

VVVF 인버터로 구동되는 전기철도차량에서 방출되는 시변 저주파 전자계 분석

Analysis of time-varying low-frequency electric magnetic field emitted from electric rolling stocks fed by VVVF inverter

장동욱† 김주락* 김형철**
Dong-Uk Jang Joo-Rak Kim Heol-Cheol Kim

ABSTRACT

This paper is described the analysis of time-varying low-frequency electric magnetic field emitted from electric rolling stocks fed by VVVF inverter, in reference to allowable magnitude for exposures to time-varying electromagnetic field issued by International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection(ICNIRP). The level of the magnetic field strength was measured, in reference to the standard for occupational environments, which takes into account the public person's protection against the excessive emission of the low-frequency magnetic field, 5 Hz ~ 2 kHz.

1. 서론

전기철도차량은 주변압기, 추진제어장치(컨버터, 인버터), 견인전동기, 보조전원장치 등과 같은 다양한 전기장치들이 탑재되어 있다. 이러한 장치들은 각 장치의 구동 및 동작 상태에 따라서 다양한 시변 저주파영역의 전자계를 방출하고 있다. 특히, 전기철도차량은 인버터에 의해서 견인전동기가 속도제어 되기 때문에, 제어 주파수 변화에 따라서 다양한 저주파 전자계가 방사된다. VVVF제어를 위한 IGBT와 같은 스위칭 소자의 스위칭 주파수에 의한 전자계 형성 및 기타의 고주파, inter-harmonics가 발생하게 된다. 이러한 스위칭 소자의 동작에 따라서 주변의 전자기기 및 인체에 영향을 줄 수 있다. 이와 같은 이유로 방사되는 전자계에 대한 제한치를 국제위원회에서 규정하고 있다. 본 논문에서는 차량에서 발생하는 시변 저주파 전자계의 크기를 검토하여 방사를 국제비전리방사기구(ICNIRP)에서 제한한 값에 대한 평가를 실시하였다. VVVF 인버터에 의한 여러 주파수의 전자계가 존재하는 특별한 상황에 대해서 ICNIRP 가이드라인에서 정의한 공식을 적용하였다. 이 공식은 여러 주파 정상상태의 전자계에 대한 보호를 위한 요구조건을 정의하고 있다. 시간에 대한 전자계 신호에

† 정회원, 한국철도기술연구원, 전철전력, 선임연구원
E-mail : dujang@krri.re.kr

TEL : (031)460-5412 FAX : (031)460-5459

* 정회원, 한국철도기술연구원, 전철전력, 선임

** 정회원, 한국철도기술연구원, 전철전력, 책임

서 주파수 분석을 위해 STFT(short time Fourier transform)을 활용하여 ICNIRP에서 정의한 식에 적용하였다. 실시간으로 시간영역의 저주파 전자계 신호를 전력변환장치, 견인전동기, 보조전원장치 및 주변압기 위치에서 측정하였다. 이 측정된 결과를 후처리하여 STFT 및 ICNIRP 식을 적용하여 인체의 유해성을 평가하였다.

2. 본론

2.1 ICNIRP 가이드라인

인체보호기준의 주요내용은 주파수(0Hz~300GHz) 대역별로 전기장의 세기(V/m), 자기장의 세기(A/m) 및 전력밀도(w/m^2)의 세기를 나타내며 전자기장에 노출되고 있음을 알고 있으며 이의 잠재적인 위험성에 대하여 적당히 주의하도록 훈련받은 직업인과 전자기장에 노출되고 있는 사실을 모르거나 조치를 취할 수 없는 일반인으로 구분하여 기준치를 정하였다.

여러 주파수가 동시에 존재하는 자계는 각각의 주파수 영향을 더하여 자계의 크기를 계산하여 평가해야 하며, 그 수식은 다음과 같다.

$$B_{ref}(t) = \sum_{i=1}^{65kHz} \frac{B_i(t)}{B_{L,i}} + \sum_{j>65kHz} \frac{B_j(t)}{B_0} \leq 1 \quad (1)$$

여기서 i, j 는 자계의 정현파 주파수를 나타내며, $B_{L,i}$ 와 B_0 는 그림 3에서 정의한 기준값을 나타낸다. 사용한 자계 측정기가 최대 2 kHz로 되어 있기 때문에 본 논문에서는 2 kHz까지 위의 식을 적용하였다. 차량이 운행 중에는 $B_{ref}(t)$ 는 항상 1이하가 되어야 한다.

표 2 일반인 및 작업자에 대한 시변 극저주파 자계의 기준 값

작업자		일반인	
주파수 범위	자속밀도(B-field)[μT]	주파수 범위	자속밀도(B-field)[μT]
~ 1Hz	2×10^5	~ 1Hz	4×10^5
1-8 Hz	$2 \times 10^5 / f^2$	1-8 Hz	$4 \times 10^5 / f^2$
8-25 Hz	$2.5 \times 10^4 / f$	8-25 Hz	$5000 \times 10^4 / f$
0.025-0.82 kHz	$25/f$	0.025-0.8 kHz	$5/f$
0.82 - 65 kHz	30.7	0.8-150 kHz	6.25
0.065-10 MHz	$2.0/f$	0.15-10 MHz	$0.92/f$

2.2 극저주파 자계측정방법

교류전기철도 차량을 대상으로 극저주파 자계를 측정하였다. 전기철도차량 객실 측정 위치는 자계가 많이 발생할 것으로 판단되는 전장품이 있는 곳을 선정하여, 전력변환장치(컨버터 인버터, C/I box), 주변압기(Main transformer, MTr), 보조전원장치(SIV), 견인전동기(traction motor, TM)에서 실시하였다. 각 측정위치는 그림 2의 (●)에 자계 측정기를 설치하여 측정 및 기록을 실시하였다.

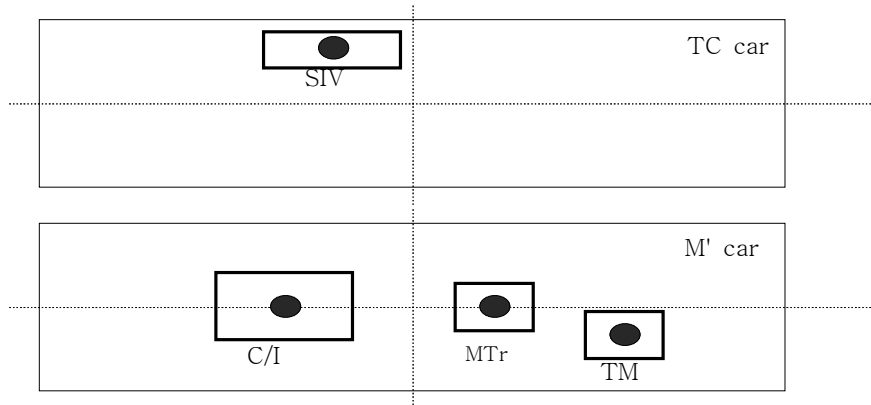


그림 2 자계측정 위치

자계측정에 사용한 장비는 BMM-3000(스웨덴, Enviromentor)으로 5 Hz~2 kHz까지 측정이 가능하고, BMM-3000의 뒤 쪽에 아날로그신호를 출력하는 BNC 컨넥터를 가지고 있다. 구형으로된 자계 센서를 객실내 바닥 60 cm높이에 설치하였으며, 센서로부터 측정된 신호는 자계측정기의 아날로그 출력을 통하여 x, y, z의 삼축에 대한 자계의 순시파형을 기록 및 분석하였다. 그림 3은 자계측정방법에 대한 개략도 및 계측기인 BMM-3000을 나타내고 있다.

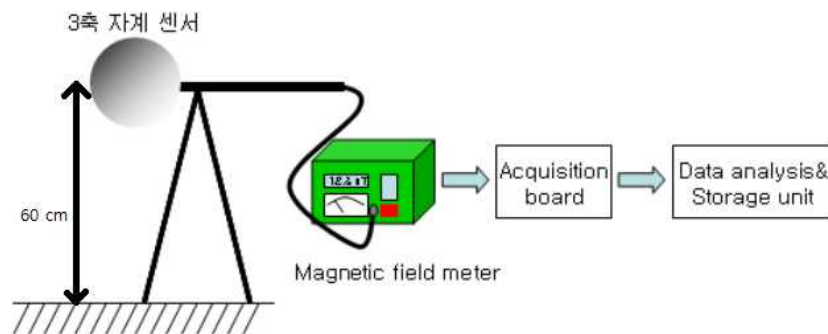


그림 3. 자계 측정 개략도

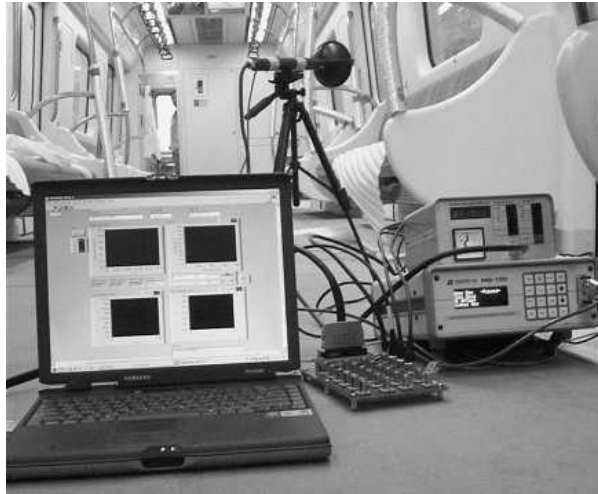


그림 4 극저주파 자기측정용 계측기 및 노트북

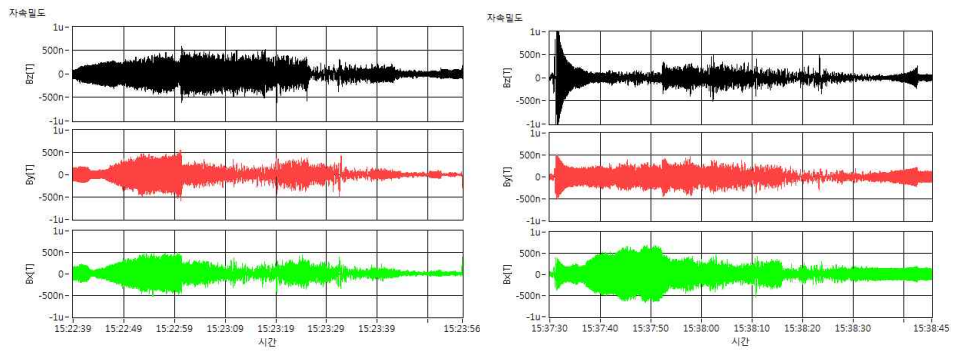
차량 운행은 정지 상태에서 속도가 본선최고운행속도(약 100 km/h)가 될 때까지 최대견인력으로 가속한 후 최고운행속도이내에서 타행 후, 회생제동을 사용하여 정지하는 조건으로 하여 실시하였다.

자기측정은 노트북의 랩뷰프로그램에 의해서 FFT 및 RMS 값을 기록하였다. 측정된 자계의 저장은 NI DAQCard-6062E를 사용하였으며, 데이터 샘플링 레이트는 5 kHz, 12 bit의 A/D변환으로 하였으며, 자기측정기의 아날로그 출력 신호에서 time window = 0.1 s씩 신호처리를 실시하였다. 이렇게 저장된 이산신호를 랩뷰 프로그램으로 후처리 하여 분석하였다.

전기철도차량의 추진장치 시스템에서는 다양한 고조파들이 함유되어 있기 때문에 이러한 전기철도차량의 VVVF 인버터 부하변동에 따라서 방사되는 자계를 시간적으로 분석하기 위해서 STFT를 이용하여 시간-주파수-크기를 동시에 분석하였다. x, y, z의 삼축에서 측정된 자계는 벡터합 공식에 의해서 전체 자속밀도 B를 계산하였다. 또한 ICNIRP에서 제시한 공식 (1)를 적용하여 일반인에 대한 자속밀도영향을 검토하였다.

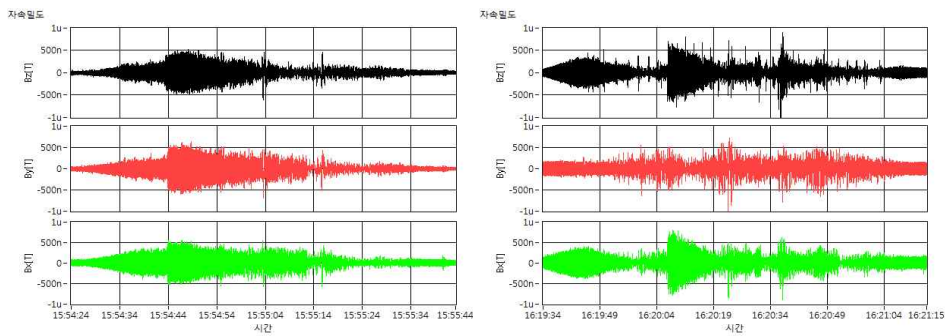
2.3 측정결과

랩뷰 프로그램을 이용하여 데이터를 정리하였다. 그림 5는 전기철도차량이 출발하여 정지할 때까지 측정한 시간영역에 대한 자속밀도파형을 나타내고 있다. 시간영역에 있어서 극저주파 자속밀도의 피크값은 약 700 nT정도이며, 자속밀도 값은 차량의 운행상태 즉 차량 부하크기에 따라서 변화하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) 주변압기

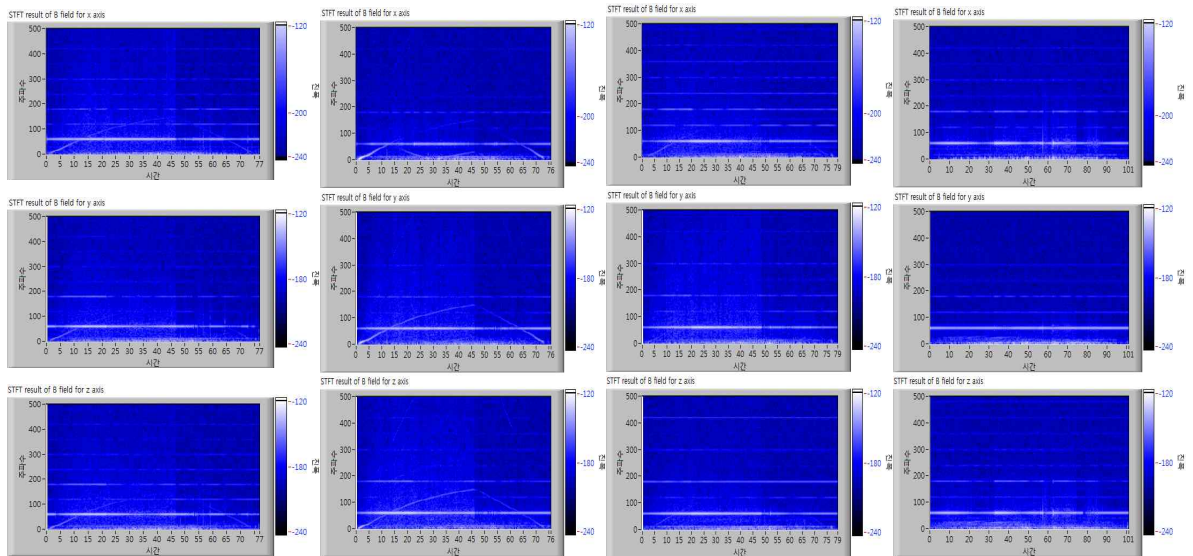
(b) 전력변환장치(C/I box)



(c) 견인전동기

(d) 보조전원장치(SIV)

그림 5. 시간영역에 대한 주요 전기장치의 극저주파 파형



(a) 주변압기

(b) C/I box

(c) 견인전동기

(d) SIV

그림 6. STFT을 이용하여 얻은 극저주파 자속밀도의 시간-주파수 영역

그림 6은 시간영역의 자속밀도를 주파수-시간 영역으로 변환한 STFT결과를 보여주고

있다. 전기철도차량의 전력변환장치가 VVVF로 운행되기 때문에 인버터 스위칭 주파수 변화에 따라서 주파수가 STFT결과로 반영되어 나타나고 있다. 또한, 60 Hz의 고조파 성분이 모든 측정영역에서 존재하고 있다. 시간-주파수 분석결과로부터, 각 전장품 및 기기에서 발생하는 전자계는 비정적인 특성을 갖고 있다는 것이 증명된다. 따라서 ICNIRP에서 제시된 식(1)을 적용하여 극저주파 자계의 유해성 여부를 평가하는 것이 적합한 것을 알 수 있다. 그림 6에서 보면, 주변압기, C/I box, 견인전동기는 차량이 가속하여 제동할 때까지 부하크기 및 차량의 속도 변화에 따라서 주파수가 변화하는 상황을 확인할 수 있다. 반면, SIV의 경우는 차량의 냉난방 부하, 조명부하 등과 같은 객실 서비스 시설에 활용되기 때문에 차량의 운행 중에 측정된 결과 큰 부하 변동 및 주파수 변화가 없음을 알 수 있다.

그림 7은 식(1)을 적용하여 계산한 결과이며, 모든 측정 장소에서 기준값인 1이하인 것을 알 수 있다.

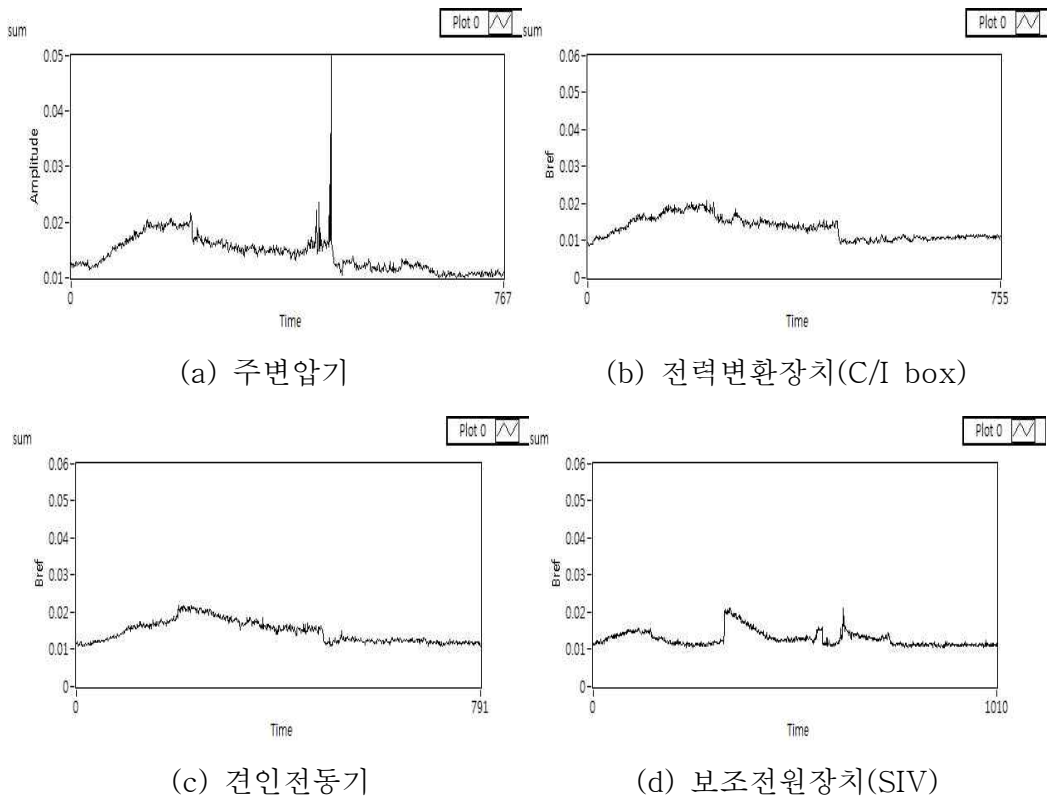


그림 7. ICNIRP의 식을 적용한 결과

4. 결론

본 논문은 교류 전원을 입력 받아 VVVF 인버터로 구동되는 전기철도차량을 대상으로 하여 시변 극저주파 자계를 측정하였다. 극저주파 자계 측정을 위해서 3축 자계센서로 시간영역의 자속밀도를 측정하였고, 이 신호를 STFT 및 ICNIRP 가이드를 이용하여 분석하

였다. 또한 차량이 영업 운전과 동일하게 하기 위해서 가속, 타행, 제동의 모든 운행 상황을 고려하여 시험을 실시하였다.

자속밀도측정 결과를 살펴보면 자속밀도 스펙트럼이 차량의 동적 운행상태와 연관되어 나타나고 있음을 알 수 있었다. 동시에 여러 주파수 성분을 갖는 극저주파 자계에 대한 평가를 위해서 ICNIRP에서 제시한 평가지표를 활용하여, 차량의 주변압기, C/I box, 견인전 동기, 보조전원장치를 대상으로 분석한 결과 제한치 이내인 것으로 확인되었다.

참고문헌

1. 방통위 고시 제2001-88호, “전자파인체보호기준”.
2. "ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields(up to 300 GHz)"(1998), Health Phys., vol. 74, no. 4, pp. 494-522
3. D. Bellan, P. Betti, D. Carrillo, M. D'Amore, M. D'Arco, C. De Capua, A. Gaggelli, M. Grandolfo, F. Maradei, A. Mariscotti, S. Pignari, P. Pozzobon, P. Rossi, and A. G. Violi, "Measurement and analysis of low-frequency magnetic field emissions in rolling stock," in Proc. European Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sorrento, Italy, Sept. 9-13, 2002, pp. 1201-1204
4. Diego Bellan, Alessio Gaggelli, Fransescaromana Maradei, Andrea Mariscotti and Sergio A. Pignari(2004), "Time-Domain Measurement and Spectral Analysis of Nonstationary Low-Frequency Magnetic-Field Emissions on Board of Rolling Stock", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46, No. 1, pp. 12-23
5. 장동욱, 한문섭, “전기철도차량 객실 내부 위치에 따른 극저주파 자계 측정 및 분석”, 한국철도학회:학술대회논문집, 한국철도학회 2008년도 춘계학술대회 논문집, pp.489-494, 2008년 6월
6. Beata Pałczyńska, Jacek Wyszowski, "ANALYSIS OF TIME-VARYING LOW-FREQUENCY MAGNETIC-FIELD EMITTED FROM THE SHIP'S INVERTER-FED INDUCTION MOTOR" XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology , September 6-11, 2009, Lisbon, Portugal