

**고속철도 급전계통 고조파 저감설비 설치에 따른 저감효과 검토**

이장무\*, 한문섭\*, 박현준\*, 신창기\*, 이인재\*\*  
 \*한국철도기술연구원, \*\*한국철도시설공단

**Investigation of Reduction Effect according to installation of Harmonic Diminution Equipments at Feeding System of High Speed Railway**

Lee Changmu, Han Moonseub, Park Hyunjun, Shin Changgi, Lee Injae  
 \*Korea Railroad Research Institute, \*\*Korea Rail Network Authority

**Abstract** - 경부고속철도 급전구간을 운행하는 KTX 고속열차는 사이리스터 위상제어방식을 사용하는 대용량의 집중부하로 고속열차가 운행될 때 차량에서 발생하는 많은 고조파 전류가 철도급전계통으로 유입된다. 이러한 고조파 전류가 한국전력계통으로 유입되면 한전계통의 전압왜형을 증가시켜 전력품질을 저하시키게 된다. 이에 따라 모든 고속철도 변전소에는 고조파 전류 저감을 위한 필터설비가 설치되어 있다. 필터설비 설치에 따라 고속철도 급전계통으로 유입되는 고조파 전류와 전압왜형을 측정결과로 고조파 저감효과를 보인다.

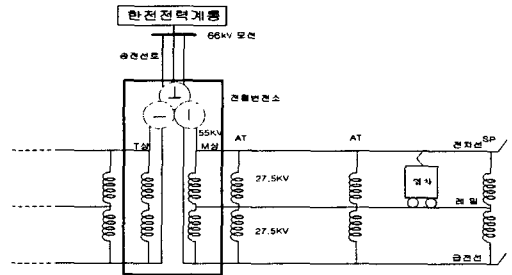


그림 1. AT 급전계통

**1. 서론**

2004년 4월 1일로 고속철도가 개통되어 경부고속철도 서울-대구구간, 경부선 대구-부산구간 및 호남선 서대전-목포구간에 고속열차가 운행되고 있다. 이 구간을 운행하는 KTX고속열차는 사이리스터 위상제어방식을 사용하는 대용량의 집중부하로 차량이 운행할 때 많은 고조파를 발생시킨다. 차량으로부터 발생한 고조파는 전차선로와 철도 변전계통을 통하여 한국전력계통으로 유입되며 한국전력계통의 전압왜형을 증가시켜 전력품질을 저하시키게 된다. 이러한 이유로 한국전력은 모든 수용가에 대하여 한전인출점(PCC)에서 전압왜형을 1.5% 이하를 만족시키도록 규정하고 있으며 고속철도 급전계통에서 한전계통으로 유입되는 고조파를 저감시키기 위하여 고속철도 변전소에는 능동형 고조파 저감설비(액티브 필터)가 설치되어 있다.

본 논문에서는 경부고속철도를 운행하는 고속열차(KTX)의 고조파 발생패턴, KTX차량이 운행할 때 고속철도 급전계통으로 유입되는 고조파로 인한 154kV 철도의 전압왜형을 예측, 고조파 저감설비의 저감효과 및 설치 후의 전압왜형을 측정결과를 비교검토하고자 한다.

**2. 본론**

**2.1 고속철도급전계통의 고조파 예측**

KTX 고속열차가 경부고속철도 구간에서 운행될 때 해당 구간을 급전하는 고속철도변전소로 유입되는 고조파와 변전소 수전측(154kV측)의 전압왜형을 예측하고 한국전력의 전압왜형용 기준과 비교하여 고조파 저감설비 필요성과 고조파 전류 저감용량을 검토하고자 한다.

**2.1.1 고조파 예측모델**

AT급전계통은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 그림 1의 회로모델에서 고조파 전류원인 전기차량은 양쪽 단권변압기의 2차측(T-R)에 전차선과 레일을 통하여 접속되어있고 단권변압기의 1차측(T-F)은 급전선을 통하여 연결되어 있다.

더구나 전차선로의 3가지 도체군(T,R,F)의 상호간에는 정전용량에 의한 어드미턴스가 존재하므로 4단자 정수로 표현하기가 곤란하다.

따라서 급전선로의 자기임피던스, 상호임피던스와 어드미턴스를 고려하여 전철급전시스템의 정밀한 고조파 해석을 위해 6단자 정수를 정의하여, 그림 2와 같이 AT급전회로의 모든 회로요소(전원임피던스, 변전소측 단권변압기, 급전소측 단권변압기, 선로중간 단권변압기, 급전선로 및 차량)를 6단자 전달행렬식으로 모델링하여 이로부터 급전선로의 고조파 특성을 해석하는 기법을 사용하였다.

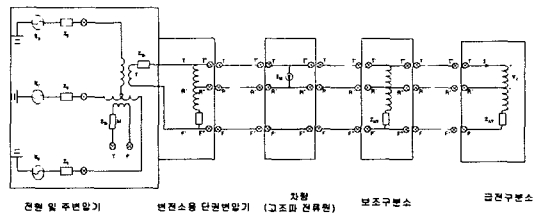


그림 2 교류 급전시스템의 구성

**2.1.2 고속철도차량의 고조파 특성**

고조파 예측계산을 수행하기 위하여 가장 중요한 데이터는 고속철도 급전계통의 주요 부하원이 차량의 고조파 전류 발생 패턴이다. 차량의 고조파전류는 KTX 고속열차에서 실측을 통하여 획득하였으며 다음 그림 3에 나타내었다.

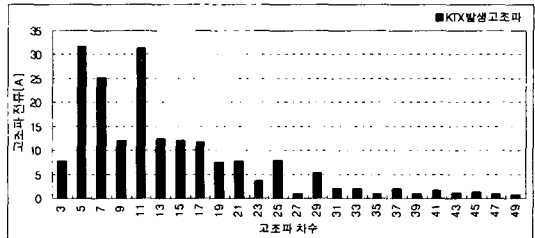


그림 3. KTX 차량의 고조파 특성  
 그림 3을 살펴보면 5차고조파~17차고조파 전류의 크

기가 10A를 넘는 것으로 나타났으며, 5차고조파 및 11차 고조파전류의 경우 크기가 32A로 크게 나타났다.

이는 KTX 고속열차가 사이리스터 위상제어방식을 사용하기 때문이며, 대체적으로 차량에서 발생하는 고조파전류의 양이 많다고 할 수 있다.

### 2.1.3 고조파 예측결과

위의 철도급전계통 6단자망 고조파 해석모델과 KTX 차량의 고조파전류 특성을 이용하여 KTX고속열차가 1편성 운행할 때 수전측의 전압왜형률과 향후 고속열차의 운행이 최대가 되는 각 상별 2편성이 운행하는 경우의 수전측 전압왜형률을 예측하여 그 결과를 그림 4에 나타내었다.

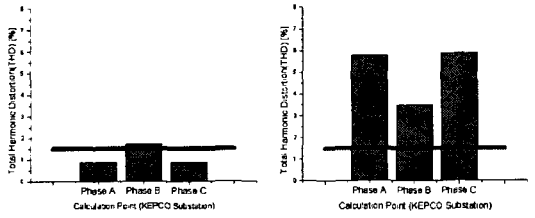


그림 4. 전압왜형률 예측 결과

KTX 고속열차 1편성이 고속철도변전소 T상에 위치할 경우 변전소 수전측의 전압왜형률이 한국전력 전압왜형률 기준 1.5%를 초과하는 것으로 나타났다. 또한 고속철도변전소 급전구간에 4편성의 고속열차가 운행할 경우, 즉 M상/T상에 각각 2편성의 열차가 운행할 경우 수전측의 전압왜형률은 최대 약 5.8%(A상, C상), 3.5%(B상)인 것으로 예측되었다.

이러한 예측결과 한국전력의 전압왜형률 기준 1.5%를 크게 초과하므로 전압왜형률을 저감시키기 위한 고조파 저감설비가 필요한 것으로 나타났다.

## 2.2 고조파 예측결과 검토

2.1절에서는 차량에서 발생하는 고조파 전류 측정 데이터를 기준으로 KTX 고속열차가 운행될 때 변전소 수전측의 전압왜형률을 예측하였다. 위의 예측결과를 검증하기 위하여 고속철도 선로에서 2편성의 KTX 고속열차가 가속운전, 최고속도주행 및 회생제동을 할 때 변전소 수전측의 전압왜형률을 측정하였다.

### 2.2.1 수전측 전압왜형률 실측결과

고조파 예측결과 검증을 위하여 고속철도 변전소 T상 급전선로에 2편성의 KTX 고속열차가 동시 운행하는 상태에서 변전소 수전측의 전압왜형률을 측정하였다. 이때 KTX열차의 운행은 다음과 같이 이루어졌다.

- 상 선 : 변전소 ⇒ 급전구분소 방향
- 하 선 : 급전구분소 ⇒ 변전소 방향
- 운전조건 : 2편성 고속열차 동시가속, 동시회생제동

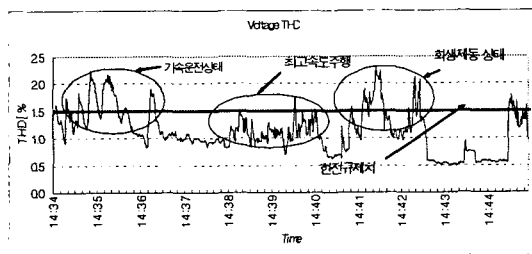


그림 5. 차량운행상태에 따른 전압왜형률 변화

### 전압왜형률 측정결과

- 가속운전상태 : 최대 2.25%
- 회생제동상태 : 최대 2.32%

고속철도 변전소 T상에서 수행된 KTX차량 2편성 동시운행조건에서의 수전측 전압왜형률 측정결과 최대 2.32%로 나타났다. 이는 2편성 운행시 예측한 수전측 전압왜형률 3.5%와 비교하여 볼 때 차이를 보이고 있다.

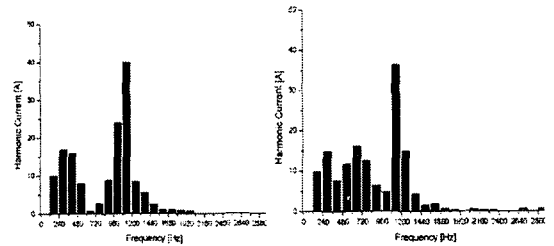
이러한 예측과 실측의 차이 원인은 ①예측계산시 모든 고조파를 동일한 위상으로 간주하여 계산, ②각 고조파 전류의 최대값을 모든 차량에 적용하여 계산, ③선로 공진점에서 고조파 전류의 확대율이 다르기(실제 1.12배, 예측 7.8배) 때문인 것으로 판단된다. 따라서 향후 정확한 고조파 예측을 위하여는 이러한 부분을 고려하여 차량 고조파 모델을 검증하여야 할 것이다.

### 2.2.2 급전측 고조파 특성

그림 5에 적용된 열차 운행조건에 따라 차량이 운행하였을 때, 차량의 운행상태(역행 및 회생)에 따라 변전소 급전측으로 유입되는 고조파 전류를 측정된 결과를 그림 6에 나타내었다.

KTX 고속열차가 최대부하조건으로 역행할 경우 급전측으로 유입되는 고조파 전류 스펙트럼을 그림 6(a)에 나타내었다. 이때 수전측의 전압왜형률을 저감시키기 위하여 급전측에서 제거하여야 할 고조파 전류의 차수는 3차~9차, 15차~23차고조파로 9개의 고조파에 대하여 고조파 전류를 저감시켜야 한다.

KTX 고속열차가 동시회생조건으로 회생제동할 경우 급전측으로 유입되는 고조파 전류 스펙트럼을 그림 6(b)에 나타내었다. 그림 6(a)의 역행의 경우와 비교하여 볼 때 모든 고조파 대역에서 고조파 전류가 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 수전측의 전압왜형률을 저감시키기 위하여 저감시켜야 할 고조파 전류는 3차~23차고조파로 총 11개 고조파이다.



(a) KTX고속열차역행시 (b) KTX고속열차회생시  
그림 6. 급전측 유입 고조파 전류

## 2.3 고조파 저감설비 저감효과

2.1절 및 2.2절의 고조파 예측과 측정결과로부터 수전측의 고조파 전압왜형률을 저감시키기 위한 고조파 저감설비(Active Filter)를 고속철도 변전소 급전측에 설치한 이후의 고조파 개선 효과를 나타내었다.

### 2.3.1 고조파 저감설비(액티브 필터)

액티브필터의 고속철도 변전소의 급전반과 급전모선을 연결하는 72.5kV GIS 공동모선에 병렬설치된다. 설치된 액티브필터는 크게 필터용 변압기 및 검측용 CT/PT, 전원측 과전압보호장치, IGBT 펄스 필터, Precharge DC-Link 및 액티브필터 캐비닛으로 구성된다. 이러한 액티브필터의 구성도를 그림 7에 나타내었다.

설치된 액티브필터의 간략한 사양은 다음과 같다.

- 가. 방식 : 단상 IGBT PWM
- 나. 입력전압 : 단상 400V 60Hz
- 다. 정격용량 : 3MVA
- 라. 보상가능고조파 : 3차~21차고조파

측정결과 철도급전계통이 무부하인 경우 전압왜형율이 0.55~0.59%인 상태에서, 차량이 운행될 때 전압왜형율은 순시최대 1.27%로 나타나 한전 전압왜형율 기준 1.5%이하를 만족시키는 것으로 나타났다.

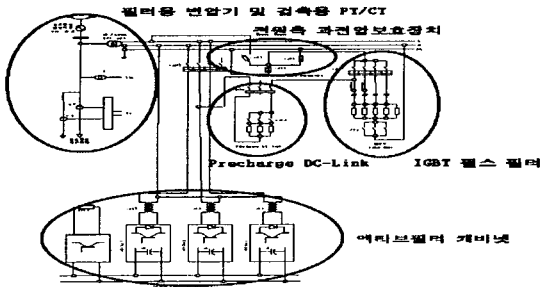


그림 7. 액티브필터의 구성도

### 3. 결 론

경부고속철도 급전계통에서 양질의 전력품질 확보를 위하여 고속열차의 고조파 발생패턴, 차량 운행시 급전계통의 고조파 예측 및 실측, 고조파 저감설비의 필요성 및 고조파 저감설비 설치 후의 고조파 저감효과와 전압왜형율 측정결과를 검토하였다.

검토 결과 고조파 예측의 정확성을 위하여 좀더 정확한 차량의 고조파 모델이 필요하며, 고속철도 변전소 급전측에 액티브 필터가 설치되어 운영됨으로써 급전측으로 유입되는 고조파 전류가 50%이상 저감되어 수전측의 전압왜형율을 한전기준치인 1.5%이하를 만족시켜 필터의 설치효과가 우수함을 알 수 있다.

#### 2.3.2 고조파 저감특성 분석

##### (1) 급전측 고조파 전류 저감효과

고속철도변전소 급전측 M상/T상에 Active Filter를 설치한 후 필터의 설치효과를 측정된 결과를 아래 표 1.에 나타내었다. 철도 급전계통에서 유입되어 들어오는 부하측 고조파전류를 기준으로 전철변전소 전원측의 고조파 전류의 비를 이용하여 고조파 전류의 저감율을 나타내었다. 이때 각 상별 3회(1회 1시간 기준)의 측정결과를 기준으로 볼 때 액티브 필터에서의 평균 고조파 저감율은 약 49~59%로 액티브필터에서 50%이상의 고조파 전류를 저감시키는 것을 알 수 있다.

##### (참 고 문 헌)

- [1] A. Bonner, et.al., "Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks PART I". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11, No.1, pp.452-465, 1996
- [2] A. Bonner, et.al., "Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks PART II". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11, No.1, pp.466-474, 1996
- [3] Yoshifumi Mochinaga, "Higher harmonics Resonance on AT Feeding Circuit and Countermeasures to Suppress it". T.IEE Japan, Vol.114-D, No.10, pp.978-986, 1994
- [4] 오광해 외, "Harmonic analysis based on four-port representation for traction power supply system". ICEE Proceedings, pp.165-168, 2000
- [5] 이장무 외, "전기철도 고조파 평가지표 검토", 전기학회학계학술대회, pp1251-1253, 2002
- [6] 오광해 외, "서울-부산 고속철도 시험선로에서 고조파 해석을 위한 8단지방 모델", 전기학회, Vol.51, No.3, pp.99-106, 2002

표 1. 급전측 고조파 전류 저감효과

시험번호	급전측	최대 부하전류	고조파 전류 용량 <sup>(주)</sup>		평균고조파 저감율[%]
			부하측	전원측	
1	M상	324.9 [A]	23.5 [A]	11.0 [A]	53.3%
2	M상	326.3 [A]	21.6 [A]	9.4 [A]	56.3%
3	M상	320.9 [A]	22.5 [A]	10.2 [A]	54.8%
4	T상	327.9 [A]	24.4 [A]	11.8 [A]	51.5%
5	T상	321.8 [A]	24.1 [A]	12.6 [A]	47.8%
6	T상	936.3 [A]	44.1 [A]	18.2 [A]	58.8%

(주) 고조파 용량 =  $\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_{30}^2}$

##### (2) 154kV 수전측 전압왜형율

다음 표 2.는 고조파 저감설비인 액티브 필터가 고속철도 급전측에 설치되어 동작할 때 154kV 수전측의 전압왜형율을 각 상별로 3회에 걸쳐 측정된 결과이다.

표 2. 수전측 전압왜형율 측정결과

시험번호	시험기간	상	최대부하전력 [단위:MW]	최대 부하전류 [단위:A]	고조파 전압왜형율[%]		
					순시치	IEC 표준측정 (10분기준)	한전기준(평균)
1	16:10 ~ 16:45	A상	5.21	67.5	0.94	0.75	0.56
		B상	11.16	127.4	1.27	0.92	0.56
		C상	5.54	66.9	0.96	0.77	0.59
2	16:49 ~ 17:48	A상	7.15	111.6	0.76	0.69	0.55
		B상	11.11	127.2	1.10	0.95	0.55
		C상	10.21	111.4	0.78	0.73	0.60
3	17:53 ~ 18:30	A상	8.80	122.2	0.72	0.67	0.55
		B상	21.52	245.4	1.02	0.91	0.53
		C상	9.76	123.1	0.81	0.73	0.59