

풍력발전단지 출력보상용 하이브리드 에너지저장장치의 용량산정

Determination of the Hybrid Energy Storage Capacity for Wind Farm Output Compensation

김승현* · 진경민** · 오성보*** · 김일환****†

Kim Seong Hyun*, Jin Kyung-Min**, Oh Sung-Bo*** and Kim Eel-Hwan****†

(Submit date : 2013. 4. 30., Judgment date : 2013년 5. 3., Publication decide date : 2013. 8. 13.)

Abstract : This paper presents the determination method of the hybrid energy storage capacity for compensating the output of wind power when disconnecting from the grid. In the wind power output compensation, a lot of charging and discharging time with lithium-ion battery will be deteriorated the life time. And also, this fluctuation will cause some problems of the power quality and power system stability. To solve these kind of problems, many researchers in the world have been studied with BESS(Battery Energy Storage System) in the wind farm. But, BESS has the limitation of its output during very short term period, this means that it is difficult to compensate the very short term output of wind farm. Using the EDLC(Electric Double Layer Capacitor), it is possible to solve the problem. Installing the battery system in the wind farm, it will be possible to decrease the total capacity of BESS consisting of HESS (Hybrid Energy Storage System). This paper shows simulation results when not only BESS is connected to wind farm but also to HESS. To verify the proposed system, results of computer simulation using PSCAD/EMTDC program with actual output data of wind farms of Jeju Island will be presented.

Key Words : 배터리에너지저장장치(BESS), 슈퍼캐패시터(EDLC), 풍력(Wind power), 하이브리드에너지저장장치(HESS)

기 호 설 명

E	: 무부하 전압 (V)	E_0	: 초기 방전전압 (V)
		k	: 분극전압 (V)

****† 김일환(교신저자) : 제주대학교 전기공학과
E-mail : ehkim@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3674
*김승현 : 제주대학교 전기공학과
**진경민 : 포스코ICT 스마트그리드 사업단
***오성보 : 제주대학교 전기공학과

****† Kim Eel-Hwan(corresponding author) : Department of Electrical Engineering, Jeju National University.
E-mail : ehkim@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3674
*Kim Seong Hyun : Department of Electrical Engineering, Jeju National University.
**Jin Kyung-Min : Smart grid business department, POSCO ICT
***Oh Sung-Bo : Department of Electrical Engineering, Jeju National University

Q	: 배터리 정격용량 (Ah)
$\int_0^t idt$: 실제 배터리 충전 전류 (Ah)
V _{batt}	: 배터리 전압 (V)
I _{batt}	: 배터리 전류 (A)
R	: 내부 저항 (Ω)
A	: 지수영역 비례계수 (V)
B	: 지수영역 감쇠시정수 (Ah) ⁻¹
V _C	: 캐패시터 전압 (V)
V _T	: 단자 전압 (V)
C	: 캐패시턴스 (F)
R _S	: 직렬 등가저항 (Ω)
R _L	: 누설 저항 (Ω)
i _L	: 누설 전류 (A)
P _{ESS}	: 에너지저장장치 출력 (MW)
PW	: 풍력발전단지 정격출력 (MW)
P _{ref}	: 이상적인 출력 (MW)
M	: 여유분 (pu)
T	: 시정수 (s)

1. 서 론

풍력발전의 에너지원인 바람은 기상 조건에 따라 불규칙하게 변동한다. 이러한 변동은 풍력발전기의 출력 변동을 야기 시켜 계통의 전력 품질을 악화 시킬 가능성이 있고 또한 풍력발전단지가 계통으로부터 탈락 될 경우 계통의 안정성에 영향을 미치게 된다. 이에 대한 해결 방안중 하나로 풍력발전단지에 에너지 저장장치를 연계하여 운영하는 방법들이 연구되어 오고 있다.¹⁾ 이 경우 풍력발전 출력을 보상하기 위해 에너지 저장장치 선정 시 출력 변동 주기 특성을 고려하여 에너지 저장장치를 선정하여야 한다. 일반적으로 많이 사용되고 있는 리튬이온 배터리는 잦은 충·방전이 일어날 경우 수명이 짧아지고 순간적으

로 큰 전류가 흐를 때 손상이 가해진다는 단점이 있다.²⁾ 반면 슈퍼캐패시터는 순간적으로 많은 에너지를 저장 후 높은 전류를 순간적으로 공급함으로써 리튬이온 배터리가 수용하지 못하는 출력 특성 영역 즉 단주기의 출력변동을 보상할 수 있는 고출력 특성을 가지고 있어 리튬이온 배터리로만 구성 할 때보다 배터리의 수명을 향상시키는 방안이 될 수가 있다.

따라서 본 논문에서는 풍력출력의 단주기 변동에 대해서는 슈퍼캐패시터, 그 이외의 주기에 대해서는 리튬이온 배터리가 동작하도록 하는 혼합 시스템, 즉 하이브리드 에너지저장시스템을 제안하고자 한다. 제안한 시스템의 타당성을 검증하기 위하여 전력계통 및 전력전자 해석 프로그램에 많이 이용되는 PSCAD/EMTDC 프로그램으로, 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 통하여 제안한 시스템의 타당성을 입증하고자 한다.

2. 모델링

그림 1은 풍력발전단지와 HESS가 연계된 전체적인 시뮬레이션 구성이다. 풍력발전단지는 이상적인 전류원으로 모델링 하였고, BESS 및 EDLC는 수학적으로 모델링하여 PSCAD/EMTDC 프로그램에서 구현하였다.

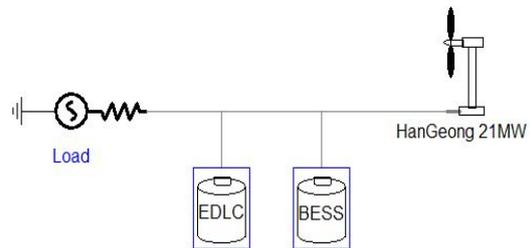


Fig. 1 The proposed 21MW of Wind Farm structure

2.1 리튬이온 배터리 수학적 모델링

본 논문에서는 Shepherd model을 참조하여 그림 2와 같이 단순한 가변 전압 소스와 저항으로 구성하여 모델링하였고, 식 (1)과 같이 가변 전압을 제어하였다.³⁾ 리튬이온 배터리 모델링에 필요한 각종 상수들은 국내 A 사의 제품 중, 정격전압 3.6V, 용량 50Ah를 갖는 배터리를 기준으로 하였다.

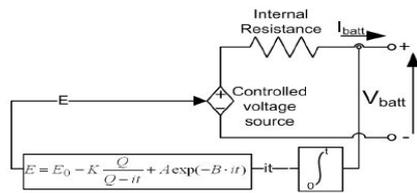


Fig. 2 Non-linear battery model

$$E = E_0 - k \frac{Q}{Q - it} + A \exp(-B \cdot it) \quad (1)$$

2.2 슈퍼캐패시터 수학적 모델링

일반적인 슈퍼캐패시터 모델링은 슈퍼캐패시터의 동특성을 표현할 수 있는 테브난 등가회로를 이용하여 그림 3과 같이 모델링하였다.⁴⁾ 슈퍼캐패시터의 등가직렬저항 R_s 는 슈퍼캐패시터와 직렬로 연결된 저항으로써 충·방전 시 발생하는 전압강하에 영향을 준다. 식 (3)과 식 (4)는 슈퍼캐패시터의 전압, 전류 특성을 나타낸다. 슈퍼캐패시터는 국내 B 사의 정격전압 2.8V, 용량 3000F의 슈퍼캐패시터를 기준으로 하였다.

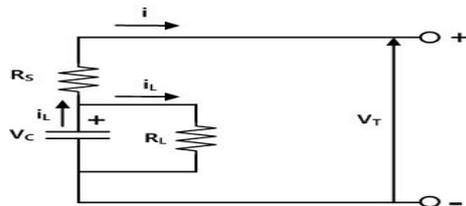


Fig. 3 EDLC equivalent circuit model

$$V_T = V_c - iR_s \quad (2)$$

$$V_c = \frac{1}{c} \int i_c dt = \frac{1}{c} (i + i_L) dt \quad (3)$$

$$i_L = \frac{V_c}{R_L} \quad (4)$$

그림 4와 그림 5는 본 논문에서 사용된 B사의 슈퍼캐패시터 방전 곡선과 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 모델링된 슈퍼캐패시터 방전 곡선으로 100A에서 1000A까지 전류 방전 시뮬레이션 결과이다. 이 그림에서 나타난 곡선들을 보면 거의 일치함을 알 수 있다.

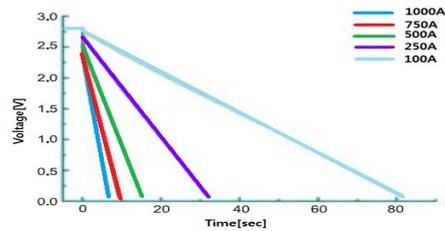


Fig. 4 Discharging curves of real EDLC

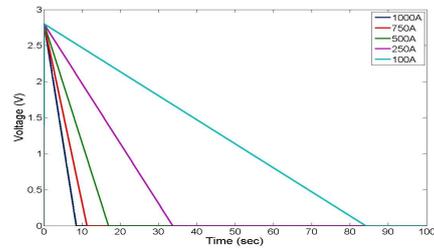


Fig. 5 Discharging curves of modeling EDLC

3. 발전단지 탈락 시 ESS 제어

3.1 ESS 제어

제주지역의 안정적인 전력계통 운영을 위해서 남제주화력발전소 100MW 터빈 발전기 두 대의 증·감발 출력값인 분당 10MW를 기준으로, 제주도내에 존재하는 분산전원들에 대해서

출력 변동을 제한하고 있다.⁵⁾ 풍력발전단지 탈락 시 계통 출력 안정화를 위한 최소 ESS 용량 C_{bat_min} 은 식 (5)와 같이 된다.

$$C_{bat_min} = \frac{P_w * T_{op}}{2} \quad (5)$$

T_{op} 는 단지가 최대 출력에서부터 방전하였을 때 분당 10MW에 기울기를 유지할 수 있는 ESS 운전시간을 나타낸다. 배터리 운전시간 T_{op} 는 식 (6)과 같이 된다.

$$T_{op} = \frac{P_w/10}{60} \quad (6)$$

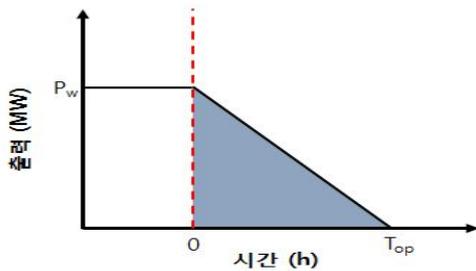


Fig. 6 Minimum capacity of the ESS for disconnecting the wind farm from the grid

그림 6은 풍력발전단지가 계통탈락 시 필요한 ESS 용량을 보여준다. 식 (5)에 식 (6)을 대입하면 식 (7)과 같이 최소 ESS 용량은 풍력발전단지 용량의 제곱에 비례하게 된다.

$$C_{bat_min} = \frac{P_w^2}{1200} \quad (7)$$

풍력발전단지가 정격 운전 중 계통에서 탈락하였을 경우만 고려하여 ESS 용량을 산정할 경우 최대방전전류의 배수 $C-rate_{max}$ 는 식 (8)과 같이 된다.

$$C-rate_{max} = \frac{P_w}{C_{bat_min}} = \frac{1200}{P_w} \quad (8)$$

리튬이온 배터리의 특성상 5C 이상의 C-rate으로 수분 동안 충·방전할 경우 수명이 단축될 우려가 있으므로, P_w 가 240MW 이하의 경우에는 배터리 수명을 고려하여 배터리 용량 C_{bat} 은 풍력발전단지 정격출력의 20%로 고정하는 것이 효과적으로 볼 수가 있다.

$$C_{bat} = \begin{cases} 0.2P_w & (P_w < 240MW) \\ \frac{P_w^2}{1200} & (P_w \geq 240MW) \end{cases} \quad (9)$$

3.2 HESS 제어

풍력발전단지가 계통으로부터 탈락 시 HESS에서 출력을 보상하여 계통에 영향을 줄여야 한다. 그러기 위해서는 그림 10과 같이 HESS의 에너지 영역을 보상해야한다. 제어 방법으로는 그림 10에서 볼 수 있듯이 단지 탈락 시 필요한 BESS와 EDLC 용량, 즉 면적을 구할 수 있다. 이러한 에너지영역 보상 위한 BESS와 EDLC의 상호 연동제어를 하기 위해서 그림 7과 같이 샘플링 타임과 풍력단지의 출력을 피드백 받아 필요한 BESS와 EDLC의 면적을 구할 수 있다. 이러한 과정으로 BESS 및 EDLC 출력의 기준값을 얻어 탈락 시 이 기준값에 의해 EDLC 방전 후 BESS가 방전하여 단지 출력을 보상하는 원리가 된다.

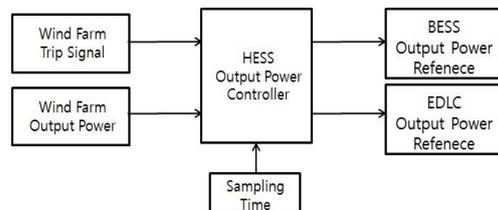


Fig. 7 HESS output power controller

4. ESS 용량 산정

4.1 BESS 용량 산정

단지출력 평활화를 위한 배터리 용량을 산정하기 위해, 2009년 3월부터 2010년 2월까지 한경풍력단지의 출력 중 하루 출력변동이 심한 5일을 택하여 평가시간을 구하였고, 변동에 따른 최대 출력변동 그래프를 그림 8과 같이 작성하여 분석한 결과 20분 후의 출력변동은 거의 변화가 없었다. 따라서 20분을 최대 출력변동을 확인 할 수 있는 출력변동 평가시간으로 결정하였고, 이에 따라 식 (10)을 계산하면 다음과 같이 최대 BESS 용량이 계산된다.

$$C_{BESS,max} = \frac{21MW \cdot \frac{20}{60}h}{2} = 3.5 [MWh] \quad (10)$$

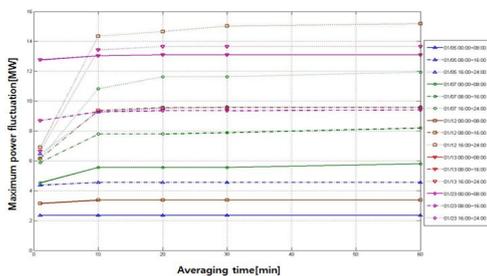


Fig. 8 Maximum power fluctuation every averaging time in the Hangeong wind farm

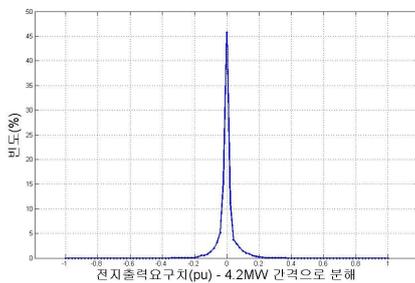


Fig. 9 Probability distribution curve of the power fluctuation of wind farm

그림 9는 풍력발전단지 출력변동에 대한 발생빈도분포를 나타내는 그래프이다. 이 결과에서 보면 풍력발전단지는 출력변동이 $\pm 0.2pu$ 이다. 즉, 출력 평활화를 위한 BESS 용량이 4.2MW으로 결정된다.

4.2 HESS 용량 산정

그림 10은 풍력발전단지가 계통탈락 시 하이브리드 에너지 저장장치의 보상에너지 영역을 그림으로 나타낸 것이며 슈퍼캐패시터의 특성상 용량은 작으나 높은 순간 출력이 가능함을 이용하여 배터리의 용량을 줄이고자 한다. 따라서 슈퍼캐패시터 용량 C_{EDLC} 는 식 (11)에 의해 구하고 식 (12)에 의해 계통 탈락 시 필요한 BESS의 용량 $C_{BESS,min}$ 이 결정된다. 이때 BESS의 출력 P_{BESS} 가 식 (13)에 의해 구할 수 있다. 이를 풍력발전단지에 적용하게 되면 BESS 용량 C_{hybird_bat} 은 식 (9)에 의해 결정된다.

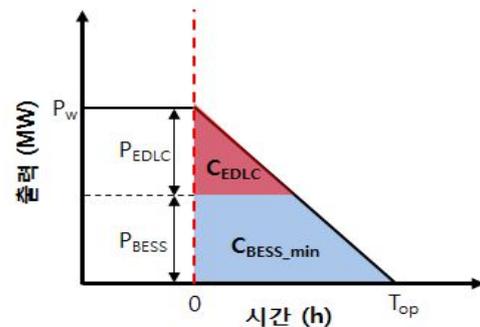


Fig. 10 Capacity of the HESS for disconnecting the wind farm from the grid

$$C_{EDLC} = \frac{1}{2} \times P_{EDLC} \times T_{op} \frac{P_{EDLC}}{P_w} = \frac{P_{EDLC}^2}{1200} \quad (11)$$

$$C_{BESS,min} = \frac{P_w^2 - P_{EDLC}^2}{1200} \quad (12)$$

$$P_{BESS} = P_w - P_{EDLC} \quad (13)$$

따라서 ESS의 용량은 슈퍼캐패시터 용량 P_{EDLC} 를 어떤 값으로 결정하는가에 따라 모든 값이 결정되어 지게 된다. 본 논문에서는 그림 11과 같이 0.1MW 단위로 P_{EDLC} 를 변경하면서 슈퍼캐패시터 용량 증가량 ΔC_{EDLC} 대비 BESS 출력요구 감소량 ΔP_{BESS} 비교하고 슈퍼캐패시터 용량을 증가시킴에 따른 BESS 용량 감소율이 완화되는 시점을 기준으로 $P_{EDLC} = 3.5\text{MW}$ 로 결정하였다.

위 식에 의해 BESS 용량과 EDLC 용량은 각각 3.5MWh, 10.2kWh, BESS 출력 및 EDLC 출력은 각각 17.5MW, 3.5MW로 결정하였다.

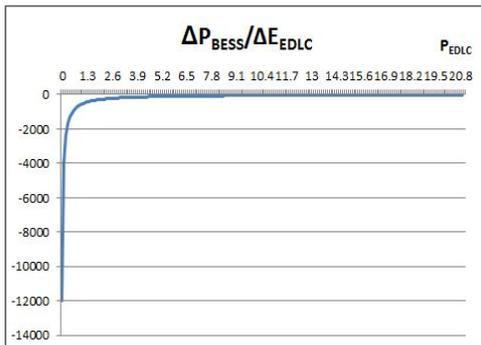


Fig. 11 Comparison between the increase of EDLC and the reduction of BESS

5. 시뮬레이션

그림 12는 풍력발전단지가 정상 운전 도중 계통으로부터 단지가 탈락 되었을 때 출력을 보여주고 있다. 이러한 출력의 스텝 변화는 계통에 영향을 주게 된다. 이러한 영향을 줄이기 위해 BESS 및 HESS를 구성하여 단지 탈락 시 출력을 그림 13, 14와 같이 단지 출력을 완만하게 감소시켜야 한다.

그림 13은 21MW 환경풍력발전단지가 정상 운전 도중 계통으로부터 단지가 탈락 되었을

때 배터리가 보상하는 경우의 잔존용량 곡선이며 분당 10MW의 기울기로 완만하게 출력이 감소를 보여주고 있다. 그림 14는 풍력발전 단지가 정격출력 중 계통 탈락하였을 때 배터리와 슈퍼캐패시터가 동시에 보상하는 경우 각각의 잔존용량 곡선이며, 특히 슈퍼캐패시터가 침투치 부분을 보상하고 있으며 분당 10MW의 기울기로 완만하게 출력이 감소를 보여주고 있다.

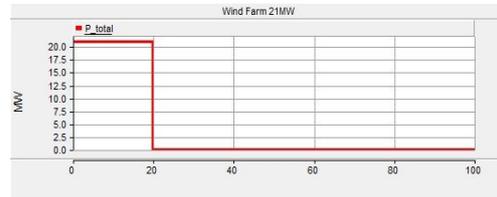


Fig. 12 disconnecting the wind farm from the grid

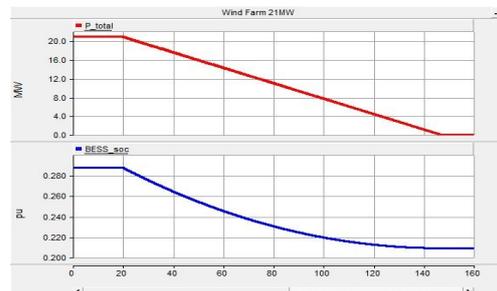


Fig. 13 SOC variation of the BESS in case of disconnecting the wind farm from the grid

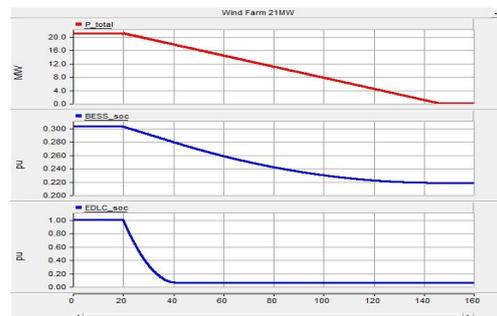


Fig. 14 SOC variation of the HESS in case of disconnecting the wind farm from the grid

Table. 1 Comparative results between the BESS and the HESS in the Hangeong wind farm

BESS	C_{BESS} [MWh]	4.2
	P_{BESS} [MW]	21
	SOC	0.36~0.62
HESS	C_{EDLC} [kWh]	11.2
	C_{HESS} [MWh]	3.5 (16.7% decrease)
	P_{EDLC} [MW]	3.5
	P_{HESS} [MW]	17.5 (16.7% decrease)
	SOC	0.28~0.68

한경풍력발전단지는 표 1에서 배터리만을 사용하였을 경우 사용되는 에너지 저장시스템의 용량은 식 (9)에 의해 4.2MWh로 계산되었다. 또한 하이브리드 에너지저장시스템의 배터리용량은 3.5MWh이며 배터리만을 사용하여 에너지저장시스템을 구성하는 경우와 비교하여 0.7MWh의 용량이 감소하였다. 이를 보상하기 위해 사용되는 슈퍼캐패시터의 용량은 불과 11.2kWh인데 순간출력이 높은 슈퍼캐패시터의 특성으로 약 3.5MW의 순간출력을 감당하기 때문이다.

또한 하이브리드 에너지저장시스템을 사용하는 경우 전체 에너지 저장장치의 활용도가 높아지는 경향을 사용하는 잔존용량(SOC)을 통하여 확인할 수 있으며, 또한 출력과위의 최대치가 줄어들게 되어 하이브리드 에너지저장시스템을 사용하는 경우 에너지변환장치의 최대 출력용량 역시 3.5MW가 감소함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 풍력발전단지의 갑작스런 계통으로부터의 탈락으로 인해 전력품질 및 계통의 안정성 감소를 줄이기 위해 에

너지 저장장치 도입 시 기존의 리튬이온 같은 배터리만을 사용하는 것보다 아주 빠른 응답 출력을 구현 할 수 있는 슈퍼캐패시터와의 혼합하여 적용할 때 각각의 배터리 용량 산정하는 방법에 대해서 기술하였다. 제안된 에너지저장장치의 용량 산정방법을 가지고 21MW의 한경풍력발전단지 적용하여 컴퓨터 해석을 수행한 결과, 표 1에 나타난 것과 같이 BESS와 HESS로 구성하였을 때를 비교해보면 BESS의 경우 배터리 용량은 4.2MWh가 필요하게 되고, HESS의 경우 배터리 및 EDLC 용량은 각각 3.5MWh, 11.2kWh가 필요하게 된다. 경제적인 측면으로 보면 리튬이온 배터리의 경우 1MWh 당 2013년 기준 판매가격이 약 15억원 정도이고 총 약 63억원이 필요하게되고, 반면 전자와 같은 출력 특성을 가지도록 슈퍼캐패시터로 HESS를 구성하였을 때 배터리는 약 52.5억원이 필요하게 된다. 현재 판매되고 있는 EDLC는 1kWh당 약 0.3억원에 판매되고 있기 때문에 약 3억원의 비용이 든다. 두 경우를 비교해보면 HESS으로 구성하면 BESS만으로 구성하였을 때보다 약 10억원을 줄일 수 있습니다.

따라서 풍력발전단지의 변동성 출력완화를 위한 에너지저장장치 도입 시 리튬이온 배터리만으로 구성하는 것보다 순간 응답 출력이 크고 빠른 슈퍼캐패시터를 혼재하여 적용하는 것이 배터리 용량을 줄이는데 유리 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2013년도 제주대학교 학술연구지원사업에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

1. 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.
2. Lee, Yuang-Shung, Ming-Wang Cheng, Intelligent control battery equalization for series connected lithium-ion battery strings, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 52, No. 5, Oct. 2005.
3. 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, 2009.
4. Jin-Geun Shon, Soon-Nam Chu, Won-Sik Lee, & Chae-Dong Na, Analysis of EDLC characteristics for dynamic voltage restorer system, Power Electronics Annual Conference, pp. 424-427, 2006.
5. Method of stability power supply and study on how to increase limited capacity of wind turbines, Jeju Special Self-governing Province, Feb. 2012.