2001년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집(2001.4.19~21)

전기철도에서의 고조파저감장치의 실험적 연구

한문섭, 권삼영, 김용규
한국철도기술연구원

A experimental study on harmonic reduction in electric railway

M. S. Han, S. Y. Kwon, Y. K. Kim
Korea Railroad Research Institute

Abstract - 국내 BT급전방식의 고조파 문제를 해결하기 위하여 급전말단에 RC 필터를 설치하는 고조파저감장치를 설계 제작하여 그 고조파 저감특성을 실험적으로 입증하였다.

1. 서 론

국내전기철도에서 운영하고 있는 급전방식은 수도권에서는 교류 25kV AT(Auto Transformer)급전방식과 직류 1,500V방식을 사용하고 있으며, 수도권이외 구간에서는 교류 25kV AT급전방식과 교류 25kV BT (Booster Transformer)급전방식을 사용하고 있다.

전기차의 견인전동기는 초기에는 추진제어가 용이한 직류직권전동기가 주로 사용되어 수도권 1호선(경인/경부선) 전동차는 다이오드 정류방식에 의한 저항제어방식을 이용하고 수도권이외의 노선을 운행하는 전기기관차는 세미브릿지(Semi-Bridge)형의 싸이리스터 위상제어방식을 사용하고 있다. 이러한 정류방식을 사용하는 전기차에서는 저차영역에서 큰 고조파 전류를 발생시키게 된다.

특히 전기기관차에 의한 고조파로 인해 변전소내의 방전코일의 손상은 물론 철도에서 사용하는 모든 전원계통으로 전철구간에서 발생한 고조파가 유입되어 철도의 운영에 많은 지장을 초래하는 등 고조파 문제가 야기되었다.

그러므로 본 연구를 통하여 고조파 문제가 심각한 BT급전방식의 특정변전소를 선정하여 변전소 급전측과 전기기관차에서 발생한 고조파 현황을 파악하고 문제해결을 위한 고조파를 경감방안을 실험적으로 규명하였다

2. 본 론

2.1 개요

"고조파"란 기본 주파수의 정수배 차수의 주파수를 갖는 정현파 성분을 말한다.

일반적으로 비정현파 f(t)는 식 (1)과 같이 주파수와 진폭을 달리하는 무수히 많은 여현항(余弦項)과 정현항(正弦項)의 합으로 표시될 수 있으며 이를 퓨리에(Fourier) 급수에 의한 전개라고 한다.

$$\begin{aligned} f(t) &= a_0 + a_1\cos\omega t + \ldots + a_n\cos n\omega t + \ldots + \\ &\quad b_0 + b_1\sin\omega t + \ldots + b_n\sin n\omega t + \ldots \\ &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n\cos n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n\sin n\omega t \\ &= \text{직류} + \text{여현항} + \text{정현항} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 주파수가 영(零)일 때 상수항 a_0는 여현항 $a_0\cos 0t = a_0$와 상수항 b_0는 정현항 $b_0\sin 0t = 0$이다. 모든 동일주파수(ω, 2ω, ..., $n\omega$, ...)에 대해 여현항과 정현항을 합성하면,

$$\begin{aligned} f(t) &= a_0 + A_1\sin(\omega t + \phi_1) + \ldots + \\ &\quad A_n\sin(n\omega t + \phi_n) + \ldots \\ &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n\sin(n\omega t + \phi_n) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{단, } A_n = \sqrt{(a_n^2 + b_n^2)},\ \phi_n = \tan^{-1}\frac{a_n}{b_n}$$

이 된다.

식 (2)에서 a_0는 시간과 주파수에 무관한 직류성분이고 그 외의 항은 각종 주파수를 갖는 정현파 성분이 된다.

특히 직류성분 외의 성분 중 $A_1\sin(\omega t + \phi_1)$은 비정현파 f(t)와 동일주파수 성분을 갖는 기본파가 되고, 그 외의 $\sum_{n=2}^{\infty} A_n\sin(n\omega t + \phi_n)$는 기본파의 2, 3,..., n, ...배의 주파수성분을 갖게 되는데 각각 2차 고조파, 3차 고조파, ..., n차 고조파, ...로 부르며 이를 합쳐 "고조파"라 한다.

2.2 고조파 발생

전기철도에서의 고조파 발생원은 주로 전기차이다.

전기기관차는 견인전동기를 구동시키기 위해서 싸이리스터를 이용한 위상제어를 사용하고 있어 다른 제어방식에 의한 전기차보다 고조파 전류를 많이 함유하고 있으며 실제 측정을 통한 고조파 발생 현황은 다음과 같다.

전기기관차 부하에 따른 고조파 전류함유율은 그림 1과 같으며 전기기관차의 전류가 약 120A이하일 경우 싸이리스터 위상각이 커서 고조파 전류함유율이 비교적 큰 값을 나타내면서 큰 기울기로 줄어드는 경향을 나타내지만, 120A이상에서는 고조파 전류함유율이 23%에서 미소하기는 하지만 점차 증가하는 것을 볼 수 있다. 최대 전류시의 고조파 전류함유율은 약 23%이다.

한편 전기기관차에서 발생하는 각 조파별 최대전류를 구하면 그림 2와 같다.

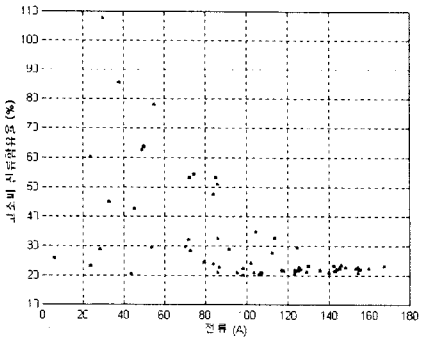

그림 1.전기기관차의 부하에 따른 고조파 전류함유율

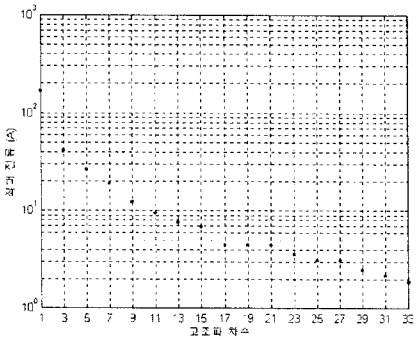

그림 2. 전기기관차의 각 조파별 최대 고조파전류

2.3 변전소측 고조파

BT 급전계통 변전소 급전측 고조파 전류와 전압은 다음과 같다.

그림 3은 변전소 부하전류에 따른 전압왜형률을 나타낸 그림으로 전류가 증가함에 따라 전압왜형률이 1%정도에서 증가하여 22%에서 포화됨을 알 수 있으며 고조파 전류는 5차 조파 이상에서 크게 발생하고 있다.

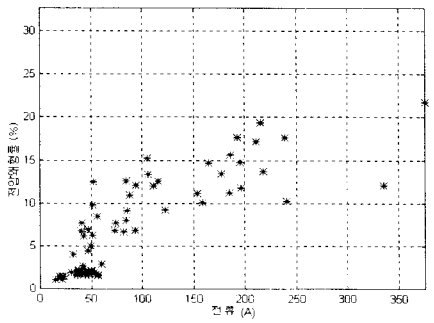

그림 3. BT 급전계통 변전소의 전류에 대한 전압왜형률

2.4 고조파 저감대책

BT 급전계통 변전소의 고차 고조파 전류를 저감시키기 위해 그림 4와 같이 전기기관차에서 변전소(SS)측을 바라본 급전회로의 임피던스를 Z_1(거리 l_1)이라 하고 급전선로 구분소(SP) 측을 본 급전회로의 임피던스를 Z_2(거리 l_2)라 할 때, 전기차의 위치에서 구분소 측까지를 4단자회로로 표시하면 식 (3)과 같다.

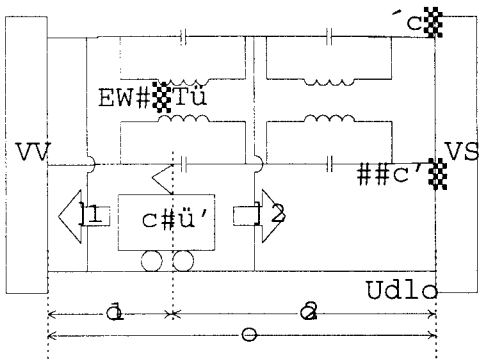

그림 4. BT 급전계통도

$$\begin{bmatrix} E_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh\gamma l_2 & Z_0 \sinh\gamma l_2 \\ \frac{1}{Z_0}\sinh\gamma l_2 & \cosh\gamma l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{sp} \\ I_{sp} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, $Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$: 특성 임피던스(Ω)

$\gamma = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$: 전파정수

만일 구분소에 고조파저감장치로서 RC 필터(Z_{CR})를 설치할 경우, Z_2의 위치각을 θ_{SP}라 하면 전기기관차가 있는 위치에서의 전압과 전류를 구하면 식 (4)와 (5)가 된다.

$$\begin{aligned} E_2 &= E_{sp}\cosh\gamma l_2 + I_{sp} Z_0 \sinh\gamma l_2 \\ &= E_{sp}(\cosh\gamma l_2 + \frac{1}{Z_{CR}} Z_0 \sinh\gamma l_2) \\ &= E_{sp}\frac{\cosh\gamma l_2 \sinh\theta_{sp} + \cosh\theta_{sp} \sinh\gamma l_2}{\sinh\theta_{sp}} \\ &= E_{sp}\frac{\sinh(\gamma l_2 + \theta_{sp})}{\sinh\theta_{sp}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} I_2 &= E_{sp}\sinh\frac{\gamma l_2}{Z_0} + I_{sp}\cosh\gamma l_2 \\ &= I_{sp}(\frac{Z_{CR}}{Z_0}\sinh\gamma l_2 + \cosh\gamma l_2) \\ &= I_{sp}\frac{\sinh\gamma l_2 \sinh\theta_{sp} + \cosh\gamma l_2 \cosh\theta_{sp}}{\cosh\theta_{sp}} \\ &= I_{sp}\frac{\cosh(\gamma l_2 + \theta_{sp})}{\cosh\theta_{sp}} \end{aligned} \quad (5)$$

전기기관차가 있는 위치에서의 구분소측을 바라본 임피던스는 식 (4)과 (5)에 의해 구할 수 있으며 식 6과 같다.

$$Z_2 = \frac{E_2}{I_2} = Z_0 \tanh(\gamma l_2 + \theta_{sp}) \quad (6)$$

단, $\theta_{sp} = \tanh^{-1}\frac{Z_{CR}}{Z_0}$

여기서 Z_{CR}을 특성 임피던스 Z_0와 같게 하면, $\theta_{sp} = \infty$가 되어 식 (7)과 같이 되어 Z_2는 일정하게 되어

전기기관차의 위치에 관계없이 고조파를 저감할 수 있게된다.

$$Z_2 = Z_0 \tanh(\gamma l_2 + \infty) = Z_0 \qquad (7)$$

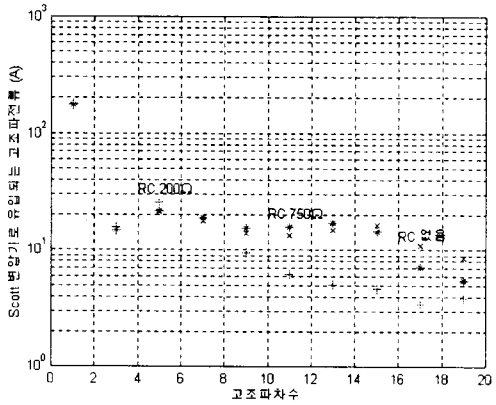

그림 5. 변전소로 유입되는 고조파 예측전류

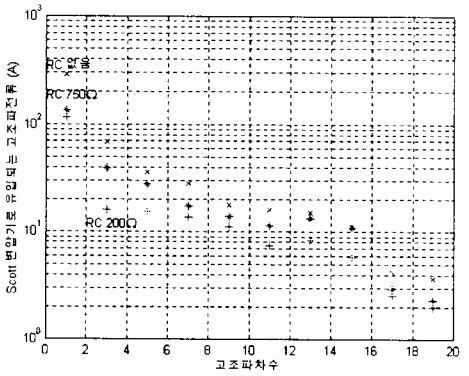

그림 6. 변전소로 유입되는 고조파 측정전류

위 (7)식의 결과를 이용하여 급전 말단에 RC 필터의 값을 R=200Ω, C=1.5uF로 선정하여 시제품을 제작 현장시험을 실시하였다. 그림 5와 6은 각각 RC 필터를 급전측 말단에 설치할 경우의 변전소로 유입되는 고조파 예측전류와 측정전류를 보이고 있다. (R=750Ω, C=0.18uF은 기존 설치된 필터) RC 필터 설치전과 설치후를 비교할 때 9조파 이상에서 고조파 전류가 상당히 감소되었으며 고조파 예측전류와 측정전류의 양상이 거의 일치함을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서의 고조파 대책으로 BT 급전계통 중 국수변전소의 원덕구분소방면에 200Ω, 1.5uF의 RC 필터를 구분소에 설치하여 현장시험을 수행한 결과 고조파 전류함유율이 10.87%로 기존보다 두 배 이상 줄어들었고 수전 측 전압왜형률 최고 4.9%로 기존보다 두 배 이상 줄어듦을 확인하였다.

본 실험은 대상변전소의 M상 급전측의 구분소에서 수행하였으며 T상 급전측의 구분소에도 RC 필터를 설치할 경우를 예측 계산한 결과 2.5%까지 수전 측 전압왜형률을 줄일 수 있음을 예측할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

(1) "전철고조파 대책", 일신전기, 1997. 4. 15.
(2) "경부고속전철용 전력공급의 비용절감 방안연구", 한국전기연구소, 1992. 10
(3) "고속전철의 성능향상을 위한 전기 및 전자기술연구", 한국전기연구소, 1994. 6
(4) "VVVF차 주행시에 수반되는 고조파 장해에 관한 조사보고서", 현대정공 외, 1993. 3. 29
(5) "KNR 분당선 교류 VVVF 전동차 유도장애시험 결과보고서", 대우 중공업, 1996. 12
(6) Mellitt. B. 외 5인, "Harmonic characteristics of traction loads on New Zealand's newly electrified North Island line, 10th International Conference on electricity distribution, 1989
(7) "き電 System 技術講座", 鐵道總合技術研究所, 1995. 9
(8) 前田 孝외 1인, "交流電氣車のための高調波抑制用 Active Filter", 鐵道總研報告, 1997. 4
(9) 長谷伸一외 3인, "自勵式 電力變換裝置による 交流電氣鐵道 電源電壓變動對策", 鐵道總研報告, 1996. 7
(10) Arrillaga. J외 3인, "Power System Harmonics", John Wiley and Sons, 1985
(11) 前田 孝외 2인, "PWM Converterを 用いた 交流電氣車の 架線高調波電流抑制の 諸方法", 平成7年電氣學會全國大會, 1994
(12) 持永芳文외4인, "AT き電回路におはる 高調波共振と 抑制對策", T.IEE Japan, Vol.114-D, No 10, '94
(13) "鐵道總研 き電System 技術報告", 1995. 11.