

## 제주 행원 풍력발전단지의 출력 안정화를 위한 에너지저장시스템 용량산정에 관한 연구

강명석\*, 진경민\*\*, 김일환\*\*\*, 오성보\*\*\*\*, 이정민\*\*\*\*\*

\*제주대학교 풍력특성화 협동과정(kms3586@naver.com),  
\*\*제주대학교 풍력특성화 협동과정(thesis98@naver.com),  
\*\*\*제주대학교 전기공학과(ehkim@jejunu.ac.kr),  
\*\*\*\*제주대학교 전기공학과(sboh@jejunu.ac.kr),  
\*\*\*\*\* (주)효성 중공업연구소 PV PCS TFT(neomin@hyosung.com)

### A Study on the Determining ESS Capacity for Stabilizing Power Output of Haeng-won Wind Farm in Jeju

Kang, Myeong-Seok\* Jin, Kyung-Min\*\* Kim, Eel-Hwan\*\*\* Oh, Sung-Bo\*\*\*\* Lee, Jeong-Min\*\*\*\*\*

\*Multidisciplinary Graduate School Program For Wind Energy, Jeju National University(kms3586@naver.com),  
\*\*Multidisciplinary Graduate School Program For Wind Energy, Jeju National University(thesis98@naver.com),  
\*\*\*Department of electrical engineering, Jeju National University(ehkim@jejunu.ac.kr),  
\*\*\*\*Department of electrical engineering, Jeju National University(sboh@jejunu.ac.kr),  
\*\*\*\*\*Power & Industrial Systems R&D Center, HYOSUNG CORPORATION(neomin@hyosung.com)

#### Abstract

This paper presents the characteristics of power generation output at Haeng-won wind farm and how to determine the optimized ESS capacity for power stabilizing. Depend on the fluctuation rate of wind power output variation, wind farm capacity and site, power stabilization will be impacted. Therefore, we need to determine proper ESS capacity. Using the actual data of Haeng-won wind farm from 2009.3 to 2010.2., capacity of ESS was determined by moving average value. To verify the proposed algorithm, simulations are carried out with PSCAD/EMTDC program. As a result, optimal ESS capacity of Haeng-won wind farm in Jeju is estimated about 1.63 MWh.

Keywords : 에너지저장시스템(Energy Storage System), 풍력(Wind power), 출력변동률(Fluctuation rate of power), 출력 안정화(Power stabilization)

## 1. 서 론

국내의 풍력산업은 1998년 8월 상업 운전에 들어간 제주 행원 풍력단지를 시작으로 2011년까지 총 28곳에 393.845MW의 용량이 조성되어 있다.<sup>1)</sup> 제주지역에 조성된 풍력단지는 표1과 같고 국내에 설치된 총 용량의 22.9%를 차지하고 있다. 현재 제주지역의 발전설비 공급능력은 2011년 기준으로 780MW이며 그 중 풍력이 차지하는 비중은 11.6%이다.<sup>2)</sup> 2012년부터 신·재생에너지 공급의무화 제도인 RPS(Renewable portfolio standards)제도가 도입됨에 따라 신·재생에너지 비율이 높아질 것으로 예측되고 제5차 전력수급기본 계획에 따라 제주 지역에 2016년까지 풍력이 143.2MW가 추가적으로 설치될 예정이다.<sup>3,4)</sup>

표 1. 제주지역 풍력단지 현황

No	발전소	총용량 (kW)	단위용량 (kW)	대수	사업자	설치 위치
1	행원	9,795	225	1	제주도청	구좌읍 행원리
			600	2		
			660	7		
			750	5		
2	환경	21,000	1,500	4	남부발전	환경면
			3,000	5		
3	신창	1,700	850	2	제주도청	환경면 신창리
4	월정	1,500	1,500	1	제주도(예기연)	구좌읍 월정리
5	성산	20,000	2,000	10	남부발전	성산읍 수산리
6	삼달	33,000	3,000	11	한신에너지	성산읍 삼달리
7	김녕	1,500	750	2	제주도	구좌읍 김녕리
8	월령	2,000	2,000	1	제주도	한림읍 월령리
Total		90,495				

이러한 시점에서 풍력발전은 그 에너지원인 바람의 특성상 출력이 간헐적으로 나타나기 때문에 출력변동이 심하고, 예측이 어려워 계통에서 차지하는 비중이 높아질수록 풍력발전과 연계된 계통의 전력품질을 저하시킨다.<sup>5)</sup> 이러한 문제점들을 해결하기 위해 에너

지저장시스템을 풍력단지의 AC계통에 연계하여 운영하는 방법 및 풍력발전기 컨버터 시스템의 DC-Link에 연결하여 운영하는 방법이 연구되고 있다.<sup>6)</sup> 그러나 이러한 연구에서는 에너지저장시스템의 용량 산정에 관한 내용이 부족한 실정이다. 풍력단지에 적용되는 에너지저장시스템의 용량이 증가할수록 중앙 급전 발전원과 같이 일정한 출력을 내보낼 수 있지만 경제적인 이유로 인해 실제 시스템에 적용하기가 힘들어 최적 용량산정에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 리튬이온 배터리를 사용하여 제주 행원 풍력단지의 특성에 맞는 최적 용량을 산정하고, 에너지저장시스템에 산정된 용량을 적용하여 출력 평활화에 미치는 영향을 분석하기 위해 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 기반으로 시뮬레이션 하고 그 효과를 분석하였다.

## 2. 제주 행원 풍력단지의 출력특성

그림 1~4는 2009년 3월 1일~2010년 2월 28일 1년간 2초 간격으로 측정된 제주 행원 풍력단지의 유효전력 데이터를 활용하여 나타난 출력변동 빈도분포 그래프이다. 출력특성은 각각 1분, 10분, 30분에 대해 계절별로 나누어 분석하였다.

계절별 출력변동률에서 볼 수 있듯이 사계절 가운데 겨울철이 가장 큰 변동률을 가지고 있다. 이 겨울철 데이터를 사용하여 출력 변동폭이 가장 심한 특정일을 찾아내기 위하여 이동평균을 사용하였다.

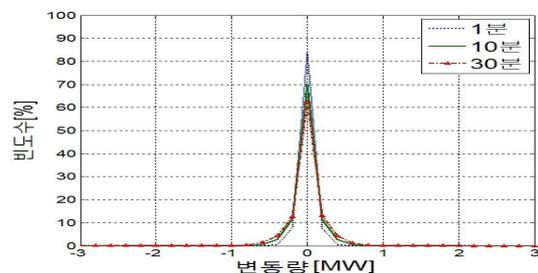


그림 1. 봄 출력변동률 빈도분포

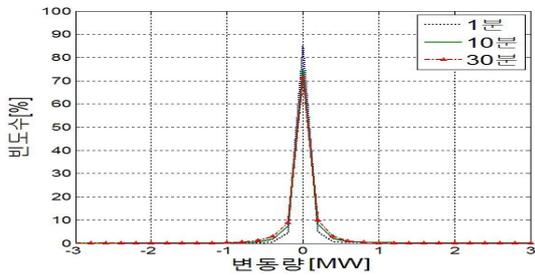


그림 2. 여름 출력변동률 빈도분포

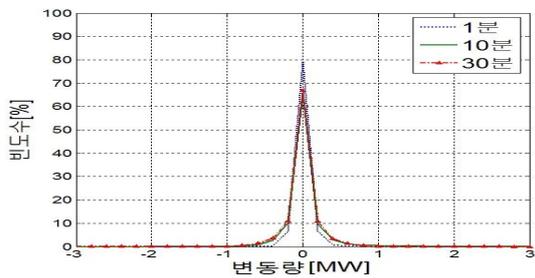


그림 3. 가을 출력변동률 빈도분포

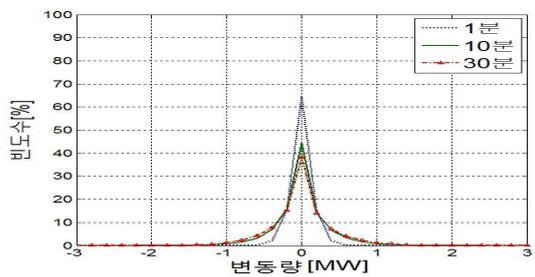


그림 4. 겨울 출력변동률 빈도분포

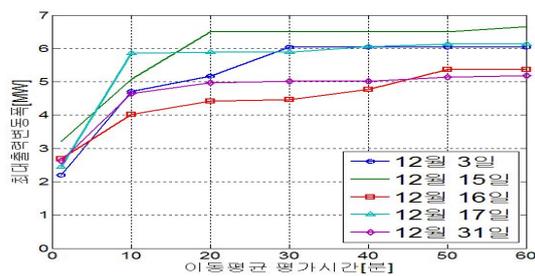


그림 5. 이동평균에 따른 최대출력변동

그림 5는 겨울철 중에서 출력변동이 심한 5일을 선정하여 이동평균 평가시간에 따른 최대출

력 변동폭을 나타내었다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 2009년 12월 15일이 선정한 5일 가운데 최대 출력 변동폭인 6.5MW를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 시뮬레이션 대상으로 2009년 12월 15을 선정하였다. 하루의 데이터를 사용한 이유는 PSCAD/EMTDC 소프트웨어 특성상 취급할 수 있는 데이터 수와 시뮬레이션 시간을 고려해서이다. 또한 출력 변동이 가장 심한 날의 출력을 평활화 시키는 것이기 때문에 1년 안에 발생하는 모든 출력 변동은 선정일의 출력변동 범위 안에 포함된다고 볼 수 있다.

### 3. 에너지저장시스템의 모델링과 시뮬레이션

#### 3.1 리튬 이온 배터리 모델링

본 논문에서 사용되는 배터리 모델은 Shepherd model<sup>7)</sup>을 참조하였고 전압 동특성은 식 (1)과 같다. 그림 6과 같이 가변 전압 소스와 직렬 연결된 저항으로 구성하여 모델링 하였으며, 모델링에 필요한 파라미터 값은 A사의 사용전압 4.2V~2.8V, 정격용량 50Ah, 공칭 전압 3.6V인 리튬이온 배터리의 실제 방전 곡선을 이용하여 도출하였다.

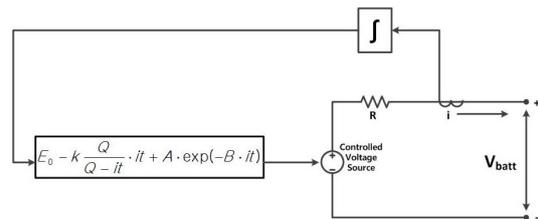


그림 6. shepherd 배터리 모델

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

$V_{batt}$  : battery voltage [V]

$E_0$  : battery constant voltage [V]

$A$  : exponential zone amplitude [V]

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

$Q$  : battery capacity [Ah]  
 $k$  : polarization constant [V/Ah]

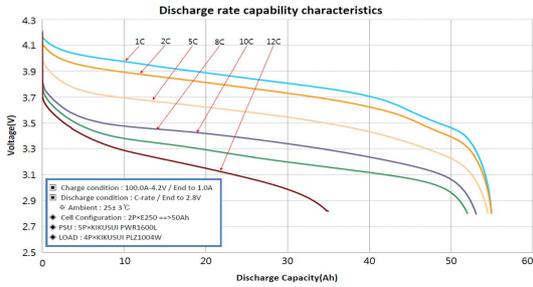


그림 7. 실제 C-rate별 방전 그래프

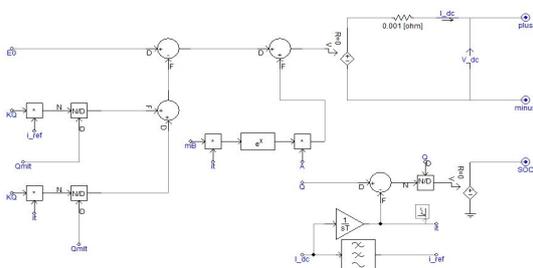


그림 8. PSCAD/EMTDC를 사용한 배터리 모델

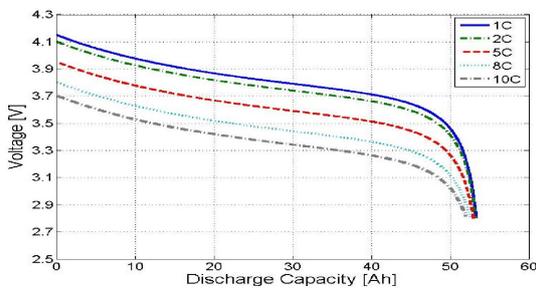


그림 9. 모델링된 배터리의 C-rate별 방전 그래프

그림 9는 PSCAD/EMTDC를 사용하여 모델링한 리튬이온 배터리의 방전 곡선이며 이 곡선은 그림 7의 실제 방전곡선과 유사하다.

### 3.2 배터리 용량 산정

배터리의 용량을 산정하는데 있어서 배터리의 용량이 크면 클수록 평활화의 정도가 이상적으로 평활화 되는 것은 당연하다. 하지만

경제적인 측면이나 실현가능성을 생각한다면 최소의 배터리 용량으로 최대의 출력 평활화를 얻어내는 것이 가장 좋다. 본 논문에서는 최적의 배터리 용량을 산정하기 위하여 이동평균값을 사용하였다. 이동평균에 사용된 평가시간은 풍력단지 출력을 어느 정도 평활화 시킬 것인가에 대한 기준 시간을 결정하는 중요한 요소가 된다. 그림 10에서 처럼 최종적으로 얻어지는 합성출력은 실제 풍력단지 출력이 평가시간  $T_s$ 를 가진 LPF(Low Pass Filter)를 통과한 출력이 된다. 여기서 LPF의 역할은 출력 변동이 심한 출력을 평활화 시키는 필터의 역할과 배터리 충·방전 신호의 기준값을 결정해주는 역할을 한다.

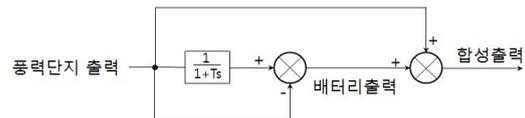


그림 10. 이상적인 합성출력

2절에서 선정된 2009년 12월 15일은 본 논문에서 사용된 유효전력 데이터 가운데 최대 출력 변동폭을 가지는 하루이다. 그림 5에서 12월 15일의 출력변동은 이동평균 시간 20분에서 포화되는 것을 확인할 수 있다. 배터리 용량을 산정하는데 있어 10분 이동평균을 사용하였을 경우에는 20분 이동평균에서 발생한 최대출력 변동폭을 보상에 줄 수 없고 30분 이동평균을 사용하였을 경우에는 이미 20분 이동평균에서 최대출력 변동폭이 포화되었기 때문에 필요이상으로 배터리 용량을 산정하게 된다. 따라서 최대출력 변동폭이 포화되는 20분이 최적의 배터리 용량을 산정하기 위한 이동평균시간이라고 볼 수 있다. 그리고 평활화를 하는데 있어 가장 난처한 상태는, 그림 11에서 나타내듯이 풍력단지 출력이 0인 상태에서 정격 출력으로 스텝 변화할 때라고 생각할 수 있다. 이러한 출력변동에 대해 합성 출력 목표치를 출력변동이 포화되는 시점인 20분을 사용하여 배터리 용량을 산정하였다.

배터리의 SOC가 100% 사용될 수 있고 전력변환기의 효율이 100%라고 가정하였을 때, 식 (2)를 사용하여 결정된 배터리 용량은 1.632[MWh]로 전체 행원 풍력단지출력의 16.6%이다. 결정된 배터리 용량은 3.1절에서 모델링된 리튬이온 배터리를 사용하여 총 9070개의 cell로 직렬 구성하였다.

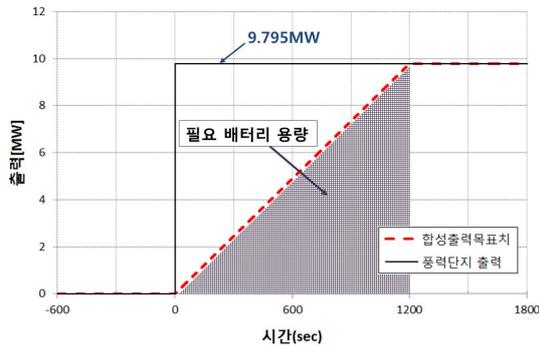


그림 11. 풍력단지 스텝 변동 시 필요 배터리 용량

$$\text{배터리 용량[MWh]} = \frac{\text{단지출력[MW]} \times \text{이동평균[h]}}{2} \quad (2)$$

### 3.3 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 논문에서 결정된 배터리 용량이 최적임을 보이기 위하여 각각의 이동평균시간을 10분, 20분, 30분으로 하여 이에 대한 배터리 용량을 3.2절의 식 (2)를 사용하여 산정하고 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 12는 각각의 이동평균 시간에 따른 배터리 출력 요구치에 대한 빈도 그래프이다.

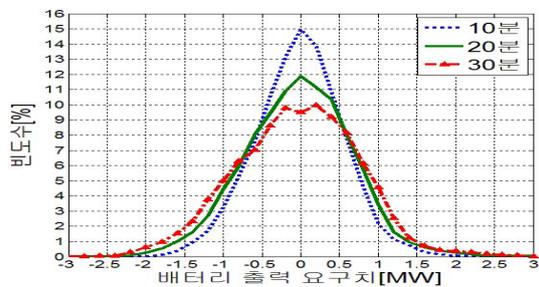


그림 12. 배터리 출력 요구치

그림 12에서 나타내는 배터리의 출력 요구치는 전력변환기의 용량이 된다. 전력변환기의 용량을 산정하는데 있어서 배터리 출력 요구치를 100% 만족시키기 위해서는 빈도수가 적은 용량까지 고려하여야 하므로 전력변환기의 용량이 늘어나게 된다. 따라서 경제적인 측면과 효율성을 고려하여 배터리 출력 요구치 빈도수가 약 96%되는 지점을 전력변환기 용량으로 결정 하였다.

표 2. 시뮬레이션에 사용된 배터리 및 전력변환기 용량

변동률	배터리 용량	전력변환기 용량	빈도수
10분	0.817MWh	1.2MW	96.86%
20분	1.632MWh	1.4MW	96.19%
30분	2.45MWh	1.6MW	96.29%

그림 13은 산정된 배터리 용량이 출력 평활화에 미치는 영향을 분석하기 위해 개발된 PSCAD/EMTDC 소프트웨어 기반의 풍력단지 출력 평활화 시스템이다.

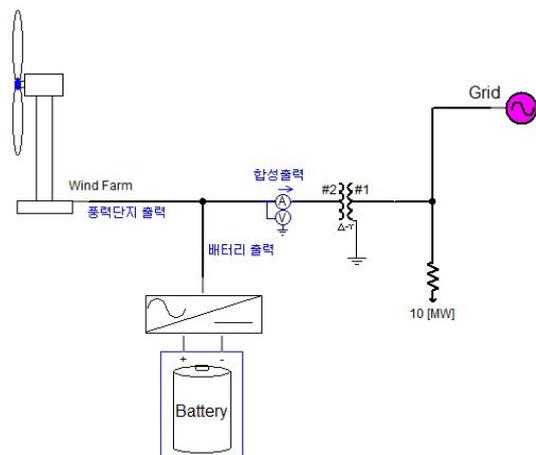


그림 13. PSCAD/EMTDC를 사용한 풍력단지 출력 평활화 시스템

그림 14는 본 논문에 사용된 2009년 12월 15일의 실제 출력변동률이고 약 ±2MW부분에서 출력변동이 포화되는 것을 볼 수 있다.

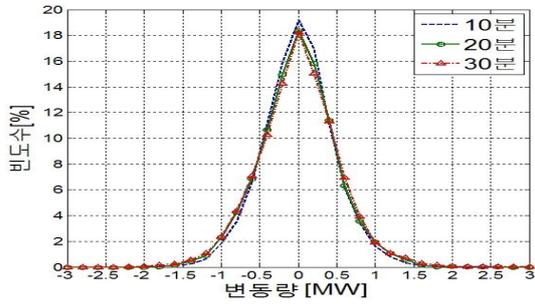


그림 14. 실제 풍력단지 출력 변동 분포

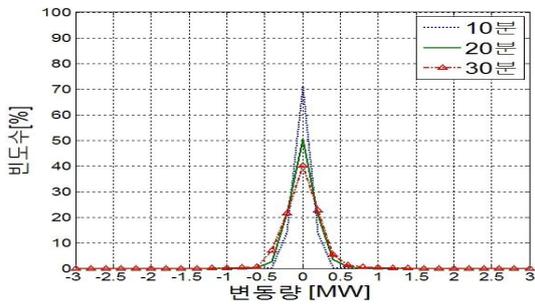


그림 15. 10분 이동평균 용량 적용 시 출력 변동 분포

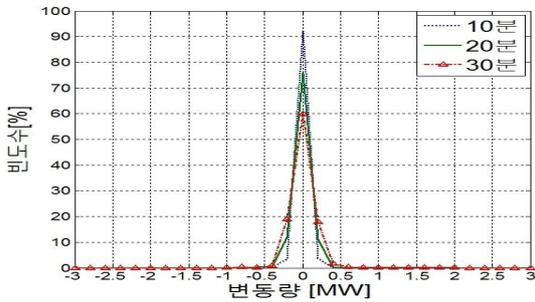


그림 16. 20분 이동평균 용량 적용 시 출력 변동 분포

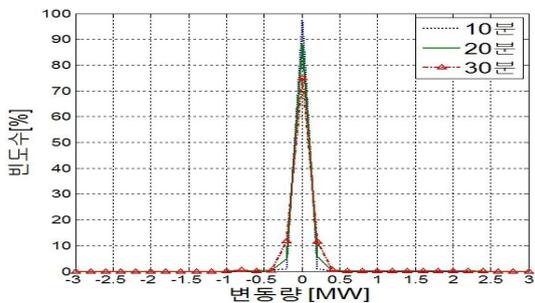


그림 17. 30분 이동평균 용량 적용 시 출력 변동 분포

각각의 배터리용량을 적용하여 시뮬레이션을 실시한 결과 그림 15~17에서처럼 출력변동률이 대부분  $\pm 0.5\text{MW}$ 에서 포화되는 것을 확인할 수 있고 각각의 출력변동 빈도수가 증가하여 출력변동이 개선되었음을 알 수 있다. 그림 15의 10분 이동평균 용량을 적용하여 보상된 출력변동은 그림 14의 실제 출력변동률과 비교하였을 때 크게 개선되었음을 확인할 수 있으나 이는 2절의 그림 5에서 보듯이 최대출력 변동폭이 포함이 되어 있지 않아 배터리의 용량이 부족함을 알 수 있다. 그림 16의 20분 이동평균 용량은 10분 이동평균 용량보다 약  $0.8\text{MW}$  증가하여 10분, 20분, 30분 변동률이 20% 이상 증가하는 것을 확인할 수 있고 2절의 그림 5에서처럼 최대출력 변동폭이 포함되어 출력 평활화에 만족하고 있다. 하지만 30분 이동평균 용량은 20분 이동평균 용량보다 약  $0.8\text{MW}$ 가 증가하였으나 10분, 20분 변동률이 10%미만으로 증가하여 용량 증가 대비 출력변동 개선에 미치는 영향이 적었으며 이미 20분 이동평균에서 최대출력 변동폭이 포함되었기 때문에 필요 이상의 배터리 용량이 산정됨을 알 수 있다. 그림 18은 본 논문에 사용된 2009년 12월 15일 실제 출력 그래프 이고, 그림 19는 본 논문에서 산정된 용량을 가진 ESS에 의해 보상되어진 출력을 나타낸다.

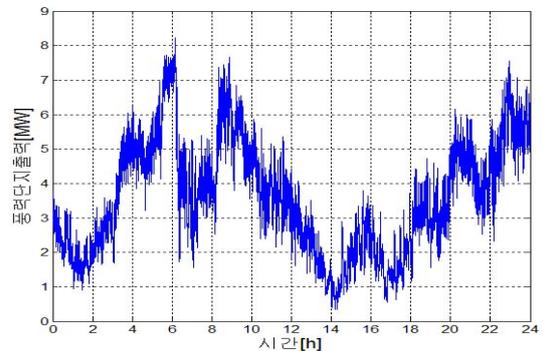


그림 18. 2009년 12월 15일 실제 출력

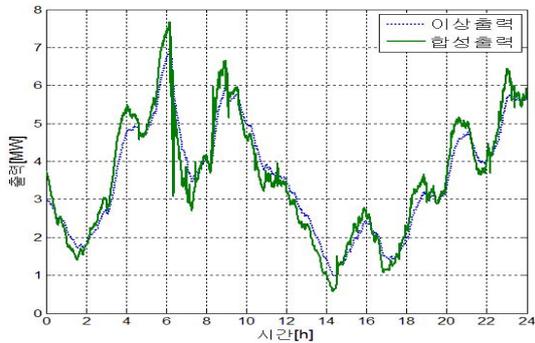


그림 19. 안정화된 합성출력

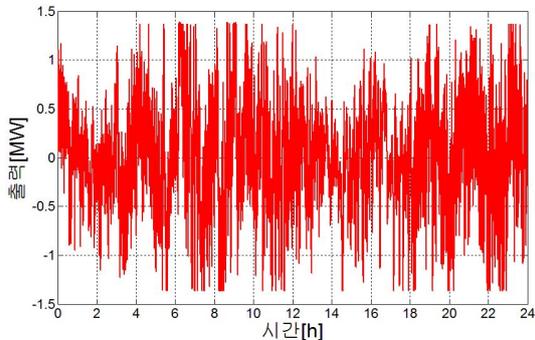


그림 20. 배터리 출력

#### 4. 결 론

본 논문에서는 제주 행원 풍력단지의 출력 특성에 맞는 에너지저장시스템의 최적 용량 산정에 대한 방법을 제안하였다. 1년간의 실제 출력데이터를 바탕으로 제주 행원 풍력단지의 출력특성을 파악하고 이동평균을 사용하여 출력변동이 가장 심한 이동평균 기준시간을 찾아내어 3.2절에서 제시한 용량산정을 통하여 1.63MWh의 용량을 산정하였고, 3.3절을 통하여 1.4MW의 전력변환기 용량을 결정하였다. 이는 풍력단지 출력의 16.6%로 상대적으로 작은 용량이며 시뮬레이션 결과 출력변동률이 눈에 띄게 개선됨을 확인할 수 있었다.

향후 본 논문에서 제시한 에너지저장시스템의 용량산정을 사용하여 현재 운영되고 있

는 풍력단지의 출력특성을 고려하여 풍력단지별 출력특성에 맞는 에너지저장시스템의 용량을 산정하는데 기여하리라 기대한다.

#### 후 기

본 연구는 2011(3차년도)년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20093021020030)

#### 참 고 문 헌

1. 한국풍력산업협회 홈페이지 자료
2. KPX 전력거래소, 제주지역 운영예비력 산정기준 연구(최종보고서), 2011.4.
3. 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 시행령[시행 2010.9.17.][대통령령 제22382호, 2010.9.17., 일부개정]
4. KPX 전력거래소, 제5차 전력수급기본계획
5. 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.
6. 김종율, 박준호, 에너지저장장치 및 STATCOM을 이용한 풍력발전시스템의 출력 제어 기법, 대한전기학회논문집, 제59권 10호, 2010.10, pp.1718-1726
7. Shepherd, C. M. "Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An equation describing battery discharge" Journal of Electrochemical Society, Volume 112, Jul. 1965, pp 657-664.