

# 경부고속철도 시험선구 고조파 예측에 관한 연구

## A study of the harmonics evaluation in the test track of Korea High Speed Rail

김길상                      오광해                      권삼영                      이태형  
Kim, Gil-Sang\*      Oho, Kwnag-Hae\*\*      Kwon, Sam-Young\*\*\*      Lee, Tae-Hyung\*\*\*\*

### ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the harmonics generated from Korea High Speed Rail's trainset and to analyze the effect on the KEPCO power system. This study focuses on the test track of the high speed rail and analyzes 154kV transmission line, scott transformer, autotransformer and 27.5kV line. The trainset is modeled as a harmonic source attached to the catenary line of the test track. Then, harmonic distortion is calculated. This distortion is compared with the KEPCO's regulations in relation to harmonic.

### 1. 서론

본 연구는 경부고속철도 운영을 위해 한국전력으로부터 전력을 수전하여야 함에 따라 고속철도 운영시 발생되는 고조파가 한전계통에 미치는 영향을 예측 계산한 것이다. 그림 1에서 보이는 바와 같이 경부고속철도의 시험선구간(천안~대전)을 대상으로 하였으며 경부고속철도 시험선구의 급전계통은 한전청원변전소로부터 154kV를 수전받아 약 10km의 송전선로를 거친 후 신청주 전철변전소에서 55kV로 변성하여 열차에 전력이 공급되도록 구성되어 있으며 전차선로는 교류 25kV, AT급전방식을 채택하고 있다.

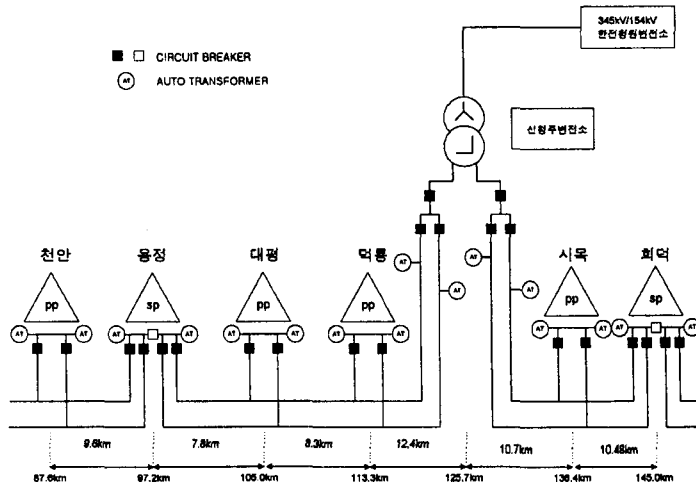


그림 1 경부고속철도 시험선구 급전계통도

\* 한국철도기술연구원 수석연구원, 정회원  
\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원  
\*\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 비회원  
\*\*\*\* 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

2. 고조파 계산 입력 자료

2.1. 송전선로 자료

송전선로의 인덕턴스(L)는 사양을 사용하면 식(1)과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 L &= 0.4605 \log \frac{D}{r} + 0.0529 \\
 &= 0.4605 \log \frac{5.945}{0.01425} + 0.0529 \quad \text{----- (1)} \\
 &= 1.2595 \times 10^{-6} \text{ [H/m]}
 \end{aligned}$$

송전선로의 커패시턴스(C)는 대지에 Y로 연결된 대지정전용량을 Δ로 변환하여 구한다.

완전 연가가 이루어진 3상 1회선 선로에서는 3선 1괄의 경우 1선당의 대지 정전 용량 Cs, 상호정전용량 Cm 은 각각 식(2)와 식(3)으로 표현된다.

$$C_s = \frac{0.02413}{\log_{10} \frac{8h^3}{rD^2}} \text{ [μF/km]} \quad \text{----- (2)}$$

$$C_m = \frac{0.02413 \log_{10} \frac{2h}{D}}{\log_{10} \frac{D}{r} \log_{10} \frac{8h^3}{rD^2}} \text{ [μF/km]} \quad \text{----- (3)}$$

송전선로 사양을 대입하여 Cs, Cm을 구하고 A-C에서 들여다 본 등가정전용량(C)은 식(4)로 계산된다.

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{1}{2} C_s + \frac{3}{2} C_m \\
 &= \frac{1}{2} \times 0.005 + \frac{3}{2} \times 0.00178 \quad \text{----- (4)} \\
 &= 0.00517 \text{ [μF/km]}
 \end{aligned}$$

송전선로의 컨덕턴스(G)는 무시한다.

송전선로는 선간에 걸려있으므로 이를 반영하여 특성임피던스와 전파정수를 구한다.

송전선로의 특성임피던스 Z<sub>0TL</sub>와 전파정수 γ<sub>TL</sub>은 각각 식(5), 식(6)으로 된다.

$$Z_{0TL} = \sqrt{\frac{2(R+j\omega L)}{j\omega C}} \text{ [Ω]} \quad \text{----- (5)}$$

$$\gamma_{TL} = \sqrt{2(R+j\omega L)j\omega C} \times 10^{-9} \text{ [1/m]} \quad \text{----- (6)}$$

여기서, f는 주파수

전차선-급전선의 직렬임피던스는 식(7)과 같이 된다.

$$Z_{ser1} = 0.1909 + j12.05f \times 10^{-3} \text{ [Ω/km]} \quad \text{----- (7)}$$

전차선-급전선의 병렬어드미턴스를 구하면 식(8)이 된다.

$$y_{par1} = j65.169 \times 10^{-9} * f \text{ [S/km]} \quad \text{-----}(8)$$

따라서, 전차선-급전선의 특성임피던스 및 전파정수는 식(9)와 식(10)으로 된다.

$$Z_{0f} = \sqrt{\frac{Z_{ser1}}{Y_{par1}}} = \sqrt{\frac{190.9 + j12.05f}{j65.169f}} \times 10^3 \quad \text{-----}(9)$$

$$Y_f = \sqrt{Z_{ser1} Y_{par1}} \quad \text{-----}(10)$$

$$= \sqrt{(190.9 + j12.05f)j65.169f} \times 10^{-6} \text{ [}\frac{1}{m}\text{]}$$

전차선-레일의 직렬임피던스를 구하면 식(11)로 계산된다.

$$Z_{ser2} = 0.3210 + j14.3f \times 10^{-3} \text{ [}\Omega/\text{km}] \quad \text{-----}(11)$$

전차선-레일의 병렬어드미턴스는 식(12)의 값을 갖게 된다.

$$y_{par2} = j67.456 \times 10^{-9} * f \text{ [S/km]} \quad \text{-----}(12)$$

따라서, 전차선-급전선의 특성임피던스 및 전파정수는 식(13)과 식(14)로 계산된다.

$$Z_{0tr} = \sqrt{\frac{Z_{ser2}}{Y_{par2}}} = \sqrt{\frac{321.0 + j14.3f}{j67.456f}} \times 10^3 \text{ [}\Omega\text{]} \quad \text{-----}(13)$$

$$Y_{tr} = \sqrt{Z_{ser2} Y_{par2}} \quad \text{-----}(14)$$

$$= \sqrt{(321.0 + j14.3f)j67.456f} \times 10^{-6} \text{ [}\frac{1}{m}\text{]}$$

### 3. 시험선구에서의 고조파예측 계산

#### 3.1. 급전계통 해석 모델

그림 1과 같은 경부고속철도 시험선구간의 급전계통을 대상으로 한전변전소 인출점에서의 고조파영향을 분석하기 위하여 Scott 변압기 M상 회로의 전차선로(Catenary)에 열차가 주행하는 경우를 가정하여 해석하기로 하고 계통을 모델링하면 그림 2와 같다

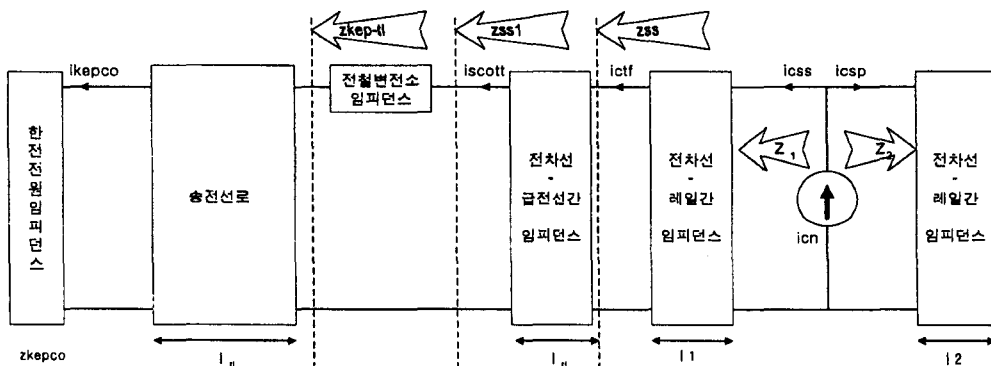


그림 2 M상 등가회로

### 3.2. $Z_{kep-tl}$ 구하기

송전선로 말단에서 즉 전철변전소의 인입측에서 전원임피던스를 바라본 임피던스  $Z_{kep-tl}$  을 구하기 위해 한전변전소에서의 전압과 전류를 각각  $V(x)$ ,  $I(x)$ , 송전선로 말단에서의 전압과 전류를 각각  $V(0)$ ,  $I(0)$ 라 하면 전압, 전류 관계식은 식(15), 식(16)과 같다.

$$V(0) = AV(x) + BI(x) \quad \text{----- (15)}$$

$$I(0) = CV(x) + DI(x) \quad \text{----- (16)}$$

여기서,

$$A = D = \cosh \gamma_{tl} l_{tl}$$

$$B = Z_{OTL} \sinh \gamma_{tl} l_{tl}$$

$$C = \frac{1}{Z_{OTL}} \sinh \gamma_{tl} l_{tl}$$

식(15)를 식(16)으로 나누고  $V(0)/I(0)$ 를  $Z_{kep-tl}$  라 하고  $V(x)/I(x)$ 를  $Z_{kepco}$ 라 놓으면 고조파 임피던스는 식(17)과 같다.

$$Z_{kep-tl} = Z_{OTL} \frac{2Z_{kepco} \cosh \gamma_{tl} l_{tl} + Z_{OTL} \sinh \gamma_{tl} l_{tl}}{2Z_{kepco} \sinh \gamma_{tl} l_{tl} + Z_{OTL} \cosh \gamma_{tl} l_{tl}} \quad \text{----- (17)}$$

이다.

여기서,

$$Z_{OTL} = \text{송전선로의 특성임피던스}$$

$$Z_{kepco} = 0.3846 + j0.0288f$$

$$\gamma_{TL} = \text{송전선로의 전파정수}$$

$$l_{tl} = \text{송전선로의 거리 } 10.1 \times 10^3 [m]$$

이다.

### 3.3. $Z_{ssl}$ 구하기

전철변전소 후단에서 한전측을 바라본 등가임피던스는 식(18)과 같이 표현된다.

$$Z_{ssl} = \frac{1}{a^2} Z_{kep-tl} + Z_{scott} \quad \text{----- (18)}$$

$$\text{여기서, } a = 154/55$$

$$Z_{scott} = j0.14f$$

### 3.4. $Z_{ss}$ 구하기

열차가 존재하지 않는 AT구간의 말단에서 한전측을 바라본 고조파 임피던스는 식(19)와 같이 표현된다.

$$Z_{ss} = Z_{0ff} \frac{Z_{ssl} \cosh \gamma_{ff} l_{ff} + Z_{0ff} \sinh \gamma_{ff} l_{ff}}{Z_{ssl} \sinh \gamma_{ff} l_{ff} + Z_{0ff} \cosh \gamma_{ff} l_{ff}} \quad \text{----- (19)}$$

$Z_{0f}$  = 전차선-급전선간의 특성임피던스

여기서,  $\gamma_f$  = 전차선-급전선의 전파정수

$l_f$  = 첫번째 AT구간의 길이  $10.7 \times 10^3 [m]$

### 3.5. $I_{css}$ 구하기

그림 1에서 고조파발생원(열차)의 위치에서 변전소측을 본 급전회로의 임피던스를  $Z_1$ 이라 하고 급전선로 말단측을 본 급전회로의 임피던스를  $Z_2$ 라 하면 식(20)과 같이 표현된다.

$$Z_1 = Z_{0tr} \frac{Z_{ss} \cosh \gamma_{tr} \ell_1 + Z_{0tr} \sinh \gamma_{tr} \ell_1}{Z_{ss} \sinh \gamma_{tr} \ell_1 + Z_{0tr} \cosh \gamma_{tr} \ell_1} \quad (\Omega) \quad \text{----- (20)}$$

$$Z_2 = Z_{0tr} \coth \gamma_{tr} \ell_2 \quad (\Omega)$$

여기서,

$Z_{0tr}$  = 전차선-레일간의 특성임피던스

$\gamma_{tr}$  = 전차선-레일간의 전파정수

$l_{tr}$  = 전차선-레일간의 거리 ( $0 \sim 10.5 \times 10^3 [m]$ )

$Z_1$ 과  $Z_2$ 는 고조파전원에 대하여 병렬회로를 구성하므로 그 병렬임피던스  $Z_p$ 는 식(21)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} Z_p &= \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (\Omega) \quad \text{----- (21)} \\ &= \frac{Z_{0tr} \cosh \gamma_{tr} (\ell_1 - \ell_2) \cdot (Z_{ss} \cosh \gamma_{tr} \ell_1 + Z_{0tr} \sinh \gamma_{tr} \ell_1)}{Z_{ss} \sinh \gamma_{tr} \ell_1 + Z_{0tr} \cosh \gamma_{tr} \ell_1} \end{aligned}$$

여기서,

$$l = l_1 + l_2$$

이다. 식(21)에서 사용한 값을 사용하여 고조파임피던스를 구할 수 있다.

열차에 의해 발생한 고조파전류를  $I_{cn}(A)$ , 한전방향으로 흐르는 고조파전류를  $I_{css}(A)$ , 급전구분소 방향으로 흐르는 고조파전류를  $I_{csp}(A)$ 라 하고  $I_{css}$  를 구하면 식(22)와 같다.

$$\begin{aligned} I_{css} &= I_{cn} \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \text{----- (22)} \\ &= I_{cn} \cdot \frac{\left(\frac{1}{b}\right)^2 Z_{ss} \sinh \gamma_{tr} \ell_1 + Z_{0tr} \cosh \gamma_{tr} \ell_1}{\left(\frac{1}{b}\right)^2 Z_{ss} \sinh \gamma_{tr} \ell_1 + Z_{0tr} \cosh \gamma_{tr} \ell_1} \end{aligned}$$

이다.

여기서,  $b = 55/27.5$

### 3.6. Ictf구하기

열차가 존재하지 않는 구간에 흐르는 고조파 전류를 구하기 위해 전류관계식을 적용하면 식(23)과 같다.

$$I_{css} = C_{tr}Z_{ss}I_{ctf} + D_{tr}I_{ctf}$$

$$I_{ctf} = \frac{\frac{1}{b}I_{css}}{C_{tr}Z_{ss} + D_{tr}} \quad \text{----- (23)}$$

### 3.7. Iscott구하기

전철변전소로 유입되는 고조파 전류는 2.5에서 사용한 식을 동일하게 적용하여 구하면 식(24)와 같다.

$$I_{scott} = \frac{I_{ctf}}{C_{tr}Z_{ss1} + D_{tr}} \quad \text{----- (24)}$$

### 3.8. Ikepco구하기

전철변전소를 통과하여 한전측으로 유입되는 전류는 식(25)와 같다.

$$I_a = \frac{N_2}{N_1} \frac{2}{\sqrt{3}} I_T$$

$$I_b = \frac{-1}{\sqrt{3}} I_T + \frac{N_2}{N_1} I_{M'}$$

$$I_c = \frac{-1}{\sqrt{3}} I_T + \frac{N_2}{N_1} I_{M''}$$
----- (25)

### 3.9. 고조파전압(Vkepco) 및 전압왜형율(HDF) 구하기

한전변전소 인출점에서의 전압강하를 구하면 식(26)과 같다.

$$V_{kepco}[V_1, V_2, \dots, V_{51}] = 2Z_{kepco} * I_{kepco} \quad \text{----- (26)}$$

따라서 고조파전압  $\overline{V_{kepco}}$  은

$$\overline{V_{kepco}} = [154 \times 10^3 - V_1, V_2, \dots, V_{51}]$$

고조파전압왜형율은 식(27)과 같이 표현된다.

$$HDF = 100\% \times \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad \text{----- (27)}$$

#### 4. 계산사례

고조파 예측계산은 그림 1과 같은 경부고속철도 시험선구의 M상, T상 선로에 실제 1단계 운행계획대로 열차가 2대 주행하는 경우로 하였다. 열차는 50[km/h], 100[km/h], 200[km/h] 및 300[km/h] 속도로 주행하는 경우에 대하여 수행하였다.

##### 4.1. 공진주파수와 고조파 임피던스

차량위치에 따른 공진주파수와 고조파임피던스는 표 1과 같다.

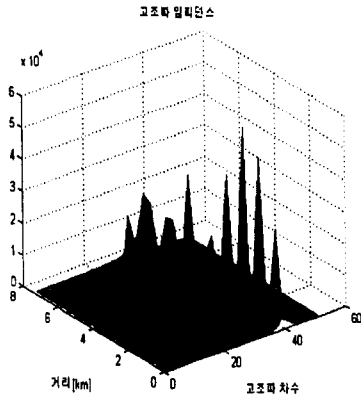


그림 3 M좌에서의 고조파임피던스

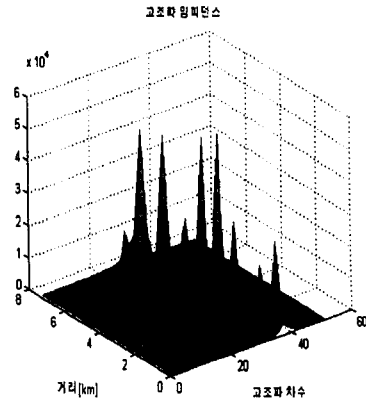


그림 4 T좌에서의 고조파임피던스

표 1 차량위치별 고조파임피던스

차량위치	고조파차수	임피던스
0.00	2400	7848.63
0.37	2340	30181.83
0.74	2340	6952.38
1.11	2280	50991.23
1.48	2280	6586.39
1.85	2220	58450.59
2.22	2220	6864.81
2.59	2160	41264.60
2.96	2160	8151.01
3.33	2100	20036.74
3.70	2100	12126.80
4.07	2040	10549.31
4.44	2040	35526.82
4.81	2040	7389.52
5.18	1980	19252.11
5.55	1980	18711.49
5.92	1920	7304.74
6.29	1920	21082.72
6.66	1920	22527.68
7.03	1920	8019.78
7.40	1860	13357.30

#### 4.2. 고조파 왜형을

각 경우에 대한 고조파 전압 왜형율(HDF : Harmonics Distortion Factor)은 표 2와 같다.

표 2 열차운행시의 전압왜형율

T좌 \ M좌	50km/h			100km/h			200km/h			300km/h		
50km/h	0.6	0.3	0.6	0.6	0.8	0.8	0.6	0.4	0.4	0.6	0.3	0.3
100km/h	0.9	0.4	0.4	0.9	0.5	0.5	0.9	0.5	0.5	0.9	0.3	0.3
200km/h	0.4	0.6	0.6	0.4	0.9	0.9	0.4	0.2	0.2	0.4	0.3	0.3
300km/h	0.4	0.5	0.5	0.4	0.9	0.9	0.4	0.3	0.3	0.4	0.2	0.2

#### 5. 결론

공진주파수는 차량위치에 따라 변동하였으며 31차 고조파와 41차고조파 사이에서 발생하였으며 급전구분소로 열차가 이동함에 따라 저차 고조파에서 공진이 된다는 것을 확인할 수 있었다. 모든 경우에 대해 전압왜형율은 한전 규제치를 넘지 않았으며 저속도에서 전압왜형율이 큰 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

1. 持永芳文외(1994), AT급전회로에서 발생하는 고조파 공진과 억제대책, T. IEE Japan Vol. 114-D, No-10
2. 고속철도 연구보고서(전기분야) 한국철도기술연구원 1997. 12
3. 경부고속철도 시험선구 전력설비 일부 실시설계 설계설명 요약보고서, 한국고속철도건설공단 1993. 7