

# 순시 PSD기반의 p-q이론을 사용한 3상 3선 능동전력필터 시스템 구현

김정근<sup>o\*</sup> 임영철<sup>\*</sup> 정영국<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>전남대학교 전기공학과 <sup>\*\*</sup>대불대학교 전기공학과

## Implementation of 3-Phase 3-Wire Active Power Filter with an Instantaneous PSD based p-q theory

<sup>o\*</sup>Jung-Kun Kim <sup>\*</sup>Young-Cheol Lim <sup>\*\*</sup>Young-Gook Jung

<sup>\*</sup>Chonnam National University <sup>\*\*</sup>Daebul University

### ABSTRACT

This paper describes the implementation of 3-phase 3-wire active power filter system with a instantaneous PSD for distorted and unbalanced power conditions. The positive sequence voltage of the distorted and the unbalanced power system is calculated by the instantaneous PSD, and phase transformation matrix of the instantaneous power theory is achieved with detected positive sequence voltage. Finally, the proposed method is experimented and tested under unbalanced nonlinear load as well as unbalanced /distorted condition in power system.

### 1. 서 론

최근 컴퓨터를 이용한 전자 제어 장비와 정보 기기 그리고 디지털 기기와 같은 비선형 부하에 대한 수요가 증가되고 있다. 이들 비선형 부하는 전원전압의 왜형과 불평형 그리고 고조파 전류에 대해 매우 민감한 동작 특성을 갖고 있으며, 동시에 관련 계통에 고조파 및 전압 왜형의 발생원이 되기도 한다[1].

이들 비선형 부하들은 대부분 PWM 전력 변환기에 의해서 출력전압과 변환기 입력 역률을 단위 역률로 제어되고 있다. 특히 비선형 부하들로부터 야기되는 관련 전력계통의 전력 품질의 저하 문제는 능동전력필터 [2-4]나 순시전압 강하 보상기[5-6]등에 의해 해결이 가능하다. 불평형 또는 왜형된 전원 전압 조건하에서도 능동전력필터와 같은 전력 품질 개선 시스템이 제 기능을 발휘하기 위해서는, 비선형 부하의 보상기준 전류를 정확하게 검출해야 한다.

Akagi에 의해 제안된  $\alpha-\beta$  변환p-q이론[7]이라고 불리는 순시전력이론은 3상 3선식 능동전력필터나 PWM 전력변환기등을  $\alpha-\beta$  정지 좌표계에서 비교적 쉽게 제어할 수 있기 때문에 전력전자 분야에서 광범위

하게 사용되고 있다. 그러나 순시전력이론은 대칭이며 정현적인 3상 3선 전력 시스템에 대해서는 보상 특성이 탁월하나, 3상 4선 전원계통이나 왜형된 전원조건 또는 불평형이 발생되면 보상 효과는 현저하게 저하된다. 이와 같은 문제점을 개선하기 위해서 순시전력이론과는 별개의 알고리즘을 개발하거나 순시전력이론을 전반적으로 수정[8]하는 등 많은 노력이 진행되어왔다.

따라서 본 연구에서는 왜형되고 불평형인 전원의 정상분 순시전압 검출(PSD)[9]을 기반으로 한 3상 3선 능동전력필터를 구현하였다. 구현된 방법은 전원전압의 왜형과 불평형이 동시에 발생하는 경우, 전원 전압의 정상분을 순시적으로 검출하여 전압 불평형과 왜형을 최소화한 후, 이 전압에 의해 순시전력이론의 상 변환 행렬을 수행하고 있다. 타당성을 검증하기 위해 제작된 시스템은, 2마력의 3상 능형 유도모터와 전압형 인버터로 구성된 비선형 부하, 비선형 부하의 고조파 및 무효 전류를 제어하기 위한 독립형 TMS320C31 DSP(digital signal processor)와 능동전력필터로 구성되어져 있다. 왜형된 B상 전압이 20% 증가되는 불평형 전원과 불평형 비선형 부하 조건을 고려하여 정상상태 실험을 수행하였으며, 종전의 방법에 비하여 구현된 방법의 유용성을 입증할 수 있었다.

### 2. PSD기반의 능동전력필터 시스템

식(1)로 나타낸 3상 3선의 순시전원전압  $v_{(abc)}$ 이 왜형되고 불평형인 경우, 역상분과 영상분이 발생되며 중성선이 없는 경우에는 영상분은 부하측에 나타나지 않게 되며 이는 식(2)로 표현된다.

$$v_a = V_m \sin \omega t$$

$$v_b = V_m \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi) \tag{1}$$

$$v_c = V_m \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = V_{pm} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \theta_p) \\ \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \theta_p) \\ \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \theta_p) \end{bmatrix} + V_{nm} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \theta_n) \\ \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \theta_n) \\ \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \theta_n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$V_{pm}$  은 정상분,  $V_{nm}$ 은 역상분을 의미하며, 식(2)를 공간벡터로 표현하면 다음과 같다.

$$V_{abc} = V_{pm} e^{j(\omega t + \theta_p)} + V_{nm} e^{-j(\omega t + \theta_n)} \quad (3)$$

불평형된 순시전원전압의 정상분  $v_{(abc)p}$ 을 대칭 좌표법에 의하여 표현하면 식(4) 및 식(5)와 같다[9].

$$\begin{bmatrix} v_{ap} \\ v_{bp} \\ v_{cp} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{2} v_a + \frac{1}{(2\sqrt{3})j} (v_b - v_c) \\ -(v_{ap} + v_{cp}) \\ \frac{1}{2} v_c - \frac{1}{(2\sqrt{3})j} (v_a - v_b) \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서  $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$  or  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$

불평형이 되거나 왜형된 3상 순시전원전압  $v_{(abc)}$ 이 식(5)의 연산 과정을 거치게 되면 정상분 순시전압  $v_{(abc)p}$ 이 얻어지므로 이를 정상분 검출기법 (detection method of instantaneous positive sequence voltage : PSD)이라 한다. 그림1에는 본 연구에서 구형된 PSD의 블록선도를 나타내고 있다.

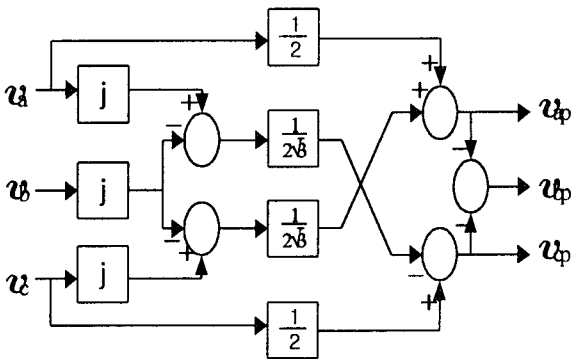


그림1 정상분 전압 검출기법(PSD)의 블록선도  
Fig.1 Block diagram of the detection method of positive sequence (PSD)

불평형된 순시전원전압이 PSD를 거치게 되면, 영상분

을 고려하지 않은 경우, abc기준좌표상의 정상분이 얻어지며, 이를  $\alpha-\beta$ 기준좌표계로 표현하면 식(6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ap} \\ v_{bp} \\ v_{cp} \end{bmatrix} \quad (6)$$

또한 abc기준 좌표계로 표현한 비선형 부하전류  $i_{L(abc)}$ 를  $\alpha-\beta$ 기준좌표로 변환하면 다음으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

식(6)와 식(7)로 부터 순시유효전력  $p$  및 순시무효전력  $q$ 는 식(8)로 구해진다.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

식(8)은 순시전력이론을 이해하는데 중요한 식이며,  $p$ 와  $q$ 가 고역통과필터(HPF)를 거치게 되면 다음과 같은 성분들로 분해된다.

$$p_{3\varphi} = p + q = \bar{p} + \tilde{p} + \bar{q} + \tilde{q} \quad (9)$$

$\bar{p}$  = p의 직류성분     $\tilde{p}$  = p의 교류성분  
 $\bar{q}$  = q의 직류성분     $\tilde{q}$  = q의 교류성분

능동전력필터는 식(9)의  $\tilde{p}$ ,  $\bar{q}$  또는  $\tilde{q}$ 중에서 각 성분을 선택적으로 보상 가능하다. 특히 능동전력필터가 고조파 및 무효성분을 전부 보상하기 위해서는 식(10)으로 표현된 보상전류를  $\alpha-\beta$ 좌표에서 발생하면 된다.

$$\begin{bmatrix} i_{ca*} \\ i_{cb*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\tilde{p} \\ -(q + \tilde{q}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$\alpha-\beta$ 기준좌표에서 연산된 보상기준전류를 abc기준좌표로 변환하면 보상기준전류  $i_{c(abc)*}$ 는 식(11)과 같게 된다.

$$\begin{bmatrix} i_{ca*} \\ i_{cb*} \\ i_{cc*} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca*} \\ i_{cb*} \end{bmatrix} \quad (11)$$

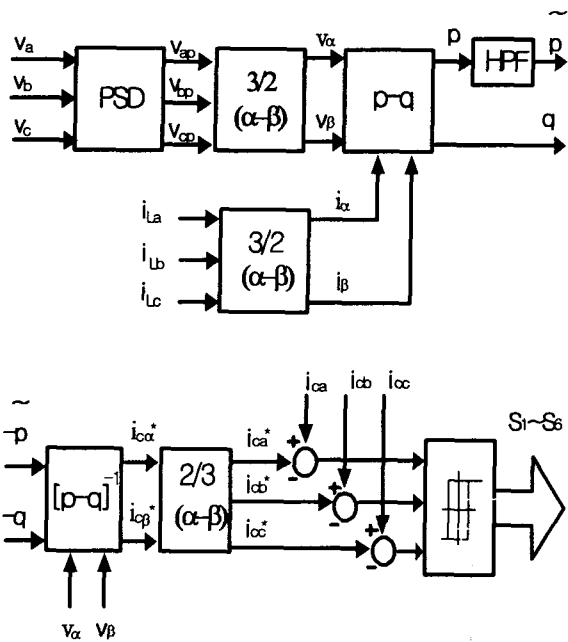


그림 2. PSD 기반의 보상 알고리즘의 블록선도  
Fig.2 Block diagram for PSD based compensation algorithm

그림 2는 PSD기반의 p-q이론에 의해 보상기준전류  $i_{c(abc)}^*$ 를 연산하고 발생하기 위한 블록선도를 나타내고 있다. 그림2에서 보는 바와 같이 정상분 순시전압의 연산부 만을 추가하면, 왜형되고 불평형된 3상 3선 전원시스템에 p-q이론을 적용할 수 있음을 알 수 있다.

### 3. 실험 시스템 구성

그림 3과 표 1은 제안된 이론의 타당성을 검토하기 위한 제작된 시스템과 사양을 나타내고 있다. 비선형 부하로는 2마력의 3상 능형 유도모터와 전압형 인버터로 구성된 상업용 가변속 장치를 채택하였다.

표 1 실험 시스템의 사양  
Table 1 Specifications of experimental system

Nonlinear load	<ul style="list-style-type: none"> <li>3phase voltage source inverter -MITSUBISHI(FR-E520-3.7k)</li> <li>3 phase induction motor</li> </ul>
Active power filter	<ul style="list-style-type: none"> <li>source voltage : 110V/60Hz</li> <li>sinusoidal pulse width modulation</li> <li>d.c capacitor : 6600uF</li> <li>d.c voltage: 250V</li> <li>Lf : 1mH</li> <li>source transformer :<math>\Delta</math>-Y connection</li> </ul>

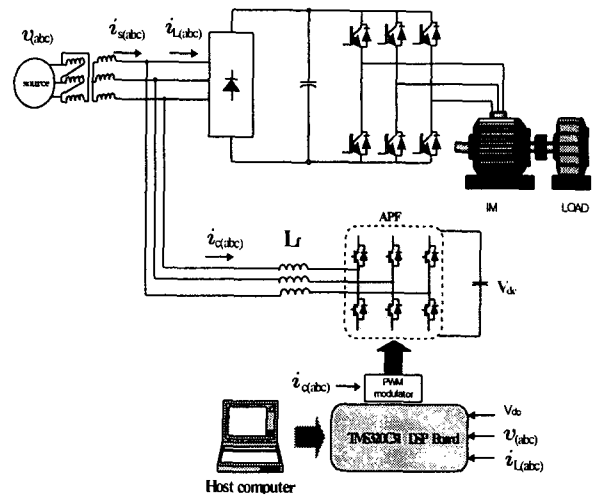


그림 3 실험 시스템의 블록선도  
Fig.3 Block diagram of the experimental system

PSD기반의 보상 알고리즘은 TMS320C31의 독립형 DSP보드에 의해 수행되고 있다. DSP보드는 4채널의 고속A/D변환기와 4채널의 고속 D/A변환기를 가지고 있으며, A/D변환기는 12비트 분해능과 채널당  $8\mu\text{sec}$ 의 A/D변환시간을 가지므로 4채널을 모두 사용할 경우에는 29KHz까지의 샘플링이 가능하다. 전압과 전류의 샘플링 주기는 0.1msec이며, 60Hz전원의 한 주기 동안 120개 가량의 샘플링을 하여 전압과 전류의 실효치를 계산한다. 샘플링은 DSP의 내부 타이머 인터럽트에 의하여, DSP보드내에 탑재된 D/A변환기에 의해 보상 기준전류를 출력하였다. 출력된 보상기준전류는 PWM발생 전용칩에 의해 IPM(Intelligent Power Module)을 구동하고 보상전류를 발생하고 있다.

그림4는 전원의 불평형과 왜형을 발생하기 위한 전원 변압기의 결선도를 나타내고 있다. 변압기의 1차 및 2차결선은  $\Delta$ -Y결선(2:1)이며, B상에 슬라이다스를 설치하여 왜형과 불평형을 조절하고 있다.

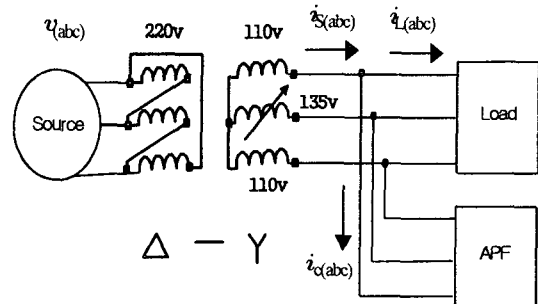
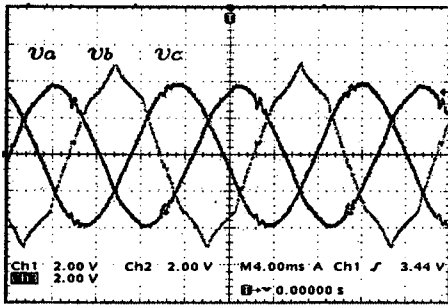


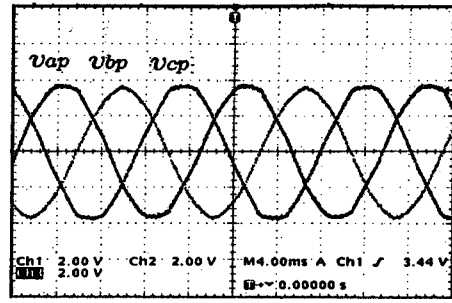
그림4 불평형을 위한 변압기의  $\Delta$ -Y 결선  
Fig.4 Transformer  $\Delta$ -Y connection for unbalance source

#### 4. 실험결과 및 고찰

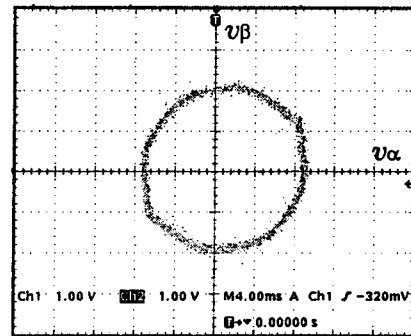
그림 5(a)에서 보는 바와 같이 전원전압은 A상 및 C상이 정현파이고 B상은 왜형되어져 있다. 또한 A상과 C상의 실효치는 110v이며 B상의 실효치는 135v이다. 이때의 전원전압의  $\alpha-\beta$  궤적은 그림 5(b)에서와 같이 왜형된 타원형이며, 전원전압의 위상각 역시 그림 5(c)과 같이 왜형된 모습을 보이고 있다.



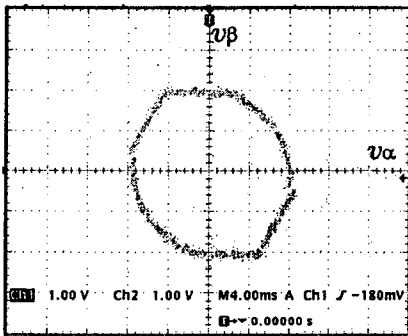
(a) source voltage



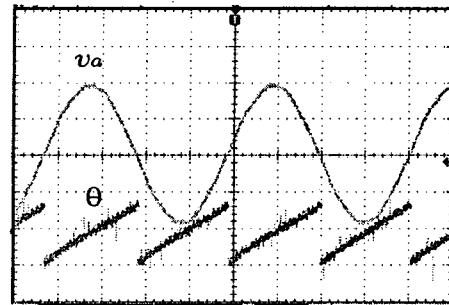
(a) positive component of source voltage



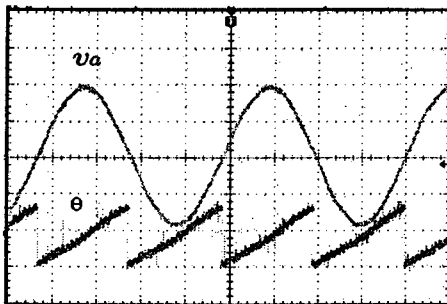
(b)  $\alpha-\beta$  trajectory



(b)  $\alpha-\beta$  trajectory



(c) phase angle of positive component



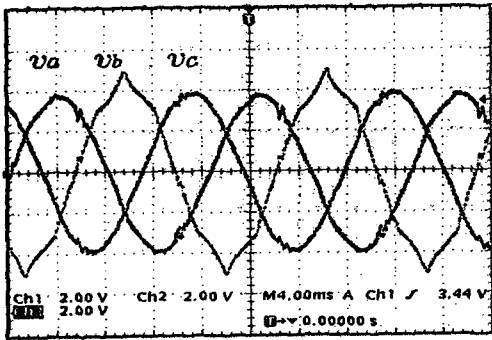
(c) phase angle

그림 5 전원전압 및  $\alpha-\beta$  궤적과 위상각  
(80V/div, 4ms/div,  $\pi$  rad/div)  
Fig.5 Source voltage,  $\alpha-\beta$  trajectory and  
Phase angle (80V/div, 4ms/div,  $\pi$  rad/div)

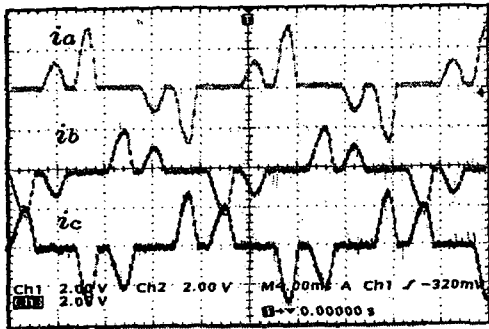
그림 6 정상분 전원전압 및  $\alpha-\beta$  궤적과 위상각  
(80V/div, 4ms/div,  $\pi$  rad/div)  
Fig.6 Positive component of source voltage,  
 $\alpha-\beta$  trajectory and phase angle  
(80V/div, 4ms/div,  $\pi$  rad/div)

그림 6은 그림5와 같은 불평형된 전원전압으로부터 식(5)로 나타낸 PSD에 의해 정상분 순시전압을 검출한 결과이다. 불평형이고 왜형된 전원전압으로부터 평형된 정현파의 정상분 순시전압이 그림6(a)로 검출됨을 확인할 수 있다. 그림 6(b)는 정상분 순시전압의  $\alpha-\beta$  궤적을 나타내고 있으며 그림 5(b)와 비교하여, 원형에 가까운  $\alpha-\beta$  궤적을 보이고 있다. 그림 6(c)는 전원전압의 정상분 순시전압의 위상각을 실측한 것이다. 그림 5(c)와 비교하여 그림 6(c)는 양호한 위상각을 보이고 있다.

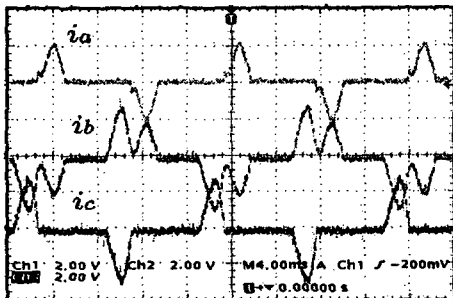
그림 7(b)는 3상이 평형인 전원전압 조건하에서 전압형 비선형 부하가 불평형으로 되었을 때의 입력전류 파형을 나타내고 있다. 그림 7(c)는 그림 7(b)의 불평형 비선형 부하에 대해 그림 7(a)와 같이 불평형된 전압이 인가되는 경우의 입력전류 파형이다. 이 경우, 그림 7(c)에서 보는 바와 같이, A, C상의 전류는 단상 전압형 정류기의 입력전류와 유사하게 1개의 스파이크 형태이나, B상은 3상 전압형 정류기의 전형적인 입력전류 파형을 보이고 있다.



(a) source voltage



(b)source current under unbalanced nonlinear load

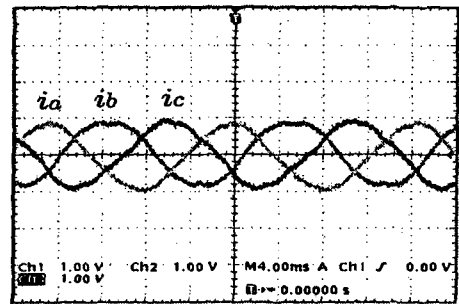


(c)source current under unbalanced nonlinear load and unbalanced/distorted source voltage

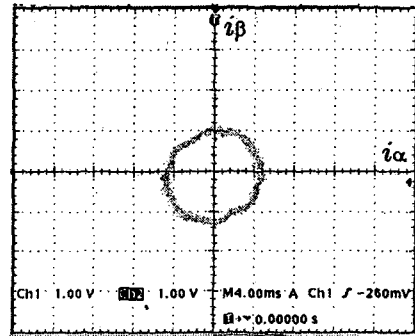
그림 7 불평형된 비선형 부하에 대한 전원전류 (5A/div, 4ms/div.)

Fig.7 source current under unbalanced nonlinear load current(5A/div,4ms/div.)

그림 8은 그림 7(c)에서 나타낸 비선형 부하전류의 고조파 및 무효전류 성분을 능동전력필터에 의해 보상한 결과이다. 그림 8(a)는 PSD를 고려하지 않은 보상 후의 전원전류 파형을 나타낸다. B상의 전원전류는 사다리꼴에 가까운 파형이며, C상의 전원전류는 삼각파형으로 왜형되고 있다. 또한 보상 후 전원전류의  $\alpha$ - $\beta$  궤적은 역시 왜형된 형태를 보인다. 그림 9는 PSD를 고려한 p-q이론에 의해서 비선형 부하의 전원전류를 보상한 결과이다. 그림 8과 비교하여 보면 전원전류는 평형된 정현파로 개선되어져 있으며,  $\alpha$ - $\beta$  궤적 역시 원형에 가깝게 됨을 알 수 있다.



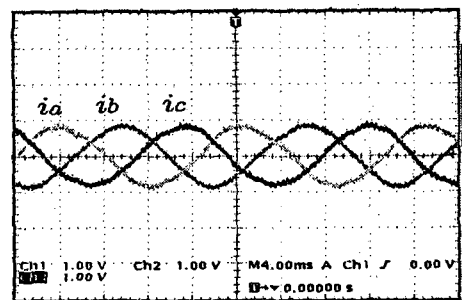
(a)source current without PSD



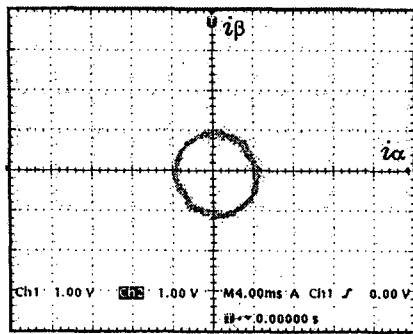
(b) $\alpha$ - $\beta$  trajectory

그림 8 PSD가 없는 경우, 보상 후의 전원전류와  $\alpha$ - $\beta$  궤적(2.5A/div, 4ms/div.)

Fig.8 After compensated, Source current and  $\alpha$ - $\beta$  trajectory without PSD (2.5A/div,4ms/div.)



(a)source current with PSD



(b)  $\alpha$ - $\beta$  trajectory

그림 9 PSD가 있는 경우, 보상후의 전원 전류와  $\alpha$ - $\beta$  궤적 (2.5A/div, 4ms/div.)

Fig.9 After compensated, Source current and  $\alpha$ - $\beta$  trajectory with PSD (2.5A/div, 4ms/div.)

## 5. 결 론

본 연구에서는 왜형되고 불평형인 전원의 정상분 순시 전압 검출(PSD)를 기반으로 한 3상 3선 능동전력필터를 구현하였다. 구현된 방법은 전원전압의 왜형과 불평형이 동시에 발생하는 경우, 전원 전압의 정상분을 순시적으로 검출하여 전압 불평형과 왜형을 최소화한 후, 이 전압에 의해 p-q이론의 상 변환 행렬을 수행하였다.

A와 C상 전원전압이 일정하고 왜형된 B상 전압이 20% 증가되는 불평형 조건을 고려하여 실험을 수행하였다. PSD를 고려한 p-q이론은 불평형 및 왜형된 전원 조건하에서도 전원전류를 평형된 정현파로 제어 가능하였다.

본 연구는 한국과학재단 지정 전남대 고품질전기전자부품 및 시스템 연구센터 연구비 지원에 의하여 연구된 결과의 일부임.

## 참 고 문 헌

- [1] Y. G. Jung, Y.C.Lim and S. H. Yang, "Single-Phase Active Power Filter based on Three-Dimensional Current Coordinates", IEE Proc. Electro. Power Appl., Vol. 147, No. 6, pp. 572~578, 2000.
- [2] 이지명, 이동춘, "직렬형 능동필터와 수동형 병렬필터를 이용한 전원 불평형 및 고조파 전류보상", 전력전자학회 학술대회 논문집, pp. 565-568, 2001.7.
- [3] C.C. Chen and Y.Y. Hsu, "A Novel Approach to the Design of a Shunt Active Power Filter for an Unbalanced Three-Phase Four-Wire System under Non-sinusoidal Condition", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, No. 4, pp. 1258-1264, 2000.

- [4] M. Aredes, J. Hafner and K. Heumann, "A Three-Phase Four-Wire Shunt Active Power Filter using Six IGBT's", IEEE PESC'95, pp. 874-879, 1995.
- [5] 이승요, 고재석, 목형수, 최규하, "3상 불평형 전원시스템의 새로운 위상각 검출기법을 이용한 순간전압보상기의 해석 및 제어", 전력전자학회 논문지, 제4권, 제3호, pp. 275-284, 1999.
- [6] 박현규, 송홍석, 남광희, "불평형 전원의 위상각 검출방법을 이용한 순시 저전압 보상기", 전력전자학회 학술대회 논문집, pp. 395-400, 1998.7.
- [7] H. Akagi and A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-20, No. 3, 1984.
- [8] Y. Komatsu and T. Kawabata, "Characteristics of Three Phase Active Power Filter Using Extension p-q Theory", IEEE ISIE'97, pp. 302-307, 1997.
- [9] S.J. Lee, J.K. Kang and S.K. Sul, "A New Phase Detecting Method for Power Conversion Systems Considering Distorted Conditions in Power System", IEEE IAS'99, pp. 2167-2172, 1999.