

# 불평형 전원시스템을 고려한 3상 능동전력 필터에 관한 연구

이승요 조준석 최규하 목형수 박영길\* 신우석\*\*  
건국대학교 전기·전자공학부 대영전기\* 두원공업전문대\*\*

## A Study on a 3-Phase Active Power Filter Under Unbalanced Input Voltage

S.Y. Lee J.S. Cho G.H. Choe H.S. Mok Y.K. Park\* W.S. Shin\*\*  
School of Electrical·Electronic Engineering Kon-kuk Univ.  
Dae Young Electric Technology Co\* Doo Won Technical College\*\*

**Abstract** - An important assumption for the active power filter design using instantaneous power theory and the d-q transformation method in a 3-phase power system is based on balanced 3-phase system. However, under practical conditions, the 3-phase power system can not be continuously balanced due to unbalanced loading. In this paper, a method to control the 3-phase active power filter using instantaneous power theory and the d-q transformation under unbalanced power system is presented and the theoretical results are verified by simulated results.

하기 위하여 불평형 전원전압에서 정상분 전압 성분을 검출하고 정상분에 동기된 위상각을 좌표변환에 사용하는 방식을 사용하였으며, 아울러 고조파가 포함된 불평형 전류의 해석을 통하여 보상 전류 성분을 새롭게 결정하여 불평형 전원시스템에서도 기존의 능동 전력필터가 필터로서의 기능을 충실히 수행할 수 있도록 하는 방안을 제시하고 시뮬레이션을 통하여 이를 검증하였다.

### 1. 서론

3상 전원 시스템에서 고조파 및 무효전류를 보상하기 위한 능동전력 필터의 설계는 주로 순시전력이론과 d-q 좌표변환을 이용하여 이루어지고 있는데 이는 전원시스템이 3상 평형되어야 한다는 가정에 기초를 두고 있다[1-4]. 따라서 전원이 불평형된 시스템에서는 d-q 두 축 상에서 능동전력필터의 해석이 이루어질 경우 능동필터의 성능을 제대로 보장 받을 수 없게 된다. 이는 제어부의 설계에 있어서 좌표변환을 위해 사용되는 전원의 위상각이 전원전압의 역상성분과 영상성분으로 인해 왜곡되는 문제가 발생하기 때문이며 불평형 전원시스템에서 전류의 보상 성분을 정확히 결정하기 위해서는 고조파를 포함한 전류의 불평형 해석이 반드시 수반되어야 할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 불평형 전원시스템에서 발생하는 위상각 왜곡에 대한 문제를 해결

### 2. 고조파를 포함한 불평형전류 해석

고조파가 포함된 불평형 전류에 대해 대칭좌표법을 사용하여 정상분, 역상분, 영상분으로 분리하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = I_{mp} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \alpha_p) \\ \cos(\omega t + \alpha_p - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\omega t + \alpha_p + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} + I_{mn} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \alpha_n) \\ \cos(\omega t + \alpha_n + \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\omega t + \alpha_n - \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} + I_{m0} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \alpha_0) \\ \cos(\omega t + \alpha_0) \\ \cos(\omega t + \alpha_0) \end{bmatrix} + \sum_{k=2}^{\infty} I_{m0k} \begin{bmatrix} \cos(k\omega t + \alpha_{0k}) \\ \cos(k\omega t + \alpha_{0k}) \\ \cos(k\omega t + \alpha_{0k}) \end{bmatrix} + \sum_{k=2}^{\infty} I_{mpk} \begin{bmatrix} \cos(k\omega t + \alpha_{pk}) \\ \cos(k\omega t + \alpha_{pk} - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(k\omega t + \alpha_{pk} + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix}$$

$$+ \sum_{k=2}^{\infty} I_{mkn} \begin{bmatrix} \cos(k\omega t + \alpha_{nk}) \\ \cos(k\omega t + \alpha_{nk} + k\frac{2}{3}\pi) \\ \cos(k\omega t + \alpha_{nk} - k\frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 첨자 p는 정상분임을 첨자 n은 역상분, 0는 영상분임을 나타내며 k는 k차 고조파 성분임을 나타낸다. 식(1)을 동기좌표계 d-q축 성분으로 변환하면 기본파 성분과 2고조파 성분의 합으로 표현되며, 중성선이 없는 것으로 가정하였을 때 원래 3상 전류내에는 3배수 고조파 성분이 존재하지 않으므로 고조파 성분에 대한 d-q축 성분은 정상분의 경우 d-q축 모두 3배수 고조파 성분으로 표현되며 역상분의 경우는 k=3N-1 (N은 정수)일 경우 1, 4, 7, 10...차 성분으로 k=3N+1 (N은 정수)일 경우에는 5, 8, 11, 14...차 성분으로 나타나게 된다. 영상분의 경우는 어느 경우에든지 d-q축 상에서 모두 사라지게 되어 나타나지 않게 된다. 따라서 고조파를 포함한 불평형전류를 d-q축 전류로 변환한 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_q^e \\ i_d^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{qF}^e + i_{apk}^e + i_{qnk}^e \\ i_{dF}^e + i_{apk}^e + i_{dnk}^e \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 기본파성분에 대한 d-q성분은 식 (3),(4)로 표현되고 고조파 성분에 대한 d-q성분은 식 (5)~(8)과 같다.

$$i_{qF}^e = I_{mp} \cos \alpha_p + I_{mn} \cos(2\omega t + \alpha_n) \quad (3)$$

$$i_{dF}^e = -I_{mp} \sin \alpha_p + I_{mn} \sin(2\omega t + \alpha_n) \quad (4)$$

N을 1부터 시작하는 정수라 하면 고조파 성분에 대하여는 다음식으로 정리된다.

$$\begin{aligned} i_{apk}^e &= I_{mpk} \cos[(k+1)\theta + \alpha_{pk}] \quad (k=3N-1) \\ &= I_{mpk} \cos[(k-1)\theta + \alpha_{pk}] \quad (k=3N+1) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} i_{dpk}^e &= I_{mpk} \sin[(k+1)\theta + \alpha_{pk}] \quad (k=3N-1) \\ &= -I_{mpk} \sin[(k-1)\theta + \alpha_{pk}] \quad (k=3N+1) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} i_{qnk}^e &= I_{mnk} \cos[(k-1)\theta + \alpha_{nk}] \quad (k=3N-1) \\ &= I_{mnk} \cos[(k+1)\theta + \alpha_{nk}] \quad (k=3N+1) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $i_{apk}^e$ : q축 성분의 정상분의 고조파전류

$I_{mpk}$ : 정상분 고조파 전류의 피크값

$I_{mnk}$ : 영상분 고조파 전류의 피크값

$\alpha_{pk}$ : 기준각에 대한 정상분의 지연각

$\alpha_{nk}$ : 기준각에 대한 역상분의 지연각

$$\begin{aligned} i_{dnk}^e &= -I_{mnk} \sin[(k-1)\theta + \alpha_{nk}] \quad (k=3N-1) \\ &= I_{mnk} \sin[(k+1)\theta + \alpha_{nk}] \quad (k=3N+1) \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 고조파를 포함한 불평형 전류의 전체적인 d-q표현식은 다음과 같다.

$$i_q^e = I_{mp} \cos \alpha_p + I_{mn} \cos(2\omega t + \alpha_n) \quad (9)$$

$$+ \sum_{k=3N} i_{apk}^e + \sum_{k=3N-2} i_{qnk}^e + \sum_{k=3N+2} i_{qnk}^e$$

$$i_d^e = -I_{mp} \sin \alpha_p + I_{mn} \sin(2\omega t + \alpha_n) \quad (10)$$

$$+ \sum_{k=3N} i_{dpk}^e + \sum_{k=3N-2} i_{dnk}^e + \sum_{k=3N+2} i_{dnk}^e$$

식 (2)에서 능동필터가 고조파 뿐만아니라 무효 전류까지를 보상하기 위해서는  $i_{qF}^e$  성분을 제외한 모든 성분을 보상하여야 한다. d-q축으로 변환하였을 경우 최저차수의 교류성분은 60[Hz]이므로 q축 성분의 60[Hz] 교류성분을 제거하기 위해서는 60[Hz]이하의 차단 주파수를 갖는 저역 통과 필터를 제어계통의 q축상에 사용할 필요가 있음을 식 (7)에서 알 수 있다.

### 3. 상불평형시 시스템 모델

능동 필터의 전력회로는 그림 1에 나타난 바와 같이 3상 컨버터로 구성된다. 상불평형을 고려한 컨버터 시스템의 출력전압에 대한 방정식은 중성선이 없는 것으로 가정하였을 때 식 (11) 및 (12)와 같은 조건이 성립한다.

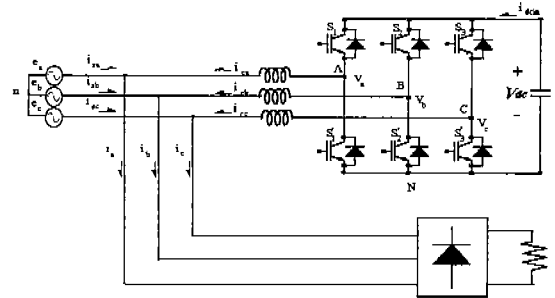


그림 1. 능동전력필터의 전력회로

$$e_a + e_b + e_c \neq 0 \quad (11)$$

$$i_{ca} + i_{cb} + i_{cc} = 0 \quad (12)$$

그림 1에서 각 상의 스위칭 함수를 다음과 같이 정의 하면 다음과 같다.

$S_a, S_b, S_c = 1$  : 상위 그룹 스위치 ON

$S_a, S_b, S_c = 0$  : 하위 그룹 스위치 ON

인버터의 각상 출력전압은 식 (13)~(15)로 나타낼 수 있다.

$$V_{An} = \frac{V_{dc}}{3} [2S_a - S_b - S_c] + \frac{1}{3} [e_a + e_b + e_c] \quad (13)$$

$$V_{Bn} = \frac{V_{dc}}{3} [2S_b - S_c - S_a] + \frac{1}{3} [e_a + e_b + e_c] \quad (14)$$

$$V_{Cn} = \frac{V_{dc}}{3} [2S_c - S_c - S_b] + \frac{1}{3} [e_a + e_b + e_c] \quad (15)$$

#### 4. 상불평형을 고려한 시스템 제어기

##### 4.1 정상분에 동기된 위상각검출 알고리즘

변환행렬을 T라 했을 때 동기 좌표축상의 3상 2상 좌표변환은 식 (16), (17)로 표현된다. 여기서 사용되는  $\cos \theta, \sin \theta$ 는 보통 식 (18)로 얻어지게 되는데 3상 전원에 불평형이 생기게 되면 좌표변환을 위해 사용되는  $\cos \theta, \sin \theta$ 의 값이 정확하게 얻어질 수 없을 뿐만 아니라 전원의 위상자세도 변하게 되어 전체적인 제어의 흐름을 바로할 수 없게 된다. 따라서 본 논문에서는 불평형 전원에서부터 정상성분만을 검출하여 정상분에 동기된 위상각에 맞추어 능동필터 시스템을 제어하는 방법을 사용하였으며 그림 2는 전원의 정상분을 검출하기 위하여 120[Hz] 밴드패스필터를 사용하는 정상분 검출 블록선도를 나타낸다[7].

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$e_d^s = \frac{2}{3} (e_a - \frac{e_b}{2} - \frac{e_c}{2}) \cos \theta + \frac{1}{\sqrt{3}} (e_b - e_c) \sin \theta \quad (16)$$

$$e_d^s = \frac{2}{3} (e_a - \frac{e_b}{2} - \frac{e_c}{2}) \sin \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} (e_b - e_c) \cos \theta \quad (17)$$

$$\cos \theta = \frac{e_q^s}{\sqrt{e_q^s{}^2 + e_d^s{}^2}} \quad (18)$$

$$\sin \theta = \frac{-e_d^s}{\sqrt{e_q^s{}^2 + e_d^s{}^2}}$$

여기서  $e_q^s$ 는 전원의 정지좌표계의 q축성분이며  $e_d^s$ 는 전원의 d축성분이고, 그림 3의 (a), (b)는 각각 정상분을 검출하는 방법을 사용하지 않았을 때 식(18)에 의해 계산된  $\cos \theta, \sin \theta$ 의 값을 나타내며 (c), (d)는 정상분만을 검출하여 계산한 경우에 해당한다.

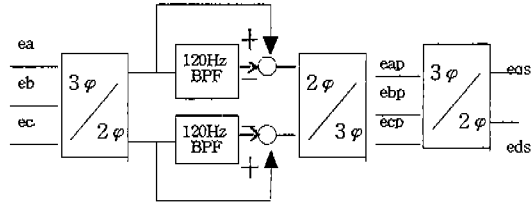


그림 2 정상분 검출 블록선도

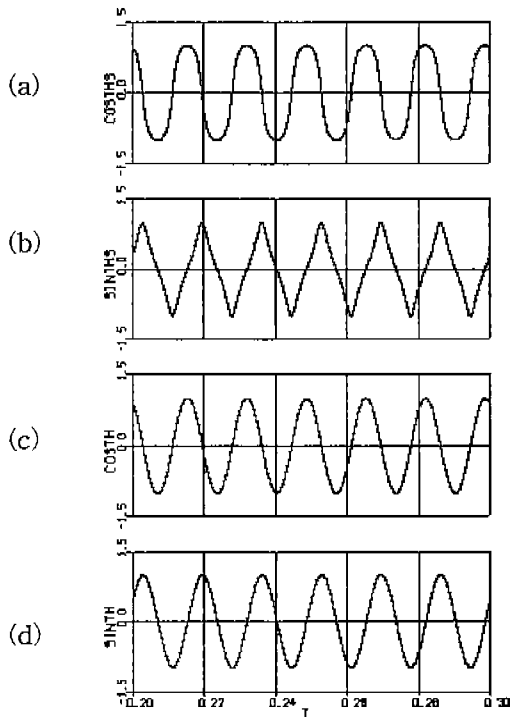


그림 3 계산된  $\cos \theta, \sin \theta$

(a)(b) 정상분을 검출하는 방법을 사용하지 않았을 경우의  $\cos \theta, \sin \theta$

(c)(d) 정상분만을 검출하여 계산한 경우의  $\cos \theta, \sin \theta$

## 4.2 보상전류의 검출 및 시스템 제어기

그림 4는 보상전류를 검출하기 위한 블록선도이며 직류단 일정전압을 유지 시키기 위한 전압제어 블록선도를 함께 나타내었다. 그림상에서 좌표변환을 위하여 사용되는  $\cos \theta$ ,  $\sin \theta$  는 제안된 방식으로 계산되는 값을 사용하게 되며  $q$ 축 성분의 보상전류 기준치를 계산하기 위하여 사용되는 저역통과 필터는 차단주파수가 60[Hz]이하 이어야 하므로 본 논문에서는 50[Hz] 버터워쓰 저역통과 필터를 설계하여 사용하였다. 그림 5는 PI제어기를 사용한 전류제어 블록 다이어그램을 나타내고 있으며 공간벡터 변조기를 사용하였다.

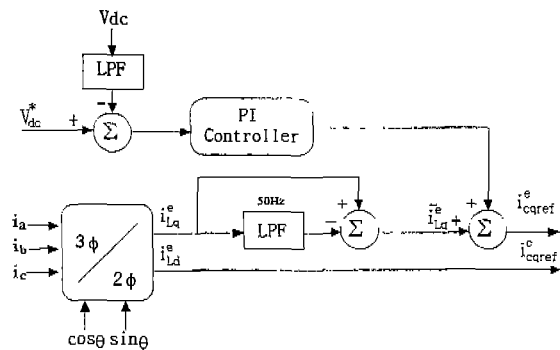


그림 4. 직류단 전압제어를 포함하는 보상전류 검출 블록선도

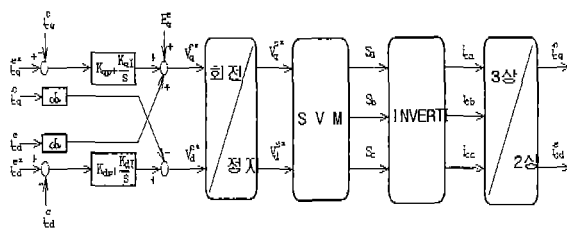


그림 5. PI제어기를 사용한 전류제어 블록선도

## 5. 컴퓨터 시뮬레이션 및 고찰

그림 6은 역상분이 30[%] 포함된 경우의 불평형 3상전원 전압을 나타내고 있으며 그림 7은 보상전 불평형된 3상 부하전류를 나타내고 있다. 이때 그림 8은 불평형을 고려하지 않고 능동필터를 제어하였을 경우의 보상후 전류파형으로 여전히 심하게 전류의 모양이 왜곡되어 있음을 알 수 있다. 그림 9는 불평형을 고려하여 능동필터를 제어하였을 경우이나  $q$  축 전류 성분을 100[Hz] 저역통과 필터를 사용하여 필

터링 했을때의 보상파형을 나타내고 있다. 그림 10은 불평형 전원을 고려하고 50[Hz] 저역통과필터를 사용하였을 경우의 보상후 파형으로 a상을 기준하였을 때 보상전 THD 22.4%, 그리고 100[Hz] 필터를 사용했을 때의 15[%]에 비하여 12[%]의 THD로써 가장 낮은 값을 나타내었다. 사용된 시스템 파라미터는 인버터 출력단 리액턴스가 1.5[mH]였으며 직류축 커패시턴스는 2200[ $\mu$ F]를 사용하고, 비선형부하로는 다이오드 정류기를 사용하였다.

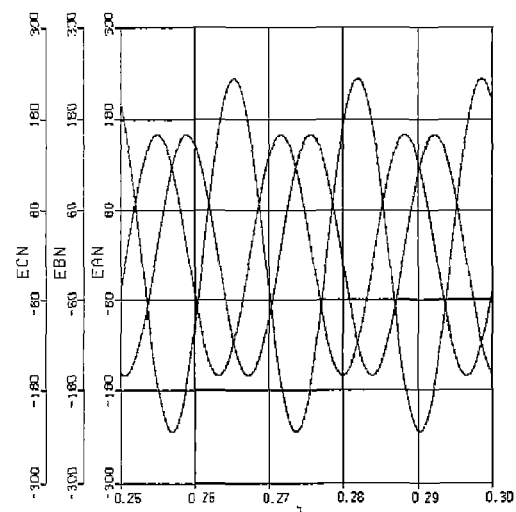


그림 6. 역상분이 30[%]포함된 불평형 3상전원

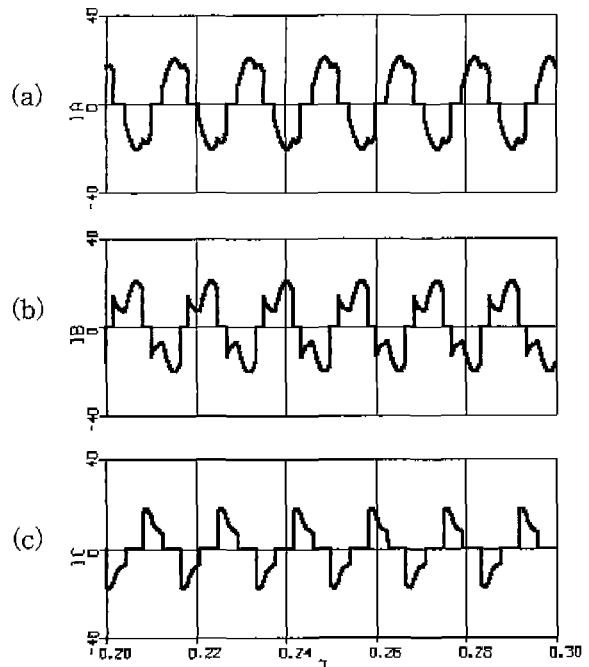


그림 7. 보상전 불평형된 3상 전원전류  
(a) a상전원전류 (b) b상전원전류 (c) c상전원전류

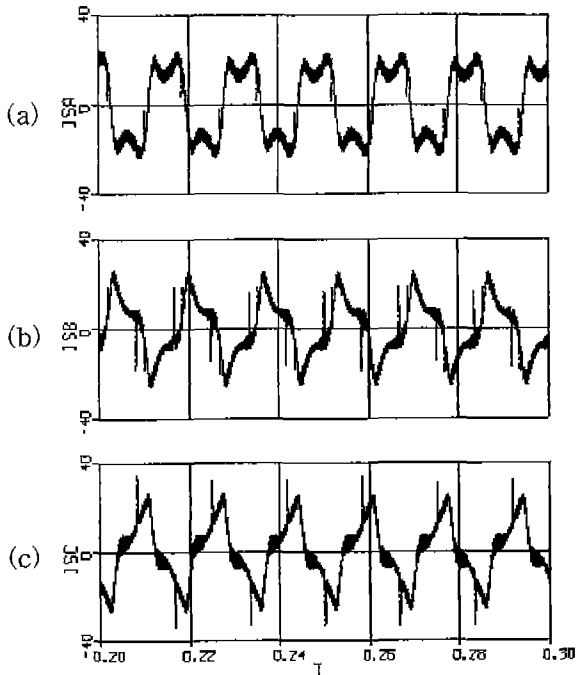


그림 8. 불평형을 고려하지 않은 경우의 보상후 전원 전류파형

(a) a상전원전류 (b) b상전원전류 (c) c상전원전류

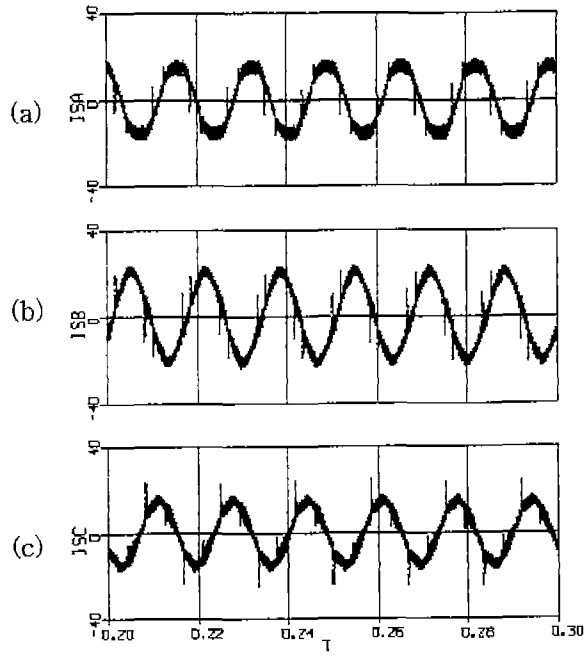


그림 10. 불평형을 고려하고 50[Hz] 저역통과 필터를 사용한 경우의 보상후 전류파형

## 6. 결론

본 논문에서는 동기좌표계를 사용하여 보상 성분을 검출하는 능동전력 필터에 있어서 3상 전원에 불평형이 발생하는 경우에도 원활한 제어를 수행하도록 하는 방안을 제시하였다. 고조파가 포함된 불평형 전류의 해석을 통하여 보상 전류 성분을 새롭게 정의할 수 있었으며 전원이 불평형이 됨으로 인해 발생하는 회전각 검출의 어려운 문제를 시스템의 정상분 전압 성분을 검출하여 정상분에 동기된 회전각을 사용함으로써 해결할 수 있었다. 비선형 부하로 다이오드정류기를 사용하여 시뮬레이션을 수행하여 불평형 전원에 있어서 제안된 방식의 고조파 보상특성을 고찰하였다.

## 참고문헌

- [1] C. E. Lin, C. L. Chen "Calculation Approach and Implementation for Active Filter in Unbalanced Three-Phase System using Synchronous Detection Method", IECON pp. 374-380, 1992.
- [2] C. Lin Chen, C. E. Lin "An Active Filter for Unbalanced Three-phase System

그림 9. 불평형을 고려하고 100[Hz] 저역통과 필터를 사용한 경우의 보상후 전류파형

(a) a상전원전류 (b) b상전원전류 (c) c상전원전류

- Using Synchronous Detection method", PESC pp.1451-1455, 1994.
- [3] Hideaki Fujita and Hirofumi Akagi, "A Practical Approach to Harmonic Compensation in Power Systems -Series Connection of Passive and Active Filters", IEEE IAS Annual Meeting, Conf. Rec., pp.537- 542. 1990.
- [4] Hirofumi Akagi, Akira Nabae and Satoshi Atoh, "Control Strategy of Active Power Filters Using Multiple Voltage-Source PWM Converters", IEEE Trans. on Industry Applications, VOL. IA-22, NO.3, 1986, pp. 460-465
- [5] Luis Moran "Design Aspects of Synchronous PWM Rectifier-Inverter System under Unbalanced Input Voltage Conditions" IEEE Trans. Industry Applications, vol. 28. NO. 6. December 1992.
- [6] Pascal Rioual, Herve Pouliquen, et al., "Regulation of PWM Rectifier in The Unbalanced Network State Using a Generalized Model" IEEE Trans power electronics. VOL. 11. NO. 3. May 1996.
- [7] 김홍성, 전윤석, 목형수, 최규하, 김한성, "조건부 적분기를 가지는 LQ 제어기를 이용한 3상 PWM 컨버터의 전류제어", KIPPE Power Electronics Annual Conference, July 1997.

본 연구는 1996년 한국 과학재단 산학협력 연구비 지원에 의하여 이루어 졌음.