

**철도 전력공급시스템에서의 고조파전류 확대현상에 관한 연구**

오 광 해    창 상 훈    한 문 섭    이 장 무    신 한 순  
한국철도기술연구원

**A Study on the Propagation of Harmonic Current in the Traction Power Supply System**

K.H. Oh    S.H. Chang    M.S. Han    C.M. Lee    H.S. Shin  
Korea Railroad Research Institute

**Abstract** - Modern AC electric car has PWM(Pulse Width Modulation)-controlled converters, which give rise to higher harmonics. The current harmonics injected from AC electric car is propagated through power feeding circuit. As the feeding circuit is a distributed constant circuit composed of RLC, the capacitance of the feeding circuit and the inductance on the side of power system cause a parallel resonance and a magnification of current harmonics at a specific frequency.

The magnified current harmonics usually brings about various problems. That is, the current harmonics makes interference in the adjacent lines of communications and the railway signalling system. Furthermore, in case it flows on the side of power system, not only overheating and vibration at the power capacitors but also wrong operation at the protective devices can occur.

Therefore, the exact assessment of the harmonic current flow must be undertaken at design and planning stage for the electric traction systems.

From these point of view, this study presents an approach to model and to analyse traction power feeding system focused on the amplification of harmonic current. The proposed algorithm is applied to a standard AT(Auto-transformer)-fed test system in which electric car with PWM-controlled converters is running.

시킬 우려가 있다. 따라서 신설 철도노선의 건설계획 단계에서는 급전시스템의 고조파 문제를 정밀하게 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 철도부하에 의한 발생된 고조파 전류의 파급특성에 주안점을 두고, 그 발생 원인을 규명하고 이를 해석하기 위한 방법을 다룬다. 아울러 PWM(Pulse Width Modulation) 차량이 운행되고 있는 AT급전시스템을 대상으로 고조파확대율을 계산하고 공진특성에 대한 일반적 경향을 도출하였다.

**2. 교류 전철 급전계통**

교류 전기철도는 통상 단상 25kV/50kV 급전방식에 기초를 두고 있으며 단상의 대용량 전력을 공급 받기 위해서는 3상 전력계통과 연계되어야 한다. 이를 위해 철도 교류급전회로는 그림 1.과 같이 전철변전소의 스크트변압기에 의해 단상으로 변환된 전력을 급전선, 전차선, 레일에 통해 차량에 공급한다. 단권변압기는 10km 정도의 간격으로 설치되며 이곳에 상하행선을 연결하는 개폐기가 함께 설치된다. 변전소와 변전소의 거리는 약 50km이고 중간지점은 양쪽 변전소의 전압위상이 다르기 때문에 개폐설비로써 전기적으로 구분하여(급전구분소; SP) 운전하고 있는데 이것은 변전소 고장시 인근 변전소에서 연강급전을 하기 위해 연결해 주는 역할도 한다.

**1. 서 론**

전기철도에서는 전원계통으로부터 전력을 수전받아 전철급전계통을 통하여 차량의 구동을 위해 필요한 전력을 공급한다. 전철급전계통에는 변압기, 전차선, 급전선, 레일 및 보호선등 일련의 수송설비와 이들을 유기적으로 결합시키고 효율적으로 운용, 관리하기 위한 운용설비가 포함된다. 이러한 전철급전계통은 일반 전력계통에 비해 부하의 특성이나 계통구성 형태 및 제반 현상측면에서 상이한 특징을 가진다. 특히, 최근에 도입된 전철구동시스템에는 컨버터와 인버터가 포함되어 있으며 위상제어 및 펄스폭 변조방식에 의하여 제어되기 때문에 고조파를 발생시킨다.

차량에서 발생된 고조파전류는 급전계통의 임피던스 특성에 의해 특정 조파에서 공진되어 고조파전류 확대현상을 일으켜 각종 문제를 야기시킨다. 즉, 고조파전류는 인접통신선에의 유도장해를 일으키고 철도신호장해의 원인이 될 뿐만 아니라 전원계통에 유입되는 경우에는 전력용콘덴서의 과열/진동을 유발시키고 보호계전기를 오동작

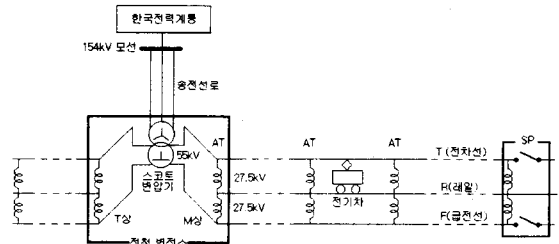


그림 1. AC 급전계통

고려대상 구간을 정의하기 위해, 전철 변전소의 M상에서의 전원 임피던스를  $Z_{ss}$ 로 두고 차량을 고조파전류원으로 하면, M상측에 대한 고조파 등가회로는 그림 2.와 같다. 차량 양단 이외에 위치한 단권변압기에서는 전류가 매우 작으므로 이들 단권변압기는 등가회로에서 무시하였다. 굵은 실선은 분포정수회로임을 표시한 것이며 X1, X2는 차량-AT사이의 거리, L1, L2는 각각 변전소-AT, AT-급전구분소까지의 거리를 나타낸 것이다.

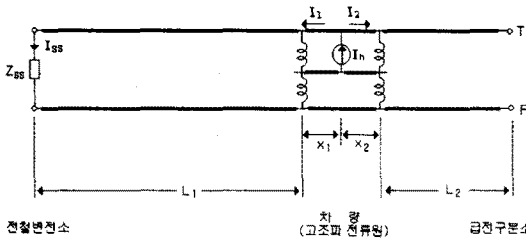


그림 2. M상측의 고조파 등가회로

### 3. 고조파 해석

전철 변전소로 유입되는 고조파에 주안점을 두고 차량에서 발생된 고조파 전류에 대한 공간현상을 해석한다. 이를 위해서 그림 2.의 등가회로에 대한 선로정수를 4단자정수로 표현하였다. 고조파 전류원은 양쪽 단권변압기의 2차측(T-R)에 각각 접속되어있고 단권변압기의 1차측(T-F)은 급전선을 통하여 연결되어 있으므로 4단자정수에 의한 임피던스 다이어그램은 그림 3.으로 표현된다.

이때  $[A,B,C,D]_{TF1}$ ,  $[A,B,C,D]_{TF2}$ ,  $[A,B,C,D]_{TF}$ 는 T-F간의 4단자 분포회로정수를 표시한 것이고  $[A,B,C,D]_{TR1}$ ,  $[A,B,C,D]_{TR2}$ 는 T-R간의 4단자 분포회로정수를 표시한 것이며  $[A,B,C,D]_{AT}$ 는 단권변압기의 임피던스를 포함한 1/2차측 전압전류관계를 4단자정수로 나타낸 것이다.

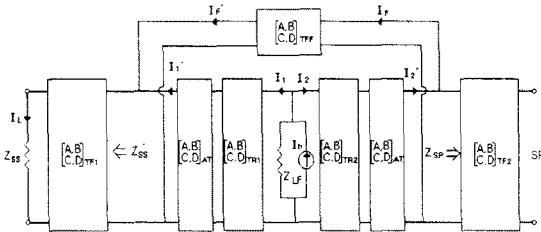


그림 3. 4단자정수에 의한 임피던스 다이어그램

전철 변전소로 유입되는 고조파 전류  $I_L$ 을 계산하기 위한 수식유도과정은 다음과 같다.

먼저, 그림 3.의 AT 구간에서 변전소측을 바라본 임피던스  $Z_{SS}'$ 는 식 (1)로 계산된다.

$$\begin{aligned} Z_{SS}' &= \frac{Z_{SS}A_{TF1} + B_{TF1}}{Z_{SS}C_{TF1} + D_{TF1}} \\ &= Z_{0TF} \frac{Z_{SS} \cosh \gamma_{TF} L_1 + Z_{0TF} \sinh \gamma_{TF} L_1}{Z_{SS} \sinh \gamma_{TF} L_1 + Z_{0TF} \cosh \gamma_{TF} L_1} \end{aligned} \quad (1)$$

또한 AT 구간에서 급전구분소측을 바라본 임피던스  $Z_{SP}$ 는 식 (2)로 계산된다.

$$\begin{aligned} Z_{SP} &= \frac{A_{TF2}}{C_{TF2}} \\ &= Z_{0coth} \gamma_{TF} L_2 \end{aligned} \quad (2)$$

그림 3.의 AT구간에서 차량 원편의 T-R간 4단자는

식 (3)의 관계가 성립되며, 차량 오른쪽의 T-R간 4단자에 대해서는 식 (4)가 성립한다.

$$\begin{bmatrix} Z_{LF}(I_n - I_1 - I_2) \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{A}_{TR1} & \hat{B}_{TR1} \\ \hat{C}_{TR1} & \hat{D}_{TR1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{SS}'(I_1' + I_F') \\ I_1' \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{여기서, } \begin{bmatrix} \hat{A}_{TR1} & \hat{B}_{TR1} \\ \hat{C}_{TR1} & \hat{D}_{TR1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{TR1} & B_{TR1} \\ C_{TR1} & D_{TR1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{AT} & B_{AT} \\ C_{AT} & D_{AT} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Z_{LF}(I_n - I_1 - I_2) \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{A}_{TR2} & \hat{B}_{TR2} \\ \hat{C}_{TR2} & \hat{D}_{TR2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{SP}(I_2' - I_F) \\ I_2' \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{여기서, } \begin{bmatrix} \hat{A}_{TR2} & \hat{B}_{TR2} \\ \hat{C}_{TR2} & \hat{D}_{TR2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{TR2} & B_{TR2} \\ C_{TR2} & D_{TR2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{AT} & B_{AT} \\ C_{AT} & D_{AT} \end{bmatrix}$$

한편 AT 구간에서 T-F간의 4단자에 대해서는 식 (5)의 전압/전류 관계가 성립한다.

$$\begin{bmatrix} Z_{SP}(I_2' - I_F) \\ I_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{TF} & B_{TF} \\ C_{TF} & D_{TF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{SS}'(I_1' + I_F') \\ I_F' \end{bmatrix} \quad (5)$$

이제 식 (3)~식 (5)는 다음식 (6)의 6×6 연립방정식으로 정리되고, 식 (6)의 연립방정식으로부터 각부분에 흐르는 고조파전류  $I_1, I_1', I_2, I_2', I_F, I_F'$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} Z_{SS}' \hat{A}_{TR1} + \hat{B}_{TR1} & Z_{LF} & 0 & 0 & 0 & Z_{LF} \\ Z_{SS}' \hat{C}_{TR1} + \hat{D}_{TR1} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{LF} & Z_{SP} \hat{A}_{TR2} + \hat{B}_{TR2} & Z_{LF} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{SP} \hat{C}_{TR2} + \hat{D}_{TR2} & -1 & 0 & 0 \\ Z_{SS}' A_{TF} & 0 & -Z_{SP} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{SS}' C_{TF} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_1' \\ I_2 \\ I_2' \\ I_F \\ I_F' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{LF} I_n \\ 0 \\ Z_{LF} I_n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

결국, 변전소측으로 유입되는 전류  $I_L$ 는 4단자정수  $C_{TF1}, D_{TF1}$ 와 전류  $I_1', I_F'$ 와의 관계로부터 다음 식 (7)과 같이 계산된다.

$$I_L = \frac{I_1' + I_F'}{Z_{SS} C_{TF1} + D_{TF1}} \quad (7)$$

### 4. 적용 사례

본 연구에서 제시한 고조파 해석방법의 유용성을 검증하기 위해 문헌<sup>[2]</sup>을 참고로 한 가상 전철급전제통에 대하여 사례연구를 실시하였다.

#### 4.1 입력 자료

3상 전원계통 및 철도급전계통에 대한 입력자료를 표 1에 보인다.

또한, PWM 차량에서 발생되는 고조파전류에 대한 전형적인 패턴은 그림 4.와 같다.

표. 1 계통 입력자료

구분	기호	값
전원 및 변전소	$Z_{SS}$	전원 및 변압기 임피던스 $(0.00783 * F + 0.109) + j(0.0434 * f + 3.618) [\Omega]$ 직렬 콘덴서 : $1.77E-4 [F]$
전차선로	$[A, B, C, D]_{TF}$	직렬임피던스 $(0.000741 * f + 0.6556) + j(0.00648 * f + 2.6111) [\Omega/km]$ 병렬어드미턴스 $j(f * 3.85E-8) [S/km]$
	$[A, B, C, D]_{TR}$	직렬임피던스 $(0.19) + j(0.0092 * f) [\Omega/km]$ 병렬어드미턴스 $j(6.9 * f * E-8) [S/km]$
단권 변압기	$[A, B, C, D]_{AT}$	변압기 임피던스 $j(0.4 * f) [\Omega]$
차량 필터	$Z_{LF}$	$R : 0.043 [\Omega]$ $L : 0.0018 [H]$ $C : 0.00043 [F]$

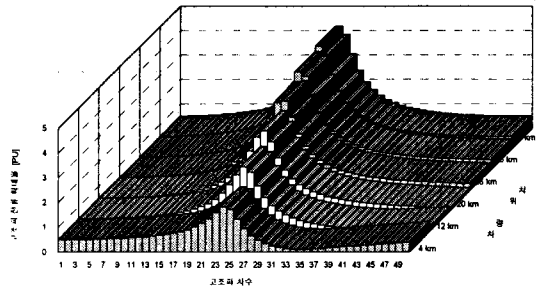


그림 5. 차량 위치에 따른 고조파 확대현상

그림 6.은 급전시스템의 구간길이가 고조파 공진에 미치는 영향을 분석한 결과이다. 그림에서 급전선로의 길이가 길수록 고조파 공진은 저차조파에서 발생되며 그 크기는 다소 감소한다. 따라서 기존노선의 연장급전시 혹은 신설노선의 급전선로 계획시에는 고조파문제를 더욱 세밀하게 검토하여야 할 것으로 사료된다.

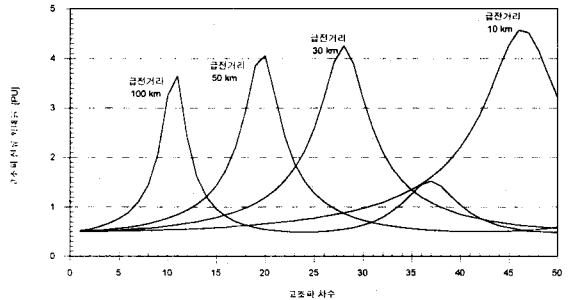


그림 6. 급전거리와 고조파공진과의 상관성

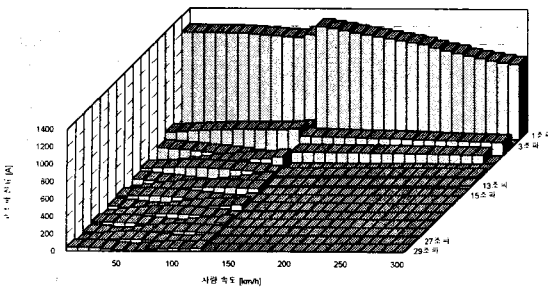


그림 4. 차량의 고조파전류 발생량

#### 4.2 계산 결과

차량에서 발생한 고조파의 전파특성을 분석하기 위해 급전구간이 50 km인 경우에 있어서 차량의 위치에 따른 고조파전류 확대율을 계산하고 이를 그림 5.에 도시하였다. 이때 고조파확대율은 차량의 고조파전류 발생량과 변전소에 유입되는 고조파전류의 비로 정의하였다.

이경우의 공진점(공진주파수)은 차량의 위치에 따라 23~25조파 사이에서 발생하며 공진점에서의 고조파확대율은 차량이 변전소로부터 멀수록(급전구분소에 가까워질수록) 커진다. 이러한 현상은 종래의 연구[1][2] 결과와 일치하는 것이며, 또한 고조파의 억제대책으로써 RC 뱅크를 급전구분소에 설치해야하는 이론적 배경이된다.

#### 5. 검토 및 고찰

본 연구에서는 철도부하에 의한 발생된 고조파 전류의 파급특성에 주안점을 두고, 그 발생 원인을 규명하고 이를 해석하기 위한 방법을 제시하였으며, AT급전시스템을 대상으로 고조파확대율을 계산하고 공진특성에 대한 일반적 경향을 다음과 같이 도출하였다.

- 1) 급전선로의 길이가 일정한 경우, 공진점(공진주파수)은 차량의 위치에 관계없이 거의 변함이 없다.
- 2) 급전선로의 길이가 일정한 경우, 공진점에서의 고조파확대율은 차량이 변전소로부터 멀수록(구분소에 가까울 수록) 커진다.
- 3) 급전선로의 거리가 길수록 고조파 공진은 저차조파에서 발생되며 그 크기는 다소 감소한다.

#### [참고 문헌]

- [1] Yoshifumi Mochinaga, "Higher Harmonics Resonance on AT Feeding Circuit and Countermeasures to Suppress it", T.IEE Japan, Vol. 114-D, No. 10, 1994
- [2] 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, 1989