

PWM 전압형 컨버터에 의한 무효전력  
보상에 관한 연구

박민호, 최계호, 김상훈<sup>o</sup>  
서울대학교

A Study on Reduction of Reactive Power  
by PWM Voltage Converter

Min-Ho Park, Jae-Ho Choi, Sang-Hoon Kim  
Seoul National University

ABSTRACT

This paper introduces a method to reduce the reactive power required by electronic converters. The instantaneous reactive power is calculated and compensated by the current controlled PWM voltage source converter connected parallel between the power lines and the converter. A high performance current control technique which is based on the current deviation vector is used for the PWM converter as compensator of reactive power. Accurate compensation of the reactive power and a control system ensuring fast response to the sudden change of load are attained. The converter structure and control scheme are discussed. Simulation of the system is performed.

1. 서론

최근 사이리스터와 같은 대전력 반도체소자의 개발로 전력전자기기의 사용이 급격히 증대됨에 따라 그로 인해 발생하는 무효전력이나 고조파의 문제에 대한 대책이 중요한 문제로 대두되었다.

종래부터 기본파전류의 뒤집음 보상을 하기 위해서 진상콘덴서가 사용되었고, 고조파전류성분을 억제하기 위해서 수동필터가 사용되었으나 이러한 방법은 특정한 주파수성분에 대해서만 무효전력을 감소시켰다. 또한 사이리스터를 이용한 무효전력 보상장치등이 연구되었으나 진상 또는 지상등의 부하가 일정한 경우에만 적용되었고, 무효전력 보상의 정확도가 높지 못했다.

따라서 고조파를 포함하는 무효전력을 이상적으로 보상하는 데는 부하의 변동에 따라 전원전류의 순시치를 능동적으로 보정하는 무효전력 보상장치가 필요하다. 이러한 점에서 능동필터에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는데 순수한 고조파 성분에만 적용되거나 구성상 복잡한 회로를 요구하고 있다. 또한 무효전력 개환에 의한 임의의 고조파 성분을 포함하는 무효전력을 용이하게 보상하는 제안방식이 제안되어 단상교류 회로에 적용한 연구도 보고되었다.

본 연구에서는 3상회로에서의 전력전자기기 부하의 고조파 및 무효전력 보상에 관한 기본원리, 시뮬레이션이 제시되었다. 이 장치는 기본파 전류 지연 및 모든 고조파 전류를 포함하는 무효전력을 보상하며 특히 전류제어방식에 의한 PWM 전압형 컨버터를 무효전력 보상장치로서 사용함으로써, 부하 급변에 대하여 응답특성이 빠르고 제어 특성이 우수하다.

2. 기본 원리

3상 전원전압  $\bar{e}_s = (e_a, e_b, e_c)^T$ 은

$$\bar{e}_s = \begin{pmatrix} e_{sa} \\ e_{sb} \\ e_{sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \sin \omega t \\ E \sin(\omega t - 2/3) \\ E \sin(\omega t + 2/3) \end{pmatrix} \dots (1)$$

부하 전류  $\bar{i}_l = (i_{la}, i_{lb}, i_{lc})^T$ 은 유효성분  $\bar{i}_p = (i_{pa}, i_{pb}, i_{pc})^T$ 과 무효성분  $\bar{i}_q = (i_{qa}, i_{qb}, i_{qc})^T$ 으로 분리가 가능하며 이때 유효성분은 각 상의 전원전압과 동일주파수, 동일위상의 정현파이다.

$$\bar{i}_l = \bar{i}_p + \bar{i}_q \dots (2)$$

$$\bar{i}_p = \begin{pmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_p \sin \omega t \\ i_p \sin(\omega t - 2/3) \\ i_p \sin(\omega t + 2/3) \end{pmatrix} \dots (3)$$

부하가 발생하는 무효성분전류  $\bar{I}_g$ 를 전원으로 흘리지 않도록 하기 위해 외부로부터 그것과 180° 위상의 보상전류  $\bar{I}_c = (I_{ca}, I_{cb}, I_{cc})^t$ 로 선로에 주입함으로써 이를 상쇄한다. 즉

$$\bar{I}_c = -\bar{I}_g = \bar{I}_p - \bar{I}_g \quad \dots\dots(4)$$

이 되도록 보상전류로 제어한다. 따라서 전원전류  $\bar{I}_s = (I_{sa}, I_{sb}, I_{sc})$  또는 부하전류  $\bar{I}_g$  과 보상전류  $\bar{I}_c$  의 차이므로  $\bar{I}_c$  가 (4)식으로 표현되는 경우에는

$$\bar{I}_s = \bar{I}_g + \bar{I}_c = \bar{I}_p \quad \dots\dots(5)$$

로 되며 무효전력을 제거한다.

3. 순시 무효전력의 계산

그림1은 전원전압과 싸이리스터부하 사이에 연결된 보상장치의 구성도이다.

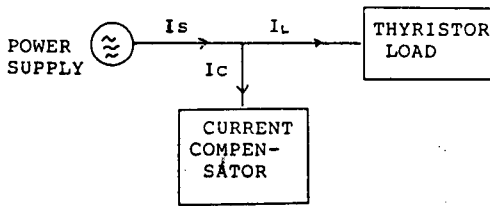


그림 1. 보상장치의 기본 구성도

실제 순시 무효전력의 계산과정을 단상에 대해서 기술하면 다음과 같다. 전원전압  $E_s$ 와 부하전류  $I_L$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$E_s = A * \sin \omega t \quad \dots\dots(6)$$

$$I_L = B_1 * \sin \omega t + C_1 * \cos \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} B_n * \sin(n\omega t) + \sum_{n=2}^{\infty} C_n * \cos(n\omega t) \quad \dots\dots(7)$$

부하전류  $I$  은 유효성분 및 기본파전류 지연과 모든 고조파전류의 무효성분으로 되어 있다.

무효성분전류의 순시값은 다음과 같이 정의된다.

$$I_{cr} = B_1 * \sin \omega t - I_L \quad \dots\dots(8)$$

따라서 보상이기  $I_{cr}$ 에 대응하는 전류를 발생하여 부하전류와 더해졌을때 전원전류  $I_s$ 는 유효성분전류 즉  $B_1 * \sin(\omega t)$ 와 같아진다. 따라서 보상전류  $I_{cr}$ 을 구하기

위해서는 유효성분전류의 진폭  $B_1$ 을 먼저 구한 후 전원전압파형과 곱한 뒤 부하전류와의 차를 구하면 된다.

여기서 유효성분전류의 진폭  $B_1$ 을 구하는 방법은 다음과 같다. 대개 부하전류  $I_L$ 의 무효성분은 단지 기수 고조파만을 포함하고 있기 때문에 선로 주파수의 반주기동안만의 적분으로  $B_1$ 을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/\omega} E_s * I \, dt \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/\omega} A * \sin \omega t * \left[ \sum_{n=1}^{\infty} B_{2n-1} * \sin((2n-1)\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} C_{2n-1} * \cos((2n-1)\omega t) \right] dt \\ &= \left( \frac{A}{2} \right) * B_1 \end{aligned}$$

윗 식은 또한 부하전류가 우수고조파를 포함하고 있는 경우에도 타당하다.

4. 계통의 구성

전체 시스템의 구성도는 그림 2 과 같다.

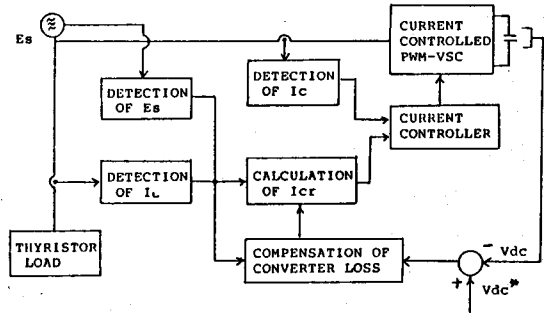


그림 2. 전체 시스템의 구성도

전체 시스템은 크게 2부분으로 이루어져 있다. 첫번째 부분은 순시무효전력을 계산하여 기준보상전류를 만들어 내는 부분으로 먼저 전원전압  $E_s$ 와 부하전류  $I_L$ 을 곱하여 이것을 선로주파수의 반주기 적분을 통하여 유효전류의 진폭  $B_1$ 을 구한다. 적분은 전원전압의 한 Zero-crossing 순간부터 다음 Zero-crossing 까지이다. 이 진폭  $B_1$ 에 전원전압파형을 곱하면  $B_1 * \sin \omega t$ 가 얻어지며 이것과 부하전류의 차가  $I_{cr}$ 이 된다. 이  $I_{cr}$ 에 정류기 자체손실과 DC Link 전압  $V_{dc}$ 를 일정하게 유지하기 위한 전류도 포함되어 기준보상전류  $I_{cr}$ 이 얻어진다. 두번째 부분은 PWM 정류기의 트랜지스터 베이스 구동에 의하여 앞부분에서 만든 기준보상전류  $I_{cr}$ 을 발생하게 하는

부분으로 실제 PWM 정류기의 전류  $I_c$ 를 피드백하여 기준 보상전류를 추종하게 한다.

( 보상 장치 )

본 시스템에서는 보상기로서 전류제어형 PWM 전압형 정류기를 사용하였다. 이때 사용한 전류제어방식은 전류오차벡터 제어방식으로 PWM 정류기가 과도상태에서는 빠른 전류응답특성을 만족하도록 하고, 정상상태에서는 전류고조파성분을 줄이도록 하였다. 또한 기준전류의 위상을 변화시켜서 동상 및 진상 역률을 얻을 수 있어 PWM 정류기가 보상기로 사용될 수 있게 하였다.

전류제어형 PWM 정류기의 구성도는 그림 3 와 같다.

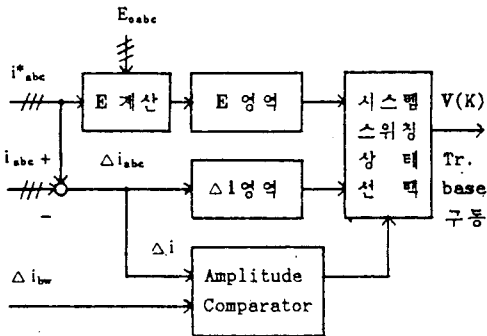


그림 3. PWM 정류기의 전류제어장치 구성도

전류제어장치는 기준보상전류  $i^*_{abc,cr}$  과 실제전류  $i_{abc,cr}$ 와의 전류오차  $\Delta i$ 와 정상상태와 과도상태를 구분하는 주어진 bandwidth  $\Delta i_{bw}$ 크기를 비교하여,  $\Delta i$ 가  $\Delta i_{bw}$ 보다 크면 빠른 전류응답특성을 얻기위한 스위칭 전압벡터  $V(k)$ 를 선택하고  $\Delta i$ 가  $\Delta i_{bw}$ 보다 작으면 전류고조파성분을 줄이기위한 스위칭 전압벡터  $V(k)$ 를 선택하여 트랜지스터의 베이스를 구동함으로써 기준보상전류를 추종하게 한다.

5. 시뮬레이션

앞에서 보인 순시무효전력 보상 동작의 이론을 검증하기 위해 보상장치로서 전류제어방식을 사용한 PWM 정류기를 포함한 전체 시스템을 Computer 시뮬레이션을 하였다.

전원전압의 주파수는 60Hz 이며 싸이리스터 부하는 부하로서 저항과 인덕턴스를 가진 3상 싸이리스터 브릿지 정류기이다.

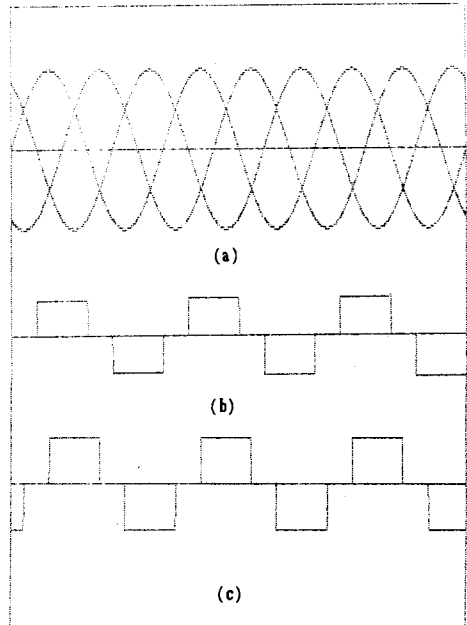


그림 4. (a) 3상 전원전압 (b) a상 전원전류 ( $\alpha = 30^\circ$ )  
(c) a상 전원전류 ( $\alpha = 60^\circ$ )

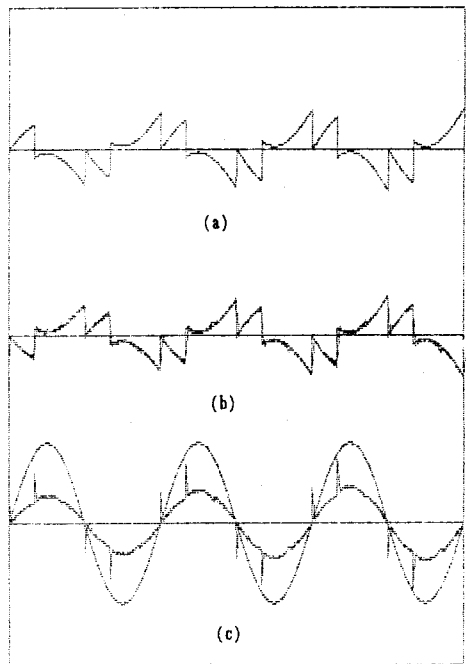


그림 5. (a) a상의 기준보상전류 (b) 실제 보상전류  
(c) 보상후 전원전류

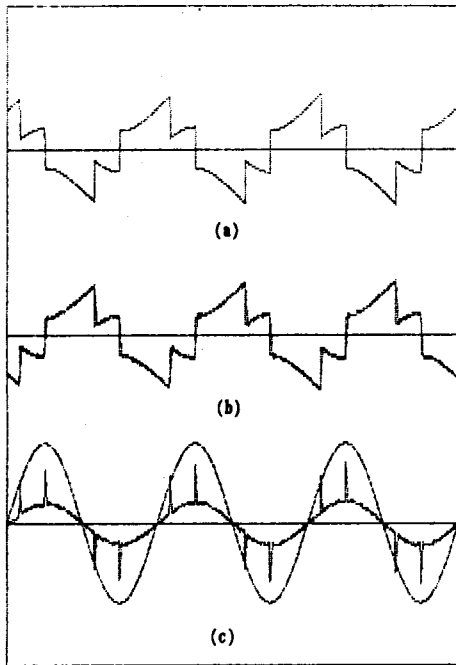


그림 6.  $\alpha=60^\circ$ 일때 (a) a상의 기준보상전류  
(b) 실제 보상전류 (c) 보상후 전원전류

그림 4 (a)는 3상 전원전압이며, (b)는 3상 컨버터의 위상제어각  $\alpha$ 가  $30^\circ$ 인 경우의 a상 전류이고 (c)는  $\alpha$ 가  $60^\circ$ 인 경우이다. 그림 5 (a)는 a상의 기준보상전류이며, (b)는 전류 제어형 PWM 정류기에서의 실제보상전류를 기준보상전류와 비교한 것이다. 그림 5 (c)는 보상후 a상 전원전류와 전원전압이다. 그림 6은 위상제어각  $\alpha$ 가  $60^\circ$ 인 경우이다.

그림 5와 그림 6 (c)에서 보이는 것처럼 기준 보상전류가 순간적으로 급격한 변화를 보일 경우에는 실제 보상전류는 이를 순간적으로 따라가지 못하게되므로 전원전류에 스파이크가 발생하게 되어 전원 측에 Filter 사용이 요망된다.

### 6. 결 론

싸이리스터부하에서 발생하는 무효전력을 계산하고 전류 제어형 PWM 컨버터를 보상장치로 사용한 본 실험에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 기본파 전류 지연 및 고조파전류를 포함한 무효전력을 제거할 수 있었다.
- (2) 전류제어 (전류오차백터제어)를 이용한 PWM 정류기를 보상기로 사용함으로써 부하 급변에 대하여 빠른 응답특성을 얻을 수 있었다.

### 참고문헌

1. F. Harashina, H. Inaba, and K. Tsuboi, "A Closed-loop Control System for The Reduction of Reactive Power Required by Electronic Converters." IEEE Trans. Ind. Electron. Contr. Instrum., IECI-23, No.2, 1976
2. A. Nabae, S. Ogasawara, H. Akagi, "A Novel Control Scheme of Current Controlled PWM Inverter." IEEE-IAS Conf. Rec., 1985
3. D. M. Brod and D. W. Novotny, "Current Control of VSI-PWM Inverters." IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-21, 1985
4. B. T. Ooi, J. C. Salmon, T. W. Dixon, A. B. Kulkarni "A Three-Phase Controlled-Current PWM Converter with Leading Power Fator." IEEE-IAS Conf. Rec., 1985
5. L. Malesani, L. Rossetto, P. Tenti, "Active Filter for Reactive Power and Harmonics Compensation." IEEE PESC 1986