

8200대 전기기관차 Matlab 모델링 및 제어 알고리즘에 관한 고찰

A Study on the Matlab Modeling and Control Algorithm of 8200 Electric Locomotive

이 환* · 정 노 건** · 김 재 문†
 (Hwan Lee · No-Geon Jung · Jae-Moon Kim)

Abstract - In this paper, the converter and traction system of 8200 electric locomotive is modeled using matlab simulation module. And the characteristic was analyzed through simulation of the combined system of converter and inverter for controlling 8200 electric locomotive. The validity of the simulation was proved through performing unit power factor control of converter and speed control of inverter.

Key Words : Electric locomotive, Induction motor, Converter, Inverter, Speed control

1. 서 론

국내 철도분야에 화물 및 여객 수송의 많은 부분을 차지하고 있는 전기기관차는 노후화가 진행되고 있다. 그 중 8200호대 전기기관차는 해외에서 수입된 차량으로 운영기관의 핵심기술의 미확보로 차량 유지보수에 큰 어려움을 겪고 있다 [1][2]. 이로 인해 노후화 및 부품 단종에 따른 유지보수 비용이 계속하여 증가하고 있어 신뢰성을 기반으로 국산화 개발을 추진하고 있다. 국산화는 최근 많이 사용되고 있는 반도체 소자와 마이크로프로세서 적용을 통하여 경량화 및 융합기술을 적용한 시스템 개발이 이루어지고 있다. 따라서 다양한 방법의 모델링과 시뮬레이션을 통하여 그 특성을 예측하는 것이 중요하다.

본 논문은 8200호대 전기기관차 컨버터 및 견인시스템을 matlab 시뮬레이션의 모듈을 이용하여 모델링하였다. 또한 8200대 전기기관차를 제어하기 위한 컨버터와 인버터의 결합시스템의 시뮬레이션을 수행하여 그 특성을 분석하였다. 컨버터는 단위 역률제어를 통하여 모델링을 수행하였고 인버터는 유도전동기의 속도제어를 수행하여 시뮬레이션의 타당성을 입증하였다.

2. 시스템 구성

단상 컨버터를 이용하여 DC-Link의 전압 및 컨버터 입력단의

† Corresponding Author : Dept. of Transportation System Engineering, Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, Korea
 E-mail: goldmoon@ut.ac.kr

* Dept. of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation

** Dept. of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation, Korea

Received : December 5, 2016; Accepted : December 21, 2016

역률을 제어하고, 컨버터와 DC-Link를 공유한 인버터로 전기기관차의 동력을 제공하는 유도전동기를 제어하도록 구성되어 있다. 컨버터는 25[kV]의 AC전압을 변압기를 거쳐 1,231[V]의 AC전압으로 변압한 후 단상 컨버터를 통해 2,600[V]의 DC-Link 전압을 공급한다. 이 때, 회로의 구성은 승압을 위한 인덕터와 등가화된 저항 성분으로 구성된다. 컨버터는 DC-Link 전압 공급 외에도 입력단의 전압과 전류의 위상을 동상으로 하기 위한 단위 역률제어의 역할을 한다. 인버터는 컨버터에서 공급한 DC-Link 전압을 입력으로 하여 1,300[kW] 유도전동기에 전력을 공급한다. 본 연구에서는 제어의 타당성을 확인하기 위해 matlab 시뮬레이션의 모듈을 이용하여 모델링과 시뮬레이션을 수행하였다. 전체 시스템 구성도는 그림 1과 같고 또한 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같다.

2.1 PWM 컨버터

컨버터 제어기에서는 DC-Link 전압 제어 및 입력단의 단위

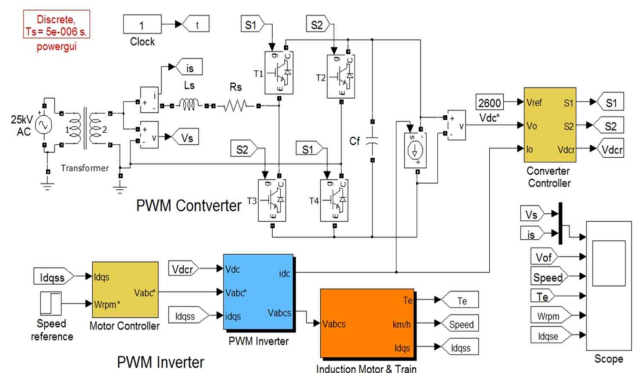


그림 1 전체 시스템 구성도

Fig. 1 Total system configuration

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameter

항 목	사 양
컨버터 스위칭 주파수	1.5 [kHz]
인버터 스위칭 주파수	1 [kHz]
샘플링 시간	5 [μs]
입력측 인덕터(Ls)	1 [mH]
입력측 저항(Rs)	8 [mΩ]
DC-Link 캐패시터(Cf)	8.2 [mF]

역률제어를 위해 컨버터 입력단의 전류제어를 한다. 전압 제어기는 PI제어기로 구성하였고, 이 때 제어기의 적분기 포화를 막기 위해 Anti-Windup 제어기를 포함시켰다. 전압 제어기의 지령값은 2,600[V]로 설정한다. 전류 제어기에서는 전압제어기의 출력전압을 컨버터의 입력 전류와 비교하여 PI제어를 한다. 따라서 단위 역률제어를 수행하게 된다. 교류 입력전압 1,231[V]를 받아 전압과 위상차가 π/2인 신호를 발생한다. 입력 전압이 $V_{in} = E \sin(\omega t)$ 일 때 차단주파수 ω_c 가 추정 각주파수($\hat{\omega}$)인 1차 LPF를 거치면 $\omega \approx \hat{\omega}$ 인 $E/\sqrt{2} \sin(\omega t - \pi/4)$ 경우가 된다. 그러므로 V_d^s , V_q^s 는 식 (1), 식 (2)와 같이 된다[3,4].

$$\begin{aligned}
 V_d^s &= V_{in} - 2 \times E/\sqrt{2} [\sin(\omega t - \pi/4)] \\
 &= E \sin(\omega t) - 2 \times E/\sqrt{2} [\sin(\omega t - \pi/4)] \quad (1) \\
 &= E \cos(\omega t)
 \end{aligned}$$

$$V_q^s = E \sin(\omega t) = V_{in} \quad (2)$$

동기좌표계 위상 제어기는 2상 전압 발생기에서 구한 V_d^s 와 V_q^s 를 이용하여 추정각주파수($\hat{\omega}$), 추정위상($\hat{\theta}$), 추정진폭(\hat{E})을 발생하는 부분이다. V_d^s 는 식 (3)와 같이 동기 좌표계로 변환한다.

$$V_d^c = E \cos(\hat{\theta} - \theta) \approx E \quad (3)$$

$V_d^s = E \cos \theta$, $V_q^s = E \sin \theta$ 이므로, $\hat{\theta}$ 와 θ 의 오차가 작은 경우에는 아래와 같은 식으로 근사화되어 V_q^c 를 0으로 제어하면 추정 위상각 $\hat{\theta}$ 는 θ 에 일치하게 된다.

$$V_d^c = E \cos(\hat{\theta} - \theta) \approx E \quad (4)$$

$$V_q^c = E \sin(\hat{\theta} - \theta) \approx E(\hat{\theta} - \theta) \quad (5)$$

전류 제어기 출력 전압을 최종적으로 1.5[kHz]의 캐리어파와 비교하여 스위칭을 결정하게 된다. 컨버터 제어기의 구성도는 그림 2와 같다.

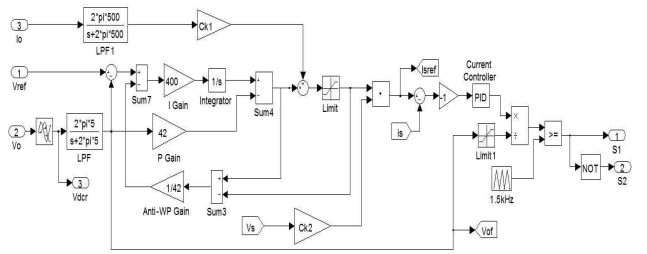


그림 2 컨버터 제어기 구성도
Fig. 2 Configuration of converter controller

2.2 PWM 인버터

2.2.1 인버터 모델링

본 연구에서는 인버터를 수학적으로 모델링을 수행하였다. 전동기 제어기에서 출력한 상전압 지령을 인버터의 스위칭 주파수 1[kHz]의 삼각파와 비교하여 실제 전동기에 인가되는 상전압을 형성한다. 사용한 PWM 방식은 공간 벡터 전압 변조(SVPWM) 방식을 사용하였다. SVPWM은 주어진 직류 전압 하에서 가장 큰 교류 전압을 얻을 수 있는 기법으로써 전동기의 출력 전류나 토크에 포함된 고조파가 다른 변조 방식보다 적다는 장점으로 인하여 가장 널리 사용되고 있는 방식이다. 인버터 모델링 구성도는 그림 3과 같다.

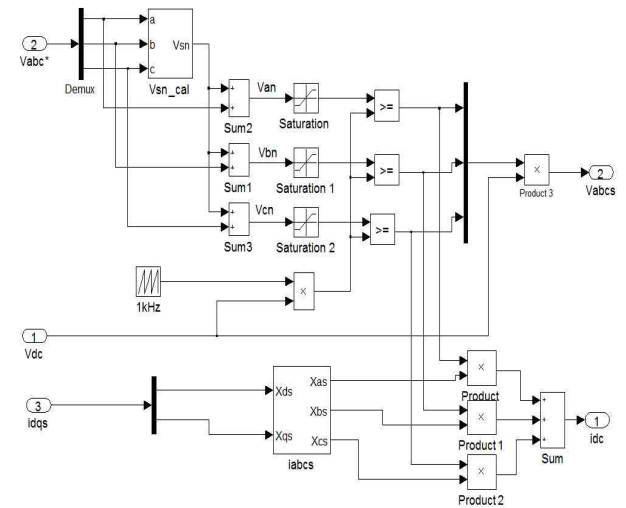


그림 3 인버터 모델링 구성도
Fig. 3 Configuration of inverter modeling

2.2.2 유도전동기 및 전기기관차 모델링 모델링

그림 4는 유도전동기의 d, q축 등가 모델링과 전기기관차를 기계적 시스템으로 모델링한 구성도이다. 이를 통하여 속도 응답 특성을 확인할 수 있다.

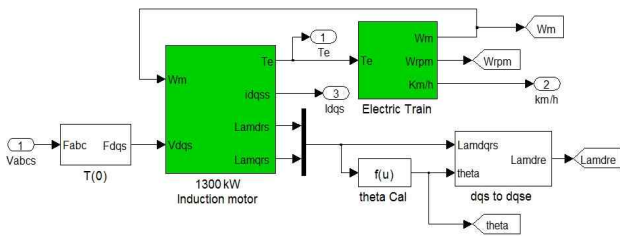


그림 4 유도전동기 및 전기기관차 구성도
 Fig. 4 Configuration of induction motor and electric locomotive

유도전동기를 d, q축으로 등가화하여 수식으로 구현하였다. 인버터 모델링으로부터 결정된 전압을 구현된 수식에 연산하여, 출력 전류와 토크, 자속각(θ)을 확인할 수 있다. Induction Motor 구성도는 그림 5와 같다[5].

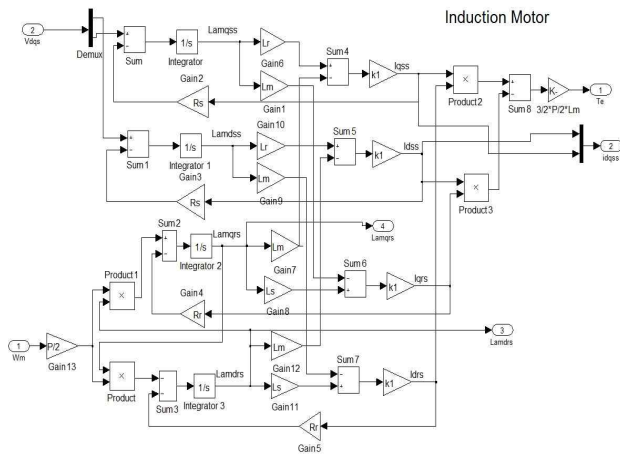


그림 5 유도전동기 구성도
 Fig. 5 Configuration of induction motor

본 연구에서는 전기기관차를 기계적 시스템으로 수학적 모델링하여 전동기에서 전달된 토크를 바탕으로 부하시스템의 운동방정식에 적용하여 전기기관차의 속도를 계산하였다. 전기기관차의 구성도는 그림 6과 같다.

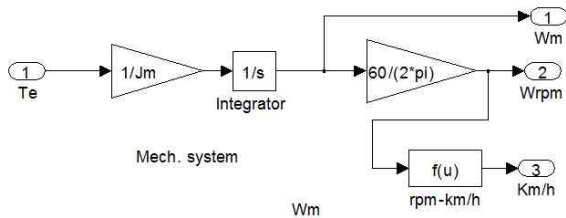


그림 6 전기기관차 구성도
 Fig. 6 Configuration of electric locomotive

3. 시뮬레이션

3.1 컨버터 입력단 전류 제어

그림 7은 컨버터 입력 전압 및 전류파형이다. 이를 분석하면 부하가 작은 경우에는 전류의 크기가 작기 때문에 뚜렷하게 나타나지 않지만, 표시된 부분은 인버터에서 유도전동기를 구동하기 위해 전력을 사용하는 부분이기 때문에 전압과 전류의 위상이 동상으로 제어되며 단위 역률 제어를 수행하고 있음을 확인할 수 있다.

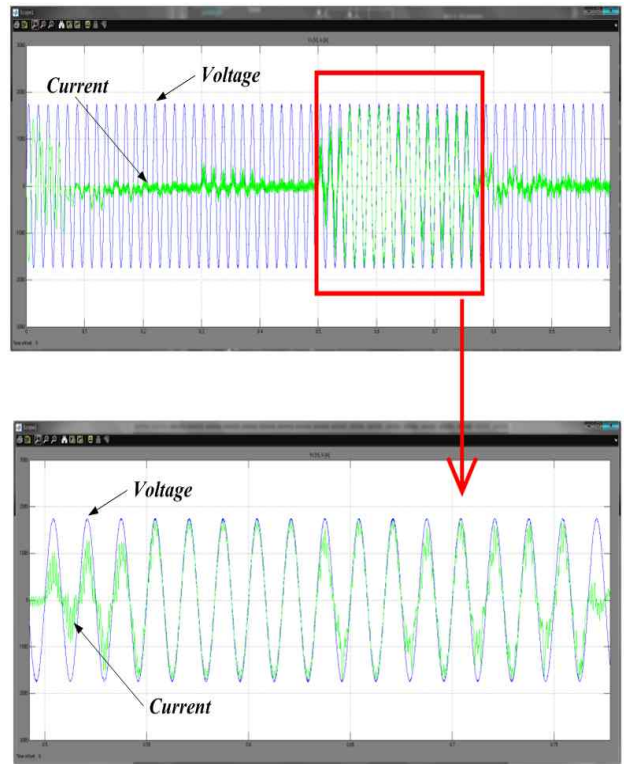
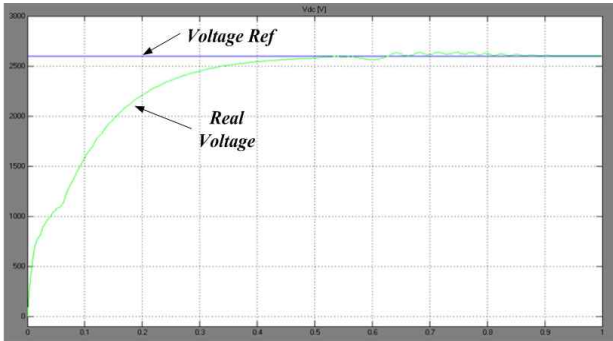


그림 7 컨버터 입력 전압 및 전류 파형
 Fig. 7 Input voltage and current waveform of converter

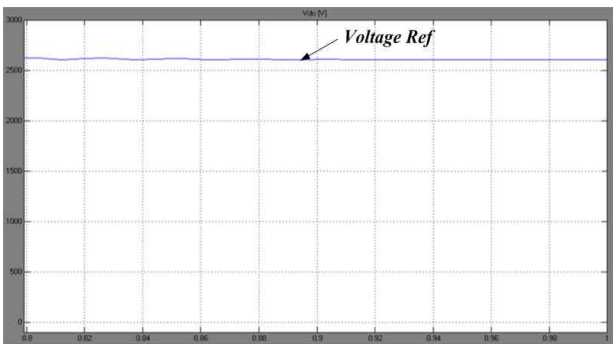
3.2 DC link 전압 및 인버터 전류 제어

그림 8(a)에서 DC link 전압이 지령 전압(V_{dc}^*) 2,600[V]를 추종하고 있다. 또한 그림 8(b)와 같이 정상상태에서도 전압을 유지하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 컨버터의 전압제어가 잘 이루어짐을 확인하였다.

그림 9와 같이 전류 제어기에서 각각 d축은 전류지령치에 따라 실제 d축 전류가 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다. q축 전류 또한 전류지령치에 잘 추종되고 있는 형태를 확인할 수 있다.



(a) DC link 전압 파형



(b) DC link 전압 파형(정상상태)

그림 8 컨버터 출력 전압

Fig. 8 Output voltage of converter

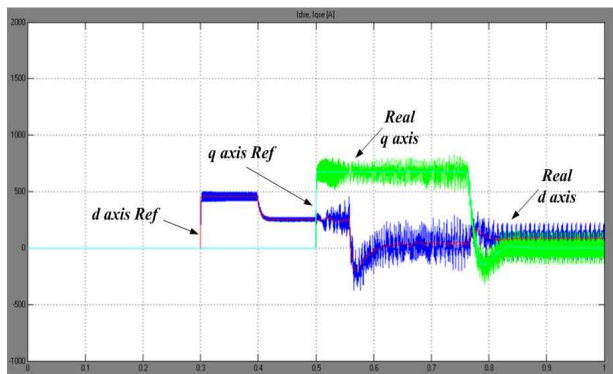


그림 9 d, q축 전류 제어

Fig. 9 Current control of d and q axis

3.3 전동기 속도 제어

그림 10을 보면 전동기의 속도 지령 3,750[rpm]을 PI제어기의 응답특성에 따라 추종되고, 속도 응답이 안정화 되는 것을 확

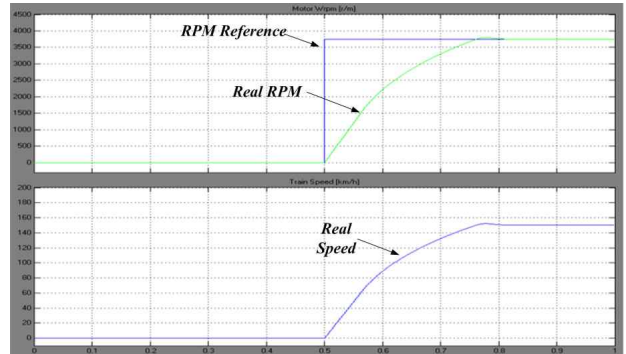
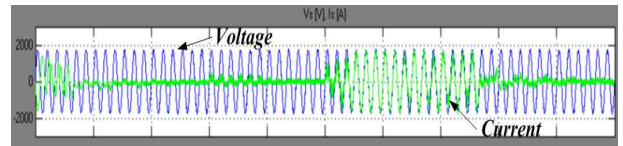
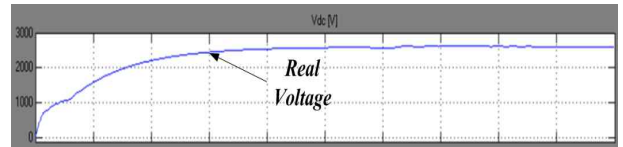


그림 10 전기기관차의 속도 제어

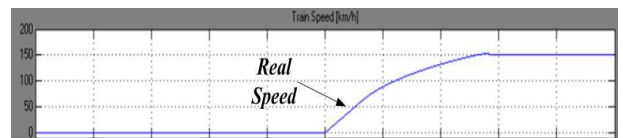
Fig. 10 Speed control of electric locomotive



(a) 컨버터 입력전류



(b) DC-Link 전압



(c) 8200대 전기기관차 속도

그림 11 전기기관차의 시뮬레이션 파형

Fig. 11 Simulation waveform of electric locomotive

인할 수 있다. 이때의 전기기관차 속도는 150[km/h]이다. 시뮬레이션 시간의 간소화를 위해 실제 전동기의 관성 값을 임의의 값으로 줄여서 사용하였다[6].

3.4 시뮬레이션 및 현차시험 결과 비교

모델링의 따른 시뮬레이션 결과와 현차시험 결과 비교를 통하여 모델링의 타당성을 분석하고자 한다. 그림 11은 8200대 전기기관차의 시뮬레이션 파형을 나타내었으며 그림 12는 동일 모델 차량의 현차 시험 결과를 나타내었으며 시험은 0→150[Km/h]의

최고속력 시험의 결과이다. 컨버터의 입력전압은 약 1,300[V]로 동일하게 출력되었다. 반면 시뮬레이션의 컨버터 입력전류는 속도가 상승하는 시점에서 최대 약 1,450[A]로 나타났으며 현차시험에서는 1,600~2,000[A]의 출력이 발생되었다. 이는 현차시험의 경우 구배 등의 주행 중 발생하는 기타 부하 변동 때문에 발생하는 오차이다.

또한 DC-Link의 전압은 시뮬레이션에서는 2,600[V]를 추종하였으며 현차 시험에서는 2,400~2,600[V]의 전압 변동 폭을 보였다. 이는 현차에 적용되는 GTO소자의 스위칭 주파수보다 시뮬레이션의 적용된 스위칭 주파수가 더 높고 시뮬레이션 부하변동 폭이 더 작아서 발생하는 현상이다. 시뮬레이션에서 더 높은 주파수를 사용한 이유는 향후 국산화에 적용되는 소자는 IGBT로 GTO소자에 비하여 더 높은 주파수를 적용할 수 있기 때문이다. 8200대 전기기관차 모델링에 대한 시뮬레이션과 현차시험을 비교한 결과 부하에 따라 10[%] 정도의 오차가 발생하지만 제어 성능 측면에서 모델링이 잘 되었음을 확인할 수 있다.

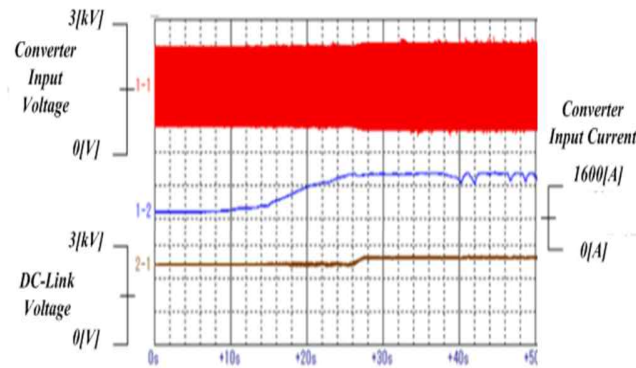


그림 12 전기기관차의 현차시험 (0→150[km/h]→0)

Fig. 12 Field test of electric locomotive

4. 결 론

본 논문은 8200호대 전기기관차를 모델링하고 시뮬레이션을 통해 컨버터 및 인버터 제어에 따른 응답특성을 분석하였다. 컨버터의 입력 전압, 전류를 확인하여 단위 역률 제어 양상을 확인하였고 DC-Link 전압이 2,600[V]로 제어되고 있는 양상을 확인할 수 있다. 또한 전기기관차의 유도전동기의 제어가 3,750 [rpm]으로 속도로 환산하면 150[km/h]로 잘 제어되고 있음을 확인하였고 이에 따른 d, q축 전류제어 양상을 확인할 수 있었다. 또한 8200대 전기기관차 모델링에 대한 시뮬레이션과 현차시험 결과비교를 통하여 모델링이 잘 되었음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 국토교통과학기술진흥원에서 지원하
는 철도기술 연구사업 중 '전기기관차(8200호대) 주변환장
치 및 종합제어장치 실용화 기술개발' 과제의 지원을 받아
이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] Bo-Young Park, "Structure and Function of Electric Locomotive", Korail Human Resources Development Center, pp.430-439, 2006
- [2] No-Geon Jung, Jae-Moon kim et al, "Response Characteristic Analysis using Modeling of Propulsion System for 8200 Electric Locomotive", The Transactions of KIEE, Vol 62, No. 11, pp. 1640-1646, 2013
- [3] No-Geon Jung, Jae-Moon kim et al, "A Study on Powering Characteristic on Speed Variation of Propulsion System of Prototype 8200 Electric Locomotive", The Transactions of KIEE, Vol 63, No. 10, pp. 1467-1472, 2014
- [4] Yong-seok Lee et al., "Performance Comparison of Single-Phase PLL Algorithms Using Virtual 2-Phase Strategy", Journal of KAICS, Vol. 8, No. 2, pp. 219-225, 2007
- [5] Byoung-Gun Park et al, "An Improved Feed-Forward Controller for the Parallel Operation of a Single-Phase PWM Converter in High-Speed Trains", Journal of KIPE, Vol. 15, No. 3, pp. 226-234, 2010
- [6] Sang-Hun Kim, DC, AC, BLDC motor control, Bogdo, 3th edition, 2012

저 자 소 개



이 환 (Hwan Lee)

2014년 한국철도대 철도차량전기와 졸업.
2015년~현재 한국교통대 교통대학원 교통시
스템공학과 석사과정



정 노 건 (No-Geon Jung)

2012년 한국철도대 철도차량전기와 졸업.
2015년 한국교통대 교통대학원 교통시스템
공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 교통시스
템공학과 박사과정



김 재 문 (Jae-Moon Kim)

1994년 성균관대 전기공학과 졸업. 2000년 2
월 동 대학원 졸업(공학). 2000년~2004년 현
대모비스(주) 기술연구소 선임연구원. 2006
년~현재 국토교통부 철도기술 전문위원, 2004
년 3월~현재 한국교통대학교 교통대학원 교통
시스템공학과/철도전기전자공학과 교수
E-mail : goldmoon@ut.ac.kr