역률개선 및 고조파 보상을 위한 능동전력필터에 관한 연구

김 용호, 김 진수°, 권 기현, 정 용호, 최 경수

금성 산전 연구소

A Study on Active Power Filter for Compensation of Power Factor and Harmonic Currents

Y.H.Kim, J.S.Kim, G.H.Kwon, Y.H.Chung, K.S.Choi

GOLDSTAR INDUSTRIAL SYSTEMS CO.,LTD R & D LAB.

ABSTRACT

By using nonlinear loads in power line, reactive power and harmonics are occured. In this thesis, on the basis of the instantaneous reactive power theory, the calculation method of compensation current commands and the current control characteristics of active power filter using voltage source PWM converter are presented. The calculation of compensation current is performed by DSP within 50 usec. And the PI control of current is performed by analog devices. The compensations of harmonic current in rectifier loads and unbalance currents are proved by experiments.

1. 서 론

최근 반도체 응용기기의 확산으로 인한 고조파의 증가 및 역률의 저하 또는 역률의 변동 등이 계통상에 점차 많은 문제를 야기하고 있다. 이에 대한 일반적인 대책으로 수동필터를 많이 사용하고 있으나 이는 주파수의 변동이나 부하및 전원단과의 관계에 따라 그성능이 달라지고 특히 플리커 등과 같은 변동하는 요소에 대하여는 마땅히 대처하지 못한다. 따라서 이에 대한 대책으로서 능동전력필터가 등장하게 되었다. 능동전력필터는 고조파 뿐만 아니라 역률 및 부하의 불평형 그리고 플리커의 억제 등에도 현재 널리 사용되고 있으며, 최근에는 운전범위를 매우 큰 용량까지 확대시켜 계통의 안정화에도 적용되고 있다. 위의 적용범위는 제어구조를 바꿈에 따라 쉽게 변경 가능하므로 마이크로프로세서를 채용하면 구조변경시 소프트웨어만 바꾸면되므로 매우 유리하다. 이때 계산시간 및 계산의 정확도가 매우 중요하며, 용량확대가 용이해야 하는데 이를 보장할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 또한 고조파를 보상하기 위해서는 컨버터의 스위칭 주파수가 매우 높아야 하므로 최근 많이 이용되는 IGBT 가 이 목적에 적합하다.(약 10KHZ)

2. 능동전력필터의 구성

실제의 전력계통은 그림 1과 같이 선형부하와 비선형 부하가 병렬로 연결될수 있다. 이때 비선형 부하에 의해 발생되는 고조파와 무효전력 변동에 의한 전압변동에 의해 선형부하가 영향을 받게된다. 이러한 현상을 억제하기 위하여 능동전력 필터가 비선형 부하의 고조파 전류와 무효전력을 공급하게 된다. 이러한 능동전력필터는 다음과 같이 3 부분으로 구분될수 있다. 첫째, 비선형 부하의 전류를 가지고 각상 보상전류를 계산하는 부분이 있다. 둘째, 계산된 전류명령에 따라 보상전류가 주입될수 있도록 전력부를 제어하는 전류제어부가 있다. 셋째, 전력부로 구분되어진다.

1) 보상전류 계산 : 우선 보상하여야 할 전류명령을 빠르고 정확하게 검출하는 것이 필요하다. 3상 전원의 전압 및 전류는 직교하는 2개의 좌표로 변환되어질수 있다. 이때 각상의 순시전압을 e_a, e_b, e_c로, 각상의 순시전류를 i_a, i_b, i_c로 각각 표현하고 이를 서로 직교하는 고정좌표 d, q 축에 변환된 값으로 나타낸다.

$$e_{dq} = K_S * e_{abc} \tag{1}$$

$$i_{dq} = K_S * i_{abc} \tag{2}$$

여기서,

$$K_S = 2/3 * \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

이다. 3상전압이 완전평형하다고 가정하고, 부하전류 i_{aL}, i_{bL}, i_{cL}이 흐를때 윗식에 따라 3상-2상 변환하면

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = E * \begin{bmatrix} SIN\theta e \\ -COS\theta e \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix} i_{dL} \\ i_{qL} \end{bmatrix} = 3/2 * \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{aL} \\ i_{bL} \\ i_{cL} \end{bmatrix} \tag{5}$$

위에 구해진 전압과 전류로부터 순시전력을 구해보면

$$\begin{bmatrix} P_L \\ Q_L \end{bmatrix} = 3/2 * E * \begin{bmatrix} SIN\theta e & -COS\theta e \\ COS\theta e & SIN\theta e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dL} \\ i_{qL} \end{bmatrix} \quad (6)$$

윗식을 3/2*E로 나누어 이를 전류로 정의하며, 전력분전류 I_P와 무효전력분전류 I_Q라 하면

$$\begin{bmatrix} I_{PL} \\ I_{QL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{PL.dc} + I_{PL.ac} \\ I_{QL.dc} + I_{QL.ac} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} SIN\theta e & -COS\theta e \\ COS\theta e & SIN\theta e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dL} \\ i_{qL} \end{bmatrix} \quad (7)$$

I_{PL}, I_{QL}의 직류분 $I_{PL.dc}$, $I_{QL.dc}$은 정상분을 나타내며, 교류분 $I_{PL.ac}$, $I_{QL.ac}$은 보상범위에 따라 다양한 주파수 성분을 갖는다.

일반적으로 플리커는 1 ~ 24 HZ 의 주파수 범위를 갖고, 역상분 전류는 전원 주파수의 2 배의 주파수를 가지며 고조파는 주로 전원주파수의 5 배이상의 주파수 성분을 갖는다. 따라서 적정한 대역폭을 갖는 필터링을 통하여 보상범위를 정하여 보상분 전류 I_{PC}, I_{QC}를 구한다. 여기에 직류전압을 일정하게 유지하기 위한 전력성분 전류 I_{PAV}가 추가된다. 구해진 보상분 전류로부터 d, q 축 전류를 구하면

$$\begin{bmatrix} i_{dC} \\ i_{qC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SIN\theta e & COS\theta e \\ -COS\theta e & SIN\theta e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{PC} + I_{PAV} \\ i_{QC} \end{bmatrix} \quad (8)$$

이 식은 전압이 개입되지않아 계산처리하기가 매우쉽다. 이를 2상 - 3상 변환함으로써 보상해야할 3상 전류명령이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} iC_a^* \\ iC_b^* \\ iC_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dC} \\ i_{qC} \end{bmatrix} \quad (9)$$

위의 수식에 의해서 3상 전류명령 iC_a^*, iC_b^*, iC_c^*의 검출부 블록도가 그림 2에 나타나있다. 먼저 각상전류를 식 (5)에 따라 d-q 변환한뒤 이 값으로부터 순시전력성분 I_{PL} 및 순시무효전력성분 I_{QL}을 식 (7)과 같이 구한다. I_{PL}과 I_{QL}은 각각 직류분과 교류분을 포함하므로 저역필터를 거치면 기본파 성분인 직류분만 남게된다. 식 (7)로 부터 나온 값들로 부터 저역필터를 거친 직류분을 빼면 부하전류의 고조파 성분만이 남게된다. 이때 순시 무효전력성분 I_{QL} 에서 직류분을 빼지 않으면 역률보상 제어도 이루어진다.(즉 $I_{QC} = I_{QL}$)

또한 DC-LINK단 전압 VDC 가 기준 전압명령 VDC*를 따르도록 제어루프를 구성하고, 이 두 값의 차에 보상이득 Gc를 곱하여 전력성분 I_{PAV}를 구한뒤 보상전력성분전류 i_{PC}에 더해준다. 저역필터는 보상범위에 따라 대역폭을 변경하며, 보상주파수 이하에서 가능한한 대역폭이 클수록 유리하므로 보통 고차필터를 사용한다. 이렇게 구해진 보상분은 식 (8)에 의해 d-q 축 전류가 구해지고 식 (9)에 의해 2상-3상 변환하므로써 각상 보상전류가 계산된다. 위의 계산과정은 50 usec 이내에 이루어진다.

2) 전류제어 : 앞에서 설명한 보상 전류 명령에 따라 보상전류를 주입하는 부분이다. 본 논문에서는 PI 제어를 행하였다. 그림 3은 전류제어부를 나타낸다. 그림에서 PI 전류제어가 전압 외란에 약한 점을 보완하기 위하여 외란 전압에 대하여 보상하여 준다. 보상된 전압은 Carrier와 비교되어 Gate Driver 회로에 의하여 IGBT를 ON, OFF 한다. 전류제어부는 응답성이 빨라야 하므로 아나로그로 수행한다. 따라서 스위칭 속도가 10 KHz 정도가 가능한 IGBT를 전력소자로 사용하였다.

3) 전력부 : 그림 4와 같이 교류 직렬 리액터, 전력소자, 직류 콘덴서로 구성된다. 교류 콘덴서는 리플전류 제거 목적으로 이용된다.

4) 시스템 구성 : 그림 5는 능동전력필터의 기본구조를 보인다. 앞서 설명한 각 부분들을 조합하여 점선안의 능동전력필터를 구성하고 다른계통과 그림과 같이 연결된다.

3. 실험 및 고찰

부하가 정류기인 경우와 부하가 불평형인 경우의 전류보상에 대하여 실험하였다. 그림 6 (a)는 정류기부하일 때의 보상 전 파형으로 전원전류와 부하전류가 같음을 알 수 있다. 정류기부하로 인해 전원전류에 고조파가 포함되어 있음을 알 수 있다. 그림 6 (b)는 보상 후의 파형으로 보상전류가 흘러서 전원전류가 거의 정현파로 되어 고조파가 보상됨을 알 수 있다. 그림 7 (a)는 부하의 ab단에 부하를 연결하고 c단을 개방시킨 경우 즉 부하가 불평형일 때의 파형으로 보상되기 전의 파형이다. 그림 7 (b)는 보상 후의 파형으로 능동전력필터에 의해 보상되어 전원전류가 balance 됨을 알 수 있다. 전류의 리플은 스위칭주파수 때문이다.

4. 결론

이상에서 내용으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 순시전력 및 순시무효전력에 의해 보상전류를 검출하므로 매우 빠른 보상특성을 보인다.

2) 계산이 매우 간편하고 계산시간도 매우 빠르다.

3) DSP 를 사용하므로 보상범위의 변경이 매우 자유롭다.

4) 전류만으로 보상전류를 계산하므로 컨버터를 병렬운전하는 경우 외부 전류센서의 이득만을 조정하므로써 제어변수의 변동없이 병렬운전이 가능하다.

위의 장점에 반해 스위칭 속도가 매우높아 대용량에서는 제한을 받는다.

5. 참고 문헌

[1] HIROFUMI AKAKI, Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components " IEEE TRANS. IND. APPL., 1984

[2] HIROFUMI AKAKI, " Control stragy of active power filters using multiple voltage-source-PWM converters" IEEE TRANS. IND. APPL., 1986

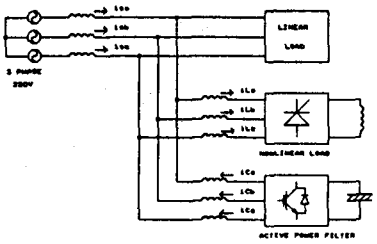


그림 1 부하의 연결

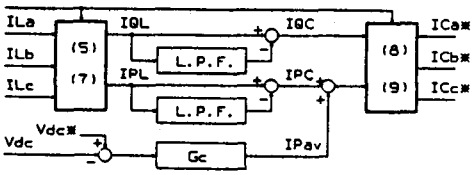


그림 2 보상전류 계산

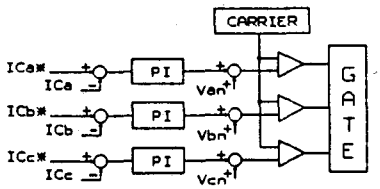


그림 3 전류제어부

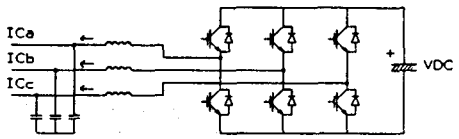


그림 4 전력부

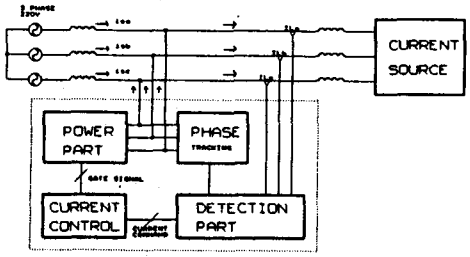
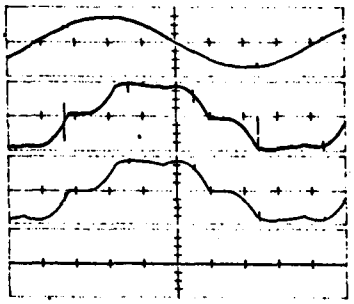
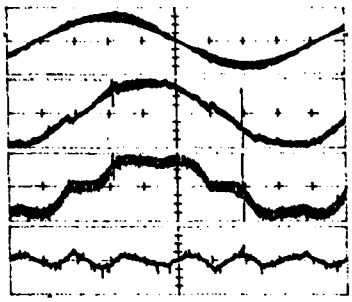


그림 5 능동전력필터의 구성도



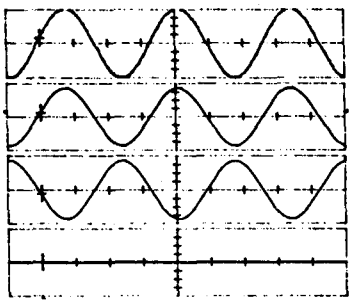
(a) 보상 전



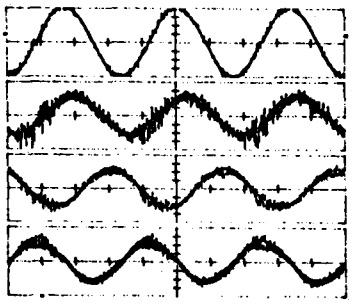
(b) 보상 후

그림 6 정류기부하의 경우 (2 mSEC/DIV)

ch 1	ch 2	ch 3	ch 4
전원전압	전원전류	부하전류	보상전류
100V/DIV	25A/DIV	25A/DIV	25A/DIV



(a) 보상 전



(b) 보상 후

그림 7 부하 불평형의 경우 (5 mSEC/DIV)

ch 1	ch 2	ch 3	ch 4
전원전압	isa	isb	isc
75V/DIV	25A/DIV	25A/DIV	25A/DIV