

철도 급전시스템에서의 고조파 해석 및 대책 연구

A Study on the Countermeasures to Suppress Harmonics in the Traction Power Supply System

오광해*
K.H. Oh

이장무**
C.M. Lee

창상훈***
S.H. Chang

한문섭*
M.S. Han

김길상****
K.S. Kim

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.

1. 서론

전철급전시스템은 변압기, 전차선, 급전선, 레일 및 보호선등 일련의 수송설비와 이들을 유기적으로 결합시키고 효율적으로 운용, 관리하기 위한 운용설비로 구성되어 있다. 이러한 전철급전시스템은 일반 전력계통에 비해 부하의 특성이나 계통구성 형태 및 제한 현상측면에서 상이한 특징을 가진다. 특히, 최근에 도입된 전철구동시스템에는 컨버터와 인버터가 포함되어 있으며 위상제어 및 펄스폭변조방식에 의하여 제어되기 때문에 고조파를 발생시킨다.

차량에서 발생된 고조파전류는 급전계통의 임피던스 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 고조파문제를 정밀하게 평가할 필요가 있다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원

** 한국철도기술연구원 주임연구원

*** 한국철도기술연구원 책임연구원

**** 한국철도기술연구원 수석연구원

본 연구에서는 철도부하에 의한 발생된 고조파 전류의 과급특성에 주안점을 두고, 그 발생 원인을 규명하고 이를 해석하기 위한 새로운 이론을 개발하였다. 즉, 전철 급전시스템의 해석에 적합한 6단자망 이론을 정립하고 이를 이용하여 급전시스템의 고조파 회로모델을 구성하였다. 본 연구 이론의 유용성을 입증하기 위해 PWM(Pulse Width Modulation) 차량이 운행되고 있는 AT급전시스템에 대해 사례연구를 실시하였다.

2. 고조파 회로모델 및 정식화

2.1 교류 전철급전계통의 고조파 회로모델

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 1과 같이 전철변전소의 스코트변압기에 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 연장급전을 하기 위해 연결해 주는 역할도 한다.

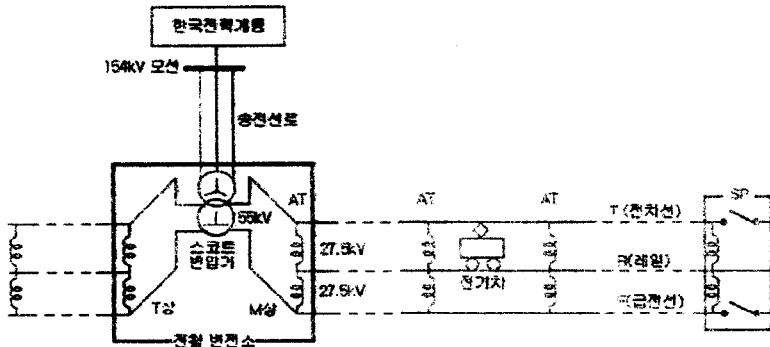


그림 1. AC 급전계통

고려대상 구간을 정의하기 위해, 전철 변전소의 M상에서의 전원 임피던스를 Z_{ss} 로 두고 차량을 고조파전류원으로 하면, M상측에 대한 고조파 등가회로는 그림 2와 같다. 굵은 실선은 각 고조파성분에 대응한 분포정수 또는 T형(x형) 등가회로로 표현해야 할 전차선로를 표시한 것이며 $K1$, $X2$ 는 차량-AT사이의 거리, $L1$, $L2$ 는 각각 변전소-AT, AT-급전구분소까지의 거리를 나타낸 것이다.

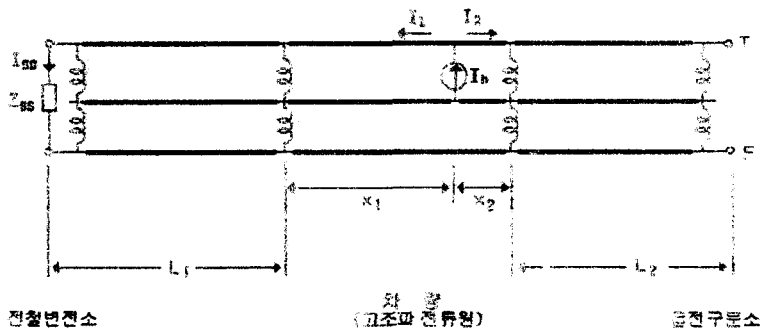


그림 2. M상측의 고조파 등가회로

2.2 6단자 정수에 의한 정식화

일반적으로 정밀한 고조파 해석을 위해서는 회로를 4단자 분포정수회로 또는 복수개의 T형(π 형) 등가회로로 모델링하고 이를 해석하는 것이 바람직하다. 그러나 그림 2의 회로모델에서 고조파 전류원은 양쪽 단권변압기의 2차측(T-R)에 각각 접속되어있고 단권변압기의 1차측(T-F)은 급전선을 통하여 연결되어 있다. 더구나 전차선로의 3가지 도체군(T,R,F)의 상호간에는 정전용량에 의한 어드미턴스가 존재하므로 4단자 정수로 표현하기가 곤란하다.

따라서 본 연구에서는 전철급전시스템의 정밀한 고조파 해석을 위해 6단자 정수를 정의하고 이로부터 고조파 회로를 모델링하여 해석하는 기법을 개발하였다. 고조파 회로를 구성하는 각 요소에 대한 6단자 정수모델은 다음과 같다.

따라서 본 연구에서는 전철급전시스템의 정밀한 고조파 해석을 위해 6단자 정수를 정의하고 이로부터 고조파 회로를 모델링하여 해석하는 기법을 개발하였다. 고조파 회로를 구성하는 각 요소에 대한 6단자 정수모델은 다음과 같다.

1) 급전구분소의 단권변압기

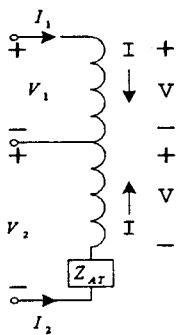


그림 3. SP의 AT

구분소에 설치된 단권변압기는 전차선로의 말단에 위치하고 그 전압전류 특성은 그림 3과 같이 표현된다. 즉, 단권변압기의 T-R간에서의 전압을 V , T-R간에 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 전압강하만큼 작게된다.

따라서 급전구분소의 단권변압기는 식 (1)과 같은 6단자정수로 표현된다.

$$\left. \begin{matrix} V'_1 = V \\ V'_2 = V - Z_{AT} \cdot I \\ I'_1 = I \\ I'_2 = I \end{matrix} \right\} \Rightarrow \begin{bmatrix} V'_1 \\ V'_2 \\ I'_1 \\ I'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -Z_{AT} \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = M_{\pi} \cdot \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} \quad (1)$$

(1)

2) 전차선로

전차선로는 도체군의 자기임피던스 뿐만 아니라 상호임피던스 및 선간 어드미턴스를 포함하고 있다. 이들 정수를 T형등가 회로로 표현하면 그림 4와 같다.

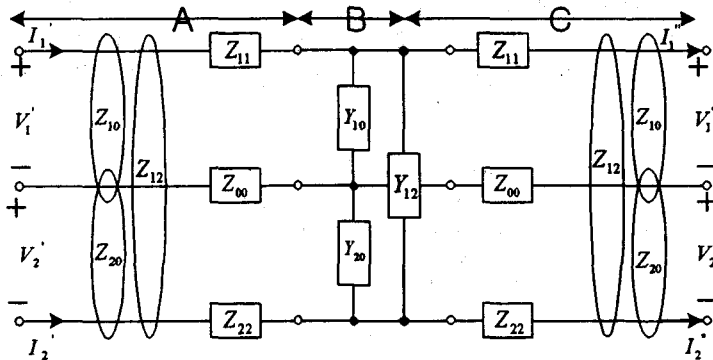


그림 4. 전차선로

그림 4의 A,C 구간에서 송전단과 수신단의 전압, 전류관계는

$$\begin{cases} V_1' = V_1'' + (Z_{11} + Z_{00} - 2Z_{10})I_1' + (Z_{00} + Z_{12} - Z_{10} - Z_{20})I_2' \\ V_2' = V_2'' + (Z_{10} - Z_{00} - Z_{12} + Z_{20})I_1' + (2Z_{20} - Z_{00} - Z_{22})I_2' \\ I_1' = I_1'' \\ I_2' = I_2'' \end{cases}$$

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

이 되고, 그림 4.의 B 구간에서는

$$\begin{cases} V_1' = V_1'' \\ V_2' = V_2'' \\ I_1' = I_1'' + Y_{10}V_1'' + Y_{12}(V_1'' + V_2'') = (Y_{10} + Y_{12})V_1'' + Y_{12}V_2'' + I_1'' \\ I_2' = I_2'' - Y_{20}V_2'' - Y_{12}(V_1'' + V_2'') = -Y_{12}V_1'' - (Y_{20} + Y_{12})V_2'' + I_2'' \end{cases}$$

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

이 된다.

따라서 이들 정수를 모두 포함한 전압, 전류관계는 다음식 (2)와 같은 6단자정수로 정리된다.

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = M_Z \cdot M_Y \cdot M_Z \begin{bmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ I_1'' \\ I_2'' \end{bmatrix} = M_{LINE} \begin{bmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ I_1'' \\ I_2'' \end{bmatrix} \quad (2)$$

3) ATP용 단권변압기

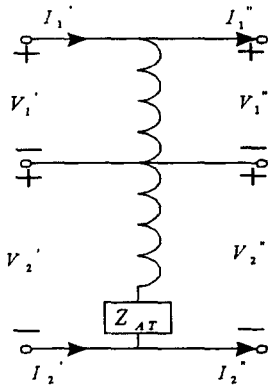


그림 5. ATP용 AT

ATP의 단권변압기는 전차선로의 중간에서 병렬로 접속되고 그 회로 모델은 그림 5와 같다.

변전소측(송전단)측에서 본 ATP용 단권변압기의 T-R간, R-F간 전압은 각각 구분소측(수전)측에서 본 전압과 같다. AT의 전류분류 특성과 내부임피던스를 고려하고 송수전단 전류관계를 정리하여 식 (3)에 나타내었다.

$$\begin{aligned} V_1' &= V_1'' \\ V_2' &= V_2'' \\ I_1' - I_1'' &= I_2' - I_2'' \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} I_1' &= \frac{1}{Z_{AT}}V_1' - \frac{1}{Z_{AT}}V_2' + I_1'' - 2I_2'' \\ V_2' &= V_1' + (I_2' - I_2'')Z_{AT} \Rightarrow I_2' = \frac{1}{Z_{AT}}V_1' - \frac{1}{Z_{AT}}V_2' - I_2'' \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{Z_{AT}} & -\frac{1}{Z_{AT}} & 1 & -2 \\ \frac{1}{Z_{AT}} & -\frac{1}{Z_{AT}} & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ I_1'' \\ I_2'' \end{bmatrix} = M_{MIDAT} \begin{bmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ I_1'' \\ I_2'' \end{bmatrix} \quad (3)$$

4) 차량의 고조파 전류원

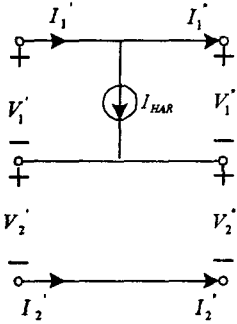


그림 6. 고조파 전류원

철도급전시스템의 주된 고조파 전류원은 차량이므로 차량에서 발생된 고조파는 그림 6.과 같이 전차선로의 레일과 전차선 사이에서 주입되는 전류원으로 취급할 수 있다.

이 경우 차량의 고조파 전류원에 대한 6단자 등가모델은 다음 식(4)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 V_1' &= V_1'' \\
 V_2' &= V_2'' \\
 I_1' &= I_1'' + I_{HAR} \\
 I_2' &= I_2''
 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ I_1'' \\ I_2'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_{HAR} \\ 0 \end{bmatrix} = I_4 \cdot \begin{bmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ I_1'' \\ I_2'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_{HAR} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

5) 변전소의 단권변압기

변전소의 단권변압기는 다음 그림 7.과 같이 결선되고 앞서와 같은 방법에 의해 정리하면 식(5)과 같이 2쌍의 관계식을 유도할 수 있다. 이들 관계식들은 다음 3절의 고조파해석에서 직접 이용된다.

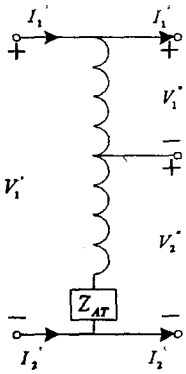


그림 7. 변전소 AT

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & \begin{cases} V_1' = V_1'' + V_2'' \\ I_1' - I_1'' = -I_1'' - I_2'' \Rightarrow I_1' = \frac{1}{2}I_1'' - \frac{1}{2}I_2'' \end{cases} \\
 (2) \quad & \begin{cases} V_1' = 2V_1'' + \frac{Z_{AT}}{2}I_1'' + \frac{Z_{AT}}{2}I_2'' \\ I_1' = \frac{1}{2}I_1'' - \frac{1}{2}I_2'' \end{cases} \\
 (1) \quad & \begin{bmatrix} V_1' \\ I_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ I_1'' \\ I_2'' \end{bmatrix} \quad (5a)
 \end{aligned}$$

$$(2) \quad \begin{bmatrix} V_1' \\ I_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & \frac{Z_{AT}}{2} & \frac{Z_{AT}}{2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ I_1'' \\ I_2'' \end{bmatrix} \quad (5b)$$

3. 고조파 해석

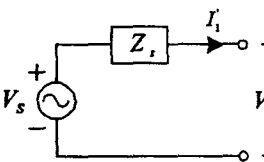


그림 8. 전원계통

전철 변전소로 유입되는 고조파에 주안점을 두고 차량에서 발생된 고조파 전류에 대한 공진현상을 해석한다. 이를 위해서 2절에서 유도한 전차선로측의 6단자정수를 이용하였다.

먼저, 전철 주변압기의 임피던스를 포함한 등가임피던스와 함께 전원계통의 등가회로를 그림 8.에 보인다. 그림 8.에서 전압, 전류는 다음식 (6)을 만족한다.

$$V_s = V_1' + Z_s I_1' \quad (6)$$

식 (6)에 식 (5a)를 대입하면

$$V_s = V_1' + V_2' + Z_s \left(\frac{1}{2} I_1' - \frac{1}{2} I_2' \right) \text{ 이 되고}$$

식 (6)에 식 (5b)를 대입하면

$$\begin{aligned} V_s &= 2V_1' + Z_{AT} \left(\frac{1}{2} I_1' + \frac{1}{2} I_2' \right) + Z_s \left(\frac{1}{2} I_1' - \frac{1}{2} I_2' \right) \\ V_s &= 2V_1' + \frac{Z_{AT} + Z_s}{2} I_1' + \frac{Z_{AT} - Z_s}{2} I_2' \end{aligned}$$

이 되므로 변전소의 단권변압기와 전원계통을 포함한 6단자 정수는 다음식 (7)로 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \frac{Z_s}{2} & -\frac{Z_s}{2} \\ 2 & 0 & \frac{Z_{AT} + Z_s}{2} & \frac{Z_{AT} - Z_s}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} = M_{ZS} \cdot \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (7)에서 전원계통의 내부전압은 순수한 기본파 성분으로 가정할 수 있으므로 각 고조파별 계산시에 V_s 는 0으로 둘 수 있다.

따라서 구분소 측부터 6단자 행렬을 변전소측까지 차례로 집계하면 식 (8)로 유도된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_s \\ V_s \end{bmatrix} &= M_{ZS} \cdot M_{LNB} \cdot M_{AT} \cdots \cdots M_{LNB} \cdot M_{TRAIN} \cdot M_{LNB} \cdot M_{SP} \cdot \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V_s \\ V_s \end{bmatrix} &= M \cdot \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

결국 식 (8)의 연립방정식을 풀면 구분소측의 AT에 흐르는 고조파 전류 I와 전압 V를 구할 수 있고 순차적으로 6단자 행렬을 곱하여 급전시스템의 각 요소에 흐르는 고조파 전압, 전류를 산출할 수 있다.

4. 사례연구

본 연구에서 제안한 6단자정수에 의한 고조파 해석방법의 유용성을 검증하기 위해 실제 전철급전계통에 대하여 사례연구를 실시하였다.

4.1 입력 자료

입력자료로는 기존의 전철급전시스템과 신설 시스템의 두가지를 대상으로 하였다. 신설 시스템의 경우, 3상 전원계통은 우리나라에서 최근에 신설된 S전철변전소의 데이터를 사용하였고 전차선로의 고조파 회로정수는 S 전철변전소의 급전구간에서 실측하였다.

4.2 신설 급전시스템에 대한 고조파 해석결과

본 연구의 6단자정수에 의한 고조파 해석방법으로 계산한 결과를 고조파 전류확대율로써 그림 9.에 보인다.

그림 9.에서 신설 전철 급전시스템의 경우, 공진점은 11조파에서 발생하였으며 그 확대율은 4.3으로 평가되었다. 이 결과는 우리나라 재래선에 비해 확대율 자체는 비슷하지만 공진점이 저차조파에서 발생되었다는 점이 특징이라 할 수 있다.

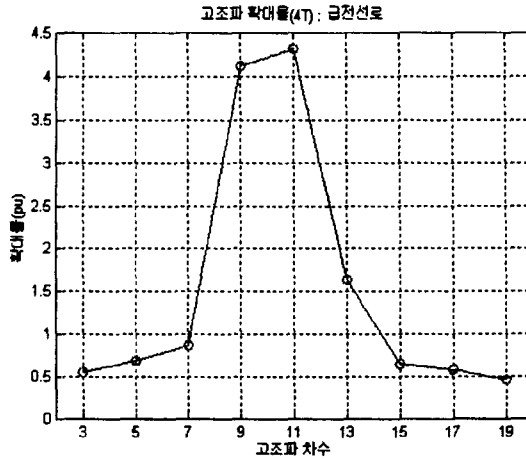


그림 9. 고조파 확대율 계산결과

한편, 전차선로 모델은 분포정수 회로의 경우가 가장 정확한 것으로 알려져 있다. 따라서 T형 등가로 모델링할 경우 그 개수를 몇 개로 해야할 것인가에 대한 검토가 필요하다. 그림 10.은 T형 등가의 개수가 계산결과(레일에서의 고조파 확대율)에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

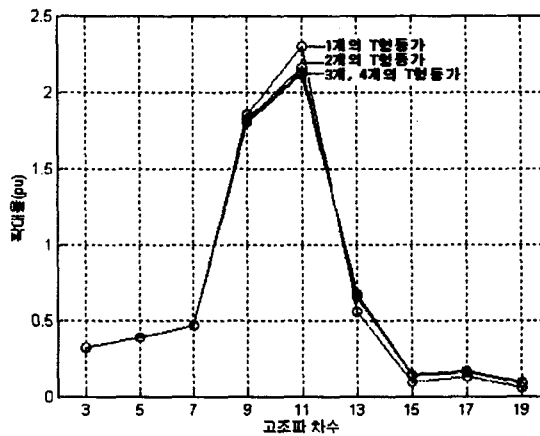


그림 10. T형 등가의 개수에 따른 영향검토

그림 10.에서 저차조파에서는 계산결과가 T형 회로의 개수에 거의 영향이 없으나 고차조파에서는 다소 차이를 보인다. 그러나 T형 등가의 개수가 3개 이상이면 계산결과는 거의 일치한다. 따라서 전차선로를 T형 등가회로로 표현할 경우 3개의 T형회로를 이용하면 충분할 것으로 판단된다.

4.3 기존 급전시스템에 대한 고조파 해석결과

차량에서 발생된 고조파의 전파특성을 분석하기 위해 급전구간이 50 km인 경우에 있어서 차량의 위치에 따른 고조파전류 확대율을 계산하고 이를 그림 11.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.

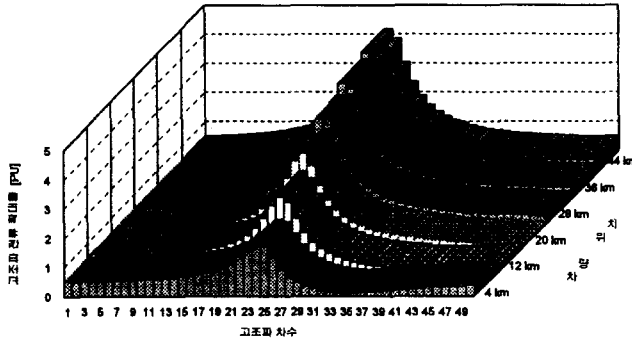


그림 11. 차량위치에 따른 고조파 확대현상

그림 12는 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.

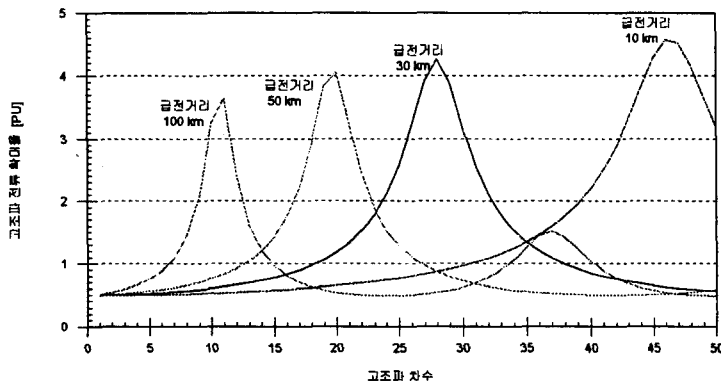


그림 12. 급전거리와 고조파공진과의 상관성

5. 검토 및 고찰

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

- 1) 전차선로를 T형 회로로 모델링할 경우 최소 3개의 T형회로를 이용해야 한다.
- 2) 급전선로의 길이가 일정한 경우, 공진점(공진주파수)은 차량의 위치에 관계없이 거의 변함이 없다.
- 3) 급전선로의 길이가 일정한 경우, 공진점에서의 고조파 확대율은 차량이 변전소로부터 멀수록(구분소에 가까울 수록) 커진다.
- 4) 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