

전철 적용을 위한 능동필터

An Active Power Filter For Railway Application

김형준*
Kim, Hyeong-Jun

송중호**
Song, Joong-Ho

ABSTRACT

Basic design for single-phase active power filter, which aims at railway applications provided with PWM-controlled converters, is comprehensively studied and its performance is presented in this paper. Active power filters are used to compensate railway signaling and public telecommunication interference due to the high-order harmonic currents generated in railway traction locomotives. A type of hybrid digital filter which is composed of low pass filter and high pass filter is proposed so that the desired harmonic reference current with accurate magnitude and phase shift can be extracted from catenary line current. A design criteria to determine input inductor L and output capacitor C is also described, considering voltage, current, PWM pattern, and switching frequency of the main converters. Finally, computer simulation and DSP-based experiments resulted from laboratory test are presented.

1. 서 론

최근 전철의 급전선에 흐르는 전력의 전력품질은 향상시키기 위하여 능동필터를 전철에 설치하는 기술응용이 관심을 끌고 있다. 이러한 연구 움직임은 독일, 일본, 이태리등의 국가에서 기존의 수동필터 성능을 능동필터로써 대체하려는 연구로 나타나고 있다.

전철의 전력변환장치들은 GTO, IGBT등을 이용하여 PWM모드로 동작하는 AC/DC 컨버터가 주로 사용되고 있을 뿐만 아니라, 발생 고조파 전류를 줄이는데 유효한 컨버터의 병렬운전이 일반적으로 채택되고 있다. 따라서 급전선에 흐르는 임박전류의 dominant harmonics group은 수 kHz 대역에 분포하게 된다. 이러한 상대적으로 높은 차수의 고조파전류는 public telephone interference나 전철의 track signaling interference를 유발시키기 쉽다. 이것이 일반산업용 및 전력계통용 능동필터와 전철용용 능동필터의 기본적인 차이점이 된다.

본 논문에서는 능동필터의 보상 고조파전류 기준치 발생을 위한 필터의 구성방법과 능동필터 전력회로의 입력 리액터와 출력 캐패시터의 값을 결정하는 design criteria가 중심이 되어 기술되고 있다. 기준 전류 발생 필터의 경우, 동일 차수의 다른 필터 구성법에 비하여 1차측 입력전류로부터 기준전류 추출 성능이 우수한 필터구성 방법을 제안하고 컨버터의 전압, 전류, PWM패턴, 스위칭 주파수등을 고려하여 능동필터의 전력회로 인덕터와 커패시터의 값을 결정하는 design criteria를 아울러 제안하며 컴퓨터에 의한 모의실험과 DSP에 의한 실증실험을 통해서

* 서울산업대학교 석도전문대학원 석사과정, 학생회원

** 서울산업대학교 교수, 정회원

능동전력필터 시스템의 타당성을 검증하고, 본 논문의 연구결과들은 진철용을 위한 실용량 시스템의 적용을 목표로 하여 축소 제작한 실험실 set-up에 대한 결과를 정리한 것이다.

2. 고조파 기준전류 발생

그림 1에 진철용 2병렬 PWM 컨버터에 의한 변압기 1차측 전류의 예를 나타내었다. 이 그림은 상대적으로 적은 고조파 함유량을 보여주고는 있지만, 서론에서 말한 바와 같이 1~3 kHz 대역의 고조파 전류성분은 telecommunication 및 track signal 간섭문제를 일으킬 수 있다. 따라서 이 대역의 고조파 전류를 정확히 추출하는 것이 필요하다.

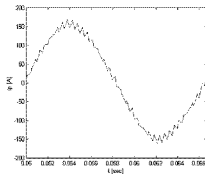


그림 1. 2병렬 PWM 컨버터에 의한 변압기 1차측 전류

기본 고조파에 기본과 성분이 포함되어 있을 경우, 능동전력필터의 용량을 불필요하게 증가 시켜야 하는 단점을 초래할 수 있기 때문에 고차 고역통과필터(High Pass Filter, HPF)를 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 고차 디지털필터를 사용할 경우 통과대역 신호의 위상오차 증가 현상이 발생할 뿐만 아니라 디지털 제어기에 의한 실제 구현시 연산시간의 증가 때문에 능동전력필터의 고조파 보상성능을 크게 저하 시키는 요인이 된다.

따라서 감쇠대역의 감쇠율과 통과대역의 위상오차 발생정도 그리고 실제 시스템의 구현 능력을 고려하여 HPF 필터의 차수를 결정하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 감쇠대역에서의 감쇠율의 경우, 본 연구에서는 감쇠영역에서 기본과 성분이 1% 미만인 되도록 HPF를 설계 하였다. 동일 차수의 디지털 필터를 설계한 경우 동일 유형의 HPF를 어떻게 구성하는 가의 방법상의 차이에 따라 기본 고조파전류 추출 특성이 달라지게 된다. 따라서 본 논문에서는 구성방법을 3가지로 대별하여 그에 따른 추출특성 변화를 관찰하였다. 이를 바탕으로 하여 동일 차수의 디지털 필터로서 기본과 성분에 대해 거의 동일한 감쇠율을 가지면서도(1% 미만) 위상오차를 최소한으로 줄일 수 있는 방법을 제안하였다.

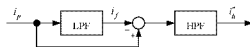


그림 2. LPF와 HPF 혼용한 기준전류의 발생 (방법 3)

본 논문에서 제안하는 방법으로서 필터의 구조는 방법 1 및 방법 2를 혼합한 것으로서 기본구성은 그림 2에 나타나 있다.

이 방식의 감쇠율 특성은 방법 2와 거의 동일하며 위상오차 특성은 방법 1보다 우수한다. 그 이유는 방법 1의 경우 필터 설계시 조절 가능한 차단 주파수가 하나인데 비해 방법 3은 LPF와 HPF의 차단주파수를 각각 설정할 수 있기 때문이다. 즉, 그림 2에서 기본과 성분 i_j 를 추출하기 위해 위상오차 특성이 우수한 저차 LPF를 사용하므로써 변압기 1차측 전류 i_p 중 보상 고조파 전류의 위상오차를 고려하지 않고 그 크기만 충분히 감쇠시키는 측면에서 LPF의 차단주파수를 결정한다. 다음 HPF에서는 i_h 의 입장에서 볼 때 " $i_p - i_j$ "가 i_h 보다는 기본과 성분의 크기가 작으므로 기준 고조파의 위상오차를 최대한 고려하여 HPF의 차단주파수를 설계할 수 있다.

기본과 성분을 1% 미만으로 억제하는 각 방법의 필터 설계치를 구하여 주파수 응답 특성을 구해 보면 그림 3과 같다. 그림 3(a)에 나타난 것처럼 방법 1은 기본과 성분을 원하는 만큼 감쇠시키지 못함을 알 수 있다. 방법 2와 3을 비교하면 방법 3이 기본과 성분에 대해서는 방법 2와 거의 동일한 감쇠율을 가지면서 통과대역의 주파수 성분들이 더욱 빨리 -360° 즉 0° 에 수렴함을 그림 3(b)에서 볼 수 있다.

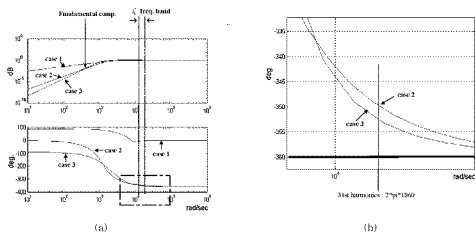


그림 3. 각 방법에 따른 주파수 응답특성(보드선도)

3. L 및 C값의 선정

3-1. L값 상한(Upper Limit)의 결정

능동전력필터의 전력회로에서 교류측의 지형성분을 무시할 경우 교류측 전압 및 전류 관계식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L \frac{di_c}{dt} = v_s - v_c \quad (1)$$

$$\Delta I_C = \frac{\Delta V_L}{4f_s \cdot L} \quad (2)$$

여기서 i_c 는 능동전력필터의 입력전류, v_s 는 입력전압, v_c 는 능동전력필터의 출력전압을 각각 나타낸다. 식(1)에서 펄스폭 주기동안 기본과 성분이 일정하다고 가정하면 식(1)의 di_c 는 전류 리플

의 peak-to-peak값이 된다. 즉 $di_C \rightarrow \Delta I_C$ 로 근사화 시킬 수 있다. 한편 Unipolar SPWM방식의 Switching에서 스위칭 한 주기 동안 전류 기울기의 방향이 4번 변하므로 식(1)에서 dt 는 $T_S/4$ 로 근사화 시킬 수 있다. 또한 $v_S - v_C$ 는 인덕터 양단에 걸리는 전압, ΔV_L 로 근사화할 수 있다. 따라서 식(1)과 식(2)는 같이 근사화 시켜 표현할 수 있다. 식(2)에서 ΔI_C 는 능동전력 필터가 추종해야 할 전류 리플의 크기를 의미한다. 한편 능동전력 필터 입력전류가 기준전류를 추종하기 위해서는 능동전력 필터 전류의 기울기가 기준 전류의 기울기보다 같거나 커야하므로 식(3)과 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{\Delta I_C}{T_S} \geq \frac{\Delta I_{ref}}{2} \quad (3)$$

식(3)에서 ΔI_C , T_S 는 능동전력 필터 전류리플의 크기 및 스위칭 주기를 각각 의미한다. 또한 식(2)와(3)으로부터 식(4)를 유도해 낼 수 있다.

$$L \leq \frac{\Delta V_L}{\Delta I_{ref} \cdot 2f_{ref}} \quad (4)$$

식(4)에서 계산된 값은 능동전력 필터 L값의 상한을 의미한다. 즉 이 상한을 초과하는 L값에서는 능동전력 필터가 기준 전류를 제대로 추종하지 못하게 된다.

3-2. L값 하한(Lower Limit)의 결정

Unipolar SPWM 방식에서 전류 리플의 기울기는 곧 삼각파와 비교하여 스위칭 함수를 만들어내는 변조파 리플의 기울기와 같다. 이러한 SPWM 방식에서 일정 주파수 스위칭을 보장하기 위해서는 전류의 기울기가 반송파인 삼각파의 기울기보다 작아야 한다. 능동전력 필터 입력전류의 기울기는 능동전력 필터의 제어에 사용되는 삼각파의 기울기보다 작아야 하므로, 즉 $\lambda > \frac{di_C}{dt}$ 을 만족해야 하므로 식(5) 즉 능동전력 필터 L값의 하한을 구할 수 있다.

$$L \geq \frac{\Delta V_L}{4 \cdot \xi \cdot f_S} \quad (5)$$

식(4)에서 보던 능동 필터 L값의 상한은 능동 필터의 스위칭 주파수와는 관계가 없으며 단지 보상해야 할 고조파 전류의 크기와 주파수 그리고 능동전력 필터의 출력전압의 크기에 의해 결정되어질 수 있다.

L값이 작을수록 전류의 기울기가 커지기 때문에 전류의 추종속도가 빨라지는 반면 능동전력 필터 스위칭에 의한 스위칭 리플도 커지게 되어 전체적인 보상성능을 저감시키는 결과를 가져오게 된다. 그러므로 최적의 L값은 상한과 하한 사이의 범위에서 실제 시스템의 시뮬레이션을 통하여 결정되어야 한다.

3-3. C값의 결정

C의 값은 기본적으로 능동전력 필터의 용량에 의해 결정되며, 이 값에 따라 직류측 전압 리플의 크기가 좌우된다. 능동전력 필터는 기본적으로 무부하 상태이므로 정상상태에서 입력전압과 동일하

상의 기본파 진류성분은 없다고 할 수 있다. 그러므로 기준 고조파를 추종하는 교류속 진류 자체를 커패시터의 전압, 직류속 전압 리플에 기여하는 성분으로 볼 수 있게 된다. 그림 4의 개념도에 나타난 커패시터에 흐르는 전류와 전압 리플로부터 식(6)과 같이 관계식을 얻을 수 있다.

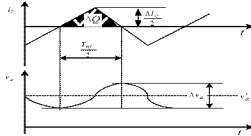


그림 4. 커패시터에 흐르는 전류와 전압 리플과의 관계

$$\Delta V_{dc} = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \frac{1}{2} \frac{\Delta I_C}{2} \frac{T_{ref}}{2} \quad (6)$$

식(2)를 통해 기준 고조파 진류의 크기, ΔI_C 와 평균 주기를 알 수 있으며 T_{ref} 는 주 컨버터의 스위칭 주파수와 병렬대수, 그리고 PWM 스위칭 방법으로부터 계산해 낼 수 있다. 또한 V_{dc} 는 항상 입력 교류전압의 최대값, v_s 보다 커야 하는 조건으로부터 ΔV_{dc} 에 대해서 식(7)과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

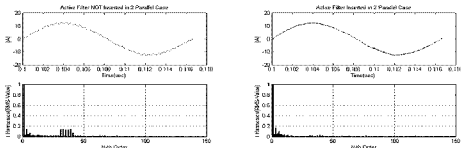
$$\frac{\Delta V_{dc}}{2} \leq V_{dc}^* - v_s \quad (7)$$

식(7)의 조건으로부터 커패시터 값의 하한을 결정하는 식(8)를 얻을 수 있다.

$$C \geq \frac{\Delta I_C}{16 \cdot f_{ref} \cdot (V_{dc}^* - v_s)} \quad (8)$$

식(8)에서 계산된 값은 커패시턴스 값의 하한으로서 이 값 이상의 실제 적용이 가능한 커패시턴스 값을 사용하면 된다.

4. 시뮬레이션 및 실험결과



(a) 능동필터 보상하기 전

(b) 능동필터 보상한 후

그림 5. 변압기 1차측 전류 시뮬레이션 파형

그림 5는 능동전력필터로 고조파를 보상하기 전과 보상된 후의 변압기 1차측 전류의 시뮬레이션 파형이다. 지수별 가중치를 나타낸 식을 사용할 경우 그림5(a)의 psophometric 전류는 약53mA이며 그림5(b)의 경우는 약 7 mA로 고조파 보상성능이 개선되었다.

각각의 컨버터와 능동전력필터 교류 입력측의 L값은 변압기 2차 및 3차측의 누설값을 이용하였으며 그림 6에 실험결과를 나타내었다. 그림 6에서 보이는 바와 같이 발생 고조파영역에서 고조파의 역제가 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

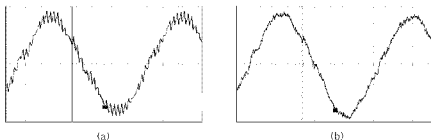


그림 6. 보상 전(a)와 보상 후(b)의 변압기 1차측 전류 실험파형

5. 결론

본 논문에서는 전철에 응용하기 위한 단상 능동전력필터의 설계방법을 다루었다. 고차 고조파 전류를 효과적으로 추출해내기 위하여 LPF와 HPF를 2단으로 구성된 hybrid filter를 제안하여 위상 오차를 최소화시키면서 기존 고조파 전류를 정확하게 발생시키는 방법을 제안하였다. 컨버터의 전압, 전류, PWM 패턴, 스위칭주파수 등을 고려하여 능동전력필터의 중요한 회로정수인 L과 C값을 설계하는 design criteria를 제시하였다. 이러한 결과를 이용하여 psophometric 전류를 약 1/7수준으로 보상할 수 있었다.

참고문헌

1. Bhim Singh, Kamal Al-Haddad, and Amrbrish Chandra, "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement", *IEEE trans. on Industrial Electronics*, vol.46, no. 5, May 1999, pp 960~971.
2. David A. Torry, Adel M. A. Al-Zamel, "single-phase Active Power Filter for Multiple Nonlinear Loads", *IEEE trans. power electron.*, vol.10, no. 3, May 1995, pp 263~272.
3. Joachim Holtz, Heinz-Jürgen Klein, "The Propagation of Harmonic Currents Generated by Inverter-fed Locomotives in the Distributed Overhead Supply System". *IEEE trans. power electron.*, vol. 10, no. 2, April 1989, pp 168~174.
4. Jens-Onno Kraib and Joachim Holtz, "Total Compensation of Line-Side switching Harmonics in Converter-Fed AC Locomotives", *IEEE trans. Ind App* pp., vol.31, no. 6, May 1995, pp 1264~1273.
5. Markus Mayer, "Active Power Filters for Inverter Locomotives - a concept for improved efficiency and low distortion currents", *PESC*, 1992 pp. 389~396.
6. Takashi Maeda & Tomoki Watanabe, Katsuyoshi & Masano Sekimoto, "Compensation of Line Side Switching High Order Harmonics in Converter-fed High Speed Train", *JIASC* 1996 pp. E-26~E-31.
7. Tomoki Watanabe, Takashi Maeda, Hirohisa Ueno, Abballah Mechi, and Katsuji Iida, "Single-Phase Power Active Filter for High Order Harmonics Compensation", *JIASC* 1995 pp. E-35~E-40.