

한국형 고속전철 시제차량 고조파 계측 및 분석

Harmonics Measurement and Analysis for Korea High Speed Train Prototype

이태형*
Lee, Tae-Hyung

박춘수**
Park, Choon-Soo

ABSTRACT

It is essential to evaluate harmonic characteristics of high speed train using power electronics equipment such as converter-driven motor drives, battery chargers and auxiliary power supplies. The purpose of this study is to measure and analyze harmonics characteristics of Korea high speed train prototype. This paper presents result of harmonics measurement and analysis of harmonics characteristics in terms of loading, speed and operation mode.

1. 서론

전기철도차량의 전력변환시스템은 건인전동기를 제어하여 차량의 추진 및 전기제동을 수행하는 주전력변환장치와 차량내 전기기기 전원 공급 및 객차 서비스를 위한 조명설비, 냉난방설비에 필요한 전원을 공급하는 보조전원장치로 구성된다. 전력변환시스템은 전력전자기술, 고속 대용량 반도체소자 및 마이크로프로세서의 기술발달에 힘입어 높은 성능과 승차감, 효율, 안전성, 에너지 소비측면에서 뛰어난 제어능력을 갖추게 되었다. 하지만 고속 스위칭소자를 사용함에 따라 발생하는 고조파로 인해 전기차량은 물론 변전소, 신호시스템, 데이터 전송 및 감시시스템에 영향을 주게 된다[1].

전기철도시스템의 고조파를 분석하기 위하여 P. Ferrari 등은 차량 추진 및 변전소에 사용되는 자연/자기 소호(natural and self commutation) 컨버터는 주파수 영역에서 표현하고 가선 및 선로는 분포정수회로로 구성하여 시뮬레이션을 수행하였는데 이는 차량 전력변환장치에 의한 고조파 특성을 개별적으로 분석한 후 도출된 결과를 급전시스템에 주입하는 고전적인 방식을 탈피한 것이며 급전시스템과 차량의 전력변환장치의 상호작용을 고려할 수 있는 것이었다[1]. K. H. Yuen 등은 차량의 고조파 특성을 Spline 내삽법(interpolation)을 사용하여 다항식의 집합으로 표현하여 사용하였다[2]. 오광해 등은 급전시스템을 단자망모델과 상하선 Tie를 고려하기 위한 등가축약모델을 사용하여 표현하고 고조파측정 및 분석을 수행하였다.

본 논문에서는 급전계통 및 타 고속열차를 고려한 고조파 해석을 위하여 현재 고속선구간에서 시운전시험중인 한국형 고속전철 시제차량을 대상으로 차량에서 발생하는 고조파를 차량의 부하, 속도 및 운전모드에 따라 측정하고 그 결과를 바탕으로 시제차량의 고조파 특성을 분석하였으며 등가방해전류로 영향을 평가하였다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

2. 고조파 계측

2.1 고조파 계측시스템

한국형 고속전철 시제차량(7량 1편성)에서 발생하는 고조파를 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 계측시스템을 구축하였다. Fig. 2는 계측에 사용된 전력분석기이며 Fig. 3은 전력분석기에 연결된 Data Acquisition System의 모니터링 화면이다. 계측시간 선택에 따라 샘플시간이 결정되는데 본 측정에서는 시험주행이 약 40분 정도 소요됨을 감안하여 1시간 계측(샘플시간 1초)을 선택하였으며 고조파 계산차수는 63조파까지 가능하다.

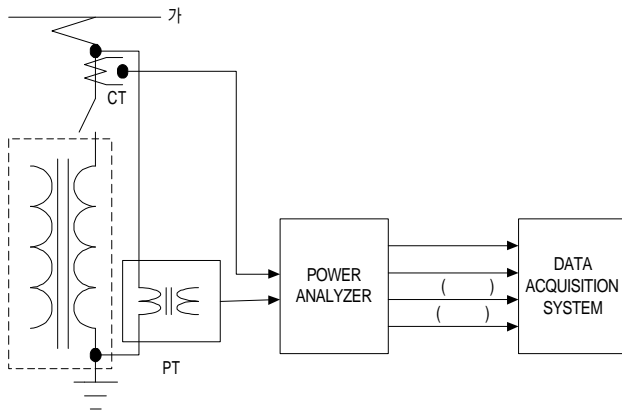


Fig. 1. Measurement Block Diagram

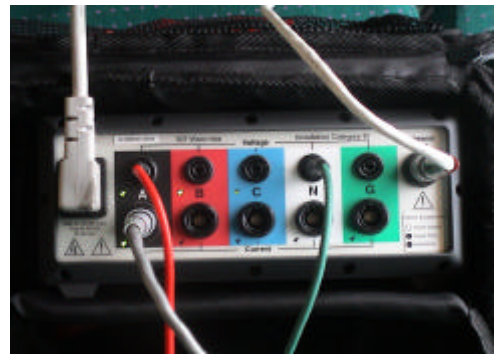


Fig. 2. Power Analyzer

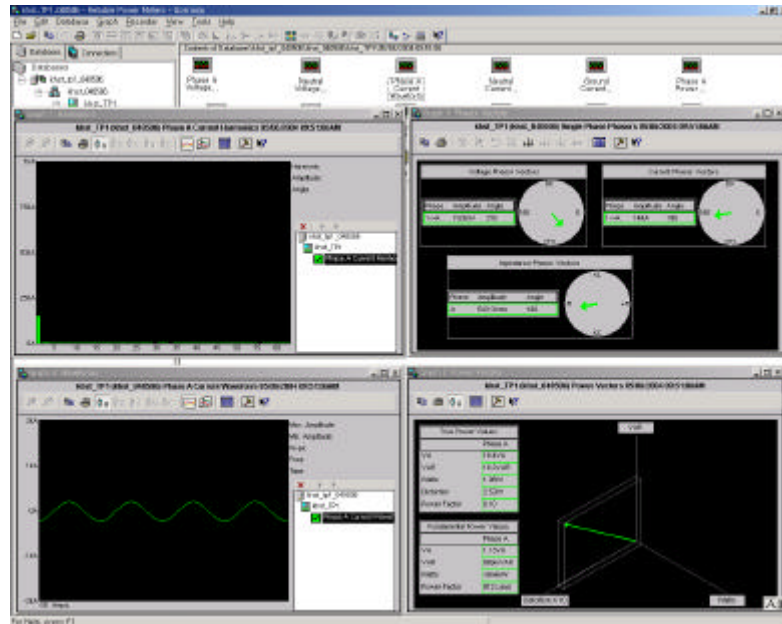


Fig. 3. Data Acquisition System

2.2 한국형 고속전철 시제차량의 전력변환장치

Table 1에서 보는 바와 같이 G7 고속전철기술개발사업을 통해 개발된 350km/h급 한국형 고속전철 시제차량은 7량 1편성으로 구성되었으며 상업운행 20량 편성의 성능을 평가할 수 있도록 구

성되었다. 시제차량은 동력차 2량, 동력객차 1량, 중간동력객차1량, 객차 3량으로 구성되어 있으며 견인전동기로는 1100kW급 유도전동기 12대를 사용하며 총 출력은 13,200kW이다. 추진 및 전기제동을 담당하는 주전력변환장치(모터블럭)는 Table 2와 같이 4500V, 4000A의 IGCT(Integrated Gate Commutated Thyristor) 소자를 사용하여 4상한 PWM컨버터 2대를 병렬운전하고 인버터는 전압형 3상 PWM을 사용한다. 또한 제어전원, 전기기기 냉각 및 승객서비스 전원을 공급하는 보조전원장치(보조블럭)는 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)를 사용하여 1.4MVA 용량의 PWM컨버터로 구성하고 신뢰성을 보장하기 위해 2군 2병렬방식으로 운전하고 있다.

Table 1. Specification of KHST

구분	20량 편성	시제차량 (7량편성)	
		동력차	동력객차
구성	동력차	2	2
	동력객차	2	1
	중간동력객차	2	1
	객차	14	3
전동기수		16	12
출력/1대(kW)		1,100	1,100
총출력(kW)		17,600	13,200

Table 2. Specification of Power Electronic Equipment

항목	모터블럭		보조블럭
	컨버터	인버터	
입력전압	1400Vac	2800Vdc	380Vac
입력전류	930A	884A	914A
출력전압	2800Vdc	0~2183Vac	670Vdc
출력전류	884A	747A	2089A
용량	1300kVA×2	3000kVA	1.4MW
소자	IGCT	IGCT	IGBT
제어방식	PWM	VVVF	PWM

2.3 고조파 측정 시험조건

한국형 고속전철 시제차량이 고속전철 광명역(KP21.937)과 천안아산역(KP95.5)구간을 왕복하여 시운전시험을 수행할 때 차상에서 정차(0km/h), 가속주행(100km/h, 200km/h), 정속주행(300km/h), 최고속도주행(310km/h) 조건으로 구분하여 측정하였다. Table 4는 시험구간에 전력을 공급하는 급전시스템으로 시험구간을 둘로 나누어 광명역쪽은 안산변전소에서 천안아산역쪽은 평택변전소에서 담당하고 있다. Fig. 4는 시험구간의 곡선과 경사를 도시한 것이다. 시제차량은 Table 5와 같이 고조파 측정시 총 4회의 시험을 수행하였으며 상하행주행시 속도 및 운전모드에 대해 고조파를 측정하였다.

Table 4. Power System

KP	이름	구분
19.129	일직	SP
34.683	안산	SS
45.324	월평	PP
54.818	마하	SP
64.798	어연	PP
76.137	평택	SS
85.386	석곡	PP
91.932	천안	PP
101.570	용정	SP

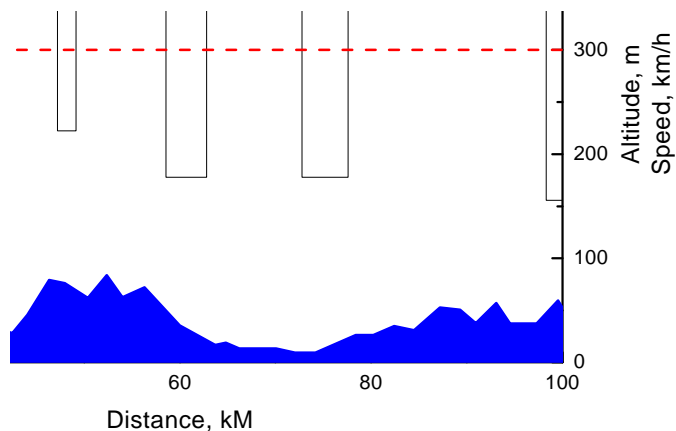


Fig. 4 Line data of test section

2.4 고조파 계측 결과

Fig. 5. ~ Fig. 12.는 Table 5.의 #1, #2, #3, #4 주행구간에 대한 63조파까지 계산한 고조파 전류와 식(1-a)와 같이 RMS로 계산한 부하전류이다. Fig. 13.은 등가방해전류(Psophometric Current)를

Table 5. Test scenario

번호	주행구간	주행시간	최고속도
#1	오송기지 -> 광명역	09:50 ~ 10:17	300km/h
#2	광명역 -> 천안아산역	10:54 ~ 11:14	310km/h
#3	천안아산역 -> 광명역	11:25 ~ 11:50	300km/h
#4	광명역 -> 오송기지	13:09 ~ 13:40	300km/h

속도별로 도시한 결과를 보인 것이고 Fig. 14.는 등가방해전류 계산시 적용한 국제전기통신연합 (ITU)의 잡음평가계수이며 등가방해전류 계산식은 아래 식(1-b)와 같다. 여기서 J_{Pn} 은 각 조파 별 등가방해전류, S_{fn} 은 잡음평가계수, I_n 은 고조파 전류, J_P 은 등가방해전류이다.

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{128} I_n^2}{128}} \quad (1-a)$$

$$J_{Pn} = S_{fn} I_n$$

$$J_P = \sqrt{\sum (J_{Pn})^2} \quad (1-b)$$

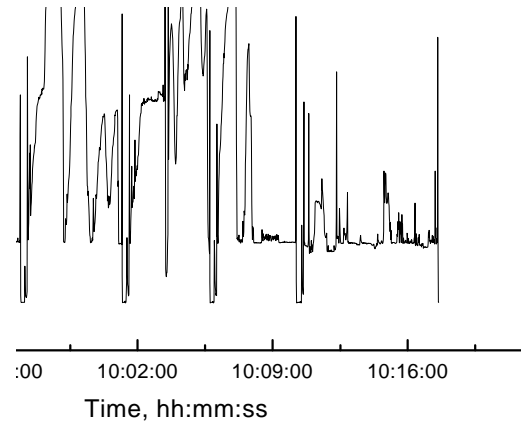
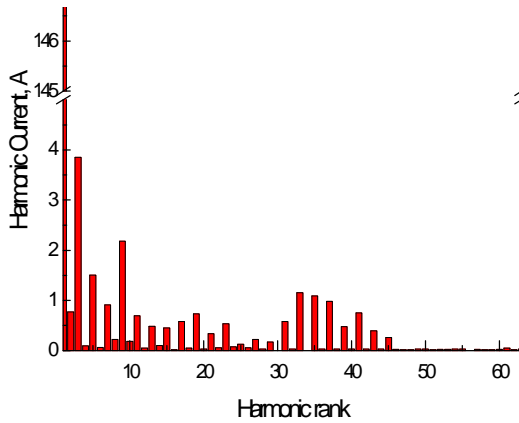


Fig. 5. Harmonic Current for #1(가속 30km/h)

Fig. 6. Load Current for #1

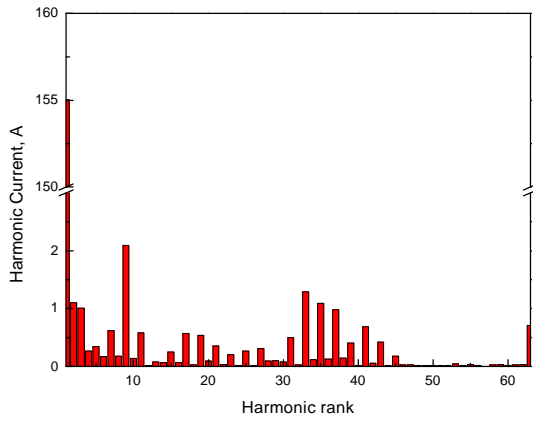


Fig. 7. Harmonic Current for #2(가속 310km/h)

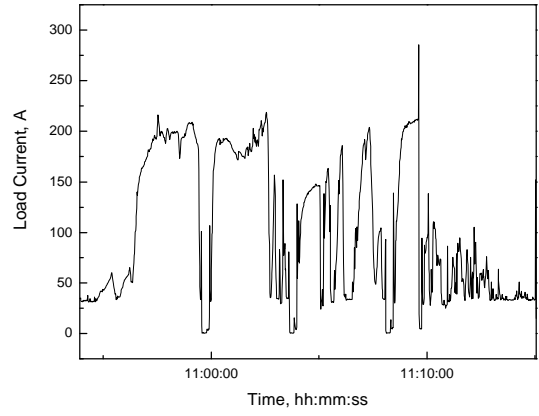


Fig. 8. Load Current for #2

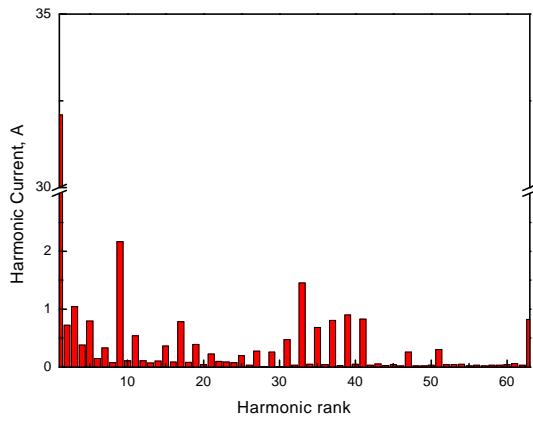


Fig. 9. Harmonic Current for #3(타행 300km/h)

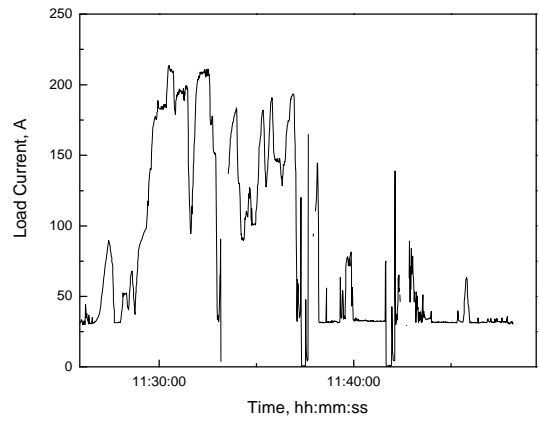


Fig. 10. Load Current for #3

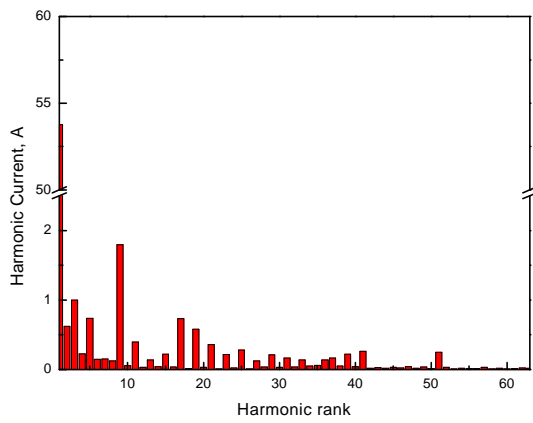


Fig. 11. Harmonic Current for #3(정속 300km/h)

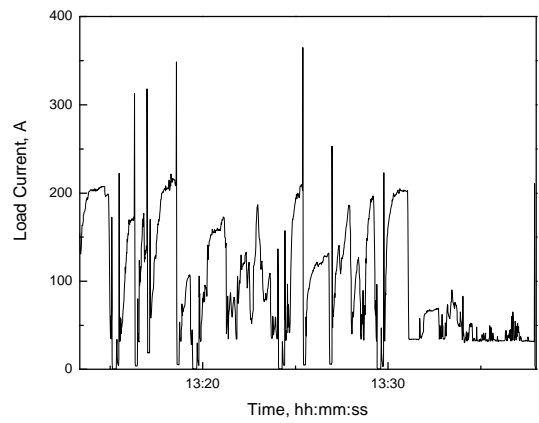


Fig. 12. Load Current for #3

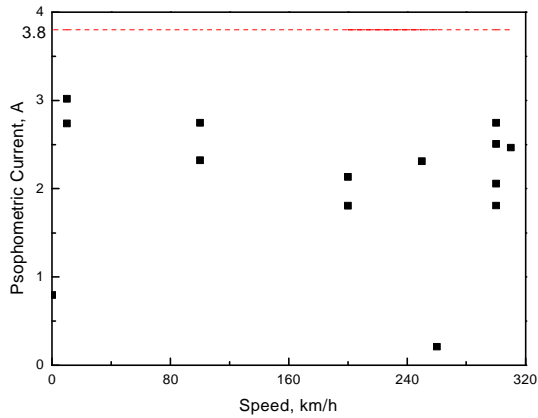


Fig. 13. Psophometric Current

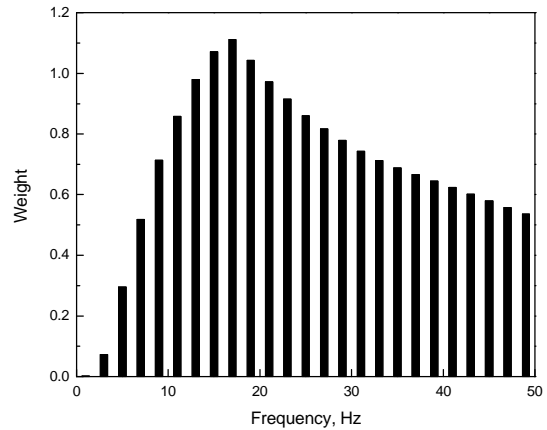


Fig. 14. Weight assigned to frequency

3. 고조파 분석

시제차량의 전력변환장치에서는 PWM 제어 방식을 사용하고 있으므로 위상제어방식에서 발생하지 않는 짝수차 고조파가 Fig. 5 ~ 11과 같이 발생함을 확인할 수 있었다.

가속, 정속 운전시 3고조파와 9고조파가 기본파의 2.5% 수준으로 발생하는 것을 확인 할 수 있었으며 30 ~ 40조파 사이에서도 2.0% 이하 수준으로 고조파가 발생하는 것을 볼 수 있다. 하지만 이 결과는 시제차량의 전력변환장치 뿐만 아니라 같은 급전구간에 존재하는 고속열차의 영향과 기타 고조파 발생원 등도 포함되어 나타난 현상이므로 향후 예측 및 시험을 통한 정밀한 분석이 요구된다.

통신장애에 관한 지표인 등가방해전류를 속도별로 차량측에서 계산하였을 때 한국전력공사의 고조파허용기준치인 3.8[A]를 초과하지 않는 것으로 나타났다. 다만 등가방해전류가 200km/h까지는 지속적으로 속도가 증가함에 따라 반비례하고 다시 최고속도까지 비례하는 경향을 보이고 있다.

시제차량의 부하전류는 상기 시험조건에서 half rake당 최대 200A로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 급전계통 및 타 고속열차를 고려한 고조파 해석을 위하여 현재 고속선구간에서 시운전시험중인 한국형 고속전철 시제차량을 대상으로 차량에서 발생하는 고조파를 차량의 부하, 속도 및 운전모드에 따라 측정하였다. 그 결과를 바탕으로 시제차량의 고조파 특성 분석과 등가방해전류로 영향을 평가하였으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- PWM제어방식을 사용하는 전력변환장치로 인해 짝수고조파가 발생하였으며 시험조건에서 고조파가 기본파 대비 2.5%이하로 발생하였다.
- 등가방해전류는 차량측에서 계산했을 때 기준치인 3.8[A]이하로 나타났다.
- 시제차량의 부하전류는 상기 시험조건에서 half rake당 최대 200A로 나타났다.
- 본 예측 및 분석결과를 바탕으로 시제차량의 전기기기에 대한 영향을 검토하여 신뢰성 및 안정화를 확보하고자 한다.

참고문헌

1. P. Ferrari, et al, "A method for integrated harmonic analysis of multi-converter systems", ICHQP'98 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp426-431, 1998
2. K.H.Yuen, et al, "Modeling of Electric Railway Vehicle for Harmonic Anaysis of Traction Power-supply system using Spline Interpolation in Frequency Domain", APEC '99 Fourteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp458-463, 1999.
3. 오광해 외, "전기철도에서의 고조파 발생과 계통응답특성(Ⅰ) - 계통응답특성을 중심으로 -, 한국철도학회논문집 제7권 제1호 pp66-64, 2004
4. 오광해 외, "전기철도에서의 고조파 발생과 계통응답특성(Ⅱ) - 고조파 측정분석을 중심으로 -, 한국철도학회논문집 제7권 제1호 pp65-69, 2004

후 기

본 연구는 건설교통부 고속철도기술연구개발사업으로 지원된 "고속철도시스템 신뢰성 및 운영 효율화 기술개발"과제의 연구결과 중 일부입니다.