



저작자표시-동일조건변경허락 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.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

EES를 이용한 제주지역
풍력발전단지의 출력 평활화 효과
분석

濟州大學校 大學院

電氣工學專攻

金 承 賢

2014 年 8 月



EES를 이용한 제주지역 풍력발전단지의 출력 평활화 효과 분석

指導教授 金 鎬 民

金 承 賢

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2014 年 8 月

金承賢의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ ①

委 員 _____ ①

委 員 _____ ①

濟州大學校 大學院

2014 年 8 月

Analyzing Smoothing of Output Power for Wind Farm in Jeju Island Using EES

Seung Hyun Kim
(Supervised by professor Ho-Min Kim)

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

FACULTY OF APPLIED ENERGY SYSTEM
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2014. 8.

- i -

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	iv
SUMMARY	v
1. 서 론	1
2. 제주계통 특성	3
2.1 발전소 운전 특성	4
2.2 풍력발전단지 현황	5
2.3 풍력발전기 계통 접속 기준	6
3. 모델링과 풍력발전단지 분석	8
3.1 풍력발전단지 출력 안정화 제어 및 EES 모델링	8
3.2 제주계통 모델링	15
3.3 EES를 이용한 풍력발전단지별 효과 분석	21
4. 컴퓨터 해석	27
4.1 제주계통의 실제데이터 및 컴퓨터 해석	27
4.2 제주계통의 EES 연계 해석	28
4.3 해석 결과 및 고찰	31
5. 결 론	34
참 고 문 헌	35
감사의 글	37

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Status of power grid in Jeju Island	3
Fig. 2 The active power flow of power plants in Jeju Island	5
Fig. 3 Block diagram of the wind power system with EES	9
Fig. 4 Simulation results of output power of total and wind farm, EES	9
Fig. 5 Smoothing control of output power	11
Fig. 6 Feedback control of the state of charge	11
Fig. 7 The battery model	13
Fig. 8 Discharging current curves of CGR 17500	13
Fig. 9 Discharging current curves of battery model	14
Fig. 10 Characteristics of voltage and current of CGR 17500	14
Fig. 11 Characteristics of voltage and current of the battery model	14
Fig. 12 Power grid in Jeju Island	15
Fig. 13 The generator model	16
Fig. 14 The equivalent model of a wind farm	17
Fig. 15 The real active power of wind farms	18
Fig. 16 The simulation results of active power of wind farm model	18
Fig. 17 The equivalent model of the HVDC	19
Fig. 18 50 MVA STATCOM model	20
Fig. 19 Comparing of output power of Gasiri wind farm with/without EES	21
Fig. 20 Comparing of output power of Hangeong wind farm with/without EES	22
Fig. 21 Comparing of output power of Hangwon wind farm with/without EES	23
Fig. 22 Comparing of output power of Samdal wind farm with/without EES	24
Fig. 23 Comparing of output power of Seongsan wind farm with/without EES	25
Fig. 24 The real active power of power grid in Jeju Island	27
Fig. 25 The active power of power grid in Jeju Island	28
Fig. 26 The active power of power grid with EES in Jeju Island	29
Fig. 27 The SOC variation of EES in case of connecting east wind farm	30
Fig. 28 The SOC variation of EES in case of connecting west wind farm	31
Fig. 29 Comparing of output power with/without EES	32

LIST OF TABLES

Table 1 Capacity of power generation in Jeju Island	4
Table 2 Capacity of Wind farms in Jeju Island	6
Table 3 A ramp rate of the output of power plants in Jeju Island	7
Table 4 Specifications of CGR 17500	12
Table 5 Gasiri wind farm	22
Table 6 Hangeong wind farm	23
Table 7 Hangwon wind farm	24
Table 8 Sandal wind farm	25
Table 9 Seongsan wind farm	26
Table 10 Comparison of power fluctuation with/without EES	33

SUMMARY

The fluctuation of the output power generated from wind farms connected to Jeju power grid will be able to make effects at the power quality and stability. To solve the matter, many researchers have proposed the usage of the EES(Electric Energy Storage) in the wind farm.

In this paper, The EES is applied to each wind farms for mitigating the fluctuation of the output power generated from wind farms. The EES is controlled for smoothing the output power of wind farms.

To verify the effectiveness of the proposed method, two kinds of simulation will be carried out:

1) The simulation results by using PSCAD/EMTDC simulation program are compared to the measured data from the real power grid in Jeju Island.

2) The second simulation is to analyze the output power generated from wind farms when the EES is connected to the grid.

Without the EES, the fluctuation rate per minute of the output power generated from wind farms is about 14.4%. It is larger than the fluctuation rate of 10% which has been noticed by Grid Standard of renewable generator. In case of applying the EES, the fluctuation rate of the output power generated from wind farms is reduced to 12.7% which has about 1.7% improvement. However, it also does not meet the Grid Standard of renewable generator.

Finally, to satisfy the Grid Standard of renewable generator, it is effective to estimate the capacity of the EES which applies larger than 10% capacity of wind forms

1. 서 론

최근 일본 후쿠시마에서 발생한 원전사고에 따른 방사능 유출과 국내 여러 원자력 발전소의 운전 정지로 인해 원자력발전에 대한 우려가 전 세계적으로 확산되고 있다. 그러나 원자력 발전은 저렴한 발전단가로 인해 전체 발전량의 상당량을 차지하고 있어 에너지 수요를 감당하기 위해서는 단기간에 그 점유율 감소에는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 신재생에너지 기술 개발에 집중하고 있다 [1][2]. 신재생에너지 발전은 다양한 무공해 에너지를 사용하여 전력을 생산하는 발전 방식을 말하며 이 중 풍력발전은 면적당 수급 가능한 에너지가 다른 신재생 에너지원들 보다 높고 주변 환경에 미치는 영향이 적어 현재 전 세계적으로 가장 각광받고 있는 신재생 에너지원으로 볼 수 있다.

또한 풍력발전은 국토가 좁은 반면 비교적 풍력자원이 풍부한 국내 지형 조건에 적합하여 지속가능한 청정에너지원으로서의 활용가치가 매우 높다. 특히, 제주도는 섬이라는 지리적 특수함으로 인해 타 지역에 비해 풍력 발전을 위한 풍황 조건이 우수하여 풍력발전 산업의 메카로 떠오르고 있다.

2014년 6월 기준 제주지역의 풍력발전단지 용량은 112.5 MW로 제주지역의 총 발전설비용량인 840 MW의 약 13%를 차지하고 있으며 그 점유율은 지속적으로 증가하고 있으며 풍력단지의 대단지화 및 풍력 터빈의 대형화로 변화하고 있는 추세이다. 그러나 풍력발전은 풍속 조건에 직접적으로 영향을 받는 특징으로 인해 강한 난류가 불어올 시 풍력단지의 출력이 크게 변동하여 인접한 전력계통에 전압과 주파수변동 등과 같은 문제를 야기할 수 있다 [3][4].

이러한 계통의 불안전성을 최소화하고 안정적으로 풍력발전설비를 운영하는 방안 수립이 요구되고 있지만 현재 제주 계통은 복합화력발전소 등을 포함한 기저발전원들이 단시간 출력 변동을 추종할 수 있는 능력이 부족하여 단시간 출력 변동 추종이 가능한 HVDC(High Voltage Direct Current) 시스템이 계통의 출력 변동을 보상하고 일정시간 후에 발전소들이 출력변동을 보상하고 있다. 그러나 HVDC 시스템 고장 등의 문제가 발생했을 시 이를 대체할 수 있는 방안이 시급한 상태이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 풍력발전단지에 EES(Electrical

Energy Storage)를 연계한 단지출력 변동 최소화 방안이 현실적인 대안으로 부각되고 있다 [5]-[7]. 풍력발전단지와 EES 연계 운전 시 풍력발전단지의 출력변동에 따라 에너지 충·방전을 통해 계통에 공급되는 풍력발전단지 출력을 평활화할 수 있다.

본 논문에서는 풍력발전단지의 출력을 안정적으로 계통에 연계하기 위해 다양한 EES 중 상대적으로 응답속도 및 에너지 밀도가 높은 Li-ion battery를 적용하여 모델링하였다. 풍력발전단지로부터 발생한 출력전력의 평활화 제어를 위해 요구되는 EES의 용량은 제주특별자치도 에너지 저장장치 설치에 관한 세부사항을 참고하여 풍력발전단지 용량의 10% 이상으로 최소 1시간동안 지속적인 출력이 가능하도록 산정하였다 [8]. EES를 풍력발전단지에 적용 시 계통에 공급되는 전력은 출력 변동의 평활화정도와 EES 적용 유/무에 따른 발전 출력의 변동률에 대해 분석되었다. 제주계통 모델링과 EES 적용 효과를 분석하기 위해 PSCAD/EMTDC 프로그램을 사용하였으며 실제 풍력단지의 출력 데이터와 비교 분석하여 시뮬레이션 해석 결과를 검증하였다.

2. 제주계통 특성

현재 제주계통은 Fig. 1과 같이 각각의 발전소들과 전류형 HVDC #1, #2, STATCOM(Static Synchronous Compensator) 2대, 풍력발전단지로 계통 운영하고 있다. STATCOM은 신제주변전소와 한라변전소에, HVDC #1, #2는 제주변환소와 서제주변환소에 연계되어 운영되고 있다. 제주계통에서 부하변동에 따른 전력보상은 빠른 응답에서는 HVDC 시스템이, 늦은 응답에서는 기존 발전소가 담당하고 있다. 또한 전류형 HVDC 시스템은 직류송전에 대한 제어를 위하여 사이리스터의 점호각을 제어하기 때문에 컨버터 교류전류의 위상은 항상 전압에 뒤진다. 그래서 전류형 HVDC의 컨버터는 전류를 흡수하기 위해 무효전력이 필요하여 AC 필터와 동기조상기 및 STATCOM 2대로 무효전력을 보상해준다 [9][10].

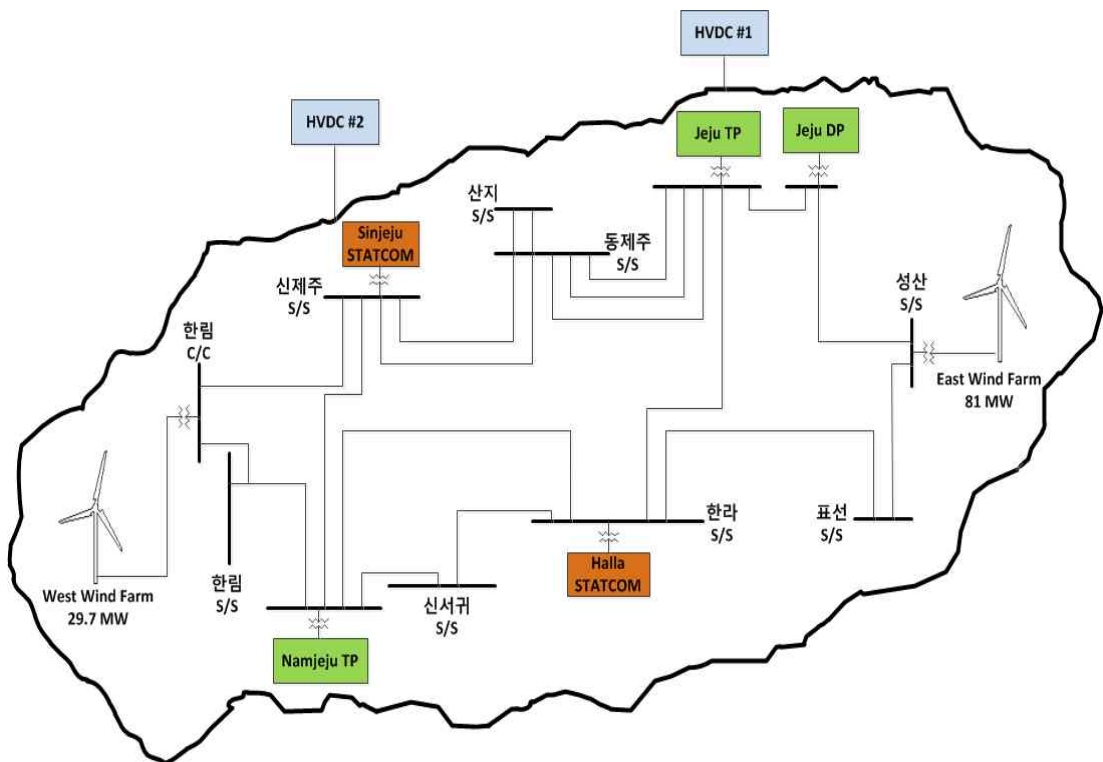


Fig. 1 Status of power grid in Jeju Island

2.1 발전소 운전 특성

2013년 11월 기준 제주계통에서 운영되는 발전설비는 총 590 MW로 발전기 10기로 운영되고 있으며, 기력발전기 4대가 기저부하를 담당하고 내연 및 가스터빈 발전기는 첨두부하를 담당하고 있다. 제주도내 풍력발전단지는 총 110.7 MW가 운영되고 있고, HVDC #1은 300 MW로 수전이 가능하나 계통 사고 시를 대비하기 위해 최대 150 MW 수전만이 가능하게 운영되고, HVDC #2는 현재 시운전 중에 있다. 제주 계통의 각 발전소별 설비용량 및 공급능력은 Table 1에 보여주고 있다.

Table 1 Capacity of power generation in Jeju Island

[단위:MW]

	Capacity	Availability
Jeju TP #2	75	79
Jeju TP #3	75	79
Jeju DP #1	40	40
Jeju DP #2	40	40
Jeju GT #3	55	45
Namjeju TP #1	100	103
Namjeju TP #2	100	103
Hallim CC	105	102
Sub-Total	590	591
Wind farm	110.7	24.5
HVDC #1	-	150
HVDC #2	-	100
Total	700.7	865.5

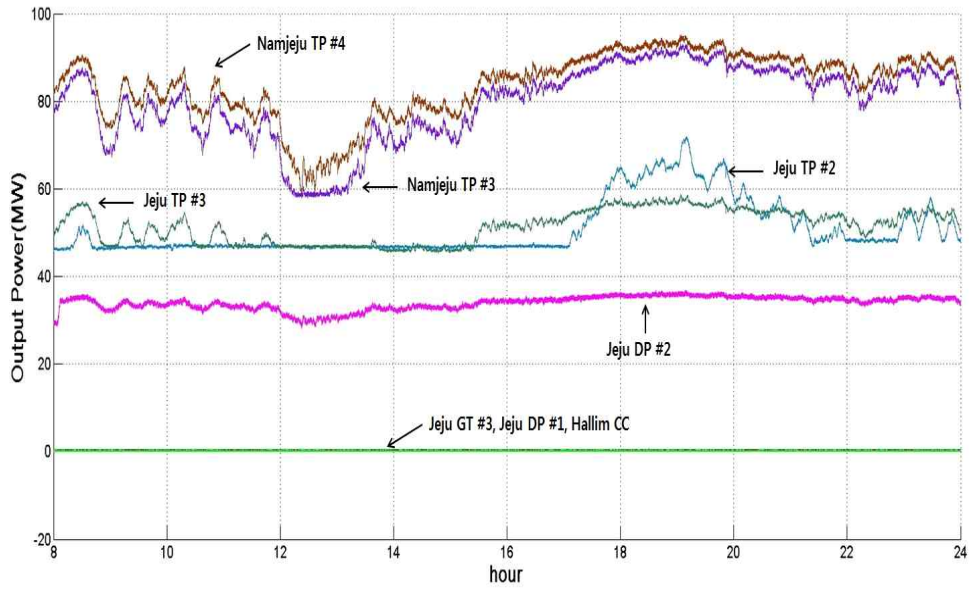


Fig. 2 The active power flow of power plants in Jeju Island

풍력발전단지의 출력 변동이 가장 심한 2013년 11월 27일의 제주계통 내 각 발전소별 출력은 Fig. 2와 같다. 실제로 제주계통 내의 발전소 출력은 부하에 따라 각 발전소의 출력이 변하는 것을 알 수 있다. 또한 기저부하는 기력발전소 즉, 남제주 TP #3, #4와 제주 TP #2, #3이 담당하는 것을 볼 수 있고 제주 DP #1, #2와 제주 GT #3은 첨두부하를 담당하고 있기 때문에 일정한 범위 내에서 운전됨을 알 수 있다.

2.2 풍력발전단지 현황

2013년 11월 기준 제주지역 풍력발전단지는 가시리 풍력발전단지를 중심으로 동부지역에 81 MW, 한경 풍력발전단지를 중심으로 서부지역에 29.7 MW로 총 110.7 MW의 설비 용량을 가지며 총 68기로 운영 및 실증되고 있다. 제주지역의 풍력발전단지별 용량은 Table 2와 같다.

Table 2 Capacity of Wind farms in Jeju Island

	Capacity (MW)
Gasiri Wind Farm	15 (15EA)
Hangeong Wind Farm	21 (9EA)
Hangwon Wind Farm	10 (15EA)
Samdal Wind Farm	33 (11EA)
Seongsan Wind Farm	20 (10EA)
Sinchang Wind Farm	1.7 (2EA)
Kimnyeong Wind Farm	1.5 (2EA)
Walryung Wind Farm	2 (1EA)
Waljung Wind Farm	6.5 (3EA)
Total	110.7

2.3 풍력발전기 계통 접속 기준

풍력발전기 및 풍력발전단지의 계통 접속 및 운영 시 “신재생발전기 계통연계 기준”을 준수하여 운영해야 된다. 규정을 보면 풍력발전기는 전력계통의 안정적인 운영에 영향을 미치는 중대한 계통고장 발생 시, 전력시장운영규칙 중 비상시에 급전지시 절차를 준용하여 사전 유효전력을 제어할 수 있도록 4가지 제어기능을 각각 구비해야 한다는 내용이 있다 [11]. 즉, 풍력발전단지는 유효전력을 전력계통에 안정적으로 공급하기 위해서는 단지 출력을 억제할 수 있도록 제어해야 한다. 또한 풍력발전단지의 증발률 제한은 풍속이 증가함에 따라 출력 변화량을 일정 이하로 제한하는 것을 목적으로 한다. 그러나 풍력발전단지의 출력 변동에 따

라 기존 발전기가 출력 변동을 추종할 수 있어야 하는데, 계통 내의 기존발전기는 출력 변동을 추종할 수 있는 성능이 기술 및 경제적인 이유로 제한된다. 이러한 문제를 해결하고 전력계통을 안정적으로 운영하기 위해서는 에너지저장장치를 적용해야 한다 [12].

Table 3은 제주계통 발전기의 출력 증발률을 나타낸 것이다 [13]. 풍력발전기의 최대 증발률은 남제주발전기의 출력 증발률인 10 MW/min 보다 작아야만 계통의 주파수가 안정적으로 유지될 수 있다. 현재까지 제주계통의 풍력발전 출력 변동에 대한 기존 발전기들의 추종 능력은 충분하지만 향후 더 많은 풍력발전단지가 계통에 연계되거나 갑작스런 돌풍 등으로 인해 풍력발전단지의 출력이 변할 수 있기 때문에 이에 따라 풍력발전단지의 증발률을 적절히 제한할 수 있어야 한다.

Table 3 A ramp rate of the output of power plants in Jeju Island

		Capacity of generator (MW)	Ramp rate of output (MW/min)
KOMIPO	Jeju TP #2	75	1
	Jeju TP #3	75	1
	Jeju DP #1	40	1.2
	Jeju GT #3	55	5
KOSPO	Namjeju TP #1	100	5
	Namjeju TP #2	100	5
	Hallim CC	105	8.8

* KOMIPO : Korea Midland Power

KOSPO : Korea Southern Power

3. 모델링과 풍력발전단지 분석

3.1 풍력발전단지 출력 안정화 제어 및 EES 모델링

1) 풍력발전단지 출력 안정화 제어

풍력발전단지 출력은 바람에 의해 시시각각 변하기 때문에 풍력발전단지를 계통에 연계할 경우 EES 운영시스템에 의해 출력 제어가 되어야 한다. 출력 변동을 안정화시키기 위한 풍력발전단지 연계형 EES 운영시스템은 Fig. 3과 같이 PCS, PMS(Power Management System), BMS(Battery Management System), EES로 구성되어 있다. PCS는 전력변환시스템으로 단지 출력을 배터리에 충·방전하기 위한 장치이고 BMS는 배터리의 전압, 온도 등을 모니터링하는 기능과 배터리를 보호하는 기능 등으로 구성된 배터리 관리 시스템이다. PMS는 계통 전력, 전압 등을 측정하여 EES의 전력제어를 담당하는 시스템이다 [14].

풍력발전단지 출력 안정화 제어는 풍력발전단지에 따른 합성출력 목표치를 산정하고 목표치를 추종하도록 배터리 출력을 제어하는 것이다. 요구되는 배터리 출력은 식 (1)에 의해 구할 수 있다. 또한 요구되는 배터리 출력에 대해서 EES가 대응할 수 있으면 실제 합성출력은 합성출력 목표치와 동일해진다. Fig. 4는 풍력발전단지 출력 안정화 제어를 통한 풍력발전단지와 합성 출력, EES 에너지 충·방전과의 관계를 나타내고 있다. EES는 풍력발전단지 출력과 합성출력 목표치에 의해 에너지를 충·방전한다.

$$at \quad P_{total} - P_{wind} \tag{1}$$

여기서,

P_{bat}	:	Required battery output	[MW]
P_{total}	:	Total output	[MW]
P_{wind}	:	Wind farm output	[MW]

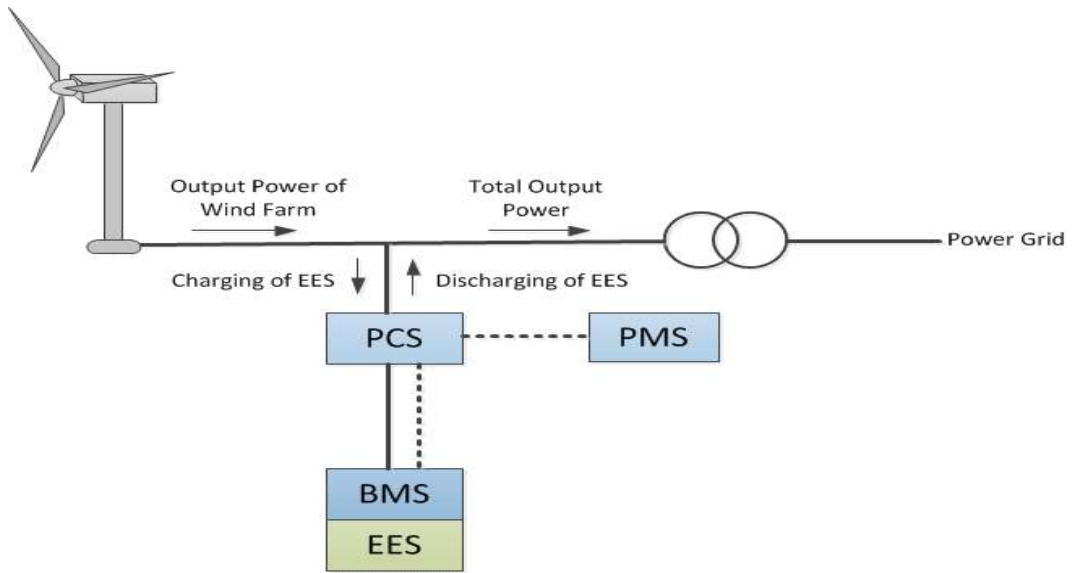


Fig. 3 Block diagram of the wind power system with EES

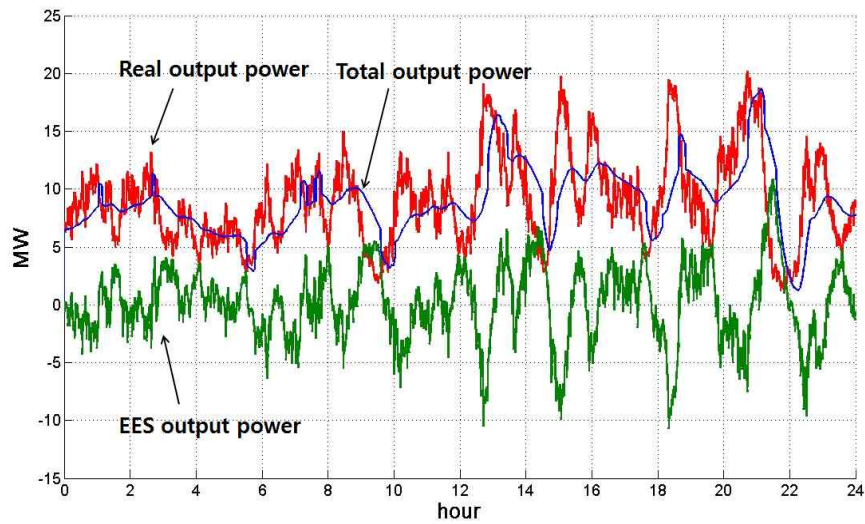


Fig. 4 Simulation results of output power of total and wind farm, EES

이러한 풍력발전단지 출력 안정화 제어를 실현하기 위해서 풍력발전단지 연계형 EES 운영시스템을 계통에 적용하여 운영하여야 한다. 출력 안정화 제어는 풍력발전단지 출력 평활화 제어 및 배터리 잔존 용량 피드백 제어 알고리즘을 통한 제어가 필수적이다.

2) EES 제어

EES 제어는 풍력발전 출력보상 및 배터리 잔존 용량(SOC : State of Charge)을 일정범위 내에 유지할 수 있도록 제어한다. 배터리는 완전방전 시 기전력을 다시 생성하기가 어렵기 때문에 배터리 SOC를 10~20%의 여유를 두고 제어하였다. 또한 배터리의 방전율(C-rate)은 최대 4C로 제한하고 [15] 배터리 용량은 제주특별자치도 에너지저장장치설치에 관한 세부사항을 참고하여 풍력발전단지 용량의 10% 이상으로 최소 1시간동안 지속적인 출력이 가능하도록 산정하였다.

가. 평활화 제어

평활화 제어는 풍속에 의해 변동하는 풍력발전출력의 단주기 성분을 EES의 보상 및 방전을 통하여 풍력발전단지의 출력 변동을 평활화하는 제어 방식이다.

Fig. 5는 EES를 이용한 풍력발전단지의 출력 변동을 평활화하는 제어를 나타낸 블록도이다. 풍력발전단지의 출력을 계통에 안정적으로 공급하기 위해서 LPF(Low Pass Filter)를 통해 합성출력 목표치를 산출해야한다. 그리고 목표치와 풍력발전단지의 출력 차를 통하여 요구되는 배터리 용량을 구할 수 있다. 그러나 LPF의 시정수 T_s 가 커지면 평활화 효과가 커지지만 요구되는 배터리 용량이 산정된 용량을 넘게 되어 평활화 효과가 줄어들 수 있다.

나. 잔존 용량 피드백 제어

EES의 지속적인 평활화 제어 및 운전 중에 자기 방전에 의해 배터리가 완전 방전될 수가 있기 때문에 배터리 용량을 유효하게 활용하기 위해서는 배터리 SOC를 항상 일정한 범위 내에서 유지하도록 잔존 용량 피드백 제어를 해야 할 필요가 있다 [16].

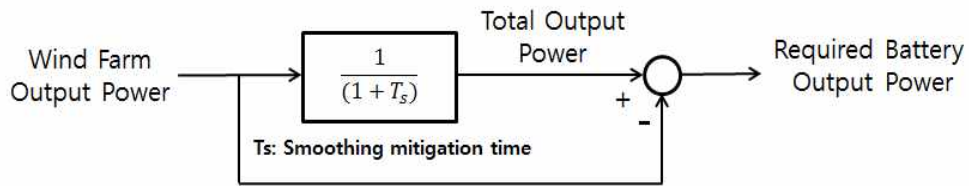


Fig. 5 Smoothing control of output power

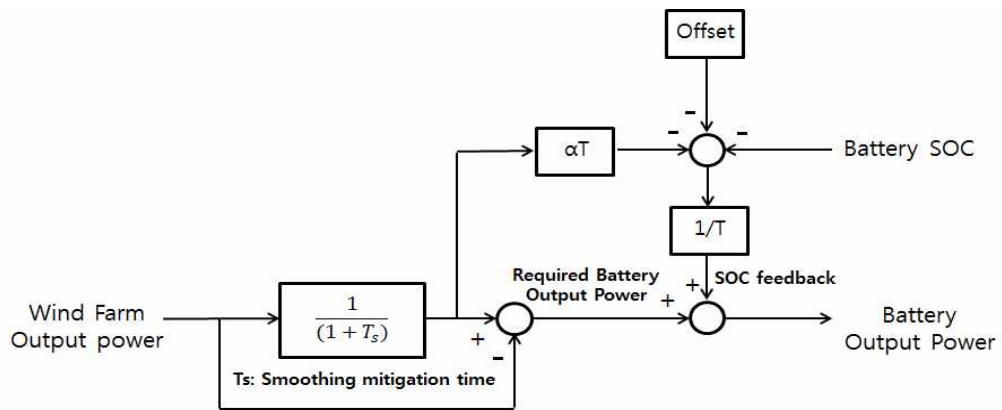


Fig. 6 Feedback control of the state of charge

Fig. 6은 출력 평활화 제어 알고리즘에 피드백 제어를 추가한 잔존용량 피드백 제어의 블록도를 나타낸다. 배터리 SOC를 피드백 받아 배터리 요구치와 합산하여 출력 평활화에 요구되는 배터리 용량을 출력한다.

여기서, α 는 배터리 출력 레퍼런스 값을 SOC와 비교하기 위한 변환 계수이며, Offset은 SOC의 여유분을 남기기 위한 상수이다.

$$= (-2 \cdot C \cdot M) / (T_p \cdot P_{wf}) \quad (2)$$

$$Offset = M \cdot C \quad (3)$$

여기서,

T_{op}	:	Smoothing mitigation time	[sec]
C	:	Battery capacity	[MWh]
M	:	Margin of SOC of battery	[PU]
P_{wf}	:	Wind farm output	[MW]

3) EES 모델링

EES의 구성은 배터리와 PCS(Power Conditioning System)로 구성된다. 본 논문의 배터리 모델은 Li-ion battery의 전기화학적 특성을 고려하여 수학적으로 나타내기 위해 Shepherd nonlinear battery model을 적용하여 단순한 가변 전압 소스와 저항으로 구성하였으며 PCS 모델은 유·무효전력의 제어가 가능한 전류원으로 등가화하여 모델링하였다. 배터리의 비선형적인 충·방전 특성은 식 (4)와 같이 표현 할 수 있다 [17][18].

$$V_{bat} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} - R \cdot i + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (4)$$

여기서,

V_{bat}	:	Battery voltage	[V]
E_0	:	Battery constant voltage	[V]
K	:	Polarization voltage	[V/Ah]
Q	:	Battery capacity	[Ah]
A	:	Exponential zone amplitude	[V]
B	:	Exponential zone time constant inverse	[Ah ⁻¹]
R	:	Internal resistance	[Ω]
i	:	Leakage current	[A]
$t = \int_0^t i dt$:	Actual battery charge	[Ah]

Li-ion battery는 Panasonic사의 CGR 17500의 특성을 적용하였으며, 배터리 규격은 Table 4와 같다. 정격전압 및 용량은 각각 3.6 V, 830 mAh이고 최대 전압 및 전류는 4.2 V, 550 mA이다 [19].

Table 4 Specifications of CGR 17500

Nominal Voltage		3.6 V
Standard Capacity		830 mAh
Dimensions	Diameter	16.9 +0/-0.7 mm
	Height	49.6 +0/1.0 mm
	Weight	Approx. 25 g

Fig. 8과 Fig. 9는 실제 배터리 방전곡선과 모델링한 배터리 방전곡선을 각 전류별로 배터리 방전 시 방전곡선을 나타낸다. 전류량에 따라 초기 전압 및 방전 곡선이 다르고 최소 전압은 3.0 V이다. 두 방전곡선을 비교하면 거의 유사한 방전특성을 볼 수 있다.

또한 Li-ion battery를 4 W로 방전 시 실제 배터리와 모델링된 배터리의 전압, 전류 방전곡선은 Fig. 10, Fig. 11과 같이 두 방전곡선 비교 시 거의 유사한 특성을 보인다.

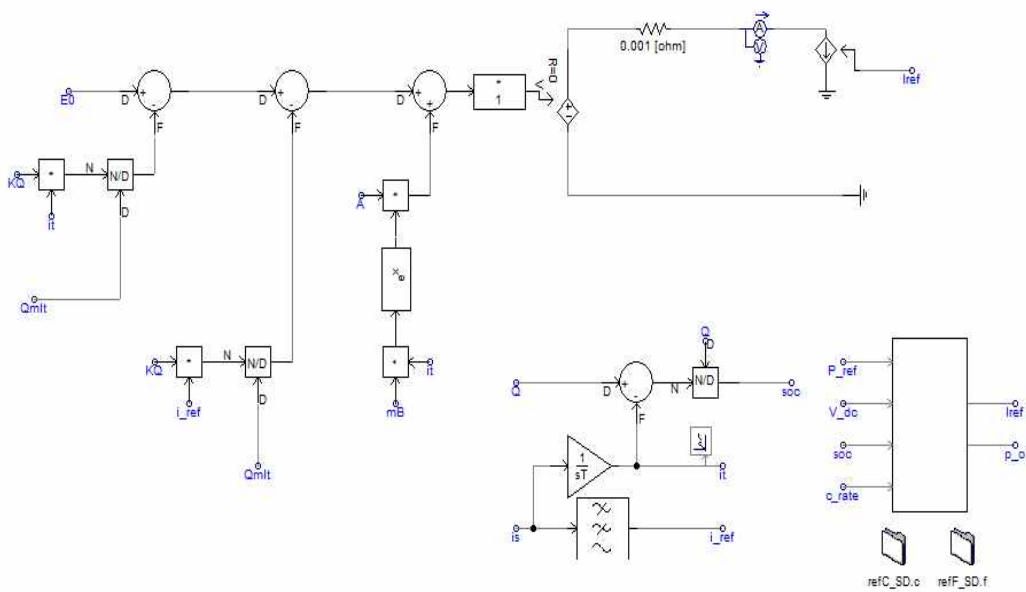


Fig. 7 The battery model

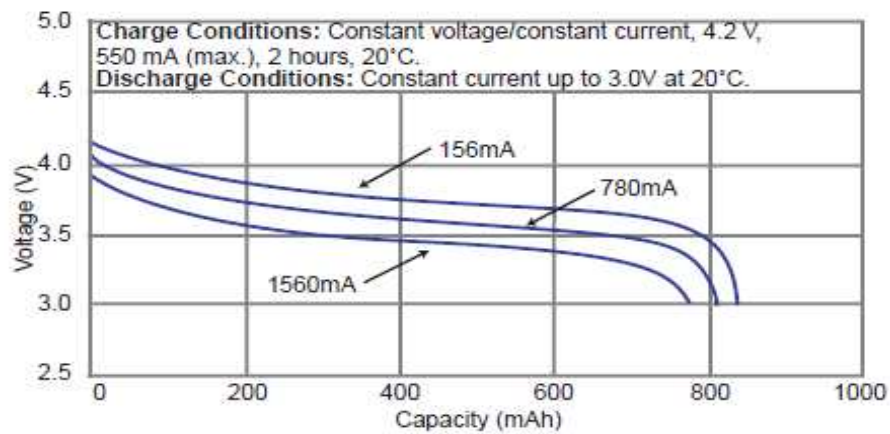


Fig. 8 Discharging current curves of CGR 17500

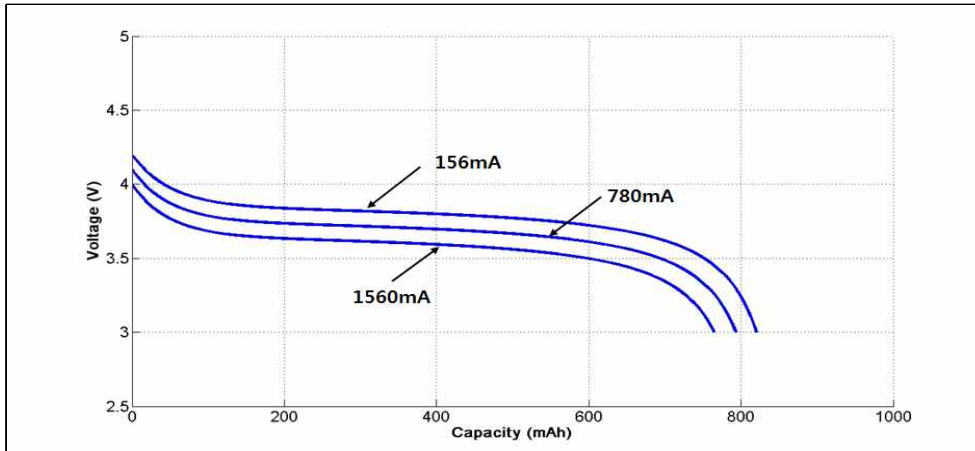


Fig. 9 Discharging current curves of battery model

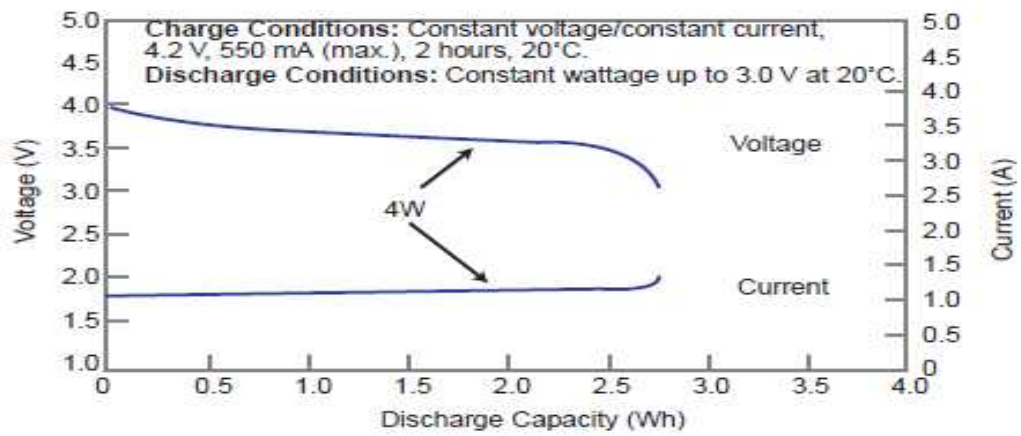


Fig. 10 Characteristics of voltage and current of CGR 17500

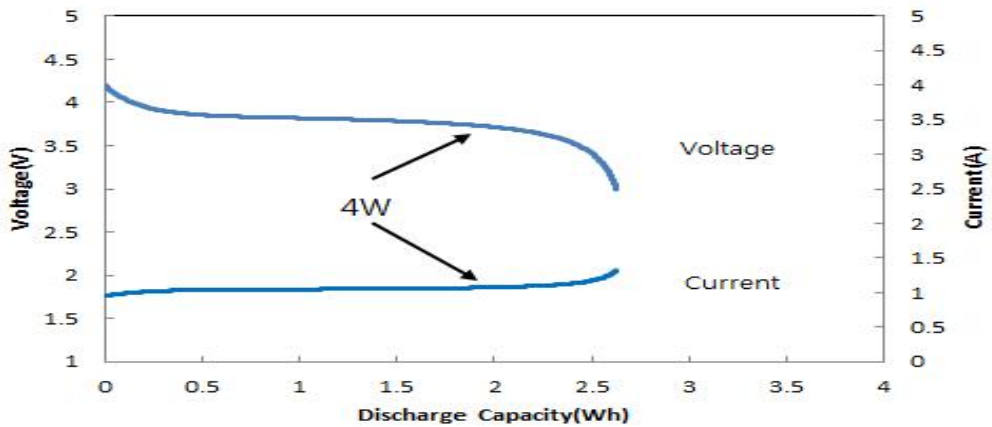


Fig. 11 Characteristics of voltage and current of the battery model

3.2 제주계통 모델링

Fig. 12는 2013년 11월 27일 기준으로 모델링된 제주계통을 보여준다. 제주계통 내의 시스템 모델링은 해남~제주 간에 연결되어 있는 HVDC #1 150 MW, 진도~제주 간에 연결되어 있는 HVDC #2 100 MW, STATCOM 50 MVA 2대, 풍력발전단지 및 각 발전소로 구성되어 있다. 모델링된 HVDC 시스템은 실제 데이터를 통해 제주계통에 유·무효전력을 공급하고 있고 STATCOM은 제주계통 전압을 피드백 받아 기준전압 154 kV로 무효전력을 제어하고 있다. 풍력발전단지는 110.7 MW로 각 단지별로 실제 데이터를 통해 유효전력을 제어하고 있고 EES는 단지별로 용량을 적용하여 제어하고 있다. 또한 부하는 실제 부하량을 적용하여 가변 저항 및 인덕턴스를 통해 부하를 표현하였고, 선로정수와 변압기 파라미터는 실제 데이터 값을 적용하였다. 그리고 제주계통 내의 발전소는 실제 값을 적용하였다.

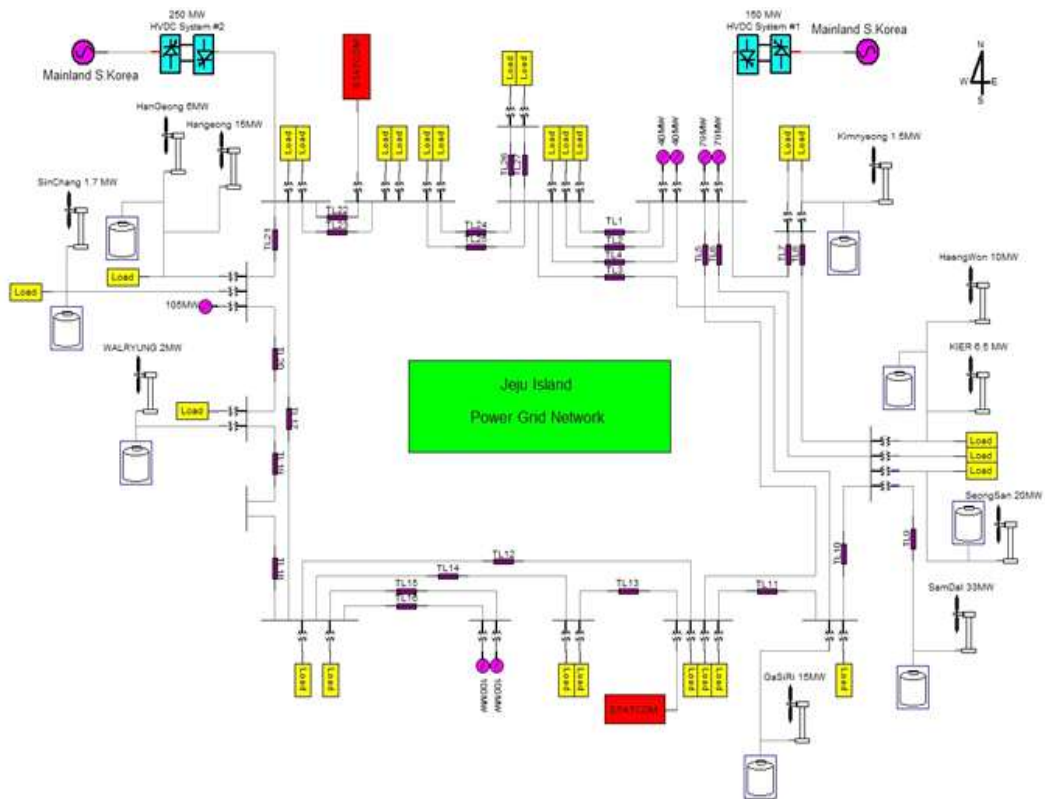


Fig. 12 Power grid in Jeju Island

1) 발전소 모델링

발전기, 여자시스템 그리고 조속기/ 터빈 등의 정수는 실제 값을 적용하였고 그 외의 값들은 실측된 결과를 토대로 결정하였으며 실측된 결과와 비교하여 값들의 유효성을 확인하여 적용하였다.

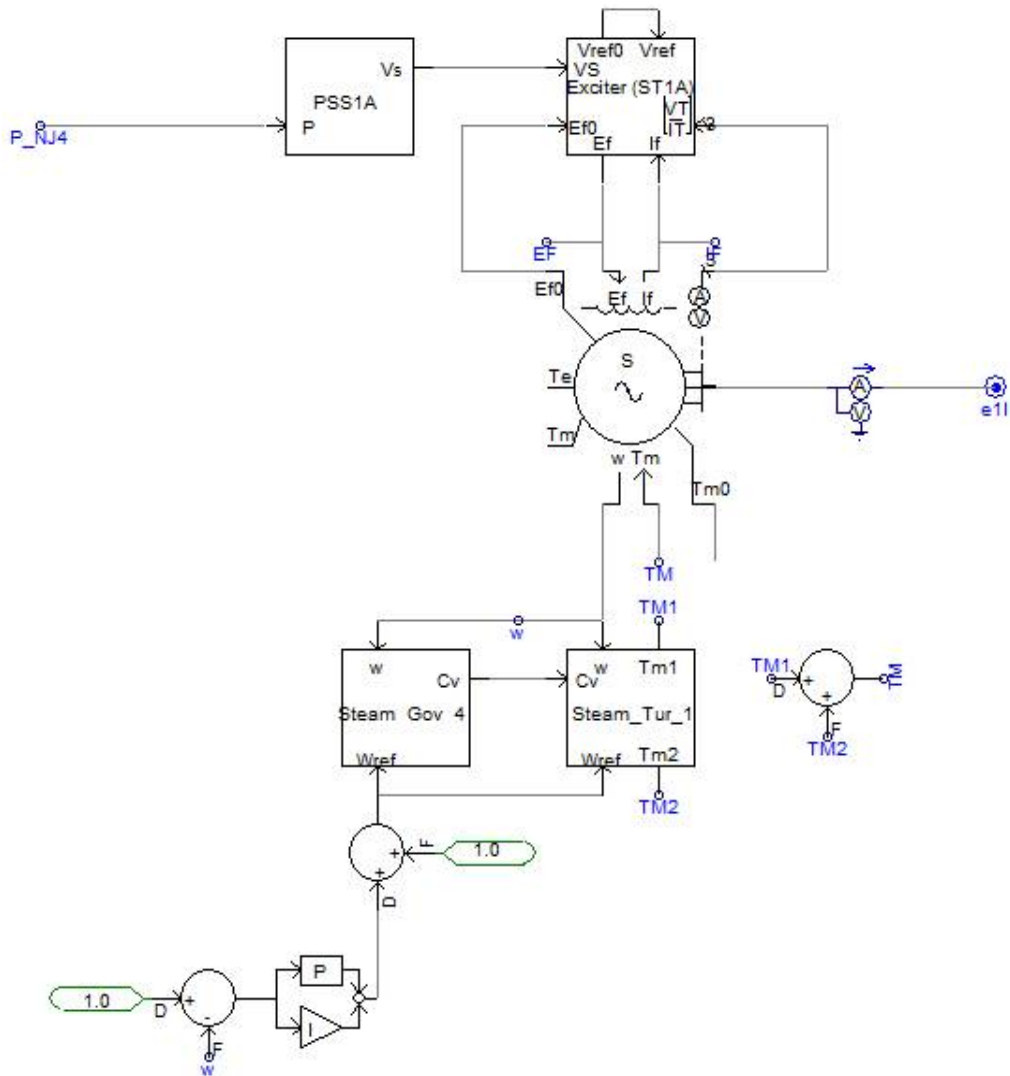


Fig. 13 The generator model

2) 풍력발전단지 모델링

풍력발전기들은 신재생에너지 계통연계기준에 따라 지상 0.95~진상 0.95의 역률을 유지하여야 한다. 또한 풍력발전단지의 유효전력은 정격풍속 이하에서는 최대 출력점 제어 즉, MPPT(Maximum Power Point Tracking)제어를 하고 정격풍속 이상에서는 정출력 제어를 하여 최대 유효전력을 계통으로 공급하게 된다.

풍력발전단지의 실제 출력과 유사한 특성을 가지기 위해서 시뮬레이션 상의 풍력발전단지는 실제 데이터를 Look-up Table화하여 가변 전류원으로 모델링하여 실제와 유사한 출력을 표현하도록 하였다.

실제 풍력발전단지 출력과 전류원으로 모델링된 풍력발전단지 출력을 검증하기 위해 성산, 삼달풍력단지 두 곳을 선정하여 비교하였으며, 그 결과 Fig. 15, Fig. 16와 같이 단지 출력 특성이 거의 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다.

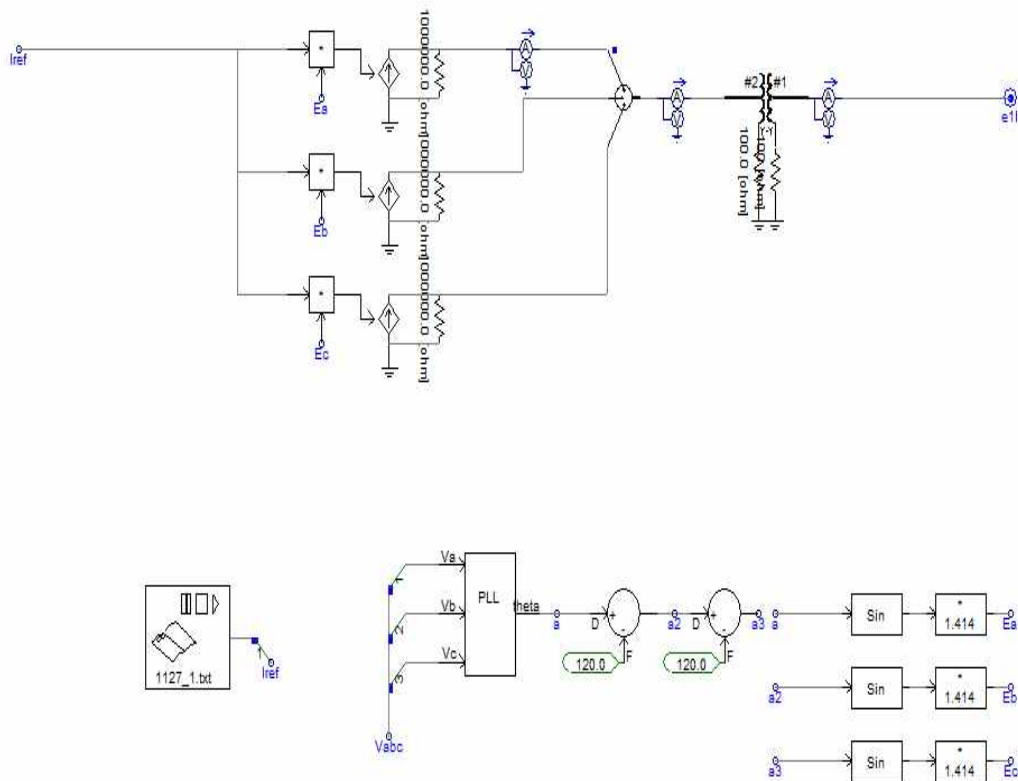


Fig. 14 The equivalent model of a wind farm

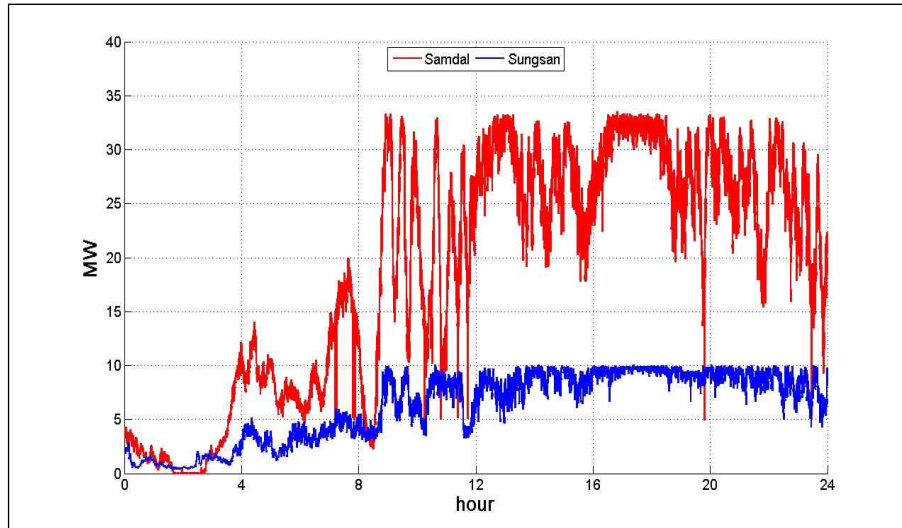


Fig. 15 The real active power of wind farms

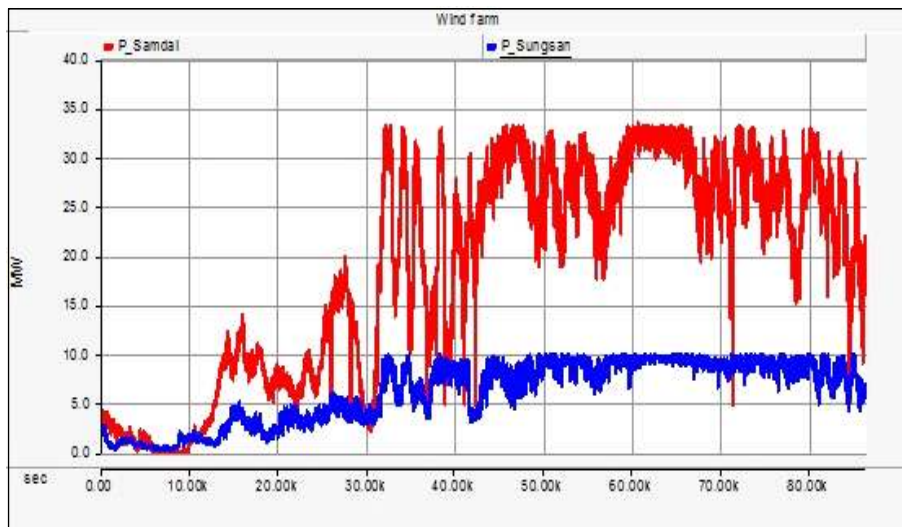


Fig. 16 The simulation results of active power of wind farm model

3) HVDC 모델링

HVDC 모델링은 시뮬레이션 시간을 단축하기 위해 가변 전류원으로 증가화하여 표현하였다. 실제와 유사한 출력 특성을 나타내기 위해 실제 데이터를 Look-up Table화하고, 피상전력 값으로 전류 기준값을 얻어 유·무효전력을 실제 출력과 유사하게 나타냈다.

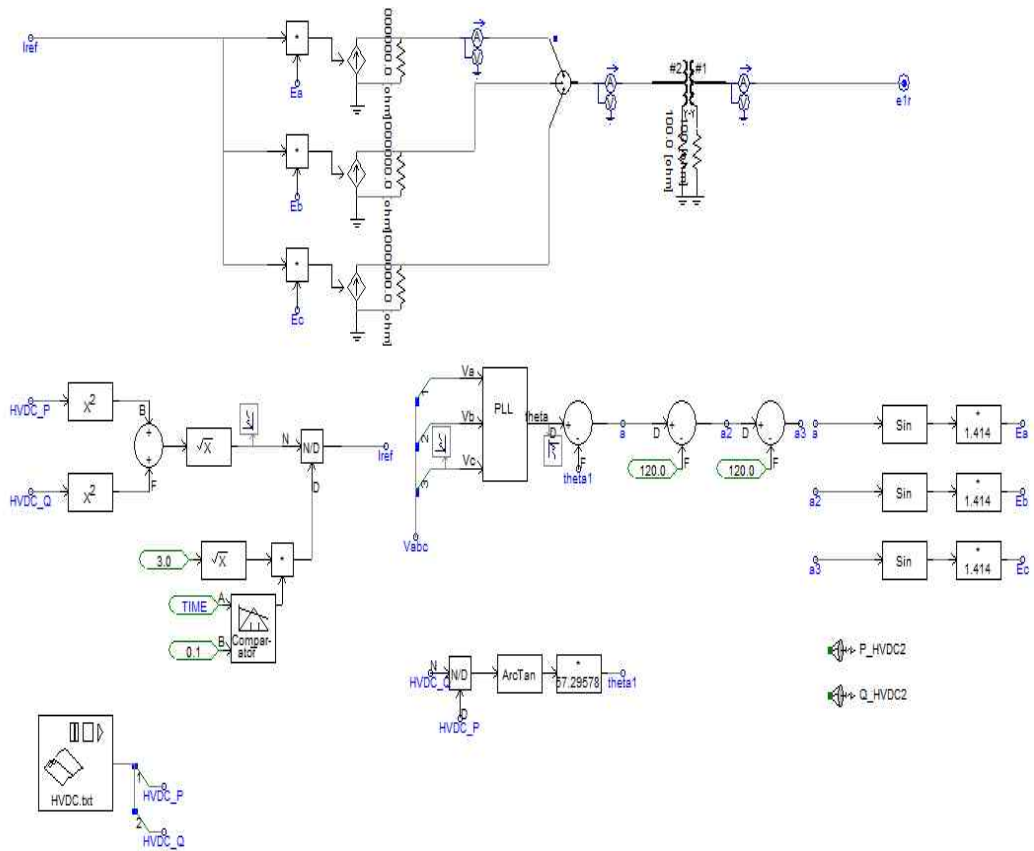


Fig. 17 The equivalent model of the HVDC

4) STATCOM 모델링

신제주변전소와 한라변전소에 설치되어 운용되고 있는 STATCOM은 각각 50 MVA의 용량을 가지며 제주계통 전압을 피드백 받아 제주계통의 무효전력을 제어하고 있다.

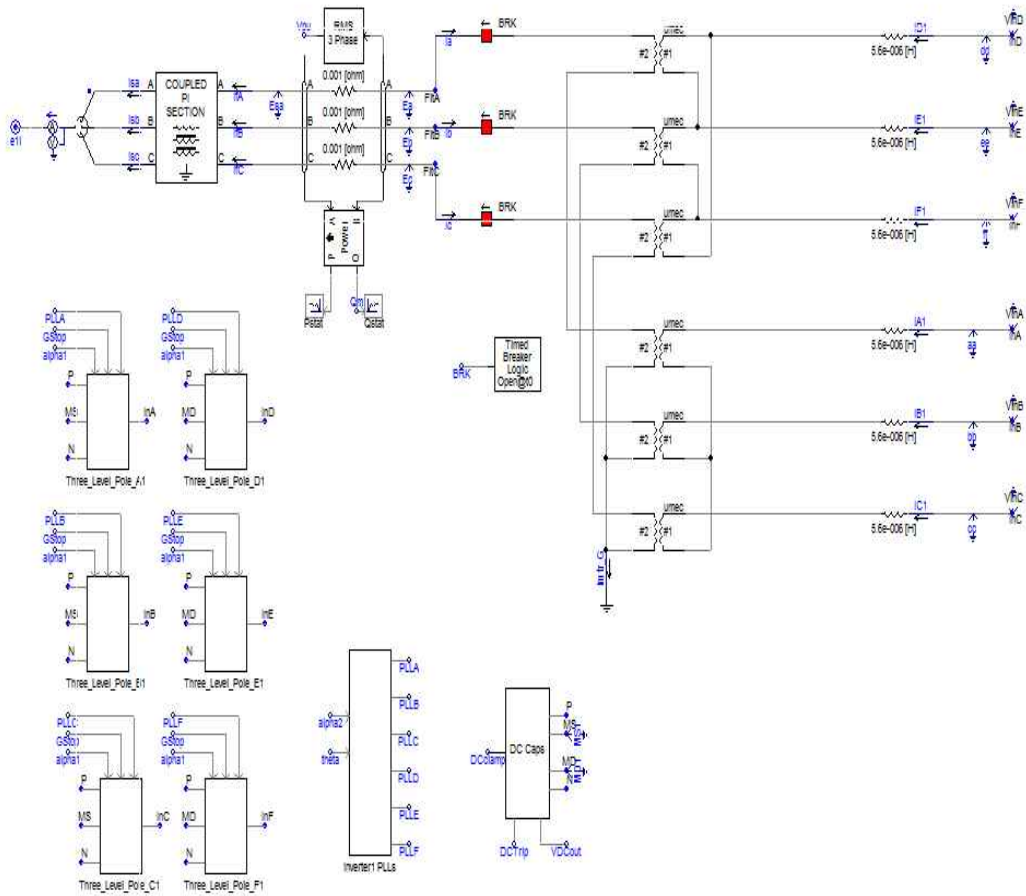


Fig. 18 50 MVA STATCOM model

Fig. 18은 모델링된 50 MVA 용량의 STATCOM을 나타낸다. STATCOM의 구성은 크게 주 변압기, 인버터 폴, DC 클램프, 시스템 제어기로 구분된다. 시스템 제어기는 제어기 내에서 계통과 동기화된 위상을 만들어내는 PLL(Phase Locked Loop)과 이 위상으로 d-p변환을 수행하여 게이팅 신호를 만들어낸다. 또한 알파 각은 전류 기준값을 실시간으로 측정하여 d-q변환을 통하여 얻은 전류 값과 비교하여 점호각을 조절하여 계통에 무효전력을 보상하는 역할을 한다.

인버터는 3-Level NPC방식을 적용하였으며 중성점 제어를 통하여 3레벨의 구형파를 만들어 6개 인버터 폴에 의해 24 pulse 파형을 생성하여 DC 클램프의 출력량을 조절함으로써 주 변압기를 통해 계통으로 연결된다.

3.3 EES를 이용한 풍력발전단지별 효과 분석

풍력발전단지에 EES를 적용한 효과를 분석하기 위해서 타 발전단지에 비해 대단지화 되어 있는 가시리, 한경, 행원, 삼달, 성산 풍력발전단지를 선정하여 EES 적용 유/무에 따른 발전 출력의 증발률에 대해 비교 분석하였다.

1) 가시리 풍력발전단지

Fig. 19는 2013년 11월 27일 가시리 풍력발전단지의 출력과 EES를 연계 시 단지 출력을 나타낸다. 합성출력과 단지 출력에 따라 EES에 에너지 충·방전이 되고 계통에 공급되는 합성출력이 평활화되는 것을 알 수 있다. Table 5는 가시리 풍력발전단지의 분당 출력 변동률을 보여주며, EES를 적용 시 변동률은 약 2.1% 개선되었다.

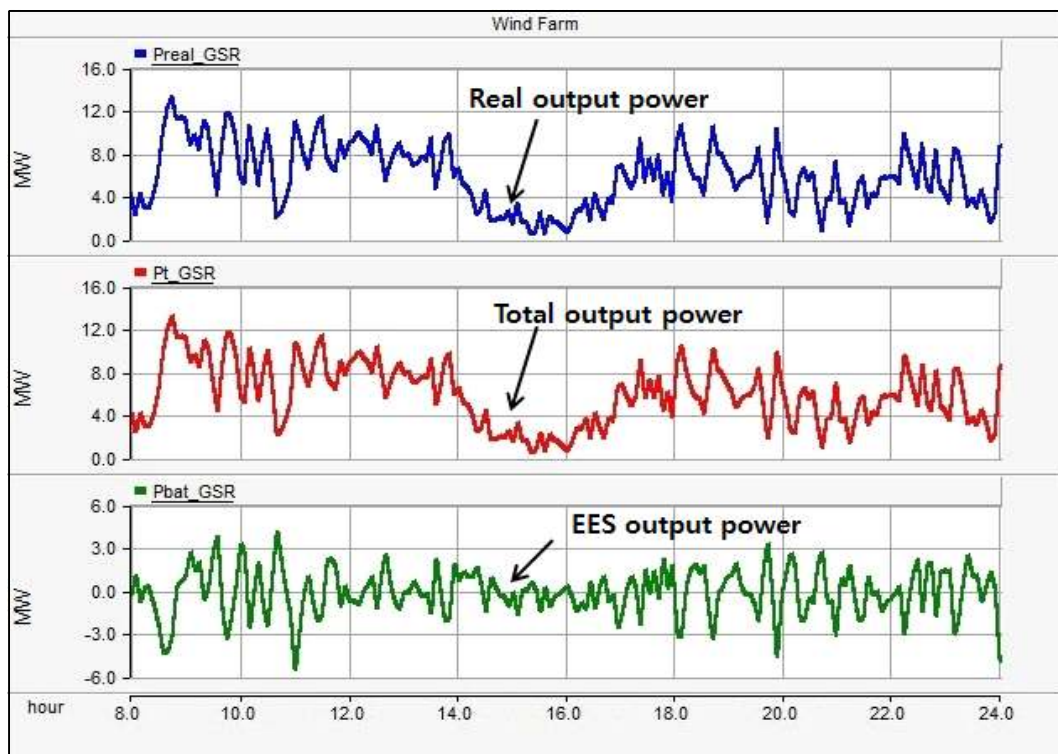


Fig. 19 Comparing of output power of Gasiri wind farm with/without EES

Table 5 Gasiri wind farm

	Power fluctuation (%)
Without EES	14.8
With EES	12.7

2) 한경 풍력발전단지

Fig. 20은 한경 풍력발전단지의 출력과 EES를 연계 시 단지 출력을 나타낸다. 합성출력과 단지 출력에 따라 EES에 에너지 충·방전이 되고 계통에 공급되는 합성출력이 평활화되는 것을 알 수 있다. Table 6은 한경 풍력발전단지의 분당 출력 변동률을 보여주며, EES를 적용 시 변동률은 약 1.8% 개선되었다.

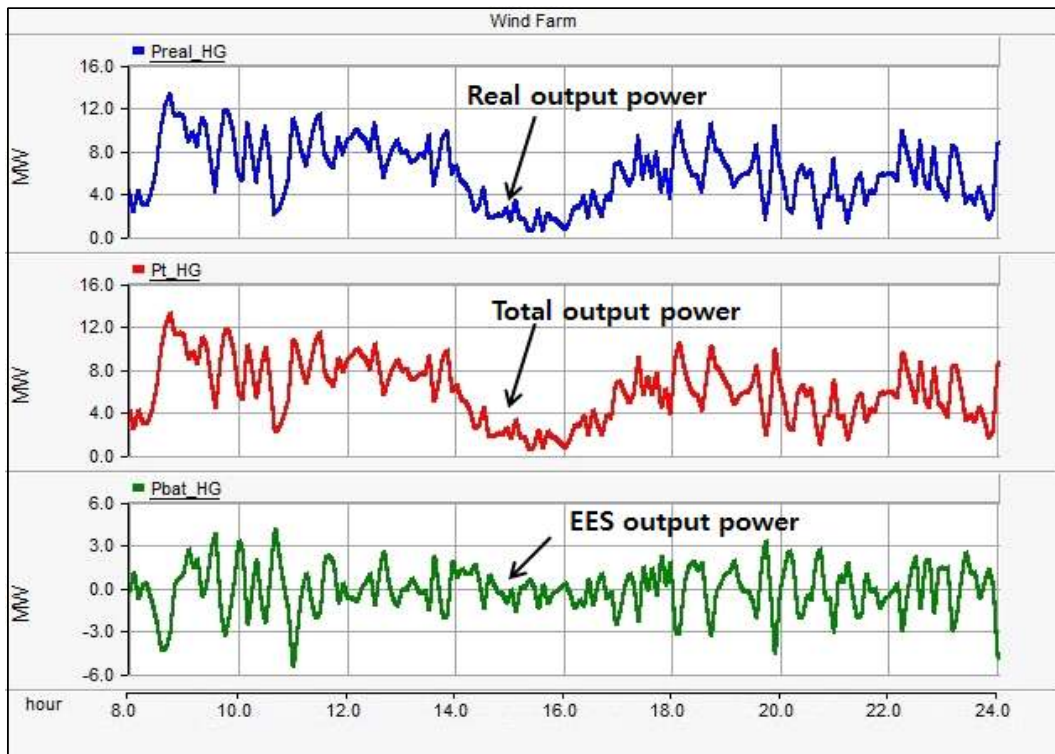


Fig. 20 Comparing of output power of Hangeong wind farm with/without EES

Table 6 Hangeong wind farm

	Power fluctuation (%)
Without EES	6.7
With EES	4.9

3) 행원 풍력발전단지

Fig. 21은 행원 풍력발전단지의 출력과 EES를 연계 시 단지 출력을 나타낸다. 합성출력과 단지 출력에 따라 EES에 에너지 충·방전이 되고 계통에 공급되는 합성출력이 평활화되는 것을 알 수 있다. Table 7은 행원 풍력발전단지의 분당 출력 변동률을 보여주며, EES를 적용 시 변동률은 약 1.7% 개선되었다.

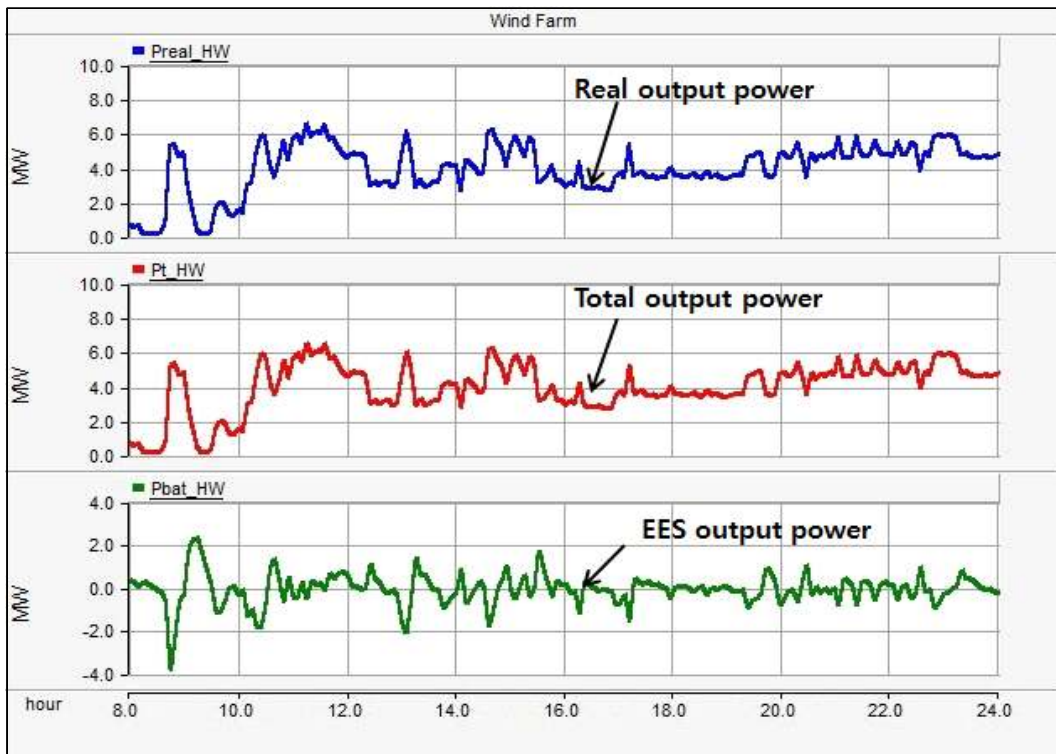


Fig. 21 Comparing of output power of Hangwon wind farm with/without EES

Table 7 Hangwon wind farm

	Power fluctuation (%)
Without EES	4.8
With EES	3.1

4) 삼달 풍력발전단지

Fig. 22는 삼달 풍력발전단지의 출력과 EES를 연계 시 단지 출력을 나타낸다. 합성출력과 단지 출력에 따라 EES에 에너지 충·방전이 되고 계통에 공급되는 합성출력이 평활화되는 것을 알 수 있다. Table 8은 삼달 풍력발전단지의 분당 출력 변동률을 보여주며, EES를 적용 시 변동률은 약 2.3% 개선되었다.

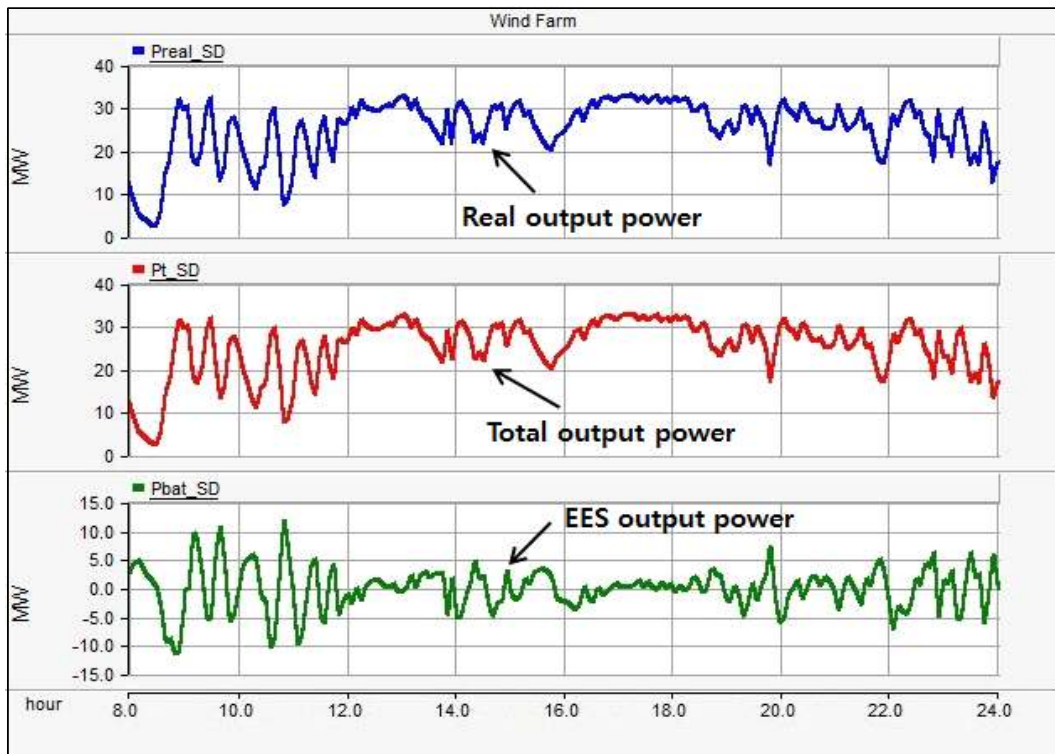


Fig. 22 Comparing of output power of Samdal wind farm with/without EES

Table 8 Samdal wind farm

	Power fluctuation (%)
Without EES	14.5
With EES	12.2

5) 성산 풍력발전단지

Fig. 23은 성산 풍력발전단지의 출력과 EES를 연계 시 단지 출력을 나타낸다. 합성출력과 단지 출력에 따라 EES에 에너지 충·방전이 되고 계통에 공급되는 합성출력이 평활화되는 것을 알 수 있다. Table 9는 성산 풍력발전단지의 분당 출력 변동률을 보여주며, EES를 적용 시 변동률은 약 1.7% 개선되었다.

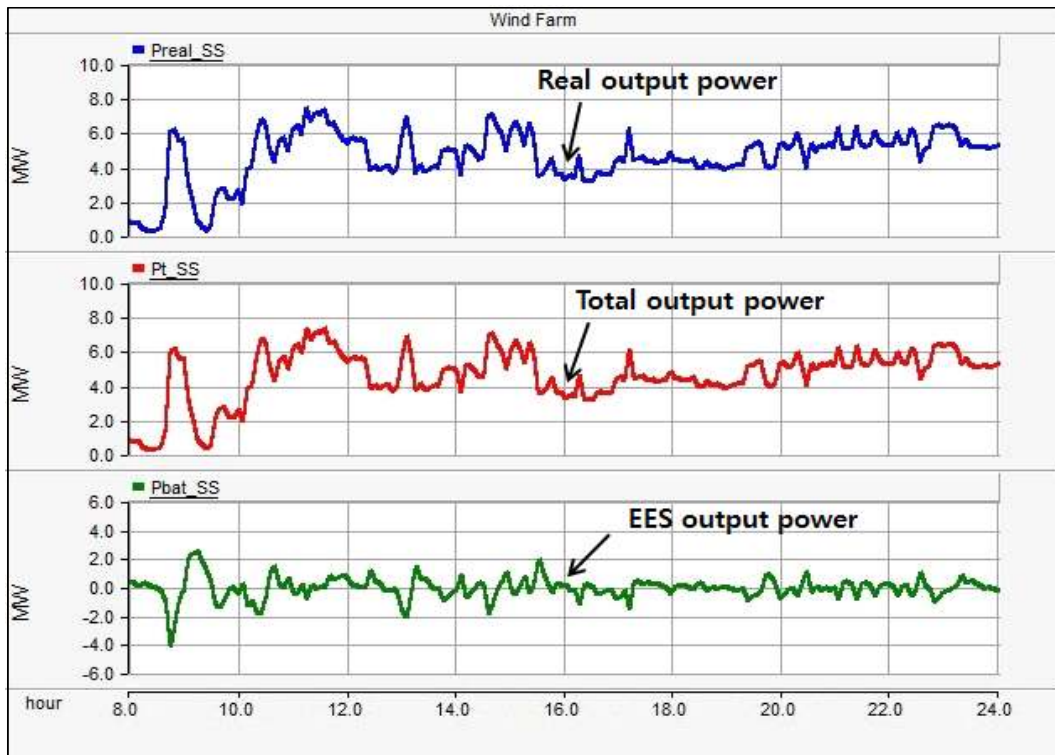


Fig. 23 Comparing of output power of Seongsan wind farm with/without EES

Table 9 Seongsan wind farm

	Power fluctuation (%)
Without EES	4.9
With EES	3.2

4. 컴퓨터 해석

풍력발전단지 출력을 계통에 보다 안정적으로 공급하기 위해서는 EES를 통해 출력을 평활화할 필요가 있다. 실제로 EES를 계통에 적용하기 전에 사전에 적용 효과 분석이 이루어져야한다. 이를 위해 실제 제주계통의 각 발전기별 출력과 모델링된 각 발전기별 출력을 비교 분석 하였다. 이를 바탕으로 풍력발전단지의 출력을 평활화하기 위해서 풍력발전단지에 EES를 적용하여 그 효과를 분석하였다.

4.1 제주계통의 실제데이터 및 컴퓨터 해석

11월 27일 중 부하 변동이 있는 8~24시까지 유효전력은 Fig. 24와 같이 나타난다. 풍력발전단지 출력은 8~12시 사이에 급격히 변동하여 계통 연계점의 불안정성을 증대시킨다. 이러한 변동에 의한 영향을 줄이기 위해서 단시간 출력을 추종이 가능한 HVDC 시스템이 출력을 보상하고 일정시간 후에 각 발전소들이 출력 변동을 보상하고 있는 것을 알 수 있다.

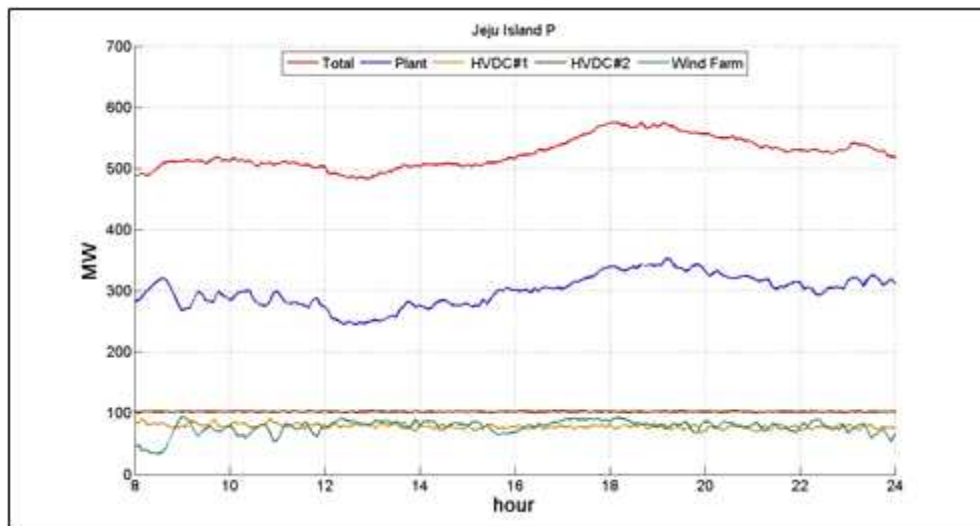


Fig. 24 The real active power of power grid in Jeju Island

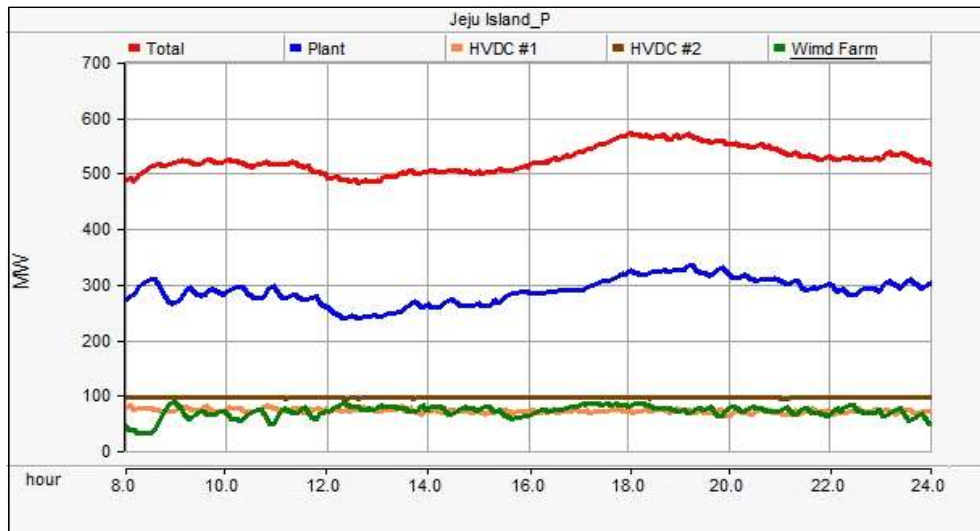


Fig. 25 The active power of power grid in Jeju Island

실제 데이터와 비교하기 위해서 제주계통 모델링의 각 발전소의 출력 특성은 Fig. 25와 같은 결과를 나타낸다. 풍력발전단지의 출력 변동에 따라 HVDC 시스템과 각 발전소에서 공급하는 출력이 실제 데이터와 모델링 결과를 비교하였을 때, 출력 특성이 거의 유사하게 반영됐음을 확인할 수 있다.

4.2 제주계통의 EES 연계 해석

실제 데이터와 비교 분석한 결과를 바탕으로 제주계통 내의 각 풍력발전단지에 EES를 적용하여 효과를 분석해 보았다. 배터리 용량은 제주특별자치도 에너지저장장치설치에 관한 세부사항을 참고하여 풍력발전단지 용량의 10% 이상으로 최소 1시간동안 지속적인 출력이 가능하게 산정하였으며, 풍력발전단지의 출력을 평활화하고 제주계통 연계점에 안정적으로 공급하였다. EES 적용 시 실제 데이터와 비교하면 풍력발전단지의 출력 변동이 심한 8~12시에 EES에 의해서 단지 출력이 평활화되고 단지 출력에 따라 전력을 추종하는 발전소의 출력 역시 평활화되는 것을 알 수 있다.

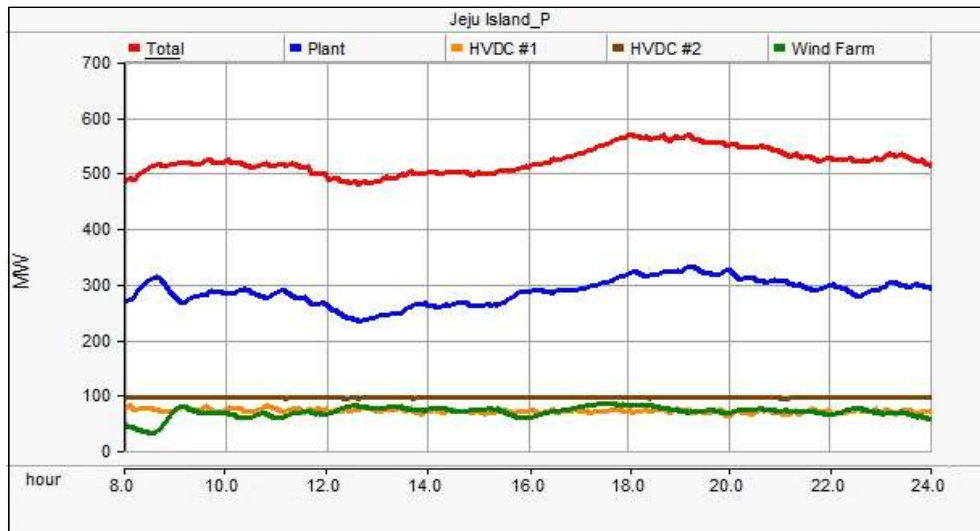


Fig. 26 The active power of power grid with EES in Jeju Island

제주지역 풍력발전단지는 크게 제주 동·서부로 분류하여 볼 수 있는데 동부의 경우 바람이 다른 지역보다 많이 불고, 풍력발전단지가 대단지화되어 있어 단지 출력의 변동이 심하다 서부의 경우 동부에 비해 풍력발전단지의 용량 비교적 작고 바람의 변동이 작다.

Fig. 27은 EES를 동부 풍력발전단지에 적용 시 단지 출력 및 배터리 출력, SOC를 보여준다. 단지출력이 합성출력보다 클 때 EES가 충전을 하고 반대일 경우 EES에서 방전하여 평활화 제어를 하는 것을 알 수 있다. 동부 풍력발전단지의 EES 용량은 8.1 MWh이며 배터리 최대 출력 용량은 배터리를 4C로 제한했기 때문에 PCS 용량은 ± 32.4 MW로 EES의 출력 제어를 한다. 또한 동부지역은 출력 변동이 심하기 때문에 요구되는 배터리 용량이 크고 충·방전횟수가 많은 것을 알 수 있다. 이에 따라 배터리 SOC도 많이 변하는 것을 알 수 있다.

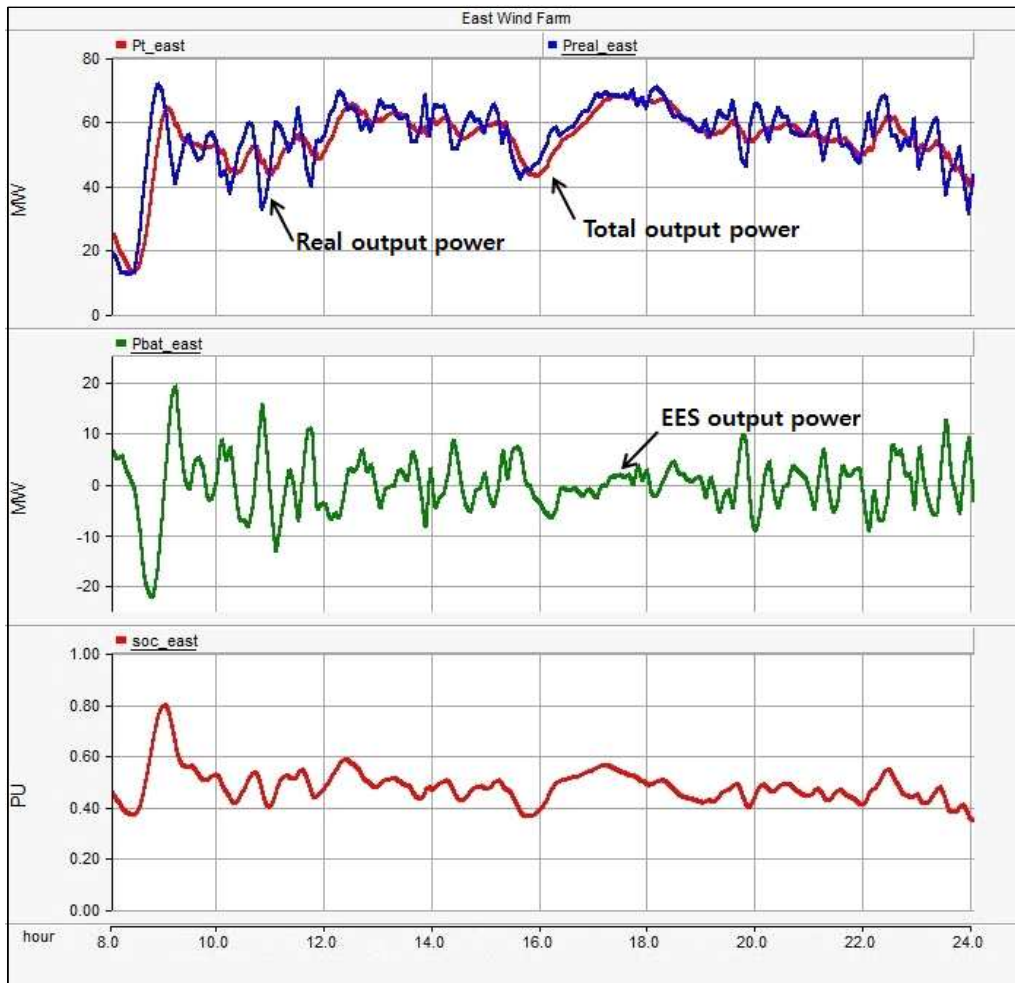


Fig. 27 The SOC variation of EES in case of connecting east wind farm

Fig. 28은 EES를 서부 풍력발전단지에 적용 시 단지 출력 및 배터리 출력, SOC를 보여준다. 단지출력이 합성출력보다 클 때, EES가 충전을 하고 반대일 경우 EES에서 방전하여 평활화 제어를 하는 것을 알 수 있다. 서부 풍력발전단의 EES 용량은 2.47 MWh이며 배터리 최대 출력 용량은 배터리를 4C로 제한했기 때문에 PCS 용량은 ± 9.88 MW로 EES의 출력 제어를 하고, 또한 서부지역은 동부지역에 비해 비교적 출력 변동이 작기 때문에 요구되는 배터리 용량이 작고 충·방전횟수가 작은 것을 알 수 있다. 이에 따라 배터리 SOC도 거의 변하지 않는 것을 알 수 있다.

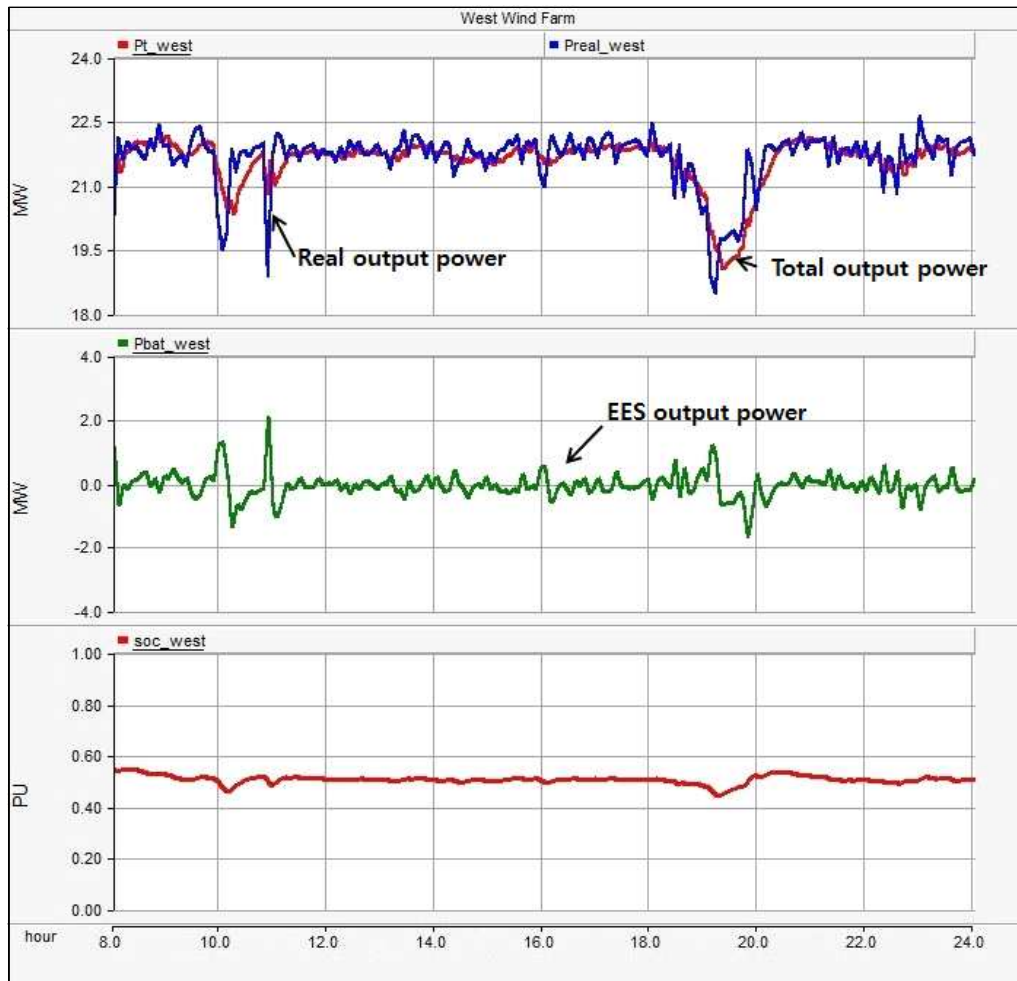


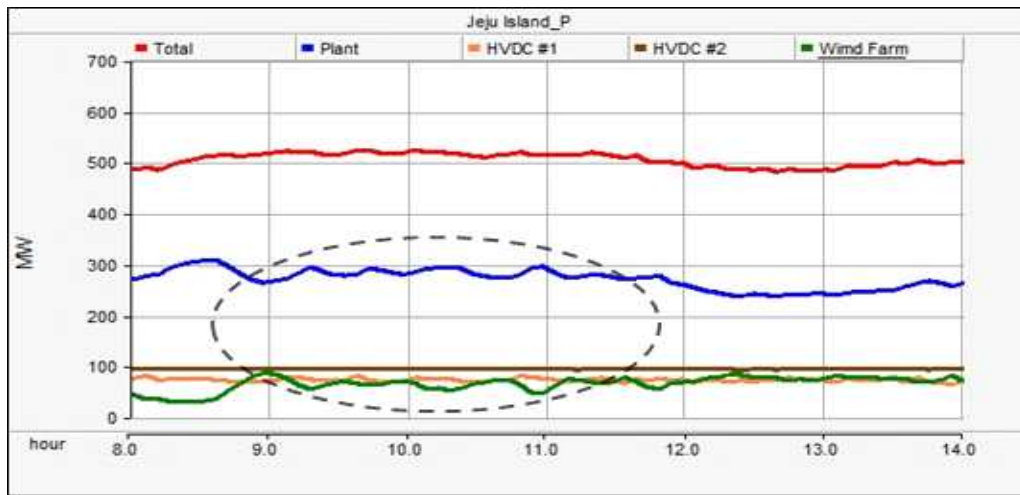
Fig. 28 The SOC variation of EES in case of connecting west wind farm

4.3 해석 결과 및 고찰

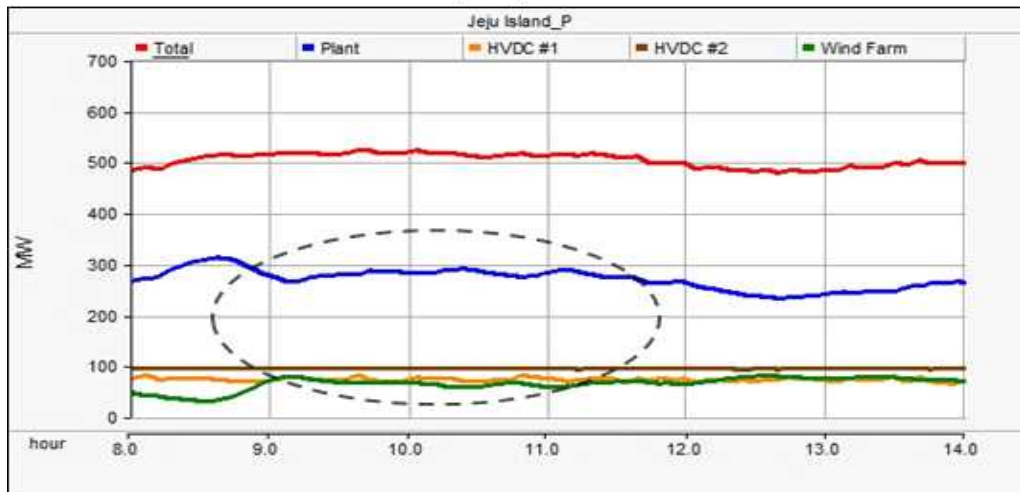
위의 절에서 수행하였던 실제 데이터와 제주계통 모델링을 비교하여 타당성을 검증하고 풍력발전단지에 EES를 적용하여 단지 출력을 분석하였다. 제주특별자치도 에너지저장장치설치에 관한 세부사항을 참고하여 풍력발전단지 용량의 10% 이상으로 최소 1시간동안 지속적인 출력이 가능한 EES 용량을 산정하였고 이를 풍력발전단지에 적용 시 평활화 제어 및 잔존용량 피드백 제어에 의해 단지 출력이 평활화되는 것을 알 수 있다.

Fig. 29은 2013년 11월 27일 중 풍력발전단지 출력 변동이 가장 심한 8시~14

시 사이를 기준으로 실제 출력과 EES 적용 시를 비교한 것이다. 실제 출력 Fig. 29 (a)의 경우 풍력발전단지의 출력 변동에 따라 발전소에서 출력을 보상하는 것을 알 수 있으나 출력 변동으로 인하여 계통의 불안정성을 증대시킨다. 이러한 영향을 해결하기 위해 풍력발전단지에 EES를 적용한 결과, Fig. 29 (b)에서와 같이 풍력발전단지의 출력을 평활화하고 발전소의 출력 또한 평활화되는 것을 알 수 있다.



(a) The output power without EES



(b) The output power with EES

Fig. 29 Comparing of output power with/without EES

Table 10 Comparison of power fluctuation with/without EES

[단위:%]

	Gasiri	Han geong	Hang won	Samdal	Seong san	Total
Without EES	14.8	6.7	4.8	14.5	4.9	14.4
With EES	12.7	4.9	3.1	12.2	3.2	12.7

Table 10은 제주지역 총 풍력발전단지와 각 풍력발전단지별 분당 출력 변동률을 나타낸 것이다. 분당 출력 변동률이 가장 큰 풍력발전단지는 가시리 풍력발전단지로서 변동률은 14.8%로 제주특별자치도 및 신재생발전기 계통연계기준에서 고시한 분당 변동률인 10%를 초과하는 것을 알 수 있고 제주지역 풍력발전단지의 변동률 14.4% 또한 계통연계기준을 초과하는 것을 알 수 있다. EES를 적용하였을 경우, 최대 변동률을 가진 가시리 풍력발전단지는 12.7%의 변동률을 보이고 약 2.1%가 개선되었다. 제주지역 풍력발전단지는 12.7%의 변동률을 보이고 약 1.7%가 개선되었지만 가시리와 제주지역 풍력발전단지 변동률은 계통연계기준을 만족하지 않는 결과를 보였다.

5. 결 론

본 논문에서는 제주계통 내의 각 풍력발전단지별 EES 적용효과를 분석하기 위하여 풍력발전단지의 출력 변동이 가장 심한 하루를 선정하였으며, 실제 풍력발전단지 출력과 모델링된 제주계통의 풍력발전단지 출력을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

EES로는 Li-ion battery를 적용하였고 이를 단순화한 가변 전압 소스와 저항으로 구성하여 모델링하였다. 풍력발전단지에 EES 적용에 앞서 EES 용량은 제주특별자치도 에너지저장장치설치에 관한 세부사항을 참고하여 풍력발전단지 용량의 10% 이상으로 최소 1시간동안 지속적인 출력이 가능하게 산정하였으며 풍력발전단지 출력 안정화 제어를 통하여 단지 출력을 평활화하였다.

또한 EES를 적용하지 않은 풍력발전단지 출력과 EES를 풍력발전단지에 적용하였을 경우의 출력을 비교 분석하였다. 분당 출력 변동률이 가장 큰 풍력발전단지는 가시리 풍력발전단지이며 변동률은 14.8%로 제주특별자치도 및 신재생발전기 계통연계기준에서 고시한 분당 변동률인 10%를 초과하는 결과를 보였고 제주도 총 풍력발전단지의 변동률 14.4% 또한 계통연계기준을 초과하는 결과를 보였다. EES를 적용하였을 경우, 최대 변동률을 가진 가시리 풍력발전단지의 변동률은 12.7%로 약 2.1%가 개선되었다. 제주지역 풍력발전단지 변동률은 12.7%로 약 1.7%가 개선되었지만 가시리와 제주지역 풍력발전단지 변동률은 계통연계기준을 만족하지 않는 결과를 보였다.

본 논문에서는 EES 적용 시 제주지역 풍력발전단지 변동률은 약 1.7%가 개선되었지만 계통연계기준에 만족하지 않는 결과를 보였다. 계통연계기준에 만족하여 단지를 운영하기 위해서는 EES용량을 단지 용량의 10% 이상으로 산정하여 EES를 적용하는 것이 효과적일 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Zhe Chen, Guerrero, J.M, Blaabjerg, F, “A review of the state of the art of power electronics for wind turbines,” IEEE transactions on power electronics, Vol. 24, No. 8, pp. 1859~1875, 2009.
- [2] 오승진, 차민영, 김종원, 정종규, 한병문, 장병훈, “풍속계와 Motor-Generator 세트를 이용한 DFIG 풍력발전시스템 하드웨어 시뮬레이터 개발,” 전력전자학회논문지, Vol. 16, No. 1, pp.11~19, 2011.
- [3] 진경민, “풍력발전단지의 유효전력 증발률 조정을 위한 BESS 용량 산정,” 제주대학교 풍력특성화협동과정, 석사학위 논문, 2013. 8.
- [4] J.E.S. de Haan, J. Frunt, W.L. Kling, “Mitigation of Wind Power Fluctuations in smart grids,” in Proc. Int. Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, pp. 1~8, 2010.
- [5] “Feasibility study on application of ESS for wind farms in Jeju,” Jeju Special Self-Governing Province, Feb, 2013.
- [6] Shimizukawa, J., Iba, K., Hida, Y., Yokoyama, R, “Mitigation of intermittency of wind power generation using battery energy storage system,” Universities Power Engineering Conference(UPEC), 2010.
- [7] Farzana Islam, Hany. Hasanien, Ahmed Al-Durra, S.M.Muyeen, “A new control strategy for smoothing of wind farm output using short-term ahead wind speed prediction and flywheel energy storage system,” American control conference(ACC), pp. 3026~3031, 2012
- [8] “제주특별자치도 전력계통 연계망의 안정 및 풍력발전출력 신뢰도 향상을 위한 에너지저장장치의 설치에 관한 세부사항 고시안,” 제주특별자치도지사, 12, 2013.
- [9] 양병모, 유병우, 박종광, 김찬기, 이형한, “HVDC 시스템에서 무효전력 보상 특성,” 전력전자학술대회 논문집, pp. 451~455, 2004,
- [10] 조남혁, “제주지역 STATCOM 신설에 따른 전력계통 특성변화에 관한 연

- 구,” 서울과학기술대학교 산업대학원, 석사학위 논문, 2012. 2.
- [11] KEPCO 한국전력, “송·배전용전기설비 이용규정 : 별표 6 신재생발전기 계통연계기준,” 2013.
- [12] 최영도, “제주 풍력발전 계통연계 유효출력 제어 분석,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 14~15, 7, 2010.
- [13] 제주특별자치도, “안정적 전력공급방안 및 풍력발전 한계용량 증대방안 조사,” 2012.
- [14] Maciej Swierczynski, Remus Teodorescu, Pedro Rodriguez, “Lifetime investigations of a lithium iron phosphate battery system connected to a wind turbine for forecast improvement and output power gradient reduction,” International Stationary Battery Conference, 2013.
- [15] KEPCO, “한전일반구매규격,” 2014
- [16] Sercan Teleke, Mesut E. Baran, Alex Q. Huang, Subhashish Bahttacharya, “Control Strategies for Battery Energy Storage for Wind Farm Dispatching,” IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 24, No. 3, pp. 725~732, 2009.
- [17] Olivier Tremblay, Louis-A. Dessaint, Abdel-illah Dekkiche, “A generic battery model for the Dynamic simulation of hybrid electric vehicles,” World Electric Vehicle Journal, Vol. 3, 2009.
- [18] C.M. Shepherd, “Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An equation describing battery discharge,” Journal of Electrochemical Society, Vol. 112, No. 7, pp. 657~664, 1965.
- [19] Panasonic battery manufacturer’s datasheet.20

감 사 의 글

연구실에 처음 들어와서 모든 것이 생소하게만 느껴졌던 때가 엇그제 같은데 이렇게 끝을 맺는 시기에 이르렀습니다. 2년 6개월, 길수도 있고 짧을 수도 있는 시간이 저에게는 인생의 전환점이 되었고 많은 경험과 지식을 얻을 수 있었던 시간이었습니다.

학생으로서가 아닌 자식처럼 항상 사랑으로 보살펴주시고 많은 격려와 열정적인 가르침으로 저를 항상 지도해주신 김일환 교수님께 진심어린 감사함을 전하고 싶습니다. 끊임없는 가르침으로 지도해주시고 전기공학과와 선배로서 아낌없는 조언을 해주신 김호민 교수님, 논문이 완성될 수 있도록 세세하게 검토해주시고 조언을 해주신 김세호 교수님, 김호찬 교수님, 전기공학과와 발전을 위해 노력해주시고 제자들에게 진심어린 조언을 해주시는 좌종근 교수님, 오성보 교수님, 이개명 교수님께 진심으로 감사드립니다.

선배로서 조언과 책임감에 대해 일깨워주신 김재홍 선배님, 오랜 방황 끝에 다시 제자리로 오게 해주시고 아낌없는 조언을 해주신 진홍이형, 대현이형, 익수형, 그리고, 연구실 동기인 명석이 모두 감사합니다. 옆에서 항상 힘이 되주는 경민이, 동기인 동완이, 지한이와 앞으로 기대되고 전력전자연구실의 미래인 도현이, 우철이, 승민이에게도 이 자리를 빌려 고마움을 전하고 싶습니다.

그리고 전기공학과와 발전을 위해 항상 최선을 다해주시는 강지훈, 고평강 조교 선생님과 김도진 선배님, 부창진 선배님, 어떠한 일이 있더라도 항상 옆에서 조언과 기댈 수 있게 해주는 동기 지형이과 사일이, 항상 씩씩한 동우에게 감사함을 느낍니다.

대학원 생활을 하면서 자주 만나지 못한 죽마고우 친구들, 대학동기들에게 미안함을 전하고 싶고 항상 옆에서 믿어주시고 진심어린 조언과 격려를 해주시는 할아버지, 할머니, 작은아버지 그리고 작은어머니, 올바른 길로 갈 수 있게 해주시는 누님, 매형에게 감사함을 전하고 싶습니다. 부끄럽지 않은 사람이 되어 보답하겠습니다. 오랜기간동안 옆에서 응원해주고 한결같은 사랑을 주는 민정이에게 고마움을

전하고 싶습니다. 마지막으로, 항상 뒤에서 든든한 후원자역할을 해주시고 아들의 결정에 대해 항상 믿어주시는 어머니께 감사하고 하늘에서 항상 지켜봐주시고 돌봐주시고 있을 아버지에게 이 논문을 바칩니다.

2014년 8월

김 승 현 올림