

틸팅열차 운행 중 고조파 측정 및 분석에 관한 연구

(A Study of Harmonic Measurement and Analysis during Tilting Train eXpress Operation)

강철 · 임재찬 · 허재선 · 김재철 · 이수길* · 한성호* · 이은규**

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

송실대학교 · *한국철도기술연구원 · **우진산전

Abstract

Recently, TTX(Tilting Train eXpress), EMU(Electric Multiple Unit) has operated test. Presently, electric problems(harmonic, voltage variation etc) of TTX are studying briskly. Henceforth, electrical harmonic study of TTX will operate on the rail actually is needed.

In this paper, we detected electrical harmonic of operating TTX. In addition to we analyzed and estimated electrical harmonic regarding TTX's coasting, acceleration and braking state.

1. 서론

최근 친환경적인 저탄소 녹색성장이라는 국가적인 정책과 더불어 환경에 대한 국민적인 관심이 나날이 증가하고 있다.

전기철도는 기존의 디젤전동차와 달리 전력을 동력원으로 사용하기 때문에 친환경적이며 효율적인 교통수단으로서 자리매김 하고 있다.

경제 발전에 따라 늘어나는 지역 간의 활발한 교류는 더 빠르고 편한 교통수단을 필요로 하게 되었고 그 결과 KTX와 같은 초고속열차가 등장하게 되었다[1]. 그러나 아직도 전국적으로 많은 선로에서 새마을호와 같은 준고속 전동차가 운행되고 있다. 하지만 우리나라는 산악지역이 전체 국토의 70%이상으로 전차 선로에 곡선부가 많아 준고속 전동차의 운행 속도에 한계가 있어왔다.

새롭게 개발된 한국형 틸팅열차는 이러한 우리나라의 지형을 고려하여 곡선부에서도 급격한 속도감속 없이 기존 열차 대비 약 20~30%의 속도향상을 기대할 수 있는 국내 기술로 개발된 최신의 준고속 전동차이다. 틸팅열차는 곡선부에서 열차 자체의 틸팅기능으로 곡선부 통과 시 자체를 기울여 중력가속도로 열차의 원심력을 상쇄시켜 열차가 감속 없이 곡선부를 통과할 수 있는 열차로써 최고운행속도도 과거 새마을호의 120km/h 보다 빠른 180km/h로써 속도향상을 통한 철도 수송력 증대와 국토균형 발전에 도모할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 또한 KTX와 같이 전용선로 등의 신

선 건설 없이 기존선에 투입하여 운행될 수 있기 때문에 막대한 건설비와 시간 소요 그리고 환경문제를 야기 시키지 않는다는 큰 장점이 있다.

전기 전동차는 견인 전동기를 구동시키기 위한 인버터와 컨버터의 사용이 빈번하기 때문에 고조파 발생, 전압변동 등의 전력품질 문제가 발생할 수 있다. 열차는 그 특성상 한 번의 사고가 큰 인명과 재산 피해를 낼 수 있기 때문에 틸팅열차 운행 중 전력품질 등 전기적인 사항 등을 계측하고 분석할 필요가 있겠다.

본 논문에서는 기존 새마을호와 같은 준고속 전동차를 대체할 것으로 예상되는 틸팅열차에 안정화를 향상시키기 위해 현재 실제 영업 선로에서 시험운전을 하고 있는 틸팅열차의 운행 중 발생하는 고조파를 계측하고 이를 분석하여 국내외 고조파 관련 규정을 근거로 이를 평가하였다.

2. 고조파 계측

2.1 고조파 계측 구간

2007년 6월부터 틸팅열차는 여러 구간에서 안정화를 위한 시험운전을 지속하고 있다. 실제 영업구간인 호남선, 충북선, 태백선, 중앙선 등에서 2009년 4월 현재 약 87,500km의 주행거리와 199회의 운행회차를 기록하는 등 지속적인 시험운전이 진행되고 있다.

본 논문에서 호남선 구간과 태백선 구간에서 직접

전기신호를 계측하여 고조파 분석을 하였다. 호남선 구간은 KTX 등 전기기관차의 이용 빈도가 높은 선로인 반면에 태백선 구간은 전기기관차의 운행 빈도가 호남선에 비해 상대적으로 낮은 구간이다. 향후 틸팅열차는 태백선과 같이 고속열차의 서비스가 제공되지 못하는 구간에 운행될 것으로 예상되므로 이 두 구간에서의 고조파의 비교·분석이 필요하겠다.

표 1은 고조파 비교 구간으로 선정한 호남선과 태백선에 대한 설명을 나타낸 표이다.

표 2. 고조파 계측 구간

Table 2. The sections of harmonic measurement[2]

선 별	운전 구간	운전 거리
호남선	대전~송정리 (왕복)	약 370[km]
태백선	고한~쌍릉	약 62[km]

그림 1은 호남선 구간에서 틸팅열차 운행 중 계측된 전압, 전류를 나타낸 그림이며 그림 2는 태백선 구간에서 계측된 전압, 전류를 나타낸 그림이다.

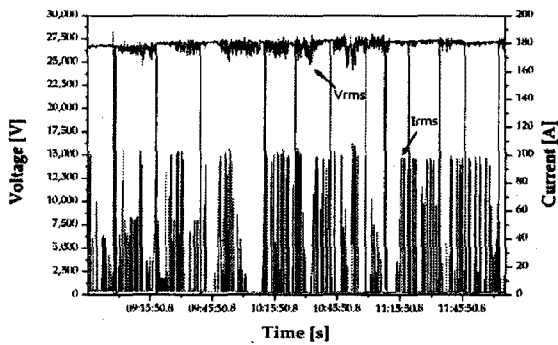


그림 1. 틸팅열차 호남선 운행 중 측정된 전압, 전류
Fig. 1. The measured voltage and current during TTX operation at Ho-Nam line

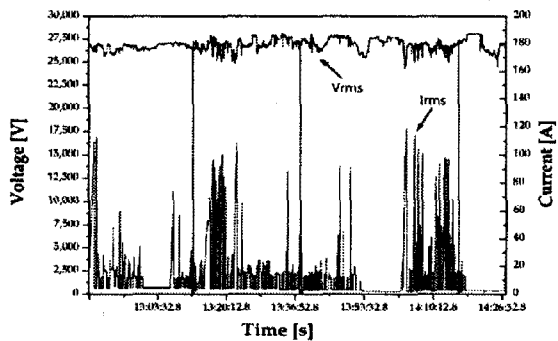


그림 2. 틸팅열차 태백선 운행 중 측정된 전압, 전류
Fig. 2. The measured voltage and current during TTX operation at Tae-baek line

2.2 고조파 계측 위치 및 측정 장비

고조파 계측을 위해 틸팅열차 운행 중 고조파 계측을 위해 호남선, 태백선 두 개의 운전 구간을 선정하고 고조파 계측에 필요한 장비를 설치하였다. 고조파 계측 점은 틸팅열차의 운전에 따른 고조파 발생을 측정할 수 있는 주회로 시스템 측에 설치하였다. 그림 3은 이러한 고조파 계측 위치를 나타낸다. 그림 3에서처럼 고조파 신호를 계측하기 위해 주변압기 1차측의 전압과 전압은 각각 차량 옥상에 설치된 PT와 로고스키 코일을 사용하였다. 그림 3과 같은 계측점에서는 열차가 가속, 타행, 제동에 따라 달라지는 부하 변동에 따라 컨버터, 인버터의 전력변환시스템에서 발생하는 고조파를 계측할 수 있다.

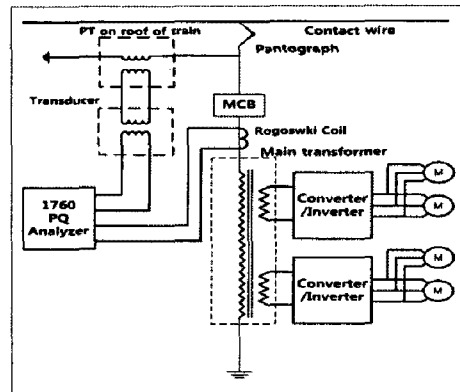


그림 3. 고조파 계측 위치

Fig. 3. The point of harmonic measurement

고조파 계측에 사용된 장비는 Fluke 社의 1760 PQ analyzer로 고조파를 포함한 전력품질 측정에 사용되는 전문 장비이다. 고조파는 0.2초 간격으로 설정하였으며 장비의 샘플링 주파수는 10.24[kHz]이다.

3. 고조파 분석 및 평가

3.1 고조파 분석 방법

틸팅열차를 비롯한 전기철도는 그림 1, 2와 같이 시간적, 공간적으로 부하변동이 극심하다. 때문에 일반적인 고조파 분석으로는 적절한 고조파 평가를 수행하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 틸팅열차의 운전 모드를 역률과 전류의 크기 그리고 계측 파형, 열차 운행 동안에 기록한 열차 운전 상태 등을 종합적으로 고려하여 각각 타행, 가속, 제동의 세 단계로 분류하여 고조파 분석을 하였다.

고조파 분석과 평가에서는 THD(Total harmonic distortion)과 TDD(Total demand distortion)을 사용하였다. 특히 전압은 THD로 분석과 평가를 하였지만 전류는 열차 특성상 부하변동이 심하여 기본파를 기준으로 왜형률을 계산하는 THD를 사용시 그 값이 매우 크게 나타남으로 열차의 운전 모드에 따른 고조파 평가에는 부적합하다. 따라서 최대부하전류를 기준으로 고조파를 평가하는 TDD로 고조파 전류를 분석하고 평가하였다. 아래 식(1)과 식(2)는 각각 전압 THD와 전류 TDD에 대한 고조파 계산을 나타낸다.

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_h^2}}{V_1} \times 100[\%] \quad (1)$$

$$I_{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_L} \times 100[\%] \quad (2)$$

여기서,

V_h : 제 h차 고조파 전압의 실효치

I_h : 제 h차 고조파 전류의 실효치

V_1 : 기본파 전압의 실효치

I_L : 최대부하전류의 실효치

고조파 분석 결과는 15분 평균하여 타행, 가속, 제동에 따라 각각 평가하였다.

3.2 고조파 평가

고조파 전압 THD와 전류 TDD는 15분 평균한 값으로 국내의 한전과 국외의 IEEE 519-1922의 규정을 근거로 평가하였다[3].

그림 4~6는 호남선에서의 운전 모드에 따른 전압, 전류의 고조파 파형이다. 본 논문에서는 호남선 구간에 대한 고조파 파형을 대표로 나타낸다. 그림 4~6에서 알 수 있듯이 탈팅열차 운전 모드에 따라 전압, 전류의 패턴이 변동이 나타났으며 특히 전류의 변화가 가장 심하다. 그 결과 고조파 또한 운전 모드에 따라 그 값이 달라진다.

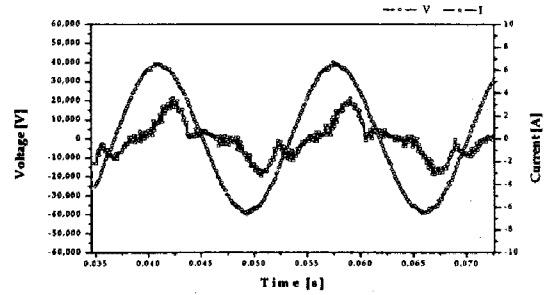


그림 4. 타행 운전 시 전압, 전류 (호남선)

Fig. 4. The voltage and current during coasting state (Ho-Nam line)

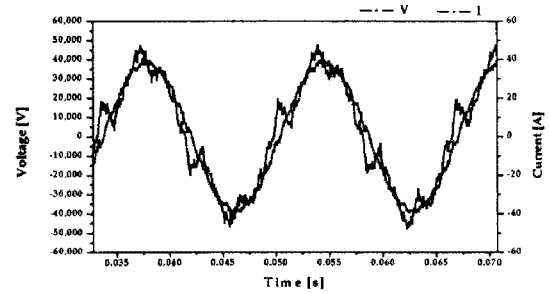


그림 5. 가속 운전 시 전압, 전류 (호남선)

Fig. 5. The voltage and current during acceleration state (Ho-Nam line)

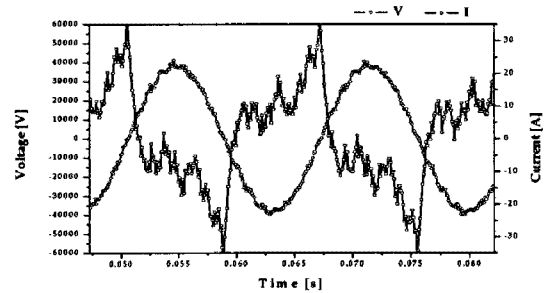


그림 6. 제동 운전 시 전압, 전류 (호남선)

Fig. 6. The voltage and current during braking state (Ho-Nam line)

그림 7과 8은 호남선과 태백선 구간에서 고조파가 가장 크게 나타나는 가속 운전 상태에서의 전류에 대한 차수별 고조파를 누적적으로 나타낸 그림이다.

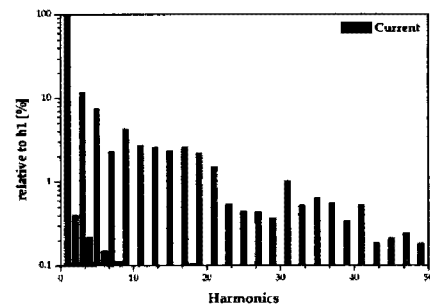


그림 7. 가속 운전 시 전류 누적 히스토그램 (호남선)

Fig. 7. The voltage cumulative during acceleration state (Ho-Nam line)

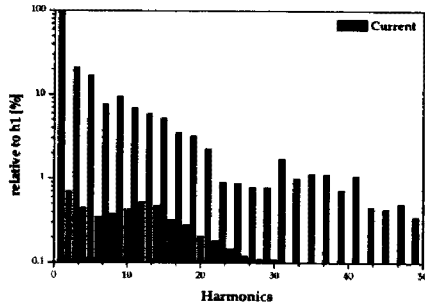


그림 8. 가속 운전 시 전류 누적 히스토그램 (태백선)
Fig. 8. The voltage cumulative during acceleration state (Tae-Ba-da line)

그림 7과 8에서 호남선과 태백선 구간에서 탈팅 열차가 가속 운전을 하는 동안 태백선 구간에서 더 많은 고조파가 섞여서 발생하는 것을 알 수 있다.

표 2는 탈팅열차 운행 중 발생한 고조파에 대한 전압 THD와 전류 TDD를 호남선 구간과 태백선 구간에 대해서 정리한 것이다. 고조파 왜형률의 적절성을 평가하기 위하여 한전과 IEEE 519-1992 규제치를 사용하였다.

표 2. 고조파 분석 결과

Table 3. The result of harmonic analysis

시험구간	V_THD 15분평균 [%]	한전 V_THD 규제치	LTDD 15분평균	IEEE 519-1992 LTDD 규제치
		(66kV이하)		(120~69,000V)
호남선	타행	5.14	1.88	5 [%]
	가속	5.32	4.86	
	제동	5.77	2.69	
태백선	타행	8.69	3.00	5 [%]
	가속	7.11	6.99	
	제동	9.76	8.07	

표 2를 통해 탈팅열차의 운전 모드 중 가속 시 가장 많은 고조파를 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 가속 시 견인 전동기에 전력을 공급하는 인버터와 컨버터의 전력전자 소자의 스위칭이 가장 최고조가 되며 전력 또한 최대로 공급되게 된다. 그 결과 고조파의 왜곡이 가장 많이 발생하는 것으로 사료된다. 또한 같은 가속 상태에서도 태백선과 호남선 구간에서의 전류 TDD의 값이 다르게 나왔다. 호남선 구간에서의 가속 시 전류 TDD 값은 IEEE 519-1992의 규제치를 초과하지 않았지만 태백선 구간에서는 가속뿐만 아니라 제동 시에도 전류 TDD 값이 규제치를 초과하여 발생하였으며 전압 THD도 호남선 구간에서보다 더 높게 나타났다. 이는 태백선 구간에서의 전력 공급 가선의 상태가

좋지 못함을 의미하며 이는 결과적으로 탈팅열차 주회로 시스템에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 탈팅열차 운행 중 발생하는 고조파를 계측하고 분석하기 위해서 호남선과 태백선 두 개의 시험 구간을 선정하여 열차의 운행 중 고조파를 직접 계측하여 분석하였다. 시간적, 공간적으로 부하의 변동이 심한 전기기관차의 특성을 고려 탈팅열차 운행 중 계측된 전기신호를 각각 타행, 가속, 제동의 세 부분으로 분류하여 해당 모드에 따라 고조파 분석과 평가를 하였다.

고조파 평가는 한전과 IEEE 519-1992의 규정을 근거로 평가하였으며 전류 고조파 왜형률은 열차의 운전 특성을 고려 TDD로 계산하여 평가하였으며 전압은 THD로 계산하여 한전의 규제치와 비교하였다.

탈팅열차의 운전 상태에 따른 고조파 분석 및 평가 결과 호남선에 비해 태백선 구간에서 열차 운행 중 더 많은 고조파가 각각의 운전 모드 모두에서 높게 나타났으며 특히 가속과 제동 시 전류 TDD와 전압 THD가 한전과 IEEE 519-1992 규제치를 크게 초과하는 것으로 나타났다. 이것은 시험구간의 가선의 상태가 좋지 못한 이유가 가장 크며 그에 따른 전력전자 소자의 고속 스위칭이 주원인이라고 사료된다.

따라서 시험 구간 및 운전 모드에 따른 고조파 분석의 더 많은 연구가 진행된다면 탈팅열차의 운행 중 고조파가 열차의 미치는 영향과 발생하는 고조파의 운전 모드별 특징을 추출하여 탈팅열차의 운행 중 상태를 진단하는데 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 지원에 의하여
한국철도기술연구원 주관으로 수행된 과제임

참고 문헌

- [1] 임재천, "탈팅열차 운행중 열차 진단을 위한 전기신호 계측 연구", 한국조명전기설비학회 2008년 추계학술대회 논문집, pp.49~52, 2008
- [2] 한국철도공사 전기기술단, "전기업무자료(15호)", 한국철도공사 전기기술단, 11-151000-000058-10, 2008
- [3] IEEE Std. 519-1992, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power System", 1993