철도 전원 공급 설비의 9 kHz ~ 150 kHz 대역에서 RFI 노이즈 저감 연구

Study on the RFI Noise Reduction of the Electric Railway in the Frequency Range of 9 kHz to 150 kHz

강 용 삼* · 이 중 우†
 (Yong-Sam Kang · Jongwoo Lee)

Abstract - A electric railway is unique system that electric trains consumed huge electric power are travelled and is much interested with EMC. There were several problems exceeding the standard in the frequency range of 9kHz to 150kHz because the radiation noises were moved the higher frequency range according to developing the power electronic technology. It is studied the experimental confirmation of main noise source on the electric train and the analytic simulation for reducing the noise level in this paper.

Key Words : EMI, EMC, Electromagnetic noise, RFI noise, Rogoski coil

1. 서 론

전기철도 시스템의 특징은 대전력 급전시스템으로 철도 차량에 전력을 공급하기 위한 긴 전차선로와 컨버터와 인버터에 의한 스위칭을 이용하고 있기 때문에 전기철도 내 전자설비와 전기철도 외의 무선 및 유선통신 등의 기기에 간섭을 발생시키고 있다. 차량의 견인 구동 시스템에서 사용되는 컨버터와 인버터의 스위칭 주파수는 수 kHz이며, 따라서 고조파 성분들이 수백 kHz 까지 발생한다.

그러므로 철도내외에서 사용되는 전기전자장비에 대하여 차량에서 나오는 RFI를 그림 1과 같이 국제표준으로 규제하고 있다. 그림에서 A는 교류 25kV, B는 교류 15kV, 직류 3kV 및 1.5kV, C는 직류 750V로 사용 전압에 따라 규정치가 다름을 볼 수 있다[1].

특히, 9 kHz ~ 150 kHz 주파수대역에서 발생하는 철도 시스템의 노이즈는 날씨, 부하 및 변전소와 차량 간의 거리 등의 조건에 따라 규정치보다 높게 방사될 수 있으며 9 kHz ~ 150 kHz 주파수대역에 할당된 무선 시스템에 대한 장애의 원인이 된다[2].

국내에서는 고속철도의 도입과 함께 EMC에 대한 인증이 활발히 이루어졌으며, 지금까지 2003년 광주도시철도를 시작으로 대략 8종류의 직류 1,500V 전동차와 직류 750V 김해경전철 및 4종류의 교류 25kV 전동차 그리고 KTX 및 KTX-산천 등 2011년 상반기까지 약 14번의 EMC 인증이 수행되었다. 그 중에서 특히 최근들어 KTX-산천차량으로부

터 9 ~ 150kHz 주파수대역에서 상대적으로 높은 방사성 노이즈가 확인되었다.

철도 시스템에서 방사하는 9 kHz ~ 150 kHz 대역의 노이즈가 규정치를 초과하는 시험 결과에 대한 예시를 그림 2에 나타내었다.

9 kHz - 150 kHz 주파수 대역이 빈번하게 IEC 62236의 제한치를 초과함에 따라 새롭게 개정된 ed 2.0에서는 다음과 같은 문구가 추가되었다: "전기철도에 의해 간섭을 받을 수 있는 9 kHz - 150 kHz 대역 무선서비스는 많지 않다. 이에 따라 9 kHz - 150 kHz 대역에서 전기철도와 무선서비스가 양립하여 사용할 수 있다는 것을 증명할 수 있다면, 그림 1의 해당 주파수 대역(9 kHz ~ 150 kHz)의 주어진 기준치의 초과를 허용할 수 있다." 그러나 전기 철도와 무선 서비스의 양립성을 증명하는 것은 어렵기 때문에 근본적인 전자파 간섭원에 대한 연구가 필요하며, 따라서 전기 철도 시스템에서 발생하는 9 kHz - 150 kHz 대역의 전자파 간섭원

그림 1 IEC 62236의 차량의 방사규제치
 Fig. 1 Limits from the trains in IEC 62236

* Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea
 † Corresponding Author : Dept. of Railway Electric and Signaling Engineering, Graduate School of Railway, Seoul National University of Science and Technology, Korea

E-mail : saganlee@seoultech.ac.kr

Received : July 5, 2013; Accepted : July 22, 2013

그림 2 IEC 62236의 규정치를 초과하는 시험 결과
Fig. 2 Test results that exceed the limits of the IEC 62236

표 1 국내 9~150kHz 이용현황
Table 1 Domestic status of 9~150kHz

주파수 (kHz)	분배사항	지정 건수	출력 (kW)
9~14	무선항행	34	30~1300
14~19.95	고정/해상이동	17	5~200
19.95~20.25	표준주파수 및 시보	13	15~200
20.25~70	고정/해상이동	149	7~350
70~72	무선항행	15	10
72~84	고정/해상이동	27	10~150
84~86	무선항행	0	-
86~90	고정위성/무선항행/해상이동	2	80~130
90~110	무선항행	2 66 3	100 3.5~200 0~150
110~112	고정/무선항행/해상이동	1	150
112~117.6	고정/무선항행/해상이동	3 61	0.01~100 0.00035
117.6~126	고정/무선항행/해상이동	28	15~500
126~129	고정/무선항행/해상이동	1	50
129~160	고정/무선항행/해상이동	58 63	30~150 0.00035

에 대한 연구가 필요하며, 전자파 노이즈 전달 경로를 확인하여 이에 대한 대책 연구가 요구된다.

본 논문에서는 방사 안테나를 이용하여 9 kHz ~ 150 kHz 저주파수 대역 주파수에 따른 노이즈 크기를 측정하고 전기차에서의 주 노이즈원을 찾기 위해 전도성 노이즈를 측정을 수행하였으며, ANSYS Q3D를 이용하여 전차선로를 모델링하여 전차선과 레일에 병렬로 연결되는 직렬 저항과 캐패시터에 의한 파라미터 해석을 통해 노이즈원을 감소시킬 수 있는 최적안을 제시하였다.

2. 전기철도시스템의 RFI (Radio Frequency Interference) 현상

2.1 전기철도 시스템

철도 시스템은 외부에서 공급된 154 및 22.9 kV의 전압을 변전소에서 교류 25 kV나 직류 1.5 kV, 750 V로 변환하여 전기차에 공급한다. 교류 시스템의 경우 60 Hz의 전원 주파수 고조파 성분이 전차선에 존재한다. 또한 철도 차량의 컨버터, 인버터 및 견인 모터에서 발생하는 노이즈가 전차선과 레일에 전도성 노이즈를 발생시켜 전자파 간섭을 발생시키는 주요 원인이 된다. 특히 선로와 변전소, 급전선 사이에서 발생하는 자기장은 변전소와 절연체 사이의 루프 사이즈에 따라 방사되는 경향에 차이를 보이게 되며, 절연 구간을 통과하여 변전소와 절연 구간사이에 철도 차량이 진입하면 부하의 변동으로 인한 자기장 성분의 변화가 발생한다.

다음 그림 3은 변전소와 절연 구간 사이에 철도 차량이 진입 전 후의 9 kHz - 150 kHz 주파수 대역의 자기장 변화를 비교한 결과이다.

그림 3 철도 차량 위치에 따른 자기장 노이즈 변화
Fig. 3 Magnetic field changes according to the location of the railroad stock

또한 IEC 62236-5에서는 변전소에서 발생하는 자기장 성분을 규제하기 위하여 고정 전원 설비들에 대한 방사를 규제 하고 있으나, 전체 시스템의 구동 시에는 제한치를 초과하는 경우가 발생하고 있다[3].

2.2 측정 결과 및 원인 분석

철도 시스템의 전원 설비에 대한 노이즈 분석을 위하여 두 가지 방법으로 측정을 수행 하였다. 첫째로 전차선에 존재하는 전도성 노이즈를 시간 영역에서 측정하여 FFT(Fast Fourier Transform)분석을 통해 결과를 도출 하였으며, 둘째로 구분소 부근에서 IEC 62236의 방법에 따라 RFI를 측정 하였다.

9 kHz ~ 150 kHz 저주파수 대역에서의 전자파 노이즈는 자기장에 의한 요소로 노이즈원을 측정하기 위해 고주파수 전류측정이 가능한 전류센서인 로고스키 코일을 사용하여

측정하고 IEC 62236에서 제시한 루프 안테나와 EMI 수신기를 이용한 측정방법으로 전달된 전자파 노이즈의 레벨을 측정하였다.

국제표준 방법인 IEC 62236의 방법에 따라 피시험 철도 차량을 시험한 결과를 다음 그림 4에 나타내었다. 그림 4는 100 km/h의 고속 운행 상태에서 측정된 결과이다.

고속 운전 상태에서는 측정대역을 3개 대역, 9 ~ 50 kHz, 50 ~ 100 kHz, 100 ~ 150 kHz으로 분할하여 측정하였다. 측정 결과 저속 운전 상태에서 제한치를 초과한 대역과 15 kHz, 18 kHz, 20 kHz 대역이 제한치를 초과하는 것으로 나타났다.

그림 4 피시험 전기철도 시스템의 자기장 복사방출 시험 결과
Fig. 4 Test results for Magnetic field radiated-emission from the electrical railway system under test

2.3 원인분석 방법 및 결과

9 kHz ~ 150 kHz 주파수영역의 차량에서 전자파 노이즈 원은 대전력을 사용하는 견인시스템이기 때문에 실제 전동차의 변압기 1차 측과 2차 측에 로고스키 코일(Rogoski coil)을 설치하여 최고속도 100 km/h까지 기동, 주행 및 제동하는 시나리오로 운행하면서 FFT분석을 실시하여 각 주파수별 최고값을 측정하였다.

그림 5 로고스키 코일을 이용한 전도전류 시험 셋업
Fig. 5 Test setup for measuring conducted current using the Rogoski coil

다음 그림 5와 6은 로고스키 코일을 이용한 전도 전류 시험을 위한 시험회로 구성과 피시험 차량에 설치된 모습을 나타내었다.

그림 6 로고스키 코일을 이용한 전도전류 시험 셋업
Fig. 6 Test setup for measuring conducted current using the Rogoski coil

그림 5의 시험 구성을 이용하여 측정된 전류를 그림 7에 나타내었다. 주변압기 1차 측과 2차 측에 대한 시험 결과를

그림 7 로고스키 코일을 이용한 전도전류 시험결과
Fig. 7 Test results for measuring conducted current using the Rogoski coil

그림 8 로고스키 코일을 이용한 전도전류 시험결과
Fig. 8 Test results for measuring conducted current using the Rogoski coil

비교하면 차량의 컨버터와 인버터에서 발생한 전류 성분이 주변압기를 거치면서 감소되는 경향을 보인다.

로고스키 코일을 이용한 전류 측정 결과와 표준 RFI 시험방법의 상관성을 확인하기 위하여 두가지 상황을 동시에 그래프로 나타내면, 위의 그림과 같이 주 변압기의 1차 측의 형태와 RFI 시험 결과가 상당히 유사함을 알 수 있다. 따라서 본 주파수 대역에서 발생하는 간섭원은 철도 차량에서 발생하는 인버터와 컨버터의 스위칭 노이즈가 주 변압기 1차 측을 통하여 급전선으로 전도되어 전차선과 레일사이의 루프로 인한 방사일 것으로 예측 된다.

3. RFI 저감 대책

3.1 노이즈 전달경로 분석[4]

철도 차량에서 발생하는 노이즈의 전달경로를 분석하기 위해 ANSYS Q3D를 이용하여 선로, 급전선, 조가선의 RLC 회로 파라미터를 추출을 위한 3D 모델링에 대한 결과를 표 2에 보였다.

그림 9 RLC 파라미터 추출을 위한 3D 모델링
Fig. 9 3D modeling for RLC parameter extraction

추출된 파라미터와 실제 철도 시스템과의 유사성을 확인하기 위해 중앙선 구리~국수사이를 아래 그림 9와 같은 등가회로를 구성하였다. 구리 변전소에서 국수 SP(말단 구분소)까지의 거리는 약 27 km 이고, 2개의 SSP(보조구분소)를 거친다. 국수 SP에는 전원의 고조파 성분을 억제하기 위하여 RC Bank가 설치되어 있으며, 이러한 RC Bank는 선로의 길이에 따라 다른 값이 적용된다.

표 2 추출한 RLC 파라미터

Table 2 RLC Parameters

	선로(1m)	전차선 및 조가선(7m)	급전선(7m)
재질	Fe	cd-cu 110	cd-bz 65
R ($\mu\Omega$)	15.25	126.75	126.78
L (μ H)	526.75	8.333	5.73
C (pF)	45.13	95.55	69.32

표 1에서 추출된 파라미터에 거리를 보상하여 파라미터를 계산하고, 그림 10과 같은 구리SS - 국수SP 간 선로 회로 등가 모델을 구성하였다. RC Bank 및 연결케이블의 등가회로에 커패시터의 기생성분이 포함되었다.

본 구간에는 60 Hz 전원 고조파 억제를 위하여 RC 뱅크가 설치 되어있다. 설치된 RC 뱅크가 자기장 방사에 대한 영향을 분석하기 위하여 ANSYS Designer를 이용하여 특성 임피던스(Z21)를 계산하였다.

그림 10 구리 - 국수 간 선로 등가 회로
Fig. 10 equivalent circuit of railway between Guri and Guksu

계산된 결과가 그림 11과 같다. 결과에서 보이는 것처럼 전원 고조파 억제를 위해 사용된 RC Bank는 20 kHz 이하와 150 kHz 이상에서는 효과가 있으며 20 kHz ~ 70 kHz 대역에서는 감쇠 특성을 보이지 않는다.

그림 11 Z21 시뮬레이션 결과
Fig. 11 simulation results of z21

시뮬레이션 결과와 유사성을 확인하기 위하여 중앙선의 국수 구분소에서 10 m 떨어진 거리에서 측정된 결과가 다음 그림 12와 같다.

구분소에 설치된 RC बैं크의 개방과 투입에 따라 20 kHz - 60 kHz 주파수 대역에서는 변화를 나타내지 않으며, 9 kHz - 20 kHz, 60 kHz - 150 kHz 주파수 대역에서는 5 dB 이상의 감쇠를 보인다.

따라서 시뮬레이션 결과와 측정 결과의 유사성을 도출할 수 있으며, 구성된 등가 회로가 적절함을 판단할 수 있다.

그림 12 RC बैं크의 사용에 따른 전원 공급 설비의 자기장 환경 변화

Fig. 12 Magnetic field environment changes according to the RC Bank

3.2 저감 대책 방안[5]

시뮬레이션 및 측정에서 RC बैं크가 효과를 보이지 않는 20 kHz - 60 kHz 대역의 특성 임피던스를 낮추기 위하여 설치된 RC बैं크 이외에 추가적으로 급전선과 선로 사이에 캐패시터 बैं크를 설치하여 등가 회로를 재 구성 하였다.

그림 13 공진 감쇠를 위한 캐패시터 설치된 가상 회로

Fig. 13 The virtual circuit installed capacitors for resonance damping

그림 13의 가상 회로에 캐시터 용량을 1 uF, 5uF, 6 uF을 변화하며 계산된 결과가 그림 14와 같다. 1 uF을 설치

한 경우 20 kHz 대역의 공진 레벨이 증가 하나, 이외의 주파수 대역에서는 그림 14와 같이 임피던스 레벨이 감소한다.

그림 14 가상 회로의 시뮬레이션 결과

Fig. 14 Simulation results of the virtual circuit

캐패시터의 용량에 따라 감쇠되는 특성임피던스의 값이 달라짐을 알 수 있다. 1 uF은 15 kHz 대역에서는 임피던스가 증가 하나, 70 kHz 주파수 대역에서의 임피던스가 가장 낮아 70 kHz 이상에서 문제가 되는 진동차나 변전 설비의 설치 시 저감 효과가 클 것으로 기대 된다.

4. 결론 및 논의

전기 철도 시스템에서 9 kHz - 150 kHz 대역의 자기장 성분은 규정된 제한치를 빈번히 초과 하고 있는 실정이다. 이에 따라 노이즈 소스원 분석을 통하여 AC-DC 컨버터, 인버터의 고속 스위칭이 급전선과 선로 사이의 루프를 통하여 방사하는 것을 확인하였다. 철도 시스템을 구성하는 변전소와 구분소, RC Bank의 기생 성분을 추출 하여 회로 구성을 단순화 하였으며 구성된 회로의 특성 임피던스 변화를 확인한 결과 전원 고조파 억제에 위하여 설치한 RC Bank에 따라 임피던스의 변화가 감지되며, 변화되는 주파수 대역이 1 kHz - 10 kHz, 100 kHz 대역 이상이다.

실제 RFI에서 RC Bank로 인한 저감 확인 위하여 등가 회로의 모델링 위치인 국수 구분소에서 측정을 수행한 결과 특성 임피던스의 변화와 유사한 결과가 측정되어 등가 회로의 적절함을 판단할 수 있다.

선로와 케이블의 기생 성분으로 추출된 등가회로 방법으로 RFI 노이즈 저감을 위한 적절한 용량의 캐패시터를 선정할 수 있을 것으로 기대 된다.

References

- [1] IEC62236-2 Ed.2 9/976/CDV, "Railway applications - Electromagnetic compatibility Part 2 : emission of the whole railway system to the outside world", 2006. 6. 29.
- [2] 川崎邦弘, "鐵道向けEMC國際規格の概要", 鐵道と環境, 2003. 9. vol.14 No.9

- [3] IEC62236-5, "Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 5 : Emission and immunity of fixed power supply installations and apparatus", 2003. 4.
- [4] Kwun, Suk-Tai, Chung, Yeon-Choon, "Analysis on the RFI Noise Path of Electrical Railway System in the Frequency Range of 9 kHz to 150 kHz", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, v.23, no.12, 1373-1379, December 2012.
- [5] 電氣學會·電氣鐵道の電磁環境に關する協同研究委員會, "鐵道とEMC", 平成20年 7月 25日

저 자 소 개

강 용 삼 (姜 龍 三)

1961년 3월 17일생.
1990년 부경대학교 전기공학과 졸업.
2002년 고려대학교 졸업(석사)
2012년 한국과학기술대학교 수료(박사)
2004년~현재 국토교통부 근무
Tel : 044-201-3539
Fax : 044-201-5547
E-mail : btlkang@hanmail.net

이 종 우 (李 鍾 宇)

1959년 3월 20일생.
1983년 한양대학교 기계설계과 졸업.
1986년 Ecole Centrale de Nantes 졸업.
1993년 Paris VI 졸업(공학박사).
2005년~현재 서울과학기술대학교 철도
전기신호공학과 교수
Tel : 02-970-6874
Fax : 02-970-6874
E-mail : saganlee@seoultech.ac.kr