

이선현상을 포함한 고속철도차량의 전도성 잡음 해석

(Analysis on Conductive Noise of High-Speed Train Including Pantograph Detachment)

이성근* · 조영만 · 고광철**

(Sung-Gyen Lee · Young-Maan Cho · Kwang-Cheol Ko)

Abstract

In high-speed train, the EMI is generated by pantograph detachment and switching device of motor-block. Especially, the conductive noise flows through rail as return feeder influences unintended results to sub-station, transformer, etc. These phenomena were investigated by PSIM circuit analysis tool and each part of railway system is modeled by circuit elements and switching devices. Consequently, the distorted wave in return feeder current occurs by the high speed switching frequency, and the overvoltage is applied by the pantograph detachment. Also the distortion of return current is high in starting point and it decreases from the proximity of a starting point to the end of terminal.

Key Words : Conductive Noises in High-Speed Train, Pantograph Detachment, Switching Frequency

1. 서 론

일반적으로 고속으로 주행 중인 고속철도에서는 전력을 공급받기 위한 팬터그래프와 전차선 사이에서 접점이 물리적으로 떨어지는 이선현상과 주 전력변환장치(Motor-block)의 고속 스위칭을 주 발생원으로

전자과장해(EMI)가 발생한다[1]. 전자과 장애에는 전도성 잡음과 방사성 잡음이 있으며, 두 잡음 중 특히 전도성 잡음은 귀선선로인 레일을 통해 유입되어 변전소나 변압기에 효율감소 및 과열, 포화, 고조파 성분 유입 등 악영향을 미친다. 기존의 연구들은 실측 자료를 바탕으로 한 현상 분석과 전자과 규정의 준수여부 확인, 그리고 모의실험 등이 주를 이루고 있다. 하지만, 재연성이 낮고 실측이 다소 쉽지 않아 연구에 어려움이 있다. 그러므로 철도 시스템에서 각 부분을 회로 소자와 스위칭소자로 모델링하여 회로해석 함으로서, 전도성 잡음이 미치는 영향에 대한 해석의 재연성과 경제성을 확보하고자 한다.

* 주저자 : 한양대학교 전기공학과 박사과정
** 교신저자 : 한양대학교 전기·생체공학부 교수
* Main author : Dept. of Electrical Eng., Hanyang University, Korea
** Corresponding author : Professor, Dept. of Electrical Eng., Hanyang Univ., Korea
Tel : 02-2220-0348, Fax : 02-2220-1886
E-mail : kwang@hanyang.ac.kr
접수일자 : 2013년 9월 10일
1차심사 : 2013년 9월 12일
심사완료 : 2013년 10월 22일

2. 모델링

시뮬레이션을 위한 모델링 구간은 그림 1과 같이 전체 철도시스템 구간에서 두 단권변압기 사이의 10km 구간으로 정하였다. 모델링은 전차선로와 이선현상, 주 전력변환장치의 세 가지 영역을 대상으로 회로소자와 스위칭 소자로 실시하였다.

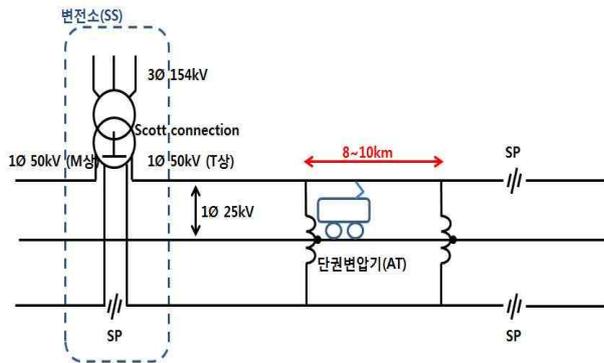


그림 1. 모델링 구간
Fig. 1. Modeling region

2.1 전차선로

전차선은 표 1과 같은 특성을 가지고 있으며, 전차선의 직경은 13.6mm이고 1km 당 저항은 0.17593Ω이다[2].

표 1. 전차선 특성
Table 1. Characteristics of feeder

재질	냉간 압연동	직경	13.6mm
형태	홉붙이선	도전율	98%
단면적	150mm ²	저항	0.17593

전차선로는 그림 2와 같이 구성되어 있고, 전차선은 5.08m의 높이를 유지하도록 설치되어 있다. 도체의 직경과 높이에 따라 발생하는 인덕턴스와 커패시턴스를 전송선(Transmission Line) 모델로 전차선로의 선로정수를 모델링하였다.

수식 (1)과 (2)로 인덕턴스와 커패시턴스가 구해진다.

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r \ln(2b/a)}{\pi} \text{ [H/m]} \quad (1)$$

$$= \frac{(4\pi \times 10^{-7})(1) \ln(2(5.08)/(0.0136))}{\pi}$$

$$= 2.64646 \times 10^{-6} \text{ [H/m]}$$

$$C = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln(2b/a)} \text{ [F/m]} \quad (2)$$

$$= \frac{\pi \times (8.854 \times 10^{-12})(1)}{\ln(2(5.08)/(0.0136))}$$

$$= 4.20231 \times 10^{-12} \text{ [F/m]}$$

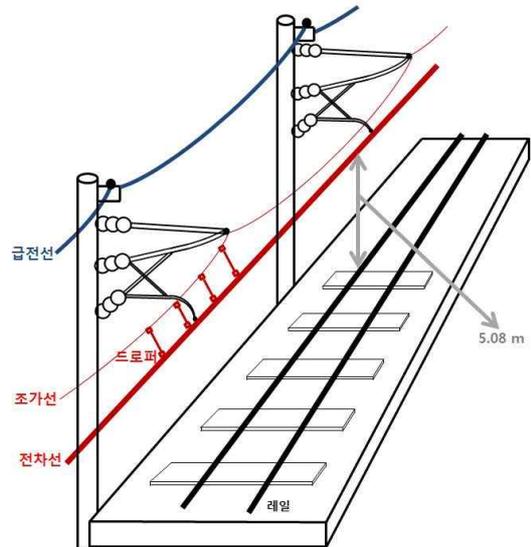


그림 2. 전차선로의 구성
Fig. 2. Formation of traction line

2.2 이선현상

이선현상은 철도차량의 팬터그래프와 전차선 사이에서 주행 속도와 전차선 높이의 변화, 전차선의 요동 등으로 인해 접촉력이 변화하여 물리적으로 순간 떨어지는 현상을 의미한다. 크게 세 가지로 분류되며 팬터그래프의 진동에 의한 소이선, 불연속점에 의한 중이선, 지지점 주기에 의한 대이선으로 분류된다. 이선율은 수식 (3)과 같고, 철도의 건설기준에 관한 규정에

의해 1%를 넘지 않도록 해야 한다[3].

$$\begin{aligned} \text{이선율} &= \frac{\text{이선주행시간}}{\text{전체주행시간}} \times 100\% \\ &= \frac{\text{이선주행거리}}{\text{전체주행거리}} \times 100\% \end{aligned} \quad (3)$$

모델링에서 이선현상을 스위치로 모델링하여 이선 발생 후 다시 접촉되는 현상을 표현하였다. 주행속도가 300km/h인 차량이 1km를 주행하는데 걸리는 시간이 12초(300km : 3600s = 1km : x, x=12s)이므로, 1% 이선율을 고려하여 이선시간을 0.12초로 가정하였다.

2.3 주 전력변환장치

모델링의 대상인 KTX-산천호의 주 전력변환장치는 주 변압기, 2대의 컨버터, 1대의 인버터로 구성되며, 전력변환을 통해 유도전동기 2개를 구동한다. 전차선에서 AC 25kV의 전력을 공급받아 주 변압기에서 AC 1400V로 강압해 각각 두 컨버터에 입력하고, 이를 정류하여 인버터에 DC 2800V를 입력한다. 인버터에서는 PWM 제어를 이용하여 입력된 DC 전압을 유도전동기의 구동에 적합한 3상 AC 전압으로 변환한다[4]. 컨버터부는 일반 주행 시 정류회로의 역할을 하므로 다이오드를 이용한 풀 브릿지 정류회로로 모델링하였다. 인버터부의 PWM 제어회로는 그림 3과 같으며, 레퍼런스 주파수는 주행속도에 따라 거꾸로 구할 수 있다.

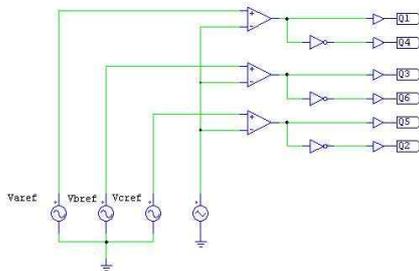


그림 3. PWM 제어회로
Fig. 3. Control circuit of PWM

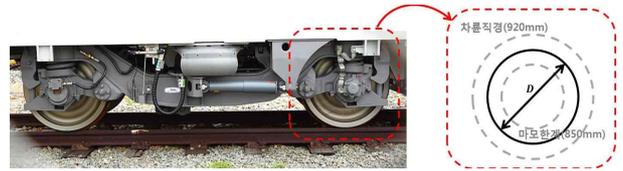


그림 4. 대차구조와 차륜
Fig. 4. Structure of truck and wheel

대차구조와 차륜은 그림 4와 같고, 기어비 $G = 2.19$, 유도전동기의 슬립 $s = 0.0105$ [5], 극수 $P = 4$ 이다. 수식 (4)의 차륜지름 D 와 수식 (5)의 주행속도를 이용하여 유도전동기의 회전 속도를 구하면 수식 (6)과 같고, 레퍼런스 주파수는 수식 (7)로 나타난다.

$$\text{직경 } D = ((\text{차륜지름} + \text{마모한계지름}) / 2) \quad (4)$$

$$\text{주행속도 } V = \frac{60\pi \times D \times N}{1000 \times G} \text{ [km/h]} \quad (5)$$

$$\text{전동기 회전수 } N = \frac{V \times 1000 \times G}{60\pi \times D} \text{ [rpm]} \quad (6)$$

$$\text{레퍼런스 주파수 } f = \frac{P}{120(1-s)} N \text{ [Hz]} \quad (7)$$

따라서 주행속도가 300km/h일 경우 레퍼런스 주파수는 132.7407Hz이다.

3. 시뮬레이션

그림 5 (a)는 시뮬레이션의 모델링 계략도, 그림 5 (b)는 PSIM 회로도를 나타낸다. 두 단권변압기 사이 구간 10km에서 300km/h의 속도로 주행 중인 차량이 1km와 6km, 8km의 각 위치를 지나갈 때를 모델링 구간으로 정하였다. 실제로 단권변압기는 8~10km 간격으로 현장여건에 맞게 설비되어 있고, 결과의 변동 추이를 가시적으로 관찰하기 위해 관측점을 택하였다. 시뮬레이션은 주 전력변환장치가 귀선전류에 미치는 영향을 살펴보고 또 이선현상이 추가되었을 때를 가정하여 실시하였다. 이선현상은 0.12초간 발생하며 이는 0.12초 동안 모델링 한 스위치 소자의 ON/OFF 동작으로 구현하였다.

이선현상을 포함한 고속철도차량의 전도성 잡음 해석

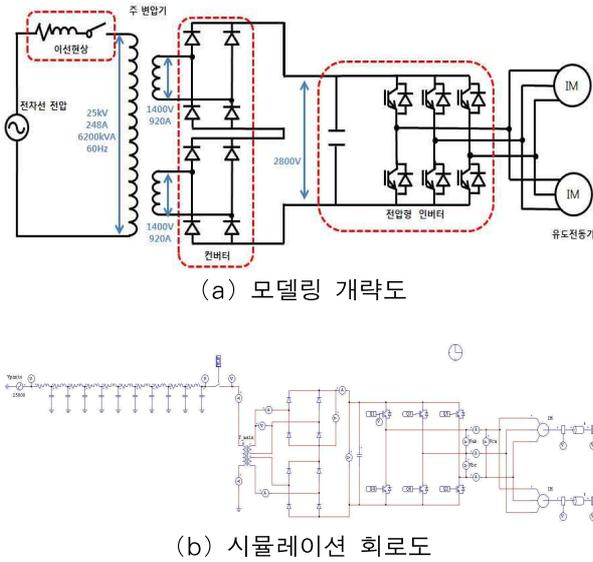


그림 5. 모델링 개략도와 시뮬레이션 회로도
Fig. 5. Modeling schematic and Simulation circuit

이선현상이 발생하지 않은 정상주행 상태의 팬터 그래프를 통해 공급받은 후, 주 변압기를 거쳐 정류된 컨버터 1대의 출력 전압은 그림 6 (a)에서, 두 대의 컨버터 출력을 합친 인버터 입력전압은 그림 6 (b)와 같다.

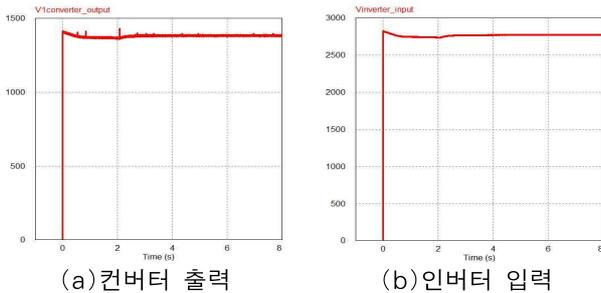


그림 6. 한 대의 컨버터 출력과 인버터 입력
Fig. 6. Output of one converter and input of inverter

그림 7은 주행 중인 차량이 1km의 위치에 있을 때 각각의 주 변압기 1차 측 전압(a)과 귀선선로에 흐르는 전류(b)를 나타내고 있다. 그리고 이선현상이 추가적으로 발생 할 경우의 주 변압기 1차 측 전압(c)과 귀선선로에 흐르는 전류(d)를 나타낸다.

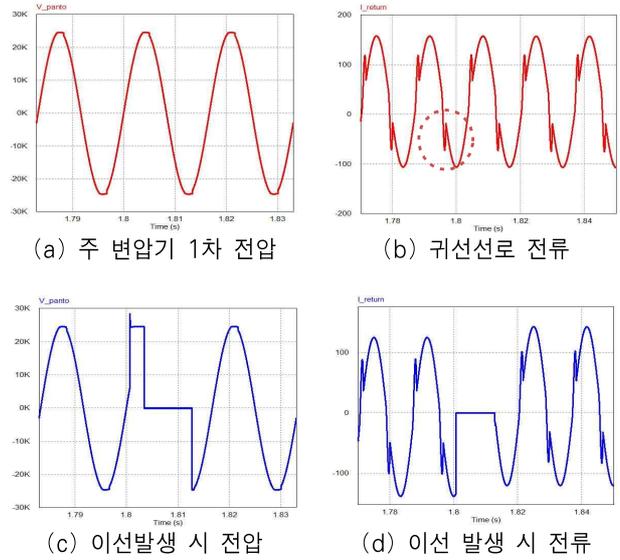


그림 7. 1km 위치 일 경우
Fig. 7. Case of 1km away from AT

그림 8은 6km의 위치에 있을 때 각 파형을 나타내며, 그림 9는 8km의 위치에 있을 경우를 나타낸다.

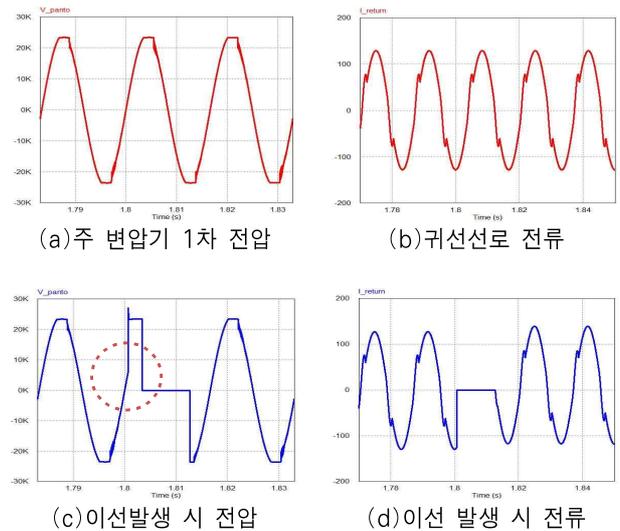


그림 8. 6km 위치 일 경우
Fig. 8. Case of 6km away from AT

세 경우 모두 전반적인 파형의 추세는 유사하게 나타난다. 주 변압기 1차 측 전압의 경우 이선이 발생하였을 때, 정상상태 전압보다 높은 과전압이 이선초기

에 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한, 귀선선로 전류는 주 전력변환장치의 스위칭에 의해 정상상태에서 왜형이 발생하고, 그에 따른 이상전류가 원래 전류보다 높은 것을 확인할 수 있다. 그리고 이선이 발생하면 왜형이 더욱 심해진다.

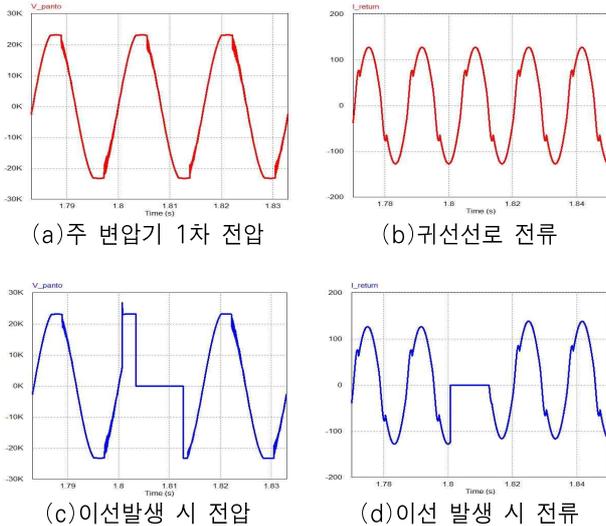


그림 9. 8km 위치 일 경우
Fig. 9. Case of 8km away from AT

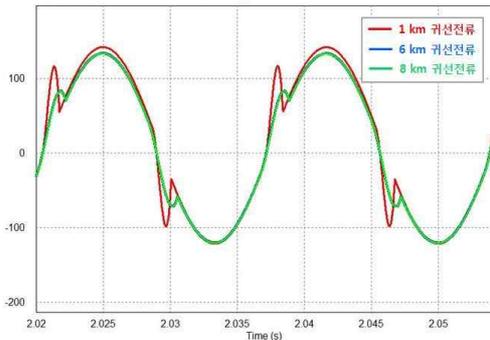


그림 10. 위치에 따른 귀선선로 전류
Fig. 10. Return feeder current with position

그림 10는 위치에 따른 귀선선로 전류를 비교한 것이다. 파형의 형태는 큰 차이가 없으나 위치에 따른 전차선로의 선로정수의 변화로 귀선전류 왜형의 크기가 시작지점의 단권변압기로부터 멀어짐에 따라 감소하는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 철도시스템의 각 부분을 회로소자와 스위치소자로 모델링 하여, PSIM 프로그램을 이용해 주행 중인 고속철도에서 발생하는 전도성 잡음에 대하여 연구하였다. 단권변압기와 단권변압기 사이를 300km/h의 속도로 주행 중인 고속열차에 이선이 발생할 경우를 시뮬레이션 하였으며, 결과는 아래와 같이 정리된다.

- 이선이 발생하지 않은 정상상태에서는 귀선선로 전류에서 전력변환장치의 스위칭에 의한 왜형이 발생하며, 이는 변전소나 변압기에 유입되어 악영향을 발생시킨다.
- 이선현상이 발생 시 이선 초기에 정상상태보다 높은 과전압이 인가되므로, 기기의 정격과 절연에 미치는 전기적 스트레스가 증가한다.
- 차량의 위치가 이동함에 따라 전차선로의 선로정수가 변화해 귀선전류의 왜형이 감소하므로, 출발점에서 가까운 곳에 더 큰 영향을 미친다.

위의 결과로 주 전력변환장치에 의한 귀선선로에 미치는 영향과 이선현상이 추가로 발생 하였을 때의 영향을 확인하였다. 회로로 모델링 한 시뮬레이션 연구를 이용하여, 철도시스템에서 재연성이 어려워 용이하지 않은 상황을 반복적으로 분석해볼 수 있다. 또한 계통 보호를 위한 전력품질 분석장비의 사용이나, 연구를 위한 실측 및 모의실험에 비해 상대적으로 비용을 절감되어 경제성의 확보가 가능하다.

References

- [1] Kunihiro Kawasaki, "Method to Calculate Fluctuations in the Strength of Radio Noise Emitted from Electric Railway Systems", Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, Vol. 50, No. 3, Aug. 2009.
- [2] Yongsu Kim, Hae-Chul You, "Electric Railway", Donillbook, 2008.
- [3] "Regulations regarding the Construction of the Railway Standards", Ministry of Land, Notice No. 236, Article 37, Paragraph 2.
- [4] Sung-Joon Cho., Man-Kyu Jeong, Kwang-Ju Lee, Geon-Tae Park, Du-Sik Kim, "A Study on Propulsion Control System for Korean Train Express(KTX-Sancheon)", Power Electronics Annual Conference, No. 7 pp. 295-296, 2010.

- [5] Sangsu Lim, Jeongchul Kim, Yeong-Ho Park, Jeongsoo Han, "Study on Management Standard of Railway Vehicles Wheel Radius Difference", Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway, No. 10, pp. 1896-1901, 2012.
- [6] Bernardo Tellini, Massimo Macucci, Romano Giannetti, Gabriele Alessandro Antonacci, "Conducted and Radiated Interference Measurements in the Line-Pantograph System", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 50, No. 6, Dec, 2001.
- [7] Andrea Cozza, Bernard Demoulin, "On the Modeling of Electric Railway Lines for the Assessment of Infrastructure Impact in Radiated Emission Test of Rolling Stock", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 50, No. 3, Aug, 2008.
- [8] Kyung-Chul Kim, Seong-Eun Jin, Joo-Hong Lee, Young-Soo Jeon, "Time-varying Harmonics Measurement and Evaluation of the High Speed Electric Train Loads", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 20, No. 7, pp. 29-37, Aug, 2006.
- [9] Verschraegen, Pierre-Vincent. "A Model of the Pantograph Arc Impedance for 50Hz Catenary Voltage." Master of Science Thesis, Stockholm Sweden, 2010.
- [10] Midya, Surajit, and Rajeev Thottappillil. "An overview of electromagnetic compatibility challenges in European Rail Traffic Management System." Transportation Research Part C: Emerging Technologies 16.5 pp. 515-534, 2008.
- [11] Paul W. Smith, "Transient Electronics : Pulsed circuit technology", John Wiley & Sons Ltd, 2002.

◇ 저자소개 ◇



이성근 (李誠根)

1957년 5월 17일생. 1986년 서울시립대 전자공학과 졸업. 2010년 한양대 공학대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한양대 일반대학원 전기공학과 박사과정. 1987~1994년 서울시 공무원. 1994~2012년 서울시 도시철도공사 팀장. 2012년~현재 (주)디투엔지니어링 전무.



조영만 (趙英滿)

1985년 12월 28일생. 2012년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 현재 한양대 일반대학원 전기공학과 석사과정.



고광철 (高光哲)

1959년 1월 31일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동경공업대학 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(박사). 1990~1995년 가천대 전기공학과 조교수. 1995~2005년 한양대 전기공학과 조교수. 2005년~현재 한양대 전기·생체공학부 교수.