

## 전기 자동차 계통 연계 시 BESS의 협조제어를 이용한 전력품질 향상 대책 개발

(Development of Countermeasure for Improving the Power Quality using Coordinated Control of BESS on Electric Vehicle connected System)

이순정\* · 김상원 · 김준혁 · 김철환\*\*

(Soon-Jeong Lee · Sang-Won Kim · Jun-Hyeok Kim · Chul-Hwan Kim)

### Abstract

Energy Storage Systems (ESSs) are essential in the future power systems because they can improve power usage efficiency. In this paper, we propose the countermeasure for improving the power quality using coordinated control of BESS(Battery Energy Storage System) on EV connected system. To verify the performance of proposed scheme, we simulate on the actual power system of KEPCO and compare the results of voltage variation, frequency variation, and load factor with those of uncoordinated control. From the simulation results, we confirm that frequency and voltage deviation are significantly reduced with proposed coordinated control of BESS.

Key Words : Battery Energy Storage System(BESS), Coordinated Control, Power Quality, Voltage Control, Frequency Control

### 1. 서 론

환경오염의 심화, 온실 배기가스 규제, 화석연료의 고갈, 유가의 상승 등으로 인하여 전기 자동차의 개발 경쟁이 치열해지고 있다. 특히 화력 발전을 제외하고

는 자동차 산업이 단일 품목으로는 가장 많은 화석 연료를 사용하기 때문에 새로운 자동차의 개발 및 보급이 더욱 절실하다. 이러한 이유로 전기 자동차는 가솔린 자동차의 대안으로 급부상하고 있다. 전기 자동차는 배기가스를 배출하지 않으며, 가솔린 차량에 비해 에너지 소비도 적어 친환경성과 경제성까지 갖추고 있다는 장점이 있다.

하지만 대규모의 전기 자동차가 충전을 위하여 계통에 연계된다면, 전력계통 측면에서는 주파수 및 전압 변동 등의 전력품질 문제가 발생할 수도 있으므로 이에 대한 대책 개발이 반드시 필요하다. 전력계통에서 발생할 수 있는 상기 문제들을 해결하기 위하여, 최근 전력 저장장치(ESS, Energy Storage System)를 이용

\* Main author : Ph. D Course, College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University

\*\* Corresponding author : Professor, College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University

Tel : 031-290-7124, Fax : 031-299-4137

E-mail : chkim@skku.edu

Received : 2015. 3. 4

Accepted : 2015. 4. 9

한 전력품질 개선 대책이 제안되고 있다.

전력 저장장치는 다양한 목적으로 전력계통에 이용될 수 있으며, 그 중에서 전송 효율 및 전력품질을 향상시키는데 가장 큰 목적이 있다. 전송 효율 측면에서는 off-peak 시간 동안 전력을 저장하였다가 peak 시간대에 저장된 전력을 공급하는 부하 평준화(Load Leveling) 기능이 있고[1-2], 전력품질 측면에서는 신재생에너지의 간헐적인 출력 보상 및 계통의 전압과 주파수를 안정하게 유지하는 기능으로 ESS가 이용될 수 있다[3-5]. 따라서 본 논문에서는 전기 자동차 충전 시 발생할 수 있는 전력품질 문제를 개선하기 위하여, 배터리 전력 저장장치(BESS, Battery Energy Storage System)의 새로운 협조제어 기법을 제안하여 그 결과를 분석하였다.

## 2. 구성요소 모델링

### 2.1 모의 계통 및 전기 자동차 모델링

본 논문은 참고문헌 [6]에 제시된 우리나라의 한전 실 배전 계통을 대상으로 수행되었다. 이 계통은 변전소로부터 약 1.5km 길이의 2단 장주 구간으로 구성되고 중성선과 가공지선이 존재한다. 변전소로부터 22.9kV를 공급받아 상단의 13개 부하와 하단의 11개 부하에 전력을 공급하며 총 유효부하는 28.6MW, 무효부하는 13.9MVar이다. 2012년 기준, 해당 계통에는 총 8,961대의 소형 자동차가 존재하므로 2020년까지 전기 자동차를 10%까지 보급하겠다는 정부의 계획에 따라[7] 전기 자동차는 총 896대가 존재한다고 가정하였다. 전기 자동차의 수는 각 부하의 부하량에 비례하여 산정되었으며 전기 자동차용 배터리는 참고문헌 [8]에 제시된 바와 같이 가장 널리 이용되는 Li-ion 배터리를 이용하였다. 다음 그림 1은 모델링한 전기 자동차 충전 인터페이스를 나타낸다[9].

### 2.2 배터리 전력 저장장치 모델링

BESS는 다음 그림 2와 같이 크게 양방향 전력 변환 장치, 고조파 필터, 그리고 배터리 등으로 구성된다.

일반적으로, 3상 AC 계통에서 변압기와 정류기를 거쳐 배터리에 전력을 저장하고, 필요 시 배터리에서 인버터와 변압기를 거쳐 계통으로 전력을 공급하는 구조를 갖고 있다.

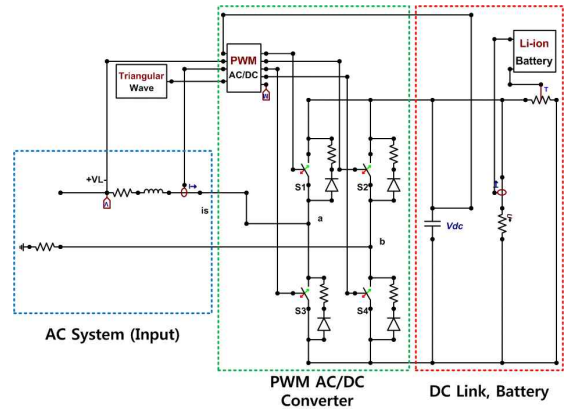


그림 1. 전기 자동차 충전 장치  
Fig. 1. EV charging interface

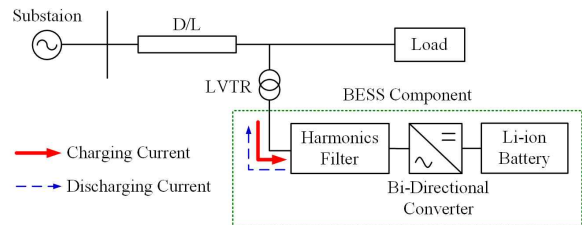


그림 2. BESS의 구성성분  
Fig. 2. Components of BESS

참고문헌 [1]에서는 전력품질 개선 및 계통 신뢰도 향상의 목적으로 BESS를 활용할 경우, 1MW급 이하

표 1. 모델링한 BESS의 파라미터  
Table 1. Parameters of modeled BESS

BESS Energy (kWh)	BESS Power (kW)	입·출력 전압 (V)	입·출력 전류 (A)
100	20	500	40
200	40	500	80
250	50	500	100
500	100	500	200
1,000	200	500	400

의 Li-ion 배터리를 이용하는 것이 적절하다고 언급하였다. 따라서 본 논문에서는 100kWh~1MWh의 Li-ion 배터리를 이용하였으며, 본 논문에 적용한 BESS의 파라미터를 표 1에 나타내었다. 또한, 그림 3과 4는 각각 모델링한 BESS의 입·출력 전류 파형과 배터리 SoC(State of Charge) 곡선이다.

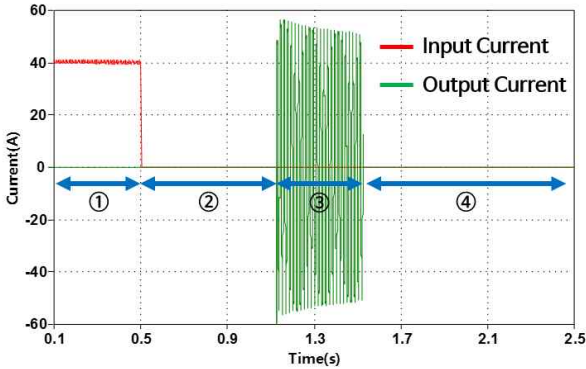


그림 3. BESS의 입·출력 전류  
Fig. 3. Input and output current of BESS

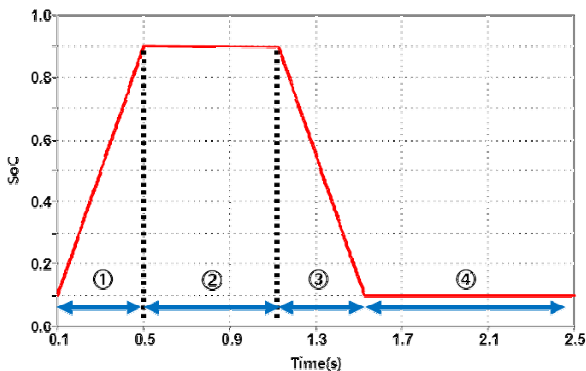


그림 4. BESS의 SoC 곡선  
Fig. 4. SoC curve of BESS

여기서, ①~④는 각각 다음을 의미한다.

- ① 충전 구간
  - 전류 흐름 : 계통 → 배터리
- ② 방전 대기 구간
  - 과충전 보호(SoC : 0.9)
- ③ 방전 구간
  - 전류 흐름 : 배터리 → 계통
- ④ 충전 대기 구간

- 과방전 보호(SoC : 0.1)

본 논문에서는 시뮬레이션 시간을 단축하고자 1시간을 0.1초로 가정하였다. 따라서 그림 3~5의 가로축이 나타내는 시간(0.1초~2.5초)은 하루 동안의 시간 변화(01시~25시)를 의미한다. 또한 배터리의 과충전과 과방전을 방지하고자 SoC의 동작 범위는 0.1에서 0.9로 설정하였다.

### 3. BESS의 자동 충·방전 제어

BESS가 설치되는 가장 큰 목적은 전력품질을 개선하고 전송 효율을 향상시키는 것이다[1-5]. 따라서 본 논문에서는 현재 적용 중인 다양한 전력품질 표준을 기반으로 BESS의 자동 충·방전 제어 기법을 구성하였다. 이는 총 4단계로 구성된다.

- ① 전압, 전류, 주파수 및 SoC 취득
- ② 부하율 제어
- ③ 전압 제어
- ④ 주파수 제어

#### 3.1 BESS를 이용한 자동 부하율 제어

전력 계통에서 부하율은 일정한 기간 동안의 평균 부하량과 같은 기간 동안의 최대 부하량의 비율로 정의되며, 부하 곡선과 다음 식 (1)을 이용하여 계산될 수 있다. 식 (1)에서 알 수 있듯이, 전력계통 측면에서 부하율은 100%인 경우가 이상적인 상태이다. 이는 곧 일일 부하곡선이 완전히 평평하다는 것을 의미하며, 계통 이용 효율이 가장 높다고 할 수 있다.

$$\text{부하율} = \frac{\text{평균 부하량}}{\text{최대 부하량}} \times 100(\%) \quad (1)$$

다음 그림 5는 부하율 제어를 위한 BESS의 충·방전 동작 영역을 나타낸다. 2.2절에 언급한 것과 같이, 배터리는 과충전 및 과방전 보호를 위하여 SoC가 0.1에서 0.9 사이인 경우에서만 동작하도록 설정하였고

이 범위를 벗어나게 되면 BESS는 계통과 분리된다. 또한 over valley filling과 over peak shaving을 방지하기 위하여 부하량의 상한(Upper limit) 또는 하한(Lower limit)을 벗어나게 되면 BESS는 더 이상 충·방전 동작을 수행하지 않는다. 본 논문에서는 다음 식(2)와 같이 부하량의 상한 및 하한을 설정하였다.

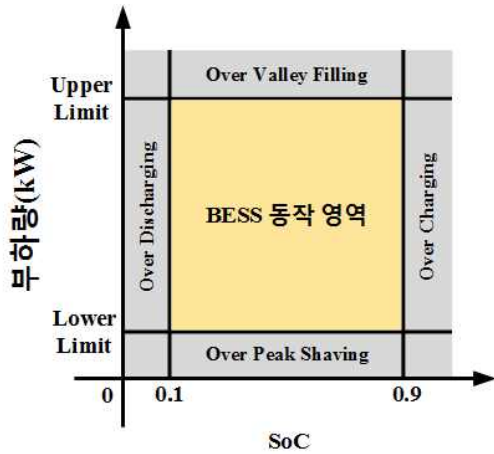


그림 5. 부하율 향상을 위한 BESS 충·방전 동작 영역  
Fig. 5. BESS operation area for improving load factor

$$|P_n - P_a| > P_a \times 0.1 \quad (2)$$

여기서,  
 $P_n$  : n시의 부하량  
 $P_a$  : 평균 부하량  
 n : 1~24(시)

### 3.2 BESS를 이용한 자동 전압 제어

참고문헌 [10]에서는 ESS가 배터리에 저장된 전력을 방전함으로써 전압 강하를 줄일 수 있으며, 충전 동작을 수행함으로써 전압 상승을 감소시킬 수 있다고 언급하고 있다. 따라서 본 논문에서는 그림 6에 나타난 IEEE Std. 1159[11]의 전압강하 및 전압상승 구분 형태에 따라, 순시전압강하(Voltage Sag)가 발생하면 방전 동작을, 순시전압상승(Voltage Swell)이 발생하면 충전 동작을 수행하도록 BESS를 제어하였다.

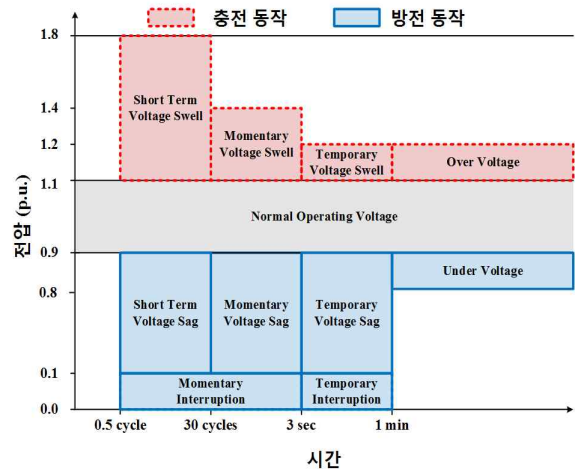


그림 6. 전압강하 및 전압상승의 구분(IEEE Std. 1159)  
Fig. 6. Categories of Voltage Sag and Swell (IEEE Std. 1159)

### 3.3 BESS를 이용한 자동 주파수 제어

일반적으로 전력 계통의 주파수는 발전기의 출력을 조정함으로써 제어될 수 있다. BESS는 이것과 유사한 원리로 주파수를 조정할 수 있다. 즉 그림 7에 나타난 것과 같이 계통의 주파수가 허용 범위보다 클 때에는 충전을 통하여 주파수를 감소시키고 주파수가 허용 범위 이하로 감소하였을 경우에는 방전을 통하여 주파수를 상승시킬 수 있다[6-7].

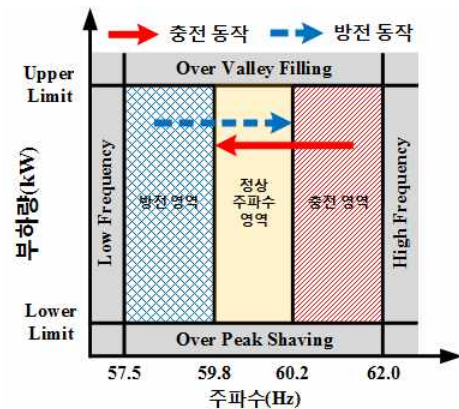


그림 7. 우리나라의 주파수 허용 범위에 따른 BESS 충·방전 동작 영역  
Fig. 7. BESS Operation Area based on Frequency Tolerance Range of Republic of Korean Distribution System

따라서 본 논문에서는 한전의 “송·배전용전기설비 이용규정”에 명시된 배전용 전기설비 성능기준의 주파수 및 유지 범위[12]를 기반으로 BESS의 주파수 제어 범위를 설정하였다.

### 3.4 BESS의 협조제어 기법

본 논문에서 제안한 협조 제어 기법은 다음과 같다. 2.1절에서 설명한 모의 계통에는 총 11개의 부하가 존재하며 이를 4개의 그룹(영역)으로 구분하였다. 각 그룹은 2~3개의 BESS로 구성되며, 가장 큰 용량을 갖는 BESS를 Master로 설정하였다. Slave BESS들은 그 이외의 BESS들을 의미한다. 외란이 발생하여 Master BESS가 더 이상 동작할 수 없을 때(즉 SoC 동작 범위를 벗어난 경우), 각 영역의 Slave들이 이어서 동작하게 된다. BESS 제어 센터는 각 그룹의 Master 및 Slave BESS에게 충전 및 방전 신호를 전송하는 역할을 한다.

## 4. 사례연구 및 결과 분석

본 논문에서 제안한 BESS의 협조제어 기법을 검증하기 위하여 한전 실 배전 계통에 전기 자동차를 연계한 후 전압 및 주파수 편차와 부하율을 분석하였다. 2.1절에 언급한 것과 같이, 계통에 연계되는 전기 자동차는 총 896대이며 전기 자동차의 수는 참고문헌 [13]에서 조사된 실제 주행거리를 고려하여 산정되었다.

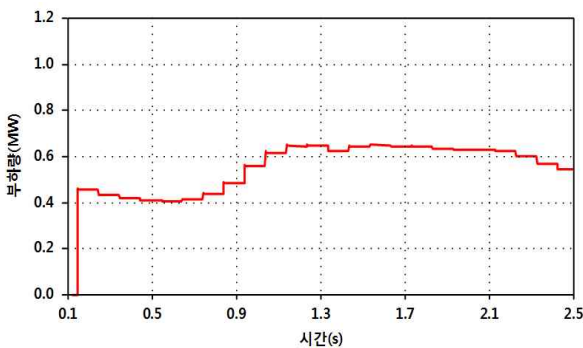


그림 8. 모의 계통의 일일 부하곡선  
Fig. 8. Daily load curve of the simulation system

각 시간에 해당하는 전기 자동차는 EMTP/ATPDraw의 MODELS를 이용하여 계통과 연계하였으며, 다음 그림 8은 모의 계통의 일일 부하곡선을 나타낸다.

### 4.1 모의 결과 : 협조 제어 미-적용

다음 표 2는 BESS의 협조제어를 적용하지 않은 경우의 모의 결과이다.

표 2. 모의 결과 : 협조제어 미-적용  
Table 2. Simulation Result : Uncoordinated Control

BESS 용량 (kWh)	최대 주파수 (Hz)	주파수 편차 (Hz)	최대 전압 (p.u.)	전압 편차 (p.u.)	부하율 (%)
100	61.080	1.080	1.016	0.016	75.782
200	61.126	1.126	1.036	0.036	76.107
250	61.366	1.366	1.041	0.041	76.731
500	61.605	1.605	1.044	0.044	76.876
1,000	62.034	2.034	1.058	0.058	78.752

BESS의 용량이 증가함에 따라 최대 주파수 편차는 2.034Hz, 최대 전압 편차는 0.058p.u.까지 크게 증가하였다. 또한 부하율은 BESS의 용량이 1000kWh 일 때, 78.752%로 나타났다. 이는 BESS 설치 이전에 측정된 부하율인 73.512%에 비하여 약 5.24% 상승한 결과이다.

### 4.2 모의 결과 : 협조제어 적용

표 3은 본 논문에서 제안한 협조제어를 적용한 결과이다. 협조제어를 적용하지 않은 경우와 비교하여 주파수 편차는 약 1.8Hz, 전압 편차는 약 0.04p.u. 감소하여 전력품질 측면에서 크게 개선되었음을 알 수 있다. 부하율은 BESS 설치 이전보다 약 3.11% 증가한 결과를 나타내었다.

상기에 나타낸 모의 결과 중에서, 그림 9~11은 각각 BESS 용량이 1000kWh인 경우에 대한 전압 곡선, 주파수 곡선 및 부하 곡선이며, 그림 12에 그 결과를 나타내었다.



표 3. 모의 결과 : 협조제어 적용

Table 3. Simulation Result : Coordinated Control

BESS 용량 (kWh)	최대 주파수 (Hz)	주파수 편차 (Hz)	최대 전압 (p.u.)	전압 편차 (p.u.)	부하율 (%)
100	60.056	0.056	1.006	0.006	74.698
200	60.146	0.146	1.007	0.007	74.724
250	60.148	0.148	1.008	0.008	75.729
500	60.152	0.152	1.009	0.009	76.110
1,000	60.200	0.200	1.013	0.013	76.621

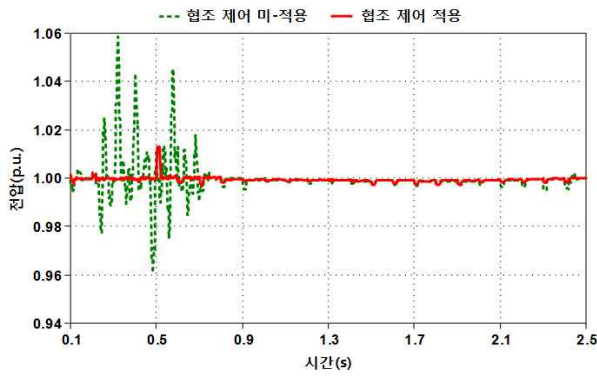


그림 9. 모의 결과 : 전압 곡선  
Fig. 9. Simulation Result : Voltage Curve

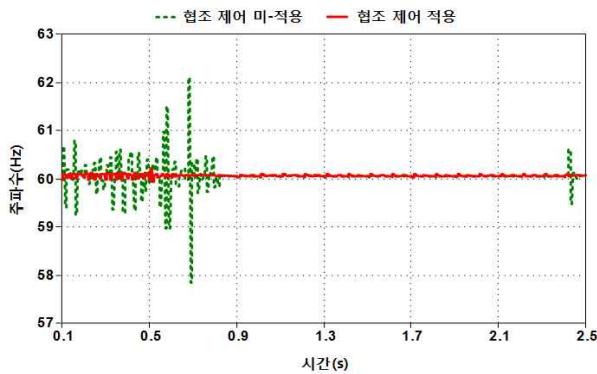


그림 10. 모의 결과 : 주파수 곡선  
Fig. 10. Simulation Result : Frequency Curve

## 5. 결론

일정한 전압 및 주파수를 유지하는 것은 전력공급 측면에서 매우 중요하다. 본 논문에서는 전기 자동차 계통 연계 시 발생할 수 있는 전력품질 저하 문제를 개선하기 위하여 BESS의 협조제어 기법을 제안하였

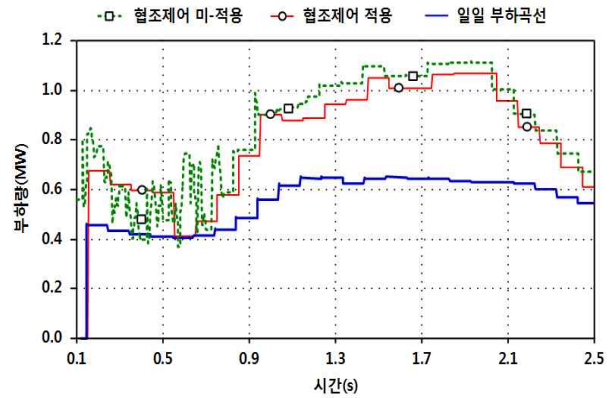


그림 11. 모의 결과 : 부하 곡선  
Fig. 11. Simulation Result : Load Curve

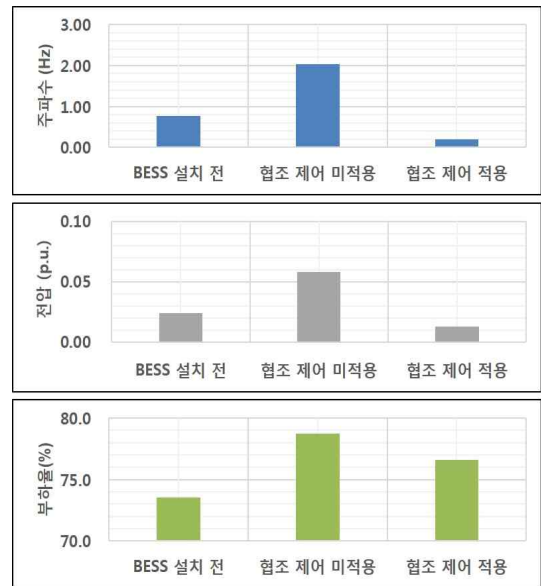


그림 12. 모의 결과 : 1000kWh BESS  
Fig. 12. Simulation Results : 1000kWh BESS

다. 협조제어 기법을 적용하지 않은 경우와 비교한 결과, 제안하는 기법을 적용함으로써 전력품질이 크게 향상됨을 알 수 있었다. 본 논문에서 제안한 협조제어 기법을 통하여 더욱 안정적이고 신뢰할 수 있는 전력계통의 운영이 가능하며 BESS의 보급에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 신재생에너지원의 간헐적인 출력에 대한 개선 대책으로, 본 논문에서 제안한 BESS의 협조제어 기법을 적용하고 그 결과를 분석할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20124010203300)입니다.

References

- [1] EPRI, "Electricity Energy Storage Technology Options", Dec 2010.
- [2] The Electricity Advisory Committee, "Bottling Electricity: Storage as a Strategic Tool for Managing Variability and Capacity Concerns in the Modern Grid", Dec 2008.
- [3] Pascal Mercier, Rachid Cherkaoui, Alexandre Oudalov, "Optimizing a Battery Energy Storage System for Frequency Control Application in an Isolated Power System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 3, Aug 2009.
- [4] Alexandre Oudalov, Daniel Chartouni, Christian Ohler, "Optimizing a Battery Energy Storage System for Primary Frequency Control", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 3, Aug 2007.
- [5] Sandia National Laboratories, "DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NERCA", Jul 2013.
- [6] Keon-Woo Park, Hun-Chul Seo, Chul-Hwan Kim, Chang-soo Jung, Yeon-Pyo Yoo, Yong-Hoon Lim, "Analysis of the Neutral Current for Two-Step-Type Poles in Distribution Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, pp1483~1489, 2009.
- [7] Korea Smart Grid Institute, "A Research of Charging Infrastructure for Electric Vehicle", Ministry of Trade, Industry & Energy, 2010. 09.
- [8] Jun-Hyeok Kim, Soon-Jeong Lee, Eung-Sang Kim, Seul-Ki Kim, Chul-Hwan Kim, László Prikler, "Modeling of Battery for EV using EMT/ATPDraw", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 9, No. 1, Jan 2014.
- [9] Soon-Jeong Lee, Jun-Hyeok Kim, Doo-Ung Kim, Hyo-Sang Go, Chul-Hwan Kim, Eung-Sang Kim, Seul-Ki Kim, "Evaluation of Voltage and Unbalance due to the System Connection of Electric Vehicles on Distribution System", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 9, No. 2, Mar 2014.
- [10] IEC MSB, "Electrical Energy Storage, White Paper", IEC, Dec 2011.
- [11] IEEE Power & Energy Society, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", Jun 2009.
- [12] KEPCO, "Provision of usage for electric equipment on transmission/distribution system", 2014. 08.
- [13] Dong-Soo Kang, Joo-Hee Kim "Research on the actual condition of driving distance in 2008", Korea Transportation Safety Authority.

◆ 저자소개 ◆



**이순정**(李淳正)

1986년 2월 26일생. 2010년 강원대학교 전기전자정보통신공학부 졸업. 2012년 성균관대학교 정보통신대학 졸업(석사). 2012년~현재 동 대학원 정보통신대학 박사과정.



**김상원**(金相源)

1988년 8월 23일생. 2015년 성균관대학교 정보통신대학 졸업. 2015년~현재 동경대학교 공학계 연구과 전기계 공학 석사과정.



**김준혁**(金俊赫)

1985년 5월 17일생. 2012년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2014년 동 대학원 정보통신대학 졸업(석사). 2014년~현재 동 대학원 정보통신대학 박사과정.



**김철환**(金喆煥)

1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 성균관대 정보통신대학 교수. 전력IT인력양성센터 센터장.