

경부고속철도 시험선로의 고조파 해석을 위한 10단자 회로망 모델

오광해 이한민 창상훈
(한국철도기술연구원)

8-Port Network Model for Harmonic Analysis
on the Test Track in Seoul-Pusan High-Speed Railway

Kwanghae Oh Hanmin Lee Sanghoon Chang
< Korea Railroad Research Institute >

Abstract - This study presents an approach to model and to analyse traction power feeding system focused on the amplification of harmonic current. Through the research, 8-port network model which can be effectively applied to harmonic analysis is derived.

2. 회로망모델에 의한 정식화

본 연구에서는 그림 1과 같은 교류급전시스템의 정밀한 고조파 해석을 위해 각각의 회로구성요소를 단자망모델로 정의하고 이로부터 고조파 회로를 해석하는 기법을 개발하였다.

1. 서 론

전기철도의 차량에서 발생된 고조파전류는 급전계통의 임피던스 특성에 의해 특정 조파에서 공진되어 고조파 전류 확대현상을 일으켜 각종 문제를 야기시킨다. 즉, 고조파전류는 인접통신선에의 유도장애를 일으키고 철도신호장치의 원인이 될 뿐만 아니라 전원계통에 유입되는 경우에는 전력용콘덴서의 과열/진동을 유발시키고 보호계전기를 오동작 시킬 우려가 있다. 따라서 신설 철도노선의 건설계획 단계에서는 급전시스템의 고조파 문제를 정밀하게 평가할 필요가 있다.

이와 관련하여 본 연구자들은 상하선이 분리된 표준 AT급전시스템의 고조파 해석을 단자망 이론을 적용하여 수행한 바 있다.

그러나 경부고속전철과 최근 건설되고 있는 신선의 급전시스템은 공동접지방식을 채용하여 상하선 레일도체군과 접지회로가 공통으로 접속되어 있다. 이러한 경우의 고조파 해석에 있어서는 기존의 방법에서와 같이 상하선의 급전회로를 분리하여 고려할 수가 없다.

따라서 본 연구에서는 공동접지방식을 채용한 급전계통 구성에 적합한 고조파해석 알고리즘을 위한 단자망 모델을 회로망 이론을 바탕으로 유도하였다. 본 연구에서는 이 모델을 10단자회로망 모델이라 명명하고 이를 이용하여 개발한 고조파 해석모델을 실제의 급전시스템에 적용하여 그 결과를 분석하였다.

2.1 회로구성요소의 10단자 회로망 모델

먼저 고조파 회로를 구성하는 각 요소에 대한 단자망 모델은 다음과 같다.

① 급전구분소의 단권변압기

구분소 단권변압기의 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 피더로부터 유입되는 전류도 각각 I_1, I_2 가 된다. 따라서 급전구분소의 단권변압기에 대한 단자망 행렬은 M_{SP} 로 모델링하였다.

$$\begin{bmatrix} V_{T1} \\ V_{F1} \\ V_{T2} \\ V_{F2} \\ I_{F1} \\ I_{F1} \\ I_{T2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & & & \\ & -1 & & & & & & & & \\ & & 1 & & & & & & & \\ & & & -1 & & & & & & \\ & & & & 1 & & & & & \\ & & & & & 1 & & & & \\ & & & & & & 1 & & & \\ & & & & & & & 1 & & \\ & & & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

② 전차선로

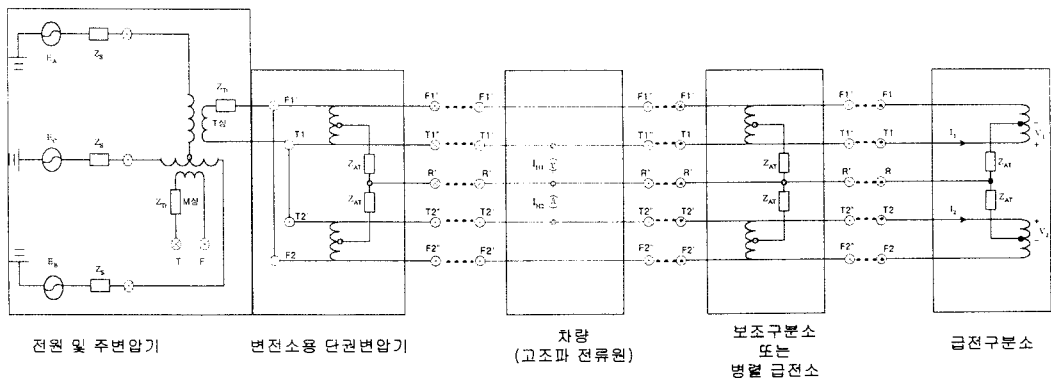


그림 1 교류 급전시스템의 구성

전차선로는 도체군의 자기임피던스 뿐만 아니라 상호임피던스 및 선간 어드미턴스를 포함하고 있다. 단위 길이당의 선로정수를 T형등가 회로로 표현하고 양쪽 구간의 자기 및 상호임피던스에 의한 전압, 전류관계를 행렬 $M_{Z,2}$ 로 두고 가운데 구간의 선간 어드미턴스에 의한 전압, 전류관계를 행렬 M_Y 로 하면 전차선로에 대한 단자망 모델은 이들 행렬을 직렬결합한 M_{CAT} 에 의해 정의된다.

$$\begin{bmatrix} V_{T1} \\ V_{F1} \\ V_{T2} \\ V_{F2} \\ I_{T1} \\ I_{F1} \\ I_{T2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} = [M_{Z,2}] [M_Y] [M_{Z,2}] \begin{bmatrix} V'_{T1} \\ V'_{F1} \\ V'_{T2} \\ V'_{F2} \\ I'_{T1} \\ I'_{F1} \\ I'_{T2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix} = [M_{CAT}] \begin{bmatrix} V'_{T1} \\ V'_{F1} \\ V'_{T2} \\ V'_{F2} \\ I'_{T1} \\ I'_{F1} \\ I'_{T2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

③ 보조구분소의 단권변압기

이 단권변압기는 전차선로의 선간에 병렬로 접속되므로 1차측단자의 전압은 2차측 단자의 전압과 동일하다. 또한 권수비 1:1의 특성을 고려하면 1차측 단자의 전류는 2차측 단자의 전류에 중성점 전류의 1/2를 더한 값과 같게 된다. 이 관계식에 따라 보조구분소의 단권변압기에 대한 단자망 행렬 M_{SSP} 는 다음 식 (3)으로 유도된다.

$$\begin{bmatrix} V_{T1} \\ V_{F1} \\ V_{T2} \\ V_{F2} \\ I_{T1} \\ I_{F1} \\ I_{T2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{4Z_{AT}} & \frac{1}{4Z_{AT}} & & \\ \frac{1}{4Z_{AT}} & \frac{1}{4Z_{AT}} & & \\ & & \frac{1}{4Z_{AT}} & \frac{1}{4Z_{AT}} \\ & & \frac{1}{4Z_{AT}} & \frac{1}{4Z_{AT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{T1} \\ V'_{F1} \\ V'_{T2} \\ V'_{F2} \\ I'_{T1} \\ I'_{F1} \\ I'_{T2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

④ 전기철도 차량(고조파 전류원)

철도급전시스템의 주된 고조파 발생원은 차량이고, 차량에서 발생된 고조파는 전차선로의 레일과 전차선 사이에서 주입되는 전류원으로 취급할 수 있다. 이 경우 차량의 고조파 전류원에 대한 단자망 모델은 단위행렬 M_1 와 주입 전류원 벡터 $M_{harmonics}$ 을 이용하여 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V'_{T1} \\ V'_{F1} \\ V'_{T2} \\ V'_{F2} \\ I'_{T1} \\ I'_{F1} \\ I'_{T2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ & & & & 1 \\ & & & & & 1 \\ & & & & & & 1 \\ & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{T1} \\ V'_{F1} \\ V'_{T2} \\ V'_{F2} \\ I'_{T1} \\ I'_{F1} \\ I'_{T2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{H1} \\ I_{H2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

⑤ 전원 계통

단상의 대용량 전철전력을 공급 받기 위해서는 3상 전력계통과 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 다음 식으로 구한다.

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

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.

한편, 변전소의 단권변압기는 변전소 급전측의 모선에 상하선 단권변압기가 공통접속되어 있다. 권수비 1:1인 변전소 단권변압기에 대한 전압-전류 관계식을 전원계통측의 전압-전류관계식에 대입함으로써 전원계통과 변전소의 단권변압기를 포함한 단자망 행렬 M_{SS} 를 식(5)와 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} E_M \\ E_M \\ E_M \\ E_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & A & B & A & B \\ 0 & 0 & 1 & -1 & A & B & A & B \\ 2 & 0 & 0 & 0 & C & D & C & D \\ 0 & 0 & 2 & 0 & C & D & C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{T1} \\ V'_{F1} \\ V'_{T2} \\ V'_{F2} \\ I'_{T1} \\ I'_{F1} \\ I'_{T2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix}$$

여기서,

$$A = \frac{1}{2}Z_M$$

$$B = -\frac{1}{2}Z_M$$

$$C = \frac{1}{2}Z_M + Z_{AT}$$

$$D = -\frac{1}{2}Z_M + Z_{AT}$$

(5)

2.2 상하선 Tie를 고려하기 위한 등가축약 모델

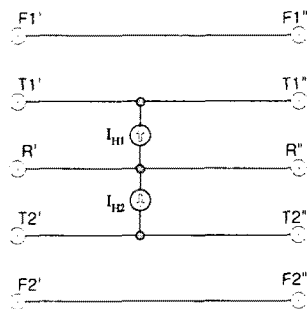


그림 2. 일반적인 단자망 모델

위의 2.1절에서는 상하Tie가 없는 표준 AT 급전시스템에 대한 단자망 모델을 다루었다. 이경우의 가장 일반적인 단자망 모델은 그림 2와 같이 회로의 임피던스, 어드미턴스와 함께 Source가 포함된 요소이다. 이 요소에 대한 수식적 표현은 식 (6)으로 쓸 수 있다.

3. 고조파 해석

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(7)과 같이 집계하여 고조파 해석을 위한 연립방정식을 구성한다.

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

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} & b_{17} & b_{18} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} & b_{27} & b_{28} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} & b_{37} & b_{38} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} & b_{46} & b_{47} & b_{48} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} & b_{56} & b_{57} & b_{58} \\ b_{61} & b_{62} & b_{63} & b_{64} & b_{65} & b_{66} & b_{67} & b_{68} \\ b_{71} & b_{72} & b_{73} & b_{74} & b_{75} & b_{76} & b_{77} & b_{78} \\ b_{81} & b_{82} & b_{83} & b_{84} & b_{85} & b_{86} & b_{87} & b_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_{H1} \\ 0 \\ I_{H2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

그림 2에서 상하선의 전차선(T)과 급전선이 각각 Tie 접속된 경우에는

$$\begin{aligned} V_{F1} &= V_{F2}, & V_{F1}' &= V_{F2}', \\ V_{F1} &= V_{F2}, & V_{F1}' &= V_{F2}' \text{인 전압조건과} \\ I_T &= I_{F1} + I_{F2}, & I_F &= I_{F1} + I_{F2}, \\ I_T &= I_{F1} + I_{F2}, & I_F &= I_{F1} + I_{F2} \text{인 전류조건이 만족되어야} \end{aligned}$$

한다. 이러한 Tie 조건에 의거하여 위의 행렬관계식 (6)을 재구성함으로써 새로운 축약행렬식은 표 1과 같이 유도되었다.

표 1에서

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} (a_{23} - a_{44}) - (a_{26} - a_{46}) & (a_{16} - a_{36}) - (a_{14} - a_{34}) \\ (a_{25} - a_{43}) - (a_{27} - a_{47}) & (a_{17} - a_{37}) - (a_{15} - a_{35}) \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{bmatrix} b_{15} - b_{18} & b_{17} - b_{18} \\ b_{25} - b_{43} & b_{27} - b_{47} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} (a_{29} - a_{48}) - (a_{26} - a_{46}) & (a_{16} - a_{36}) - (a_{14} - a_{34}) \\ (a_{25} - a_{43}) - (a_{27} - a_{47}) & (a_{17} - a_{37}) - (a_{15} - a_{35}) \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{bmatrix} (a_{11} + a_{13}) - (a_{31} + a_{33}) & (a_{12} + a_{14}) - (a_{32} + a_{34}) & (a_{15} - a_{35}) & (a_{16} - a_{36}) \\ (a_{22} + a_{24}) - (a_{32} + a_{34}) & (a_{25} + a_{27}) - (a_{35} + a_{37}) & (a_{25} - a_{43}) & (a_{26} - a_{46}) \end{bmatrix}$$

$$\Delta = (a_{11} - a_{31} - a_{15} + a_{35})(a_{28} - a_{48} - a_{26} + a_{46}) - (a_{18} - a_{38} - a_{16} + a_{36})(a_{27} - a_{47} - a_{25} + a_{45}) \text{로 정의하였다.}$$

표. 1 Tie를 고려한 등가축약 유도결과

$$\begin{bmatrix} V_T \\ V_F \\ I_T \\ I_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a_{31} + a_{33}) + d_{11}(a_{37} - a_{35}) + d_{21}(a_{38} - a_{36}) & (a_{32} + a_{34}) + d_{12}(a_{37} - a_{35}) + d_{22}(a_{38} - a_{36}) \\ (a_{41} + a_{43}) + d_{11}(a_{47} - a_{45}) + d_{21}(a_{48} - a_{46}) & (a_{42} + a_{44}) + d_{12}(a_{47} - a_{45}) + d_{22}(a_{48} - a_{46}) \\ (a_{51} + a_{53}) + (a_{55} + a_{57}) + d_{11}(a_{57} - a_{55} - a_{75}) + d_{21}(a_{58} + a_{78} - a_{56} - a_{76}) & (a_{52} + a_{72}) + (a_{54} + a_{74}) + d_{12}(a_{57} + a_{77} - a_{55} - a_{75}) + d_{22}(a_{58} + a_{78} - a_{56} - a_{76}) \\ (a_{61} + a_{63}) + (a_{65} + a_{67}) + d_{11}(a_{67} + a_{67} - a_{65} - a_{65}) + d_{21}(a_{68} + a_{88} - a_{66} - a_{86}) & (a_{62} + a_{82}) + (a_{64} + a_{84}) + d_{12}(a_{67} + a_{87} - a_{65} - a_{85}) + d_{22}(a_{68} + a_{88} - a_{66} - a_{86}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_T \\ V_F \\ I_T \\ I_F \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} a_{35} + d_{13}(a_{37} - a_{35}) + d_{23}(a_{38} - a_{36}) & a_{36} + d_{14}(a_{37} - a_{35}) + d_{24}(a_{38} - a_{36}) \\ a_{45} + d_{13}(a_{47} - a_{45}) + d_{23}(a_{48} - a_{46}) & a_{46} + d_{14}(a_{47} - a_{45}) + d_{24}(a_{48} - a_{46}) \\ (a_{55} + a_{75}) + d_{13}(a_{57} + a_{77} - a_{55} - a_{75}) + d_{23}(a_{58} + a_{78} - a_{56} - a_{76}) & (a_{56} + a_{76}) + d_{14}(a_{57} + a_{77} - a_{55} - a_{75}) + d_{24}(a_{58} + a_{78} - a_{56} - a_{76}) \\ (a_{65} + a_{85}) + d_{13}(a_{67} + a_{87} - a_{65} - a_{85}) + d_{23}(a_{68} + a_{88} - a_{66} - a_{86}) & (a_{66} + a_{86}) + d_{14}(a_{67} + a_{87} - a_{65} - a_{85}) + d_{24}(a_{68} + a_{88} - a_{66} - a_{86}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{H1} \\ I_{H2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} b_{35} - c_{11}(a_{37} - a_{35}) - c_{21}(a_{38} - a_{36}) & b_{37} - c_{12}(a_{37} - a_{35}) - c_{22}(a_{38} - a_{36}) \\ b_{45} - c_{11}(a_{47} - a_{45}) - c_{21}(a_{48} - a_{46}) & b_{47} - c_{12}(a_{47} - a_{45}) - c_{22}(a_{48} - a_{46}) \\ b_{55} + b_{75} - c_{11}(a_{57} + a_{77} - a_{55} - a_{75}) - c_{21}(a_{58} + a_{78} - a_{56} - a_{76}) & b_{57} + b_{77} - c_{12}(a_{57} + a_{77} - a_{55} - a_{75}) - c_{22}(a_{58} + a_{78} - a_{56} - a_{76}) \\ b_{65} + b_{85} - c_{11}(a_{67} + a_{87} - a_{65} - a_{85}) - c_{21}(a_{68} + a_{88} - a_{66} - a_{86}) & b_{67} + b_{87} - c_{12}(a_{67} + a_{87} - a_{65} - a_{85}) - c_{22}(a_{68} + a_{88} - a_{66} - a_{86}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{H1} \\ I_{H2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} E_M \\ E_M \\ E_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{SS} \\ (4 \times 8) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{CAT1} \\ (8 \times 8) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_I \\ (8 \times 8) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{CAT2} \\ (8 \times 8) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{SSP} \\ (4 \times 8) \end{bmatrix} \cdots \cdots \begin{bmatrix} M_{SP} \\ (8 \times 4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_I \\ I_I \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_{H1} \\ 0 \\ I_{H2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M_{SS} \\ (4 \times 8) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{CAT1} \\ (8 \times 8) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_{H1} \\ 0 \\ I_{H2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

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(7)과 같이 집계하여 고조파 해석을 위한 연립방정식을 구성한다.

$$\begin{bmatrix} E_M \\ E_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{SS} \\ (2 \times 4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{CAT1} \\ (4 \times 4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_I \\ (4 \times 4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{CAT2} \\ (4 \times 4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{SSP} \\ (4 \times 4) \end{bmatrix} \cdots \cdots \begin{bmatrix} M_{SP} \\ (4 \times 2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{H1} \\ V_{H2} \\ I_{H1} \\ I_{H2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (7), 식 (8)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 (7), (8)의 연립방정식을 풀면 구분소속의 단권변압기에 흐르는 고조파 전류 I_1, I_2 와 고조파 전압 V_1, V_2 를 구할 수 있고 순차적으로 단자망 행렬을 곱하여 급전시스템의 각 요소에 흐르는 고조파 전압, 전류를 산출할 수 있다. 이 계산과정은 관심대상 조파별로 반복한다.

4. 사례연구

본 연구에서는 공동접지방식을 채용한 급전계통에 적합한 고조파해석 알고리즘을 회로망 이론을 바탕으로 개발하였다. 아울러 본 연구에서 개발한 고조파 해석모델을 고속철도 시험선구의 급전시스템에 적용하여 그 결과를 분석하였다.

4.1 입력 자료

사례연구에서 입력자료로 사용한 전차선로에 대한 선로정수와 전원 및 변압기 임피던스는 고속철도 시험선구의 데이터를 사용하였으며 차량의 고조파 전류Source로는 KTX 차량 1편성 측정데이터를 이용하였다.

4.2 계산결과 및 고찰

사례연구로서 경부고속철도 시험선구 급전시스템의 고조파 공진특성을 분석하기 위해 가장 특징적인 현상인 고조파 확대율을 검토하였다.

경부고속철도에서는 차량의 컨버터에서 발생된 고조파 전류가 전차선로를 따라 전철변전소를 통하여 전원계통 쪽으로 유입되는데, 고조파 확대율은 고속철도차량의 고조파 발생전류에 대한 변전소 유입고조파 전류로 정의된다. 전체 급전계통의 선로정수는 주파수의 함수이므로 고조파 확대율은 각 조파(1,3,5...)에서 서로 다른 값을 갖는다. 따라서 고조파 확대율은 조파별로 계산되어야 하며 고조파 확대율이 최대인 주파수를 공진주파수라고 한다. 대책설계가 없는 경우에 대하여 경부고속철도 시험선구간의 고조파 확대율 계산결과를 그림 3에 보인다.

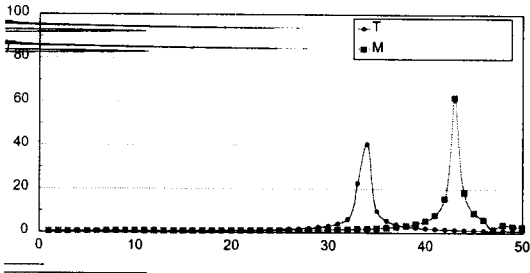


그림 3. 경부고속철도 시험선구의 고조파 공진특성

그림 3의 결과에서 고조파 공진특성을 정리하면, 급전거리가 상대적으로 큰 T상측이 M상측보다 저차에서 공진이 발생되었으며 그 확대율은 급전거리가 상대적으로 작은 M상측이 더 크게 계산되었다. 이런 추이는 종래의 문헌에서와 동일한 결과로써, 급전거리가 길수록 고조파 전류확대율은 작아지나 저차조파에서 공진이 발생되어 신호 계통등에의 장애 개연성이 있음을 말해주고 있다. 경부고속철도 시험선구의 경우에는 비교적 고차조파(30조파 이상)에서 고조파확대 현상이 크게 일어나고 있다.

한편, 고조파 계산지점에 따른 종합왜형률의 추이를 검토하기 위해, 시험선구 T상의 급전구분소(회덕SP)에

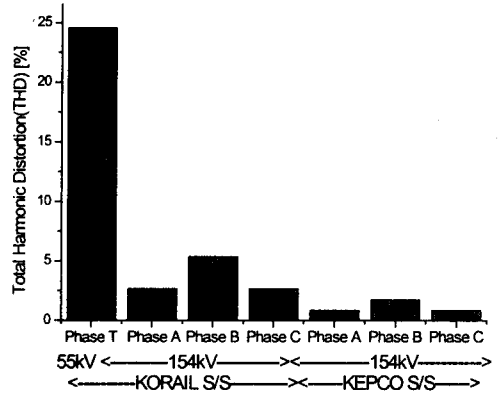


그림 4. 계산지점에 따른 전압왜형률값의 비교
차량 1편성 운행되고 있는 조건에서 전압왜형률을 계산하였다. 계산결과는 신정주 전철변전소의 55kV 급전모선과 154kV 수전모선 그리고 한전 청원변전소의 154kV 인출모선에서의 종합왜형률값으로 그림 4에 비교하여 나타내었다. 그림 4에서 고조파 전압왜형률 값을 전철변전소보다 한국전력계통의 인출변전소가 더 작다. 이는 전철 차량이 고조파 전류원이므로 고조파 전류원까지 집계한 고조파 임피던스와 조파별 전압크기가 전철변전소 쪽이 더 크기 때문이다. 이와 같이 고조파 왜형률은 규제지점에 따라 달라지므로 고조파 전압왜형률 규제점(PCC)이 정의되어야 한다. 일반적으로는 전력인출점 즉 자산의 분기점으로 규정하고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 공동접지방식을 채용한 급전계통에 적합한 고조파해석 알고리즘을 회로망 이론을 바탕으로 개발하였다. 특히, 최근 우리나라 고속전철에서 채용하고 있는 상하 Tie 급전방식에 대한 고조파해석 알고리즘을 위해 등가축약 모델을 통하여 구현하였다.

제한한 고조파해석프로그램을 실제의 AT급전시스템에 적용하여 고조파 확대율을 계산하고 공진특성에 대한 일반적 경향 분석하였다. 향후에, 본 알고리즘을 이용한 고조파 대책설계가 계속적이다.

[참 고 문 헌]

- [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