



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

BESS를 이용한 풍력발전단지의  
출력 안정화

濟州大學校 大學院

風力特性化協同科程

姜 明 錫

2011 年 12 月



# BESS를 이용한 풍력발전단지의 출력 안정화

指導教授 金 一 煥

姜 明 錫

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2011 年 12 月

姜明錫의 工學 碩士學位 論文을 認准함

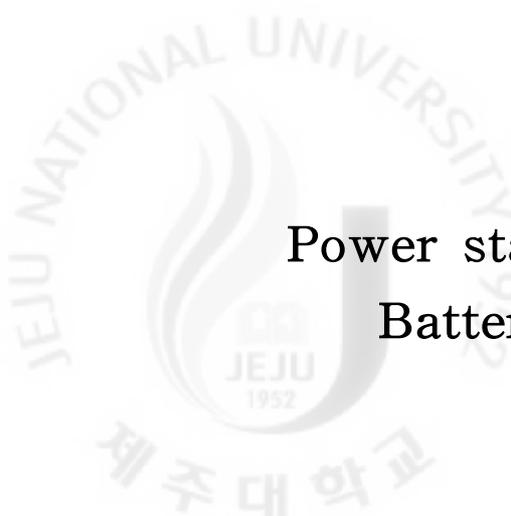
審査委員長 \_\_\_\_\_ ①

委 員 \_\_\_\_\_ ①

委 員 \_\_\_\_\_ ①

濟州大學校 大學院

2011 年 12 月



Power stabilization of wind farm using  
Battery Energy Storage System

Myeong-Seok Kang  
(Supervised by professor Eel-Hwan 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

2011. 12.

## 목 차

그림 목차 .....	ii
표 목차 .....	iv
SUMMARY .....	V
I. 서 론 .....	1
II. 풍력발전단지의 출력특성 .....	3
2.1 행원 풍력발전단지의 개요 .....	3
2.2 출력특성 .....	5
III. 용량산정 및 출력 안정화 .....	11
3.1 BESS의 용량산정 .....	11
3.2 출력 안정화 .....	14
IV. 컴퓨터 해석 .....	19
4.1 BESS 모델링 .....	19
4.2 제어시스템 모델링 .....	20
4.3 해석 결과 및 고찰 .....	23
V. 결 론 .....	28
참 고 문 헌 .....	30

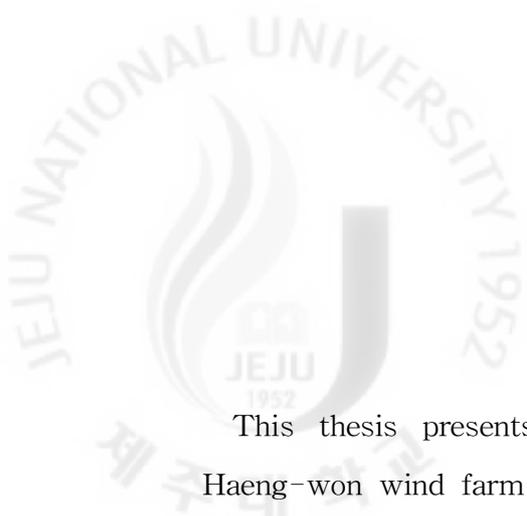
## 그림 목 차

그림 1 배터리 용량에 따른 용도 .....	2
그림 2 행원 풍력발전단지 전경 .....	3
그림 3 피치제어와 스톱제어의 출력특성 .....	4
그림 4 봄 출력 변동률 .....	6
그림 5 여름 출력 변동률 .....	7
그림 6 가을 출력 변동률 .....	8
그림 7 겨울 출력 변동률 .....	10
그림 8 풍력발전단지 스텝 변동 시 필요 배터리 용량 .....	11
그림 9 이동평균 평가시간 .....	12
그림 10 이상적인 합성출력 블럭도 .....	13
그림 11 이상적인 합성출력 그래프 .....	13
그림 12 배터리 출력 요구치 히스토그램 .....	13
그림 13 출력 안정화 시스템의 개략도 .....	14
그림 14 출력 평활 제어 블럭도 .....	15
그림 15 평활화 시정수와 합성출력과의 관계 .....	15
그림 16 합성 출력 목표치와 배터리 잔존용량의 관계 .....	16
그림 17 잔존 용량 피드백 제어의 블럭도 .....	16
그림 18 시정수 가변 제어 블럭도 .....	17
그림 19 Shepherd 배터리 모델 .....	19
그림 20 PSCAD/EMTDC를 사용한 배터리 모델 .....	20
그림 21 모델링된 배터리의 내부 구조도 .....	20
그림 22 PSCAD/EMTDC를 사용한 제어시스템 모델 .....	21
그림 23 인버터 모델링 .....	21

그림 24 풍력발전단지 모델링 .....	22
그림 25 실제 배터리의 방전 그래프 .....	23
그림 26 모델링된 배터리의 방전 그래프 .....	23
그림 27 행원풍력발전단지의 최대 출력변동(2009.12.11.) .....	24
그림 28 출력 평활화 제어 시 출력과형 및 배터리 잔존용량 .....	25
그림 29 잔존용량 피드백 제어 시 출력 과형 및 배터리 잔존용량 .....	26
그림 30 시정수 가변제어 시 출력 과형 및 배터리 잔존용량 .....	27

## 표 목 차

표 1 봄 출력 변동률 누적빈도분포 .....	6
표 2 여름 출력변동률 누적빈도분포 .....	7
표 3 가을 출력변동률 누적빈도분포 .....	9
표 4 겨울 출력변동률 누적빈도분포 .....	10



## SUMMARY

This thesis presents the characteristics of output power generation at Haeng-won wind farm in Jeju and how to control the output power of wind farm with BESS for stabilizing power by using the actual data of Haeng-won wind farm from 2009.3 to 2010.2.

Output characteristics of Haeng-won wind farm is confirmed by analyzing the fluctuation rate of power for 1 min, 10 min and 30 min using the actual data. By using the moving average method, the optimal saturation time is found at 30 min.

So, the 2.45 MWh is fixed for the capacity of battery, and the rated power of inverter is determined 2 MW by the histogram of battery output requirement.

To control the stabilizing power, the output smoothing, SOC feedback and reference time variable control methods are used. Wind farm, batteries and inverter modeling are carried out by using PSCAD/EMTDC simulation program.

As a result, the proposed control methods show the excellent performance of the output power of wind farm.

## I. 서 론

전 세계적으로 화석 에너지 고갈에 따른 대체에너지원 개발과 화석 에너지 사용으로 인해 발생하는 탄소배출을 줄이기 위해 신재생 에너지 분야의 관심과 투자가 활발히 이루어지고 있다. 신재생 에너지 가운데 단위 면적당 경제성 확보가 우수한 풍력발전 분야의 투자 규모는 매년 증가하는 추세로서 전체 전력 생산량에서 풍력발전이 차지하는 범위가 점차 증가되고 있다. 초기의 풍력발전시스템개발은 유럽을 중심으로 이루어졌던 반면에 현재는 북미를 시작으로 아시아에 이르기까지 전 세계적으로 풍력발전 분야의 투자와 개발이 활발히 이루어지고 있다. 우리나라도 『2015년 5대 신재생 에너지 강국으로 도약』이란 신재생에너지 산업 발전전략을 바탕으로 정부와 기업을 중심으로 풍력발전에 대한 투자와 연구가 활발히 진행 중이다[1].

현재 국내의 풍력발전 산업은 1998년 8월 상업 운전에 들어간 제주 행원 풍력발전단지를 시작으로 2011년 까지 총 28곳에 393.8MW의 용량이 조성되어 운영되고 있다[2]. 바람자원이 풍부하여 풍력발전의 최적지로서 각광을 받고 있는 제주지역에서 운영되고 있는 풍력발전단지는 동부지역에 약 66MW, 서부지역에 약 24.5MW로 국내에 설치된 총 풍력발전용량의 22.9%를 차지하고 있다. 또한 2012년부터 발전사업자의 총발전량 가운데 일정비율 이상을 신재생 에너지 전력으로 공급하도록 의무화하는 제도인 RPS(Renewable Portfolio Standards)가 도입됨에 따라 신재생에너지 비율이 높아질 것으로 예측되고, 지식경제부에서 발표한 제5차 전력수급기본 계획에 따라 제주 지역에 2016년까지 풍력이 143.2MW가 추가적으로 설치될 예정이다[3][4].

이러한 시점에서 풍력발전은 그 에너지원인 바람의 특성상 출력이 간헐적으로 나타나기 때문에 출력변동이 심하고, 예측이 어려우며 계통에서 차지하는 비중이 높아질수록 풍력발전과 연계된 계통의 전력품질을 저하시킨다[5]. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 에너지저장시스템을 풍력발전단지의 계통 및 풍력발전기 컨버터 시스템의 직류링크에 연결하여 운영하는 방법이 연구되고 있다[6]. 또한 에너지저장장치는 저장용량과 순시출력에 따라 그림 1과 같이 다양한 활용 범위를

가지고 있어 각 저장장치의 동작 특성에 따라 활용 범위를 특징지을 수 있다. 이러한 에너지저장장치의 활용방안은 크게 에너지 관리, 예비력, 전력품질 보상으로 나눌 수 있다.

본 논문에서는 출력 안정화에 대한 시스템을 PSCAD/EMTDC 프로그램을 사용하여 하나의 모델로 구성하고, 다양한 에너지저장장치 가운데 리튬 이온 배터리를 사용하여 제주 행원풍력발전단지에 알맞은 최적 BESS 용량산정에서부터 출력 안정화 제어에 이르는 모든 과정을 수행하여 출력 안정화 방안에 대해 비교 분석 하고자 한다.

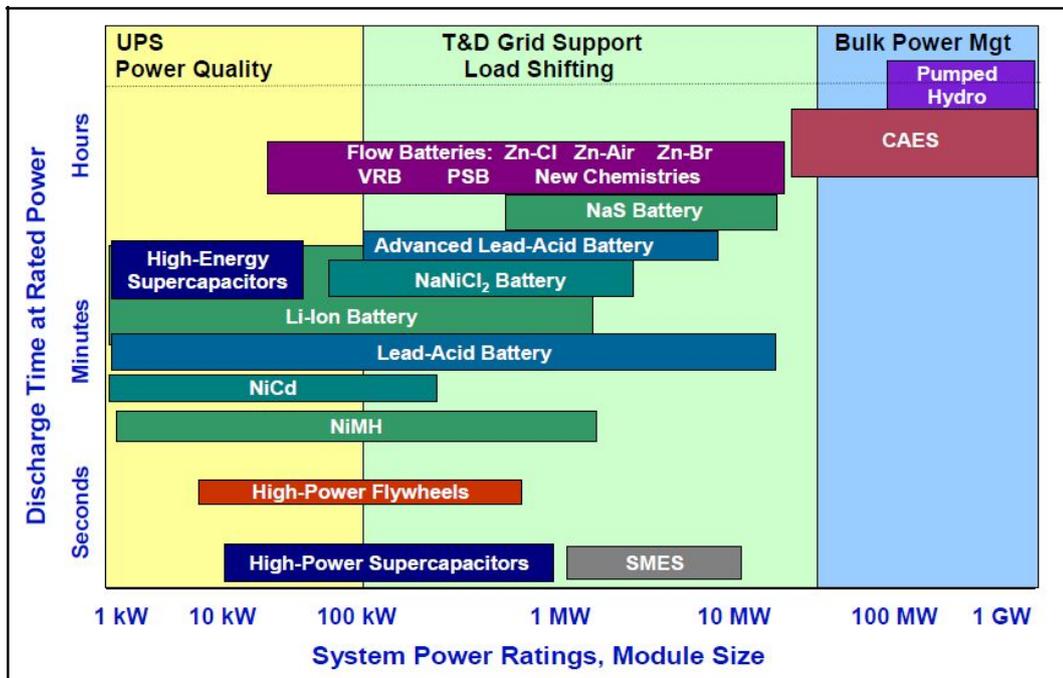


그림 1 배터리 용량에 따른 용도

## II. 풍력발전단지의 출력특성

### 2.1 행원 풍력발전단지의 개요

행원 풍력발전단지는 제주시 구좌읍 행원리 563번지의 바닷가 일대 5만 6900 m<sup>2</sup> 부지에 조성된 풍력발전단지로서 1995년 제주도청에서 『제주도 지역 에너지 계획』을 수립하여 1996년부터 제주도가 가지고 있는 우수한 풍속자원을 청정 대체 에너지로 개발하기 위한 풍력 발전 실용화 사업에 국비와 제주도의 지방비를 가지고 사업을 착수하였다. 1997년 600kW급 풍력발전기 2기 설치를 시작으로 1998년 8월부터 상업 운전에 들어가 국내 최초로 풍력발전의 상업화에 성공하였으며 국비 156억, 도비 43억, 민자 4억 등 총 203억 원을 들여 2003년 4월까지 600kW급 2기, 750kW급 5기, 660kW급 7기, 225kW급 1기 등 총 15기, 9.795MW 규모로 조성되었다.



그림 2 행원 풍력발전단지 전경

행원 풍력발전단지에 설치되어 있는 풍력발전시스템은 피치제어로 운전하는 Vestas 풍력발전기와 스톨제어로 운전하는 NEGMIICON 풍력발전기로 구성되어 있다. 여기서 피치제어 시스템을 사용하는 Vestas의 풍력발전기는 그림 3에 나타난 것과 같이 정격출력이 안정되어 있지만 스톨제어를 사용하는 NEGMIICON의 풍력발전기는 정격출력이 진동한다는 단점을 가지고 있다.

행원 풍력발전단지는 kW급 풍력발전기로 이루어져 있어 풍력발전시스템의 전체적인 관성이 MW급 풍력발전기보다 떨어지게 된다. 또한 풍력발전단지는 하나의 풍력발전기가 아닌 여러 대로 구성되어 있어 어느 정도 출력변동을 잡아낼 수는 있지만 풍력발전기 하나하나의 관성이 작으므로 MW급 풍력발전기로 구성된 풍력발전단지보다 출력변동이 쉽게 일어나게 된다.

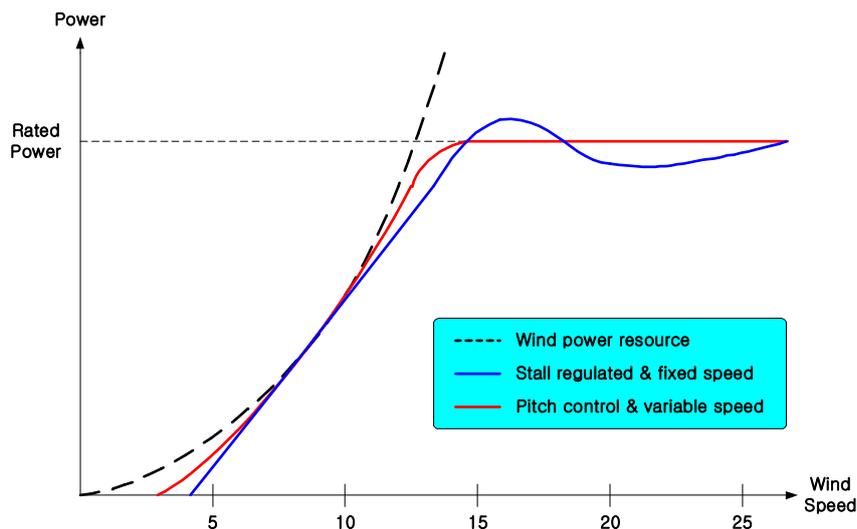


그림 3 피치제어와 스톨제어의 출력특성

이러한 출력변동은 매초, 매분, 매시간 변화하기 때문에 계통을 운영하는 입장에서는 하나의 큰 왜란 요소로 볼 수가 있다. 이러한 왜란 요소는 계통 전체에 영향을 미치게 되고 전압강하 혹은 주파수 변화 등에 의하여 전력계통의 전력품질이 저하된다. 이러한 계통에 미치는 영향을 줄이기 위해 풍력발전단지의 출력특성을 분석하여 계통에 미치는 영향을 최소화 할 수 있는 출력 안정화에 대한 연구가 필요하다.

## 2.2 출력특성

본 논문에서는 행원 풍력발전단지의 출력특성을 파악하기 위하여 2009년 3월 ~ 2010년 2월 까지 전력거래소 제주지사에서 2초 단위로 측정된 유효전력 데이터를 사용하였다.

풍력발전단지 출력특성은 출력 변동률에 의해서 파악될 수 있다. 출력 변동률은 풍력발전량을 매 시간단위마다 측정하여 발전량의 변화량을 정격설비용량으로 나눈 것이다. 여기서 출력 변동률의 값이 적을수록 발전량의 변화량이 적음을 나타내고 값이 커질수록 발전량의 변화량이 커짐을 나타낸다.

$$\text{출력변동률} = \frac{\text{풍력발전량의 변화량}}{\text{풍력발전의 정격설비용량}} \times 100[\%] \quad (1)$$

행원 풍력발전단지의 출력특성을 파악하기 위해 식(1)과 전력거래소 제주지사 에서 측정한 유효전력 데이터를 사용하여 1분, 10분, 30분에 대한 계절별 출력 변동률에 대해서 분석하였다.

그림 4는 2009년 봄 행원풍력발전단지 출력에 대한 1분, 10분, 30분 단위의 출력 변동률에 대한 히스토그램이고, 표 1은 출력 변동률에 대한 누적빈도분포를 나타낸 것이다. 표 1에서 보듯이 1분, 10분, 30분 단위의 전체 출력에서  $\pm 4\%$  이 내의 출력 변동률이 차지하는 비중은 각각 98.8%, 93%, 87.7%이다.

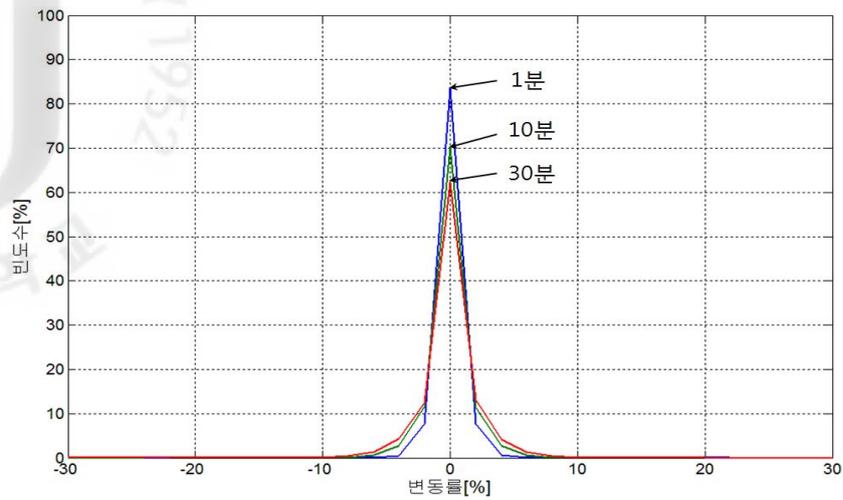


그림 4 분 출력 변동률

표 1 분 출력 변동률 누적빈도분포

변동률[%]	누적빈도분포[%]			변동률[%]	누적빈도분포[%]		
	1분	10분	30분		1분	10분	30분
-30	0	0	0	0	83.5	70.2	62.2
-28	0	0	0	2	7.6	11.4	13.1
-26	0	0	0	4	0.6	2.7	4.2
-24	0	0	0	6	0	0.6	1.2
-22	0	0	0	8	0	0.1	0.3
-20	0	0	0	10	0	0	0
-18	0	0	0	12	0	0	0
-16	0	0	0	14	0	0	0
-14	0	0	0	16	0	0	0
-12	0	0	0	18	0	0	0
-10	0	0	0.1	20	0	0	0
-8	0	0.1	0.4	22	0	0	0
-6	0	0.6	1.4	24	0	0	0
-4	0.5	2.7	4.3	26	0	0	0
-2	7.7	11.5	12.5	28	0	0	0
				30	0	0	0

그림 5는 2009년 여름 행원풍력발전단지 출력에 대한 1분, 10분, 30분 단위의 출력 변동률에 대한 히스토그램이고, 표 2는 출력 변동률에 대한 누적빈도분포를

나타낸 것이다. 표 2에서 보듯이 1분, 10분, 30분 단위의 전체 출력에서  $\pm 4\%$  이  
 내의 출력 변동률이 차지하는 비중은 각각 98.6%, 94.1%, 89.3%이다.

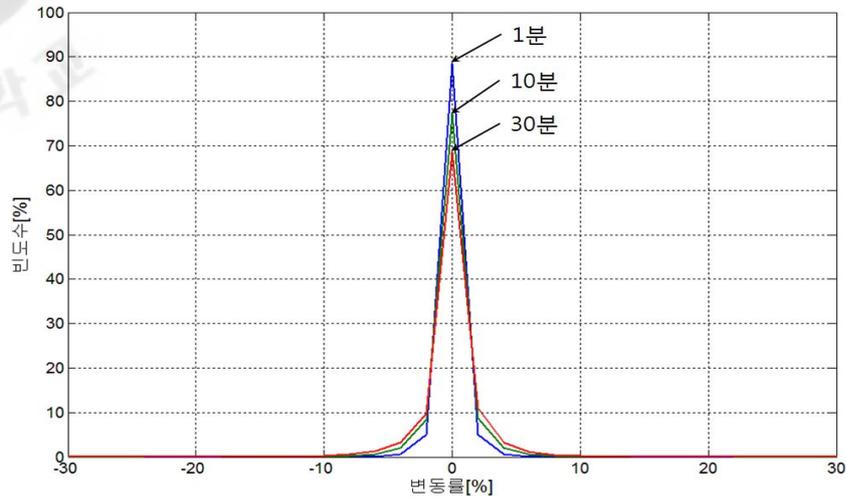


그림 5 여름 출력 변동률

표 2 여름 출력변동률 누적빈도분포

변동률[%]	누적빈도분포[%]			변동률[%]	누적빈도분포[%]		
	1분	10분	30분		1분	10분	30분
-30	0	0	0	0	88.4	77.2	68.5
-28	0	0	0	2	5.1	8.7	10.9
-26	0	0	0	4	0.6	2	3.2
-24	0	0	0	6	0.1	0.6	1.1
-22	0	0	0	8	0	0.2	0.5
-20	0	0	0	10	0	0.1	0.2
-18	0	0	0	12	0	0	0.1
-16	0	0	0	14	0	0	0
-14	0	0	0.1	16	0	0	0
-12	0	0	0.1	18	0	0	0
-10	0	0.1	0.3	20	0	0	0
-8	0	0.2	0.5	22	0	0	0
-6	0.1	0.7	1.2	24	0	0	0
-4	0.6	2	3.2	26	0	0	0
-2	5.1	8.3	9.9	28	0	0	0
				30	0	0	0

그림 6은 2009년 가을 행원풍력발전단지 출력에 대한 1분, 10분, 30분 단위의 출력 변동률에 대한 히스토그램이고, 표 3은 출력 변동률에 대한 누적빈도분포를 나타낸 것이다. 표 3에서 보듯이 1분, 10분, 30분 단위의 전체 출력에서  $\pm 4\%$  이내의 출력 변동률이 차지하는 비중은 각각 98.7%, 90.3%, 86.1%이다.

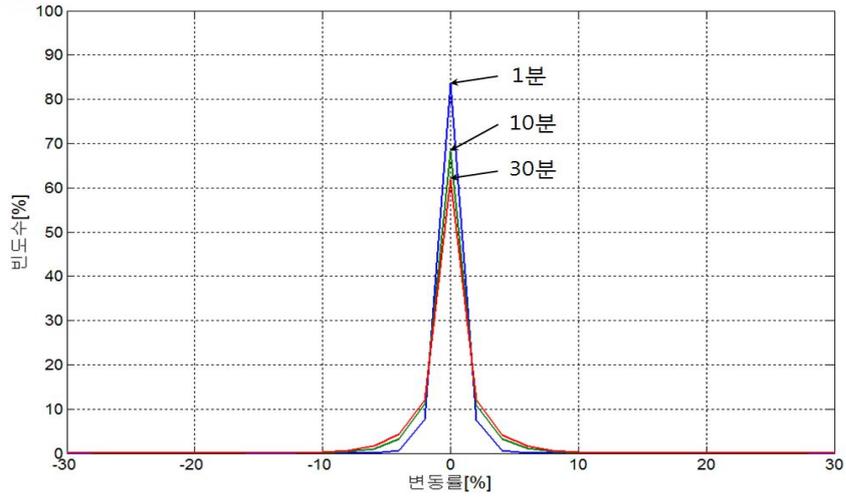


그림 6 가을 출력 변동률

표 3 가을 출력변동률 누적빈도분포

변동률[%]	누적빈도분포[%]			변동률[%]	누적빈도분포[%]		
	1분	10분	30분		1분	10분	30분
-30	0	0	0	0	83.6	68.3	61.9
-28	0	0	0	2	7.5	10.8	12.1
-26	0	0	0	4	0.6	3.2	4.1
-24	0	0	0	6	0	1.1	1.6
-22	0	0	0	8	0	0.4	0.6
-20	0	0	0	10	0	0.1	0.3
-18	0	0	0	12	0	0.1	0.1
-16	0	0	0	14	0	0	0.1
-14	0	0	0.1	16	0	0	0
-12	0	0.1	0.1	18	0	0	0
-10	0	0.1	0.3	20	0	0	0
-8	0	0.4	0.7	22	0	0	0
-6	0	1	1.6	24	0	0	0
-4	0.6	3.3	4.3	26	0	0	0
-2	7.6	11.2	12.1	28	0	0	0
				30	0	0	0

그림 7은 2009년 겨울 행원풍력발전단지 출력에 대한 1분, 10분, 30분 단위의 출력 변동률에 대한 히스토그램이고, 표 4는 출력 변동률에 대한 누적빈도분포를 나타낸 것이다. 표 4에서 보듯이 1분, 10분, 30분 단위의 전체 출력에서  $\pm 4\%$  이내의 출력 변동률이 차지하는 비중은 각각 95.4%, 74.3%, 67.5%으로 사계절 가운데 출력 변동률이 가장 크다는 것을 알 수 있다.

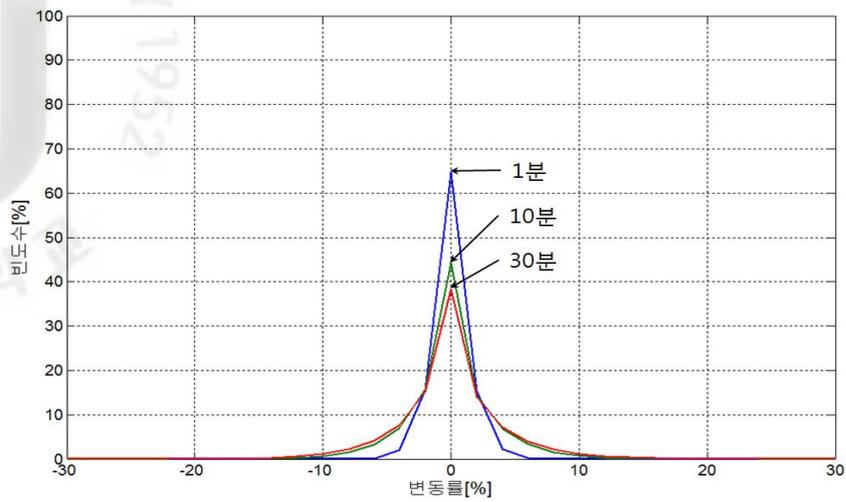


그림 7 겨울 출력 변동률

표 4 겨울 출력변동률 누적빈도분포

변동률[%]	누적빈도분포[%]			변동률[%]	누적빈도분포[%]		
	1분	10분	30분		1분	10분	30분
-30	0	0	0	0	64.7	44.3	38.3
-28	0	0	0	2	15.2	14.3	14
-26	0	0	0	4	2.2	6.8	7.1
-24	0	0	0	6	0.2	3.4	4
-22	0	0	0	8	0	1.6	2.3
-20	0	0	0	10	0	0.7	1.2
-18	0	0	0.1	12	0	0.3	0.7
-16	0	0	0.1	14	0	0.2	0.4
-14	0	0.1	0.3	16	0	0.1	0.2
-12	0	0.3	0.5	18	0	0	0.1
-10	0	0.7	1.2	20	0	0	0.1
-8	0	1.5	2.2	22	0	0	0
-6	0.2	2.2	4.2	24	0	0	0
-4	2.1	6.9	7.7	26	0	0	0
-2	15.5	15.7	15.3	28	0	0	0
				30	0	0	0

### Ⅲ. 용량산정 및 출력 안정화

#### 3.1 BESS의 용량산정

BESS의 용량을 산정하는데 있어서 배터리의 용량이 크면 클수록 합성출력의 평활화 정도가 이상적으로 되는 것은 당연하다. 하지만 경제적인 측면이나 실현 가능성을 생각한다면 최소의 배터리 용량으로 최대의 출력 평활화를 얻어내는 것이 가장 좋다. 본 논문에서는 최적의 배터리 용량을 산정하기 위하여 이동평균을 사용하였다. 이동평균에 사용된 평가시간은 풍력발전단지 출력을 어느 정도 평활화 시킬 것인가에 대한 기준과 배터리의 용량을 산정하는데 중요한 요소가 된다. 그리고 평활화를 하는데 있어 가장 난처한 상태는 그림 8에서 나타내듯이 풍력발전단지 출력이 0인 상태에서 정격 출력으로 스텝 변화할 때라고 생각할 수 있다.

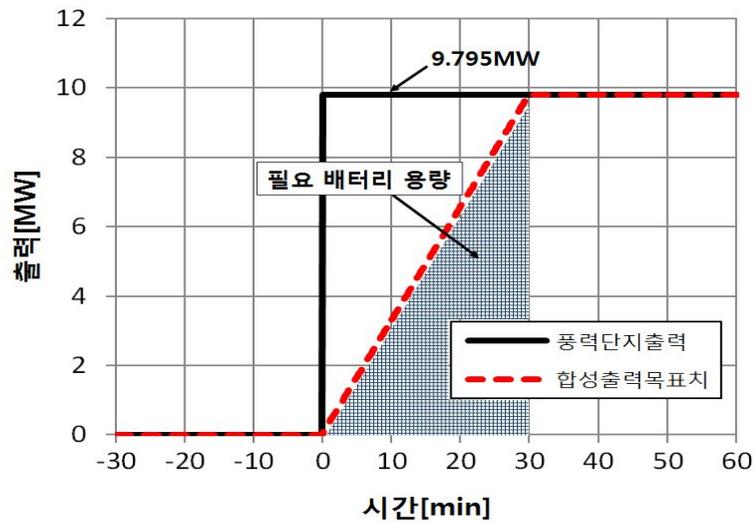


그림 8 풍력발전단지 스텝 변동 시 필요 배터리 용량

$$\text{배터리 용량}[MWh] = \frac{\text{단지출력}[MW] \times \text{평가시간}[h]}{2} \quad (2)$$

출력 평활화를 위한 배터리의 용량을 산정하기 위하여 2.2절에서 분석한 행원 풍력발전단지 출력특성을 참고로 하여 출력변동이 큰 겨울철 데이터 가운데 출력변동이 가장 심한 6일을 선정하여 그림 9와 같이 이동평균 평가시간에 따른 출력변동 그래프를 작성하였다. 그 결과 대부분의 출력변동은 이동평균 평가시간 30분 이후에는 거의 변동하지 않음을 확인할 수 있었다. 따라서 평활화의 정도와 배터리 용량을 산정하는데 중요한 요소인 평가시간을 30분으로 결정하였고, 식 (2)를 통하여 2.45MWh의 배터리 용량을 산정하였다.

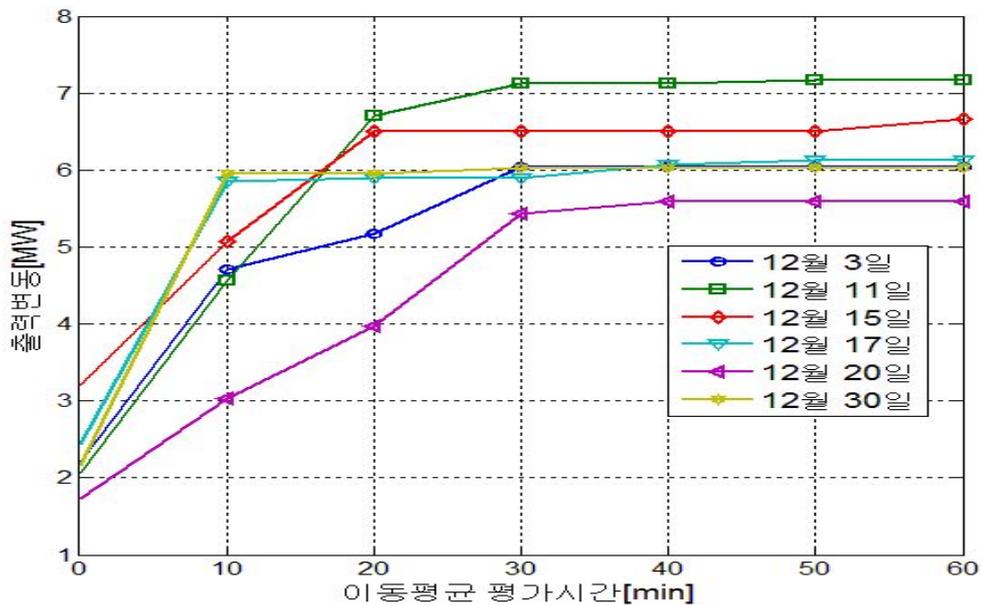


그림 9 이동평균 평가시간

그림 10에서 보듯이 이상적인 합성출력은 실제 풍력발전단지 출력이 시정수  $T_s$ 를 가진 LPF를 통과한 출력이 된다. 여기서 시정수  $T_s$ 는 평활화의 정도를 결정하는 시간으로 이동평균에서 구해진 30분을 사용하였다. 이 값을 가지고 BESS가 평활화에 필요한 전력을 모두 보상해 준다는 가정 하에 시뮬레이션을 하였을 경우, 그림 11과 같은 결과가 나오게 된다.

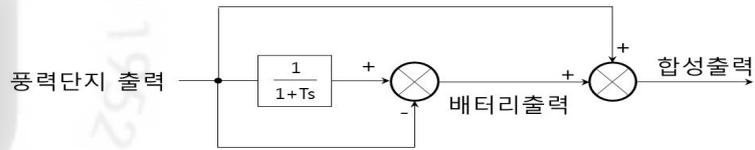


그림 10 이상적인 합성출력 블록도

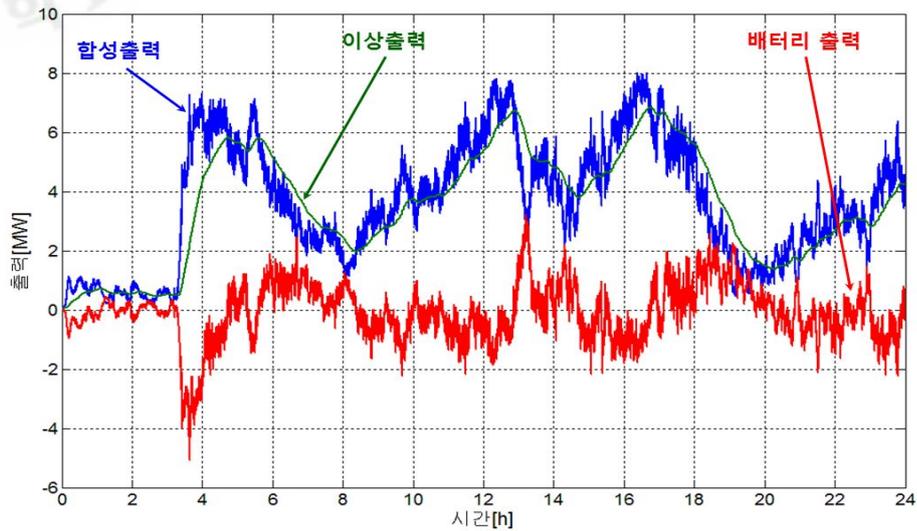


그림 11 이상적인 합성출력 그래프

그림 11은 그림 10을 바탕으로 배터리 출력 요구치에 대한 히스토그램이다. 그림 12에서 볼 수 있듯이 배터리 출력 요구치는 대부분  $\pm 2\text{MW}$  이내에서 이루어짐을 알 수 있다. 따라서 배터리 출력을 제한하는 인버터의 용량을  $2\text{MW}$ 로 선정하였다.

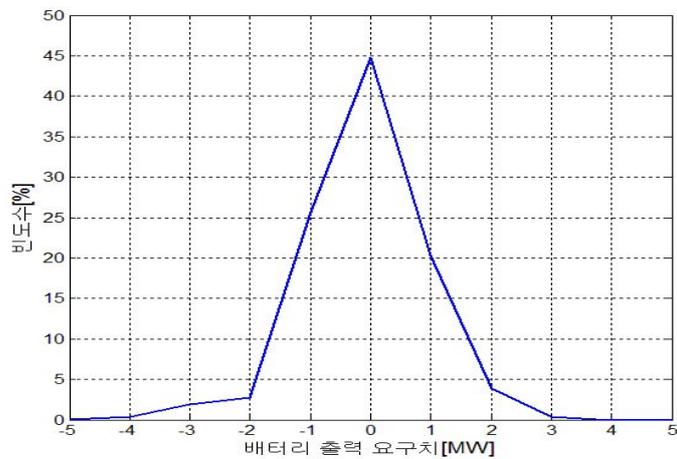


그림 12 배터리 출력 요구치 히스토그램

### 3.2 출력 안정화

풍력발전단지의 출력 안정화 제어는 시시각각 변화하는 풍력발전단지 출력을 평활화한 합성출력의 목표치를 주고 그것을 추종하도록 배터리 출력을 제어하는 것이다. BESS에 요구되는 배터리 출력은 식(3)에 의해 주어지고 배터리 출력 요구치에 대해서 BESS가 완벽하게 대응할 수 있다면, 실제의 합성출력은 합성출력 목표치와 동일해진다.

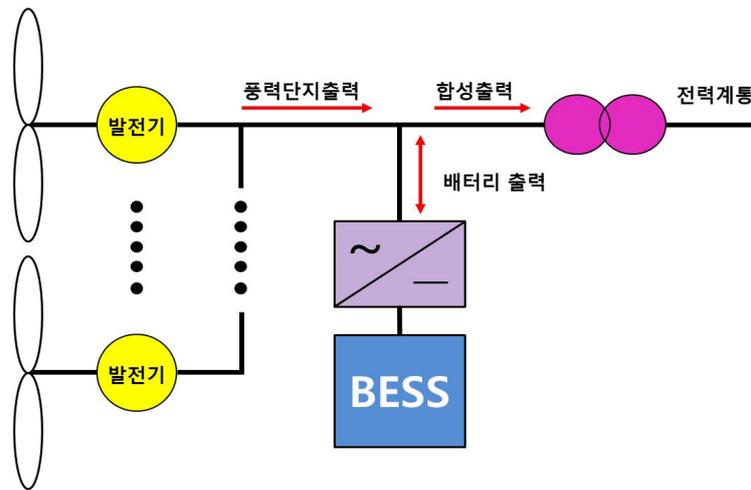


그림 13 출력 안정화 시스템의 개략도

$$\text{배터리출력요구치} = \text{합성출력목표치} - \text{풍력단지출력} \quad (3)$$

이러한 출력 안정화를 실현하기 위해서 다음과 같은 제어 방법을 통하여 제어 알고리즘의 타당성을 분석하고자 한다.

#### 3.2.1 출력 평활화 제어

출력 평활화 제어의 목적은 BESS를 이용하여 풍력발전단지 출력의 변동을 평활화 하는 것이다. 그림 14와 같이 풍력발전단지 출력으로부터 합성출력 목표치를 구하고 그 합성출력 목표치와 풍력발전단지 출력의 차이를 배터리로 보상하

는 방법이다. 합성출력 목표치는 평활화를 위한 1차 지연요소의 시정수  $T_s$ 에 따라 평활화 특성이 나타나게 된다.

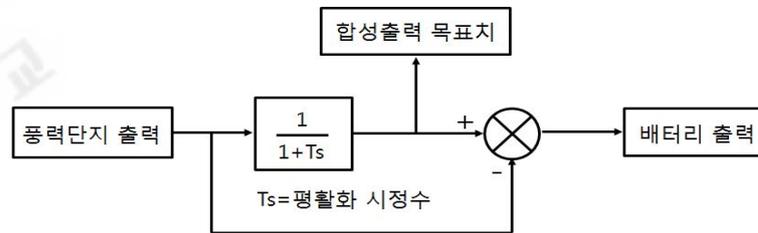


그림 14 출력 평활 제어 블록도

그림 15는 평활화 시정수  $T_s$ 와 합성출력과의 관계를 나타내고 있다. 시정수  $T_s$ 가 커지는 것에 따라 평활화 효과가 커지게 되나  $T_s$ 를 너무 크게 하여 제어 출력이 배터리 용량을 넘게 된다면 평활화의 효과가 떨어질 수 있다.

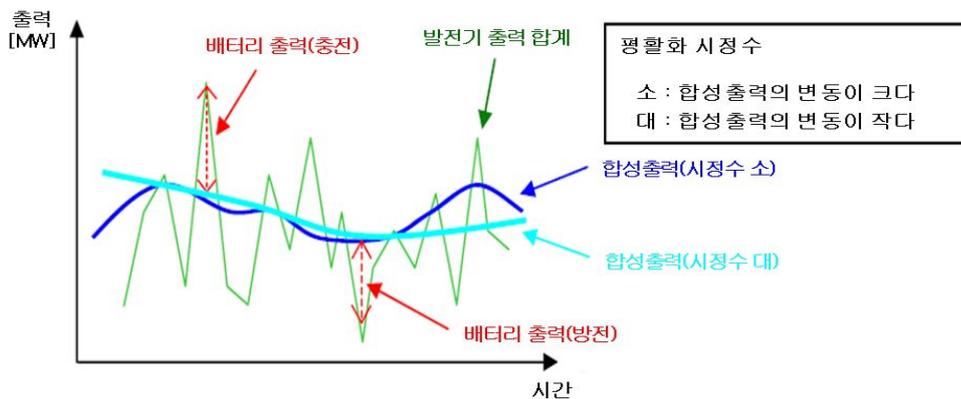


그림 15 평활화 시정수와 합성출력과의 관계

### 3.2.2 잔존용량 피드백 제어

출력 평활화 제어에서 1차 지연요소의 시정수  $T_s$ 를 크게 했을 경우, 배터리의 용량이 상·하한에 이르기 쉬워지고 또한 운전을 계속하고 있는 동안 자기 방전에 의해 배터리의 전압 레벨이 0이 되는 경우가 있을 수 있기 때문에 이러한 문제를 해결하기 위해 배터리의 용량을 유효하게 활용하기 위해서는 잔존용량 피드

백 제어를 실시할 필요가 있다[7].

잔존용량 피드백 제어는 배터리의 잔존용량과 합성출력 목표치를 검출하고, 배터리에 대해서 풍력발전단지 출력에 대응한 보충전·보방전을 실시하는 것으로 배터리의 충전 레벨을 적절한 범위에서 유지할 목적으로 제어한다.

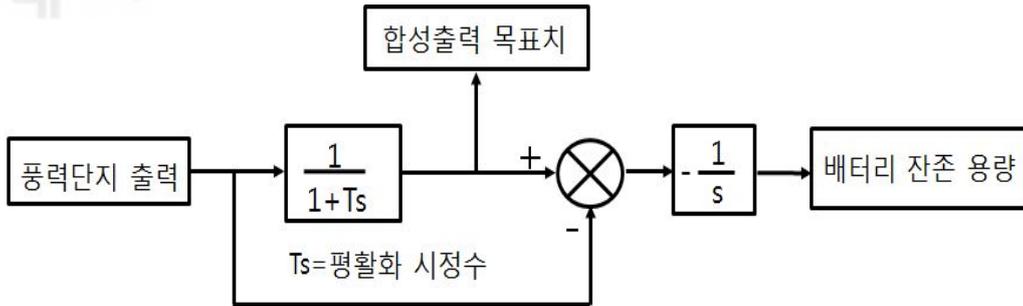


그림 16 합성 출력 목표치와 배터리 잔존용량의 관계

그림 17은 잔존용량 피드백 제어의 블럭도를 나타낸 것으로 배터리의 셀 전압을 잔존용량으로 측정해 합성출력 목표치와 배터리 셀 전압의 편차에 게인 배가된 것을 합성출력 목표치 수정량으로써 배터리 출력 요구치에 수정량을 더하는 것으로 배터리의 수명을 생각하는 효율적인 충·방전을 위하여 적절한 잔존용량 범위 내에서 보충전·보방전을 하게 된다.

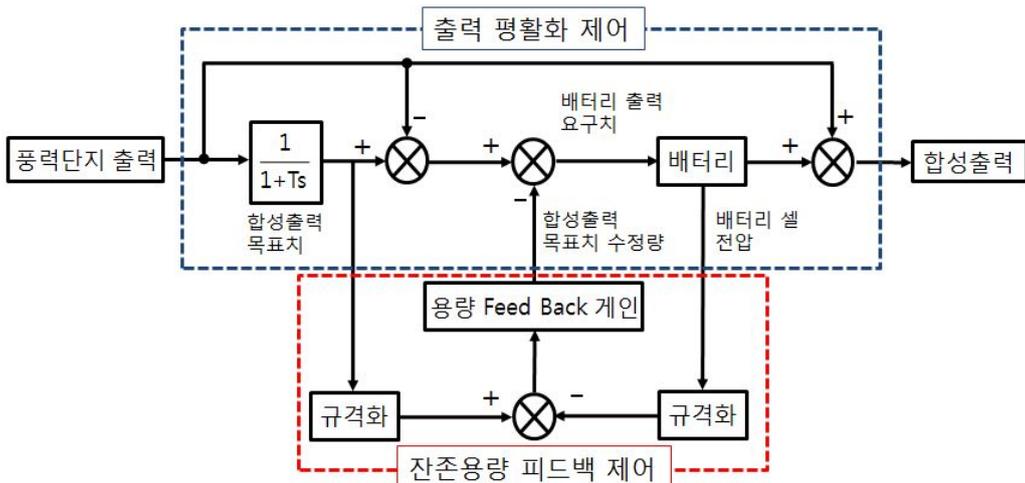


그림 17 잔존 용량 피드백 제어의 블럭도

잔존용량 피드백 제어의 2가지 파라미터 가운데 첫 번째인 용량 피드백 계인  $\alpha$ 는 합성출력 목표치 수정량의 크기를 정하는 정수이며, 충전 레벨의 유지를 도모하기 위해서는 큰 값으로 설정하는 편이 좋다. 두 번째 파라미터인 마진( $M$ )은 배터리의 충전 레벨을 안전한 범위에 두게 하기 위한 정수이며 충전 레벨의 유지를 우선하는 경우에는 큰 편이 좋으나 어느 한쪽이 너무 크면 평활화를 열화시키는 방향으로 영향을 준다.

$$\alpha = (C - 2 \cdot C \cdot M) / (T \cdot P_{WF}) \quad (4)$$

$$offset = M \cdot C \quad (5)$$

$C$  : 배터리의 용량 [MWh]

$M$  : 여유분 [P.U]

$T$  : 시정수 [s]

$P_{WF}$  : 정격 출력 [MW]

### 3.2.3 시정수 가변 제어

풍력발전단지 출력이 급변할 때, 배터리의 최대출력을 초과하는 충·방전 요구가 발생되면 출력이 상·하한에 이르기 전에 평활화에 사용되는 시정수를 바꾸고, 평활화 효과를 가능한 범위에서 유지하도록 하기 위해 적용하였다.

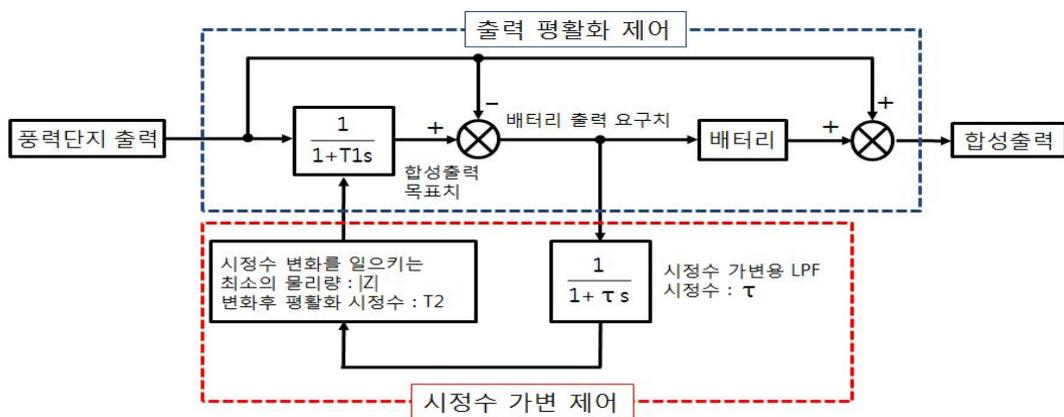


그림 18 시정수 가변 제어 블록도

그림 18은 시정수 가변 제어의 블럭도를 나타낸 것으로 배터리 출력 요구치에 시정수 가변용 저역통과필터(LPF, 시정수  $\tau$ )를 통한 신호를 시정수 가변 제어의 입력 신호로 한다. 그리고 배터리 출력의 크기가 시정수 변환 반응을 일으키는 최소의 물리량|Z|를 넘었을 경우에, 평활화 시정수를 T1에서 T2로 변경한다. 시정수 가변 제어의 파라미터는 시정수 가변용 LPF의 시정수  $\tau$ 와 시정수 변환 반응을 일으키는 최소의 물리량|Z| 및 시정수 변환 후의 평활화 완화시간 T2 이다.

시정수 가변제어에서 시정수 가변용 LPF의 시정수  $\tau$ 가 작은 경우, 평활화 시정수의 전환이 발생하기 쉬워져, 평활화 효과가 낮아지고 시정수 변환 반응을 일으키는 최소 물리량|Z|가 큰 경우는 배터리의 용량초과가 발생하기 쉬워지지만 평활화 효과는 높다. 시정수 변환 후의 평활화 시정수 T2는 용량초과를 방지하기 위해서는 작은 편이 좋다.

## IV. 컴퓨터 해석

### 4.1 BESS 모델링

BESS에 사용되는 배터리 모델은 Shepherd model[8]을 참조하였고 배터리의 전압 동특성은 식 (6)과 같다. 그림 19와 같이 가변 전압 소스와 직렬 연결된 저항으로 구성하여 모델링을 수행 하였으며, 모델링에 필요한 파라미터 값은 A사의 사용전압 4.2V ~ 2.8V, 정격용량 50Ah, 공칭전압 3.6V인 리튬이온 배터리의 실제 방전 곡선을 이용하여 도출하였다[9].

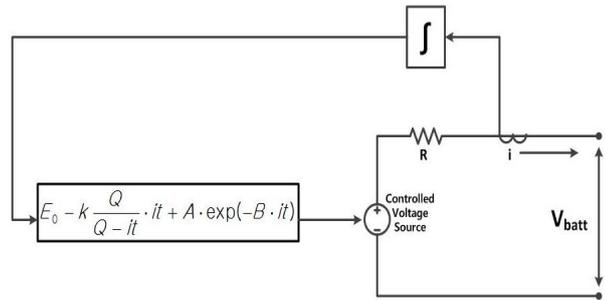


그림 19 Shepherd 배터리 모델

$$V_{batt} = E_0 - k \frac{Q}{Q - i \cdot t} \times i \cdot t - R \cdot i + A \exp(-B \cdot i \cdot t) \quad (6)$$

$V_{batt}$  : battery voltage [V]

$E_0$  : battery constant voltage [V]

$A$  : exponential zone amplitude [V]

$B$  : exponential zone time constant inverse [Ah]<sup>-1</sup>

$Q$  : battery capacity [Ah]

$k$  : polarization constant [V/Ah]

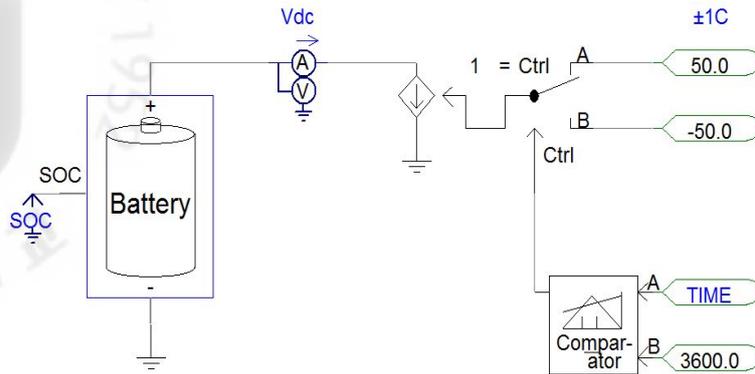


그림 20 PSCAD/EMTDC를 사용한 배터리 모델

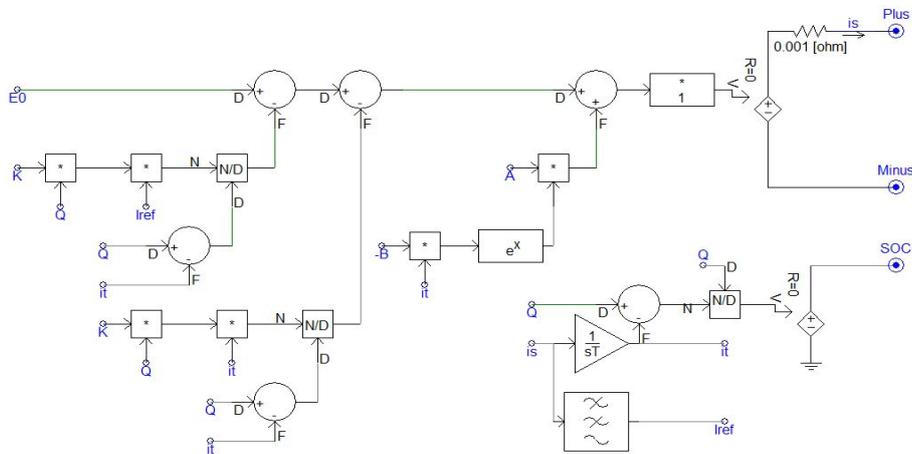


그림 21 모델링된 배터리의 내부 구조도

#### 4.2 제어시스템 모델링

그림 22는 풍력발전단지에 BESS를 연계하여 출력의 안정화를 분석하기 위해 PSCAD/EMTDC 프로그램으로 모델링한 제어시스템 모델이다. 여기서 풍력발전 단지 출력은 배터리를 전원으로 사용하는 인버터가 출력 안정화에 필요한 전력을 보내주어 출력 안정화가 이루어진다. 풍력발전단지는 행원 풍력발전단지의 실제출력 데이터에 따라 유효전력만 생산하게끔 모델링 되었으며 배터리 출력은 인버터에 의해 출력되도록 하였다. 모든 모델은 축약형 모델로써 간단하면서도 해석시간을 줄일 수 있도록 모델링 되었다. 그리고 계통에는 10MW의 부하 용량이 연계되어 운전되고 계통에서 사용되는 전원은 이상적인 전원으로 모델링 하였다.

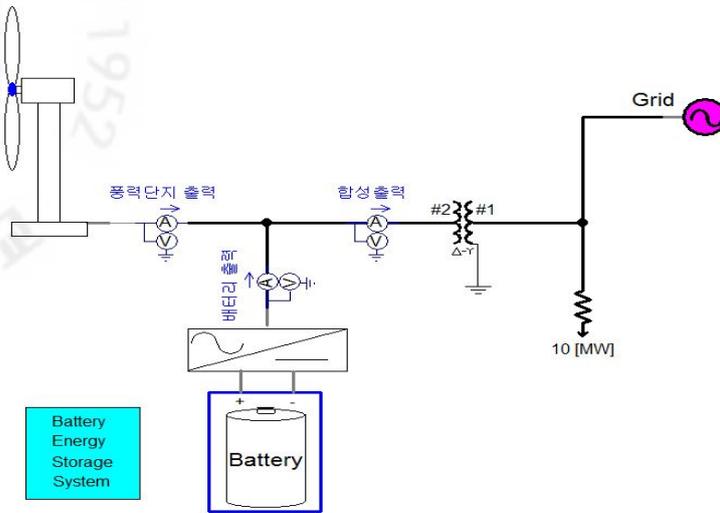


그림 22 PSCAD/EMTDC를 사용한 제어시스템 모델

그림 23은 제어시스템 모델에서 인버터를 모델링 한 것이다. 사용된 인버터 모델은 가변 전류원을 기반으로 하고 있으며 출력을 위한 전류 기준 값은 배터리 모델에서 보내주는 유효전력을 가지고 구해진다. 또한 무효전력은 내보내지 않는다고 가정하였다.

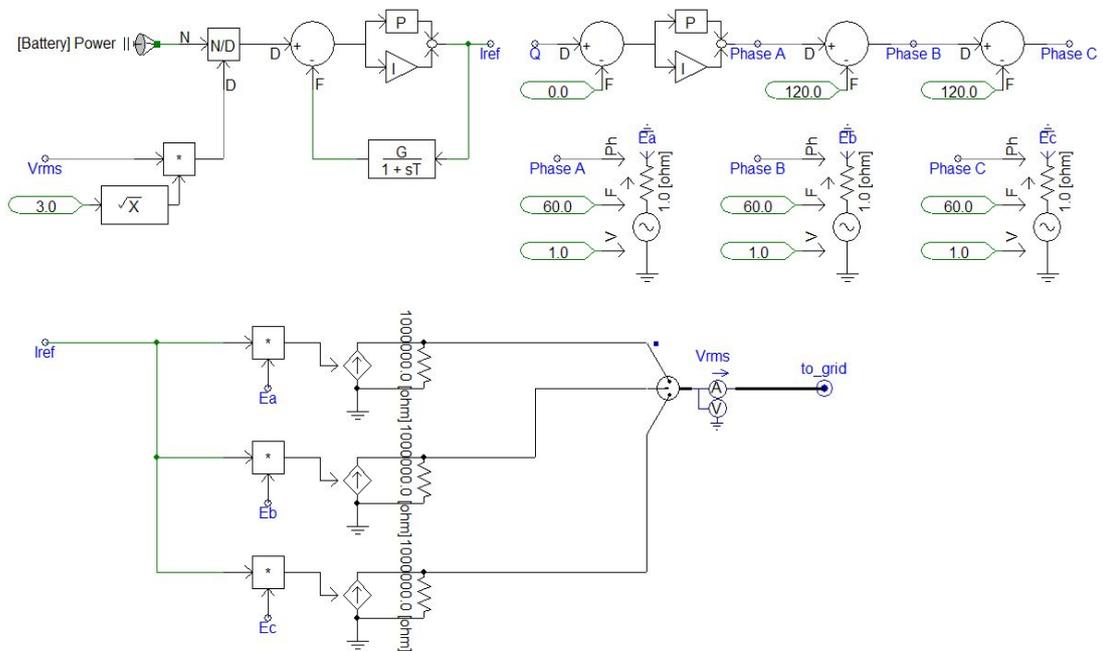


그림 23 인버터 모델링

그림 24는 제어시스템 모델에서 풍력발전단지를 모델링 한 것이다. 현재 제주 행원 풍력발전단지에 설치되어 있는 풍력발전시스템은 2.1절에 설명했듯이 다양한 풍력발전시스템을 가지고 있다. 이러한 풍력발전시스템을 하나하나 모델링하여 그 합성출력이 단지출력으로 나오게 모델링을 하는 것보다 여러 시스템의 출력이 하나로 모여져 단지출력으로 계통에 공급되게 하도록 모델링하는 것이 효과적으로 볼 수 있다[10]. 여기서 행원 풍력발전단지의 실제출력을 사용하기 위하여 유효전력 데이터를 Look Up 테이블화 하고 출력되는 유효전력을 전류로 변환하여 가변 전류원의 전류 기준 값으로 사용하여 실제출력이 발생하도록 하였다. 또한 행원 풍력발전단지에 설치된 풍력발전시스템은 역률이 1이 되게끔 제어기가 이루어지므로 무효전력은 없다고 가정하여 풍력발전단지 모델에서 무효전력은 발생하지 않도록 하였다.

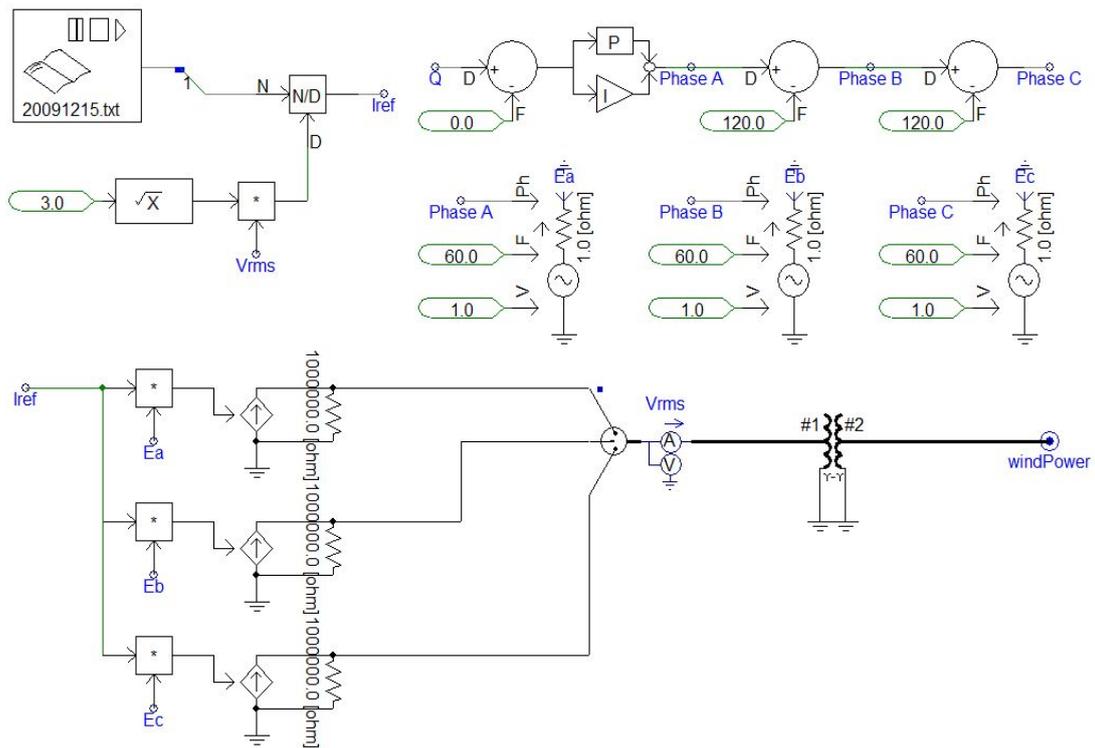


그림 24 풍력발전단지 모델링

### 4.3 해석 결과 및 고찰

그림 25와 그림 26은 4.1절에서 배터리 모델링에 사용된 A사의 실제 방전 그래프와 PSCAD/EMTDC로 모델링된 배터리의 시뮬레이션 결과이다. 이 결과에서 보면 두 결과가 거의 일치함을 알 수 있어 배터리 모델링은 양호하게 되었음을 알 수 있다.

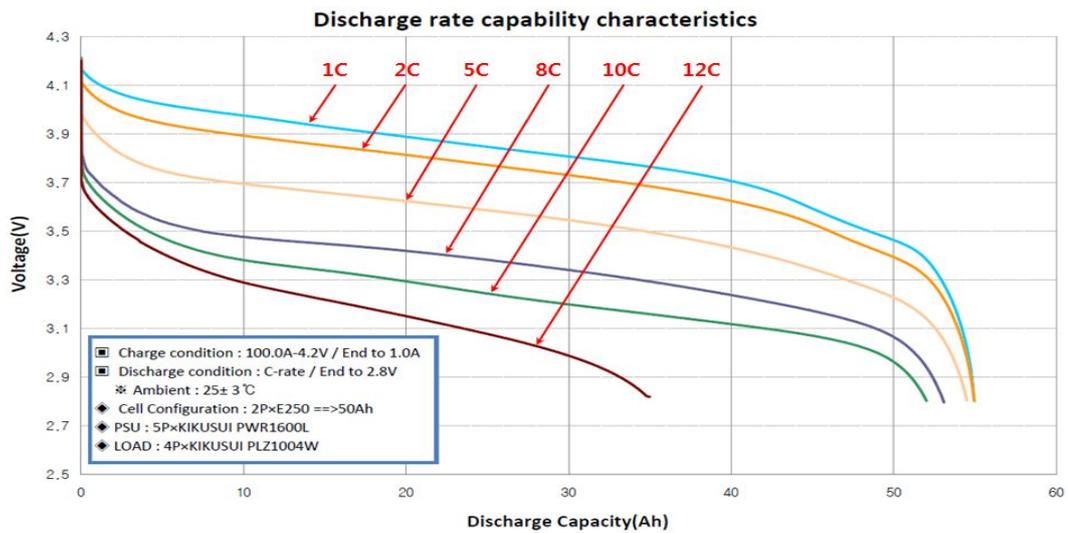


그림 25 실제 배터리의 방전 그래프

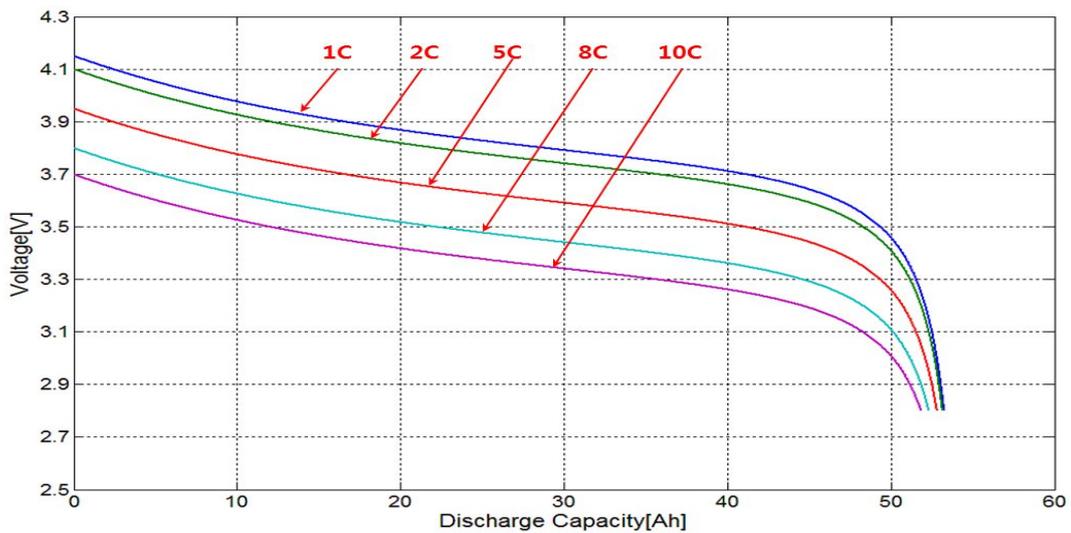


그림 26 모델링된 배터리의 방전 그래프

그림 27은 본 논문에서 하고자 하는 BESS를 이용한 풍력발전단지 출력 안정화를 위해 사용된 출력 변동폭이 가장 큰 2009년 12월 11일의 행원 풍력발전단지 유효전력 출력을 나타내고 있다. 이 결과에서 보면 오전 3시 경에 약 0.5MW에서 7.4MW 까지 급속하게 변동하는 것을 볼 수가 있다.

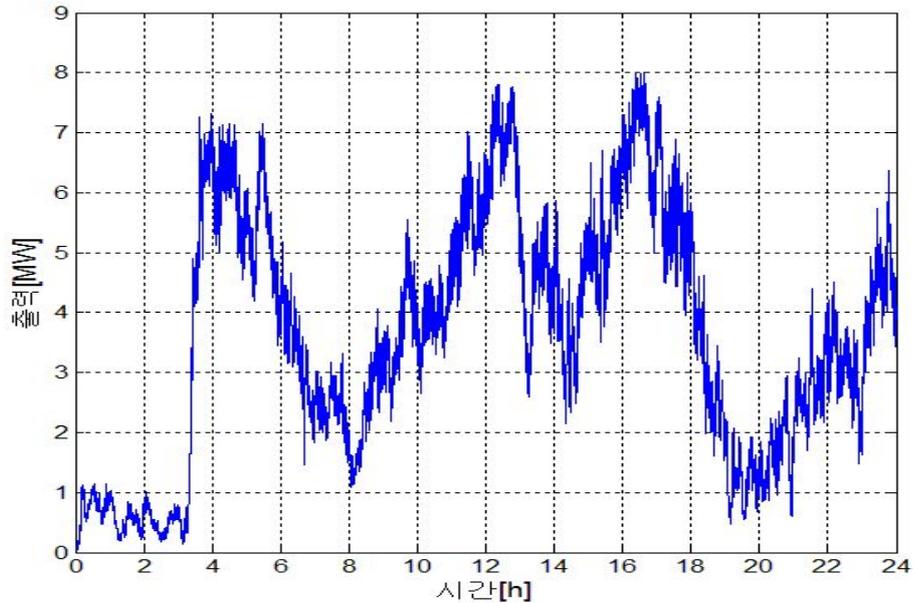


그림 27 행원풍력발전단지의 최대 출력변동(2009.12.11.)

그림 28은 그림 28의 실제출력을 가지고 출력 평활화 제어를 사용했을 때의 출력 파형과 배터리 잔존용량이다. 배터리의 출력이 2MW 이상 나오지 않은 이유는 3.1절에서 배터리의 출력을 내보내주는 인버터의 용량을 2MW로 설정하였기 때문이다. 여기서 합성출력은 배터리의 잔존용량이 0 또는 1이 아닌 상황에서 이상출력을 완벽하게 보상하는 것을 확인할 수 있으나 배터리의 잔존용량이 1이 되는 상태가 발생되게 된다. 이러한 상황이 지속되게 되면 배터리의 수명을 단축시킬 뿐만 아니라 열화현상이 발생하여 배터리 시스템에 문제를 야기할 수 있다. 또한 그림 28에서처럼 잔존용량이 1이 되는 곳의 합성출력은 실제 풍력발전단지 출력과 같아져 출력 평활화의 제어가 이루어지지 않음을 알 수 있다. 그 이유는 잔존용량이 1이상 또는 0이하가 되게 되면 용량초과가 발생하여 배터리의 출력 기준값이 0이 되기 때문이다.

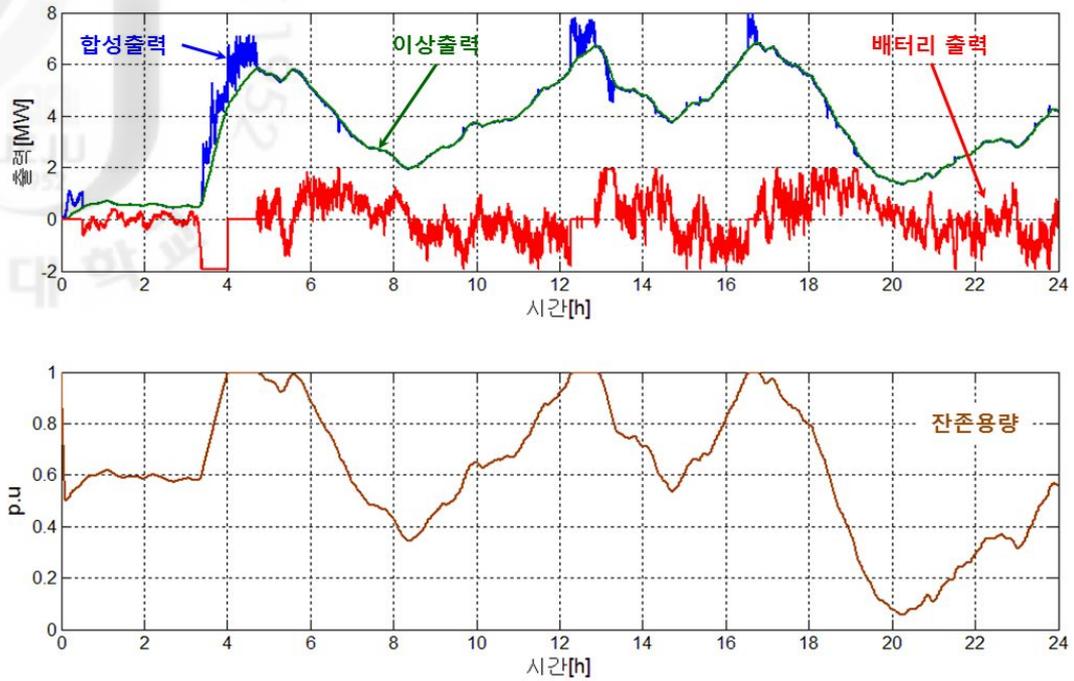


그림 28 출력 평활화 제어 시 출력파형 및 배터리 잔존용량

그림 29는 출력 평활화 제어를 사용했을 때 발생했던 문제점을 해결하기 위해 배터리의 잔존용량이 0.2 ~ 0.8사이에서 제어되도록 잔존용량 피드백 제어를 사용했을 때의 출력 파형과 배터리의 잔존용량이다. 이 결과에서 보면 합성출력이 이상적인 출력보다 평활화가 떨어지는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 잔존용량 피드백 제어를 실시하여 배터리의 출력 기준 값이 변하기 때문이다. 그림 28에서 보듯이 배터리의 잔존용량은 0.2 ~ 0.8사이에서 제어가 잘 되고 있음을 확인할 수 있고, 합성출력 또한 잔존용량 1이상에서 출력되었던 실제출력이 평활화된 출력으로 나타나고 있어 출력 평활화 제어를 사용하였을 때의 문제점이 해결됨을 볼 수 있다.

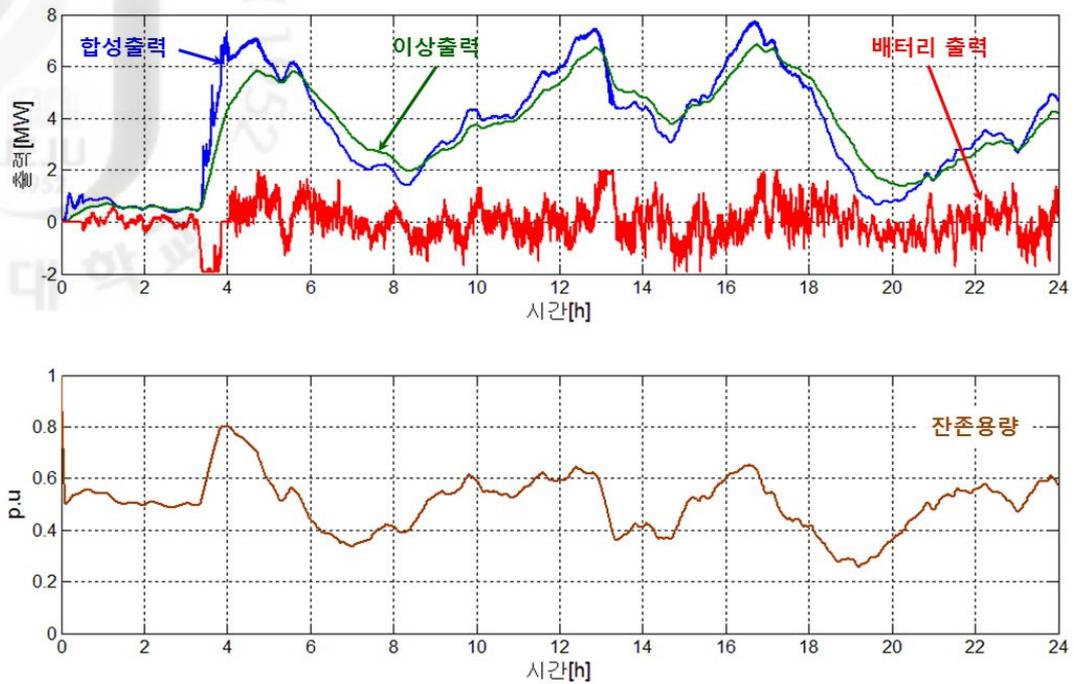


그림 29 잔존용량 피드백 제어 시 출력 파형 및 배터리 잔존용량

그러나 최대 출력변동이 발생하는 오전 약 3시 ~ 4시 사이의 합성출력을 보게 되면 인버터 출력의 최대치인 2MW의 한계치에 도달하여 합성출력이 불규칙한 것을 확인할 수 있다. 또한 잔존용량 범위인 0.8 한계치에 도달하여 그 순간에 배터리의 출력이 0인 상태를 볼 수 있다. 이러한 불규칙한 출력을 보상하기 위해 시정수 가변제어를 실시하게 되면 그림 30과 같이 인버터 출력 한계치에 걸리는 시간이 줄어들 뿐만 아니라 잔존용량 또한 설정 범위인 0.2 ~ 0.8사이에서 안전하게 변동하는 것을 확인할 수 있다. 또한 합성출력도 시정수 가변제어를 사용하였을 경우가 더욱 평활화 됨을 확인 할 수 있다.

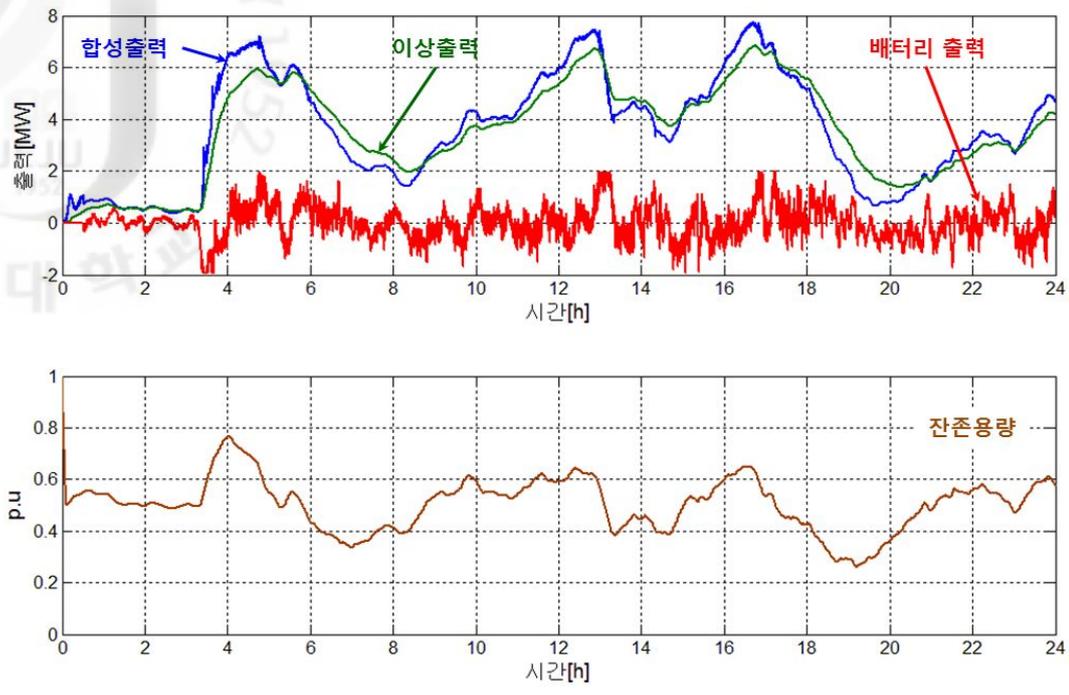


그림 30 시정수 가변제어 시 출력 파형 및 배터리 잔존용량

## V. 결 론

본 논문에서는 각기 다른 출력특성을 가지는 풍력발전단지의 출력을 해당 풍력발전단지에 알맞은 배터리 용량을 산정하여 BESS를 이용한 출력 안정화에 대하여 기술 하였다. 출력 평활화의 효과를 분석하기 위하여 풍력발전단지, 배터리, 인버터, 제어시스템을 PSCAD/EMTDC 프로그램을 사용하여 모델링 하였으며, 출력 평활화의 분석이 가능하도록 통합된 시스템을 구현하였다.

출력 평활화 분석에 사용된 풍력발전단지는 제주 행원풍력발전단지로서 2009년 3월 ~ 2010년 2월까지의 유효전력 데이터를 사용하였다. 제주 행원 풍력발전단지는 출력 변동률이 겨울철에 가장 크게 나타났으며 출력 변동폭의 최대치 또한 겨울철에 나타났다. 행원 풍력발전단지 출력특성에 따라 최적의 배터리 용량을 산정하기 위하여 이동평균을 사용하여 최대출력이 포화되는 시점을 찾아낸 결과 30분이란 평가시간을 얻게 되었다. 결정된 30분 평가시간에 따라 배터리의 용량이 2.45MWh로 결정되어 졌고, 출력 평활화에 기본이 되는 1차 지연요소의 시정수가 30분으로 결정되어졌다. 또한 배터리에 필요한 출력 요구치에 대한 히스토그램을 통해서 배터리의 출력을 담당하는 인버터의 용량이 2MW로 결정되어 졌다. 이를 바탕으로 출력 안정화 제어를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 출력 평활화 제어를 사용했을 때 배터리의 잔존용량이 1보다 커지는 현상이 발생되어 출력 평활화의 정도가 부족한 사실과 배터리의 용량초과가 발생하였다.
2. 잔존용량 피드백 제어를 사용했을 때 출력 평활화 제어만 사용했을 때의 문제점이 보완되어 개선된 평활화 출력을 얻을 수 있었으며, 최대출력이 변동하는 순간 인버터 한계치 및 잔존용량 제어에 따른 용량초과가 발생하였다.
3. 시정수 가변제어를 통해 잔존용량 피드백 제어에서 발견된 문제점이 보완되어 최대출력이 변동할 때 발생되었던 불규칙한 출력이 대부분 제거된 평활화된 출력을 나타내는 것이 확인 되었다.

이상의 결과를 토대로 풍력발전단지의 출력 안정화를 위하여 출력 평활화 제어에서부터 시정수 가변제어에 이르기까지 모든 제어가 통합된 출력 안정화 방안이 최적의 평활화된 출력이 얻어짐을 확인할 수 있었다. 따라서 이러한 안정화된 출력이 연계된 계통에 적은 영향을 미쳐 계통의 전력품질 향상에 기여하리라 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 안진홍 “STATCOM에 의한 제주계통의 전력품질 분석” 제주대학교 대학원, 석사학위 논문, 2011. 6.
- [2] (주)효성중공업, Smart Renewable용 풍력발전 특성 연구(중간보고서), 2011.
- [3] KPX 전력거래소, 제주지역 운영예비력 산정기준 연구(최종보고서), 2011.4.
- [4] KPX 전력거래소, 제5차 전력수급기본계획, 2010.
- [5] H. Holttinen, R. Hirvonen “Power System Requirements for Wind Power” Wind Power in Power Systems, T. Ackermann, Ed. John Wiley & Sons, 2005, pp.143-167.
- [6] 김종을, 박준호 “에너지저장장치 및 STATCOM을 이용한 풍력발전시스템의 출력제어 기법” 대한전기학회논문집, 제59권 10호, 2010.10, pp.1718-1726.
- [7] Katsuhisa Yoshimoto, Toshiya, Nanahara, Gentaro Koshimizu, Yoshihsa Uchida, “New Control Method for Regulating State-of-Charge of a Battery in Hybrid Wind Power/Battery Energy Storage System” Power Systems Conference and Exposition, 2006. IEEE PES, pp. 1244-1251.
- [8] C. M. Shepherd “Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An equation describing battery discharge” Journal of Electrochemical Society, Volume 112, Jul. 1965, pp. 657-664.
- [9] O. Tremblay, L. A. Dessaint, A. I. Dekkiche “A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles” Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. IEEE VPPC, pp. 284-289.
- [10] 이춘우 “PSCAD/EMTDC에 의한 한경풍력발전단지의 모델링과 해석” 제주대학교 산업대학원, 석사학위 논문, 2009. 12.

## 감사의 글

‘2년이라는 시간이 정말 짧구나.’ 라고 느끼게 해준 대학원 생활이 이제 끝나다고 생각하니 한편으로 아쉽기도 하고 너무 감사한 일들만 생각이 납니다.

연구실 생활에서부터 본 논문이 완성되기까지 열정이란 모습으로 모든 면에서 많은 가르침을 주시고 부족한 저를 이끌어 주신 김일환 지도교수님께 진심으로 머리 숙여 감사드립니다. 교수님이 주신 가르침 평생 잊지 않겠습니다. 그리고 풍력대학원생들에게 진심어린 관심과 학생들을 위해 발로 직접 뛰시는 모습을 보여주신 허종철 풍력특성화대학원 단장님께도 감사하다는 말을 전합니다.

본 논문이 완성될 수 있도록 꼼꼼한 심사와 조언을 아끼지 않으셨던 좌종근 교수님, 김세호 교수님, 전기공학의 기초를 다질 수 있게끔 배움을 주신 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김호찬 교수님 등 전기공학과 교수님들께 진심으로 감사드립니다. 제주대학교 풍력대학원을 위해 고생하시는 김익선 행정실장님, 이창림, 김봄솔 조교 선생님께도 감사하다는 말을 전합니다. 또한 제주대학교 전기공학과를 위하여 누구보다 먼저 신경을 써주시는 이진재, 이길연 조교 선생님, 항상 옆에서 힘이 되 주고 의지할 수 있었던 대학원 동기 김형택 선배님, 양수형에게도 너무 감사고 고마울 따름입니다. 또한 전기기기 연구실의 김도진 선배님, 전력계통 연구실의 동기 명호산, 김봉연 후배님, 계측제어 연구실의 부창진 선배님, 전기재료 연구실의 동기 김진, 조명연구실의 황경환, 김영찬 후배님에게도 감사의 말을 전합니다.

늦은 시간까지 전력전자 연구실에 계시면서 도움을 주신 김재홍 선배님, 사람냄새를 물씬 풍겨준 안진홍 선배님, ‘무엇이든 가능하다.’라는 긍정을 보여준 김대현 선배님, 앞으로 우리 연구실을 이끌어 나갈 변익수 선배님, 동기 김승현, 진경민, 김동완, 고지한 후배님께 항상 고마움과 감사함을 느낍니다. 그리고 항상 자식들 잘되기만 바라보시며 정작 본인은 신경 쓰지 않으시던 아버지, 어머니, 우리 하나뿐인 누나와 매형, 눈에 넣어도 아프지 않을 우리 조카 세훈이, 현희에게 사랑한다는 말을 전합니다.

이외에 제가 미처 언급하지 못한 많은 분들의 성함을 하나하나 되새기지 못함을 죄송하게 생각하며, 지금 이 순간이 끝이 아닌 새로운 시작이라 생각하여 항상 최선을 다하는 모습으로 이 모든 은혜에 보답하도록 하겠습니다.

2011년 12월

강 명 석 올림