

철도 고압배전계통 고조파 현황 및 대책에 관한 연구

Cause and Protection of Harmonics in the Railway High Voltage System

김귀동*

창상훈**

한문섭***

김왕곤****

Kim, Kwi-Dong

Chang, Sang-Hoon

Han, Moon-Sub

Kim, Wang-Gon

ABSTRACT

The harmonics in railway high voltage system is due to common use of 3 phase incoming bus and doing the power converter for traction system on the electric car(or electric locomotive).

This paper, we analyze the harmonics mechanism and characteristics of railway high voltage system, also we analyze the problem according to the actual measurement about influence of harmonics on the railway high voltage system.

And we proved the countermeasure device(passive filter or L-C filter) of harmonics applies in the field. The test result, we have know that the filter is not fit. Consequently, The countermeasure of harmonics for the railway high voltage system be able to resolve by another filter.

1. 서론

철도에서 역사조명, 신호, 동력설비 등에 전원을 공급하는 고압배전설비는 수송업무에 필수적인 전기에너지를 공급하는 중요 설비로 무정전의 안정된 전원으로 전압, 주파수 등에 대한 엄격한 규제가 적용되고 있다. 또한 각종 대상 기기의 전자화 및 다양화와 정보화시대의 요구에 맞추어 안정된 전원에 대한 수요요구도 증대되고 있어 양질의 전력 공급과 높은 신뢰도가 필히 확보되어야 한다.

철도 고압배전선로는 지하구간과 지상구간의 방식이 서로 상이한데 먼저 지하구간(통상적으로 직류전철방식)은 한전수전 모선으로부터 AC 3상 22.9kV의 전력을 수전하여 6.6kV로 변성하여 모선에 1, 2, 3호계로 나누어 배전선로를 통하여 각 역사에 공급되는데 이들 중 1, 2호계는 역사조명, 동력, 신호설비에 전력을 공급하게 되어있고, 3호계는 터널환기 및 역사 냉방설비에 전력을 공급하도록 구성되어 있다. 각 역의 고압배전선은 2회선이 공급되므로 1회선 고장시 다른 1회선이 정상공급되므로 신뢰도가 상당히 높은 공급방식을 적용하고 있다.

다음, 지상구간(통상적으로 교류전철방식)은 한전수전 모선으로부터 AC 3상 22.9kV를 수전하거나, 기존에 건설된 전철구간의 경우에는 전철급전회로 공급용 수전모선(154kV 또는 66kV)을 공동으로 사용하여 1, 2호계로 나누어 배전선로를 통하여 전력이 공급되며, 운용방법은 지하구간의 1, 2호계 방식과 동일하다. 본 연구에서는 수전모선을 공동으로 사용하고 있는 구간을 대상으로 고압배전계통에서의 고조파 문제점에 대하여 검토하고자 한다. 이 구간에서 운행되는 전기차는 power electronics의 기술진보에 따라 다양한 제어방법을 채택하고 있다.

* 철도전문대학원 석사과정(동원건설 근무)

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

**** 서울산업대학교 교수, 정회원

즉, thyristor 위상제어, PWM제어, 저항제어 등이 적용되고 있다. 차량에서의 반도체 switching에 의한 고조파의 발생은 고압배전계통에 유입되어 부하설비인 신호계통의 정류기, 컴퓨터 제어기의 전원품질을 저하시켜 기기의 소손이 발생되거나, 신호 오동작을 유발하고 있다. 본 논문에서는 철도고압배전계통에서의 고조파 현황을 분석하고, 전력품질향상을 위한 대책을 수립하고자 한다.

2. 고조파 발생 메카니즘 분석

2.1 고조파 특성

고조파란 기본 주파수의 정수배 차수의 주파수를 갖는 정현파 성분을 말한다.

비정현파(왜형파) $f(t)$ 는 식 (2-1)과 같이 주파수와 진폭을 달리하는 무수히 많은 여현항(余弦項)과 정현항(正弦項)의 합으로 표시될 수 있으며, 이를 푸리에 (Fourier) 급수에 의한 전개라고 한다.

$$\begin{aligned}
 f(t) &= a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + a_n \cos n\omega t + \dots + \\
 &\quad b_0 + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots + b_n \sin n\omega t + \dots \\
 &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t
 \end{aligned} \tag{1}$$

식 (1)에서 주파수가 영(零)일 때, 상수항 a_0 는 여현항 $a_0 \cos 0t = a_0$ 와 상수항 b_0 는 정현항 $b_0 \sin 0t = 0$ 이 될 수 있다. 모든 동일주파수 ($\omega, 2\omega, \dots, n\omega, \dots$)에 대해 여현항과 정현항을 합성하면,

$$\begin{aligned}
 f(t) &= a_0 + A_1 \sin(\omega t + \phi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \phi_2) + \dots \\
 &\quad + A_n \sin(n\omega t + \phi_n) + \dots \\
 &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad \text{단, } A_n = \sqrt{(a_n^2 + b_n^2)}, \quad \phi_n = \tan^{-1} \frac{a_n}{b_n}
 \end{aligned} \tag{2}$$

이 된다.

식 (2)에서 a_0 는 시간과 주파수에 무관한 직류성분이고 그 외의 항은 각종 주파수를 갖는 정현파 성분이 된다.

특히 직류성분의 성분중 $A_1 \sin(\omega t + \phi_1)$ 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 고조파로 부르며 이를 합쳐 "고조파"라 한다. 그러므로 비정현파는 직류성분, 기본파와 고조파를 포함한다.

2.2 전기철도에서의 고조파 발생 원인

교류급전방식에서의 고조파의 발생원으로는 Scott변압기, AT 또는 BT변압기 등의 전철 변전소측 기기와 전차선로 및 전기차의 주변압기, 견인장치 및 추진장치외에 차량용 전원을 사용하기 위한 보조전원장치 등 모든 전기기기로 볼 수 있다.

(1) 저항제어 전동차

수도권 제1호선(경인/경부선)에서 운행하는 전동차는 전차선으로부터 인가된 교류전압을 단상 정류기에 의해 직류로 정류시키고 직류전동기를 약계자제어하여 견인력을 변화시키면서 저항제어에 의해 운행 속도를 변화시킨다.

저항제어전동차의 추진제어장치의 개략도는 그림1과 같고 가선측으로 발생하는 조파별 고조파 전류함유율은 그림2와 같다. 이 그림에서 알 수 있듯이 고조파는 3, 5 및 7조파에서 집중적으로 발생한다.

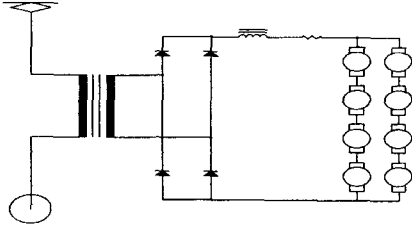


그림 1. 저항제어 전동차 구성도

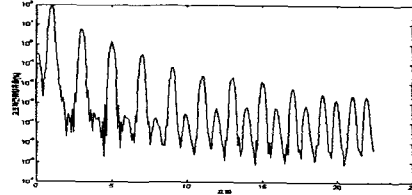


그림 2. 저항제어차의 고조파전류 함유율

(2) 8000대 전기기관차

산업선에서 운행하는 전기기관차는 전차선으로부터 인가된 교류전압을 세미-브릿지 (Semi Bridge)형으로 싸이리스터와 다이오드가 복합된 정류기를 이용하여 싸이리스터의 위상을 제어하여 속도를 변화시키면서 약제자제어에 의해 견인력을 변화시킨다.

싸이리스터 위상제어방식을 사용하면 정류기방식에 비해 역률이 저하하며 고조파도 증가한다는 결점이 있다.

싸이리스터 위상제어 전기기관차의 추진제어장치의 개략도는 그림 3과 같고, 가선측으로 발생하는 싸이리스터 점호 위상각의 변화에 따른 조파별 고조파 전류함유율은 그림 4와 같다. 그림 4에서 보는바와 같이 싸이리스터 제어방식에서는 위상각이 클수록 고조파 전류함유율이 커짐을 알 수 있고 낮은 조파 영역에서 주로 고조파가 발생한다.

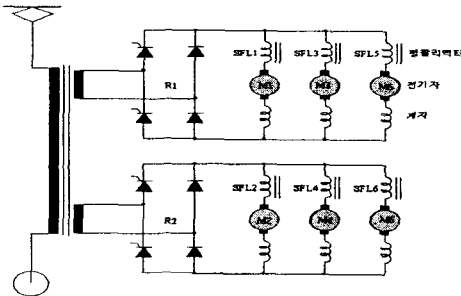


그림2.2 싸이리스터 제어차량 구성도

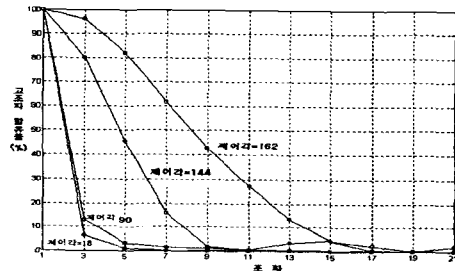


그림 4. 싸이리스터 위상제어차 고조파전류

3) VVVF 전동차

과천/안산선에서 운행하는 VVVF 전동차는 전차선으로부터 인가된 교류전압을 PWM 컨버터에 의해 정류시키고 VVVF 인버터에서 가변전압/가변주파수 제어방식에 의해 3상 교류로 변환하여 유도전동기의 속도제어를 수행한다.

VVVF 전동차의 고조파 분포는 앞서 설명한 저항제어 전동차나 싸이리스터 위상제어를 수행하는 전기기관차와는 달리 주파수가 높은 영역에서 PWM 반송파 주파수에 기인하는 고조파 성분이 발생한다.

일반적으로 PWM 컨버터의 가선측에 발생하는 고조파 전류의 주파수(f_h)는

$$f_h = 2 m n f_c \pm k f_s \quad (3)$$

$m ; 1, 2, 3, \dots, k ; 1, 3, 5, \dots$

과 같이 표현된다.

과천/안산선에서 운행하는 전동차의 경우 PWM 컨버터의 스위칭 주파수(f_c)는 기본주파수(f_s)가 60Hz이고 기본주파수 한 주기에 7개의 펄스를 발생시키므로 420Hz를 사용하고 있고, 컨버터의 상수(n)는 2상이므로 고조파가 발생하는 주파수(f_h)는

$$f_h = 1680 m \pm 60 k \quad (4)$$

이므로, 고조파는 1680, 3360,..... (Hz)의 측대역에서 발생한다.

3. 고조파 발생현황 분석

철도의 특성상 3상 수전모선을 공동으로 사용하는 경우 전기철도 급전계통에서 전기차에 의해 발생된 고조파가 고압배전계통으로 유입되어 영향을 주거나, 그림 5와 같이 전철급전회로와 고압배전선간 상호인덕턴스에 의한 전차선로 전압의 유도현상으로 고조파 불평형 전류가 흘러 고압배전계통 보호계전기 등을 오동작 시키는 경우가 있다.

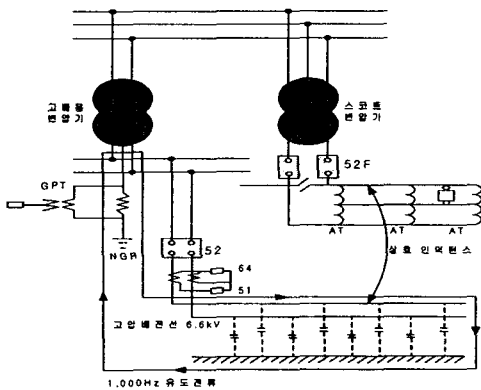


그림 5. 고압배전계통 유도현상 개념도

표 1. 저압기기 고조파 제한치 (IEC 61000-2-2)

기수 고조파 (3의 배수 아닐 경우)		기수 고조파 (3의 배수일 경우)		우수 고조파	
고조파 차수(n)	고조파 전압 (%)	고조파 차수(n)	고조파 전압 (%)	고조파 차수(n)	고조파 전압(%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+0.5*25/n$				

또한 그림 5와 같이 3상 수전모선을 공동으로 사용하는 경우 전철급전회로에서 발생된 고조파가 6.6kV인 고압배전계통으로 유입되는데 이 전압을 단상으로 변압하여 신호기기, 동력설비, 조명기기 등의 입력전원으로 사용하게 된다. 대상기에 입력되는 전압의 파형을 측정하여 다음 표 1의 IEC 61000-2-2의 제한치를 만족하는지 여부를 분석한 결과, 제한치를 상당히 초과(최고 10.3%)하는 것으로 나타나 철도고압배전계통을 이용한 전원의 품질을 양호하게 하기 위해서는 별도의 대책설비가 필요한 것으로 분석되었다.

4. 고조파 대책방안

4.1 대책설비

고조파 장애를 미연에 방지하기 위해서는 부하에서의 고조파 전류발생량을 파악하여 콘덴서나 전력계통 분류량을 예측하여 적절한 대책을 하는 것이 필요하다.

고조파 분석 및 예측기술 흐름도는 그림 8과 같다.

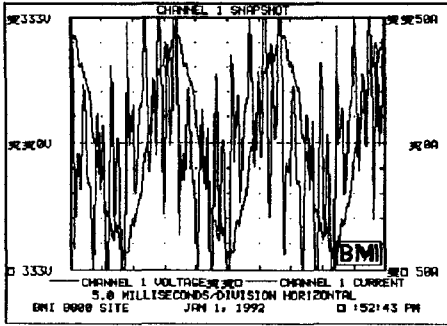


그림 6. 대상기기 입력전압·전류 파형

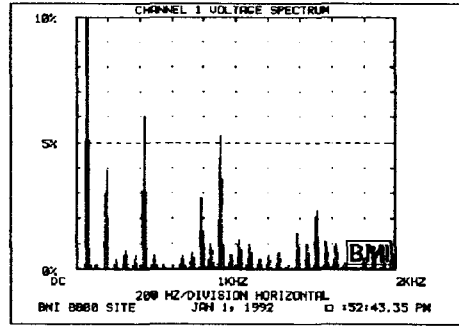


그림 7. 입력전압에 대한 spectrum 분석

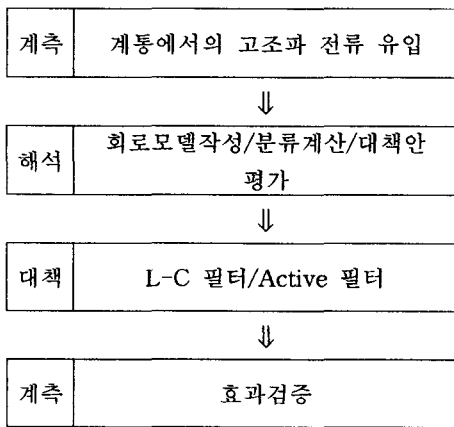


그림 8. 고조파 분석·대책 흐름도

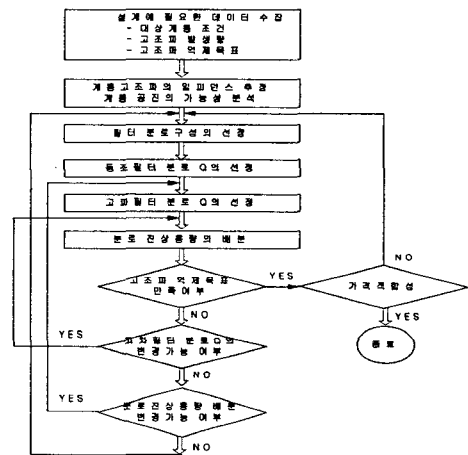


그림 9. 필터설계 흐름도

고압배전계통의 고조파 문제는 전기를 이용하는 기기가 상호간에 간섭하여 악영향을 미치지 않도록 하는 전자기 양립성(EMC)의 하나이다. 즉, 계통의 전압변동을 야기시키는 고조파 발생원과 전압변형에 의해서 영향을 받는 기기간에 조화를 이루는 것이 문제해결에 있어 중요하다. 일반적으로 광범위한 고압배전계통에서 전압변형의 레벨은 장소에 따라서 크게 차이가 있고 또한 시간대에 따라서 변화하기 때문에 확률분포로 표현된다.

고조파에 대한 발생원에서의 대책으로서 기기에서 발생한 고조파 전류를 흡수하는 필터의 설치 및 기기 자체에 대하여 고조파 전류의 발생이 적은 회로의 사용 등이 고려되고 있다. 필터에는 리액터(L)와 콘덴서(C)의 공진회로를 이용한 수동필터(단일동조필터와 2차형 고차필터로 구분)와 인버터를 사용하여 기기에서 발생한 고조파 전류와 역위상의 고조파 전류를 주입하여 상쇄시키는 능동필터가 있다. 기기측에서의 대책은 발생원에서의 대책과 동일한 필터를 설치하는 방법이나 고조파에 대한 내량을 강화하는 방법이 있다. 계통측에서의 대책은 계통구성의 변경 등에 의해 장애발생 기기와 발생원 기기를 별개의 계통으로 하는 방책 등이 있다. 이 세가지 방법 중 철도고압배전계통의 특성상 기기측에서의 대책이 타당한 것으로 분석되었으며, 그림 9는 필터설계의 흐름도를 나타낸 것이다.

4.2 대책설비 현장적용 분석

대책설비(수동필터)를 대상기기 입력측에 설치(그림10. 참조)하고 전압왜형율을 측정하였다. 측정결과는 그림 10과 같으며, 어느 정도 고조파에 대한 억제효과가 있음을 알 수 있다.

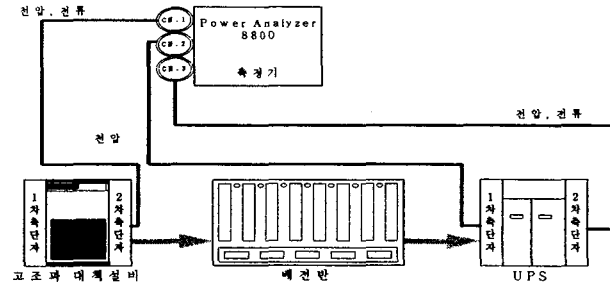


그림 10. 대책설비 설치 및 측정도

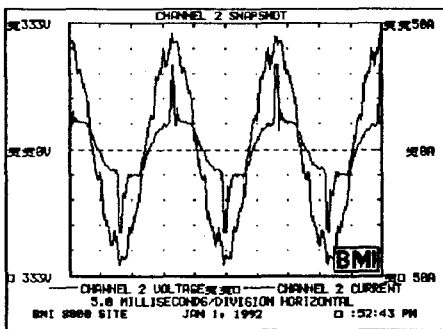


그림 11. 고조파 대책설비 설치 효과

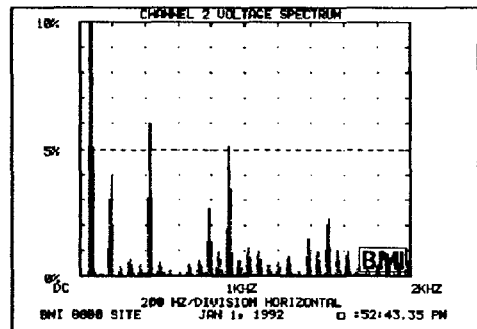


그림 12. 대책설비 2차측 전압 spectrum

위의 측정결과에서 알 수 있듯이 대책설비를 통하여 어느 정도의 고조파 억제효과가 있음이 입증되었다. 그러나 표 1의 IEC 61000-2-2 제한치 기준을 만족하지 못하는 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 논문에서는 전기철도 교류급전 시스템과 병행으로 설치되어 있고, 3상 수전모선을 공동으로 사용하고 있는 고압배전계통에서의 고조파 발생 메카니즘과 발생원인에 대하여 검토하였으며, 고압배전계통에 유입되는 고조파에 대하여 현장측정을 통하여 문제점을 분석하였다.

그리고 고조파 대책설비중의 한가지인 수동필터를 적용하여 고조파 억제여부를 검증하여 제시하였다. 결국 현재 적용되고 있는 철도고압배전계통은 3상 수전모선을 공동으로 사용하고 있고, 이 모션에는 단상대용량이고 시공간적으로 급변하는 전기차 부하가 상존하고 있기 때문에 이에 대처하기 위해서는 최근 power electronics기술의 발전으로 그 적용이 적극적으로 추진되고 있는 액티브 필터를 적용여부에 대해 앞으로 적극적인 검토가 필요하다.

참고문헌

1. 倉相勳 外, "전철구간에서 발생하는 고조파 현황 및 대책연구" 한국철도기술연구원 1997.
2. Arrillaga, J, "Power System Harmonics", John Wiley and Sons, 1985.
3. 渡辺都夫 外, "VVVF制御車の高調波が 信號設備へ与える影響" 鐵道と電氣技術, VOL.6, NO.12, pp29~37, 1995. 12