전기철도 시스템의 9~150 kHz 대역에서의 RFI 노이즈 전달 경로 분석

Analysis on the RFI Noise Path of Electrical Railway System in the Frequency Range of 9 kHz to 150 kHz

권 석 태 · 정 연 춘

Suk-Tai Kwun · Yeon-Choon Chung

요 약

철도 시스템에서 방사하는 9~150 kHz 대역의 자기장 복사 방출은 철도 시스템 주변의 무선 설비 등에 영향을 주어 통신 성능의 저하나 오동작을 초래할 수 있다. 본 논문에서는 전기 철도 시스템에서 방사하는 9~150 kHz 주파수 대역의 전자파 노이즈에 대한 등가 회로 모델을 소스 및 전달 경로 분석을 통하여 제안하고, 철도 차량의 견인 구동 시스템과 변전 시스템에서 발생하는 수 kHz의 스위칭 노이즈가 급전선과 선로의 루프 회로를 통하여 방사됨을 확인하였다. 또한, 실제의 구리-국수 간 중앙선 철도의 RC Bank의 효과를 분석하여 이러한 회로 등가 모델의 유효성을 검증하였고, 급전선과 선로 사이에 적절한 용량의 커패시터를 장착함으로써 효과적으로 설계 대책이 가능함을 보였다.

Abstract

The interaction of magnetic field in the frequency range of 9~150 kHz radiating from a railway system with wireless systems has been the cause of radio frequency interference. In this paper, the equivalent circuit model of the RFI noise is proposed through source and transfer path analysis, and it is confirmed that the switching noise of several kHz that occurs a vehicle traction drive system and a substation is radiated by forming the loop circuit with a feeder line by a rolling stock. And the validity of the proposed equivalent circuit model is verified by analyzing the effects of RC banks installed in the real railway between Guri and Guksu stations, the RFI noise can be effectively mitigated by loading suitable capacitance between rail and feeding line.

Key words : Railway, RFI, Magnetic Field, RC Bank, Equivalent Circuit

I. 서 론

대전력 급전 시스템을 사용하는 전기 철도 시스템은 차량에 전력을 공급하기 위한 긴 전차 선로를 사용하고, 컨버터와 인버터에 의한 스위칭을 이용하고 있기 때문에 전기 철도 내 전자 설비와 전기 철도 외

의 무선 및 유선 통신 등의 기기에 간섭을 발생시킬 가능성이 높다. 철도 차량의 견인 구동 시스템에서 사용되는 컨버터와 인버터의 스위칭 주파수가 수 kHz로 이에 고조파 성분들이 발생하여 수백 kHz까지 발생한다. 특히, 9~150 kHz 주파수 대역에서 발생하는 철도 시스템의 노이즈는 본 주파수 대역에 할

서경대학교 전자컴퓨터공학부(Department of Electronic & Computer Engineering, Seokyeong University)

· Manuscript received October 30, 2012 ; Revised November 21, 2012 ; Accepted November 27, 2012. (ID No. 20121030-121)

· Corresponding Author : Yeon-Choon Chung (e-mail : ycchung@skuniv.ac.kr)

당된 의도적 무선 시스템에 대한 장애의 원인이 된다.

특히 열차의 간격 제어 및 열차 진로 제어 용도로 사용되고 있는 열차 자동 정지(ATS: Automatic Train Stop) 시스템 및 열차 자동 운영(ATO: Automatic Train Operation)은 78~130 kHz와 9.5~16.5 kHz 주파수 대역을 사용하고 있다.

ATS 장치는 차상 신호기의 정보 전달을 필요로 할 때 이것을 차상에 전하기 위한 수단으로서 전기적 유도 작용을 이용하고 있다. 이는 차량에 설치된 ATS 장치가 지상의 ATS 안테나의 접근에 의하여 차상에 설치된 발진 회로의 전송 특성에 변화를 주어 발진주파수를 변화시키는 주파수 변환 방식을 사용하고 있다^[1].

주파수 변환 방식을 사용하는 ATS 장치는 외부의 전자파에 의한 간섭 등의 영향으로 근래 들어 ATS 장치의 오동작으로 인한 열차 운행의 지연이나 사고가 발생하고 있다. 표 1은 ATS 장치의 오동작 발생 현황을 나타낸다.

그동안 ATS 장치의 오동작의 방지 대책으로 ATS 차폐, 전자파 내성 강화에 대한 대책이 제안되었으나, 큰 효과를 보이지 못하였다^[2].

ATS 장치를 비롯한 철도 신호시스템에서 사용되는 수~수십 kHz의 주파수 대역은 철도 차량 및 견인 변전소에서 발생하는 스위칭 노이즈로 인한 영향을 미칠 수 있기 때문에 IEC 62236에서 자기장 영역의 제한치를 두어 철도 시스템의 방사를 제한하고 있다. 본 주파수 대역에서 방사하는 철도시스템의 노이즈는 날씨나 부하 조건, 변전소와 차량 간의 거리 등의 조건에 따라 규정치보다 높게 방사되고 있는 실정이다^[3].

따라서 본 논문에서는 ATS 장치가 사용되는 주파수 대역을 포함하는 9~150 kHz 주파수 대역의 노이즈 원과 전달 경로를 분석하여 철도 신호 시스템에서 사용되는 시스템 간의 간섭을 최소화할 수 있는

표 1. ATS 장치의 오동작 발생 현황^[2]

Table 1. Improper operation times in ATS^[2].

월별 ATS 오동작 건수(2007년도 기준)							
월	1	2	3	4	5	6	계
건수	193	130	85	69	89	70	642

표 2. 시험 전동차 주요 제원

Table 2. Specifications of the rolling stock under test.

차량 구성	6량 1편성(Mc-Tp-M-T-Tp-Mc)
전원 사양	AC 25 kV
추진 장치	개별 제어 방식(1C1M)
신호 방식	CBTC
차체 재질	알루미늄

방법을 제안한다. 본 연구에서는 사용된 시험 전동차의 제원은 표 2와 같다.

II. 전기철도 시스템의 9~150 kHz 대역에서의 RFI 현상

2-1 전기철도 시스템의 노이즈 방사

우리나라의 전기철도 시스템은 크게 직류식 전기철도와 교류식 전기 철도로 나뉜다. 직류식의 경우 단상 22.9 kV를 수전 받아서 변압기와 정류기를 통하여 직류 전원을 급전하는 시스템이고, 교류식은 3상 154 kV를 수전 받아 변전소의 변압기를 이용하여 급전선에 공급하는 시스템이다.

전기 철도 시스템에서는 그림 1에서 볼 수 있는 것처럼 다양한 형태의 전자파와 장애 현상이 발생한다^[4]. 본 연구에 사용된 철도 시스템은 교류 방식을 사용하므로 60 Hz의 전원 주파수 고조파 성분이 급전선에 존재하고, 또한 철도 차량의 컨버터, 인버터 및 견인 모터에서 발생하는 노이즈가 급전선과 선로에 전도성 노이즈를 발생시켜 전자파 간섭을 발생시키

그림 1. 전기철도 시스템에서의 전자파 발생 원인

Fig. 1. Origins of EMI in a electrical railway system.

는 주요 원인이 된다.

특히 9~150 kHz 주파수 대역의 노이즈는 선로와 변전소, 급전선 사이에서 발생하며, 자기장 성분이 현저하게 나타난다.

이러한 복사 방출 자기장 성분은 변전소와 절연체 사이의 루프 사이즈에 따라 방사되는 주파수 특성에 차이를 보이며, 절연 구간을 통과하여 변전소와 절연 구간 사이에 철도 차량이 진입하면 부하의 변동에 따라 복사 방출 자기장의 크기도 변화하는 경향을 가진다.

2-2 측정 결과 및 원인 분석

9~150 kHz 주파수 대역에서의 방사되는 복사 방출 자기장을 국제 표준 시험규격인 IEC 62236-2의 방법으로 측정하였다. 측정 셋업은 루프 안테나와 EMI 수신기를 포함하여 그림 2와 같이 구성하였다^[3].

측정 결과를 그림 3에 보였다. 그림 3(a)는 65 km/h 저속 운전 상태, 그림 3(b)는 100 km/h의 고속 운행 상태에서 측정된 결과이다. 저속 운전 상태에서는 28.5, 30.8, 36.1, 98.3 kHz 주파수 대역이 제한치를 초과하며, 고속 운전 상태에서는 저속 상태에서 제한치를 초과하는 주파수 대역 이외에 13.9 kHz, 18.3 kHz, 27~36.5 kHz 및 90.8~99.1 kHz 주파수 대역에서도 제한치를 초과하는 것으로 확인되었다.

2-3 원인 분석 방법 및 결과

그림 3에 보인 측정 결과의 원인을 분석하기 위해 고주파수 전류 측정이 가능한 전류 센서인 로고스키

그림 2. 복사 방출 측정 구성

Fig. 2. Test setup for measuring radiated field.

(a) 저속

(a) Low speed

(b) 고속

(b) High speed

그림 3. 9~150 kHz 대역에서의 복사 방출 자기장 측정 결과

Fig. 3. Measurement results of radiated H-field in 9 ~ 150 kHz range.

코일(Rogoski coil)을 그림 4와 같이 전동차의 주변압기의 1차 측과 2차 측에 설치하여 최고 속도 100 km/h까지 기동, 주행 및 제동하는 시나리오로 운행하면서 FFT분석을 실시하여 각주파수별 첨두치를 측정하였다.

주변압기 1차 측과 2차 측에 대한 측정 결과를 비교하여 차량의 컨버터와 인버터에서 발생한 전류 성분이 주변압기를 거치면서 감소되는 경향을 보임을 확인하였다. 또한, 주변압기의 1차 측에서 측정된 전도 전류의 포락선과 그림 3에 보인 복사 방출 자기장의 측정 결과를 비교한 결과, 그림 5에서 볼 수 있는 것처럼 매우 유사함을 알 수 있었다. 따라서 9~150

그림 4. 로고스키 코일을 이용한 전도 전류 시험 구성
Fig. 4. Test setup for measuring conducted current using the Rogoski coil.

그림 5. 주변압기 1차 측 전도 전류와 복사 방출 자기장의 비교
Fig. 5. Comparison of the measured conduction-current of a 1st coil and the radiated H-field.

kHz 주파수 대역에서의 방사되는 복사 방출 자기장은 철도 차량에서 발생하는 인버터와 컨버터의 스위칭 노이즈가 주 변압기 1차 측을 통하여 급전선으로 전도되어 급전선과 선로 사이의 루프를 통하여 RFI 노이즈가 방사되는 것으로 판단할 수 있다.

III. RFI 저감 대책

3-1 노이즈 전달 경로 분석

우리는 앞에서 판단된 철도 차량에서의 RFI 노이즈 전달 경로를 분석하기 위해 먼저 ANSYS Q3D를 이용하여 선로, 급전선, 조가선을 3D 모델링하여 RLC 회로 파라미터를 9~30 MHz 주파수 대역에서의 AC 해석으로 추출하였으며, 그 결과를 표 3에 보였다. 추출된 각 성분은 선로상의 기생 성분을 등가화하여 계산된 파라미터이다^[5].

표 3. 추출한 RLC 파라미터

Table 3. Extracted RLC parameters.

	선로	전차선 및 조가선	급전선
단위 길이	1 m	7 m	7 m
재질	Fe	Cd-Cu 110	Cd-Bz 65
$R(\mu\Omega)$	15.25	126.75	126.78
$L(\mu H)$	526.75	8.33	5.73
$C(pF)$	45.13	95.55	69.82

추출된 파라미터와 실제 철도 시스템과의 유사성을 확인하기 위해 실제의 중앙선 선로(구리~국수 구간)를 모의하였다. 구리 변전소(SS: Sub Station)에서 국수 구분소(SP: Section Post)까지의 거리는 약 27 km이고, 2개의 구분소를 거친다. 국수 구분소에는 전원의 고조파 성분을 억제하기 위하여 RC bank가 설치되어 있으며, 이러한 RC bank는 선로의 길이에 따라 다른 값이 적용된다^[6].

표 3에서 추출된 파라미터에 거리를 보상하여 파라미터를 계산하고, 실제의 구리변전소-국수 구분소 구간의 선로 회로 등가 모델을 그림 6과 같이 구성하였다. 이러한 등가 회로를 사용하여 구리 변전소와 국수 구분소 구간에 설치된 RC bank의 60 Hz 전원 고조파 억제 효과를 ANSYS Designer를 이용하여 9~150 kHz 대역에서의 입력력 임피던스(Z_{in}) 값의 변화를 계산하였으며, 그 결과를 그림 7에 보였다.

그림 7로부터 RC bank가 20 kHz 이하와 70 kHz 이상의 대역에서는 효과가 있으나, 20~70 kHz 대역에서는 큰 효과를 보이지 않음을 알 수 있다.

그림 6. 구리 - 국수 간 철도 선로의 등가 회로
Fig. 6. Equivalent circuit of the railway between Guri and Guksu.

그림 7. RC bank의 사용에 따른 임피던스의 변화
Fig. 7. The changes of impedance according to the RC bank.

이러한 시뮬레이션 결과의 유효성을 확인하기 위하여 IEC 62236의 방법에 따라 선로에서 10 m 떨어진 거리에서 9~150 kHz 대역의 자기장 방출 특성의 변화를 측정하였다. 측정은 전동차가 측정용 안테나로부터 300 m 이내에 존재하지 않는 상태에서 수행하였고, 측정 위치는 시뮬레이션 결과와 유사성을 도출하기 위하여 중앙선 전동차가 운행하는 신원역 부근이며, 측정 결과를 그림 8에 보였다.

그림 8로부터, RC bank의 투입에 따라 9~20 kHz, 50~150 kHz 주파수 대역에서는 5 dB 이상의 감쇠를 보이지만 20~40 kHz 주파수 대역에서는 변화를 주지 못함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에 사용된 등가모델과 접근 방법이 유효함을 알 수 있다.

그림 8. RC bank의 사용에 따른 복사 방출 자기장의 변화

Fig. 8. The changes of the radiated H-field according to the existence of a RC bank.

3-2 저감 대책 방안

철도 시스템의 구성은 변전소에서 공급된 전원이 구분소를 거친 후 선로를 따라 변전소로 귀환된다. 이러한 구조에서 급전선과 선로 사이에 적정 용량의 커패시터를 장하시킴으로써 9~150 kHz 대역에서의 공진을 낮추어 복사 방출 자기장을 저감시킬 수 있다. 그림 9는 그림 6과 같이 구성된 등가회로에서 급전선과 선로 사이에 공진 저감용 커패시터를 추가한 모습이다.

공진 저감용 커패시터의 용량 선정은 커패시터의 공진 특성을 고려하여 다음 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

여기에서, f 는 공진 주파수이고, L 은 커패시터의 기생 인덕턴스, C 는 커패시터의 용량 값이다.

일반적으로 수 kV 이상의 특 고전압용 커패시터 뱅크의 경우, 기생 인덕턴스가 수 μH 에서 수백 μH 이다. 자기장 복사 방출에서 RC bank가 효과를 보이지 않는 20~40 kHz 대역을 감안하여 커패시터의 공진을 계산하면 20 kHz에서 공진을 갖는 값은 6 μF 이고, 50 kHz 주파수 대역에서 공진을 갖는 값은 1 μF 이다.

20~40 kHz 대역의 공진 특성을 갖는 커패시터의 용량을 1 μF , 5 μF , 6 μF 로 변화시켜 급전선과 선로 사이에 설치하였을 때의 입출력 임피던스의 변화

그림 9. 커패시터를 장하시켜 공진을 감쇠시키기 위한 등가회로

Fig. 9. Equivalent circuit of loaded capacitor for damping resonance effects.

그림 10. 커패시터 장하에 따른 공진 감쇠 효과의 변화
Fig. 10. The changes of resonance damping-effects according to the loaded capacitance.

를 1~30 MHz의 주파수 대역에서 계산하였으며, 그 결과를 그림 10에 보였다. 그림 10으로부터 1 μ F의 커패시터를 장하한 경우, 20 kHz 대역의 공진 레벨이 증가하고, 이외의 주파수 대역에서는 임피던스 레벨이 감소한다. 또한, 6 μ F의 커패시터를 장하하는 경우 30 kHz 이하의 대역에서 입출력 임피던스가 줄어들고 결과적으로 자기장 복사 방출을 저감됨을 알 수 있다. 따라서 적절한 용량의 커패시터를 장하시킴으로써 효과적인 RFI 감쇠를 기대할 수 있다.

특히, 현재 국수 구분소에 설치된 RC bank가 효과가 보이지 않는 20~50 kHz의 주파수 대역은 1 μ F의 커패시터를 장하할 경우, 입출력 임피던스가 0.1 Ω 이하로 공진을 감쇠시킬 수 있을 것으로 기대되며, 1 μ F 이상의 커패시터가 설치될 경우 선로의 임피던스가 낮아져 9~150 kHz 대역에서의 복사 방출이 낮아질 것으로 기대된다.

IV. 결론 및 논의

철도 시스템은 여러 전자 통신 장비의 설치에 따라서 시스템 간의 전자파 간섭이 빈번히 발생하고 있다. 특히 철도 시스템에서 방사하는 9~150 kHz 대역의 자기장 복사 방출은 철도 신호 장비에 영향을 줄 수 있다.

본 논문에서는 전기 철도 시스템에서 방사하는 9~150 kHz 주파수 대역의 노이즈 소스 분석을 통하여 철도 차량의 견인 구동 시스템과 변전 시스템에

서 발생하는 수 kHz의 스위칭 노이즈가 급전선과 선로의 루프 회로를 통하여 방사함을 측정과 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

9~150 kHz 주파수 대역의 노이즈 전달 경로 분석을 선로를 구성하는 급전선, 조가선 및 선로의 기생 성분을 추출하여 구리-국수 간 중앙선 철도를 회로로 등가 모델을 추출하여 회로의 특성 임피던스 변화를 계산하였다. 이러한 접근 방법을 이용하여 전원 고조파 억제에 위하여 설치되어 있는 RC bank의 효과를 분석한 결과, 20~50 kHz 대역에서 별다른 효과를 나타내지 못함을 예측하였으며, 실제 중앙선 전동차가 운행하는 신원역 부근에서의 자기장 복사 방출 측정 결과와 매우 유사함을 확인하였다. 또한, 9~150 kHz 주파수 대역의 RFI를 줄이기 위해서는 RC bank 외에도 급전선과 선로 사이에 적절한 용량의 커패시터를 장하함으로써 효과적인 RFI 대책이 가능함을 보였다.

감사의 글

저자들은 측정에 도움을 주신 현대로템 시스템기술팀 공명상 차장님과 측정용 차량을 지원해 주신 한국철도기술연구원 한문섭 팀장님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 삼성전자 교통정보 2그룹, "철도 신호일반", pp 85-90, 1997년 3월.
- [2] 고영환, 최규형 "신호장치에 의한 ATS 신호장치 오동작 방지에 대한 연구", 한국철도학회 2008년도 춘계학술대회논문집, pp. 574-582, 2008년 6월.
- [3] IEC Standard 62236, Railway application - Electromagnetic compatibility, Dec. 2008.
- [4] Xavier Perpinya, *Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway*, InTech., pp. 333-351, 2012.
- [5] Jingen Qian, "RF models for Active IPEMs", Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Jan. 2003.
- [6] 김태승, 장우진, "전기철도 시스템에서 RC-bank의 위치가 고조파저감에 미치는 영향", 한국철도학회 2010년도추계학술대회, pp. 228-228, 2010년 10월.

권 석 태

2007년 2월: 서경대학교 정보통신
공학과 (공학사)

2007년 4월~2009년 2월: 한국전파
진흥협회 EMC 기술지원센터 연
구원

2009년 3월~현재: (주)이앤알텍 선
임연구원

2010년 3월~현재: 서경대학교 전자컴퓨터공학부 석사
과정

[주 관심분야] 시스템 레벨 EMC, EMC 측정, EMI 대책

정 연 춘

1984년 2월: 경북대학교 물리학
과 (이학사)

1986년 2월: 경북대학교 물리학
과 (이학석사)

1999년 8월: 충남대학교 전자공학
과 (공학박사)

1985년 12월~2001년 5월: 한국표준
과학연구원 전자기환경그룹 그룹장(책임연구원)

2000년 3월~2001년 2월: Univ. of York, Visiting Academics

2001년 6월~2002년 2월: (주)익스펜전자 중앙연구소장

2002년 2월~현재: 서경대학교 전자공학과 교수

2005년 6월~2008년 11월: 한국전자진흥협회 EMC기술지
원센터장(겸임)

[주 관심분야] EMI/EMC 측정 및 대책 기술, 전자파 재료