

전원외란 시뮬레이터를 이용한 고속전철 이선현상 과도 특성 연구

논문
58P-4-11

Transient Characteristic Study on Contact Loss of High Speed Electric Railway Using a Power Line Disturbance Simulator

김재문[†] · 김양수*
(Jae-Moon Kim · Yang-Su Kim)

Abstract - In this study, the dynamic characteristic of a contact wire and pantograph supplying electrical power to high-speed trains are investigated from an electrical response point of view. To analysis power line disturbance by induced contact loss phenomenon for high speed operation, a hardware Simulator which considered contact loss between contact wire and the pantograph as well as contact wire deviation is developed. It is confirmed that a contact wire and pantograph model are necessary for studying the dynamic behavior of the pantograph system.

One of the most important needs accompanied by increasing the speed of high-speed train is reduced that an arc phenomenon by loss of contact brings out EMI. In case of a high-speed train using electrical power, as comparison with diesel rolling stock, PLD(Power Line Disturbance) such as harmonic, transient voltage and current, EMI(Electromagnetic Interference), dummy signal injection etc usually occurs. Throughout experiment, it is verified that an arc phenomenon is brought out for simulator operation and consequently conducted noise is flowed in electric circuit by power line disturbance.

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

1. 서 론

경부선 고속전철(KTX)이 도입된 이래 철도에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 국내 IT 기술 및 신소재 개발, 제어 기술 및 반도체 성능향상 등 산업전반에 걸쳐 비약적인 기술 발전을 보임에 따라 복합기술을 요구하는 철도분야에 신기술이 접목되고 있다. 고속전철의 고속화에 따라 대두되고 있는 문제점 중의 하나는 안정된 집전 능력을 확보하는 것이다. 즉, 고속전철의 속도 성능향상은 집전 시스템이 고속에서도 안정된 집전 능력을 갖추어야 하는 선행 해결과제로 철도 선진국을 중심으로 많은 연구가 이루어지고 있다.

최근 호남선에 350km/h급 고속전철(HSR350x)이 운행예정인 가운데 400km/h급 차세대 고속전철(HEMU-400X) 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 고속전철은 집전장치를 통해 외부로부터 전력을 공급받아 움직이는 동적부하(Dynamic Load)이므로 고속전철이 주행하는 동안 차량상부에 설치된 팬터그래프(Pantograph)와 전력을 공급하는 전차선(Contact wire) 사이에 이선(Contact loss)이 발생하여 전원외란(Power Line Disturbance ; PLD)이 일어난다. 이선으로 인해 불규칙적인 아크현상은 빈번히 발생하게 되는데, 전

차과복사에 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 연구결과가 있다. 또한 고속에 적합하도록 전차선 재료를 대체하거나 팬터그래프 자체를 개량하여 동적인 움직임이 최소가 되도록 연구와 안정된 집전 성능을 확보하기 위해 접촉력을 해석하여 능동적으로 제어하는 방법 등이 이루어지고 있다[3-6].

그러나 이선에 관한 연구는 대부분 현상 자체에 해결을 위한 연구만 이루어지고 있는 실정으로 이선으로 인한 아크현상이 전력변환장치(Converter /Inverter) 상호간에 전원라인을 통해 유입 및 유출되는 전도성 노이즈 성분에 대한 EMI/EMC의 대책을 수립하여 전장품 개발시 반영해야 한다.

본 논문에서는 고속전철 주행시 이선 발생에 따른 아크현상을 모의할 수 있는 PLD 모의 시뮬레이터를 제작하고 EMI 대책을 수립하기 위한 선행연구로 이선 현상시 부하(R, R-L)에 미치는 과도특성 현상을 연구하였다.

2. 고속전철 주행에 따른 이선현상

2.1 PLD 현상의 주요요인

전자과장해(EMI)는 Source, Victim 그리고 전달매체라는 3가지 요소가 존재하고, 전달매체는 공간으로부터의 전자과복사에 의한 전달(Radiated Emission)과 전원라인을 통한 전달(Conducted Emission)로 구분한다. 전원외란(PLD)의 주

[†] 교신저자, 정희원 : 한국철도대학 철도차량전기과 조교수 · 공박
E-mail: goldmoon@krc.ac.kr

* 정희원 : 한국철도대학 철도차량전기과 부교수 · 공박

접수일자 : 2009년 8월 28일

최종완료 : 2009년 9월 3일

<본 논문은 본 학회 2009년도 하계학술대회에서 우수논문으로 선정되어 편집위원회에서 심사 후 본 논문에 게재 되었음>

요원인은 표 1과 같이 구분되는데, 외인성은 각종 전기·전자기기로부터 발생되어 공간을 통해 전력선로에 유입되는 잡음이고 내인성은 불안정한 발전설비, 과부하, 급격한 부하변동 등으로 고조파 및 주파수 변동으로 나타난다.

본 논문에서 언급하는 이선(Contact Loss)은 외인성의 임펄스 노이즈의 유입으로 인한 전도성 형태로 전력계통인 전차선에 강력한 노이즈레벨을 갖고 다양한 형태로 나타나는데, 기기에 치명적인 영향을 미치기 때문에 매우 중요하며 반도체 소자를 이용한 스위칭 전원회로 투입시의 돌입전류로 인한 과도현상과 같은 특징을 갖는다[3]. 뿐만 아니라 전차선과 전력을 공급받는 팬터그래프 사이의 불안정한 접촉으로 인한 아크(Arc)현상은 방사성 노이즈 형태로 나타나게 되어 이선은 전도성 및 방사성 노이즈를 유발시킨다. 이러한 이선은 시간 관점에서 고속 주행 중에 크게 소이선, 중이선 및 대이선으로 나타나고, 역행(Powering mode)시의 사구간(Dead Section)을 통과하는 경우에도 발생한다.

표 1 전원방해(PLD)의 주요요인

Table 1 The main factors of PLD

분 류		방사성(복사성) 유입	전도성 유입
외 인 성	고주파 잡음	<ul style="list-style-type: none"> 고주파이용설비 무선통신 설비 전기철도 	<ul style="list-style-type: none"> 고주파이용설비 무선통신 설비 비선형성 부하
	임펄스 잡음	<ul style="list-style-type: none"> 점화장치 등 	<ul style="list-style-type: none"> 방전 잡음 접촉 잡음 과도현상 등
내 인 성	전원고조파 잡음 전압 변동 주파수 변동	<ul style="list-style-type: none"> 부안정한 발전설비 과부하 및 급격한 부하변동 전기사고 	

2.2 PLD현상에 따른 EMI 경로

400km/h급 차세대 고속전철은 차량 상부에 설치된 집전장치인 팬터그래프를 통해 전차선 교류전력 25[kV]을 공급받아 주행하며 유입된 전력은 차량 내에 설치된 주변압기를 통해 전력변환장치부로 전달되거나 전기를 필요로 하는 각종 설비로 공급된다. 대표적인 전기 시스템은 크게 추진제어장치와 보조전원장치로 나눌 수 있는데, 차량을 견인하는 추진제어장치(Motor Block)는 그림 1과 같이 주변압기 2차측에서 적정 전압으로 변압한 후 전력변환장치(C/I)를 거쳐 견인전동기를 구동하게 된다. 보조전원장치는 주변압기 2차측 일부 권선을 사용하여 고속전철내의 제어장치 및 냉난방장치, 조명장치 등 전원설비로서 사용된다.

그림 1에서 보듯이 팬터그래프를 통해 고속전철내로 전력이 공급되므로 주행 중 이선으로 인하여 아크현상이 발생하면 경우 방사성 및 전도성 노이즈가 동시에 발생하게 되는데, 전원라인을 통해 유입되는 전도성 노이즈 성분은 주변압기를 거쳐 전력용 반도체 소자로 고속스위칭을 하는 전력변환장치인 컨버터와 3상 인버터에 손상을 초래하거나 견인전동기에 과전압이 유입된다.

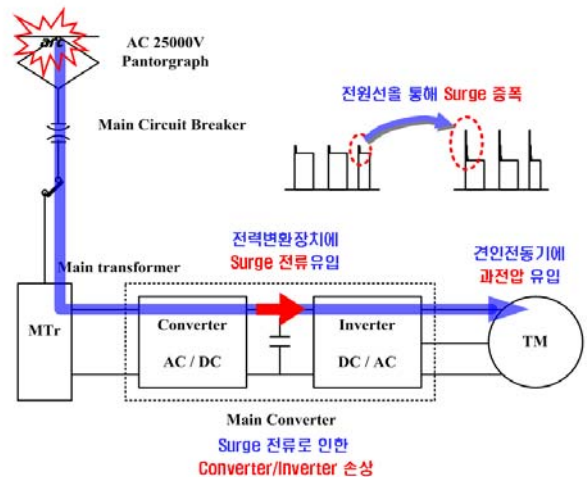


그림 1 고속전철 차량내의 전도성 노이즈 경로
Fig. 1 Conducted noise path in high-speed railway

아크현상은 순간적인 임펄스 형태의 전압이 인가되는 과도현상으로 고려될 수 있는데, 이때 인덕터 및 커패시터에 흐르는 전류와 전압의 변화 즉 di/dt , dv/dt 의 과도한 서지가 유발하게 되는데 이것은 전력용 반도체 스위칭 소자의 Turn-On, Turn-Off 시 전력변환장치의 제어시스템을 교란시키고 기준값을 제어하는데 어려움이 따른다.

2.3 이선현상에 따른 전기적 고찰

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

$$v_{ac} = Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} + v_{mtr1} \tag{1}$$

여기서, v_{ac} : 전차선 전압($25000\sqrt{2} \sin \omega t$), R : 전차선 저항, L : 전차선 인덕턴스, i_1 : 고속전철내의 주변압기 1차측에 흐르는 전류, v_{mtr1} : 주변압기 1차측 전압

그러나 이선이 발생할 경우에는 전차선과 팬터그래프 사이에는 아크가 발생하므로 참고문헌[7]에 따르면, 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.

$$v_{ac} = (R + R_1)i_1 + (L + L_1) \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + v_{mtr1} \tag{2}$$

v_{ac} 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, w_1 는 상수, $w(=120\pi)$ 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 때(Q 가 클 때)로 $t=0$ 에서 전차선 전압 v_{ac} 전원의 위상과 초기조건에 따라 매우 큰 과도전류가 발생하고 시간이 지남에 따라 지수 함수적으로 감소함을 알 수 있다.

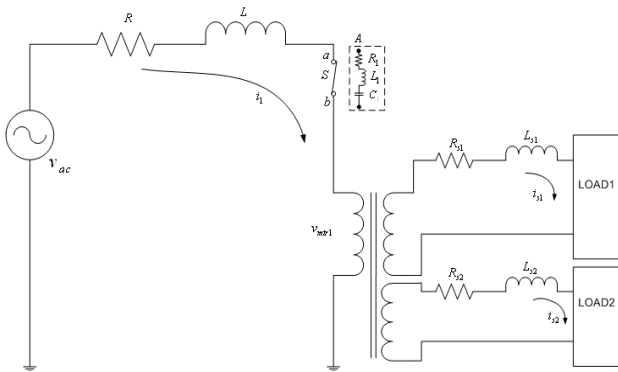


그림 2 이선현상에 따른 전기적 모델링
Fig. 2 Electrical circuit modeling in case of contact loss

3. 전원외란 시뮬레이터 제작 및 실험결과

3.1 전원외란 시뮬레이터 제작

최고속도 400km/h급 차세대 분산형 고속철도에 대한 이선현상에 따른 전력변환장치가 미치는 영향을 분석하기 위해 지금까지 진행된 시스템 요구사항(안)에 근거하여 전원외란 시뮬레이터를 제작하였다[8]. 시뮬레이터를 제작하기 위해 사용된 파라미터는 표 2와 같이 입력전압 220V, 주차단기 차단전류 20A이다.

표 2 시뮬레이터 주요 파라미터
Table 2 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 싱글암	612.5 ± 10mm	204.2mm

그림 3은 전원외란 시뮬레이터로 크게 집전부, 이선현상 발생부, 전차선 편위부, 제어부로 나뉜다. 고속전철 주행 중

에 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 실제 가깝게 하였다. 팬터그래프 압상력은 스프링 장력 의해 항상 상승하도록 하였으며, 이선현상 제어부에 의해 이선을 유도하기 위해 원판 회전 중에 상부가 진동하도록 구현하였다.

한편 이선 모의 시뮬레이터가 집전 성능 향상을 위해 많은 연구가 이루어지면서 제작되었지만, 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.

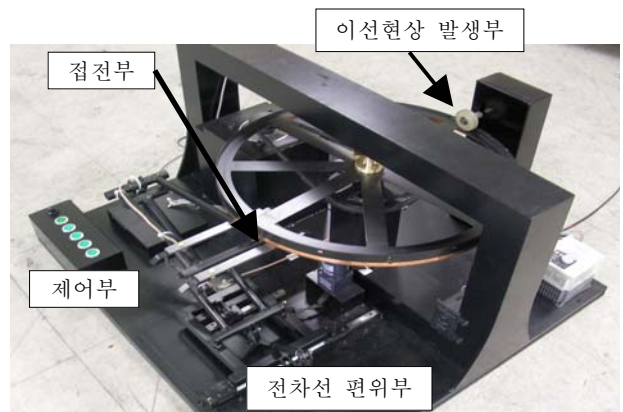


그림 3 전원외란 시뮬레이터 장치
Fig. 3 The power line disturbance simulator setup

3.2 실험결과

전원외란 시뮬레이터를 이용하여 고속전철 주행 중에 이선현상을 모의하기 위해 상용전원 220V를 변압기 1차측에 공급하고 부하(저항 15.6Ω, 10mH)를 연결하여 실험하였다.



그림 4 이선으로 인한 아크 현상
Fig. 4 The arc phenomenon by contact loss

그림 4는 이선으로 인한 아크현상이 발생하고 있음을 보여주고 있으며, 부하에 전류가 많이 흐르는 상태에서 이선이 발생하게 되면 아크가 크게 발생한다. 이선현상으로 인한 과도특성을 연구하기 위해 이선이 발생하지 않을 경우와 저항부하만 연결한 경우, R-L부하를 연결한 경우 등 다양한 경우에 대해 변압기 1차측 전압과 전류, 변압기 2차측 전압과 전류를 측정하여 고찰하였다.

3.2.1 이선이 발생하지 않은 경우(저항부하 15.6Ω)

그림 5는 전원의란 시뮬레이터 상부에 설치된 원관이 회전하고 있는 상태에서 팬터그래프와 접촉이 정상적으로 이루어져 이선현상이 발생하지 않을 때 저항부하에 흐르는 전류와 전압과형을 보여준다. 상용전원 220V가 팬터그래프 및 변압기 2차측을 통해 부하에 인가되므로 전압위상과 동상인 정현파 전류가 흐른다.

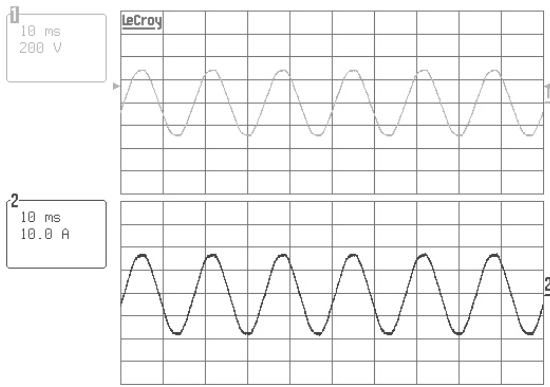


그림 5 부하측 전압, 전류(200V,10A/div, 10ms/div)
Fig. 5 Voltage, current of load side

3.2.2 이선이 발생한 경우

그림 6은 R-L(15.6Ω,10mH)부하를 직렬로 연결한 후 차단장치를 통해 개방한 상태에서 전원의란 시뮬레이터를 구동하면서 변압기 1차측 전압, 전류를 측정된 파형이다.

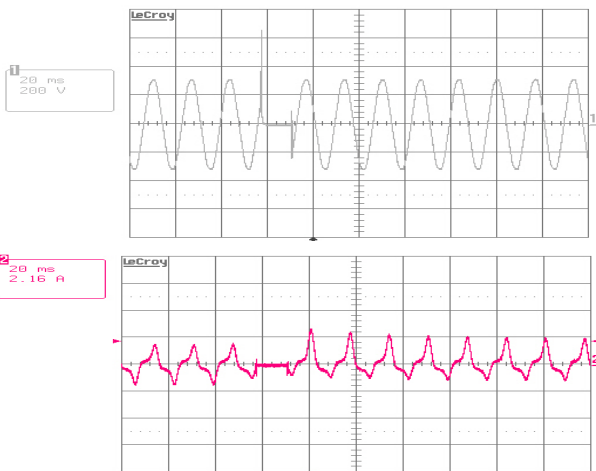


그림 6 RL(15.6Ω,10mH)부하를 연결했을 때 변압기 1차측 전압, 전류(200V,2.16A/div, 20ms/div)
Fig. 6 Transformer 1st voltage, current in case of no load

부하가 개방된 상태이므로 변압기 1차측에 정현파 전압은 인가되지만, 전원공급라인-팬터그래프-변압기로 연결되고 2차측이 무부하이므로 변압기에서의 누설자속성분으로 인해 왜곡된 전류가 흐른다. 또한 전원의란 시뮬레이터가 회전 중에 이선이 발생하는 순간 변압기 공급전압은 인가전압의 2배인 과도전압이 발생하고 전류는 흐르지 않다가 다시 팬터그래프와 상부 회전판이 접촉하는 순간 과도전류가 흐르다가 지수 함수적으로 감소하여 수 사이클 후에 정상적으로 흐름을 보여준다.

그림 7은 저항만을 연결한 경우 이선이 발생하였을 때 부하에 인가되는 전압과 전류과형을 보여준다. 이선이 발생한 경우 부하에 전류가 흐르지 않다가 다시 팬터그래프가 전차선(회전판)이 접촉되는 순간 과도전류가 부하에 흐르고 있다. 이는 이선되는 순간 변압기에 축적된 자속성분이 다시 부하에 공급되어 발생하는 되고 있음을 의미한다.

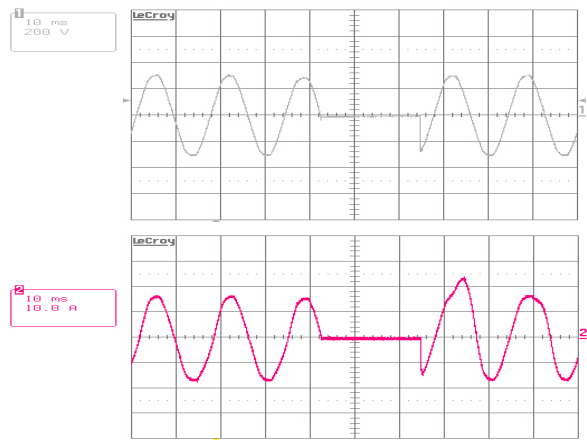


그림 7 저항 15.6Ω만을 연결했을 때 부하측 전압, 전류 (200V,10A/div, 10ms/div)
Fig. 7 Load voltage, current in case of connected R

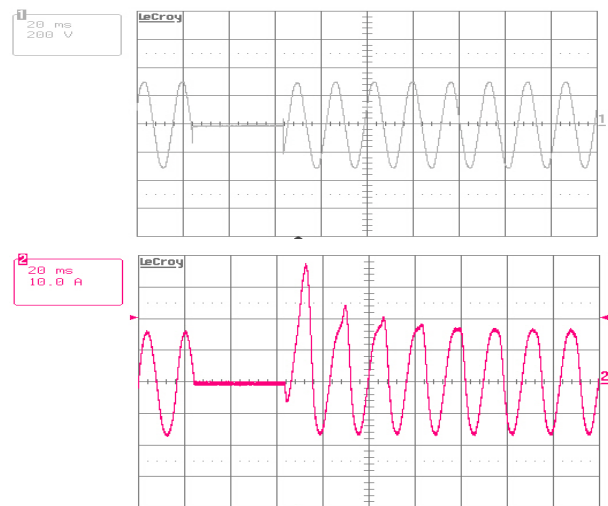


그림 8 RL(15.6Ω,10mH)부하를 연결했을 때 부하측 전압, 전류(200V,10A/div, 20ms/div)
Fig. 8 Load voltage, current in case of connected RL load

그림 8은 RL부하를 연결한 후 이선현상으로 인해 부하에 미치는 영향을 살펴보았다. 인가전압이 Zero되는 순간 이선

현상을 발생시켰을 경우 과도전압이 거의 나타나지 않고 있지만 다시 전차선과 팬터그래프가 접촉하는 순간 정상전류의 2배 이상에 가까운 과도전류가 크게 발생하여 4 사이클 동안 지수 함수적으로 감소하고 있음을 보여준다. 이것은 식 (3)에서 표현된 수식과 유사함을 알 수 있다.

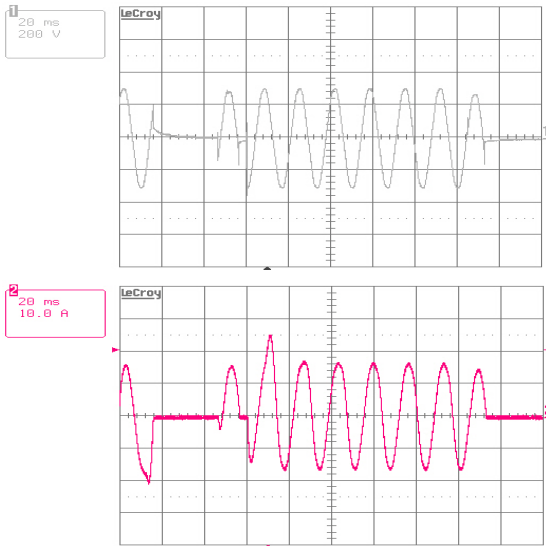


그림 9 이선이 연속으로 발생했을 경우 부하측 전압, 전류 (200V,10A/div, 20ms/div)

Fig. 9 Load voltage, current in case of discredited contact loss

그림 9는 RL부하를 직렬로 연결한 상태에서 이선이 연속적으로 발생한 경우로 이선순간 서지형태의 전압이 발생하고 과도전류가 흐름을 보여준다. L의 영향으로 전압과 전류의 위상이 다르기 때문에 R만의 부하를 연결하였을 때 보다 출력전압 및 출력전류의 변동이 많음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 이선으로 인한 전원의란이 차량내의 전력 변환장치에 미치는 영향을 살펴보기 위해 전원의란 시뮬레이터를 제작하였다. 이를 위해 400km/h급 차세대 고속철도 차량에 대한 전력변환장치의 시스템 요구사항에 준하여 파라미터를 산정한 후 이선현상을 모의하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 고속전철이 주행 중 이선이 수시로 발생하는데 이로 인해 변압기 1차측 및 부하에 서지전압 및 전류가 유입됨을 확인하였다.
- (2) 이선시간에 따라 부하에 미치는 정도, 즉 전도성 노이즈 및 전류의 왜곡정도가 다르다는 것을 확인하였다.
- (3) 철도차량 부하의 특성에 따라 이선에 따른 전류의 왜곡정도가 다르다는 것을 확인할 수 있었고 식(3)과 유사한 과도특성을 보였다.

참 고 문 헌

[1] 철도청, “전철구간에서 발생하는 고조파 현황 및 대책

연구보고서”, 1998.

- [2] 한국전기연구원, “전원방해(PLD) 현상과 기술동향 연구보고서”, 2000.
- [3] 김진우 외 4인, “고속전철용 가선-팬터그래프 시스템의 모델링 및 접촉력 해석”, 한국소음진동공학회 논문집 Vol. 13, No. 6, pp.474-483, 2003.
- [4] 김정수 외 1인, “주행 중 발생하는 고속전철 집전 신호의 동작 해석”, 홍익대 과학기술연구논문집, Vol. 14, 2003.
- [5] 이봉이 외 3인, “팬터그래프와 전차선 사이에서 발생하는 아크 특성에 관한 연구”, 한국조명·전기설비학회 추계 학술대회 논문집, pp.367-370, 2005.
- [6] 김재문, 김양수 외 2인, “전차선-팬터그래프 사이의 이선현상에 따른 전원의란이 보조전원장치에 미치는 영향”, 대한전기학회 전기설비위원회 춘계학술대회 논문집, pp197-181, 2008.
- [7] Berardo Tellini, Massimo Macucci, et al., Line-Pantograph EMI in Railway Systems, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2001.
- [8] 한국철도기술연구원, “차세대 고속철도 기술개발사업 1차년도 Workshop”, 2008.

저 자 소 개



김재문 (金才文)

1994년 성균관대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 동 대학원 졸업(공학). 2000년~2004년 2월 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원. 2006년~현재 국토해양부 철도기술 전문위원, 2004년 3월~현재 한국철도대학 철도차량전기과 조교수.

Tel : 031-460-4612

Fax : 031-461-2944

E-mail : goldmoon@krc.ac.kr



김양수 (金陽洙)

2004년 고려대 대학원(공학). 1971년 1월~2002년 3월 철도청 근무, 1999년 11월 전기철도 기술사, 2008년 1월~현재 국토해양부 철도건설 심의위원, 2008년 1월~현재 항공철도사고조사위원회 철도분야 자문위원, 2008년 2월~현재 교통안전공단 철도종합안전 심사위원, 2002년 3월~현재 한국철도대학 철도차량전기과 부교수.

Tel : 031-460-4442

E-mail : kysrail@dreamwiz.com