

제주지역 풍력발전단지의 BESS 적용효과 분석

Analyzing effects of the BESS for wind farm in Jeju Island

이도현* · 김일환**† · 김호민*** · 김승현****

DOHEON-LEE*, Eel-Hwan Kim**†, Ho-Min Kim*** and Seung Hyun Kim****

(Submit date : 2014. 6. 11., Judgment date : 2014. 6. 18., Publication decide date : 2014. 8. 25.)

Abstract : The fluctuation of the output power of wind farms will be able to cause the impact on the Jeju power system such as power quality and stability. To settle the matter, many researchers have proposed the use of the BESS(Battery Energy Storage System) in the wind farm. In this paper, The BESS is applied to each wind farms for mitigating the fluctuation of wind power output. The BESS is controlled for smoothing the output of wind farms. Two kinds of simulation will be carried out. First, the simulation results by using PSCAD/EMTDC simulation program are compared to the measured data from the real power grid in Jeju Island. The other is to analyze the output of wind farms when the BESS is applied to the simulation works. The simulation results will demonstrate the effectiveness of using BESS to stabilize for power grid in Jeju Island.

Key Words : 배터리에너지저장장치(Battery energy storage system), 풍력(Wind power), 잔존용량(State of charge)

1. 서론

최근 제주도 풍력발전설비의 비율이 급속히 증가하고 있다. 풍력발전기의 대형화 및 대단지화에 따른 출력변동성이 커짐에 따라 제주도의 전력계통에 미치는 영향은 점차 확대되

고 있다. 이에 따라, 최소화하며 안정적으로 풍력설비를 운영하는 방안에 대한 수립이 요구됨으로써, 풍력발전단지에 BESS를 적용하여 단지 출력제어를 통해 계통을 안정화하는 방법이 현실적인 대안으로 부각되고 있다[2]. 따라서, 본 논문에서는 단주기의 제주 지역 풍

**† 김일환(교신저자) : 제주대학교 전기공학과
E-mail : ehkim@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3674
*이도현 : 제주대학교 풍력공학부
***김호민 : 제주대학교 전기공학과
****김승현 : 제주대학교 전기공학과

**† Eel-Hwan Kim(corresponding author) : Department of Electrical Engineering, Jeju National University.
E-mail : ehkim@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3674
*DOHEON-LEE : Mutidisciplinary Graduate School Program for Wind Energy, Jeju National University.
***Ho-Min Kim : Department of Electrical Engineering, Jeju National University.
****Seung Hyun Kim : Department of Electrical Engineering, Jeju National University.

력발전단지의 출력 변동을 평활화하여 계통의 영향을 최소화하고자 한다. 평활화 제어를 위해 필요한 BESS의 용량은 2013년 2월 18일자로 제주특별자치도 에너지 저장장치 설치에 관한 세부사항에 의거하여 풍력발전단지 용량의 10% 시간으로 산정하였다[3]. BESS를 풍력발전단지에 적용 시 계통에 공급되는 전력은 출력 변동의 평활화 정도와 BESS 적용 유/무에 따른 발전 출력의 변동률에 대해 분석되었다. 제주계통의 영향을 분석하기 위해 제주계통을 모델링하였으며 실제 데이터와 비교 분석을 통한 시스템의 타당성을 검증하기 위하여 PSCAD/EMTDC 프로그램으로 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 입증하고자 한다.

2. 제주계통 특성

현재 제주계통에서 운영되는 발전설비는 총 590MW로 발전기 10기로 운영되고 있으며, 기력발전기 4대가 기저부하를 담당하고 내연 및 가스 터빈 발전기는 첨두부하를 담당하고 있다. 제주도내 풍력발전단지는 총 109.9MW가 운영되고 있고 HVDC #1은 300MW로 배전이 가능하지만, 사고 시 위험하기 때문에 최대 150MW까지 수전만이 가능하고 HVDC #2는 현재 시운전 중에 있다. 제주계통에서는 부하 변동에 따라서 빠르게 응답하여 전력을 보상해야 한다. 이에 따라 전력보상이 빠른 HVDC가 순간적으로 변동하는 용량에 맞게 보상한다. 반면 응답속도가 늦은 발전소의 경우 일정시간 지난 후에 계통에 전력을 보상하게 된다. 또한, 전류형 HVDC는 무효전력이 필요하기 때문에 AC 필터와 동기조상기 및 STATCOM 50MVA 2대로 계통의 무효전력을 제어한다. 2013년 11월 기준 제주계통 내의 발전기별 설비용량 및 가용능력은 Table. 1과 같다.

Table. 1 Availability of Generator in Jeju
[단위:MW]

구 분	설비용량	공급능력
제주기력 #2	75	79
제주기력 #3	75	79
제주내연 #1	40	40
제주내연 #2	40	40
제주G/T #3	55	45
남제주기력 #1	100	103
남제주기력 #2	100	103
한림복합	105	102
소 계	590	591
풍력	109.9	24.5
HVDC #1	-	150
HVDC #2	-	100
합 계	699.9	865.5

2013년 11월 27일 제주계통 내의 각 발전소별 출력을 보면 Fig. 1과 같이 보여준다. 각 발전소의 출력이 부하에 따라 변하는 것을 알 수 있다.

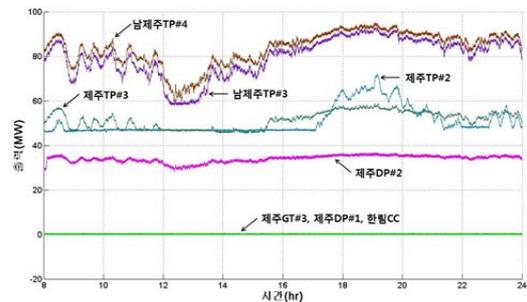


Fig. 1 The active power of generators

3. 모델링과 제어

3.1 제주계통 모델링

(1) BESS 모델링

ESS(Energy Storage System)는 리튬이온 배터리로 구성된 BESS를 수학적으로 나타내기 위해 Shepherd nonlinear battery model을 적용하여 단순한 가변 전압 소스와 저항으로 구성하여 Fig. 2와 같이 모델링하였다. PCS

모델은 유·무효 전력의 제어가 가능한 전류원으로 증가화하여 모델링하였다. 배터리의 비선형적인 충·방전 특성은 수식 (1)과 같이 표현할 수 있다[4].

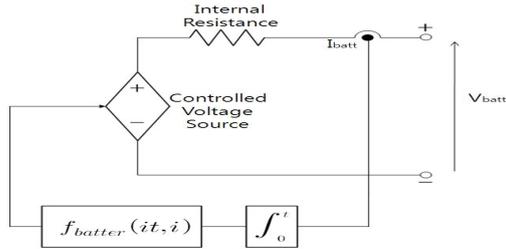


Fig. 2 Non-Linear battery model

$$V_{bat} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it - R \cdot i + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (1)$$

- V_{bat} : battery voltage [V]
- E_0 : battery constant voltage [V]
- A : exponential zone amplitude [V]
- B : exponential zone time constant inverse [Ah^{-1}]

배터리 데이터는 Panasonic사의 정격 3.6V, 용량 830mAh인 CGR17500 리튬이온 배터리를 적용하였다[5]. Fig. 3, 4는 실제 배터리와 모델링된 배터리의 방전 곡선을 보여주고 있으며, 전압, 전류의 곡선이 유사한 방전 특성을 보여주는 것을 알 수 있다.

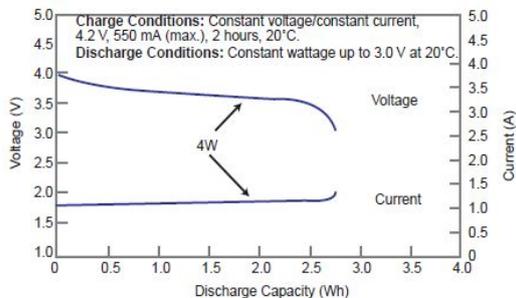


Fig. 3 Discharging curves of CGR17500

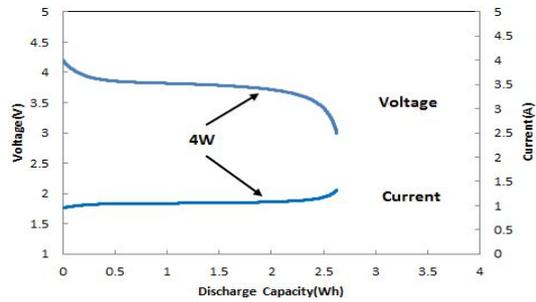


Fig. 4 Discharging curves of the battery model

(2) 시스템 모델링

Fig. 5는 제주계통의 전반적인 구성을 나타내고 있다. STATCOM은 신제주변전소와 한라변전소에 설치되어 운용되고 있으며 각각 용량 50MW, 기준전압 154kV로 제주계통 전압을 피드백 받아 계통의 무효전력을 제어한다. HVDC는 시뮬레이션 시간을 단축하기 위해 축약 모델로 증가화하여 실제 데이터를 Look-up table 방식으로 나타냈으며, 피상전력 값으로 전류 기준값을 얻어 유·무효전력을 실제 출력과 유사하게 나타냈다. 풍력발전단지는 실제 출력과 유사한 특성을 가지기 위해서 풍력발전단지의 실제 데이터를 Look-up table화하여 가변 전류원으로 모델링 하여 실제 출력과 유사한 출력으로 표현하였고, 시뮬레이션의 시간을 고려하여 동·서쪽으로 구분하여 모델링 하였다.

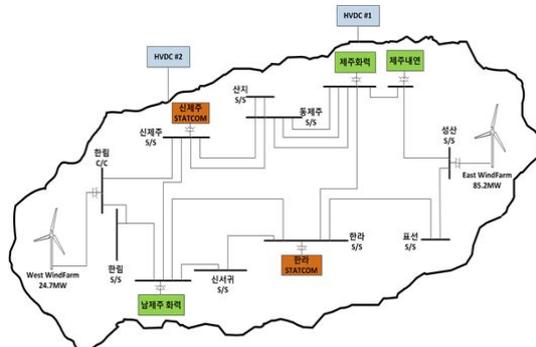


Fig. 5 Power grid in Jeju Island

변압기 파라미터는 Table. 2와 같이 실제 데이터 값을 적용하였다. 선로정수의 경우 정상분, 영상분, 어드미턴스를 고려하여 실제 데이터를 적용하였다. 또한 각 발전소는 각각의 특성시험을 통해 결정된 발전기, 여자시스템 그리고 조속기/터빈 등의 정수는 대부분 실제 값을 적용하였다. 그 외의 값은 실측된 결과를 토대로 유도하여 결정하였으며 실측된 결과와 비교하여 값들의 유효성을 확인하여 적용하였다[6].

Table. 2 Electric transformer Parameter

구 분	정격전압[kV]	변압기 정격용량[MVA]
표선#1	154/23	60
표선#2	154/23	60
서제주C/S #1	154/23	12
서제주C/S #2	154/23	12
서제주C/S #1CTR	154/111	251.1
서제주C/S #2CTR	154/111	251.1
금악 C/S #1CTR	154/33.5	36
금악 C/S #2CTR	154/33.5	36
한림 C/S #1CTR	154/33.5	36
한림 C/S #2CTR	154/33.5	36

3.2 BESS 제어

본 논문에서는 단시간 주기의 풍력발전단지 출력 변동을 평활화하여 제주계통에 안정적으로 공급하기 위한 목적으로 BESS를 적용하였다. BESS의 방전율(C-rate)은 최대4C로 제한하였다. 출력을 평활화하기 위해서는 평활화 제어와 잔존용량 피드백 제어가 필요하다.

(1) 출력 평활화 제어

출력 평활화 제어는 BESS를 이용하여 풍력발전 출력 변동을 평활화하는 제어이다. 제어 방법

으로는 Fig. 6와 같이 풍력발전 출력을 평활화한 합성 출력 목표치를 주고 목표치와 풍력발전 출력의 차이를 BESS로 보상하는 원리이다.

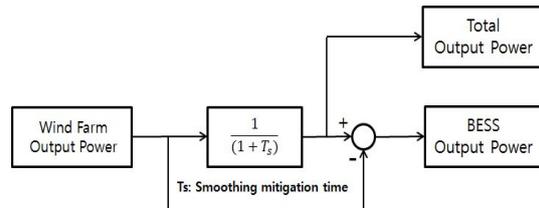


Fig. 6 Smoothing control of output power

(2) 잔존용량 피드백 제어

출력 평활화 제어의 시정수 T를 크게 할 경우 BESS의 용량이 상하한에 이르고 자기방전에 의해 잔존용량(SOC)이 0이 되는 경우를 방지하기 위해서 잔존용량을 적절한 범위에서 유지하기 위한 제어이다. Fig. 7은 출력 평활화 제어 알고리즘에 피드백 제어를 추가한 잔존용량 피드백 제어의 블록도를 나타낸다. 배터리 SOC를 피드백 받아서 배터리 요구치와 합하여 출력 평활화에 필요한 배터리 용량을 출력한다. 여기서 α 는 배터리 출력 레퍼런스 값을 SOC와 비교하기 위한 변환 계수이며, Offset은 SOC의 여유분을 남기기 위한 상수이다.

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

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

여기서,

Top : Smoothing mitigation time

C : Battery capacity [MWh]

M : Margin of SOC of battery [PU]

Pwf : Wind farm output [MW]

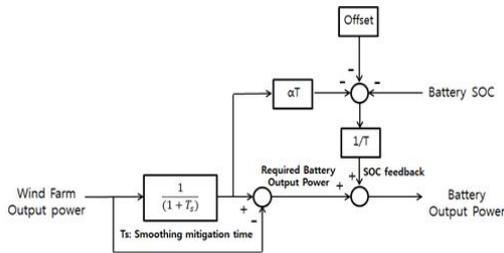


Fig. 7 Feed Back control of state of charge

4. 시뮬레이션

4.1 제주계통 운영 데이터 분석

풍력발전기 특성상 바람의 영향을 많이 받기 때문에 연 중 바람이 가장 심한 겨울철 중에서 2013년 11월 27일을 선정하여 실제 데이터를 분석하였다. 또한 시뮬레이션 결과와 비교를 위해 풍력발전단지과 계통이 연계되는 PCC(Point of Common Coupler)의 데이터를 기준으로 하여 분석하였다.

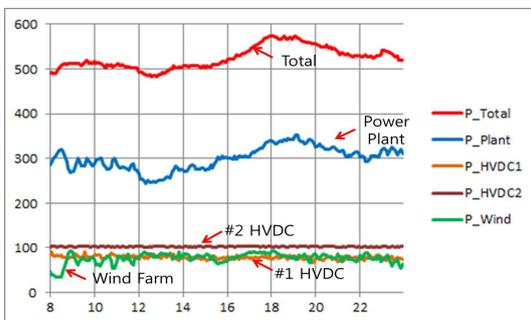


Fig. 8 The real active power of generators

Fig. 8을 보면 풍력발전단지의 출력이 변동이 심하므로 BESS를 적용하여 평활화 제어하기에 적합하다는 것을 알 수 있다. 제주계통 내의 발전기와 HVDC #1, #2의 유효전력을 볼 수 있다. 또한, 발전소는 부하 및 풍력발전 출력의 변동에 따라 응동하는 것을 확인할 수 있다.

4.2 제주계통 운영 모의 해석

2013년 11월 27일 기준으로 제주계통을 시뮬레이션한 결과, Fig. 9와 같은 출력 파형을 확인 하였다. 유효전력 및 무효전력, 전압이 실제 데이터와 유사한 특성을 갖는 것을 검증하였고, 이를 토대로 계통에 BESS 적용 시 계통에 어떠한 영향을 주는지 분석하였다.

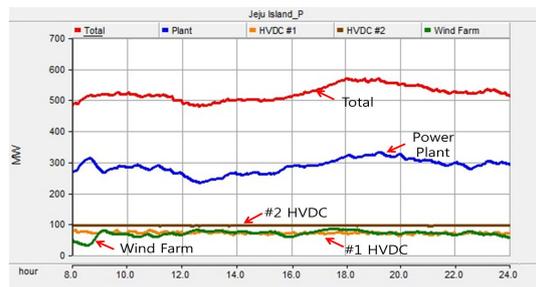


Fig. 9 The output power of generators

Table. 3은 제주계통의 실제 데이터와 시뮬레이션 결과를 비교하였으며, 2013년 11월 27일의 24시간 데이터를 4주기로 분석한 결과이다. 실제 데이터와 시뮬레이션 분석결과가 유사한 특성을 나타냄을 확인하였다.

Table. 3 Comparison of Real Data and Simulation Result

Time	Real data	Simulation Result
00:00~06:00	485.1 MW	480.3 MW
06:00~12:00	517.8 MW	515.7 MW
12:00~18:00	504.2 MW	507.1 MW
18:00~24:00	549.8 MW	553.3 MW

4.3 BESS를 적용한 제주계통 해석

제주계통 내의 각 풍력단지별 BESS를 적용하고 단지 출력을 평활화함으로써 계통에

미치는 영향을 분석하였다. BESS 용량은 풍력발전단지의 10% 시간을 산정하여 평활화 제어를 하였다. Fig. 10 (a), (b)는 실제 데이터와 BESS 적용 시 제주계통 내의 발전기별 출력을 나타낸다. 실제 계통은 풍력발전변동에 따라 발전소의 출력이 변동하는 것을 알 수 있는데 BESS 적용 시 풍력발전단지 출력과 발전소의 출력이 거의 변동하지 않는 것을 볼 수 있다. 따라서 계통 공급 시 BESS를 이용하여 풍력발전단지를 안정적으로 운영할 수 있을 것으로 보인다.

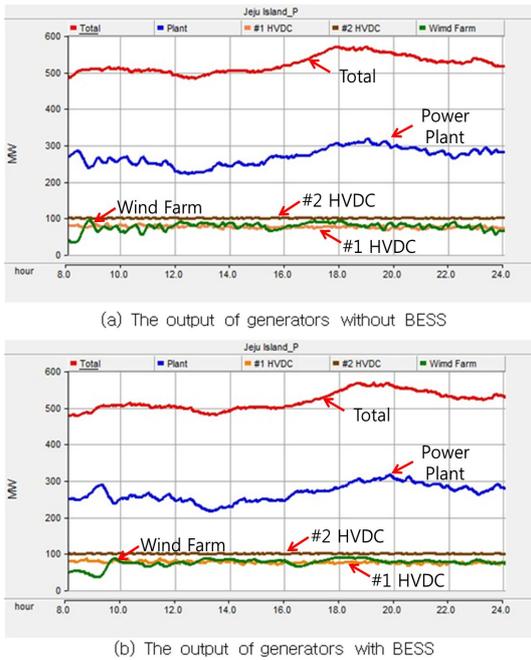


Fig. 10 Comparing with and without BESS

Fig. 11은 풍력발전단지에 BESS 적용 시 제주도내의 풍력발전단지를 동·서부로 구분하였으며, 이에 따른 단지 출력, BESS출력 및 SOC를 보여준다. BESS의 SOC는 잔존용량 피드백 제어에 의해 0.1~0.9 범위를 유지하고 있다.

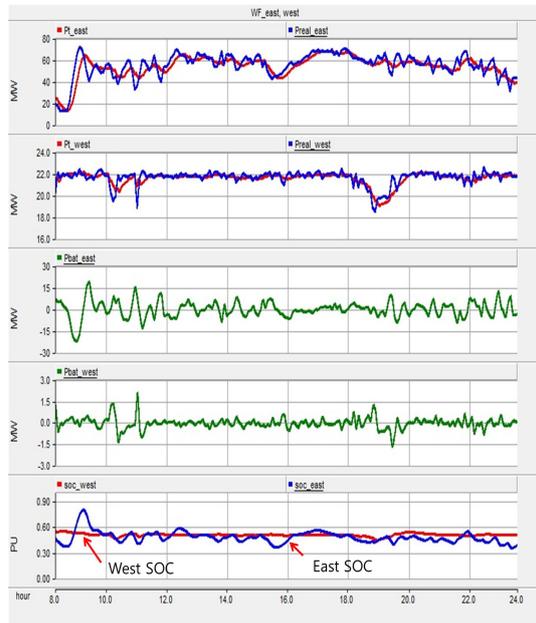


Fig. 11 SOC variation of the BESS in case of connecting wind farms

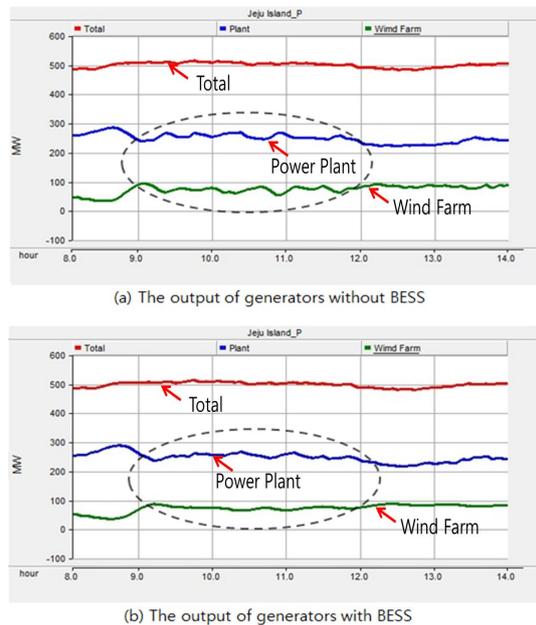


Fig. 12 Comparing with and without BESS

Fig. 12는 2013년 11월 27일 중 풍력발전단

지 출력 변동이 가장 심한 8시~14시 사이를 기준으로 실제 동·서부의 단지 출력과 BESS 적용 시를 비교한 것이다. 실제 출력 Fig. 12 (a)의 경우 바람에 의해서 풍력발전기가 변동하기 때문에 이를 보상해주기 위해서 발전소에서 출력을 분담하는 것을 알 수 있으나 변동에 따른 계통 안정화에 악영향을 주는 것을 알 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 풍력발전단지에 BESS를 적용한 결과 Fig. 12 (b)에서와 같이 풍력발전단지와 발전소의 출력이 거의 평활화되어 계통을 안정화 시키는 것을 알 수 있다.

Table. 4는 풍력발전단지를 동·서로 구분하여 출력을 분담 변동률을 나타내며, BESS 유/무에 따른 출력을 비교한 것이다. BESS가 없을 시 제주계통 내의 풍력발전단지의 출력 변동률은 동부의 경우 16.3%, 서부의 경우 6.7%로 동부의 경우 제주특별자치도에서 고시한 분담 변동률 10%를 넘는 것을 알 수 있고, BESS를 적용 시 풍력발전단지의 출력 변동률이 동부 12.5%, 서부 4.9% 출력 변동률이 줄어들었음을 알 수 있다. 따라서, BESS를 적용하였을 경우, 기존의 풍력발전단지 출력 변동 보다 상당히 줄어듦을 확인 할 수 있다.

Table. 4 Comparison of regulation with and without BESS

	East Wind farm	West Wind farm
Without BESS	16.3%	6.7%
with BESS	12.5%	4.9%

5. 결 론

본 논문에서는 제주도의 각 풍력발전단지별

BESS를 적용 시 제주계통에 적용효과를 분석하기 위하여 제주계통을 모델링하여 실제 데이터와 비교하여 타당성을 입증하고 BESS를 설치하였을 경우에 대한 분석 효과를 서술하였다.

풍력발전단지에 BESS 용량은 제주특별자치도에서 고시한 풍력발전단지의 10% 전력량으로 산정하였으며, 평활화 제어를 통해 풍력발전단지의 합성출력을 평활화함으로써 제주계통을 안정화시켰다. 또한, BESS의 유/무를 비교 분석한 결과, BESS 미적용 시 풍력발전단지 동·서부의 출력 변동이 각각 16.3%, 6.7%로 변동이 심하고, BESS 적용 시 각각의 출력 변동은 12.5%, 4.9%로 변동이 개선되었지만, 동부의 경우 제주지역 풍력발전단지 변동률은 계통연계기준을 만족하지 않는 결과를 보였다. 이에 따라 계통연계기준에 만족하여 단지를 운영하기 위해서는 BESS용량을 단지 용량의 10% 이상으로 산정하여 적용하는 것이 효과적일 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 풍력특성화대학원 인력양성사업(과제번호:20094020200020) 및 「풍력발전설비 평가용 실증단지 확장개발」 과제(과제번호:2012T100201731)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

Reference

1. Report, Feasibility study on application of ESS for wind farms in Jeju, Jeju Special Self-Governing Province Feb, 2013
2. 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), Cardiff, Wales, 2010
3. Report, Details about ESS for output wind turbines and stability of power grid in Jeju ,Jeju Special Self-Governing Province, Dec, 2013
 4. Olivier Tremblay, Louis-A. Dessaint, Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications, World Electric Vehicle Journal Vol. 3, pp. 284~294, 2009
 5. Panasonic battery manufacturer's data sheet. 2009
 6. Report, IEEE Exciter Model Constants, GENERAL ELECTRIC COMPANY, May, 1997