

# A Study on DC-DC Converter Development for LRT Wireless Power Supply

Young-Jae Han\*, Su-Gil Lee\*\*, Young-Ho Lee\*\*\*

## Abstract

In this paper, we have proposed the development of DC-DC converter for LRT power supply. First of all, we have studied converter technology, main functions and characteristics were determined. In also, the converter design was carried out to meet the system design conditions. Based on this design, converter simulation is performed to enable stable charging and discharging of the vehicle system. We have performed the Light-load test according to charge mode, discharge mode. As a result, the manufactured converter performance was verified through the load test, and it's stability was confirmed.

▶ Keyword: DC-DC Converter, Wireless Power Transfer, Light Rail Transit, Patent Analysis, Propulsion System

## I. Introduction

현재 국내외 업체 및 연구기관에서 무선급전을 교통시스템에 적용하기 위한 연구가 활발히 추진되고 있다.[1-3] 기존 접촉식 전력공급시스템은 무선급전시스템과 비교하여 건설비와 유지보수 비용이 높고 환경친화성이 낮다. 무선급전 기술의 장점에 대해 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.[4-5]

첫째, 전차선 설비가 없기 때문에 건설비와 터널 공사비의 저감이 가능하고, 가선 접촉에 의한 마모가 없어 유지보수 비용을 줄일 수 있다. 더 나아가 오염물질 배출이 줄어들면서 대기 오염을 줄이고, 에너지 효율성 향상을 통해 환경성과 경제성을 동시에 만족시킬 수 있다.

둘째, 시스템 규모가 작은 중소도시부터 대도시 지선교통까지 운영처의 수요에 맞게 대응이 가능하다. 특히, 가선이 필요 없어 지리적, 공간적 상황에 따라 제공하기 어려웠던 지역에 철도서비스를 추가로 제공할 수 있고, 도시 경관과 조화로운 교통시스템을 공급할 수 있다.

본 연구에서는 경량전철 무선급전용 DC-DC 컨버터 개발에 대하여 수행하였다. 컨버터 기술개발을 위해 국내외 연구동향을 살펴본 후, 주요기능과 특징을 결정하였다. 또한, 시스템 설계 조건에 맞도록 컨버터 설계를 진행하였다. 이러한 설계를 바

탕으로 컨버터 시뮬레이션을 수행하여 차량 시스템의 충전과 방전이 안정적으로 이루어질 수 있게 하였다. 그리고, 제작된 컨버터에 대한 부하시험을 통해 제어의 추종성을 검증하고, 안정성을 확인하였다.

## II. Body

### 1. Related works

경량전철 무선급전시스템을 실현하기 위해서는 많은 첨단기술이 필요하며, 이 중에서도 DC-DC 컨버터 기술은 가장 핵심적인 기술이라고 볼 수 있다. 이 기술과 관련하여 국내외 연구동향을 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 고속철도 PWM 컨버터 연구를 통해, 입력전류 고조파 성분을 저감시켜 간섭현상에 대한 성능저하를 최소화하기 위한 연구 등을 진행하였다.[6-7]

도시철도와 관련된 연구는 무가선 전동차용 울트라커패시터 모듈 충전방전을 위한 DC-DC 컨버터와 도시철도 직류 급전용 듀얼 컨버터의 병렬운전 제어에 관한 연구 등이 수행되었다.[8-11]

\* First Author: Young-Jae Han, Corresponding Author: Young-Jae Han

\*Young-Jae Han (yjhan@krri.re.kr), Railroad Type Approval Team, Korea Railroad Research Institute

\*\*Su-Gil Lee (sglee@krri.re.kr), Propulsion System Research Team, Korea Railroad Research Institute

\*\*\*Young-Ho Lee (yhlee@wjis.co.kr), R&D Center, Woojin Industrial Systems, Co., Ltd

Received: 2018. 12. 08, Revised: 2018. 12. 24, Accepted: 2018. 12. 25.

This research was supported by "Development on the Interface Technologies of Wireless Power Transfer System for LRT (Light Rail Transit)" of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport

최근에 친환경 에너지원으로 각광받고 있는 연료전지 시스템에 컨버터를 적용하기 위한 연구도 지속적으로 추진되고 있다. 예를 들어, 견인특성을 고려하여 인터리브드 양방향 DC-DC 컨버터의 리플을 줄이기 위한 연구 등도 활발히 연구되고 있다.[12]

차량 부하 변동에 따라 집전 모듈 출력전압을 조정하기 위한 전압조정장치와 유도급전기술에 대하여 개발하기도 하였다. 프랑스의 경우에는 최대 1km까지 무가선 운행이 가능한 하이브리드 트램의 시운전에 성공하기도 하였다. 이처럼, 무선전력전송 기술은 철도뿐만 아니라 다양한 분야에 활용될 수 있는 핵심원천기술이다.[13~15]

## 2. DC-DC converter technology development

### 2.1 Outline

본 연구에서 개발된 DC-DC 컨버터는 경량전철에 취부되어 무선급전구간에서 Pick up장치를 통해 전력을 공급받아 에너지저장장치에 저장시킨 후, 운행할 때 차량의 추진장치 및 보조전원장치에 전원을 공급하고 차량의 주회로 전압을 안정화시키는 역할을 담당한다. 제동시에는 회생전력을 받아 에너지저장장치에 저장하는 기능을 수행한다. DC-DC 컨버터의 주요기능과 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 전원안정화장치는 무선급전 집전장치의 정상적 동작이 불가능할 경우를 대비하여 최소 5개 역 이상을 운행할 수 있는 용량, 즉 1MW이상으로 설정하였다.
- 2) 전원안정화장치는 무선급전 집전시스템과 인터페이스를 하여 역사 내부 및 주행 중 충전과 방전이 원활한 구조로 이루어져야 하며, 한 역에서 10kWh 이상을 45초간 충전할 수 있는 구조로 만들어져야 한다.
- 3) 전원안정화장치는 차량 언더프레임이나 대차, 차량지붕에 설치되어야 한다.
- 4) 경량전철의 진동, 방수 기준에 적합하여야 한다.
- 5) 저장장치는 탈부착이 쉽고, 유지보수가 편리한 모듈구조로 이루어져야 한다.
- 6) 차량이 전기제동으로 동작할 경우, 이를 80% 이상 수용할 수 있어야 한다.

### 2.2 DC-DC converter design

DC-DC 컨버터는 무선급전 경량전철에서 Pick up Regulator로부터 전력을 저장하고, 가선이 없는 구간에서 저장된 에너지를 추진 및 보조전원 장치에 공급해주는 역할을 수행한다. 시스템 설계조건은 다음과 같다.

- 1) 입력전압 : DC 750V
- 2) 추진제어시스템 용량 : 500kW
- 3) 전력변환방식 : 인터리브드 방식의 양방향 DC/DC 컨버터
- 4) 설치조건 : 차상 설치
- 5) 주요기능 : 전력 저장 및 공급
- 6) 주위온도 : -25℃ ~ +40℃

제작된 컨버터의 주회로도도 그림 1과 같고, 각 부분에 대한 역할은 다음과 같다. 충전/방전회로는 충전용 콘택터(K)와 충전저항(CHK)으로 구성된다. 주콘택터를 투입하기 전 DC 필터단의 캐패시터의 돌입전류를 제한하여 캐패시터 신뢰성과 수명을 향상시키는 역할을 담당한다. 방전회로는 방전용 콘택터와 저항으로 이루어져있는데, 필터 캐패시터에 충전된 전압을 방전시켜서, 유지보수시에 발생할 수 있는 사고를 예방하는 역할을 수행한다. 컨버터는 인터리브드 1개의 히트파이프 모델로 구성된다. 1,700V, 650A급 IGBT 모듈이 사용되었고, 수냉각방식이 채택되었다. 리액터는 출력회로부에서 전류필터 및 승압기능을 수행한다.

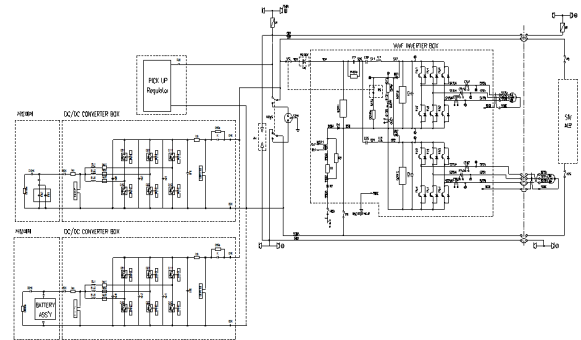


Fig. 1. The Main Circuit Diagram of DC/DC Converter

차상에 설치되는 구조로, 컨버터 좌측에는 주회로, 제어회로용 캐논이 배치되었고, 우측에는 수냉각용 호스를 연결하였으며, 커버는 상하 열림 구조이다. 인터리브드 방식을 적용하여 컨버터를 구성하였고, 종합제어장치, BMS와 연결되도록 하였다. DC/DC 컨버터 개념은 그림 2와 같으며, 실제 외형도는 그림 3과 같다.

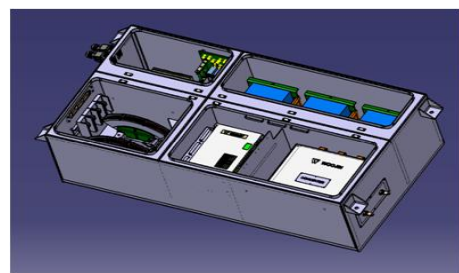


Fig. 2. The Concept Design of DC/DC Converter

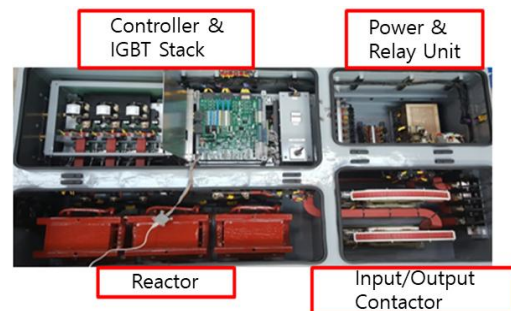


Fig. 3. The Picture of DC/DC Converter

한편, 차량에 안정적인 전원을 공급하기 위한 기능을 수행하는 DC/DC 컨버터와 에너지저장장치는 그림 4에서 보는 바와 같이, 각 차량에 설치되도록 설계하였다.

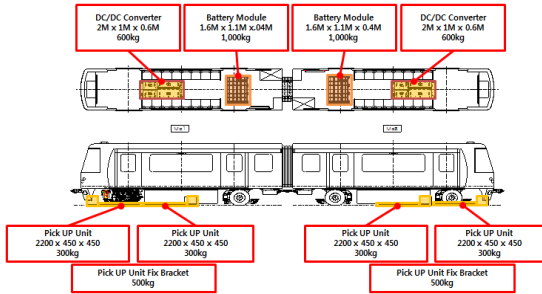


Fig. 4. The Arrangement of DC/DC Converter

### 2.3 DC-DC converter simulation

무선급전 경량전철에 적용하기 위한 배터리의 충전과 방전용 DC-DC 컨버터의 알고리즘을 설계할 수행하였다. 알고리즘은 시스템 특성에 맞게 설계되고, 충전 및 방전 알고리즘을 통해 차량 시스템의 충전과 방전이 원활하게 이루어질 수 있도록 해야 한다.

DC-DC 부스트 컨버터 출력 리플을 감소하기 위해 캐패시터 용량을 늘리거나 주파수를 증가시켜 주기를 적게 할 수 있다. 그러나, 캐패시터 용량을 대폭 늘릴 경우에는 속응성이 줄어들고 컨버터 크기가 커지는 단점이 있다. 따라서, 캐패시터를 적게 하기 위해 주파수를 크게 하는 방법을 주로 이용하지만, 주파수를 키울수록 스위칭 손실과 스트레스가 커지게 된다. 아울러, 인덕터의 크기도 증가하여 시스템 부피와 비용이 증가하게 된다. 이러한 이유로, 본 연구에서는 시스템의 부피, 무게를 줄이고 효율을 향상시키기 위해 인터리브드 방식을 사용하였다.

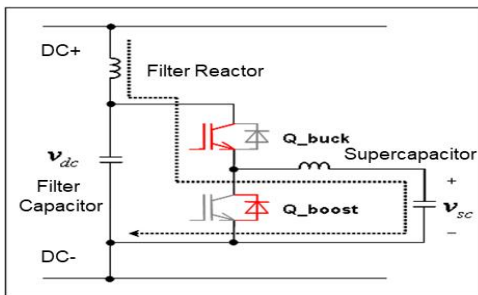


Fig. 5. Charge Mode (Buck operate)

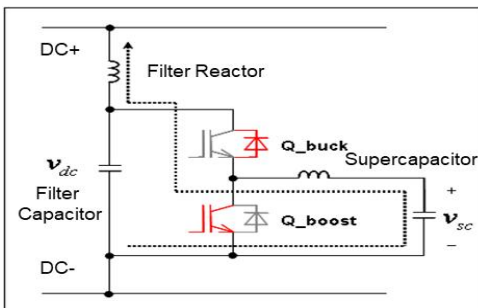


Fig. 6. Discharge Mode (Boost operate)

그림 5, 6은 에너지저장장치의 충전, 방전동작에 따른 스위칭과 프리휠링 다이오드의 동작상태를 보여 주고 있다. 에너지 저장장치는 충전 시에는 윗상 IGBT의 동작을 통하여 강압(buck)기능을 수행하고, 방전 시에는 DC링크단에 전력을 공급하기 위하여 아랫상 IGBT를 동작시켜 승압(boost)기능을 수행한다.

이러한 스위칭 동작 시 발생하는 손실을 최소화하기 위한 스위칭 기법이 ZVS(Zero Voltage Switching)이다. ZVS는 영전압시 스위칭 동작을 수행하는 원리로서 그림 7에서 보여진 것과 같이 IGBT가 프리휠링 다이오드를 통하여 전류루프가 구성되었을 때 IGBT의 스위칭 동작을 수행하는 기능이다.

그러나, 이러한 동작수행을 위해서는 전류가 불연속 모드로 동작하여야 한다는 전제가 있어야 가능하고, 이로 인한 출력특성의 저하에 대한 부담을 수반하여야 한다. 인터리브드 방식은 이러한 단점을 보완할 수 있는 시스템으로 각 압에 해당하는 스위칭 동작은 전류가 불연속 모드로 진행되더라도, 출력의 합성전류는 연속전류분포를 가지도록 하는 방식이다.

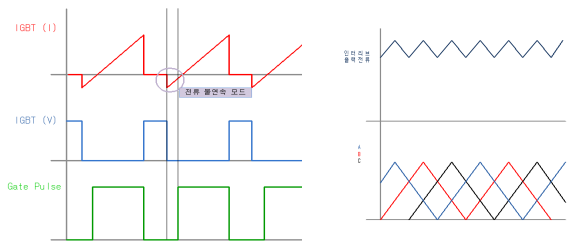


Fig. 7. The Relation of Voltage and Current when IGBT Switching

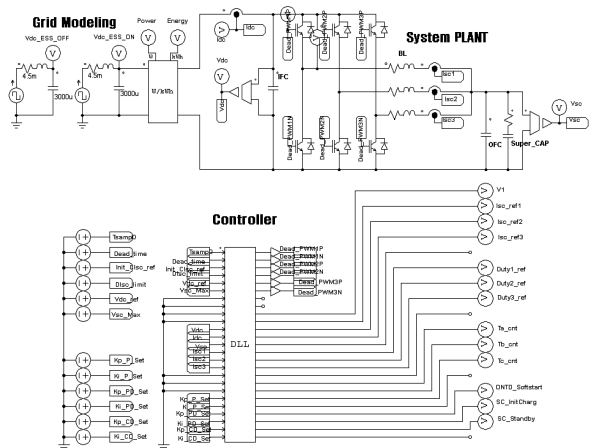


Fig. 8. Simulation Block (PSIM)

인터리브드 방식의 에너지저장장치의 동작 및 기능을 검증하기 위한 시뮬레이션은 PSIM을 적용하여 수행하였다. 그림 8은 모델링된 시스템을 보여주고 있다. 계통의 모델링은 에너지 저장장치의 충전, 방전동작 특성을 위하여 전류 소스원으로 모델링하였고, 에너지저장장치의 제어기는 실제와 동일한 상황을 연출하기 위하여 DLL을 사용하여 코딩하였다.

그림 9는 이렇게 모델링하여 수행된 에너지저장장치의 동작 특성을 보여주고 있다. 결과에서 확인할 수 있듯이 모델링된

DC링크의 전류원에 대하여 DC전압을 유지시켜주기 위한 전압 제어기의 동작특성이 약 200ms의 응답속도를 가지고 동작됨을 확인할 수 있다. 또한, 이 때 저장장치에 충전, 방전동작에 따른 저장매체의 전압과 전류도 확인하였다.

그림 10과 그림 11은 인터리브드 방식에 따른 충전, 방전 동작 시 전류를 확대하여 보여준 결과로서 각 암에서 발생된 전류의 맥동은 약 50A인데 비해 출력전류의 맥동은 약 10A이하로 유지되는 것으로 나타났다.

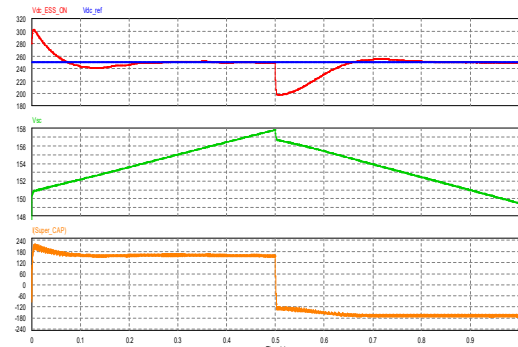


Fig. 9. The Simulation Result(Voltage Controller Response)

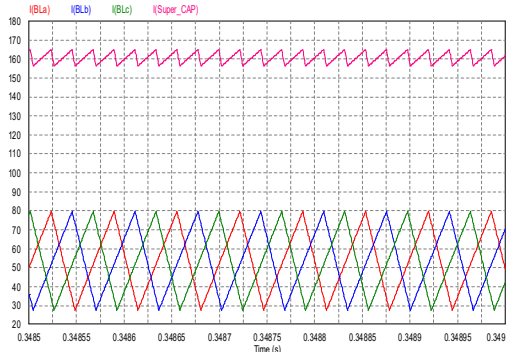


Fig. 10. The Simulation Result(Charge)

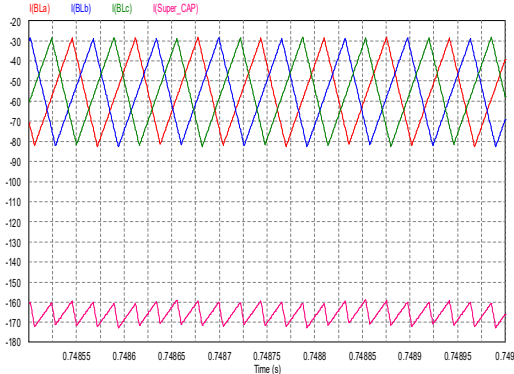


Fig. 11. The Simulation Result(Discharge)

### 2.4 DC-DC converter test result

제작된 DC-DC 컨버터에 대한 성능 확인을 위해 그림 12 (a), (b)는 컨버터 장치, 저장장치간의 연계시험 구성도로 Buck

충전 모드시에는 입력 전원을 750V, 부하는 저항기 또는 저장 장치를 이용하여 측정하였으며, 방전 모드시에는 입력에 저항 부하를 연결하고, 출력에 전원을 인가한 후 전압 지령치 및 출력전류 지령 지령치를 추종하는지 확인하였다.

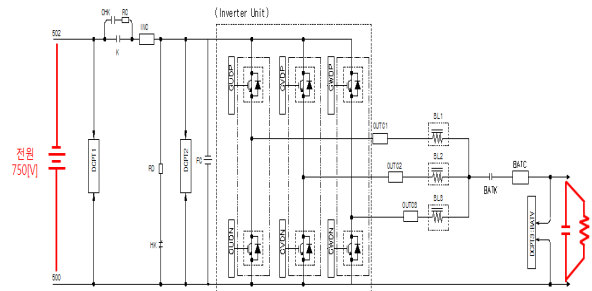


Fig. 12. The load Test Layout (Buck Charge mode (a))

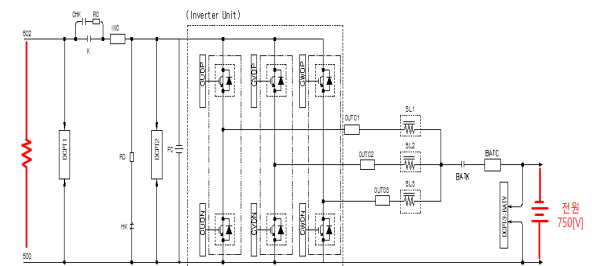


Fig. 12. The load Test Layout (Boost Discharge mode (b))



Fig. 13. The Light-load Test(Charge Mode)

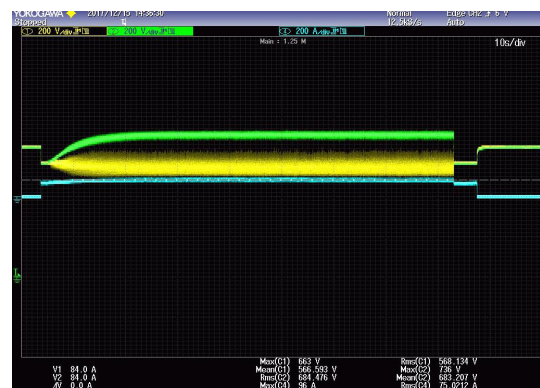


Fig. 14. The Light-load Test (Discharge Mode)

Table 1. Channel Measurement Data

동작모드	CH1	CH2	CH3	CH4
충전모드	출력전압	입력전압	출력전류	입력전류
방전모드	입력전압	출력전압	입력전류	출력전류

그림 13과 그림 14는 충전 모드와 방전 모드시 부하에 흐르는 전류 및 전압을 측정된 결과로서 제어의 추종성 검증, 제어의 안정성을 확인하였고, 양방향 컨버터 장치에 흐르는 맥동전류분이 감쇄되는 것을 확인하였다. 표 1은 동작모드에 따른 채널별 측정 신호들을 보여준다.

### III. Conclusions

본 연구에서는 경량전철 무선급전 추진과 보조전원 시스템에 전력을 공급하기 위해 개발된 DC-DC 컨버터에 대하여 언급하였다. 경량전철 무선급전용 컨버터를 개발하기 위하여 시스템 조건을 만족시키기 위해, 시뮬레이션을 통해 최적의 컨버터 사양을 결정하였다. 기존에도 고속철도, 무가선 전동차용 울트라 커패시터와 연료전지 시스템에 컨버터를 적용하기 위한 연구가 진행된 바 있으나, 경량전철 무선급전을 위한 연구는 거의 전무하였다.

본 논문에서는 컨버터 시스템의 부피, 무게를 줄이고 효율을 향상시키기 위해 인터리브드 방식을 사용하였다. 인터리브드 방식의 에너지저장장치에 대한 성능검증을 위해 시뮬레이션을 실시하였다. 저장장치에 충전 및 방전 동작에 따른 저장매체의 전압, 전류도 확인할 수 있었다. 각 암에서 발생된 전류 맥동이 50A인데, 출력전류 맥동은 약 10A이하로 유지되는 것을 볼 수 있었다.

컨버터 성능시험을 위해 부하시험설비를 이용하였고, 충전, 방전 모드시에 제어의 추종성과 제어의 안정성을 검증하였다. 아울러, 양방향 컨버터에 흐르는 맥동전류분이 감쇄하는 것으로 나타났다. 향후에는 경량전철 차량에 취부한 후, 실제 노선을 운행하면서 제작된 컨버터에 대한 성능을 확인할 계획이다.

### Reference

- [1] Seung-Cheoi Choi, Byung-Song Lee, Hyung-Soo Mok, "A Study on the improvement of efficiency in the light railway vehicle system using IPT," The Korean Institute of Power Electronics, pp. 62-63, November 2010.
- [2] Jae-Bum Lee, In-Ho Cho, "Research on Power Converters for High-Efficient and Light-Weight Auxiliary Power System," Journal of The Korean Society for Railway, Vol. 15, No. 1, pp. 329-338, June 2017.
- [3] Jeong-Min Jo, Young-Jae Han, Jae-Won Kim, Jang-Moo Lee, Gil-Dong Kim, "Design of DC-DC Converter to Charge and Discharge Ultra-Capacitor Modules for Wireless Trains," The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 15, No. 1, pp. 1776-1781, December 2015.
- [4] Chan-Bae Park, Byung-Song Lee, Hyung-Woo Lee, "Prediction and Analysis of the Energy Consumption Considering the Electric Railway Vehicle's Driving," The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 61, No. 5, pp. 777-781, May 2012.
- [5] Chang-byung Park, Sung-woo Lee, Seog-Yong Jeong, Gyu-Hyeong Cho, "Uniform Power I-Type Inductive Power Transfer System With DQ-Power Supply Rails for On-Line Electric Vehicles", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 30, Issue 11, pp. 6446-6455, November 2015.
- [6] Byoung-Gun Park, Dong-Seok Hyun, "An Improved Feed-Forward Controller for the Parallel Operation of a Single-Phase PWM Converter in High-Speed Trains" The Korean Institute of Power Electronics, Vol. 15, No. 3, pp. 226-234, June 2010.
- [7] Shen. J., Taufig. J. A., and Mansell. A. D., "Analytical solution to harmonic characteristics of traction PWM converters," IEE Proceedings on Electronic Power Applications, Vol. 144, No. 2, pp. 158-168, March 1997.
- [8] Sung-An Kim, Gab-Jin Han, Sung-Wo Han, Yon-Hub Cho, "Study on Parallel Operation Control of Dual Converter for Urban Railway DC Power Substations," The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 999-1000, July 2016.
- [9] Sung-Woo Han, Sung-An Kim, Yun-Hyun Cho, Gi-Sig Byun, "A Studies for Sequential Mode Charge Control Algrithm of the Parallel Dual Converter of Using Thyristor for Supplying the Urban Railway DC Power," The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 65, No. 3, pp. 511-519, March 2016.
- [10] Junichi Nomura, Akihisa Kataoka, Katsuhisa, Katsuhisa Inagaki, "Development of a Hybrid Inverter and a Hybrid Converter for an electric railway," Power Conversion Conference, Nagoya, pp. 1164-1169, April 2007.
- [11] Hwan Lee, No-geon Jung, Kye-seung Lee, Chin-young Chang, Jae-moon Kim, "A Study on the Topology of Interleaved Bi-directional DC/DC Converter for Application of Railway Vehicle for Fuel Cell," The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 317-318, October 2016.
- [12] Hwan Lee, No-Geon Jung, Jae-Moon Kim, "A Study on Ripple Current Reduction of Interleaved Bi-directional DC-DC Converter for Traction

- Characteristic of Railway Vehicle," The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 733-739, April 2017.
- [13] S. Chhawchharia, S. Sahoo, M. Balamurugan, S. Sulchari, F. Yanine, "Investigation of wireless power transfer applications with a focus on renewable energy," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 91, pp. 888-902, August 2018.
- [14] S. Das, K. Pal, P. Goswami, M.A.K. Kerawalla, "Wireless Power Transfer in Electric Vehicles," International Journal of Applied Environmental Sciences, Volume 13, Number 7, pp. 643-659, January 2018.
- [15] Dinesh Baniya Kshatri, SurendraShrestha, and Bhanu -Shrestha, "A Brief Overview of Wireless Power Transfer Techniques," The Institute of Internet, Broadcasting and Communication 2015 Conference Paper, pp. 163, Yanbian, China, June 2015.

## Authors



Young-Jae Han received the Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Hongik University. In also, he received the Ph.D. degrees in Technology Management from Korea University. He is currently an principal researcher in Korea Railroad

Research Institute. His research interests are technology management, system engineering, train vehicle system, test evaluation, and patent analysis.



Su-Gil Lee received the Ph.D. degrees in Electrical Engineering from SoongSil University. He is currently an principal researcher in Korea Railroad Research Institute. His research interests include wireless power transfer, electric vehicles,

tilting train control, and battery energy control.



Young-Ho Lee received the B.S. degrees in Electrical Engineering from Cheongju University in 1993. He is currently an director of Woojin Industrail Systems. His research interests are power electronics, battery energy control.