



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#) 

博士學位論文

풍력발전 출력보상을 위한 하이브리드
에너지저장시스템에 관한 연구

濟州大學校 大學院

電氣電子工學科

金 宰 弘

2012年 12月

풍력발전 출력보상을 위한 하이브리드 에너지저장시스템에 관한 연구

指導教授 金一煥
金宰弘

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2012年 12月

金宰弘의 工學 博士學位 論文을 認准함

| | | |
|-------|-------|---|
| 審查委員長 | _____ | 印 |
| 委 員 | _____ | 印 |
| 委 員 | _____ | 印 |
| 委 員 | _____ | 印 |
| 委 員 | _____ | 印 |

濟州大學校 大學院

2012年 12月

A Study on the Wind Power Output Compensation
with the Hybrid Energy Storage System

Jae-Hong Kim

(Supervised by Professor Eel-Hwan Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2012. 12.

목 차

| | |
|--------------------------------------|-----|
| LIST OF FIGURES | iii |
| LIST OF TABLES | vii |
| LIST OF SYMBOLS | ix |
| SUMMARY | x |
| | |
| I. 서 론 | 1 |
| 1. 연구의 배경 및 필요성 | 1 |
| 2. 연구의 목표 | 4 |
| | |
| II. 풍력발전단지의 출력변동 분석 | 5 |
| 1. 바람 에너지 특성 | 5 |
| 2. 풍력발전 시스템의 전력품질과 계통 영향 | 7 |
| 1) 풍력발전 시스템에 의한 계통영향 | 7 |
| 2) 제주계통에서 풍력발전 출력변동에 의한 주파수 영향 | 9 |
| 3. 제주 풍력발전단지별 출력변동 분석 | 11 |
| 1) 행원풍력발전단지 | 13 |
| 2) 한경풍력발전단지 | 23 |
| 3) 성산풍력발전단지 | 32 |
| | |
| III. 에너지저장시스템 모델링과 용량산정 | 40 |
| 1. 에너지저장시스템 모델링 | 41 |
| 1) 리튬이온배터리의 모델링 | 41 |
| 2) 슈퍼커패시터 모델링 | 49 |
| 3) 제어기 모델링 | 54 |
| 2. 에너지저장시스템 용량산정 | 58 |
| 1) 에너지저장시스템의 용량산정 방법 | 58 |
| 2) 풍력발전단지별 에너지저장시스템 용량산정 | 67 |

| | |
|------------------------|-----|
| IV. 컴퓨터 해석과 결과고찰 | 86 |
| 1. 행원풍력발전단지 | 86 |
| 2. 환경풍력발전단지 | 91 |
| 3. 성산풍력발전단지 | 95 |
| V. 결 론 | 101 |
| 참 고 문 헌 | 103 |

LIST OF FIGURES

| | |
|---|----|
| Fig. 1 Output characteristics of wind turbine generation system | 6 |
| Fig. 2 Frequency variation according to load change | 10 |
| Fig. 3 Wind map of Jeju Island | 11 |
| Fig. 4 Jeju power grid with wind farms | 12 |
| Fig. 5 Grid connection of the Haengwon wind farm | 13 |
| Fig. 6 Probability distribution curve of the power fluctuation every 2 seconds in the Haengwon wind farm | 16 |
| Fig. 7 Probability distribution curve of the power fluctuation every 1 minute in the Haengwon wind farm | 18 |
| Fig. 8 Probability distribution curve of the power fluctuation every 10 minutes in the Haengwon wind farm | 20 |
| Fig. 9 Probability distribution curve of the power fluctuation every 30 minutes in the Haengwon wind farm | 22 |
| Fig. 10 Grid connection of the Hangeong wind farm | 23 |
| Fig. 11 Probability distribution curve of the power fluctuation every 2 seconds in the Hangeong wind farm | 25 |
| Fig. 12 Probability distribution curve of the power fluctuation every 1 minute in the Hangeong wind farm | 27 |
| Fig. 13 Probability distribution curve of the power fluctuation every 10 minutes in the Hangeong wind farm | 29 |
| Fig. 14 Probability distribution curve of the power fluctuation every 30 minutes in the Hangeong wind farm | 31 |
| Fig. 15 Grid connection of wind generators in the Seongsan wind farm | 32 |
| Fig. 16 Probability distribution curve of the power fluctuation every 2 seconds in the Seongsan wind farm | 34 |
| Fig. 17 Probability distribution curve of the power fluctuation every 1 minute in the Seongsan wind farm | 36 |
| Fig. 18 Probability distribution curve of the power fluctuation every 10 minutes in the Seongsan wind farm | 38 |

| | |
|---|----|
| Fig. 19 Probability distribution curve of the power fluctuation every 30 minutes in the Seongsan wind farm | 40 |
| Fig. 20 Configuration of the Li-ion battery | 41 |
| Fig. 21 Non-linear battery model | 43 |
| Fig. 22 Discharging curve of the 7S2P Li-ion battery pack | 44 |
| Fig. 23 The modeling of Li-ion battery with PSCAD/EMTDC | 46 |
| Fig. 24 Configuration of Li-ion battery with PSCAD/EMTDC | 46 |
| Fig. 25 Actual discharging curves of the 50Ah Li-ion battery | 47 |
| Fig. 26 Discharge curves of the modeling Li-ion battery | 47 |
| Fig. 27 Discharging/charging curves of the modeling Li-ion battery (1C-rate) · | 48 |
| Fig. 28 Discharging/charging curves of the modeling Li-ion battery (5C-rate) · | 48 |
| Fig. 29 Equivalent circuit model of the EDLC | 51 |
| Fig. 30 Modeling of EDLC with the PSCAD/EMTDC | 52 |
| Fig. 31 Actual discharging curves of the EDLC | 53 |
| Fig. 32 Discharging curves of the modeling EDLC | 53 |
| Fig. 33 Configuration of the ESS in wind farm | 54 |
| Fig. 35 Smoothing effect on different time constants | 55 |
| Fig. 36 Block diagram of SOC & power reference | 56 |
| Fig. 37 Block diagram of the SOC control | 57 |
| Fig. 38 Maximum power fluctuation every averaging time | 58 |
| Fig. 39 ESS capacity for the power compensation | 59 |
| Fig. 40 Probability distribution curve of the power fluctuation of wind farm · | 60 |
| Fig. 41 Minimum capacity of the ESS disconnecting the wind farm from the grid · | 61 |
| Fig. 42 SOC region for the ESS | 63 |
| Fig. 43 Schematic diagram of the HESS | 64 |
| Fig. 44 Capacity of HESS for disconnecting the wind farm from the grid · | 65 |
| Fig. 45 Saturation point of $\Delta P_{BESS}/\Delta C_{EDLC}$ | 66 |
| Fig. 46 Power output of the Haengwon wind farm (2009.12.03) | 67 |
| Fig. 47 Power output of the Haengwon wind farm (2009.12.15) | 67 |
| Fig. 48 Power output of the Haengwon wind farm (2009.12.16) | 68 |
| Fig. 49 Power output of the Haengwon wind farm (2009.12.17) | 68 |
| Fig. 50 Power output of the Haengwon wind farm (2009.12.31) | 68 |

| | |
|--|----|
| Fig. 51 Maximum power fluctuation every averaging time in the Haengwon wind farm | 69 |
| Fig. 52 Probability distribution curve of the power fluctuation in the Haengwon wind farm | 70 |
| Fig. 53 Saturation point of $\Delta P_{BESS}/\Delta C_{EDLC}$ in the Haengwon wind farm .. | 72 |
| Fig. 54 Power output of the Hangeong wind farm (2010.01.05) | 73 |
| Fig. 55 Power output of the Hangeong wind farm (2010.01.07) | 74 |
| Fig. 56 Power output of the Hangeong wind farm (2010.01.12) | 74 |
| Fig. 57 Power output of the Hangeong wind farm (2010.01.13) | 74 |
| Fig. 58 Power output of the Hangeong wind farm (2010.01.23) | 75 |
| Fig. 59 Maximum power fluctuation every averaging time in the Hangeong wind farm | 76 |
| Fig. 60 Probability distribution curve of the power fluctuation in the Hangeong wind farm | 76 |
| Fig. 61 Saturation point of $\Delta P_{BESS}/\Delta C_{EDLC}$ in the Hangeong wind farm .. | 78 |
| Fig. 62 Power output of the Seongsan wind farm (2010.01.04) | 80 |
| Fig. 63 Power output of the Seongsan wind farm (2010.01.06) | 80 |
| Fig. 64 Power output of the Seongsan wind farm (2010.01.07) | 80 |
| Fig. 65 Power output of the Seongsan wind farm (2010.01.12) | 81 |
| Fig. 66 Power output of the Seongsan wind farm (2010.01.27) | 81 |
| Fig. 67 Maximum power fluctuation every averaging time in the Seongsan wind farm | 82 |
| Fig. 68 Probability distribution curve of the power fluctuation in the Seongsan wind farm | 82 |
| Fig. 69 Saturation point of $\Delta P_{BESS}/\Delta C_{EDLC}$ in the Seongsan wind farm | 84 |
| Fig. 70 SOC variation of the HESS in case of disconnecting the Haengwon wind farm from the grid | 87 |
| Fig. 71 Frequency variation in case of disconnecting the Haengwon wind farm from the grid without the ESS | 87 |
| Fig. 72 Frequency variation in case of disconnecting the Haengwon wind farm from the grid with the ESS | 88 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 73 Power output of the Haengwon wind farm (2009.12.15) | 88 |
| Fig. 74 Compensated power output of the Haengwon wind farm with the BESS and LPF | 89 |
| Fig. 75 Compensated power output of the Haengwon wind farm with the HESS and LPF | 89 |
| Fig. 76 SOC variation during the BESS operation in the Haengwon wind farm · | 90 |
| Fig. 77 SOC variation during the HESS operation in the Haengwon wind farm · | 90 |
| Fig. 78 SOC variation of the HESS in case of disconnecting the Hangeong wind farm from the grid | 92 |
| Fig. 79 Frequency variation in case of disconnecting the Hangeong wind farm from the grid without the ESS | 92 |
| Fig. 80 Frequency variation in case of disconnecting the Hangeong wind farm from the grid with the ESS | 93 |
| Fig. 81 Power output in the Hangeong wind farm (2012.01.12.) | 93 |
| Fig. 82 Compensated power output of the Hangeong wind farm with the BESS and LPF | 94 |
| Fig. 83 Compensated power output of the Hangeong wind farm with the HESS and LPF | 94 |
| Fig. 84 SOC variation during the BESS operation in the Hangeong wind farm ··· | 95 |
| Fig. 85 SOC variation during the HESS operation in the Hangeong wind farm ··· | 95 |
| Fig. 86 SOC variation of the HESS in case of disconnecting the Seongsan wind farm from the grid | 97 |
| Fig. 87 Frequency variation in case of disconnecting the Seongsan wind farm from the grid without the ESS | 97 |
| Fig. 88 Frequency variation in case of disconnecting the Seongsan wind farm from the grid with the ESS | 98 |
| Fig. 89 Power output in the Seongsan wind farm (2010.01.27.) | 98 |
| Fig. 90 Compensated power output of the Seongsan wind farm with the BESS and LPF | 99 |
| Fig. 91 Compensated power output of the Seongsan wind farm with the HESS and LPF | 99 |
| Fig. 92 SOC variation during the BESS operation in the Seongsan wind farm · | 100 |
| Fig. 93 SOC variation during the HESS operation in the Seongsan wind farm · | 100 |

LIST OF TABLES

| | | |
|----------|---|----|
| Table 1 | Frequency characteristic constant caused by load change | 10 |
| Table 2 | Wind farms in the Jeju Island in 2012 | 12 |
| Table 3 | Probability distribution of the output power fluctuation every 2 seconds in the Haengwon wind farm | 15 |
| Table 4 | Maximum power fluctuation every 2 seconds in the Haengwon wind farm | 16 |
| Table 5 | Probability distribution of the output power fluctuation every 1 minute in the Haengwon wind farm | 17 |
| Table 6 | Maximum power fluctuation every 1 minute in the Haengwon wind farm | 18 |
| Table 7 | Probability distribution of wind power fluctuation every 10 minutes in the Haengwon wind farm | 19 |
| Table 8 | Maximum power fluctuation every 10 minutes in the Haengwon wind farm | 20 |
| Table 9 | Probability distribution of wind power fluctuation every 30 minutes in the Haengwon wind farm | 21 |
| Table 10 | Maximum power fluctuation every 30 minutes in the Haengwon wind farm | 22 |
| Table 11 | Probability distribution of wind power fluctuation every 2 seconds in the Hangeong wind farm | 24 |
| Table 12 | Maximum power fluctuation every 2 seconds in the Hangeong wind farm | 25 |
| Table 13 | Probability distribution of wind power fluctuation every 1 minute in the Hangeong wind farm | 26 |
| Table 14 | Maximum power fluctuation every 1 minute in the Hangeong wind farm | 27 |
| Table 15 | Probability distribution of wind power fluctuation every 10 minutes in the Hangeong wind farm | 28 |

| | |
|---|----|
| Table 16 Maximum power fluctuation every 10 minutes in the Hangeong wind farm | 29 |
| Table 17 Probability distribution of variable fluctuation every 30 minutes in the Hangeong wind farm | 30 |
| Table 18 Maximum power fluctuation every 30 minutes in the Hangeong wind farm | 31 |
| Table 19 Probability distribution of wind power fluctuation every 2 seconds in the Seongsan wind farm | 33 |
| Table 20 Maximum power fluctuation every 2 seconds in the Seongsan wind farm | 34 |
| Table 21 Probability distribution of wind power fluctuation every 1 minute in the Seongsan wind farm | 35 |
| Table 22 Maximum power fluctuation every 1 minute in the Seongsan wind farm | 36 |
| Table 23 Probability distribution of wind power fluctuation every 10 minutes in the Seongsan wind farm | 37 |
| Table 24 Maximum power fluctuation every 10 minutes in the Seongsan wind farm | 38 |
| Table 25 Probability distribution of wind power fluctuation every 30 minutes in the Seongsan wind farm | 39 |
| Table 26 Maximum power fluctuation every 30 minutes in the Seongsan wind farm | 40 |
| Table 27 Characteristics of batteries | 42 |
| Table 28 Comparative results between the BESS and the HESS in the Haengwon wind farm | 86 |
| Table 29 Comparative results between the BESS and the HESS in the Hangeong wind farm | 91 |
| Table 30 Comparative results between the BESS and the HESS in the Seongsan wind farm | 96 |

LIST OF SYMBOLS

| | |
|---------------------|-------------------------------|
| η_m | 전달장치의 효율 |
| η_g | 발전기의 효율 |
| v_{cut-in} | 시동풍속 |
| v_{rated} | 정격풍속 |
| P_{rated} | 정격출력 |
| K | 주파수특성정수 |
| η | 효율 |
| I_{nom} | 공칭전류 |
| V_{nom} | 공칭전압 |
| E_{Full} | 완전 충전전압 |
| E_{Exp} | 지수영역 전압 |
| K_p | 분극상수 |
| C_{ESS} | 에너지저장시스템 용량 |
| M | 여유분 |
| T | 시정수 |
| P_{WF} | 풍력발전단지 정격출력 |
| $C_{ESS_SM_max}$ | 풍력발전단지 출력 평활화를 위한 최대 배터리 용량 |
| $C_{ESS_SM_min}$ | 풍력발전단지 출력 평활화를 위한 최소 배터리 용량 |
| $C_{ESS_DG_min}$ | 풍력발전단지 탈락 시 안정화를 위한 최소 배터리 용량 |
| C_{ESS_Total} | 마진을 고려한 총 에너지저장장치 용량 |
| P_{EDLC} | 슈퍼커패시터의 출력 |
| P_{BESS} | 배터리 출력 |
| $C_{BESS_DG_min}$ | 발전단지 탈락 시 안정화를 위한 최소 배터리 용량 |

SUMMARY

Nowadays, to cope with the rapid exhaustion of the earth's fossil fuel resources and the climate change, the renewable energies have been researched in many countries such as wind energy, solar energy, tidal energy and so on. Especially, wind energy is the most significant renewable energy because of its capacity and friendly environment. With the development of advanced technologies, the wind turbine has been increasing in the capacity.

Wind power has been given much weight in the electrical energy every year. But wind power systems may cause problems to system operation such as power fluctuation, frequency variation, voltage variation, and grid instability. Hence, wind farm can be no longer considered as a stable energy source.

In the Jeju Island, wind power system is one of the main renewable energy source because wind speed is most strong in Korea. The total wind power capacity is almost 106 MW among 852 MW of Jeju power system in 2012. This power will be increased in the future when new wind farms are installed. The Jeju power system is considered as a weak-grid, thus it needs a support from other sources. Two LCC(Line Commutated Converter)-HVDC(High Voltage Direct Current) systems have built to connect between mainland and the Jeju power grid network (HVDC #1: 150 MW and HVDC #2: 250MW). The aims of LCC-HVDC systems are to supply the electrical energy and to make a stabilization in the Jeju power system. However, the Jeju power system will be able to be also in dangerous situation, such as frequency fluctuation, in case of maintenance or breakdown of HVDC systems. Therefore, a separated energy source should be connected to wind farm when a fault occurs.

Many methods have been researched in literature to solve this problem. An ESS(Energy Storage System) using lithium ion battery is also one of the effective methods to stabilize the fluctuation of wind power system.

Advanced battery technologies now allow extraordinary energy densities, but it is still insufficient for applications of large power impulses. Especially, in case of the fluctuation in wind power system, it requires a high power density in very short duration.

This deficiency can be overcome by paralleling more batteries if that is allowed by system volume, weight, and cost constraints. On the other hand, a hybrid ESS-EDLC(Electric double layer capacitor) can solve the power deficiency at lower cost, space, and weight. Even though lithium-ion battery has high energy density, EDLC has much more energy density than former battery. The advantages of a hybrid ESS-EDLC are the extension of life cycle and the reduction of internal faults because EDLC does not have chemical variations on the electrodes. With smaller internal resistances, the internal losses and heating during extremely discharging term can be also reduced.

In this dissertation, the different storage energy devices are first analyzed and compared each other. Then, a hybrid ESS is proposed to compensate for the Jeju power system in case of power fluctuation. The characteristics of battery is compared between real data and simulation data. This dissertation also proposes the method for calculating the adequate capacity of the hybrid ESS. This work is very important because the fluctuation of wind power will be depended on the characteristic of wind velocity. An proposed capacity depend on the capacity of wind farm will save energy, increase efficiency, and ensure economical operation. Finally, the simulation results will confirm the effectiveness of proposed method.

I. 서론

1. 연구의 배경 및 필요성

국내의 풍력발전 산업은 1998년 8월 상업운전에 들어간 제주 행원풍력발전단지를 시작으로 2011년까지 총 28곳에 393.8MW의 용량이 조성되어 운영되고 있다 [1]. 바람자원이 풍부하여 풍력발전의 최적지로서 각광을 받고 있는 제주지역에서 운영되고 있는 풍력발전단지는 2012년 10월 현재 동부지역에 약 81MW, 서부지역에 약 25MW로 국내에 설치된 총 풍력발전용량의 22%를 차지하고 있다. 또한 2012년부터 발전사업자의 총발전량 가운데 일정 비율 이상을 신·재생에너지 전력으로 공급하도록 의무화하는 제도인 신·재생에너지 공급의무화제도(RPS: Renewable Portfolio Standards)가 도입됨에 따라 신·재생 에너지 비율이 높아질 것으로 예측되고 있으며, 지식경제부에서 발표한 제5차 전력수급기본 계획에 따라 제주지역에 2016년까지 풍력이 143.2MW가 추가적으로 설치될 예정이다[2][3].

그러나 풍력발전의 에너지원인 바람은 기상조건과 지형적인 특성에 따라 매순간 불규칙하게 변동한다. 이러한 바람의 변동은 블레이드가 터빈 회전축에 공급하는 토크의 변동으로 나타나고 이것은 발전기가 생산하는 전력변동의 원인이 되어 예상할 수 없는 전력의 갑작스런 계통 유입 또는 감소가 발생할 수 있으며, 순시전압 강하나 상승, 플리커, 최악의 경우 순시정전 및 주파수 변동으로 이어져 전력계통에 악영향을 줄 수 있다.

대단위 풍력발전단지 추가 설치가 예정되어 있는 제주 전력계통의 경우 제1연계선(HVDC#1)의 급속한 전력 보상능력을 이용하여 풍력발전 유동성에 의해 발생할 수 있는 전력계통 사고위험과 전력품질 문제를 대처해 왔다. 그러나 연계선의 한정된 출력용량 때문에 풍부한 풍력에너지 자원에도 불구하고 풍력설비 한계 용량은 120MW로 제한되어 있다[4]. 실제적으로 풍력설비 용량제한 필요성은 다음과 같은 문제에 대처하기 위함이다. 행원풍력발전단지나 한경풍력발전단지의

풍력출력변동을 1년간 조사해보면 시간당 풍력설비 최대 변동량이 설비용량의 약 45% 정도까지 나타나고 있다. 이러한 풍력출력의 변동은 연계선 수전량 변동을 발생시키며 무효전력 설비인 분로리액터의 다 빈도 On/Off 현상을 유발하게 된다. 또한 풍력발전량의 급격한 변동에 따라 이에 대응한 예비 발전기를 운용해야 하기 때문에 경제적인 전력운영 측면에서 부담이 되고 있다.

이러한 문제들에 의해 풍력설비 용량이 제한되고 있지만, 정부의 강력한 녹색성장 추진의지로 국산 풍력발전기가 개발되면서, 국산 풍력발전기 실증성능시험 및 풍부한 바람 자원활용을 위하여 설비한계용량을 운전한계용량으로 변경 운영할 필요가 있게 되었다. 따라서 2011년 134MW의 풍력설비용량에 대한 발전기 운영계획을 수립하였는데 해당 용량까지는 예비력 확보가 가능한 것으로 나타났다[4]. 또한 국가의 녹색성장 정책에 부합하고 2019년까지 1GW의 해상풍력과 300MW의 육상 풍력발전단지 구축 의지를 표명하는 제주도의 정책에 따라 추가되는 풍력발전용량의 예비력을 확보하기 위해 정부에서는 2012년 9월 완공된 제2연계선(HVDC#2)뿐만 아니라 제3연계선(HVDC#3)을 추진하려고 계획 중 이다. 그러나 이러한 집중적인 관심과 풍력에너지의 성장에도 불구하고 제 1, 2 연계선에 의존한 풍력발전 설비 예비력 확충은 문제점을 내포하고 있다. 연계선 설비의 유지보수 및 고장사태에 따라 제주계통은 심각한 사고 및 전력불안을 겪을 수 있다. 이는 연계선 설비의 용량이 증가될수록 이를 보완하기 위한 화석연료 발전소의 필요성이 부각되기 때문이며, 연계선에 의존한 제주지역 전력수급이 본질적으로 적합인가에 대한 의문 역시 큰 딜레마이기도 하다. 이를 극복하기 위해 제주지역 단독의 전력수급 자립화를 고려할 필요가 있으며 적어도 풍력발전단지별 자립적 전력 안정화를 위한 다른 대책이 수립되어야 한다.

이러한 문제는 제주지역에 국한된 것이 아니며 신·재생에너지 발전 선진국에서는 이미 다양한 연구가 이루어졌다. 대다수의 연구는 에너지저장시스템(ESS: Energy Storage System)을 풍력발전기와 복합연계 운영하는 방법에 집중되어 있으며 크게 두 가지 종류의 논문 및 연구로 나뉘고 있는데, 첫째는 에너지저장시스템의 용량산정에 대한 주제이고[5]~[10], 둘째는 다양한 에너지저장시스템의 최적구성에 대한 연구이다[11]~[17]. 첫째 연구의 경우 대다수 논문들은 확률 이론적 접근으로 결국 풍력발전단지 용량에 근접한 에너지저장시스템의 채용을 추

천하고 있지만 이는 경제적인 이유로 실현성이 낮은 문제점이 있다. 두 번째 경우의 논문은 다양한 에너지 저장매체를 이용하여 에너지저장시스템을 최적으로 구성하는 방법에 대한 연구이다. 하지만 각종 에너지저장시스템의 전압 전류 및 잔존용량(SOC: State of Charge)등 동특성을 고려한 연구와 실제 풍력발전단지의 운전데이터를 활용한 컴퓨터 해석을 통해 제안된 에너지저장시스템의 적정성을 밝히는 논문은 그리 많지 않다.

본 논문에서는 실제 제주 풍력발전단지(행원, 한경, 성산)의 출력특성을 근거로 하여 수초 또는 수분의 출력보상을 위한 에너지저장시스템의 용량을 산정하는 방법을 제안하고 있다. 그리고 에너지저장시스템의 구성에 있어 배터리 에너지저장시스템(BESS: Battery ESS)만을 사용하는 경우와 배터리와 슈퍼커패시터 에너지저장시스템(SCESS: Super Capacitor ESS)를 복합 구성하여 하이브리드 에너지저장시스템(HESS: Hybrid ESS)을 구성하는 두 가지 경우에 대한 풍력발전단지의 출력변동성 완화와 계통탈락 시 계통충격 완화에 대해 실제 단지출력을 이용하여 컴퓨터 해석을 수행함으로써 하이브리드 에너지저장시스템의 타당성을 입증하고자 한다.

2. 연구의 목표

본 논문은 약한 계통에 연계된 풍력발전단지의 변동성 완화를 위한 하이브리드 에너지저장시스템 적용방안을 도출하기 위해 다음과 같은 목표를 갖고 연구하였다.

첫째, 현재 제주도에서 운영 중인 10MW 이상의 풍력발전단지 중 행원, 한경, 성산풍력발전단지의 출력변동 특성을 검토하기 위해 최대 변동량, 변동률, 확률분포를 분석하였고, 연계선이 없는 상황에서 발전전력변동에 따라 발생할 수 있는 주파수 변동에 대하여 논하고자 한다. 이를 통하여 에너지저장시스템의 필요성과 기대효과를 파악할 수 있다.

둘째, 리튬이온(Li-ion) 배터리와 슈퍼커패시터를 전력계통과 전력전자 해석에 많이 사용되고 있는 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하여 모델링하였다. 모델링된 에너지저장시스템에 대하여 용량산정을 하고, 전력변환 시스템 및 제어기의 모델링과 제어기법에 대해 정리하여 각 모델 요소의 유기적 결합의 적절성을 규명함으로써 신뢰성 있는 컴퓨터 해석이 이루어졌음을 밝히고자 한다.

셋째, 풍력출력변동성 완화를 위해 배터리 에너지저장시스템으로만 구성되었을 때 용량산정에 대한 기법을 검토하고, 산정된 용량을 풍력발전단지에 적용하였다. 모델링된 풍력발전단지의 컴퓨터 해석을 통해 제안된 용량산정 기법이 유효함을 입증하고자 한다..

넷째, 제주계통에 연계된 각 풍력발전단지에 배터리 에너지저장시스템만으로 구성할 때와 슈퍼커패시터와 하이브리드 형태로 구성하여 운용하였을 때의 특성을 비교 검토하여 풍력발전에 적용되는 에너지저장시스템을 구성함에 있어 출력평활화와 계통탈락 시 계통안정화에 효과적인 에너지저장시스템 구성방안을 도출한다. 제안된 에너지저장시스템의 용량을 기준으로 컴퓨터 해석을 수행하여 배터리 저장장치로만 에너지저장시스템을 구성했을 때와 하이브리드 에너지저장시스템으로 구성했을 때를 비교하여 특징과 장점을 밝히고 하이브리드 에너지저장시스템이 유리함을 나타내고자 한다.

II. 풍력발전단지의 출력변동 분석

1. 바람 에너지 특성

풍속이 갖는 전력의 크기는 식(1)과 같이 풍속의 3제곱에 비례한다.

$$P_{\omega} = \frac{1}{2} \rho C_p A v_{\omega}^3 \quad [W] \quad (1)$$

- 여기서, P_{ω} : 풍속에서 얻어지는 전력 [W]
 ρ : 공기 밀도 [kg/m^3]
 C_p : 블레이드에 따른 출력계수
 A : 블레이드의 회전투영 면적 [m^2]
 v_{ω} : 풍속 [m/s]

P_{ω} 는 풍력터빈의 회전자에 의해 기계적인 동력으로 변환되는 에너지이며, 각 운동량의 변화가 없고 회전자 끝의 간섭흐름이 없는 경우 변환효율을 표시하는 출력계수 C_p 는 베츠법칙에 의하여 최대 0.593가 된다. 실제로 회전자에 걸리는 공기흐름은 이상적인 상태와는 달리 공기의 점성에 의한 운동량의 손실과 회전자 끝의 간섭흐름 및 회전자의 후류에 의한 영향 등에 의해 C_p 의 값은 회전자 및 운전상태에 따라 다르게 나타나며 통상 0.35에서 0.5정도의 값을 갖게 된다. 또한 풍력발전시스템의 경우 기계적인 에너지를 전달해 주는 전달장치의 효율 η_m 과 발전기의 효율 η_g 가 포함되어야 하므로 실제로 이용 가능한 전기적인 출력 P_e 는 식(2)와 같다.

$$P_e = \frac{1}{2} \rho C_p A v_w^3 \eta_m \eta_g = \frac{1}{2} \rho C_p A v_w^3 \eta \quad [W] \quad (2)$$

여기서, η_m : 에너지 전달장치의 효율

η_g : 발전기효율

$$\eta = \eta_m \eta_g$$

Fig. 1과 같은 일반적인 풍력발전시스템의 출력특성을 보면 시스템의 기계적 관성, 마찰 및 전기적 손실 등에 의해 시동풍속(v_{cut-in}) 이상에서 시스템의 출력이 생산되기 시작하고, 정격풍속(v_{rated})에서의 정격출력(P_{rated})은 풍속의 3제곱(v_w^3)에 비례하여 출력이 나타난다. 또한 정격풍속 이상의 풍속에서도 시스템의 출력이 일정하게 유지되며, 종단풍속($v_{cut-out}$)에서는 시스템을 보호하기 위해 출력을 멈추게 된다. 따라서 풍속자원은 변동성이 강한 에너지 자원이며 이를 활용한 풍력발전단지 출력은 풍속의 3제곱에 비례하는 변동성을 나타냄에 따라 이러한 변동성이 전력품질 및 계통안정성에 주요한 영향을 끼침을 알 수 있다.

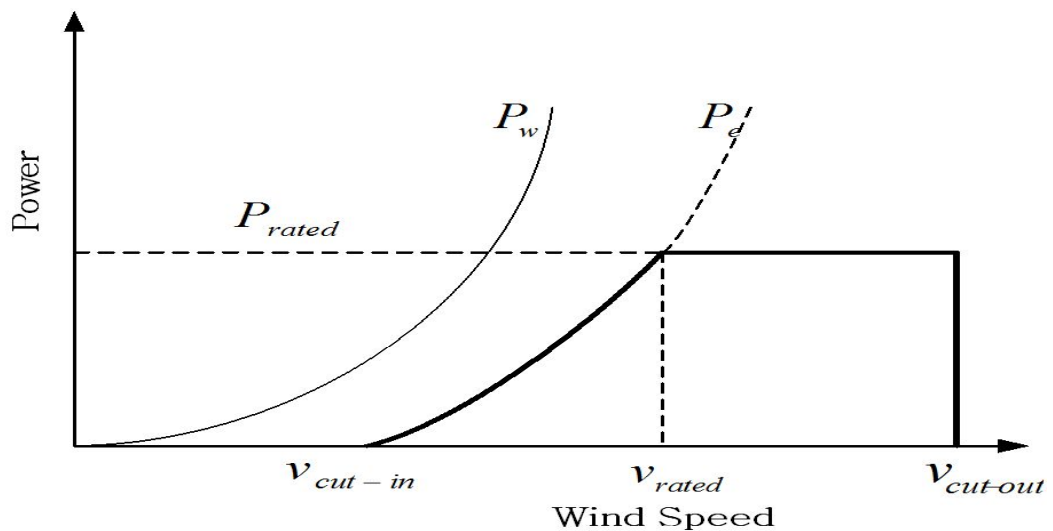


Fig. 1 Output characteristics of wind turbine generation system

2. 풍력발전 시스템의 전력품질과 계통 영향

1) 풍력발전 시스템에 의한 계통영향

(1) 연계점 전압변동

풍력발전기가 국부적으로 연계점 전압변동에 미치는 영향은 발전기 출력형태가 고정속도 방식 또는 가변속도 방식인지에 따라 크게 달라진다. 고정속도 발전시스템에 사용되는 농형유도기는 회전자 속도와 유효전력, 무효전력, 그리고 단자 전압 사이에 일정한 관계를 가지고 있으므로 단자전압의 임의적인 보상이 불가능하다. 그래서 필요한 만큼의 무효전력을 생산할 수 있는 가변 무효전력 소스가 필요하며 주로 커패시터 뱅크를 사용한다. 한편 가변속도 풍력발전기의 경우에는 무효전력의 양을 임의로 조절할 수 있어 단자 전압을 안정적으로 유지시킬 수 있다.

(2) 고조파 왜곡

고조파 왜곡에 관한 이슈는 주로 전력변환장치가 포함된 가변속 풍력발전시스템의 경우에 해당하는 것으로서 전력변환 회로의 스위칭 동작에 의해 발생하는 전압 및 전류의 고조파 성분이 문제가 된다. 하지만 전력변환기술의 발달에 따라 고속 스위칭 주파수 채용, 고성능 제어 알고리즘 채택, 필터 삽입 등의 방법으로 고조파 문제는 해결될 수 있다. 반면 농형유도기를 계통에 직접 연결하는 고정속도 방식의 풍력발전시스템에서는 고조파에 관한 문제는 없다.

(3) 플리커

전압 플리커 문제는 풍력발전기 자체의 고유특성과 밀접한 관련이 있으며 자주 문제를 일으킨다. 고정속도방식의 풍력발전기에서 풍속의 변동은 곧바로 발전기 출력전력의 변동으로 나타나게 된다. 기계적 입력과 전기적 출력 양자간의 차이를 보상해 줄 수 있는 완충장치가 없기 때문이다. 따라서 풍력발전기 출력이 연결된 계통의 수용능력에 따라 계통전압의 변동이 발생하며, 이에 의해서 전구의 밝기가 비이상적으로 출렁거리는 현상, 이른바 플리커 현상이 발생하게 된다.

일반적으로 가변속 풍력발전시스템에서는 회전자 관성이 일종의 에너지 버퍼역할을 하므로 급격한 풍속의 변동이 있더라도 발전기의 출력에 직접적으로 나타나지 않는다.

(4) 전력시스템 동특성과 안정도에 미치는 영향

고정속도 풍력발전기에 사용되는 농형 유도발전기는 사고 발생 시 바람으로부터 들어오는 기계적 파워와 계통으로 나가는 전기적 파워 사이에 심각한 차이가 발생하므로 빠르게 가속되고 전압이나 회전속도 측면에서 불안정한 상태에 이르게 된다. 전압이 회복되었을 때에도 발전기의 무효전력을 공급해 주어야 하기 때문에 전압 회복을 방해하는 요인이 된다. 동기발전기에서는 저전압인 상황에서 여자기 제어를 통해 무효전력을 발생하려고 노력하기 때문에 전압 회복을 돕는 입장인 반면에 유도발전기는 반대 현상이 나타나는 것이다. 물론 무효전력 보상을 위해 설치되어 있는 커패시터 뱅크의 연결 상태에 따라 과도현상은 크게 달라질 수 있다.

가변속도 풍력발전기의 경우에는 과전류에 대한 전력변환용 인버터의 민감도가 오히려 계통 입장에서는 안정도에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있다. 풍력발전기의 점유율이 상당히 높은 상황을 가정하면, 상대적으로 적은 양의 전압 변동에 풍력발전기가 너무 민감하게 반응하여 전력의 부족사태를 초래할 수 있다. 송전선로의 사고발생시 이러한 상황을 초래할 수 있으므로 이를 막기 위해서 관할지역에 많은 양의 풍력발전기로부터 전력을 공급받고 있는 전력회사 측에서는 풍력발전기의 계통연계 규정을 보완 및 수정하고 있다. 따라서 많은 용량의 풍력발전 전력이 한꺼번에 차단되는 것을 막기 위하여 풍력발전기가 어느 정도의 전압강하를 겪더라도 발전유지가 가능하도록 요구하고 있다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위하여 가변속 풍력발전기 제조사들은 풍력발전기가 계통전압 강하에 둔감하도록 수정, 보완하고 있다.

(5) 무효전력 및 전압제어

무효전력보상이나 전압제어의 측면에서 풍력발전기가 기존의 발전소에 비해 다른 점은 설치위치 선정에 관한 것으로 풍력발전기가 설치되는 위치가 외딴 곳, 해안가 등인 경우가 많아 계통이 상대적으로 약하고 전압제어를 수행하기에 적

절치 않을 수 있다. 즉 기존 발전소를 대신해서 대용량의 풍력발전단지를 외딴지역에 설치할 때 전압제어의 문제를 간과해서는 안 된다는 것이다.

(6) 주파수 제어 및 기존 발전시스템의 부하 추종 성능에 미치는 영향

풍력발전기가 주파수제어나 부하추종제어에 미치는 영향은 주로 바람이 일정하지 않고 제어가 불가능하기 때문이다. 상대적으로 긴 15분에서 60분 정도의 시간의 관점에서 풍속변동은 기존의 발전 유닛이 부하추종을 수행하는 데 상당한 영향을 미친다. 기존의 발전소에서 발전해야 하는 출력량은 부하요구량에 풍력발전 생산량을 제외한 요구량이므로 풍력발전량이 변동하는 만큼 기존발전기의 출력도 자주 조절되어야 하는 것이다.

여러 대의 발전기가 설치된 풍력발전단지의 통합 출력량은 일반적으로 1분 이내의 단시간의 관점에서 보면 부드럽게 평활되어 문제를 일으킬 가능성은 적다. 이러한 단시간 출력변동은 보통 난류에 의한 것으로 여러 대가 설치되더라도 발생 시점이 확률적으로 분포되기 때문이다. 하지만 강한 폭풍 등에 의해 약 25m/s의 발전 한계풍속이 넘는 경우 여러 대가 동시에 발전을 중단하는 상황이 일어날 수 있다.

2) 제주계통에서 풍력발전 출력변동에 의한 주파수 영향

제주계통에서 풍력발전 출력이 변동될 때 연계선이 주파수 모드로 운전된다면 제주계통 주파수 영향은 줄어들지만 만약 연계선이 동작되지 않는다면 많은 영향을 받을 것이다. 이러한 영향을 분석하기 위해 모든 연계선이 동작하지 않는 상황을 가정하여, 독립된 제주계통에서 부하 변동에 따른 주파수 변화를 분석할 필요가 있다. 독립계통 부하의 출력이 ΔP_{total} 만큼 변화하였을 때 주파수가 ΔF_{grid} 만큼 변화하였다면, 이 부하의 주파수특성정수 K 는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다[18].

$$K = \frac{\Delta P_{total}}{\Delta F_{grid}} \quad (3)$$

각 부하변동에 따른 제주계통의 주파수 분석을 Table 1에서 계산하여, 제주계통의 주파수 특성계수 K 를 구하여 보면 66.9MW/Hz가 된다. 식(3)을 이용하여 부하 출력 변화에 따른 전력 계통의 주파수 변동 ΔF_{grid} 을 유도하면 식(4)로 나타낼 수 있다. 여기서 ΔP_{total} 는 풍력단지 출력변동 또는 단지탈락에 의하여 제주계통에 연계된 발전기의 출력변동량을 나타낸다.

Table 1 Frequency characteristic constant caused by load change

| ΔP_{total} [MW] | ΔF_{grid} [Hz] | K [MW/Hz] |
|-------------------------|------------------------|-------------|
| 10 | 0.15 | 67.07 |
| 20 | 0.30 | 66.86 |
| 30 | 0.45 | 66.78 |
| Average | | 66.90 |

$$\Delta F_{grid} = \frac{\Delta P_{total}}{K} \quad (4)$$

Fig. 2는 Table 1의 타당성을 입증하기 위해 같은 조건으로 제주계통에 가변 부하를 10초에 10MW, 30초에 20MW, 50초에 30MW로 투입하였을 때 컴퓨터 해석을 통한 주파수 변화가 특성계수에 의해 변화되고 있음을 보이고 있다.

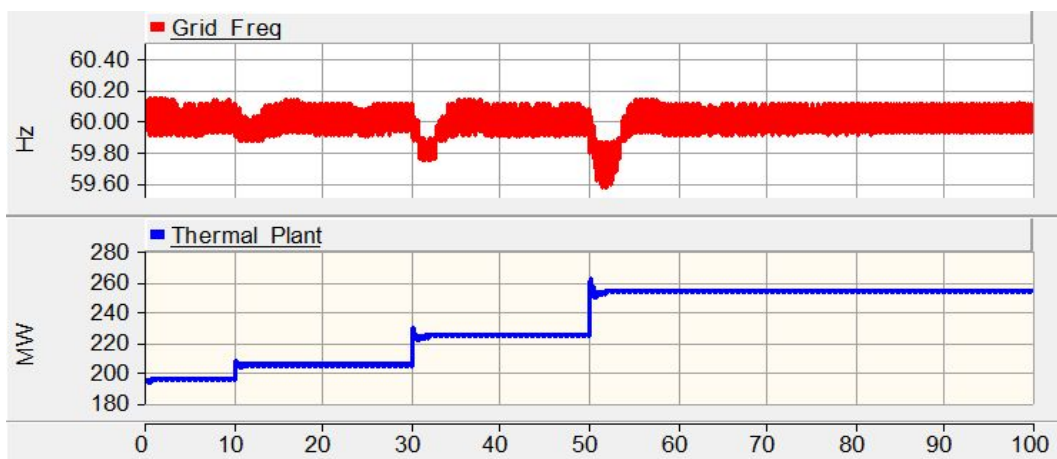


Fig. 2 Frequency variation according to load change

3. 제주 풍력발전단지별 출력변동 분석

제주지역은 우리나라에서 풍속자원이 가장 풍부하여 1970년대부터 대학과 연구소에서 활발한 연구와 투자가 이루어져 왔으며, 특히 Fig. 3에 나타난 것과 같이 제주 동부지역과 서부지역은 풍력발전단지를 조성하는데 아주 좋은 풍속자원을 갖고 있음을 나타내고 있다.

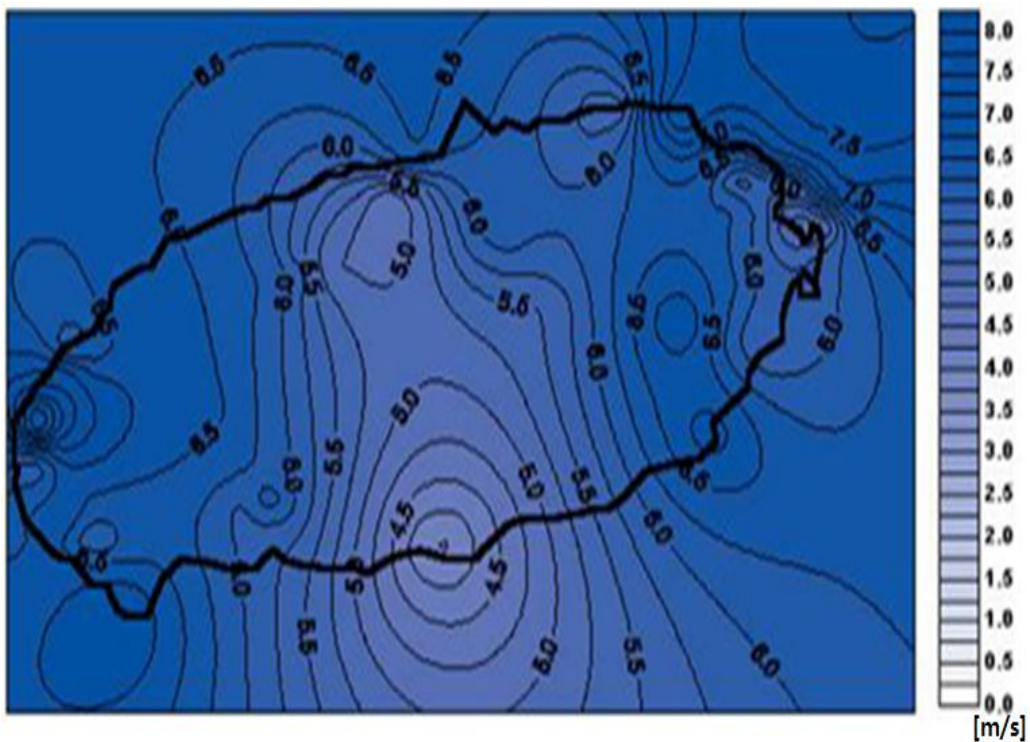


Fig. 3 Wind map of Jeju Island

2012년 12월 현재 행원을 중심으로 하는 동부지역에 약 81MW, 한경을 중심으로 하는 서부지역에 약 25MW, 총 106MW 용량의 설비가 구축되어 운전되고 있다. Table 2와 Fig. 4에서 나타난 것과 같이 현재 제주지역에 구축되어 있는 풍력발전단지는 주로 동부지역에 집중되어 있다.

Table 2 Wind farms in the Jeju Island in 2012

| Project | Site location | Number of units | Capacity |
|----------------|-----------------------------|-----------------|----------|
| Hangwon | Haengwon-ri, Gujwa-eup | 12 | 10.6MW |
| Sinchang | Sinchang-ri, Hangeong-myeon | 2 | 1.7MW |
| Woljeong | Woljeong-ri, Gujwa-eup | 1 | 1.5MW |
| Hangeong | Yongsu-ri, Hangeong-myeon | 9 | 21.0MW |
| Sungsan | Susan-ri, Seongsan-eup | 10 | 20.0MW |
| Samdal | Samdal-ri, Seongsan-eup | 11 | 33.0MW |
| Gasiri | Gasi-ri, Pyoseon-myeon | 13 | 15.0MW |
| Gimnyeong | Gimnyeong-ri, Gujwa-eup | 2 | 1.5MW |
| Wollyeong | Wollyeong-ri, Hallim-eup | 1 | 2.0MW |
| Total capacity | | 61 | 106.3MW |

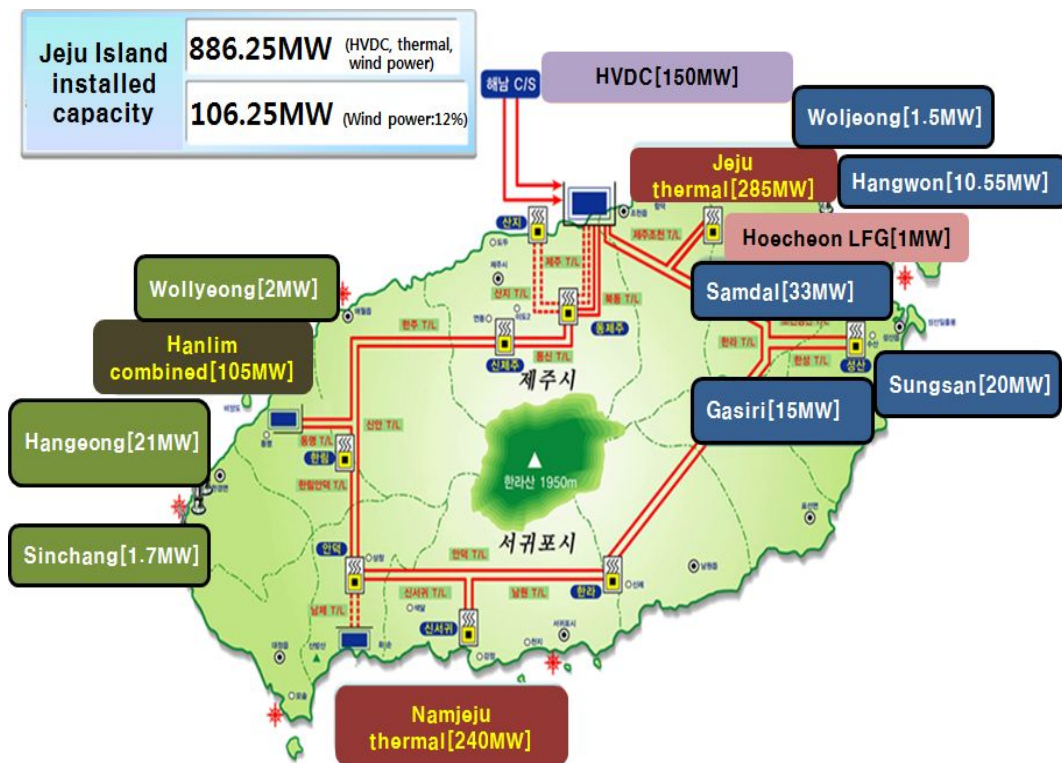


Fig. 4 Jeju power grid with wind farms

1) 행원풍력발전단지

(1) 행원풍력발전단지의 개요

행원풍력발전단지는 제주시 구좌읍 행원리 563번지의 바닷가 일대 5만 6900㎡ 부지에, 1995년 제주도청에서 '제주도지역에너지계획'을 수립하고 국비와 제주도 지방비를 투입하여 제주도가 갖는 우수한 풍속자원을 청정 대체 에너지로 개발하기 위한 풍력발전 실용화 사업에 착수했다. 1997년 600kW급 풍력발전기 2기 설치를 시작으로 1998년 8월부터 상업운전에 들어가 국내 최초로 풍력발전의 상업화에 성공을 이루었으며, 국비 156억, 도비 43억, 민자 4억 등 총 203억원을 들여 2003년 4월까지 600kW급 2기, 750kW급 5기, 660kW급 7기, 225kW급 1기 등 총 15기 10MW 규모의 풍력발전기가 Fig. 5와 같이 구성되어 전용선로에 의해 성산변전소로 연계되어 운전되었다[19]. 본 논문은 2009년 3월부터 2010년 2월까지 행원풍력발전단지의 출력데이터를 이용하여 해석하였다. 그러나 현재 2012년 말 기준 750kW급 5기, 660kW급 5기, 1.5MW(한진)급 1기, 2MW(Unison)급 1기 등 총 12기가 운전 중에 있다.

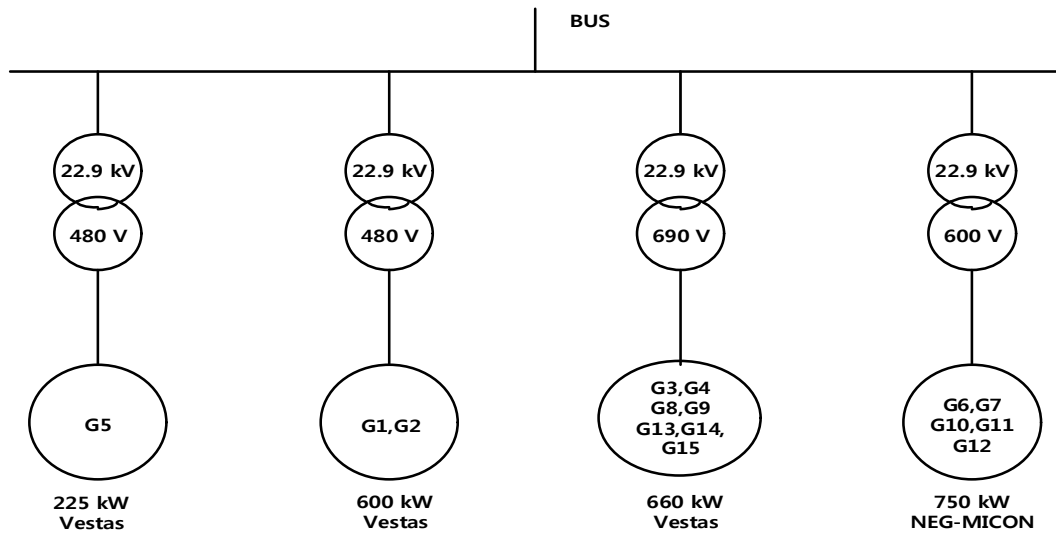


Fig. 5 Grid connection of the Haengwon wind farm

풍력발전 출력은 설치지역에 따른 풍속특성에 따라 출력이 변하기 때문에 출력을 정확하게 예측하는 것은 매우 어렵다. 그러므로 발전량은 매초, 매분, 매시간 변화하기 때문에 계통을 운영하는 입장에서는 하나의 큰 왜란 요소로 볼 수 있다. 이러한 큰 왜란 요소는 계통 전체에 영향을 미치게 되고 전압강하 혹은 주파수 변화 등에 의하여 전력계통의 전력품질이 저하될 뿐만 아니라 정전과 같은 큰 문제를 야기할 수가 있다. 이러한 사고를 막기 위해서는 풍력발전단지의 출력특성을 분석하여 계통에 끼치는 영향을 최소화 할 수 있는 방안을 모색하는 것이 필요하다.

(2) 행원풍력발전단지의 출력변동률 분석

가. 2초 단위 출력변동률 분석

2009년 3월부터 2010년 2월까지 2초 단위의 행원풍력발전단지 발전에 대한 출력변동률을 분석하였다. 출력변동률은 식(5)로 표현되며, 풍력발전량을 매 기준 시간 단위마다 측정하여 발전출력 변화량을 발전설비용량으로 나눈 것으로 출력변동률의 값이 0%에 가까울수록 변화폭이 적음을 나타내고 100%에 가까울수록 발전량이 급격히 변화한 것을 나타낸다.

$$\text{출력변동률} = \frac{\text{풍력발전출력 변화량}}{\text{풍력발전설비의 용량}} \times 100[\%] \quad (5)$$

일정기간 동안의 출력변동률 중에서 최대값이 발생하는 시점을 찾고 변화량의 정도를 파악하여 에너지저장시스템의 용량을 선정하는데 활용하게 되며, 2초, 1분, 10분, 30분의 시간 단위로 출력변동률을 분석하고자 한다.

Table 3과 Fig. 6은 해당기간 동안 2초 단위의 정격설비용량 대비 출력변동률에 대해 발생빈도분포를 나타낸 것이다. 여기서 보면 전체 출력의 97%가 ±1% 이내의 출력변동률을 보이고 있다.

Table 3 Probability distribution of the output power fluctuation every 2 seconds
in the Haengwon wind farm

| pu | Frequency | | pu | Frequency | |
|-------|--------------|-----------|------|--------------|-----------|
| | Sample[unit] | Sample[%] | | Sample[unit] | Sample[%] |
| -0.50 | 1 | 0 | 0.00 | 15,169,925 | 97 |
| -0.48 | 0 | 0 | 0.02 | 228,093 | 1 |
| -0.46 | 0 | 0 | 0.04 | 2,549 | 0 |
| -0.44 | 0 | 0 | 0.06 | 74 | 0 |
| -0.42 | 0 | 0 | 0.08 | 11 | 0 |
| -0.40 | 0 | 0 | 0.10 | 2 | 0 |
| -0.38 | 0 | 0 | 0.12 | 2 | 0 |
| -0.36 | 0 | 0 | 0.14 | 0 | 0 |
| -0.34 | 0 | 0 | 0.16 | 0 | 0 |
| -0.32 | 1 | 0 | 0.18 | 0 | 0 |
| -0.30 | 0 | 0 | 0.20 | 0 | 0 |
| -0.28 | 1 | 0 | 0.22 | 1 | 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 |
| -0.20 | 1 | 0 | 0.30 | 0 | 0 |
| -0.18 | 0 | 0 | 0.32 | 0 | 0 |
| -0.16 | 1 | 0 | 0.34 | 0 | 0 |
| -0.14 | 0 | 0 | 0.36 | 0 | 0 |
| -0.12 | 4 | 0 | 0.38 | 0 | 0 |
| -0.10 | 2 | 0 | 0.40 | 0 | 0 |
| -0.08 | 12 | 0 | 0.42 | 0 | 0 |
| -0.06 | 48 | 0 | 0.44 | 0 | 0 |
| -0.04 | 1,562 | 0 | 0.46 | 0 | 0 |
| -0.02 | 216,183 | 1 | 0.48 | 0 | 0 |
| | | | 0.50 | 1 | 0 |

Table 4에서 나타난 것과 같이 2009년 3월부터 2010년 2월까지의 2초 단위 출력변동률에서 $\pm 20\%$ 가 넘는 사례가 7건을 기록하고 있으며, 해당 년도 동안 최대 출력변동률이 발생한 시각은 2010년 1월 21일 12시 20분 36초 때였으며, 이때의 출력변동률은 -64% 이며 변동량은 6.44MW로 나타났다. 만약 2초 변동에 대비한 에너지저장시스템을 설치한다면 총 설비용량 대비 약 65%까지 고려해야 할 것으로 판단된다.

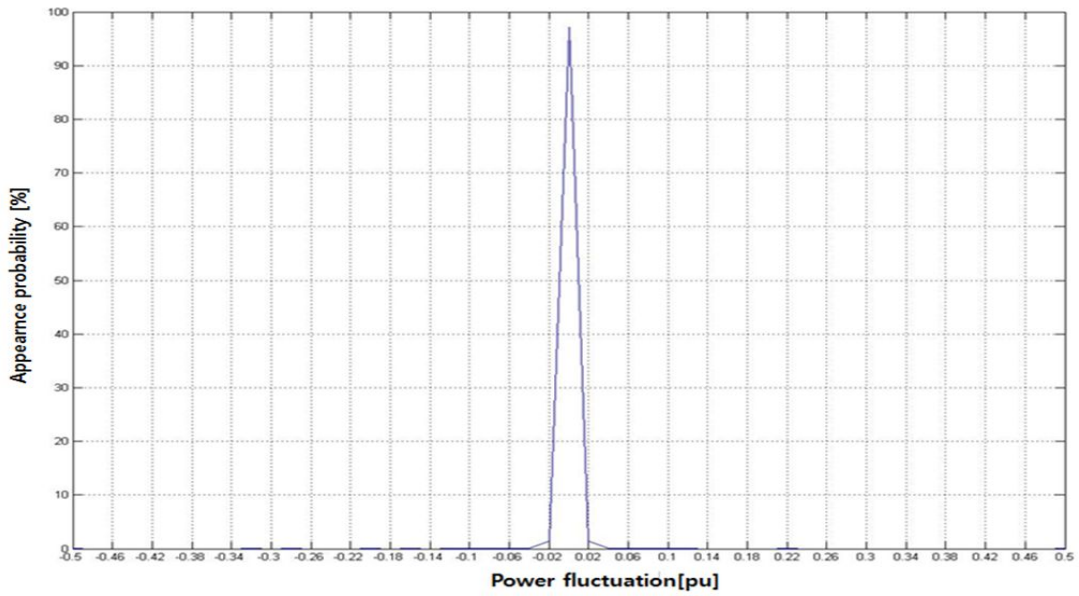


Fig. 6 Probability distribution curve of the power fluctuation every 2 seconds in the Haengwon wind farm

Table 4 Maximum power fluctuation every 2 seconds in the Haengwon wind farm

| Date | Time | Power production [MW] | Power fluctuation [MW] | Fluctuation rate [%] |
|------------|----------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| 2010.01.21 | 12:20:36 | 6.49 | -6.44 | -64 |
| 2009.06.02 | 12:57:00 | 5.42 | -3.38 | -34 |
| 2009.07.25 | 13:02:06 | 2.55 | -2.52 | -25 |
| 2010.01.26 | 13:38:44 | 2.24 | -2.24 | -22 |
| 2009.08.09 | 19:03:18 | 3.38 | -2.23 | -22 |
| 2010.02.19 | 05:22:16 | 6.76 | -1.90 | -19 |
| 2009.07.17 | 20:58:54 | 3.58 | -1.78 | -18 |
| 2009.12.31 | 11:58:14 | 7.27 | -1.66 | -17 |
| 2009.07.24 | 10:15:28 | 3.03 | -1.63 | -16 |
| 2009.05.20 | 21:25:40 | 4.73 | -1.50 | -15 |
| 2009.07.25 | 13:02:00 | 0.07 | 2.48 | 25 |
| 2009.12.31 | 11:58:10 | 4.98 | 2.28 | 23 |
| 2009.11.01 | 03:08:14 | 2.60 | 1.75 | 18 |
| 2009.11.12 | 09:12:32 | 6.16 | 1.75 | 18 |
| 2010.01.04 | 20:03:08 | 2.68 | 1.63 | 16 |
| 2010.01.21 | 12:36:52 | 2.54 | 1.56 | 16 |
| 2010.01.13 | 10:09:16 | 5.20 | 1.45 | 14 |
| 2009.06.20 | 20:00:06 | 3.09 | 1.41 | 14 |
| 2009.12.27 | 13:38:38 | 5.93 | 1.38 | 14 |
| 2010.01.12 | 16:28:08 | 6.04 | 1.36 | 14 |

나. 1분 단위 출력변동률

2009년 3월부터 2010년 2월까지 1분 단위의 행원풍력발전단지 발전에 대한 출력변동률을 분석하였으며, Table 5와 Fig. 7은 해당기간의 1분 단위의 정격설비용량 대비 출력변동률에 대한 발생빈도분포를 나타낸 것이다. 여기서 보면 전체 출력의 94%가 $\pm 1\%$ 이내의 출력변동률을 보이고 있다.

Table 5 Probability distribution of the output power fluctuation every 1 minute in the Haengwon wind farm

| pu | Frequency | | pu | Frequency | |
|-------|--------------|-----------|------|--------------|-----------|
| | Sample[unit] | Sample[%] | | Sample[unit] | Sample[%] |
| -0.50 | 0 | 0 | 0.00 | 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 |
| -0.40 | 0 | 0 | 0.10 | 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 |
| -0.30 | 0 | 0 | 0.20 | 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 |
| -0.20 | 0 | 0 | 0.30 | 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 |
| -0.10 | 8 | 0 | 0.40 | 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 |
| | | | 0.50 | 0 | 0 |

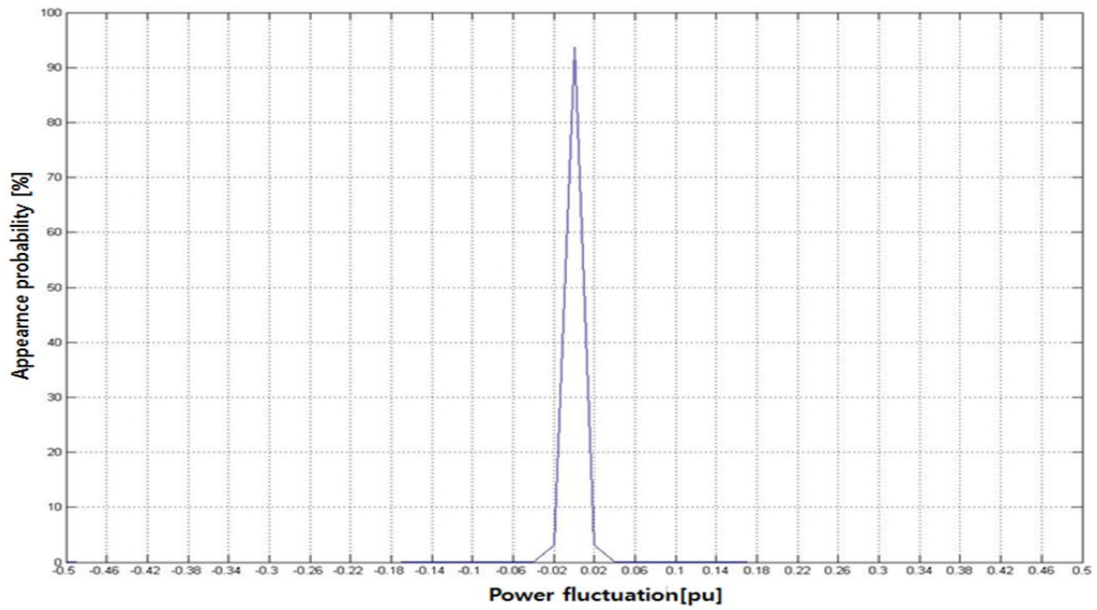


Fig. 7 Probability distribution curve of the power fluctuation every 1 minute in the Haengwon wind farm

Table 6 Maximum power fluctuation every 1 minute in the Haengwon wind farm

| Data | Time | Power production [MW] | Power fluctuation [MW] | Fluctuation rate [%] |
|------------|----------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| 2010.01.21 | 12:20:14 | 6.71 | -6.66 | -67 |
| 2009.06.02 | 12:56:54 | 5.50 | -3.74 | -37 |
| 2009.12.15 | 06:55:18 | 5.43 | -3.21 | -32 |
| 2010.02.25 | 11:45:54 | 5.58 | -2.71 | -27 |
| 2010.02.13 | 09:09:00 | 6.89 | -2.64 | -26 |
| 2009.07.07 | 09:05:02 | 5.58 | -2.60 | -26 |
| 2009.05.20 | 21:24:58 | 5.40 | -2.60 | -26 |
| 2009.11.30 | 08:34:32 | 6.80 | -2.60 | -26 |
| 2010.02.04 | 03:49:46 | 6.21 | -2.58 | -26 |
| 2010.02.03 | 14:59:24 | 6.38 | -2.56 | -26 |
| 2010.01.12 | 18:53:00 | 3.24 | 3.88 | 39 |
| 2010.01.21 | 12:36:34 | 2.46 | 3.26 | 33 |
| 2010.02.13 | 16:33:00 | 3.78 | 3.16 | 32 |
| 2010.02.18 | 00:52:24 | 2.09 | 3.13 | 31 |
| 2010.02.19 | 16:47:24 | 4.13 | 3.06 | 31 |
| 2009.06.02 | 19:32:48 | 2.51 | 3.03 | 30 |
| 2010.02.25 | 05:57:16 | 3.92 | 3.00 | 30 |
| 2010.01.08 | 19:03:28 | 3.79 | 2.91 | 29 |
| 2010.02.12 | 23:26:30 | 4.29 | 2.83 | 28 |
| 2010.02.03 | 15:52:08 | 4.03 | 2.77 | 28 |

Table 6에는 2009년 3월부터 2010년 2월까지 1분 단위 출력변동률이 $\pm 30\%$ 가 넘는 사례가 10건을 기록하였다. 최대 출력변동률이 발생한 시각은 2010년 1월 21일 12시였으며, 이때의 출력변동률은 66%이며 변동량은 -6.66MW로 나타났다.

다. 10분 단위 출력변동률

10분 단위의 풍력발전량에 대한 출력변동률을 분석하였는데, Table 7과 Fig. 8은 정격설비용량 대비 변동량에 대하여 발생빈도분포를 나타내고 있다. 해당기간에는 전체 출력의 97%가 $\pm 3\%$ 이내의 출력변동률을 보이고 있다.

Table 7 Probability distribution of wind power fluctuation every 10 minutes in the Haengwon wind farm

| pu | Frequency | | pu | Frequency | |
|-------|--------------|-----------|------|--------------|-----------|
| | Sample[unit] | Sample[%] | | Sample[unit] | Sample[%] |
| -0.50 | 0 | 0 | 0.00 | 12630360 | 81 |
| -0.48 | 0 | 0 | 0.02 | 1254986 | 8 |
| -0.46 | 0 | 0 | 0.04 | 181462 | 1 |
| -0.44 | 0 | 0 | 0.06 | 34492 | 0 |
| -0.42 | 0 | 0 | 0.08 | 5845 | 0 |
| -0.40 | 0 | 0 | 0.10 | 993 | 0 |
| -0.38 | 0 | 0 | 0.12 | 204 | 0 |
| -0.36 | 0 | 0 | 0.14 | 76 | 0 |
| -0.34 | 0 | 0 | 0.16 | 11 | 0 |
| -0.32 | 0 | 0 | 0.18 | 0 | 0 |
| -0.30 | 0 | 0 | 0.20 | 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 |
| -0.20 | 0 | 0 | 0.30 | 0 | 0 |
| -0.18 | 11 | 0 | 0.32 | 0 | 0 |
| -0.16 | 12 | 0 | 0.34 | 0 | 0 |
| -0.14 | 54 | 0 | 0.36 | 0 | 0 |
| -0.12 | 113 | 0 | 0.38 | 0 | 0 |
| -0.10 | 823 | 0 | 0.40 | 0 | 0 |
| -0.08 | 4987 | 0 | 0.42 | 0 | 0 |
| -0.06 | 31207 | 0 | 0.44 | 0 | 0 |
| -0.04 | 183037 | 1 | 0.46 | 0 | 0 |
| -0.02 | 1289202 | 8 | 0.48 | 0 | 0 |
| | | | 0.50 | 0 | 0 |

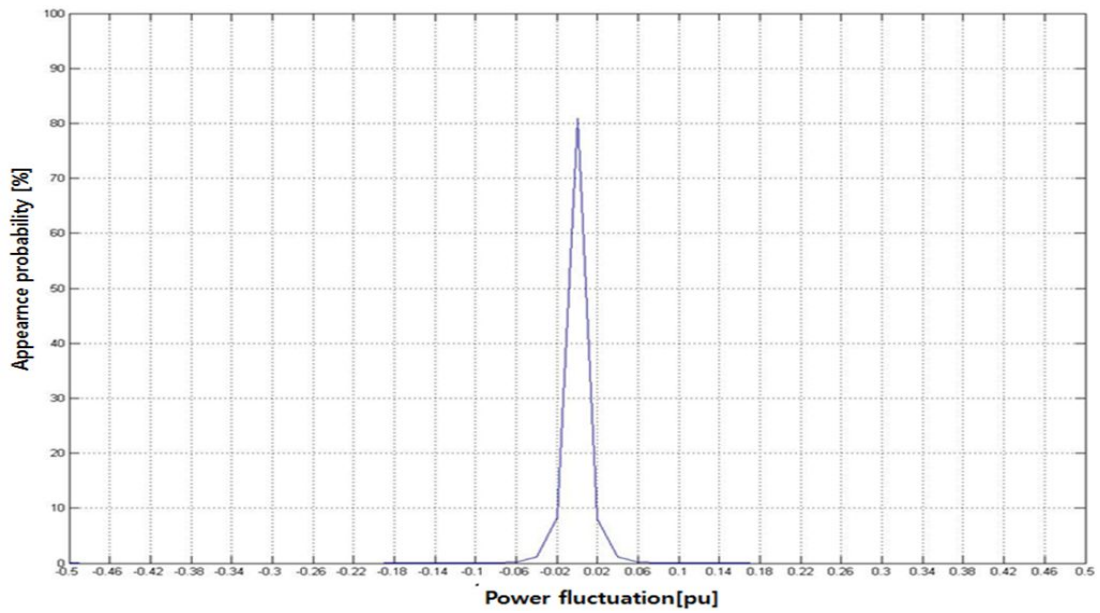


Fig. 8 Probability distribution curve of the power fluctuation every 10 minutes in the Haengwon wind farm

Table 8 Maximum power fluctuation every 10 minutes in the Haengwon wind farm

| Date | Time | Power production [MW] | Power fluctuation [MW] | Fluctuation rate [%] |
|------------|----------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| 2010.01.21 | 12:20:14 | 6.71 | -6.70 | -67 |
| 2010.02.19 | 13:33:44 | 7.60 | -6.16 | -62 |
| 2009.06.30 | 20:06:14 | 6.05 | -6.04 | -60 |
| 2009.12.17 | 03:46:30 | 6.32 | -5.51 | -55 |
| 2010.01.12 | 23:11:30 | 6.10 | -5.41 | -54 |
| 2009.07.28 | 21:08:58 | 5.67 | -5.29 | -53 |
| 2009.12.15 | 06:50:22 | 6.79 | -5.07 | -51 |
| 2010.02.13 | 05:59:30 | 7.32 | -5.05 | -51 |
| 2010.02.03 | 16:27:30 | 7.10 | -4.98 | -50 |
| 2010.02.18 | 00:27:28 | 7.38 | -4.93 | -49 |
| 2010.02.18 | 00:50:38 | 0.76 | 7.82 | 78 |
| 2010.01.12 | 20:49:44 | 0.49 | 6.66 | 67 |
| 2009.12.30 | 03:35:00 | 0.36 | 5.96 | 60 |
| 2009.10.17 | 03:43:08 | 0.02 | 5.90 | 59 |
| 2009.12.17 | 03:35:46 | 0.77 | 5.86 | 59 |
| 2010.01.21 | 12:28:30 | 0.01 | 5.84 | 58 |
| 2009.06.30 | 19:57:46 | 0.41 | 5.68 | 57 |
| 2010.02.19 | 11:06:04 | 0.80 | 5.51 | 55 |
| 2010.01.08 | 18:58:38 | 1.30 | 5.51 | 55 |
| 2010.02.13 | 06:07:54 | 2.27 | 5.06 | 51 |

Table 8에서 해당 연도에 최대출력변동률이 $\pm 50\%$ 가 넘는 사례가 18건을 기록하였으며, 최대 출력변동률이 발생한 시각은 2010년 2월 18일 0시였으며, 이때의 출력변동률은 78%이며 변동량은 7.81MW로 나타났다.

라. 30분 단위 출력변동률

30분 단위의 출력변동률은 2009년 3월부터 2010년 2월까지 분석하였다. Table 9와 Table 10 그리고 Fig. 9는 해당기간의 30분 단위의 정격설비용량 대비 변동량에 대하여 발생빈도분포를 나타낸 것이다. 해당기간에는 전체 출력의 94%가 $\pm 3\%$ 이내의 출력변동률을 보이고 있다.

Table 9 Probability distribution of wind power fluctuation every 30 minutes in the Haengwon wind farm

| pu | Frequency | | pu | Frequency | |
|-------|--------------|-----------|------|--------------|-----------|
| | Sample[unit] | Sample[%] | | Sample[unit] | Sample[%] |
| -0.50 | 0 | 0 | 0.00 | 11628436 | 74 |
| -0.48 | 0 | 0 | 0.02 | 1585303 | 10 |
| -0.46 | 0 | 0 | 0.04 | 289568 | 2 |
| -0.44 | 0 | 0 | 0.06 | 67366 | 0 |
| -0.42 | 0 | 0 | 0.08 | 17057 | 0 |
| -0.4 | 0 | 0 | 0.10 | 4439 | 0 |
| -0.38 | 0 | 0 | 0.12 | 1629 | 0 |
| -0.36 | 0 | 0 | 0.14 | 574 | 0 |
| -0.34 | 0 | 0 | 0.16 | 571 | 0 |
| -0.32 | 0 | 0 | 0.18 | 54 | 0 |
| -0.30 | 0 | 0 | 0.20 | 7 | 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 |
| -0.20 | 0 | 0 | 0.30 | 0 | 0 |
| -0.18 | 43 | 0 | 0.32 | 0 | 0 |
| -0.16 | 259 | 0 | 0.34 | 0 | 0 |
| -0.14 | 592 | 0 | 0.36 | 0 | 0 |
| -0.12 | 1762 | 0 | 0.38 | 0 | 0 |
| -0.10 | 4336 | 0 | 0.40 | 0 | 0 |
| -0.08 | 15827 | 0 | 0.42 | 0 | 0 |
| -0.06 | 66512 | 0 | 0.44 | 0 | 0 |
| -0.04 | 302262 | 2 | 0.46 | 0 | 0 |
| -0.02 | 1630078 | 10 | 0.48 | 0 | 0 |
| | | | 0.50 | 0 | 0 |

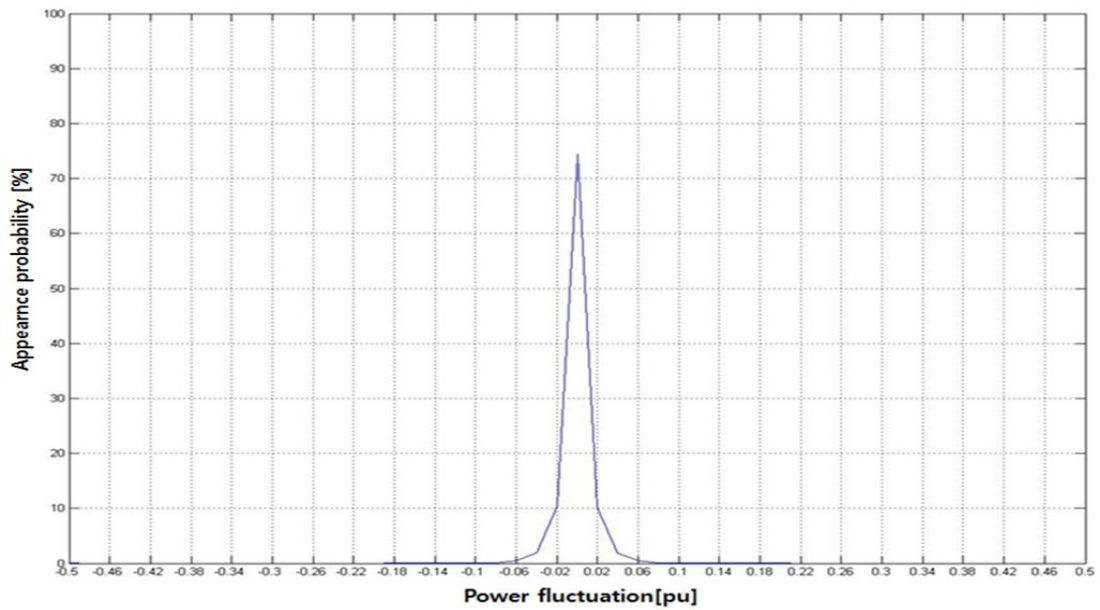


Fig. 9 Probability distribution curve of the power fluctuation every 30 minutes in the Haengwon wind farm

Table 10 Maximum power fluctuation every 30 minutes in the Haengwon wind farm

| Date | Time | Power production [MW] | Power fluctuation [MW] | Fluctuation rate [%] |
|------------|----------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| 2010.01.12 | 20:26:00 | 8.04 | -7.55 | -76 |
| 2010.02.18 | 00:24:18 | 8.23 | -7.47 | -75 |
| 2010.01.21 | 12:20:14 | 6.71 | -6.70 | -67 |
| 2009.12.15 | 06:44:18 | 8.22 | -6.50 | -65 |
| 2010.02.19 | 13:33:44 | 7.60 | -6.16 | -62 |
| 2009.06.30 | 20:04:44 | 6.09 | -6.08 | -61 |
| 2009.07.28 | 21:06:10 | 6.02 | -6.01 | -60 |
| 2009.12.17 | 03:42:18 | 6.63 | -5.89 | -59 |
| 2010.01.08 | 18:42:46 | 7.14 | -5.84 | -59 |
| 2010.02.01 | 14:10:46 | 6.58 | -5.82 | -58 |
| 2010.02.18 | 00:50:38 | 0.76 | 7.82 | 78 |
| 2010.01.04 | 11:03:08 | 0.45 | 7.28 | 73 |
| 2009.12.11 | 03:17:00 | 0.15 | 7.12 | 71 |
| 2010.01.12 | 20:49:02 | 0.49 | 6.66 | 67 |
| 2010.02.19 | 11:06:04 | 0.80 | 6.43 | 64 |
| 2010.02.25 | 05:45:26 | 1.13 | 6.25 | 63 |
| 2009.07.07 | 04:25:52 | 0.78 | 6.18 | 62 |
| 2010.01.21 | 11:41:00 | 0.01 | 6.05 | 61 |
| 2009.12.03 | 07:30:12 | 1.76 | 6.04 | 60 |
| 2009.12.30 | 03:16:28 | 0.30 | 6.02 | 60 |

2) 한경풍력발전단지

(1) 한경풍력발전단지의 개요

제주시 한경면에 위치한 한경풍력발전단지는 한국남부발전이 운영하고 있으며 1단계 사업에서 opti 슬립 타입 1.5MW 4기 총 6MW가 2004년 2월 준공되었고, 2단계 사업에서는 DFIG 타입 V90 3MW 5기 총 15MW가 2007년 12월 준공되어 총 21 MW 용량의 설비가 구축되어 상업운전을 하고 있다. 한경풍력발전단지의 계통연계는 Fig. 10과 같이 22.9kV의 가공지선을 통하여 한림변전소에 연계하도록 되어 있으며, opti 슬립에 의한 방식과 역률을 1로 제어하는 DFIG 타입이 혼재되어 운전하고 있어 발전단지 출력에 대한 역률은 높을 것이라 기대된다.

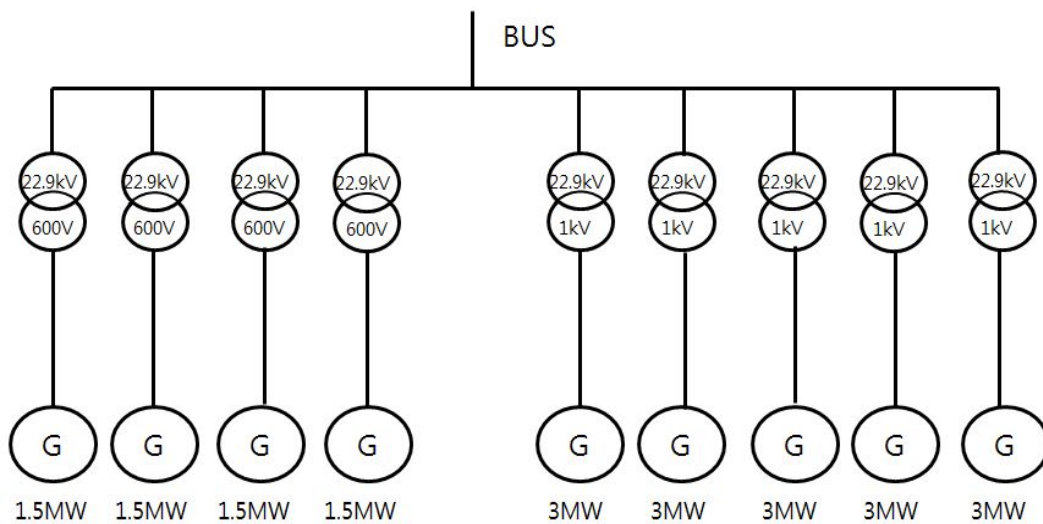


Fig. 10 Grid connection of the Hangeong wind farm

(2) 한경풍력발전단지의 출력변동률 분석

가. 2초 단위 출력변동률 분석

2009년 3월부터 2010년 2월까지 2초 단위의 한경풍력발전단지 발전에 대한 출력 변동률을 분석하였으며, Table 11과 Fig. 11은 해당기간의 2초 단위의 정격설비용량 대비 출력변동량에 대한 발생빈도분포를 나타낸 것이다. 여기서 보면 전체

출력의 97%가 $\pm 3\%$ 이내의 출력변동률을 보이고 있다.

Table 11 Probability distribution of wind power fluctuation every 2 seconds in the Hangeong wind farm

| pu | Frequency | | pu | Frequency | |
|-------|--------------|-----------|------|--------------|-----------|
| | Sample[unit] | Sample[%] | | Sample[unit] | Sample[%] |
| -0.50 | 6 | 0 | 0.00 | 12,930,240 | 87 |
| -0.48 | 0 | 0 | 0.02 | 790,572 | 5 |
| -0.46 | 1 | 0 | 0.04 | 112,975 | 1 |
| -0.44 | 0 | 0 | 0.06 | 17,404 | 0 |
| -0.42 | 0 | 0 | 0.08 | 2,550 | 0 |
| -0.4 | 0 | 0 | 0.10 | 337 | 0 |
| -0.38 | 0 | 0 | 0.12 | 58 | 0 |
| -0.36 | 0 | 0 | 0.14 | 7 | 0 |
| -0.34 | 1 | 0 | 0.16 | 0 | 0 |
| -0.32 | 1 | 0 | 0.18 | 1 | 0 |
| -0.30 | 1 | 0 | 0.20 | 1 | 0 |
| -0.28 | 0 | 0 | 0.22 | 0 | 0 |
| -0.26 | 2 | 0 | 0.24 | 0 | 0 |
| -0.24 | 1 | 0 | 0.26 | 0 | 0 |
| -0.22 | 1 | 0 | 0.28 | 0 | 0 |
| -0.20 | 0 | 0 | 0.30 | 0 | 0 |
| -0.18 | 2 | 0 | 0.32 | 1 | 0 |
| -0.16 | 11 | 0 | 0.34 | 1 | 0 |
| -0.14 | 34 | 0 | 0.36 | 0 | 0 |
| -0.12 | 72 | 0 | 0.38 | 0 | 0 |
| -0.10 | 320 | 0 | 0.40 | 0 | 0 |
| -0.08 | 2,074 | 0 | 0.42 | 0 | 0 |
| -0.06 | 14,998 | 0 | 0.44 | 0 | 0 |
| -0.04 | 107,338 | 1 | 0.46 | 1 | 0 |
| -0.02 | 807,005 | 5 | 0.48 | 0 | 0 |
| | | | 0.50 | 4 | 0 |

Table 12에서 나타난 것과 같이 2009년 3월부터 2010년 2월까지의 2초 단위 출력변동률에서 $\pm 20\%$ 가 넘는 사례가 13건을 기록하고 있으며, 해당 연도 동안 최대 출력변동률이 발생한 시각은 2010년 2월 7일 5시였으며, 이때의 출력변동률은 64%이며 변동량은 13.4MW로 나타났다. 만약 2초 변동에 대비한 에너지저장시스템을 설치한다면 총 설비용량대비 약 64%까지 고려해야 할 것으로 판단된다.

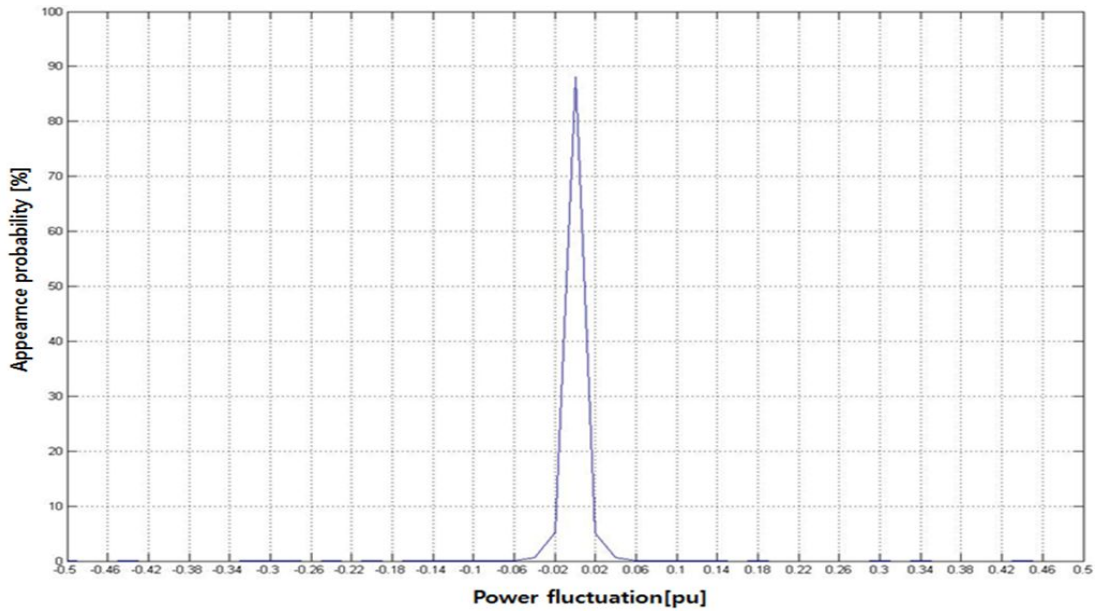


Fig. 11 Probability distribution curve of the power fluctuation every 2 seconds in the Hangeong wind farm

Table 12 Maximum power fluctuation every 2 seconds in the Hangeong wind farm

| Date | Time | Power production [MW] | Power fluctuation [MW] | Fluctuation rate [%] |
|------------|----------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| 2009.11.20 | 23:59:54 | 13.83 | -13.26 | -63 |
| 2010.01.13 | 00:10:36 | 12.82 | -12.16 | -58 |
| 2009.08.27 | 15:38:30 | 12.16 | -11.49 | -55 |
| 2009.03.20 | 03:22:54 | 17.84 | -11.08 | -53 |
| 2010.02.27 | 23:59:54 | 11.71 | -11.07 | -53 |
| 2010.02.01 | 05:56:04 | 14.44 | -10.48 | -50 |
| 2009.04.20 | 10:12:54 | 6.89 | -6.20 | -30 |
| 2009.10.07 | 10:04:46 | 13.98 | -6.02 | -29 |
| 2009.10.17 | 03:24:02 | 9.54 | -5.20 | -25 |
| 2009.12.06 | 13:23:36 | 8.03 | -5.07 | -24 |
| 2010.02.07 | 05:42:10 | 3.63 | 13.44 | 64 |
| 2010.01.14 | 23:59:54 | 4.52 | 9.22 | 44 |
| 2010.01.16 | 23:59:54 | 4.94 | 6.46 | 31 |
| 2009.04.04 | 14:33:14 | 4.30 | 3.84 | 18 |
| 2010.02.19 | 05:22:16 | 9.07 | 3.64 | 17 |
| 2009.11.25 | 12:42:12 | 1.22 | 2.84 | 14 |
| 2009.12.26 | 21:56:10 | 10.32 | 2.78 | 13 |
| 2009.03.12 | 15:50:02 | 12.04 | 2.67 | 13 |
| 2009.03.18 | 13:08:16 | 12.55 | 2.67 | 13 |
| 2009.05.28 | 03:57:38 | 5.48 | 2.63 | 13 |

나. 1분 단위 출력변동률

Table 13과 Fig. 12는 해당기간의 1분 단위의 정격설비용량 대비 출력변동량에 대한 발생빈도분포를 나타낸 것이다. 여기서 보면 전체 출력의 95%가 $\pm 5\%$ 이내의 출력변동률을 보이고 있다.

Table 14에는 1분 단위 출력변동률이 $\pm 30\%$ 가 넘는 사례가 20건 기록되었다. 최대 출력변동률이 발생한 시각은 2010년 2월 7일 5시이며, 이때의 출력변동률은 70%이고 변동량은 14.7MW로 나타났다. 이에 따라 최대 출력변동률에 대비하여 1분 단위 출력변동률은 설비용량대비 약 70%까지 고려해야 할 것으로 판단된다.

Table 13 Probability distribution of wind power fluctuation every 1 minute in the Hangeong wind farm

| pu | Frequency | | pu | Frequency | |
|-------|--------------|-----------|------|--------------|-----------|
| | Sample[unit] | Sample[%] | | Sample[unit] | Sample[%] |
| -0.50 | 0 | 0 | 0.00 | 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 | 0.10 | 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 |
| -0.30 | 4 | 0 | 0.20 | 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 |
| -0.20 | 7 | 0 | 0.30 | 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 |
| -0.10 | 602 | 0 | 0.40 | 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 |
| | | | 0.50 | 2 | 0 |

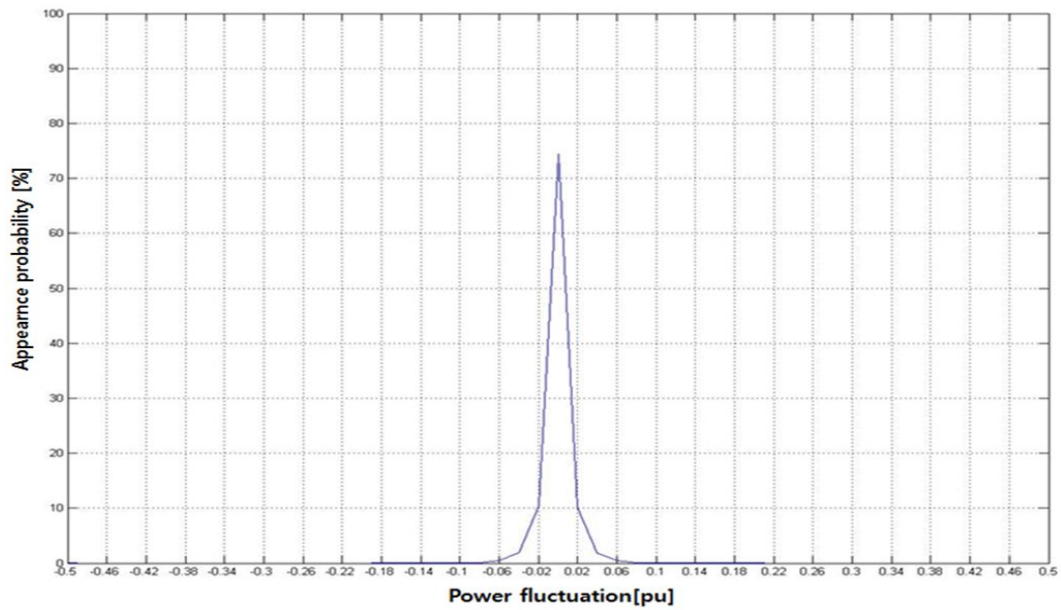


Fig. 12 Probability distribution curve of the power fluctuation every 1 minute in the Hangeong wind farm

Table 14 Maximum power fluctuation every 1 minute in the Hangeong wind farm

| Date | Time | Power production [MW] | Power fluctuation [MW] | Fluctuation rate [%] |
|------------|----------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| 2010.01.13 | 00:10:10 | 13.42 | -12.76 | -61 |
| 2009.10.17 | 03:23:32 | 14.37 | -11.90 | -57 |
| 2009.08.27 | 15:38:04 | 12.36 | -11.72 | -56 |
| 2009.03.20 | 03:22:32 | 17.90 | -11.57 | -55 |
| 2010.02.01 | 05:55:28 | 14.80 | -10.84 | -52 |
| 2010.02.10 | 10:20:28 | 14.13 | -9.30 | -44 |
| 2009.12.31 | 05:46:12 | 16.30 | -7.27 | -35 |
| 2010.01.12 | 17:54:46 | 14.43 | -6.88 | -33 |
| 2009.12.19 | 02:53:06 | 14.21 | -6.77 | -32 |
| 2009.12.18 | 22:08:28 | 16.63 | -6.70 | -32 |
| 2010.02.07 | 05:41:24 | 2.46 | 14.69 | 70 |
| 2009.10.17 | 03:28:04 | 3.40 | 11.67 | 56 |
| 2010.02.10 | 10:14:40 | 6.91 | 8.81 | 42 |
| 2009.11.14 | 23:24:08 | 8.95 | 8.62 | 41 |
| 2010.01.13 | 15:52:08 | 7.25 | 8.47 | 40 |
| 2010.01.14 | 05:49:44 | 2.84 | 8.03 | 38 |
| 2009.12.17 | 07:39:44 | 6.61 | 8.01 | 38 |
| 2010.02.06 | 03:16:32 | 2.61 | 7.61 | 36 |
| 2009.12.18 | 08:27:20 | 6.17 | 7.32 | 35 |
| 2009.11.21 | 06:25:04 | 8.65 | 7.19 | 34 |

다. 10분 단위 출력변동률

2009년 2월부터 2010년 2월까지 10분 단위의 풍력발전량에 대한 출력변동률을 분석하였으며 Table 15와 Fig. 13은 정격설비용량 대비 변동량에 대하여 발생빈도분포를 나타낸 것이며, 전체 출력의 97%가 $\pm 7\%$ 이내의 출력변동률을 보이고 있다. Table 16에는 10분 단위 출력변동률이 $\pm 50\%$ 가 넘는 사례가 20건을 기록하였으며, 최대 출력변동률이 발생한 시각은 2010년 2월 7일 5시 36분 32초 이다. 이때의 출력변동률은 75%이며 변동량은 15.8MW로 나타났다.

Table 15 Probability distribution of wind power fluctuation every 10 minutes in the Hangeong wind farm

| pu | Frequency | | pu | Frequency | |
|-------|--------------|-----------|------|--------------|-----------|
| | Sample[unit] | Sample[%] | | Sample[unit] | Sample[%] |
| -0.50 | 0 | 0 | 0.00 | 8,769,078 | 59 |
| -0.48 | 0 | 0 | 0.02 | 1,757,203 | 12 |
| -0.46 | 0 | 0 | 0.04 | 624,232 | 4 |
| -0.44 | 0 | 0 | 0.06 | 290,381 | 2 |
| -0.42 | 6 | 0 | 0.08 | 141,189 | 1 |
| -0.4 | 11 | 0 | 0.10 | 68,798 | 0 |
| -0.38 | 13 | 0 | 0.12 | 34,394 | 0 |
| -0.36 | 23 | 0 | 0.14 | 17,398 | 0 |
| -0.34 | 44 | 0 | 0.16 | 8,545 | 0 |
| -0.32 | 37 | 0 | 0.18 | 4,482 | 0 |
| -0.30 | 63 | 0 | 0.20 | 2,419 | 0 |
| -0.28 | 78 | 0 | 0.22 | 1,184 | 0 |
| -0.26 | 182 | 0 | 0.24 | 735 | 0 |
| -0.24 | 439 | 0 | 0.26 | 359 | 0 |
| -0.22 | 730 | 0 | 0.28 | 215 | 0 |
| -0.20 | 1,388 | 0 | 0.30 | 179 | 0 |
| -0.18 | 2,788 | 0 | 0.32 | 96 | 0 |
| -0.16 | 6,233 | 0 | 0.34 | 37 | 0 |
| -0.14 | 13,247 | 0 | 0.36 | 24 | 0 |
| -0.12 | 28,780 | 0 | 0.38 | 13 | 0 |
| -0.10 | 62,311 | 0 | 0.40 | 7 | 0 |
| -0.08 | 135,782 | 1 | 0.42 | 7 | 0 |
| -0.06 | 297,908 | 2 | 0.44 | 1 | 0 |
| -0.04 | 675,763 | 5 | 0.46 | 0 | 0 |
| -0.02 | 1,838,023 | 12 | 0.48 | 0 | 0 |
| | | | 0.50 | 2 | 0 |

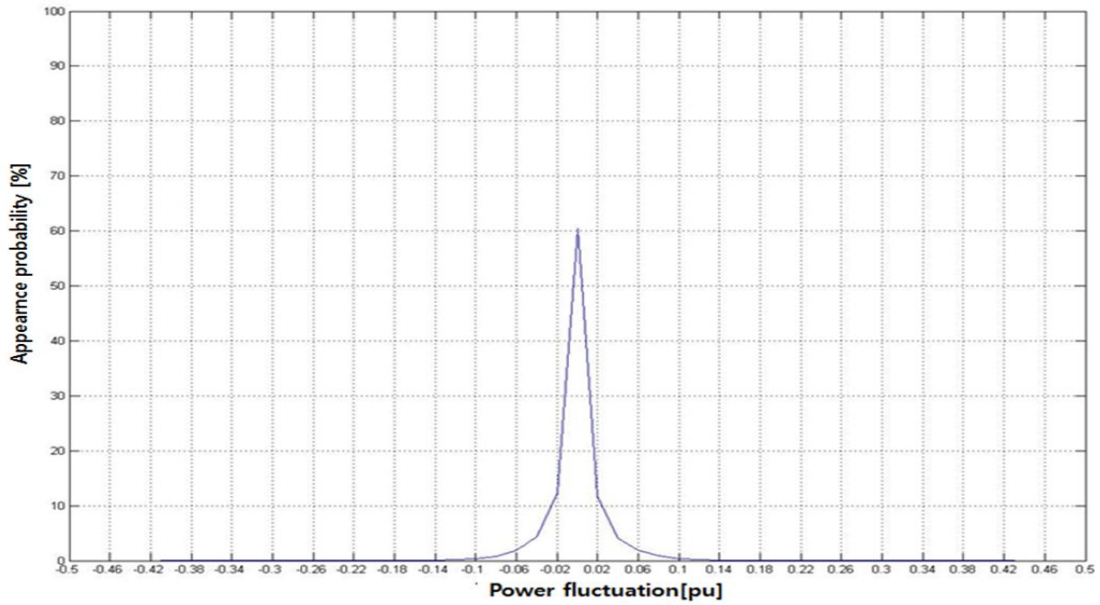


Fig. 13 Probability distribution curve of the power fluctuation every 10 minutes in the Hangeong wind farm

Table 16 Maximum power fluctuation every 10 minutes in the Hangeong wind farm

| Date | Time | Power production [MW] | Power fluctuation [MW] | Fluctuation rate [%] |
|------------|----------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| 2010.02.10 | 10:15:52 | 15.81 | -14.67 | -70 |
| 2010.01.12 | 18:49:44 | 16.61 | -14.35 | -68 |
| 2009.11.12 | 22:13:32 | 17.23 | -14.34 | -68 |
| 2009.06.22 | 16:13:56 | 16.13 | -14.01 | -67 |
| 2009.12.16 | 20:12:58 | 16.34 | -13.99 | -67 |
| 2009.07.28 | 19:59:28 | 14.15 | -13.66 | -65 |
| 2010.01.13 | 18:33:40 | 16.90 | -13.43 | -64 |
| 2009.11.18 | 03:57:52 | 16.16 | -13.35 | -64 |
| 2009.12.28 | 08:45:32 | 16.19 | -13.26 | -63 |
| 2010.02.19 | 02:15:14 | 16.13 | -13.22 | -63 |
| 2010.02.07 | 05:36:32 | 1.33 | 15.82 | 75 |
| 2009.07.23 | 23:25:32 | 0.82 | 15.65 | 75 |
| 2009.12.17 | 01:09:06 | 1.36 | 15.39 | 73 |
| 2010.02.10 | 10:06:04 | 0.43 | 15.38 | 73 |
| 2009.09.25 | 16:14:08 | 4.01 | 15.07 | 72 |
| 2010.01.12 | 20:16:00 | 2.35 | 14.17 | 68 |
| 2010.01.13 | 18:43:48 | 3.47 | 13.27 | 63 |
| 2009.11.01 | 02:26:10 | 2.03 | 13.20 | 63 |
| 2009.11.10 | 09:14:40 | 2.93 | 12.99 | 62 |
| 2009.10.17 | 03:25:12 | 2.29 | 12.77 | 61 |

라. 30분 단위 출력변동률

30분 단위의 출력변동률은 2009년 3월부터 2010년 2월까지 한경풍력발전단지의 출력데이터를 가지고 분석하였으며, Table 17과 Fig. 14는 해당기간의 30분 단위의 정격설비용량 대비 변동량에 대하여 발생빈도분포를 나타낸 것이다. 이 기간 동안에는 전체 출력 98%가 $\pm 9\%$ 이내의 출력변동률을 보이고 있다. Table 18에는 30분 단위 최대출력변동을 나타내었으며 대부분의 경우 70% 이상의 출력변동을 보여 주고 있다.

Table 17 Probability distribution of variable fluctuation every 30 minutes in the Hangeong wind farm

| pu | Frequency | | pu | Frequency | |
|-------|--------------|-----------|------|--------------|-----------|
| | Sample[unit] | Sample[%] | | Sample[unit] | Sample[%] |
| -0.50 | 10 | 0 | 0.00 | 7696144 | 52 |
| -0.48 | 8 | 0 | 0.02 | 1919166 | 13 |
| -0.46 | 31 | 0 | 0.04 | 754205 | 5 |
| -0.44 | 92 | 0 | 0.06 | 373916 | 3 |
| -0.42 | 110 | 0 | 0.08 | 199116 | 1 |
| -0.40 | 65 | 0 | 0.10 | 110859 | 1 |
| -0.38 | 72 | 0 | 0.12 | 62117 | 0 |
| -0.36 | 113 | 0 | 0.14 | 35503 | 0 |
| -0.34 | 152 | 0 | 0.16 | 20265 | 0 |
| -0.32 | 198 | 0 | 0.18 | 12344 | 0 |
| -0.30 | 386 | 0 | 0.20 | 7514 | 0 |
| -0.28 | 898 | 0 | 0.22 | 4556 | 0 |
| -0.26 | 1536 | 0 | 0.24 | 2934 | 0 |
| -0.24 | 2298 | 0 | 0.26 | 2029 | 0 |
| -0.22 | 3677 | 0 | 0.28 | 1234 | 0 |
| -0.20 | 5634 | 0 | 0.30 | 841 | 0 |
| -0.18 | 9357 | 0 | 0.32 | 607 | 0 |
| -0.16 | 17420 | 0 | 0.34 | 471 | 0 |
| -0.14 | 31652 | 0 | 0.36 | 306 | 0 |
| -0.12 | 58247 | 0 | 0.38 | 124 | 0 |
| -0.10 | 108478 | 1 | 0.40 | 99 | 0 |
| -0.08 | 208367 | 1 | 0.42 | 136 | 0 |
| -0.06 | 403711 | 3 | 0.44 | 74 | 0 |
| -0.04 | 814236 | 6 | 0.46 | 30 | 0 |
| -0.02 | 1911066 | 13 | 0.48 | 17 | 0 |
| | | | 0.50 | 6 | 0 |

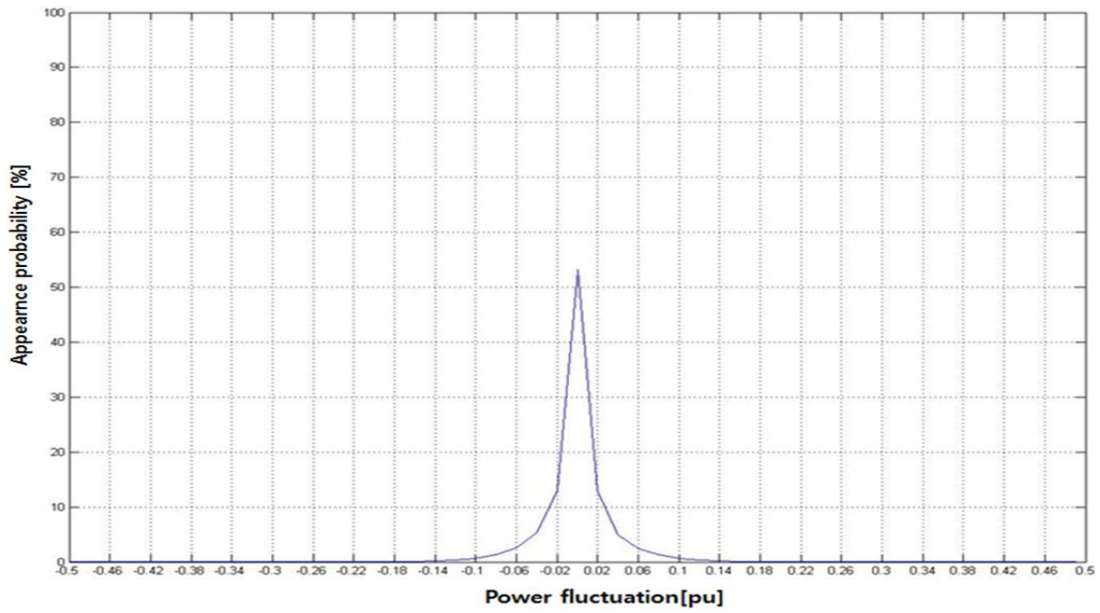


Fig. 14 Probability distribution curve of the power fluctuation every 30 minutes in the Hangeong wind farm

Table 18 Maximum power fluctuation every 30 minutes in the Hangeong wind farm

| Date | Time | Power production [MW] | Power fluctuation [MW] | Fluctuation rate [%] |
|------------|----------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| 2009.11.12 | 22:05:46 | 18.01 | -16.04 | -76 |
| 2010.02.19 | 11:17:28 | 16.53 | -15.94 | -76 |
| 2009.09.25 | 16:24:20 | 19.09 | -15.67 | -75 |
| 2010.02.11 | 05:16:32 | 16.56 | -15.59 | -74 |
| 2009.12.17 | 00:37:52 | 16.45 | -15.37 | -73 |
| 2009.06.22 | 16:13:56 | 16.13 | -15.32 | -73 |
| 2009.08.05 | 03:46:08 | 16.32 | -15.22 | -73 |
| 2009.11.10 | 09:45:12 | 15.76 | -15.20 | -72 |
| 2009.11.11 | 13:54:28 | 18.00 | -15.00 | -71 |
| 2010.02.10 | 10:15:52 | 15.81 | -14.67 | -70 |
| 2009.09.25 | 15:56:44 | 0.79 | 18.30 | 87 |
| 2009.11.10 | 09:00:48 | 0.56 | 17.00 | 81 |
| 2010.02.07 | 05:36:32 | 1.33 | 16.99 | 81 |
| 2009.07.23 | 23:25:32 | 0.82 | 16.53 | 79 |
| 2009.04.24 | 10:00:16 | 1.76 | 16.42 | 78 |
| 2009.07.28 | 20:05:56 | 0.49 | 16.08 | 77 |
| 2009.12.17 | 01:08:32 | 1.08 | 16.08 | 77 |
| 2010.02.10 | 10:06:04 | 0.43 | 15.38 | 73 |
| 2009.06.22 | 15:34:08 | 1.13 | 15.30 | 73 |
| 2010.01.12 | 18:53:52 | 2.26 | 15.02 | 72 |

3) 성산풍력발전단지

(1) 성산풍력발전단지의 개요

서귀포시 성산읍 수산리에 위치한 성산풍력발전단지는 한국남부발전이 운영하고 있으며, 1단계 사업에서 Vestas사의 DFIG 타입 V80 2MW 6기 총 12MW가 2009년 3월 준공되었고, 2단계 사업에서는 Vestat사의 DFIG 타입 V80 2MW 4기 총 8MW가 2010년 9월 준공되어 총 20MW 용량의 설비가 구축되어 상업운전을 하고 있다. 성산풍력발전단지의 계통연계는 Fig. 15와 같이 22.9kV의 지중송전선로를 통하여 성산변전소에 연계하도록 되어 있으며 2010년 2월 이전을 기준으로 논문의 해석시점의 계통연계도이다. 역률을 1로 제어하는 DFIG 타입이 운전되고 있다.

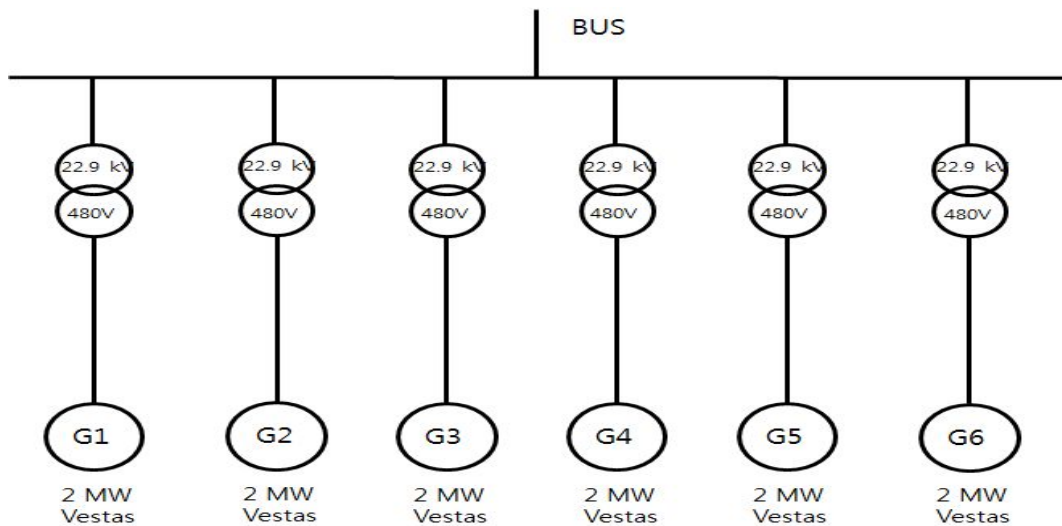


Fig. 15 Grid connection of wind generators in Sungsan wind farm

(2) 성산풍력발전단지의 출력변동률 분석

가. 2초 단위 출력변동률 분석

2009년 3월부터 2010년 2월까지 2초 단위의 성산풍력발전단지 발전에 대한 출력변동률을 분석하였는데, Table 19와 Fig. 16은 해당기간의 2초 단위의 정격설

비용량 대비 출력변동량에 대한 발생빈도분포를 나타낸 것이다. 여기서 보면 전체 출력의 95%가 $\pm 1\%$ 이내의 출력변동률을 보이고 있다.

Table 19 Probability distribution of wind power fluctuation every 2 seconds in Sungsan wind farm

| pu | Frequency | | pu | Frequency | |
|-------|--------------|-----------|------|--------------|-----------|
| | Sample[unit] | Sample[%] | | Sample[unit] | Sample[%] |
| -0.50 | 1 | 0 | 0.00 | 12,774,482 | 95 |
| -0.48 | 0 | 0 | 0.02 | 266,105 | 2 |
| -0.46 | 0 | 0 | 0.04 | 61,849 | 0 |
| -0.44 | 0 | 0 | 0.06 | 15,274 | 0 |
| -0.42 | 0 | 0 | 0.08 | 3,507 | 0 |
| -0.4 | 0 | 0 | 0.10 | 790 | 0 |
| -0.38 | 1 | 0 | 0.12 | 154 | 0 |
| -0.36 | 1 | 0 | 0.14 | 25 | 0 |
| -0.34 | 0 | 0 | 0.16 | 4 | 0 |
| -0.32 | 0 | 0 | 0.18 | 1 | 0 |
| -0.30 | 0 | 0 | 0.20 | 0 | 0 |
| -0.28 | 0 | 0 | 0.22 | 1 | 0 |
| -0.26 | 1 | 0 | 0.24 | 0 | 0 |
| -0.24 | 0 | 0 | 0.26 | 0 | 0 |
| -0.22 | 0 | 0 | 0.28 | 0 | 0 |
| -0.20 | 1 | 0 | 0.30 | 0 | 0 |
| -0.18 | 2 | 0 | 0.32 | 1 | 0 |
| -0.16 | 3 | 0 | 0.34 | 0 | 0 |
| -0.14 | 16 | 0 | 0.36 | 0 | 0 |
| -0.12 | 81 | 0 | 0.38 | 0 | 0 |
| -0.10 | 499 | 0 | 0.40 | 0 | 0 |
| -0.08 | 2,356 | 0 | 0.42 | 0 | 0 |
| -0.06 | 12,541 | 0 | 0.44 | 0 | 0 |
| -0.04 | 60,253 | 0 | 0.46 | 0 | 0 |
| -0.02 | 280,553 | 2 | 0.48 | 0 | 0 |
| | | | 0.50 | 0 | 0 |

Table 20에서 나타난 것과 같이 2009년 3월부터 2010년 2월까지의 2초 단위 출력변동률에서 $\pm 20\%$ 가 넘는 사례가 20건을 기록하고 있으며, 해당 년도 동안 최대 출력변동률이 발생한 시각은 2009년 7월 28일 20시 14분 32초 때이고, 이때의 출력변동률은 -86% 이며 변동량은 10.4MW로 나타났다. 만약 2초 변동에 대비한 에너지저장시스템을 설치한다면 총 설비용량대비 약 87%까지 고려해야 할 것으로 판단된다.

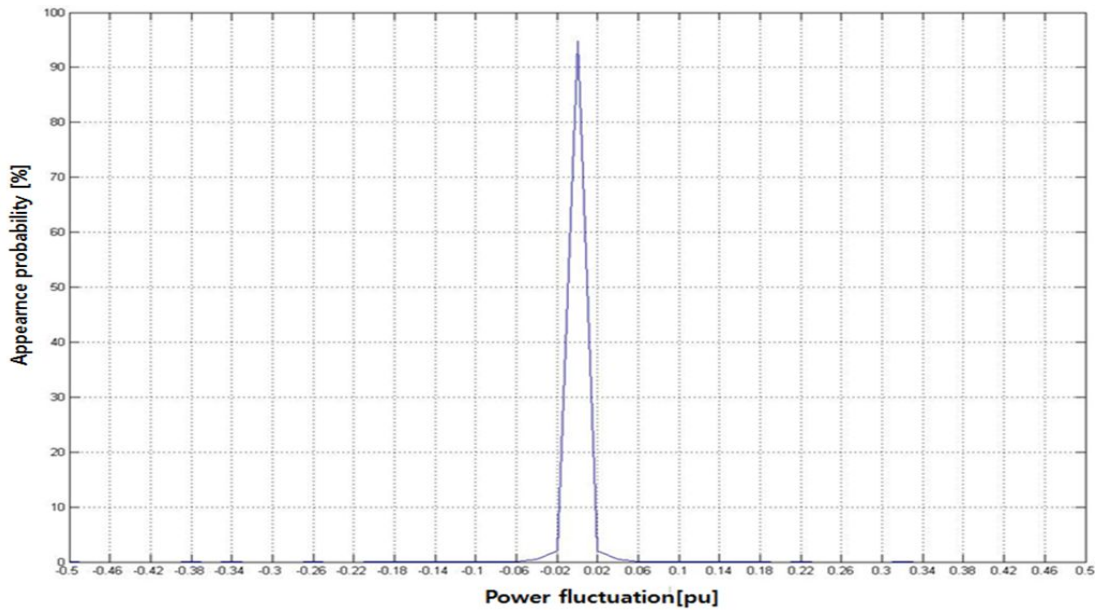


Fig. 16 Probability distribution curve of the power fluctuation every 2 seconds in the Seongsan wind farm

Table 20 Maximum power fluctuation every 2 seconds in the Seongsan wind farm

| Date | Time | Power production [MW] | Power fluctuation [MW] | Fluctuation rate [%] |
|------------|----------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| 2009.07.28 | 20:14:32 | 11.99 | -10.35 | -86 |
| 2009.08.27 | 14:28:12 | 8.36 | -7.95 | -66 |
| 2009.06.20 | 22:00:58 | 7.78 | -7.33 | -61 |
| 2010.01.12 | 23:46:10 | 6.10 | -5.61 | -47 |
| 2009.05.16 | 04:33:22 | 11.98 | -4.23 | -35 |
| 2010.01.21 | 16:15:12 | 7.99 | -3.96 | -33 |
| 2009.07.28 | 20:58:50 | 7.24 | -3.70 | -31 |
| 2009.07.28 | 20:57:00 | 6.70 | -3.54 | -30 |
| 2010.01.21 | 22:31:52 | 11.22 | -3.26 | -27 |
| 2009.05.16 | 19:15:56 | 10.49 | -3.15 | -26 |
| 2010.02.07 | 05:42:10 | 2.92 | 6.87 | 57 |
| 2009.04.11 | 21:56:06 | 0.42 | 4.44 | 37 |
| 2009.07.28 | 20:16:44 | 3.58 | 3.72 | 31 |
| 2009.07.19 | 06:00:56 | 4.81 | 3.53 | 29 |
| 2010.01.20 | 08:38:06 | 7.59 | 3.30 | 28 |
| 2009.07.17 | 07:50:00 | 7.90 | 3.21 | 27 |
| 2009.10.14 | 01:37:26 | 7.51 | 3.17 | 26 |
| 2010.01.06 | 06:48:58 | 3.87 | 3.10 | 26 |
| 2010.01.07 | 08:07:14 | 6.56 | 3.06 | 26 |
| 2009.06.02 | 15:06:56 | 8.85 | 3.05 | 26 |

나. 1분 단위 출력변동률

2009년 3월부터 2010년 2월까지 1분 단위의 성산풍력발전단지 발전에 대한 출력변동률을 분석하였으며, Table 21과 Fig. 17은 해당기간의 1분 단위의 정격설비용량 대비 출력변동량에 대한 발생빈도분포를 나타낸 것이다. 여기서 보면 전체 출력의 97%가 $\pm 3\%$ 이내의 출력변동률을 보이고 있다.

Table 21 Probability distribution of wind power fluctuation every 1 minute in the Seongsan wind farm

| pu | Frequency | | pu | Frequency | |
|-------|--------------|-----------|------|--------------|-----------|
| | Sample[unit] | Sample[%] | | Sample[unit] | Sample[%] |
| -0.50 | 0 | 0 | 0.00 | 10,826,657 | 80 |
| -0.48 | 0 | 0 | 0.02 | 1,162,101 | 9 |
| -0.46 | 0 | 0 | 0.04 | 147,356 | 1 |
| -0.44 | 0 | 0 | 0.06 | 14,595 | 0 |
| -0.42 | 0 | 0 | 0.08 | 1,043 | 0 |
| -0.4 | 0 | 0 | 0.10 | 47 | 0 |
| -0.38 | 0 | 0 | 0.12 | 11 | 0 |
| -0.36 | 0 | 0 | 0.14 | 6 | 0 |
| -0.34 | 0 | 0 | 0.16 | 8 | 0 |
| -0.32 | 0 | 0 | 0.18 | 6 | 0 |
| -0.30 | 0 | 0 | 0.20 | 1 | 0 |
| -0.28 | 0 | 0 | 0.22 | 1 | 0 |
| -0.26 | 0 | 0 | 0.24 | 1 | 0 |
| -0.24 | 1 | 0 | 0.26 | 0 | 0 |
| -0.22 | 2 | 0 | 0.28 | 0 | 0 |
| -0.20 | 2 | 0 | 0.30 | 0 | 0 |
| -0.18 | 3 | 0 | 0.32 | 0 | 0 |
| -0.16 | 3 | 0 | 0.34 | 0 | 5 |
| -0.14 | 7 | 0 | 0.36 | 0 | 0 |
| -0.12 | 12 | 0 | 0.38 | 0 | 0 |
| -0.10 | 81 | 0 | 0.40 | 0 | 0 |
| -0.08 | 850 | 0 | 0.42 | 0 | 0 |
| -0.06 | 12,757 | 0 | 0.44 | 0 | 0 |
| -0.04 | 140,852 | 1 | 0.46 | 0 | 0 |
| -0.02 | 1,172,042 | 9 | 0.48 | 0 | 0 |
| | | | 0.50 | 0 | 0 |

Table 22에는 1분 단위 최대출력변동률이 $\pm 30\%$ 가 넘는 사례가 13건을 기록하였다. 최대 출력변동률이 발생한 시각은 2009년 7월 28일 20시 13분 36초 때였으며, 이때의 출력변동률은 -87% 이며 변동량은 10.45MW로 나타났다.

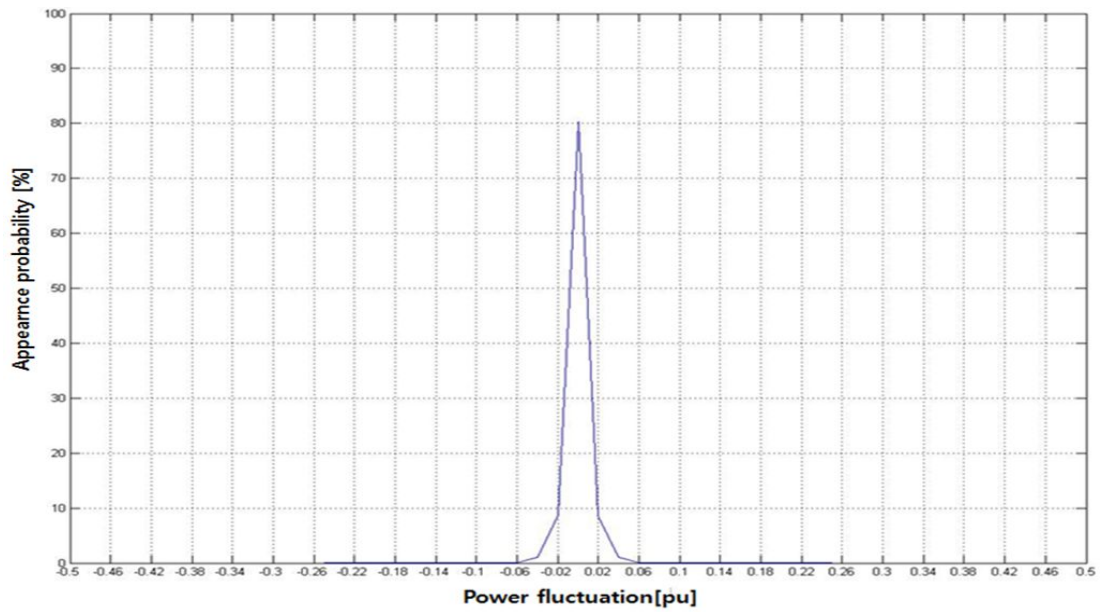


Fig. 17 Probability distribution curve of the power fluctuation every 1 minute in the Seongsan wind farm

Table 22 Maximum power fluctuation every 1 minute in the Seongsan wind farm

| Date | Time | Power production [MW] | Power fluctuation [MW] | Fluctuation rate [%] |
|------------|----------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| 2009.07.28 | 20:13:36 | 12.09 | -10.45 | -87 |
| 2009.06.20 | 22:00:26 | 10.42 | -9.97 | -83 |
| 2009.08.27 | 14:27:14 | 8.88 | -8.47 | -71 |
| 2009.07.28 | 20:58:04 | 10.06 | -7.12 | -59 |
| 2010.01.12 | 23:46:02 | 6.10 | -5.64 | -47 |
| 2009.05.16 | 04:33:14 | 11.98 | -5.01 | -42 |
| 2010.01.07 | 15:20:14 | 8.93 | -4.81 | -40 |
| 2009.07.21 | 11:42:40 | 9.79 | -4.79 | -40 |
| 2010.01.04 | 15:45:42 | 6.08 | -4.78 | -40 |
| 2009.05.08 | 06:20:46 | 9.95 | -4.65 | -39 |
| 2010.02.07 | 05:42:10 | 2.92 | 6.14 | 51 |
| 2009.04.11 | 21:56:06 | 0.42 | 4.34 | 36 |
| 2009.07.28 | 20:16:44 | 3.58 | 3.72 | 31 |
| 2009.07.28 | 20:57:10 | 3.16 | 2.99 | 25 |
| 2009.10.14 | 01:37:26 | 7.51 | 2.96 | 25 |
| 2009.10.17 | 03:55:56 | 3.91 | 2.83 | 24 |
| 2009.05.28 | 12:38:10 | 4.25 | 2.75 | 23 |
| 2009.04.22 | 15:25:44 | 5.35 | 2.58 | 22 |
| 2009.05.22 | 22:25:20 | 3.12 | 2.57 | 22 |
| 2010.02.19 | 12:21:38 | 6.54 | 2.54 | 21 |

다. 10분 단위 출력변동률

2009년 3월부터 2010년 2월까지 10분 단위의 풍력발전량에 대한 출력변동률을 분석하였으며, Table 23와 Fig. 18은 정격설비용량 대비 변동량에 대하여 발생빈도분포를 나타낸 것이다. 해당기간에는 전체 출력의 97%가 $\pm 5\%$ 이내의 출력변동률을 보이고 있다. Table 24에는 해당 년도의 최대 출력변동률을 나타내었다. 최대 출력변동률이 발생한 시각은 2009년 7월 28일 19시 57분 때였으며, 이때의 출력변동률은 97.0%이며 변동량은 11.6MW로 나타났다. 이에 따라 최대 출력변동률을 대비하여 10분 단위 출력변동률은 설비용량대비 약 97%까지 고려해야 할 것으로 판단된다.

Table 23 Probability distribution of wind power fluctuation every 10 minutes in the Seongsan wind farm

| pu | Frequency | | pu | Frequency | |
|-------|--------------|-----------|------|--------------|-----------|
| | Sample[unit] | Sample[%] | | Sample[unit] | Sample[%] |
| -0.50 | 0 | 0 | 0.00 | 8,796,129 | 65 |
| -0.48 | 0 | 0 | 0.02 | 1,597,544 | 12 |
| -0.46 | 0 | 0 | 0.04 | 496,481 | 4 |
| -0.44 | 0 | 0 | 0.06 | 169,341 | 1 |
| -0.42 | 0 | 0 | 0.08 | 53,859 | 0 |
| -0.4 | 0 | 0 | 0.10 | 15,042 | 0 |
| -0.38 | 0 | 0 | 0.12 | 4,024 | 0 |
| -0.36 | 0 | 0 | 0.14 | 1,132 | 0 |
| -0.34 | 0 | 0 | 0.16 | 227 | 0 |
| -0.32 | 0 | 0 | 0.18 | 53 | 0 |
| -0.30 | 0 | 0 | 0.20 | 36 | 0 |
| -0.28 | 0 | 0 | 0.22 | 6 | 0 |
| -0.26 | 11 | 0 | 0.24 | 0 | 0 |
| -0.24 | 10 | 0 | 0.26 | 0 | 0 |
| -0.22 | 39 | 0 | 0.28 | 5 | 0 |
| -0.20 | 71 | 0 | 0.30 | 0 | 0 |
| -0.18 | 117 | 0 | 0.32 | 0 | 0 |
| -0.16 | 326 | 0 | 0.34 | 5 | 0 |
| -0.14 | 1,274 | 0 | 0.36 | 49 | 0 |
| -0.12 | 4,169 | 0 | 0.38 | 5 | 0 |
| -0.10 | 15,942 | 0 | 0.40 | 0 | 0 |
| -0.08 | 53,458 | 0 | 0.42 | 0 | 0 |
| -0.06 | 169,678 | 1 | 0.44 | 0 | 0 |
| -0.04 | 507,782 | 4 | 0.46 | 0 | 0 |
| -0.02 | 1,591,090 | 12 | 0.48 | 0 | 0 |
| | | | 0.50 | 0 | 0 |

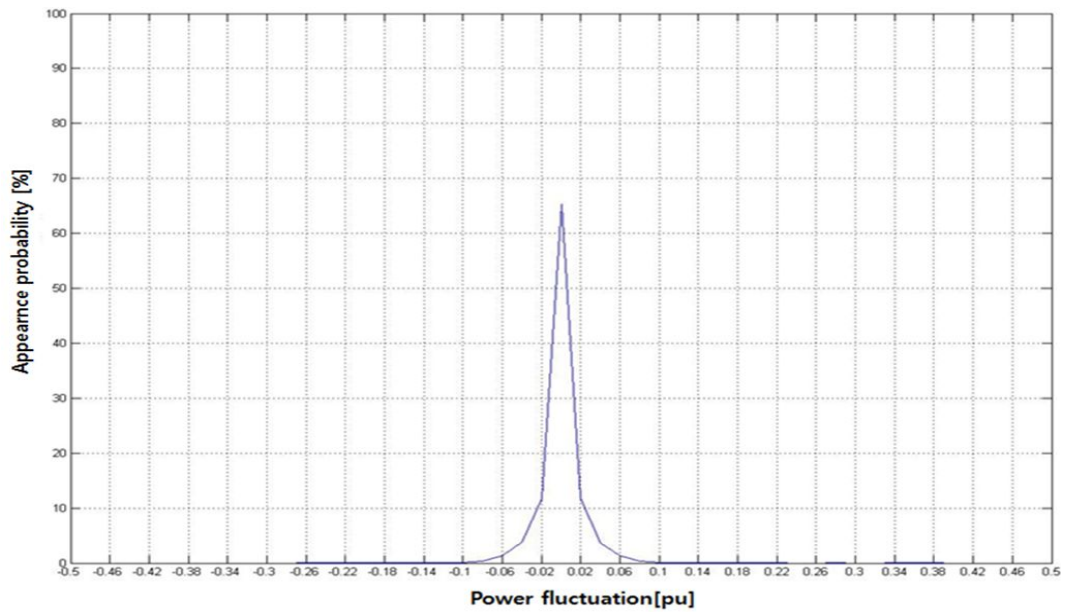


Fig. 18 Probability distribution curve of the power fluctuation every 10 minutes in the Seongsan wind farm

Table 24 Maximum power fluctuation every 10 minutes in the Seongsan wind farm

| Date | Time | Power production [MW] | Power fluctuation [MW] | Fluctuation rate [%] |
|------------|----------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| 2009.06.20 | 21:51:36 | 11.77 | -11.32 | -94 |
| 2009.07.28 | 20:07:54 | 12.12 | -10.48 | -87 |
| 2009.08.27 | 14:25:28 | 9.46 | -9.10 | -76 |
| 2009.10.17 | 04:31:30 | 11.69 | -8.86 | -74 |
| 2010.02.19 | 12:05:02 | 10.16 | -8.29 | -69 |
| 2009.07.21 | 11:42:34 | 9.79 | -8.00 | -67 |
| 2010.02.13 | 03:53:46 | 11.98 | -7.85 | -65 |
| 2010.01.27 | 19:46:18 | 9.04 | -7.79 | -65 |
| 2009.12.19 | 18:17:40 | 8.19 | -7.72 | -64 |
| 2009.07.18 | 15:46:34 | 10.44 | -7.66 | -64 |
| 2009.07.28 | 19:57:00 | 0.42 | 11.63 | 97 |
| 2009.04.11 | 21:55:56 | 0.39 | 11.11 | 93 |
| 2009.10.14 | 01:27:56 | 1.01 | 10.80 | 90 |
| 2009.10.17 | 03:54:52 | 2.22 | 9.76 | 81 |
| 2009.07.19 | 21:04:04 | 2.31 | 9.50 | 79 |
| 2009.12.17 | 13:09:58 | 0.56 | 9.37 | 78 |
| 2010.02.18 | 03:12:46 | 2.68 | 9.36 | 78 |
| 2009.05.21 | 23:23:50 | 2.74 | 8.97 | 75 |
| 2009.08.27 | 14:21:02 | 0.58 | 8.96 | 75 |
| 2009.05.21 | 03:54:56 | 1.46 | 8.56 | 71 |

라. 30분 단위 출력변동률

Table 25와 Fig. 19는 해당기간의 30분 단위의 정격설비용량 대비 변동량에 대하여 발생빈도분포를 나타낸 것이다. 이 기간 동안에는 전체 출력 98%가 $\pm 7\%$ 이내의 출력변동률을 보이고 있다.

Table 25 Probability distribution of wind power fluctuation every 30 minutes in the Seongsan wind farm

| pu | Frequency | | pu | Frequency | |
|-------|--------------|-----------|------|--------------|-----------|
| | Sample[unit] | Sample[%] | | Sample[unit] | Sample[%] |
| -0.50 | 0 | 0 | 0.00 | 7,618,167 | 57 |
| -0.48 | 0 | 0 | 0.02 | 1,764,728 | 13 |
| -0.46 | 0 | 0 | 0.04 | 661,891 | 5 |
| -0.44 | 0 | 0 | 0.06 | 128,387 | 2 |
| -0.42 | 0 | 0 | 0.08 | 293,016 | 1 |
| -0.4 | 0 | 0 | 0.10 | 58,552 | 0 |
| -0.38 | 0 | 0 | 0.12 | 21,300 | 0 |
| -0.36 | 0 | 0 | 0.14 | 9,247 | 0 |
| -0.34 | 0 | 0 | 0.16 | 3,904 | 0 |
| -0.32 | 11 | 0 | 0.18 | 1,116 | 0 |
| -0.30 | 11 | 0 | 0.20 | 382 | 0 |
| -0.28 | 44 | 0 | 0.22 | 146 | 0 |
| -0.26 | 101 | 0 | 0.24 | 78 | 0 |
| -0.24 | 118 | 0 | 0.26 | 11 | 0 |
| -0.22 | 429 | 0 | 0.28 | 11 | 0 |
| -0.20 | 805 | 0 | 0.30 | 32 | 0 |
| -0.18 | 1,816 | 0 | 0.32 | 28 | 0 |
| -0.16 | 4,048 | 0 | 0.34 | 53 | 0 |
| -0.14 | 9,246 | 0 | 0.36 | 0 | 0 |
| -0.12 | 23,303 | 0 | 0.38 | 0 | 0 |
| -0.10 | 56,261 | 0 | 0.40 | 21 | 0 |
| -0.08 | 136,161 | 1 | 0.42 | 38 | 0 |
| -0.06 | 307,768 | 2 | 0.44 | 0 | 0 |
| -0.04 | 680,742 | 5 | 0.46 | 0 | 0 |
| -0.02 | 1,694,733 | 13 | 0.48 | 0 | 0 |
| | | | 0.50 | 0 | 0 |

Table 26에는 30분 단위 최대출력변동을 나타내었으며 대부분의 경우 80% 이상의 출력변동을 보여 주고 있다.

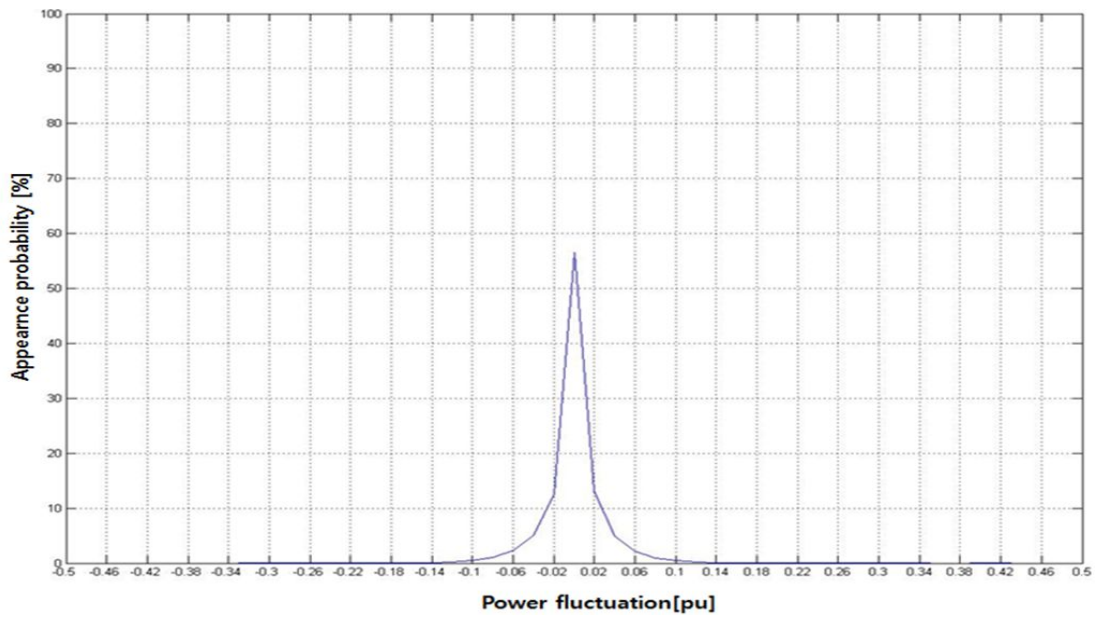


Fig. 19 Probability distribution curve of the power fluctuation every 30 minutes in the Seongsan wind farm

Table 26 Maximum power fluctuation every 30 minutes in the Seongsan wind farm

| Date | Time | Power production [MW] | Power fluctuation [MW] | Fluctuation rate [%] |
|------------|----------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| 2009.06.20 | 21:48:06 | 12.00 | -11.59 | -97 |
| 2009.07.28 | 20:45:20 | 11.88 | -11.52 | -96 |
| 2009.10.17 | 04:31:32 | 11.69 | -10.56 | -88 |
| 2009.05.21 | 22:25:52 | 11.49 | -10.54 | -88 |
| 2009.07.18 | 15:37:20 | 11.64 | -9.90 | -83 |
| 2009.11.02 | 01:57:04 | 10.66 | -9.74 | -81 |
| 2009.05.12 | 09:40:12 | 10.50 | -9.69 | -81 |
| 2009.05.21 | 22:30:50 | 10.59 | -9.64 | -80 |
| 2009.06.20 | 21:59:20 | 10.04 | -9.63 | -80 |
| 2010.01.21 | 16:12:04 | 10.04 | -9.63 | -80 |
| 2009.07.28 | 19:56:50 | 0.42 | 11.78 | 98 |
| 2010.01.21 | 18:54:32 | 0.42 | 11.66 | 97 |
| 2009.10.17 | 03:29:34 | 0.39 | 11.60 | 97 |
| 2009.04.11 | 21:41:16 | 0.38 | 11.51 | 96 |
| 2009.10.14 | 01:21:24 | 0.55 | 11.37 | 95 |
| 2009.10.17 | 03:36:58 | 0.99 | 11.00 | 92 |
| 2009.05.21 | 23:07:30 | 1.58 | 10.25 | 85 |
| 2010.02.18 | 00:12:18 | 1.77 | 10.24 | 85 |
| 2009.05.21 | 23:06:34 | 1.73 | 10.09 | 84 |
| 2009.07.21 | 06:47:56 | 0.60 | 10.03 | 84 |

Ⅲ. 에너지저장시스템 모델링과 용량산정

1. 에너지저장시스템 모델링

1) 리튬이온배터리의 모델링

(1) 리튬이온배터리의 특징

리튬이온배터리는 리튬염 전해액을 사용하는 이차전지로 양극활물질, 음극활물질, 분리막, 전해액 및 용기로 구성된다. 분리막은 다공성 고분자 필름으로 양극과 음극의 물리적 접촉을 방지하는 전기적 절연체이며, 전해액은 리튬염을 유기용매에 용해시킨 용액이다. Fig. 20에서 리튬은 전자를 잃고 양이온이 되려는 경향이 강하므로, 기존의 납축전지 및 니켈전지보다 우수한 작동전압 및 에너지 용량을 구현할 수 있으며, 리튬이온전지는 전극판과 분리막을 적층하고 두루마리 형태로 감아서 용기에 삽입한 후, 전해액을 주입하고 밀봉하여 제조하게 된다. 리튬이온전지는 형상에 따라 원통형, 각형 및 파우치형으로 구분하며, 전해액을 겹화하여 분리막과 결합시킨 경우에는 리튬이온 폴리머전지라고 한다.

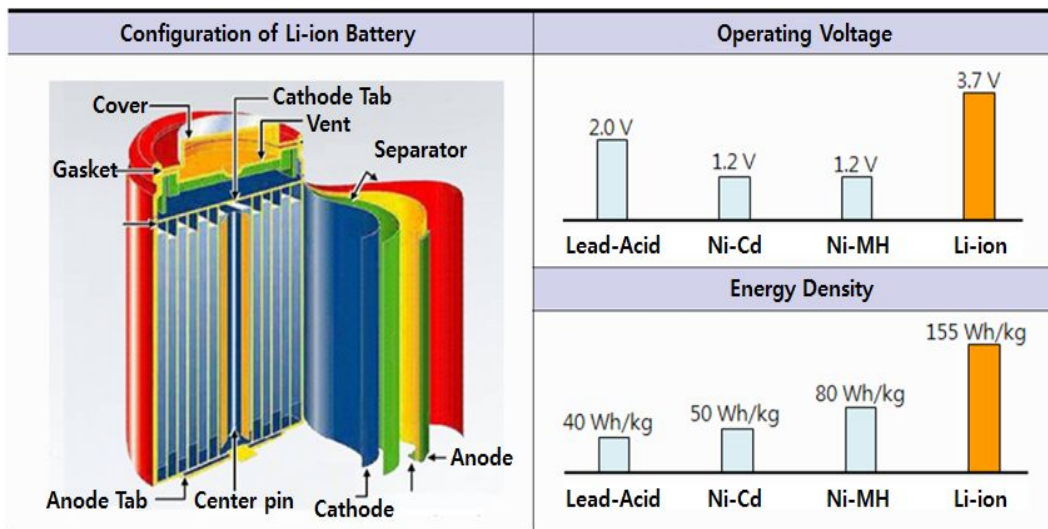


Fig. 20 Configuration of the Li-ion battery

단기 에너지 저장기술 중 본 논문에 이용된 리튬이온 2차 배터리는 국내 모바일 기술의 급성장과 함께 이미 기반 산업이 활성화 되어 있으며, 전기자동차 산업이 주목 받음에 따라 고용량화 기술개발이 급성장 하고 있다. 따라서 본 논문에서 제안하는 풍력발전 출력전력의 변동성 완화를 위한 에너지저장시스템으로서 적합하다고 생각된다. 또한 Table 27[21]과 같이 다른 배터리 에너지 저장매체에 비해 에너지 밀도가 높아 하중과 부피가 줄어들고, 발열량이 적어 열손실이 작으며 자기 방전률이 낮아 유지보수 및 에너지 절감에 유리하고 잔존용량 모니터링 및 모듈화가 쉽다는 장점이 있다.

Table 27 Characteristics of batteries

| | Ni-Cd | Ni-H ₂ | Li-ion | System impact using Li-ion |
|----------------------------|---------|-------------------|------------------|--|
| Specific energy [Wh/kg] | 30 | 60 | 165 | Weight saving |
| Energy efficiency [%] | 72 | 70 | 96 | Reduction of charge power |
| Thermal power [scale 1-10] | 8 | 10 | 3 | Reduction of radiator, heat pipe sizes |
| Self discharge [%/day] | 0.5 | 5 | 0.3 | No trickle and simple management at launch pad |
| Temperature range [°C] | 0 to 40 | -20 to 30 | 10 to 30 | Management at ambient |
| Memory effect | Yes | Yes | No | No reconditioning |
| Energy gauge/monitor | No | Pressure | Voltage | Better observability of states of charge |
| Charge management | CC | CC | CC CV +Balancing | Weight saving |
| Modularity | No | No | Yes | One cell design, ability to put cells in paralalled. |

(2) 리튬이온 배터리 수학적 모델

본 모델은 Shepherd model[22]을 참조하여 Fig. 21과 같이 단순한 가변 전압 소스와 직렬연결된 저항으로 구성하여 모델링하였으며 식(6)를 이용하여 가변 전압을 제어하였다[23][24].

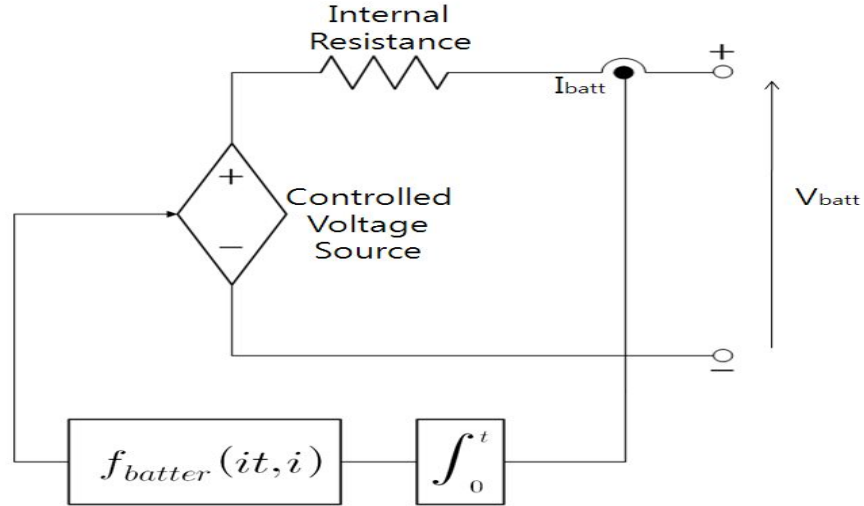


Fig. 21 Non-linear battery model

$$f_{battery}(it, i) = E_0 - K_p \frac{Q}{Q-it} + A \exp(-B \cdot it) \quad (6)$$

여기서, $f_{battery}$: 출력전압 함수 [V]

it : $\int_0^t i dt$ [Ah]

A : 지수영역 비례계수 [V]

B : 지수영역 감쇠시정수 [Ah]⁻¹

Q : 배터리 정격용량 [Ah]

K_p : 분극전압 [V]

(3) 모델링 상수 추출

모델링에 필요한 각종 상수들은 배터리의 실제 방전 곡선을 이용하여 얻을 수 있으며[24], Fig. 22는 병렬 2회로 셀을 7개 직렬 구성한 배터리(7S2P), 3.2Ah 리튬 폴리머 팩을 0.5C(1.6A)로 셀 당 3V 즉 21V까지 방전하여 Cell 방전 특성을

나타내는 그래프이며 1분을 0.01초로 증가화 하여 컴퓨터해석 데이터와 비교가 용의하도록 정리한 실제 방전데이터이다.

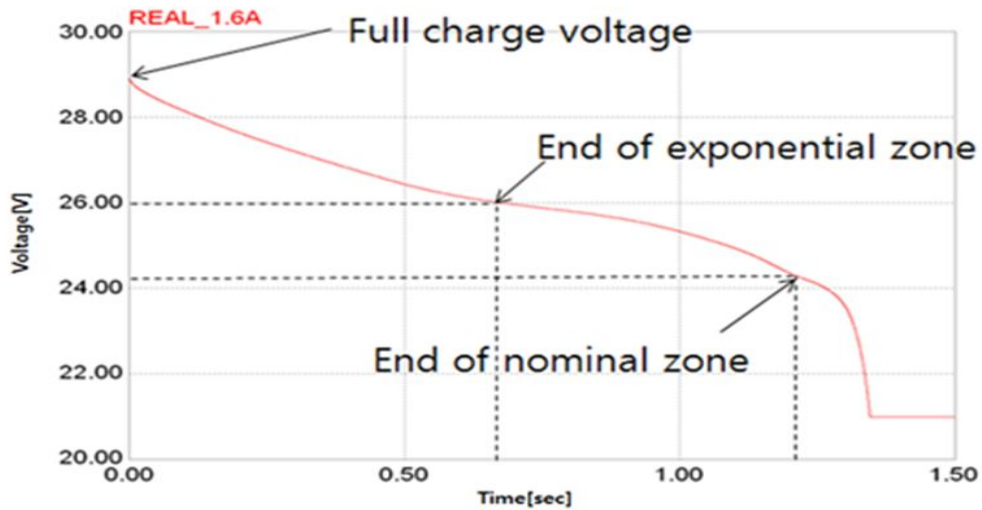


Fig. 22 Discharging curve of the 7S2P Li-ion battery pack

가. 내부저항 근사화

내부저항은 배터리의 출력 전압에 영향을 주며 식(7)으로 표현되는 용량 변화에 따른 효율과 공칭전압의 변화에 따라 계산될 수 있다.

$$\eta = 1 - \frac{I_{nom} \cdot R \cdot I_{nom}}{V_{nom} \cdot I_{nom}} = 1 - \frac{I_{nom} \cdot R}{V_{nom}} \quad (7)$$

I_{nom} 은 방전곡선을 통하여 식(8)를 통하여 얻을 수 있다.

$$I_{nom} = Q_{nom} \cdot \frac{0.2}{1[hr]} \quad (8)$$

결국 식(7)과 식(8)을 연립하여 내부 저항 수식으로 변환하면 식(9)과 같고 본 논문에서 적용된 리튬이온배터리의 효율 99.3%를 대입하면 내부저항이 구해진다.

$$R = (1 - \eta) \cdot \frac{V_{nom}}{0.2 \cdot Q_{nom}} [\Omega] \quad (9)$$

나. 모델상수

Fig. 22의 방전 곡선에서 지수 부분과 공칭 부분의 전압 및 용량을 파악하여 모델의 파라미터를 구할 수 있으며 식(10)를 이용하여 A 를 먼저 구한다.

$$A = E_{Full} - E_{Exp} = 29V - 26V = 3[V] \quad (10)$$

식(11)을 이용하여 지수 부분의 시정수의 역수를 구한다.

$$B = \frac{3}{Q_{Exp}} = \frac{3}{1.6[A] \cdot 0.65[s]} \quad (11)$$

또한 식(10)의 만충전압 E_{Full} 과 공칭 부분의 끝 즉, 종지 전압 E_{Nom} 을 대입하면 분극전압 K_p 를 구할 수 있으며 식(12)와 같다.

$$K_p = \frac{(E_{Full} - E_{Nom} + A(\exp(-BQ_{Nom}) - 1)) \cdot (Q - Q_{Nom})}{Q_{Nom}} \quad (12)$$

지금까지 구한 모델 파라미터를 이용하여 다시 E_0 를 구하면 식 (13)과 같다.

$$E_0 = E_{Full} + K_p + R \cdot i - A \quad (13)$$

(4) PSCAD/EMTDC 등가 모델

식(6)에 대한 리튬이온 배터리의 PSCAD/EMTDC 컴퓨터 해석 프로그램을 이용한 모델링을 Fig. 23에 나타내었으며 식에 의해 계산된 출력 전압을 전압소스에 지령함으로써 배터리의 출력전압이 표현되고 있다. 또한 내부 저항이 증가되어 삽입되어 있고 순시치 전류와 잔존용량에 따라 배터리 전압이 동적해석 될 수 있도록 하였다.

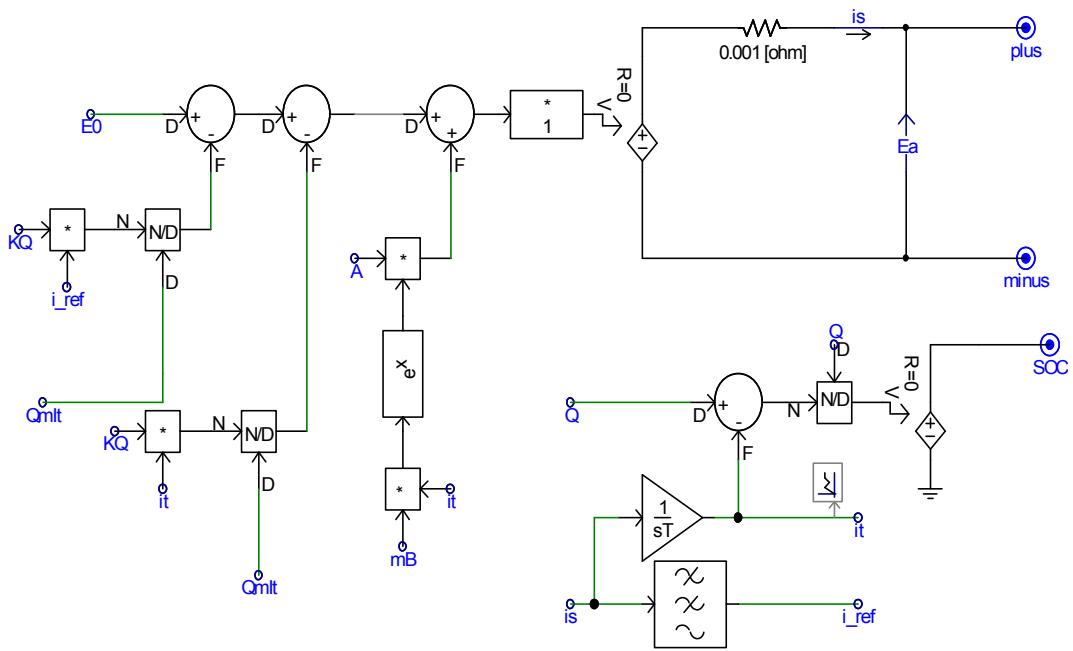


Fig. 23 The modeling of Li-ion battery with PSCAD/EMTDC

Fig. 24는 1 C-rate 상황에서 자기 용량만 큼의 충·방전이 이뤄지는지 특성 그래프를 확인하기 위한 컴퓨터 해석 도면이다.

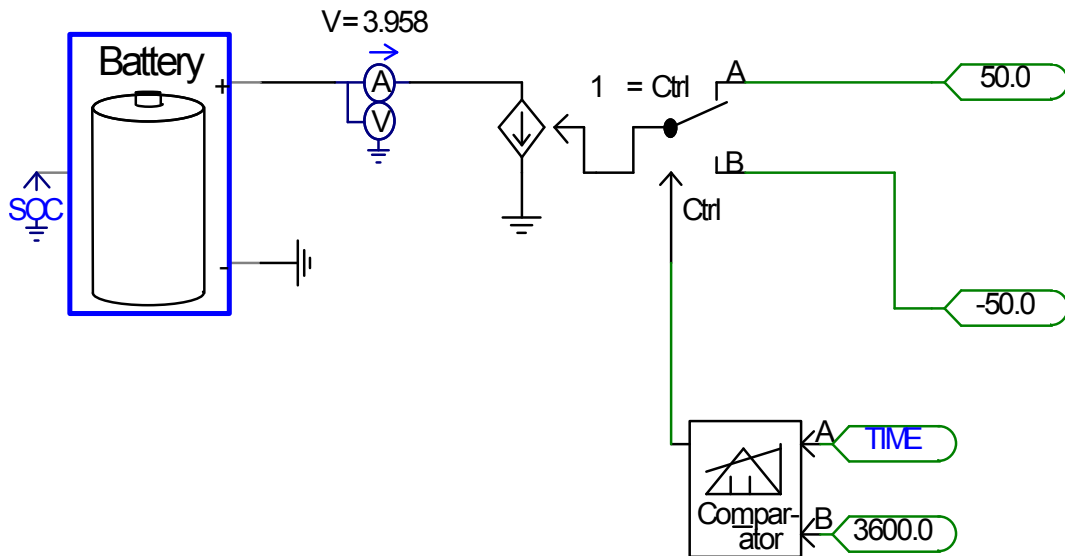


Fig. 24 Configuration of Li-ion battery with PSCAD/EMTDC

(5) 모델 배터리의 컴퓨터 해석

Fig. 25와 Fig. 26은 본 연구에서 사용된 리튬이온 배터리 모델을 실제 방전 그래프와 1C에서 10C까지 방전한 컴퓨터 해석 결과이다. 이 결과에서 보면 두 결과가 거의 일치함을 알 수 있고, 배터리 모델링이 적절하게 되었음을 알 수 있다.

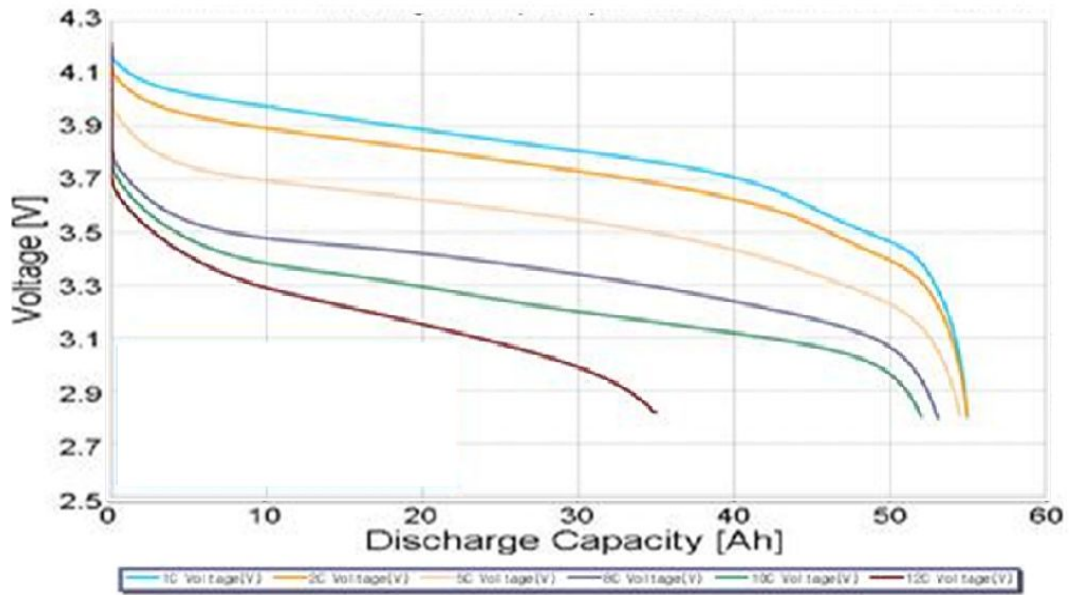


Fig. 25 Actual discharging curves of the 50Ah Li-ion battery

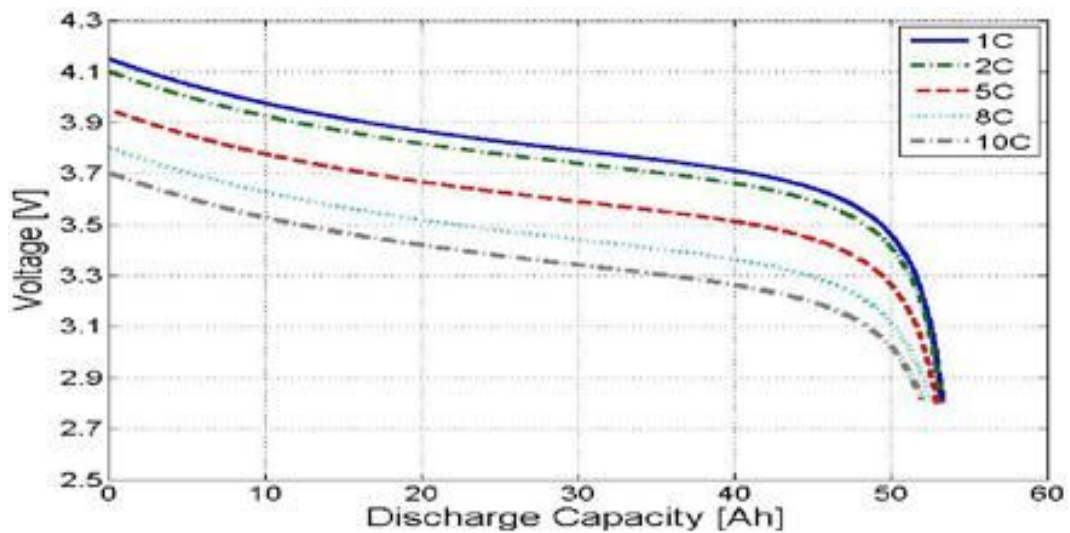


Fig. 26 Discharge curves of the modeling Li-ion battery

Fig. 27과 Fig. 28은 모델링 된 배터리를 컴퓨터 해석을 통해 1C와 5C로 충·방전 시뮬레이션을 했을 때의 전류와 잔존용량을 나타내고 있다. 이 결과들에서 보면 1C와 5C 충·방전에서 잔존용량에 따른 전압과 전류의 특성변화가 잘 추종되고 있음을 알 수 있다.

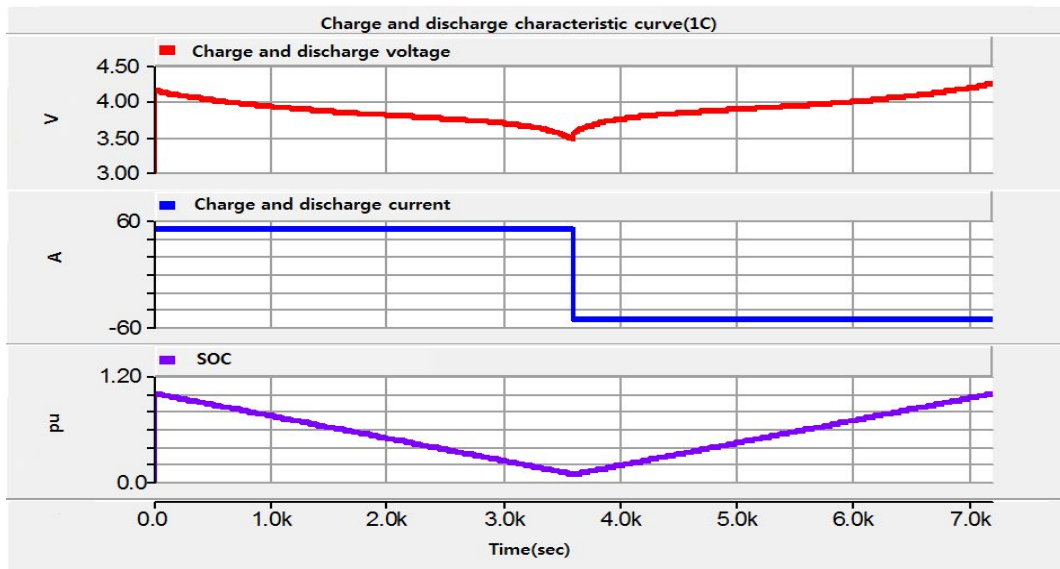


Fig. 27 Discharging/charging curves of the modeling Li-ion battery (1C-rate)

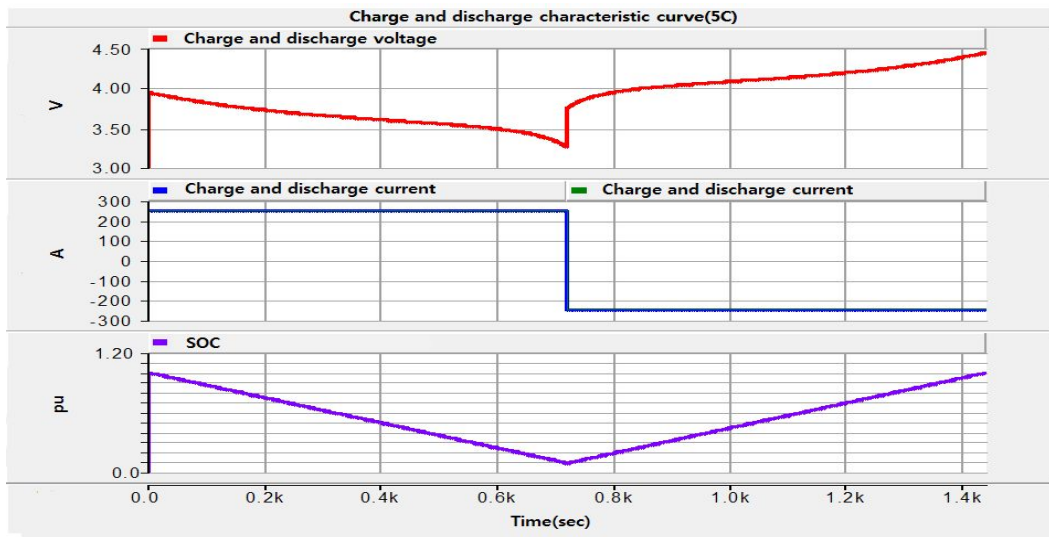


Fig. 28 Discharging/charging curves of the modeling Li-ion battery (5C-rate)

2) 슈퍼커패시터 모델링

(1) 슈퍼커패시터의 특징

슈퍼커패시터는 축전용량이 대단히 큰 커패시터로 초고용량 커패시터이다. 기존의 정전기식 또는 전해식과 구분해 전기화학식 커패시터이며 대표적으로 활성탄소를 전극재료로 사용하고 전기이중층 효과를 이용한 슈퍼커패시터를 (EDLC:Electrical Double Layer Capacitor)라 한다. 그 특징은 표면적이 큰 활성탄을 사용하여 유전체의 거리를 짧게 하여 소형으로 매우 큰 정전 용량을 얻을 수 있으며, 과충전, 과방전을 하여도 전지와 같이 수명에 영향을 주는 일이 없을 뿐만 아니라 환경성도 뛰어나다. 전자 부품으로서 땀납이 용의하므로 2차 전지와 같이 단락이나 접속 불안정이 일어나지 않는다. 종래의 전기 화학반응을 이용하는 2차전지에 비해, 슈퍼커패시터는 전하 자체를 물리적으로 축전하는 방법을 이용하고 있어 충·방전 시간의 조절이 가능하고, 긴 수명, 높은 에너지 밀도 등의 장점이 있다.

기존 2차 전지는 대용량의 에너지를 짧은 시간에 충전할 수 없으며, 충전 알고리즘에 의하여 정전류 충전에서 정전압충전으로 제어를 해주어야 한다. 또한 에너지의 방전에서도 20%의 얕은 방전을 해야 수명이 오래가고 80%의 깊은 방전은 그 수명을 짧게 만든다. 따라서 그 수명 사이클이 짧고 장시간 사용을 위해 항상 관리해야 하며, 충전된 100%를 쓸 수 없다는 에너지 사용 효율상의 단점과 공해물질 배출의 문제점을 가지고 있다. 현재 납축전지의 에너지 밀도는 40Wh/kg이고 슈퍼커패시터는 약 6Wh/kg으로 2차 전지에 비해 상당히 낮은 밀도를 가지고 있으나, 어느 정도의 내부 저항증가를 이용해 정전용량 밀도를 향상시키고, 충전과 방전을 하는 컨버터의 효율을 극대화함으로써 에너지 밀도를 극대화 할 수 있다.

슈퍼커패시터는 내부저항이 높을 수록 충전시간은 길어지지만, 슈퍼커패시터의 단점인 제한된 부피당 에너지 밀도를 높일 수 있다. 따라서 슈퍼커패시터는 10분에서 15분 정도의 충전으로 단시간용 전력 피크의 보상이나 몰입전류를 공급할 수 있으며, 2시간 정도의 충전으로 장시간 전력 보상을 할 수 있다. 정전압 충전의 경우 내부저항에 상관없이 약 50%의 효율을 보여주고 있으나, 내부저항 값에

따라 더 좋은 충전 효율도 얻을 수 있다. 기존의 배터리로 구현 불가능한 이와 같은 슈퍼커패시터의 특성으로 인하여 산업계 전반에 걸쳐 그 응용분야가 점차 확대되어 가고 있는 추세이다. 특히 전기자동차(EV: Electric Vehicle), 하이브리드 전기자동차(HEV: Hybrid Electric Vehicle) 또는 연료전지자동차(FCV: Fuel Cell Vehicle) 등과 같은 차세대 환경친화 차량개발분야에 있어 에너지 버퍼로써 슈퍼 커패시터의 효용성은 날로 증가하고 있다.

슈퍼커패시터는 잔존용량이 전압에 직접적으로 비례하는 전기에너지 저장매체로서 효율이 95%이상으로 차세대 고신뢰성 에너지 저장매체의 주요 기술이다. 또한, 고출력 펄스 파워 능력을 가지고, 소형경량의 고출력 전기·화학적 에너지 저장매체로써, 피크파워 부하 평준화용으로의 응용이 기대되며, 최근에는 2차 전지에 비하여 충·방전속도와 사이클 수명이 우수해, 2차 전지의 병용 및 대체 가능한 에너지 저장매체로 각광받고 있다.

본 논문에서 에너지저장시스템의 사용목적으로 풍력발전단지의 계통탈락에 의한 계통영향을 줄이고자 한다. 이를 위해 배터리만을 사용하여 에너지저장시스템을 구성하는 경우 배터리의 순간 출력 용량한계 및 과도한 C-rate에 의해 배터리의 성능저하가 우려되며 높은 출력을 발생시키기 위해 더 많은 배터리를 직·병렬 연결하여 배터리 에너지저장시스템을 구성하는 경우 설치 할 공간 및 무게, 비용에 대한 부담이 높아진다.

따라서 슈퍼커패시터를 하이브리드 구성하여 에너지저장시스템을 구성하면 상기 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다[26]. 또한 슈퍼커패시터는 다른 에너지 저장장치보다 더 적은 내부 저항을 갖고 있고 충·방전 시 전해액의 화학적 반응이 일어나지 않으므로 급속하고 높은 출력을 발생시키는데 유리하다[27].

(2) 슈퍼커패시터 수학적 모델

Fig. 29에는 일반적인 커패시터 모델링으로서, 슈퍼커패시터의 동특성을 표현할 수 있는 테브낭 전기회로를 이용하여 모델링 하였다. 슈퍼커패시터의 등가직렬저항(ESR: equivalent series resistance)은 슈퍼커패시터와 직렬로 연결된 저항으로써 충·방전 발생되는 에너지 손실 및 전압강하에 관여된다. 이는 방전되는 전류에 따라 슈퍼커패시터의 전압상태를 동적으로 표현하기 위해 필요하다. R은

자기방전저항을 나타내고 있으며, 이 값은 항상 ESR보다 크고, 자기방전에 관여하여 충전 후 자연 방전되는 기능을 표현할 수 있다. 커패시턴스 C는 슈퍼커패시터의 정전용량을 나타내며 슈퍼커패시터의 저장용량에 직접적으로 관여한다. 또한 커패시턴스는 자기방전저항과 병렬로 연결되어 있다[28].

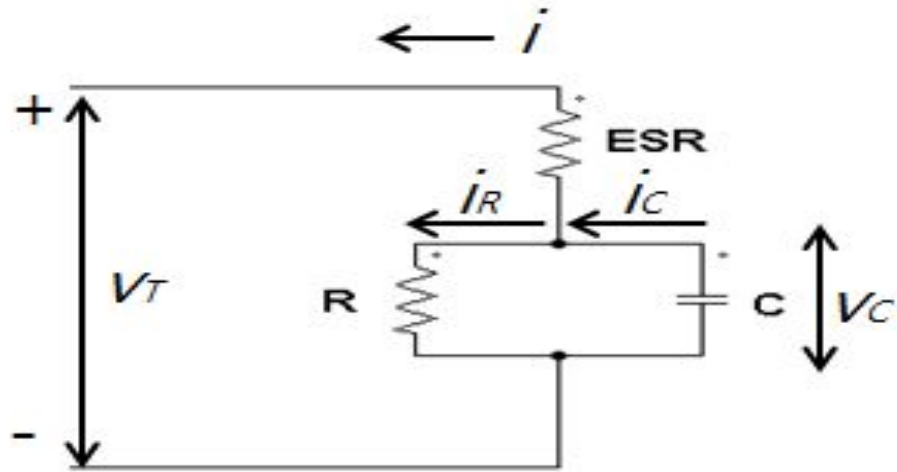


Fig. 29 Equivalent circuit model of the EDLC

커패시터의 전압과 전류의 관계는 다음 식(14)과 같다.

$$V_c = V_T + iR_{ESR} = \frac{1}{C} \int i_c dt = \frac{1}{C} \int (i + i_R) dt \quad (14)$$

전류와 전하의 관계에서 전하량 q 는 식(15)와 같다.

$$q = \int i dt \quad (15)$$

커패시터에 충전되는 전하량 q는 식(16)과 같다.

$$q = Cv \quad (16)$$

식(16)을 이용하여 다음과 같이 캐패시턴스를 구할 수 있다.

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta v} \quad (17)$$

캐패시터와 직렬로 연결된 저항 ESR을 구하는 식은 다음과 같다.

$$ESR = \frac{\Delta v}{i} \quad (18)$$

(3) PSCAD/EMTDC 등가 모델

PSCAD/EMTDC 컴퓨터 해석 프로그램을 이용하여 Fig. 29 등가모델에 대해 식 (14)의 슈퍼커패시터의 모델링을 Fig. 30에 나타내었으며, 등가모델의 출력 전압을 계산하여 전압소스에 지령함으로써 슈퍼커패시터의 출력전압이 표현되고 있다. 또한 내부저항이 등가화 되어 삽입되어 있고 잔존용량을 계산하는 회로가 포함되어 있다.

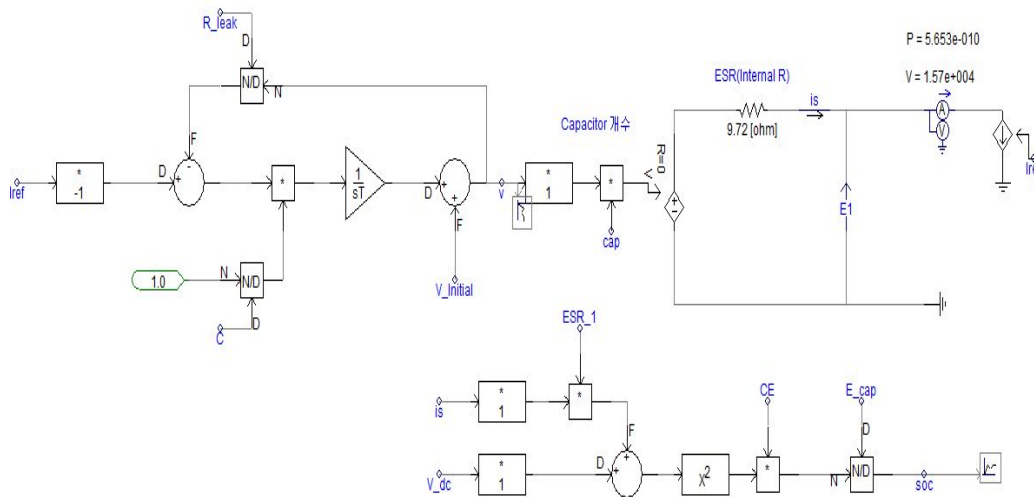


Fig. 30 Modeling of EDLC with the PSCAD/EMTDC

(4) 슈퍼커패시터 컴퓨터 해석

Fig. 31과 Fig. 32는 본 논문에서 사용된 A사의 슈퍼커패시터의 실제 방전 그래프와 PSCAD/EMTDC 프로그램으로 100A에서 1000A까지 전류 방전 시뮬레이션 결과이다. 이 결과에서 보면 두 결과가 거의 일치함을 알 수 있어 슈퍼커패시터 모델링은 양호하게 되었음을 알 수 있다.

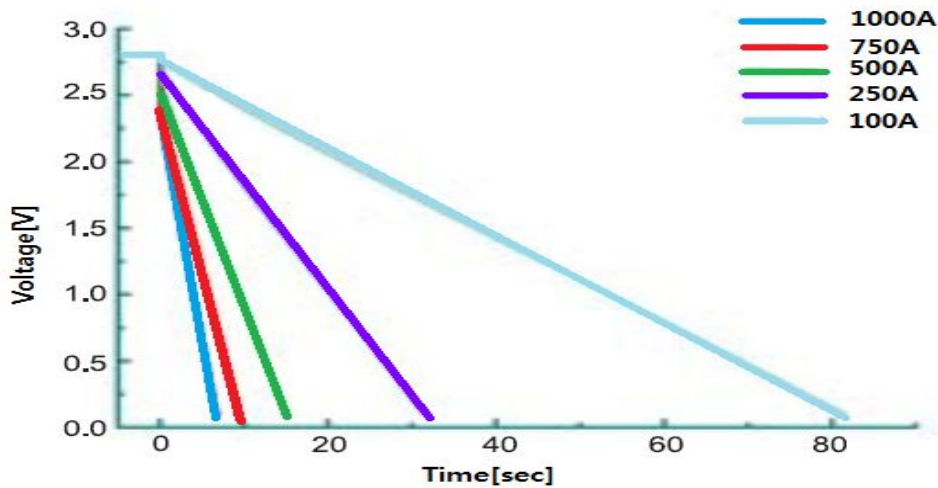


Fig. 31 Actual discharging curves of the EDLC

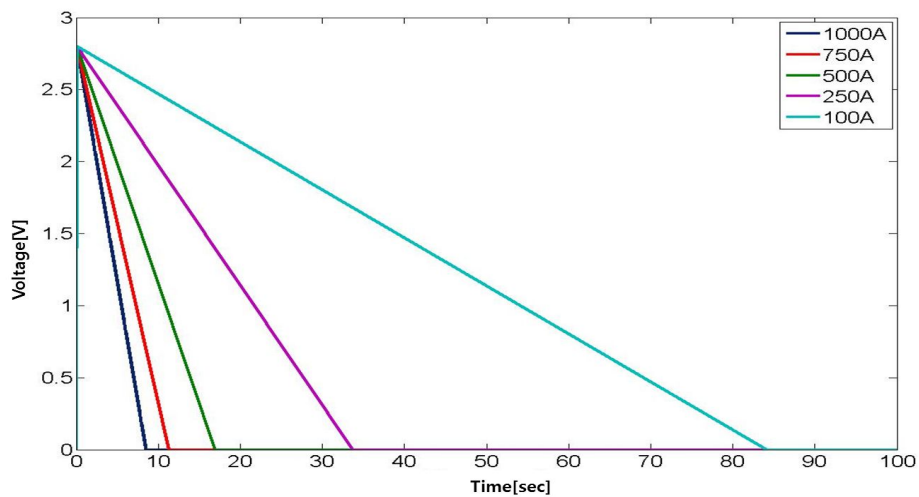


Fig. 32 Discharging curves of the modeling EDLC

3) 제어기 모델링

Fig. 33에서 에너지저장시스템이 적용된 풍력발전단지를 표현하였으며, 풍력발전단지의 출력 안정화 제어는 시시각각 변화하는 풍력발전단지 출력을 평활화한 합성출력의 목표치를 주고 그것을 추종하도록 에너지저장시스템의 출력을 제어하는 것이다. 에너지저장시스템에 요구되는 출력은 식(19)에 의해 주어지고 에너지저장시스템의 출력 요구 값에 대하여 에너지저장시스템이 완벽하게 대응한다면, 실제의 합성출력은 합성출력 목표치를 추종하게 된다. 이러한 출력 안정화를 실현하기 위해서 본 논문에서는 출력 평활화 제어와 잔존용량 피드백제어를 사용하였다.

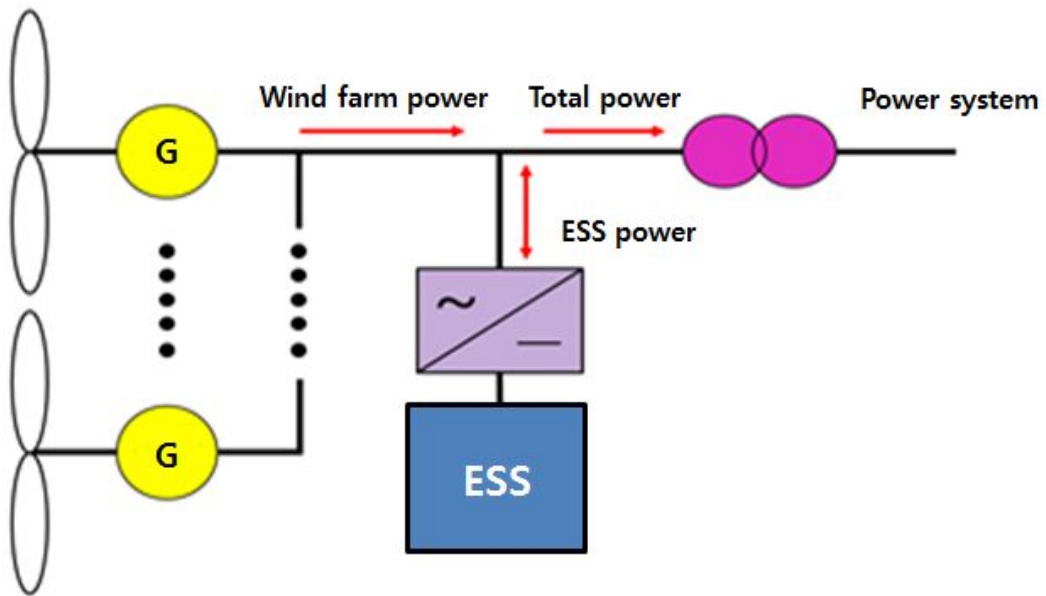


Fig. 33 Configuration of the ESS in the wind farm

$$P_{ESS} = P_{ref} - P_{windfarm} \quad [W] \quad (19)$$

여기서, P_{ESS} : 에너지저장시스템 출력 [W]

P_{ref} : 합성출력 목표치 [W]

$P_{windfarm}$: 풍력단지 출력 [W]

(1) 출력 평활화 제어

출력 평활화 제어의 목적은 배터리 에너지저장시스템을 이용하여 풍력발전단지 출력변동을 평활화 하는 것이다. Fig. 34와 같이 풍력발전단지 출력으로부터 합성출력 목표치를 구하고 그 합성출력 목표치와 풍력발전단지 출력의 차이를 에너지저장시스템으로 보상하는 방법이다. 합성출력 목표치는 평활화를 위한 1차 지연요소의 시정수 T 에 따라 평활화 특성이 나타나게 된다.

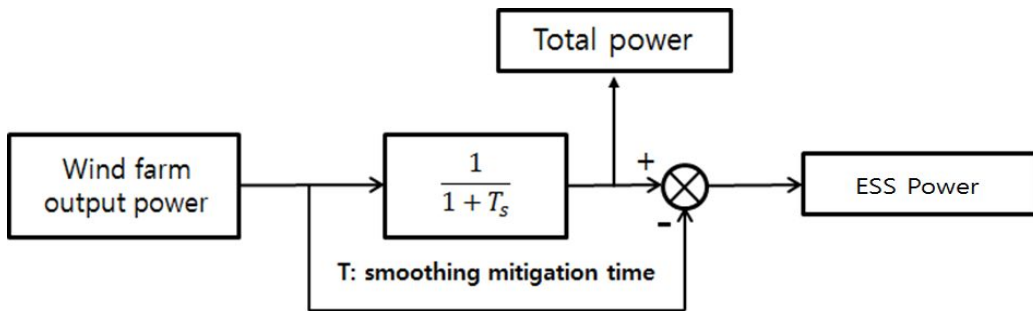


Fig. 34 Block diagram of power smoothing control

Fig. 35는 평활화 시정수 T 와 합성출력과의 관계를 나타내고 있다. 시정수 T 가 커지는 것에 따라 평활화 효과가 커지게 되나 T 를 너무 크게 하여 제어출력이 에너지저장시스템의 용량을 넘게 된다면 평활화의 효과가 떨어질 수 있다.

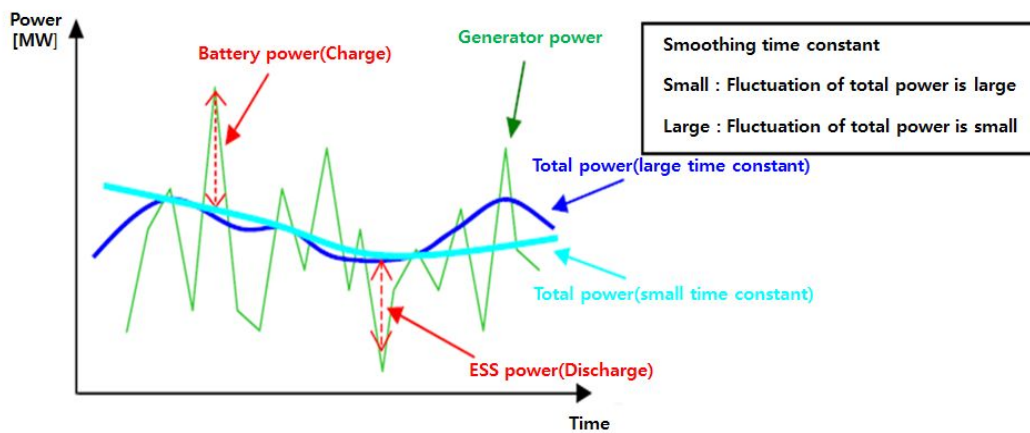


Fig. 35 Smoothing effect on different time constants

(2) 잔존용량 피드백 제어

출력 평활화 제어에서 1차 지연요소의 시정수 T 를 크게 했을 경우, 에너지 저장시스템의 용량 상·하한에 이르기 쉬워지고 또한 운전 을 계속하고 있는 동안 자기 방전에 의해 에너지저장시스템이 완전방전되는 경우가 있을 수 있기 때문에 이러한 문제를 해결할 수 있도록 에너지저장시스템의 용량을 유효하게 활용하기 위해서는 잔존용량 피드백 제어를 수행 할 필요가 있다.

잔존용량 피드백 제어는 배터리의 잔존용량과 합성출력 목표치를 검출하고, 에너지저장시스템에 대해서 풍력발전단지 출력에 대응한 보충전·보방전을 실시하는 것으로 배터리의 충전 레벨을 적절한 범위에서 유지하는 것을 목적으로 제어기를 구성한다[29].

Fig. 36은 잔존용량을 계산하기 위한 제어기이며, 합성출력과 풍력발전출력을 이용하여 에너지저장시스템의 출력을 계산하고 에너지저장시스템의 전류 누적량을 기존 잔유용량에서 가·감하여 에너지 저장장치의 잔존용량을 계산하게 된다.

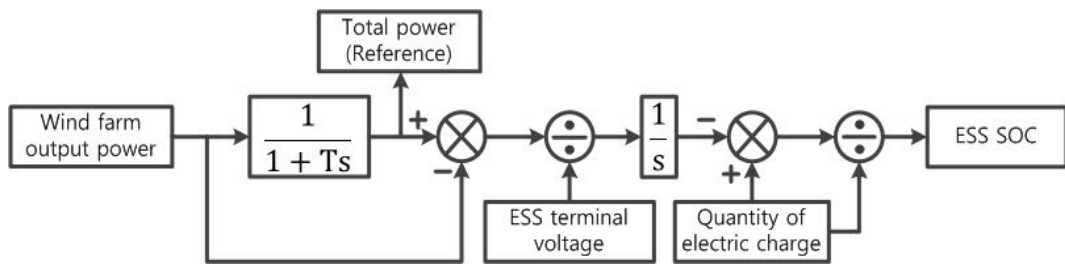


Fig. 36 Block diagram of SOC & power reference

Fig. 37은 잔존용량 피드백 제어의 블럭도를 나타낸 것으로 출력 평활화 제어를 하기 위해 만들어지는 출력 요구치를 규격화 하여 잔존용량과 비교한 값으로 합성출력 목표치를 수정하게 된다. 이는 일정한 잔존용량을 일정 범위 내에 추종하도록 만드는 제어기로서 적절한 잔존용량 범위 내에서 보충전·보방전을 가능하게 한다.

잔존용량 피드백 제어의 2가지 파라미터 가운데 첫 번째인 용량 피드백 계인으로 식(20)으로 표현되는 합성출력 목표치 보정량의 크기를 정하는 정수이다. 충전 레벨의 유지를 도모하기 위해서는 큰 값으로 설정하는 편이 좋다. 두 번째

파라미터인 마진은 식(21)로 정의되며 에너지저장시스템의 충전 레벨을 안전한 범위에 두게 하기 위한 정수이다. 충전 레벨의 유지를 우선하는 경우에는 큰 편이 좋으나 어느 한쪽이 너무 크면 출력의 평활화가 출력 목표치에서 벗어나는 문제가 생길 수 있다[30].

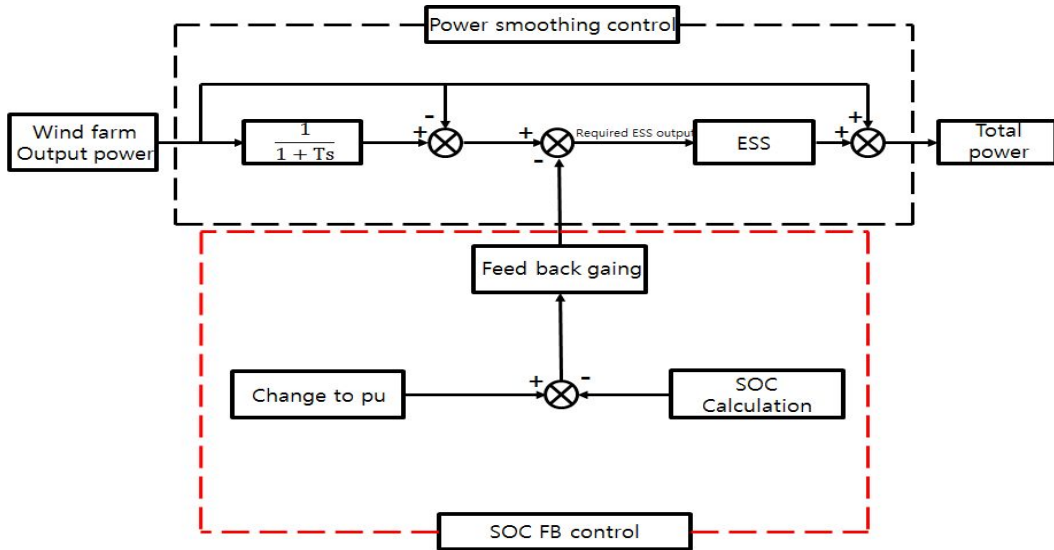


Fig. 37 Block diagram of the SOC control

$$\alpha = (C_{ESS} - 2MC_{ESS}) / TP_{WF} \quad (20)$$

$$offset = MC_{ESS} \quad (21)$$

- 여기서, α : 잔존용량 피드백 제어 이득
 $offset$: 잔존용량 피드백 제어 마진
 C_{ESS} : 에너지저장시스템 용량 [MWh]
 M : 여유분 [p.u]
 T : 시정수 [sec]
 P_{WF} : 풍력발전단지의 정격용량 [MW]

2. 에너지저장시스템 용량산정

1) 에너지저장시스템의 용량산정 방법

(1) 평활화용 에너지저장시스템 용량산정

풍력발전단지의 풍속자원은 고유하며 출력변동폭 역시 고유한 범위를 갖는다. 이러한 특성 때문에 풍력발전단지의 출력변동 완화를 위해서는 풍력발전단지의 실제 출력데이터를 이용한 확률분포에 따른 최대 출력변동량 분석이 필요하다. 이때 기준이 되는 평가시간에 따라 출력변동량에 대한 평가차이가 발생하므로, 적합한 근거에 따라 평가시간에 대한 결정이 필요하다. 이를 위해 풍력발전단지 1년 출력데이터 중 최대 출력변동을 나타내는 상위 5일을 샘플링하여 최대 출력변동 평가시간을 결정하였다.

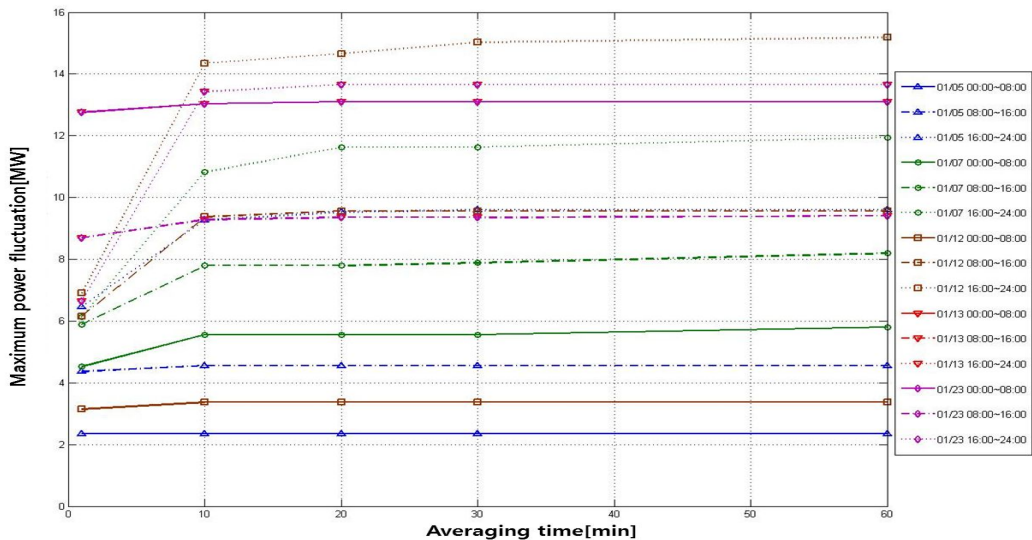


Fig. 38 Maximum power fluctuation every averaging time

Fig. 38은 앞서 기술한 최대 출력변동을 나타내는 상위 5일의 풍력발전단지 출력데이터를 8시간씩 분할하여 평가시간에 따른 최대 출력변동을 나타낸 그래프이

다. 그래프에서 알 수 있듯이 20분 출력변동 이상은 크게 변화가 없으며 최대 출력변동을 확인할 수 있는 출력변동 평가시간은 20분임을 알 수 있다. 이를 이용하여 풍력발전단지 평활화를 위한 최대 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_SM_max}$)을 계산하면 식(22)와 같다. 이는 Fig. 39와 같이 풍력발전단지 출력이 0MW에서 정격출력으로 스텝 변화한 최악의 조건을 고려한 에너지저장시스템의 용량산정이며 평가시간에 대한 정격출력의 면적을 보상하기 위한 최대용량으로 표현된다[31].

$$C_{ESS_SM_max} = \frac{\text{단지용량} \cdot \text{최대출력변동 평가시간}}{2} \quad [MWh] \quad (22)$$

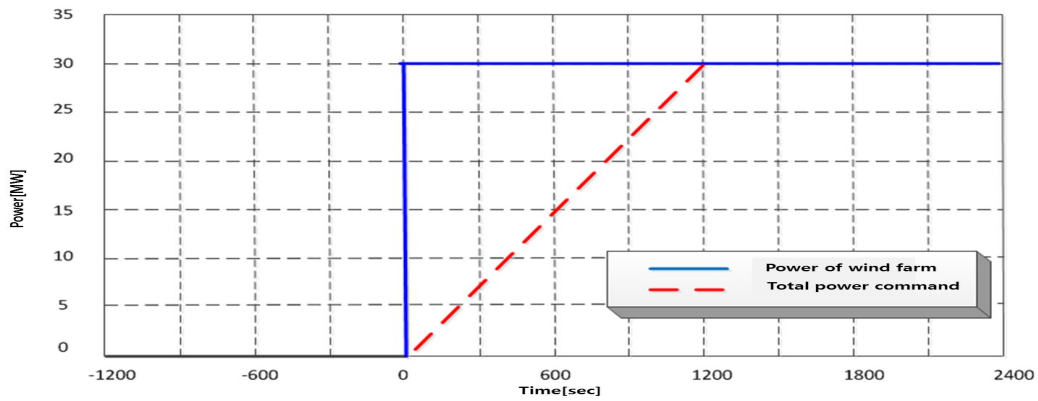


Fig. 39 ESS capacity for the power compensation

식(22)에 의한 풍력발전단지 출력 평활화를 위한 최대 에너지저장시스템의 용량은 최악의 상황을 고려한 용량이며 출력 평활화를 위한 에너지저장시스템의 경제적 용량은 아니다. 출력 평활화를 목적으로 하는 경제적인 에너지저장시스템의 용량을 구하기 위해서는 Fig. 40과 같이 발전단지 출력을 출력변동 평가시간인 20분 간격으로 확률분포를 구하여 식(23)과 같이 출력 평활화를 위한 최소 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_SM_min}$)을 계산하여야 한다. Fig. 40과 같은 상황에서는 21MW 풍력발전단지의 0.2 pu 사이의 변동량만 존재하므로 식(23)에 의해 $C_{ESS_SM_min}$ 는 4.2MW가 된다.

$$C_{ESS_SM_min} = \text{확률분포변동량} \cdot \text{최대출력변동 평가시간} \quad [MWh] \quad (23)$$

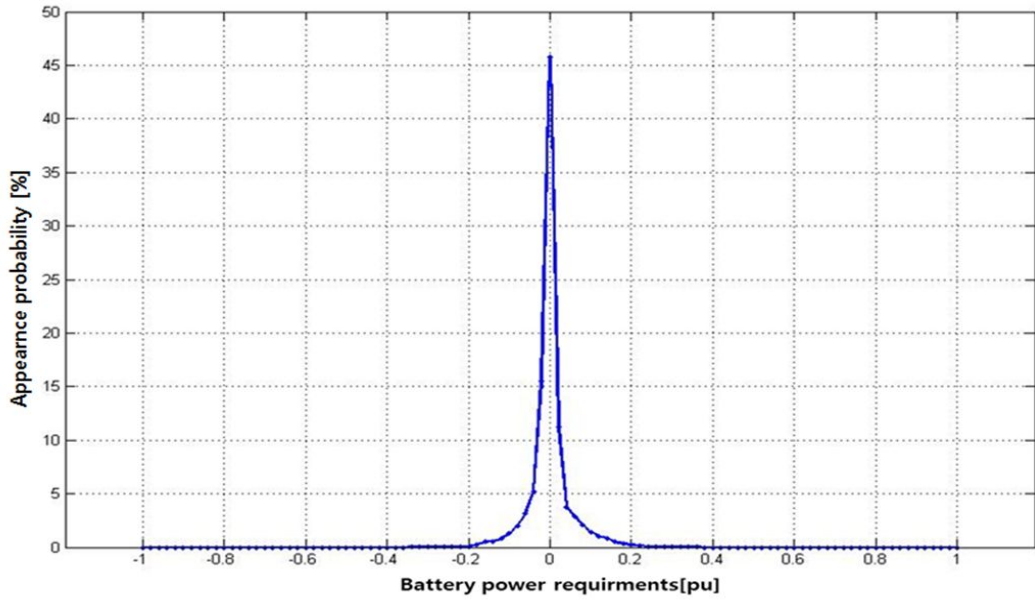


Fig. 40 Probability distribution curve of the power fluctuation of wind farm

(2) 풍력발전단지 계통탈락을 고려한 에너지저장시스템 용량산정

대규모 풍력발전단지가 정상운전 중 외부적 혹은 내부적인 문제로 계통에서 탈락하게 될 경우 다른 발전기 전원이 탈락된 풍력발전단지 만큼의 출력을 보상하기 위해서 일반적으로 수초에서 수분 정도의 시간이 소요되며 제주계통의 경우 앞서 기술한대로 순간적인 주파수 변동이 우려된다. 따라서 제주계통의 경우 남제주 화력발전소의 두 100MW 터빈발전기의 증·감발 출력 값인 10MW/min을 기준으로 제주도내 분산전원의 출력변동을 제한하고 있다. 발전단지 탈락 시 계통 출력 안정화를 위한 최소 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_DG_min}$)은 식(24)와 같으며 Fig. 41의 면적에 해당하는 에너지량이 된다. 여기서 P_{WF} 는 단지의 용량, 식(25)로 표현되는 T_{op} 는 단지가 최대 출력에서부터 방전하였을 때 분당 10MW에 기울기를 유지할 수 있는 에너지저장시스템의 운전시간을 나타낸다.

$$C_{ESS_DG_min} = \frac{P_{WF} \cdot T_{op}}{2} [MWh] \quad (24)$$

$$T_{op} = \frac{P_{WF}/10}{60} [h] \quad (25)$$

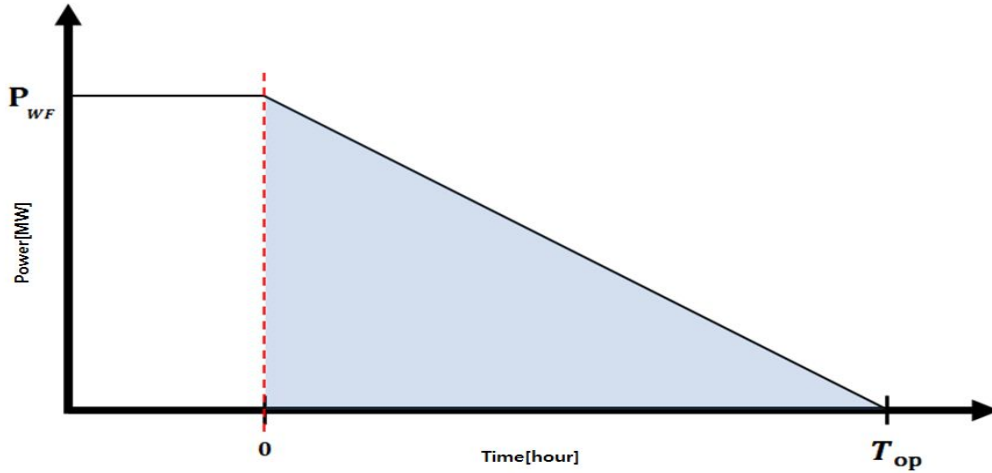


Fig. 41 Minimum capacity of the ESS
for disconnecting the wind farm from the grid

식(24)에 식(25)를 대입하면 식(26)과 같이 단지탈락 시 최소 에너지저장시스템의 용량은 풍력발전단지 용량의 제곱에 비례하게 된다. 풍력발전단지가 정격출력 도중 계통에서 탈락하였을 경우만 고려하여 에너지저장시스템의 용량을 산정할 경우 에너지 저장매체의 에너지용량 대비 최대방전 전류의 배수($C-rate_{max}$)는 식(27)과 같이 단지의 정격 출력인 P_{WF} 에서 단지탈락 시 최소 에너지저장시스템의 용량($C_{ESS_DG_min}$)을 나눈 값과 같게 된다.

$$C_{ESS_DG_min} = \frac{P_{WF}^2}{1200} \quad (26)$$

$$C-rate_{max} = \frac{P_{WF}}{C_{ESS_DG_min}} = \frac{1200}{P_{WF}} \quad (27)$$

에너지저장시스템의 에너지 저장매체로 리튬이온 배터리 적용을 가정하였으므

로 리튬이온 배터리 특성을 고려하면, 5C 이상의 C-rate으로 수분 동안 충·방전할 경우 전기화학적 작용에 무리가 발생하여 에너지저장시스템의 수명이 단축될 우려가 있다. 따라서 식(28)과 같이 P_{WF} 가 240MW 이상이 되지 않을 경우에는 배터리의 수명과 계통탈락을 고려한 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_DG_bat}$)은 풍력 발전단지 정격출력의 20%로 고정하는 것이 효과적이다.

$$C_{ESS_DG_bat} = \begin{cases} 0.2P_{WF} & (P_{WF} < 240MW) \\ C_{ESS_DG_min} = \frac{P_{WF}^2}{1200} & (P_{WF} \geq 240MW) \end{cases} \quad (28)$$

(3) 배터리만으로 구성된 에너지저장시스템의 용량산정 및 제어기 설정
 앞서 본 논문에서는 세 가지 주요한 에너지저장시스템의 용량을 계산하였다. 첫 번째는 출력 평활화를 위한 최소 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_SM_min}$)이고, 두 번째는 발전단지 탈락 시 계통 출력 안정화를 위한 최소 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_DG_min}$)이다. 마지막으로 배터리의 C-rate를 고려한 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_DG_bat}$)이다. 풍력발전단지 출력 안정화를 위하여 세 가지 요소에 대한 유기적인 고려가 필요하다. 따라서 풍력발전단지의 안정적 운전을 위해서 잔존용량 0.2부터 0.8 구간에서 에너지저장시스템을 운전한다고 가정하여, 단순하게 구성하면 전체 에너지저장시스템 용량(C_{ESS_Total})은 식(29)로 표현되며 식(30)과 식(31)에 의해 에너지저장시스템의 여유용량(C_{ESS_Margin})을 40%로 결정하게 된다. Fig. 42로 잔존용량에 따른 전체 에너지 구성이 설명될 수 있다.

$$C_{ESS_Total} = C_{ESS_SM_min} + C_{ESS_DG_min} + C_{ESS_Margin} \quad (29)$$

$$\frac{(C_{ESS_SM_min} + C_{ESS_DG_min})}{C_{ESS_Total}} = 0.6 \quad (30)$$

$$C_{ESS_Margin} = \frac{0.4}{0.6}(C_{ESS_SM_min} + C_{ESS_DG_min}) \quad (31)$$

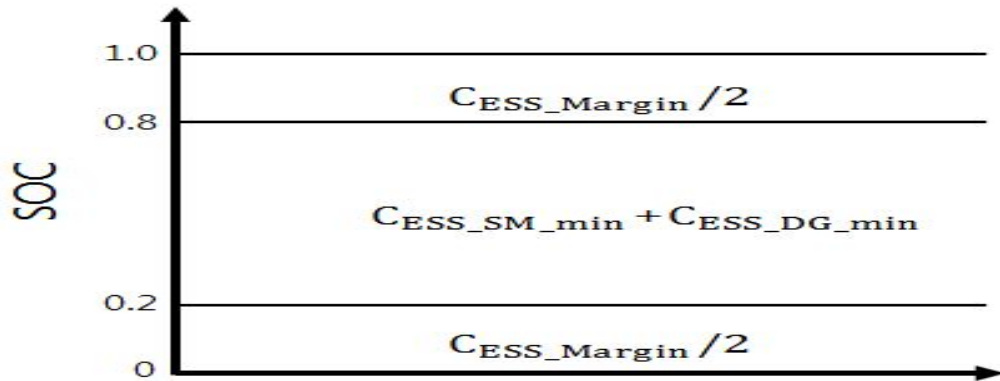


Fig. 42 SOC region for the ESS

그러나 식(28)에 기술한 C-rate를 고려한 배터리 용량($C_{ESS_DG_bat}$)이 단지용량의 20%로 결정되는 상황 즉 $P_{WF} < 240MW$ 일 때 식(32)와 같은 상황에 따라 최종 에너지저장시스템의 용량(C_{ESS_Total})이 결정된다. 이는 제주계통 풍력발전단지의 경우 대부분 240MW 이하이며 출력 평활화를 위한 최소 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_SM_min}$)이 상대적으로 작게 되고 계통탈락을 고려한 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_DG_bat}$)이 큰 경우 $C_{ESS_DG_bat} \geq (C_{ESS_SM_min} + C_{ESS_DG_min})/0.6$ 을 만족한다.

$$C_{ESS_Total} = \begin{cases} C_{ESS_DG_bat} & (C_{ESS_DG_bat} \geq (C_{ESS_SM_min} + C_{ESS_DG_min})/0.6) \\ C_{ESS_SM_min} + C_{ESS_DG_min} + C_{ESS_Margin} & (else) \end{cases} \quad (32)$$

잔존용량 피드백 제어를 위해 식(20)과 식(21)을 이용 식(33)과 식(34)를 계산하여 α 와 offset을 계산한다. 이때 에너지저장시스템 용량 $C_{ESS} = C_{ESS_Total}$, 잔존용량 제어가 0.2부터 0.8사이에서 이루어지고 있으므로 마진M=0.2, 평활화 시정수 T는 최대출력변동 평가시간을 초로 환산하여 기입하고 단지의 정격용량 P_{WF} 를 적용하여 계산한다.

$$\alpha = (C_{ESS_Total} - 2C_{ESS_Total} \cdot 0.2) / (T \cdot P_{WF}) \quad (33)$$

$$offset = M \cdot C_{ESS_Total} \quad (34)$$

(4) 하이브리드 에너지저장시스템의 용량산정

앞서 리튬이온 배터리만을 이용하여 에너지저장시스템을 구성함에 있어 제주 계통의 풍력발전단지 대부분이 30MW 이하의 용량이며 단지가 커질수록 단지를 구성하는 여러 풍력발전기의 기계관성에 의해 기계적 출력 평활화가 이뤄지며 출력변동은 작아지게 된다. 따라서 에너지저장시스템은 풍력발전단지 출력 평활화를 위한 목적보다는 발전단지 탈락 시 계통영향을 줄이기 위한 필요성이 중요하게 되며 대부분의 풍력발전단지는 240MW 이하이므로 식(28)에 의해 풍력발전단지 정격용량(P_{WF})의 20%의 단지 용량을 선정하게 된다. 이는 출력 평활화를 위한 에너지저장시스템의 용량과 비교하여 발전단지 탈락 시 계통영향을 줄이기 위해 필요이상으로 용량이 증가하게 되는 문제점이 발생하게 된다. 이를 줄이기 위해 Fig. 43과 같이 슈퍼커패시터와 배터리로 구성된 하이브리드 에너지저장시스템을 제안하고 그에 따른 용량 계산을 하고자 한다.

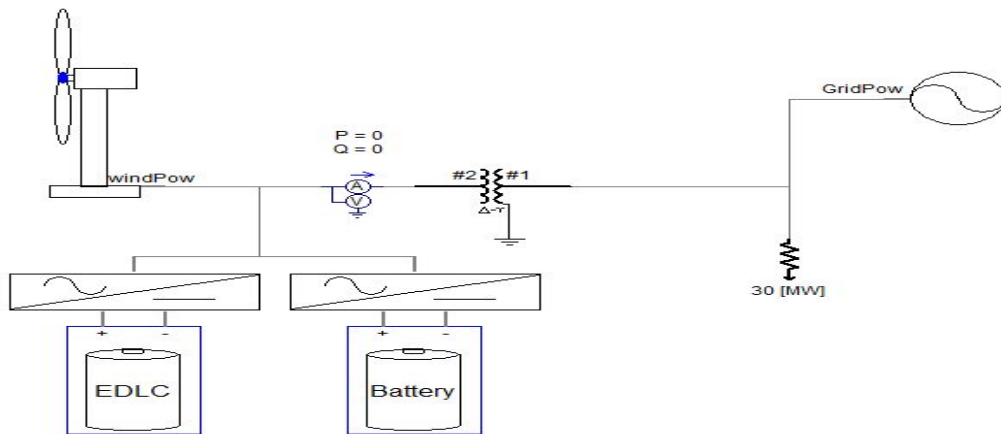


Fig. 43 Schematic diagram of the HESS

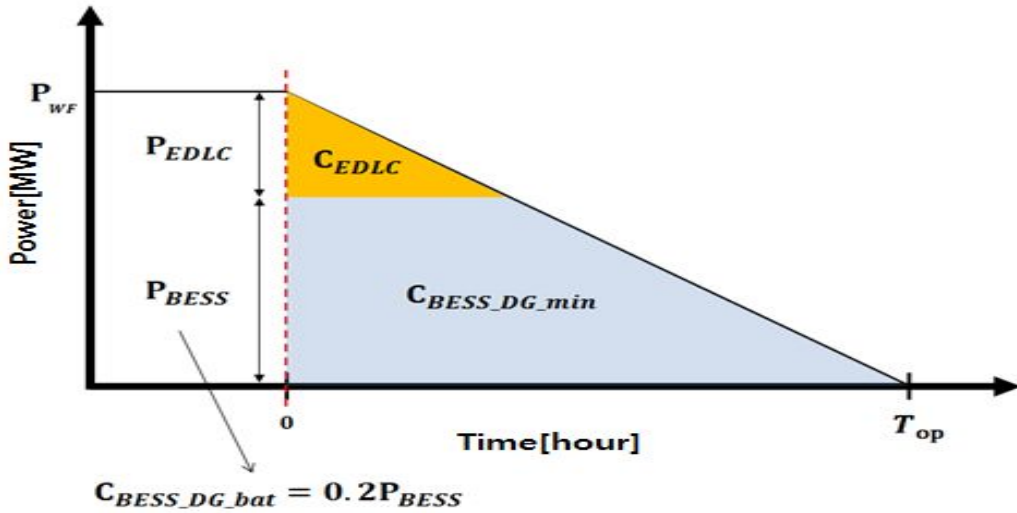


Fig. 44 Capacity of HESS for disconnecting the wind farm from the grid

Fig. 44는 풍력발전단지가 계통탈락 시 하이브리드 에너지 저장장치의 보상에너지 영역을 그림으로 나타낸 것이며 슈퍼커패시터의 특성상 용량은 작으나 높은 순간 출력이 가능함을 이용하여 배터리의 용량을 줄이고자 한다. 따라서 슈퍼커패시터의 용량(C_{EDLC})은 식(35)에 의해 결정되며 식(25)의 T_{op} 를 대입함에 따라 단순히 슈퍼커패시터의 출력량(P_{EDLC})으로 결정된다. 또한 식(36)에 의해 계통탈락을 고려한 배터리용량($C_{BESS_DG_min}$)이 결정되고 이때 배터리의 출력 (P_{BESS})은 식(37)에 의해 결정되게 된다. 결국 제주계통 풍력발전단지에 적용될 수 있는 하이브리드 에너지저장시스템의 배터리용량($C_{BESS_DG_bat}$)은 식(38)에 의해 결정된다.

$$C_{EDLC} = \frac{1}{2} \times P_{EDLC} \times T_{op} \frac{P_{EDLC}}{P_{WF}} = \frac{P_{EDLC}^2}{1200} \quad (35)$$

$$C_{BESS_DG_min} = \frac{P_{WF}^2 - P_{EDLC}^2}{1200} \quad (36)$$

$$P_{BESS} = P_{WF} - P_{EDLC} \quad (37)$$

$$C_{BESS_DG_bat} = \begin{cases} 0.2P_{BESS} & (P_{BESS} < 240MW) \\ C_{BESS_DG_min} = \frac{P_{WF}^2 - P_{EDLC}^2}{1200} & (P_{BESS} \geq 240MW) \end{cases} \quad (38)$$

수식(35)~(38)에서 풍력발전단지 정격출력(P_{WF})은 고정된 상수값이므로 슈퍼커패시터의 출력량(P_{EDLC})을 결정함으로써 모든 값이 결정된다. 따라서 슈퍼커패시터의 출력량 결정이 하이브리드 에너지저장시스템의 배터리의 용량 결정에 주요한 요인이 된다.

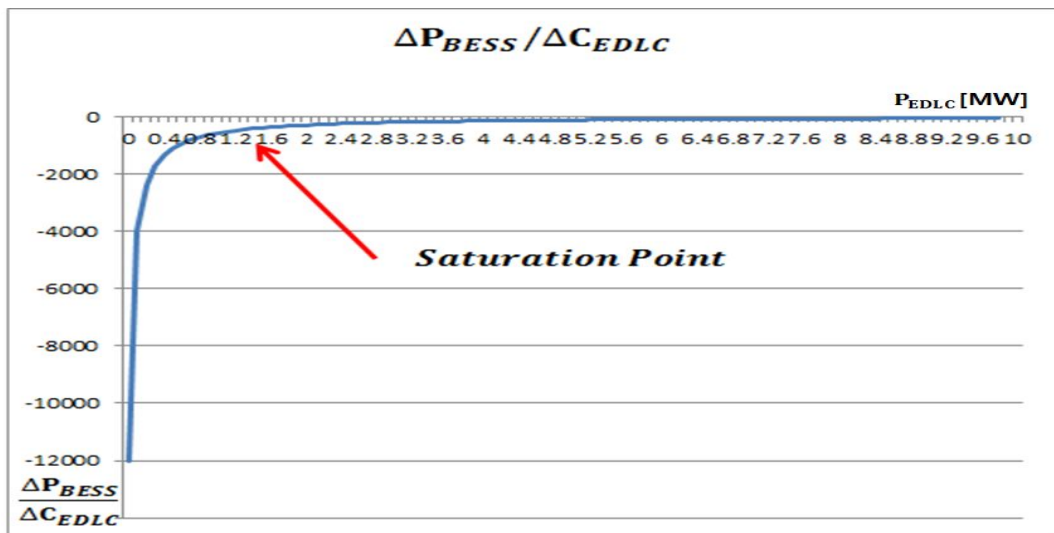


Fig. 45 Saturation point of $\Delta P_{BESS} / \Delta C_{EDLC}$

본 논문에서는 Fig. 45와 같이 0.1MW 단위로 슈퍼커패시터의 출력량(P_{EDLC})을 변경하면서 슈퍼커패시터 용량 증가량(ΔC_{EDLC}) 대비 배터리의 출력 감소량(ΔP_{BESS})을 비교하여 슈퍼커패시터 용량을 증가시킴에 따른 배터리의 용량 감소율이 포화되는 시점을 기준으로 슈퍼커패시터의 출력량(P_{EDLC})를 결정하였다.

2) 풍력발전단지별 에너지저장시스템 용량산정

(1) 행원풍력발전단지

가. 배터리만으로 구성된 에너지저장시스템의 용량산정 및 제어기 설정

본 논문에서 활용한 데이터는 2009년 3월부터 2010년 2월까지 행원풍력발전단지의 출력데이터이며, 그 당시 행원풍력발전단지는 225kW 1기, 600kW 4기, 660kW 5기, 750kW 5기 총 9.8MW의 설비용량을 가지고 운전되었다.

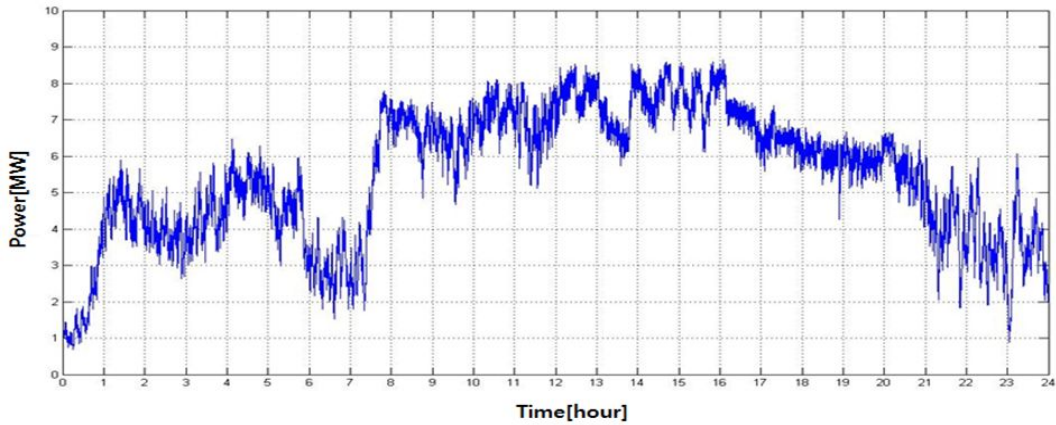


Fig. 46 Power output of the Haengwon wind farm (2009.12.03)

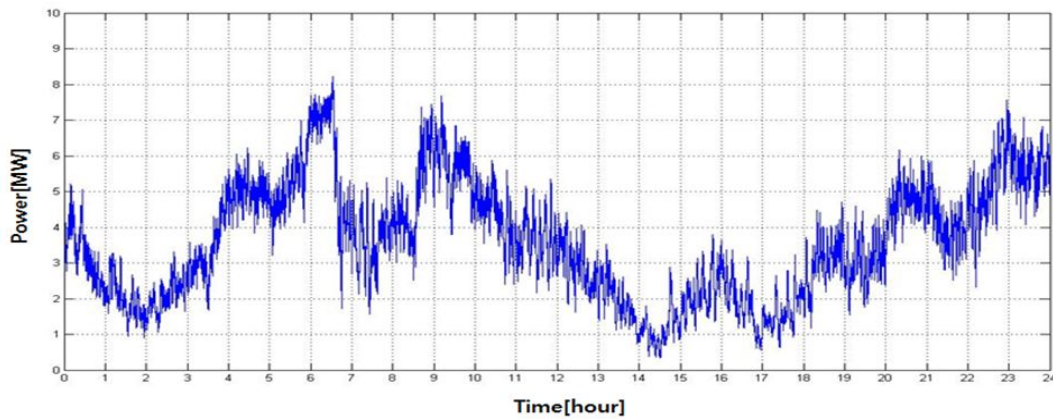


Fig. 47 Power output of the Haengwon wind farm (2009.12.15)

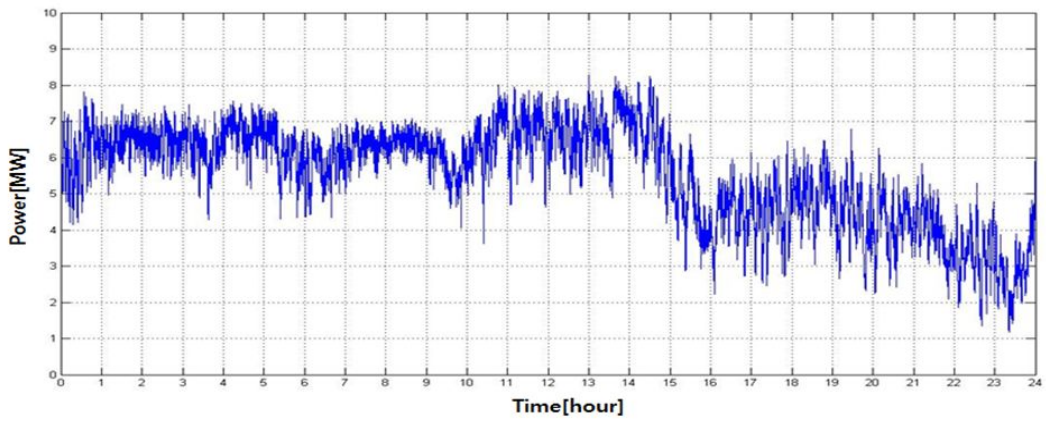


Fig. 48 Power output of the Haengwon wind farm (2009.12.16)

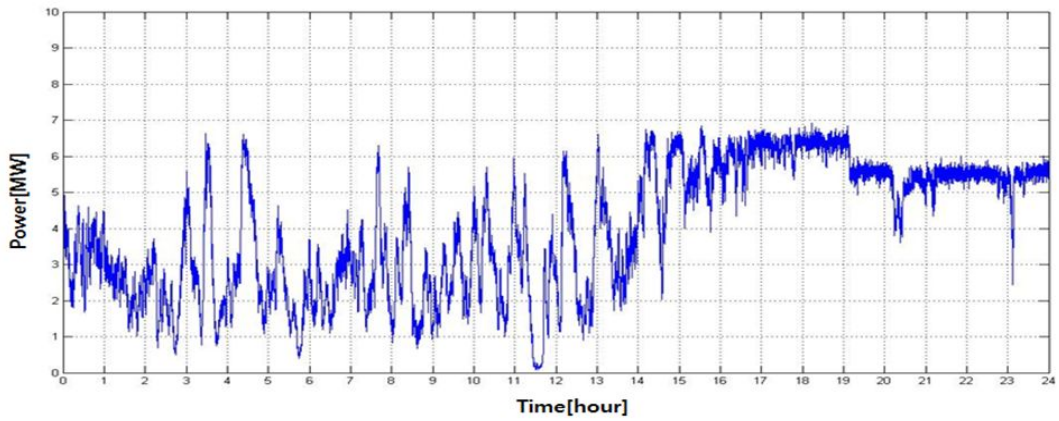


Fig. 49 Power output of the Haengwon wind farm (2009.12.17)

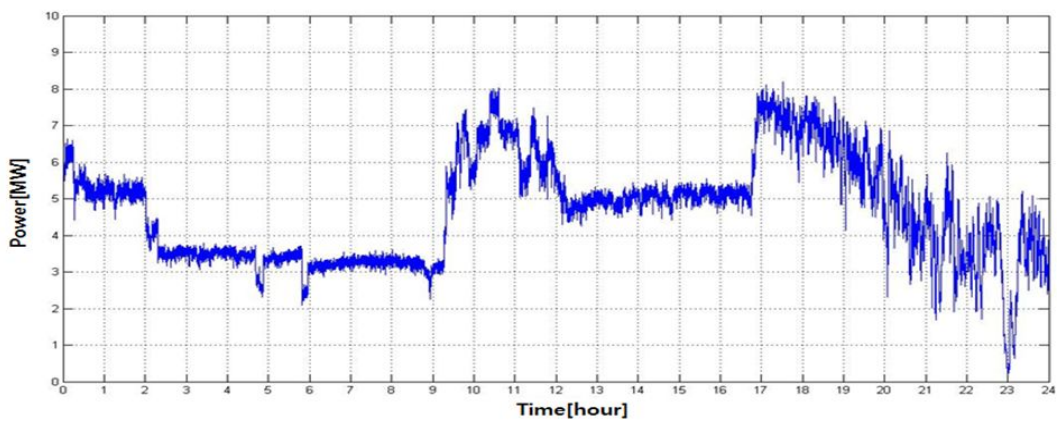


Fig. 50 Power output of the Haengwon wind farm (2009.12.31)

Fig. 46부터 Fig. 50은 해당 분석기간 중 하루 출력변동이 심한 5일을 택하여 2초 간격으로 24시간의 출력을 나타낸 그래프이다.

상기 데이터를 활용, 단지출력 평활화를 위한 배터리 용량을 산정하기 위하여 Fig. 51과 같이 평가시간 변동에 따른 최대 출력변동 그래프를 작성하여 분석한 결과 30분 후의 출력변동은 거의 변화가 없었다. 따라서 30분을 최대 출력변동을 확인할 수 있는 출력변동 평가시간으로 결정하였고 이에 따라 식(39)를 계산하면 다음과 같이 최대 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_SM_max}$)이 계산된다.

$$C_{ESS_SM_max} = \frac{10MW \cdot 0.5h}{2} = 2.5 [MWh] \quad (39)$$

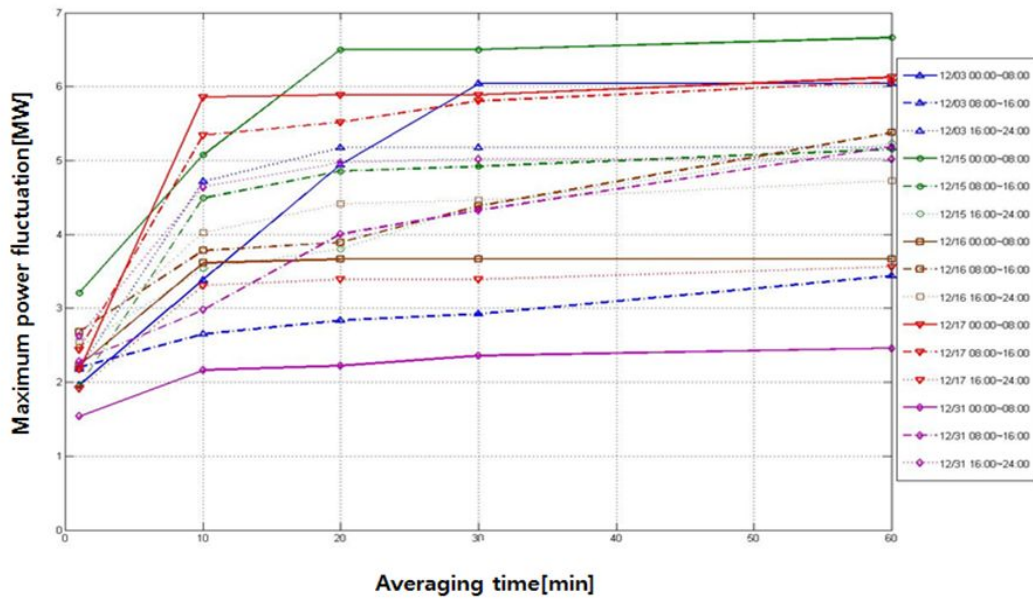


Fig. 51 Maximum power fluctuation every averaging time in the Haengwon wind farm

Fig. 52는 행원풍력발전단지의 30분 출력변동폭이 가장 크다고 여겨지는 2009년 12월 15일의 출력변동에 대한 발생빈도분포를 나타내는 그래프이다. 이 결과에서 대부분 출력변동이 $\pm 0.2pu$ 즉, 2MW이므로 식(40)에 의해 출력 평활화를 위한 최소 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_SM_min}$)이 결정된다.

$$C_{ESS_SM_min} = 2MW \cdot \frac{30}{60}h = 1.0 [MWh] \quad (40)$$

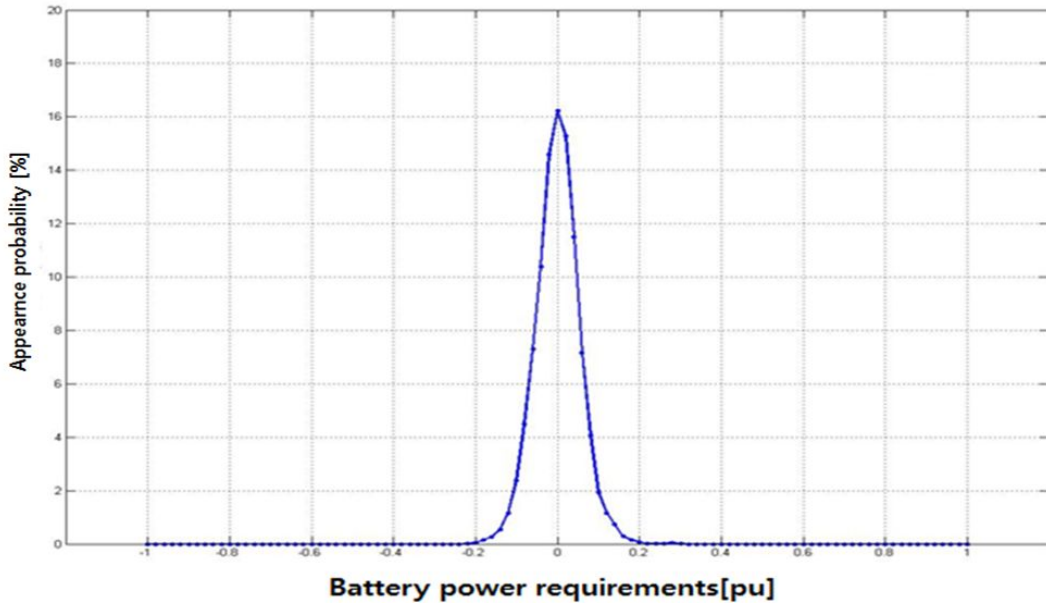


Fig. 52 Probability distribution curve of the power fluctuation in Haengwon wind farm

식(41)에 의해 행원풍력발전단지 탈락 시 계통 출력 안정화를 위한 최소 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_DG_min}$)을 계산할 수 있으며, 풍력발전단지 정격출력의 제공에 비례하게 된다.

$$C_{ESS_DG_min} = \frac{P_{WF}^2}{1200} = \frac{100}{1200} \simeq 84 [kWh] \quad (41)$$

행원풍력발전단지의 정격출력(P_{WF})을 10MW로 설정하였으므로 식(28)에 의해 배터리의 수명과 계통탈락을 고려한 에너지저장시스템 용량은 $C_{ESS_DG_bat} = 0.2P_{WF} = 2MWh$ 가 된다. 따라서 식(32)에 의해 출력 평활화를 위한 최소 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_SM_min}$)이 상대적으로 작게 되고 계통탈락을 고려한 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_DG_bat}$)이 큰 경우 $(C_{ESS_SM_min} + C_{ESS_DG_min})/0.6 = 1.807MWh$ 로 계산되고 이

값은 배터리의 수명과 계통탈락을 고려한 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_DG_bat}$)보다 작기 때문에 풍력발전단지에 필요한 최종 에너지저장시스템의 용량(C_{ESS_Total})은 식(42)와 같다.

$$C_{ESS_Total} = C_{ESS_DG_bat} = 2 \text{ [MWh]} \quad (42)$$

잔존용량 피드백 제어를 위해 식(43)과 식(44)를 이용하여 α 와 offset을 계산한다. 이때 용량 C 값에 $C_{ESS_Total} = 2\text{MWh}$ 을, 잔존용량 제어가 0.2부터 0.8 사이에서 이루어지고 있으므로 마진 $M=0.2$, 평활화 시정수 T 는 최대출력 평가시간을 초로 환산하여 $T=1800$ 이며, 단지의 정격용량 $P_{WF} = 10\text{MW}$ 를 적용하여 계산한다.

$$\alpha = (2 - 2 \cdot 2 \cdot 0.2) / (1800 \cdot 10) = 6.6e^{-5} \quad (43)$$

$$offset = 0.2 \cdot 2 = 0.4 \quad (44)$$

나. 하이브리드 에너지저장시스템의 용량산정

행원풍력발전단지의 경우 240MW 이하의 단지출력 용량이며 평활화가 필요한 출력 변동보상용량은 상대적으로 작고 발전단지의 계통탈락 보호를 위한 배터리 보상 용량은 상대적으로 큰 경우이다. 이때 배터리는 $C_{ESS_DG_bat} = 0.2P_{WF} = 2\text{MWh}$ 로 필요 이상으로 용량이 증가하게 된다. 따라서 Fig. 44와 같이 하이브리드 에너지저장시스템을 구성하기 위해, 슈퍼커패시터의 용량(C_{EDLC})은 식(45)에 의해 결정되며 식(46)에 의해 계통탈락을 고려한 최소 배터리용량($C_{BESS_DG_min}$)이 결정되고 이때 배터리의 출력(P_{BESS})은 식(47)에 의해 결정된다. 하이브리드 에너지저장시스템의 배터리용량($C_{BESS_DG_bat}$)은 식(48)에 의해 결정된다. Fig. 53과 같이 0.1MW 단위로 슈퍼커패시터의 출력(P_{EDLC})를 변경하면서 슈퍼커패시터 용량 증가량 (ΔC_{EDLC}) 대비 배터리 에너지 저장장치 출력 요구량 감소량(ΔP_{BESS})을 비교하고 슈퍼커패시터 용량을 증가시킴에 따른 배터리 에너지 저장장치 용량 감소율이 포화되는 시점을 기준으로 $P_{EDLC} = 2\text{MW}$ 로 결정하였다.

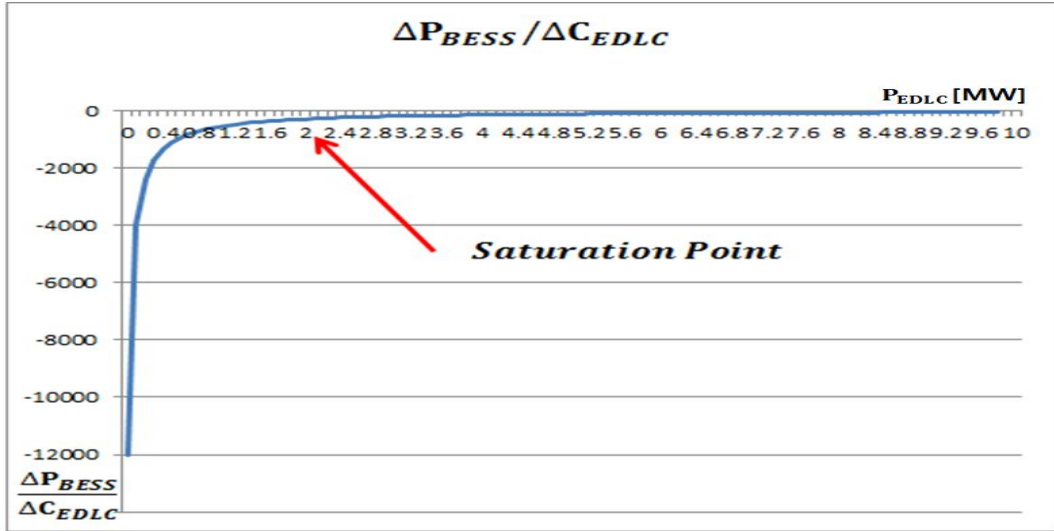


Fig. 53 Saturation point of $\Delta P_{BESS} / \Delta C_{EDLC}$ in the Haengwon wind farm

$$C_{EDLC} = \frac{P_{EDLC}^2}{1200} = 3.4 \text{ [kWh]} \quad (45)$$

$$C_{BESS_DG_min} = \frac{P_{WF}^2 - P_{EDLC}^2}{1200} = 80 \text{ [kWh]} \quad (46)$$

$$P_{BESS} = P_{WF} - P_{EDLC} = 8 \text{ [MW]} \quad (47)$$

$$C_{BESS_DG_bat} = 0.2P_{BESS} = 1.6 \text{ [MWh]} \quad (48)$$

여기서 한 가지 주의할 점은 슈퍼캐패시터 저장장치에 의해 줄어든 하이브리드 에너지저장시스템의 배터리용량($C_{BESS_DG_bat}$)이 풍력발전단지 평활화를 위한 최소 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_SM_min}$)보다 크게 설계되어야 한다는 것을 확인해야 한다. 결국 $C_{BESS_DG_bat} = 1.6 \text{ MWh}$ 이 $C_{ESS_SM_min} = 1 \text{ MWh}$ 보다 충분히 크기 때문에 풍력발전단지에 필요한 총 하이브리드 에너지저장시스템의 배터리용량 (C_{HESS_Total})은 식(49)와 같다.

$$C_{HESS_Total} = C_{BESS_DG_bat} = 1.6 [MWh] \quad (49)$$

잔존용량 피드백 제어를 위해 식(50)과 식(51)을 이용하여 α 와 offset을 계산한다. 이때 용량 C 값에 $C_{HESS_Total} = 1.6MWh$ 을, 잔존용량 제어가 0.2부터 0.8 사이에서 이루어지고 있으므로 마진 $M=0.2$, 평활화 시정수 T 는 최대출력 평가시간을 초로 환산하여 $T=1800$ 이며, 단지의 정격용량 $P_{WF} = 10MW$ 를 적용하여 계산한다.

$$\alpha = (1.6 - 1.6 \cdot 2 \cdot 0.2) / (1800 \cdot 10) = 5.4e^{-5} \quad (50)$$

$$offset = 0.2 \cdot 1.6 = 0.32 \quad (51)$$

(2) 한경풍력발전단지

가. 배터리만으로 구성된 에너지저장시스템의 용량산정 및 제어기 설정

본 논문에서 활용한 데이터는 2009년 3월부터 2010년 2월까지 한경풍력발전단지의 출력데이터이며, 그 당시 한경풍력발전단지는 1.5MW 4기, 3MW 5기 총 21MW의 설비용량을 가지고 운전되었다. 실제 출력은 약간의 오차를 가지지만 단지정격 출력을 21MW로 가정하여 연구를 수행하였다. Fig. 62부터 Fig. 66은 해당 분석기간 중 하루 출력변동이 심한 5일을 택하여 출력을 나타낸 그래프이다.

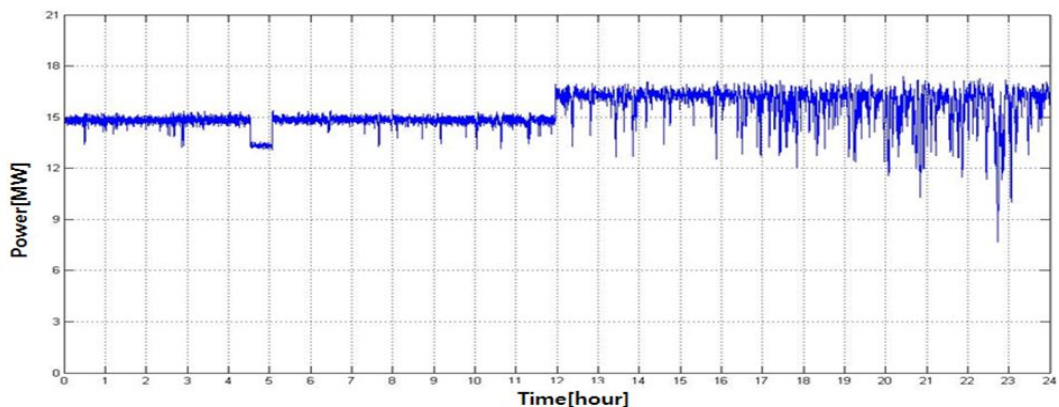


Fig. 54 Power output of the Hangeong wind farm (2010.01.05)

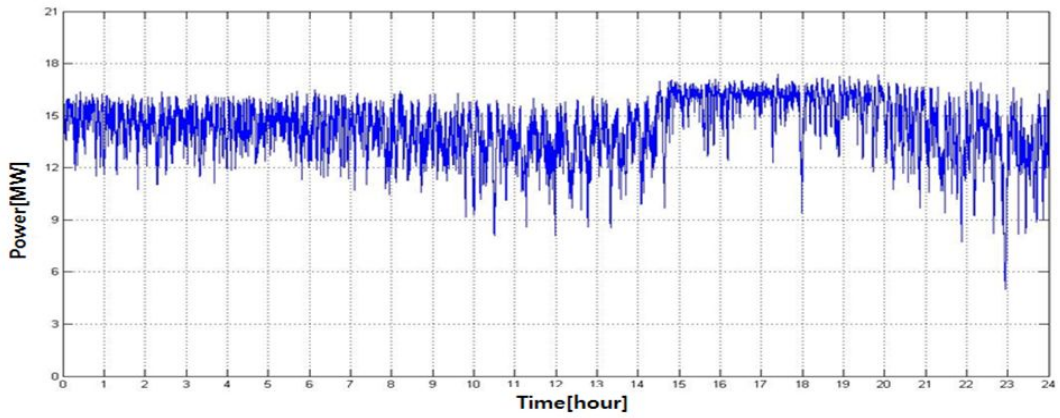


Fig. 55 Power output of the Hangeong wind farm (2010.01.07)

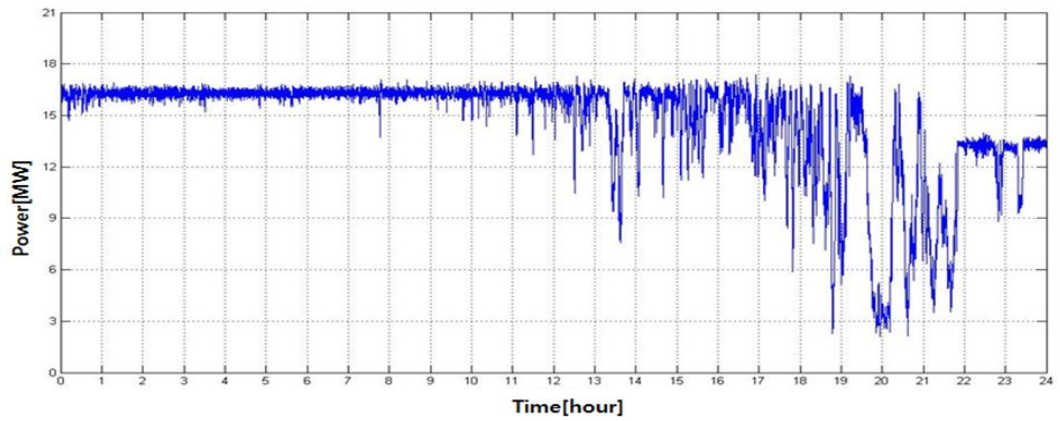


Fig. 56 Power output of the Hangeong wind farm (2010.01.12)

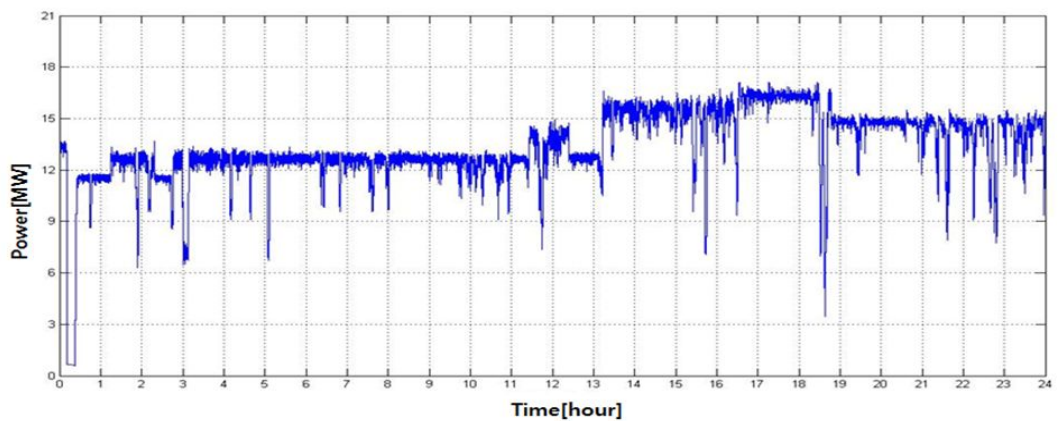


Fig. 57 Power output of the Hangeong wind farm (2010.01.13)

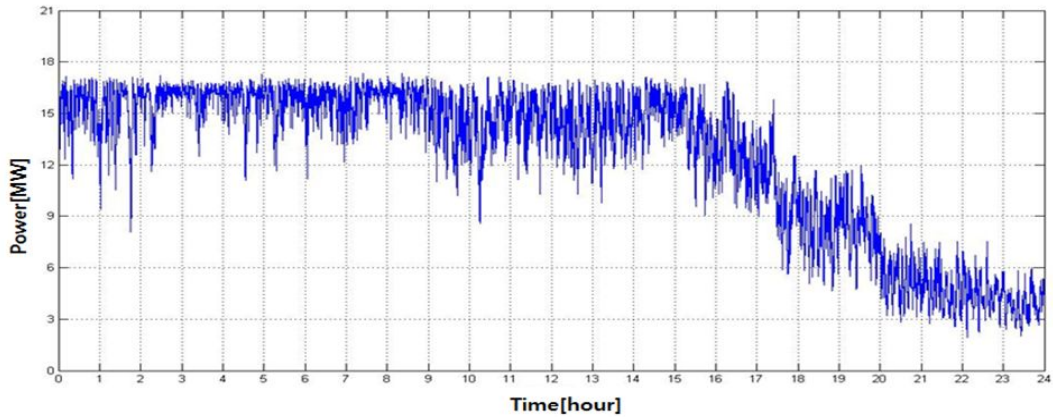


Fig. 58 Power output of the Hangeong wind farm (2010.01.23)

상기 데이터를 활용하여 단지출력 평활화를 위한 배터리 용량을 산정하기 위하여 Fig. 59과 같이 평가시간 변동에 따른 최대 출력변동 그래프를 작성하여 분석한 결과 20분 후의 출력변동은 거의 변화가 없었다. 따라서 20분을 최대 출력변동을 확인 할 수 있는 출력변동 평가시간으로 결정하였고, 이에 따라 식(52)를 계산하면 다음과 같이 최대 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_SM_max}$)이 계산된다.

$$C_{ESS_SM_max} = \frac{21MW \cdot \frac{20}{60}h}{2} = 3.5 [MWh] \quad (52)$$

Fig. 60은 한경풍력발전단지의 20분 출력변동폭이 가장 크다고 여겨지는 2009년 1월 12일의 출력변동에 대한 발생빈도분포를 나타내는 그래프이다. 이 결과에서 보면 한경풍력발전단지는 출력변동이 $\pm 0.2pu$ 즉 4.2MW이므로 식(53)에 의해 출력 평활화를 위한 최소 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_SM_min}$)이 결정된다.

$$C_{ESS_SM_min} = 4.2MW \cdot \frac{20}{60}h = 1.4 [MWh] \quad (53)$$

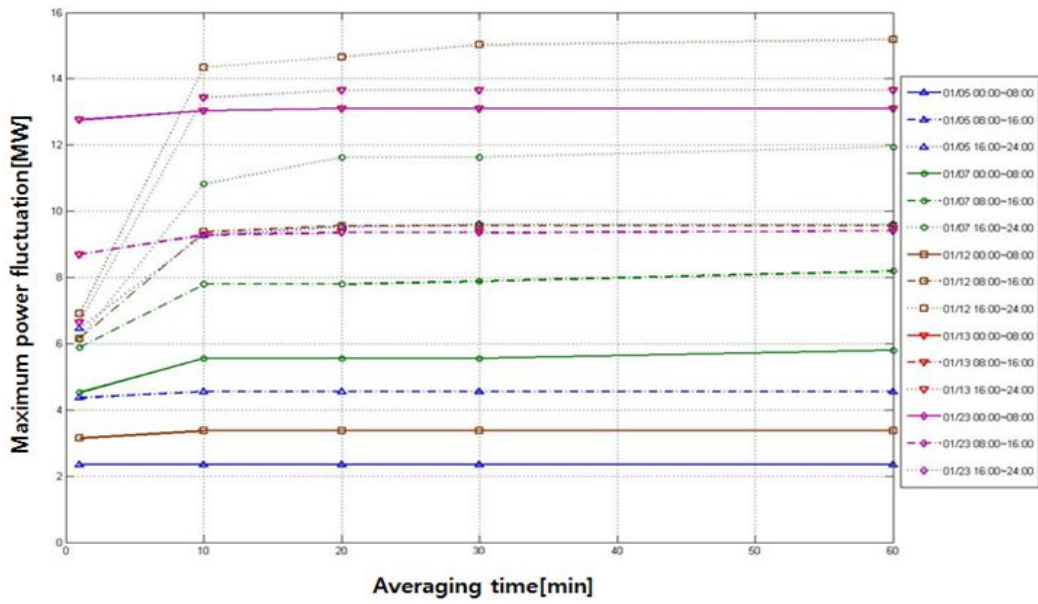


Fig. 59 Maximum power fluctuation every averaging time in the Hangeong wind farm

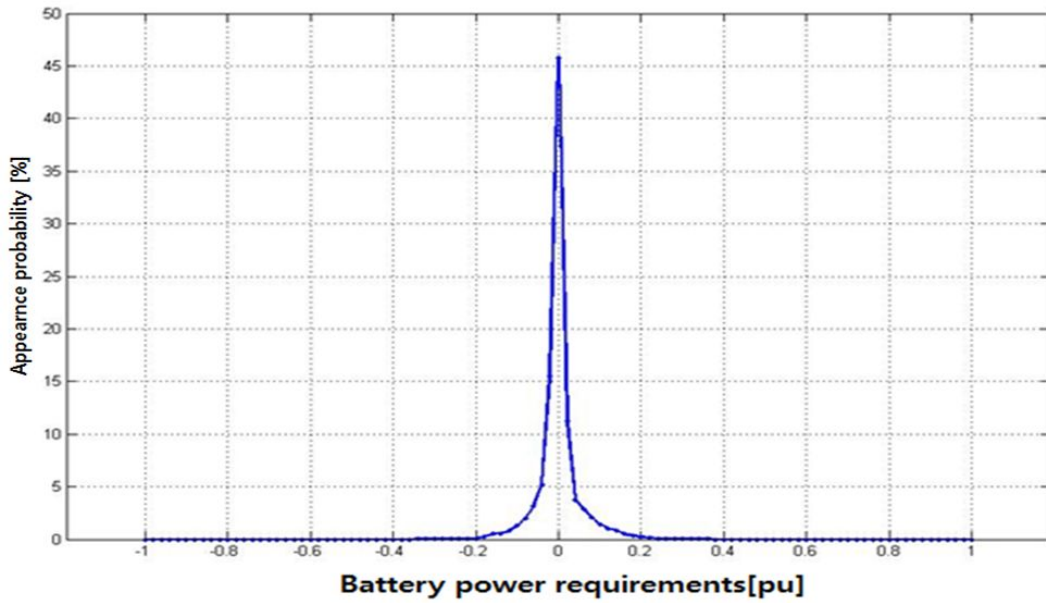


Fig. 60 Probability distribution curve of the power fluctuation in the Hangeong wind farm

식(54)에 의해 한경풍력발전단지 탈락 시 계통 출력 안정화를 위한 최소 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_DG_min}$)을 계산할 수 있으며, 정격출력의 제공에 비례하게 된다.

$$C_{ESS_DG_min} = \frac{P_{WF}^2}{1200} = \frac{441}{1200} \simeq 368 [kWh] \quad (54)$$

한경풍력발전단지의 정격출력(P_{WF})을 21MW로 설정하였으므로 식(28)에 의해 배터리의 수명과 계통탈락을 고려한 에너지저장시스템 용량은 $C_{ESS_DG_bat} = 0.2P_{WF} = 4.2 MWh$ 가 된다. 따라서 식(32)에 의해 출력 평활화를 위한 최소 에너지저장시스템 용량 ($C_{ESS_SM_min}$)이 상대적으로 작게되고 계통탈락을 고려한 에너지저장시스템 용량 ($C_{ESS_DG_bat}$)이 큰 경우 $(C_{ESS_SM_min} + C_{ESS_DG_min})/0.6 = 2.94 MWh$ 로 계산되고 이 값은 배터리의 수명과 계통탈락을 고려한 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_DG_bat}$)보다 작기 때문에 풍력발전단지에 필요한 최종 에너지저장시스템의 용량(C_{ESS_Total})은 식(55)와 같다.

$$C_{ESS_Total} = C_{ESS_DG_bat} = 4.2 [MWh] \quad (55)$$

잔존용량 피드백 제어를 위해 식(56)과 식(57)을 이용하여 α 와 offset을 계산한다. 이때 용량 C 값에 $C_{ESS_Total} = 4.2 MWh$ 을, 잔존용량 제어가 0.2부터 0.8 사이에서 이루어지고 있으므로 마진 $M=0.2$, 평활화 시정수 T 는 최대출력 평가시간을 초로 환산하여 $T=1200$ 이며, 단지의 정격용량 $P_{WF} = 21MW$ 를 적용하여 계산한다.

$$\alpha = (4.2 - 4.2 \cdot 2 \cdot 0.2) / (1200 \cdot 21) = 1e^{-4} \quad (56)$$

$$offset = 0.2 \cdot 4.2 = 0.84 \quad (57)$$

나. 하이브리드 에너지저장시스템의 용량산정

한경풍력발전단지의 경우 240MW 이하의 단지출력 용량이며 평활화가 필요한 출력변동보상용량은 상대적으로 작고 발전단지의 계통탈락 보호를 위한 배터리 보상 용량은 상대적으로 큰 경우이다. 이때 배터리는 $C_{ESS_DG_bat} = 4.2 MWh$ 로 필요 이상으로 용량이 증가하게 된다. 따라서 Fig. 44와 같이 하이브리드 에너지저

장시스템을 구성하기 위해, 슈퍼커패시터의 용량(C_{EDLC})은 식(58)에 의해 결정되며 식(59)에 의해 계통탈락을 고려한 최소 배터리용량($C_{BESS_DG_min}$)이 결정되고 이때 배터리의 출력(P_{BESS})이 식(60)에 의해 결정된다. 하이브리드 에너지저장시스템의 배터리용량($C_{BESS_DG_bat}$)은 식(61)에 의해 결정된다. Fig. 69와 같이 0.1MW 단위로 슈퍼커패시터의 출력(P_{EDLC})를 변경하면서 슈퍼커패시터 용량 증가량(ΔC_{EDLC}) 대비 배터리 에너지 저장장치 출력요구량 감소량(ΔP_{BESS}) 비교하고 슈퍼커패시터 용량을 증가시키에 따른 배터리 에너지 저장장치 용량 감소율이 포화되는 시점을 기준으로 $P_{EDLC} = 3.5MW$ 로 결정하였다.

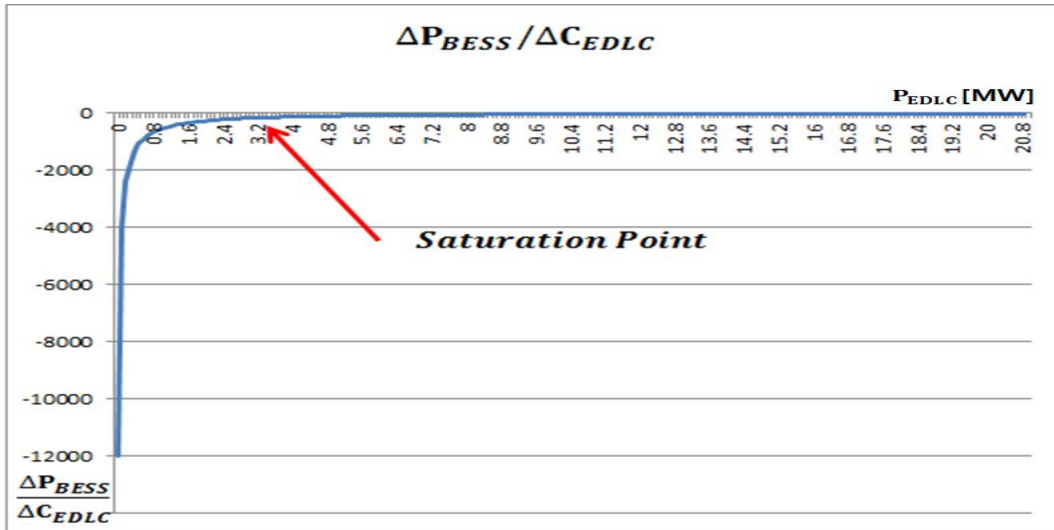


Fig. 61 Saturation point of $\Delta P_{BESS} / \Delta C_{EDLC}$ in the Hangeong wind farm

$$C_{EDLC} = \frac{P_{EDLC}^2}{1200} = 11.2 \text{ [kWh]} \quad (58)$$

$$C_{BESS_DG_min} = \frac{P_{WF}^2 - P_{EDLC}^2}{1200} = 358 \text{ [kWh]} \quad (59)$$

$$P_{BESS} = P_{WF} - P_{EDLC} = 17.5 \text{ [MW]} \quad (60)$$

$$C_{BESS_DG_bat} = 0.2P_{BESS} = 3.5 [MWh] \quad (61)$$

여기서 한 가지 주의할 점은 슈퍼캐패시터 저장장치에 의해 줄어드는 하이브리드 에너지저장시스템의 배터리용량($C_{BESS_DG_bat}$)이 풍력발전단지 평활화를 위한 최소 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_SM_min}$)보다 크게 설계되어야한다. 결국 $C_{BESS_DG_bat} = 3.5MWh$ 이 $C_{ESS_SM_min} = 1.4 MWh$ 보다 충분히 크기 때문에 풍력발전단지에 필요한 총 필요한 하이브리드 에너지저장시스템의 배터리용량(C_{HESS_Total})은 식(62)와 같다.

$$C_{HESS_Total} = C_{BESS_DG_bat} = 3.5 [MWh] \quad (62)$$

잔존용량 피드백 제어를 위해 식(63)과 식(64)을 이용하여 α 와 offset을 계산한다. 이때 용량 C 값에 $C_{HESS_Total} = 3.5MWh$ 을, 잔존용량 제어가 0.2부터 0.8 사이에서 이루어지고 있으므로 마진 $M=0.2$, 평활화 시정수 T 는 최대출력 평가시간을 초로 환산하여 $T=1200$ 이며, 단지의 정격용량 $P_{WF} = 21MW$ 를 적용하여 계산한다.

$$\alpha = (3.5 - 3.5 \cdot 2 \cdot 0.2) / (1200 \cdot 21) = 8.4e^{-5} \quad (63)$$

$$offset = 0.2 \cdot 3.5 = 0.7 \quad (64)$$

(3) 성산풍력발전단지

가. 배터리만으로 구성된 에너지저장시스템의 용량산정 및 제어기 설정

성산풍력발전단지는 현재 2MW 10기 총 20MW의 설비용량을 가지고 운전되고 있다. 그러나 본 논문의 해석시점인 2010년 2월 이전의 단지정격 출력은 2MW 6기 즉 12MW가 운전되었다. Fig. 62부터 Fig. 58까지는 2010년 1월 1일부터 2010년 1월 30일까지 하루 출력변동이 심한 5일을 택하여 2초 간격으로 24시간의 출력을 나타낸 것이다.

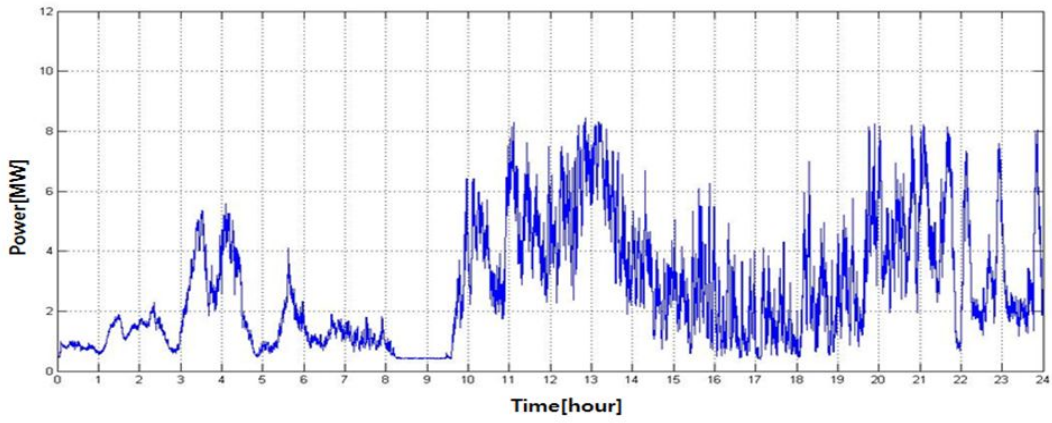


Fig. 62 Power output of the Seongsan wind farm (2010.01.04)

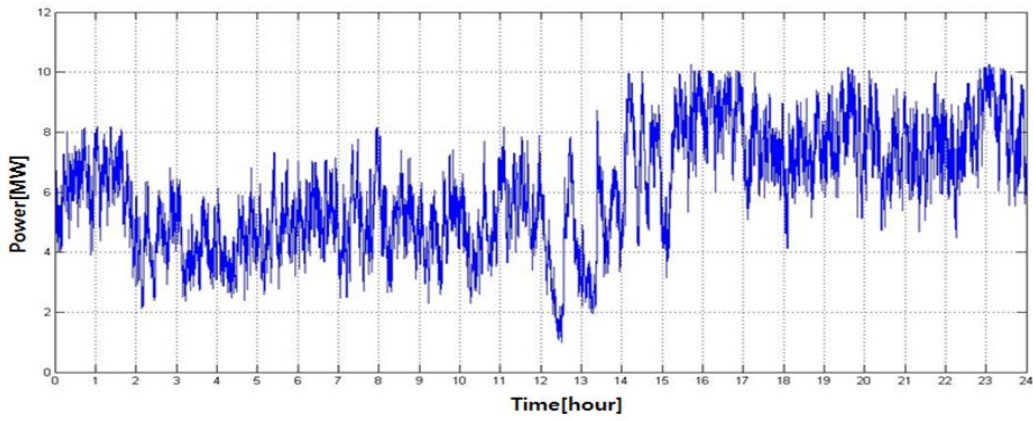


Fig. 63 Power output of the Seongsan wind farm (2010.01.06)

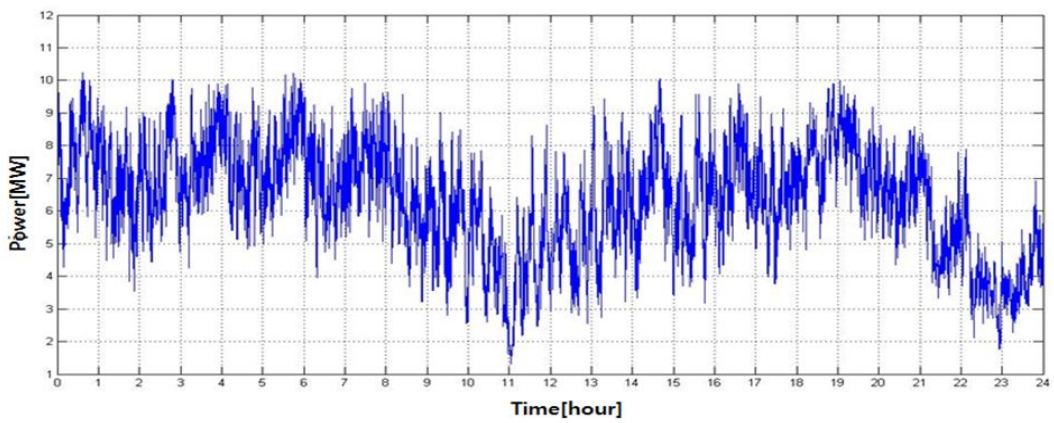


Fig. 64 Power output of the Seongsan wind farm (2010.01.07)

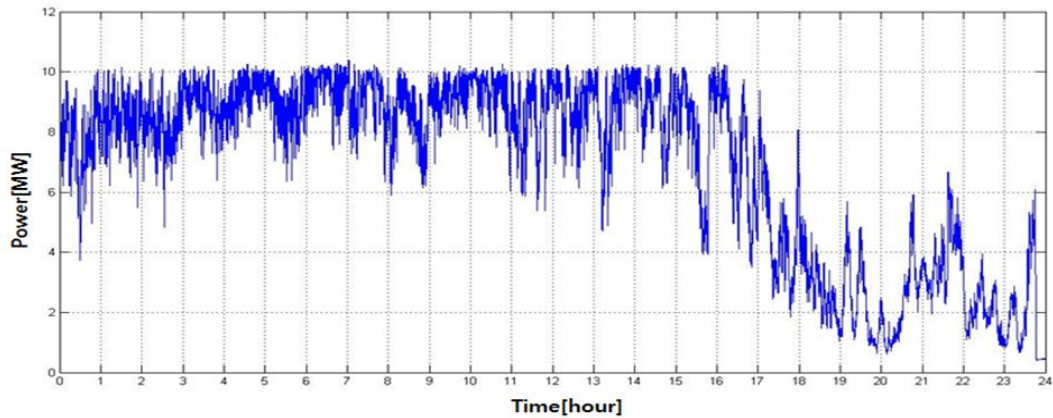


Fig. 65 Power output of the Seongsan wind farm (2010.01.12)

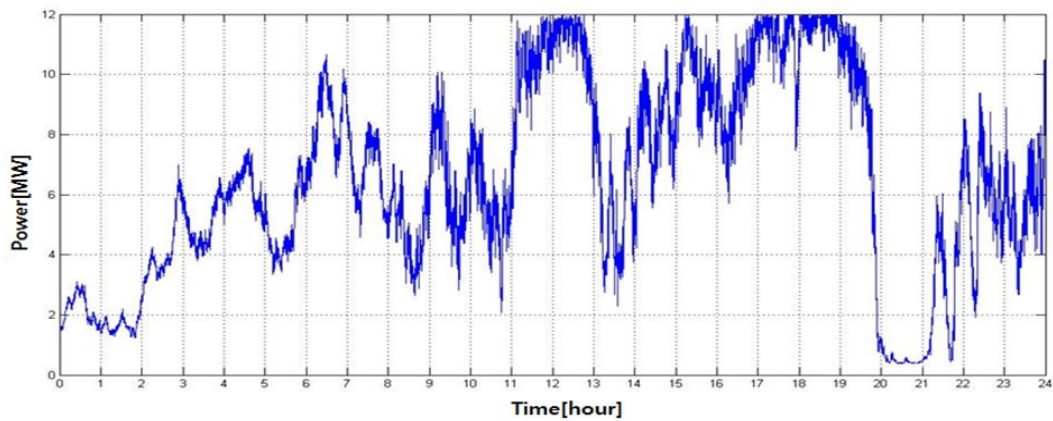


Fig. 66 Power output of the Seongsan wind farm (2010.01.27)

상기 데이터를 활용하여 단지출력 평활화를 위한 배터리 용량을 산정하기 위하여 Fig. 67과 같이 평가시간 변동에 따른 최대 출력변동 그래프를 작성하여 분석한 결과 30분 후의 출력변동은 거의 변화가 없다. 따라서 30분을 최대 출력변동을 확인할 수 있는 출력변동 평가시간으로 결정하였고, 이에 따라 식(65)를 계산하면 다음과 같이 최대 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_SM_max}$)이 계산된다.

$$C_{ESS_SM_max} = \frac{12MW \cdot 0.5h}{2} = 3 [MWh] \quad (65)$$

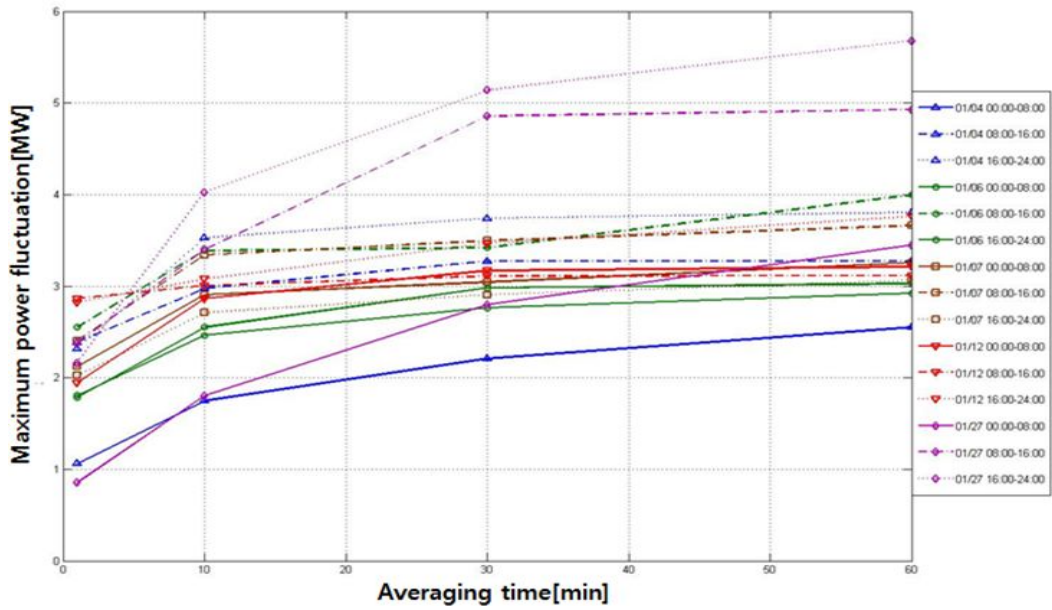


Fig. 67 Maximum power fluctuation every averaging time in the Seongsan wind farm

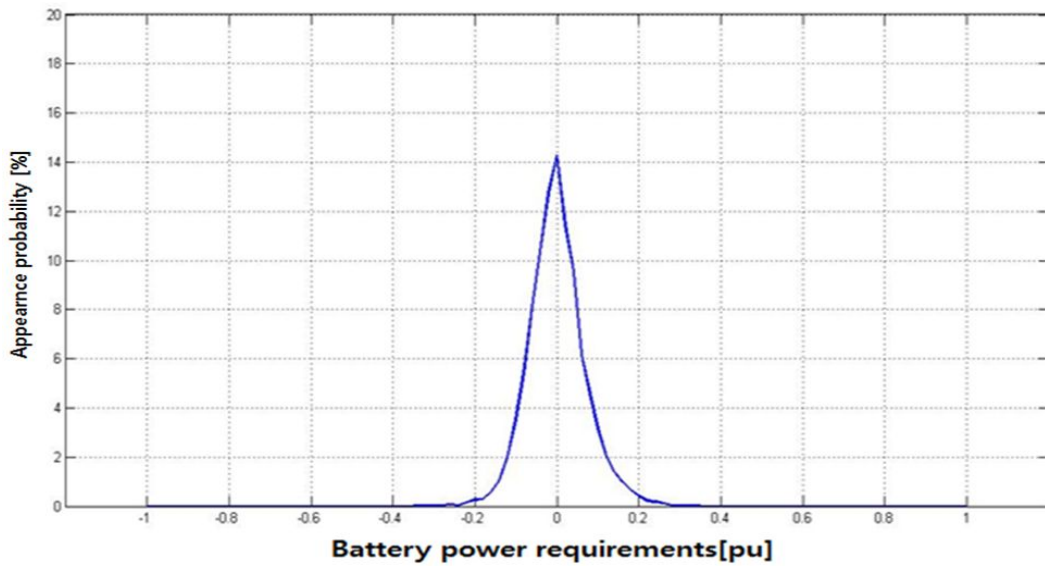


Fig. 68 Probability distribution curve of the power fluctuation in the Seongsan wind farm

Fig. 68는 성산풍력발전단지의 30분 출력변동폭이 가장 크다고 여겨지는 2009년 1월 27일의 출력변동에 대한 발생빈도분포를 나타내는 그래프이다. 이 결과에서 대부분 출력변동이 $\pm 0.2pu$ 즉 2.4MW이므로 식(66)에 의해 출력 평활화를 위

한 최소 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_SM_min}$)이 결정된다.

$$C_{ESS_SM_min} = 2.4MW \cdot \frac{30}{60}h = 1.2 [MWh] \quad (66)$$

식(67)에 의해 성산풍력발전단지 탈락 시 계통 출력 안정화를 위한 최소 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_DG_min}$)을 계산할 수 있으며, 풍력발전단지 정격출력의 제공에 비례하게 된다.

$$C_{ESS_DG_min} = \frac{P_{WF}^2}{1200} = \frac{144}{1200} \simeq 0.12 [MWh] \quad (67)$$

성산풍력발전단지의 정격출력(P_{WF})을 12MW로 설정하였으므로 식(28)에 의해 배터리의 수명과 계통탈락을 고려한 에너지저장시스템 용량은 $C_{ESS_DG_bat} = 2.4MWh$ 가 된다. 따라서 식(32)에 의해 출력 평활화를 위한 최소 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_SM_min}$)이 상대적으로 작게 되고 계통탈락을 고려한 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_DG_bat}$)이 큰 경우 $(C_{ESS_SM_min} + C_{ESS_DG_min})/0.6 = 2.2MWh$ 로 계산되고 이 값은 배터리의 수명과 계통탈락을 고려한 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_DG_bat}$)보다 작기 때문에 풍력발전단지에 필요한 최종 에너지저장시스템의 용량(C_{ESS_Total})은 식(68)과 같다.

$$C_{ESS_Total} = C_{ESS_DG_bat} = 2.4 [MWh] \quad (68)$$

잔존용량 피드백 제어를 위해 식(43)과 식(44)를 이용하여 α 와 offset을 계산한다. 이때 용량 C 값에 $C_{ESS_Total} = 2.4MWh$ 을, 잔존용량 제어가 0.2부터 0.8 사이에서 이루어지고 있으므로 마진 $M=0.2$, 평활화 시정수 T 는 최대출력 평가시간을 초로 환산하여 $T=1800$ 이며, 단지의 정격용량 $P_{WF} = 12MW$ 를 적용하여 계산한다.

$$\alpha = (2.4 - 2.4 \cdot 2 \cdot 0.2) / (1800 \cdot 12) = 6.67e^{-5} \quad (69)$$

$$offset = 0.2 \cdot 2.4 = 0.48 \quad (70)$$

나. 하이브리드형 배터리 용량산정

성산풍력발전단지의 경우 240MW 이하의 단지출력 용량이며 평활화가 필요한 출력변동보상용량은 상대적으로 작고 발전단지의 계통탈락 보호를 위한 배터리 보상 용량은 상대적으로 큰 경우이다. 이때 배터리는 $C_{ESS_DG_bat} = 2.4MWh$ 로 필요 이상으로 용량이 증가하게 된다. 따라서 Fig. 44와 같이 하이브리드 에너지저장시스템을 구성하기 위해, 슈퍼커패시터의 용량(C_{EDLC})은 식(71)에 의해 결정되며 식(72)에 의해 계통탈락을 고려한 최소 배터리용량($C_{BESS_DG_min}$)이 결정되고 이때 배터리의 출력(P_{BESS})이 식(73)에 의해 결정된다. 하이브리드 에너지저장시스템의 배터리용량($C_{BESS_DG_bat}$)은 식(74)에 의해 결정된다. Fig. 69와 같이 0.1MW 단위로 슈퍼커패시터의 출력(P_{EDLC})를 변경하면서 슈퍼커패시터 용량 증가량(ΔC_{EDLC}) 대비 배터리 에너지 저장장치 출력요구량 감소량(ΔP_{BESS})을 비교하고 슈퍼커패시터 용량을 증가시키에 따른 배터리 에너지 저장장치 용량 감소율이 포화되는 시점을 기준으로 $P_{EDLC} = 2MW$ 로 결정하였다.

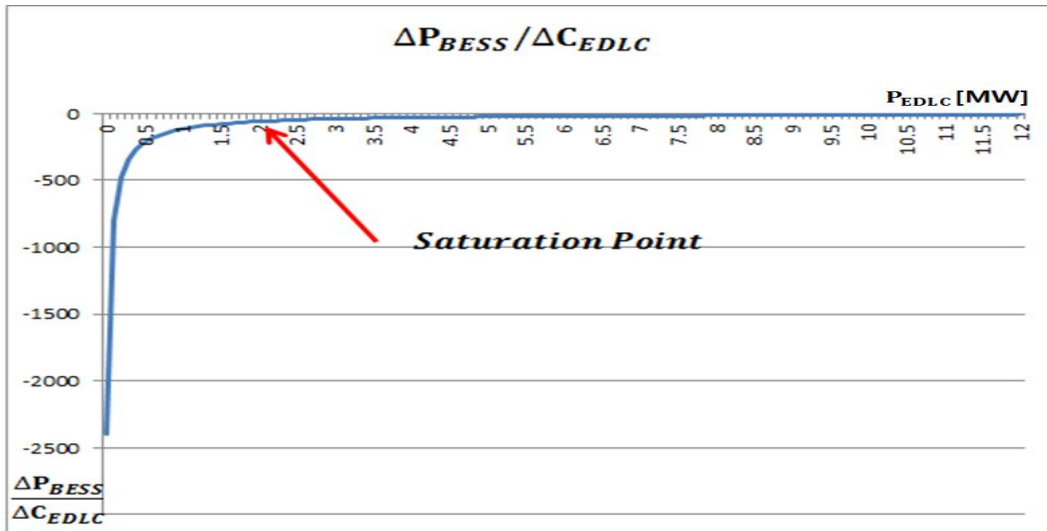


Fig. 69 Saturation point of $\Delta P_{BESS} / \Delta C_{EDLC}$ in the Seongsan wind farm

$$C_{EDLC} = \frac{P_{EDLC}^2}{1200} = 3.4 [kWh] \quad (71)$$

$$C_{BESS_DG_min} = \frac{P_{WF}^2 - P_{EDLC}^2}{1200} = 117 [kWh] \quad (72)$$

$$P_{BESS} = P_{WF} - P_{EDLC} = 10 [MW] \quad (73)$$

$$C_{BESS_DG_bat} = 0.2P_{BESS} = 2 [MWh] \quad (74)$$

여기서 한 가지 주의할 점은 슈퍼캐패시터 저장장치에 의해 줄어든 하이브리드 에너지저장시스템의 배터리용량($C_{BESS_DG_bat}$)이 풍력발전단지 평활화를 위한 최소 에너지저장시스템 용량($C_{ESS_SM_min}$)보다 크게 설계되어야 한다는 점이다. 결국 $C_{BESS_DG_bat} = 2MWh$ 이 $C_{ESS_SM_min} = 1.2MWh$ 보다 충분히 크기 때문에 풍력발전 단지에 필요한 총 필요한 하이브리드 에너지저장시스템의 배터리용량(C_{HESS_Total})은 식(75)와 같다.

$$C_{HESS_Total} = C_{BESS_DG_bat} = 2 [MWh] \quad (75)$$

잔존용량 피드백 제어를 위해 식(76)과 식(77)을 이용하여 α 와 offset을 계산한다. 이때 용량 C 값에 $C_{HESS_Total} = 2MWh$ 을 , 잔존용량 제어가 0.2부터 0.8 사이에서 이루어지고 있으므로 마진 $M=0.2$, 평활화 시정수 T 는 최대출력 평가시간을 초로 환산하여 $T=1800$ 이며, 단지의 정격용량 $P_{WF} = 12MW$ 를 적용하여 계산한다.

$$\alpha = (2 - 2 \cdot 2 \cdot 0.2) / (1800 \cdot 12) = 5.56e^{-5} \quad (76)$$

$$offset = 0.2 \cdot 2 = 0.4 \quad (77)$$

IV. 컴퓨터 해석과 결과고찰

앞서 이루어진 에너지저장시스템의 용량산정을 기초로 각 풍력발전 단지별 최대 출력변동 데이터에 대한 출력안정화 컴퓨터 해석을 수행하였으며, 각각의 단지에 대해 배터리 에너지저장시스템만을 사용하여 해석하는 경우와 하이브리드 에너지저장시스템을 사용하여 출력안정화를 수행하는 경우에 대하여 사용되어지는 에너지저장시스템의 용량과 출력, 보상운전 중 잔존용량 등을 비교하였다.

1. 행원풍력발전단지

행원풍력발전단지의 경우 Table 28에서 배터리만을 사용하였을 경우 사용되는 에너지 저장시스템의 용량(C_{ESS_Total})은 식(42)에 의해 2MWh로 계산되었다. 또한 하이브리드 에너지저장시스템의 배터리용량(C_{HESS_Total})은 식(49)에 의해 1.6MWh로 계산되며 배터리만을 사용하여 에너지저장시스템을 구성하는 경우와 비교하여 0.4MWh의 용량이 감소하였다. 이를 보상하기 위해 사용되는 슈퍼커패시터의 용량은 불과 3.4kWh인데 비출력이 높은 슈퍼커패시터의 특성으로 약 2MW의 순간출력을 감당하기 때문 이다. 또한 하이브리드 에너지저장시스템을 사용하는 경우 전체 에너지 저장 장치의 활용도가 높아지는 경향을 사용되는 잔존용량(SOC_{use})을 통하여 확인할 수 있으며, 에너지변환장치의 최대 출력용량 역시 2MW가 감소함을 알 수 있다.

Table 28 Comparative results between the BESS and the HESS
in the Haengwon wind farm

| BESS | | | HESS | | | | |
|---------------------------|--------------------------|-------------|---------------------|----------------------------|--------------------|---------------------------|-------------|
| C_{ESS_Total} [MWh] | P_{ESS_Total} [MW] | SOC_{use} | C_{EDLC} [kWh] | C_{HESS_Total} [MWh] | P_{EDLC} [MW] | P_{HESS_Total} [MW] | SOC_{use} |
| 2 | 10 | 0.4~ 0.6 | 3.4 | 1.6 (20% decrease) | 2 | 8 (20% decrease) | 0.4~ 0.6 |

Fig. 70는 풍력발전단지가 정격출력 중 계통 탈락하였을 때 배터리와 슈퍼커패시터가 동시 보상하는 경우 각각의 잔존용량 곡선이며, 특히 슈퍼커패시터가 첨두치 부분을 보상하고 있으며 분당 10MW의 기울기로 완만하게 출력이 감소하고 있다.

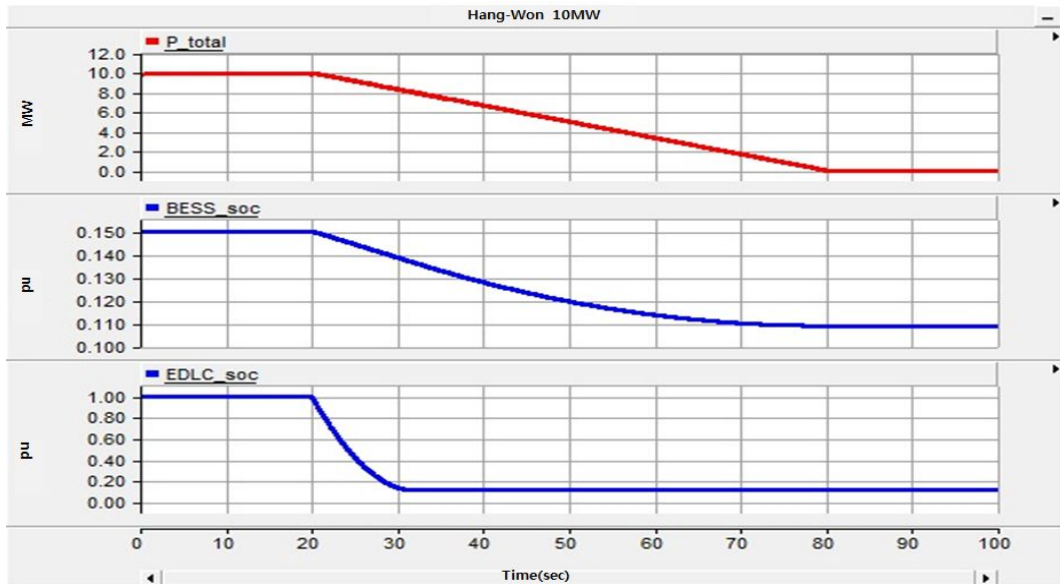


Fig. 70 SOC variation of the HESS in case of disconnecting the Haengwon wind farm from the grid

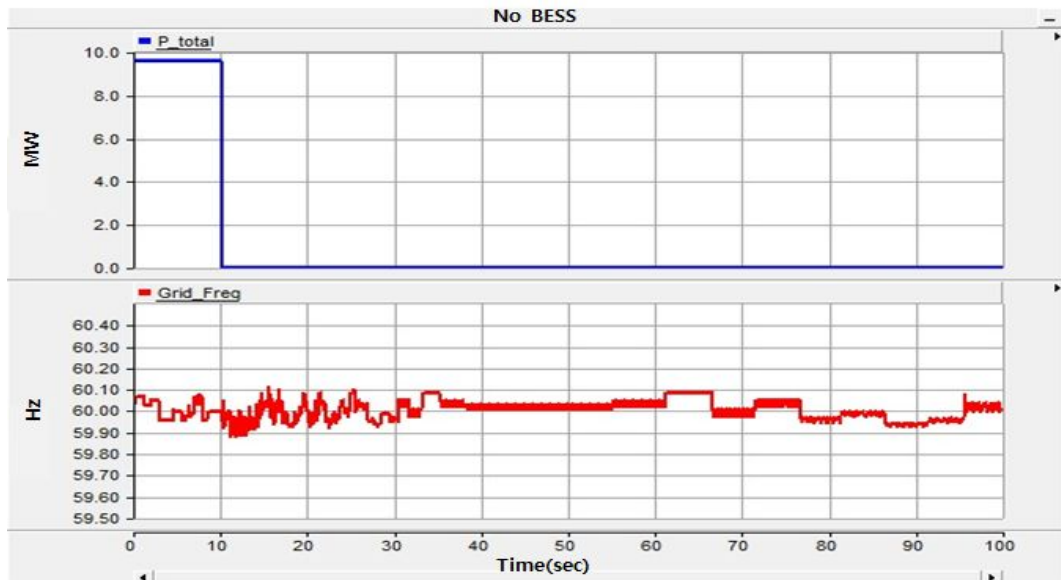


Fig. 71 Frequency variation in case of disconnecting the Haengwon wind farm from the grid without the ESS

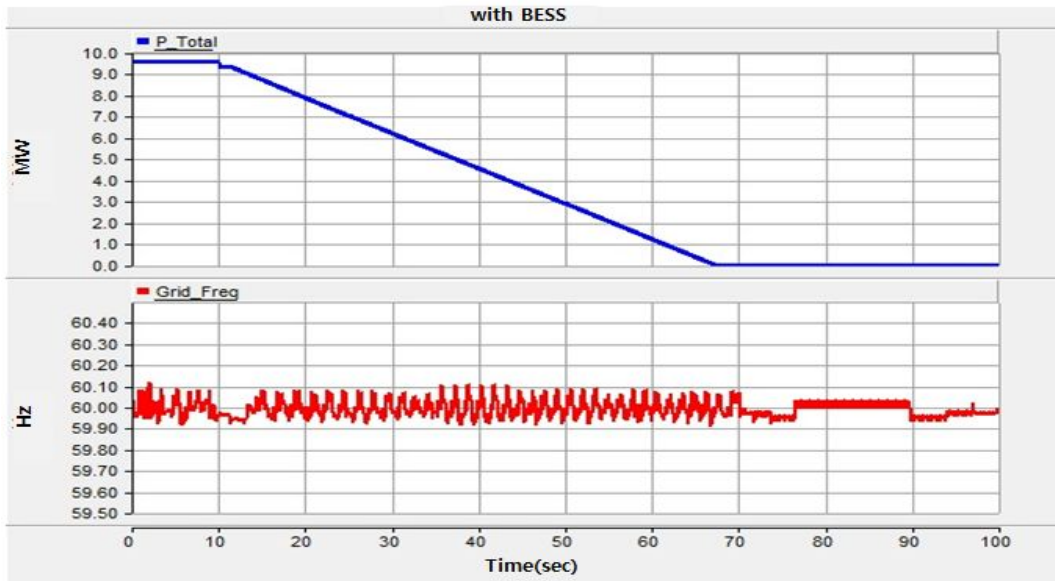


Fig. 72 Frequency variation in case of disconnecting the Haengwon wind farm from the grid with the ESS

Fig. 71과 Fig. 72는 각각 행원풍력발전단지 계통탈락 시 에너지저장시스템이 없는 경우와 있는 경우에 대해서 컴퓨터 해석을 수행한 경우이다. 에너지저장시스템이 없는 경우, 크진 않지만 더 많은 주파수 변동을 보이고 있다.

Fig. 73은 2009년 3월부터 2010년 2월까지 출력변동 폭이 가장 큰 2009년 12월 15일의 2초당 행원풍력발전단지의 출력데이터를 나타내고 있다. 이 데이터를 통해 오전 6시 30분경에 약 8MW에서 2MW까지 급속하게 변동하는 것을 볼 수 있다.

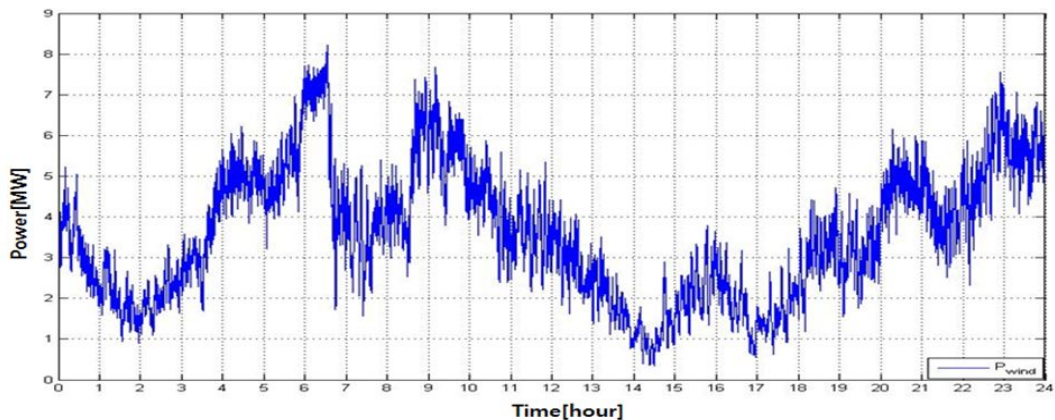


Fig. 73 Power output of the Haengwon wind farm (2009.12.15)

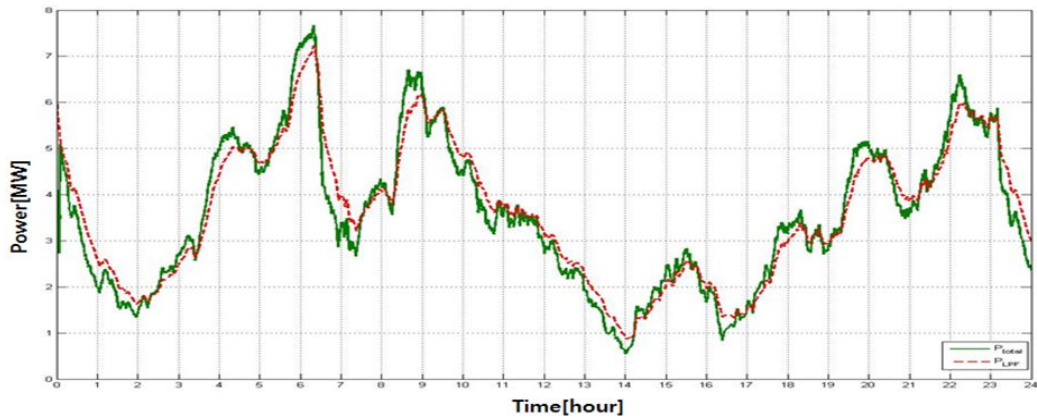


Fig. 74 Compensated power output of the Haengwon wind farm with the BESS and LPF

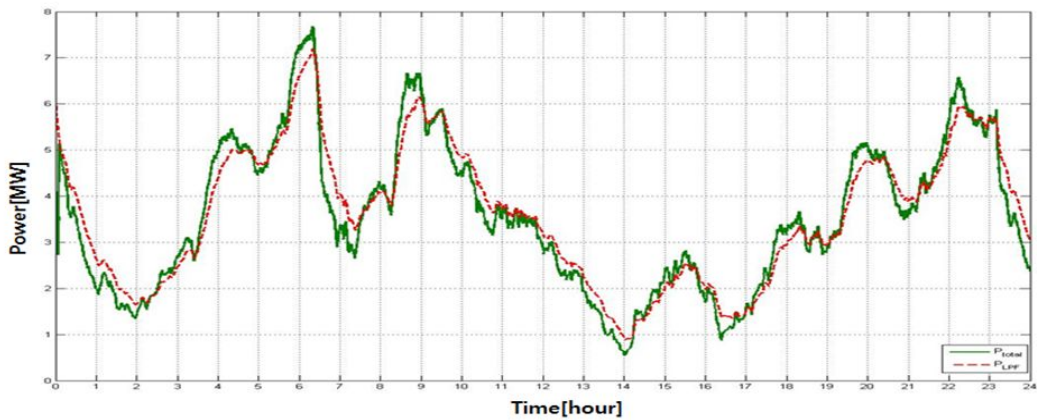


Fig. 75 Compensated power output of the Haengwon wind farm with the HESS and LPF

Fig. 74는 Fig. 73과 같은 풍력단지 출력에 대해 배터리만 사용하여 평활화 보상하는 경우를 컴퓨터 해석한 그래프이며 저역통과 필터로 처리된 기준 출력과 배터리에 의해 보상된 출력을 나타내고 있다. 실제 변동되는 출력에 비해 상당한 에너지가 보상되어 평활화가 이루어지고 있다. 같은 상황에 대해 Fig. 75는 하이브리드 에너지저장시스템을 사용하는 경우를 나타내며 슈퍼커패시터를 사용함에 따라 배터리 용량은 감소하였으나 출력변동을 보상하기 위해 필요한 최소 에너지 용량보다는 충분하게 설계되었으므로 배터리만 사용하는 경우와 차이가 없을 정도로 평활화 보상이 이루어지고 있다.

Fig. 76은 Fig. 73과 같은 출력변동에 대해 배터리만 사용한 에너지저장시스템이 출력 평활화를 수행하는 동안의 잔존용량 제어결과를 나타낸 것이다. Fig. 77에서 하이브리드 에너지저장시스템은 배터리만을 사용하는 경우보다 저장장치 용량이 적기 때문에 잔존용량 사용범위가 다소 넓어진다.

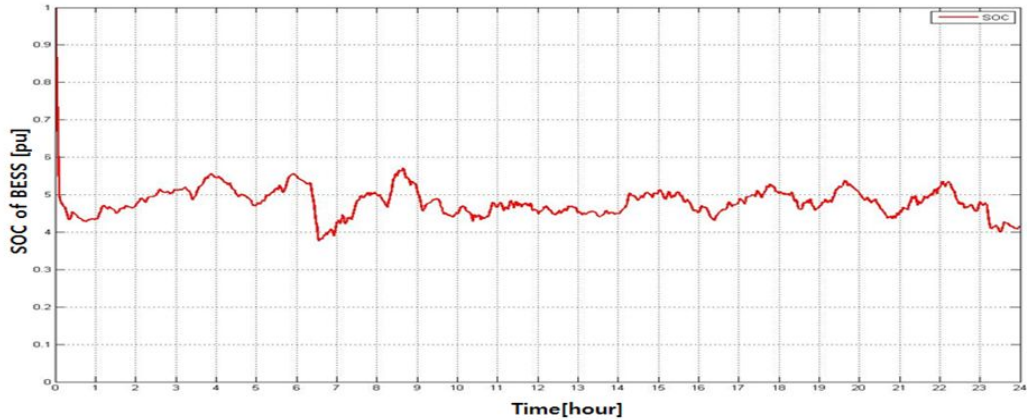


Fig. 76 SOC variation during the BESS operation in the Haengwon wind farm

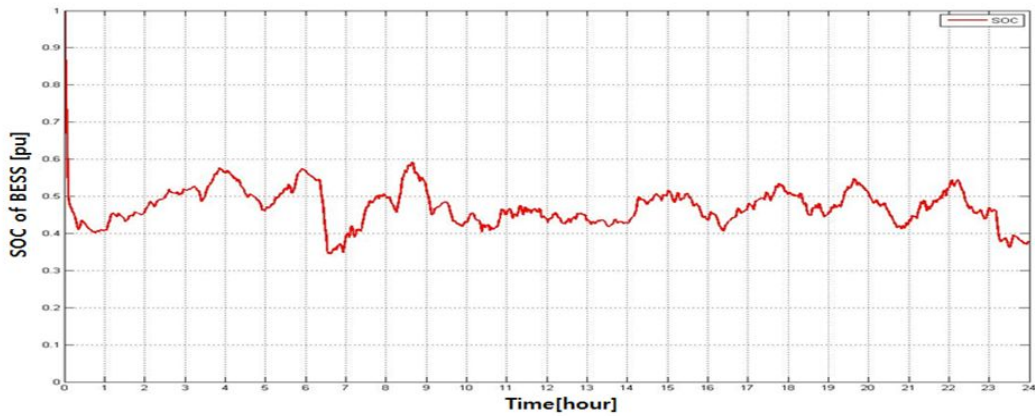


Fig. 77 SOC variation during the HESS operation in the Haengwon wind farm

2. 한경풍력발전단지

한경풍력발전단지의 경우 Table 29에서 배터리만을 사용하였을 경우 사용되는 에너지 저장시스템의 용량(C_{ESS_Total})은 식(55)에 의해 4.2MWh로 계산되었다. 또한 하이브리드 에너지저장시스템의 배터리용량(C_{HESS_Total})은 식(62)에 의해 3.5MWh로 계산되며 배터리만을 사용하여 에너지저장시스템을 구성하는 경우와 비교하여 0.7MWh의 용량이 감소하였다. 이를 보상하기 위해 사용되는 슈퍼커패시터의 용량은 불과 11.2kWh인데 비출력이 높은 슈퍼커패시터의 특성으로 약 3.5MW의 순간출력을 감당하기 때문이다. 또한 하이브리드 에너지저장시스템을 사용하는 경우 전체 에너지 저장장치의 활용도가 높아지는 경향을 사용하는 잔존용량(SOC_{use})을 통하여 확인할 수 있으며, 출력과위의 최대치가 줄어들게 되어 하이브리드 에너지저장시스템을 사용하는 경우 에너지변환장치의 최대 출력용량 역시 3.5MW가 감소함을 알 수 있다.

Table 29 Comparative results between the BESS and the HESS in the Hangeong wind farm

| BESS | | | HESS | | | | |
|---------------------------|--------------------------|---------------|---------------------|----------------------------|--------------------|-----------------------------|---------------|
| C_{ESS_Total} [MWh] | P_{ESS_Total} [MW] | SOC_{use} | C_{EDLC} [kWh] | C_{HESS_Total} [MWh] | P_{EDLC} [MW] | P_{HESS_Total} [MW] | SOC_{use} |
| 4.2 | 21 | 0.36~ 0.62 | 11.2 | 3.5 (16.7% decrease) | 3.5 | 17.5 (16.7% decrease) | 0.28~ 0.68 |

Fig. 78은 풍력발전단지가 정격출력 중 계통 탈락하였을 때 배터리와 슈퍼커패시터가 동시 보상하는 경우 각각 잔존용량곡선이며, 특히 슈퍼커패시터가 침투치 부분을 보상하고 있으며 분당 10MW의 기울기로 완만하게 한경풍력발전단지 출력이 감소하여 계통 안정에 기여하고 있음을 확인할 수 있다.

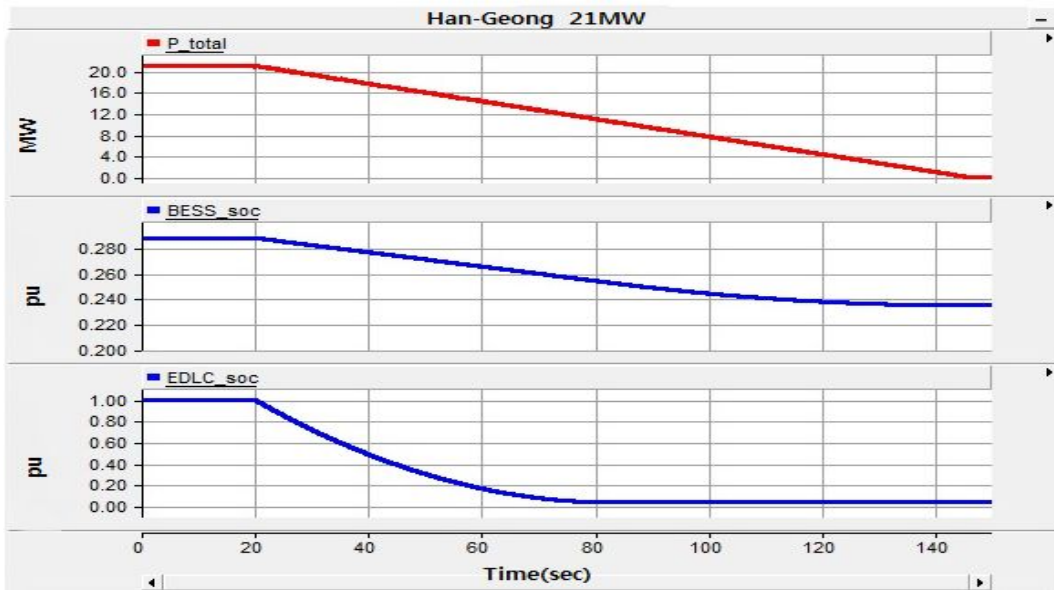


Fig. 78 SOC variation of the HESS
in case of disconnecting the Hangeong wind farm from the grid

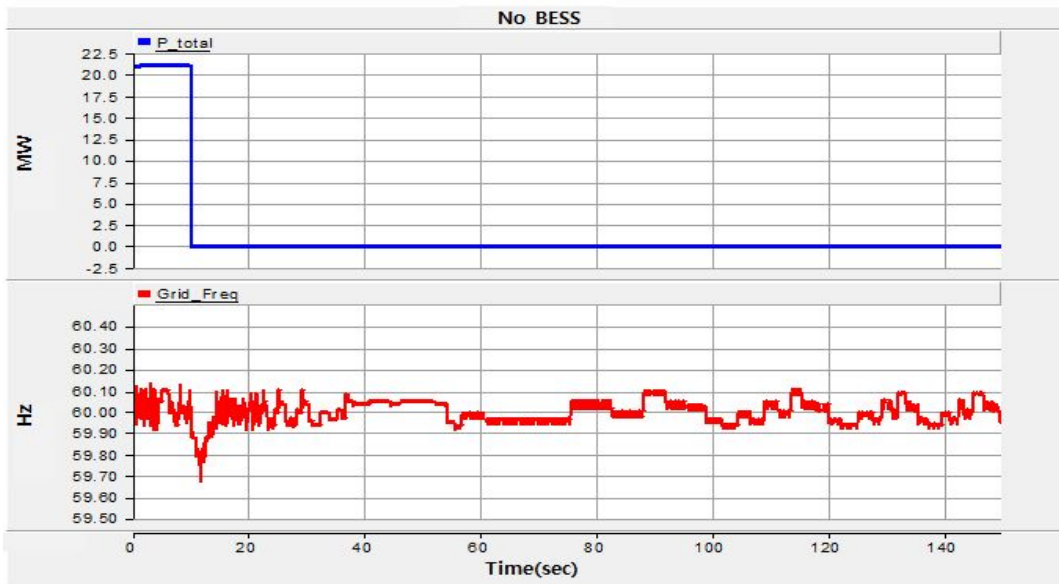


Fig. 79 Frequency variation in case of disconnecting the Hangeong wind farm
from the grid without the ESS

Fig. 79와 Fig. 80은 각각 한경풍력발전단지 계통탈락 시 에너지저장시스템이 없는 경우와 있는 경우에 대해서 컴퓨터 해석을 수행한 경우이다. 에너지저장시스템이 없는 경우, 크진 않지만 더 많은 주파수 변동을 보이고 있다.

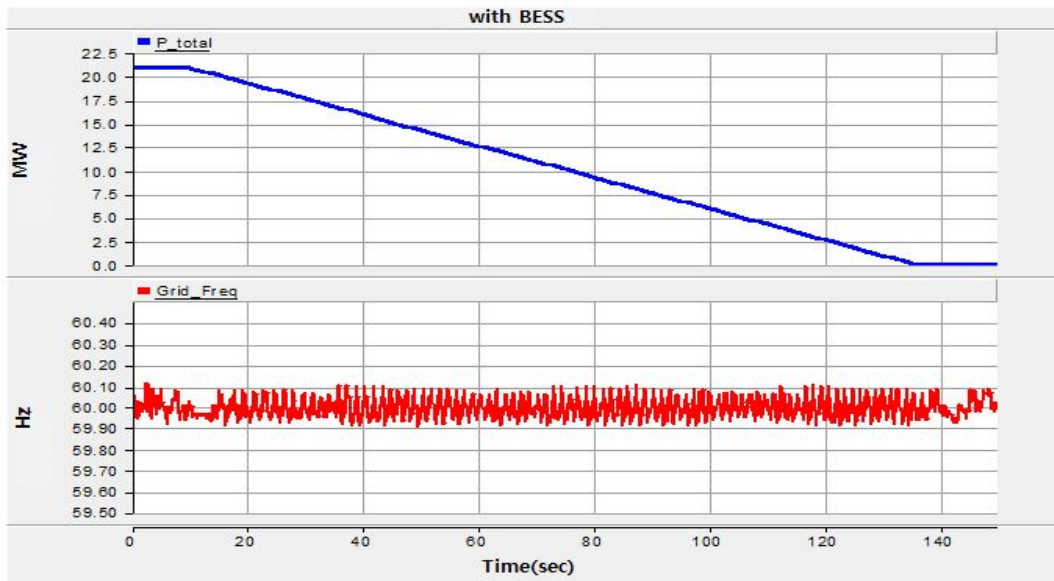


Fig. 80 Frequency variation in case of disconnecting the Hangeong wind farm from the grid with the ESS

Fig. 81은 2009년 3월부터 2010년 2월 까지 출력변동 폭이 가장 큰 2010년 1월 12일의 2초당 한경풍력발전단지의 출력데이터를 나타내고 있다. 이 결과에서 보면 20시경 약 17MW에서 2MW까지 급속하게 변동하는 것을 볼 수가 있다.

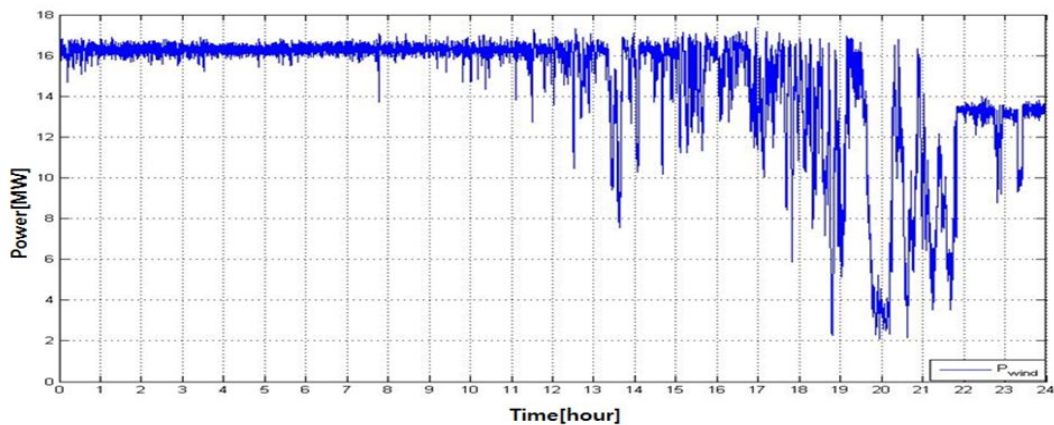


Fig. 81 Power output in the Hangeong wind farm (2012.01.12.)

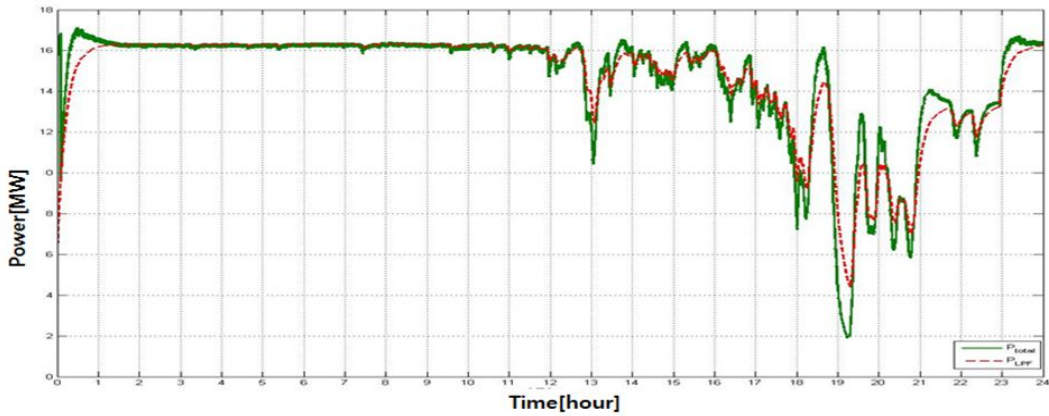


Fig. 82 Compensated power output of the Hangeong wind farm with the BESS and LPF

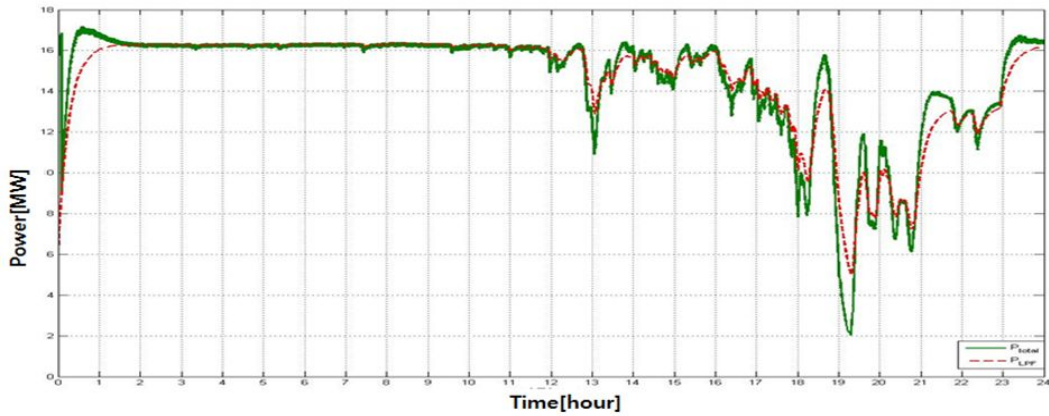


Fig. 83 Compensated power output of the Hangeong wind farm with the HESS and LPF

Fig. 82는 Fig. 81과 같은 풍력단지 출력에 대해 배터리만 사용하여 평활화 보상하는 경우를 컴퓨터 해석한 그래프이며 저역통과 필터로 처리된 기준 출력과 배터리에 의해 보상된 출력을 나타내고 있다. 같은 상황에 대해 Fig. 83는 하이브리드 에너지저장시스템을 사용하는 경우를 나타내며 슈퍼커패시터를 사용함에 따라 배터리 용량은 감소하였으나 출력변동을 보상하기 위해 필요한 최소 에너지 용량보다는 충분하게 설계되었으므로 배터리만 사용하는 경우와 차이가 없을 정도로 평활화 보상이 이루어지고 있다.

Fig. 84은 배터리만 사용하여 출력 평활화를 수행하는 동안의 잔존용량 제어결

과를 나타낸 것이다. Fig. 85에서 하이브리드 에너지저장시스템은 배터리만을 사용하는 경우보다 저장장치 용량이 적기 때문에 잔존용량 사용범위가 다소 넓어진다.

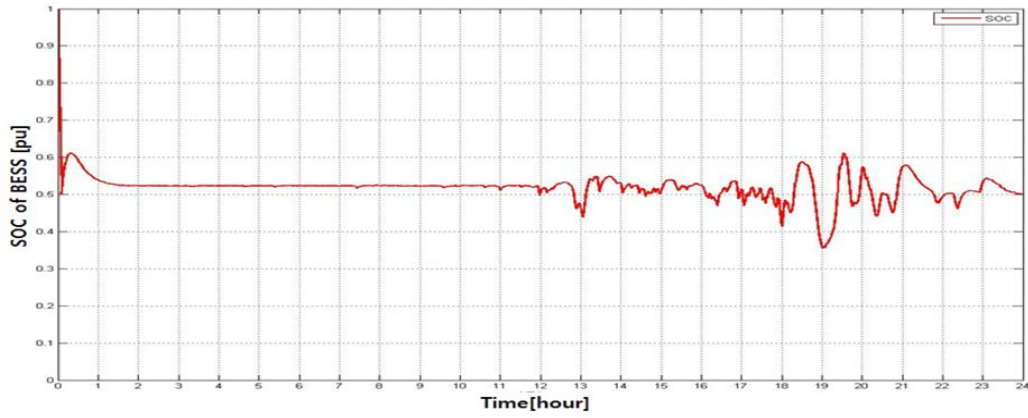


Fig. 84 SOC variation during the BESS operation in the Hangeong wind farm

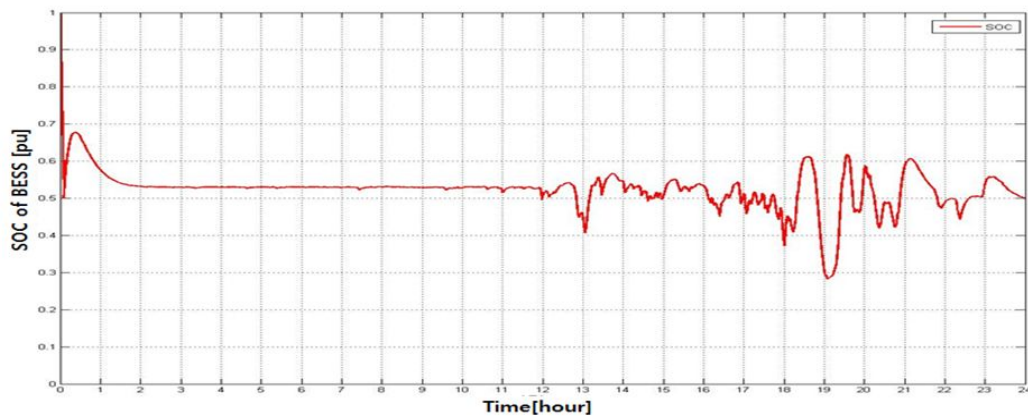


Fig. 85 SOC variation during the HESS operation in the Hangeong wind farm

3. 성산풍력발전단지

성산풍력발전단지의 경우 Table 30에 배터리만을 사용하였을 경우 사용되는 에너지저장시스템의 용량(C_{ESS_Total})은 식(68)에 의해 2.4MWh로 계산되었다. 또한 하이브리드 에너지저장시스템의 배터리용량(C_{HESS_Total})은 식(75)에 의해 2MWh로 계산되며 배터리만을 사용하여 에너지저장시스템을 구성하는 경우와 비교하여 0.4MWh의 용량이 감소하였다. 이를 보상하기 위해 사용되는 슈퍼커패시터의 용량은 불과 3.4kWh이다. 또한 하이브리드 에너지 저장 시스템을 사용하는 경우 전체 에너지 저장장치의 활용도가 높아지는 경향을 사용하는 잔존용량(SOC_{use})을 통하여 확인 할 수 있으며, 하이브리드 에너지저장시스템을 사용하는 경우 에너지변환장치의 최대 출력용량 역시 2MW가 감소함을 알 수 있다.

Fig. 86은 풍력발전단지가 정격출력 중 계통 탈락하였을 때 배터리와 슈퍼커패시터가 동시 보상하는 경우 각각의 잔존용량 곡선이며, 분당 10MW의 기울기를 갖으며 완만하게 성산풍력발전단지 출력이 감소하고 있음을 확인 할 수 있다.

Table 30 Comparative results between the BESS and the HESS in the Seongsan wind farm

| BESS | | | HESS | | | | |
|---------------------------|--------------------------|---------------|---------------------|----------------------------|--------------------|---------------------------|---------------|
| C_{ESS_Total} [MWh] | P_{ESS_Total} [MW] | SOC_{use} | C_{EDLC} [kWh] | C_{HESS_Total} [MWh] | P_{EDLC} [MW] | P_{HESS_Total} [MW] | SOC_{use} |
| 2.4 | 12 | 0.39~ 0.65 | 3.4 | 2 (16.7% decrease) | 2 | 10 (16.7% decrease) | 0.31~ 0.72 |

Fig. 87과 Fig. 88은 각각 성산풍력발전단지 계통탈락 시 에너지저장시스템이 없는 경우와 있는 경우에 대해서 컴퓨터 해석을 수행한 경우이다. 에너지저장시스템이 없는 경우 크진 않지만 더 많은 주파수 변동을 보이고 있다.

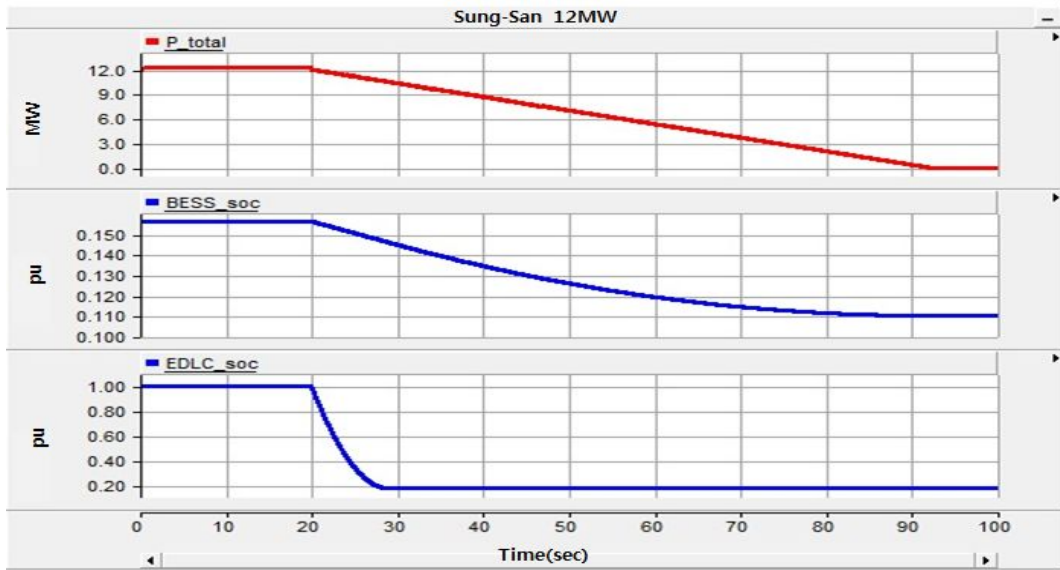


Fig. 86 SOC variation of the HESS
in case of disconnecting the Seongsan wind farm from the grid

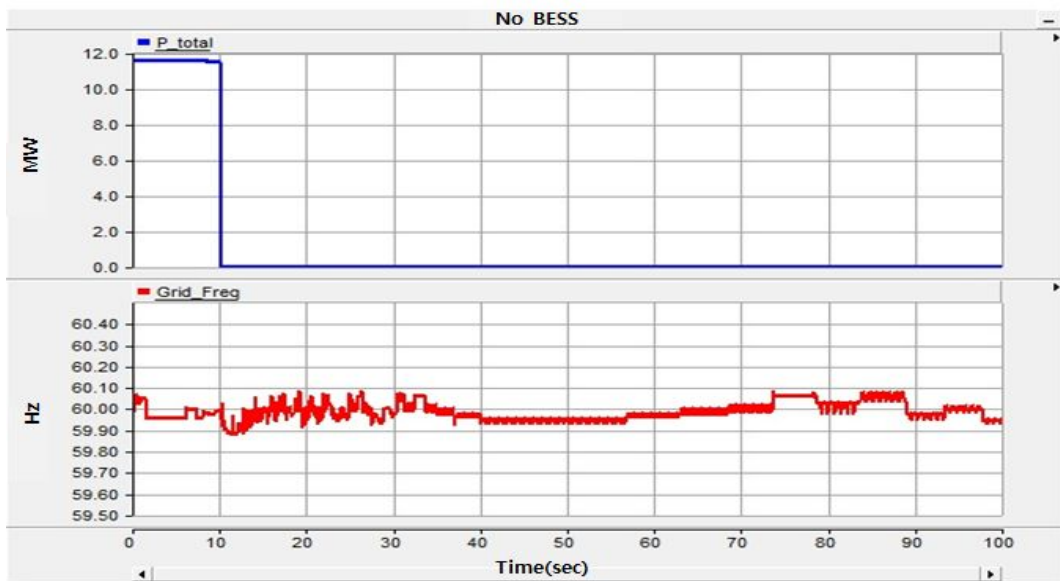


Fig. 87 Frequency variation in case of disconnecting the Seongsan wind farm
from the grid without the ESS

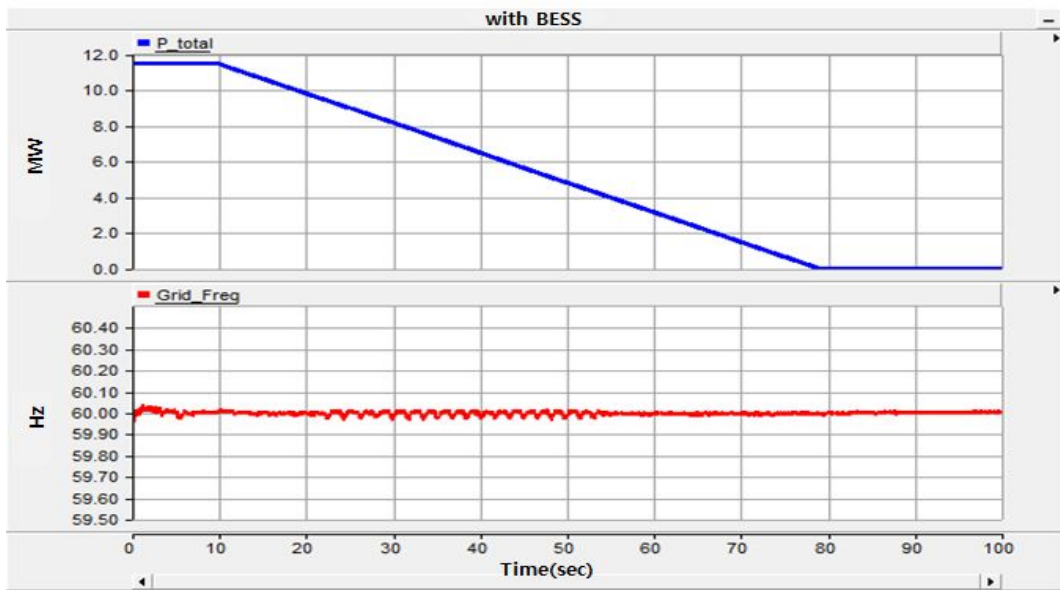


Fig. 88 Frequency variation in case of disconnecting the Seongsan wind farm from the grid with the ESS

Fig. 89는 2009년 3월부터 2010년 2월까지 출력변동 폭이 가장 큰 2010년 1월 27일의 2초당 성산풍력발전단지의 출력데이터를 나타내고 있다. 이 결과에서 보면 19시경 약 12MW에서 1MW까지 급속하게 변동하는 것을 볼 수 있다.

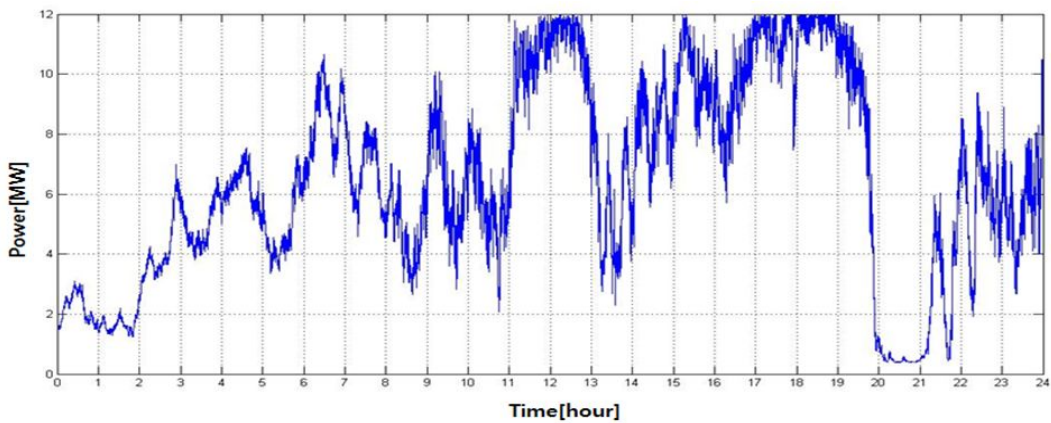


Fig. 89 Power output in the Seongsan wind farm (2010.01.27.)

Fig. 90은 Fig. 89와 같은 풍력단지 출력에 대해 배터리만 사용하여 평활화 보상하는 경우를 컴퓨터 해석한 그래프이며 배터리에 의해 보상된 출력을 나타내고 있다. 실제 변동되는 출력에 비해 상당한 에너지가 보상되어 평활화가 이루어지고 있다. 같은 상황에 대해 Fig. 91은 하이브리드 에너지저장시스템을 사용하는 경우를 나타내며 슈퍼커패시터를 사용함에 따라 배터리 용량은 감소하였으나 출력 변동을 보상하기 위해 필요한 최소 에너지 용량보다는 충분하게 설계되었으므로 배터리만 사용하는 경우와 차이가 없을 정도로 평활화 보상이 이루어지고 있다.

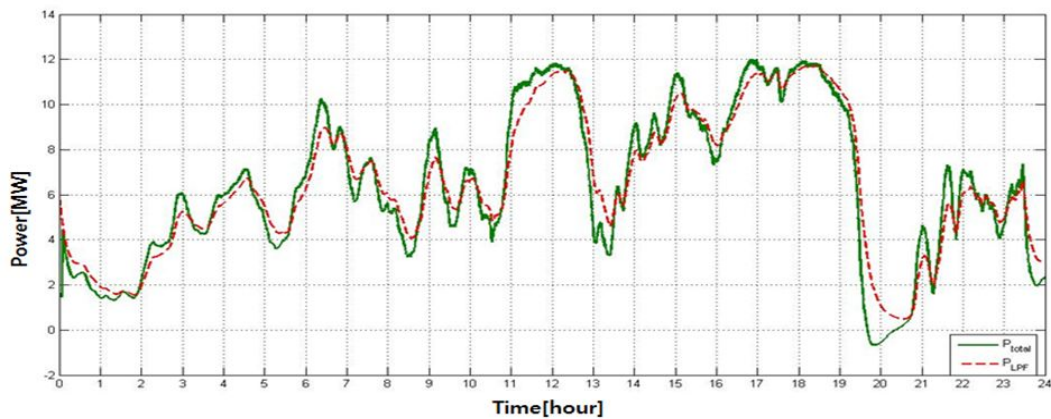


Fig. 90 Compensated power output of the Seongsan wind farm with the BESS and LPF

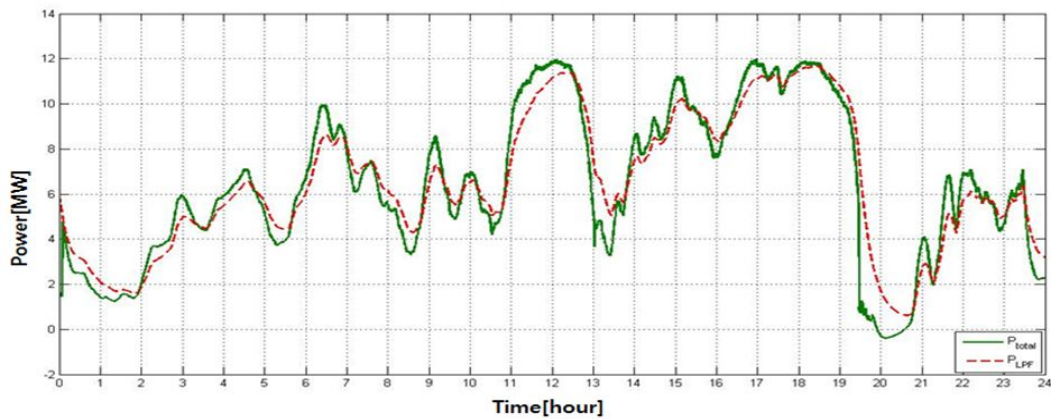


Fig. 91 Compensated power output of the Seongsan wind farm with the HESS and LPF

Fig. 92는 Fig. 89와 같은 출력변동에 대해 배터리만 사용한 에너지저장시스템이 출력 평활화를 수행하는 동안의 잔존용량 제어결과를 나타낸 것이다. Fig.

93에서 하이브리드 에너지저장시스템은 배터리만을 사용하는 경우보다 저장장치 용량이 적기 때문에 잔존용량 사용범위가 다소 넓어진다.

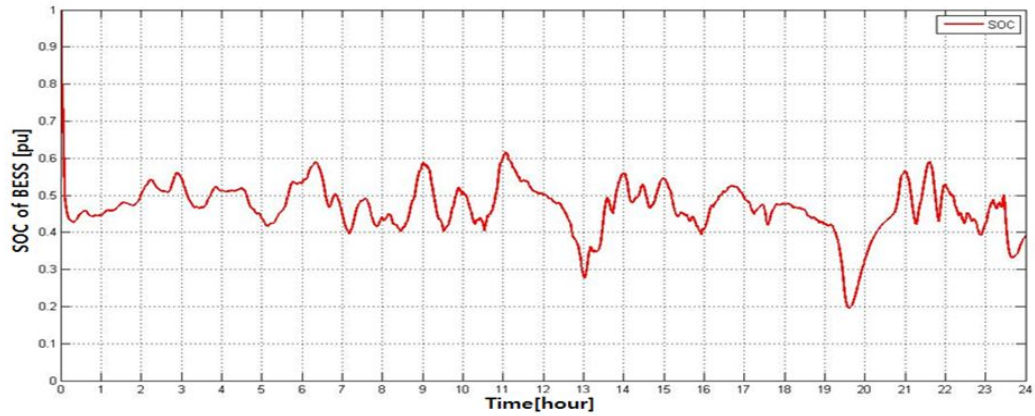


Fig. 92 SOC variation during the BESS operation in the Seongsan wind farm

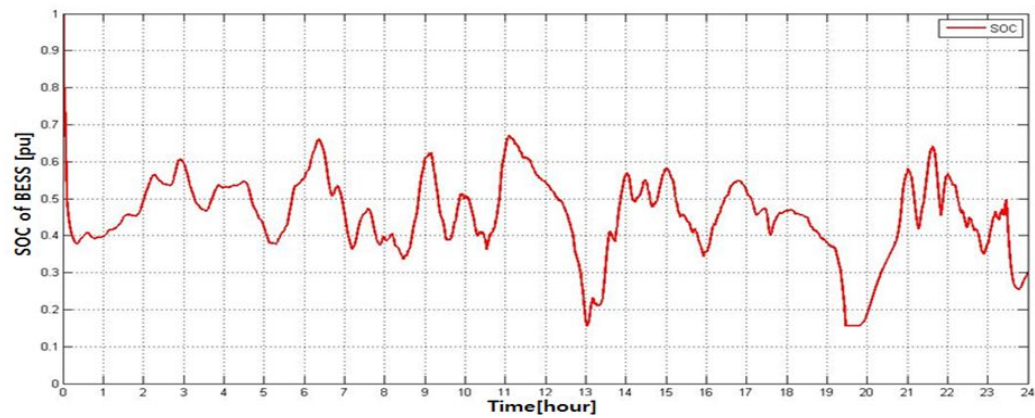


Fig. 93 SOC variation during the HESS operation in the Seongsan wind farm

V. 결 론

본 논문에서는 제주지역 풍력발전단지의 지속적 증가와 함께, 풍력발전이 갖는 단점인 불안정한 출력에 의한 계통의 영향을 최소화하고자 하이브리드 에너지저장시스템을 제안하였다. 연구를 위해 제주지역에서 운전되고 있는 행원, 한경, 성산풍력발전단지의 데이터를 선택하였으며, 풍력발전단지의 1년 동안의 출력데이터를 이용하여 실제적인 출력의 변동폭을 파악하였고, 가장 적절하게 적용할 수 있는 에너지저장시스템을 제안하기 위해 각종 에너지 저장매체에 대한 분석과 세계 동향을 파악하여 정리하였다.

그 중 국내 산업여건을 고려하였을 때 풍력발전 출력변동 완화 및 계통 탈락 보상을 위한 합리적 구성으로서 다른 에너지 저장매체에 비해 에너지밀도가 높아 하중과 부피가 줄어들고, 발열량이 적어 열손실이 작으며 자기 방전률이 낮아 유지보수 및 에너지 절감에 유리하며, 잔존용량 모니터링 및 모듈화가 쉽다는 장점이 있는 리튬이온 배터리와, 다른 에너지 저장매체보다 더 적은 내부저항을 갖고 있고 충·방전 시 전해액의 화학적 반응이 일어나지 않으므로 급속하고 높은 출력을 발생시키는데 유리한 슈퍼커패시터를 혼합 구성한 하이브리드 에너지저장시스템이 다른 시스템보다 성능이나 경제적인 측면에서 우수하다고 사료되어 본 논문에서 제안하게 되었다.

제안한 에너지저장시스템에 대한 컴퓨터 해석을 위해 리튬이온 배터리와 슈퍼커패시터의 수학적 모델링을 제안하였고, 풍력발전단지별 출력변동 특성 및 계통 탈락을 가정하여 발전단지의 정격용량에 따라 배터리로만 에너지저장시스템을 구성하는 경우와 하이브리드 형태로 에너지저장시스템을 구성하는 경우 각각에 대해서 용량산정기법에 대한 연구가 이루어졌고, 도출된 결과를 PSCAD/EMTDC 컴퓨터 해석 프로그램을 이용하여 비교 분석하였다. 이상의 연구를 통하여 다음의 결과를 도출하였다.

가. 현재 제주도에서 운영 중인 10MW 이상의 풍력발전단지 중 행원, 한경, 성산 풍력발전단지의 출력변동 특성을 분석하여 최대 변동량, 변동률, 확률분포를 분석하였다. 연계선이 없는 상황에서 발생될 수 있는 계통 영향을 예상할 수 있다.

나. 리튬이온 배터리 모델링 기법과 슈퍼커패시터 모델링 기법을 제안하고 이를 PSCAD/EMTDC 프로그램으로 구현하여 대용량 에너지저장시스템의 컴퓨터 해석을 수행 했을 때 순시전류와 배터리 잔존용량에 따른 출력전압의 동특성을 분석할 수 있으며, 이는 실제적으로 대용량 에너지저장시스템을 설계 및 제작하는데 검증용으로 활용이 가능하다.

다. 풍력발전단지에 에너지저장시스템을 구성하는 경우 배터리로만 구성하는 경우와 슈퍼커패시터와 하이브리드 구성하는 경우에 대해서 각각 용량산정 방법을 제안하고 있으며, 풍력출력변동성 완화를 위한 에너지저장시스템 용량과 풍력발전단지의 계통탈락을 고려한 에너지 저장장치 용량 계산을 구분하여 필요에 따라 적절한 용량산정이 가능하도록 제안하였다.

라. 제안된 에너지저장시스템의 용량을 기준으로 컴퓨터 해석을 수행하여 배터리로만 에너지저장시스템을 구성했을 때와 하이브리드형 에너지저장시스템으로 구성했을 때를 비교하면, 작은 용량의 슈퍼커패시터를 채용함으로써 상당히 많은 양의 배터리 용량을 줄일 수 있음을 밝히고 있다.

이상과 같은 결과를 종합하면, 풍력발전단지의 출력변동성 완화와 계통탈락 시 계통충격 완화를 목적으로 에너지저장시스템이 설계되는 경우, 제안된 배터리와 슈퍼커패시터로 구성된 하이브리드 에너지저장시스템이 배터리만으로 단일 구성된 에너지저장시스템보다 유리함을 밝히고 있다. 또한 향후 풍력발전단지에 에너지저장시스템의 용량산정 및 동작 신뢰성을 검토하는데 있어 제안된 용량산정 및 모델링 기법이 유용할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] (주)효성중공업, Smart Renewable용 풍력발전 특성 연구(중간보고서), 2011.
- [2] KPX 전력거래소, 제5차 전력수급기본계획, 2010.
- [3] KPX 전력거래소, 제주지역 운영예비력 산정기준 연구(최종보고서), 2011.4.
- [4] 강지윤, 김세호, 김영환, 고영준, 2009 대한전기학회 제40회 하계학술대회 2010~2011년 제주 풍력발전기 운전 한계용량 검토, pp. 123~124, 07, 2009.
- [5] A. Ingram, "Storage options and sizing for utility scale integration of wind energy plants," in Proc. Int. Solar Energy Conf. 2005, Orlando, FL, pp. 843~851, Aug. 2005.
- [6] C. Abbey and G. Joos, "Sizing and power management strategies for battery storage integration into wind-diesel systems," in Proc. Conf. IEEE Industrial Electronics (IECON), pp. 3376~3381, 2008.
- [7] A. Shahirinia, S. Tafreshi, A. H. Gastaj, and A. Moghaddamjoo, "Optimal sizing of hybrid power system using genetic algorithm," in Proc. Int. Conf. Future Power Systems, Amsterdam, The Netherlands, pp. 6, 2005.
- [8] S. Schoenung and W. Hassenzahl, "Long vs Short Term Energy Storage Technologies Analysis." A Life-Cycle Cost Study DOE Energy Systems Program, Tech. Rep, August. 2003.
- [9] H. Le and T. Nguyen, "Sizing energy storage systems for wind power firming: An analytical approach and a cost-benefit analysis," in Proc. Power and Energy Society General Meeting, Pittsburgh, PA, pp. 1~8, 2008.
- [10] C. Brunetto and G. Tina, "Optimal hydrogen storage sizing for wind power plants in day ahead electricity market," Renewable Power Generation, vol. 1, no. 4, pp. 220~226, Dec. 2007.
- [11] KASSERIS E, SAMARAS Z, ZAFEIRIS D, "Optimization of a wind power fuel-cell hybrid system in an autonomous electrical network

- environment”, *Renew. Energy*, 32, pp. 57~79, 2007.
- [12] CAVALLO A, “Controllable and affordable utility-scale electricity from intermittent wind resources and compressed air energy storage (CAES)”, *Energy*, 32, pp. 120~127, 2007.
- [13] WANG J, KANG LY, CAO BG, “A new control strategy of a wind power generation and flywheel energy storage combined system”. *Lecture Notes in Computer Science* vol. 3972, pp. 1370~1377.
- [14] PRASAD AR, NATARAJAN E, “Optimization of integrated photovoltaic-wind power generation systems with battery storage”, *Energy*, 31, pp. 1943~1954, 2006.
- [15] ONAR OC, UZUNOGLU M, ALAM MS, “Dynamic modeling, design and simulation of a wind/fuel cell/ultra-capacitorbased hybrid power generation system”, *J. Power Sources*, 161, pp. 707~722, 2006.
- [16] GARCIA RS, WEISSER D, “A wind-diesel system with hydrogen storage: joint optimisation of design and dispatch”, *Renew. Energy*, 31, pp. 2296~2320, 2006.
- [17] DENHOLM P, “Improving the technical, environmental and social performance of wind energy systems using biomass-based energy storage”, *Renew. Energy*, 31, pp. 1355~1370, 2006.
- [18] 정봉상, 전영환, 김일동, 양정재 “우리나라 계통의 주파수응답특성에 의한 발전기정수 산정에 관한 연구” *대한전기학회, 전기학회논문지* 58(4), pp. 688~693, 04, 2009.
- [19] 제주도내 풍력발전단지 성능 모니터링 및 평가(총괄), 제주도, 2004.6.
- [20] 진창수 “대용량 에너지저장 전지” *KIC News*, Volume 13, No. 2, pp. 23~29, 2010.
- [21] Salt Specialty Battery Group, “Rechargeable Li-ion battery systems-Light energy storage for space applications”, *Product catalog*, 2006.
- [22] C. M. Shepherd, “Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An equation describing battery discharge” *Journal of Electrochemical Society*,

- Volume 112, pp. 657~664, Jul. 1965.
- [23] C. M. Shepherd, "Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An equation describing battery discharge" *Journal of Electrochemical Society*, Volume 112, pp. 1~23, Jul. 1965.
- [24] Olivier Tremblay, Louis-A. Dessaint "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications" *World Electric Vehicle Journal* Vol. 3 - ISSN 2032-6653 - 2009 AVERE, pp. 1~10, 2009.
- [25] Tremblay, O., Dessaint, L.-A. Dekkiche, A.-I. "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles" *Vehicle Power and Propulsion Conference*. IEEE, pp. 284~289, 2007.
- [26] Dougal R.A, Liu S, White, R.E. "Power and Life Extension of Battery - Ultracapacitor Hybrids", *Components and Packaging Technologies*, IEEE Transactions on Volume: 25 , Issue: 1, pp. 120~131, 2002.
- [27] Khaligh A, Zhihao Li, "Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art", *Vehicular Technology*, IEEE Transactions on Volume: 59 , pp. 2806~2814, 2010.
- [28] 강명석, "슈퍼커패에 의한 풍력발전기의 출력전력 안정화"- 2011 한국 춘계 풍력학회. pp. 327~330, 2011.
- [29] 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, pp. 1244~1251, 06, 2006.
- [30] Sercan Teleke, Mesut E, Baran, Q. Huang, Subhashish Bhattacharya, Loren Anderson "Control Strategies for Battery Energy Storage for Wind Farm Dispatching" *IEEE, VOL.24, NO.3*, pp. 725~732, 2009.
- [31] 전원개발 주식회사 "풍력발전 전력 계통 안정화등 기술개발 - 성과보고서 (중간)" 독립행정법인 신에너지 산업기술 종합 개발 기구, 2006.

감 사 의 글

2005년 다니던 직장과 타지생활을 그만두고 고향으로 내려오면서 만학의 꿈을 다시 꾸게 되었고, 그때 시작한 박사과정이 어느덧 올해까지 만 7년의 시간이 지났습니다. 혼자의 생각으로는 그 시간동안 여러 가지 것들에 대한 도전과 성취를 이루었고, 열정적인 인생의 과정으로 보람 있고 바쁜 시간을 보냈다고 생각하지만 학문적으로는 좀 더 좁아지고 채워지지 않는 부족함을 느끼는 제 자신을 돌이켜 봅니다. 결국 지도 교수님과 심사 교수님들의 배려와 이해로 저의 부끄럽고 모자란 논문이 보완되어 완성되지 않았나 생각합니다.

16년 전 김일환 지도교수님과 인연을 맺은 후 교수님은 항상 아버지 이상의 관심과 애정을 아낌없이 표현해 주셨고 노심초사 제 논문과 학위과정을 포기하지 않고 마무리 할 수 있도록 지도해주셨습니다. 그중에 가장 강조하신 교수님의 가르침은 “박사의 박(博)은 얇을 박(薄)이다. 그러니 항상 겸손하게 자신을 낮추며 살아라.”, “모르는 것은 부끄러운 것이 아니다. 항상 물어보고 지식을 구해라.”, “근본을 잊지 말고 신의를 지켜라.” 제가 할 수 있는 교수님에 대한 보은은 최선을 다해 가르침대로 살려고 노력하는 것이라 생각합니다. 감사합니다.

학위 과정 중 항상 따듯한 관심과 애정 어린 조언을 해 주신 좌종근 교수님, 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김세호 교수님, 김호찬 교수님, 김호민 교수님과 멀리 제주도까지 오셔서 논문심사에 흔쾌히 응해주신 조선대학교 조금배 교수님께도 감사의 마음을 전합니다. 논문의 완성까지 같이 고생하고 도와준 연구실 학사, 석사 후배들에게 고맙다는 말을 전하고 싶고, 논문 막바지 교정을 도와준 부창진 박사님, 김도진 박사님과도 이 기쁨을 같이 나누고 싶습니다. 제가 가진 미력한 재능을 밖에서도 사용할 수 있고 쓸모 있는 것으로 만드는데 도움을 아끼지 않은 김영환 부장님, 송기혁 형님, 송기택 사장님, 김경탁 사장님, 이태호 본부장님에게도 감사드리며, 논문 막바지 귀찮은 여러 일들 도와주시고 챙겨주신 김현정 선생님, 문선영 과장, 김동현 팀장, 안연준 연구원에게 감사를 포함합니다.

끝으로 불혹의 아들을 아직도 걱정하시는 어머니, 아버지와 항상 옆에서 든든한 버팀목이 되어주는 사랑하는 아내 고영심과 나를 꼭 닮은 아들 김건 에게도 이 영광과 기쁨을 함께하며 사랑한다 말하고 싶습니다.