

전압형 능동필터에 의한 교류고조파제거와 무효전력 보상

김한성 최규하 신우석* 이계필^o
 건국대학교 * 금성사

AC Harmonic Elimination and Reactive Power Compensation
by Voltage-type Active Filter

Han-Sung Kim Gyu-Ha Choe Woo-Seok Shin* Jea-Pil Lee^o
Kon-Kuk University * Gold-Star Co.Ltd.

ABSTRACT

The active filter system for harmonic current compensation is presented in this paper. The active filter, composed of a three-phase voltage-type PWM inverter and the capacitor, compensates both the harmonic currents and the reactive power by injecting the PWM current to the ac line. This paper describes the principle of harmonic current compensation, the calculation circuits for the harmonic currents to be injected, the several compensation characteristics. Also the experimental results are shown to verify the theory proposed in this paper.

1. 서론

최근 반도체소자의 발달로 인해 전력의 변환이나 제어용 위해 전력전자변환장치가 많이 보급되고 있다. 이런 전력변환장치들은 비선형성을 가지며 그로 인해 교류전원측으로 비정현파전류가 흘러 고조파가 발생된다.

고조파발생원으로는 포화상태의 변압기, 회전기, 전기로 및 전기용접기, 정지형 전력변환장치, 각종 전동기 제어장치 및 고효율 운전장치, 정지형 무효전력 보상기, 직류고압송전, 직접에너지변환시스템등을 들 수 있으며, 이러한 고조파발생원이 계통에 연결될 때 비선형성으로 인해 비정현파 전류가 흐르게되고 그로써 계통의 리액턴스에 고조파전압이 나타나서 결국 교류

전압의 왜형을 일으킨다.

계통에서 고조파의 발생은 통신선로와 TV의 유도 및 신호장애, 회전기의 가열, 토오크맥동 및 기계적 진동발생, 역률보상용 커패시터의 손상, 병렬공진으로 인한 계통의 과전압 및 과전류발생, 보호계전기의 오동작 및 계측기 오차유발 그리고 반도체 제어장치의 오동작과 같은 문제점들을 일으키게 된다. [3] [4] 또한 근래 고조파 발생원의 대표적인 것으로 간주되고 있는 전력변환장치 들은 스위칭에 따라 출력을 제어하고 이로써 교류측 역률이 심히 저하되는 경향이 있다.

지금까지 이러한 문제들은 고조파저감 위주의 L-C수동 필터, 그리고 무효전력보상을 위주로 하는 정지형 무효 전력 보상기가 개별적으로 사용되어왔다. 전자의 수동 필터는 고조파저감특성이 계통의 상태에 따라 달라질 뿐만아니라 빈번한 계통상태의 변화에도 그 특성이 좋지 않고 특히 저차 고조파를 제거하기가 쉽지 않지만 이러한 수동필터로 어느정도 무효전력보상은 가능하다. 또한 정지형 무효전력보상기는 무효전력을 보상하는 동안 새로운 고조파를 계통에 유입시키는 단점을 갖고있다.

최근에 많이 연구되고 있는 능동필터는 수동필터에 비해 계통의 주파수가 변해도 효과적으로 고조파전류를 제거할 수 있고 신호조작만으로 제거하고자 하는 고조파의 양이나 차수를 임의로 변경가능한 특징을 가지고 있다. 근래에 와서 능동필터는 고조파제거 뿐 아니라 무효전력보상의 기능을 동시에 발휘하는 형태로 발전되고 있다. 이러한 두 기능의 발휘는 약간의 제어회로를 변경시킴으로써 가능하기 때문에 더욱 유리한 점이 된다.

능동필터는 크게 전류형과 전압형으로 구분할 수 있으며 전류형 능동필터는 정전류원으로 리액터, 전압형 능동필터는 정전압원으로 커패시터를 사용하여 고조파 보상전류를 발생시킨다. 전류형필터는 일정 리액터직류를 직접 PWM전류로 변환, 주입하므로 고조파 억제효과 및 속응성이 좋은 장점이 있으나 잔류고조파를 제거하기 위해 반송파제거필터를 부착하여야 하며, 고조파억제특성을 향상시키기 위하여 리액터전류를 증대시켜야 하며 그로 인해 손실이 증대되는 단점이 있다.

반면 전압형 능동필터는 전류형필터에 비해 다소 느린 응답특성을 가지고 있으나 실시간제어에 문제가 없고 고조파전류에 부합된 순시전류만 흘리면 되므로 손실이 적은 장점을 가지고 있다.

따라서 본 논문은 전압형 능동필터를 이용하여 고조파제거와 무효전력보상을 동시에 수행하는 보상 원리에 관해 연구하고자 한다. 기준보상전류는 p-q 변환으로 쉽게 구할 수 있고 필터에 의한 보상전류발생은 속응성을 위해 전류적응제어 기법을 이용하였다. 전압형 필터의 특성을 고찰하기 위해 실험을 수행하였고 그 결과를 제시하였다.

2. 보상 시스템

(1) 보상원리

비선형부하가 계통에 연결되어 고조파가 발생될 때 이상적인 고조파 보상전류 i_c 를 그림 1과 같이 고조파 발생원의 입력단으로 주입시키면 고조파를 완전히 제거할 수 있다.

계통에 존재하는 고조파전류 i_h 를 구하기 위해 $i_g(\theta)$ 를 푸리에급수 (Fourier series) 로 전개하면

$$i_g(\theta) = i_{g1}(\theta) + i_h(\theta) \quad (1)$$

$$i_h(\theta) = \sum_{n=2}^{\infty} i_{gn}(\theta)$$

와 같다. 그림 1 에서 전원측으로 아래식과 같은 보상전류 i_c 를 주입시키면

$$i_c = i_h \quad (2)$$

보상된 전원전류는

$$i_{cs} = i_s - i_c \quad (3)$$

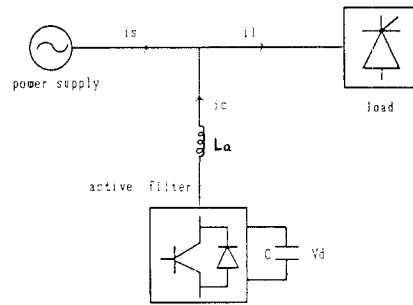


그림1. 전압형능동필터

Fig.1 Voltage-type active filter.

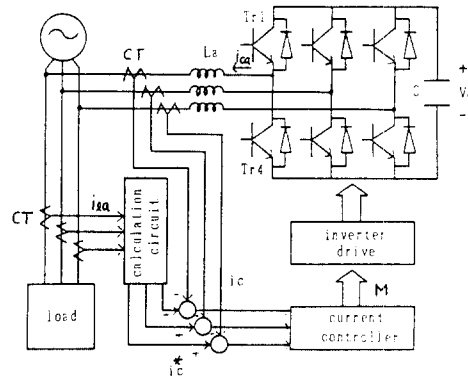


그림2. 능동필터시스템

Fig.2 System of active filter.

으로 표현되고 결국 전원측은 모두 고조파가 상쇄되어 순수한 정현파로 된다. 이러한 보상전류 i_c 는 그림2와 같이 전압형인버터와 정전압원 V_d 로 구성되는 전압형 필터로써 발생시킬 수 있다.

비선형부하의 교류입력측에서 current transformer (CT)로 그림 3-a와 같은 a상 부하전류 i_{ga} 를 검출하여 보상전류 계산회로에서 그림 3-b와 같은 기준보상전류 i_c^* 를 계산하고 이보상전류는 비교기에 입력되어 i_c^* 에 근사한 출력전류 i_c 가 발생되도록 한다. 이를 위해 그림4와 같이 전력트랜지스터 구동신호 M 이 발생 된다.

이러한 제어신호 M 에 따라 정전압원인 C 와 전원측의 폐회로가 형성되어 전원측에 존재하는 고조파를 제거하도록 실제보상전류 i_c 가 교류측으로 주입된다. 즉, 정전압원에 의해서 a상전류 i_{ca} 가 주입되는 방향을 살펴보면, i_h 가 흘러나올 경우 기준보상전류 i_c^* 가

Positive 이면, 1h를 상쇄시키기 위해서 ica를 주입시켜 주어야 하므로 그림 4와 같이 Tr1이 도통하게 된다. 이때 주입되는 전류 ica가 히스테리시스 비교기의 상한에 도달하면 Tr1은 오프되고 다이오드를 통해 충전전류가 커패시터로 흘러 하한에 도달하면 다시 Tr1이 도통되어 전류를 주입시키는 동작을 반복하여 기준보상전류를 계속적으로 추종해간다. 또한 ica가 반대극성이면 Tr4가 고조파를 제거하기 위하여 그림4의 동작을 반복해간다.

그림 5-b는 능동필터가 그림 5-a의 기준보상전류를 히스테리시스 비교기에 의해 추종해가는 실제 보상전류의 파형으로써 전원측으로 주입되어 고조파를 상쇄시키며 b상과 c상도 a상과 같은 방식으로 고조파가 제거된다.

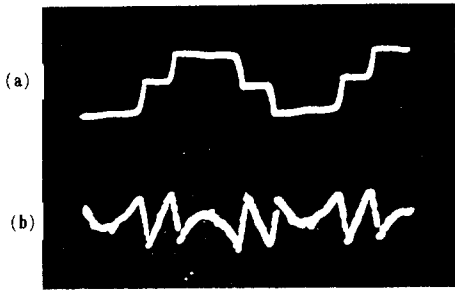


그림3-a. A상 부하전류 ila

3-b. A상 기준보상전류 ica

Fig. 3-a. A-phase lod current ila

3-b. A-phaes reference compensation current ica.

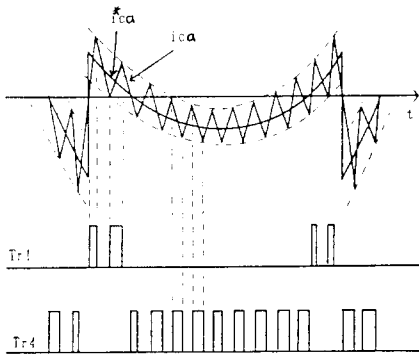


그림4. 보상전류 제어방식

Fig.4 Control method of compensation current.

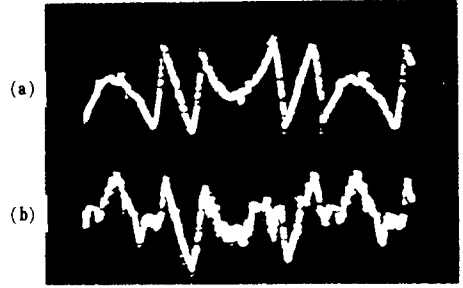


그림 5-a. A상 기준보상전류

5-b. A상 능동필터전류

Fig. 5-a. A-phase reference compensation current

5-b. A-phase current of active filter .

(2) p-q 변환

3상 부하전류 i_{ga}, i_{gb}, i_{gc} 로부터 고조파성분과 무효전력보상을 위한 무효전류성분을 동시에 계산하기 위해 2상 전류로 변환시킨다. 2상 전류를 i_p, i_q 라 하면

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t - 4\pi/3) \\ \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t - 4\pi/3) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

와 같다. 여기서 i_p 는 유효전류성분이고 i_q 는 무효전류 성분으로써 다음 식과 같이 직류성분과 교류성분으로 표현할 수 있으며

$$i_p = \bar{i}_p + \tilde{i}_p \quad (5)$$

$$i_q = \bar{i}_q + \tilde{i}_q$$

\bar{i}_p, \bar{i}_q 는 기본파성분이고 \tilde{i}_p, \tilde{i}_q 는 고조파성분을 나타낸다. 그러므로 보상에 주어야 할 성분으로 고조파 제거를 위한 \tilde{i}_p 및 \tilde{i}_q 와 무효전력보상을 위한 \bar{i}_q 를 선택하면

$$\begin{bmatrix} i_{pc} \\ i_{qc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_p \\ \bar{i}_q + \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

로 주어진다. 식 (6)의 2상 보상전류를 3상

기준보상전류 i_{ca}^* , i_{cb}^* , i_{cc}^* 로 변환시키면 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \cos \omega t \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t - 4\pi/3) & \cos(\omega t - 4\pi/3) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \tilde{i}_p \\ \tilde{i}_q + \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (7)$$

따라서 식 (7)은 전원측에 나타나는 고조파와 무효전력을 보상하기 위한 기준보상전류 계산식으로서 순수한 아날로그 소자인 승산기 (multiplier) 와 감산기, op Amp 로 계산될 수 있으므로 실시간제어에 적합하다.

3. 실험

(1) 시스템 구성

그림2와 같은 전압형 능동필터는 크게 전압형 인버터, 기준보상전류 계산회로, 전류제어회로, 전력 트랜지스터 구동회로로 구성된다. 전압형 인버터는 전류 (commutation) 능력을 갖는 전력트랜지스터로 구성하고 각 Tr에 역병렬로 다이오드를 연결하였으며 정전압원인 커패시터 C는 4700 uF, La 는 280 mH, CT는 정격 5VA를 사용하였다.

(2) 실험

식 (4)를 다시 쓰면

$$\begin{aligned} i_p &= i_{ga} \times \sin \omega t + i_{gb} \times \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ &\quad + i_{gc} \times \sin(\omega t - 4\pi/3) \\ i_q &= i_{ga} \times \cos \omega t + i_{gb} \times \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ &\quad + i_{gc} \times \cos(\omega t - 4\pi/3) \end{aligned}$$

와 같이 표현되며, 계산회로인 그림6은 CT로 부터 3상 부하전류 i_{ga} , i_{gb} , i_{gc} 를 검출하여 식 (7)의 기준보상전류를 계산하는 회로이다. 이 회로는 순수한 아날로그 소자인 승산기 (multiplier), 가산기, op Amp 들로 구성되었기 때문에 시간지연이 거의 없어 실시간제어에 매우 적합하다. 각 상의 기준신호로써 $\sin \omega t$, $\cos \omega t$ 가 발생되고 이것은 부하전류와 곱해지며

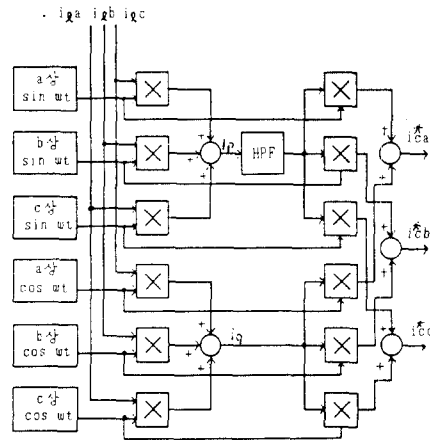


그림6. 보상전류계산회로

Fig.6 Calculation circuit of compensation current.

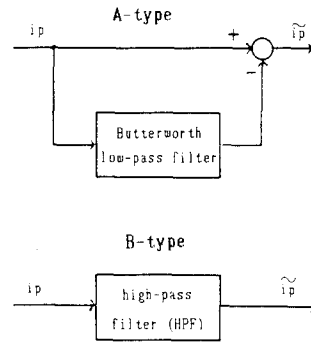


그림7. 고조파성분 i_p

Fig.7 Harmonic component i_p .

가산기를 통해 유효전류성분 i_p 와 무효전류성분 i_q 를 얻는다. i_p 에서 고조파성분 \tilde{i}_p 를 얻기 위해 그림7과 같이 두 형태의 high-pass filter (HPF) 를 사용할 수 있는데, A형은 Butterworth low-pass filter (BLPF) 를 포함하고 있으며 B형보다 residual characteristics 가 훨씬 우수하므로 본 실험에서는 A형으로 설계하였으며 BLPF의 cutoff 주파수 f_c 는 120Hz 로 실험하였다. 또한 HPF의 특성이 능동필터시스템특성을 크게 좌우하는 주요한 원인이 된다. 전류제어회로는 히스테리시스 비교기를 사용하여 전류적용 제어기법으로 보상전류를 제어하였고 이 비교기의 상한과 하한사이의 폭이 전압형인버터의 스위칭 주파수에 영향을 미친다.

즉, 폭이 작으면 실패전류가 기준보상전류에 근접하지만 인버터의 스위칭주파수가 상승되는 문제점이 있다. 비선형부하로서 3상 R-L 정류기부하를 사용하여 실험을 하였으며 a상에 흐르는 전류파형은 그림 8-a 에 보였다. 그림 8-b는 본 실험을 통해 보상된 전원전류 파형을 나타내며 약간의 ripple이 함유되어 있지만 정현파에 근접해 있음을 알 수 있다.

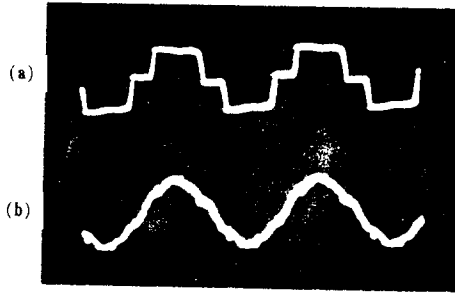


그림8-a. 보상전 전류

8-b. 보상후 전류

Fig.8-a. Current without active filter

8-b. Current with active filter.

4. 결 론

본 논문에서 전압형 능동필터를 이용하여 전원측에 존재하는 고조파를 제거하기 위한 연구를 통해 다음 과같은 사실을 얻을 수 있었다.

1. 전압형 능동필터에 의한 교류전원측 고조파제거 특성이 양호하다.
2. 제어회로 구성이 순수한 아날로그 소자들로 구성되므로 실시간제어에 우수한 특성을 지니고 있다.
3. 인버터의 직류회로부분의 임피던스가 작기 때문에 능동필터의 손실이 적다.
4. 저차 고조파제거 특성이 수동필터에 비해 우수하다.

그리고 이상의 결과로 미루어 전압형 필터는 앞으로 많이 사용될 것으로 전망되며 La, C의 최적치 선정, 수동필터와 병렬운전으로 능동필터의 용량감소, 일정 커패시터전압을 위한 보상회로 설계등은 추후 연구해야 할 과제로 사료된다.

5. 참 고 문 헌

1. L. Gyugyi and E.C. Strickland, "Active as power filters". in Proc. IEEE IAS Annual Meeting, pp.529,1976.
2. H. Akagi, Y.Kanazawa, and A.Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage component", IEEE Trans.on Ind. Appl. Vol. IA-20, pp.665 1984.
3. Gyu-Ha Choe, Min-Ho Park, "A New Injection Method for AC Harmonic Elimination by Active Power Filter", IEEE Trans. on Ind. Elec. Vol. 35, No.1. pp. 141-147. 1988.
4. Gyu-Ha Choe, Min-Ho Park, "Analysis and control of Active Power Filter with Optimized Injection". IEEE. PESC, pp.401-409, 1986.
5. M. Takeda, K. Ikeda et al., "Harmonic current and reactive power compensation with an active filter", IEEE., PESC, pp1174 1988.
6. K. Komatsugi, T.Imura, "Harmonic current compensator composed of static power converter", IEEE. PESC, pp.283 1986.