

전기철도에서의 고조파 발생과 계통응답특성(II) - 고조파 측정분석을 중심으로 -

Harmonic Generation and System Response Characteristics in Electrified Railway(II) - Focused on Measurement and Analysis -

오광해¹ · 이한민²

Kwang-Hae Oh · Han-Min Lee

Abstract

In reference to this study, Part I showed how the system respond to the harmonics originated from electric locomotives. That is, the system response to the harmonics was derived by computational algorithm with numerical formulas in theoretical aspects. However, Real catenary system has complex configuration of conductors and it is an important point that if we can consider the circuit element of catenary conductors as an uniformly distributed RLC element. Moreover, harmonic characteristics in electric locomotive depend on its operational modes. From these point of view, measurements of harmonics are performed for real railway power supply systems under the various operational modes, and spectrum and distortion analyses in measurement data are described.

Keywords : Electrified Railway System, Harmonic Generation, Harmonic Analysis

1. 서론

본 논문과 관련하여, I편에서는 전기철도의 표준 AT급 전시스템의 고조파 응답특성을 이론적으로 규명하였다. 즉 경부고속철도 시험선구의 차량에서 발생된 고조파가 전철 변전소와 한전계통으로 유입되는 과정에서 시스템의 병렬 공진에 의해 고조파 응답특성이 어떻게 나타나는지를 수식적인 알고리즘 체계로써 검토하였다. 그러나 실제 전기철도의 전차선로등은 복잡한 도체군으로 구성되어 전력공급계통의 회로요소를 RLC의 이론적 분포정수회로 보기에 불확실성이 다수 내포되어 있고, 철도차량의 고조파 발생특성은 운전모드에 따라 그 특성이 다양하게 변화하므로 이에 대한 실측과 정량적 분석이 요구된다. 따라서 II편에서는 차량의 운전모드, 전차선로의 구성, 차량의 위치등

운전상황에 따른 고조파의 발생과 전파특성을 실측하고 이를 분석하는데 주안점을 두었다.

2. 고조파 측정분석

고속철도 시험선구의 고조파 발생현황을 현장시험과 측정데이터 분석을 통해 검토하였다. 현장시험은 고속철도 KTX 차량과 시험선구 전력공급 변전소(신청주)에서 수행되었다.

2.1 KTX 차량의 전력특성 측정

고속철도 KTX 차량의 전력소비 특성과 고조파 발생특성을 위한 시험이 차상(車上)에서 실시되었다. 전압은 판토 그래프와 레일 사이의 전위차로, 전류는 3 Motor Block에 공급하는 회로의 CT를 통해 측정하였다. 전체 6 Motor Block을 가동하는 경우에는 측정 전류값의 2배를 전체 부하전류로 간주하였다.

1 산업자원부 기술표준원 공업연구원

2 한국철도기술연구원 전력계통그룹, 주임연구원

2.1.1 KTX 차량의 전력부하 소비특성

고속철도 KTX 차량의 운전속도에 따른 전력소비 특성 시험의 상세한 결과를 그림 1에 나타내었다. 그림 1의 측정 결과에서 차량속도 100km/h 근처에서 로컬 피크 부하가 걸리고, 전체 피크 부하는 200km/h 속도에서 나타난다. 참고로, 차량 부하역률은 전체 속도 구간에서 85% 이상을 기록했으며 100km/h 전후에서 특성의 변곡이 나타나는데 이는 PFC(Power Factor Compensator)의 추가 투입에 따른 역률 변화이다.

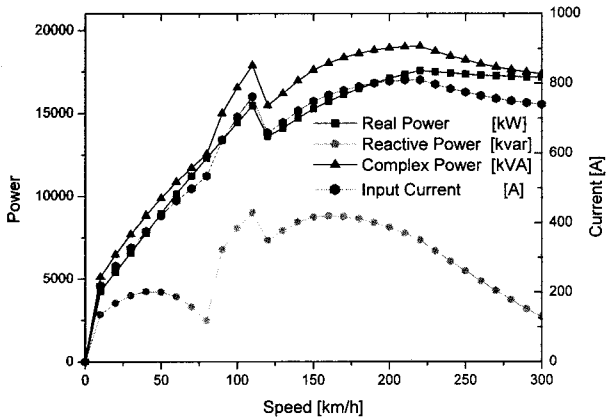


그림 1. KTX 차량의 전력 소비 특성

2.1.2 고속철도차량(KTX)의 고조파특성

(1) 시험조건

고속철도차량(KTX)에서 발생하는 고조파를 정밀하게 측정하기 위해 동력차를 시험선구 신청주변전소 앞의 사구간에 정차하고 Full 부하를 걸어서 고조파 발생특성을 기록하였다. 전력을 사구간에 정차한 KTX에 공급하고 인접한 전차선로를 차단한 상태이므로 급전회로에서 전차선로의 선로임피던스 및 정전용량 등이 제외되고 한국전력계통-송전선로-주변압기(T상)-단권변압기-KTX로 회로가 구성되었다. 시험조건은 다음의 표 1과 같이 KTX Motor Block의 부하크기, PFC(Power Factor Compensator)의 투입상태를 서로 달리한 조합인 B1~B4으로 설정하였다.

(2) 차량발생 고조파 측정결과

B1~B4까지의 시험 조건에서 실측된 전압전류 파형을 그림 2~그림 5에 나타내었다. 그림에서 PFC가 off된 경우의 전류파형(그림 4)은 특히 저차 고조파가 많이 포함되어 있음을 알 수 있다. 그림 2~그림 5의 전압전류 파형 데이터를 FFT 분석을 통해 각 조파별 전압 전류값으로 환산한 결과, PFC가 투입되지 않은 시험(그림 4)에서는 41조파에서 직렬 공진 현상이 관찰되었으나 PFC가 투입된 나머지 모든 시험에서는 50조파까지 직렬 공진이나 병렬 공진 현상은 관측되지 않았다. 이는 전차선로의 정전용량이 포함되지 않은 시험조건 때문이라고 판단된다.

표 1. KTX 차량 고조파측정을 위한 시험조건

시험 번호	시험조건(KTX 차량)	시험조건(전력공급)
B1	부하: 6MB(full), PFC: On (2/MB), ISW : Closed	- 차량위치 : 사구간 - 주변압기 단독운전 - 전차선로 사구간에만 전력공급, 나머지 구간은 전력차단
B2	부하: 6MB(Medium), PFC: On (1/MB), ISW : Closed	
B3	부하: 6MB(full), PFC: Off, ISW : Closed	
B4	부하: 3MB(Full), PFC: On (2/MB), ISW : Open	

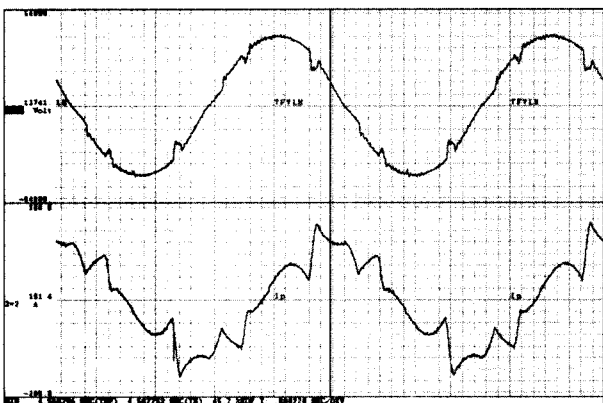


그림 2. 전압전류파형(시험 B1)

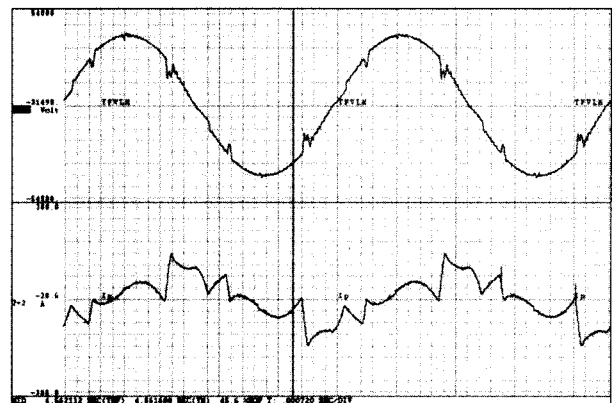


그림 3. 전압전류파형(시험 B2)

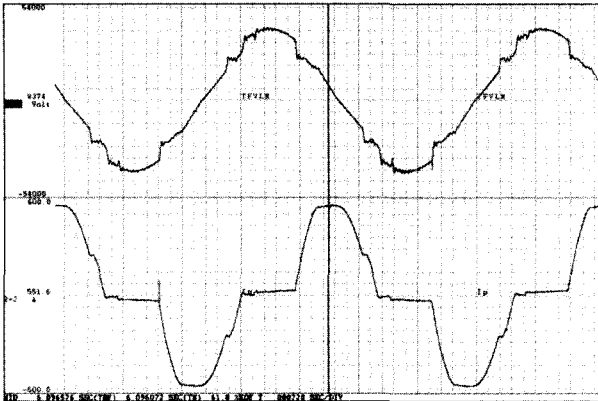


그림 4. 전압전류파형(시험 B3)

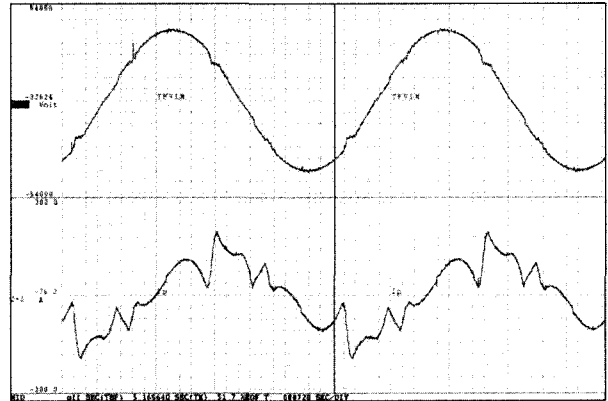


그림 5. 전압전류파형(시험 B4)

3. 시스템 고조파 응답특성 측정분석

전차선로의 커패시티브 리액턴스와 전원계통의 인덕티브 리액턴스와의 병렬공진으로 인한 고조파 응답특성을 고조파 전류확대율 지표로서 정의하고 이를 실측분석하였다. 즉, 주파수별 고조파 응답특성 지수 $m(k)$ 를 식 (1)과 같이 차량 발생 고조파 전류에 대한 변전소 유입 고조파 전류의 비로 정의하고 각각을 실측후 그 확대 배율을 계산하였다.

$$m(k) = \frac{I_{ss}(k)}{I_{panto}(k)} \quad (1)$$

여기서, $m(k)$: k 차 조파에 대한 급전시스템의 고조파 응답특성

$I_{panto}(k)$: 철도차량에서 발생한 k 차 고조파 전류의 실효치 [A]

$I_{ss}(k)$: 변전소로 유입되는 k 차 고조파 전류의 실효치 [A]

고속철도 KTX 차량의 위치를 변전소 앞(KPR=129km)과 전차선로 말단(KPR=108)으로 이동, 전차선로의 전 구간을 가압/단전, 또한 건인 부하를 변화하면서 측정된 고조파 응

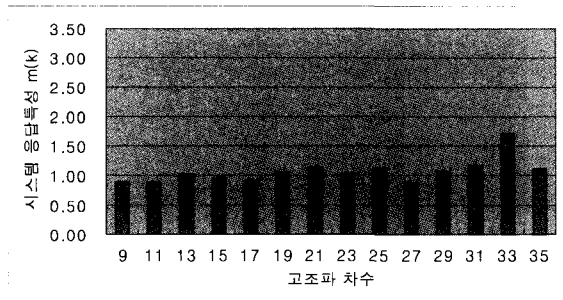


그림 6. 시스템 고조파응답특성 실측결과 (KPR=129km., 6MB(full), 전차선로=차단)

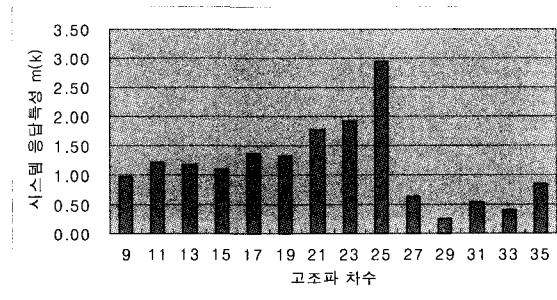


그림 7. 시스템 고조파응답특성 실측결과 (KPR=129km, 6MB(full), 전차선로=가압)

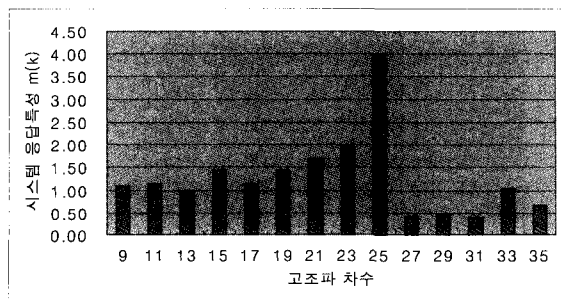


그림 8. 시스템 고조파응답특성 실측결과 (KPR=129km, 3MB(full), 전차선로=가압)

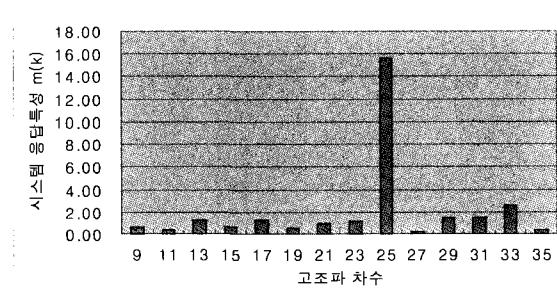


그림 9. 시스템 고조파응답특성 실측결과 (KPR=108km, 6MB(full), 전차선로=가압)

답특성을 그림 6~그림 9에 보인다.

전차선로가 차단된 경우(그림 6)에서는 고조파 전류확대 현상이 그리 현저하지 않다. 그러나 전차선로의 전 구간이 가압된 경우에는 고조파 공진 현상이 25조파 근처에서 나타나고 있으며 그 확대율은 차량이 변전소 부근에 위치한 경우(3~4배)보다 전차선로 말단에 위치한 경우(15배)가 더 큰 것으로 나타났다.

4. 운전모드에 따른 고조파 전압/전류 측정 분석

경부고속철도 시험선구 급전시스템에 고속철도차량(KTX) 운행시 한국전력에서 규제하고 있는 고조파 제한을 만족하는

지 여부를 조사하기 위해 차량 1편성의 운행시험을 실시하고 철도변전소의 154kV 모선측에서 고조파를 측정하였다.

차량의 운행 패턴에 따라, 즉 가속, 최고 속도, 회생 제동의 3가지 운전상태에서의 고조파 전압과 고조파 전류 스펙트럼 측정결과를 그림 10~그림 12에 보인다. 또한 운행시간에 따른 전압왜형률(THD)을 그림 13에 나타내어 차량운전모드별 THD 변화를 살펴볼 수 있도록 하였다.

그림 10~그림 12의 측정결과를 살펴보면, 가속모드(역행)에는 3~5, 15~19조파가 현저하게 큰 데 비해 회생모드에서는 3~21조파 전체에 걸쳐 큰 값을 기록하였다. 또한 차량이 최고속도로 운행할 때보다는 가속할 때와 회생할 때, 고조파가 크게 일어남을 알 수가 있다. 이런 이유로 차량운

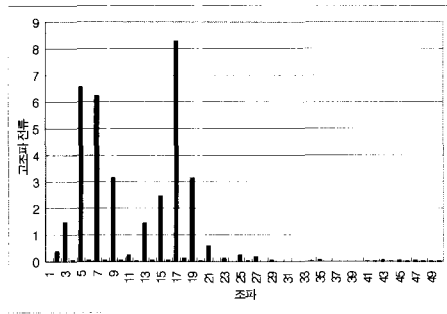
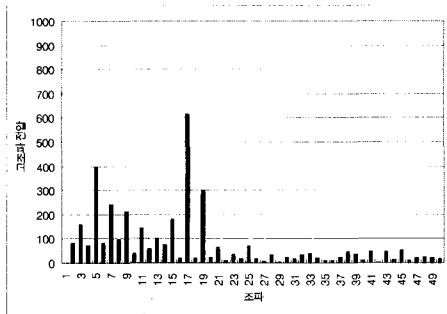


그림 10. 고조파 전압/전류 스펙트럼(가속운전)

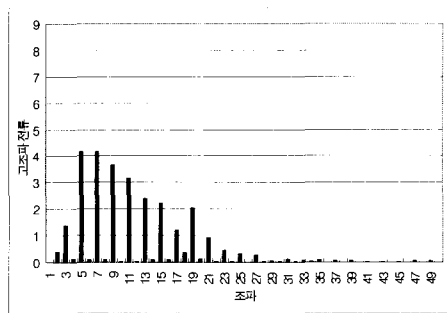
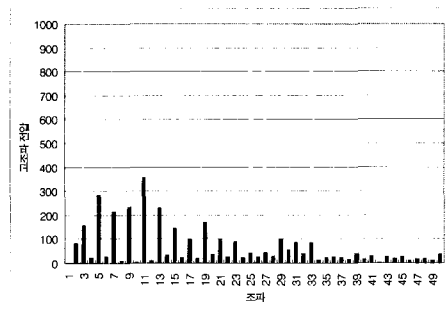


그림 11. 고조파 전압/전류 스펙트럼(최고속도)

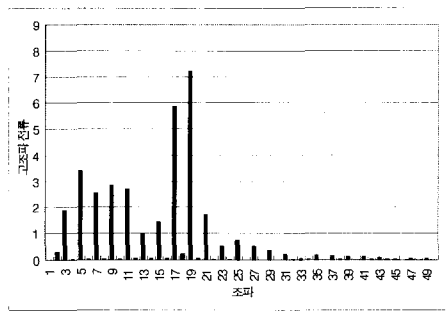
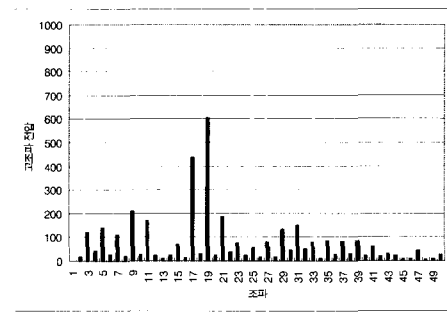


그림 12. 고조파 전압/전류 스펙트럼(회생운전)

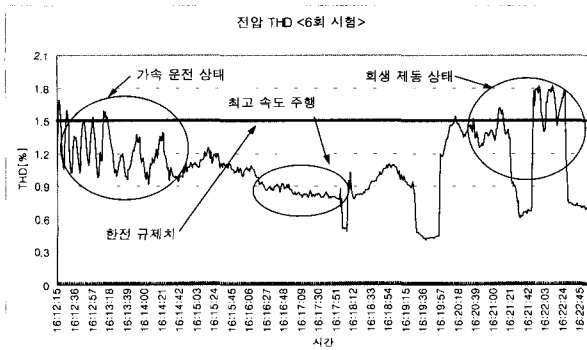


그림 13. KTX 주행상태에 따른 전압 왜형률

전모드별의 전압왜형률 측정결과에서도 최고속도 운행 시 보다 가속운전과 회생운전시의 전압왜형률 값이 크게 나타나게 되는 것을 그림 13에서 관찰할 수 있다.

5. 결 론

전기철도에서의 계통 고조파응답특성을 예측계산하고 고조파 발생 및 유입에 대한 현장실측을 수행한 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 계통 고조파응답특성을 예측계산한 결과, 전차선로가 신청주SS~용정SP인 경우의 공진주파수(전류 확대율)는 33조파(22배), 35조파(10배) 전후인 것으로 예측되었다. 또한 전차선로가 신청주SS~용정SP~용와까지 11.8km 연장된 경우의 공진주파수(전류 확대율)는 25조파(10배) 부근으로 계산되었다. 이는 전차선로의 연장으로 인해 정전용량이 증대되어 고조파 공진이 저차 조파 쪽으로 이동하고 고조파 전류 확대율의 최고치가 저감되는 효

과로 국내외의 연구결과 및 현장실측 결과와도 잘 일치하고 있다.

- (2) 계통 고조파응답특성을 실측분석한 결과, 전차선로가 차단된 경우에는 고조파 전류 확대 현상이 그리 현저하지 않다. 그러나 전차선로의 전 구간이 가압된 경우에는 고조파 공진 현상이 25조파 근처에서 나타나고 있으며 그 확대율은 차량이 변전소 부근에 위치한 경우(3~4배) 보다 전차선로 말단에 위치한 경우(15배)가 더 큰 것으로 나타났다.
- (3) 시험선로의 전차선로를 차단하고 차량에서 전원계통을 들여다본 고조파 임피던스 계산결과, 고조파 병렬공진은 고려대상 주파수영역 밖에서 발생되었다.
- (4) 차량 1편성의 운행조건에서도 전압왜형률은 최대 1.8%로 규제치 1.5%를 초과하였다.
- (5) 차량의 운전모드 중, 가속(역행)운전 상태와 회생제동 상태에서 고조파가 크게 발생되었다.

후 기

본 연구는 한국고속철도건설공단에서 시행한 연구개발사업[1] 결과의 일부임.

참 고 문 헌

1. 경부고속철도 서울-대구구간 전력품질 안정화대책 연구(I), 고속철도건설공단, 2002.
2. Yoshifumi Mochinaga, "Higher Harmonics Resonance on AT Feeding Circuit and Countermeasures to Suppress it", T.IEE Japan, Vol.114-D, No.10, 1994.