

직교류 합성 충전 패턴을 이용한 풍력 연계용 ESS의 배터리 충전 효율 향상

이종학¹, 송승호[†]

Improvement of Battery Charging Efficiency of ESS for Wind Power Application Using DC-AC Hybrid Charging Pattern

Jong-Hak Lee¹ and Seung-Ho Song[†]

Abstract

Increased fossil fuel consumption causes global warming, environmental pollution, and abnormal climate change. Wind-generated power installation is proposed to solve this problem. Recently, the wind power plant construction case encourages the installation of the energy storage system (ESS) to improve the intermittency of wind power. The maximized ESS operation profits connected to wind power are not generated in the simplest operation pattern of charging at night and discharging at day. The battery charging efficiency improvement should be considered to get more profits. Thus, there is a possibility of increasing ESS operation profits by analyzing the battery AC and DC charging/discharging efficiency and the yearly average sealed maintenance free (SMP) in hours. In this paper, the battery impedance characteristic, AC and DC charging/discharging efficiency, and the yearly average SMP are analyzed. The operation scenario to improve the ESS battery charging efficiency connected to wind power is proposed and verified via simulation.

Key words: Battery, ESS(Energy Storage System), PCS(Power Conditioning System)

1. 서 론

1960년대 이후 우리나라는 경제개발 정책을 추진하여 고도의 경제 성장을 이루고 그 결과 산업화가 이루어졌다. 하지만 이에 따른 전력소비량도 지속적으로 증가하게 된다. 기존에 가장 효율적인 대체에너지로 평가되고 우리나라에서 대부분 전력 공급을 담당하는 원자력 발전은 안정성의 문제와 부지선정, 폐기물 처리 등의 제약이 심해지고 있어 추가 설비의 도입이 어렵다. 또한, 전 세계적으로 온실가스 감축에 대한 요구로 인해 화력 발전을 추가적으로 도입이 어려운 상황이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 신재생에너지 RPS(Renewable Pportfolio Standard) 제도를 도입하여

발전설비를 보유한 발전사업자는 일정량의 신재생에너지를 공급하도록 의무화하고 있다. 신재생에너지의 의무 할당 비율은 2012년 2%에서 2022년까지 10%로 점진적으로 늘려가는 추세로 신재생에너지의 보급은 필수적이라 할 수 있다. 신재생에너지에서도 바람이 갖고 있는 에너지를 전기에너지로 변환하는 풍력발전은 발전단가가 저렴하고 소요면적이 작아 전 세계적으로 많이 보급되고 있다. 하지만 바람은 풍력터빈이 설치된 위치의 기상상태와 지형에 따라 매 순간 불규칙적으로 변동하여 계통연계 시 계통 전압 및 주파수 변동에 영향을 주고, 전력 Peak시간 때에 전력출력에 대한 기대효과를 보기가 어렵다. 이러한 문제를 해결하는 방안으로 ESS(Energy Storage System)를 풍력발전기와 연계하여 운영하는 방법에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 신재생에너지 연계용 에너지 저장장치는 고 성능, 고 안전성, 친환경, 초경량 등의 필요성이 증대되고 있으며 이를 만족하는 리튬 이온 배터리가 많이 사용하고 있다. 풍력발전 연계 ESS 시스템으로 인해 풍속과 날씨 등 외부환경에 따라 출력이 일정치 않은 전력의 품질향상과 전력저장을 통해 전력운용 효율이 향상될 수 있다.

Paper number: TKPE-2017-22-4-7

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: ssh@kw.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon University

Tel: +82-2-940-5762 Fax: +82-2-940-5141

¹ Control System Research Department, POSCO ICT
Manuscript received Feb. 8, 2017; revised Mar. 16, 2017;
accepted May 25, 2017

TABLE I
THE DOMESTIC SEASONAL MAXIMUM LOAD TIME
NOTICED THE GOVERNMENT

Items	Maximum Load Time	
	Mainland	JeJu
Spring Season	09~12	19~22
Summer Season	13~17	13~15, 19~21
Fall Season	18~21	18~21
Winter Season	09~12	18~21

RPS 제도(신재생에너지 공급의무화 제도)란 일정규모 이상의 발전설비를 보유한 발전사업자에게 총 발전량의 일정비율 이상을 신재생에너지를 이용하고 공급토록 의무화한 제도이다. 각 발전사업자에게 신재생 에너지원으로부터 공급한 전력량만큼의 REC(신재생에너지 발전인증서, Renewable Energy Certificate)를 주어 의무수준 초과분만큼의 REC를 의무수준 달성에 미달한 사업자에게 판매할 수 있도록 하는 신재생에너지 보급제도이다. 국내 풍력발전소는 SMP(계통한계가격, System Marginal Pprice)과 REC로 전력을 판매하고 있으며 ESS 설치 참여를 도모하기 위해 정부는 2015년부터 ESS 설비를 풍력설비와 연계하여 전력 판매 시 REC 가중치를 최대 5.5(15년 : 5.5, 16년 : 5.0, 17년 : 4.5)로 부여하고 있다. ESS 설비의 REC 가중치는 충전된 전기 중 계절별 최대 부하 시간에 방전(ESS => 전력계통)하여 활용하는 전력량에 한하여 적용하며 세부 기준은 표 1과 같다^[1].

현재 우리나라에서는 풍력발전소에 대용량 ESS에 대한 설치가 활발히 진행되고 있지만 ESS 연계 시 배터리 효율 및 SMP를 고려한 충방전 전략에 대한 연구가 부족한 상황이다. 따라서 본 논문에서는 풍력 연계용 ESS의 수익 향상을 위한 효율적인 배터리 충방전 전략에 대해 기술한다.

2. SMP를 고려한 풍력 연계 ESS의 필요성

SMP는 원자력과 화력 외의 일반 발전기 출력 분에 대한 전력거래 시장가격이라 할 수 있으며, 할당된 발전기의 유효발전가격(변동비) 가운데 가장 높은 값으로 결정된다. 즉, 계통한계가격에 따라 발전소의 수익여부가 결정이 될 수 있다.

그림 1은 KEPCO에서 제공한 15년 7월부터 16년 6월까지의 월별 시간대 최고 SMP 대비 평균 SMP 비율을 나타낸 것이다. 시간대별 SMP 비율을 살펴보면 하루 중 2시부터 7시까지는 평균적으로 SMP가 낮으며 평균적으로 10시부터 22시까지의 SMP가 높음을 알 수 있다.

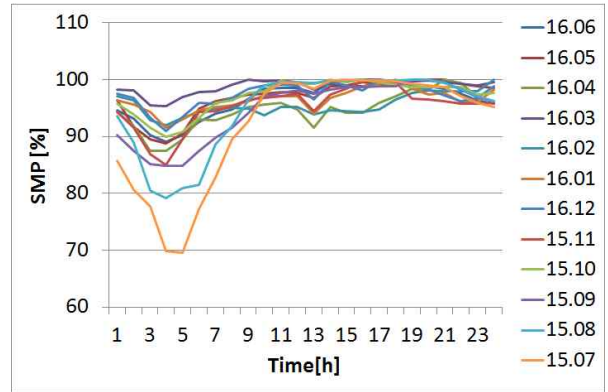


Fig. 2. The monthly average SMP ratio.

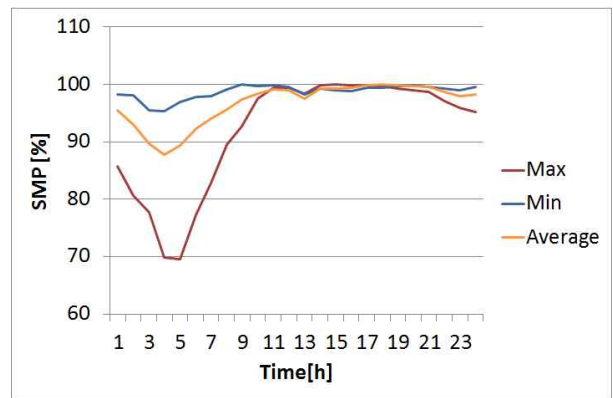


Fig. 3. Max/min/average SMP ratio per year.

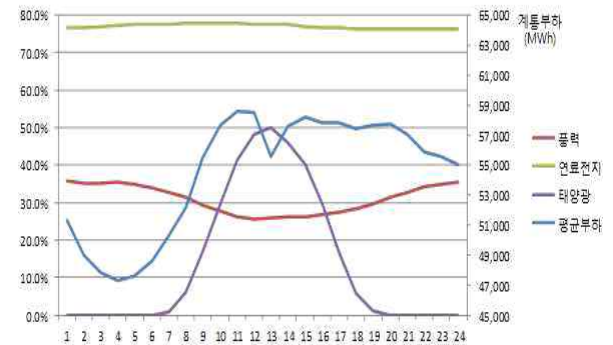


Fig. 4. The development patterns of renewable energy source^[2].

그림 2는 15년 7월부터 16년 6월까지의 1년 중 하루 시간대 편차 최고/최소/평균의 시간대 평균 SMP 비율을 나타낸 것이다. 16년 3월이 4.72% 차이로 1년 중 최소 차이를 나타내고 15년 7월이 30.45%로 최고 차이를 나타내었다. 1년간 평균 SMP 비율은 12.19%의 차이가 난다.

그림 3은 신재생에너지원별 하루 발전 패턴을 나타낸 것이다^[2]. 태양광은 평균부하곡선과 유사한 발전패턴을 보이고 있어 경부하시 배터리에 저장할 전력이 충분하

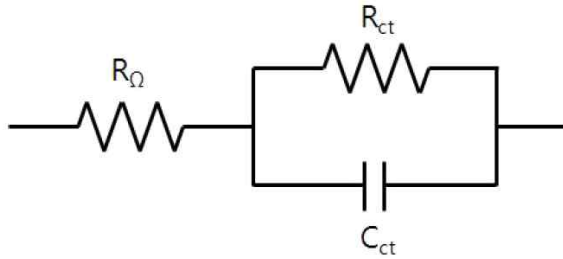


Fig. 5. The impedance equivalent circuit of battery.

지 않으며, 연료전지는 LNG 및 화력발전 기반으로 발전하기 때문에 수요곡선과 무관하게 일정한 발전패턴을 보여 충방전에 불리하다. 풍력 발전은 경부하시 발전량이 많아 전력 저장이 용이하고 방전시 피크저감이 가능하다. 풍력 발전을 효율적으로 이용하기 위해선 ESS가 필수적이며 풍력 연계용 ESS를 운영하기 위한 조건으로 SMP를 고려하여 배터리를 충전하여야 한다. 하루 중 SMP가 가장 낮은 3시부터 7시까지 배터리를 충전하고 REC 가중치를 최대로 올리기 위한 계절별 최대 부하시간에 방전하여 풍력발전의 이익을 최대화할 수 있다. 또한 SMP 최저 요금시간에 배터리의 충전효율을 높여 전기요금 절감을 최대로 할 수 있어야 한다.

3. 배터리 특성

3.1 배터리 임피던스 특성

그림 4는 전형적인 배터리 임피던스 등가회로이며 그림 5는 배터리의 임피던스 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림 5에서 보이는 것과 같이 배터리의 임피던스는 인덕턴스, 전하전송(Charge Transfer)현상, 전기화학적 이중층(Electrochemical Double Layer) 및 물질 이동(Mass Transport)현상 등이 주파수 대역에 따라 각각 나타나게 된다^[3].

3.2 배터리 AC 충전에 따른 효율

그림 6은 리튬 배터리 셀의 SOC(State of Charge)별 배터리 AC 임피던스의 크기를 나타낸 것이다^[4]. 그림 6에서 알 수 있듯이 주파수에 따라 임피던스의 크기는 변화한다. 고주파 영역 1kHz에서 500Hz까지는 크기가 감소하는 추세를 보이며, 500Hz에서 저주파 영역 0.01Hz로 갈수록 임피던스 크기가 점차적으로 증가하는 것을 알 수 있다. SOC의 변화에 따라 임피던스가 동일하지는 않지만 전체적으로 변화되어 가는 경향은 유사하다. 이러한 AC 임피던스는 정도의 차이는 있을 수 있으나 일반적으로 비슷한 추세를 갖는다^[5-6].

표 2는 참고문헌 [7]에서 실험한 AC 충전 전류 리플에 따른 충방전 효율을 나타낸 것이다^[7]. 표의 결과를 살펴보면 임피던스 측정결과 임피던스의 크기가 작았던 약 1kHz 리플 전류로 충전할 경우 가장 높은 충전 효율

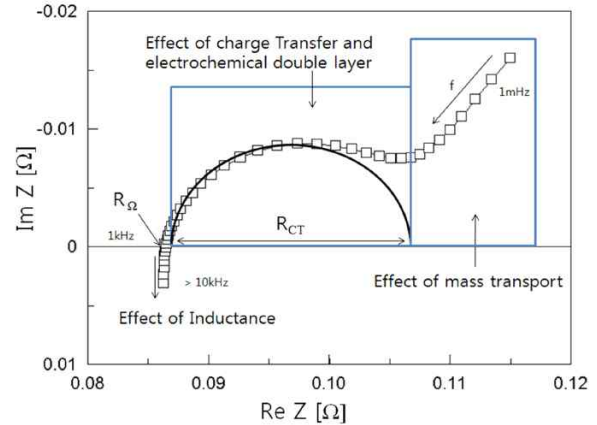


Fig. 6. The impedance spectrum of battery.

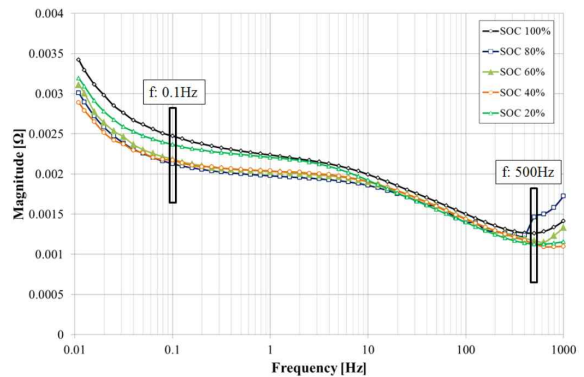


Fig. 7. The impedance magnitude of lithium battery.

TABLE II
THE EFFICIENCY OF BATTERY CHARGED
BY DIFFERENT CHARGING METHODS

Charging Methods	Efficiency
1kHz Ripple	99.0%
100Hz Ripple	98.6%
1Hz Ripple	98.4%
CC-CV	97.0%

을 나타내었다. 효율 결과로는 직류 전류로 충전하는 것이 1kHz로 충전한 경우보다 2% 낮고 1Hz로 충전한 경우보다 1.4% 낮은 것을 확인할 수 있다. 따라서 정전류로 충전하는 CC(Constant Current)-CV(Constant Voltage) 충전법보다는 임피던스가 낮은 영역의 AC 리플 전류로 충전하는 것이 배터리 충전에 효과적이다.

3.3 배터리 DC 충전에 따른 효율

배터리의 에너지 손실은 R_{Ω} (Internal Resistance) 과 R_{CT} (Charge Transfer Resistance)로 다음과 같이 구할 수 있다^[8].

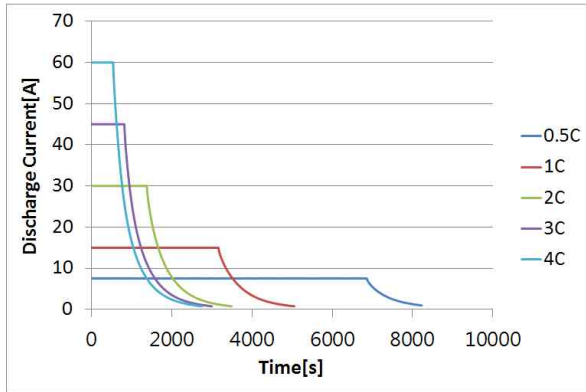


Fig. 8. The current profile of DC charging current.

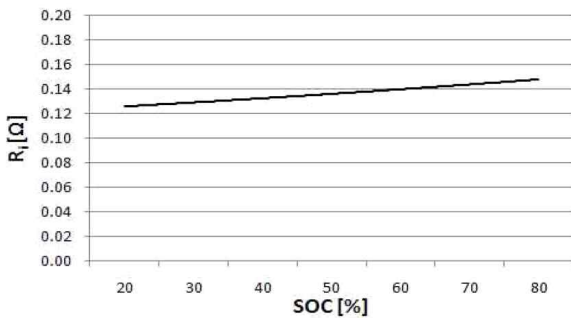


Fig. 9. The battery resistance by charging current(R_b).

$$E_{loss} = I^2 * (R_{\Omega} + R_{CT}) * t \quad [\text{Wh}] \quad (1)$$

그림 7은 배터리의 충전 기법 중 기본인 CC-CV충전 방법을 사용한 충전 전류별 전류 프로파일이다. 여기서 배터리의 용량은 15Ah, 공칭전압은 3.7V이다. 그림 7을 살펴보면 충전 전류가 높을수록 충전 시간은 단축되지만 CV의 시간이 긴 특징이 있다. 배터리 완충전을 목표로 충전할 경우 충전 전류는 15Ah 만큼 동일하게 충전을 하여 그림 7에서 각 충전전류의 면적은 동일하겠지만 충전전류가 높을수록 에너지 손실은 커져 손실이 발생하게 된다.

그림 8과 9는 충전 전류별 배터리 내부 임피던스를 나타낸 것이다⁹⁾. SOC별 임피던스가 다르지만 계산의 편의상 평균값의 임피던스(약 3mΩ)로 계산할 경우 에너지 손실은 표 3과 같다.

배터리의 정격 에너지는 55.5Wh(15Ah * 3.7V)이며, 0.33C로 충전 시 4C로 충전하는 것보다 효율이 3.4% 높음을 알 수 있다. 따라서 풍력 연계용 ESS를 낮은 전류로 충방전하면 효율을 높일 수 있다.

4. 배터리의 효율을 고려한 풍력 연계용 ESS 운영 시나리오 제안

본 장은 배터리의 효율을 고려한 풍력 연계용 ESS

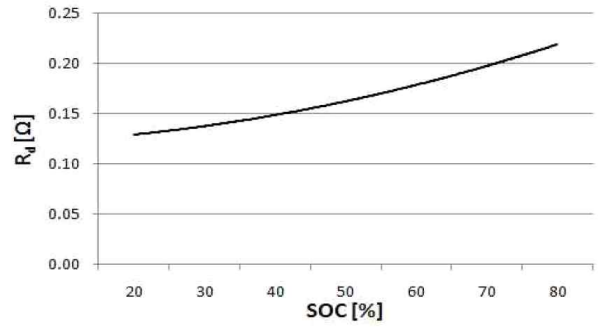


Fig. 10. The battery resistance by charging current(R_b).

TABLE III
THE EFFICIENCY OF BATTERY CHARGED BY DIFFERENT CHARGING CURRENT

Charging Current [C-rate]	Energy Loss[Wh]	Energy Loss[%]	Charging Efficiency[%]
0.33	0.23	0.42	99.58
0.5	0.33	90.60	99.40
1	0.64	1.15	98.85
2	1.19	2.14	97.86
3	1.68	3.03	96.97
4	2.12	3.82	96.18

충방전 시나리오에 대해 기술한다. 앞서 설명한 배터리 효율을 증가시키기 위한 충방전법을 고려한 PCS(Power Conversion System)의 설계의 조건은 다음과 같이 한다.

- 1) 배터리 용량 대비 PCS의 용량은 66%로 설계 (ex- 배터리 3MWh시 PCS 2MW설계)
- 2) 그림 10과 같이 0.33C DC 전류와 1Hz 0.33C AC 전류로 충전

배터리의 효율을 높이기 위한 충방전 시나리오는 다음과 같다. 최대 충전 전류는 AC 전류 0.33C 1Hz, DC 전류 0.33C를 더한 0.66에 해당하는 전류이며 충전 전류는 풍력 출력 전력에 비례하여 충전하고 방전은 풍력 출력 전력과 상관없이 0.33C DC 전류로 하루 중 최대 부하 시간에 맞춰 3시간 동안 방전한다. 풍력 출력 전력이 만족할 경우 하루 평균 최저요금 시간인 2시부터 3시간동안 완충전을 실시한다. 하지만 풍력 출력 전력이 배터리 최대 충전 전류보다 작을 경우 배터리 충전을 시작하여 0.33C로 9시까지 충전한다.

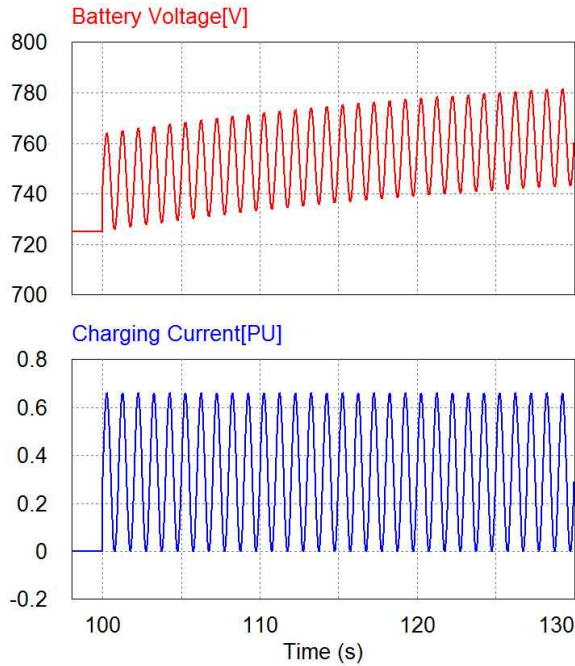


Fig. 11. The sample profile of charging voltage/current.

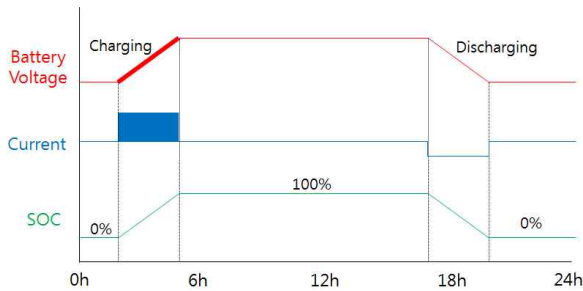


Fig. 12. The sample charging/discharging profile of ESS with wind power considering SMP.

- 1) 2시부터 배터리 충전 시작
- 2) 풍력 출력 전력이 충전전류에 만족하면 기본 3시간동안 1/3C로 완충전
- 3) 풍력 출력 전력이 충전전류보다 미치지 못할 경우 9시까지 완충전
- 4) REC 가중치를 고려한 최대 부하 시간에 0.33C DC 전류로 3시간동안 방전

5. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 배터리 효율 및 SMP를 고려한 풍력 연계용 ESS 시나리오를 검증하기 위해 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션을 위한 기본 사양은 다음과 같으며 제주도에 설치된 3MW급 풍력 출력 데이터를 사용하였다.

그림 12와 13은 14년 3월 30일과 14년 4월 30일의 실

TABLE IV
SPECIFICATIONS OF SIMULATION

Items	Specification
Wind Power	3MW
PCS Power	2MW
Battery Capacity	3MWh
Battery Voltage	610V ~ 820V

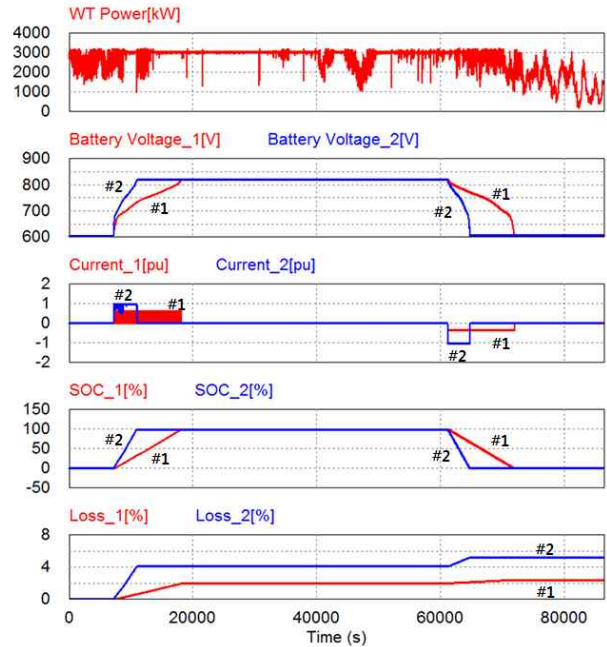


Fig. 13. Simulation waveform of 14-03-30.

(#1 : proposed method, #2 : conventional method)

제 풍력 데이터로 시뮬레이션 한 결과이다. 시뮬레이션 결과에서 #1은 본 논문에서 제안한 방법으로 충방전 한 경우이고 #2는 기존 방법(1C)로 충방전한 결과이다. 본 논문에서 제안한 그림 11의 시나리오대로 ESS 충방전을 시뮬레이션 결과로 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과 #1의 제안한 방법의 하루 에너지 손실은 2.43%이며 #2의 기존 방법의 하루 에너지 손실은 5.27%이다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법의 경우 기존 방법보다 0.33C의 낮은 DC+AC로 충방전 한 경우 하루 2.84%의 효율을 증가시킬 수 있다. 이 하루 평균 효율 이익을 토대로 SMP로만 계산할 경우 1년 평균 SMP 최고 33.29%(7월), 최소 7.56%(3월)로 년 평균 15.03%의 이익을 취할 수 있다.

6. 결론

풍력 연계용 ESS의 이익을 취하기 위해서는 배터리 효율이 높아야 한다. 본 논문에서는 SMP 및 배터리 충

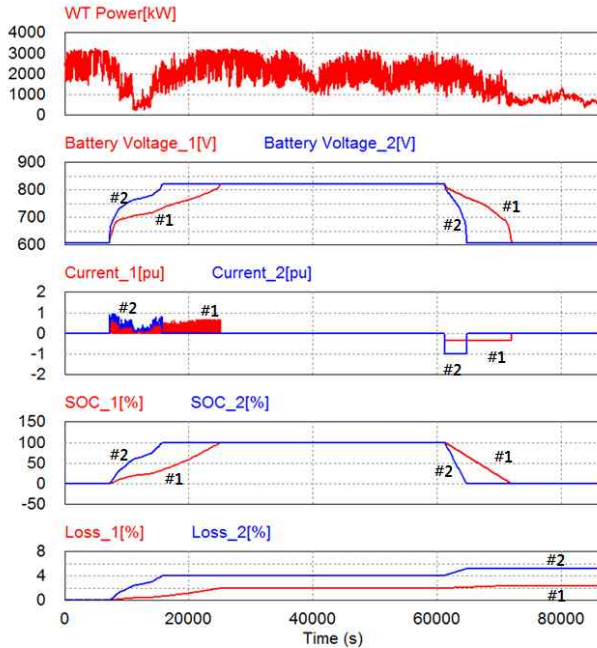


Fig. 14. Simulation waveform of 14-04-30.
 (#1 : proposed method, #2 : conventional method)

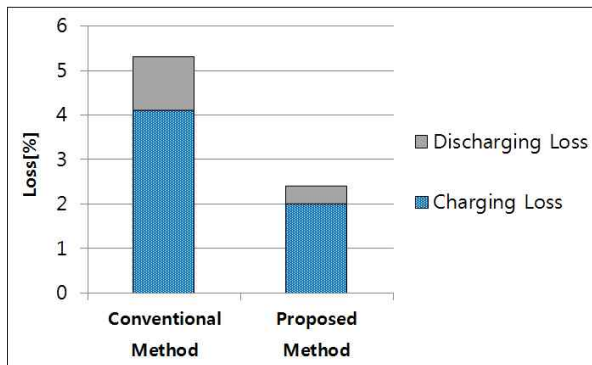


Fig. 15. The charging/discharging loss of conventional method and proposed method.

방전 효율을 고려한 풍력 연계용 ESS의 효율적인 운영에 대해 기술하였으며 시뮬레이션을 통해 제안한 시나리오를 검증하였다. 그 결과 1C로 충전하는 것 보다 2.84%의 효율이 상승함을 알 수 있었다. 이 효율 향상 수치는 모든 배터리에 만족할 수는 없지만 배터리의 특성상 비슷한 추세를 보이며 풍력 연계용 ESS의 이익을 취할 수 있는 것은 분명하다. 본 논문의 배터리 효율 향상 방법을 이용하면 풍력 연계용 ESS의 이익을 창출할 수 있을 것이라 기대된다.

References

[1] Ministry of Trade, Industry and Energy, "The management & operation guidelines for renewable energy portfolio standard," 2015.

- [2] Korea New & Renewable Energy Center, "A study on the calculation of ESS added value RPS weighting factors," 2014.
- [3] J. H. Lee, S. H. Kim, W. Kim, and W. j. Choi, "A research on the estimation method for the SOC of the lithium batteries using AC impedance," *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 14, No. 6, pp. 457-465, Dec. 2009.
- [4] T. H. Kim, J. B. Jeong, H. J. Lee, and B. H. Lee, "A study about charging method for improving battery charging/discharging efficiency", *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 279-280, Apr. 2014.
- [5] T. L. Kulova, V. A. T. skii, and A. M. Skundin, "The impedance of lithium-ion batteries," *Russian Journal of Electrochemistry*, Vol. 45, No. 1, pp. 38-44, Feb. 2008.
- [6] S. Buller, M. Thele, R. W. A. A. De Doncker, and E. Karden, "Impedance-based simulation models of supercapacitors and li-ion batteries for power electronic applications," *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. 41, No. 3, pp. 742-747, Mar. 2005.
- [7] L. R. Chen, S. L. Wu, D. T. Shieh, and T. R. Chen, "Sinusoidal-ripple-current charging strategy and optimal charging frequency study for li-ion batteries," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 1, pp. 88-97, Jan. 2013.
- [8] A. Abdollahi, X. Han, G. V. Avvari, N. Raghunathan, B. Balasingam, K. R. Pattipati, and Y. Bar-Shalom, "Optimal battery charging, Part I: Minimizing time-to-charge, energy loss, and temperature rise for OCV-resistance battery model," *Journal of Power Sources*, Vol. 303, pp. 388-398, Jan. 2016.
- [9] J. H. Lee, S. H. Kim, T. H. Kim, S. H. Kim, and B. K. Kwon, "The impedance modeling of the lithium battery for BESS," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 109-110, 2011.



이종학(李鐘鶴)

1984년 7월 15일생. 2009년 숭실대 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2016년~현재 광운대 전기공학과 박사과정. 2011년~현재 (주)포스코ICT 제어시스템연구그룹 선임연구원.



송승호(宋丞鎬)

1968년 8월 27일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 2000년~2006년 전북대 전자정보공학부 조교수. 2006년~현재 광운대 전기공학과 교수. 당 학회 재무이사.