

3상/단상 BTB 전압형 컨버터 기반의 전기철도 급전 시스템의 전압제어 향상을 위한 BESS 적용

BESS Application to Voltage Compensation of AC Railway System based on 3 ϕ /1 ϕ BTB Voltage Source Converter

유형준* · 신승권** · 정호성** · 김학만†
(Hyeong-Jun Yoo · Seungkwon Shin · Hosung Jung · Hak-Man Kim)

Abstract - The scott transformer changes three-phase power to two single-phase power. However, this method causes unbalance and fluctuation of voltage by the change of electric railroad. Recently, the AC railway system based on 3 ϕ /1 ϕ back-to-back (BTB) voltage source converter (VSC) has been proposed to solve these problems. Meanwhile, battery energy storage system (BESS) is used to compensate voltage instantaneously in power system. In this paper, BESS application to the AC railway system based on 3 ϕ /1 ϕ BTB VSC is suggested to compensate voltage instantaneously. The application effect is shown through simulation using MATLAB/SIMULINK.

Key Words : 3 ϕ /1 ϕ back to back (BTB) voltage source converter (VSC), Battery energy storage system (BESS), Voltage compensation, AC railway system

1. 서 론

국내의 교류전기철도 급전시스템은 3상 154kV를 수전하여 스코트 변압기를 통하여 2개의 단상 50kV로 변환하고, AT 변압기를 이용하여 25kV를 전기철도에 공급하고 있다[1]. 그러나 스코트 변압기를 통하여 얻은 2개의 단상 부하는 항상 동일하게 운전할 수 없기 때문에 3상 전력계통에 전압 불평형이 발생하게 되며, 전기철도의 운행에 따른 부하 변동으로 전압변동이 발생한다[1].

최근, 이러한 문제를 해결하기 위하여 3상/단상 BTB 전압형 컨버터를 이용한 전기철도 급전시스템에 대한 연구가 진행되고 있다[2]. 전압형 컨버터는 신속하고 독립적으로 유/무효 전력제어가 가능하여 철도급전계통 내에 발생하는 부하변동에 탄력적인 운전이 가능한 장점을 가지고 있다[5]. 특히, 철도 부하는 대용량 부하로써, 순간적으로 변동하는 부하량에 따라 DC 링크 전압 및 철도급전계통 내에 전압 변동이 발생하게 된다. 전압형 컨버터 기반의 급전시스템을 적용할 경우 순간적인 전압변동에 대한 순시 전압보상이 가능하지만, 좀 더 정밀한 순시 전압보상에 대해서는 추가적인 기술 검토의 필요성이 있다.

한편, 세계적으로 다양한 분야에 배터리 에너지 저장장치

시스템 (BESS, battery energy storage system)을 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다[3,4]. 특히, BESS는 순간적으로 전력의 충/방전이 가능하기 때문에 과도현상 완화 및 전력품질 향상을 향상하고자 하는 분야에 많이 이용되고 있으며, 기술발전과 시장 확대에 리튬이온 BESS의 가격이 점차 낮아질 것이 예상된다[5].

본 논문에서는 3상/단상 BTB 전압형 컨버터 DC 링크단에 BESS를 적용하여 DC 링크 전압 및 철도 급전 계통측의 전력품질을 향상시키는 방법을 제안하고자 한다. BESS 적용 효과를 검토하기 위하여 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 3상/단상 BTB 전압형 컨버터 기반의 철도급전시스템과 BESS를 모델링하고 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 3상/단상 BTB 전압형 컨버터 기반의 전기철도 급전 시스템

본 논문에서는 3상/단상 BTB 전압형 컨버터 기반의 전기철도 급전시스템을 모델링하였다. 이는 3상 154 kV를 수전하여 변압기를 이용하여 22.9 kV로 강압하고, 이는 3상 전압형 컨버터를 통하여 DC 100 kV로 정류되며, 정류된 DC 100 kV는 단상 전압형 컨버터를 통하여 단상 55kV로 출력된다. 세부적인 모델링은 다음과 같다.

2.1 3상 전압형 컨버터

그림 1은 3상의 교류 전압을 DC로 변환하는 IGBT 기반의 전압형 컨버터를 나타내고 있다.

AC 계통을 포함한 3상 전압형 컨버터의 전압방정식은 식 (1)과 같이 간략화하여 나타낼 수 있으며, 식 (1)에 d-q변환

* Dept. of Electrical Engineering, Incheon National Univ., Korea

** Korea Railroad Research Institute, Korea.

† Corresponding Author : Research Institute for Northeast Asian Super Grid, Incheon National Univ., Korea

E-mail : hmkim@incheon.ac.kr

Received : August 18, 2014; Accepted : October 14, 2014

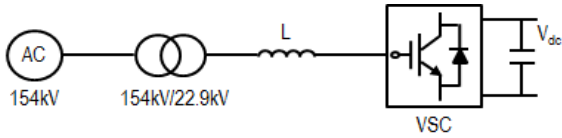


그림 1 3상 전압형 컨버터
Fig. 1 3-phase voltage source converter

을 적용하면 식 (2)와 같이 변환할 수 있다.

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + V \quad (1)$$

여기서, U : Grid voltage
 R : Resistance
 L : Inductance
 V : VSC terminal voltage

$$u_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega Li_q + v_d \quad (2)$$

$$u_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega Li_d + v_q$$

전압형 컨버터의 수리 모델인 식 (2)를 이용하여 전압형 컨버터의 decoupling이 적용된 전류제어기 설계가 가능하다. 이러한 전류제어기와 전압형 컨버터의 DC 링크 전압제어기는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다[6,7].

$$V_{dref} = (K_{p1} + \frac{K_{i1}}{s}) \left\{ (K_{p2} + \frac{K_{i2}}{s})(V_{dc}^* - V_{dc}) - I_d \right\} - \omega Li_q \quad (3)$$

$$V_{qref} = (K_{p3} + \frac{K_{i3}}{s})(0 - I_q) + \omega Li_d$$

2.2 단상 전압형 컨버터

단상 컨버터는 3상 컨버터와 달리 하나의 상만 존재하므로 일반적인 d-q 변환을 이용한 전류제어가 불가능하다. 따라서 그림 2와 같이 가상의 직교회로를 만들어 가상의 직교

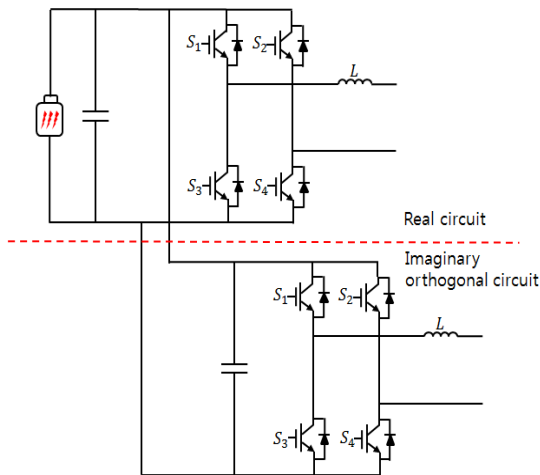


그림 2 실제 회로와 직교의 가상회로
Fig. 2 Real circuit and Imaginary orthogonal circuit

전류를 만들면 d-q 변환이 가능하고, d-q 변환을 통하여 얻은 식을 이용하면 식 (4)와 같이 단상 전압형 컨버터의 전압제어기를 설계할 수 있다.

$$V_{ref} = [(I_d^* - I_d)(K_{p4} + \frac{K_{i4}}{s}) + V_d - \omega Li_d \cdot \cos \omega t] \quad (4)$$

$$+ [(I_q^* - I_q)(K_{p5} + \frac{K_{i5}}{s}) - \omega Li_q \cdot \sin \omega t]$$

이를 철도 급전계통에 전압 변동 발생 시 전압제어를 수행하도록 하기 위하여 그림 3과 같이 전압제어기를 설계할 수 있다[8,9].

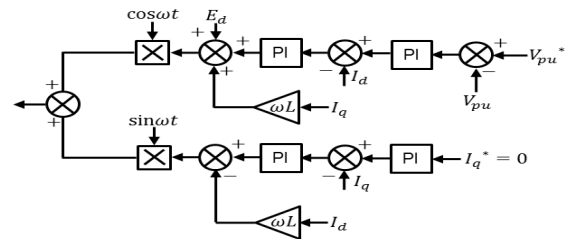


그림 3 단상 전압형 컨버터 제어 블록도
Fig. 3 Control block diagram of single-phase VSC

2.3 3상/단상 BTB 전압형 컨버터 기반의 전기철도 급전 시스템

이와 같이 3상 전압형 컨버터와 단상 전압형 컨버터를 이용한 전기철도 급전 시스템은 그림 4와 같다.

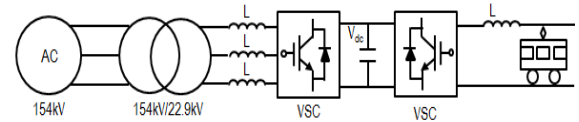


그림 4 3상/단상 BTB 컨버터 기반의 전기철도 급전 시스템
Fig. 4 Structure of AC railway based on 3φ/1φ BTB VSC

3. BESS를 포함한 3상/단상 BTB 전압형 컨버터 기반의 전기철도 급전 시스템

3.1 단상 전압형 컨버터

본 논문에서는 그림 5와 같이 가변전원과 고정 저항을 이용한 비선형 배터리 모델을 이용하였다[10].

이러한 BESS는 DC 링크단에 적용하여 충/방전하기 때문에 그림 6과 같이 양방향 DC/DC 컨버터를 이용한 BESS를 모델링하였다. 이때, 양방향 DC-DC 컨버터는 DC 링크의 전압에 따라 buck/boost 동작을 하여 충/방전하도록 모델링하였다.

양방향 DC-DC 컨버터를 설계할 때, 전류는 항상 연속모드로 동작하도록 L값을 산정해야 한다. 이와 같은 L값을 결정하기 위하여 buck 모드일 경우에 식 (5), boost 모드일 경우에는 식 (6)을 만족해야 한다.

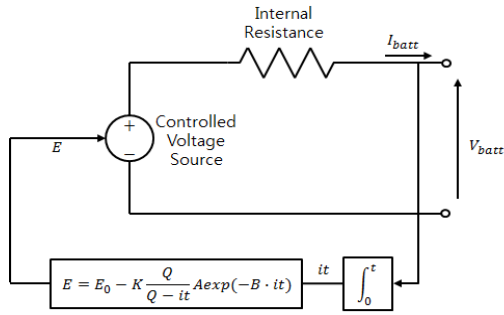


그림 5 Battery 모델

Fig. 5 Battery model

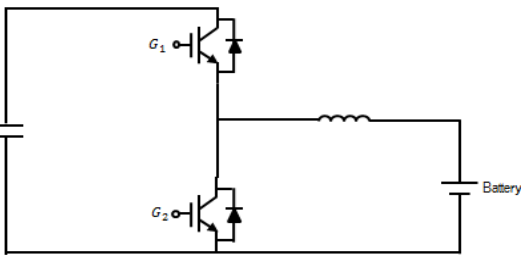


그림 6 BESS 구성도

Fig. 6 Structure of BESS

$$L \geq \frac{D}{2fI_{buck}} (V_{dc.link} - V_{BESS}) \quad (5)$$

$$L \geq \frac{D(1-D)}{2I_{boost}} V_{dc.link} \quad (6)$$

여기서, L : Inductance

$V_{dc.link}$: DC-link voltage

I_{buck} : Charge current

I_{boost} : Discharge current

f : Switching frequency

D : Duty ratio

또한, 양방향 DC/DC 컨버터는 충전모드에서 방전모드로, 방전모드에서 충전모드로 전환하는 과정에서 식 (7), (8)과 같이 과도 시간이 발생한다[11,12].

$$\Delta t = \frac{L}{V_{BESS}} (I_{buck} + I_{boost}) \quad (7)$$

$$\Delta t = \frac{L}{V_{dc.link} - V_{BESS}} (I_{buck} + I_{boost}) \quad (8)$$

3.2 BESS를 포함한 3상/ 단상 BTB 전압형 컨버터 기반의 전기철도 급전 시스템

이와 같이 3상 전압형 컨버터, 단상 전압형 컨버터, BESS를 포함한 3상/단상 BTB 전압형 컨버터 기반의 철도 급전 시스템은 그림 7과 같이 모델링할 수 있다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서 모델링한 3상/단상 BTB 전압형 컨버터는 50MW급으로 3상 154kV를 수신받아 변압기를 통하여

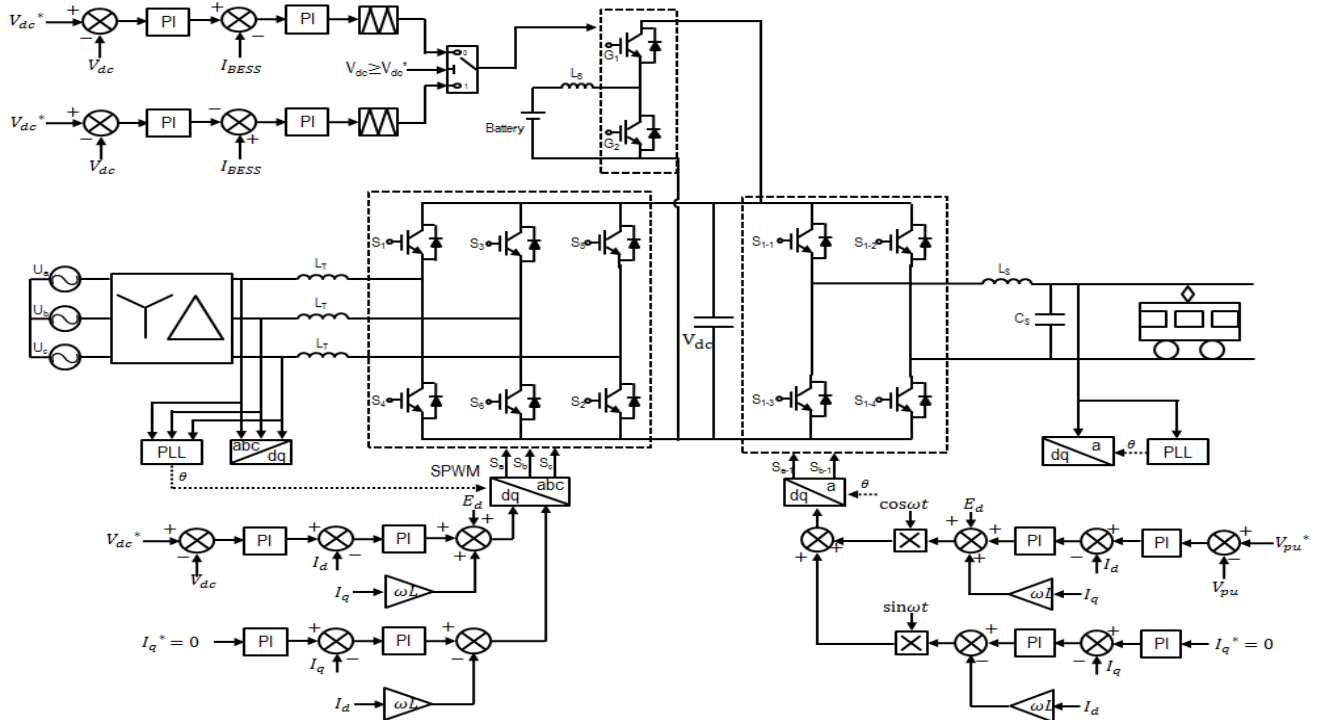


그림 7 BESS를 포함한 3상/단상 BTB 전압형 컨버터 기반의 전기철도 시스템

Fig. 7 AC Railway System base on 3φ/1φ BTB VSC including BESS

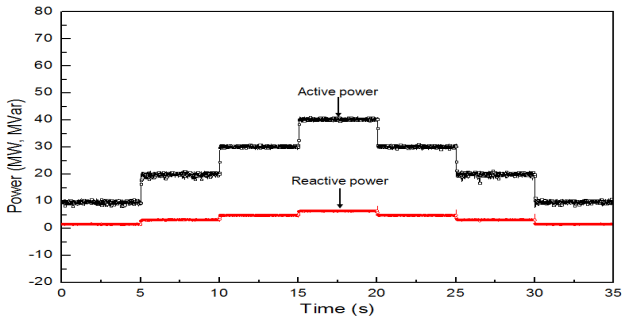


그림 8 부하량
Fig. 8 Load

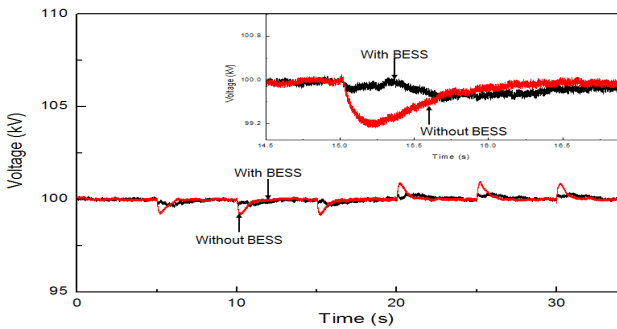


그림 9 DC 링크 전압
Fig. 9 DC link voltage

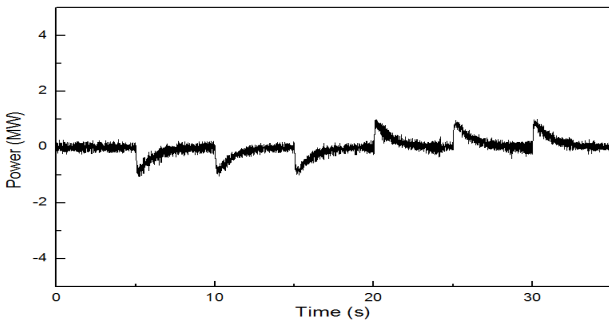


그림 10 BESS 출력
Fig. 10 Power output of BESS

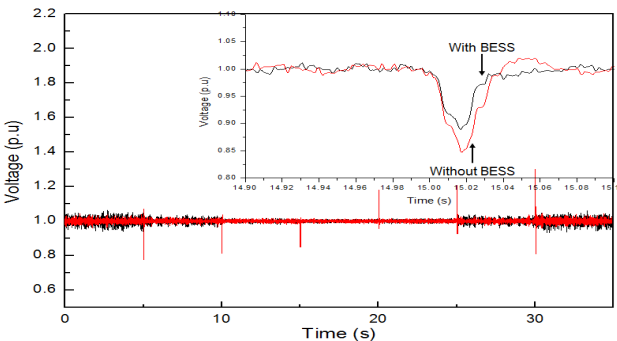


그림 11 부하 변동에 따른 출력 전압
Fig. 11 Voltage according to load change

22.9kV로 강압되고, 이는 3상 전압형 컨버터를 통하여 DC

100kV로 정류되며, 최종적으로 단상 전압형 컨버터를 통하여 단상 55kV로 출력된다. 또한, BESS 적용 효과를 검토하기 위하여 DC 링크단에 3상/단상 BTB 전압형 컨버터 용량의 약 2%급에 해당되는 1MW급 BESS를 적용하였다.

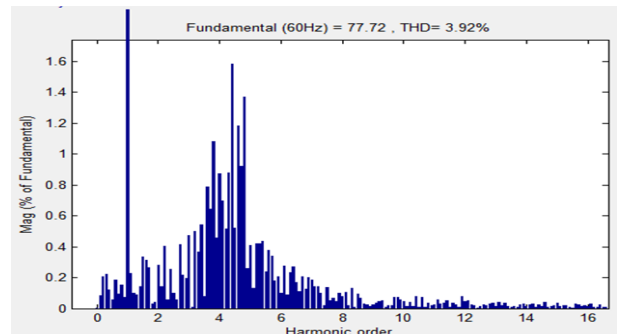
그림 8은 시간에 따라 가변부하의 증/감에 따른 출력 전력을 나타낸 그래프이다. 가변부하는 그림 8과 같이 5초 간격으로 10 MW, 15 MVar가 변화되도록 설정하였다.

그림 9는 3상 전압형 컨버터를 통하여 정류된 DC 링크단의 전압을 나타낸 것이다. 그림 9에서 확인할 수 있듯이 BESS를 포함한 3상/단상 BTB 전압형 컨버터 기반의 철도 급전시스템의 DC 링크 전압이 BESS를 포함하지 않는 DC 링크 전압보다 순간 강압전압이 적고, 보다 신속하게 회복되는 것을 확인할 수 있다.

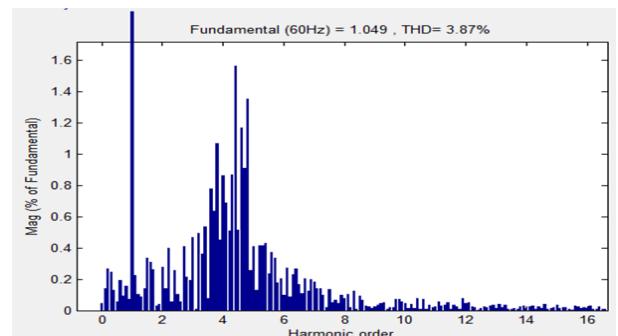
그림 10은 BESS의 출력량을 나타낸 것으로 부하변동으로 인하여 DC 링크전압에 변동이 발생할 경우, 짧은 시간에 전력을 충/방전함으로써 그림 9와 같이 DC 링크 전압의 순간강압강하가 줄어들고 보다 신속하게 제어되는 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 부하 변동에 따른 3상/단상 BTB 전압형 컨버터 기반의 철도 급전시스템의 전압을 나타낸 것이다. 그림 11에서 확인할 수 있듯이 BESS를 포함한 3상/단상 BTB 전압형 컨버터 기반의 철도 급전시스템의 출력전압 변동이 BESS를 포함하지 않는 3상/단상 BTB 전압형 컨버터 기반의 철도 급전시스템의 출력전압 변동보다 폭이 적음을 확인할 수 있다.

그림 12는 BESS를 적용하지 않을 경우에 전압과 전류의



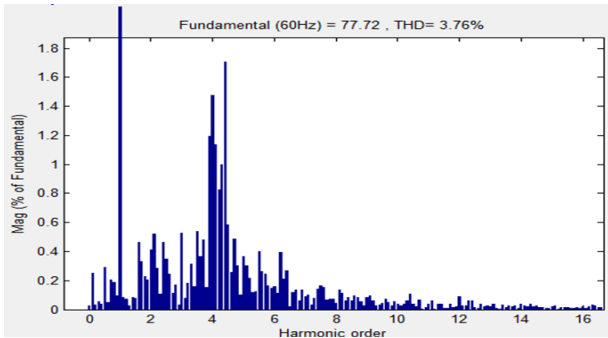
(a) 전압



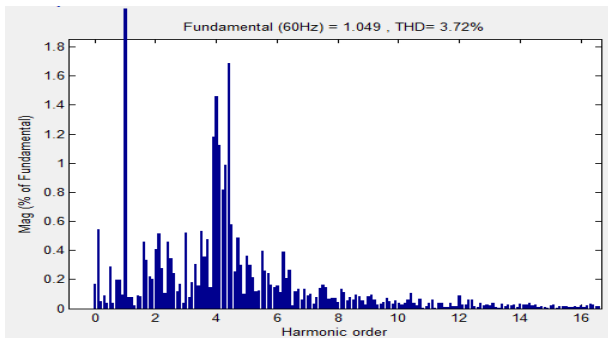
(b) 전류

그림 12 단상 전압 및 전류 FFT 해석 (without BESS)

Fig. 12 FFT analysis of single-phase voltage and current (without BESS)



(a) 전압



(b) 전류

그림 13 단상 전압 및 전류 FFT 해석 (with BESS)

Fig. 13 FFT analysis of single-phase voltage and current (with BESS)

FFT 해석 결과를 나타낸 것이고, 그림 13은 BESS를 적용했을 경우 전압과 전류의 FFT 해석 결과를 나타낸 것이다. 그림 12, 13으로부터 BESS 적용 후의 전압과 전류의 FFT가 근소하게 향상됨을 확인할 수 있다.

시뮬레이션을 통하여 3상/단상 BTB 전압형 컨버터 기반 철도 급전시스템의 DC 링크단에 3상/단상 BTB 전압형 컨버터의 약 2% 용량에 해당하는 1MW급 BESS를 적용함으로써 부하변동에 따른 DC 링크 전압과 단상 출력 전압의 제어가 향상되는 것을 확인할 수 있었고 출력 전압 및 전류의 FFT 해석 결과도 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 3상/단상 BTB 전압형 컨버터 기반의 전기 철도 급전시스템의 전압제어 효과를 향상시키기 위하여 DC 링크단에 BESS를 적용하는 방법을 제안하였다. 시뮬레이션을 통하여 BTB 컨버터 용량의 2% 정도의 비교적 소용량 BESS의 적용으로도 과도상태의 전압품질이 많이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 주요사업인 “철도 그린인프라 구축을 위한 Smart 철도 시스템 통합플랫폼 개발”과제에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- [1] Korea Railroad Research Institute, Technical Development for Improvement of Electrical Railway System, 2008.
- [2] H. J. Yoo, H. M. Kim, and H. S. Jung, “Basic Modeling and Analysis for AC Railway System based on BTB Voltage Source Converter,” *Trans. KIEE*, Vol. 61, No. 11, pp. 1737-1742, 2012.
- [3] S. T. Cha, H. Zhao, Q. Wu, A. Saleem, and J. Qstergaard, “Coordinated Control Scheme of Battery Energy Storage System (BESS) and Distributed Generations (DGs) for Electric Distribution Grid Operation,” *Proc. of 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 4758-4764, 2012.
- [4] H. Zhou, T. Bhattacharya, D. Tran, T. S. T. Siew, and A. M. Khambadkone, “Composite Energy Storage System Involving Battery and Ultra-capacitor with Dynamic Energy Management in Microgrid Application,” *Trans. on IEEE Power Electronics*, Vol. 26, No. 3, pp. 923-930, 2011.
- [5] A. Qudalov, M. Koller, 1MW BESS in the Swiss Distribution Grid Experience and Visions, 2014.
- [6] A. Yazdani, and R. Iravani, *VOLTAGE-SOURCED CONVERTERS IN POWER SYSTEM*, A John Wiley and Sons, 2010.
- [7] S. L. Sanjuan, Voltage Oriented Control of Three-Phase Boost PWM Converter, Thesis of M.S., Chalmers University of Technology, 2010.
- [8] R. Zhang, M. Cardinal, P. Szczesny, and M. Dame, “A Grid Simulator with Control of Single-Phase Power Converters in D-Q Rotating Frame,” *Proc. of Power Electronics Specialists Conference*, Vol. 3, pp. 1431-1436, 2002.
- [9] U. A. Miranda, M. Aredes and L.G.B. Rolim, “A DQ Synchronous Reference Frame Control for Single-Phase Converters” *Proc. of Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1377-1481, 2005.
- [10] O. Ttrmblay, L. A. Dessaint, and A. I. Dekkiche, “A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles,” *Proc. of IEEE VPPC*, pp. 284-289, 2007.
- [11] L. Jan, B. Pavol, B. Petr, and R. Vladimír, “Bi-directional DC-DC Converters for Super-capacitor based Energy Buffer for Electrical Gene-Sets,” *Proc. of Power Electronics and Applications*, pp.1-10, 2007.
- [12] Y. Du, X. Zhou, S. Bai, S. Lukic, and Huang, “A Review of Non-isolated Bi-directional DC-DC Converters for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charge Station Application at Municipal Parking Decks,” *Proc. of Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 1145-1151, 2010.

저 자 소 개



유 형 준(Hyeong-Jun Yoo)

1987년 10월생. 2012년 인천대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2014년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 032-835-4206

E-mail : hjyoo@incheon.ac.kr



신 승 권(Seungkwon Shin)

1972년 6월생, 1998년 성균관대학교 전기공학과 졸업(공학석사). 2001년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 2003년~현재 한국철도기술연구원 스마트역사연구팀 선임연구원.

Tel : 031-460-5685

Fax : 031-460-5749

E-mail : skshin@krri.re.kr



정 호 성(Hosung Jung)

1971년 10월생, 2002년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 2002년~현재 한국철도기술연구원 기술전략실 책임연구원.

Tel : 031-460-5116

Fax : 031-460-5749

E-mail : hsjung@krri.re.kr



김 학 만(Hak-Man Kim)

1998년 성균관대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학박사), 2011년 일본 Tohoku (東北)대학교 정보과학연구과 졸업(공학박사), 1996년 10월~2008년 2월 한국전기연구원 전력연구단 선임연구원. 현재 인천대학교 공과대학 전기공학과 교수. 동북아 수퍼그리드 연구센터장

Tel : 032-835-8769

E-mail : hmkim@incheon.ac.kr