공동접지방식 급전시스템의 고조파 해석
Harmonic Analysis for Traction Power Supply System with Common Grounding

오광해* 이한민** 장동욱*** 김주락****
Oh, Kwanghae Lee, Hanmin Jang, Dongwook Kim, Joorak

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 we can conclude the following:

- The resonance frequency is not depend on the location of vehicle. The magnification of harmonic is, however, a function of the position of a train.
- The resonance frequency is lower as catenary length is longer.

1. 서 론

전철급전시스템은 일반 전력계통에 비해 부하의 특성이나 계통구성 형태 및 제반 현상측면에서 상이한 특징을 가진다. 특히, 최근에 도입된 전철구동시스템에는 컨버터와 인버터가 포함되어 있으며 위상제어 및 펄스폭변조방식에 의하여 제어되기 때문에 고조파를 발생시킨다.

차량에서 발생된 고조파전류는 급전계통의 임피이던스 특성에 의해 특정 조파에서 공진되어 고조파전류 확대현상을 일으켜 각종 문제를 야기시킨다. 즉, 고조파전류는 인접통신선에의 유도장애를 일으키고 철도신호장애의 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

* 한국철도기술연구원 선임연구원
** 한국철도기술연구원 연 구 원
*** 한국철도기술연구원 연 구 원
**** 한국철도기술연구원 연 구 원

연구에서는 공동접지방식을 채용한 급전계통 구성에 대한 적합한 고조파해석 알고리즘을 회로망 이론을 바탕으로 개발하였다. 아울러 본 연구에서 개발한 고조파 해석모델을 가상의 급전시스템에 적용하여 그 결과를 분석하였다.

2. 고조파 회로모델 및 정식화

2.1 교류 급전시스템의 구성

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 스코트변압기에 의해 단상으로 변환된 전력을 급전선, 전차선, 레일에 통해 차량에 공급한다. 단권변압기는 대략 12km 정도의 간격으로 설치되며 이곳에 상하행선을 연결하는 개폐기가 함께 설치되기도 한다. 변전소와 변전소의 거리는 약 50km이고 중간지점은 양쪽 변전소의 전압위상이 다르기 때문에 개폐설비로써 전기적으로 구분하여(급전구분소; SP) 운전하고 있는데 이것은 변전소 고장시 인근 변전소에서 연장급전을 하기 위해 연결해 주는 역할도 한다.

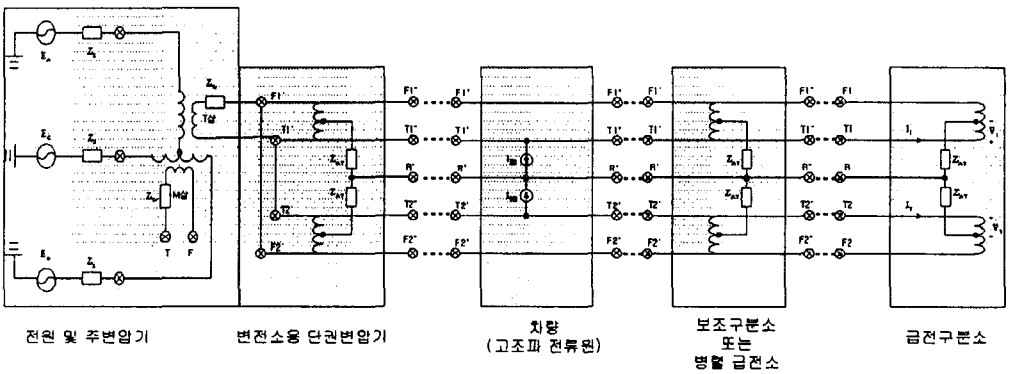


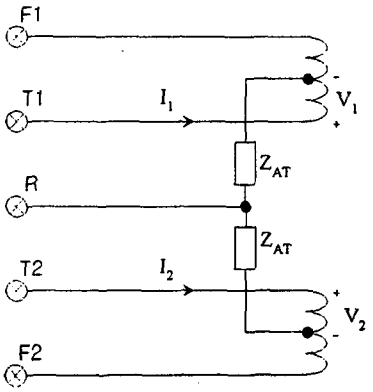
그림 1. 교류 급전시스템의 구성

그림 1.과 같은 교류급전시스템의 정밀한 고조파 해석을 위해 각각의 회로구성요소를 단자망모델로 정의하고 이로부터 고조파 회로를 해석하는 기법을 개발하였다. 고조파 회로를 구성하는 각 요소에 대한 단자망 모델은 다음과 같다.

2.2 단자망 모델

2.2.1 급전구분소의 단권변압기

구분소의 단권변압기는 전차선로의 말단에 위치하고 결선회로는 그림 2.와 같다. 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_2라고 하면 상하선의 피이더로부터 유입되는 전류도 각각 I_1, I_2가 된다. 따라서 급전구분소의 단권변압기에 대한 단자망 행렬은 M_{SP} 로 모델링하였다.



$$\begin{bmatrix} V_{T1} \\ V_{F1} \\ V_{T2} \\ V_{F2} \\ I_{T1} \\ I_{F1} \\ I_{T2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc:cc} 1 & & 2Z_{AT} & \\ -1 & & 2Z_{AT} & \\ & 1 & & 2Z_{AT} \\ & -1 & & 2Z_{AT} \\ \hdashline & & 1 & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \\ & & & 1 \end{array}\right] \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

그림 2. 금전구분소의 단권변압기

2.2.2 전차선로

전차선로는 도체군의 자기임피던스 뿐만 아니라 상호임피던스 및 선간 어드미턴스를 포함하고 있다. 단위 길이당의 선로정수를 T형등가 회로로 표현하면 그림 3.과 같다.

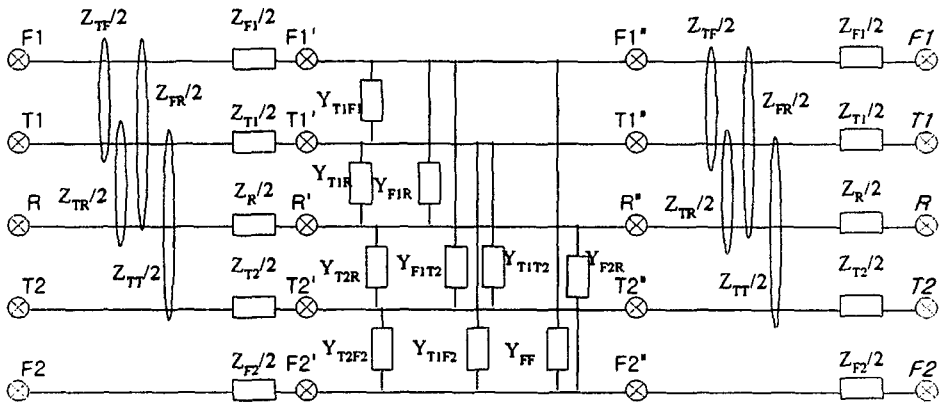


그림 3. 전차선로에 대한 T형 등가회로

그림 3.에서 양쪽 구간의 자기 및 상호임피던스에 의한 전압, 전류관계는 다음 식 (2)와 같이 단자망 행렬 $M_{Z/2}$로 유도되고 가운데 구간의 선간 어드미턴스에 의한 전압, 전류관계는 식 (3)의 단자망 행렬 M_Y로 표현된다. 따라서 전차선로에 대한 단자망 모델은 이들 행렬을 직렬결합한 M_{CAT}에 의해 식 (4)로 정의된다.

$$\begin{bmatrix} V_{T1} \\ V_{F1} \\ V_{T2} \\ V_{F2} \\ I_{T1} \\ I_{F1} \\ I_{T2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cccc:cccc} 1 & 0 & 0 & 0 & (Z_T+Z_R-2Z_{TR}) & (Z_R+Z_{TF}-Z_{FR}-Z_{TR}) & (Z_R+Z_{TT}-2Z_{TR}) & (Z_R-Z_{FR}-Z_{TR}) \\ 0 & 1 & 0 & 0 & (Z_R+Z_{TF}-Z_{TR}-Z_{FR}) & (Z_F+Z_R-2Z_{FR}) & (Z_R-Z_{TR}-Z_{FR}) & (Z_R-2Z_{FR}) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & (Z_R+Z_{TT}-2Z_{TR}) & (Z_R-Z_{FR}-Z_{TR}) & (Z_T+Z_R-2Z_{TR}) & (Z_R+Z_{TF}-Z_{TR}-Z_{FR}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & (Z_R-Z_{TR}-Z_{FR}) & (Z_R-2Z_{FR}) & (Z_R+Z_{TF}-Z_{TR}-Z_{FR}) & (Z_F+Z_R-2Z_{FR}) \\ \hdashline 0 & 0 & 0 & 0 & \multicolumn{4}{c}{1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \multicolumn{4}{c}{1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \multicolumn{4}{c}{1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \multicolumn{4}{c}{1} \end{array}\right] \begin{bmatrix} V'_{T1} \\ V'_{F1} \\ V'_{T2} \\ V'_{F2} \\ I'_{T1} \\ I'_{F1} \\ I'_{T2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_{T1} \\ V_{F1} \\ V_{T2} \\ V_{F2} \\ I_{T1} \\ I_{F1} \\ I_{T2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cccc:cccc} 1 & 0 & 0 & 0 & & & & \\ 0 & 1 & 0 & 0 & & & & \\ 0 & 0 & 1 & 0 & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & & & & \\ \hdashline (Y_{TR}+Y_{TF}+Y_{TT}+Y_{T1F2}) & -(Y_{TF}) & -(Y_{TT}) & -(Y_{T1F2}) & 1 & & & \\ -(Y_{TF}) & (Y_{FR}+Y_{TF}+Y_{T1F2}+Y_{FF}) & -(Y_{T1F2}) & -(Y_{FF}) & & 1 & & \\ -(Y_{TT}) & -(Y_{T1F2}) & (Y_{TR}+Y_{TT}+Y_{T1F2}+Y_{TF}) & -(Y_{TF}) & & & 1 & \\ -(Y_{T1F2}) & -(Y_{FF}) & -(Y_{TF}) & (Y_{FR}+Y_{T1F2}+Y_{FF}+Y_{TF}) & & & & 1 \end{array}\right] \begin{bmatrix} V'_{T1} \\ V'_{F1} \\ V'_{T2} \\ V'_{F2} \\ I'_{T1} \\ I'_{F1} \\ I'_{T2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{T1} \\ V_{F1} \\ V_{T2} \\ V_{F2} \\ I_{T1} \\ I_{F1} \\ I_{T2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} = [M_{Z/2}]\,[M_Y]\,[M_{Z/2}] \begin{bmatrix} V'_{T1} \\ V'_{F1} \\ V'_{T2} \\ V'_{F2} \\ I'_{T1} \\ I'_{F1} \\ I'_{T2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix} = [M_{CAT}] \begin{bmatrix} V'_{T1} \\ V'_{F1} \\ V'_{T2} \\ V'_{F2} \\ I'_{T1} \\ I'_{F1} \\ I'_{T2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2.3 보조구분소의 단권변압기

보조구분소의 단권변압기는 전차선로의 중간에 12 km 간격으로 위치하고 그 결선회로는 그림 2.와 같다. 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 (5)로 유도된다.

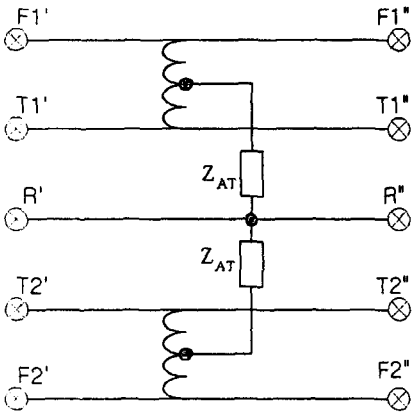


그림 4. 보조구분소의 단권변압기

$$\begin{bmatrix} V_{T1} \\ V_{F1} \\ V_{T2} \\ V_{F2} \\ I_{T1} \\ I_{F1} \\ I_{T2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cccc:cccc} 1 & 0 & 0 & 0 & & & & \\ 0 & 1 & 0 & 0 & & & & \\ 0 & 0 & 1 & 0 & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & & & & \\ \hdashline \frac{1}{4Z_{AT}} & \frac{1}{4Z_{AT}} & & & 1 & & & \\ \frac{1}{4Z_{AT}} & \frac{1}{4Z_{AT}} & & & & 1 & & \\ & & \frac{1}{4Z_{AT}} & \frac{1}{4Z_{AT}} & & & 1 & \\ & & \frac{1}{4Z_{AT}} & \frac{1}{4Z_{AT}} & & & & 1 \end{array}\right] \begin{bmatrix} V'_{T1} \\ V'_{F1} \\ V'_{T2} \\ V'_{F2} \\ I'_{T1} \\ I'_{F1} \\ I'_{T2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2.4 고조파 전류원(차량)

철도급전시스템의 주된 고조파 발생원은 차량이고, 차량에서 발생된 고조파는 그림 5.와 같이 전차선로의 레일과 전차선 사이에서 주입되는 전류원으로 취급할 수 있다. 이 경우 차량의 고조파 전류원에 대한 단자망 모델은 단위행렬 M_I와 주입 전류원 벡터 $M_{harmonics}$을 이용하여 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

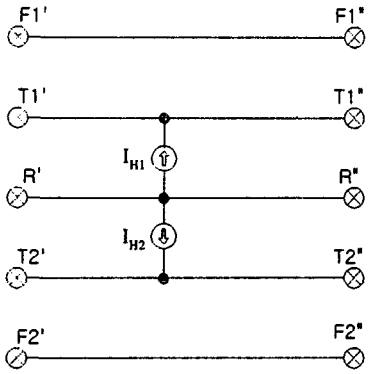


그림 5. 고조파 전류원

$$\begin{bmatrix} V_{T1} \\ V_{F1} \\ V_{T2} \\ V_{F2} \\ I_{T1} \\ I_{F1} \\ I_{T2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cccc|cccc} 1 & 0 & 0 & 0 & & & & \\ 0 & 1 & 0 & 0 & & & & \\ 0 & 0 & 1 & 0 & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & & & & \\ \hline & & & & 1 & & & \\ & & & & & 1 & & \\ & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & 1 \end{array}\right] \begin{bmatrix} V'_{T1} \\ V'_{F1} \\ V'_{T2} \\ V'_{F2} \\ I'_{T1} \\ I'_{F1} \\ I'_{T2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \\ \\ \\ \\ I_{H1} \\ \\ I_{H2} \\ \end{bmatrix} \qquad (6)$$

2.2.5 전원계통

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 임피이던스 Z_{TR} 은 다음식 (7)로 구한다.

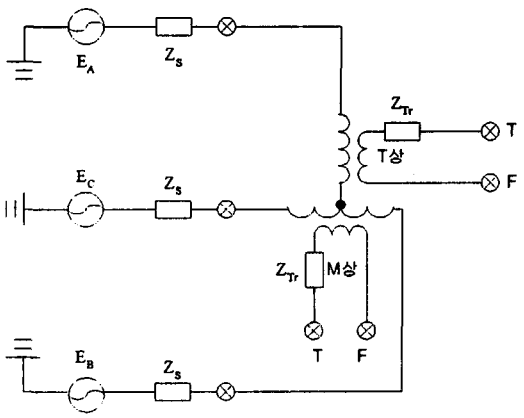


그림 6. 3상 전원계통

$$Z_{TR} = \%Z_{TR} \frac{10 \cdot V^2}{P_{TR}/2} \quad [\Omega] \qquad (7)$$

여기서, Z_{TR} : 스코트 변압기의 M상 또는 T상 임피이던스 [Ω],

$\%Z_{TR}$: 스코트 변압기의 % 임피던스

V : 기준전압(55kV) [kV],

P_{TR} : 스코트변압기의 3상 용량 [KVA]

그림 6.에서, 급전측으로 환산한 등가부하는 다음과 같이 집계된다.

i) M상 부하

그림 6에서 전원 임피이던스는 2배로 고려되므로 M상 등가부하는

$Z_M = 2Z_S + Z_{tr}$

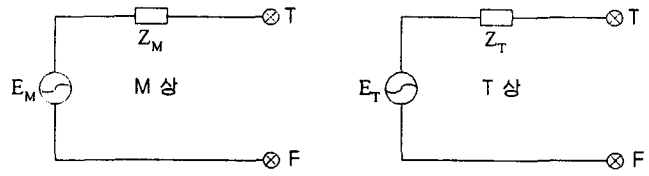
ii) T상 부하

그림 6으로부터 T상측으로 환산한 전압강하는

$V_T = [(Z_S + \frac{Z_{tr}}{2}) \frac{2I_T}{\sqrt{3}} + (Z_S + \frac{Z_{tr}}{2}) \frac{I_T}{\sqrt{3}}] \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}$ 가 되고

전압강하를 전류로 나누면, T상 등가부하는 $Z_T = 2Z_S + Z_{tr}$ 가된다.

즉, M상측과 마찬가지로 T상측에서도 전원 임피이던스는 2배로 고려된다. 따라서 M상(또는T상)측에서 본 전원계통의 등가회로도는 그림 7.과 같고 급전측 전압, 전류관계는 식 (8)로 정리된다.



$$E_M = V' + Z_M I' \qquad E_T = V' + Z_T I' \tag{8}$$

그림 7. 급전측에서 본 전원계통의 등가회로

2.2.6 변전소의 단권변압기

변전소의 단권변압기는 다음 그림 8.과 같이 변전소 급전측의 모선에 상하선 단권변압기가 공통접속되어 있다. 권수비 1:1인 단권변압기에서는

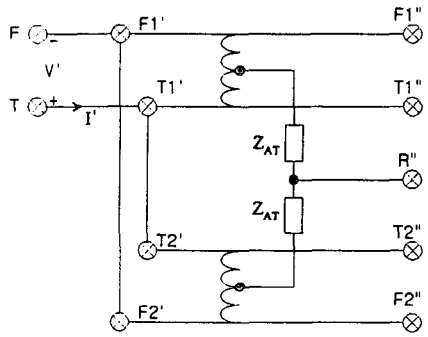


그림 8. 변전소의 단권변압기

$I'_{T1} - I''_{T1} = I'_{F1} - I''_{F1}$
$I'_{T2} - I''_{T2} = I'_{F2} - I''_{F2}$ 의 관계가 있으므로 급전측 전류는 다음 식 (9)와 같이 표현되며 급전측 단자전압은 식 (10), (11)로 정의된다.

$$I' = \frac{1}{2}I''_{T1} + \frac{1}{2}I''_{T2} - \frac{1}{2}I''_{F1} - \frac{1}{2}I''_{F2} \tag{9}$$

$$V' = V''_{T1} - V''_{F1} \tag{10}$$

$$V' = V''_{T2} - V''_{F2} \tag{11}$$

또한 급전측 단자전압과 단권변압기 2차측 단자전압 및 단권변압기 2차측 단자전류사이에는 $\frac{1}{2}V' = V''_{T1} - Z_{AT}\frac{(I''_{T1} + I''_{T2} + I''_{F1} + I''_{F2})}{2}$ 의 관계가 있고 이는 다음식 (12), (13)으로 정리된다.

$$V' = 2V''_{T1} - Z_{AT}(I''_{T1} + I''_{T2} + I''_{F1} + I''_{F2}) \tag{12}$$

$$V' = 2V''_{T2} - Z_{AT}(I''_{T1} + I''_{T2} + I''_{F1} + I''_{F2}) \tag{13}$$

결국 변전소 단권변압기에 대한 전압-전류 관계식 (9) ~ (13)을 전원계통측의 전압-전류관계식 (8)에 대입함으로써 전원계통과 변전소의 단권변압기를 포함한 단자망 행렬 M_{SS}는 식(14)와 같이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} E_M \\ E_M \\ E_M \\ E_M \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cccc:cccc} 1 & -1 & 0 & 0 & \frac{1}{2}Z_M & -\frac{1}{2}Z_M & \frac{1}{2}Z_M & -\frac{1}{2}Z_M \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \frac{1}{2}Z_M & -\frac{1}{2}Z_M & \frac{1}{2}Z_M & -\frac{1}{2}Z_M \\ 2 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}Z_M - Z_{AT} & -\frac{1}{2}Z_M - Z_{AT} & \frac{1}{2}Z_M - Z_{AT} & -\frac{1}{2}Z_M - Z_{AT} \\ 0 & 0 & 2 & 0 & \frac{1}{2}Z_M - Z_{AT} & -\frac{1}{2}Z_M - Z_{AT} & \frac{1}{2}Z_M - Z_{AT} & -\frac{1}{2}Z_M - Z_{AT} \end{array}\right] \begin{bmatrix} V''_{T1} \\ V''_{F1} \\ V''_{T2} \\ V''_{F2} \\ I''_{T1} \\ I''_{F1} \\ I''_{T2} \\ I''_{F2} \end{bmatrix} \tag{14}$$

3. 고조파 해석

전체 급전시스템은 이를 구성하고 있는 회로요소들의 결합이므로, 앞서 2절에서 도출한 회로요소의 단자망모델의 직렬 결합을 통하여 급전회로망을 표현할 수 있다. 즉, 전원계통과 변전소의 단권변압기, 전차선로, 고조파 전류원(차량), 보조구분소의 단권변압기, ... , 급전구분소의 단권변압기에 대한 단자망 행렬을 식(15)와 같이 집계하여 고조파 해석을 위한 연립방정식을 구성한다.

$$\begin{bmatrix} E_M \\ E_M \\ E_M \\ E_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{SS} \\ (4\times8) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} M_{CAT1} \\ (8\times8) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} M_1 \\ (8\times8) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} M_{CAT2} \\ (8\times8) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} M_{SSP} \\ (4\times8) \end{bmatrix}\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet\begin{bmatrix} M_{SP} \\ (8\times4) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

$$-\begin{bmatrix} M_{SS} \\ (4\times8) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} M_{CAT1} \\ (8\times8) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_{H1} \\ 0 \\ I_{H2} \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (15)$$

식 (15)에서 전원계통의 내부전압은 순수한 기본파 성분으로 가정할 수 있으므로 각 고조파별 계산시에 E_M은 0으로 둘 수 있고 I_{H1}과 I_{H2}는 차량의 고조파 전류원이므로 주어지는 값이다. 결국 식 (15)의 연립방정식을 풀면 구분소측의 단권변압기에 흐르는 고조파 전류 I_1, I_2와 고조파 전압 V_1, V_2를 구할 수 있고 순차적으로 단자망 행렬을 곱하여 급전시스템의 각 요소에 흐르는 고조파 전압, 전류를 산출할 수 있다. 이 계산과정은 관심대상 조파별로 반복된다. 본 연구에서는 기본파 ~ 50조파까지를 대상범위로 하였다.

4. 사례연구

본 연구에서는 공동접지방식을 채용한 급전계통에 적합한 고조파해석 알고리즘을 회로망이론을 바탕으로 개발하였다. 아울러 본 연구에서 개발한 고조파 해석모델을 가상의 급전시스템에 적용하여 그 결과를 분석하였다.

4.1 입력 자료

사례연구에서 입력자료로 활용한 전차선로에 대한 선로정수와 전원 및 변압기 임피던스는 고속철도 시험선구의 데이터를 사용하였다. 그러나 본 연구에서 고려한 급전방식은 표준 AT급전방식으로 보조구분소와 구분소에서 상하선의 회로가 분리된 것으로 하였다. 이는 경부고속철도 시험선구의 상하 Tie 급전과는 회로구성에서 다소 차이가 있다.

4.2 고조파 확대율 계산

본 연구의 단자망 모델에 의한 고조파 해석법으로 계산한 결과를 고조파 전류확대율로써 그림 9.에 보인다. 그림 9.에서 고조파 공진점은 32조파에서 발생하였으며, 이 주파수에서 변전소로 유입되는 전류의 확대율이 최대가 되며 그 값은 7.54배로 평가되었다. 이 결과를 우리나라 고속철도 시험선구와 비교해 보면 확대율은 다소 크고 공진점도 고차조파쪽에서 발생되었다.

그림 10.은 급전시스템의 전차선로길이가 고조파 공진에 미치는 영향을 분석한 결과이다. 그림에서 급전선로의 길이가 길수록 고조파 확대율은 감소하나 저차조파에서 공진이 발생된다. 따라서 기존노선의 연장급전시 혹은 신설노선의 급전선로 계획시에는 고조파문제를 더욱 세밀하게 검토하여야 할 것으로 사료된다.

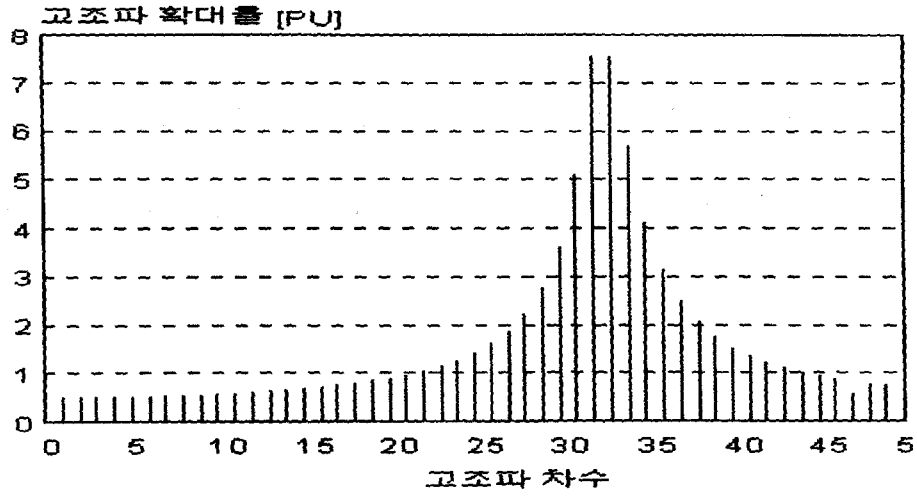


그림 9. 고조파 차수에 따른 전류확대율

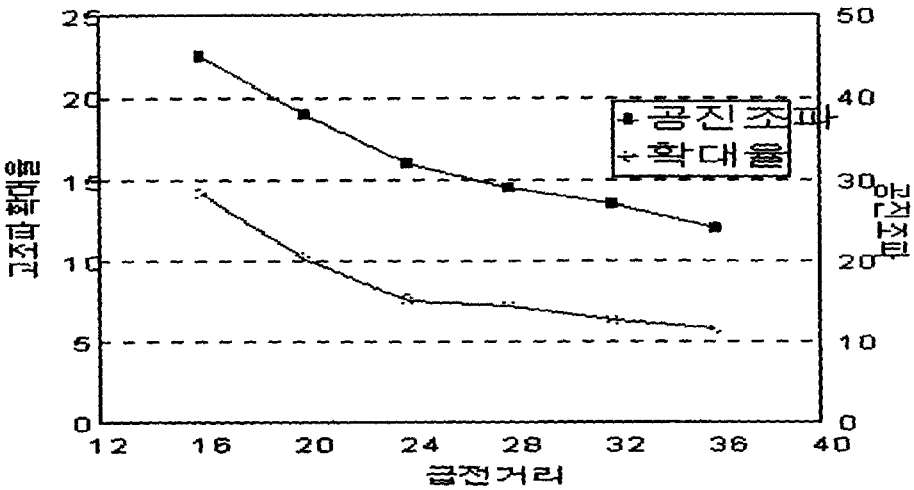


그림 10. 급전거리에 따른 공진특성

5. 검토 및 고찰

본 연구에서는 공동접지방식을 채용한 급전계통에 적합한 고조파해석 알고리즘을 회로망 이론을 바탕으로 개발하고, 가상의 AT급전시스템을 대상으로 고조파 확대율을 계산하고 공진특성에 대한 일반적 경향 분석하였다.

현재, 우리나라 고속전철에서 채용하고 있는 상하 Tie 급전방식에 대한 고조파연구가 진행중에 있다.

[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