

# 6단자망 회로모델을 이용한 전기철도 급전시스템의 고조파 해석

論 文

51A-6-1

## Harmonic Analysis for Traction Power Supply System Using Four-Port Network Model

倉相勳\* · 吳廣海\*\* · 金周落\*\*\* · 金正勳<sup>§</sup>

(Sanghoon Chang · Kwanghae Oh · Joorak Kim · Junghoon Kim)

**Abstract** - Recently, traction motors in trains are supplied with single phase a.c. power. After this power is converted to d.c. power, it is inverted to three phase power to operate traction motors. As going through the process of the conversion, harmonic current is generated in train.

The method of conventional analysis on harmonics, studied by RTRI, is modeled with equivalent circuit of ac AT-fed electric railroad system using by the distributed constant circuit. However, this circuit as two-port network model has some difference in comparison with real system. The reason why the conventional method is different from the real system is that the conventional method does not include three conductor groups, that is catenary, rail, and feeder, and admittance between the conductors for line capacitance. Therefore, this method has a little error.

This paper proposes new method to more effectively estimate Harmonic current. In this method, numerous components in electric railway are categorized and each component is defined as a four-port network model. The equivalent circuit for the entire power supply system is also described into a four-port network model with connections of these components. In order to evaluate the efficiency and the accuracy of a proposed method, it is compared with values measured in Kyung-Bu high speed line and ones calculated by the conventional method.

**Key Words** : Traction Power System, Harmonic Analysis, Four-Port Network Model, Kyung-Bu High Speed Line

### 1. 서 론

전기철도 급전시스템은 3상 전력계통으로부터 수전하여 단상의 전력으로 변환하여 급전 받으며, 이 단상전력을 전기적 부하인 차량에 공급한다. 또한 전기철도차량은 시공간적인 변화를 갖는 대용량의 단상부하이다. 따라서 대용량의 부하에 적합한 전력 공급을 위해서 교류 급전방식을 채택하게 되었고, 그 중에서도 단권변압기(AT; Auto-Transformer)를 사용하는 AT 급전시스템을 주로 사용한다[1][2]. 건인용 3상 동기전동기 또는 3상 유도전동기의 구동을 위해 단상 교류전력을 직류전력으로 변환시키고 이를 다시 3상 교류전력으로 변환하는 과정을 거친다. 이 전력변환과정에서 전기차량은 AC측 전류에 고차고조파를 생성시키며, 급전회로의 경우 전차선로를 따라 분포된 저항·인덕턴스 및 정전용량 등의 전기적 특성에 의해 특정 조파에서 공진되어, 고조파 전류 확대현상을 일으킨다. 즉, 변전소의 급전점에서 본 전원측 임피던스는 유도성으로서 급전회로의 표류 정전용량과

특정주파수에서 병렬공진하여 해당 주파수 전류의 확대현상을 일으킨다.

이러한 고조파전류는 인접 통신선에 유도장해를 일으키고 철도신호장애의 원인이 될 뿐만 아니라 전원계통에 유입되는 경우에는 전력용 콘덴서의 과열/진동을 유발시키고 보호계전기를 오동작 시킬 우려가 있으며, 일반전력계통에 유입될 경우 심각한 문제를 야기할 수도 있다[3][4]. 따라서 정밀한 고조파 예측을 통하여 이에 대한 대책을 세우는 것은 안정적이고 고신뢰도의 철도시스템 운영을 위해 절대적인 것이라 할 수 있다.

고조파 해석은 전철급전시스템의 회로 모델링 및 해석을 통해 차량에서 발생한 각 조파 전류가 급전시스템에 미치는 영향을 평가하는 것으로서 기존의 알려진 방법으로는 급전회로의 4단자망 해석에 의한 일본 철도총합연구소(RTRI; Railway Technical Research Institute)의 해석법을 들 수 있다[5]. 그러나 이 방법은 급전회로를 4단자망으로 구성함으로써 전차선, 레일, 급전선으로 구성되어 있는 전철급전시스템을 올바르게 표현하지 못한 개략적인 해석이었다. 따라서 본 논문에서는 전차선, 레일, 급전선으로 구성되는 급전회로를 6단자망으로 모델링하여 전기차량에 의해 발생한 고조파 전류 파급특성에 주안점을 두어 정밀해석을 하였다. 아울러, 경부고속전철 시험선구에서 실측한 데이터, 기존 예측방법에 의한 데이터 및 제안한 방법으로 예측·해석한 고조파 전류를 비교 검토함으로써, 제안한 기법의 유용성을 입증하였다.

\* 正會員 : 韓國鐵道技術研究員 責任研究員 · 工博

\*\* 正會員 : 韓國鐵道技術研究員 先任研究員 · 工博

\*\*\* 正會員 : 韓國鐵道技術研究員 主任研究員

§ 正會員 : 弘益大學校 電子電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2001年 9月 19日

最終完了 : 2002年 4月 18日

2. 기존의 고조파 해석 기법[5]

교류전기철도에서의 고조파 해석은 고조파전류 확대에 의한 신호기기 및 계전기 등의 오동작 등을 포함한 계통에 미치는 악영향을 방지하기 위한 것으로서, RTRI에서 제안한 해석법이 널리 알려져 있어 자주 사용되고 있다. 그러나 이 방법은 전기철도 고조파 해석시 초석이 되는 등가회로 구성 및 해석에서 실제 급전회로와는 거리가 있는 4단자망으로 회로망을 구성 및 해석함으로써 정량적이 아닌 정성적으로 밖에 해석할 수 없는 한계를 내포하고 있다. 기존의 고조파 해석 방법은 일반 전력계통에서 송전선로 해석시 사용하는 장거리선로 해석법을 이용한 특징이 있으며, 수식 전개는 다음과 같다.

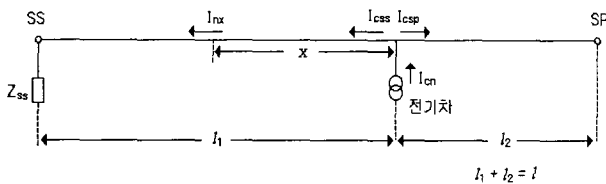


그림 1 AT 급전회로에 대한 선로분포정수회로  
Fig. 1 Distributed Constant Circuit for AT-Fed System

AT 급전회로는 약 10km 간격으로 AT가 설치되어 있어서 전기차에서 발생한 고조파전류가 전차선, 레일을 지나 부근의 AT에 의해 전차선, 급전선의 전류로서 변전소에 흐르게 된다. 이 때문에 왕복선로분포정수회로를 기본으로 그림 1과 같이 급전회로에 전원측 임피던스, 고조파원(전기차) 등을 구성한 후, 급전회로에 흐르는 고조파전류의 공진주파수, 확대율 등을 구한다. 먼저, 고조파원의 위치에서 변전소측 및 급전선로 말단측을 본 급전회로의 임피던스는 식 (1)과 같다.

$$Z_1 = Z_0 \frac{Z_{ss} \cosh \gamma l_1 + Z_0 \sinh \gamma l_1}{Z_{ss} \sinh \gamma l_1 + Z_0 \cosh \gamma l_1} \quad [\Omega] \quad (1)$$

$$Z_2 = Z_0 \coth \gamma l_2 \quad [\Omega]$$

단,  $Z_1$  : 전기차에서 바라본 변전소측 임피던스 [ $\Omega$ ]  
 $Z_2$  : 전기차에서 본 급전구분소측 임피던스 [ $\Omega$ ]

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad \text{: 급전선로측의 특성임피던스 } [\Omega]$$

$z$  : 급전선로의 단위길이당 임피던스 [ $\Omega/\text{km}$ ]

$$\text{(이때, } Z = zl \text{ )}$$

$y$  : 급전선로의 단위길이당 어드미턴스 [ $\Omega/\text{km}$ ]

$$\text{(이때, } Y = yl \text{ )}$$

$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y}$  : 급전선로측의 전파정수 [rad]

$l$  : 급전변전소와 급전구분소간의 거리 [km]

$l_1$  : 전기차에서 급전변전소까지의 거리 [km]

$l_2$  : 전기차에서 급전구분소까지의 거리 [km]

$Z_{ss}$  : 급전용 변압기와 전원측 임피던스의 합 [ $\Omega$ ]

이 때,  $Z_1$ 과  $Z_2$ 는 고조파전원에 대하여 병렬회로를 구성하며 식 (2)로 유도되는 합성 임피던스의 분모가 0이 되는 병렬공진점이 존재한다. 이는 식 (3) 또는 (4)로 표현되며, 병렬공진으로 인해 전기차에서 발생한 고조파전류의 확대현상이 발생한다. 이때, 공진주파수는 전기차 위치( $l_1$ ,  $l_2$ )에 무관하다.

$$Z_p = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{Z_0 \cosh \gamma(l-l_1) \cdot (Z_{ss} \cosh \gamma l_1 + Z_0 \sinh \gamma l_1)}{Z_{ss} \sinh \gamma l + Z_0 \cosh \gamma l} \quad [\Omega] \quad (2)$$

단,  $Z_p$  :  $Z_1$ 과  $Z_2$ 의 병렬합성임피던스

$$Z_{ss} \sinh \gamma l + Z_0 \cosh \gamma l = 0 \quad (3)$$

$$Z_{ss} + Z_0 \coth \gamma l = 0 \quad (4)$$

그림 1에서 보는 바와 같이 전기차에서 발생한 고조파 전류는 변전소와 구분소로 유입된다. 이 유입된 전류들은 선로의 전기적 특성에 의해 특정고조파에서 차량에서 발생한 전류값보다 증폭될 수 있으며, 이를 고조파 공진에 의한 확대율이라 한다. 전기차에 의해 발생한 고조파전류가  $I_{cn}$ , 변전소 및 구분소측으로 흐르는 고조파전류가 각각  $I_{css}$ ,  $I_{csp}$ 이라 하면,  $I_{css}$ 는 식 (5)와 같이 전류 분류비로서 구할 수 있다.

$$I_{css} = I_{cn} \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (5)$$

$$= I_{cn} \cdot \frac{(Z_{ss} \sinh \gamma l_1 + Z_0 \cosh \gamma l_1) \cosh \gamma l_2}{Z_{ss} \sinh \gamma l + Z_0 \cosh \gamma l} \quad [A]$$

이  $I_{css}$ 를 송전단 고조파전류로 삼고, 수전단인 SS의 임피던스를  $Z_{ss}$ 로 두면 전기차로부터  $x$ 만큼 떨어진 지점의 고조파전류  $I_{nx}$  [A]는 식 (6)과 같으며,  $I_{css}$ 에 식 (5)를 대입하여 다시 계산하면 식 (7)이 된다.

$$I_{nx} = I_{css} \cdot \frac{Z_{ss} \sinh \gamma(l_1 - x) + Z_0 \cosh \gamma(l_1 - x)}{Z_{ss} \sinh \gamma l_1 + Z_0 \cosh \gamma l_1} \quad [A] \quad (6)$$

$$I_{nx} = I_{cn} \cdot \frac{\cosh \gamma l_2 (Z_{ss} \sinh \gamma(l_1 - x) + Z_0 \cosh \gamma(l_1 - x))}{Z_{ss} \sinh \gamma l + Z_0 \cosh \gamma l} \quad [A] \quad (7)$$

여기서, 고조파 확대율  $K$ 는  $I_{nx}/I_{cn}$  에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K = \frac{\cosh \gamma l_2 (Z_{ss} \sinh \gamma(l_1 - x) + Z_0 \cosh \gamma(l_1 - x))}{Z_{ss} \sinh \gamma l + Z_0 \cosh \gamma l} \quad [\text{p.u.}] \quad (8)$$

식 (8)은  $l_1$  위치의 전기차가 발생하는 고조파전류에 의해 전기차와 변전소(SS; Substation)간의 임의의 위치  $x$ 에서의 고조파전류 확대율을 나타낸 것이다. 이 때, 고조파전류  $I_{nx}$ 가 최대가 되는 전기차의 위치는  $l_2=0$ , 즉 전기차가 급전구분소(SP; Sectioning Post)에 있는 경우로서, 고조파전류는 식 (6)의  $I_{css}$ 를  $I_{sp}$ 로 두어 식 (9)와 같이 유도되며 식 (9)에서 얻어진 급전회로의 공진조건은 식 (10)과 같다.

$$I_{nx} = I_{sp} \cdot \frac{Z_{ss} \sinh \gamma(l-x) + Z_0 \cosh \gamma(l-x)}{Z_{ss} \sinh \gamma l + Z_0 \cosh \gamma l} \quad [A] \quad (9)$$

$$\gamma l = \tanh^{-1} \left( -\frac{Z_0}{Z_{ss}} \right) \quad (10)$$

공진시  $\gamma l$ 는 음의 값을 가지는 일정 상수이므로 식 (9)의  $\sinh(\gamma l - \gamma x)$  및  $\cosh(\gamma l - \gamma x)$ 는  $x$ 가 크면 클수록  $I_{nx}$ 도 커진다. 식 (9)에서  $x=l$ ,  $I_{nx} = I_{ss}$ 로 두면  $I_{ss}$ 를 구할 수 있으며, 이 식을 변형하여 변전소로 유입되는 고조파전류의 확대율을 구하면 식 (12)와 같다.

$$I_{ss} = I_{sp} \cdot \frac{Z_0}{Z_{ss} \sinh \gamma l + Z_0 \cosh \gamma l} \quad (11)$$

$$K = \frac{I_{ss}}{I_{sp}} = \frac{Z_0}{Z_{ss} \sinh \gamma l + Z_0 \cosh \gamma l} \quad [p.u.] \quad (12)$$

AT 급전회로에 있어서는 공진 고조파전류의 가장 큰 값 또는 확대율의 가장 큰 값은 전기차가 SP에 위치하고, 그 전류를 SS점에서 관측한 경우이다.

### 3. 6단자망 회로모델에 의한 고조파 해석

2장에서 유도한 고조파전류의 공진점 및 확대율은 앞서 기술한 바와 같이 RTRI에서 제안한 것으로서 전기철도 급전시스템을 분포정수회로로 모델링하여 해석한 것이다. 그러나 2절의 수식은 전기차를 포함한 급전선로를 4단자 망모델로 구성하였기 때문에, 전차선(T; Trolley wire), 레일(R; Rail), 피더(F; Feeder) 등의 3가지 도체군으로 이루어지며, 세 도체군 상호간 정전용량으로 어드미턴스가 존재하는 실제 철도급전회로와는 거리가 있는 등가회로를 사용하였다. 따라서 해석결과에 오차가 내포될 수밖에 없다. 본 논문에서는 6단자 회로망으로 등가 급전회로를 구성하여 고조파 전류의 공진주파수와 전철변전소에서의 확대율을 구하고자 한다.

#### 3.1 설비요소 회로모델링

일반적으로 정밀한 고조파 해석을 위해서는 회로를 4단자 분포정수회로 또는 복수개의 T형 혹은  $\pi$ 형 등가회로로 모델링하고 이를 해석하는 것이 바람직하다. 그러나 그림 2의 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 상호간에는 정전용량에 의한 어드미턴스가 존재하므로 4단자 정수로 표현하기가 곤란하다.

본 논문에서는 전철급전시스템의 정밀한 고조파 해석을 위해 6단자 정수를 정의하고 이로부터 고조파회로를 모델링하여 해석하는 기법을 개발하였다. 보통의 AT급전시스템은 대개 변전소, 급전구분소 혹은 병렬급전소(PP; Parallel Post), 급전구분소의 조합으로 구성되며, 각 개소의 단권변압기와 전기차의 6단자 회로망모델은 다음과 같다.

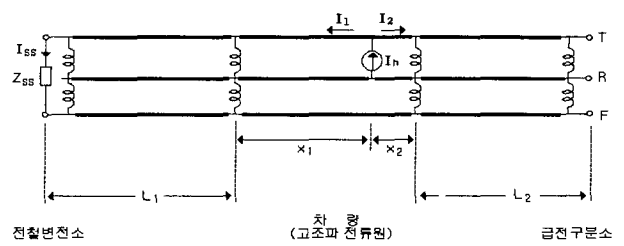


그림 2 M상측의 고조파 등가회로  
Fig. 2 Harmonic Equivalent Circuit for M Phase

#### 3.1.1 급전구분소의 단권변압기 등가모델

구분소의 단권변압기는 전차선로 말단에 위치하며, 결선은 그림 3과 같다. 즉, 단권변압기의 T-R간에서의 전압을  $V$ , T-R간에서의 흐르는 전류를  $I$ 라고 하면, R-F간에 흐르는 전류도  $I$ 가 되고, 변전소측에서 본 단권변압기의 T-R 단자전압은  $V$ 와 같고 R-F 단자전압은 내부 임피던스에 의한 전압강하 만큼 작게 된다. 따라서 급전구분소의 단권변압기는 식 (13)과 같은 6단자정수로 표현된다.

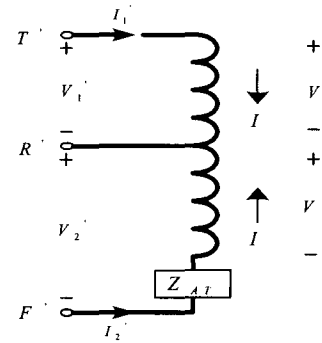


그림 3 구분소용 단권변압기 모델  
Fig. 3 Circuit model for AT in SP

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -Z_{AT} \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = M_{sp} \cdot \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} \quad (13)$$

#### 3.1.2 전차선로 등가모델

전차선로는 차량에 전력을 공급하는 전차선, 레일, 급전선 등 3개의 도체군으로 구성되어 있다. 각 도체군들은 자기임피던스 뿐만 아니라 상호임피던스 및 도체군 상호간 정전용량에 의한 선간 어드미턴스를 포함하고 있다. 이들 정수를 T형 등가 회로로 표현하면 그림 4와 같다.

그림 4의 선간 어드미턴스가 없는 A,C 구간은 직병렬 임피던스들에 의해 식 (14)와 같이 전압, 전류 관계를 유도할 수 있으며 B구간은 병렬어드미턴스에 의해 전압, 전류 관계는 식 (15)와 같다.

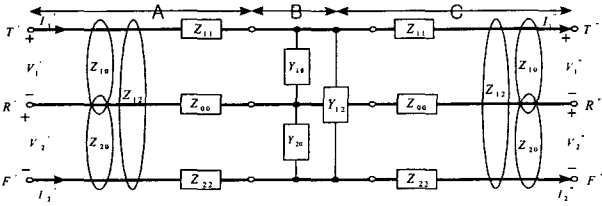


그림 4 전차선로 모델  
Fig. 4 Circuit Model for Catenary System

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & Z_{11}+Z_{00}-2Z_{10} & Z_{00}+Z_{12}-Z_{10}-Z_{20} \\ 0 & 1 & Z_{10}-Z_{00}-Z_{12}+Z_{20} & 2Z_{20}-Z_{00}-Z_{22} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ I_1'' \\ I_2'' \end{bmatrix} = M_Z \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ Y_{10}+Y_{12} & Y_{12} & 1 & 0 \\ -Y_{12} & -Y_{20}-Y_{12} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ I_1'' \\ I_2'' \end{bmatrix} = M_Y \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} \quad (15)$$

따라서 전체 전차선로의 전압, 전류 관계는 임피던스 및 어드미턴스 행렬의 곱으로 식 (16)처럼 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = M_Z \cdot M_Y \cdot M_Z \begin{bmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ I_1'' \\ I_2'' \end{bmatrix} = M_{LINE} \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} \quad (16)$$

3.1.3 병렬급전소용 단권변압기 등가모델

본 논문에서 대상으로 모델링한 급전시스템은 최근 건설되고 있는 경부고속전철을 모델로 하고 있기 때문에 급전변전소와 급전구분소 사이에는 병렬급전소가 설치된다. 이곳에 설치된 단권변압기는 전차선로의 중간에서 병렬로 접속되고 그 회로모델은 그림 5와 같다. 변전소측에서 본 PP용 단권변압기의 T-R간, R-F간 전압은 각각 구분소측에서 본 전압과 같다. AT의 전류분류특성과 내부임피던스를 고려하고 송수전단 전류관계를 식 (17)에 나타내었다.

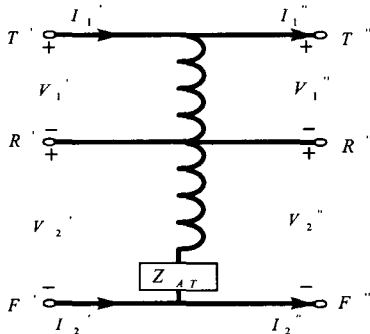


그림 5 PP용 단권변압기 모델  
Fig. 5 Circuit Model of AT in PP

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{Z_{AT}} & \frac{1}{Z_{AT}} & 1 & -2 \\ \frac{1}{Z_{AT}} & \frac{1}{Z_{AT}} & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ I_1'' \\ I_2'' \end{bmatrix} = M_{MidAT} \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} \quad (17)$$

3.1.4 차량의 고조파 전류원 모델링

철도급전시스템의 주된 고조파 전류원은 차량이고 차량에서 발생된 고조파는 그림 6과 같이 전차선로의 레일과 전차선 사이에서 주입되는 전류원으로 취급할 수 있다. 이 경우 차량의 고조파 전류원에 대한 6단자 등가모델은 다음 식 (18)로 표현할 수 있다.

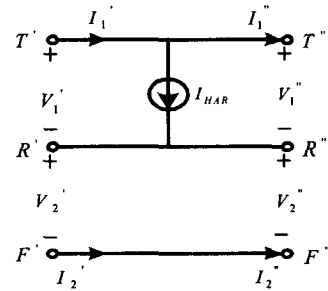


그림 6 고조파 전류원  
Fig. 6 Harmonic Current Source

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ I_1'' \\ I_2'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_{HAR} \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{I}_4 \cdot \begin{bmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ I_1'' \\ I_2'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_{HAR} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

3.1.5 변전소의 단권변압기 등가모델

변전소의 단권변압기는 그림 7과 같이 결선되고 1차/2차측의 전압전류 관계로 정리하면 식 (19)와 같이 2쌍의 식을 유도할 수 있다.

이들 수식은 3상계통 임피던스와 함께 다음절에서 유도할 전원계통 등가 모델에 직접 고려된다.

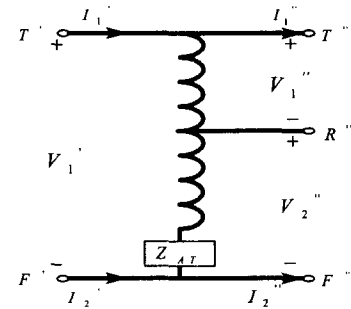


그림 7 변전소 단권변압기 모델  
Fig. 7 Circuit Model for AT in SS

$$(1) \begin{bmatrix} V_1' \\ I_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ I_1'' \\ I_2'' \end{bmatrix} \quad (19a)$$

$$(2) \begin{bmatrix} V_1' \\ I_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & \frac{Z_{AT}}{2} & \frac{Z_{AT}}{2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ I_1'' \\ I_2'' \end{bmatrix} \quad (19b)$$

3.1.6 전원계통 등가모델

전철 주변압기의 등가회로는 그림 8의 좌측 회로와 같이 전원과 등가 임피던스  $Z_S$  로 구성된 회로로 구성되며, 전원계통 등가임피던스를 포함한 회로망모델은 식 (20)으로 표현된다. 이 때 27.5kV 모선에서 전원계통을 바라본 등가임피던스  $Z_S$ 는 한전변전소 모선임피던스, 변전소까지의 송전선로 임피던스, 변전소의 스코트 변압기 임피던스, T상의 AT 변압기 임피던스를 모두 기준전압 27.5kV로 환산하여 합산한 것이다.

그림 8의 우측회로는 전원계통 등가임피던스와 그림 7의 단권변압기와의 접속을 나타낸다. 그림과 같이 의  $V_1'$ 에 식 (19a)와 (19b)를 식 (20)에 각각 대입하면 행렬  $M_{ZS}$ 는 식 (21)와 같이 유도된다.

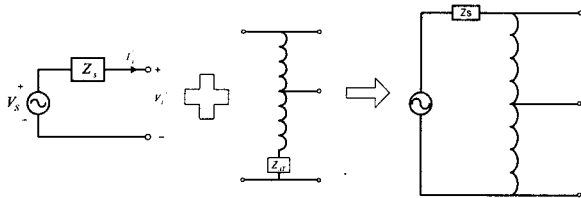


그림 8 전원계통 등가회로 모델  
Fig. 8 Equivalent circuit model for substation

$$V_S = [1 \quad Z_S] \cdot \begin{bmatrix} V_1' \\ I_1' \end{bmatrix} = M_{ZS} \cdot \begin{bmatrix} V_1'' \\ I_1'' \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} V_S \\ V_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \frac{Z_S}{2} & -\frac{Z_S}{2} \\ 2 & 0 & \frac{Z_{AT} + Z_S}{2} & \frac{Z_{AT} - Z_S}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ I_1'' \\ I_2'' \end{bmatrix} = M_{ZS} \cdot \begin{bmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ I_1'' \\ I_2'' \end{bmatrix} \quad (21)$$

3.2 고조파 해석 알고리즘

본 논문에서는 고조파 전류의 계통 과급효과를 평가하기 위하여 고조파 공진점에서의 고조파전류 확대율을 예측계산하는 방법을 제안한다. 이를 위해 3.1절에서 유도한 급전계통의 각 설비들의 등가회로모델 해석을 이용하여 전체 급전구간의 회로 해석을 시행한다. 즉, 각 설비요소의 등가회로

에 의한 행렬을 직렬결합한 식 (22)의 연립방정식을 풀면 구분소측의 단권변압기에 흐르는 고조파 전류 및 전압을 구할 수 있고, 이를 다시 역으로 행렬을 곱하게 되면 각 설비요소에 흐르는 고조파 전류 및 전압을 산출할 수 있게 되는 것이다. 이 계산과정은 관심대상 조파별로 반복계산한다. 이때, 전원계통의 내부전압은 고조파성분을 포함하지 않는 정전압원으로 가정한다. 따라서 기본파 이외의 조파에서는 전원계통의 내부전압은 단락회로로 해석한다.

$$\begin{bmatrix} V_S \\ V_S \end{bmatrix} = M_{ZS} \cdot M_{LINE} \cdot M_{AT} \cdots M_{LINE} \cdot M_{TRAIN} \cdot M_{LINE} \cdot M_{SP} \cdot \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_S \\ V_S \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} \quad (22)$$

4. 사례 연구

제안한 6단자망 모델에 의한 고조파 해석방법의 정확성을 검증하기 위해 경부고속전철 시험선구의 급전계통을 대상으로 사례연구를 실시하였으며, 모델의 정교함을 검증하기 위하여 실제 측정된 고조파전류와 4단자망 즉, RTRI의 방법에 의한 해석결과를 제안한 방법과 비교 검토하였다.

4.1 입력자료

본 논문에서는 대상 조파를 1~50조파로 선정하여 차량에서 발생한 고조파 전류의 공진점 및 확대율을 예측계산하였다. 이때, 대상 급전계통으로는 그림 9와 같은 경부고속전철 시험선구의 신청주 전철변전소의 급전데이터를 사용하였다. 아울러, 전차선로의 고조파 회로정수는 시험선구의 급전구간에서 실측한 값을 사용하였으며, 이에 대한 데이터는 문헌 [6-7]을 참고한다.

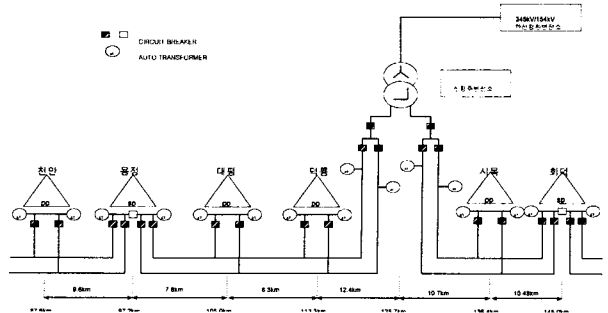


그림 9 경부고속철도 시험선구 급전시스템 구성도  
Fig. 9 AT-Fed System Configuration of Kyung-Bu High Speed Railway

4.2 6단자망 모델에 의한 고조파 예측 결과

시험선구를 운행하는 차량에서 발생한 고조파의 전파특성을 분석하기 위해 차량 1편성을 기준으로 급전회로에서의 고조파전류 및 그의 확대율을 계산하고 이를 그림 10과 11에 도시하였다. 그림 10은 보는 바와 같이 차량 1편성이 변

전소앞에 있을 때의 고조파 전류 확대율로서 급전선로 각 지점에서 실측한 데이터로 계산한 확대율, RTRI 해석법에 의한 것, 그리고 제안한 6단자망 모델로 해석한 고조파 전류 확대율을 나타낸 것이다. 이때, 고조파 확대율은 2장에서와 같이 차량의 고조파전류 발생량과 변전소에 유입되는 고조파전류의 비로 정의하였다.

그림 11은 차량의 위치에 따라 발생하는 고조파전류의 확대율을 나타낸 것으로서 각 차량 위치에서의 공진점을 보여 주고 있다. 즉, 25조파의 주파수에서 변전소에 유입되는 전류의 확대율이 최대가 되며 그 값은 차량의 위치에 따라 다르겠지만 약 6[p.u.]로 예측되었다. 이를 그림 10에서 보인 실측값 및 RTRI의 해석결과와 비교해보면 제안한 6단자망 모델에 의한 예측값이 실제측정값과 크기에 다소간의 차이는 있지만, 공진주파수의 고조파 차수 및 전 주파수 영역에서의 경향이 RTRI의 결과보다 우수함을 알 수 있다. 이는 앞서 3장의 서두에서도 언급하였지만 RTRI에서 제시한 방법은 전차선, 레일, 급전선 등의 도체군들로 구성된 전기철도 급전시스템을 4단자망, 즉, 두가지의 도체군(전차선과 레일 혹은 전차선과 급전선)으로 급전선로를 모델링하여 각 조파영역에서 각 지점의 전류들을 근사적으로 구하였기 때문에 고조파 전류의 시스템에 대한 영향도 정성적으로 해석이 되었기 때문이다.

한편, 그림 12는 급전선로의 길이에 따른 고조파전류 확대율을 도시한 것으로서 급전선로의 거리가 멀어질 수록 저차조파에서 공진이 일어나 신호계통의 주파수 대역에서 공진이 발생할 경우 신호 시스템의 오동작을 일으킬 수 있음을 보여준다.

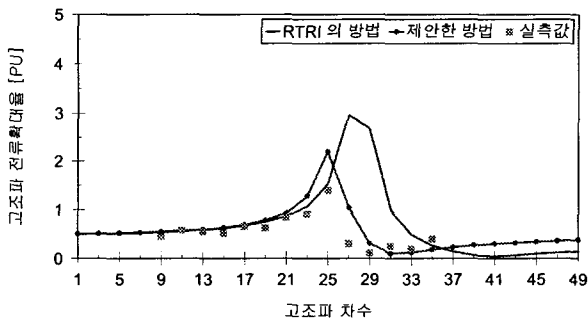


그림 10 제안한 해석방법의 정확성 검토(고조파 확대율)  
Fig. 10 Accuracy Examination of Harmonic Analysis

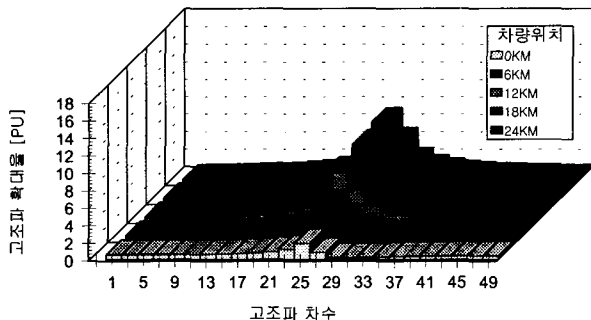


그림 11 차량의 위치에 따른 고조파 확대율  
Fig. 11 Amplification of Harmonic Current According to Location of Vehicle

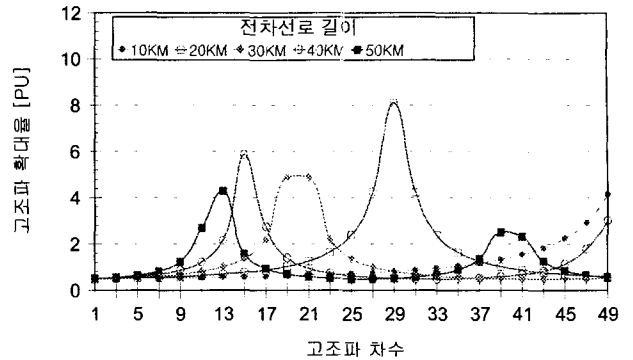


그림 12 급전선로의 길이에 따른 고조파전류 확대율  
Fig. 12 Amplification of Harmonic Current According to Length of Catenary

#### 4. 결 론

본 논문에서는 6단자망 모델에 의한 전철급전시스템의 고조파 해석방법을 수식화하고, 기존에 사용하던 해석법 및 실측값과의 비교를 통해 제안한 방법의 정밀성을 검증하였다. 결론은 다음과 같다.

- 고속철도차량의 운행으로 인하여 전철변전소로 유입되는 고조파를 정밀하게 예측하기 위해서, 일본 철도종합연구소(RTRI)에서 수행한 고조파 등가회로 모델, 공진주파수, 고조파 공진에 따른 전류확대율 계산방법에 대하여 정밀 검토하였다.
- 일본 철도종합연구소에서 수행한 고조파 해석방법의 단점을 보완하기 위해, 본 연구에서는 6단자망에 의한 회로요소 모델과 해석모형을 수립하였다. 제안한 모델을 이용하여 경부고속전철 시험선구를 대상으로 고조파 확대율을 계산하여 검토하였으며, 그 결과 기존의 4단자망 해석에 의한 고조파 해석법보다 공진 주파수 및 각 차수에 따른 고조파 전류 및 확대율의 경향이 좀더 실제값에 근접함을 알 수 있었다.
- 급전선로의 거리가 길어지면 고조파 공진은 저차조파에서 발생되어 신호계통에의 영향을 줄 수 있기 때문에 연장급전시 혹은 급전선로 계획변경시에는 고조파 공진점에 초점을 두고 검토할 필요가 있다.

본 논문에서는 기존의 방법보다 정교하며, 정량적인 해석을 도모함으로써, 급전시스템 및 고조파 대책설비 운영 및 계획단계에서 고조파에 의한 영향을 최소화할 수 있는 방안을 마련하는데 기여할 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

[1] Sanghoon. Chang, Junmin Cha, Kwanghae Oh, "Assessment of Autotransformer-Fed Electric Traction Systems using Thevenin's Equivalent Circuit", Proceedings of ICEE, Vol. 1, 1998. 7.  
[2] Ronald J. Hill and Ibrahim H. Cevik, "On-Line Simulation

of Voltage Regulation in Autotransformer-Fed AC Electric Railroad Traction Networks", IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol.42, No.3, 1993, 8.

- [3] B. A. Ross, "Meeting Tomorrow's Railroad Power Requirements ", IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-90, No.2, 1971, 3.
- [4] Joachim Holtz et. al., "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, 4.
- [5] Yoshifumi Mochinaga, "Higher Harmonics Resonance on AT Feeding Circuit and Countermeasures to Suppress it", T.IEE Japan, Vol. 114-D, No. 10, 1994.
- [6] "고속전철 서울-대전구간 고조파 불평형 역률 예측계산 및 대책설계 ", 한국철도기술연구원, 2000.12.
- [7] 한국고속철도건설공단, 경부고속철도 시험선구 전력설비 일부 실시설계 중간보고서, 1992. 12,
- [8] Joachim Holtz and Heinz-jürgen 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, pp.168~174, 1989
- [9] A. Bonner, T.Grebe, E.Gunther, L.Hopkins, "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, January 1996
- [10] A. Bonner, T.Grebe, E.Gunther, L.Hopkins, "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, January 1996
- [11] 김양수, 유해출, 전기철도공학, 통일출판사, pp. 75 4~763, 1999

## 저 자 소 개



### 창 상 훈 (倉 相 勳)

1961년 3월 28일생. 1982년 한국철도대학 철도전기과 졸업. 2002년 홍익대 대학원 전기정보제어공학과 졸업(공학). 현재 한국철도기술연구원 전기신호연구본부장(전기철도기술사).

Tel : (031) 461-85301 (600)

Fax : (031)461-8374

E-mail : shchang@krri.re.kr



### 오 광 해 (吳 廣 海)

1968년 4월 10일생. 1990년 고려대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한국철도기술연구원 철도전기연구팀 선임연구원

Tel : (031) 461-85301 (188)

Fax : (031) 461-8374

E-mail : khoh@krri.re.kr



### 김 주 락 (金 周 箒)

1974년 3월 22일생. 1997년 홍익대 전자전기제어공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기제어공학과 졸업(석사). 현재 한국철도기술연구원 철도전기연구팀 주임연구원.

Tel : (031) 461-85301 (228)

Fax : (031) 461-8374

E-mail : jrkim@krri.re.kr



### 김 정 훈 (金 正 勳)

1955년 9월 13일생. 1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 1981년~현재 홍익대학교 전자전기공학부 교수. 현 대한전기학회 사업이사 및 용어위원회 위원장.

Tel : (02) 320-1621

Fax : (02) 320-1110

E-mail : kimjh@wow.hongik.ac.kr