

고속전철 주행시 이선현상 모델링 방법에 따른 전도성 노이즈 해석

김재문*, 김양수*, 장진영**
한국철도대학*, 중앙대**

Analysis of conducted noise on modeling methods for loss of contact during traction of high-speed rail vehicle

Jae-Moon Kim*, Yang-Soo Kim*, Chin-Young Chang**
Korea National Railroad College*, Chung-Ang University**

Abstract - The Electromagnetic Interference(EMI) in railway applications is largely due to doing the power conversion for traction and Auxiliary system on the Highspeed Electric Multiple Unit-400X(HEMU-400X). In order to research on EMI in railway applications, it was included how much the HEMU-400X generates it and it has an effect on the equipments of electric system which resulted from Power Line Disturbance (PLD) phenomenon by the loss of contact during its running.

In this study, the dynamic characteristic of a contact wire and pantograph supplying electrical power to high-speed trains are investigated. The analysis of the loss of contact based on Power Simulator program software is performed to develop power line disturbance model suitable for high speed operation. It is confirmed that a contact wire and pantograph model are necessary for studying the dynamic behavior of the pantograph system.

1. 서 론

차세대 고속전철은 동적 부하특성을 갖는 분산형 동력원 시스템으로 고속 주행 중에 전차선을 통해 동력에 필요한 전력을 공급받는 팬터그래프(Pantograph)와 전력용 반도체 소자를 고속 스위칭 제어하여 부하에 전력을 공급하는 컨버터 및 인버터 등 다양한 전자파 Source를 불가피하게 갖추고 있다. 따라서 고속 주행에 따른 신뢰할 수 있는 차세대 고속전철 시스템을 보장받기 위해서는 고속전철의 EMI/EMS/EMC에 대한 대책 연구가 수행되어야 한다.

고속전철의 주행속도가 증가하게 되면 팬터그래프와 전차선사이에 진동도 증가하게 되고 그 결과로 팬터그래프와 전차선 사이의 접촉력 변화가 커지고 이로 인한 이선과 그에 따른 아크가 발생하여 팬터그래프 집전판의 손상을 초래한다는 연구결과가 있다. 이런 현상은 고속전철의 고속화에 어려움을 주고 있는데, 문제점을 해결하기 위해 많은 연구가 이루어지고 있다. 고속에 적합한 전자선 재료로 대체하거나 팬터그래프 자체를 개량하여 동적 움직임이 최소가 되도록 한다. 또한 안정된 집전 성능을 확보하기 위해 접촉력을 해석하여 능동적으로 제어하는 방법 등이 이루어지고 있다.[1]

그러나 이선과 관련된 연구는 대부분 이선현상 자체에 해결을 위한 연구만 이루어지고 있는 실정으로 고속전철이 주행시 이선이 발생할 경우 차량내외에 미치는 영향에 대해 연구하고 대책을 마련해야 한다.

본 논문에서는 이선에 따라 아크가 발생하고 이로 인해 차량내의 전력변환장치 등 전장품에 미치는 영향을 살펴본다. 각 이선의 종류에 대해 모델링을 다양하게 하여 시간 및 주파수 영역에서 전도성 노이즈 성분을 분석하였다.

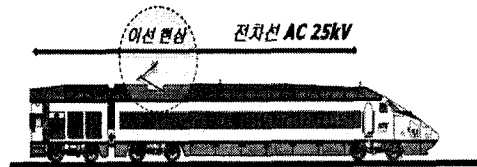
2. 본 론

2.1 이선에 따른 아크현상

동적부하(Dynamic load)인 고속전철은 차량을 중심으로 전철전력 및 통신신호 시스템, 궤도 등 종합적으로 안정적인 인터페이스가 이루어져 있으며, 정적부하(Static load)에 비해 전원의란 현상(PLD)이 항상 존재한다.

본 논문에서 언급하는 이선(Contact Loss)은 외인성 임펄스 노이즈의 유입으로 인한 전도성 형태로 전력계통인 전차선에 강력한 노이즈 레벨을 갖고 다양한 형태로 나타나는데, 기기에 치명적인 영향을 미치기 때문에 매우 중요하며 반도체 소자를 이용한 스위칭 전원으로 투입시의 돌입전류로 인한 과도현상과 같은 특징을 갖는다. 뿐만 아니라 고속전철이 주행하는 동안 전차선과 팬터그래프 사이의 접촉력이 불안정하여 이선으로 인한 아크(Arc)현상은 방사성 노이즈 형태로 나타나게 되어 이선은 전도성 및 방사성 노이즈를 유발시킨다. 이선은 주행 노선의 구배(Gradient) 및 불안정한 접촉력 등으로 발생 빈도가 높으며 그 밖에 고속전철이 사구간(Dead Section)을 통과하는 경우에 발생한다.

이선은 접촉 손실시간(Loss time of contact)에 따라 소이선, 중이선, 대이선으로 나뉜다. 소이선인 경우 이선시간은 수십의 1초(10ms 단위) 정도로 팬터그래프 습도판의 미세 진동에 의해 발생되고, 중이선은 이선시간은 수분의 1초(100ms 단위) 정도로 팬터그래프가 전차선의 경점에 의해 충격을 받을 때 발생한다.



<그림 1> 접촉력 불안정에 따른 이선현상

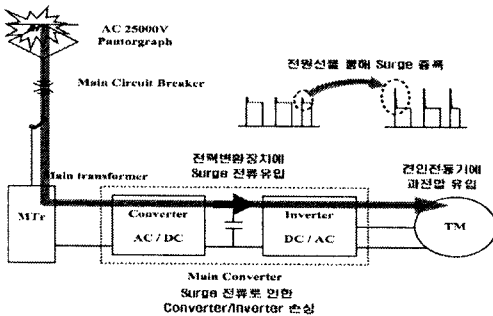
대이선은 이선시간이 1~2초에 이르며, 전차선의 지지점 통과 직후 팬터그래프 자체가 도약하여 발생하는 현상이다. 고속전철 주행시 이선이 발생하게 되면 이선 개소의 시점부 및 종단부는 아크와 충격에 의해 국부적으로 전차선의 마모가 촉진되어 열화 등에 따라 단선될 가능성이 높아진다. 또한 이선이 발생하는 동안 주행에 따른 차량내부의 집전이 증진되고 무선 잡음(Radial Noise) 장애가 발생한다. 최악의 경우 고속전철의 견인전동기 혹은 전력변환장치의 반도체 소자를 비롯한 전장품이나 보호기류가 섬락에 의해 파괴되기 쉽다.



〈그림 2〉 주행 중인 철도차량의 이선현상 사진

2.2 이선에 따른 전도성 노이즈 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 각종 전기를 필요로 하는 설비로 공급된다. 대표적인 전기장치는 크게 추진제어장치와 보조전원장치로 차량을 견인하는 추진제어장치(Motor Block)는 그림 3과 같이 주변압기 2차측에서 적정 전압으로 변압한 후 Converter/Inverter 등 전력변환장치를 거쳐 견인전동기를 구동하게 된다. 보조전원장치(Static Inverter, 이하 SIV)인 경우 고속전철 차량내의 차량을 구동시키는 것 이외의 냉난방 장치 또는 조명장치 등 전원설비로서 사용된다.



〈그림 3〉 고속전철 차량내부의 전도성 노이즈 경로

그림 3에서 이선현상 등으로 인하여 아크가 발생한 경우 방사성 및 전도성 노이즈가 동시에 발생하게 되는데, 본 논문에서 언급하는 전도성 노이즈 성분은 팬터그래프 및 차량내부의 전원을 공급하는 전원라인을 통해 주변압기를 거쳐 전력용 반도체소자로 고속스위칭을 하는 전력변환장치인 컨버터와 3상 인버터로 유입되어 견인전동기로 과전압이 인가된다. 아크현상은 순간적인 임펄스 형태의 전압이 인가되는 과도현상으로 고려될 수 있는데, 이때 리액터 및 커패시터에 의한 전류 및 전압의 변화, 즉 di/dt , dv/dt 의 과도한 서지(Surge)가 유발하게 되는데, 이것은 스위칭 소자의 스위칭 소자의 Turn-On, Turn-Off 동작시 전력변환장치의 제어시스템을 교란시키고 기준값을 제어하는데 어려움이 따른다.

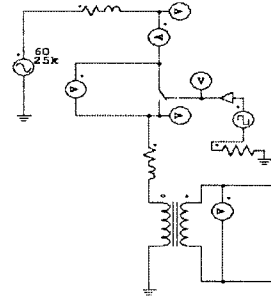
2.3 고속전철 주행에 따른 이선현상 모델링

고속전철 주행에 따른 이선현상을 모의하여 전력변환장치 상호간에 영향을 분석하기 위해서는 이선현상을 모델링해야 한다. 그러나 이러한 연구는 기계적인 관점 및 일

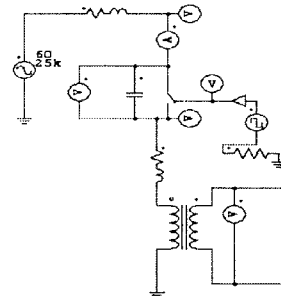
반적인 용접개념에서의 아크를 수식적으로 표현한 연구가 사례조사를 통해 확인할 수 있다.

본 논문에서는 전력변환용 시뮬레이션 도구를 이용하여 시스템의 상호영향을 분석하기 위해서는 이선현상 모델링이 필수적이어야 한다. 따라서 그림 4와 같이 전차선에 기생성분의 R-L이 존재하고 차량내부의 주변압기 앞단에 기생성분의 R-L이 존재한다고 가정하고 이선현상을 단자 반도체 소자를 이용한 전자 스위치 개념에 초점을 두어 모델링이 이루어지거나 이선에 따른 아크 발생을 에너지 저장소자인 커패시터의 방전을 고려하여 전자 스위치와 병렬로 작은 값의 커패시터를 연결하여 모델링한 경우로 나누어 생각해 볼 수 있다.

가. 반도체 소자의 스위치 개념으로 모델링한 경우

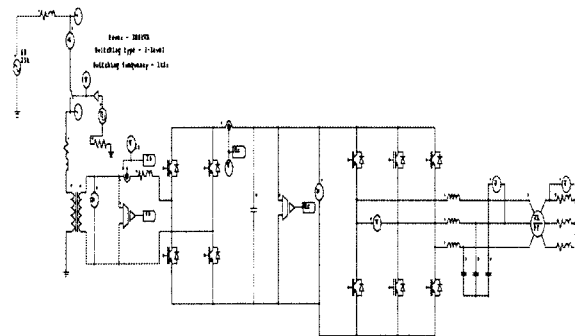


나. 반도체 소자의 스위치와 커패시터가 병렬로 모델링을 한 경우



〈그림 4〉 고속전철 주행에 따른 이선현상 모델링

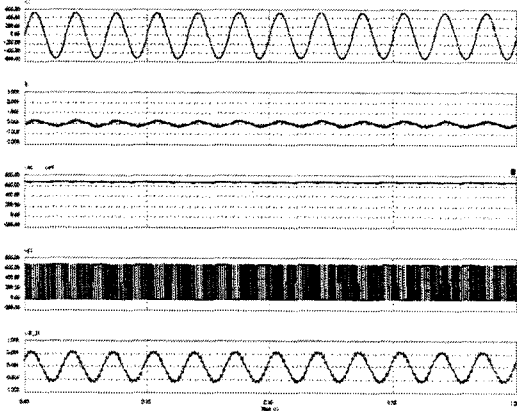
한편 이선에 따른 팬터그래프와 전차선 사이의 이선현상 모델링을 기본으로 현재까지 도출된 차세대 고속전철 사양 중에 보조전원장치(SIV)에 대해 그림 5와 같이 전체적인 시스템 모델링을 구현하였다.



〈그림 5〉 이선현상시의 SIV(컨버터, 인버터) 시스템 모델링

3. 시뮬레이션

400km/h급 차세대 분산형 고속철도에 대한 이선현상에 따른 전력변환장치가 미치는 영향을 분석하기 위해 이선현상에 대해 모델링을 다양하게 하였다. 전력변환시스템은 현재까지 도출된 시스템 요구사항(안)에 근거하여 보조전원장치(SIV)를 대상으로 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션을 수행하기 위해 사용된 파라미터는 용량 300kVA, 입력전압 25kV, 주변압기 2차측 380V, 컨버터 제어전압 670V, 3상 인버터 출력전압 440V이고 컨버터 스위칭 주파수 1kHz, 3레벨 스위칭 기법을 사용하였다.(2)



〈그림 6〉 이선현상이 없을 경우 각 부의 파형

(주변압기 2차 전압과 2차 전류, 직류전압, 스위치 양단전압, 인버터 선간전압)

그림 6은 그림 5의 SIV 전체시스템에서 컨버터 출력전압 670(V)로 일정하게 제어될 때, 이선현상이 발생하지 않을 때의 파형들이다. 각각 주변압기 2차측 전압 380(V), 주변압기 2차측에 흐르는 전류, 컨버터 제어전압 670(V), 컨버터 스위치소자의 양단전압, 3상 인버터 출력전압 440(V)로 제어될 때의 인버터 선간전압을 보여준다. 컨버터를 단위역률로 제어함에 따라 정현파와 유사한 컨버터 입력전류가 흐르고 있으며, 컨버터 출력제어가 원활히 제어되고 있고 스위칭 소자의 양단전압에도 노이즈 성분이 없음을 확인할 수 있다.

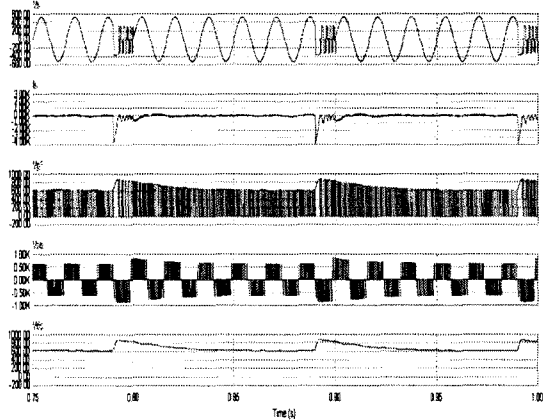
3.1 스위칭 소자 On/Off 개념의 이선현상 모델링

차세대 분산형 고속전철이 주행 중에 이선현상이 발생할 경우 단지 스위칭 소자가 On/Off 동작 개념의 모델링을 한 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 따른 파라미터는 이선현상이 발생하지 않은 경우의 시뮬레이션 조건과 동일하게 하였다.

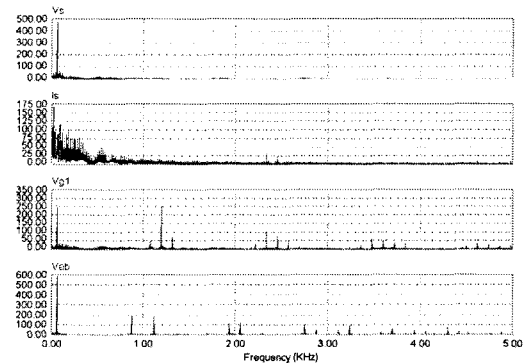
그림 7은 0.1초 주기로 10ms동안 이선이 발생한 경우의 파형으로 이선이 발생하는 동안 변압기 2차측 전압이 심하게 왜곡되고 과도전류가 컨버터로 유입되고 있음을 볼 수 있다. 이로 인해 스위칭 소자의 양단 전압이 상승하고 컨버터 출력전압 제어가 원활히 이루어지지 않고 있다. 뿐만 아니라 인버터 선간 전압도 이선이 발생하지 않았을 때에 비해 크다는 것을 알 수 있다.

그림 8은 그림 7에 대한 각 부의 FFT 분석파형으로 주변압기 2차 전압은 기본파 성분인 60Hz을 기준으로 노이즈 성분이 많이 포함되어 있지 않으나 컨버터 2차에 흐르는 전류인 경우 전도성 노이즈 성분이 많이 포함되어 있으며, 컨버터 스위칭 소자 양단 전압 및 3상 인버터 선

간전압인 경우 주기성을 갖는 고조파 성분이 나타남을 확인할 수 있다.



〈그림 7〉 0.1초 주기로 10ms동안 이선발생시 각 부의 파형 (주변압기 2차 전압과 2차 전류, 스위치 양단전압, 인버터 선간전압, 컨버터 출력전압)



〈그림 8〉 그림 7에 대한 각 부의 FFT 분석파형

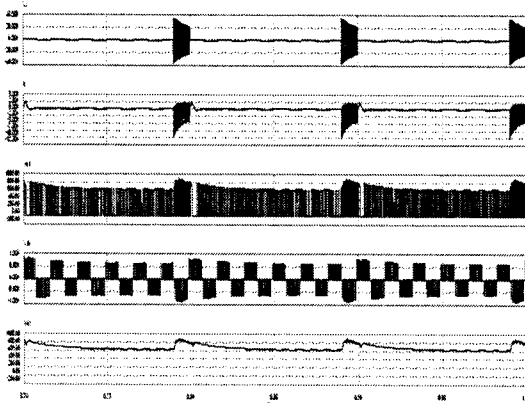
3.2 스위칭 소자와 RC소자 병렬 연결개념의 이선 모델링

아래 파형들은 스위칭 소자와 RC소자가 병렬로 연결된 개념의 이선현상을 모델링을 한 경우의 시뮬레이션 결과이다. 이선(Contact loss)이 발생하면 팬터그래프와 전차선 사이에 아크(Arc)가 발생하는데 이를 전기적 관점에서 보면 에너지 방출이 일어남을 의미하며 이것을 RC 소자 병렬 연결개념을 도입하였다.

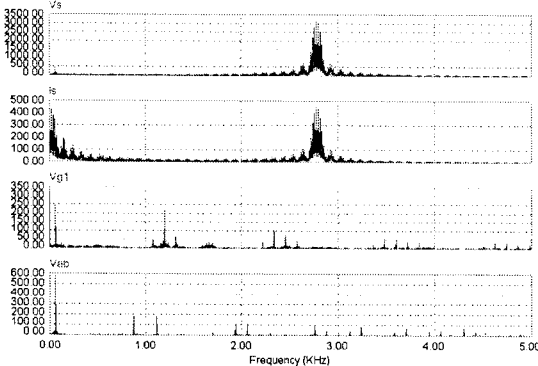
0.1초 주기로 10ms동안 이선이 발생한다고 가정하였으며, 스위칭 소자와 병렬로 연결된 RC소자의 파라미터 값은 0.1[Ω], 10(nF)이다. 그림 9는 그림 7과 동일한 조건에서 RC소자만을 병렬로 연결한 경우이다. 이선현상이 발생할 때마다 주변압기 2차 전압과 2차에 흐르는 전류가 과도현상이 매우 심함을 확인할 수 있다. 또한 컨버터 스위칭 소자에 인가되는 전압이 이선현상이 발생할 때마다 상승하고 이에 따른 컨버터 출력전압이 변동됨에 따라 3상 인버터 선간전압도 커짐을 알 수 있다.

그림 10은 그림 9에 대한 각 부의 FFT 분석파형으로 주변압기 2차 전압은 2.7kHz대역을 중심으로 노이즈 성분이 크게 발생하고 있는데 이것은 이선이 발생하는 10ms동안 2.7kHz 주파수 대역이 노이즈가 발생하기 때문이다. 주변압기 2차 전류도 2차 전압 주파수 대역의

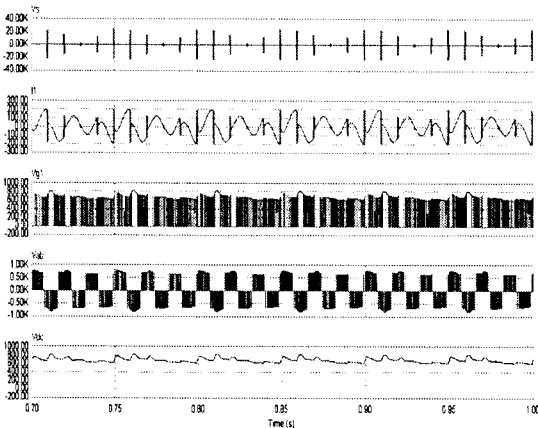
노이즈 성분 및 저차 노이즈 성분이 상당량 포함되어 있음을 확인할 수 있다. 컨버터 스위칭 양단 전압 및 3상 인버터 선간 전압은 그림 8과 유사한 패턴을 보임을 알 수 있다.



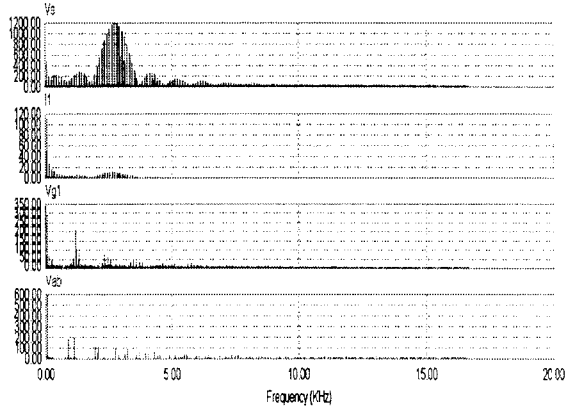
〈그림 9〉 0.1초 주기로 10ms동안 이선발생시 각 부의 파형 (주변압기 2차 전압과 2차 전류, 스위치 양단전압, 인버터 선간전압, 컨버터 출력전압)



〈그림 10〉 그림 9에 대한 각 부의 FFT 분석파형



〈그림 11〉 0.1초 주기로 1ms동안 이선발생시 각 부의 파형 (주변압기 2차 전압과 2차 전류, 스위치 양단전압, 인버터 선간전압, 컨버터 출력전압)



〈그림 12〉 그림 10에 대한 각 부의 FFT 분석파형

그림 11은 그림 9와 동일한 조건에서 이선이 0.01초 주기로 1ms동안 이선이 발생할 경우의 파형으로 만도체 소자와 병렬로 RC소자가 각각 0.1[Ω], 10[nF] 연결되었다고 가정하여 모델링을 한 경우이다. 주변압기 380V 인 것에 비해 20kV정도 과전압이 발생하고 있으며, 컨버터 입력전류가 상당히 왜곡됨을 확인할 수 있다. 그림 12는 그림 11에 대한 각부의 FFT 분석파형으로 그림 8과 그림 10에 비해 상이한 패턴을 보인다. 5kHz 이하의 노이즈 성분이 많이 포함되어 있으며, 컨버터 입력전류인 경우 그림 10에 비해 왜곡정도는 심하나 노이즈 성분은 크지 않음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

고속전철은 고속주행 중 안정된 집전성능을 보장해야 차량의 신뢰성을 높여야 한다. 그러나 주행시 이선이 발생되거나 사구간(Dead Section)을 통과하는 경우 전차선과 팬터그래프 사이에 아크가 발생한다. 이로 인하여 고속전철내의 주회로 및 제어회로에 악영향을 준다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 고속전철이 주행 중 이선이 수시로 발생하는데 이로 인해 전력변환장치에 영향을 준다.
- (2) 이선현상을 모델링하는 방법에 따라 전력변환장치의 미치는 정도, 즉 노이즈 주파수 대역 및 이선 시간에 따라 전압 및 전류의 왜곡정도가 다르다는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 “차세대 고속철도 기술개발사업”의 일환으로 국토해양부의 연구지원으로 이루어졌습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김재문, 김양수, 장진영, 김운명, “전차선-팬터그래프 사이의 이선현상에 따른 전원의란이 보조전원장치에 미치는 영향, 대한전기학회 전기설비위원회 춘계학술대회 논문집, pp197-181, 2008
- [2] 한국철도기술연구원, “차세대 고속철도 기술개발사업 1차년도 Workshop”, 2008