

한국형 틸팅열차 운행 중 운전 모드에 따른 고조파 분석 및 평가에 관한 연구

논 문
58P-4-9

A Study on Harmonic Analysis and Evaluation According to Operating Mode During Operation of the Tilting Train Express

강 철* · 임 재 찬* · 허 재 선** · 김 재 철† · 이 수 길*** · 한 성 호§

(Chul-Kang · Jae-Chan Lim · Jae-Sun Huh · Jae-Chul Kim · Su-Gil Lee · Soung-Ho Han)

Abstract - Recently, the new Korean Tilting Train Express(TTX) which maintains a speed on the curve railway line is developed. Electric railways, including the TTX, have electrical problems that could bring about serious accidents. For such reasons, the electric railway's electrical problems, electrical harmonic and others, have been studied briskly. Thus, TTX's electrical problems also need leading studies because the new Korean TTX will operate earnestly in 2012. The results could be used hereafter diagnosis of it's components and train conditions. In the paper, electrical signals in TTX operation were measured to analyze electrical harmonic. In addition, after the electrical signals were measured to operating mode (coasting mode, acceleration mode and regenerative breaking mode) respectively in test section(Ho-nam line, Chung-buk line, Jung-ang line and Tae-baek line). The electrical harmonics considered operating modes triparted were analysed and evaluated.

Key Words : Tilting Train Express, Operating Mode, Harmonic Analysis, Harmonic Evaluation, IEEE Std. 519-1992

1. 서 론

최근 저탄소 녹색성장이라는 국가적인 정책과 더불어 환경에 대한 국민적인 관심이 나날이 증가하고 있다. 전기철도는 친환경적이고 높은 에너지 효율의 장점을 바탕으로 주요 대중교통 수단으로 각광 받고 있다. 하지만 우리나라는 산악지역이 전체 국토의 70[%] 이상으로 전차 선로에 곡선부가 많아 고속철도 서비스를 제공하는데 한계가 있어 왔다. 이러한 한계를 해결하고 낙후된 철도 서비스 지역에 고속철 서비스를 제공하기 위해 개발된 한국형 틸팅열차는 곡선부에서도 속도 감속 없이 열차 자체의 틸팅기능으로 곡선부 통과 시 차체를 기울여 중력가속도로 열차의 원심력을 상쇄시키기 때문에 속도의 감속 없이 곡선부를 통과 할 수 있는 열차이다. 또한 틸팅열차는 별도의 신선 건설 없이 기존선을 그대로 이용하여 운행할 수 있기 때문에 신선 건설에 필요한 막대한 건설비와 환경문제를 야기하지 않는다는 장점을 갖고 있다 [1,2]. 그러나 틸팅열차를 비롯한 전기철도는 전기를 동력원으로 사용하고 건인 전동기를 제어를 위한 컨버터, 인버터의 전력변환 시스템을 사용하기 때문에 고조파에 의한 전기적인 문제가 발생할 수 있으며 이는 대형 사고를 초래할 수 있다. 따라서 그 동안 KTX를 비롯한 다른 전기기관차들은 고조파

등 전력품질에 관련된 전기적인 문제와 대책에 대한 연구가 이루어져왔다[3]. 더욱이 틸팅열차는 중앙선 등 기존선에 투입을 목표로 하기 때문에 이러한 고조파가 철도급전계통에 따라 어떠한 특징이 있는지도 살펴볼 필요가 있다.

따라서 향후 2012년부터 본격적으로 영업 선로에 투입되어 운행 될 틸팅열차에 대한 고조파 등 전기적인 문제에 대한 연구 또한 선행되어야 할 필요가 있으며 이러한 연구 결과는 향후 틸팅열차 인버터, 컨버터의 주회로 시스템의 상태 평가와 진단뿐만 아니라 차량에서 발생하는 고조파가 철도급전계통에 미치는 영향 등을 파악할 수 있다.

이를 위해 본 논문에서는 한국형 틸팅열차에 직접 탑승하여 전기신호를 계측하고 고조파를 분석하였다. 또한 시간적, 공간적으로 부하의 변동이 심한 틸팅열차의 특성을 고려하여 운전 모드를 각각 타행, 가속, 회생 제동의 세 부분으로 나누고 운전 구간인 호남선, 충북선, 중앙선, 태백선에서의 고조파를 분석하였으며 고조파 평가는 한전과 IEEE Std. 519-1992의 국내외 규정에 근거하여 차량에서 발생하는 고조파를 비교하고 평가하였다. 이를 통해 고조파의 운전 모드에 따른 특성을 파악할 수 있으며 이러한 분석 및 평가 결과는 향후 틸팅열차의 주회로 시스템의 상태 진단 및 평가는 물론 차량의 안정화를 위한 자료로 활용될 것으로 사료된다.

2. 틸팅열차 운행 중 고조파 계측 및 부하 특성

2.1 고조파 신호의 계측 위치 및 계측 장비

틸팅열차 운행 중 발생하는 모든 고조파를 계측하기 위해 그림 1과 같이 주변압기 1차측에 해당하는 판토품그래프 밀단의 PT와 MCB 밀단에 계측 장비를 설치하여 고조파를 측정하였다. 고조파 계측에 사용된 장비는 FLUKE 社의 1760 PQ

* 준 회 원 : 숭실대학교 전기공학과 공학석사

** 준 회 원 : 숭실대학교 전기공학과 석사과정

*** 정 회 원 : 한국철도기술연구원 선임연구원

§ 정 회 원 : 한국철도기술연구원 연구단장 · 공박

† 교신저자, 펠로우회원 : 숭실대학교 전기공학과 교수 · 공박

E-mail: jckim@ssu.ac.kr

접수일자 : 2009년 10월 22일

최종완료 : 2009년 11월 11일

Analyzer로써 고조파를 포함한 전력품질 측정에 사용되는 전문 장비이다. 고조파는 0.2[초] 간격으로 저장되도록 설정하였으며 장비의 샘플링 주파수는 10.24[kHz]이다[4]. PT의 전압 비는 25[kV]:150[V]이며 차량 내부에 설치된 Transducer는 150[V]:5[V]이므로 최종적으로 계측되는 전압비는 25[kV] :5[V]인 5000대 1이 되며 로고스키 코일의 CT비는 4[mV/A]이다.

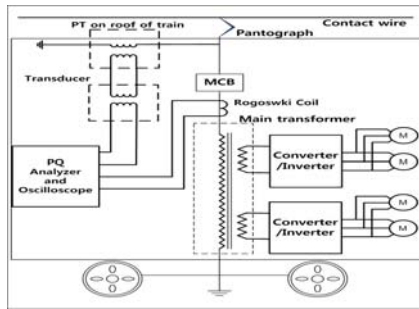


그림 1 고조파 신호 계측 위치
Fig. 1 The point of harmonic signal measurement

2.2 고조파 신호 계측 구간

2009년 9월까지 총 220회 이상의 시험 운전 횟수를 거쳐 약 97,000 [km] 이상을 운행하고 있으며 앞으로도 틸팅열차 안정화를 위해 지속적인 실제 영업 선로에서의 시험 운행이 계획되어 있다. 실제 영업 선로에서 이루어진 시험 운전은 호남선, 충북선, 중앙선, 태백선 등 다양한 선로 구간에서 이루어지고 있으며 현재 180[km] 증속 시험까지 완료하였다. 본 논문에서는 향후 2012년 틸팅열차가 투입되어 운행될 것으로 여겨지는 충북선, 중앙선과 태백선의 고조파 분석뿐만 아니라 호남선 구간에서의 고조파 또한 분석하여 이들 네 구간에 대한 고조파 분석 결과를 상호 비교하였다. 이들 네 구간의 고조파 분석과 비교는 운전 선로에서의 가선의 상태는 물론, 열차에서 발생하는 고조파의 특징을 파악할 수 있다. 여기서 호남선은 고속철도 운행권으로 KTX 및 새마을호, 무궁화호 등 여러 전기기관차의 운행 빈도가 빈번한 곳이다. 그에 반해 충북선은 일반 철도권으로 무궁화 및 새마을호가 주로 운행하며 하루 편도 열차 횟수는 약 83회이며 산업선으로 분류되는 중앙선과 태백선은 승객 수송용 열차는 무궁화호가 주로 운행되면 전기철도의 하루 편도가 약 46회로 운행 횟수가 호남선이나 충북선에 비해 차량 운행 빈도가 적다[5,6].

표 1 고조파 계측 구간
Table 1 Sections of harmonic measurement

구분	호남선	충북선	중앙선	태백선
운전 구간	대전 ~ 송정리	봉양 ~ 오근장	제천 ~ 원주, 영주	고한 ~ 쌍룡
운전 거리	370[Km]	94[Km]	268[Km]	62[Km]
개통 연도	'04.04.01	'05.03.30	'87.12.30	'74.06.20
선로 형태	복선	복선	단선	단선

2.3 틸팅열차 운행 중 운전 모드에 따른 부하 특성

그림 2는 호남선 구간에서 틸팅열차 운행 중 계측된 전압, 전류의 실효치를 나타낸 그래프로써 차량이 운행하면서 운전 상태에 따라 전류의 변화가 매우 빈번한 것을 알 수 있다. 이는 틸팅차량이 운행 중 부하변동이 발생했음을 의미한다.

결국 틸팅열차는 각기 다른 선로 구간을 운행하면서 차량의 운전 상태가 수시로 변동되기 때문에 차량에서 발생하는 고조파의 특징을 정확하게 분석하기 위해서는 차량의 운전 모드, 즉 타행, 가속, 회생 제동에 따른 부하 변화를 정확히 파악할 필요가 있다.

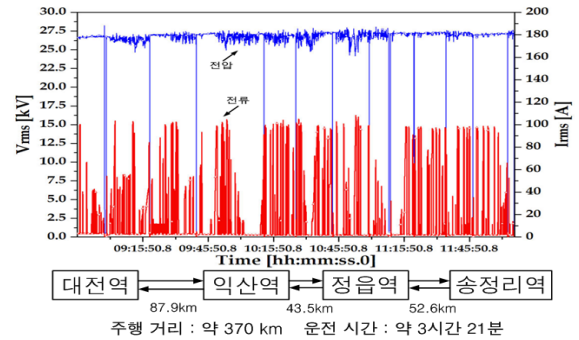


그림 2 틸팅열차 호남선 운행 중 계측된 전압-전류
Fig. 2 Measured voltage-current during TTX operation at Ho-nam line

표 2는 각 운전 선로 및 차량의 운전 모드에 따라 달라지는 부하 특성을 나타낸 결과로써 각 운전 선로의 구성뿐만 아니라 차량의 운전 조건 및 상태가 달라 차량의 운전 모드별 운전 시간의 비율과 평균 전력 등에 차이가 있지만 운전 모드에 따라 부하 특성이 확연히 달라지는 것을 확인할 수 있다. 특히, 회생 제동 시 발생하는 전력은 급전 계통으로 역송되어 인근 타 전기철도 차량에서 소비되기도 하기 때문에 전력품질이 저하되면 타 전기철도 차량에도 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 고조파 분석 시에도 이러한 틸팅열차의 시변부하 특성을 고려하여 각기 다른 운전 모드에 따른 고조파 분석이 필요하겠다.

표 2 틸팅열차 운전 모드에 따른 소비 전력
Table 2 Power consumption with operating mode of the TTX

운전 모드	선별	운전 시간 비율 [%]	평균 유효전력 [kW]	평균 무효전력 [kVar]	평균 역률
타행	호남	70.7	44	30	0.74
	충북	56.9	60	49	0.77
	중앙	55.7	100	84	0.76
	태백	51.6	59	48	0.77
가속	호남	23	1909	301	0.98
	충북	30.5	1625	234	0.99
	중앙	36.9	1397	230	0.98
회생 제동	태백	31.6	1568	309	0.97
	호남	6.3	-520	-399	-0.82
	충북	12.6	-541	-345	-0.81
	중앙	7.4	-555	-402	-0.80
	태백	16.8	-569	-406	-0.80

3. 킬팅열차 운행 중 고조파 분석 및 평가

3.1 고조파 분석 및 평가 방법

킬팅열차의 전압, 전류 고조파는 각각 종합 고조파 왜형률 (THD, Total Harmonic Distortion), 종합 수요 왜형률(TDD, Total Demand Distortion)을 이용하여 분석하였다.

이는 한전의 전압 고조파 규정치와 IEEE Std. 519-1992의 전류 TDD 규정치를 근거로 평가하기 위한 것과 보다 정확한 고조파 분석을 위한 것으로 전류를 THD로 분석 시 그 값이 기본파를 기준으로 한 계산값이 되어 모든 상황에서 매우 높은 값이 나오게 된다. 따라서 정확한 고조파 분석이 이루어 질 수 없기 때문에 최대 부하 전류를 기준으로 고조파를 계산하는 TDD 방법을 사용하여 부하변동이 심한 킬팅열차의 전류 TDD를 분석하였다. 또한, 한전의 고조파 규정에서는 전압 THD에 대한 부분만을 다루고 있어 본 논문에서는 킬팅차량에서 발생하는 전류 TDD에 대한 분석과 평가를 위해 IEEE Std. 519-1992의 고조파 전류 규정에서 55[kV] 전철 변전소 기준으로 약 단락전류(I_{sc})=3,742[A], 최대부하전류(I_L)=572[A]로 단락비(I_{sc}/I_L)가 20미만인 범위에 속하는 IEEE 제한치 값을 사용하였다[7~9]. 그리고 전압 THD와 전류 TDD는 10분과 15분 측정값을 사용하였다.

본 논문에서 고조파 판정 근거로 사용된 한전공급약관과 IEEE Std.519-1992의 고조파 제한치는 공통접속점(PCC, Point of common coupling)이 55[kV]인 철도급전계통을 기준으로 하였다. 이는 국내의 고조파 규정이 킬팅차량에 대한 규정을 따로 정하고 있지 않지만 본 논문에서는 킬팅차량의 운전 모드에 따라 달라지는 고조파의 특징을 비교하고 차량의 상태를 평가하기 위해 이들 규정값을 근거로 하였다.

3.2 타행 운전 모드에서의 고조파 분석 결과

타행 운전 시에는 보조전원장치(SIV)에 의한 적은 전력만이 차량에 공급되며 견인 전동기를 구동하지 않기 때문에 컨버터, 인버터에서의 전력전자 소자의 고속 스위칭에 의한 고조파 발생이 크지 않다. 따라서 타행 운전은 차량의 전력 소비가 가장 적은 운전 상태로 이때의 고조파 분석을 통해서 차량에서 발생하는 고조파뿐만 아니라 철도 급전 계통의 상태도 알 수 있다.

그림 3은 타행 운전 모드에서 계측된 전압-전류의 순시 파형을 나타내며 그림 4는 타행 운전 모드에서 발생하는 전류의 차수별 고조파를 차량의 최대부하전류(I_L)를 기준으로 그 비율을 나타낸 값이며 차량 및 계통에 악영향을 미치는 기수 고조파 중 그 값이 큰 3~29 고조파까지의 결과를 비교, 평가한 그래프이다. 그래프에서 타행 운전 시 발생하는 고조파 전류의 차수별 크기는 IEEE Std. 519-1992의 제한치 범위 내에서 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 네 곳의 운전 구간 중 태백선 구간에서 킬팅열차가 타행 운전 시 다른 세 구간에 비해 더 큰 고조파 전류가 발생하였다.

전압, 전류의 파형과 차수별 고조파 전류의 평가 결과와 표 3을 보면 특히, 태백선 구간에서 가장 큰 고조파가 발생하였다. 이는 태백선 구간에서의 계통 전원의 상태가 좋지 못함을 의미한다. 즉, 타행 운전 시 보조전원장치에 의한 적은 부하 전력 소비에도 불구하고 호남선, 충북선 및 중앙선과 달리 태백선 구간에서 더 심한 고조파 왜곡이 발생하고 있는

것은 철도 급전 계통의 전원 상태가 가장 좋지 못함을 보여 주는 것이다. 이를 철도 급전 계통 측면에서 살펴보기 위해 표 4에서와 같이 네 곳의 운전 구간에서의 전철 변전소에 대한 비교를 하였다[5,6]. 따라서 이러한 철도 급전 계통에서의 고조파 발생을 저감하기 위해서는 수동 L-C 필터 내지는 능동필터와 같은 고조파 저감 장치가 필요할 것으로 사료된다.

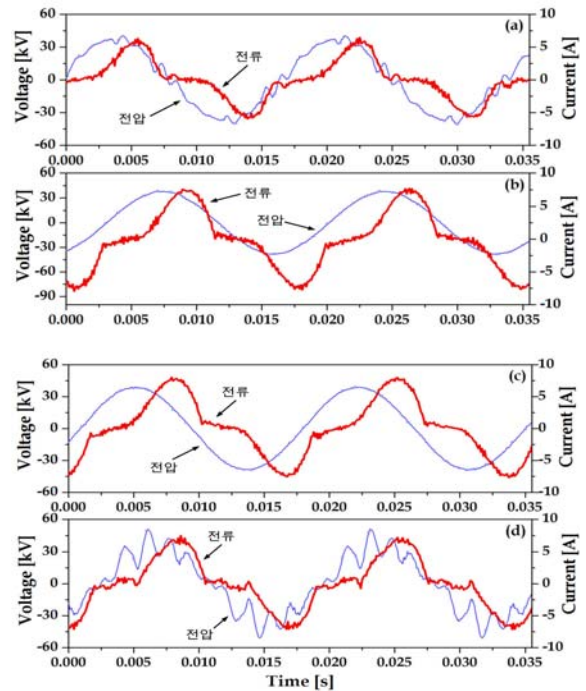


그림 3 타행 운전 모드에서의 전압-전류 파형

(a) 호남선 (b) 충북선 (c) 중앙선 (d) 태백선

Fig. 3 Waveform of the voltage and current during coasting state

((a) Ho-nam (b) Chung-buk (c) Jung-ang

(d) Tae-baek

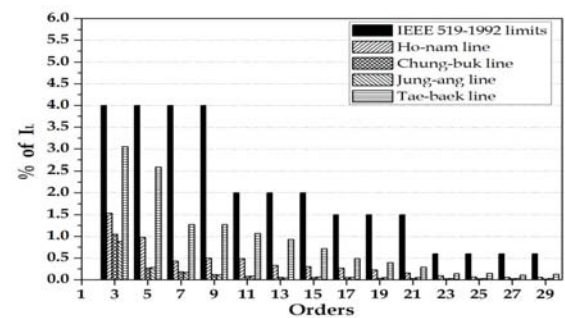


그림 4 타행 운전 모드에서의 고조파 전류의 차수별 평가

Fig. 4 Orders evaluation of the harmonic current during coasting state

표 4에서 전철 변전소 대비 공급 범위를 봤을 때 태백선 구간에서 가장 넓은 범위에 걸쳐 전력을 공급함에도 불구하고 석항 전철 변전소 용량이 30[MVA]에 불과하였다. 이는 낮은 부하율을 고려한다 하더라도 다른 운전 구간과 비교하였을 때 상당히 넓은 범위를 하나의 전철 변전소가 담당하는 것으로 이로 인한 계통 전원의 악화를 가져온 것으로 사료된다

다. 반면에 호남선 구간의 전철 변전소 용량은 다른 두 구간에 비해 최대 3배 이상으로 큼에도 불구하고 타행 운전 시 더 높은 고조파 전압이 발생하였다. 이는 호남선 구간에서 하나의 전철 변전소가 담당하는 공급 범위가 중앙선에 비해 더 넓었으며 또한 부하율에서도 알 수 있듯이 호남선 구간에서의 타 전기철도 차량의 운행이 더 많이 이루어지기 때문으로 사료된다. 이는 결과적으로 호남선의 계통의 전원이 안정적으로 유지되고 있음을 보여준다. 또한 일반선로인 충북선은 낮은 부하율에 비해 큰 설비 용량을 갖추고 있어 타행 운전 모드에서 네 구간 중 가장 낮은 고조파 결과를 보였다. 또한, 표 2에서 각 선로의 개통연도를 보면 호남선은 고속철도 선로로써 2004년도에 개통되었고 충북선은 일반 철도선으로 선로는 복선이며 2005년도에 개통되었다. 중앙선과 태백선은 산업선으로 각각 1987년과 1974년에 개통되었다. 따라서 선로시설 노후화면에서도 개통연도가 가장 오래된 태백선 구간의 급전 계통의 전원 상태가 좋지 못한 것으로 사료된다.

표 3 타행 운전 모드에서의 전압 THD 및 전류 TDD 결과
Table 3 Results of voltage THD and current TDD during coasting state

노 선	측정 시간	전압 THD [%]	전류 TDD [%]	IEEE 규제치	한전 규제치
호남선	10[분]	9.15	2.77	전류 TDD = 5 [%]	전압 THD = 3 [%]
	15[분]	8.98	2.50		
충북선	10[분]	2.04	1.22		
	15[분]	2.05	1.79		
중앙선	10[분]	5.78	1.04		
	15[분]	5.93	1.42		
태백선	10[분]	13.43	5.77		
	15[분]	12.46	4.75		

표 4 운전 구간 내에서의 전철 변전소
Table 4 Electric traction substation into operating sections

선 별	전철 변전소	전철 변전소 공급 범위 [km]	전철 변전소 설비 용량 [MVA]	평균 부하율 [%]
호남선	계룡, 익산, 백양사, 노안	평균 : 27 최대 : 33	평균 : 110 최대 : 120	71.25
충북선	충주, 증평	평균 : 29 최대 : 39	평균 : 80 최대 : 80	17
중앙선	원주, 봉양, 단양	평균 : 19 최대 : 29	평균 : 35 최대 : 66	24
태백선	석항, 증산	평균 : 30 최대 : 47	평균 : 30 최대 : 30.5	15.5

3.3 가속 운전 모드에서의 고조파 분석 결과

가속 운전 시에는 타행 운전과 달리 견인 전동기를 구동하기 위한 컨버터, 인버터 등의 주전력 변환 시스템의 의한 전력전자 소자의 고속 스위칭 동작이 최대가 된다. 이런 비선형 부하의 사용이 최대가 되기 때문에 고조파 발생에 의한 왜곡이 크게 발생하게 된다.

그림 5의 전압, 전류의 파형에서 보듯이 타행에 비해 고조

파 왜곡 중 특히, 전류의 고조파 왜곡이 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 차수별 고조파 전류 분석 결과 3고조파와 5고조파 이상의 고조파의 비율이 높게 발생한 것을 알 수 있다.

이는 톨팅 차량의 가속 운전에 따른 부하 증가로 인한 것으로 이 때 컨버터, 인버터 등의 전력변환 시스템의 동작으로 인해 고조파 전류가 크게 증가한 것으로 차수별 고조파 전류의 발생이 $4n\pm 1$ ($n=1,2,\dots,5$)로 21고조파까지 비교적 높은 비율로 발생하는 특징을 보였다. 또한 네 곳의 운전 구간 모두에서 가속 운전 시 고조파 발생 패턴이 유사하였다. 이 역시 타행과는 달리 차량의 견인 전동기를 구동하는 전력변환 시스템에서 가속을 위한 고속 스위칭 동작이 이루어지고 있음을 보여준다.

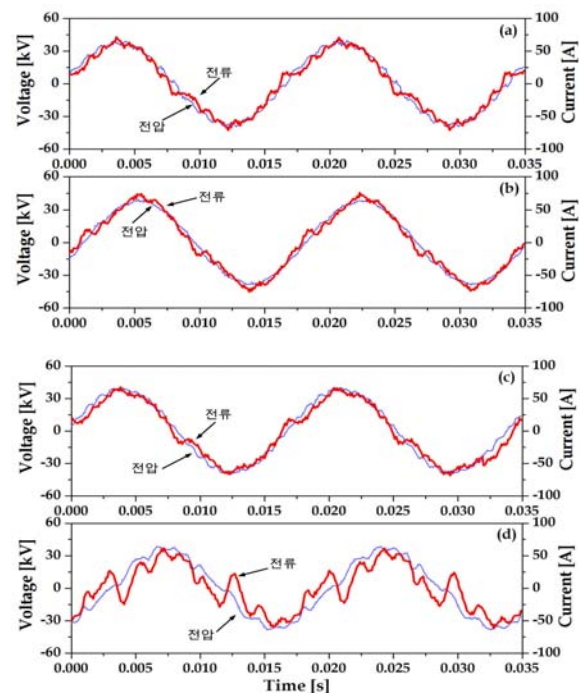


그림 5 가속 운전 모드에서의 전압-전류 파형
(a) 호남선 (b) 충북선 (c) 중앙선 (d) 태백선
Fig. 5 Waveform of the voltage and current during acceleration state
(a) Ho-nam (b) Chung-buk (c) Jung-ang (d) Tae-baek

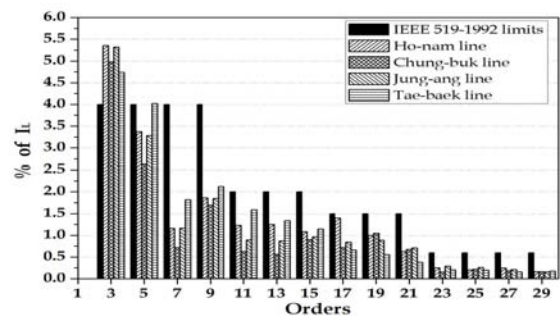


그림 6 가속 운전 모드에서의 고조파 전류의 차수별 평가
Fig. 6 Orders evaluation of the harmonic current during acceleration state

표 5 가속 운전 모드에서의 전압 THD 및 전류 TDD 결과
Table 5 Results of voltage THD and current TDD during acceleration state

노 선	측정 시간	전압 THD [%]	전류 TDD [%]	IEEE 규제치	한전 규제치
호남선	10[분]	6.39	6.38	전류 TDD = 5 [%]	전압 THD = 3 [%]
	15[분]	6.57	6.24		
충북선	10[분]	3.68	6.52		
	15[분]	3.66	6.38		
중앙선	10[분]	5.44	7.35		
	15[분]	4.01	6.46		
태백선	10[분]	8.33	7.65		
	15[분]	7.31	7.18		

표 5의 고조파 전압 THD와 전류 TDD의 평가 결과 충북선의 전압 THD를 제외한 세 운전 구간 모두 국내의 제한치를 상회하였다. 그러나 충북선과 호남선의 경우, 다른 두 구간과 비교해 볼 때 고조파 전류가 낮게 발생하였다. 이는 호남선의 경우, 전기철도 차량의 운행이 빈번함에도 불구하고 계통의 전원이 타 구간에 비해 안정됨을 보여준다. 반면에 태백선 구간에서는 높은 고조파 전류가 발생하였으며 모두 제한치를 초과하는 값을 보여줬다. 특히, 타행 운전 모드에서와 마찬가지로 가속 운전 모드에서도 태백선 구간에서 열차 운행 시 가장 많은 고조파 전류와 전압이 발생되었다. 한 가지 특이한 점은 높은 고조파 전류 발생에도 불구하고 전압 THD는 타행 운전 때에 비해 낮은 값을 나타냈다. 이는 가속 운전모드에서는 철도급전계통에 의한 영향보다 톨팅차량 자체에 의한 영향이 더 크기 때문으로 사료된다.

3.4 회생 제동 운전 모드에서의 고조파 분석 결과

톨팅열차는 제동 시 회생 제동을 비롯한 디스크 제동 등의 전기·기계적인 제동을 같이 병행하여 차량의 속도를 감속하고 정차한다. 회생 제동 시에는 건인 전동기를 발전기로써 동작시키는 전력변환 시스템의 제어 동작이 이루어지며 이때 생긴 전력은 계통에 역송되어 인근의 타 전기철도 차량에서 소비하거나 급전계통에서 소비하게 된다.

회생 제동 운전 시에는 가속 운전 때와 마찬가지로 전력변환 스위치의 고속 동작이 이루어지기 때문에 가속운전 시와 비슷한 패턴의 고조파 전류를 발생시키는 것을 그림 8의 고조파 전류의 차수별 평가 그래프를 통해 확인할 수 있다.

회생 제동 운전 시간은 전체 열차 운행 시간에서 가장 적은 부분을 차지한다. 그러나 짧은 운전 시간 비율에도 불구하고 톨팅 차량의 최대 부하 전류 측면에서 보면 매우 큰 고조파 전류가 발생하는 것을 표 6을 통해 확인할 수 있다. 특히, 이런 고조파 분석 결과는 중앙선과 태백선 구간에서 보다 크게 나왔으며 태백선 구간에서 전류 TDD의 10분 측정값이 8.60[%]로 가장 높았다. 이는 가속 보다 고조파 전류의 발생이 더 큰 회생 제동 운전이 계통의 전원 상태가 가장 좋지 못한 태백선 구간에서 타 운전 구간에 비해 더 많은 시간 비율을 가지고 운행하였기 때문으로 사료된다.

따라서 톨팅열차가 가속 및 회생 제동으로 운행 시 특정 차수에서의 고조파 저감을 위해서는 인버터를 사용해서 능동적으로 고조파를 억제하는 능동필터와 같은 고조파 저감 장치가 필요할 것으로 사료된다.

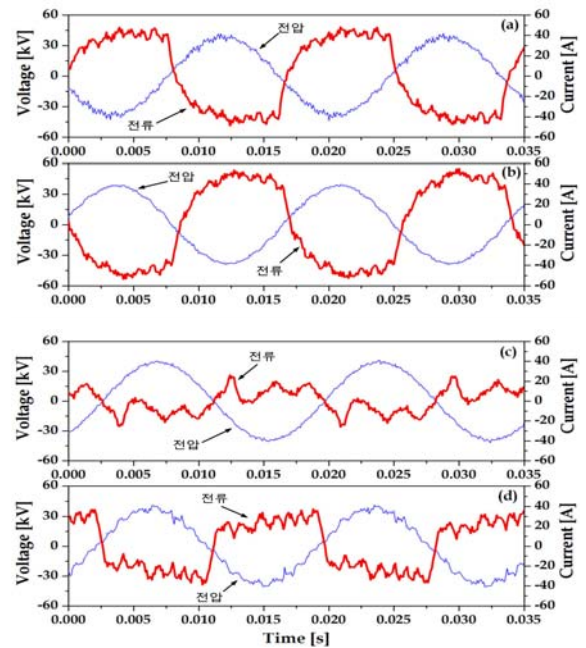


그림 7 회생 제동 운전 모드에서의 전압-전류 파형
 (a) 호남선 (b) 충북선 (c) 중앙선 (d) 태백선

Fig. 7 Waveform of the voltage and current during regenerative braking state
 (a) Ho-nam (b) Chung-buk (c) Jung-ang (d) Tae-baek

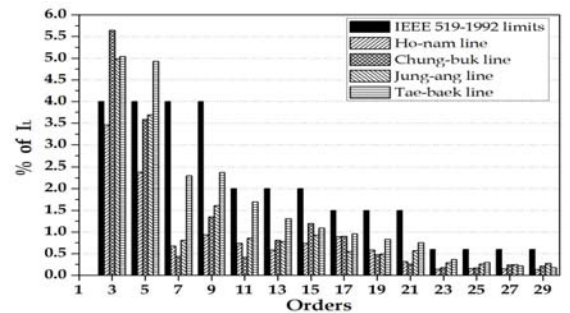


그림 8 회생 제동 운전 모드에서의 고조파 전류의 차수별 평가
Fig. 8 Orders evaluation of the harmonic current during regenerative braking state

표 6 회생 제동 운전 시 전압 THD 및 전류 TDD 결과
Table 6 Results of voltage THD and current TDD during regenerative braking state

노 선	측정 시간	전압 THD [%]	전류 TDD [%]	IEEE 규제치	한전 규제치
호남선	10[분]	5.91	4.41	전류 TDD = 5 [%]	전압 THD = 3 [%]
	15[분]	5.77	3.84		
충북선	10[분]	5.39	2.78		
	15[분]	7.19	2.88		
중앙선	10[분]	4.66	6.95		
	15[분]	4.73	6.88		
태백선	10[분]	8.90	8.60		
	15[분]	9.76	8.07		

4. 결 론

본 논문에서는 톨팅열차에서 발생하는 고조파를 직접 계측하여 차량에서 발생하는 고조파가 철도급전계통에 미치는 영향뿐만 아니라 톨팅열차의 주회로 시스템의 상태를 평가하고 진단하기 위한 운전 모드에 따른 고조파 분석을 하였다.

고조파 분석 결과, 태백선에서의 철도급전계통전원의 상태가 가장 좋지 못한 것으로 나타났으며 이로 인해 톨팅열차 운행에 따른 고조파 전류에 의한 고조파 왜곡이 가장 크게 발생하였다. 또한, 회생 제동 시에는 가속에 비해 낮은 전류를 소비함에도 불구하고 더 높은 전류 TDD 값 결과가 나와 회생 전력에 의한 타 전기철도차량과 계통에 영향을 미치는 것을 고려할 때 이러한 고조파 왜곡에 의한 악영향이 발생할 수 있다.

끝으로 고조파 분석 결과인 전압 THD와 전류 TDD 값은 실제 톨팅열차에서 운행 중 발생한 고조파에 대한 것이므로 톨팅열차 운행 중 발생하는 고조파에 대한 지표로 활용하여 열차의 상태 진단에 이용할 수 있을 것으로 여겨진다. 이는 톨팅열차의 운전 모드에 따라 달라지는 고조파 특성을 고려했기 때문에 가능하다. 이를 통해 분석 결과를 초과하는 경우에는 전력변환장치의 이상 유무에 대한 평가 지표로 활용이 가능하고 계속 진행되고 있는 톨팅열차의 안정화 연구와 전력변환 시스템 개선에 많은 도움을 줄 것으로 사료된다. 또한 이러한 분석 결과는 계통의 상태를 반영하였기 때문에 고조파 지표로서의 활용성이 더욱 높을 것으로 사료된다

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원 미래철도기술개발사업 중 한국철도기술연구원이 주관하는 “한국형 톨팅열차 신뢰성 평가 및 운용기술개발” 연구단에서 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 한국철도기술연구원, “톨팅시스템 실용기술개발 최종 연구보고서”, 2007. 7.
- [2] 진성은, 김경철, 이주홍, 전영수, “시간에 따라 변하는 고속철 부하의 고조파 측정 및 평가”, 한국조명·전기설비학회 논문지, 제20권, 제7호, pp. 29-37, 2006. 8.
- [3] Han-Min Lee, Chang-Mu Lee, Gil-Soo Jang, Sae-Hyuk Kwon, “Harmonic Analysis Model based on PSCAD/EMTDC”, KIEE International Transactions on PE, Vol. 4-A, No. 3, pp. 115-121, September. 2004.
- [4] 1760 PQ Analyzer, “User Manual”, Fluke Co., 2006.
- [5] 한국철도공사 전기기술단, “전기업무자료(14호)”, 2007.
- [6] 한국철도공사 전기기술단, “전기업무자료(15호)”, 2008.
- [7] 한국전력공사, “전기 공급 약관”, 한국전력공사, 1999.
- [8] IEEE Std. 519-1992, “IEEE Recommended Practices and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power System”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993.
- [9] 한국 전기철도 기술 주식회사, “전기철도 운행구간 전력 품질 안정성 검토 및 분석연구 제2회 세미나”, 2007. 7.

저 자 소 개



강 철 (姜 鐵)

1980년 3월 11일생, 2007년 숭실대 전기공학부 졸업, 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사).

Tel : 02-817-7966, Fax : 02-817-0780

E-mail : mateknine@naver.com



임 재 찬 (林 栽 贊)

1980년 8월 20일생, 2004년 숭실대 전기공학부 졸업, 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사).

Tel : 02-817-7966, Fax : 02-817-0780

E-mail : sqrt1003@naver.com



허 재 선 (許 宰 善)

1985년 1월 23일생, 2009년 숭실대 전기공학부 졸업, 2009년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 02-817-7966, Fax : 02-817-0780

E-mail : myppuma@naver.com



김 재 철 (金 載 哲)

1955년 7월 22일생, 1979년 숭실대 전기공학과 졸업, 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1988년~현재 숭실대 전기공학과 교수.

Tel : 02-817-7966, Fax : 02-817-0780

E-mail : jckim@ssu.ac.kr



이 수 길 (李 壽 吉)

1971년 3월 12일생, 1995년 숭실대 전기공학부 졸업, 1997년 동대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국철도기술연구원 신소재톨팅열차시스템 선임연구원, 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 031-460-5678, Fax : 031-460-5699

E-mail : sglee@krri.re.kr



한 성 호 (韓 成 浩)

1966년 6월 1일생, 1991년 숭실대 전기공학부 졸업, 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국철도기술연구원 신소재톨팅열차시스템 연구단장.

Tel : 031-460-5660, Fax : 031-460-5699

E-mail : shhan@krri.re.kr