

고속철도의 급전계통 구성에 따른 고조파 확대율 비교 검토

이장무 오광해 창상훈  
한국철도기술연구원

The comparison and investigation of harmonic magnification according to power supply schemes in high speed railway

Chang-Mu Lee, Kwang-Hae Oh, Sang-Hun Chang  
Korea Railroad Research Institute

**Abstract** - The electrified railway has various power supply schemes. Although the identical trains are operated in same condition and the impedance of track are equal, the genealogy impedance of track is changed according to composition method of feeding scheme. So, the harmonic current flowing into the railway substation are greatly unlike.

For simulation of harmonic magnification flowing into the railway substation according to feeding scheme, we propose 6-port network analysis method based on 4-port network, find 6-port equivalent model of each circuit component, and compare and investigate harmonic magnification in the case of parallel post and normal feeding scheme.

표현하기가 곤란하다. 또한 정상급전 상태인 경우를 제외한 다른 급전계통 구성 방식(PP급전 또는 Tie급전 등)을 표현하기에는 상당한 곤란함이 있다.

따라서 본 연구에서는 다양한 급전계통 구성방식을 갖는 전철급전시스템의 정밀한 고조파 해석을 위해 6단자 정수를 정의하고, 선로의 각 구성요소에 대한 고조파 등가회로를 모델링하여 모델 방정식을 구한다.

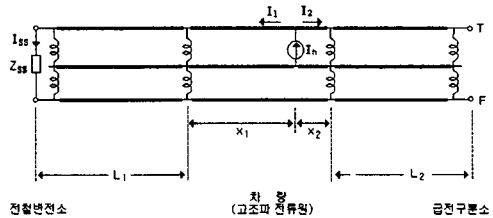


그림 1. M상측의 고조파 등가회로

1. 서론

전기철도는 다양한 급전계통 구성방식을 가지고 있다. 현재 건설중인 고속철도의 경우 병렬급전소방식(PP급전)을, 철도청 산업선 구간은 경우 정상급전방식을 그리고 수도권 전철화 구간에는 Tie 급전방식을 채택하고 있다.

차량이 전철 급전구간을 운행할 때, 차량에서 발생하는 고조파는 급전선로를 따라 확대되면서 전철 급전변전소로 유입된다. 이러한 고조파는 철도에 인접한 통신선로의 간섭과 철도 신호시스템에 영향을 주고 더 나아가 급전시스템의 전력 콘덴서의 공진이나 보호기기의 오동작을 초래할 수도 있다.

동일한 차량이 동일한 조건으로 운행하고 선로의 임피던스가 같다고 하더라도, 급전계통 구성방식에 따라 선로의 계통 임피던스가 달라지게 되어 전철급전변전소로 유입되는 고조파는 크게 달라지게 된다.

따라서 본 연구에서는 급전계통 구성의 변화에 따라 전철 급전변전소로 유입되는 고조파 확대율을 시뮬레이션 하기 위하여 4단자망을 기초로 한 AT급전선로의 6단자정수 해석기법을 제안하고, 각 회로요소에 대한 6단자 등가회로 모델방정식을 구하며, 병렬급전소방식(PP급전)과 정상급전방식의 경우에 대해 시뮬레이션을 통하여 고조파 확대율을 구하여 비교·검토하고자 한다.

2. 본론

2.1 6단자정수 해석기법

AT 급전선로에서 정밀한 고조파 해석을 위해서는 회로를 4단자 분포정수회로 또는 복수 T형(π형) 등가회로로 모델링하고 이를 해석하는 것이 바람직하다. 그러나 그림 1.의 회로모델에서 고조파 전류원은 양쪽 단권변압기의 2차측(T-R)에 각각 접속되어있고 단권변압기의 1차측(T-F)은 급전선을 통하여 연결되어 있다. 더구나 전차선로 3가지 도체군(T,R,F)의 상호간에는 정전용량에 의한 어드미턴스가 존재하므로 4단자 정수

2.1.1 급전구분소 단권변압기

급전구분소에 설치된 단권변압기는 변전소 급전구간의 말단에 위치하고 그림 2.와 같이 표현된다. 즉 단권변압기의 T-R간의 전압을 V, T-R을 흐르는 전류를 I라고 하면 단권변압기의 특성에 의하여 F-R을 흐르는 전류도 I가 되고 R-F단자전압은 내부임피던스에 의한 전압강하만큼 작게된다.

따라서 급전구분소의 단권변압기 모델은 식 (1)과 같이 표현된다.

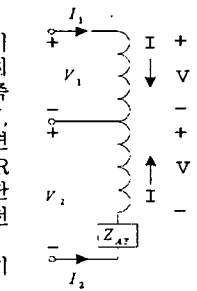


그림 2. SP의 AT

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -Z_{AT} \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = M_p \cdot \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.1.2 전차선로

전차선로는 각 도체군의 자기임피던스 뿐만아니라 상호 임피던스와 선간 어드미턴스를 포함하고 있다. 이들 정수를 T형 등가회로로 표현하면 그림 3.과 같다.

그림 3.의 Z 구간에서 변전소측과 구분소측의 전압, 전류관계는

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & Z_{TF} + Z_{RR} - 2Z_{TR} & Z_{RR} + Z_{TF} - Z_{TR} - Z_{RF} \\ 0 & 1 & Z_{TR} - Z_{RR} - Z_{TF} + Z_{RF} & 2Z_{RF} - Z_{RR} - Z_{TF} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = M_Z \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

이 되고, 그림 3의 Y구간에서는

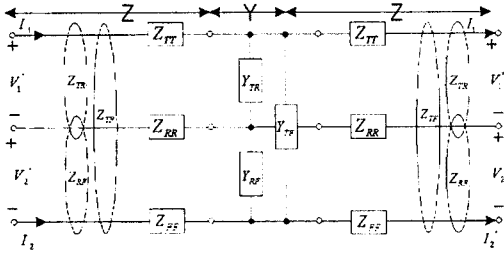


그림 3. 전차선로

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ Y_{TR} + Y_{TF} & Y_{TF} & 1 & 0 \\ -Y_{TF} & -Y_{RF} - Y_{TF} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = M_Y \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix}$$

이 된다.

따라서 이들 정수를 모두 포함한 전압, 전류관계는 다음 식(2)와 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = M_Z \cdot M_Y \cdot M_Z \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = M_{Track} \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 2.1.3 ATP의 단권변압기

ATP의 단권변압기는 전차선로의 중간에서 병렬로 접속되고 그 회로 모델은 그림 4.와 같다.

변전소측에서 본 ATP용 단권변압기의 T-R간, R-F간 전압은 각각 구분소측에서 바라본 전압과 같다. AT의 전류 분류특성과 내부임피던스를 고려하여 변전소측과 구분소측의 전류관계를 정리하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{Z_{AT}} & -\frac{1}{Z_{AT}} & 1 & -2 \\ \frac{1}{Z_{AT}} & -\frac{1}{Z_{AT}} & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = M_{AT} \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} \quad (4)$$

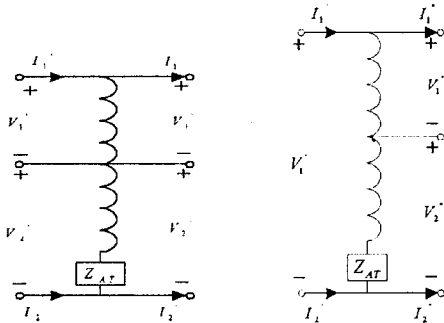


그림 4. ATP용 AT

그림 5. 변전소 AT

### 2.1.4 변전소의 단권변압기

변전소의 단권변압기는 다음 그림 5.와 같이 나타나고 이를 정리하면, 다음의 2쌍의 관계식을 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ I_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} V_1' \\ I_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & \frac{Z_{AT}}{2} & \frac{Z_{AT}}{2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix}$$

이 두쌍의 관계식을 합하여 하나의 수식으로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ I_1' \\ V_1' \\ I_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 2 & 0 & \frac{Z_{AT}}{2} & \frac{Z_{AT}}{2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = M_{SSAT} \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 2.1.5 전원계통

변전소에 위치한 AT의 T-F 단에서 바라본 전철 주변압기의 임피던스를 포함한 전원계통의 등가임피던스와 함께 전원계통의 등가회로를 그림 6.에 나타내었다.

이를 수식으로 정리하면

$$V_S = [1 \quad Z_S] \cdot \begin{bmatrix} V_1' \\ I_1' \end{bmatrix}$$

이 되고, 우측의 열벡터를 식 (5)와 맞추기 위하여 다시 정리하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_S \\ V_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1' \\ I_1' \\ V_1' \\ I_1' \end{bmatrix} = M_{SS} \begin{bmatrix} V_1' \\ I_1' \\ V_1' \\ I_1' \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)에서 전원계통의 내부전압은 순수한 기본파 성분으로 가정할 수 있으므로 각 고조파별 계산시 전원 \$V\_S\$는 0으로 둘 수 있다.

### 2.1.7 차량 고조파 전류원

철도급전시스템의 주된 고조파 전류원은 차량이므로 차량에서 발생한 고조파는 그림 7.과 같이 전차선로의 레일과 전차선 사이에서 주입되는 전류원으로 취급할 수 있다.

따라서 차량의 고조파 전류원에 대한 6단자 등가모델은 다음 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_{HAR} \\ 0 \end{bmatrix} = I_4 \cdot \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_{HAR} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

## 2.2 고조파 해석

이와같이 등가화된 모델식을 사용하여 구분소 측부터 6단자 행렬을 변전소 측까지 차례로 집계하면 다음과 같다.

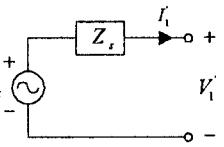


그림 6. 전원계통

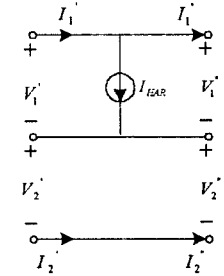


그림 7. 고조파 전류원

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = M_{SS} \cdot M_{SSAT} \cdot M_{Track1} \cdot M_{AT} \cdots M_{AT} \cdot M_{Track2a} \cdot I_4 \cdot M_{Track2b} \\ \cdots M_{AT} \cdots M_{AT} \cdot M_{TrackN} \cdot M_{SP} \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} \\ -M_{SS} \cdot M_{SSAT} \cdot M_{Track1} \cdot M_{AT} \cdots M_{AT} \cdot M_{Track2a} \cdot I_H \quad (8)$$

식 (8)을 계산하면 SP위치에서의 V와 I를 구할 수 있고, SP의 전압과 전류를 구하면 선로의 모든 위치에서의 값을 구할 수 있다.

### 2.3 사례연구

현재 고속철도 시험선 운행구간의 급전방식은 AT급전방식을 채택하고 있으며 급전계통구성은 병렬급전소방식(PP급전)으로 구성되어 시험운영하고 있다.

본 연구에서 제안한 6단자정수 해석기법을 이용하여 현재의 병렬급전소방식(PP급전, 그림 8.(a))과 이를 정상급전방식(그림 8.(b))으로 구성하였을 경우에 대하여, 즉 급전계통 구성방식에 따른 고조파 확대율에 관하여 사례연구를 실시하였다.

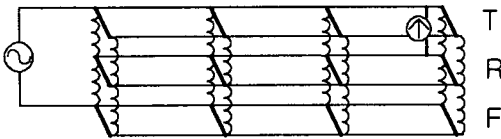


그림 8.(a) 병렬급전소급전(PP급전)방식

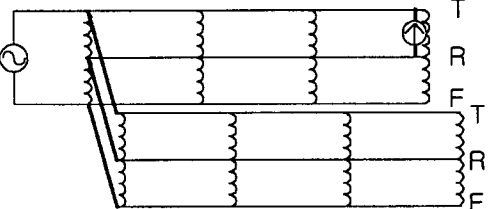


그림 8.(b) 정상급전방식

#### 2.3.1 입력자료

입력자료로는 현재 고속철도 시험선 운행구간의 전철변전소의 전원계통 데이터를 사용하였고 전차선로의 고조파 회로정수는 시험선 전철변전소의 급전구간에서 실측하였다.

#### 2.3.2 고조파 해석결과

고조파 확대율 비교를 위한 시뮬레이션을 하기 위하여 AT간격이 10km이며 변전소 급전거리가 30km인 선로에 대하여 변전소 말단 SP의 상선에서 고조파를 주입하였을 때 변전소로 유입되는 고조파 전류를 구하여 그 결과를 그림 9.에 보인다.

그림 9.에서 병렬급전소급전(PP급전)방식을 사용한 경우, 공진점은 15조파에서 발생하였으며 그 확대율은 3.03으로 평가되었다. 또한 정상급전방식을 사용한 경우 공진점은 21조파에서 발생하며 그 확대율은 5.02인 것으로 평가되었다.

두 급전방식을 비교하여 보면, 병렬급전소급전방식의 경우 정상급전방식에 비하여 저차조파에서 공진이 발생하고, 확대율은 정상급전에 비하여 훨씬 더 작음을 알 수 있다.

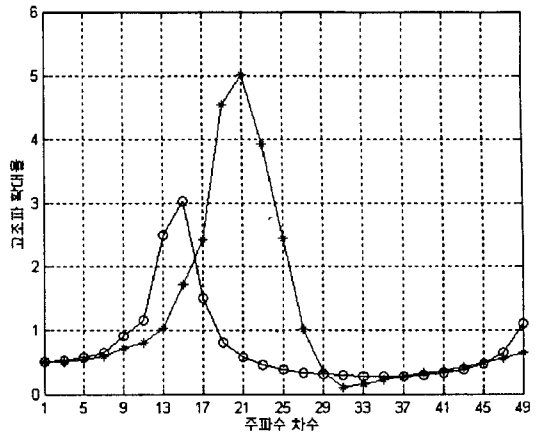


그림 9. 고조파 확대율 비교(○:PP급전, \* :정상급전)

## 3. 결 론

철도부하에 의해 발생된 고조파 전류가 급전계통 구성에 따라 어떻게 변화하는지를 해석하기 위하여 새로운 해석기법을 제시하였으며, 고속철도 시험선구간에 대하여 그 급전계통구성을 현재의 병렬급전소급전방식과 기존의 정상급전방식과 비교하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 급전선로의 길이가 일정한 경우, 그 급전계통구성을 바꾸면 공진점(공진주파수)이 달라진다.
- 2) 급전선로의 길이가 일정한 경우, 병렬급전소급전방식이 정상급전방식보다 저차조파에서 공진점이 발생한다.
- 3) 급전선로의 길이가 일정한 경우, 정상급전방식에 비하여 병렬급전소급전방식이 공진점에서의 확대율이 크게 감소한다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Yoshifumi Mochinaga, "Higher Harmonics Resonance on AT Feeding Circuit and Counter measure to Suppress it", T.IEE Japan, Vol.114-D, No. 10, 1994
- [2] Joachim Holtz and Heinz-Jurgen Klein, "The Propagation of Harmonic Currents Generated by Inverter-Fed Locomotives in the Distributed Overhead Supply System", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 4, No. 2, 1989
- [3] 한국철도기술연구원, "서울-대전간 고속철도에서 전력품질 평가와 대책", 1999
- [4] 오광해 외, "철도 급전시스템에서의 고조파 해석 및 대책 연구", 철도학회 추계학술대회 논문집, 1999