ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 67, No. 12, pp. 1729~1734, 2018
http://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.12.1729

전기철도용 대용량 PWM 컨버터 기술개발에 관한 연구

A Study on Technology Development of High Capacity PWM Converter for Electric Vehicle

한 영 재† · 조 정 민* · 배 창 한** · 이 영 호***
(Young-Jae Han · Jeong-Min Jo · Chang-Han Bae · Young-Ho Lee)

Abstract - Recently, interest in environmentally friendly transportation systems has been increasing, and study on railway systems has been aggressively conducted. Therefore, lots of studies have been done in railway advanced countries to improve performance of PWM converter. The research on the PWM converter for railway vehicle was mainly carried out on the converter mounted on railway vehicle such as the high-speed railway and metropolitan railway. In also, a lot of study has been carried out to improve converter performance installed in the ground. The high-capacity transform used in this paper converted from AC 22.9kV to AC 590V. The converter changed from AC 590V to DC 950V. In general, in the case of rectifier, the DC power supply system has a negative impact on inverter control characteristics because it can not avoid the pulsating component. In this study, it was performed current control for high-capacity converter using Matlab Simulink. The PWM converter is normally performed through the voltage and current at starting mode, powering mode, and braking mode. In the light-load test and the on-line test, we have studied for the PWM converter characteristics. Using this research, we have founded that the converter has excellent performance.

Key Words : Propulsion system, PWM Converter, On-line Test, Combined Test, Traction System

1. 서 론

최근 들어 환경친화적인 교통시스템에 대한 관심이 증대하면서 철도시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 철도시스템 중에서도 차량에 전원을 안정적으로 공급해주기 위한 PWM 컨버터는 핵심 전기장치이다[1-2]. 따라서, 컨버터의 제어특성을 향상시키고, 노이즈를 저감하는 등 PWM 컨버터의 성능향상을 위해 철도 선진국을 중심으로 많은 연구가 수행되었다[3-5].

이러한 연구들은 차상과 지상으로 구분되어 수행되었다. 차상에 탑재되는 PWM 컨버터에 대한 연구는 고속철도, 전동차 등과 같은 차량에 탑재되는 컨버터에 대한 연구가 주로 진행되었다[6-7]. 지상에 설치된 컨버터의 성능을 향상시키기 위한 연구도 많이 이루어졌는데, 단상 PWM 컨버터 차량의 진상운전이나 PWM 컨버터 차량의 역률 제어가 연구되었다[8-10].

3상 PWM 컨버터의 주요 특징은 다음과 같이 정리할 수 있다. 첫째, 다이오드 브리지와 비교할 때, IGBT 방향이 역으로 되어도 AC 전력을 DC 전력으로 바꾸어준다. 둘째, AC 입력전압 크기보다도 DC 출력전압을 더 크게 제공할 수 있다. 셋째, 리액턴스가 AC 입력측에 있더라도, 단위 역률 제어를 수행할 수 있다. 넷째, DC 부하나 AC 전력이 변동할 경우에도, DC 출력전압을 안정하게 유지할 수 있는 능동제어가 가능하다[11-12].

일반적으로 정류기를 사용하여 한전의 전력계통에 정류부하에 의한 6n±1의 고조파 성분을 발생시키게 된다. 이를 PWM 컨버터를 사용하여 제어하므로서 부하 변동에 따른 안정적인 DC 전원을 공급하고, 더블어 PWM 컨버터의 입력단의 전류를 역율제어하므로서 기존의 정류기 사용시 비해 역률을 개선시켰다.

한편, 초고속 자기부상철도를 운행하기 위해 개발된 PWM 컨버터에 대한 연구진행 방법은 다음과 같다. 먼저, 국내외 문헌조사를 통해 주요사양을 결정하였으며, 이를 바탕으로 Matlab Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고, 구성품시험, 조합시험, 시운전시험을 통해 제작된 PWM 컨버터에 대한 성능을 확인하였다[13-14].

2. 본 론

2.1 개요

그림 1은 국내 기술로 개발된 대용량 PWM 컨버터의 주회로 및 외형을 보여준다. 아울러, 컨버터 주요사양은 다음과 같다.

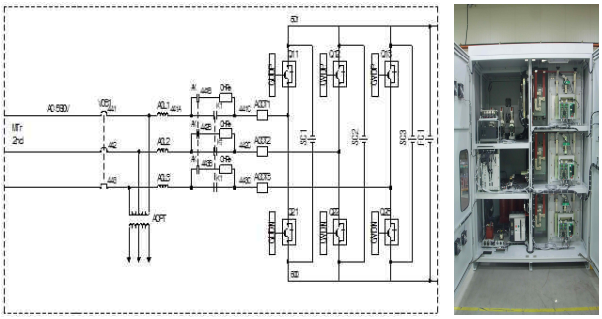
(1) 제어방식 : 2중 루프 제어방식(전압제어 및 역률제어 +

† Corresponding Author : Railroad Type Approval Team, KRRI, Korea
E-mail: yjhan@krri.re.kr
* Hypertube Research Team, KRRI, Korea
** Railroad Type Approval Team, KRRI, Korea
***Advanced Development Team, WJIS, Korea
Received : October 25, 2018; Accepted : November 26, 2018

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

전류제어방식)
(2) 전압제어 : SVPWM기법
(3) 냉각방식 : Heat pipe
(4) 정격용량 : 350KVA, 1유니트당, 최대 1MVA
(5) 입력전압변동범위 : DC 590V ±5[%]
(6) 최대효율 : 90% 이상
(7) 출력전압 : DC 950V



(a) (b)

그림 1 (a) PWM 컨버터 주회로 (b) PWM 컨버터 외형
Fig. 1 (a) The Main Circuit Diagram of PWM Converter (b) PWM Converter Picture

2.2 전력변환회로 설계

컨버터 용량은 LSM(Linear Synchronous Motor: 이하 LSM) 입출력 전류를 기본으로 산정하였으며, 3상 AC 입력측은 컨버터부, 직류부로 이루어져있다. 컨버터부는 서지전압 억제용 Varistor, 승압용 리액터, 직류부는 Capacitor 돌입전류방지용 저항, SCR Switch, 평활용 Capacitor, 전압/전류 검출용 CT 등으로 구성하였다. LSM 설계사양은 다음과 같다.

(1) 정격전류 : 340A(1열 기준)
(2) 정격전압 : 361V(1열 기준, 상전압)
(3) 정격토크 : 32.44 KN (가속도 1.1m/s2)
(4) 정격출력 : 259.6Kw (가속도 1.1m/s2)
(5) 효율 : 0.95
(6) 역률 : 0.98
(7) 쇄교수 : 312, 4 Turn (단거리 시험선)

2.3 PWM 컨버터 시뮬레이션

컨버터 주요사양을 결정하고 대용량 컨버터에 대한 전류제어 수행을 위해 Matlab Simulink를 이용하여 그림 2와 같이 히스테리시스 전류제어기를 갖는 견인모드 모델링을 진행하였다. LSM 모델은 120도 도통형 모델링, 각 상 Back-EMF는 사다리꼴 파형으로 가정하였다. 이를 통해 전동기 속도, 위상각 등을 구하였다. 그림 3은 AC 전압을 DC 전압으로 변환하기 위한 컨버터의 전류제어와 전력 부분을 보여준다. 회전좌표계에서 PI제어를 통해 전류제어를 수행하였다. 오아

그림 3의 (a)는 시뮬레이션에 적용할 컨버터 시스템 모델을 나타내고 있으며, PWM 컨버터 시스템 구성은 전원과 승압용 리액터 그리고 3상 전력회로 및 DC link 커패시터로 구성되어져 있다. 그림 3의 (b)는 즉, 리액터, DC링크 커패시터, 그리고 전력용 소자인 IGBT로 구성되어 있는 전력 회로부, 전원 전압과의 위상을 동기시키는 PLL회로, 2상-3상 및 정지-회전 좌표 변환기, 그리고 전력소자를 PWM 형태로 구동하는 게이트 구동회로로 구성되어 있다.

기본적인 동작은 다음과 같다. 우선 3상 전압검출기를 통하여, E_R, E_S, E_T 상의 위상을 검출한다. 그리고 전원의 전압 벡터가 회전 좌표축상의 q축에 일치하도록 회전좌표계의 회전 각속도 ω_e 및 회전각 θ를 설정한다. 3상전류를 검출하여 A/D 변환하고, 프로세서에 입력된 3상전류를 3상-2상 변환 및 정지좌표-회전좌표 변환을 통해서 회전좌표계의 d, q로 표현한다. d축 전류를 0으로 제어하기 위해 PI 전류제어를 행하고 PI 전류제어기 출력에 q축의 간섭분을 보상하여 d축 전압 지령을 만든다.

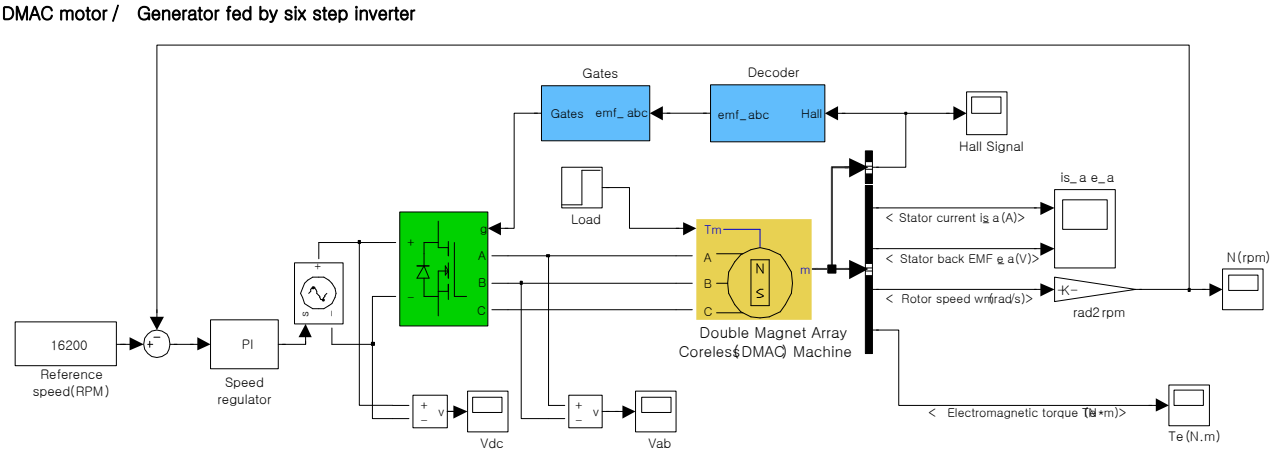


그림 2 LSM 전동기의 Matlab Simulink 모델
Fig. 2 The Matlab Simulink Model of LSM Motor

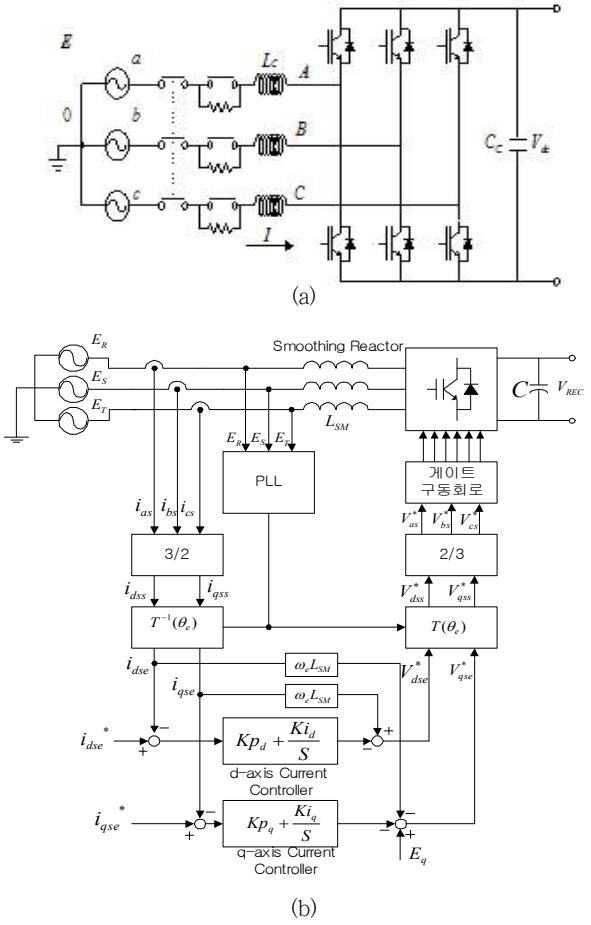


그림 3 (a) AC/DC 3상 컨버터 모델 (b) PI 제어 블록도

Fig. 3 (a) AC / DC three-phase converter model
(b) PI control block diagram

전류를 증가시키고자 할 때는 컨버터의 스위칭 전압이 작아져야 하기 때문에 PI 전류제어기 출력의 부호가 음(-)으로 된다. 그리고 제어기 출력에 d축의 간섭분을 보상하여 q축 전압 지령을 만든다. 이 때 q축 PI 전류제어기 출력은 d축에서와 마찬가지로 마이너스(-)가 곱해진다. d, q축의 전압지령을 이번에는 역으로 회전좌표-정지좌표 변환 및 2상-3상 변환을 한 다음 중앙 집중 방식의 PWM 신호를 발생시켜 게이트 구동회로를 통해 전력소자인 IGBT를 스위칭한다.

그림 4와 그림 5는 컨버터의 초기 기동, 역행, 제동시의 전압과 전류 파형을 시뮬레이션한 결과이다. 그림 4에서 보는 바와 같이, 기동시에는 1초 동안 소프트 스타트로 전압을 상승시키고, 부하전류를 50A에서 100A까지 1.5초~3초까지 증가시키는 것을 볼 수 있었다. 또한, 3초~3.5초까지 전력공급을 차단하며, 3.5초 이후에는 전력을 회생하는 것을 알 수 있었다. 그림 5는 역행 및 회생시 PWM 컨버터의 전압과 전류 파형을 확대한 결과이며, 역행시에는 컨버터 출력 전압 즉 Vdc가 부하로 인하여 저감되고 있으나 안정화되고 있음을 보여 주고 있으며, 회생시에는 Vdc가 상승되었다가 안정화되는 것을 보여주고 있다.

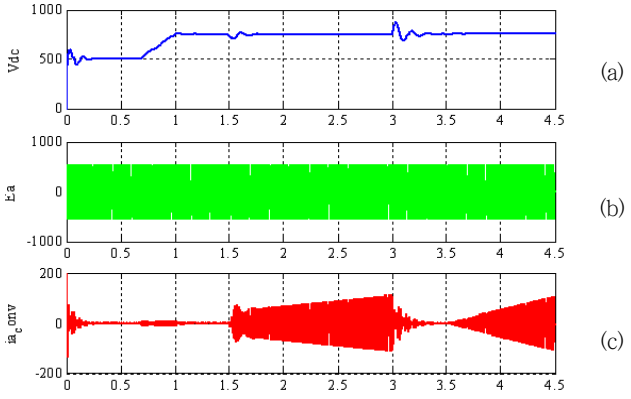


그림 4 (a) PWM 컨버터의 출력전압 (b) 컨버터 입력전압
(c) 컨버터 입력전류

Fig. 4 (a) Output voltage of PWM converter
(b) Converter input voltage, (c) Converter input current

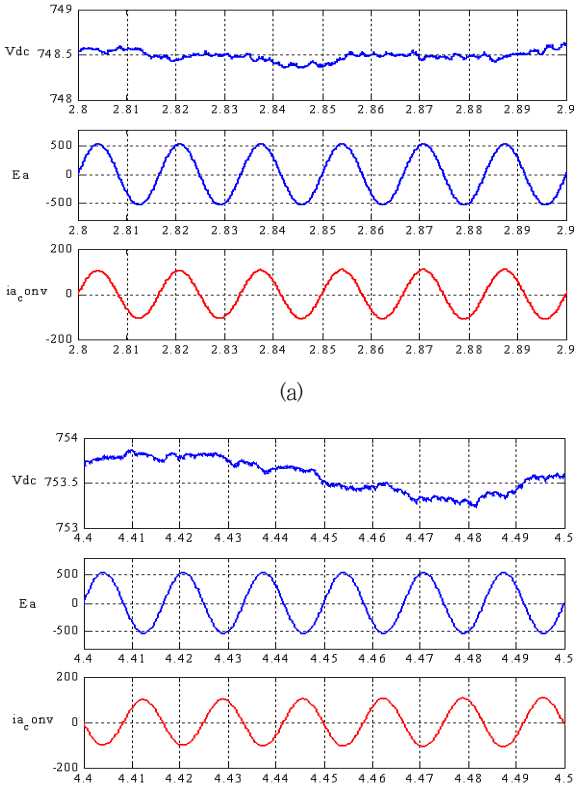


그림 5 (a) 역행시 PWM 컨버터 파형 (b) 회생시 PWM 컨버터 파형

Fig. 5 (a) The voltage, current wave in case of powering mode
(b) The voltage, current wave in case of braking mode

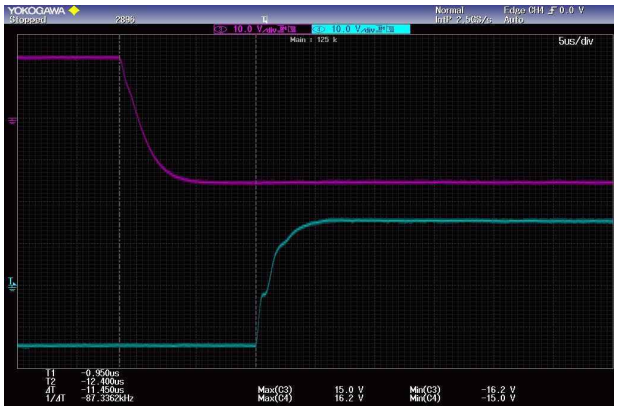


그림 6 PWM 컨버터 주회로 소자 게이트 출력전압 측정 시험 (U, X상 IGBT 스위칭)

Fig. 6 PWM converter main circuit device gate output voltage measurement test(U, X phase IGBT switching)

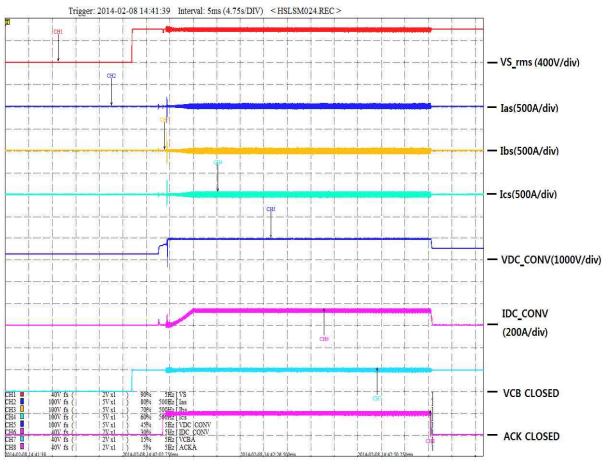


그림 7 경부하시 PWM 컨버터의 기동, 정지 시퀀스 확인

Fig. 7 Check the starting and stopping of PWM converter by light load (VS: 컨버터 입력전압, Ias,Ibs,Ics: 컨버터 입력 전류, Vdc:컨버터 출력전압, Idc: 컨버터 출력전압, VCB: 컨버터 기동접촉기, ACK : 컨버터 접촉기)

2.4 시험결과

그림 6은 PWM 컨버터 주회로 소자의 게이트 신호 U상과 X상의 스위칭 파형을 보여준다. 암으로 구성된 주회로 소자 스위칭 파형을 통해 데드타임 10us 이상을 확인하였다. IGBT가 off된 후에 다른 IGBT가 정상적으로 on되고 있음을 볼 수 있었다.

그림 7은 경부하 조건에서 기동, 정지 시퀀스 측정을 통하여 PWM 컨버터에 대한 성능을 확인한 결과이다. 측정주기는 4.75 s/div, VS_rms 400V/div, Ias/Ibs/Ics 500A/div, VDC_CONV 1000V/div, IDC_CONV 200A/div로 맞춘 후에 측정하였다. 인버터 출력전류 파형이 3상이 모두 정상적으로 동작함을 알 수 있

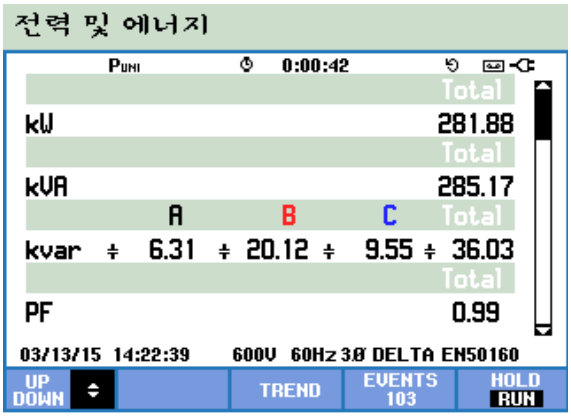


그림 8 시험선에서의 효율(96%) 및 역율(0.99) 측정

Fig. 8 Measure efficiency (96%) & power factor (0.99) on the test (CH1: 컨버터 출력전압, CH2: 컨버터 출력전류, CH3: 컨버터 전력)

었다. 또한, 컨버터 출력전압, 컨버터 입력전류 등도 원활히 동작하는 것으로 나타났다.

그림 8은 시험선에서 만차 상태에서 제작된 PWM 컨버터에 대한 효율과 역율을 측정한 결과이다. 위에서부터 아래로 컨버터 출력전압, 컨버터 출력전류, 컨버터 전력을 의미하는데, PWM 컨버터 성능특성을 확인을 통해 제작된 컨버터는 효율 96%, 역률 99%를 갖는 것으로 나타났다.

3. 결 론

본 연구를 위해 제작된 PWM 컨버터는 초고속 자기부상철도가 정상적으로 운행하기 위해 필요한 전원을 공급하기 위해 제작되었다. PWM 컨버터를 설계, 제작, 시험한 과정은 다음과 같다. 먼저, 본 연구에서는 컨버터 주요사양을 결정하고 대용량 컨버터에 대한 전류제어를 수행하기 위해 Matlab Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. PWM 컨버터는 전원, 승압용 리액터, DC Link 커패시터로 이루어져 있다.

시뮬레이션을 통해서 기동시에는 1초간 소프트 스타트로 전압을 상승시킨 후, 부하전류를 1.5~3초 동안 50A에서 100A로 증가시키는 것을 확인하였다. 아울러 역행시에는 컨버터 출력전압이 하강하다가 안정화되고, 회생시에는 반대로 상승하다가 점차 안정화됨을 볼 수 있었다.

컨버터가 제작된 후에는 구성품시험, 조합시험, 시운전시험을 수행하였다. 구성품시험인 게이트 출력전압 측정시험에서는, 게이트 신호 U상, V상에 대한 데드타임이 10us 이상으로 스위칭이 정상적으로 이루어짐을 확인하였다. 조합시험인 경부하시험에서도 인버터 출력전압, 컨버터 입력전류 등의 신호를 통해 개발된 컨버터가 양호하게 동작함을 볼 수 있었다. 마지막으로, 시운전시험을 통해, 컨버터 출력전압, 컨버터 출력전류, 컨버터 출력전력 데이터를 분석하여 PWM컨버터의 효율과 역률이 각각 96%, 99%인 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토부에서 시행하는 “초고속 자기부상철도 핵심기술개발”사업과 한국철도기술연구원 “철도차량 형식승인 검사”사업으로부터 지원을 받아 수행되었습니다.

References

[1] Kejian Song, Georgios Konstantinou, Wu Mingli, Pablo Acuna, Ricardo P. Aguilera, and Vassilios G. Agelidis, “Windowed SHE-PWM of Interleaved Four-Quadrant Converters for Resonance Suppression in Traction Power Supply Systems”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 32, No. 10, pp. 7870-7881, 2017.

[2] Mohamed Z. Youssef, Konrad Woronowicz, Kunwar Aditya, Najath Abdul Azeez, and Sheldon S. Williamson, “Design and Development of an Efficient Multilevel DC/AC Traction Inverter for Railway Transportation Electrification”, *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 31, No. 4, pp. 3036-3042, 2016.

[3] S. Maritheus, “Systematic design of high performance hybrid cascaded multi inverters with active voltage balance and minimum switching losses”, *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 28, No. 7, pp. 3100 - 3113, 2013.

[4] 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 Transactions of Korean Institute of Power Eletronics*, Vol. 15, No. 3, pp. 226-234, 2010.

[5] Hyung-chul Kim, Jae-ho Choi, “A Study of Control Algorithm for Propulsion System”, Vol. 10, No. 1, pp. 51-56, 2007.

[6] Dong-Myung Lee, Chan-Hee Hong, “Modeling of SVPWM and Control Method for Driving Systems of High-speed rains by using Multi-level Power Converters”, *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 23, No. 12, pp. 136-145, 2009.

[7] Jae-Moon Kim, “The control of Interleaved Multi -phase Boost Converter for Application of a Fuelcell Railway Vehicle”, Vol. 65, No. 11, pp. 1925-1930, 2016.

[8] Baik Kim, “A Study on the Leading Phase Operation of Single Phase PWM Converter Train”, *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 15, No. 4, pp. 357-363, August 2012.

[9] Yongho Kim, Baik Kim, “The Reactive Power Compensation for a Feeder by Control of the Power Factor of PWM Converter Trains”, *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 17, No. 3, pp. 171-177, June 2014.

[10] Sung-Woo Han, Sung-An Kim, Yun-Hyun Cho, Gi-Sig Byun, “A Studies for Sequential Mode Change Control Algorithm of the Parallel Dual Converter of Using Thyristor for Supplying the Urban Railway DC Power”, *the Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 65, No. 3, pp. 511-519, 2016.

[11] Sung-An Kim, Sung-Woo Han, Yun-Hyun Cho, “A Study on Three Parallel Operation Control Algorithm of Thyristor Dual Converter System for Urban Railway Substation”, *the Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 66, No. 2, pp. 459-467, 2017.

[12] Choon-Seok Jang, Sung-An Kim, Hwan-Jin Kim, Gap-Jin Han, Yun-Hyun Cho. “A Study on Double Converter for Urban Transit Power Supply”, *Power Electronics Annual Conference*, pp. 223-224, 2015.

[13] “Development of the super-speed propulsion system and System Engineering Technology”, *KRRI research report*, 2014.

[14] “Development of the super-speed propulsion system and System Engineering Technology”, *KRRI research report*, 2015.

저 자 소 개

한 영 재 (Young-Jae Han)

1994년 홍익대학교 전기제어공학과 졸업(학사). 1996년 홍익대 대학원 전기제어공학과 졸업(석사). 2004년 동대학원 전기정보제어공학과 졸업(박사). 2016년 고려대학교 대학원 기술경영학과 졸업(박사). 1995년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원

조 정 민 (Jeong-Min Jo)

1997년 충주대학교 졸업(학사), 1999년 명지대학교 대학원 전기공학과(석사), 2004년 명지대학교 대학원 전기공학과(박사), 현재 한국철도기술연구원 선임연구원

배 창 한 (Chang-Han Bae)

1996년 2월 아주대학교 제어계측공학과 졸업. 1998년 2월 아주대학교 제어계측공학과 석사 졸업. 2002년 8월 아주대학교 제어계측공학과 박사 졸업. 2002년 8월~현재 한국철도기술연구원 책임연구원

이 영 호 (Young-Ho Lee)

1985년 청주대학교 졸업(학사), 1993년 (주) 우진산전 입사, 2015년 한밭대학교 산업대학원 수료. 현재 (주) 우진산전 기술연구소 이사