 0.306 \quad (20)$$

그림 34에서 배터리의 특성이 비선형적인 성질을 갖고 있기 때문에 방전된 SOC의 값이 약간에 차이를 보이고 있지만 식(20)의 값과 유사한 결과를 보이고 있다.

4.3 신재생발전기 계통연계기준 BESS 용량 산정

신재생에너지원 설치법에 의하면 모든 신재생에너지 발전소들은 자기 자신의 정격용량에 대하여 분당 10% 이내로 증발률을 제한할 수 있어야 한다는 규정이 있다. 실제로 이러한 규정을 지키기 위해서 현재 상업 운전되어지는 여러 풍력 발전단지들은 Droop 제어와 같은 방법을 이용하여 출력을 제한해야 한다. 출력을 제한하여 발전단지의 전체적인 이용률을 줄이는 것은 발전사업자의 입장에서는 큰 손해가 되므로 이러한 법규를 발전량 손실을 일으키지 않으면서 지킬 수 있도록 에너지 저장장치를 사용하는 것은 Droop 제어의 좋은 대안이 될 것이다.

아래의 절에서는 생산, 환경, 삼달 풍력발전단지에 발전 출력에 증발률에 대하여 분석하고 규정이상의 출력 증발률이 발생하지 않도록 BESS를 제어하는 방법에 대하여 시뮬레이션 하였다. 여기서 BESS의 용량은 풍력단지가 일으킬 수 있는 최대 변동을 감당하기 위하여 4장 2절과 유사하게 단지용량의 10%로 제한하였고 시뮬레이션을 위한 데이터는 4장 1절에서 선정된 측정기간 중 가장 출력변

동이 컸었던 날짜의 데이터를 사용하였다.

1) 성산풍력발전단지

현재 성산풍력발전단지의 총 설비용량은 20MW이므로 분당 정격용량의 10%의 증발률인 2MW/min 이상의 출력 증발률을 가지지 못하도록 제어해야한다. 그림 35는 2012년 12월 9일의 출력데이터의 일부분으로써 표 3은 같은 시간동안 풍력발전단지에 출력 증발률이 분당 단지 정격에 10%이상의 기울기로 상승하였을 때를 보여준다. 현재의 규정상 일반적인 상황에서 증발률에 대한 고려가 필요하지 않기 때문에 규정을 넘어서는 구간이 많은 것을 볼 수 있다.

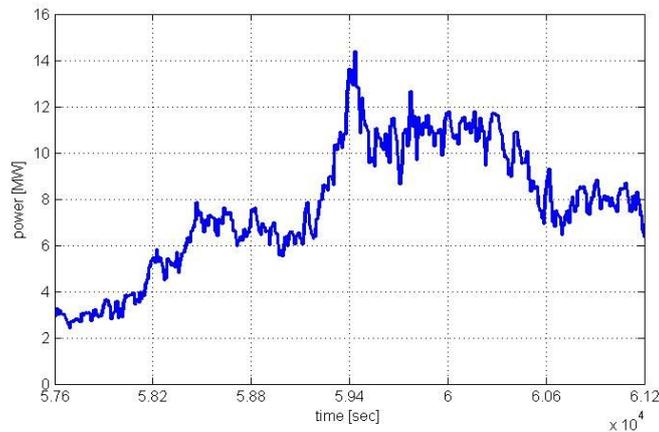


Fig. 35 Power output in Sung-San wind farm
(16:00~17:00 Dec 9th 2012)

Table. 3 Data analysis of Sung-San wind farm (Dec 9th 2012)

Start time [hh:mm:ss]	End time [hh:mm:ss]	Lowest power [MW]	Highest power [MW]	Power fluctuation [MW]
16:26:18	16:27:18	6.3	8.6	2.3
16:29:32	16:30:28	10.8	14.4	3.6
16:35:10	16:36:10	8.7	12.7	4.0
16:43:44	16:44:38	9.5	11.7	2.2
16:49:42	16:50:14	6.9	9.3	2.4

위의 표 3의 경우는 1분 내에 2MW이상의 출력의 변동만을 체크하였지만 실제로는 더 적은 출력의 변동이라도 짧은 시간 내에 생길 경우 시간에 대한 출력의 기울기는 더 커질 수 있기 때문에 더 많은 규정값 이상의 출력변동이 생겼었다는 것을 예측 할 수 있다. 위와 같은 출력 변동률을 잡기 위하여 BESS를 사용하였을 경우의 SOC변동과 합성 출력의 변화는 그림 36과 같다.

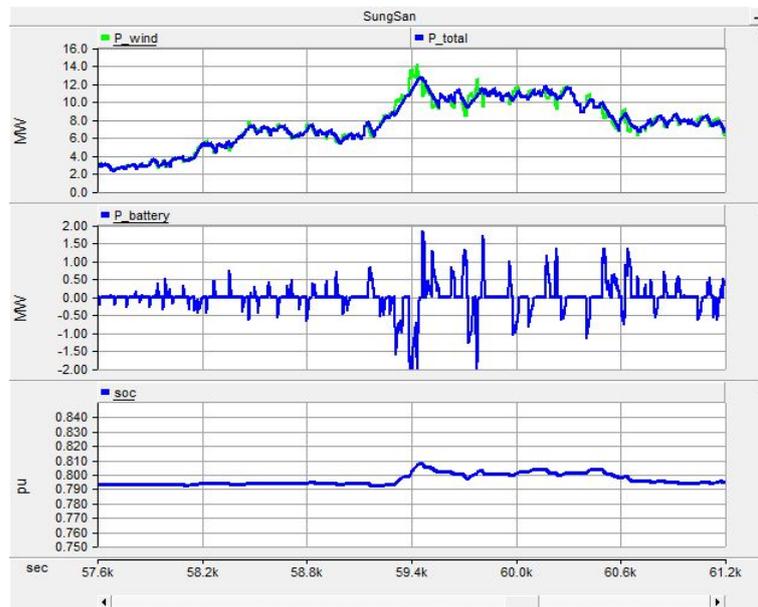


Fig. 36 Output of power and SOC in Sung-San wind farm with BESS based on grid code

증발률 제어를 하였을 경우 제어되는 구간에서는 BESS가 에너지를 계속하여 흡수하게 되기 때문에 SOC가 0.7~0.9범위를 유지할 수 있도록 증발률 제어가 필요하지 않은 구간에서는 감발률 제어를 하여 BESS의 에너지를 방전시키도록 하였다.

이러한 제어를 사용할 경우 출력 증발률뿐만 아니라 감발률의 제어도 자연스럽게 가능하게 되기 때문에 BESS의 이용 효율이 증가하게 된다.

2) 한경풍력발전단지

현재 한경풍력발전단지의 총 설비용량은 21MW이므로 신재생 에너지법 규정에 의하여 2.1MW/min 이상의 출력 증발률을 가지지 못하도록 제어해야한다. 그림 37은 2012년 12월 6일의 출력데이터의 일부분으로써 표 4는 같은 시간동안 풍력발전단지에 출력 증발률이 분당 단지 정격에 10%이상의 기울기로 상승하였을 때를 보여준다.

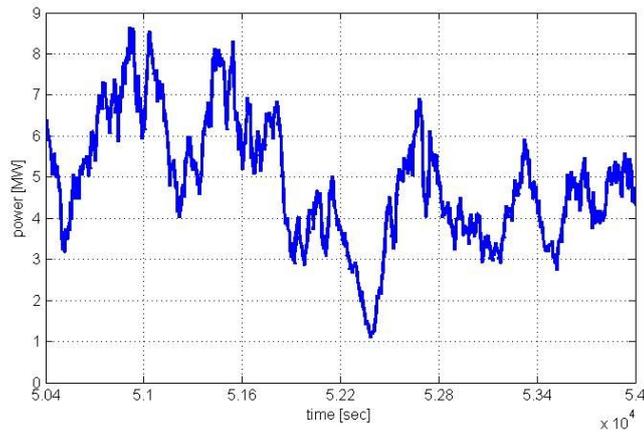


Fig. 37 Power output in Han-Geong wind farm
(14:00~15:00 Dec 6th 2012)

Table. 4 Data analysis in Han-Geong wind farm (Dec 6th 2012)

Start time [hh:mm:ss]	End time [hh:mm:ss]	Lowest power [MW]	Highest power [MW]	Power fluctuation [MW]
14:07:36	14:08:36	5.9	8.1	2.2
14:10:02	14:10:46	5.9	8.6	2.7
14:15:52	14:16:44	4.6	6.8	2.2
14:18:38	14:19:16	6.2	8.3	2.1
14:34:20	14:35:10	2.1	4.5	2.4

위의 표 4는 그림 37과 같은 기간 동안 1분 내에 2.1MW이상의 출력의 변동을 체크하였다. 실제의 출력 변동의 기울기는 더 적은 출력의 변동이라도 짧은 시간 내에 생길 경우 더 커질 수 있기 때문에 더 많은 규정값 이상의 출력변동이 생겼었다는 것을 예측 할 수 있다. 위와 같은 출력 변동률을 잡기 위하여 BESS를

사용하였을 경우의 SOC변동과 합성 출력의 변화는 그림 38과 같다.

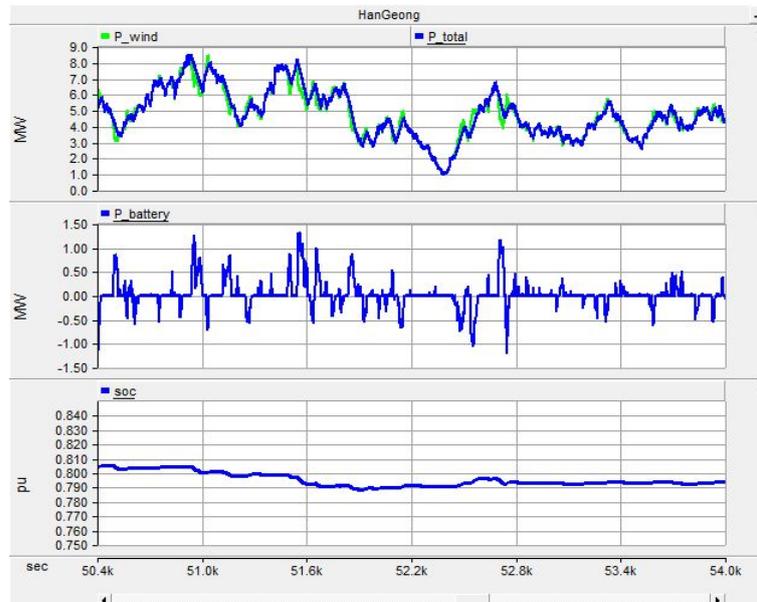


Fig. 38 Output of power and SOC in Han-Geong wind farm with BESS based on grid code

증발률 제어를 하였을 경우 제어되는 구간에서는 BESS가 에너지를 계속하여 흡수하게 되기 때문에 SOC가 0.7~0.9범위를 유지할 수 있도록 증발률 제어가 필요하지 않은 구간에서는 감발률 제어를 하여 BESS의 에너지를 방전시키도록 하였다.

3) 삼달풍력발전단지

현재 삼달풍력발전단지의 총 설비용량은 33MW이므로 분당 정격용량의 10%의 증발률인 3.3MW/min 이상의 출력 증발률을 가지지 못하도록 제어해야한다. 그림 39는 2012년 12월 9일의 출력데이터의 일부분으로써 표 5는 같은 시간동안 풍력발전단지에 출력 증발률이 분당 단지 정격에 10%이상의 기울기로 상승하였을 때를 보여준다.

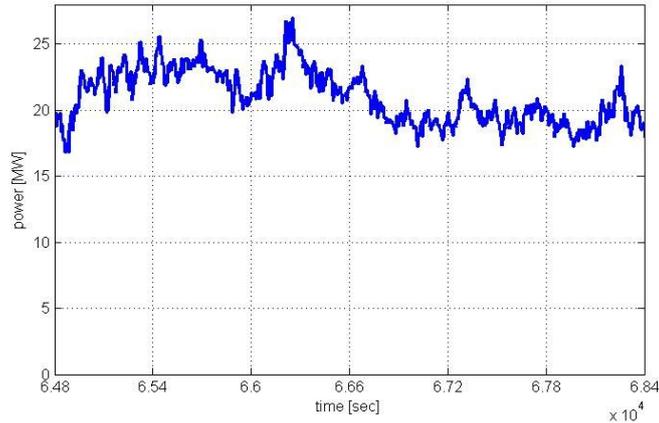


Fig. 39 Power output in Sam-Dal wind farm
(18:00~19:00 Dec 9th 2012)

Table. 5 Data analysis in Sam-Dal wind farm (Dec 9th 2012)

Start time [hh:mm:ss]	End time [hh:mm:ss]	Lowest power [MW]	Highest power [MW]	Power fluctuation [MW]
18:01:50	18:02:42	18.5	23.1	4.6
18:05:18	18:05:38	19.8	23.4	3.6
18:07:52	18:08:40	20.8	25.1	4.3
18:09:44	18:10:36	22.0	25.6	3.6
18:23:10	18:24:08	22.4	27.0	4.6
18:40:30	18:41:28	18.1	21.5	3.4
18:56:36	18:57:36	19.4	23.3	3.9

위의 표 5는 그림 39와 같은 기간 동안 1분 내에 3.3MW이상의 출력의 변동을 체크하였다. 실제의 출력 변동의 기울기는 더 적은 출력의 변동이라도 짧은 시간 내에 생길 경우 더 커질 수 있기 때문에 더 많은 규정값 이상의 출력변동이 생겼었다는 것을 예측 할 수 있다. 위와 같은 출력 변동률을 잡기 위하여 BESS를 사용하였을 경우의 SOC변동과 합성 출력의 변화는 그림 38과 같다.

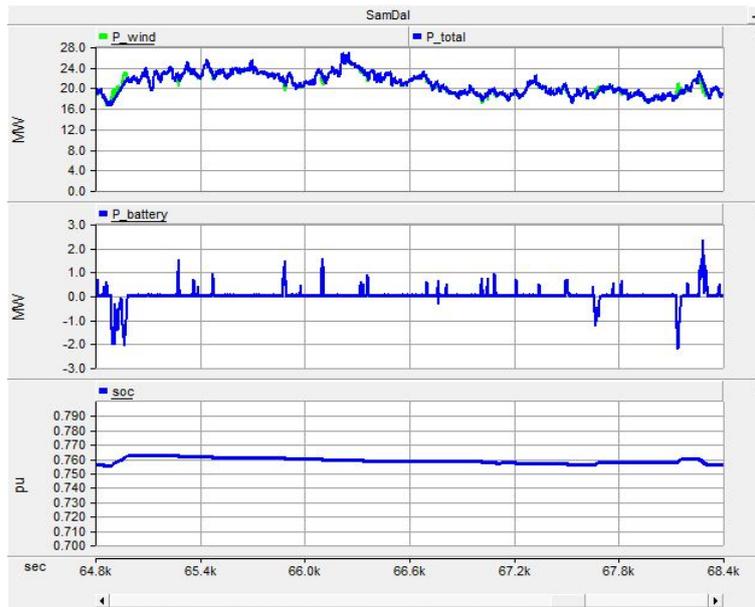


Fig. 40 Output of power and SOC in Sam-Dal wind farm with BESS based on grid code

증발률 제어를 하였을 경우 제어되는 구간에서는 BESS가 에너지를 계속하여 흡수하게 되기 때문에 SOC가 0.7~0.9범위를 유지할 수 있도록 증발률 제어가 필요하지 않은 구간에서는 감발률 제어를 하여 BESS의 에너지를 방전시키도록 하였다.

4.4 시뮬레이션 결과 및 고찰

위의 절에서 실행하였던 풍력발전단지를 위한 BESS의 용량 산정 및 제어 방식에 대한 결과는 표6과 같이 요약 가능하다. 각 제어 방식에 따른 BESS와 컨버터의 용량은 3개의 단지에 대한 계산 결과 중 가장 표준적이게 사용되어진 값들에 대하여 정리한 것이기 때문에 세부적인 결과 값들은 위의 절들에서 나왔던 결과 값과는 약간의 차이를 보일 수 있다.

Table. 6 BESS capacity and characteristics of control methods

Control method	BESS capacity	Converter capacity	Characteristics
Smoothing control	25% by wind farm's rated power	50% by wind farm's rated power	to eliminate almost short term fluctuation
as Distributed generator	10% by wind farm's rated power	100% by wind farm's rated power	to eliminate fluctuation under -10MW/min
as Grid code for renewable energy sources	10% by wind farms's rated power	100% by wind farm's rated power	to eliminate fluctuation over 10%/min

위의 표에서 보면 최대 출력 변동을 기준 하여 BESS 제어를 하였을 경우 초과 성분은 모두 제거가 되나 배터리의 용량이 그만큼 많이 필요하게 된다는 것을 알 수 있고, 분산 전원 혹은 신재생 에너지 계통 연계 기준을 고려하였을 경우 필요한 배터리 용량은 상당히 줄어들게 된다는 것을 알 수 있다. 단, 전체 단지의 탈락시를 고려하였을 경우 인버터 시스템이 단지의 정격출력을 감당할 수 있어야 된다.

5. 결 론

본 논문에서는 풍력발전단지에 출력안정화를 위하여 BESS를 사용하였을 경우에 제어기법과 용량산정에 대하여 기술 하였다. 현재 풍력발전단지를 위한 국내의 계통연계기준이 명확하지 않고 고립되어있는 국내의 전력망 특성에 의하여 풍력발전단지가 증가 할수록 전력계통에 악영향을 끼칠 수 있기 때문에 대체에너지로써 풍력발전을 사용하기 위하여서는 문제가 될 수 있는 출력 변동을 제거하는 것이 반드시 필요할 것이다. 현재 대부분의 장주기 출력 변동은 전력계통에서 원활히 흡수 할 수 있기 때문에 단주기 출력 성분 중 불필요한 성분을 제거하여 출력 안정화를 하여야 할 것이다. 이러한 출력안정화를 위한 제어기법으로 세 가지 방안을 제시하였고 이러한 제어기법들은 각각 아래와 같은 특징을 갖고 있다.

- 1) 출력 평활화 제어 방법은 평활화를 위한 시정수를 기초하여 더 변동주기가 짧은 고주파 성분들을 대부분 줄일 수 있어 출력에 안정화 정도는 뛰어나지만 BESS의 용량이 그만큼 커지게 되고 BESS의 출력 변동량도 많아지게 되어 배터리의 충·방전 사이클도 빠르게 소모될 우려가 있다.
- 2) 제주도내에서 분산전원으로써 운전하기 위한 출력 감발률 제어방식은 풍력발전단지의 출력이 기준이 되는 10MW/min 이상의 기울기로 내려갈 경우 BESS에서 출력을 보상하여 전력계통에 부담이 가지 않도록 하는 제어 방식으로 정상상태의 풍력발전의 출력에서는 이러한 출력의 변동은 자주 나타나지 않기 때문에 BESS의 용량은 클 필요가 없다. 단, 정격 출력도중 단지가 계통에서 탈락될 경우를 고려하게 되면 설치되는 배터리가 10C까지 방전이 가능하다고 할 경우 BESS의 용량은 단지 용량의 10% 이상이 되어야 한다.
- 3) 신재생에너지 계통연계기준을 지키기 위한 출력 증발률 제어방식은 풍력발

전단지의 출력 증발률이 분당 단지용량의 10%이상 일어나서는 안 되도록 BESS에서 에너지를 흡수하는 방식으로 출력 변동에 제한을 뒤서 계통에 안정성을 향상시키는 방식이다. 이 경우 역시 정상상태에서는 많이 필요한 제어방식도 아닐뿐더러 특수한 사항이 아닐 경우 굳이 제어가 필요하지 않기 때문에 대용량의 BESS를 설치할 필요가 없게 된다. 또한 증발률을 제한하기 위해서는 기준 이상의 출력을 BESS에서 흡수해야 하는 것이므로 2)의 방법과 병행해서 사용할 경우 자연스럽게 SOC를 일정하게 제어하는 것이 가능할 뿐만 아니라 이용 효율 역시 증가하게 된다. 또한 증가량 역시 0의 출력 도중 정격출력까지 도달하게 되는 경우까지 고려하게 된다면 배터리 용량은 단지용량의 10% 이상이 되어야 한다.

이러한 BESS의 제어 및 용량 산정에 대한 방식은 이 후 대용량 단지가 증가할수록 더욱 큰 고려대상이 될 것으로 보고 본 논문이 중요한 지표가 될 수 있을 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- [1] 牛山 泉 원저, 고경남·허종철 공역, “풍력공학입문”, 문운당, 2006.
- [2] Henderson M, Coste W, Platts J, “ISO New England wind integration studies and the New England governor’s renewable energy blueprint”, Power and Energy Society General Meeting, 2010, IEEE.
- [3] Feltes J.W, Gemmell B.D, Retzmann D, “From Smart Grid to Super Grid: Solutions with HVDC and FACTS for grid access of renewable energy sources”, Power and Energy Society General Meeting, 2011, IEEE.
- [4] Anna Arestova, Yury Sidorkin, “The use of wind farms and virtual power plants for emergency control in the future smart super grids” in Proc. Int. 6th International Forum on Strategic Technology, vol. 1, pp. 437~442, 2011.
- [5] J.E.S. de Haan, J. Frunt, W.L. Kling, “Mitigation of Wind Power Fluctuations in smart grids” in Proc. Int. Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, pp. 1~8, 2010.
- [6] Jin Lin, Yuanzhang Sun, Yonghua Song, Wenzhong Gao, Sorensen, P, “Wind Power Fluctuation Smoothing Controller Based on Risk Assessment of Grid Frequency Deviation in an Isolated System” in Proc. Int. IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 4, pp. 379~392, 2013.
- [7] LIN Jin, Sun Yuan-zhang , Poul Sorensen, Li Guo-jie, Li Xiong, “Frequency modeling of wind power fluctuation and the application on power systems” in Proc. Int. International Conference on Power System Technology, pp. 1~8, 2010.
- [8] Changling Luo, Hadi Banakar, Baike Shen, Boon-Teck Ooi, “Strategies to Smooth Wind Power Fluctuations of Wind Turbine Generator” in

- Proc. Int. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, pp. 341~349, 2007.
- [9] Isaac Van der Hoven, “Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0.0007 to 900 cycles per hour”, journal of meteorology, 1957.
- [10] KEPCO 한국전력, “송·배전용전기설비 이용규정 : 별표 6 신재생발전기 계통연계기준”, 2013.
- [11] Philippe Venne, X. Guillaud, R. Teodorescu, J. Mahseredjian, “Generalized Gain Scheduling for Deloaded Wind Turbine Operation”, Wind Engineering Vol34, 2010.
- [12] Islam F.R Pota H.R, “V2G Technology to Improve Wind Power Quality and Stability”, AUCC, 2011.
- [13] C.M. Shepherd, “Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An equation describing battery discharge”, Journal of Electrochemical Society, 1965.
- [14] Panasonic battery manufacturer’s datasheet.
- [15] Sercan Teleke, Mesut E. Baran, Alex Q. Huang, Subhashish Bahttacharya, “Control Strategies for Battery Energy Storage for Wind Farm Dispatching”, IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009.
- [16] 전원개발 주식회사, “풍력 발전 전력 계통 안정화 등 기술개발 - 성과보고서(중간)”, 독립행정법인 신에너지 산업기술 종합 개발 기구(NEDO), 2006.
- [17] 제주특별자치도, “안정적 전력공급방안 및 풍력발전 한계용량 증대방안 조사”, 2012.