



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 출력변동 완화를
위한 BESS 용량 산정

濟州大學校 産業大學院

電氣工學科

金 永 吉

2012. 6.

碩士學位論文

풍력발전단지의 출력변동 완화를
위한 BESS 용량 산정

指導教授 金 一 煥

濟州大學校 産業大學院

電氣工學科

金 永 吉

2012. 6.

풍력발전단지의 출력변동 완화를 위한 BESS 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

2012 年 6 月 日

濟州大學校 産業大學院

電氣工學科

金 永 吉

金永吉의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

2012 年 6 月 日

委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

목 차

그림 목차	ii
표 목차	iii
SUMMARY	iv
I. 서 론	1
II. 제주지역 풍력발전단지의 출력 특성	3
2.1. 행원풍력발전단지의 출력 특성	3
2.2. 한경풍력발전단지의 출력 특성	6
III. BESS 용량 산정	9
3.1. 남제주화력발전소 증·감발 기준	9
3.2. 풍력발전단지 출력 기준	9
IV. 컴퓨터 해석 및 고찰	14
4.1. 제어시스템 모델링	14
4.2. 해석 결과 및 고찰	19
V. 결 론	24
참 고 문 헌	25

그림 목 차

그림 1.	2009. 03. ~ 2010. 02. 행원 1분 변동률	3
그림 2.	2009. 03. ~ 2010. 02. 한경 1분 변동률	6
그림 3.	풍력발전단지 출력 변동시간에 따른 배터리 용량	9
그림 4.	행원풍력발전단지에 요구되는 배터리 용량	12
그림 5.	한경풍력발전단지에 요구되는 배터리 용량	13
그림 6.	Shepherd 비선형 배터리 모델	14
그림 7.	PSCAD/EMTDC에 의한 배터리 모델링	15
그림 8.	배터리 모델링을 위한 PSCAD/EMTDC의 구조도	16
그림 9.	시뮬레이션용 PSCAD/EMTDC 모델	17
그림 10.	인버터 모델링	18
그림 11.	풍력발전단지 모델링	18
그림 12.	2009년 12월 15일 행원풍력발전단지 실제 출력	19
그림 13.	행원풍력발전단지의 LPF의 출력과 최종 계통 출력(2009. 12. 15.)	20
그림 14.	배터리가 채용된 행원풍력발전단지의 정격출력 변동	21
그림 15.	한경풍력발전단지의 최대출력 변동(2010. 01. 12.)	22
그림 16.	한경풍력발전단지의 LPF의 출력과 최종 계통 출력(2009. 01. 12.)	22
그림 17.	배터리가 채용된 한경풍력발전단지의 정격출력 변동	23

표 목 차

표 1.	2009. 03. ~ 2010. 02. 행원 1분 단위 풍력발전 출력 변동률 누적빈도분포	4
표 2.	2009. 03. ~ 2010. 02. 행원 1분 단위 풍력발전 최대 출력 변동률	5
표 3.	2009. 03. ~ 2010. 02. 한경 1분 단위 풍력발전 출력 변동률 누적빈도분포	7
표 4.	2009. 03. ~ 2010. 02. 한경 1분 단위 풍력발전 최대 출력 변동률	8
표 5.	제주지역 풍력발전단지용량 배터리 요구량	11
표 6.	배터리의 SOC 구간별 제어방식	17

Estimation of BESS Capacity for Mitigating the Fluctuation of Wind Power Generation Output

Young-Gil Kim

*Department of Electrical and Electronic Engineering
Graduate School of Industry
Jeju National University*

Supervised by professor Eel-Hwan Kim

Summary

This paper presents the estimation of capacity of BESS(Battery Energy Storage System) equipped for mitigating the fluctuation of wind power generation output in Jeju island. For the analysis, two sited wind farms located in the east and west side of Jeju island are selected, and also lithium-ion type battery is adopted. To choice the optimum battery capacity, power system stability of Jeju island and output analysis of two wind farms which are HaengWon and HanKeong wind farms located in the east and west side of Jeju island are considered.

To analyze the output characteristics of the proposed control scheme, two kinds of simulations are carried out by using the PSCAD/EMTDC program. One is the steady state operation under the variable speed wind, and the other is that all of wind farms in Hankyung or Haengwon wind farm shut down instantly under the rated power output.

With the comparison of these results, it is useful for analyzing and mitigating the fluctuation of wind power generation output with BESS.

I. 서 론

최근 풍력발전출력의 변동성을 완화하기 위하여 에너지 저장장치를 연계한 다양한 형태의 연구가 국내·외에서 활발히 진행되고 있다[1].

현재 미국에서 풍력에 대한 에너지 저장장치 적용 관련법을 담당하고 있는 연방 에너지규제위원회(Federal Energy Regulatory Commission)는 고속으로 반응할 수 있는 에너지저장 장치가 주파수 조절 서비스에서 프리미엄을 얻을 수 있도록 각 전력시장에서 새로운 규칙을 적용하도록 권고하고 있다.

섬 지역인 경우에는 신·재생에너지 출력이 계통연계 시 계통의 안정도를 약화시킬 수 있기 때문에 설치 시에는 각 프로젝트의 출력 변동률을 제한해서 에너지 저장장치와 신·재생에너지설비의 통합시스템을 유도하고 있으며, 시스템 규모에 따라 2MW/min 에서 몇백 kW/min의 변동률 제한을 가하고 있다. 특히 미국 Xtreme Power 사의 하와이 풍력 프로젝트인 경우 풍력발전기의 최대출력의 3% 규모의 출력이 1분 안에 변동되지 않도록 하고 있으며, 그 결과 대략 풍력최대출력 대비로 볼 때 50%에서 30%의 정격출력과 30분이상의 정격 출력 저장 규모 (MWh)를 가진 시스템을 사용하고 있다.

Xtreme Power 사는 풍력에너지 저장장치는 지역과 출력 특성에 따라 다르지만 일반적으로 풍력의 변동성을 고려하여 빠르게 반응하는 에너지 저장장치 도입 시 적어도 30분이상의 출력을 내보낼 수 있는 저장규모를 가진 에너지 저장장치가 효과적이라는 의견을 제시하고 있다[2].

일본에는 세계 최초로 풍력발전단지에 배터리를 채용하여 운용하고 있는 롯카쇼 무라 푸타마타 풍력발전소는 아오모리에 위치하고 있으며 총 51MW 용량의 풍력발전단지에 총 용량의 약 60%인 30MWh의 NaS 배터리를 채용하여 일본 풍력발전주식회사에서 운용하고 있다. 여기서 제어 체계를 살펴보면 풍력출력에 대해 단순한 평활화 제어, 일정출력제어, 정격출력제어 등 다양한 방안에 대해서 실증과 상업운전을 하고 있다. 또한 신·재생에너지에 대한 매진 체계는 단순출력, 일정출력 제어, 정 출력제어 등 출력방법에 따라 요금체계를 다르게 하고 있다[3].

국내의 경우에는 국가 스마트그리드 실증사업의 일환으로 제주 행원풍력발전단에 배터리를 채용하여 외국의 경우와 같이 출력에 대한 다양한 실증시험을 하고 있는 중이다. 하지만 배터리 용량 선정 시 적정 용량에 대한 연구는 아직 미흡한 상

태이다.

따라서 본 논문에서는 제주 동부지역에 위치한 행원풍력발전단지와 서부지역에 위치한 한경풍력발전단지의 1년간 실제 출력 데이터 분석을 통하여, 풍력발전단지 출력변동을 완화시켜 계통의 안정도를 증대시킬 수 있는 에너지저장장치의 적정 용량을 산정하고, 이를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안한 방법의 타당성을 입증하고자 한다.

II. 제주지역 풍력발전단지의 출력 특성

2.1. 행원풍력발전단지의 출력 특성

행원풍력발전단지는 제주의 동부지역인 구좌읍에 자리 잡은 풍력발전단지이다. 이 발전단지에는 2010년 2월 현재에는 총 15기, 9.8MW(225kW×기, 600kW×2기, 660kW×7기, 750kW×5기) 규모로 운전되었으며 2012년 4월 현재에는 총 12기, 10.55MW(660kW×5기, 750kW×5기, 1500kW×1기, 2000kW×1) 규모로 운전되고 있는데, 출력의 계통연계는 전용선로를 통하여 성산변전소에 연계되어 운전되고 있다. 행원풍력발전단지의 출력 특성 분석을 위하여 전력거래소 SCADA에 연계되어 축적되어 있는 1년간 데이터, 즉 2009년 3월~2010년 2월까지 1분 단위의 데이터를 수집하여 풍력발전단지 출력 변동률을 분석하였는데, 그림 1과 표 1은 해당 기간의 1분 단위의 정격설비용량 대비 출력 변동량에 대한 누적빈도 분포를 나타낸 것이다. 여기서 보면 전체 출력의 94%가 $\pm 3\%$ 이내의 출력 변동률을 보이고 있다[6][7].

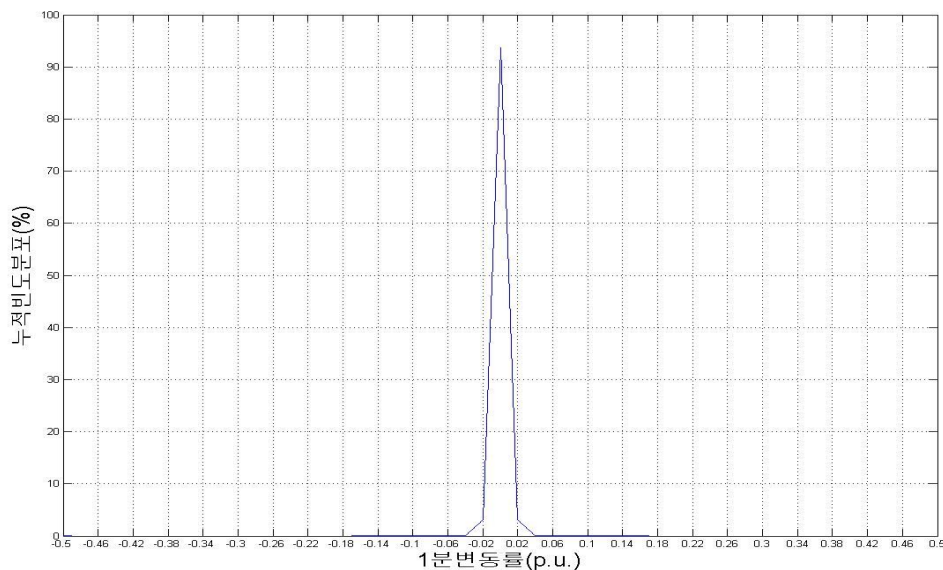


그림 1. 2009. 03 ~ 2010. 02 행원 1분 변동률

표 1. 2009. 03 ~ 2010. 02 행원 1분 단위 풍력발전 출력 변동률 누적빈도분포

pu	합계		pu	합계	
	횟수	%		횟수	%
-0.5	0	0	0	14,631,914	94
-0.48	0	0	0.02	492,274	3
-0.46	0	0	0.04	5,069	0
-0.44	0	0	0.06	95	0
-0.42	0	0	0.08	11	0
-0.4	0	0	0.1	8	0
-0.38	0	0	0.12	5	0
-0.36	0	0	0.14	2	0
-0.34	0	0	0.16	1	0
-0.32	0	0	0.18	0	0
-0.3	0	0	0.2	0	0
-0.28	0	0	0.22	0	0
-0.26	0	0	0.24	0	0
-0.24	0	0	0.26	0	0
-0.22	0	0	0.28	0	0
-0.2	0	0	0.3	0	0
-0.18	0	0	0.32	0	0
-0.16	1	0	0.34	0	0
-0.14	4	0	0.36	0	0
-0.12	8	0	0.38	0	0
-0.1	8	0	0.4	0	0
-0.08	17	0	0.42	0	0
-0.06	84	0	0.44	0	0
-0.04	4,570	0	0.46	0	0
-0.02	484,344	3	0.48	0	0
			0.5	0	0

표 2에는 2009. 03. ~ 2010. 02.까지 1년간의 1분 단위 출력 변동률이 $\pm 30\%$ 가 넘는 사례가 10건을 기록하고 있다. 최대 출력 변동률이 발생한 시각은 2010년 1월 21일 12시였으며, 이때의 출력 변동률은 66%(-6.66MW)로 나타났다. 이에 따라 최대 출력 변동률을 대비하여 1분 단위 출력 변동률은 설비용량대비 약 66%까지 고려해야 할 것으로 판단된다.

표 2. 2009. 03 ~ 2010. 02 행원 1분 단위 풍력발전 최대 출력 변동률

일자	시간	발전량 (MW)	변동량 (MW)	변동률 (%)	일자	시간	발전량 (MW)	변동량 (MW)	변동률 (%)
2010 0121	12:20:14	6.7	-6.7	-66.6	2010 0112	18:53:00	3.2	3.9	38.8
2009 0602	12:56:54	5.5	-3.7	-37.4	2010 0121	12:36:34	2.5	3.3	32.6
2009 1215	6:55:18	5.4	-3.2	-32.0	2010 0213	16:33:00	3.8	3.2	31.6
2010 0225	11:45:54	5.6	-2.7	-27.0	2010 0218	0:52:24	2.1	3.2	31.4
2010 0213	9:09:00	6.9	-2.6	-26.4	2010 0219	16:47:24	4.1	3.1	30.6
2009 0707	9:05:02	5.6	-2.6	-26.0	2009 0602	19:32:48	2.5	3.0	30.3
2009 0520	21:24:58	5.4	-2.6	-26.0	2010 0225	5:57:16	3.9	3.0	30.0
2009 1130	8:34:32	6.8	-2.6	-26.0	20100 108	19:03:28	3.8	2.9	29.1
2010 0204	3:49:46	6.2	-2.9	-25.9	2010 0212	23:26:30	4.3	2.8	28.3
2010 0203	14:59:24	6.4	-2.6	-25.7	2010 0203	15:52:08	4.1	2.8	27.7

2.2. 한경풍력발전단지의 출력 특성

제주시 한경면에 위치한 한경풍력발전단지는 한국남부발전(주)가 운영하는 발전소로써 1단계 사업에서 NEGMICON 사의 opti 슬립 타입 1.5MW 4기 총 6MW가 2004년 2월 준공되었고, 2단계 사업에서는 Vetas사의 DFIG 타입 V90 3MW 5기 총 15MW가 2007년 12월 준공되어 총 21 MW 용량의 설비가 구축되어 상업 운전을 하고 있다. 한경풍력발전단지의 계통연계는 22.9kV의 가공지선을 통하여 한림변전소에 연계되어 있다. opti 슬립에 의한 방식과 역률을 1로 제어하는 DFIG 타입이 혼재되어 운전하고 있어 전체 발전측면에서 보면 역률은 좋겠지만 풍속변화에 의한 출력변동은 풍속 변화에 좌우될 것으로 보이며, 행원풍력발전단지에 비해 한경풍력발전단지는 1.5MW 4기와 3MW 5기가 혼재되어 운전되고 있기 때문에 각 터빈 출력에 의한 평활화 효과는 떨어질 것으로 예견된다.

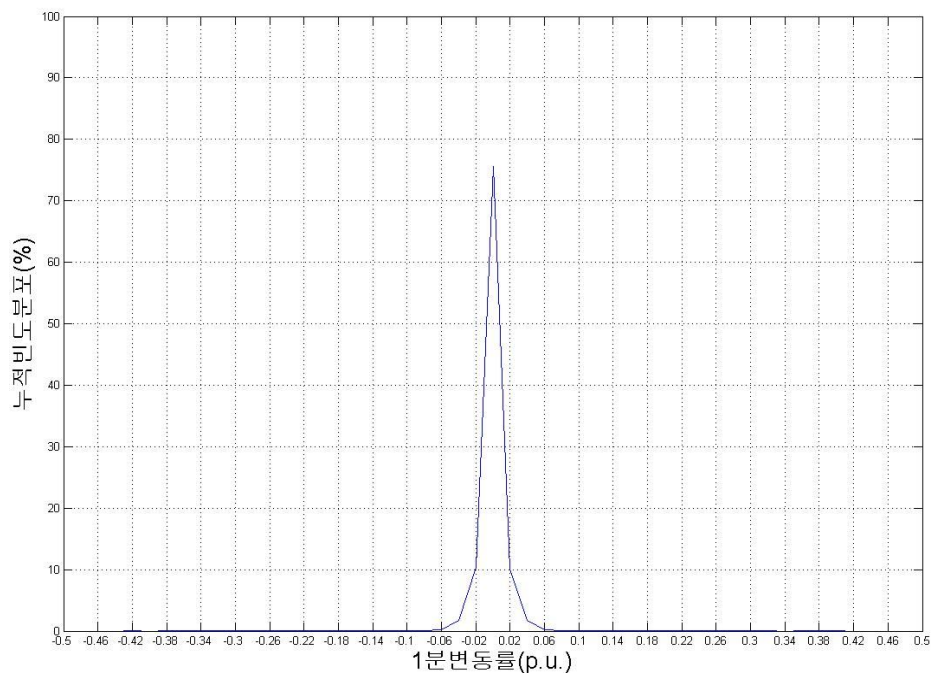


그림 2. 2009. 03 ~ 2010. 02 한경 1분 변동률

표 3. 2009. 03 ~ 2010. 02 한경 1분 단위 풍력발전 출력 변동률 누적빈도분포

pu	합계		pu	합계	
	횟수	%		횟수	%
-0.5	0	0	0	11,002,351	74
-0.48	0	0	0.02	1,537,283	10
-0.46	0	0	0.04	283,514	2
-0.44	1	0	0.06	49,075	0
-0.42	0	0	0.08	6,928	0
-0.4	1	0	0.1	940	0
-0.38	1	0	0.12	140	0
-0.36	0	0	0.14	18	0
-0.34	2	0	0.16	18	0
-0.32	2	0	0.18	6	0
-0.3	4	0	0.2	5	0
-0.28	3	0	0.22	5	0
-0.26	5	0	0.24	7	0
-0.24	7	0	0.26	6	0
-0.22	5	0	0.28	1	0
-0.2	7	0	0.3	2	0
-0.18	7	0	0.32	2	0
-0.16	8	0	0.34	1	0
-0.14	21	0	0.36	0	0
-0.12	77	0	0.38	1	0
-0.1	602	0	0.4	1	0
-0.08	5,306	0	0.42	1	0
-0.06	42,025	0	0.44	0	0
-0.04	277,705	2	0.46	0	0
-0.02	1,579,811	11	0.48	0	0
			0.5	2	0

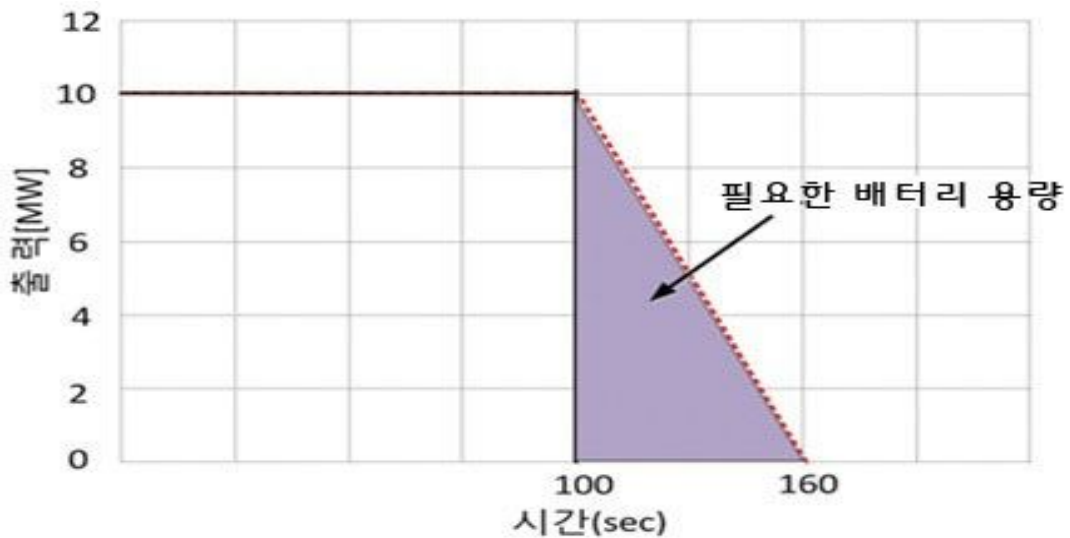
표 4. 2009. 03 ~ 2010. 02 한경 1분 단위 풍력발전 최대 출력 변동률

일자	시간	발전량 (MW)	변동량 (MW)	변동률 (%)	일자	시간	발전량 (MW)	변동량 (MW)	변동률 (%)
2010 0113	0:10:10	13.4	-12.8	-60.8	2010 0207	5:41:24	2.5	14.7	70.0
2009 1017	3:23:32	14.4	-11.9	-56.7	2009 1017	3:28:04	3.4	11.7	55.6
2009 0827	15:38:04	12.7	-11.7	-55.8	2010 0210	10:14:40	6.9	8.8	42.0
2009 0320	3:22:32	17.9	-11.6	-55.1	2009 1114	23:24:08	8.9	8.6	41.0
2010 0201	5:55:28	14.8	-10.8	-51.6	2010 0113	15:52:08	7.3	8.5	40.4
2010 0210	10:20:28	14.1	-9.3	-44.3	2010 0114	5:49:44	2.8	8.0	38.3
2009 1231	5:46:12	16.3	-7.3	-34.6	2009 1217	7:39:44	6.6	8.0	38.1
2010 0112	17:54:46	14.4	-6.9	-32.8	2010 0206	3:16:32	2.6	7.6	36.2
2009 1219	2:53:06	14.2	-6.8	-32.2	2009 1218	8:27:20	6.2	7.3	34.9
2009 1218	22:08:28	16.6	-6.7	-31.9	2009 1121	6:25:04	8.6	7.2	34.2

Ⅲ. BESS 용량 산정

3.1. 남제주화력발전소 증·감발 기준

에너지 저장장치중 하나인 배터리를 이용하여 풍력발전단지의 출력을 평활화 하는데 있어서 그림 3에 나타낸 것과 같이 출력이 정격에서 0으로 변동할 때가 가장 안 좋은 조건이라 볼 수가 있다. 제주지역 전력계통인 경우 연계선이 동작한다면 이와 같은 경우에도 연계선이 빠른 시간내에 응답해서 계통의 안정성이 문제가 되는 경우는 극히 적을 것으로 보이지만, 만약 모든 연계선의 동작이 정지되고 있을 때는 문제가 될 수가 있다.



$$\text{필요한 배터리 용량} = \frac{\text{단지용량} [MW] \times \frac{\text{출력변동시간} [h]}{60}}{2} = [MWh] \quad (1)$$

그림 3. 풍력발전단지 출력 변동시간에 따른 배터리 용량

(1)

이 경우에 제주계통의 주파수 안정도는 한국남부발전(주)의 남제주화력발전소(화순발전소) 100MW 급 No3와 No4 기력발전기가 제주계통의 주파수운전의 기준으로 정하여 운전하고 있기 때문에 이 발전기의 출력 증·감발 정수가 기준 요소가 된다. 이 발전기의 증·감발 출력 값은 10MW/분 이다. 그러므로 제주지역의 계통안정을 위해서 풍력발전단지의 시정수는 남제주화력발전기의 시정수보다 커야 한다. 그림 3에 나타난 것과 같이 풍력단지 출력은 정격 상태에서부터 0 으로 떨어지는 시간이 1분 이상 되어야 한다[7].

그러므로 필요로 하는 최소배터리의 용량은 풍력발전단지 출력과 합성 출력 목표치에 둘러싸인 면적분을 흡수하는 용량을 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

그림3에서 나타나는 풍력발전단지 출력에서 증·감발 시정수를 증가시키기 위한 최소 배터리 용량은 식(1)에 의해서 구할 수가 있다.

하지만 배터리 종류와 제어 조건에 따라 배터리의 용량은 달라진다. 특히 C-rate 조건에 따라 최소 요구 배터리용량이 달라지는데 본 논문에서 모델 배터리로 채택한 리튬이온 배터리는 5C 운전 까지는 가능하기 때문에 이를 적용하여 C-rate 값에 따른 풍력발전단지 용량별 배터리의 용량을 나타내고 있다.

표 5. 제주지역 풍력발전단지용량 배터리 요구량

풍력단지 용량 [MW]	ESS 용량 [MWh]	10MW/분 적용 C-rate 기준용량(MWh)					비고
		단지용량기준 C-rate	1C (100%)	2C (50%)	5C (20%)	10C (10%)	
10	0.08	120.0	10.0	5.0	2.0	1	
20	0.33	60.0	20.0	10.0	4.0	2	
30	0.75	40.0	30.0	15.0	6.0	3	
40	1.33	30.0	40.0	20.0	8.0	4	
50	2.08	24	50.0	25.0	10.0	5	
60	3.00	20.0	60.0	30.0	12.0	6	
70	4.08	17.1	70.0	35.0	14.0	7	
80	5.33	15	80.0	40.0	16.0	8	
90	6.75	13.3	90.0	45.0	18.0	9	
100	8.33	12	100.0	50.0	20.0	10	
150	18.75	8.0	150.0	75.0	30.0	15	
200	33.33	6	200.0	100.0	40.0	20	
250	52.08	4.8	250.0	125.0	50.0	25	
300	75.00	4	300.0	150.0	60.0	30	
350	102.08	3.4	350.0	175.0	70.0	35	
400	133.33	3	400.0	200.0	80.0	40	
450	168.75	2.7	450.0	225.0	90.0	45	
500	208.33	2.4	500.0	250.0	100.0	50	

3.2. 풍력발전단지 출력 기준

표 5에서 보면 풍력발전단지 용량에 따라 필요로 하는 배터리 용량은 배터리 운전 조건 즉 C-rate 에 따라 용량이 달라진다. 그러므로 제주지역의 풍력발전단지에서 필요로 하는 최적의 C-rate 운전조건을 얻기 위해서는 그림 4와 5에서 보면 행원풍력발전단지와 한경풍력발전단지는 출력변동 빈도가 주로 0.2 pu 이내에서 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 총 발전설비 용량의 약 20% 범위에서 출력변동이 이루어지기 때문에 행원풍력발전단지는 2MWh, 한경풍력발전단지는 4.2MWh가 필요함을 나타내고 있다.

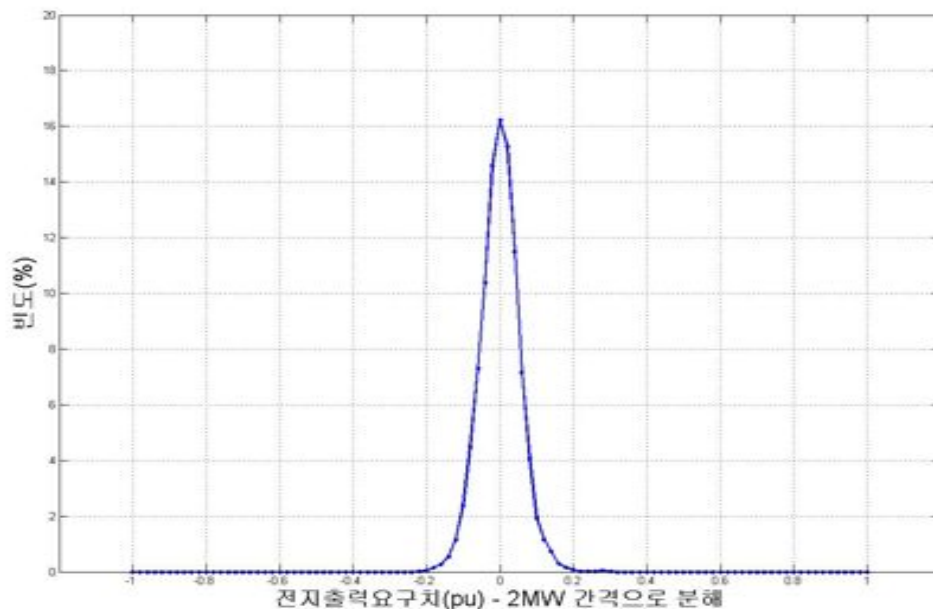


그림 4. 행원풍력발전단지에 요구되는 배터리 용량

행원풍력발전단지의 최소 배터리용량은 식(1)에 의해서 $10\text{MW} \times (1/60) / 2 = 0.0833$ MWh 이다. 즉, 행원풍력발전단지가 계통에서 탈락시 계통 주파수에 영향을 끼치지 않는 최소 배터리용량은 0.0833 MWh 이어야 한다. 단, 이 경우 배터리가 방전할 때의 C-rate은 최대 $10/0.0833=120$ 이 된다. 배터리에 C-rate를 5로 제안할 경우 제안된 배터리에 용량은 $120/5=24$ 배 증가(24×0.0833)시킨 2 MWh를 최소용량으로 가정하고 계산하여야 한다.

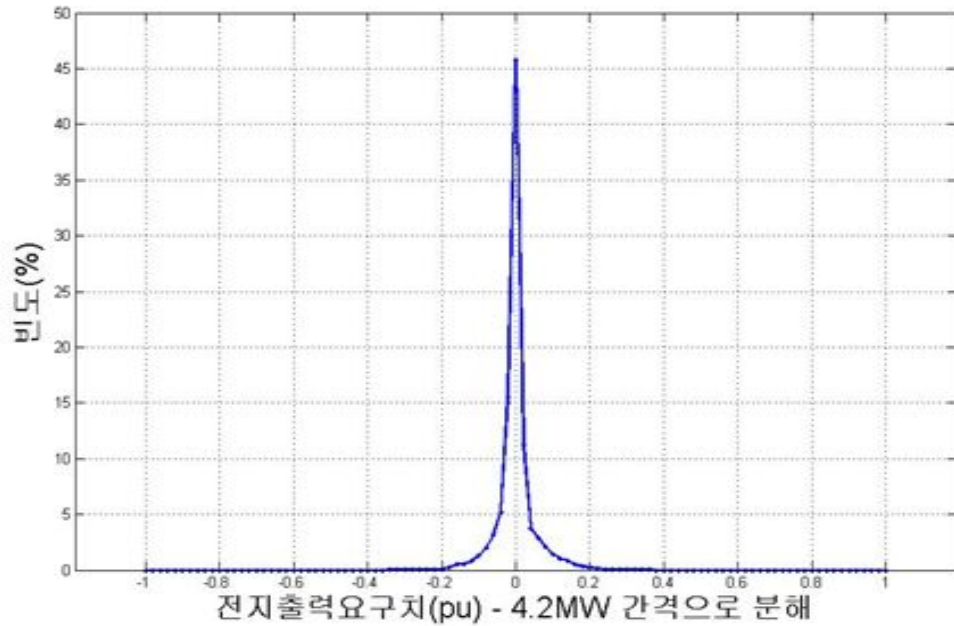


그림 5. 한경풍력발전단지에 요구되는 배터리 용량

한경풍력발전단지의 최소 배터리용량은 식(1)에 의해서 $21\text{MW} \times (2.1/60)/2 = 0.3675$ MWh 이다. 즉, 한경풍력발전단지가 계통에서 탈락시 계통 주파수에 영향을 끼치지 않는 최소 배터리용량은 0.3675 MWh 이어야 한다. 단, 이 경우 배터리가 방전할 때의 C-rate은 최대 $21/0.3675=57.143$ 이 된다. 배터리에 C-rate를 5로 제안할 경우 제안된 배터리에 용량은 $57.143/5=11.429$ 배 증가시킨 4.2 MWh를 최소용량으로 가정하고 계산하여야 한다.

IV. 컴퓨터 해석 및 고찰

4.1. 제어시스템 모델링

본 논문에서 적용된 배터리 모듈은 국내 A 사의 제품으로 공칭전압 3.6V에 50Ah 180Wh의 정격용량을 가진다. 이 리튬이온 배터리 셀은 최대충전 시 4.2V, 방전 제한은 약 3.3V까지 가능하며 최대 방전전류는 10C(500A)까지 가능하여 본 논문에서도 이 정격을 적용하였다[1][8].

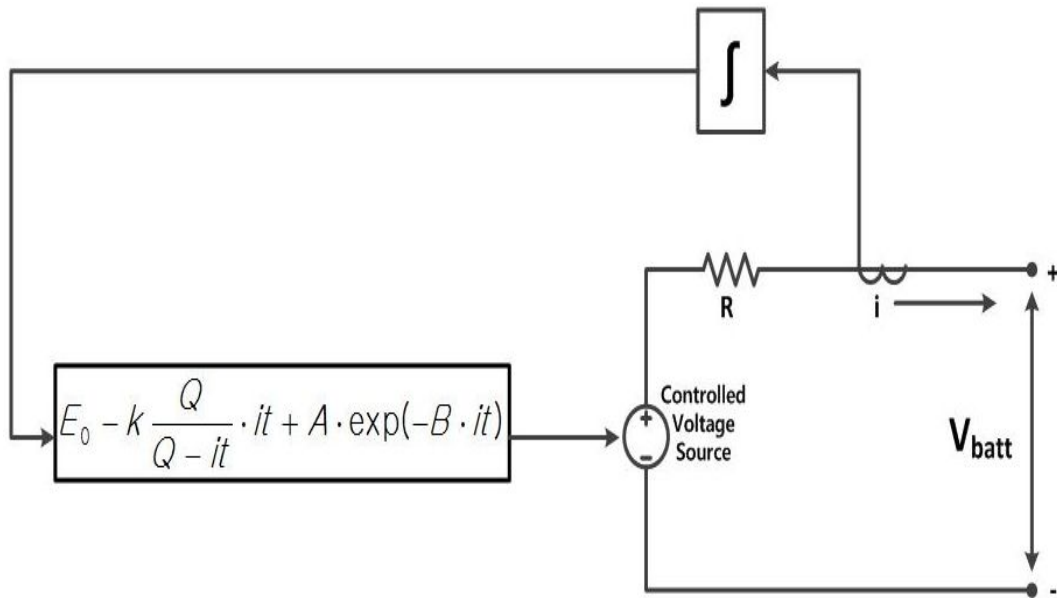


그림 6. Shepherd 비선형 배터리 모델

$$V_{batt} = E_0 - k \frac{Q}{Q - it} \cdot it - R \cdot it + A \exp(-B \cdot it) \quad (2)$$

- $V_{battery}$: 배터리 출력전압 [V]
- E_0 : 일정 배터리전압 [V]
- A : exponential zone amplitude [V]
- B : exponential zone time constant inverse [Ah]⁻¹
- Q : 정격용량 [Ah]
- k : 극성전압 [V]

사용된 배터리 모델은 Shepherd model를 참조하여 그림6과 같이 단순한 가변 전압 소스와 직렬 연결된 저항으로 구성하여 모델링 하였으며, 모델링에 필요한 각종 상수 들은 배터리의 실제 방전 곡선을 이용하여 도출하였다. 또한 식 (2)를 이용하여 방전 전류 및 SOC(State Of Charge)에 따른 전압의 동특성을 표현하였다. 그림 7과 8은 PSCAD/EMTDC 프로그램으로 배터리 모델링을 위한 개략도와 상세 제어 구조도 이다.

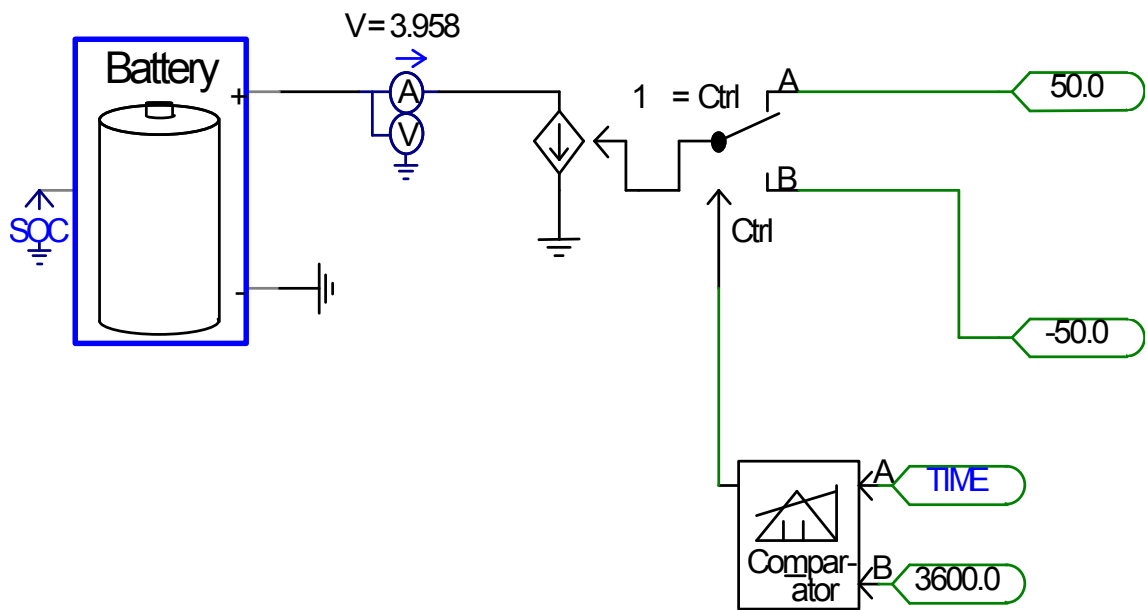


그림 7. PSCAD/EMTDC에 의한 배터리 모델링

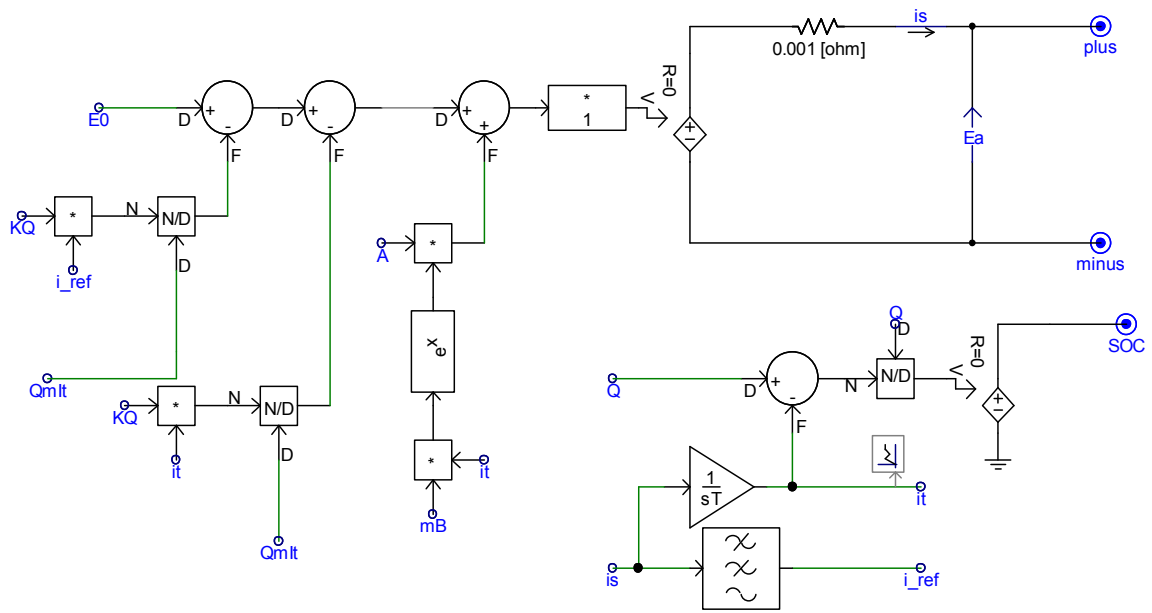


그림 8. 배터리 모델링을 위한 PSCAD/EMTDC의 구조도

풍력발전단지에 배터리를 연계하여 출력의 평활화를 이루기 위해 본 논문에서 사용된 모델의 PSCAD/EMTDC 프로그램의 모델 파일은 그림 9와 같다. 여기서 풍력발전단지에 연계되는 배터리는 4 뱅크를 병렬 연계하여 운전하고 풍력발전단지는 행원과 한계풍력발전단지가 되도록 각각의 용량에 따라 해석을 하도록 하였다. 그리고 계통에 10MW 또는 30MW 의 부하 용량이 연계되어 운전되고 또한 전원은 이상적인 전원으로 간주하여 해석하였다.

배터리 출력은 각 뱅크에 연결되어 있는 인버터에 의해 출력이 조절되도록 하고, 여기서 사용되는 인버터 모델은 그림 10과 같이 축약형 모델로 간단하면서도 해석시간을 단축하도록 모델링되어 사용하였다.

여기서 배터리 수명을 위하여 배터리 잔존용량(State of charge)을 0.2~0.8 까지 만을 사용하게 되면 사용가능한 배터리 용량은 $4.2 \times 0.6 = 2.52$ MWh 가 된다. 실제 배터리의 잔존용량은 0.3675 MWh 만 있어도 계통 안정화에 문제가 없으므로 여유분 용량인 $2.52 - 0.3675 = 2.1525$ MWh를 풍력발전단지 출력에 평활화를 위하여 사용가능하다.

배터리 SOC가 선형적으로 내려간다고 가정하면 실제로 제어되는 구간에서는 오히려 곡선이 완만하다. $0.2+0.3675/4.2=0.2+0.0875=0.2875$ 에서 0.2구간을 여유분으로 두고 나머지 부분을 출력 평활화 제어에 사용하면 된다. 결국 풍력발전단지 용량의 약 20% 정도의 배터리 용량을 가지면 표6과 같이 평활화 제어나 풍력발전단지 탈락 출력제어를 행할 수 있을 것으로 여겨진다.

표 6. 배터리의 SOC 구간별 제어방식

SOC	1.0 ~ 0.8	0.8 ~ 0.2875	0.2875 ~ 0.2	0.2 ~ 0
제어방식	비제어구간 (과충전구간)	평활화제어 / 풍력발전단지탈락 출력제어	풍력발전단지탈락 출력제어	비제어구간 (완전방전구간)

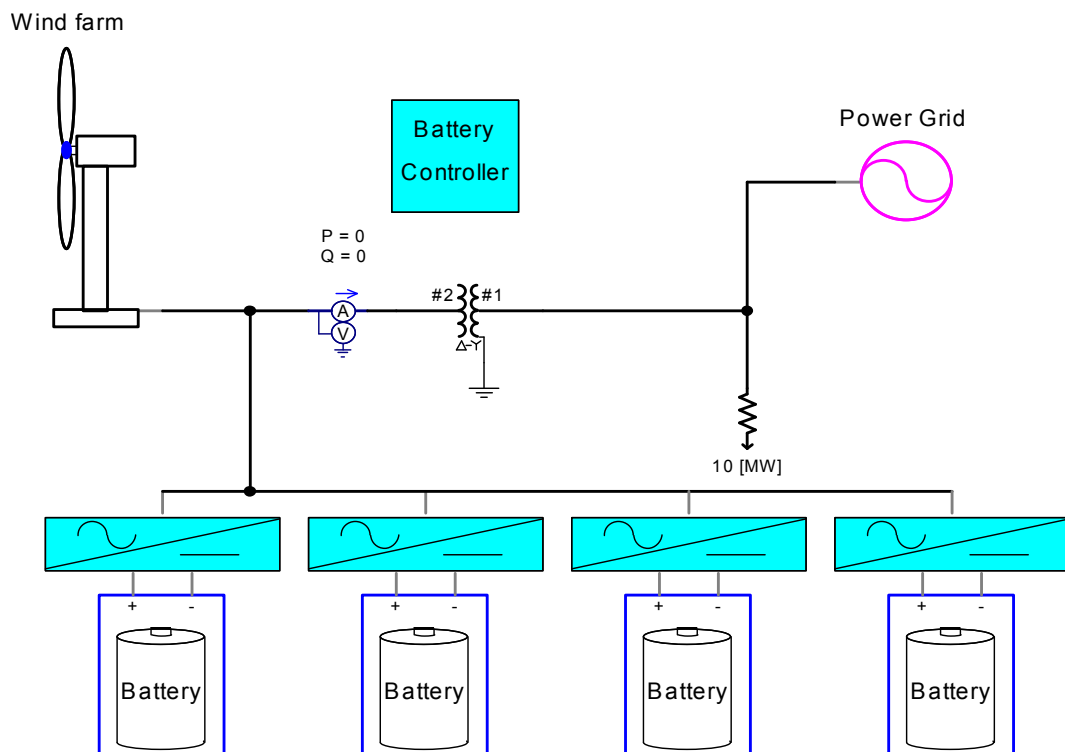


그림 9. 시뮬레이션용 PSCAD/EMTDC 모델

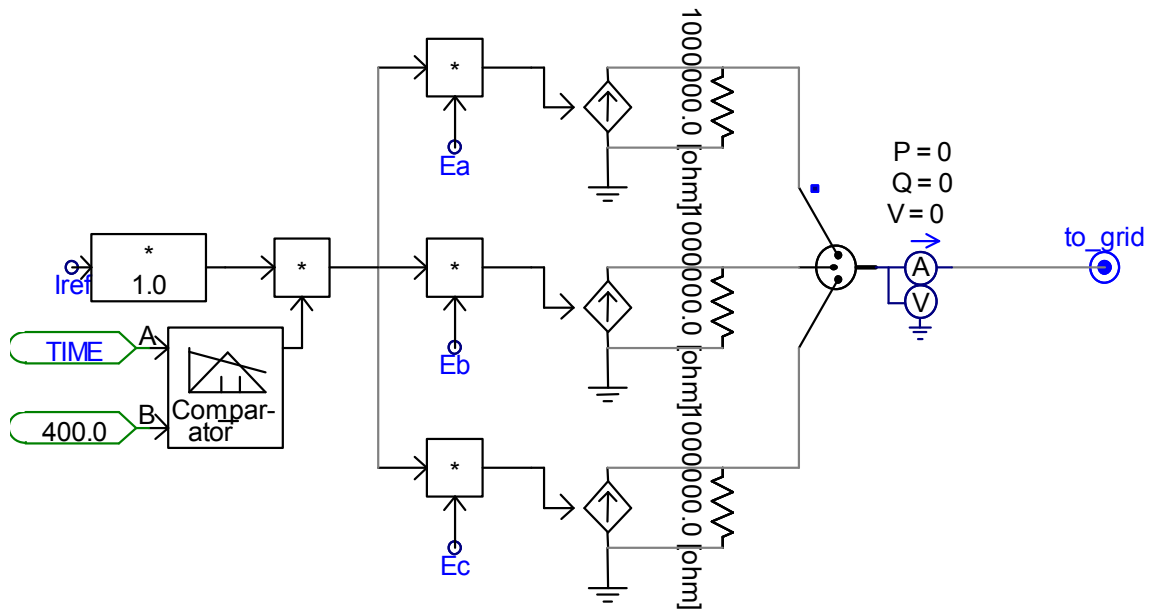


그림 10. 인버터 모델링

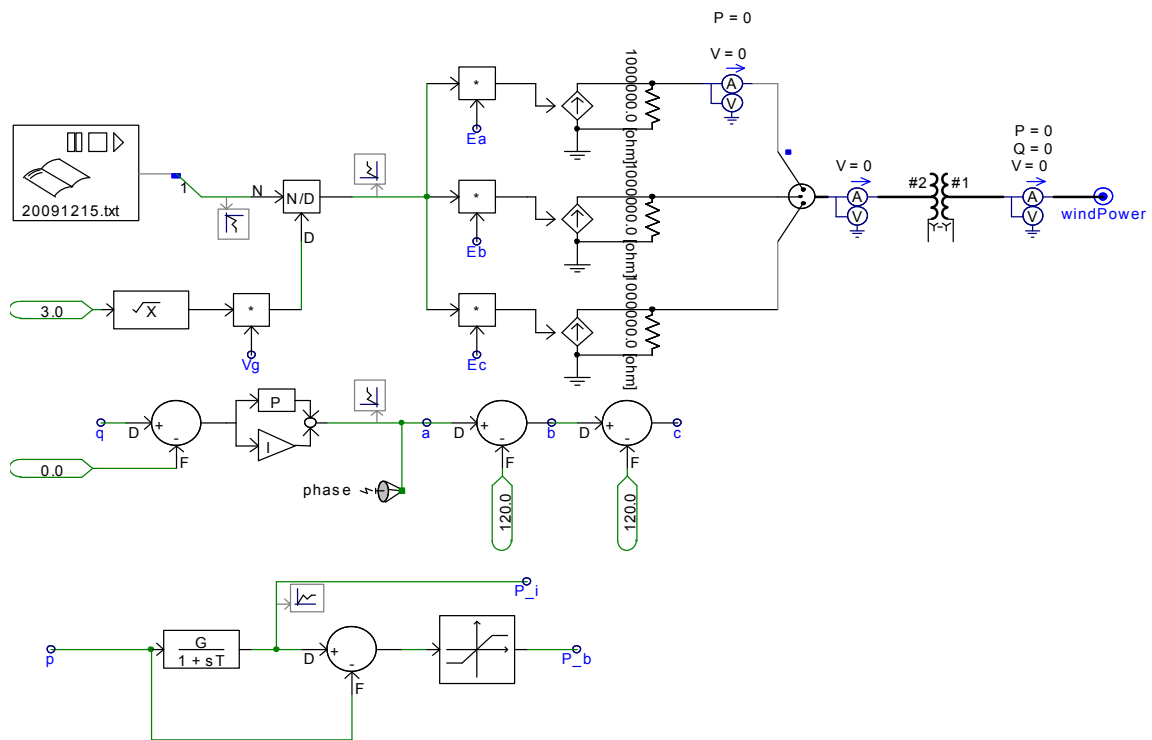


그림 11. 풍력발전단지 모델링

그림 11은 풍력발전단지 모델링을 위한 PSCAD/EMTDC 모델이다. 여기서 행원 풍력발전단지나 한경풍력발전단지의 실제 출력 데이터를 이용하기 위하여 Look-Up 테이블화 하고 출력되는 유효전력의 데이터를 전류원 데이터로 전환하여 하나의

가변 전류원으로 변경하여 해석을 하도록 하였다. 이렇게 하면 배터리에서 출력되는 출력도 가변 전류원으로 전환하여 제어를 하면 계통측에서 전류출력 변동이 적은 즉, 평활화가 이루어진 풍력발전단지 출력이 이루어진다.

4.2. 해석 결과 및 고찰

제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 풍력발전단지의 약 20% 배터리 용량을 가지고 그림 12와 같은 행원풍력발전단지의 실제 출력을 가지고 평활화 제어를 수행하였을 경우 그림 13과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

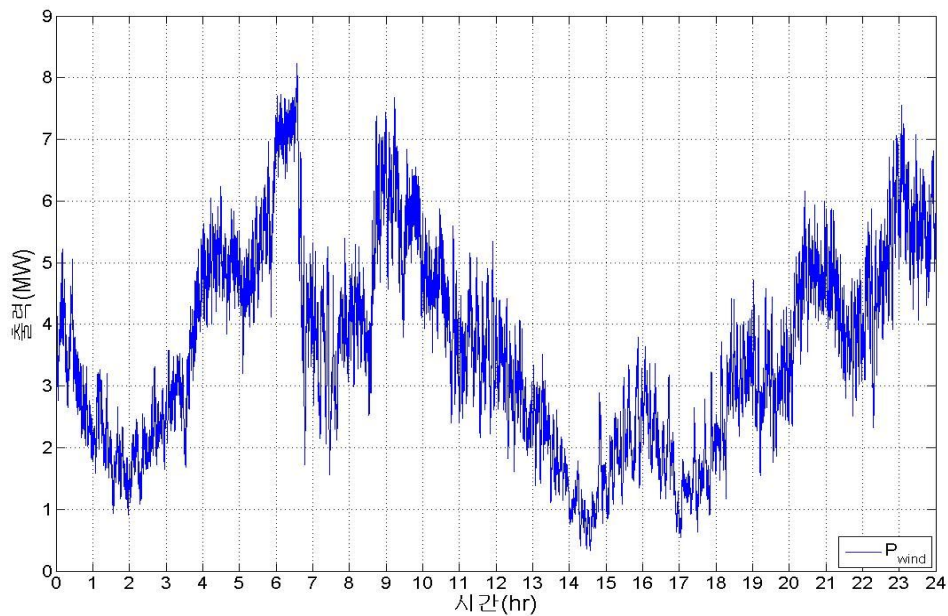


그림 12. 2009년 12월 15일 행원풍력발전단지 실제 출력

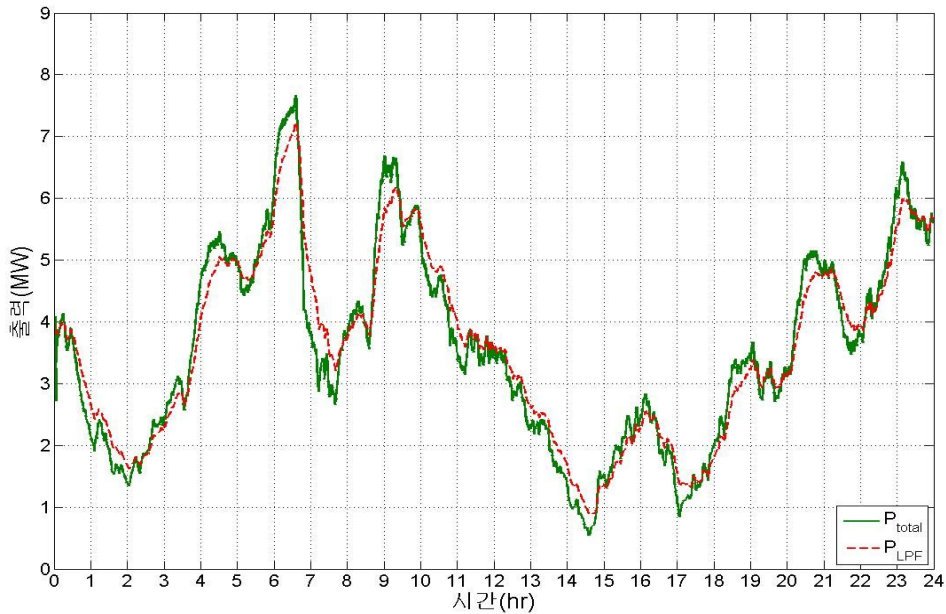


그림 13. 행원풍력발전단지의 LPF 의 출력과 최종 계통 출력(2009. 12. 15.)

그림13에서 실선의 출력선은 배터리를 가지고 평활화 한 결과 파형이며, 파선은 실제출력의 저역통과필터를 통과한 출력이다. 이 출력은 실제 출력에서 저역통과 필터의 출력을 뺀 부분이 배터리가 평활화를 요하는 부분이다.

그림 14는 정격출력에서 탈락되었을 때 10MW/분의 시정수를 만족하기 위해 나타난 시뮬레이션 결과이다. 이 결과에서 보면 제안한 풍력발전단지 용량의 20%를 가지고도 최소 출력 시정수를 만족하고 있음을 알 수 있다.

그림 15에서 그림 17까지는 이 값을 적용하여 환경풍력발전단지의 실제 출력을 평활화 했을 때의 출력과 정격에서 탈락하였을 때 배터리의 동작을 통하여 풍력발전단지의 증·감발 출력 특성이 행원풍력발전단지와 거의 비슷하게 나타내고 있다.

이상과 같은 결과에서 보면 행원풍력발전단지나 환경풍력발전단지의 설비용량의 약 20 % 배터리 용량을 연계하여 5C 로 운전한다면 출력 완화 제어나 정격에서 순간 탈락 시에도 원하는 결과 값을 얻을 수 있음을 나타내고 있다.

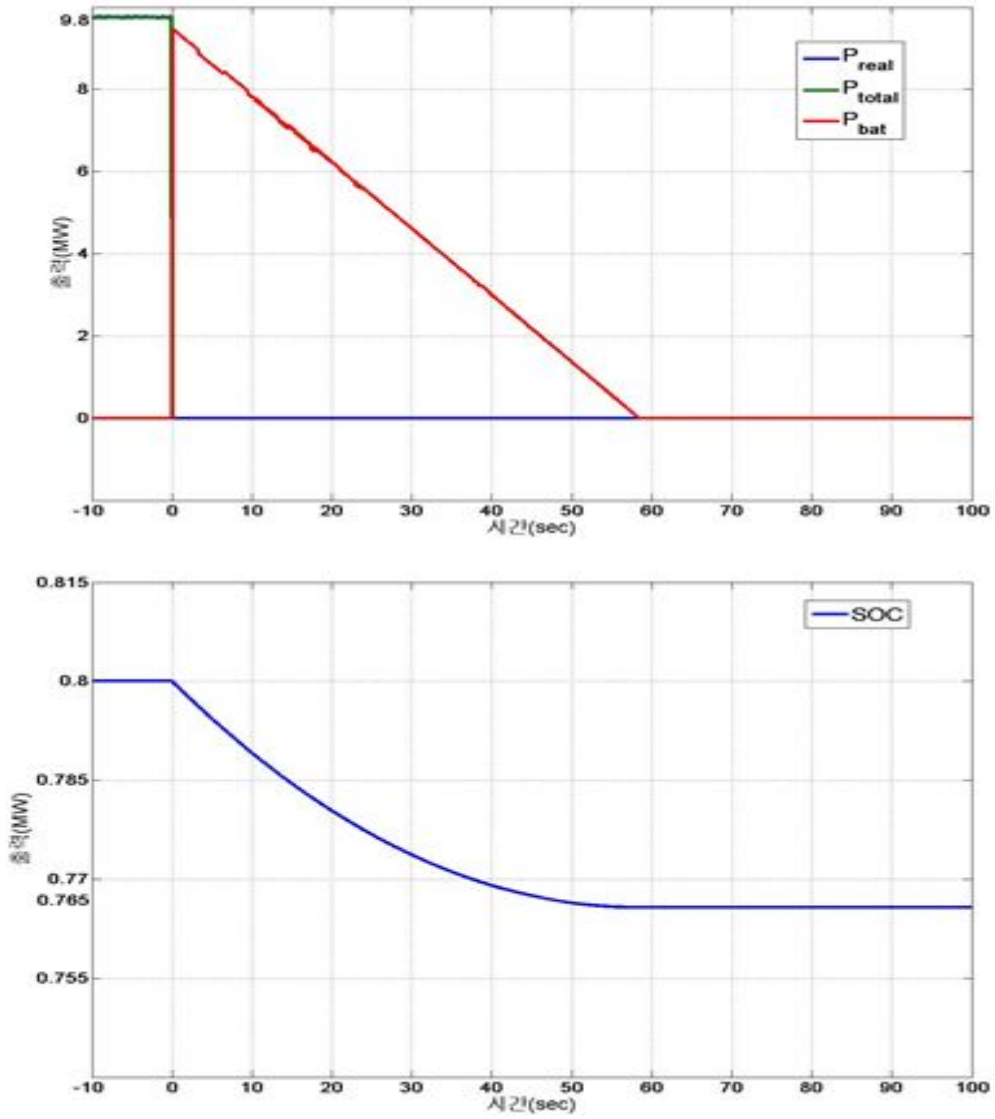


그림 14. 배터리가 채용된 행원풍력발전단지의 정격출력 변동

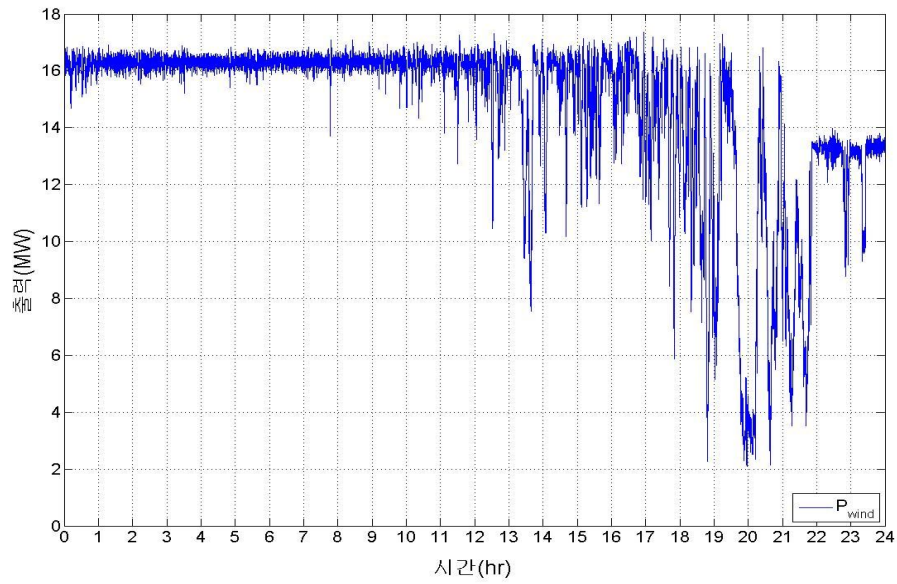


그림 15. 한경풍력발전단지의 최대출력 변동(2010. 1. 12.)

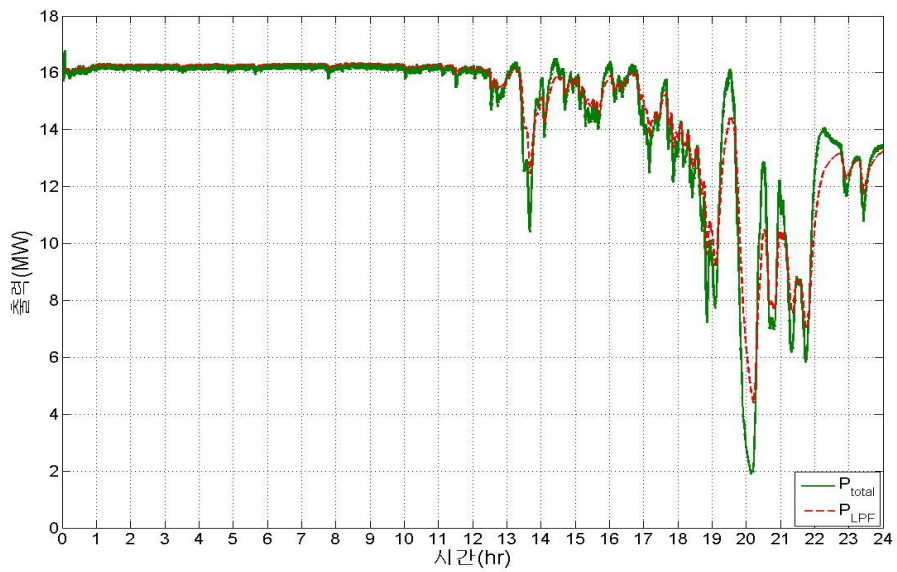


그림 16. 한경풍력발전단지의 LPF 의 출력과 최종 계통 출력(2010. 01. 12.)

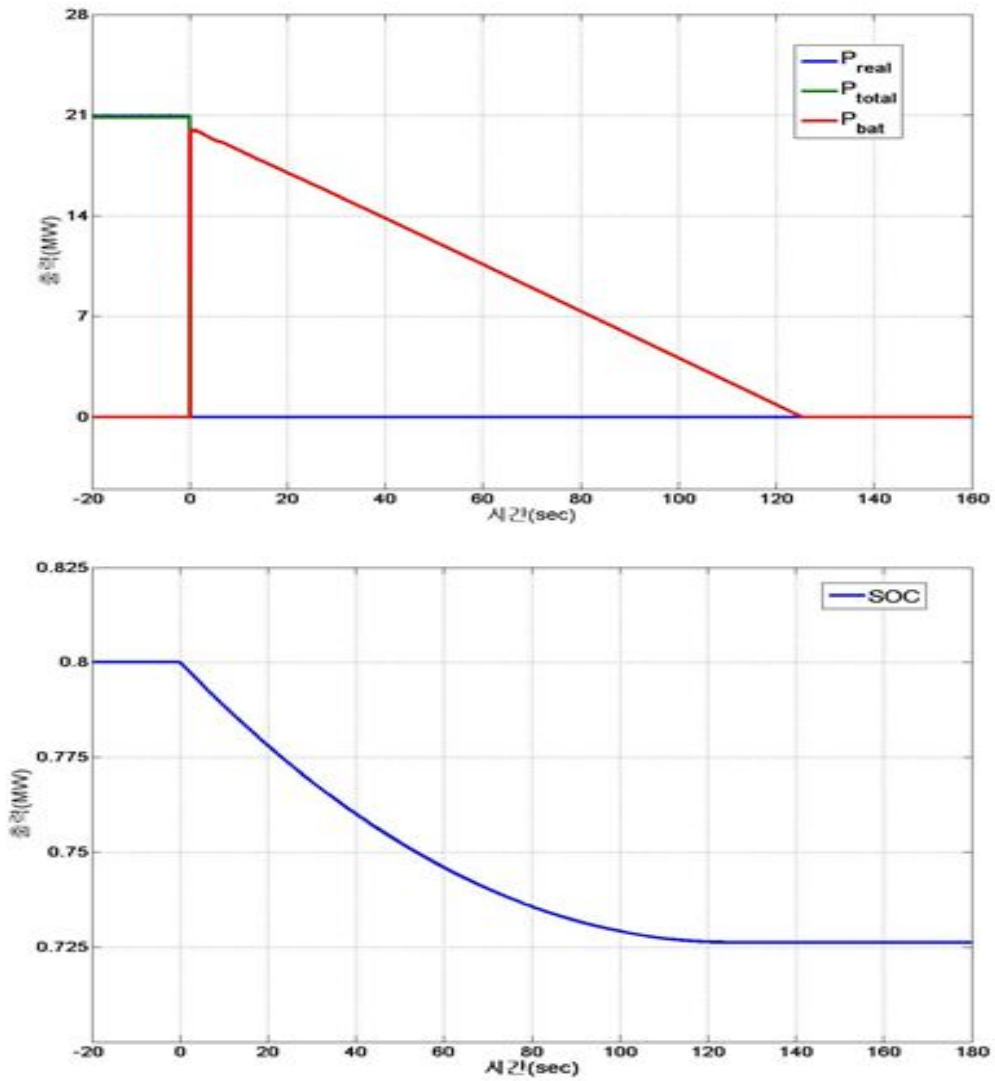


그림 17. 배터리가 채용된 한경풍력발전단지의 정격출력 변동

V. 결 론

본 논문에서는 제주특별자치도 내 행원풍력발전단지와 한경풍력발전단지 용량의 약 20%의 배터리 용량을 가지고, 2009년 3월부터 1년간의 실제 출력을 이용하여 PSCAD/EMTDC 프로그램으로 배터리와 풍력발전 제어시스템을 모델링과 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 풍력발전단지의 배터리 연계 운전시 출력 특성 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 제주 동부·서부 지역 각 1 곳의 풍력발전단지의 실제 출력을 가지고 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과 풍력발전단지의 20% 배터리 용량으로 출력 평활화 제어 및 제주 계통 HVDC 운전 정지 시 풍력발전단지 정격출력 차단에 따른 조건을 만족할 수 있어, 풍력발전단지의 배터리 연계 운전 시 단지용량의 약 20% 이상으로 하면 계통안정화에 기여할 것으로 예견된다.
2. PSCAD/EMTDC 프로그램으로 배터리 및 풍력발전 제어시스템 모델링을 통하여 컴퓨터 시뮬레이션 한 결과, 연구목적에 만족하는 결과가 나타나고 있어 제안한 모델링이 잘되었음을 알 수 있었다.
3. 배터리 채용에 의한 풍력발전단지 운용 시 계통영향을 최소화 할 수 있기 때문에 제주지역에 풍력발전 한계용량을 높이는데 크게 기여 할 것으로 여겨진다.

이상과 같은 결과를 토대로 제주지역 풍력발전단지에 시설규모의 약 20% 용량 배터리를 채용하여 운전한다면 풍력발전 출력변동에 의한 계통 영향을 최소화 할 수 있어, 추후 제주지역에 새로운 풍력발전단지 건설 시에 제안한 방법으로 배터리 채용에 의한 풍력발전단지를 건설할 경우 계통영향 및 풍력발전 한계용량을 분석하는데 유익하리라 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Jun Shimizukawa, Kenji Iba, Yusuke Hida, Ryuichi Yokoyama “Mitigation of intermittency of wind power generation using battery energy storage system” UPEC 31st, 2010.
- [2] 제주대학교, “Smart Renewable 풍력발전 연구”, 효성중공업, 2011. 10.
- [3] 일본 전원개발주식회사 “풍력 발전 전력 계통 안정화등 기술개발 - 성과 보고서 (중간)” 독립행정법인 신에너지 산업기술 종합 개발 기구, 2006.
- [4] 김재홍, 김일환, “리튬이온 배터리의 SOC 제어가 가능한 단상 멀티레벨 컨버터 시뮬레이션” 조명전기설비학회 논문집, pp122~128, 2011.
- [5] 김재홍, 강명석, 김일환, “풍력발전의 출력 변동 저감을 위한 ESS 최소용량 산정기법” 한국태양에너지학회 논문집, pp119~125, 2011.
- [6] 제주대학교, “2011년 이후 제주 전력계통에서의 전원별 최적화방안 연구” 지식경제부, 2009.10.
- [7] 제주대학교, “안정적 전력공급방안 및 풍력발전 한계용량 증대방안 조사”, 제주특별자치도, 2012.2.
- [8] 김윤성, 문대성, 원동준 “출력변동 저감 및 출력범위 예측 향상을 위한 풍력-연료전지 하이브리드 시스템의 운영방법” 대한전기학회논문지 제58권 제3호, 2009, pp431~654.
- [9] Katsuhisa Yoshimoto, Non-member, Toshiya. Nanahara “New Control Method for Regulating State-of-Charge of a Battery in Hybrid Wind Power/Battery Energy Storage System” IEEE, Power System Conference and Exposition, PSCE '06. 2006 IEEE PES, pp1244~1251.

감사의 글

2년 6개월간의 대학원 생활이 이제야 결실을 맺게 되었습니다. 에너지를 담당하는 제주특별자치도 공무원으로서 풍력발전사업에 대한 정책에 조그마한 보탬이 되고자 시작했던 대학원 생활이 생각보다 훨씬 힘들게 마무리 하게 되는 것 같습니다.

세계인의 자산인 제주도의 환경을 보전하고 풍력발전을 지속적으로 개발을 확대하는데 이 논문이 제주특별자치도의 풍력발전 개발정책에 조금이나마 보탬이 될 수 있다면 더한 영광이 없을 것입니다.

낮에는 출근하여 정책을 수립하고 집행하여야 하고, 밤에는 대학원 공부를 한다는 것이 그리 쉽지만은 않았습니다. 이런 상황에서 여러 가지로 부족한 저를 항상 넓은 아량으로 이해하시고 지도해 주신 김일환 교수님께 무한한 감사를 드립니다. 김일환 교수님의 적극적이고 애정 어린 지도가 없었다면 오늘에 이르지 못했을 것이라고 생각합니다.

그리고 깊은 지식을 아낌없이 전달해 주신 좌종근 교수님, 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김세호 교수님, 김호찬 교수님, 김호민 교수님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 또한 전력전 자연연구실에서 고생하는 동료들께도 고마운 말씀을 드립니다.

항상 옆에서 지켜봐주며 화목한 가정을 만들어 주고 있는 아내와 사랑하는 아들 제민·성민에게도 사랑한다는 말과 함께 고마운 마음을 전합니다. 그리고 사랑하는 어머니의 건강을 기원합니다.

2012년 6월

金 永 吉