

# 수동필터를 이용한 고속전철 이선현상에 의한 전원외란 저감

논문

59P-2-14

## Reduction of Power Disturbance by Contact Loss Phenomenon of a High Speed Electric Train Using Passive Filters

장진영\* · 진강환\* · 강정남\*\* · 박동규\*\*\* · 김윤호†

(Chin-Young Chang · Kang-Hwan Jin · Jeong-Nam Kang · Dong-Kyu Park · Yoon-Ho Kim)

**Abstract** - Since high-speed train is a dynamic load in which electric power is externally supplied, contact loss between the catenary and pantograph occurs. This phenomena including vibrations generates frequently irregular arcs, which, in turn causes EMI. Thus it is very important to develop the approach to reduce arc phenomenon by contact loss, as speed of electric railway vehicle increases.

In case of an electric railway vehicle using electrical power, compared with diesel rolling stock, Power Line Disturbance(PLD) such as harmonics, transient voltage and current, Electromagnetic Interference(EMI), and dummy signal injection etc usually occur.

In this study, the dynamic characteristics of a contact wire and a pantograph supplying electrical power to high-speed train are investigated with an electrical response point. To implement power line disturbance induced by contact loss phenomenon for high speed train operation, a hardware simulator which considers contact loss between contact wire and pantograph as well as contact wire deviation is developed. It is confirmed by the experiments that contact loss effect is largely dependent on voltage conditions when the contact loss occurs. Also, a passive filter is designed to reduce power disturbance and the designed system is verified by experiment.

**Key Words** : EMI(Electromagnetic Interference), PLD(Power Line Disturbance), Pantograph Contact Loss, Passive Filter

### 1. 서 론

최근 IT 기술 및 신소재 개발, 제어 및 반도체 성능향상 등 기술 발전을 보임에 따라 복합기술을 요구하는 철도분야 중 고속전철에 대한 관심이 그 어느 때보다 대두되고 있다. 대량수송과 수송수단의 고속화가 날로 비중을 더해감에 따라 이미 선진국에서는 높은 수준의 기술을 보유하고 있는 고속전철의 운영 비중을 높이고 있는 실정에서 현재 운행 중인 경부고속전철(KTX)의 운행은 우리나라 생활권을 만나 질로 바꾸어 놓은 교통 문화의 일대 혁명이었다. 그리고 시험 속도 350[km/h]이상의 HSR 350X 열차 개발은 한국의 고속전철 기술 수준을 세계에 알리는 계기가 되었다.

하지만 고속전철은 전기를 이용하여 견인력을 발생하기 때문에 무엇보다 차량에 탑재된 전장품에 대한 안정성 및 신뢰성이 보장되어야 하며, 전차선(Catenary)과 팬터그래프(Pantograph) 사이의 안정된 집전 능력을 확보해야만 한다. 이러한 고속전철의 성능과 효율의 향상을 위해서는 고속전철의 핵심이라고 할 수 있는 전력변환장치에 대한 연구, 개발이 필수적이다.

고속전철은 집전장치를 통해 외부로부터 전력을 공급받아 움직이는 동적부하(Dynamic Load)이므로 고속전철이 주행하는 동안 차량상부에 설치된 팬터그래프와 전력을 공급하는 전차선 사이에 이선(Contact loss)이 발생하여 불규칙적인 아크현상이 빈번히 발생하게 되는데, 전자파복사에 의한 방사성 노이즈뿐만 아니라 전도성 노이즈 잡음원(Noise Source)으로 작용한다[1][2].

집전시스템과 관련된 기존의 논문을 살펴보면 대부분 기계 및 재료관점에서 연구되고 있다. 고속전철의 주행속도 증가에 따라 팬터그래프와 전차선사이에 진동도 증가하게 되고 그 결과 접촉력 변화가 커지고 이로 인한 이선과 아크가 발생하여 팬터그래프 집전판의 손상을 초래한다는 연구 결과가 있다. 또한 고속에 적합하도록 팬터그래프 자체를 개량하여 동적인 움직임이 최소가 되도록 하는 연구와 안정된 집전 성능을 확보하기 위해 접촉력을 해석하여 능동적으로 제어하는 방법 등이 이루어지고 있다.

그러나 이선에 관한 연구는 대부분 이선 현상 해결을 위한 연구만 이루어지고 있는 실정으로 이선으로 인한 아크현상이 전력변환장치에 유입되는 전도성 노이즈에 관한 연구는 이루어지지 않고 있다. 그러므로 전원라인을 통해 유입 및 유출되는 전도성 노이즈 성분에 대한 EMI/EMC의 대책을 수립하여 전장품 개발시 반영해야 한다[3][4].

본 논문에서는 고속전철에 사용되는 PWM 컨버터를 축소형으로 제작, PLD 시뮬레이터로 아크현상을 발생하여 부하에 미치는 과도현상을 연구하였다. 또한 이선현상을 고려한 EMI 대책으로 수동필터를 설계하여 비교 분석 하였다.

\* 종신회원 : 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정

\*\* 정 회원 : 중앙대학교 정보통신연구원 연구원

\*\*\* 준 회원 : 중앙대학교 재생에너지학과 석사과정

† 교신저자, 종신회원 : 중앙대학교 전자전기공학부 교수 · 공박

E-mail : yhkim@cau.ac.kr

접수일자 : 2010년 3월 3일

최종완료 : 2010년 4월 9일

## 2. 이선현상

### 2.1 전원의외란 현상

근본적으로 전자파 장애(EMI) 현상은 잡음원(Source), 피장애기기(Victim), 전달매체(Medium)라는 3가지 요소가 존재하고, 전달매체는 공간으로부터의 방사성 노이즈(Radiated Emission)에 의한 전달과 기기 내, 외부 신호 및 전원라인을 통한 전도성 노이즈(Conducted Emission) 전달로 구분한다. 현재 사용되고 있는 거의 대부분의 전기·전자기기는 상용 전원라인으로부터 에너지를 공급받고 있기 때문에 전원선의 대부분은 기기 및 시스템의 불필요한 전기신호 전달매체로 작용하고 있다.

이러한 전원선로를 매체로 전달되는 잡음은 전원선로가 고유적으로 갖는 잡음과 이에 유입되는 잡음이 더해진 교란현상(Disturbance)으로 간주될 수 있는데 이것을 전원외란(Power Line Disturbance)라 하여 EMI / EMC의 가장 근본적인 문제로 취급하고 있다. 전원외란 현상은 전력신호의 미소 전압변동으로부터 주파수변동, 고조파성분의 존재여부 및 임펄스에 따른 과도현상과 외부 불필요신호의 유입에 이르기까지 전원에 영향을 미치는 모든 외란현상을 총칭한다[3]

본 논문에서 언급하는 이선현상은 외인성의 임펄스 노이즈의 유입으로 인한 전도성 형태로 전력계통인 전차선에 강력한 노이즈레벨을 갖고 다양한 형태로 나타나는데, 기기에 치명적인 영향을 미치기 때문에 매우 중요하다. 또한 전차선과 팬터그래프 사이의 이선으로 인한 아크현상은 방사성 노이즈를 유발시킨다. 즉 이 PLD현상은 전력시스템, 계측시스템, 통신시스템, 고주파이용 설비, 전원기기, 전기기기 등의 시스템의 정상적인 것에 장애를 주는 전기환경오염이다.

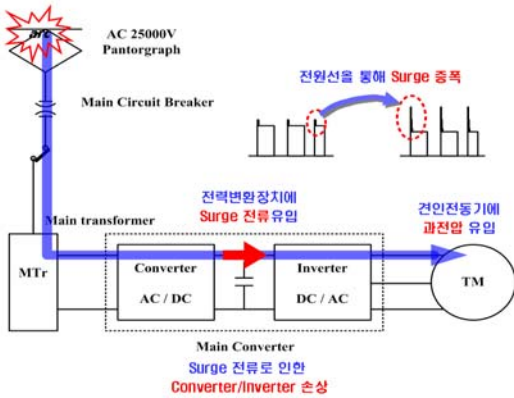


그림 1 고속전철 차량내의 전도성 노이즈 경로  
Fig. 1 Conducted noise path in high-speed railway

### 2.2 이선현상에 따른 전도성 노이즈 경로

고속전철은 차량 상부에 설치된 집전장치인 팬터그래프를 통해 전차선 교류전력 25[kV]을 공급받아 주행하며 유입된 전력은 차량 내에 설치된 주변압기를 통해 전력변환장치부로 전달된다[4].

대표적인 전기 시스템은 크게 추진제어장치를 들 수 있는데, 차량을 견인하는 추진제어장치는 그림 1과 같이 주변압기 2차측에서 변압한 후 전력변환장치를 거쳐 견인전동기를 구동하게 된다.

그림 1에서 보듯이 팬터그래프를 통해 차량 내로 전력이 공급되므로 주행 중 이선으로 인하여 아크현상이 발생한 경우 전도성 및 방사성 노이즈가 전원라인을 통해 유입되어 전도성 노이즈 성분은 주변압기를 거쳐 전력용 반도체 소자로 손상을 초래하거나 견인전동기에 과전압이 유입된다.

### 2.3 이선현상에 따른 전기적 고찰

그림 2는 그림 1에 대한 전기적인 모델링이다. 그림 2에서 스위치 S는 전차선과 팬터그래프의 이선에 따른 현상을 의미하는 것으로 이선이 발생하지 않은 경우에는 식 (1)과 같이 표현된다[4].

$$V_s = R_s i_1 + L_s \frac{di_1}{dt} + V_{tr1} \quad (1)$$

여기서,  $V_s$ : 전차선 전압( $25000\sqrt{2}\sin\omega t$ ),  $R_s$ : 전차선 저항,  $L_s$ : 전차선 인덕턴스,  $i_1$ : 고속전철내의 주변압기 1차측에 흐르는 전류,  $v_{tr1}$ : 주변압기 1차측 전압

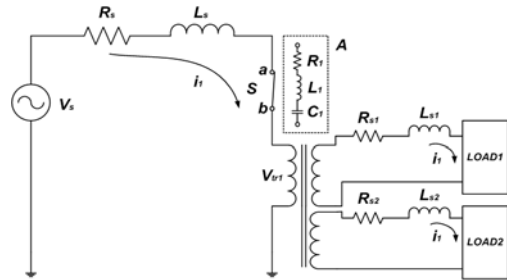


그림 2 이선현상에 따른 전기적 모델링  
Fig. 2 Electrical Circuit Modeling of Contact Loss

그러나 이선이 발생할 경우에는 전차선과 팬터그래프 사이에는 아크가 발생하므로, 그림 2에서 스위치 S가 개방되고 박스 A에서 보는바와 같이  $R_1-L_1-C_1$  소자가 직렬로 연결된 형태가 된다. 따라서 식 (2)와 같이 표현된다.

$$V_s = (R_s + R_1)i_1 + (L_s + L_1)\frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + V_{tr1} \quad (2)$$

$v_s$ 는 전차선 교류전압이므로 이선현상이 발생하게 되는 순간 식 (2)에서 보듯이  $R-L-C$  직렬회로의 과도응답 특성을 갖는 회로가 된다. 즉 과도상태에서 정상상태로 전이되는 과정에서 주변압기 1차측에 흐르는 전류는 식 (2)를 정리하면 식 (3)과 같이 된다.

$$i_1 = A\sin\omega t + e^{-at}(B\cos\omega_1 t - C\sin\omega_1 t) \quad t \geq 0 \quad (3)$$

여기서,  $A, B, C, a$ 는 상수,  $\omega_1, \omega (=120\pi)$ 는 각주파수 식 (3)을 고찰해 보면, 두 번째 항은 cosine 함수로 표시할 수 있고 진폭은 정상상태의 진폭에 비해 매우 크게 된다. 따라서 이선현상이 발생하는 순간 회로의 손실이 적을 때로  $t=0$ 에서 전차선 전압  $V_s$  전원의 위상과 초기조건에

따라 매우 큰 과도전류가 발생하고 시간이 지남에 따라 지수 함수적으로 감소함을 알 수 있다.

**2.4 수동필터의 설계**

단상 풀 브리지 컨버터는 항상 DC Link단에 전원 주파수의 2배가 되는 리플이 존재하게 되므로 이를 제거하기 위해 수동 필터가 필요하다. 통상적으로 단상 풀 브리지 컨버터는 캐패시터로 출력전압을 평활하게 하는데 본 논문에서 제안하는 PWM 컨버터는 DC Link 앞에  $R_f-L_f-C_f$  소자를 직렬로 연결한 수동필터를 설치함으로써 이선현상이 발생할 경우 전도성 노이즈를 감소하는 방식이다. 그림 3은 제안하는 시스템의 구성도를 나타낸다.

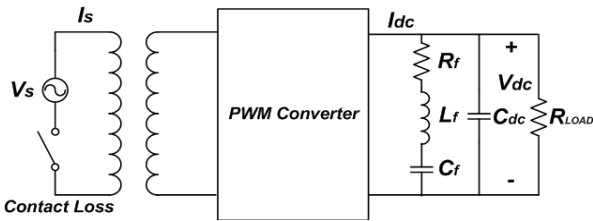


그림 3 시스템 구성도  
Fig. 3 System Configuration

$$V_{cp} \geq I_{dc} \times \frac{1}{2\omega C_f} + V_{dc} \tag{4}$$

식 (4)는 캐패시터의 최대격격전압  $V_{cp}$ 를 나타낸다. 이를 통해 필터 커패시터의 최소값을 식 (5)와 같이 유도할 수 있다.

$$C_{fmin} \geq \frac{\sqrt{2} I_s V_c}{8\pi f V_{dc} (V_{cp} - V_{dc})} \tag{5}$$

$$C_{fmin} = \frac{\sqrt{2} \times 20 \times 220}{8\pi \times 60 \times 120 \times (400 - 120)} = 122.8 [\mu F]$$

여기서,  $V_c$ 는 컨버터 입력전압,  $V_{dc}$ 는 컨버터 출력전압 식 (5)를 이용하여 수동필터 캐패시터 최소값을 선정하여 상용 캐패시터의 크기를 고려해  $L_f$  값을 선정하였다.

**3. PWM 컨버터 제작 및 실험결과**

**3.1 시스템의 구성**

고속전철 이선현상으로 인한 전도성 노이즈 성분이 전력 변환장치에 미치는 영향을 분석하기 위한 시스템은 크게 3부분으로 나눌 수 있다.

- 전원외란 시뮬레이터 : 이선 발생부
- 축소형 PWM 컨버터 : 추진제어용 컨버터
- 수동필터 : 이선발생시 고조파 저감

기존 KTX차량 시스템 사항에 근거하여 전원외란 시뮬레이터 및 축소형 PWM 컨버터를 제작하였다. 각각의 파라미터는 표 1, 2와 같다.

표 1 시뮬레이터 주요 파라미터

Table 1 The main parameters of simulator

항 목	차세대 고속전철	전원외란 시뮬레이터
입력전압	25,000V	220V
주차단기 차단전류	2,000A	20A
전력변환장치 최대용량	2,500kW	2.5kW
팬터그래프 상글압	612.5 ± 10mm	204.2mm

표 2 PWM 컨버터 주요 파라미터

Table 2 The main parameters of Converter

항 목	KTX 컨버터	축소형 컨버터
변압기 1차 전압	AC 25kV	AC 220V
변압기 1차 전류	106.4A	20A
컨버터 출력용량	2,600kW	2.0kW
컨버터 직류전압	2,800V	120V
컨버터 직류전류	921A	15A



그림 4 전원외란 시뮬레이터 장치  
Fig. 4 The Power Line Disturbance Simulator

그림 4와 같이 전원외란 시뮬레이터는 크게 접전부, 이선 현상 발생부, 전차선 편위부, 제어부로 나뉜다. 고속전철 주행 중에 이선현상을 모의하기 위해 시뮬레이터 상단에 설치된 원판이 회전운동을 함으로서 고속전철이 주행하는 것으로 하였으며, 원판은 고속전철 주행과 비례하여 가감속 회전이 가능하다. 하단에 설치된 팬터그래프는 상단 원판과 접촉해야 하므로 접촉되는 원판 하부에 고속전철 전차선로의 전차선 재질을 그대로 사용하여 이선현상에 따른 과도특성이 실제와 가깝게 되도록 구성하였다. 팬터그래프 압상력은 스프링 장력 의해 항상 상승하도록 하였으며, 이선현상 제어부에 의해 이선을 유도하기 위해 원판 회전 중에 상부가 진동하도록 구현하였다.

기존 시뮬레이터와 비교하여 본 논문에서 구현한 시뮬레이터는 고속전철이 곡선구배에서도 이선현상을 모의하기 위해 팬터그래프가 좌우 움직임이 가능하도록 하였다. 이는 팬터그래프의 편마모를 예방할 수 있을 뿐만 아니라 좌우 움직임에 따른 모의실험도 가능하다.

그림 5는 축소형 PWM 컨버터이다. 스위칭 소자로는 IGBT를 사용하고, 이를 위한 게이트 드라이브 회로와 보호 회로, 수동필터가 추가되어 있다.

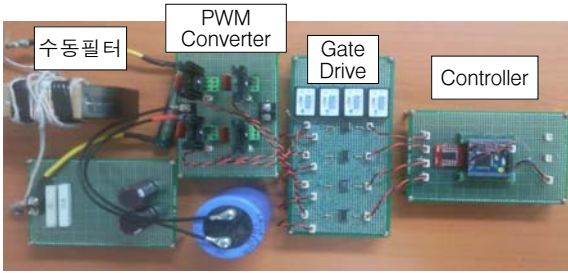
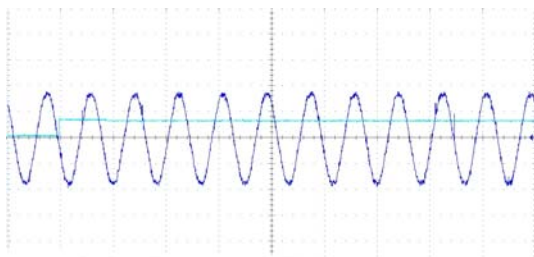


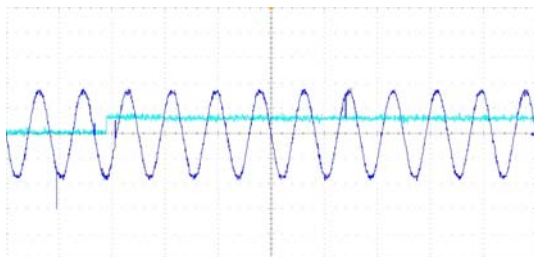
그림 5 축소형 PWM 컨버터 시스템  
Fig. 5 Experimental PWM Converter System

3.2 실험결과

전원외란 시뮬레이터를 이용하여 고속전철 주행 중에 이 선현상을 모의하기 위해 상용전원 220V를 변압기 1차측에 공급하고 부하를 연결하여 실험하였다. 실험은 입력전원과 이선발생을 동기시킴으로서 전압위상에 따라 부하에 미치는 영향을 분석하였고, 수동필터를 사용한 경우와 하지 않은 경우로 나누어서 실험하였다.



(a) 입력전압 최소 (0°)

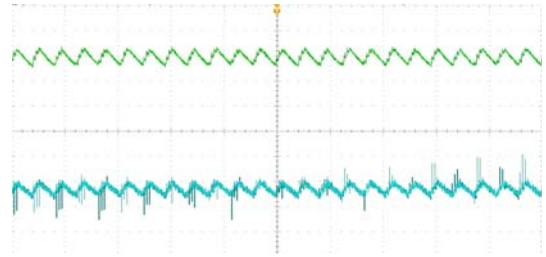


(b) 입력전압 최대 (90°)

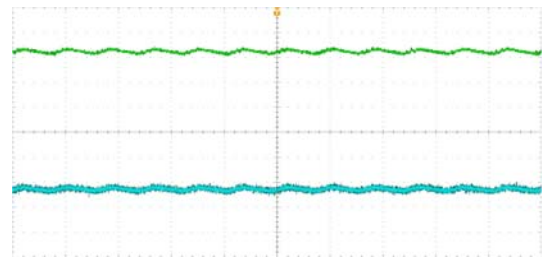
그림 6 이선발생 전압 출력 파형  
Fig. 6 Output Waveforms of the Contact Loss Voltage

3.2.1 이선이 발생하지 않은 경우

실험은 기존 단상 풀 브리지 컨버터, 수동필터를 결합한 단상 풀 브리지 컨버터로 나누어서 수행하였다. 그림 7은 각각의 경우에서 출력 전류와 출력전압을 측정하였다. 측정 결과 (a) 기존방식을 사용한 경우 DC Link 커패시터의 영향으로 스위칭 손실을 감소시켰지만, PWM 컨버터의 특성상 제2고조파의 맥동현상은 제거하지 못함을 보인다. (b) 수동필터를 결합한 경우는 기존 PWM 컨버터의 맥동현상을 완전히 제거하지는 못했지만 수동필터의 영향으로 기존 출력 전류, 출력 전압보다 직류에 가까운 결과를 보인다.



(a) 기존방식인 경우, 출력전류(上), 출력전압(下)  
(5[A], 50[V], 20[ms/div])

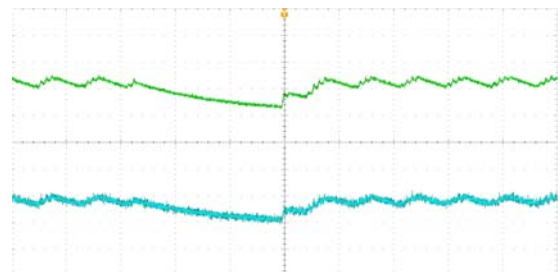


(b)수동필터가 결합된 경우, 출력전류(上), 출력전압(下)  
(5[A], 50[V], 20[ms/div])

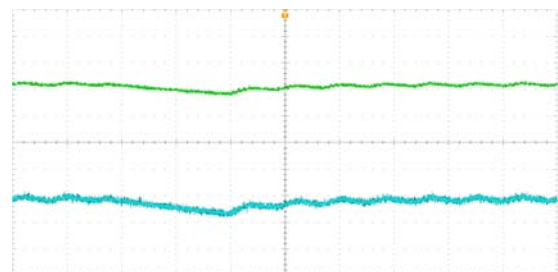
그림 7 정상 상태에서 컨버터 출력 파형  
Fig. 7 Output Waveforms of the Converter with Stationary State

3.2.2 이선이 발생한 경우-입력전압 크기가 최소 (0°)

그림 8은 전원외란 시뮬레이터를 이용하여 입력전압의 크기가 최소인 지점(0°)에서 이선을 발생시켜 과도 상태에서 PWM 컨버터의 출력전류 및 출력전압을 측정하였다.



(a) 기존방식인 경우, 출력전류(上), 출력전압(下)  
(5[A], 50[V], 10[ms/div])



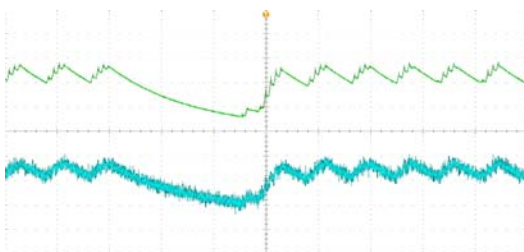
(b)수동필터가 결합된 경우, 출력전류(上), 출력전압(下)  
(5[A], 50[V], 10[ms/div])

그림 8 과도 상태에서 컨버터 출력 파형 (0°)  
Fig. 8 Output Waveforms of the Converter with Transition State

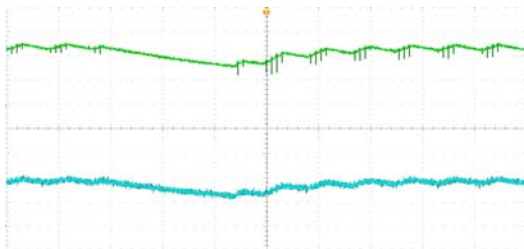
측정 결과 (a) 기존방식을 사용한 경우 이선 발생시 DC Link 커패시터에 충전된 전압이 방전되면서 전압이 낮아짐을 확인하였다. (b) 수동필터의 경우는 이선 발생시 기존 PWM 컨버터의 출력 파형보다는 작은 기울기의 전압 강하를 확인하였다. 이는 수동필터의 영향으로  $L_f$ ,  $C_f$ 에서 충전된 전압 및 전류의 영향으로 사료된다.

**3.2.3 이선이 발생한 경우-입력전압 크기가 최대 (90°)**

그림 9는 이선 발생시점을 초기 입력전압이 최대가 되는 지점(90°)에서 이선을 발생시켰을 때 각각의 경우에서 출력 전류와 출력전압을 측정된 것이다. 측정 결과 (a) 기존방식인 경우 위상이 0° 인 경우보다 큰 전압강하를 확인 하였다. 이는 2.3절의 식 (2)와 같이 초기전압에 따라 지수 함수적으로 전압강하가 됨을 확인할 수 있다. 마지막으로 (b) 수동필터를 결합한 컨버터의 경우도 위상이 0° 인 경우보다 큰 전압강하를 확인할 수 있었다.



(a) 기존방식인 경우, 출력 전류(上), 출력전압(下)  
(5[A], 50[V], 10[ms/div])

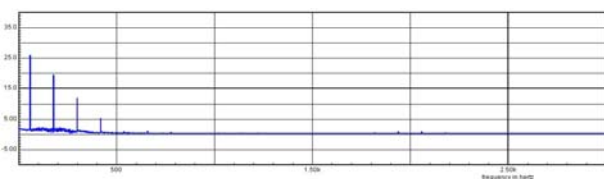


(b) 수동필터가 결합된 경우 출력전류(上), 출력전압(下)  
(5[A], 50[V], 10[ms/div])

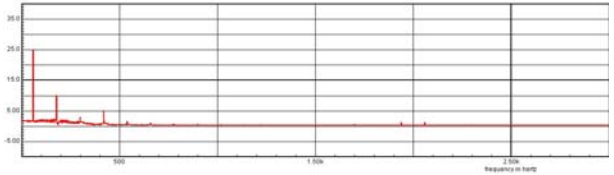
**그림 9** 과도 상태에서 컨버터 출력 파형 (90°)  
**Fig. 9** Output Waveforms of the Converter with Transition State

**3.2.4 입력전류의 FFT 분석**

그림 10은 PWM컨버터 입력전류를 기존방식을 사용한 경우와 수동필터를 사용한 경우 각각의 경우에서 FFT분석한 파형이다. 분석 결과 (a) 기존방식인 경우 3, 5, 7고조파 성분이 포함되어 있는 것을 볼 수 있다. (b) 수동필터를 결합한



(a) 기존방식인 경우 입력전류 FFT 분석



(b) 수동필터가 결합된 경우 입력전류 FFT 분석

**그림 10** 입력전류의 FFT 분석

**Fig. 10** FFT Analysis of Input Current

컨버터의 경우는 3, 5 고조파가 기존방식을 사용한 경우보다 감소됨을 확인하였다.

**4. 결 론**

본 논문에서는 이선으로 인한 전원의란이 차량내의 전력 변환장치에 미치는 영향을 살펴보기 위해 전원의란 시뮬레이터를 제작하였다. 또한 고속철 추진제어용 단상 PWM 컨버터를 축소 제작하여 이선현상을 모의하여, 고조파 저감을 위한 수동필터 연구를 수행하였다. 이를 위해 400km/h급 차세대 고속철도차량에 대한 전력변환장치의 시스템 요구사항에 준하여 파라미터를 산정한 후 이선현상을 모의하였다.

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 고속철도차량은 동적부하로서 전력을 공급하는 전차선과 전력을 집전하는 팬터그래프사이에 이선현상이 수시로 발생하는데 이로 인하여 아크현상이 발생한다.
- (2) 이선으로 인한 아크 발생은 고속철도차량 주변압기 1차측 및 부하에 서지전압 및 전류를 유입되게 하는 것을 확인하였다. 또한, 이선시간에 따라 전력변환장치의 미치는 정도, 즉 전도성 노이즈 및 전류의 왜곡정도가 다르다는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 전차선에 흐르는 전류는 전압보다 위상이 늦고, 특히 이선이 발생하는 시점의 전압위상에 따라 과도응답특성이 크게 변할 수 있음을 확인할 수 있었다.
- (4) 출력측에 수동필터를 삽입함으로써 단상 풀 브리지 컨버터 출력에 발생하는 전원주파수의 2배가 되는 맥동현상을 저감시킬 수 있었다.
- (5) 입력전류의 FFT 분석 결과 기존방식과 비교할 때 수동필터를 사용함으로써 3, 5 고조파가 감소됨을 확인하였다.

**감사의 글**

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

**참 고 문 헌**

[1] 철도청, “전철구간에서 발생하는 고조파 현황 및 대책 연구보고서”, 1998.  
 [2] 한국전기연구원, “전원방해(PLD) 현상과 기술동향 연구보고서”, 2000.

- [3] 김재문, 장진영 외 2인, “전차선-팬터그래프 사이의 이선현상에 따른 전원외란이 보조전원장치에 미치는 영향”, 대한전기학회 전기설비위원회 춘계학술대회 논문집, pp197-181, 2008.
- [4] 김재문, 장진영 외 2인, “이선발생 시플래이터를 이용한 이선발생시 전압조건에 따라 부하에 미치는 영향 분석”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp425, 2009.
- [5] Berardo Tellini, Massimo Macucci, et al., Line-Pantograph EMI in Railway Systems, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2001.

## 저 자 소 개



**장진영 (張珍榮)**  
 2006년 철도대 철도차량전기와 졸업.  
 2010년 중앙대 전자전기공학부 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기공학부 박사과정.  
 E-mail : ccy9247@hanmail.net



**진강환 (陳康煥)**  
 2006년 중앙대 전자전기공학부 졸업.  
 2008년 동 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기공학부 박사과정.  
 E-mail : bd20b@hanmail.net



**강정남 (姜正南)**  
 2008년 원광대 전기전자 및 정보공학부 졸업. 2010년 중앙대 전자전기공학부 대학원 졸업(석사). 현재 중앙대 정보통신연구원 연구원.  
 E-mail : s101018@nate.com



**박동규 (朴東奎)**  
 2008년 철도대 철도차량전기와 졸업. 현재 중앙대 재생에너지학과 대학원 석사과정.  
 E-mail : beater09@nate.com



**김윤호 (金倫鎬)**  
 1974년 서울대 전기공학과 졸업. 1987년 미국 Texas A&M대학 졸업(공학). 2004년 전력전자학회장 역임. 2008년 철도학회 회장 역임. 현재 중앙대 전자전기공학부 교수.  
 E-mail : yhkim@cau.ac.kr