

AC 및 DC 전력공급구간 운전을 위한 도시철도용 추진제어시스템의 구조 및 제어 알고리즘 개발

이창희¹, 이 주[†]

Development an Structure and Control Algorithm of Propulsion Control for Driving Railway Vehicle in Both AC and DC Power Supply Section

Chang-Hee Lee¹ and Ju Lee[†]

Abstract

This study proposes a AC/DC railway vehicle control algorithm that enables simultaneous driving of AC and DC power supply sections. In the Seoul metropolitan region, trolley voltage for railway vehicle is divided into AC and DC power supplies. Therefore, AC/DC railway vehicle algorithm is essential for driving on the outskirts of the region. This study analyzes resonance and beat phenomena for simultaneously running in AC and DC power supply sections, and proposes a control algorithm for railway vehicles with the application of damping and beatless controls based on this analysis. The performance of the proposed algorithm is verified by simulation and analysis of actual driving results.

Key words: Inverter, Converter, Railway vehicle, Damping control, Beatless control, AC/DC converter

1. 서 론

철도차량은 과거부터 현재까지 널리 이용되고 있는 대표적인 운송수단이다. 또한 매년 강화되는 국제 환경 규제에도 만족하는 친환경 전기차량으로 앞으로도 지속적인 성장, 발전을 기대할 수 있는 운송 수단이다. 따라서 세계 각 국에서 더욱 빠르고 안전한 철도차량 개발을 지속적으로 진행하고 있으며, 운행 구간을 광범위하게 늘리고 있는 추세이다^{[1],[2]}.

대한민국 수도권에 구성된 철도차량용 배전은 AC와 DC 전력공급구간으로 나뉘어져 있다. 서울 내부는 DC 배전으로 구성되어 DC 추진제어장치(VVVF 인버터)로만 구성된 차량으로 운행이 가능하지만 수도권 바깥의 지역까지 운행되는 차량의 경우 AC 및 DC 전력공급구간 모두 주행이 가능하도록 구성된 철도차량만 운행이 가능하다.

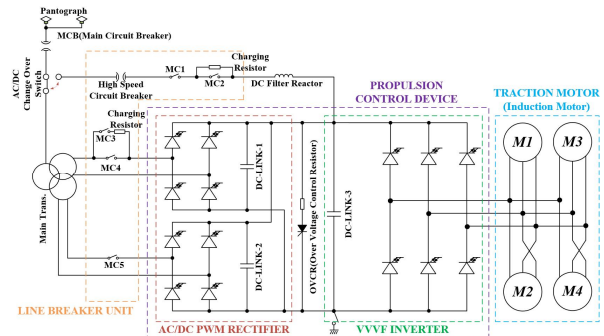


Fig. 1. Structure of propulsion control system for AC/DC railway vehicle.

AC/DC 철도차량은 DC 차량에 비해 기구적으로 복잡한 구조로 설계되며 차량 무게도 증가한다. 또한, 운전 시 고려해야 할 사항도 많아지며 추가적인 부품도 많아져서 유지보수에 필요한 비용도 증가하며, 각 전력공급구간에 적합한 제어 방법이 적용되어야 하므로 시운전 검증 기간을 포함한 전체 개발 기간이 길어지는 단점이 존재한다.

하지만 전력공급구간의 제약 없이 연장된 운행 구간에서 적용할 수 있다는 장점이 있으며, 서울에서부터 경기지역까지 운행을 위한 AC/DC 철도차량을 위해 각 구간에 대한 제어 알고리즘 개발은 필수적이다.

본 논문에서는 AC/DC 철도차량 운행을 위한 각 전력 공급구간에서 주행 시 발생하는 문제점 분석과 이를 보완하기 위한 인버터 제어 방법에 대하여 기술한다. 또한 서울지하철 1호선 및 4호선에 적용한 사례를 기준으로 제어 방법의 타당성과 성능을 주행기록을 통하여 검증한다.^{[3]-[5]}

2. 본 론

2.1 철도차량용 추진제어장치의 구조

AC/DC 철도차량용 추진제어장치의 구성은 그림 1과 같다.

추진제어장치는 판토타이프를 통하여 전력공급선의 전원을 공급받는 구조로 AC 전력공급구간의 경우에는 단상 25[kV]의 전압을 공급받게 된다. 그리고 3권선 주 변압기를 거쳐서 약 855[V]로 강압되고 2병렬로 구성된 단상 AC/DC PWM 컨버터를 이용하여 DC 1650[V]로 제어된다. 따라서 단상 AC/DC PWM 컨버터는 인터리빙 제어를 통하여 입력 전원의 고조파 성분을 줄임으로써 전원 품질을 유지하고 역률 제어를 통하여 전력변환 효율을 높이는 역할을 수행한다. 또한 다양한 운전 상황에서 DC 1650[V]를 유지하는 정전압 제어도 수행하게 된다. 단상 AC/DC PWM 컨버터의 구동으로 DC 1650[V]가 안정적으로 확보되면 VVVF 인버터의 구동으로 4개의 견인전동기가 구동된다. 이러한 구조를 1C4M(1Controller 4Motors)구조라고 부른다. 견인전동기는 유도전동기가 사용되며 개당 200[kW](연속정격)의 용량을 갖는다.

DC 전력공급구간의 경우에는 AC 전력공급구간과 마찬가지로 판토타이프를 통하여 DC 1500[V]를 공급받는다. 입력 전원은 필터 리액터(8[mH])를 거쳐 DC-LINK(Filter Capacitor Bank)로 바로 인가되며 고장신호가 발생하지 않으면 인버터가 동작되어 전동기의 구동이 진행된다. 여기서 보통 전력공급원의 특성상 DC 900[V] ~ 1800[V] 사이의 입력전원 변동이 생긴다.

2.2 AC 및 DC 전력공급구간에서 발생하는 문제점

철도차량이 주행을 하고 있다는 것은 추진제어장치의 인버터가 구동되고 있음을 의미한다. 따라서 인버터의 제어 성능이 차량 구동 성능에 가장 큰 영향을 미치게 된다. AC 전력공급구간에서는 단상 PWM 컨버터가 함께 구동되기 때문에 컨버터의 제어 성능도 매우 중요한 요소이다.

철도차량용 추진제어장치 내의 두 가지 전력변환장치를 연결해주는 DC-LINK는 인버터의 전압원으로 이용된다. 즉, DC-LINK의 전압이 일정한 값으로 유지가 되어야 인버터의 제어 성능을 최대로 활용할 수 있다. 그러나 전력변환장치와 주요 부품들의 특성으로 인하여 AC 및 DC 구간에서 DC-LINK가 불안정해지고 결국

인버터 출력을 불안정하게 만들어 제어 성능을 악화시키는 문제점들이 있다. 본 절에서는 추진제어장치의 DC-LINK에 발생하는 전압 변동이 인버터 제어 성능에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

AC 전력공급구간에서 차량이 운전되는 경우 단상 AC/DC PWM 컨버터의 구동으로 인하여 DC-LINK에 계통전원 주파수의 2배인 120[Hz]의 주기적인 전압변동이 발생한다.^[6]

식 (1)은 DC-LINK에 발생하는 평균전력을 나타낸다.

$$P_{dc,avr} = \left(\frac{V_c I_s}{2} \right) \cos \Phi \quad (1)$$

여기서 V_c 는 DC-Link 전압, I_s 는 직류단에 흐르는 전류, Φ 는 리액턴스 성분으로 인한 위상 지연을 나타낸다. DC-LINK 평균전력으로부터 전력 변동분을 표현하면 식 (2)와 같다.

$$\Delta P_{dc} = \left(\frac{V_c I_s}{2} \right) \cos(2\omega t - \Phi) \quad (2)$$

여기서 ω 는 계통 전원 각주파수를 나타낸다.

또한 DC 전압의 평균치를 $V_{dc,avr}$ 이라고 정의하고 DC-LINK에 흐르는 전류를 근사화하면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_c &= \left(\frac{\Delta P_{dc}}{V_{dc,avr}} \right) \\ &= - \left(\frac{P_{dc,avr}}{V_{dc,avr} \cos \Phi} \right) \cos(2\omega t - \Phi) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 DC-LINK에 흐르는 전류의 크기는 전력 변동분 ΔP_{dc} 크기와 비례함을 확인할 수 있다. 따라서 식 (2)와 (3)의 관계로부터 DC-LINK 전압 맥동 성분의 크기를 정의하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta V_{dc} &= \frac{1}{C_{dc}} \int i_c dt \\ &= \frac{-P_{dc,avr}}{2 \cos \Phi V_{dc,avr} \omega C_{dc}} \sin(2\omega t - \Phi) \\ &= -\Delta V_{dc,pk} \sin(2\omega t - \Phi) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\Delta V_{dc,pk}$ 는 DC-LINK 전압 맥동의 최대치를 의미한다.

전압 변동의 크기는 120[Hz] 주기로 DC-LINK 커패시턴스와 반비례하고 전류량에 비례하는 것을 식 (4)를 통하여 확인할 수 있다. 또한 AC/DC PWM 컨버터의 정전압 제어가 정상적으로 수행되고 있는 상황에서 DC-LINK의 전류가 증가한다는 것은 인버터의 출력이 증가하고 있다는 것을 의미한다. 이것은 넓은 운전 속도 영역과 철도차량 부하의 변동 특성을 고려하였을 때

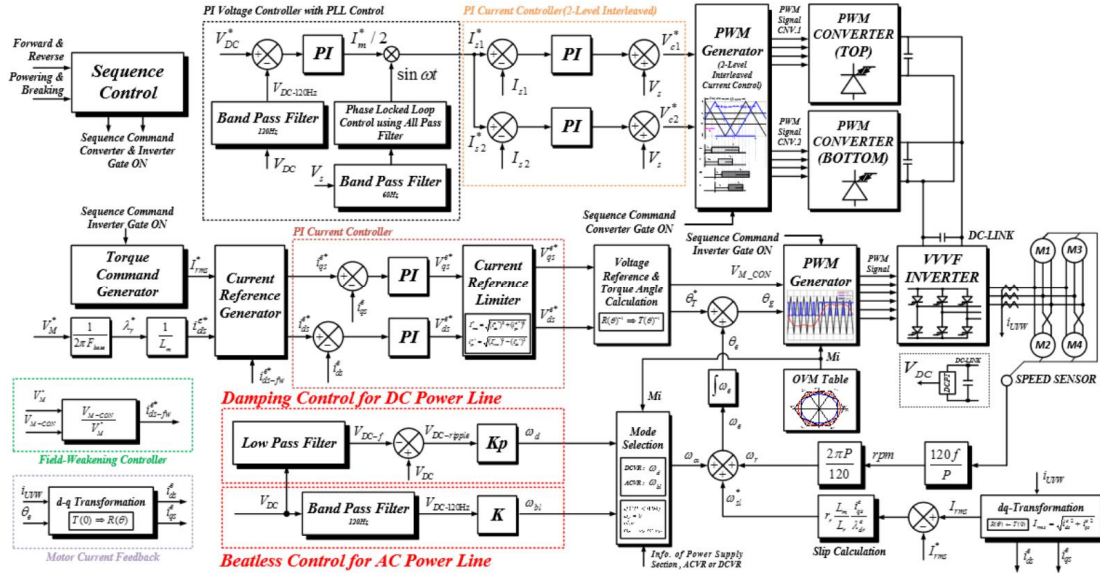


Fig. 2. Control block diagram of proposed algorithm.

DC-LINK의 전압 변동이 차량 운전 속도와 비례하는 것을 알 수 있다.

이론적으로 추진제어장치의 DC-LINK 커패시턴스를 증가시켜 전압 맥동을 줄일 수 있지만 실제로 사용되는 고전압용 필터 커패시터의 사양 및 공간 제약으로 인하여 늘릴 수 있는 용량의 제한이 생기는 문제점이 있다. 위와 같은 DC-LINK의 전압 변동은 결국 DC-LINK의 전류 맥동을 증가시키고 이러한 현상은 인버터 출력 주파수와 밀접한 관계가 있다.

식 (5)는 DC-LINK 기본과 성분에 대한 맥동 성분의 비율을 나타낸다.

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V_{dc}}{2V_{dc}} \quad (5)$$

식 (5)의 ε_v 을 줄이기 위해서는 인버터의 제어를 통하여 개선시켜야 한다. 식 (6)은 유도전동기 부하를 갖는 인버터 출력 기본과 성분에 대한 맥동 성분의 비율을 나타낸다^[7].

$$\mu = \frac{(\varepsilon_v/2) [1/Z_I(\omega_i - 2\omega)]}{1/Z_I(\omega_i)} = \frac{Z_I(\omega_i)}{2Z_I(\omega_i - 2\omega)} \varepsilon_v \quad (6)$$

견인전동기로 사용되는 유도전동기의 임피던스는 주파수와 매우 밀접한 관계가 있다. 여기서 ω_i 는 인버터 출력 주파수를 의미하며 ω 는 계통의 기본과 주파수 60[Hz]를 의미한다. 그리고 Z_I 는 유도전동기의 임피던스 성분을 의미한다. 즉, 2ω 는 DC-LINK에 발생하는 맥동 주파수가 되며 인버터 출력 주파수가 2ω 인 120[Hz]가 되는 시점에서 유도전동기의 임피던스는 0에 수렴하게 되어 μ 는 무한대가 된다. 따라서 인버터 출력 전류에 매우 큰 맥동 전류가 발생하게 되는데 이러한 현상을 비트 현상이라고 한다. 비트 현상은 매우 큰 토크 맥동

을 발생시켜 진동 및 소음으로 인하여 차량 운전 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 비트 현상은 AC/DC PWM 컨버터가 함께 구동되는 AC 전력공급구간에서 발생하게 된다^{[8],[9]}.

DC 전력공급구간에서는 그림 1에서 DC 리액터의 인덕턴스 성분과 DC-LINK의 커패시턴스에 의한 L-C 공진 현상이 발생하게 된다. 이러한 문제는 DC-LINK의 맥동을 증가시키는 원인으로 작용하여 결과적으로 비트 현상과 동일한 문제점을 발생시키게 된다.

비트 현상으로 인한 문제점을 보완하기 위해서 인버터와 견인전동기 사이에 리액터를 추가적으로 설치하는 방법 및 공진 필터를 DC-LINK에 병렬 연결하여 맥동의 크기를 제한하는 방법 등이 연구되었으나 인버터 제어 방법으로 개선시킨 결과에 비하여 제작비용 증가, 장치의 단위 무게 증가 등의 단점으로 현재 활용하지는 않는다^[6]. 이러한 비트 현상을 저감하기 위한 대책으로 일본에서 인버터 주파수를 가변 시키는 제어 방법이 연구되었다^[7]. 이러한 제어 방법을 비트리스 제어라고 한다. 본 논문에서는 AC 전력공급구간에서 비트 현상 저감을 위한 비트리스 제어 방법과 DC 전력공급구간에서 공진 현상 저감을 위한 댐핑 제어 방법을 서울 1호선 및 4호선 철도차량에 적용하였으며 1호선 주행시험을 통하여 제어 성능을 확인하였다.

2.3 AC 및 DC 추진제어장치의 제어 방법

실제로 철도차량의 운전을 위해 필요한 제어 요소들이 많으나 본 논문에서는 앞에서 설명한 L-C 공진 및 비트 현상에 대응하기 위한 인버터 제어 방법과 DSP-FPGA 제어알고리즘 설계에 대해서 기술하였다.

그림 2는 AC/DC 철도차량용 추진제어장치의 전체 시스템 알고리즘 제어 블록도를 나타낸다. AC구간에서는 컨버터를 통해 AC 입력을 DC 전원으로 변환하게 된다.

여기서 유도성 부하로 인해 DC-LINK 전압에 공진현상이 발생하게 되는데 이를 제거하기 위해 Band Pass Filter를 이용하여 공진성분을 추출하고, 추출된 성분을 전압제어 q축 지령전압에 보상함으로써 해결한다. 이때, Band Pass Filter의 대역폭은 아래의 식 (7)을 이용하여 구할 수 있다^{[10]-[12]}.

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

여기서, L은 입력단 인덕터(DC Filter Reactor)이며 C는 DC-LINK 캐패시터(그림 1에서 DC-LINK 1,2,3)이다.

그림 2의 AC/DC 철도차량용 추진제어장치의 인버터 제어 블록도를 보면, 정방향 또는 역방향 신호와 기동 및 정지 신호의 입력에 따라 토크 지령이 출력되며 이는 전동기의 상전류 지령을 발생시킨다. 또한 필요한 자속 발생을 위한 d축 전류 지령이 발생되는데 이 값에 따라서 q축 전류의 출력 범위가 제한된다. 실제 인버터 출력 전류를 피드백 받아 d-q 변환을 이용하여 토크와 자속을 독립적으로 제어하는 벡터제어를 수행하게 되며 전류 제어기를 거쳐 전압 지령을 발생시키게 된다. 전압 변조 방식은 SPWM 방식을 이용하며 고속 구간에서는 과변조 테이블로부터 변조지수 MII를 반영하는 테이블 기준 제어를 한다.

인버터 제어 블록도에서 주목해야할 점은 DC-LINK의 DCPT(Direct Current Potential Transformer)로부터 받은 전압 정보를 이용하여 인버터의 출력 주파수를 조정하는 부분이다. DC 가선에서는 DC-LINK 전압 정보와 LPF를 거친 DC-LINK 전압 정보를 비교하여 DC-LINK 전압 맥동 성분을 검출한다. 여기에서 현장 상황에 맞게 튜닝을 통해 일정 이득값을 반영하여 슬립 주파수 지령에 가산해 줌으로써 L-C 공진에 의한 DC-LINK 맥동에 대응할 수 있다. 이러한 제어 방법을 댐핑 제어라 정의한다. DC 전력공급구간에서 인버터 출력 주파수 지령은 식 (8)과 같다.

$$\omega_e = \omega_r + \omega_{sl}^* + \omega_d \quad (8)$$

여기서 ω_e 는 지령 각주파수, ω_r 는 회전자 각주파수, ω_{sl}^* 는 슬립 각주파수, ω_d 는 DC 전력공급구간에 대한 댐핑 보상 성분을 나타낸다.

AC 전력공급구간에서는 DC-LINK의 전압 정보를 BPF를 이용하여 120[Hz]의 맥동 성분을 검출한다. 120[Hz]의 맥동 성분에 일정 이득값을 반영하여 슬립 주파수 지령에 더해지면 인버터 출력 주파수와 유도전동기의 임피던스 성분에 의한 맥동의 크기에 대응하여 인버터 출력 주파수를 미세하게 가변 시켜 비트 현상을 억제할 수 있다. AC 가선에서 인버터 출력 주파수 지령은 식 (9)와 같다.

$$\omega_e = \omega_r + \omega_{sl}^* + \omega_M \quad (9)$$

TABLE 1
SPECIFICATIONS OF PROPULSION CONTROL SYSTEM
FOR RAILWAY VEHICLE(LINE1, SEOUL METRO)

Contents		Specification
1	Control	Converter Single phase voltage source PWM converter
2		Inverter Three phase voltage source VVVF inverter
3	Input	DC1500[V] (900~1800[V]) AC25[kV](20[kV]~27.5[kV]), 60[Hz]
4	Converter	Input AC 855[V] x 2 circuit
		Output DC 1650[V] / 904[kW](1350[kW])
		Switching frequency 420[Hz]
5	Inverter	Output 0 ~ 1100[V] (DC Line) 0 ~ 1250[V] (AC Line) / 960[kVA](1650[kVA])
		Frequency 0 ~ 160[Hz]

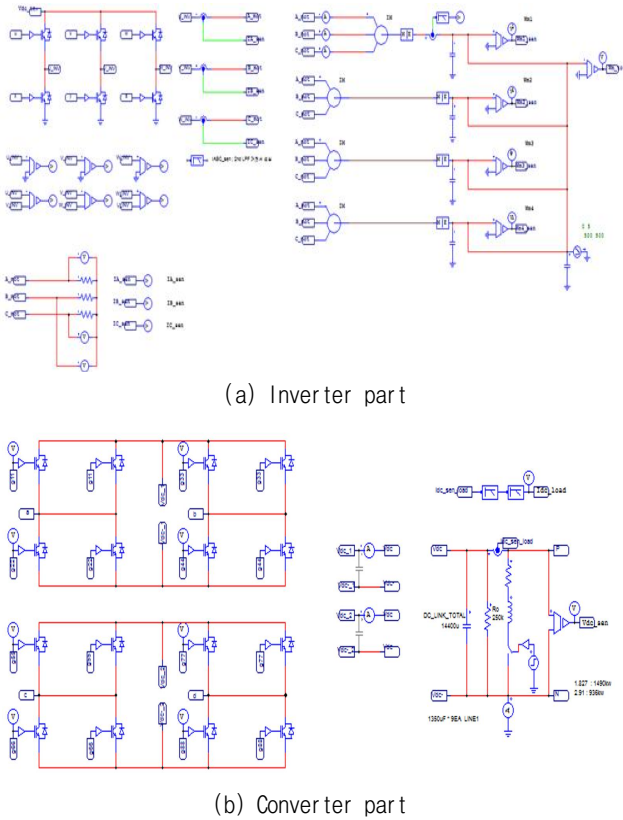
여기서 ω_M 은 AC 전력공급구간에 대한 비트리스제어 보상 성분을 나타낸다.

식 (6)에 의하여 이론적으로 전 속도 영역에서 비트현상이 발생하지만 유도전동기의 임피던스가 0에 가깝게 수렴하여 맥동이 가장 커지는 120[Hz] 운전 영역 부근에서 비트리스 제어가 수행되도록 본 논문에서는 변조지수가 0.94를 초과하는 시점부터 식 (9)의 출력 주파수 지령을 출력하도록 하였다. 변조지수가 0.94 이상이라는 기준값은 실험적 선정값이다. 철도차량은 인버터 출력주파수가 120Hz에 도달하기 전에 과변조제어로 진행되기 때문에 전압변조의 선형성이 보장되지 않고 작은 비트현상에도 큰 맥동을 야기할 위험이 있기에 과변조제어 앞인 변조지수 0.94인 값에서부터 비트리스제어 알고리즘을 적용한다. 이득값의 크기는 가감산되는 출력 주파수의 크기와 비례하게 되는데 이 값에 의해서 제어 성능이 결정되므로 선정에 주의해야 한다.

DSP에서 수행된 제어연산 파라미터 및 전압지령을 입력받아 최종 PWM 제어를 수행하기 위해 FPGA를 설계하여 이용하게 된다. DSP로부터 출력된 전압지령은 FPGA 로직에 입력되고 게이트제어 알고리즘 및 데드타임이 반영되어 최종 PWM 신호가 만들어진다.

컨버터는 1군과 2군이 인터리빙 전류제어를 수행하기 때문에 각각 전기각 90° 만큼 위상천이 된 삼각파를 발생시키고 삼각파를 기준으로 발생하는 인터럽트 시점에서 노치지령신호를 동기 시켜 제어를 시작하게 된다.

본 논문에서는 제어 성능을 비교분석 하기 위하여 시뮬레이션을 이용하였으며, 실제 차량에 적용 후 주행기록을 통하여 타당성을 검증하였다.



(a) Inverter part

(b) Converter part

Fig. 3. Simulation circuit.

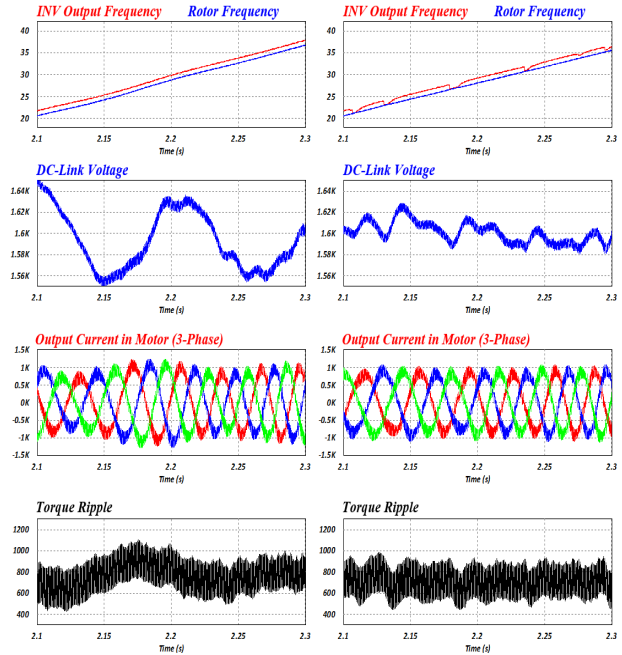
표 1은 서울 1호선 철도차량용 추진제어장치의 사양을 나타내고, 그림 3은 시뮬레이션 진행을 위한 회로도 를 나타낸다. 그림 3의 (a)는 인버터 부를 나타내며 1C4M(1개의 제어기로 4개의 모터 구동) 구성을 나타낸다. 그림 3의 (b)는 직류단 전압제어를 위한 컨버터 부를 나타낸다.

본 절에서는 표 1과 같이 실제 차량의 사양과 동일한 환경을 시뮬레이션으로 구성하였으며, 그림 2와 같이 제어 알고리즘을 적용하였다. 시뮬레이션은 Powersim사의 Psim tool을 이용하였다.

3. 시뮬레이션

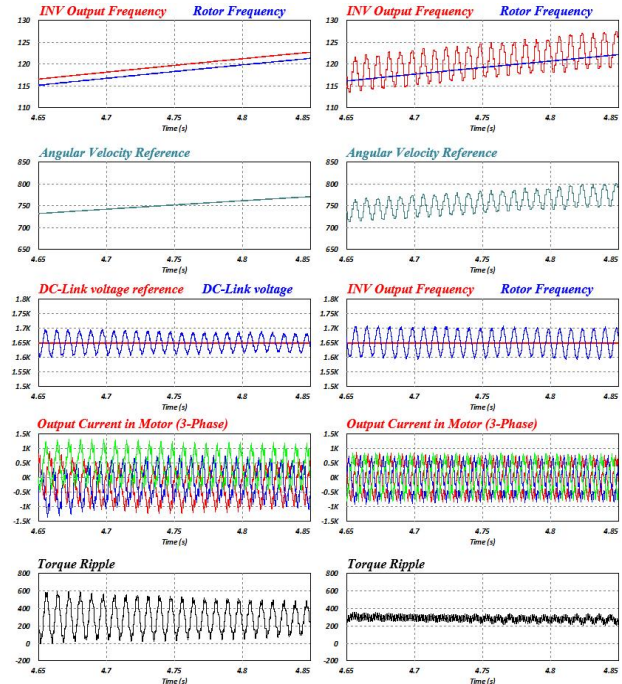
그림 4는 DC 전력공급구간에서의 시뮬레이션 결과이다. DC 리액터(8mH)와 DC-LINK의 L-C 공진은 DC-LINK에 큰 맥동을 발생시킨다. 따라서 인버터 출력 전류에 맥동이 발생하여 진동 및 소음을 발생시킨다. 그림 4(a)에서 해당 시간 범위에 인버터 출력 전류 rms값은 U상 693[A], V상 688[A], W상 695[A]이다.

DC-LINK의 전압 정보를 이용하여 맥동성분을 검출하고 식 (8)과 같이 지령치를 발생시키면 그림 4(b)와 같이 DC-LINK 및 출력 전류의 맥동을 억제할 수 있다. 그림 4(b)에서 해당 시간 범위에 인버터 출력 전류 rms값은 인버터 출력 전류는 U상 515[A], V상 517[A], W상 517[A]이며, 3상 전류의 큰 맥동 없이 거의 평행하다.



(a) Before damping control (b) After damping control

Fig. 4. Simulation results of damping control in DC power supply section.



(a) Before beatless control (b) After beatless control

Fig. 5. Simulation results of beatless control in AC power supply section.

따라서 출력 토크의 맥동도 줄어들어 DC 전력공급구간에서 안정적인 가속이 가능해진다.

그림 5는 AC 전력공급구간에서의 시뮬레이션 결과이다. (a)는 비트리스 제어 없이 인버터 주파수가 120[Hz]로 출력되는 구간이며 (b)는 (a)와 동일한 구간에서 비트

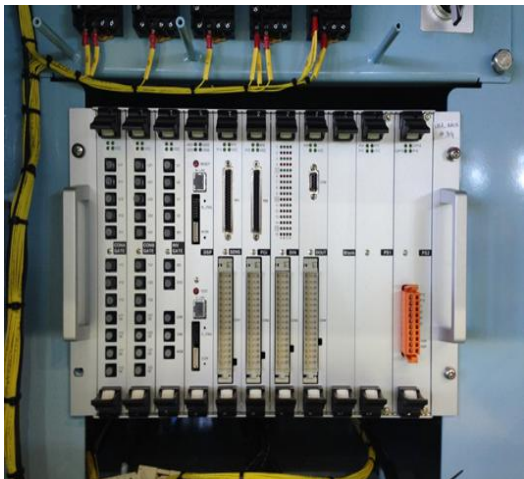


Fig. 6. Converter/Inverter controller for driving in AC/DC power supply section.

리스 제어가 적용된 시뮬레이션 결과이다. 식 (6)으로부터 DC-LINK 맥동 주파수와 인버터 출력 주파수가 같아지는 시점에서 출력 전류에 매우 큰 맥동이 발생함을 확인할 수 있다. 그림 5(a)에서 출력 전류는 U상 551[A], V상 515[A],W상 632[A]로 각각 RMS 값이 다른 것을 확인할 수 있다. 따라서 출력 토크의 맥동도 매우 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 전압 변조 지수로 알 수 있듯이 과변조 영역(고속 주행 구간)에서 그림 5(a)와 같이 큰 맥동이 발생하면 차량 및 주변 환경에 따라 매우 큰 사고가 발생할 수 있다. 따라서 비트현상을 억제할 수 있는 제어 방법이 AC 철도차량에 필수적으로 요구된다.

그림 2와 식 (8)로부터 DC-LINK 전압 정보를 이용하여 비트리스 제어를 수행한 결과가 그림 5(b)이다. DC-LINK의 맥동이 커지면 출력 주파수가 상승하고 맥동이 작아지면 주파수도 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이것은 DC-LINK의 전압 맥동 주파수 성분을 BPF를 이용하여 검출 후 ω_c 에 가감산한 결과이다. 그림 5(b)에서 인버터 출력 전류는 U상 466[A], V상 465[A], W상 470[A]로 각각의 RMS 값의 오차가 (a)보다 현저히 줄어든 것을 확인할 수 있으며, 출력 토크의 맥동도 매우 낮아져 진동 및 소음이 적을 것이라는 예상을 할 수 있다. 따라서 그림 4, 그림 5의 컴퓨터 시뮬레이션 결과로 제어 방법 적용의 타당성을 검증하였다.

그림 6은 AC 및 DC 전력공급구간 모두에서 운행 가능한 컨버터/인버터 제어기를 나타낸다. 실제 서울 1호선에 부착되어 운행중인 제어기이며 그림 6의 제어기를 이용한 주행시험 기록 결과 파형으로 알고리즘을 검증하였다. 주행시험 기록은 자체 제작한 게이트제어유닛(통합제어기)의 이더넷 통신을 활용하여 차량 내에서 모니터링 및 주행정보기록을 수행하였다.

그림 7은 주행시험을 위해 이동한 실제 서울 1호선 주행구간을 나타낸다. 그림 7에서 시간은 해당 역에 차량이

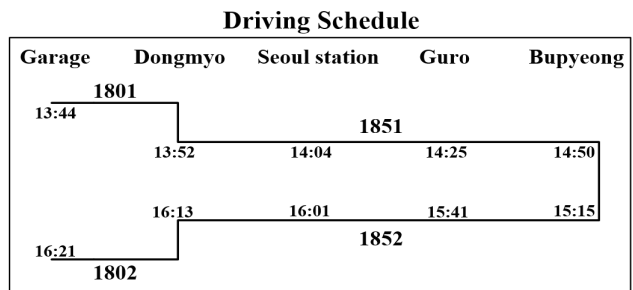


Fig. 7. Driving test section information. (Line 1, Seoul Metro)

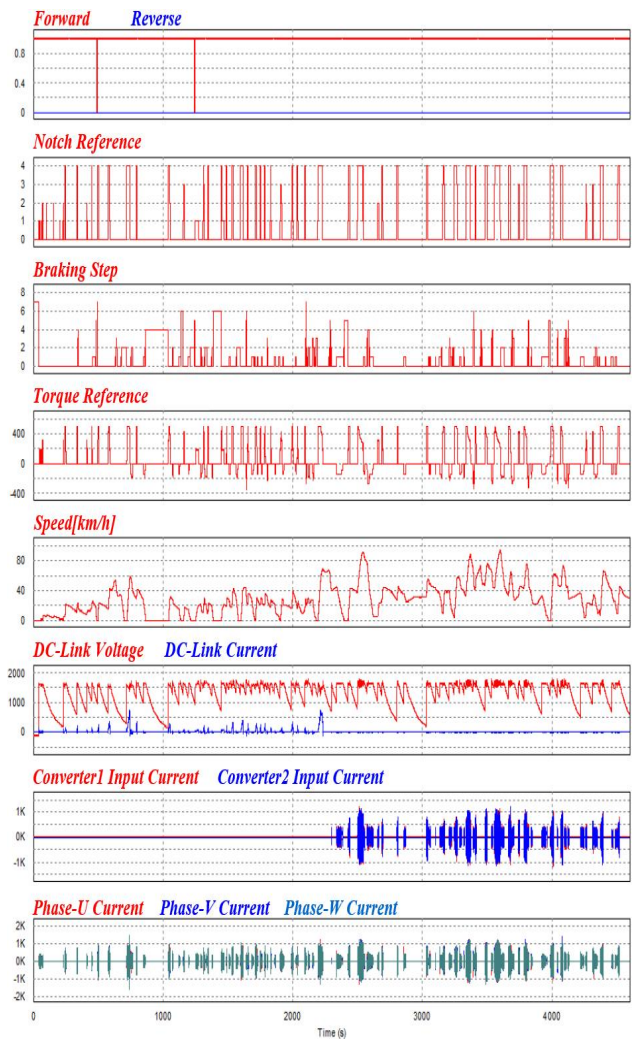


Fig. 8. Line1 driving test record(to Bupyeong Station).

도착해야 하는 시간을 나타내며 1801, 1802, 1851, 1852는 해당 구간을 지나는 차량의 이름을 나타낸다. 철도차량은 서울 1호선 차량을 이용하여 주행시험을 진행하였다.

4. 실제 주행기록 분석

그림 8은 서울교통공사 군자차량사업소에서 출발하여 부평역까지 운행한 주행시험 기록이다. 20[ms] 주기로 데이터를 기록했으며 편도 주행소요시간은 약 78분이다.

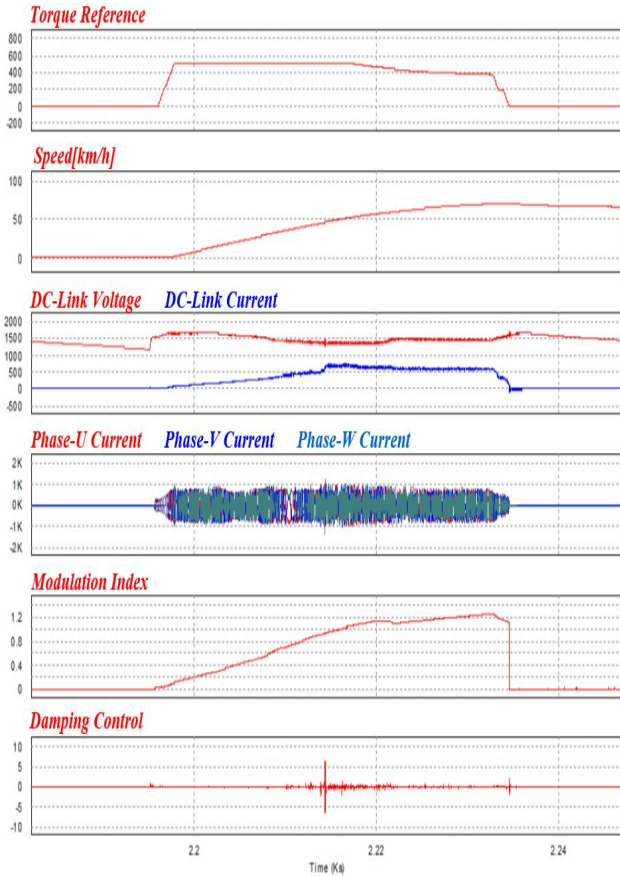


Fig. 9. Driving test record(to bupyeong station), maximum speed driving test in DC power supply section.

고장 없이 DC 전력공급구간을 거쳐 약 38분 30초(2310초) 시점에서 AC 전력공급구간으로 진입하였으며, 각 구간에서의 최고속도시험도 완료하였다.

그림 9는 제어성능시험을 검증하기 위하여 DC 전력공급구간에서 최고속도로 주행한 결과이다. 약 35분(2100초) 시점에서 정차 후 가속을 시작하였으며, 약 70[km/h] 까지 주행을 하였다. 전압변조지수도 안정적으로 증가하고 있으며 과변조 구간에서까지 정상적인 주행을 하고 있다. 모터 3상 출력전류를 보면 출력전류의 불평형이 일어나지 않으며 댐핑제어로 인해 DC전압이 안정화 되어 안정적인 주행을 하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 9에서 댐핑제어 파형은 식 (8)의 ω_d 값을 나타내며 댐핑제어가 필요한 시점에서 적용되어 제어가 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

그림 10은 제어성능시험을 검증하기 위하여 AC 전력공급구간에서 최고속도로 주행한 결과이다. 약 59분(3540초) 시점에서 약 43[km/h]로 타행을 하고 있으며, 40초 동안 약 95.12[km/h] 까지 가속하였다. 비트리스제어가 적용된 시점에서 그림 5의 제어 후 시뮬레이션 결과와 동일한 성능을 가지며 주행하는 것을 확인할 수 있다. 이는 모터 3상 출력전류의 불균형이 일어나지 않는 것을 토대로 확인할 수 있다. 전압변조지수 역시 큰 변동 없이 선형적으로 증감하고 있으며, 그림 10에서 댐핑

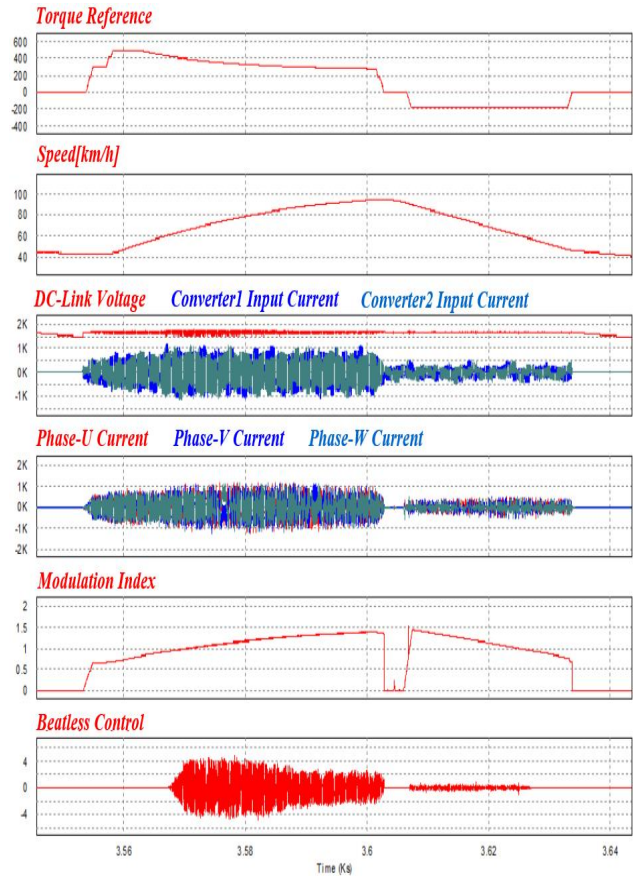


Fig. 10. Driving test record(to bupyeong station), maximum speed driving test in AC power supply section.

제어 파형은 식 (9)의 ω_b 값을 나타내며 비트리스제어가 필요한 시점에서 적용되어 제어가 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

운전 시 안정적인 승차감을 위한 저크 제어는 주행기록에서의 속도파형을 기준으로 성능을 평가할 수 있으며, 댐핑 제어 및 비트리스 제어 성능은 DC 및 AC 구간에서 구간최고속도 시험 결과 파형을 통하여 평가할 수 있다. 빠르게 변동되는 인버터 주파수와 대비하여 속도 및 전류가 공진 및 비트현상이 억제되어 양호하게 주행되고 있음을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 대한민국 수도권 지역의 AC 및 DC 전력공급구간에서 모두 주행 가능한 AC/DC 철도차량에 제어 알고리즘에 대하여 제안하였다. 각 전력공급구간에서 고려되어야 할 공진 현상 및 비트현상의 이론적 분석을 하였다. AC/DC 전력공급구간 모두 주행하기 위해 문제가 되는 현상을 억제하고 안정적인 주행이 가능하도록 댐핑 제어 및 비트리스 제어 이론을 적용한 철도차량용 제어알고리즘을 설계하여 실제 차량에 적용하였으며, 서울 1호선 및 4호선 철도차량에 적용하고 1호선 주행기록분석을 통하여 성능을 검증하였다.

이 논문은 국토부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구사업임.
(국토교통과학기술진흥원에서 부여한 과제번호 : 18TBIP-C143153-01)

References

- [1] J. H. Park, C. H. Lee, A. Y. Ko, and Y. W. Kim, "Control method of propulsion control device for AC railway vehicle," *Transportation Electrification Asia-Pacific ITEC IEEE Conference*, 2016.
- [2] S. Inarida, T. Tanamach, and K. Nakata, "Restraint method of torque ripple with d-q transformation and torque current feedback in power converter system for AC electric cars," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 121-D, No. 11, pp. 1169-1175, 2001.
- [3] G. D. Kim, Y. J. Han, H. J. Park, and N. K. Sung, "A routine test VVVF inverter for urban rail traction," *Power Electronics Annual Conference*, Nam Won, pp. 572-575, 2000.
- [4] S. H. Kim, B. H. Bae, and S. K. Sul, "Development of driving system for railway vehicle using vector control," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 6, No. 2, pp. 125-131, 2001.
- [5] M. K. Jeong, S. J. Cho, K. J. Lee, L. S. Bang, et al., "The high performance tractive force control method of propulsion control system for electric railway vehicles," *The 1st International Forum on Strategic Technology*, Cox's Bazar, pp. 459-462, 2006.
- [6] K. Klausecker, "Modern control and power electronics for the AC drives of the german high-speed train ICE," *Main Line Railway Electrification*, pp. 53-57, 1989.
- [7] H. C. Kim, "Performance improvement of PWM converter-inverter system for AC supplied electric train," *University of Chungbuk*, 2008.
- [8] A. Kimura, "Frequency domain analysis of beat-less control method for converter-inverter driving systems applied to AC electric cars," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 128-D, No. 11, pp. 1271-1274, 2008.
- [9] B. Gou, X. Feng, W. Song, et al., "Analysis and compensation of beat phenomenon for railway traction drive system fed with fluctuating DC-link voltage," *IPEMC 2012*, pp. 654-659, 2012.
- [10] D. C. Yang, J. W. Kim, and Y. B. Lee, "Resonance characteristic improvement of direct two-level auxiliary power supply," *J. the Korean Society for railway*, pp. 1398-1403, Oct. 2012.
- [11] S. G. Parker, B. P. McGrath, and D. G. Holmes, "Regions of active damping control for LCL filters," in *Proc. IEEE Energy Conver. Congr. Expo.*, pp. 53-60, 2012.
- [12] J. C. Wiseman and B. Wu, "Active damping control of a high-power PWM current-source rectifier for line-current THD reduction," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 52, No. 3, pp. 758-764, Jun. 2005.

이창희(李昌熙)



1975년 8월 27일생. 2001년 충북대 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015년~현재 한양대 전기공학과 박사과정. 2011년~현재 다원시스 기업부설연구소 연구실장.

이주(李柱)



1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 전기생체공학부 교수.