

# 풍력발전의 출력 변동 저감을 위한 ESS 최소용량 산정기법

김재홍\*, 강명석\*\*, 김일환\*\*\*

\*제주대학교 전기공학과, \*\*제주대학교 풍력 특성화 협동과정,  
\*\*\*제주대학교 전기공학과

## Method of Minimizing ESS Capacity for Mitigating the Fluctuation of Wind Power Generation System

Kim, Jae-Hong\* Kang, Myeong-Seok\*\* Kim, Eel-Hwan\*\*\*

\*Faculty of applied energy system graduate school, Jeju National University  
\*\*Multidisciplinary Graduate School Program For Wind Energy, Jeju National University  
\*\*\*Department of electrical engineering, Jeju National University

### Abstract

In this paper, we have studied about minimizing the Energy Storage System (ESS) capacity for mitigating the fluctuation of Wind Turbine Generation System (WTGS) by using Electric Double Layer Capacitor (EDLC) and Battery Energy Storage System (BESS). In this case, they have some different characteristics: The EDLC has the ability of generating the output power at high frequency. Thus, it is able to reduce the fluctuation of WTGS in spite of high cost. The BESS, by using Li-Ion battery, takes the advantage of high energy density, however it is limited to use at low frequency response. To verify the effectiveness of the proposed method, simulations are carried out with the actual data of 2MW WTGS in case of worst fluctuation of WTGS is happened. By comparing simulation results, this method shows the excellent performance. Therefore, it is very useful for understanding and minimizing the ESS capacity for mitigating the fluctuation of WTGS.

Keywords : 에너지 저장 시스템(ESS : Energy Storage System), 슈퍼 캐패시터(Super capacitor, EDLC : Electric Double Layer Capacitor), 배터리 저장 시스템(BESS : Battery Energy Storage System), 충전 상태(SOC : State of Charge)

### 1. 서론

미래의 신재생 에너지원으로서 고려되는 풍력발전은 급속한 발전을 이루고 있으며,

2009년의 통계로서 전 세계의 풍력발전 설치 용량은 약 150GW에 달하며 매해 가파른 추세로 상승하고 있다.<sup>1)</sup> 그러나 풍력에너지는 정확한 출력 예측이 불가능 하며 출력의 변동

투고일자 : 2011년 8월 16일, 심사일자 : 2011년 8월 25일, 게재확정일자 : 2011년 10월 21일  
교신저자 : 김일환(ehkim@jejunu.ac.kr)

률이 높은 특성 때문에 계통연계 시 여러 가지 문제를 일으킬 수 있다. 대표적인 예로 급격한 출력변동은 계통 전압 및 주파수의 변동을 초래하고 에너지 출력을 예측 또는 조정할 수 없음을 풍력에너지가 생산해 낼 수 있는 에너지만큼의 예비력을 상시 대기해야 한다는 불편함을 야기한다.<sup>2)</sup>

이러한 문제점을 극복하기 위해 다양한 연구가 이루어졌으며 대다수의 연구가 에너지 저장시스템 ESS를 풍력발전기와 복합연계 운영하는 방법에 집중되어 있다. ESS의 구성 역시 다양한 에너지 저장 매체를 이용하는 방법이 연구되고 있으나 본 논문에서는 BESS와 EDLC를 복합 채용한 ESS를 다루고 있으며 이를 이용하여 short term power smoothing을 목적으로 하고 있다.

ESS에 관한 대다수의 논문들은 확률 이론적 접근으로 결국 풍력발전기 용량에 근접한 ESS의 채용을 추천하고 있지만 이는 경제적인 이유로 실현성이 낮은 문제점이 있다. 또한 10분미만의 출력안정화를 목적으로 ESS를 채용한 논문의 경우 본 논문의 전개방식과 유사하나 BESS와 EDLC의 용량에 따른 동특성을 고려하고 C-rate를 고려하여 최소용량으로 경제적 ESS구성이 가능함을 보여주고 있으며, 동특성 모델을 적용한 시뮬레이션을 통해 실제 시스템 구현의 가능성 및 문제점을 점검할 수 있는 틀을 제안하고 있다는 것이 본 논문의 주요 특이성 이다.

## 2. 단순 모델링에 의한 ESS 용량 선정 기법

### 2.1 ESS용량산정을 위한 단순 모델링

풍력발전기에서 생성되는 출력은 다양한 주파수의 외란 성분을 포함하고 있다. 여기서 1Hz이상의 성분은 발전기의 기계적 관성에 의해 보상되고 0.1Hz~1Hz 성분은 비교적 응답 속도가 빠른 EDLC를 이용하여 전력 보상을 하며 0.1Hz~0.01Hz 성분은 에너지 밀도

가 높은 BESS에 의해 보상 하는 것이 적절하다.<sup>3)</sup> 그림1은 EDLC와 BESS가 보상해 주어야 하는 전력을 이상적으로 공급할 수 있다고 가정하고 ESS의 최적 용량을 산정하기 위해 사용된 단순 제어 모델이다.

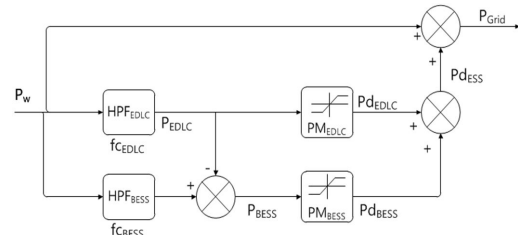


그림 1. 용량산정을 위한 단순 제어 모델

식(1)과 같이 급격한 출력변동을 포함하는 풍력발전기의 출력  $P_w$ 는 EDLC에 의해 보상되는  $P_{dEDLC}$ 와 BESS에 의해 보상되는  $P_{dBESS}$ 에 의해 완만한 출력변동을 갖고 계통에 투입되는  $P_{Grid}$ 가 된다. EDLC에 의한 이상적 보상 전력  $P_{EDLC}$ 와 BESS에 의한 이상적 보상 전력  $P_{BESS}$ 는 단순 필터 응답으로 식(2)와 식(3)에 의해 결정되어 진다.

$$P_{grid} = P_w + P_{dEDLC} + P_{dBESS} \quad (1)$$

$$P_{EDLC} = \frac{(1/fc_{EDLC})s}{(1/fc_{EDLC})s + 1} P_w \quad \text{(빈줄)} \quad (2)$$

$$P_{BESS} = \frac{(1/fc_{BESS})s}{(1/fc_{BESS})s + 1} P_w - P_{EDLC} \quad (3)$$

이때의 ESS로 보상할 수 있는 이상적 전력  $P_{grid\_ideal}$ 은 식(4)에 의해 결정되며 ESS로 보상할 수 있는 실제전력  $P_{grid\_real}$ 은 식(5)에 의해 결정되게 된다. 본 논문에서의 용량산정은 식(6)으로 표현되는  $Error_{ESS}$  값이 0에 수렴하도록  $PM_{EDLC}$ 와  $PM_{BESS}$ 에 값을 변경하여 최적용량을 산정하였다.

$$P_{grid\_ideal} = P_w + P_{EDLC} + P_{BESS} \quad (4)$$

$$P_{grid\_real} = P_W + P_{d_{EDLC}} + P_{d_{BESS}} \quad (5)$$

$$Error_{ESS} = P_{grid\_ideal} - P_{grid\_real} \quad (6)$$

## 2.2 풍력발전기의 출력 $P_w$ case 선정

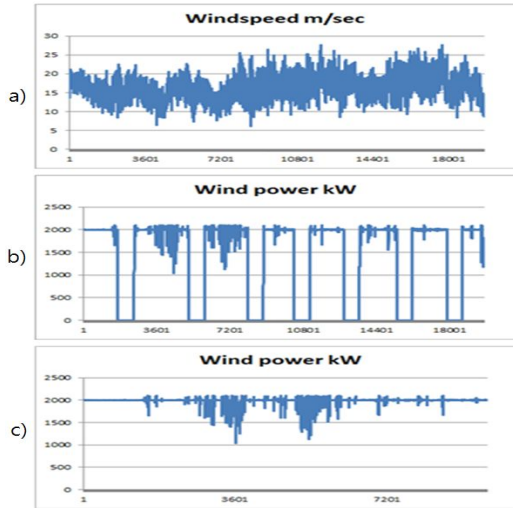


그림 2. 시뮬레이션을 위한 데이터 추출  
a) 실제 풍속 데이터 b) 실풍속시 발전기 출력량  
c) 조정된 풍속 데이터

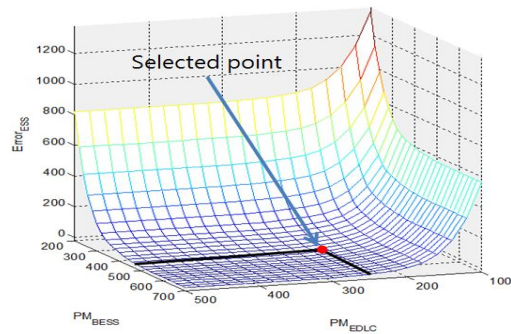


그림 3. 최적용량 산정을 위한 3차원 그래프

그림 2 a)는 풍력발전기의 실제 풍속 데이터이며, 그림 2 b)는 a) 풍속 시 Vestas 2MW 풍력발전기의 실제 출력을 1초 단위로 보이고 있다. 이 Case는 약 15m/s의 순간 풍속 변동으로 인해 최대 1MW의 출력변동 및 비상 정지되고 있는 데이터 이다. 그림 2 c)는 그림

2 b)에서 풍력발전기 정지 데이터를 삭제하여 만든 데이터이며 이 데이터를 풍력발전기의 최대 출력 변동 상황으로 가정하여 용량산정 및 시뮬레이션에 활용하였다.

## 2.3 $PM_{EDLC}$ & $PM_{BESS}$ 결정

그림 3은 2.2절에서 기술한 풍력발전기의 데이터를 적용하여  $f_{CEDLC} = 0.1\text{Hz}$ ,  $f_{CBESS} = 0.01\text{Hz}$ 로 설정한 후  $PM_{EDLC}$ 를 100~500kW 까지 가변,  $PM_{BESS}$ 를 200~700kW로 가변 하여 식(6)의  $Error_{ESS}$ 를 연산한 결과이다. 그림 3에서 보듯이  $Error_{ESS}$ 가 EDLC와 BESS의 용량이 커짐에 따라 감소되는 것을 볼 수 있는데 각각의 ESS가 일정용량 이후부터는  $Error_{ESS}$ 의 감소폭이 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 경제성을 고려하여  $Error_{ESS}$ 의 변동폭이 좁아지기 시작하며 그 값이 0에 가까운 지점인  $PM_{EDLC} = 250\text{kW}$ ,  $PM_{BESS} = 450\text{kW}$ 를 최적점으로 결정하였다.

## 2.4 $E_{EDLC}$ , $E_{BESS}$ 결정과 ESS Pack 구성

2.3절의 결과를 만족 할 수 있는 적절한 값을 선정하기 위하여 NESS사의 5000F EDLC를 이용하여 계산하였다. 표1의 EDLC 항목을 참조하여 순간 최대 출력 250kW를 만족할 수 있는 Pack 전압은 98.15V 이며 이때 최대 전류는 정격전압의 50%인 상황이다. 따라서 안정적으로 최대전류를 유지하기 위해서는 196.3V 이상으로 전압 구성이 되어야 한다. 시뮬레이션을 위한 EDLC pack은 EDLC 73개를 직렬 연결하여 197.1V로 모델링 하였고 여기서  $E_{EDLC}$ 는 370Wh가 된다.

BESS의 경우 근래 급속한 발전을 이루고 있는 리튬이온 배터리를 채용하였다. 그림 4를 참조하여 C-rate(Current rate)에 따라 사용할 수 있는 배터리의 용량을 결정하였는데 여기서 배터리는 10 C-rate 이하에서 사용되어야 하고 그 이상의 C-rate 상태에서는 배터리의 효율이 급격히 떨어지게 된다. 시뮬레이

션을 위하여 S사의 정격용량 50Ah를 이용할 경우 900V의 전압을 구성할 수 있도록 배터리 Pack을 구성하여야 한다. 사용전압이 4.2V ~ 2.8V의 리튬이온 배터리를 322개 직렬 연결하여 1352~902V의 배터리 Pack 전압과 공칭 전압이 3.6V 이므로  $3.6V \times 322 \times 50Ah = 58kWh$ 의 용량을 갖도록  $E_{BESS}$ 가 결정되게 된다.

따라서  $PM_{EDLC} = 250kW$ ,  $PM_{BESS} = 450kW$ 의 최대 순시전력을 제공할 수 있는 최소 용량은  $E_{EDLC} = 370Wh$ ,  $E_{BESS} = 7.96kWh$ 가 된다.

표 1. 시뮬레이션에 사용된 EDLC의 파라미터 값

수 치	값
Capacitance(F)	5000
ESR( $\Omega$ )	0.0003
Max. Current(discharge rate to $1/2V_{rate}$ )(A)	2,547
Stored Energy(Wh)	5.06
Rated Voltage(V)	2.70
Surge Voltage(V)	2.85

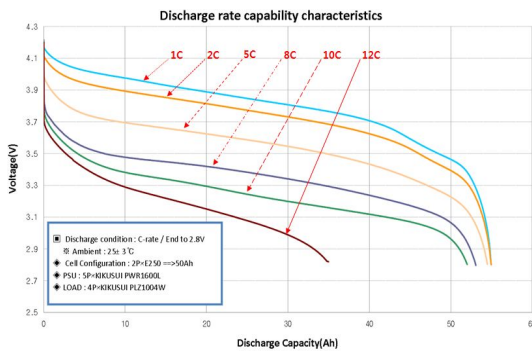


그림 4. BESS C-rate 그래프

### 2.5 $\int Pd_{EDLC\_MAX}$ , $\int Pd_{BESS\_MAX}$ 에 따른 $E_{EDLC}$ , $E_{BESS}$ , $f_{CEDLC}$ , $f_{CBESS}$ 재설정

그림5는 앞 장에서 결정된  $Pd_{EDLC}$ 와  $Pd_{BESS}$ 를 각각 시간에 대해 적분한 값을 나타내고 있으며  $\int Pd_{EDLC\_MAX}$ ,  $\int Pd_{BESS\_MAX}$ 를 2.4절에서 결정된  $E_{EDLC}$ ,  $E_{BESS}$ 와 비교하여  $E_{EDLC}$ ,  $E_{BESS}$ ,  $f_{CEDLC}$ ,  $f_{CBESS}$ 를 재설정해야 되는 경우가 발생하며 다

음의 조건에 따라 재설정을 수행해야 한다.

- 1)  $\int Pd_{EDLC\_MAX} > E_{EDLC}$   
 $\rightarrow E_{EDLC}$  용량증가 재설정
- 2)  $\int Pd_{EDLC\_MAX} < E_{EDLC}$   
 $\rightarrow f_{CEDLC}$  차단 주파수를 낮춰  $\int Pd_{EDLC}$  값이  $E_{EDLC}$  값에 근접하도록 재설정
- 3)  $\int Pd_{BESS\_MAX} > E_{BESS}$   
 $\rightarrow E_{BESS}$  용량증가 재설정
- 4)  $\int Pd_{BESS\_MAX} < E_{BESS}$   
 $\rightarrow f_{CBESS}$  차단 주파수를 낮춰  $\int Pd_{BESS\_MAX}$  값이  $E_{BESS}$  값에 근접하도록 재설정

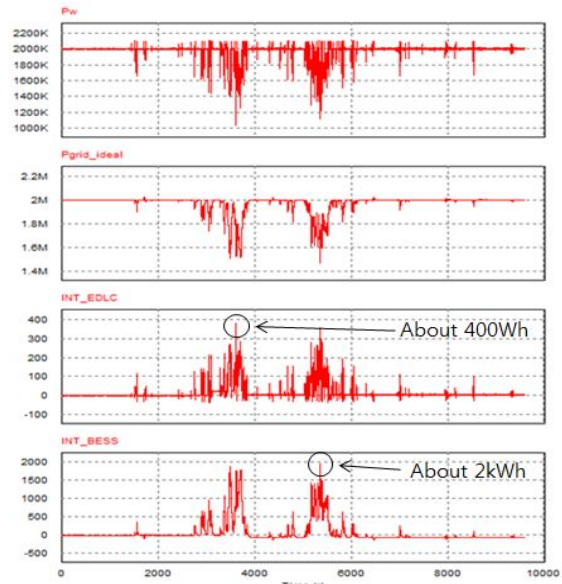


그림 5. ESS에 의해 보상된 전력량

그림 5에서  $\int Pd_{EDLC\_MAX} = 400Wh$  이므로 EDLC의 셀구성을 73개에서 79개로 증가시켜  $E_{EDLC}$ 를 400Wh에 근접시켰다.  $\int Pd_{BESS\_MAX} = 2kWh$ 이나 2.4절에서 모델링된  $E_{BESS}$ 의 용량에 미치지 않아  $f_{CBESS}$ 를 위의 재설정 절차에 따라 시뮬레이션 하여  $\int Pd_{BESS\_MAX}$ 가  $E_{BESS}$ 와 같아지는 0.0025Hz로 변경하였다.

### 3. 동적 모델링과 해석

#### 3.1 EDLC 모델링

고전적인 테브난 모델을 이용하여 Psim 프로그래밍으로 EDLC 등가 모델을 만들었다. EDLC 특성은 표1을 적용하였고 그림 6은 실제 방전곡선과 모델링에 의한 방전곡선이 유사함을 보인다.<sup>4)</sup>

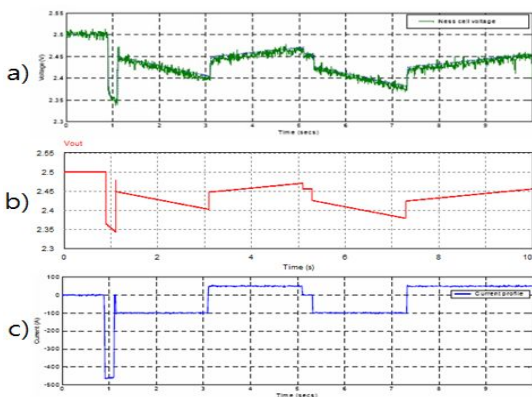


그림 6. 슈퍼캐패시터의 충/방전 전압과 전류 파형  
 (a) EDLC 실제 방전 전압 파형  
 (b) 모델링된 EDLC 방전 전압 파형  
 (c) 전류 레퍼런스 파형

#### 3.2 BESS 모델링

본 논문에서 사용되는 배터리 모델은 Shepherd model<sup>5)</sup>을 참조하여 가변 전압 소스와 직렬 연결된 저항으로 구성하여 모델링 하였으며, 모델링에 필요한 각종 상수들은 그림 4의 배터리의 실제 방전 곡선을 이용하여 도출하였다.<sup>6)</sup> 방전 전류 및 SOC에 따른 전압의 동특성은 식 (7)을 이용하여 표현 하였다.

$$f_{battery}() = E_0 - k \frac{Q}{Q-} \cdot + A \cdot \exp(-B \cdot) \quad (7)$$

$f_{battery}$  : 배터리 출력전압 [V]

$E_0$  : 일정 배터리전압 [V]

$A$  : exponential zone amplitude [V]

$B$  : exponential zone time constant inverse [Ah]<sup>-1</sup>

$Q$  ; 정격용량 [Ah]

$k$  : 분극전압 [V]

그림7은 PSIM모델을 이용하여 생성한 C-rate별 방전 곡선이며 이 곡선은 그림 4의 실제 방전곡선과 유사하다.

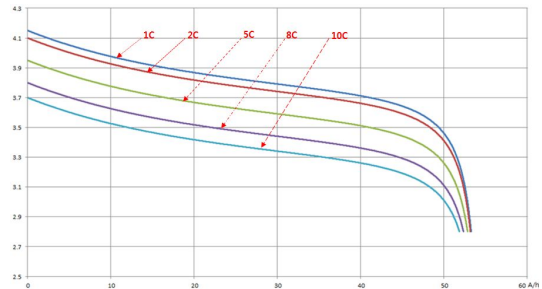


그림 7. C-rate 방전 용량 특성 모델링

#### 3.3 제안된 시스템 모델링

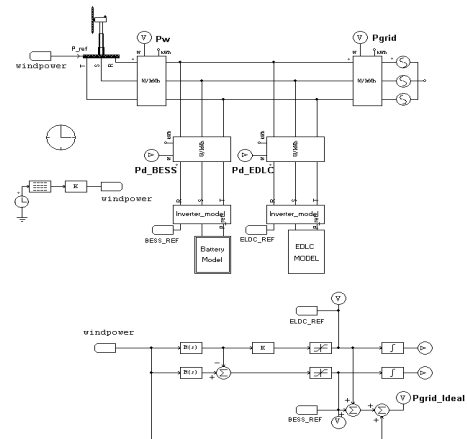


그림 8. WTGS와 ESS 시스템 모델링과 ESS 제어 블록선도

그림 8은 제안한 방법을 검증하기 위해 3.1 절에서 모델링한 ESS를 풍력발전 시스템에 연계하고 계통으로의 전력 전송을 하기 위한 시뮬레이션 모델로 전력변환기의 손실은 고려하지 않았다. 앞에서 결정된  $f_{CEDLC}$ ,  $f_{CBESS}$ ,  $PM_{EDLC}$ ,  $PM_{BESS}$ 를 적용하여 제어기를 구성 하였다. 동특성을 적용한 시뮬레이션 모델을 작성하는 주요 목적은 단순모델에 의해 계산되어지는 이론적인  $P_{grid\_ideal}$  값과 이 절에서 제안하는 BESS와 EDLC에 동특성을 포함하



여 연산된  $P_{grid}$  값을 비교함으로써 BESS와 EDLC의 용량과 제어기의 차단 주파수가 적절한지를 확인하기 위해서이다. 즉, 앞에서 결정한 BESS와 EDLC의 동작전압 영역을 항상 유지해야 하고 각각 정격이상에 충·방전을 제한 시켜줬다. 또한 BESS의 최대 전류는 500A, EDLC의 최대전류는 표1에 의해 2,547A로 제한되고 있다.

그림 9와 그림 10은 상기 모델을 시뮬레이션한 결과로서 시뮬레이션을 통해 설계된 BESS와 EDLC가 풍력발전 출력을 보상하는 동안의 SOC와 DC전압을 나타내고 있으며, 이를 통해 ESS가 안정적인 동작을 하는지 확인할 수 있다. EDLC의 경우 저전압 한계치에 따라 EDLC 출력 지령치인  $EDLC_{REF}$ 와 Protection에 의해 제한된 실제 출력인  $Pd_{EDLC}$ 와 다소 차이점을 보이는 구간이 있으며 BESS는 전 영역에서 안정적으로 동작하고 있다.

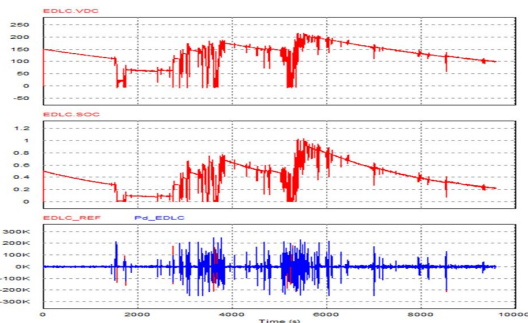


그림 9. EDLC에 출력 특성 그래프

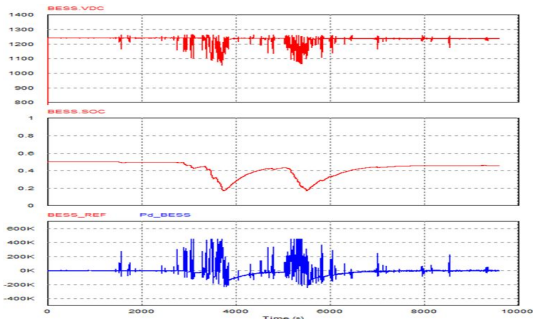


그림 10. BESS에 출력 특성 그래프

### 3.4 시뮬레이션 결과와 풍력발전량 변동률

그림 11은 실제 풍력발전기의 출력  $P_w$ 와 단순모델링의 필터만을 이용하여 ESS에 의해 보상되어 계통에 전송될 수 있는 이상적 전력을  $P_{grid\_ideal}$ 로 나타내고 있으며 동적특성이 적용되고 Protection 상황이 고려된 출력은  $P_{grid}$ 로 나타내어지고 있다.  $P_{grid\_ideal}$ 과  $P_{grid}$  파형이 다소 다른 이유는 3.3절에서와 같이 Protection 조건을 고려하기 때문에 생기는 차이이다. 그림 12는 출력변동률을 계산한 결과이다.  $P_{grid}$  출력은  $P_{grid\_ideal}$ 보다 다소 변동률이 높으나 실제 풍력발전기 출력  $P_w$ 보다는 개선된 결과를 보인다.

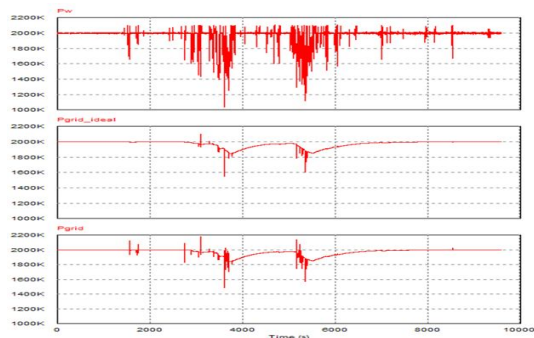


그림 11. 계통 출력 파형 그래프

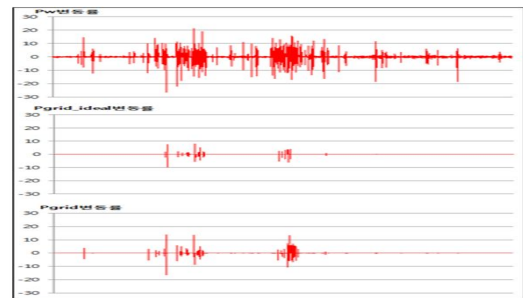


그림 12. 계통 출력 변동률 비교

## 4. 결 론

풍력발전기의 단시간 출력변동을 완화하기 위해 현 시점에서 실현 가능하고 경제적이며

효율적인 ESS 용량 설계 방법을 제안함에 있어, 2.1절과 2.2절을 통하여 BESS= 450kW와 ELDC= 250kW의 최대 출력을 산출해 냈으며 2.3절을 통하여 각각의 저장매체의 C-rate을 고려한 용량을 계산한 결과 BESS=57.96kWh, EDLC=370Wh가 되었다. 이는 2MW 출력의 풍력발전기에 비해 상대적으로 작은 용량이며 ESS의 전압 및 직·병렬 구성을 구체적으로 제시하였다.

제안한 각각의 ESS는 동특성 모델링을 하였고 3.3절의 시뮬레이션을 통하여 제안한 제어기와 다소 작은 용량의 ESS로 눈에 띄는 출력 보상 효과를 기대할 수 있음을 입증하였다.

ESS의 용량산정 및 제어기법에 관련한 많은 연구들이 전 세계적으로 이루어 졌으나 본 논문은 2.3절, 2.4절, 2.5절에서 배터리의 실제적 특성을 고려하여 독특한 방법으로 ESS의 구성 및 용량을 구체적으로 제시 하였으며 동적모델링과 동작조건을 고려한 시뮬레이션을 통해 향후 풍력발전에 적용할 수 있는 ESS를 설계 및 검토하는데 기여하리라 기대된다.

## 후 기

본 연구는 2011년(3차년도) 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20093021020030)

## 참 고 문 헌

1. Bolik, S. M.. "Grid requirements challenges for wind turbines." Fourth International Workshop on Large Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms. Oct. 2003.
2. H. Holttinen and R. Hirvonen. "Power System Requirements for Wind Power." (Wind Power in Power Systems, T. Ackermann, Ed. John Wiley & Sons, 2005, pp.143~167.)
3. Jia Hongxin.. "Design of Hybrid Energy Storage Control System for Wind Farms Based on Flow Battery and Electric Double-Layer Capacitor" Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific. pp.1~6.
4. 김영호 "초고용량 커패시터 모듈 기술" 초고용량 커패시터 기술 및 표준화 동향 세미나, 2006.
5. C. M. Shepherd, "Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An equation describing battery discharge" Journal of Electrochemical Society, Volume 112, Jul. 1965 Page(s): 657-664
6. 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, 2007. IEEE, Page(s): 284-289