

순시전력이론의 $\alpha - \beta$ 전류성분 및 $\alpha - \beta$ 전력성분의 고찰

김정근^o, 임영철, 정영국*, 김영철*, 전 홍*
 전남대학교 전기공학과, *대불대학교 전기공학과

The $\alpha - \beta$ Current and Power Components of the Instantaneous Power Theory

^oJung-Kun Kim, *Young-Cheol Lim, *Young-Gook Jung, *Young-Cheol Kim, *Hong-Chun
 Chonnam National Univ., *Daebul University

ABSTRACT

To provide beginner with the standard current information on the $\alpha - \beta$ reference frame of nonlinear load, this paper has focused on the simulation works using MATLAB/SIMULINK in case of current source thyristor controlled rectifier. The various $\alpha - \beta$ components of current/ power components are induced by the p-q theory, the results are represented waveforms and trajectories on the $\alpha - \beta$ reference frame. The compensation effect according to each of the compensating reference components are described.

1. 서론

대부분의 산업현장에는 전동기 구동장치, 정보통신기 기등 전력전자장치들이 널리 보급되어져 있다. 그런데 이들 장치들은 비선형적인 특성으로 말미암아 관련 전력계통에 고조파 및 무효전력을 발생하여 교류전원계통의 역률을 저하시키는 등 여러 가지 악영향을 주고 있다[1]. 능동전력필터는 이러한 문제점을 효과적으로 해결 할 수 있는 방법중의 하나이다. 능동전력필터란 비선형 부하에 의해 왜형된 전원계통의 전류를 전압과 동상의 정현파로 만들어주는 전력전자 변환장치를 말하는데, 최근에 와서는 원래의 기능 외에 전력분석[1], UPS 기능[2], 전압보상[3]등 다양한 기능들이 추가되고 있다. 능동전력필터에 의해 고조파 및 무효전력을 제어하기 위해 시간영역[4]과 주파수 영역의 알고리즘이 연구되고 있는 데, 특히 Akagi에 의해 제안된 $\alpha - \beta$ 변환p-q 이론[5-6]이라고 불리는 순시전력이론은 3상 3선식 능동전력필터를 $\alpha - \beta$ 정지 좌표계에서 비교적 쉽게 제어할 수 있기 때문에 현재 많은 연구[7]가 진행중이다. 이와 같은 순시전력이론은 행렬에 의해 해석되므로 전개과정이 구조화되며 따라서 수학적인 이해가 용이하다. 또한 해석과정에 있어서 대단히 많은 전류성분과

전력성분이 얻어지며 이들 성분들을 각기 제어하면 섬세한 제어가 가능한 능동전력필터를 구현할 수도 있다.

3상4선식 전력계통으로 순시전력이론을 확장하고자 할 때, 전력 및 전류성분에 대한 계산과정을 파형으로 확인해 보는 것은 순시전력이론을 이해하고 해석하는데 중요한 역할을 한다. 특히 순시전력이론을 처음 접하는 초보 연구자들에게 전류성분과 전력성분의 중간과정을 파악한다는 것은 순시전력이론의 이해를 돕는데 큰 도움이 된다.

따라서 본 연구에서는 MATLAB/ SIMULINK에 의하여 순시전력이론의 전류성분과 전력성분을 파형과 $\alpha - \beta$ 공간좌표적으로 나타내어 초보 연구자들의 이해를 돕도록 하였다. 또한 순시전력 성분 보상에 따른 보상기준 전류 파형이 비선형 부하 계통의 전원전류 파형에 미치는 영향을 쉽게 파악할 수 있도록 하였다.

2. 순시전력이론

그림 1은 능동전력필터와 비선형 부하의 전력회로를 나타내고 있다. 전력전자 변환장치등과 같은 비선형 부하에서 발생하는 고조파 및 무효전력은 병렬로 연결되어 있는 능동전력필터에 의해 보상된다.

그림 2는 3상 전원전압 v_{abc} 와 부하전류 i_{abc} 공간벡터의 abc기준좌표를 $\alpha - \beta$ 기준좌표로의 변환을 나타내고 있으며 이 두 기준좌표와의 관계는 식 (1)과 식(2)로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

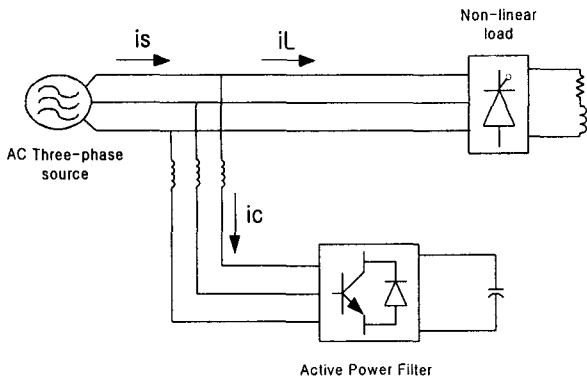


그림1. 능동전력필터와 비선형 부하
Fig.1 active power filter and nonlinear load

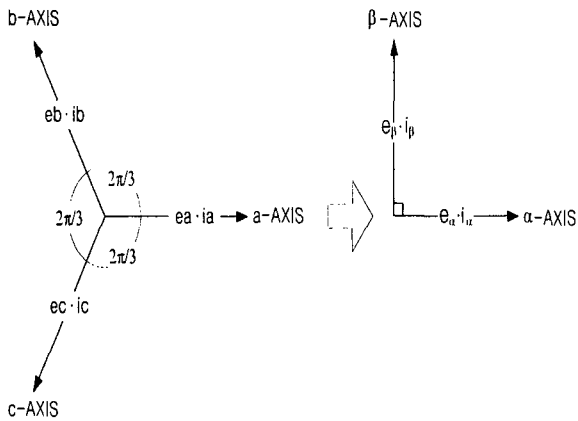


그림2. abc와 α-β 기준좌표계
Fig.2 abc and α-β reference frame

식 (1)과 식 (2)로 부터 순시유효전력 p 및 순시무효전력 q 는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a & e_\beta \\ -e_\beta & e_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)은 순시전력이론을 이해하는데 중요한 식이며, 식 (3)의 p 와 q 는 고역통과필터(HPF)를 거치면 다음과 같은 성분들로 분해된다.

$$p_{3\phi} = p + q = \bar{p} + \tilde{p} + \bar{q} + \tilde{q} \quad (4)$$

$p_{3\phi}$ = 3상 순시전력

$p = p_{3\phi}$ 의 순시유효성분 $q = p_{3\phi}$ 의 순시무효성분

\bar{p} = p성분의 직류성분 \tilde{p} = p성분의 교류성분

\bar{q} = q성분의 직류성분 \tilde{q} = q성분의 교류성분

p 와 q 로 나타낸 α-β 좌표에서 전류표현은 식 (5)와 식 (6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a & e_\beta \\ -e_\beta & e_a \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a & e_\beta \\ -e_\beta & e_a \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$e_{\alpha\beta^2} = e_a^2 + e_\beta^2 \quad (7)$$

식 (5), 식 (6), 식 (7)로 부터 α-β 좌표에서 순시전류는 다음과 같이 p 와 q 의 함수로 표현된다.

$$\alpha \text{ 상 순시유효전류 } i_{\alpha p} = \frac{e_a}{e_{\alpha\beta^2}} p \quad (8)$$

$$\alpha \text{ 상 순시무효전류 } i_{\alpha q} = \frac{-e_\beta}{e_{\alpha\beta^2}} q \quad (9)$$

$$\beta \text{ 상 순시유효전류 } i_{\beta p} = \frac{e_\beta}{e_{\alpha\beta^2}} p \quad (10)$$

$$\beta \text{ 상 순시무효전류 } i_{\beta q} = \frac{e_a}{e_{\alpha\beta^2}} q \quad (11)$$

또한 식(3)의 순시전력 p 는 식(12)와 같이 α-β 성분으로 나타내지며 p 의 각각의 성분은 식(13)-식(16)로 구성되어져 있다.

$$\begin{bmatrix} p_\alpha \\ p_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a i_a \\ e_\beta i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a i_{\alpha p} \\ e_\beta i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a i_{\alpha q} \\ e_\beta i_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\alpha \text{ 상 순시유효전력 } p_{\alpha p} = \frac{e_a^2}{e_{\alpha\beta^2}} p \quad (13)$$

$$\alpha \text{ 상 순시무효전력 } p_{\alpha q} = \frac{-e_a e_\beta}{e_{\alpha\beta^2}} q \quad (14)$$

$$\beta \text{ 상 순시유효전력 } p_{\beta p} = \frac{e_\beta^2}{e_{\alpha\beta^2}} p \quad (15)$$

$$\beta \text{ 상 순시무효전력 } p_{\beta q} = \frac{e_a e_\beta}{e_{\alpha\beta^2}} q \quad (16)$$

능동전력필터는 식 (4)로 표현된 \tilde{p} , \bar{q} 또는 \tilde{q} 중에서 각 성분을 선택적으로 보상할 수 있다. 고조파 및 무효성분을 전부 보상하기 위해서 능동전력필터는 식 (17)로 표현된 보상전류를 α-β 좌표에서 발생하면 된다.

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\tilde{p} \\ -(\tilde{q} + \hat{q}) \end{bmatrix} \quad (17)$$

식 (17)에서 \tilde{p} , \tilde{q} 또는 \hat{q} 을 0으로 하여 α - β 좌표로 표현된 보상전류는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_{ca\tilde{p}} \\ i_{cb\tilde{p}} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_{\alpha\beta^2}} \begin{bmatrix} -e_\alpha \tilde{p} \\ -e_\beta \tilde{p} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ca\tilde{q}} \\ i_{cb\tilde{q}} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_{\alpha\beta^2}} \begin{bmatrix} e_\alpha \tilde{q} \\ -e_\beta \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ca\hat{q}} \\ i_{cb\hat{q}} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_{\alpha\beta^2}} \begin{bmatrix} e_\alpha \hat{q} \\ -e_\beta \hat{q} \end{bmatrix} \quad (20)$$

α - β 기준좌표에서 abc 기준좌표로 변환된 식 (18)-식(20)의 보상전류는 식 (21)에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \end{bmatrix} \quad (21)$$

3. 시뮬레이션 모델링

그림 3은 이상에서 살펴본 순시전력이론에서 도출된 여러 전류 및 전력성분과 이들이 전원전류에 미치는 영향을 살펴보기 위해 MATLAB/SIMULINK로 시뮬레이션을 하였다. 비선형 부하인 싸이리스터 변환기와 $L=7.8\text{mH}$, $R=2.8\Omega$ 부하로 구성되어 있으며, 점호각은 30° 로 선정하였다. p 와 q 를 \tilde{p} , \tilde{q} 그리고 \hat{q} , \hat{q} 로 분해하기 위한 고역통과필터(HPF)는 2차 버터워스 필터이며 차단주파수 $f_c=0.1\text{Hz}$ 이다.

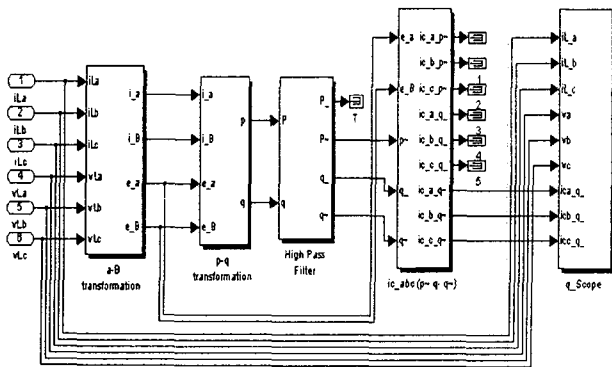


그림3. MATLAB에 의한 p-q 이론의 모델
Fig.3 The p-q theory model using MATLAB

3.1 순시전류 및 순시전력성분

그림 4는 비선형 부하로 동작하는 싸이리스터 제어 정류기의 입력전류를 α - β 기준좌표로 보여주고 있다. 그림 4를 보면 i_α 와 i_β 는 서로 90° 위상차이며 α - β 공간상에서의 궤적은 피크가 있는 6각형임을 알 수 있다.

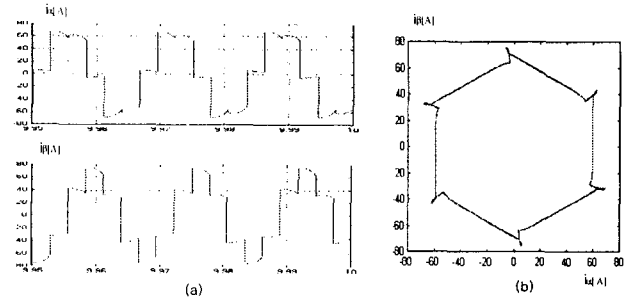


그림4. i_α 와 i_β 성분
(a) 시간영역 (b) α - β 공간궤적
Fig.4 i_α and i_β components
a) time domain b) α - β space trajectory

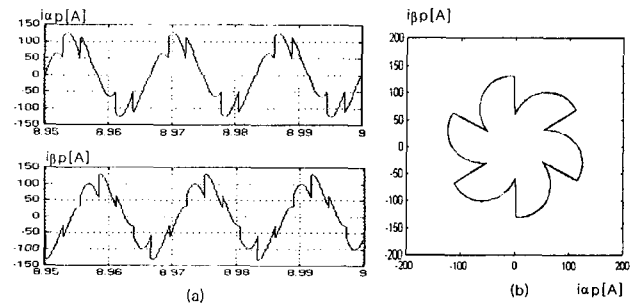


그림5. $i_{\alpha p}$ 와 $i_{\beta p}$ 성분
(a) 시간영역 (b) α - β 공간궤적
Fig.5 $i_{\alpha p}$ and $i_{\beta p}$ components
a) time domain b) α - β space trajectory

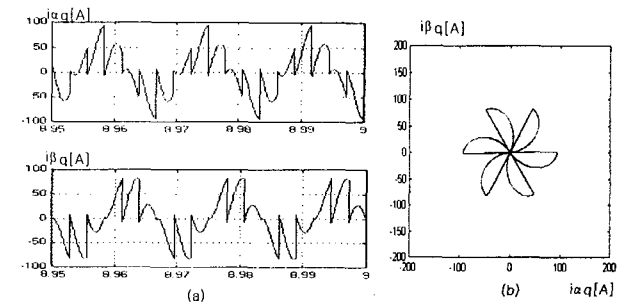


그림6. $i_{\alpha q}$ 와 $i_{\beta q}$ 성분
(a) 시간영역 (b) α - β 공간궤적
Fig.6 $i_{\alpha q}$ and $i_{\beta q}$ components
a) time domain b) α - β space trajectory

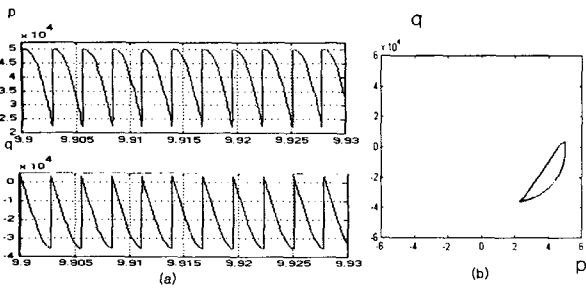


그림7. p와 q 성분
a) 시간영역 b) p-q 공간 궤적
Fig.7 p and q components
a) time domain b) p-q space trajectory

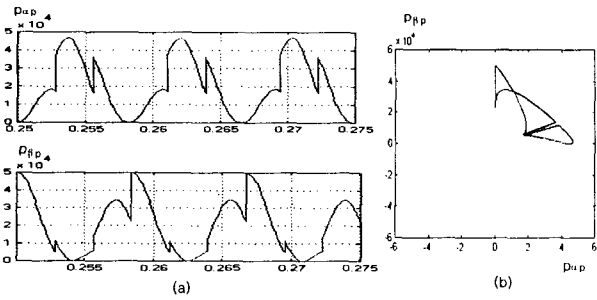


그림8. $p_{\alpha\beta}$ 와 $p_{\beta\beta}$ 성분
a) 시간영역 b) α - β 공간 궤적
Fig.8 $p_{\alpha\beta}$ and $p_{\beta\beta}$ components
a) time domain b) α - β space trajectory

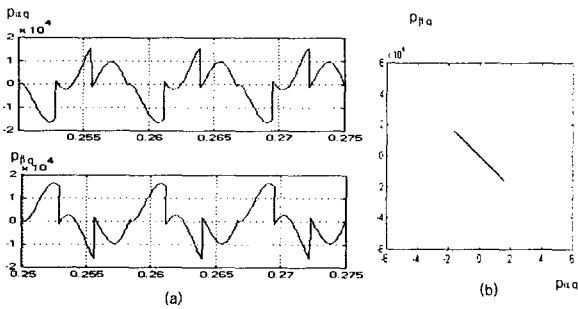


그림9. $p_{\alpha q}$ 와 $p_{\beta q}$ 성분
a) 시간영역 b) α - β 공간 궤적
Fig.9 $p_{\alpha q}$ and $p_{\beta q}$ components
a) time domain b) α - β space trajectory

식 (8)-식 (11)의 $i_{\alpha p}$ 와 $i_{\beta p}$ 그리고 $i_{\alpha q}$ 와 $i_{\beta q}$ 는 그림 5와 그림 6에서 보여주는 바와 같이 α - β 공간상의 궤적은 서로 반대의 반원형을 갖는 6개의 꽃잎형태이다. 식 (3)과 식 (4)는 순시유효전력 p 과 순시무효전력 q 를 나타내는 식이며 그림7에서 그 파형을 보여주고 있다. p 는 일정한 (+)값을 중심으로 우측이 반원형의 맥동을 하고 있고, q 는 0을 중심으로 (-)와 (+)사이를 좌

측이 반원인 맥동을 하고 있음을 알 수 있다. 여기서 얻어진 p 와 q 가 고역통과필터(HPF)를 거치면 직류와 교류성분인 \bar{p} , \hat{p} 그리고 \bar{q} , \hat{q} 이 구해진다. 식(3)의 p 는 식(13)-식(16)과 같이 α - β 기준좌표로 분해가능하며 그림8과 그림9에서 보여주는 파형과 α - β 공간 궤적을 갖는다.

3.2 순시보상전류의 α β 성분

그림 10은 식 (17)에서 보여주는 바와 같이 \bar{q} , \hat{q} , \hat{p} 을 모두 보상하기 위한 보상기준전류를 나타낸 것으로 α - β 공간 궤적은 작은 6각형 중앙에 위치한 6개 꽃잎 모양으로 된다. 그림 11, 그림 12, 그림 13, 그림 14는 각각 \bar{p} , \bar{q} , \hat{q} , \hat{p} 을 선택적으로 보상하기 위한 보상기준전류이며 기본과 무효성분 \bar{q} 를 보상기준전류로 하였을 때의 그림12를 제외하면 모두 12개의 피크치를 갖는 별 모양 또는 꽃잎 모양과 같다.

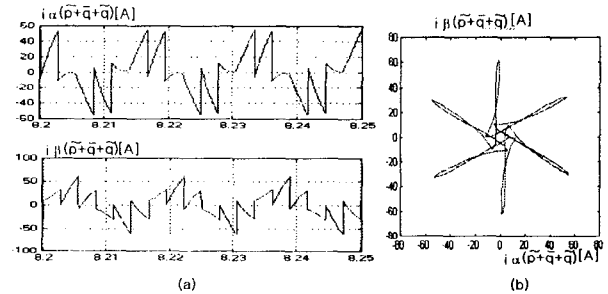


그림10. $i_{c\bar{p}\bar{q}}$ 보상기준전류
a) 시간영역 b) α - β 공간 궤적
Fig.10 $i_{c\bar{p}\bar{q}}$ compensating reference current
a) time domain b) α - β space trajectory

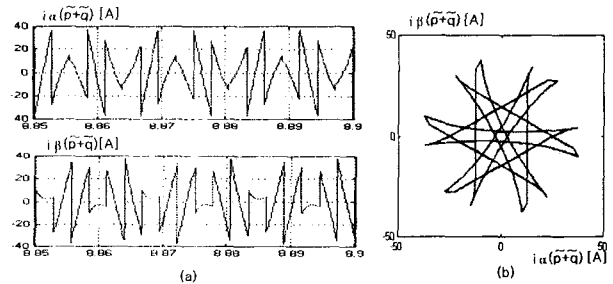


그림11. $i_{c\hat{p}\hat{q}}$ 보상기준전류
a) 시간영역 b) α - β 공간 궤적
Fig.11 $i_{c\hat{p}\hat{q}}$ compensating reference current
a) time domain b) α - β space trajectory

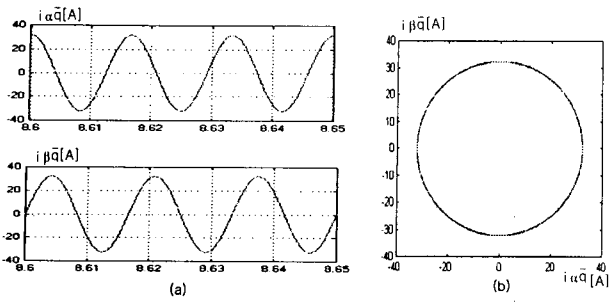


그림12. $i_{c\tilde{q}}$ 보상기준전류
 a)시간영역 b) α - β 공간궤적
 Fig.12 $i_{c\tilde{q}}$ compensating reference current
 a)time domain b) α - β space trajectory

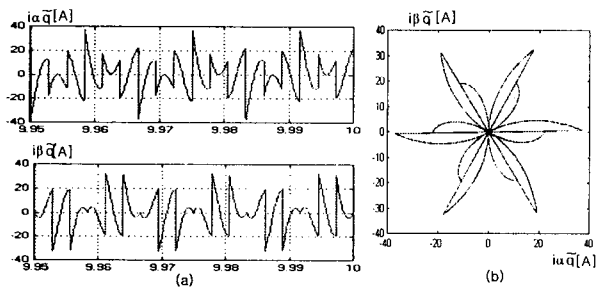


그림13. $i_{c\tilde{q}\tilde{\sim}}$ 보상기준전류
 a)시간영역 b) α - β 공간궤적
 Fig.13 $i_{c\tilde{q}\tilde{\sim}}$ compensating reference current
 a)time domain b) α - β space trajectory

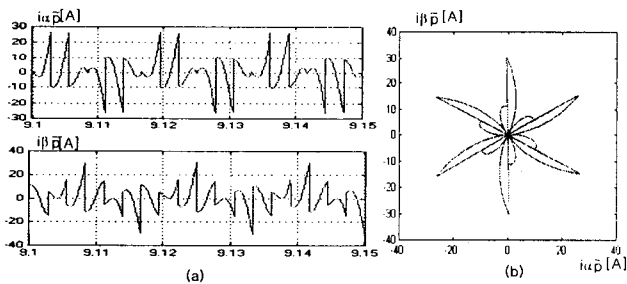


그림14. $i_{c\tilde{p}}$ 보상기준전류
 a)시간영역 b) α - β 공간궤적
 Fig.14 $i_{c\tilde{p}}$ compensating reference current
 a)time domain b) α - β space trajectory

3.3 순시보상전류가 전원전류에 미치는 영향

능동전력필터가 \tilde{q} , \tilde{q} , \tilde{p} 을 모두 보상하는 경우를 살펴보면, 그림4의 i_α 와 i_β 공간 궤적에 의해 형성된 6각형 궤적은 그림15에 나타난 원형의 i_α , i_β 공간 궤적이 된다. 이러한 보상과정은 그림4의 6각형 i_α i_β 공간 궤적과 그림10의 i_α i_β 공간 궤적과의 차이로 표현된다

그림 16, 그림 17, 그림 18, 그림 19는 선택적인 보상 과정을 설명하고 있다. 그림 16은 $i_{c\tilde{p}\tilde{q}}$ 만이 보상되었을 때 보상후의 전원전류를 나타내고 있다. 전원전류 공간궤적이 원형으로 접근함을 알 수 있으나 $i_{c\tilde{q}}$ 성분을 보상하지 않았으므로 기본파 무효성분이 보상되지 않는다. 그림4에서 나타난 육각형의 α - β 공간 궤적과 비교하여 보면, $i_{c\tilde{q}}$ 만 보상하였을 경우의 궤적은 그림 17과 같은 피크치를 갖는 육각형이다. 그림18은 보상전류 $i_{c\tilde{q}}$ 을 보상하였을 때, 보상전류가 전원전류에 미치는 영향을 나타낸다. 이것은 부하전류의 고조파 무효성분에 해당하는 q 의 교류 성분만을 보상하는 것을 의미한다. 그림 4의 육각형 α - β 공간궤적으로 부터 그림13의 별모양의 궤적을 제거하면 $i_{c\tilde{q}}$ 만이 보상된 그림18의 공간 궤적이 얻어지게 된다.

끝으로 부하전류의 고조파 유효성분 $i_{c\tilde{p}}$ 성분만을 보상하였을 때, 전원전류 파형에 미치는 영향을 그림 19에 나타내었다. 그림4의 육각형 α - β 공간 궤적에서 그림14에서 보여준 별 모양의 궤적 제거하면, 그림 19의 $i_{c\tilde{p}}$ 만이 공간궤적이 얻어진다.

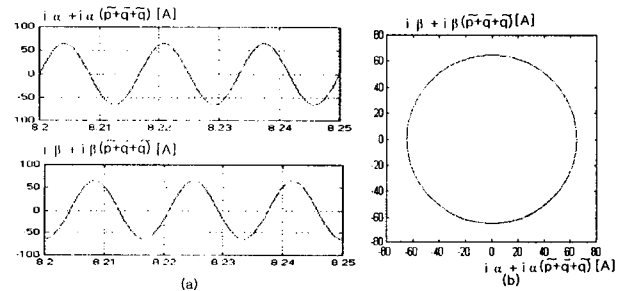


그림15. $i_{c\tilde{p}\tilde{q}\tilde{p}}$ 이 전원전류에 미치는 영향
 a)시간영역 b) α - β 공간궤적
 Fig.15 source current of after $i_{c\tilde{p}\tilde{q}\tilde{p}}$ compensated
 a)time domain b) α - β space trajectory

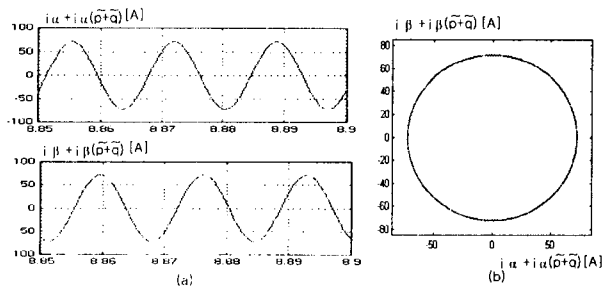


그림16. $i_{c\tilde{p}\tilde{q}}$ 이 전원전류에 미치는 영향
 a)시간영역 b) α - β 공간궤적
 Fig.16 source current of after $i_{c\tilde{p}\tilde{q}}$ -compensated
 a)time domain b) α - β space trajectory

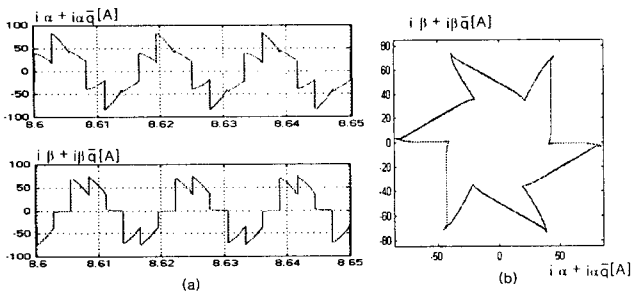


그림17. i_{cq} 이 전원전류에 미치는 영향
a) 시간영역 b) α - β 공간궤적

Fig.17 source current of after i_{cq} compensated
a)time domain b) α - β space trajectory

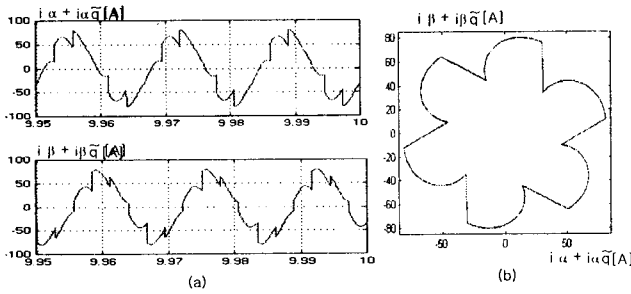


그림18. i_{cq} 이 전원전류에 미치는 영향
a) 시간영역 b) α - β 공간궤적

Fig.18 source current of after i_{cq} compensated
a)time domain b) α - β space trajectory

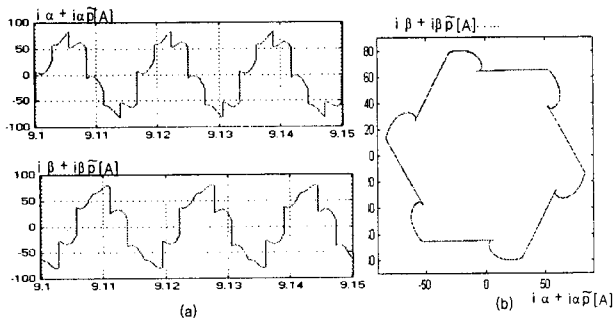


그림19. i_{cp} 이 전원전류에 미치는 영향
a) 시간영역 b) α - β 공간궤적

Fig.19 source current of after i_{cp} compensated
a)time domain b) α - β space trajectory

4. 결 론

본 연구에서는 능동전력필터 제어에 널리 이용되고 있는 순시전력이론을 초보 연구자들이 쉽게 이해 할 수 있도록 하기 위한 전류 및 전력성분에 관한 데이터를 제시하였다. 또한 순시전력의 직류 및 교류성분의 보상에 따른 보상기준 전류파형과 비선형 부하 계통의 전원

전류 파형의 변화를 α - β 기준좌표에서 쉽게 파악할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다. 순시유효전력 p 는 일정한 (+)값을 중심으로 우측 이반원형의 맥동을 하며, 순시무효전력 q 는 0을 중심으로 (-)와 (+)사이를 좌측이 반원형의 맥동을 하고 있음을 알 수 있다. 또한 α - β 공간 궤적은 물고기 형태를 갖고 있다. 비선형 부하전류의 α - β 공간상의 궤적은 6각형이며, i_{cq} , i_{cp} , i_{cp} 를 모두 보상하는 경우, 보상 후의 전원전류의 궤적은 원형이다. 또한 보상기준전류의 공간궤적은 작은 6각형이 중앙에 위치한 6개 꽃잎 모양과 같다. i_{cq} , i_{cq} , i_{cp} 을 선택적으로 보상한 경우는 전원전류의 궤적이 유사 원형 궤적이거나 보상 정도에 따라 6각형의 모양을 갖게 된다. 보상기준전류의 α - β 공간 궤적은, i_{cq} 를 보상전류로 하였을 때의 공간궤적을 제외하면, 위상이 이동된 작은 6각형 모양 또는 6개 꽃잎 또는 12개의 피크를 갖는 별 모양이다.

본 연구는 한국과학재단 지정 전남대 고품질전기 전자부품 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. Electr. Power Appl., vol.147, no.6, November, pp.572-578, 2000.
- [2] S.Silva and P.Cortizo, "A Three Phase Series-Parallel Compensated Line-Interactive UPS System with Sinusoidal Input Current and Sinusoidal Output Voltage", IEEE IAS, pp.826-832, 1999
- [3] 이우철, 현농석, 이택기, "무효전력제어에 의한 PCC전압보상을 갖는 삼상 병렬형 능동전력필터", 대한전기학회, 49B 권, 3호, pp.211-218, 2000
- [4] J.H.R.Enslin and J.D.Van Wyk, "A New control Philosophy for Power Electronic Converters as Fictitious Power Compensators", IEEE Trans. on Power Electronics, vol.5, no.1, pp.88-97, 1990.
- [5] 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.
- [6] H.Akagi and A.Nabae, "Analysis and Design of an Active Power Filter using Quad-Series Voltage Source PWM Converters", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-26, No.1, 1990.
- [7] S.Bhattacharya and A.Veltman, "Flux based Active Filter Controller", IEEE IAS, pp.2483-2491, 1995