

철도차량 보조전원장치 특성 분석에 관한 연구

A Study on Characteristic Analysis of Auxiliary Power Supply for Railway Vehicle

한 영 재[†] · 한 성 호* · 이 태 형** · 이 수 길*** · 이 영 호[§]

(Young-Jae Han · Seong-Ho Han · Tae-Young Lee · Su-Gil Lee · Young-Ho Lee)

Abstract - Auxiliary power supply for railway vehicle is a equipment that focuses on the service of passengers in a vehicle. It supplies power to controllers used in heating and cooling devices, fluorescent lamps, batteries and many other electrical equipments. Most of the auxiliary power supply for railway vehicle are mainly used for the round trips and circulation routes within the metropolitan area and have a capacity of 170~200 kVA. In this study, we developed the auxiliary power supply capacity to 240kVA for 200km/h class. As such, the auxiliary power supply is an important device for securing the reliability and safety of the railway vehicle and improving the passenger convenience, so the performance verification of the performance must be ensured. In this paper, 240kVA auxiliary power supply is developed. Also, performance of the auxiliary power supply manufactured through the analysis of various characteristics related to the auxiliary power supply was confirmed while operating the actual line.

Key Words : Auxiliary power supply, PWM converter, On-line test, Measurement system

1. 서 론

철도차량 보조전원장치는 차량에 탑승한 승객들의 서비스에 중점을 둔 장치이다. 냉난방장치, 형광등, 배터리와 그 외의 여러 전장품에서 사용하는 제어기에 전원을 공급하는 장치이다. 대부분의 철도차량용 보조전원장치는 대도시 내의 왕복이나 순환노선에 주로 활용되어 용량이 170~200kVA급이다. 철도차량에 취부되기 때문에 지상에서 사용하는 다른 보조전원장치와는 달리 내진동, 내노이즈성이 강해야 한다. 또한, GTO(Gate Turn-off Thyristor) 소자가 1990년대 중반까지 주로 사용되었고, 그 이후에는 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 소자가 대부분 채용되었다[1-3]. 보조전원장치와 관련된 연구들을 살펴보면, 소형 경량화, 유지보수 편리성, 대용량화의 특징을 가지고 있다[4-6]. 이와는 별도로, 특허분석을 활용하여 보조전원장치에 대한 기술동향을 살펴본 사례도 있다[7].

보조전원장치는 차량의 신뢰성과 안전성 확보와 승객 편의성 향상을 위해 중요한 장치이므로 성능에 대한 성능검증이 반드시 확보되어야 한다[8, 9]. 철도차량 보조전원장치 개

발 사례에 대하여 살펴보면, 독일 SMA에서는 모듈화된 시스템으로 보조전원장치를 구성하였다. 컨버터는 DC/DC 컨버터 모듈과 보조 부품으로 구성되는데, 이 모듈을 통해 컨버터가 입력전압과 출력전압을 제어한다. 또한, 고속 스위칭 주파수를 사용함으로써 변압기 무게와 크기를 대폭적으로 줄였다[10, 11]. 미쓰비시와 히타치도 SiC IGBT를 이용하여 전력 변환 손실을 30%까지 감소시켜서, 시스템의 무게와 크기를 많이 줄였다. 도시바의 보조전원장치도 경량화, 고효율, 내노이즈성에 강점을 갖고 있다.

본 연구에서는 200km/h급에 맞게 보조전원장치 용량을 240kVA로 개발하였다. 개발된 보조전원장치를 철도차량에 취부한 후, 실제 영업구간을 운행하면서 보조전원장치와 관련된 여러 특성에 대한 분석을 통해 제작된 보조전원장치에 대한 성능을 확인하였다.

2. 보조전원장치의 구성 및 사양

2.1 보조전원장치의 시스템 사양

철도차량 보조전원장치는 에어컨, 히터와 같은 냉난방장치, 형광등과 같은 조명기기, 추진 및 제동장치 등의 각종 전장품의 제어전원을 공급하는 장치이다. 회로방식은 2중 쇼퍼 + 6펄스 전압형 인버터 방식, 제어방식은 PWM 제어, 냉각방식은 자연냉각 방식을 적용하였다. 240kVA 보조전원장치는 국내 독자기술로 개발되었으며, 소형 경량화, 고효율, 유지보수의 편리성, 고신뢰성을 구현하였다. 제어장치는 32bit CPU를 사용한 디지털 제어방식이며, 고장기록을 위한 Trace-Memory 기능을 탑재하고 있다. 차량의 배터리 충전을 위한 배터리 충전부가 포함되어 있고, 킬팅에 필요한 전원을 제공하기 위한 AC-DC컨버터가 취부되어 있다. 그림 1

* Logistics System Research Division, KRRI, Korea

** Railroad Type Approval Team, KRRI, Korea

*** Wireless Power Transfer System Research Team, KRRI, Korea

§ Advanced Development Team, WJIS, Korea

† Corresponding Author : Railroad Type Approval Team, KRRI, Korea

E-mail : yjhan@krri.re.kr

접수일자 : 2017년 9월 19일

수정일자 : 2017년 10월 10일

최종완료 : 2017년 10월 16일

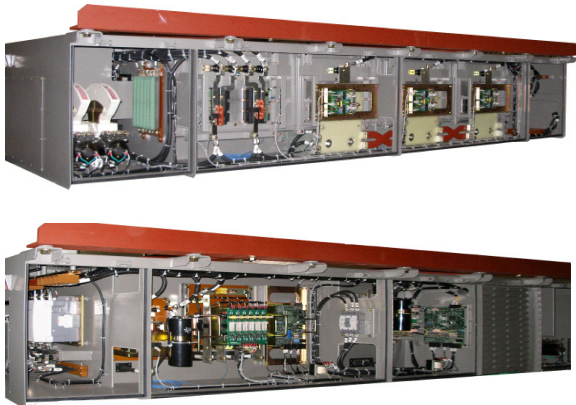


그림 1 보조전원장치 외형
Fig. 1 The picture of auxiliary power supply

은 개발된 240kVA 보조전원장치의 외형도를 나타낸다[12].
국내 독자기술로 개발된 240kVA급 보조전원장치의 주요 사양을 살펴보면 다음과 같다.

- (1) 정격용량 : 240kVA 연속
- (2) 입력전압 : AC 1,590V
- (3) 입력전압변동범위 : AC 1,431V ~ 1,749V
- (4) 출력전압 : AC 440V
- (5) 출력전류 : AC 314A
- (6) 출력전압범위 : 정격전압의 $\pm 5\%$
- (7) 부하변동시 출력전압 변동율 : $\pm 10\%$
- (8) 효율 : 90% 이상
- (9) 통신 : RS 485 비동기통신
- (10) 소음 : 70dB 이하 (1m 주위)
- (11) 주위온도 : $-25^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$

2.2 보조전원장치의 구성

보조전원장치는 가선으로부터 AC 25kV의 가선전압을 입력받은 후, 변압기를 통해 AC 1590V로 변환된 전압을 입력 전압으로 사용한다. 냉난방에 필요한 전원 AC 440V, 배터리와 제어기에 필요한 DC 100V, 톨팅제어용 DC 110V를 차량에 공급한다. 이 기능을 실현하기 위해 그림 2에서 보는 바와 같이, AC 전압을 DC 전압으로 바꾸는 정류회로와 교류 회로, DC 전압을 AC 전압으로 변환하는 인버터가 취부되어 있다. 보조전원장치의 3상 AC 전압을 DC 100V로 바꾸어주는 전지 충전부가 있다. 톨팅제어는 순시응답 특성이 좋아야 하기 때문에 별도의 AC/DC 컨버터를 통해 제어한다.

그림 3은 배터리 충전부의 회로도도를 보여준다. 배터리 충전부는 DC 100V를 공급하고, 이를 통해 차량용 배터리를 충전시키고, 각 장치에 필요한 DC 100V 제어전원을 공급한다. 배터리 충전부 입력은 보조전원장치의 출력전원을 이용하고, 싸이리스터 정류기를 이용하여 이 전압을 DC 100V로 제어해준다. 기존의 철도차량용 배터리 충전기는 대부분 3상 다이오드 브릿지를 통해 공급하였으나, 이 방식은 출력전압을 피드백 제어하지 않아 부하 영향에 민감하고, 전압을 정밀하게 제어하지 못하는 단점을 가지고 있었다. 이러한 문제 해결을 위해 240kVA급 보조전원장치의 배터리 충전기는 정밀 제어를 위해 디지털 제어가 가능한 싸이리스터 정

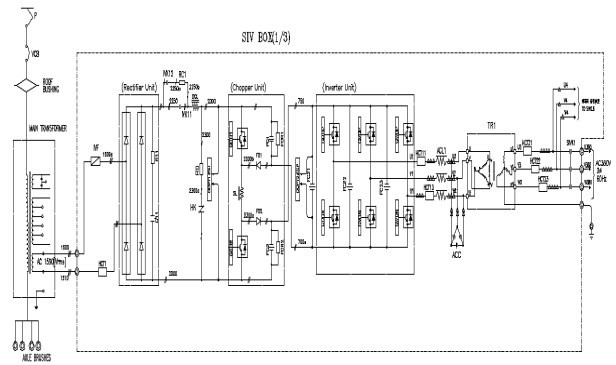


그림 2 보조전원장치 주회로도
Fig. 2 The main circuit diagram of auxiliary power supply

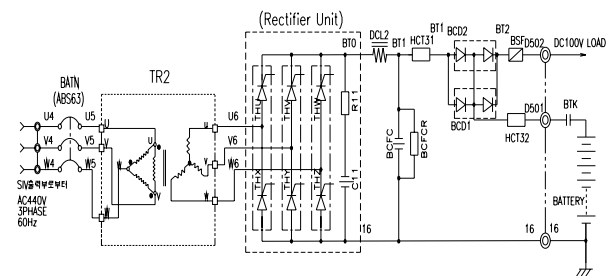


그림 3 전지 충전부 회로도
Fig. 3 The circuit diagram of battery charger part

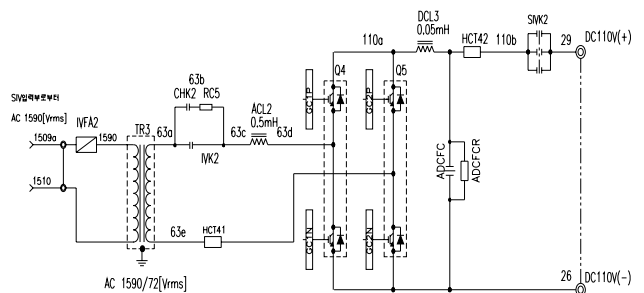


그림 4 제어부(DC 110V)
Fig. 4 The control part(DC 110V)

류기를 이용하였다. 그림 4는 톨팅 제어용 AC/DC 컨버터를 보여준다. 순간적인 부하 응답 특성을 빠르게 하기 위하여 PWM 컨버터로 구성하였다[12, 13].

2.3 계측시스템의 구성

240kVA급 보조전원장치에 대한 성능 특성을 확인하기 위하여 T차와 Th차 배전반 터미널에서 신호를 인출하여 분석에 이용하였다. 보조전원장치의 입력전압, 출력전압, 축전지 출력전압 등과 관련된 데이터들을 입력받도록 하였다. 계측 프로그램은 T차에 설치된 계측 제어모듈에 설치되어 전체 제어와 계측이 되도록 구성하였다. 보조전원장치 뿐만 아니라 추진장치, 제동장치 등에 대한 데이터를 받기 위해 계측시스템을 구성하였다.

Data 동기화를 위해 T차에 설치되어있는 제어용 프로그램

램에서 DC 5V 신호를 입력받아 Ready 상태에서 데이터를 계측하고, 계측 중에는 저장, 종료 등의 각종 명령을 제어 프로그램의 DC 5V로 제어한다. 아울러, 계측된 데이터는 하드 디스크에 저장되고, LAN 통신을 통해 실시간으로 전달되어 모니터링을 한다. 시험이 종료된 후에는 각 계측시스템에 저장된 데이터를 이동용 하드 디스크를 이용해 데이터를 백업하고 연구실로 이동한 후에 시험데이터를 분석한다. 그림 5는 계측시스템 구성도를 보여준다.

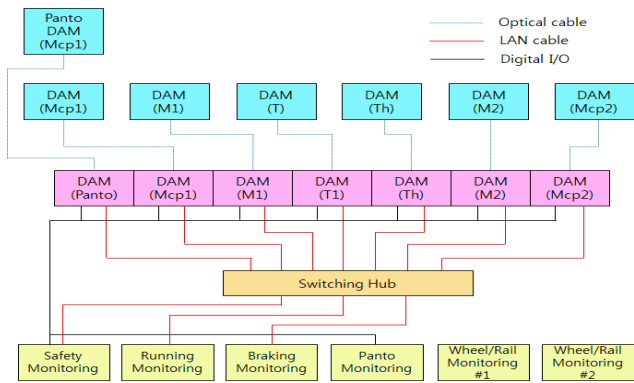


그림 5 계측시스템 구성 다이어그램
Fig. 5 The composition diagram of measurement system

2.4 보조전원장치 시뮬레이션 및 시험결과

보조전원장치의 배터리 충전기는 3상 출력을 받아 변압기로 104V로 변환한 후, 싸이리스터 정류기를 통하여 DC 100V로 내보내준다. 그림 6에서 보는 바와 같이, 보조전원장치의 PWM 인버터부와 전압제어기, 전류제어기로 구성된 주회로도를 Matlab simulink를 이용하여 시뮬레이션 하였다. LC 필터를 PWM 인버터 출력부에 연결하여 깨끗한 정현파가 나오게 하였다. 빠른 부하응답특성을 위하여 이중 제어루프를 사용하였다. 그림 7은 보조전원장치 기동시 d축과 q축 전압 지령치와 시뮬레이션상의 실측치 변화를 살펴본 것으로, 지령치를 시뮬레이션상의 실측치가 잘 추종함을 확인하였다. 초기 기동 시에는 정상상태 도달 시까지 전압이 서서히 증가시키는 것을 볼 수 있었다. 그림 8은 부하 급변시의 순간 전압과 전류 파형을 보여준다. 부하를 투입하거나 차단할 때, 순간적으로 파형이 일그러지지만, 전압 및 전류 제어기에 의해 빠른 시간 내에 원상회복하는 것을 확인하였다.

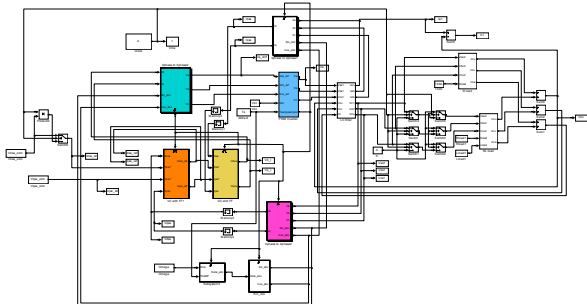


그림 6 보조전원장치 블럭도
Fig. 6 The block diagram of auxiliary power supply

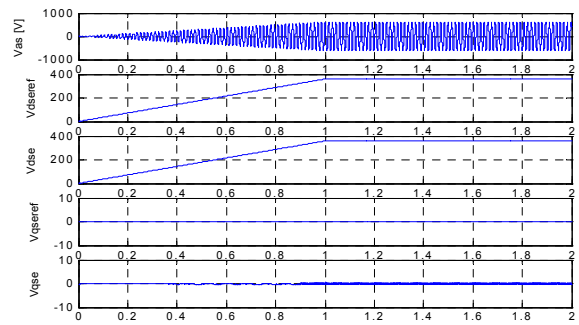


그림 7 기동시 선간전압과 d, q축 전압
Fig. 7 The line voltage and d-axis, q-axis voltage according to starting time

제작된 보조전원장치에 대한 성능을 확인하기 위해, 실제 영업노선인 오송에서 목포 구간을 운행하며, 초퍼전압, DC 100V 출력전압 등에 대한 성능을 수행하였다. 보조전원장치 초퍼 전압은 순간 출력전압이 DC 1,150V ±10%이내이어야 하는데, 그림 8과 같이 기준치 이내임을 알 수 있었다. 그림 9는 DC 100V 출력전압, 그림 10은 DC 110V 출력전압을 각각 나타내준다. 출력전압이 사구간 통과시를 제외한 전 구간에서 5%~10% 범위 내에 존재해야 하는데, 시험결과 DC 100V 출력전압과 DC 110V 출력전압이 모두 기준치를 만족하였다. 이를 통해 개발된 보조전원장치의 성능이 양호함을 확인하였다[13].

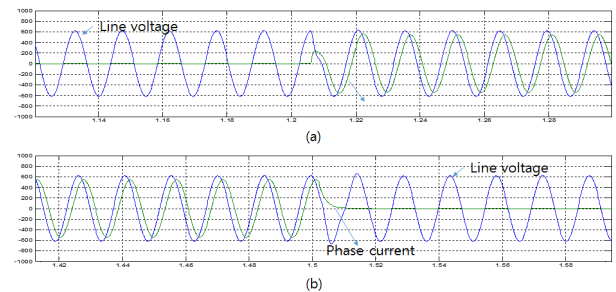


그림 8 부하 급변시 순간전압과 상전류 (a) 부하 투입시, (b) 부하 차단시
Fig. 8 Line vlotage and phase current (a) load input (b) load cut-off

제작된 보조전원장치에 대한 성능을 확인하기 위해, 실제 영업노선인 오송에서 목포 구간을 운행하며, 초퍼전압, DC 100V 출력전압 등에 대한 성능을 수행하였다. 보조전원장치 초퍼 전압은 순간 출력전압이 DC 1,150V ±10%인 DC 1,035V~1,265V이내이어야 하는데, 그림 9와 같이 기준치 이내임을 알 수 있었다. 그림 10은 DC 100V 출력전압, 그림 11은 DC 110V 출력전압을 각각 나타내준다. 출력전압이 사구간 통과시를 제외한 전 구간에서 5%~10% 범위 내에 존재해야 하는데, 시험결과 DC 100V 출력전압이 DC 90V~105V, DC 110V 출력전압이 DC 99V~116V사이에 존재하여 모두 기준치를 만족하였다.

이를 통해 개발된 보조전원장치의 성능이 양호함을 확인하였다[13]. 그림 9에서 그림 11까지 시험결과에서 100분~110분까지의 전압이 0으로 나타나는 것은 열차가 운행하지 않고 정지하여 보조전원장치의 가동을 일시적으로 멈추었기 때문에 나타난 결과이다.

3. 결 론

철도차량의 안전성과 승객 서비스 향상을 위해 핵심 전장품인 보조전원장치의 성능을 확인하는 것은 차량의 안전성과 신뢰성 확보를 위해 반드시 필요하다. 철도차량용 보조전원장치는 다른 산업용과는 달리 내노이즈성과 내진동성이 강해야 한다. 또한, 독일과 일본의 기술개발 사례를 통해서도 소형 경량화, 유지보수 편리성을 실현하기 위해 노력하고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서 개발한 보조전원장치는 200km/h급에 채용하기 위해 제작된 장치로 240kVA 용량을 가지고 있다. PWM 제어방식과 자연냉각방식을 채택하고 있다. 제어장치는 디지털 제어방식이고, Trace-Memory 기능을 탑재하여 고장

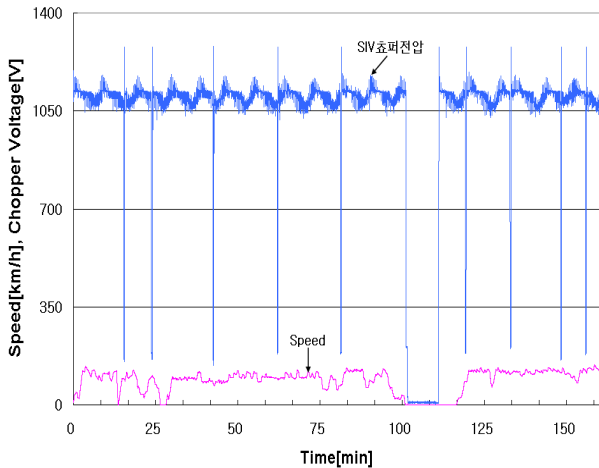


그림 9 보조전원장치 초퍼전압 파형
Fig. 9 The chopper voltage wave of auxiliary power supply

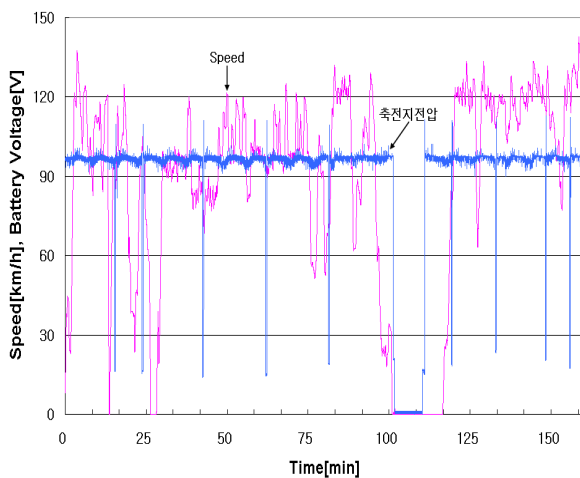


그림 10 DC 100V 출력전압 파형
Fig. 10 The output voltage wave of DC 100V

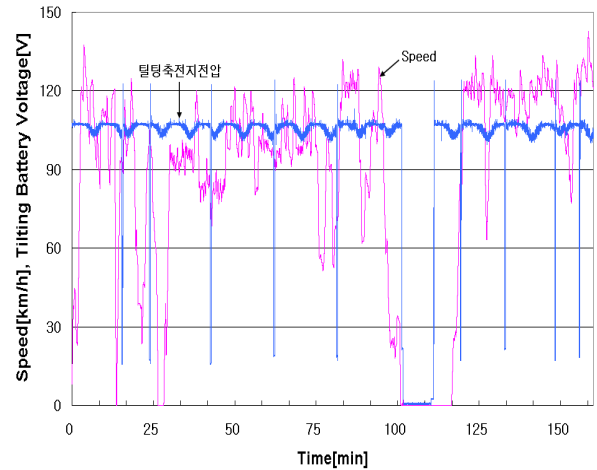


그림 11 DC 110V 출력전압 파형
Fig. 11 The output voltage wave of DC 110V

을 기록할 수 있다. 장치의 구성은 변압기, 정류회로와 초퍼회로, 전지 충전부 등으로 구성되어 있다. 제작된 보조전원장치에 대한 성능을 확인하기 위해 계측시스템을 구성하였다. 보조전원장치 입력전압, 출력전압 등을 T차에 설치되어 있는 배전반으로부터 입력받았다.

시뮬레이션을 통해 보조전원장치 기동시에 d축과 q축 전압 지령치를 실측치가 정상적으로 추정함을 볼 수 있었다. 또한, 부하 투입이나 차단시에는 선간전압과 전류 파형이 순간적으로 일그러지지만 금방 원상 복귀하는 것을 알 수 있었다.

한편, 실제 오송과 목포구간을 운행하며 성능을 확인한 결과, 보조전원장치 초퍼의 선간 전압이 기준치인 DC 1,150V $\pm 10\%$ 이내에 있음을 알 수 있었다. 출력전압의 경우에도 전 구간에서 5%~10% 범위로 기준치를 만족하는 것으로 분석되었다. 영업구간 내 시운전시험을 통해, 제작된 철도차량용 보조전원장치의 성능이 우수함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부에서 시행한 “한국형 틸팅 열차 신뢰성평가 및 운용기술개발사업”과 한국철도기술연구원 “철도차량 형식승인검사 사업”으로 수행되었습니다.

References

- [1] A. Ghosh, S. Devadas, K. Keutzer and J. White, “Estimation of Average Switching Activity in Combinational and Sequential Circuits,” *ACM/IEE Design Automation Conf.*, pp. 253-259, 1992.
- [2] Dmitri Vinnikov, Juhan Laugis, “An improved high-voltage IGBT-based half-bridge DC/DC converter for railway applications”, *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and*

Electronic Engineering, vol. 30, no. 1, pp. 280-290, 2011.

- [3] Jeong-Min Jo, Young-Jae Han, Chang-Young Lee, Jin-Ho Lee, Hyun-Seung Jeong, "Development of ultra lightweight static inverter for electrical multiple unit," *Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp. 1185-1187, 2012.
- [4] A.S. Noh, J.B. kim, K.H. Bae, etc., "A Study on Noise Reduction for Auxiliary Power Supply of Railway Vehicle Using IGBT," *The Korean Society for Railway*, pp. 280-286, 1998.
- [5] Diao Lijun, Chen Jie, Lin Wenli, Liu Zhigang, "Analysis and design for reducing voltage stress in output rectifier of LFLRV SIV DC-DC converter," *ISIE*, pp. 1077-1080, 2009.
- [6] Yang Chao, Tao Shenggui, Xie Weida, Zhuang Lingyun, "Research on novel development of static auxiliary system of Shanghai Metro Line 1," *IPEMC*, pp. 1421-1424, 2009.
- [7] Ma Fujun, Luo An, Wu Chuanping, Wu Jingbing, Wang Gang, Sun Juan, Zhang Yin, "The dual-loop control strategy of railway static power regulator for V/V electric traction system," *PEDG*, pp. 559-564, 2010.
- [8] Young-Jae Han, Jeong-Min Jo, Jin-Ho Lee, and Chul-Ung Lee, "The Trend Analysis of Technology Development for Auxiliary Power Supply of Electric Vehicle," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, vol. 16, no. 11, pp. 7957-7963, 2015.
- [9] KRRI, "SIV Technolohg for Lightweight," Prevention Consulting for Intellectual Property Dispute, 2014.
- [10] Jalakas, T., Vinnikov, D. and Laugis, J., "Development of 50kW Isolated DC/DC converter with high-voltage IGBTs," *Compatibility in Power Electronics (CPE 2007), Conference Publication*, Gdansk, pp. 1-6, 2007.
- [11] Bobert L. Steigerwald, "A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies," *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 3, no. 2, April 1988.
- [12] Haroen, Y., Dahono, P.A. and Sutanto, J, "A new type of DC-DC converter for rolling stock auxiliary power supply," *International Conference on Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth, Conference Publication, the Perth*, vol. 1, pp. 436-440, 1998.
- [13] Young-Jae Han, Jeong-Min Jo, Seong-Ho Han, and Su-Gil Lee, "A Study on SIV Characteristics of TTX(Tilting Train eXpress)," *2010 Fall Conference of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 2010.
- [14] "The Performance Test of Railway and Technology Development for Evaluation," *KRRI research report*, 2007.

저 자 소 개



한 영 재(韓咏材)

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



한 성 호(韓成浩)

1991년 2월 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1993년 2월 숭실대학교 대학원 전기공학과 석사 졸업. 1996년 3월 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사 졸업. 1996년 7월~현재 한국철도기술연구원 수석연구원



이 태 형(李泰亨)

1995년 건국대학교 졸업(학사), 1997년 건국대학교 대학원 전기공학과(석사), 2005년 건국대학교 대학원 전기공학과(박사), 현재 한국철도기술연구원 책임연구원



이 수 길(李壽吉)

1995년 숭실대학교 전기공학과 졸업(학사), 1997년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2009년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 한국철도기술연구원 책임연구원



이 영 호(李英鎬)

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