

## 교류전기철도 AT급전계통의 고조파 해석 및 적용사례

이 장무\*, 한 문섭\*, 이 한민\*, 안영준\*\*

\*한국철도기술연구원, \*\*철도청

### Harmonic Analysis and its countermeasure of AT feeding scheme on AC electric railway

Lee Changmu\*, Han Moonseub\*, Lee Hanmin\*, An Youngnoon\*\*

\*Korea Railroad Research Institute, \*\*Korea National Railroad

**Abstract** - 국내철도는 많은 철도선로를 전철화하고 있다. 25~60% 전철화구간에서 운행하는 전기차량으로 인하여 고조파에 대한 문제가 있다. 이를 해결하기 위하여 AT급전방식에서의 고조파 특성을 해석하고 차량에서 발생하여 변전소로 유입되는 고조파를 저감시키기 위한 대책설비가 필요하다. 여기에서는 지금까지 고조파 해석에 사용된 3종류의 고조파 해석모델과 기존선 전철화과정에서 고조파 대책설비 설계에 대한 3가지 예를 보인다.

### 1. 서 론

철도시스템은 에너지 절약, 친환경, 대량수송 및 고속화를 목적으로 주요 동력원을 디젤에서 전기로 대체하기 위하여 기존의 노선을 전철화하는 철도개량사업이 활발히 진행되고 있다. 단상 25kV의 고전압을 사용하는 교류전기철도차량은 전압을 변환하기 위하여 컨버터 및 인버터를 사용함으로써 여기에서 발생하는 고조파는 인접통신선로에 유도장해를 일으키고 철도신호장애의 원인이 될 뿐만 아니라 전기철도 급전계통의 전원에 유입되는 경우에 전력용 콘서트의 과열/진동, 보호계전기의 오동작 뿐만 아니라 한국전력계통으로 유입되어 계통에 연결되어 있는 기기에 각종 문제를 일으킬 수 있다.

그러므로 전철화 계획단계에서부터 교류전기철도 급전계통을 정확하게 모델링하고 고조파 시뮬레이션을 통하여 평가하여 이에 대한 대책을 수립하고 반영하는 것이 양질의 전력품질확보와 유지보수비용의 절감측면에서 매우 중요하다.

본 논문에서는 최근 전기철도 건설과정에서 적용한 고조파 해석모델, 국내에 운행중인 전기기관차의 고조파 특성에 대하여 정리하고 주요 건설구간별로 고조파 시뮬레이션 평가 및 대책방안에 대하여 사례 중심으로 언급하고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 AT급전계통 고조파 해석모델

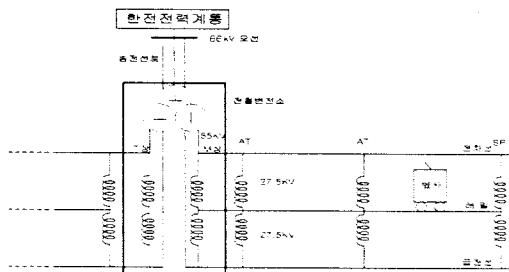


그림 1. AT 급전계통

전기철도의 AT 급전계통은 그림 1과 같으며, 전기차량에서 발생되는 고조파 전류는 급전계통의 임피던스 특성에 따라 특정 조판에서 공진되어 고조파 전류 확대현상을 일으키며 변전소로 유입되며 송전선로를 통하여 한국전력 급전계통으로 흘러간다.

#### 2.1.1 분포정수회로 해석모델

분포정수회로 해석모델은 일본의 RTRI에서 사용한 AT급전회로의 고조파 공진과 확대율 계산방법으로, AT급전회로를 4단자망의 선로분포정수회로로 모델링하였다.

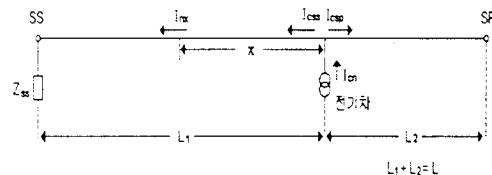


그림 2. 급전회로 고조파 근사등가회로

그림 1과 같은 급전회로를 그림 2와 같은 고조파 근사등가회로로 등가화하여 고조파 발생원(전기기관차)에 의해 급전회로에 흐르는 고조파 전류의 확대율을 계산하여 전압왜형률을 구할 수 있다. 고조파 발생원을 기준으로 변전소측과 급전선로 말단측의 등가임피던스를 계산하여 해석하는 방법이다. 고조파 확대율 K는  $I_{NN}/I_{CN}$ 으로 정의되며 이 값은 다음 식과 같다.

$$K = \frac{\cosh \gamma z_2 (Z_s \sinh \gamma (z_1 - x) + Z_0 \cosh \gamma (z_1 - x))}{Z_s \sinh \gamma + Z_0 \cosh \gamma}$$

여기에서,  $Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$  : 급전측 특성임피던스

$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y}$  : 급전측 전파정수

$Z_{SS}$  : 주변압기 및 전원계통 임피던스 합( $\Omega$ )

이와 같이 계산된 전철변전소의 유입 고조파 전류와 전원계통의 고조파 임피던스를 이용하면 전철변전소의 수전점과 한전변전소의 인출모선에서의 고조파 전압이 직접 계산되므로 이들 지점에서의 전압왜형률(THD)은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$THD = \frac{1}{V_1} \sqrt{(V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 + \dots + V_N^2)} \times 100 (\%)$$

### 2.1.2 6단자 회로망 모델

그림 1의 회로모델에서 고조파 전류원은 양쪽 단권변압기의 2차측(T-R)에 각각 접속되어 있고 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 한국철도기술연구원에서는 급전선로의 자기임피던스, 상호임피던스와 어드미턴스를 고려하여 전철급전시스템의 정밀한 고조파 해석을 위해 6단자 정수를 정의하여 AT급전회로의 모든 회로요소(전원임피던스, 변전소측 단권변압기, 급전선로 및 차량)를 6단자 전달행렬식으로 모델링하여 이로부터 급전선로의 고조파 특성을 해석하는 기법을 개발하였다.

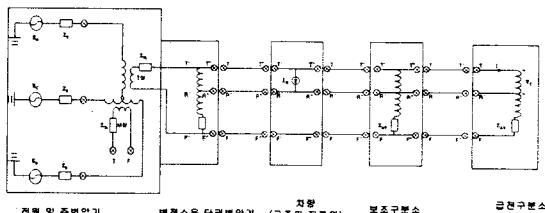


그림 3 교류 급전시스템의 구성

위의 6단자 해석모델은 단선선로 AT급전시스템 또는 상하선이 분리된 AT급전시스템의 고조파 해석에 적합한 단자망 해석모델이다.

### 2.1.3 10단자 회로망 해석모델

경부고속철과 최근 건설되고 있는 신선의 급전시스템은 공동접지방식을 채용하여 상하선 레일 도체군과 접지회로가 공통으로 접속되어 있다. 이러한 경우의 고조파 해석에 있어서는 기존의 분포정수해석모델을 적용하거나 6단자해석모델을 적용하는 것은 적합하지 않다.

따라서 공동접지방식을 채용한 급전계통 구성에 대하여 적합한 고조파 해석 알고리즘이 회로망 이론을 바탕으로 개발되었다.(참고문헌)

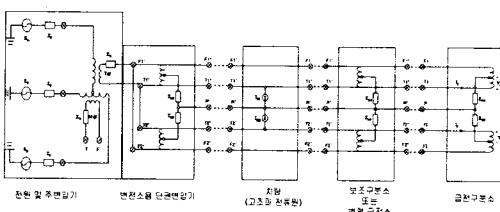


그림 4 교류 급전시스템의 구성

### 2.1.4 AT급전시스템의 공진특성

위의 해석모델을 이용하여 급전선로에서의 고조파 특성을 검토한 결과, 고조파 확대율과 공진특성에 관한 일반적인 경향은 다음과 같다.

- 급전선로의 길이가 일정한 경우, 공진점(공진주파수)은 고조파 발생원(차량)의 위치에 관계없이 거의 일정하다.
- 급전선로의 길이가 일정할 경우, 공진점에서의 고조파 확대율은 고조파 발생원(차량)이 변전소에서 멀수록 (구분소에 가까울수록) 커진다.
- 급전선로의 거리가 길수록 고조파 공진은 저차조파에서 발생하며, 그 크기는 다소 감소한다.

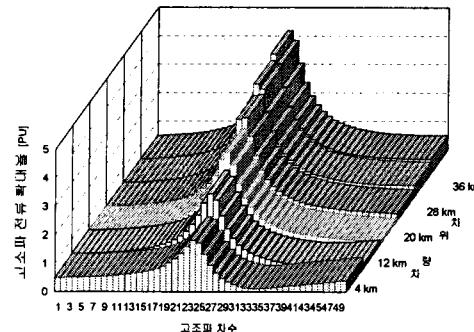


그림 5 차량위치에 따른 고조파 확대현상

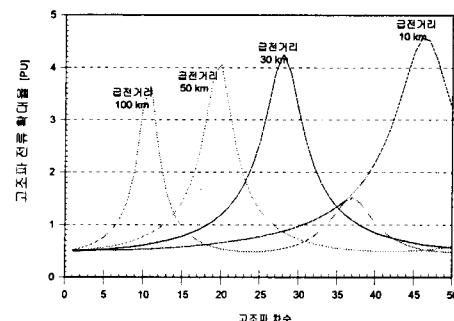


그림 6 급전거리와 고조파공진과의 상관성

## 2.2 AT급전계통의 고조파 해석 및 적용사례

### 2.2.1 전기기관차별 고조파 특성

국내에서 운행중이거나 시험중인 전기기관차는 4종류가 있으며 이에 대한 고조파 전류 측정결과를 살펴본다. 첫 번째로, 1972년 국내 전기철도건설과 맞추어 국내에 최초로 도입된 전기기관차(EL8000대)로 현재 중앙선, 영동선, 태백선 등의 기존선 전철화 구간에서 운행하고 있으며 Thyristor 제어방식을 사용한다. 두 번째로, 신형 전기기관차(EL8100대)는 기존의 전기기관차(8000대)를 대체하기 위하여 개발되어 기존선 전철화 구간에서 운행하며 PWM 제어방식을 사용한다. 세 번째는, 2004년에 경부고속철도 구간에서 운행 할 최고속도 300km/h급의 고속열차(KTX)로 Thyristor 제어방식을 사용한다. 마지막으로, PWM제어방법을 사용하는 350km/h급의 한국형 고속열차(G7열차)가 한국철도기술연구원에 의하여 개발되어 고속철도 시험선로에서 시험 중에 있다.

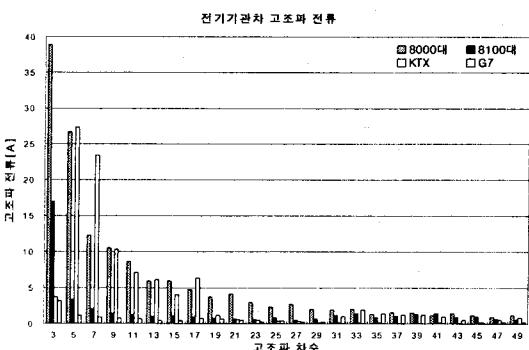


그림 7 전기기관차 발생 고조파 전류

위의 그림 7은 각각의 전기기관차에서 발생하는 고조파 전류를 측정한 결과이다. EL8000대 전기기관차에서 발생하는 고조파 전류를 측정한 결과, 견인부하전류가 커짐에 따라 각 조과별 고조파 전류의 발생량이 커지며, 고조파 차수가 증가할수록 발생되는 고조파 전류는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 8000대 전기기관차가 Thyristor 위상제어방법을 사용하기 때문이다. 특히 저차조과(3차, 5차, 7차, 9차 및 11조과 등)에서 고조파 전류의 발생량이 많으며, 이에 따라 EL8000대 전기기관차가 운행하는 전철구간에서는 이러한 저차 고조파를 억제하기 위하여 저차고조파 제거용 LC 필터를 설치하여 운용하고 있으며 또한 선로의 공진으로 발생하는 고차고조파 전류를 억제하기 위하여 급전구분소에 RC뱅크를 설치하여 운용하고 있다.

EL8100대 전기기관차에서 발생하는 고조파 전류를 측정한 결과, 견인부하전류의 변화에 따른 고조파 전류의 변화는 거의 없으며 고조파 전류는 작은 것으로 측정되었다. 이는 PWM 제어방법을 사용하기 때문에 고조파 전류 발생량이 작은 것으로 나타났다. KTX 차량에서 발생하는 고조파 전류를 측정한 결과, EL8000대의 고조파 발생 패턴과 유사하게 나타났으며, 이는 EL8000대와 마찬가지로 Thyristor 위상제어방법을 사용하기 때문이다. 그러므로 KTX 차량이 운행하는 고속철도 급전 구간에서는 저차조과를 제거하기 위한 고조파 대책설비를 설치하여 운용하여야 할 것이다. 한국형 고속열차(G7열차)의 경우 고조파 전류의 발생량이 작은 것으로 나타났으며, 이는 EL8100대와 같이 PWM제어방법을 사용하기 때문이다. Thyristor 위상제어방법을 사용하는 차량의 고조파 전류 패턴은 부하전류의 크기에 따라 고조파 전류의 크기가 변화하며, 고조파 차수가 증가할수록 고조파 전류의 발생은 작아지는 특성이 있다. PWM 제어방법을 사용하는 차량의 고조파 전류 패턴은 부하전류의 크기에 관계없이 고조파 전류는 거의 일정하며, 고차조과에서 고조파 전류가 증가하는 경향을 가진다.

## 2.2.2 고조파 적용사례

### 가. 충북선 전철화

충북선 전철화는 일본 RTRI에서 개발된 분포정수회로를 바탕으로 한 해석기법으로 고조파를 예측하였다. 다음 표1은 중평전철변전소에 송전하는 한전변전소 인출점에서의 전압왜형율에 대한 평가결과를 보여준다.

표 1. 열차운행조건에 따른 전압왜형율

열차운행조건	전압왜형율			
	대책설비 없음	RC Bank	AC Filter	RC + AC
EL8000대	3.81%	2.23%	1.40%	0.87%
EL8100대	0.73%	0.40%	0.37%	0.19%
혼용운행	2.30%	1.33%	0.86%	0.54%

기존 전기기관차만 운행할 경우엔 대책설비로써 AC필터(3, 5, 7 및 9차 고조파 제거용 LC필터)를 설치하거나 AC필터와 RC뱅크를 설치하여야 전압왜형율 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 신형 전기기관차만 운행할 경우엔 대책설비가 필요 없다. 혼합 운행시에는 전압왜형율 기준이 AC필터의 설치만으로도 만족된다.

### 나. 경부선 전철화

이 구간에는 KTX 차량과 EL8100대 신형 전기기관차가 혼용 운행하도록 계획되어 있으며, 특히 KTX 차량

의 경우 출력이 15,486kW의 대용량 부하로 동대구~부산구간을 16분 시격으로 운행하도록 계획되어 있다. 이 구간에 대한 고조파 예측은 일본 RTRI에서 고조파 예측에 사용한 분포정수회로 해석기법을 이용하여 예측 계산한 것으로, 변전소 급전선 M상/T상에 각각 고조파 발생원인 차량을 6대, 4대를 특정위치에 위치시키고 19조과까지의 고조파에 대하여 시뮬레이션 하였다. 표2는 경산전철변전소에서의 고조파 예측결과이다. 이때 사용한 RC뱅크의 사양은  $R = 750\Omega$ ,  $C = 0.18\mu F$ 으로 BT급 전방식 전철구간에서 사용하던 사양을 그대로 적용하였다. 이 예측결과에 따르면 RC Bank를 급전구분소에 설치하면 고조파 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

표 2. 전압왜형율-차량고정위치

	전압왜형율		
	대책설비 없음	RC Bank	AC Filter
전철변전소	13.63%	1.51%	1.37%
한전수전점	<b>12.62%</b>	1.39%	1.27%

시공과정에서 정확한 고조파 평가를 위하여 실시설계 재검토가 이루어졌다. 설계 재검토에서는 KRRI에서 개발한 6단자 해석기법을 이용하고, 차량의 위치를 고정시키지 않고 열차운행계획에 따라 KTX 및 전기기관차가 운행하는 경우에 대하여 연속적으로 시뮬레이션을 실시하였다. 또한 고조파 해석에서 가장 중요한 요소인 차량에서 발생하는 고조파 전류에 대하여 실 측정을 통하여 얻은 결과를 이용하였다. 표3은 설계보고서와 설계재검토에서 고조파 시뮬레이션 조건을 비교하여 나타낸 것이다.

표 3. 설계조건 비교

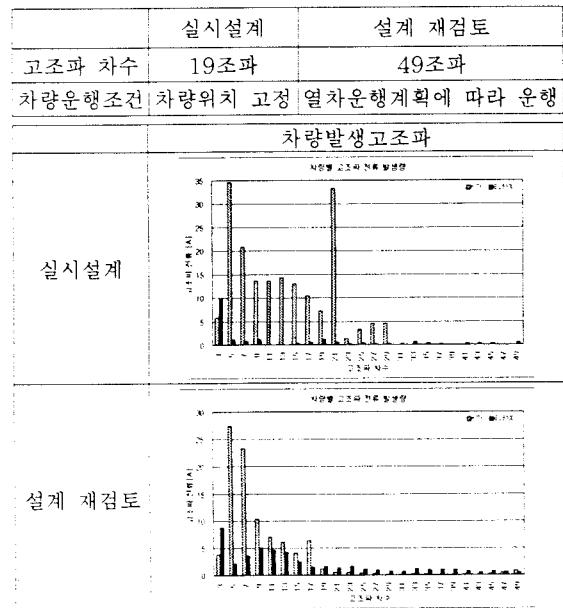


표4는 설계 재검토 결과로 3단계 열차운행계획에 따라서 차량이 운행할 때 고조파 대책설비 설치에 따른 전압왜형율 예측결과를 나타낸 것이다. 향후 최대 예측부를 기준으로 할 경우 RC뱅크( $R = 550\Omega$ ,  $C = 0.21\mu F$ )와 AC필터(3차, 5차, 7차 및 9차 고조파 제거용 LC필터)를 설치하여야 전압왜형율 기준을 만족하는 검토되었다.

표 4. 열차운행계획에 따른 전압왜형율

열차운행 계획	전압왜형율			
	대책설비없음	RC Bank	AC Filter	RC+AC
2004년	5.05%	1.97%	1.33%	1.02%
2009년	7.67%	3.61%	1.61%	1.32%
최대부하	7.51%	3.34%	1.67%	1.37%

#### 나. 호남선 전철화

이 구간에는 4단계의 열차 운행계획에 따라 KTX 고속열차, 10량편성 신규 고속열차 및 전기기관차가 혼용 운행되도록 계획되었다. 여기에서 사용되는 고조파 예측 방법은 KRRI에서 개발한 6단자 해석기법을 활용하였고, 차량이 열차운행계획에 따라 변전소 급전구간을 운행할 때 변전소로 유입하여 들어오는 고조파를 예측하여 한국전력 인출점에서의 전압왜형율을 평가한 것이다. 이 예측결과에 사용된 RC뱅크의 파라미터는 750Ω, 0.18 μF이며, AC 필터는 3, 5, 7 및 9차 고조파 저감용 LC필터이다. 표5는 4단계 열차운행계획에 따라 3종류의 열차가 두개전철변전소 급전구간에 혼용운행될 때의 전압왜형율 예측결과이다. 이 예측결과에 따르면 1단계 열차운행계획부터 고조파 대책설비로 RC뱅크와 AC필터를 설치하여야 전압왜형율 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

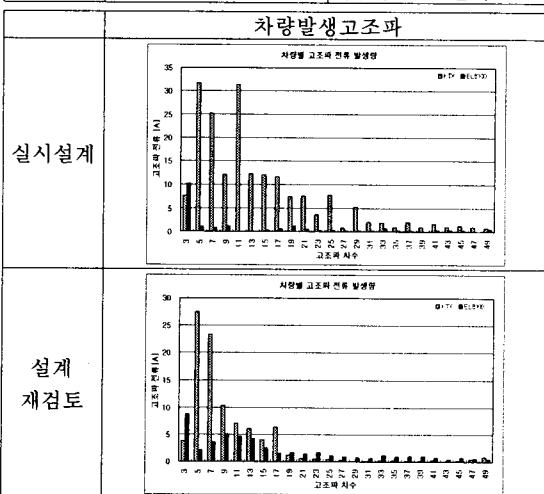
표 5. 열차운행계획에 따른 전압왜형율

열차운행계획	전압왜형율		
	대책설비없음	RC Bank	RC+AC
1단계(2004년)	6.83%	4.15%	0.62%
2단계(2014년)	13.55%	7.51%	0.89%
3단계(2024년)	20.90%	9.45%	1.08%
4단계(2034년)	20.91%	9.41%	1.11%

호남선 전철화 구간에 대하여도, 차량의 고조파 전류 발생량이 변경되는 등 조건이 변경되어 실시설계보고서의 고조파 부분에 대한 재검토가 이루어졌다. 표6은 설

표 6. 호남선구간 설계조건 비교

	실시설계	설계 재검토
RC 뱅크	사양: 750Ω, 0.18μF	사양: 550Ω, 0.21μF
AC 필터	사양: 3, 5, 7, 9차 고조파 저감용 LC 필터	사양: 3, 5, 7차 고조파 저감용 LC 필터



제 재검토에서 변경된 시뮬레이션 조건을 비교한 것이다. 특히, RC뱅크와 AC필터의 파라미터가 변경되었으며, 고조파 해석 시뮬레이션에서 가장 중요한 차량에서 발생되는 고조파 전류가 최근의 측정값으로 변경되었다.

표6은 재검토 결과로 4단계 열차운행계획에 따라서 차량이 운행할 때 고조파 대책설비 설치에 따른 전압왜형율 예측결과를 나타낸 것이다. 1단계 2004년 열차운행계획에 따라 열차가 운행할 경우엔 고조파 대책설비를 설치하지 않더라도 전압왜형율은 기준을 만족하지만, 2014년 이후 열차운행계획에 따라 열차가 운행될 경우 급전구분소에 RC 뱅크를 설치하면 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

표 6. 열차운행계획에 따른 전압왜형율

열차운행계획	전압왜형율(%)			
	대책설비 없음	RC Bank	AC Filter	RC+AC
1단계(2004년)	0.78%	0.38%	0.30%	0.26%
2단계(2014년)	1.84%	0.78%	1.41%	0.61%
3단계(2024년)	1.85%	0.80%	1.35%	0.63%
4단계(2034년)	2.17%	0.92%	1.48%	0.73%

#### 3. 결 론

전기철도의 고조파는 전기철도시스템의 급전계통, 전기차량의 운행패턴, 전기차량의 특성에 따라 적합한 해석모델을 적용해야만 정확한 해석을 할 수 있다. 정확한 고조파해석은 적정한 고조파 대책설비의 설치로 양질의 전력품질을 확보하게 하여 전철화건설에 있어서 과다설계나 과소설계를 방지하여 최적의 건설코스트를 산정 할 수 있게 한다. 그러므로 전기철도의 건설계획에 단계적으로 정확한 고조파 해석과 대책을 반영하기 위하여 다음과 같은 사항을 면밀히 검토하여야 할 것이다.

- 전기철도시스템의 급전계통을 정확히 등가화 시킨 고조파 해석모델의 적용
- 전기차량의 종류에 따라 차량에서 발생하는 고조파 전류의 특성 이해 및 정확한 측정
- 열차운행계획에 따른 전기차량의 운행조건을 반영한 고조파 시뮬레이션의 수행
- 급전계통특성, 전기차량특성, 열차운행패턴을 종합적으로 고려한 고조파 대책설비의 설계

#### [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", 전기학회 학술대회, pp.1251-1253, 2002
- (6) 오광해 외, "서울-부산 고속철도 시험선로에서 고조파 해석을 위한 8단지망 모델", 전기학회, Vol.51, No.3, pp.99-106, 2002