

## 전기철도에서의 고조파 발생과 계통응답특성(I) - 계통응답특성을 중심으로 -

### Harmonic Generation and System Response Characteristics in Electrified Railway(I) - Focused on System Response Characteristics -

오광해<sup>1</sup> · 이장무<sup>2</sup>

Kwang-Hae Oh · Chang-Mu Lee

#### Abstract

Harmonic current originating from electric locomotives can be magnified due to the impedance characteristics of power supply circuit and bring about various problems. That is, electromagnetic interference with communication lines, operational trouble in signaling, overheat and/or vibration in power capacitor, mis-operation in protection relay and so on. Therefore, the exact assessment of the harmonic current flow must be undertaken at design and planning stage for the electric traction systems. For these reasons, this study propose a new approach to model and to analyse traction power feeding system focused on system response to current and voltage harmonic(PART I). Measurements of harmonics are also performed for railway power supply systems under normal operation. Spectrum and distortion analyses in measurement data are variously described in PART II.

**Keywords** : Electrified Railway System, Harmonic Generation, Harmonic Analysis

## 1. 서론

전기철도의 차량에서 발생된 고조파전류는 급전계통의 임피던스 특성에 의해 특정 조파에서 공진되어 고조파전류 확대현상을 일으켜 각종 문제를 야기시킨다. 즉, 고조파전류는 인접통신선의 유도장애를 일으키고 철도신호장애의 원인이 될 뿐만 아니라 전원계통에 유입되는 경우에는 전력용콘덴서의 과열/진동을 유발시키고 보호계전기를 오동작 시킬 우려가 있다. 이에 신설 철도노선의 건설계획 단계에서는 급전시스템의 고조파 문제를 정밀하게 평가할 필요가 있다. 따라서, 본 연구자들은 전기철도의 표준 AT급전시스템의 고조파 응답특성을 단차망 이론을 적용하여 밝혀내고(I편), 실제 전기철도에서 발생하는 고조파를 운전상황에 따라 측정하고 이를 정량적으로 분

석하였다(II편).

## 2. 단차망 모델

본 연구에서는 철도 급전시스템에서 고조파 회로를 구성하는 각 요소를 다음과 같은 단차망모델을 이용하여 표현하였다.

### 2.1 급전구분소의 단권변압기

전차선로의 말단에 위치한 구분소 단권변압기(그림 1)은 1:1 권수비에 의해, 상하선 단권변압기의 전차선과 중성점 사이의 전압을  $V_1$ ,  $V_2$ 라고 하면 각각의 급전선과 레일사이의 전압은  $-V_1$ ,  $-V_2$ 가 된다. 또한 단권변압기로 유입되는 상하선 전차선으로 부터 단권변압기로 유입되는 전류를 각각  $I_1$ ,  $I_2$ 라고 하면 상하선의 피이더로부터 유입되는 전류도 각각  $I_1$ ,  $I_2$ 가 된다.

1 산업자원부 기술표준원 공업연구원

2 한국철도기술연구원 전력계통그룹, 선임연구원



$$\begin{bmatrix} V_{T1} \\ V_{F1} \\ V_{T2} \\ V_{F2} \\ \dots \\ I_{T1} \\ I_{F1} \\ I_{T2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & & 1 \\ & & & & & 1 \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{T1} \\ V_{F1} \\ V_{T2} \\ V_{F2} \\ \dots \\ I_{T1} \\ I_{F1} \\ I_{T2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ I_H \\ \dots \\ I_{H2} \end{bmatrix} = [M_1] \begin{bmatrix} V'_{T1} \\ V'_{F1} \\ V'_{T2} \\ V'_{F2} \\ \dots \\ I'_{T1} \\ I'_{F1} \\ I'_{T2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix} - [M_{harmonic}] \quad (4)$$

**2.5 전원 계통**

단상의 대용량 전철전력을 공급 받기 위해서는 3상 전력 계통과 연계되어야 한다. 이를 위해 철도 교류급전회로는 보통 스코트변압기에 의해 단상으로 변환된 전력을 급전선, 전차선, 레일에 의해 차량에 공급한다. 이러한 급전용 스코트 변압기는 3상을 2상으로 변환하고 있기 때문에 일반적으로 3상 용량의 1/2이 2차측 단상용량이 된다. 이 경우 M상 또는 T상의 임피던스  $Z_{TR}$ 은 다음식으로 구한다.

$$Z_{TR} = \%Z_{TR} \frac{10 \cdot V^2}{P_{TR}/2} \quad [\Omega] \quad (5)$$

여기서,  $Z_{TR}$  : 스코트 변압기의 M상 또는 T상 임피던스  $[\Omega]$ ,

- $\%Z_{TR}$  : 스코트 변압기의 % 임피던스
- V : 기준전압(55kV) [kV],
- $P_{TR}$  : 스코트변압기의 3상 용량 [KVA]

또한 급전측으로 환산한 전원 임피던스는 2배로 고려되므로 M상 등가부하는  $Z_M = 2Z_S + Z_{TR}$ , T상 등가부하는  $Z_T = 2Z_S + Z_{TR}$ 가 된다. 여기서  $Z_S$ 는 전원측 등가 임피던스가 되고  $Z_{TR}$ 은 스코트 변압기의 M상 또는 T상 임피던스가 된다. 따라서 전원 및 주변압기 등가회로도 M상(또는 T상)측에서 본 전원계통의 등가회로도 나타내면 그림 5와 같고 급전측 전압, 전류관계는 식 (6)으로 정리된다.

$$\begin{aligned} E_M &= V' + Z_M I' \\ E_T &= V' + Z_T I' \end{aligned} \quad (6)$$

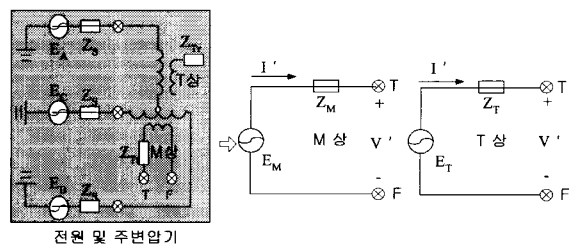


그림 5. 급전측에서 본 전원계통의 등가회로

여기서,  $E_M(E_T)$  : M상(또는 T상)측에서 본 전원계통의 급전측전압[V]

$I_M(I_T)$  : M상(또는 T상)측에서 본 전원계통의 급전측전류[A]

$Z_M(Z_T)$  : M상(또는 T상) 등가 임피던스 $[\Omega]$

$V'$  : M상(또는 T상)측 전철전력계통에 공급되는 전압[V]

한편, 변전소의 단권변압기는 그림 6과 같이 변전소 급전측의 모선에 상하선 단권변압기가 공통 접속되어 있다. 권수비 1:1인 변전소 단권변압기에 대한 전압-전류 관계식을 전원계통측의 전압-전류관계식에 대입함으로써 전원계통과 변전소의 단권변압기를 포함한 단자망 행렬  $[M_{ss}]$ 를 식 (7)과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} E_M \\ E_M \\ E_M \\ E_M \\ \dots \\ I_{T1} \\ I_{F1} \\ I_{T2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & A & B & A & B \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \dots & A & B & A & B \\ 2 & 0 & 0 & 0 & \dots & C & D & C & D \\ 0 & 0 & 2 & 0 & \dots & C & D & C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{T1} \\ V'_{F1} \\ V'_{T2} \\ V'_{F2} \\ \dots \\ I'_{T1} \\ I'_{F1} \\ I'_{T2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix} = [M_{ss}] \begin{bmatrix} V'_{T1} \\ V'_{F1} \\ V'_{T2} \\ V'_{F2} \\ \dots \\ I'_{T1} \\ I'_{F1} \\ I'_{T2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

- 여기서,  $A = \frac{1}{2}Z_M$
- $B = -\frac{1}{2}Z_M$
- $C = \frac{1}{2}Z_M + Z_{AT}$
- $D = -\frac{1}{2}Z_M + Z_{AT}$

**3. 상하선 Tie 고려하기 위한 등가축약모델**

위의 2절에서는 상하Tie가 없는 표준AT 급전시스템에 대한 단자망 모델을 다루었다. 이 경우의 가장 일반적인 단자망 모델은 그림 7과 같이 회로의 임피던스, 어드미턴스와 함께 고조파 전원이 포함된 요소이다. 이 요소에 대한 수식적

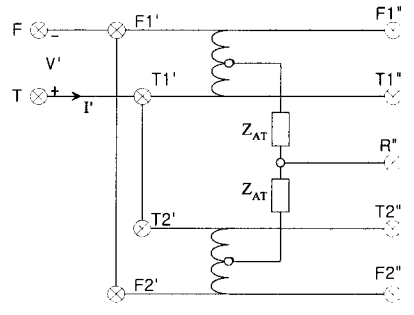


그림 6. 변전소의 단권변압기

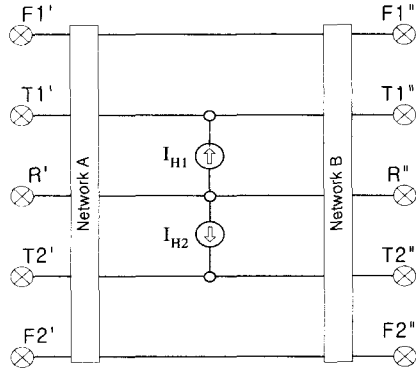


그림 7. 일반적인 단자망 모델

표현은 식 (8)으로 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{T1}' \\ V_{F1}' \\ V_{T2}' \\ V_{F2}' \\ I_{T1}' \\ I_{F1}' \\ I_{T2}' \\ I_{F2}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} & a_{28} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & a_{37} & a_{38} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & a_{47} & a_{48} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & a_{57} & a_{58} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} & a_{67} & a_{68} \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & a_{74} & a_{75} & a_{76} & a_{77} & a_{78} \\ a_{81} & a_{82} & a_{83} & a_{84} & a_{85} & a_{86} & a_{87} & a_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{T1}'' \\ V_{F1}'' \\ V_{T2}'' \\ V_{F2}'' \\ I_{T1}'' \\ I_{F1}'' \\ I_{T2}'' \\ I_{F2}'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_{H1} \\ 0 \\ I_{H2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

본 3절에서는 경부고속철도에서 적용되고 있는 상하선 Tie 방식으로 적용하기 위해 식을 유도 하였다. 그림 7에서 상하선의 전차선(T)과 급전선이 각각 Tie접속된 경우에는  $V_{T1}' = V_{T2}'$ ,  $V_{F1}' = V_{F2}'$ ,  $V_{T1}'' = V_{T2}''$ ,  $V_{F1}'' = V_{F2}''$  인 전압조건과  $I_T' = I_{T1}' + I_{T2}'$ ,  $I_F' = I_{F1}' + I_{F2}'$ ,  $I_T'' = I_{T1}'' + I_{T2}''$ ,  $I_F'' = I_{F1}'' + I_{F2}''$  인 전류조건이 만족되어야 한다. 이러한 Tie 조건에 의거하여 위의 행렬관계식 (8)을 재구성함으로써 새로운 축약행렬 식은 식 (9)와 같이 유도되었다.

$$\begin{bmatrix} V_T' \\ V_F' \\ I_T' \\ I_F' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a_{31} + a_{33}) + d_{11}(a_{37} - a_{35}) + d_{21}(a_{38} - a_{36}) \\ (a_{41} + a_{43}) + d_{11}(a_{47} - a_{45}) + d_{21}(a_{48} - a_{46}) \\ (a_{51} + a_{71}) + (a_{53} + a_{73}) + d_{11}(a_{57} + a_{77} - a_{55} - a_{75}) + d_{21}(a_{58} + a_{78} - a_{56} - a_{76}) \\ (a_{61} + a_{81}) + (a_{63} + a_{83}) + d_{11}(a_{67} + a_{87} - a_{65} - a_{85}) + d_{21}(a_{68} + a_{88} - a_{66} - a_{86}) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} (a_{32} + a_{34}) + d_{12}(a_{37} - a_{35}) + d_{22}(a_{38} - a_{36}) \\ (a_{42} + a_{44}) + d_{12}(a_{47} - a_{45}) + d_{22}(a_{48} - a_{46}) \\ (a_{52} + a_{72}) + (a_{54} + a_{74}) + d_{12}(a_{57} + a_{77} - a_{55} - a_{75}) + d_{22}(a_{58} + a_{78} - a_{56} - a_{76}) \\ (a_{62} + a_{82}) + (a_{64} + a_{84}) + d_{12}(a_{67} + a_{87} - a_{65} - a_{85}) + d_{22}(a_{68} + a_{88} - a_{66} - a_{86}) \\ a_{35} + d_{13}(a_{37} - a_{35}) + d_{23}(a_{38} - a_{36}) \\ a_{45} + d_{13}(a_{47} - a_{45}) + d_{23}(a_{48} - a_{46}) \\ (a_{55} + a_{75}) + d_{13}(a_{57} + a_{77} - a_{55} - a_{75}) + d_{23}(a_{58} + a_{78} - a_{56} - a_{76}) \\ (a_{65} + a_{85}) + d_{13}(a_{67} + a_{87} - a_{65} - a_{85}) + d_{23}(a_{68} + a_{88} - a_{66} - a_{86}) \\ a_{36} + d_{14}(a_{37} - a_{35}) + d_{24}(a_{38} - a_{36}) \\ a_{46} + d_{14}(a_{47} - a_{45}) + d_{24}(a_{48} - a_{46}) \\ (a_{56} + a_{76}) + d_{14}(a_{57} + a_{77} - a_{55} - a_{75}) + d_{24}(a_{58} + a_{78} - a_{56} - a_{76}) \\ (a_{66} + a_{86}) + d_{14}(a_{67} + a_{87} - a_{65} - a_{85}) + d_{24}(a_{68} + a_{88} - a_{66} - a_{86}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_T'' \\ V_F'' \\ I_T'' \\ I_F'' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_{35} - c_{11}(a_{37} - a_{35}) - c_{21}(a_{38} - a_{36}) \\ b_{45} - c_{11}(a_{47} - a_{45}) - c_{21}(a_{48} - a_{46}) \\ b_{55} + b_{75} - c_{11}(a_{57} + a_{77} - a_{55} - a_{75}) - c_{21}(a_{58} + a_{78} - a_{56} - a_{76}) \\ b_{65} + b_{85} - c_{11}(a_{67} + a_{87} - a_{65} - a_{85}) - c_{21}(a_{68} + a_{88} - a_{66} - a_{86}) \\ b_{37} - c_{12}(a_{37} - a_{35}) - c_{22}(a_{38} - a_{36}) \\ b_{47} - c_{12}(a_{47} - a_{45}) - c_{22}(a_{48} - a_{46}) \\ b_{57} + b_{77} - c_{12}(a_{57} + a_{77} - a_{55} - a_{75}) - c_{22}(a_{58} + a_{78} - a_{56} - a_{76}) \\ b_{67} + b_{87} - c_{12}(a_{67} + a_{87} - a_{65} - a_{85}) - c_{22}(a_{68} + a_{88} - a_{66} - a_{86}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{H1} \\ I_{H2} \end{bmatrix}$$

여기서,

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} (a_{28} - a_{48}) - (a_{26} - a_{46}) & (a_{16} - a_{36}) - (a_{18} - a_{38}) \\ (a_{25} - a_{45}) - (a_{27} - a_{47}) & (a_{17} - a_{37}) - (a_{15} - a_{35}) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} b_{15} - b_{35} & b_{17} - b_{37} \\ b_{25} - b_{45} & b_{27} - b_{47} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} \end{bmatrix} = -\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} (a_{28} - a_{48}) - (a_{26} - a_{46}) & (a_{16} - a_{36}) - (a_{18} - a_{38}) \\ (a_{25} - a_{45}) - (a_{27} - a_{47}) & (a_{17} - a_{37}) - (a_{15} - a_{35}) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} (a_{11} + a_{13}) - (a_{31} + a_{33}) & (a_{12} + a_{14}) - (a_{32} + a_{34}) & (a_{15} - a_{35}) & (a_{16} - a_{36}) \\ (a_{12} + a_{14}) - (a_{32} + a_{34}) & (a_{22} + a_{24}) - (a_{42} + a_{44}) & (a_{25} - a_{45}) & (a_{26} - a_{46}) \end{bmatrix}$$

$$\Delta = (a_{17} - a_{37} - a_{15} + a_{35})(a_{28} - a_{48} - a_{26} + a_{46}) - (a_{18} - a_{38} - a_{16} + a_{36})(a_{27} - a_{47} - a_{25} + a_{45}) \quad (9)$$

#### 4. 시스템의 고조파 응답특성 해석

전차선로의 커패시티브 리액턴스와 전원계통의 인덕티브 리액턴스와의 병렬공진으로 인한 고조파 응답특성을 고조파 전류확대율 지표로서 표현하도록 하였다. 즉, 주파수별 고조파 응답특성 지수  $m(k)$ 를 차량 발생 고조파 전류에 대한 변전소 유입 고조파 전류의 비로 정의하고 각각을 구한 후 그 확대 배율을 식 (10)과 같이 계산하였다.

$$m(k) = \frac{I_{ss}(k)}{I_{panto}(k)} \quad (10)$$

여기서,  $m(k)$  :  $k$ 차 조파에 대한 급전시스템의 고조파 응답특성

$I_{panto}(k)$  : 철도차량에서 발생한  $k$ 차 고조파 전류의 실효치 [A]

$I_{ss}(k)$  : 변전소로 유입되는  $k$ 차 고조파 전류의 실효치 [A]

식 (10)에서 변전소로 유입되는  $k$ 차 고조파 전류의 실효치  $I_{ss}(k)$ 는 다음과 같은 계산과정을 통하여 구해진다. 전체 급전시스템은 이를 구성하고 있는 회로요소들의 결합이므로, 앞절에서 도출한 회로요소의 단자망모델의 직렬 결합을 통하여 급전회로망을 표현할 수 있다. 즉, 상하행선의 회로에 Tie 접속이 없으면, 전원계통과 변전소의 단권변압기[4×8행렬], 전차선로[8×8행렬], 철도차량[8×8 단위행렬과 8×1 벡터], 보조구분소의 단권변압기[8×8행렬], ....., 급전구분소의 단권변압기[8×4행렬]에 대한 단자망 행렬을 식 (11)과 같이 집계하여 고조파 해석을 위한 연립방정식을 구성한다.

$$\begin{bmatrix} E_M \\ E_M \\ E_M \\ E_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (4 \times 8) \\ M_{SS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (8 \times 8) \\ M_{CAT1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (8 \times 8) \\ M_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (8 \times 8) \\ M_{CAT2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (4 \times 8) \\ M_{SSP} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} (8 \times 4) \\ M_{SSP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ I_1 \\ I_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (4 \times 8) \\ M_{SS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (8 \times 8) \\ M_{CAT1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ I_{H1} \\ 0 \\ I_{H2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

상하행선의 회로가 Tie 접속된 경우에는, 전원계통과 변전소의 단권변압기[2×4행렬], 전차선로[4×4행렬], 철도차량[4×4 단위행렬과 4×1 벡터], 보조구분소의 단권변압기[4×4행렬], ....., 급전구분소의 단권변압기[4×2행렬]에 대한 단자망 행렬을 식 (12)와 같이 집계하여 고조파 해석을 위한 연립방정식을 구성한다.

$$\begin{bmatrix} E_M \\ E_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (2 \times 4) \\ M_{SS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (4 \times 4) \\ M_{CAT1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (4 \times 4) \\ M_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (4 \times 4) \\ M_{CAT2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (4 \times 4) \\ M_{SSP} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} (4 \times 2) \\ M_{SP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (2 \times 4) \\ M_{SS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (4 \times 4) \\ M_{CAT1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{H1} \\ V_{H2} \\ I_{H1} \\ I_{H2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (11), 식 (12)에서 전원계통의 내부전압은 순수한 기본파 성분으로 가정할 수 있으므로 각 고조파별 계산시에  $E_M$ 은 0으로 둘 수 있고  $I_{H1}$ 과  $I_{H2}$ 는 차량의 고조파 전류원이므로 주어지는 값이다. 결국 식 (11), (12)의 연립방정식을 풀면 구분소측의 단권변압기에 흐르는 고조파 전류  $I_1, I_2$ 와 고조파 전압  $V_1, V_2$ 를 구할 수 있고 순차적으로 단자망 행렬을

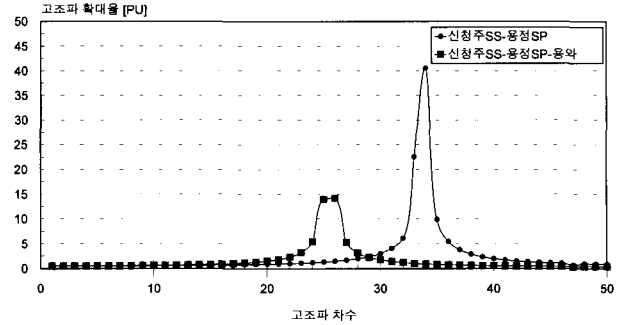


그림 8. 시험선구의 고조파 확대현상 예측결과

곱하여 급전시스템의 각 요소에 흐르는 고조파 전압, 전류를 산출할 수 있다. 이 계산과정은 관심대상 조파별로 반복한다.

### 5. 사례 연구(경부고속철도 시험선구계통의 고조파 응답특성)

경부고속철도 시험선구의 차량에서 발생된 고조파가 전철 변전소와 한전계통으로 유입되는 과정에서 시스템의 병렬공진에 의해 고조파 응답특성이 어떻게 나타나는지를 검토하였다. 이를 위해 본 연구자들이 자체 개발한 프로그램으로 고조파 확대율과 공진 주파수를 예측고 그 계산결과를 그림 8에 보인다. 그림에서 전차선로가 신청주SS~용정SP인 경우, 공진주파수(전류 확대율)는 33조파(22배), 35조파(10배) 전후인 것으로 예측되었다. 또한 전차선로가 신청주SS~용정SP~용악까지 11.8km 연장된 경우의 공진주파수(전류 확대율)는 25조파(10배) 부근으로 계산되었다. 이는 전차선로의 연장에 의해 정전용량이 증대되어 고조파 공진이 저차 조파 쪽으로 이동하고 고조파 전류 확대율의 최고치가 저감되는 효과로 국내의 연구결과와도 잘 일치하고 있다.

### 후 기

본 연구는 한국고속철도건설공단에서 시행한 연구개발사업[1] 결과의 일부임.



1. 경부고속철도 서울-대구구간 전력품질 안정화대책 연구(I), 고속철도건설공단, 2002
2. Yoshifumi Mochinaga, "Higher Harmonics Resonance on AT Feeding Circuit and Countermeasures to Suppress it", T.IEE Japan, Vol.114-D, No.10, 1994.