

강체전차선로의 특성을 고려한 급전시스템에서 이선에 따른 철도차량 전력변환장치에 대한 특성에 관한 연구

A Study on Characteristic of Power Conversion System in Electric Railway Vehicle
According to Contact Loss in Feeding System Considering Characteristic of Rigid Bar

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

Abstract - In this paper, Characteristic of power conversion unit of a railway vehicles according to contact loss in feeding system that applied impedance of rigid conductor is analyzed. It applied impedance of rigid bar in modeling of electric railway system. Railway vehicles are performed of modeling based on the performance of the electric railway vehicle. Effects of the contact loss in the power conversion unit were analyzed via main transformer of railway vehicle, the input and output voltage characteristics of the converter through contact loss was generated after linking the vehicle with feeding system.

Key Words : Power conversion system, Railway feeding system, Railway vehicle, Contact loss

1. 서 론

전기철도 기술의 발달로, 전기철도분야에서도 다양한 전차선 시스템이 상용화 되었고, 지하구간에서는 강체 조가식 급전방식의 사용이 일반화 되었다. Catenary식의 가공 전차선에 비해, 지하구간에서 보수작업의 축소, Tunnel 단면의 축소로 인한 건설비, 운영비의 축소 등과, 단선사고 방지 등의 안전상 장점 때문에 강체가선방식의 사용이 확대되고 있는 추세이다. 더욱이 장력이 가해지지 않아 단선사고가 없어 안전성이 크게 증대되는 점은 긴 터널구간에서 갖는 강체전차선방식의 큰 장점이다. 이 강체조가 방식은 강체단선식(Simple Rigid System)이 주로 사용되며 현재 도시전철의 지하구간에서 사용하는 대표적인 조가방식이 되었고 현재 우리나라를 비롯한 각 국의 도시전철 지하구간에는 대부분 이 방식을 사용하고 있다. 근래 들어서는 지하철뿐만 아니라 일반철도의 터널에서도, R-bar type의 강체가선방식이 사용되고 있으며, 성능향상요구에 따라 속도향상과 더불어 집전성능의 개선이 연구되고 있다[1, 2]. 한편 집전성능의 개선에는 이선현상을 분석하는 것이 매우 중요하다. 철도차량의 주행속도가 증가함에

따라 등고를 유지하던 전차선의 접촉력이 변하여, 물리적으로 팬터그래프와 떨어지는 이선현상이 발생하며 이는 전기철도가 고속 화됨에 따라 수반되는 주요 문제점 중 하나이다. 이러한 이선현상은 전차선에서 팬터그래프로 전력을 공급하는 도중에 발생하므로 접촉면에서 아크방전을 일으킨다. 이 때 발생하는 아크는 팬터그래프와 전차선을 마모시켜 파손, 수명단축 등의 물리적 문제뿐만 아니라 철도차량 및 내부 회로에서 전기적인 문제를 발생시킨다[3].

본 논문에서는 강체전차선로의 임피던스를 적용한 급전시스템에서 이선에 따른 철도차량의 전력변환장치에 대한 특성을 분석하였다. 급전시스템 모델링에는 강체전차선로의 임피던스를 적용하였으며 철도차량은 동력집중식 철도차량의 성능을 기준으로 모델링을 수행하였다. 급전시스템과 차량을 연계하고 이선현상을 발생하여 철도차량의 주변압기, 양방향 컨버터의 입력과 출력전압 특성을 확인을 통하여 전력변환장치에 미치는 영향을 분석하였다. 분석결과 이선이 발생할 때 철도차량의 컨버터 입력전압과 주파수가 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 이선이 계속될 경우 컨버터의 변압기의 손상을 줄 수 있을 것으로 보며 본 연구결과는 실제 철도차량의 이선현상을 분석하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 본 론

본 논문에서는 강체전차선로의 임피던스를 적용한 급전시스템에서 이선에 따른 철도차량의 전력변환장치에 대한 특성을 분석하기 위하여 AT급전시스템을 모델링하였으며 철도차량은 동력집중식 철도차량의 성능을 기준으로 모델링하였다.

† 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, Korea

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

Received : January 11, 2016; Accepted : February 28, 2016

2.1 강제전차선로 교류 AT급전시스템 구성

일반적으로 전기를 에너지원으로 주행하는 철도차량에 교류전력을 공급하기 위한 급전회로는 그림 1과 같이 구성된다.

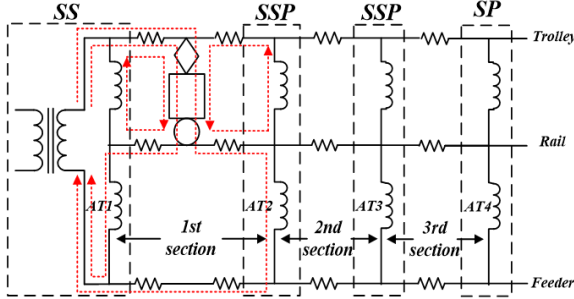


그림 1 전기철도 AT급전시스템

Fig. 1 AT Feeder method of Electric Railway

급전용 전철변전소(SubStation, 이하 SS), 급전구간의 구분과 연장을 위하여 개폐장치를 설치한 급전구분소 (Sectioning Post, 이하 SP), 작업 또는 사고시에 단전.정전구간을 한정하거나 연장 급전을 위한 목적으로 보조 급전구분소 (SubSectioning Post, 이하 SSP), 전차선로의 말단에 가공전차선의 전압강하 보상과 유도 장애의 경감을 위한 단말 급전구분소 (Auto Transformer Post, 이하 ATP) 등으로 구성되어 있다. 국내에 대부분 적용되고 있는 급전방식은 AT방식으로 단권변압기 (Auto Transformer, 이하 AT)는 전차선과 급전선에 설치가 되며, 중성점은 레일에 연결이 되고 양단을 전차선과 급전선에 각각 연결되는 급전회로 방식이다. 따라서 전차선은 레일보다 전위가 높으며, 가공 급전선은 레일 및 대지보다 전위가 낮다. AT는 변압기 2차측을 기준으로 전차선과 급전선 사이에 55[kV]를 인가하게 되며, 중성점이 전차선과 레일 사이에 연결되어 있어 27.5[kV] 전압을 인가한다[4]. 한편 강제전차선로의 특성을 위하여 강제전차선로의 임피던스 데이터를 반영하였다.

2.1.1 강제전차선로 R-BAR의 임피던스 수식

전차선로의 설계 및 특성을 정의하는데 중요한 요소 중에 하나가 임피던스이다. 교류 전차선로의 전압강하를 계산할 때 전차선로는 대지 귀선으로 자기 임피던스를 고려하여야 하며, 교류 전차선로 회로의 임피던스는 일반 3상 송전선과 다른 귀선이 레일을 따라 대지에 접속되는 1선 접지 불평형 회로이다. 지표상 가선된 전선의 대지 귀로 자기 임피던스 Z_s 는 내부 임피던스 Z_i 와 외부 임피던스 Z_o 의 합으로 구해지며, Carson-Pallaczek의 외부 임피던스 산출 공식에 의해 다음과 같이 계산할 수 있다[5].

$$Z_s = R + j\omega L \tag{1}$$

$$R = \frac{1}{58} \times \frac{100}{C} \times \frac{1000}{S} \times 1 + \alpha(T - 20) \tag{2}$$

$$L = \frac{1}{2} \times \mu_s \times 10^{-4} \tag{3}$$

$$Z_o = w \times \left(\frac{\pi}{2} - \frac{4X}{3\sqrt{2}} \right) + \tag{4}$$

$$j\omega \left(4.605 \times \ln \frac{4h}{r \times X} + \frac{4X}{3\sqrt{2}} - 0.1544 \right) \times 10^{-4}$$

$$X = 4\pi h \sqrt{20\sigma f} \times 10^{-4} \tag{5}$$

$$X' = 2\pi \sqrt{20\sigma f} \times 10^{-4} \tag{6}$$

여기서, Z_i : 내부임피던스 [Ω/km], Z_o : 외부임피던스 [Ω/km], R: 저항, C: 도전율 [%], S: 도체 단면적 [mm^2], T: 주변 온도 ($^{\circ}C$), α : [Ω/km]저항온도계수, L: 인덕턴스 [H], μ_s : 비투자율, r: 도체 반경 [m], f: 주파수 [Hz], h: 지표에서 R-BAR까지의 높이 [m], σ : 대지도전율 [S/m], hr: 레일의 높이가 hr, b : R-BAR와의 수평거리

국내에 적용된 터널에 설치되는 R-BAR 및 레일의 특성 인자는 표 1과 같다. 이를 통해 임피던스를 계산하면 아래 내부 임피던스 $Z_i = 0.0154 + j0.0189$ [Ω/km], 외부 임피던스 $Z_o = 0.0584 + j1.8101$ [Ω/km] 이므로 자기 임피던스 $Z = Z_i + Z_o = 0.0739 + j0.8021$ [Ω/km]이다.

표 1 R-bar의 특성

Table 1 Characteristics of R-bar

전도율 @20 $^{\circ}C$ [%]	51
단면적 [mm^2]	2,200
열저항계수	0.00429
반지름 [m]	0.0265
높이 [m]	5.562

2.1.2 강제전차선 R-bar의 집전성능

Pantograph의 추종성능은 이선시간으로 판정한다. 그림 2와 그림 3은 협소터널 어느 한 개소에서 실험한 이선시간 데이터로 [6] R-Bar는 이선특성이 70~150[km/h]까지 10[ms] 이하의 결과를 보였다.

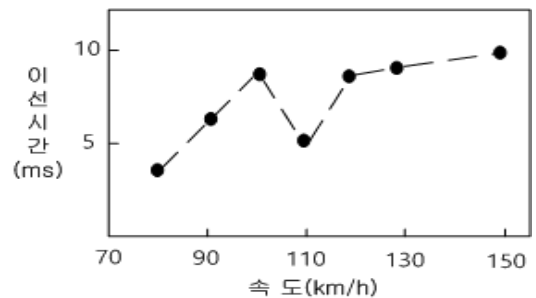


그림 2 R-bar 이선시간

Fig. 2 Contact loss time of R-bar

그림 3에서와 같이 이선율은 150[km/h]에서 2[%] 이내이다. 하지만 본 논문에서는 최악의 상황을 고려하여 1.3[s] 동안 12[ms]의 이선을 3번 발생하도록 하였다. 이때 이선시간은 총 36[ms]로 이선율은 약 2.8[%]이다.

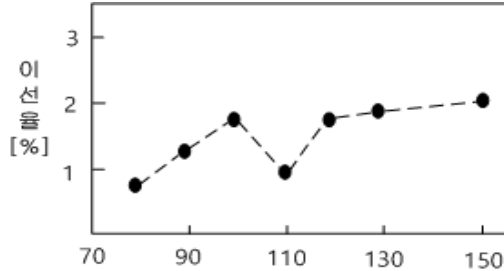


그림 3 R-bar의 이선율
Fig. 3 Contact loss rate of R-bar

2.2 철도차량의 전력변환장치 구성

동력집중식 철도차량의 추진시스템은 크게 컨버터와 인버터로 이루어진 전력변환장치와 견인전동기인 유도전동기, 제어시스템으로 구분된다[7]. 전력변환장치는 IGBT 소자와 제어기술의 발전에 따라 SVPWM(Space Vector Pulse-Width Modulation) 인버터 제어방식을 적용한다.

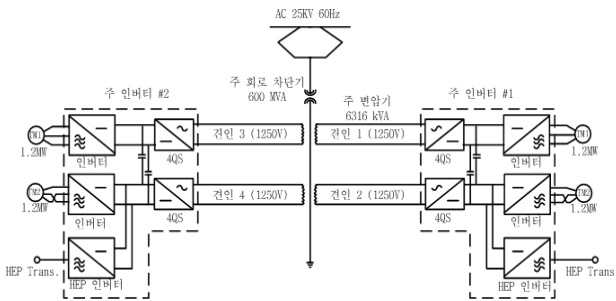


그림 4 동력집중식 철도차량의 주회로도
Fig. 4 The Main Circuit for the Centralized power railway vehicle

전력변환장치는 주변압기 2차측 권선으로부터 교류전압을 직류전압으로 바꾸는 4상한 컨버터와 컨버터 출력 전압을 3상 교류 전압으로 변환하여 견인전동기인 유도전동기를 구동하는 유니트장치로 구성된다.

3. 시뮬레이션

전철변전소(SS)는 한전 변전소에서 공급된 154[kV] 전압을 스코트변압기를 통해 55[kV]로 변압하여 M상, T상으로 전압을 공급하도록 모델링하였다 또한 전철변전소(SS), 보조급전구분소

(SSP), 급전구분소(SP)의 단권변압기를 모델링하여 상선과 하선에 27.5[kV]를 공급할 수 있도록 하였으며, 전차선로도 상세 모델링하였다. 급전계통방식은 단독급전방식으로 그림 5와 같이 한전변전소의 3상 100[MVA] 용량의 154[kV] 전압을 수전받아 스코트 변압기를 거쳐 SS-SSP-SP순으로 PSIM를 이용하여 구성하였다.

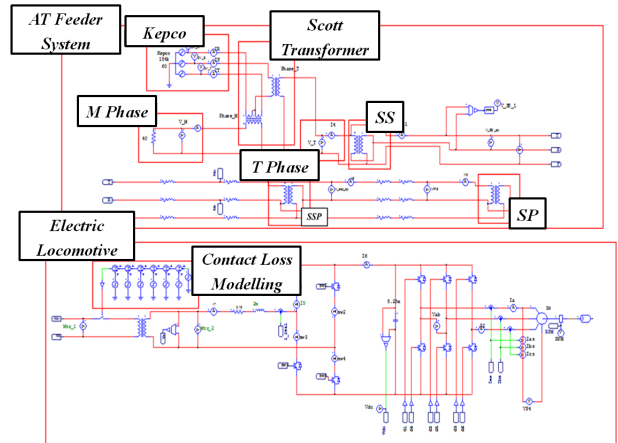


그림 5 AT급전시스템 연계 철도차량 시뮬레이션 회로도
Fig. 5 Circuit of AT feeder system applied railway vehicle

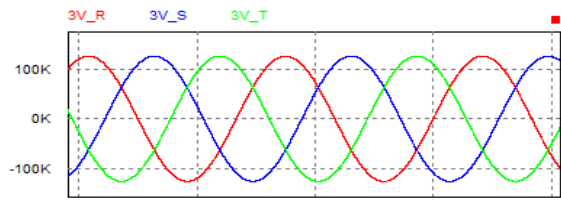
표 2 시뮬레이션에 적용된 파라미터
Table 2 The used simulation Parameter

변수	데이터
한전전압	3상 154[kV]
전차선-급전선 전압	55[kV]
전차선-레일 전압	27.5[V]
입력전압(V_{in})	1,250[V]
컨버터출력(V_{dc})	2400 ~ 2600[V]
인버터전류(I_0)	3상 780[A]
견인전동기 속도	최대 3460[rpm]

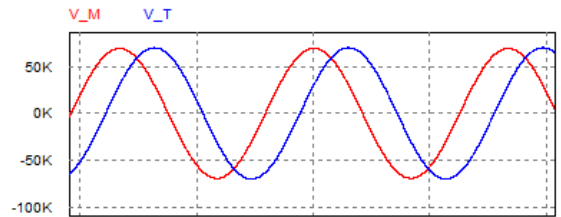
또한 추진시스템에 대한 모델링은 그림 4에서 4상한 컨버터 1 Unit와 추진용 인버터 1 Unit가 연결되어 견인전동기를 구동하는 시스템으로 하였다. 표 2는 시뮬레이션을 위해 사용된 파라미터 값을 보여준다. 컨버터는 PLL제어를 통하여 역률제어를 수행하였고 부하에 관성부하를 사용하여 회생제동이 이루어질 수 있도록 하였다.

3.1 급전시스템 시뮬레이션

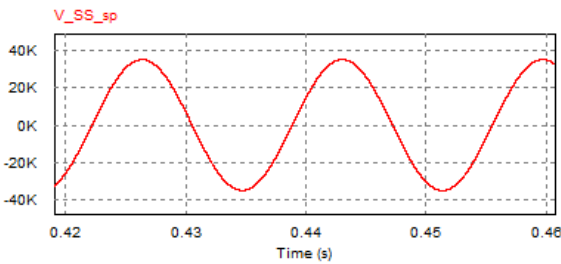
그림 6(a)는 한국전력 154[kV]를 전압파형을 나타내었다. 이후 스코트 변압기를 통해 그림 6(b)와 같이 전차선과 급전선의 전압은 M좌와 T좌에서 55[kV]를 출력한다. 이후 단권변압기 중성점을 기준으로 전차선의 전압은 27.5[kV]로 나타난다.



(a) 한국전력에서 수전되는 전압



(b) 전차선과 급전선 M좌, T좌의 전압파형



(c) 전차선과 레일의 전압

그림 6 급전시스템 모델링 파형

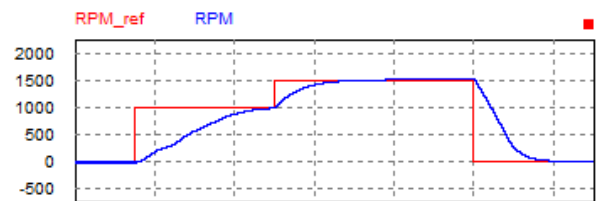
Fig. 6 Feeder system modeling waveform

3.2 AT급전시스템 연계 철도차량 시뮬레이션

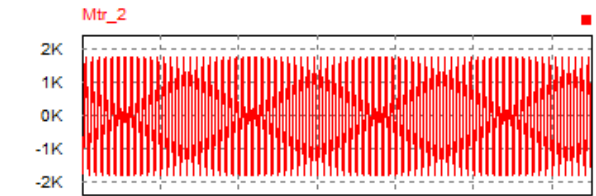
그림 7은 AT급전시스템을 연계한 철도차량 시뮬레이션 파형을 나타내었다. 그림 7(a)에서와 같이 철도차량의 기준 속도는 0→1,000→1,500→0[rpm]으로 지령을 내렸으며 실제 속도가 이에 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 7(b)에서와 같이 컨버터의 입력전압은 1,250[V]이며 그림 7(c)에서는 속도 상승하는 과도 시점에서 전류가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 그림 7(d)는 컨버터 출력의 DC-Link 단을 나타내었으며 0→1,000→1,500[rpm]의 역행시에는 전압이 강하가 발생하며 1,500→0[rpm]의 회생시에는 전압이 상승하는 것을 확인할 수 있다.

3.3 이선 발생시 AT급전시스템 연계 철도차량 시뮬레이션

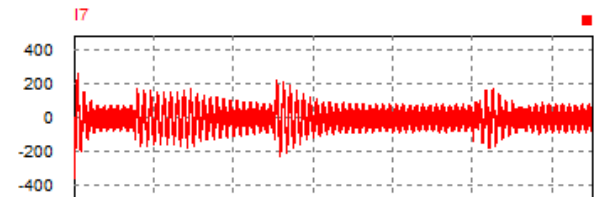
그림 8은 AT급전시스템을 연계한 철도차량 시뮬레이션 파형을 나타내었다. 그림 8(a)에서와 같이 철도차량의 기준 속도는 0→1,000→1,500→0[rpm]으로 지령을 내렸으며 0.3[s], 0.55[s], 0.9[s]에 이선을 발생시켰다. UIC 799 OR의 기준은 100[m] 거리 당 이선시간 10[ms]를 넘고 25[ms] 미만의 아크를 이선으로 판단한다[8]. 따라서 본 논문에서는 12[ms]의 이선을 발생시켰



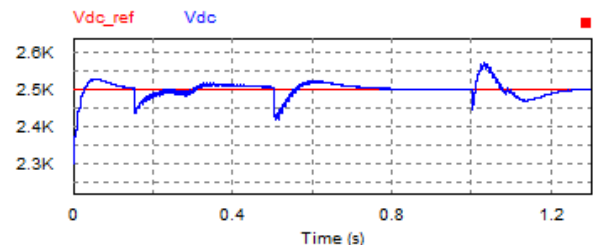
(a) 기준속도 및 실제속도



(b) 주변압기 2차측 전압 (컨버터 입력전압)



(c) 컨버터 입력전류



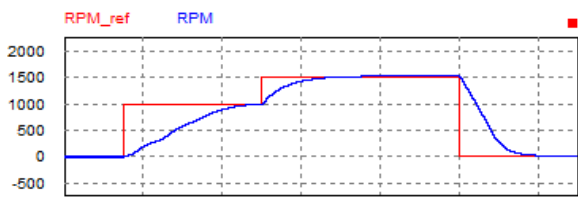
(d) DC-Link의 기준전압 및 실제전압

그림 7 철도차량 연계 급전시스템 모델링 파형

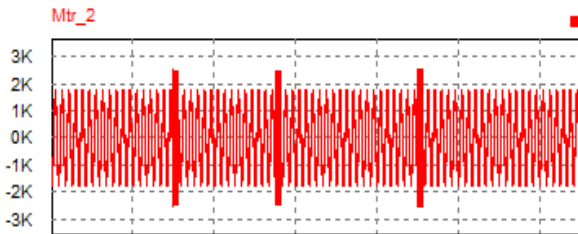
Fig. 7 Feeder system modeling applied railway vehicle waveform

다. 그림 8(b)에서와 같이 이선이 발생된 지점에서 이상전압을 확인할 수 있었으며 그림 8(c)에서와 같이 전류가 0이 되는 것을 확인할 수 있었다. 그림 8(d)에서 0.3[s]와 0.55[s]의 속도가 변하는 시점에서는 전압 감소가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

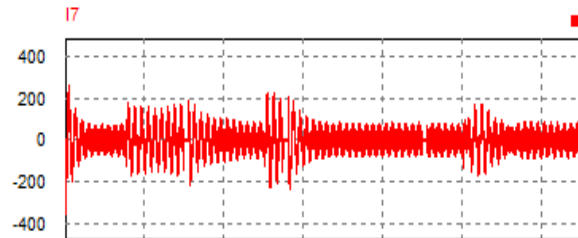
그림 9는 전류의 변화가 가장 큰 0.55[s]에서 이선을 발생시킨 조건의 컨버터 입력전압, 전류를 확대한 그래프이다. 입력 전압의 최대치는 2,489[V]로 이선이 발생하지 않을 경우의 입력전압 1,767[V]에 비해 약 700[V]이상 상승한 것을 확인할 수 있었다. 또한 전류는 0이 되는 것을 확인할 수 있다. 또한 주파수도 약 250[kHz]로 이선이 발생하지 않을 경우의 주파수 60[Hz]에 비해 약 4,000배 이상 상승하였다. 이는 변압기 누설인덕턴스로 인한 자화현상으로 발생한다.



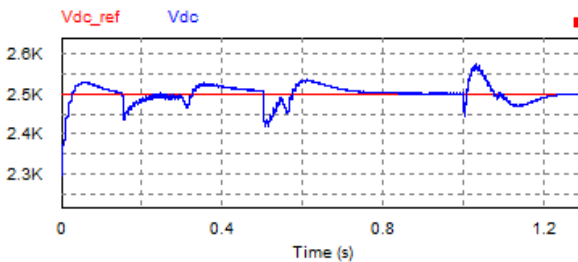
(a) 기준속도 및 실제속도



(b) 주변압기 2차측 전압 (컨버터 입력전압)



(c) 컨버터 입력전류



(d) DC-Link의 기준전압 및 실제전압

그림 8 이선발생을 적용한 급전시스템 모델링 파형

Fig. 8 Feeder system modeling applied generation of contact loss waveform

4. 결 론

본 논문에서는 강제전차선로의 임피던스를 적용한 급전시스템에서 이선에 따른 철도차량의 전력변환장치의 특성을 분석하였다. 급전시스템 모델링에는 강제전차선로의 임피던스를 적용하였으며 철도차량은 8200대 전기기관차의 성능을 기준으로 모델링을 수행하였다. 급전시스템과 차량을 연계하여 이선현상을 발생하여 철도차량의 주변압기, 양방향 컨버터의 입력과 출력전압 특성을 확인을 통하여 전력변환장치에 미치는 영향을 분석하였다.

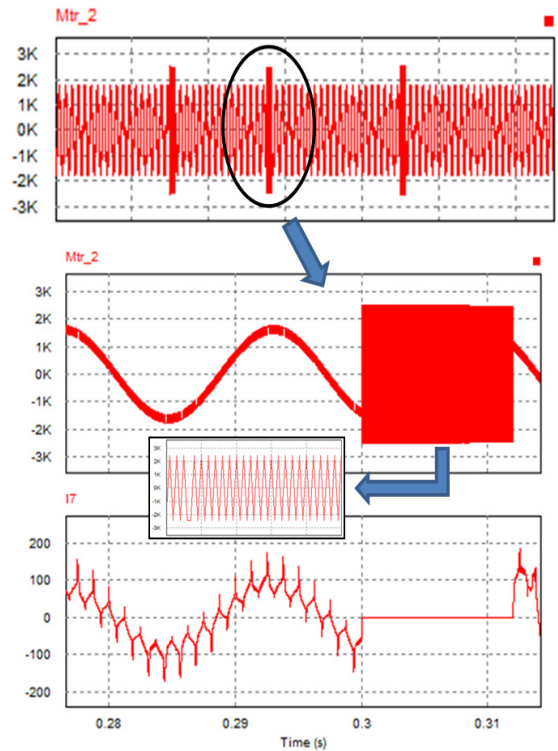


그림 9 이선 발생시의 변압기 2차 전압, 전류 파형

Fig. 9 Second side voltage and current of Transformer when contact loss occur

분석결과 이선이 발생하였을 때 기준 속도에 실제 속도가 추종하는 것에는 문제가 없었지만 철도차량의 컨버터 입력전압이 700[V] 상승하며 주파수도 4,000배 가까이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 이선이 계속될 경우 컨버터의 변압기의 손상을 줄 수 있을 것으로 판단되며 본 연구결과는 실제 철도차량의 이선현상을 분석하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 이선 발생시 나타나는 컨버터 입력의 이상전압을 감소하는 대책을 마련하는 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 철도기술 연구사업 중 '철도 핵심부품 및 장치 기술개발 2단계(철도부품창의연구센터)' 과제의 지원을 받아 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] Jo, Han-Bum, "A Study on the Improvement of Overhead Rigid Conductor Line of Electric Railway for

Speed-up, master's thesis, Seoul National University of science and technology, 2011.

- [2] Park, Young et al, "On the Implementation of an Advanced Judgement Algorithm for Contact Loss of Catenary System", KIEE, Vol. 63, No. 6, pp. 850-854, 2014.
- [3] Lee, Sung-Gyen et al, "The Influence on Traction Return Current by Pantograph Detachment Frequency of High-speed Train", JIEIE, Vol. 28, No. 9, pp. 8-13, 2014.
- [4] Jung, No-Geon, "The Analysis of Short Current on Actual System through Power Analysis of AT Feeder System for Electric Railway", KIEE, Vol. 63, No. 11, pp. 1582-1587, 2014.
- [5] Bae, Sang-Joon, Jang, Kwang-Dong, Lee, Ki-Won, Park Youn-Cheol, "A Study on Characteristics of Overhead Rigid Conductor System for Developing the High-speed System up to 250km/h", KIEE, Vol. 64, No 3, 2015.
- [6] Yim, Geum-Kwang "Analysis of Overhead Rigid Conductor Line for Subway Tunnel Sections", The Transactions of KIEE, Vol 62, No. 11, pp. 1640-1646, 2013.
- [7] 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.
- [8] KR, "Dynamic Performance of Catenary System", 2012.

저 자 소 개



정 노 건 (No-Geon Jung)

2012년 한국철도대 철도차량전기와 졸업.
2015년 한국교통대 교통대학원 교통시스템공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 교통시스템공학과 박사과정



이 환 (Hwan Lee)

2014년 한국철도대 철도차량전기와 졸업.
2015년~현재 한국교통대 교통대학원 교통시스템공학과 재학



김 재 문 (Jae-Moon Kim)

1994년 성균관대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 동 대학원 졸업(공학). 2000년~2004년 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원. 2006년~현재 국토교통부 철도기술 전문위원, 2004년 3월~현재 한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과/철도전기전자공학과 부교수

E-mail : goldmoon@ut.ac.kr