

3상 4선 계통에서의 순시전력 보상이론

金孝城[†]

Instantaneous Power Compensation Theory in Three-phase Four-wire Systems

Hyosung Kim

요 약

본 논문은 Akagi에 의해 발표된 p-q 이론과 Nabae 및 Peng에 의하여 발표된 크로스벡터 이론의 대비를 통하여 3상 4선 계통에서 순시전력보상방법을 분석한다. 3상 3선 계통에서 영상성분 전압이 없는 경우 두 이론은 똑 같다. 그렇지만 3상 4선 계통에서 영상성분 전압과 전류가 포함되는 경우, 두 이론은 순시무효전력과 순시유효전력을 달리 정의한다. 본 논문에서는 이론적 분석과 컴퓨터 시뮬레이션을 바탕으로 영상성분 전압과 영상성분 전류가 존재하는 3상 4선 계통에서 에너지 저장요소의 필요 없이 무효전력만의 보상을 통하여 계통의 중성선 전류를 완벽히 제거할 수 있는 순시전력보상방법을 제시한다.

ABSTRACT

This paper analyzes instantaneous power compensation theory through comparing p-q theory and cross-vector theory which were proposed by Akagi and Nabae respectively in three-phase four-wire systems. The two compensation theories are identical when there is no zero-sequence voltage component in three-phase three-wire systems, However, when the zero-sequence voltage and/or current components exist in three-phase four-wire systems, the two compensation theories are different in definition on instantaneous real power and instantaneous imaginary power. Based on the analysis, this paper presents instantaneous power compensation method that can eliminate neutral current completely without using energy storage element when the zero-sequence current and voltage components exist in three-phase four-wire systems.

Key words: 3-phase 4-wire systems, Instantaneous power compensation, p-q theory, cross-vector theory

1. 서 론

1983년에 Akagi와 그의 동료들에 의하여 소위 p-q 이론이라 불리우는 3상계통의 순시전력이론이 처음으로 소개되었다^[1,2]. p-q 이론은 3상 3선 계통에 적용하기 위하여 개발된 이론이지만 3상 4선 계통에도 적용이 가능하다. 제안된 순시전력이론은 임의의 3상 전압

및 전류에 대하여 각상의 순시무효전력을 정의할 수 있으며, 순시무효전력에 대한 물리적의미가 명확한 특징이 있다.

한국과 일본에서는 3상 3선 회로가 6.6kV 배전계통과 산업용의 저전압 배전계통에 채택되고 있다. 한편 미국 및 유럽 등지의 여러 나라에서는 3상 4선 회로가 산업용의 저전압 배전계통에 널리 사용되고 있다. 또한 최근의 방송장비들은 큰 용량의 100V 전원을 사용하지 않고 상전압이 100V인 3상 4선 계통이 특수한 목적으로 많이 사용된다. 일본의 명전사는 저전압용 3상 4선 계통의 능동필터를 개발하였다. 이 능동필터는 75kVA에

[†]교신저자 : 정희원, 공주대 전기전자공학부 교수

E-mail : hyoskim@kongju.ac.kr

접수일자 : 2006. 1. 24 1차 심사 : 2006. 2. 27

2차 심사 : 2006. 3. 3 심사완료 : 2006. 3. 7

서 500kVA 범위의 상품이며, 300kVA의 능동필터에 의한 3상 4선 계통에서의 중성선 전류와 고조파 전류에 대한 우수한 보상특성이 보고되었다^[1,2].

1994년 Nabae와 그의 동료들에 의하여 3상 4선 계통에 적용시키기 위한 수정된 순시전력이론으로서 크로스벡터 이론이 제안되었으며^[13,14], Peng과 Lai에 의해서 발전되었다^[16,19]. 크로스벡터 이론도 각상의 순시 무효전력을 유일하게 정의한다. 3상 4선 계통에서 영상성분 전압과 전류가 존재하는 경우 크로스벡터 이론에서 정의된 순시 무효전력은 p-q 이론과 전혀 다르다. 따라서 두 이론을 에너지저장요소를 사용하지 않는 능동필터에 적용시켰을 때, 성능이 달리 나타나게 된다.

본 논문에서는 p-q 이론과 크로스벡터이론의 유사점과 차이점의 비교를 통하여 3상 4선계통에서 순시전력 보상이론의 적용방법을 분석한다. 두 이론의 차이점은 3상 4선 회로의 영상회로를 어떻게 다루는가에 따라 달라지며 결과적으로 “뱀뱀매트릭스”상의 큰 차이를 가져온다. 또한 본 논문은 에너지저장요소를 사용하지 않는 능동필터를 사용하여 각상의 무효전력과 영상성분 전류를 보상하기 위한 제어전략을 제시한다.

2. 3상 4선 계통의 순시무효전력 이론

그림 1은 영상 전압 및 전류를 포함하는 3상 4선 계통의 회로구성을 보인다. 이론의 전개를 간단하게 하기 위하여 전원측과 부하측간에 존재하는 배전선 임피던스와 중성선 임피던스를 제외하였다. 그러나 본 이론은 배전선과 중성선에 무시할 수 없는 크기의 임피던스가 존재하는 3상 4선 계통에도 적용이 가능하다. 그 이유는 본 이론이 임의의 버스(예를 들어, 인입선, 중간 버스 또는 종단 버스)의 순시적인 3상 전압 및 전류에

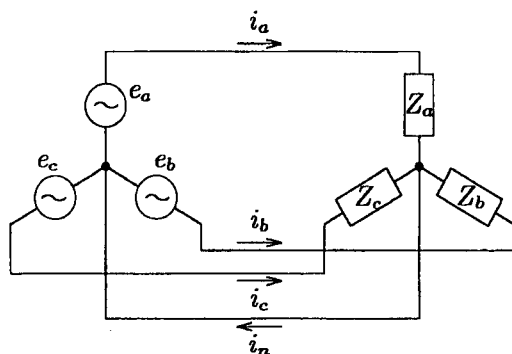


그림 1 3상 4선 계통
Fig. 1 Three-phase four-wire systems

대한 해석이기 때문이다.

a-b-c 좌표의 3상 순시전압 및 전류는 다음 식과 같이 α-β-0 좌표의 값들로 변환될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_\beta \\ e_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

그림 1의 중성선 전류와 식 (2)의 영상전류 사이에는 다음의 관계가 성립된다.

$$i_n = i_a + i_b + i_c \quad (3)$$

$$i_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_a + i_b + i_c) = \frac{1}{\sqrt{3}} i_n \quad (4)$$

위 좌표변환의 물리적 의미는 그림 2로 설명할 수 있다.

전류 또는 전압을 3차원상의 공간벡터로 표현하는 경우, a-b-c좌표축은 마치 평면위에 모로 세워놓은 정육면체의 꼭지점에 인접한 세 개의 모서리에 대응된다. 같은 3차원상의 공간벡터를 α-β-0 좌표계에 나타내면 α-β 평면상의 회전하는 회전 벡터성분과 0-축의 성분으로 나타나는 영상 벡터성분으로 직교적으로 분리하여 표현할 수 있다. 3상 평형의 조건이라면 전류 및 전

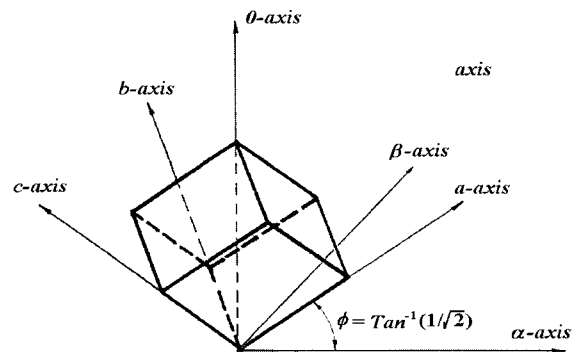


그림 2 α-β-0 좌표계의 물리적 의미
Fig. 2 Physical meaning of the α-β-0 coordinate system

압 공간벡터는 α - β 평면 위에서 원형의 궤적을 그리며 반시계 방향으로 회전할 것이다. 계통의 전압이나 전류에 역상분 또는 고조파 성분이 포함되면 공간벡터의 궤적은 더 이상 원형이 되지 못하여 α - β 평면 위에서 왜곡된 형태를 갖게 된다. 계통의 전압이나 전류에 영상성분이 포함되면 공간벡터의 궤적은 영상성분의 부호에 따라 α - β 평면의 위 또는 아래에 나타나게 된다.

3상 4선 계통의 순시 실전력 p 는 다음과 같다.

$$p = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c = e_a i_a + e_\beta i_\beta + e_0 i_0 \quad (5)$$

2.1 p-q 이론

p-q 이론은 3상 4선 계통에서 두 개의 순시 실전력 p_0 와 $p_{\alpha\beta}$ 를 정의하고, 한 개의 순시 허전력 $q_{\alpha\beta}$ 를 정의한다^[1,2].

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p_{\alpha\beta} \\ q_{\alpha\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_0 \\ e_\alpha & e_\beta & 0 \\ -e_\beta & e_\alpha & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)은 $p_0(=e_0 i_0)$ 를 영상회로에서 발생하는 순시 실전력으로 본다. 또한 $e_\alpha i_\alpha$ 와 $e_\beta i_\beta$ 도 같은 상의 순시전압과 순시전류의 곱으로 정의된 순시 실전력들이다. 따라서, $p_{\alpha\beta}$ 는 α - β 회로상에서 발생하는 순시 실전력이며, 순시실전력의 단위는 [W]이다.

다른 한편, $e_\alpha i_\beta$ 와 $e_\beta i_\alpha$ 는 서로 다른 상의 순시전압과 순시전류의 곱이므로 순시 실전력으로 볼 수 없다. 따라서, α - β 회로에서 발생하는 순시 허전력 $q_{\alpha\beta}$ 는 [1]에서 정의한 새로운 전기량으로서, [W], [VA] 또는 [var]이 아닌 새로운 단위인 [IW]가 제시되었다.

식 (6)의 상용전원은 기지의 값인 e_α , e_β 및 e_0 의 전압원으로 간주되므로, 식 (6)은 3차원 전류공간에서 3차원 전력공간으로의 “맵핑”으로 볼 수 있다. 이론적인 관점에서는 많은 맵핑이 존재할 수 있으나 소수의 매트릭스만이 실제적인 측면에서 명확한 물리적 의미를 갖는다. 식 (6)의 역변환은 다음식과 같이 존재한다.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{e_0 e_{\alpha\beta}^2} \begin{bmatrix} 0 & e_0 e_\alpha & -e_0 e_\beta \\ 0 & e_0 e_\beta & e_0 e_\alpha \\ e_{\alpha\beta}^2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 \\ p_{\alpha\beta} \\ q_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

단 $e_{\alpha\beta} = \sqrt{e_\alpha^2 + e_\beta^2}$

α - β -0 좌표의 순시전류는 식 (7)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i_0 = \frac{1}{e_0} p_0 (= \frac{1}{e_0} e_0 i_0 = i_0) \quad (8)$$

$$i_\alpha = \frac{1}{e_{\alpha\beta}^2} e_\alpha p_{\alpha\beta} + \frac{1}{e_{\alpha\beta}^2} (-e_\beta q_{\alpha\beta}) \equiv i_{\alpha p} + i_{\alpha q} \quad (9)$$

$$i_\beta = \frac{1}{e_{\alpha\beta}^2} e_\beta p_{\alpha\beta} + \frac{1}{e_{\alpha\beta}^2} (e_\alpha q_{\alpha\beta}) \equiv i_{\beta p} + i_{\beta q} \quad (10)$$

단 i_0 : 영상성분 순시전류
 $i_{\alpha p}$: α -상 순시 유효전류
 $i_{\beta p}$: β -상 순시 유효전류
 $i_{\alpha q}$: α -상 순시 무효전류
 $i_{\beta q}$: β -상 순시 무효전류

식 (6)으로부터 식 (7)~(10)을 이끌어 내기 위해서는 $e_0 \neq 0$ 이라는 조건을 전제로 한다. 왜냐하면, $e_0=0$ 이라면 식 (6)의 역행렬을 구할 수 없기 때문이다. 그렇지만, 식 (9)의 i_α 와 식 (10)의 i_β 는 $e_0 \neq 0$ 임에도 불구하고 e_0 를 포함하지 않는다. 이는 p-q 이론이 영상회로를 α -상 및 β -상과는 독립된 단상회로로 다루고 있음을 의미한다.

따라서, 3상 4선 계통에서 영상전압성분이 없는 경우는 $e_0 \neq 0$ 인 조건으로 유도한 결과식에 $e_0=0$ 를 대입함으로써 p-q 이론을 적용할 수 있다.

식 (9)와 (10)의 우측 첫째 항과 둘째 항은 α -상 및 β -상 각각에 대한 순시 유효전류와 순시 무효전류를 나타낸다. 그러므로 다음의 관계가 존재한다.

$$e_0 i_0 + e_\alpha i_{\alpha p} + e_\beta i_{\beta p} = e_0 i_0 + e_\alpha \left(\frac{1}{e_{\alpha\beta}^2} e_\alpha p_{\alpha\beta} \right) + e_\beta \left(\frac{1}{e_{\alpha\beta}^2} e_\beta p_{\alpha\beta} \right) = p_0 + p_{\alpha p} + p_{\beta p} \quad (11)$$

$$e_\alpha i_{\alpha q} + e_\beta i_{\beta q} = e_\alpha \left\{ \frac{1}{e_{\alpha\beta}^2} (-e_\beta q_{\alpha\beta}) \right\} + e_\beta \left(\frac{1}{e_{\alpha\beta}^2} e_\alpha q_{\alpha\beta} \right) = p_{\alpha q} + p_{\beta q} = 0. \quad (12)$$

각 상의 순시 유효 및 무효 전력은 다음과 같이 정의된다.

$p_0 = e_0 i_0$: 영상 순시전력
 $p_{\alpha p} = e_\alpha i_{\alpha p}$: α -상 순시 유효전력
 $p_{\beta p} = e_\beta i_{\beta p}$: β -상 순시 유효전력
 $p_{\alpha q} = e_\alpha i_{\alpha q}$: α -상 순시 무효전력
 $p_{\beta q} = e_\beta i_{\beta q}$: β -상 순시 무효전력

위의 값들은 계통의 각 상에 순시적으로 실제로 존재하는 값들로서, 영상회로에는 순시전력만 정의되고 순시무효전력의 개념이 없는 것에 주의할 필요가 있다. 또한, α -상과 β -상에서 정의되는 순시 무효전력은 기존의 주파수영역에서 정의되는 무효전력과는 다른 개념으로서, 두 순시무효전력은 항상 크기는 같고 부호가 다르므로 순시적으로 그 합이 항상 영이 된다.

2.2 크로스벡터 이론

크로스벡터 이론은 한 개의 순시 실전력 p 와 세 개의 순시 허전력, q_α , q_β , q_0 를 정의한다^[13,14].

$$\begin{bmatrix} p \\ q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta & e_0 \\ 0 & -e_0 & e_\beta \\ e_0 & 0 & -e_\alpha \\ -e_\beta & e_\alpha & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

세 개의 순시 허전력, q_α , q_β , q_0 사이에는 다음과 같은 선형 의존적(linearly dependant)인 관계가 존재한다.

$$0 = e_\alpha \cdot q_\alpha + e_\beta \cdot q_\beta + e_0 \cdot q_0 \quad (14)$$

따라서, 식 (13)의 랭크는 3이고 순시 허전력 q_α , q_β , q_0 에서의 독립변수는 세 개가 아니고 두 개임을 알 수 있다. 결과적으로 p-q 이론에서와 마찬가지로 크로스벡터 이론에서도 3차원의 전력공간을 정의한다. 그렇지만 식 (6)과 (13)에서 정의된 맵핑매트릭스는 다른 구성을 갖고 있다. 식 (13)의 역행렬을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{e_{a\beta 0}^2} \begin{bmatrix} e_\alpha & 0 & e_0 & -e_\beta \\ e_\beta & -e_0 & 0 & e_\alpha \\ e_0 & e_\beta & -e_\alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\text{단, } e_{a\beta}^2 = e_\alpha^2 + e_\beta^2$$

식 (15)로부터 각상의 순시전류는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_0 &= \frac{1}{e_{a\beta 0}^2} e_0 p + \frac{1}{e_{a\beta 0}^2} (e_\beta q_\alpha - e_\alpha q_\beta) \\ &\equiv i_{0p} + i_{0q} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} i_\alpha &= \frac{1}{e_{a\beta 0}^2} e_\alpha p + \frac{1}{e_{a\beta 0}^2} (e_0 q_\beta - e_\beta q_0) \\ &\equiv i_{\alpha p} + i_{\alpha q} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} i_\beta &= \frac{1}{e_{a\beta 0}^2} e_\beta p + \frac{1}{e_{a\beta 0}^2} (e_\alpha q_0 - e_0 q_\alpha) \\ &\equiv i_{\beta p} + i_{\beta q} \end{aligned} \quad (18)$$

여기서는 영상성분 전류를 다음과 같이 두 성분으로 구분하여 정의한다.

i_{0p} : 영상 순시 유효전류

i_{0q} : 영상 순시 무효전류

따라서 다음과 같은 관계식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} e_0 i_{0p} + e_\alpha i_{\alpha p} + e_\beta i_{\beta p} \\ &= e_0 \left(\frac{1}{e_{a\beta 0}^2} e_0 p \right) + e_\alpha \left(\frac{1}{e_{a\beta 0}^2} e_\alpha p \right) + e_\beta \left(\frac{1}{e_{a\beta 0}^2} e_\beta p \right) \\ &= p_{0p} + p_{\alpha p} + p_{\beta p} = p \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} e_0 i_{0q} + e_\alpha i_{\alpha q} + e_\beta i_{\beta q} \\ &= e_0 \left\{ \frac{1}{e_{a\beta 0}^2} (e_\beta q_\alpha - e_\alpha q_\beta) \right\} \\ &+ e_\alpha \left\{ \frac{1}{e_{a\beta 0}^2} (e_0 q_\beta - e_\beta q_0) \right\} + e_\beta \left\{ \frac{1}{e_{a\beta 0}^2} (e_\alpha q_0 - e_0 q_\alpha) \right\} \\ &= p_{0q} + p_{\alpha q} + p_{\beta q} = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

여기서 영상성분의 순시전력은 다음과 같이 두 개의 성분으로 구분되어 정의됨을 알 수 있다.

$p_{0p} = e_0 i_{0p}$: 영상 순시 유효전력

$p_{0q} = e_0 i_{0q}$: 영상 순시 무효전력

이는 영상순시전력도 유효전력성분과 무효전력성분으로 구성되어야 한다는 Willems의 주장을 뒷받침하며 수식적으로도 체계적이다^[8].

3. p-q 이론과 크로스벡터 이론의 유사점과 차이점

3.1 $e_0 \neq 0$ 이고 $i_0 \neq 0$ 인 경우

그림 3은 3상 4선 계통에서 p-q 이론의 전력흐름을 보인다. p-q 이론은 영상회로를 α -회로 및 β -회로와는 독립적인 단상회로로 간주한다. 이는 소위 “대칭좌표법”이 3상 4선 계통을 영상회로, 정상회로, 역상회로로 분리하고, 영상회로를 정상회로 및 역상회로와는 독립된 단상회로로 취급하는 것과 같다.

단상회로에서, 순시 전압 및 전류의 곱으로서 순시 유효전력을 정의할 수 있으나, 같은 시점에서의 순시

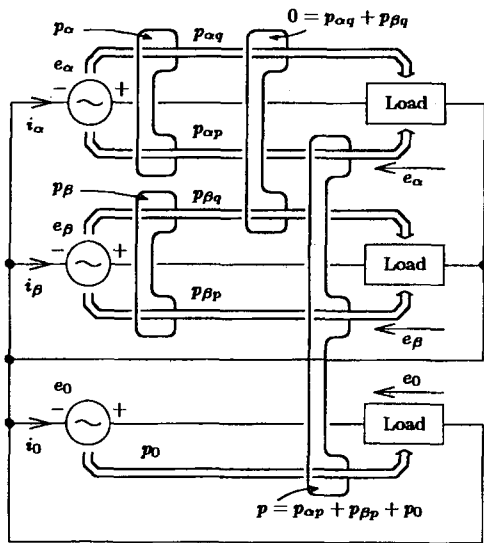


그림 3 p-q 이론에서의 전력흐름도
Fig. 3 Power flow based on the p-q theory

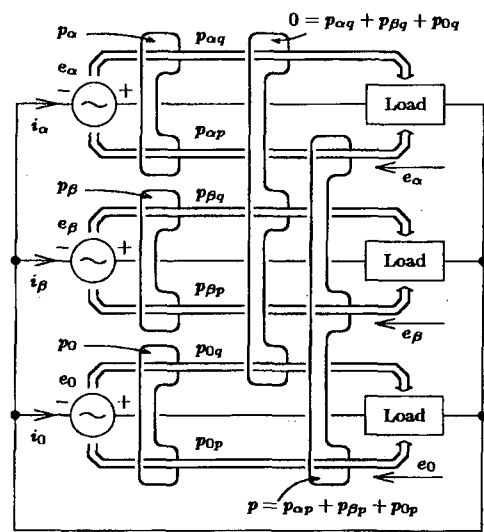


그림 4 크로스벡터 이론에서의 전력흐름도
Fig. 4 Power flow based on the crossvector theory

무효전력을 유일하게 정의하는 것은 불가능하다. 그러므로 p-q 이론은 영상회로의 $e_0 \neq 0$ 에 대하여 순시유효 전력 $p_0 = e_0 i_0$ 만이 형성되므로, 영상전류 i_0 를 순시 유효 전류로 처리한다. 이는 영상회로에 순시 무효전력이 없음을 의미한다.

식 (12)는 a-상의 순시 무효전력 $p_{\alpha q} (= e_{\alpha} i_{\alpha q})$ 와 β -상의 순시 무효전력 $p_{\beta q} (= e_{\beta} i_{\beta q})$ 의 합이 어느 순간이든 제로임을 의미한다. 이는 $p_{\alpha q}$ 와 $p_{\beta q}$ 의 합이 α - β 상 내에서는 에너지 전달에 기여하지 않음을 내포한다. 하지만, $p_{\alpha q}$ 는 a-상 내에서는 분명히 에너지 전달에 기여를 하고, $p_{\beta q}$ 도 β -상 내에서 역시 에너지 전달에 기여하므로, 각상의 순시 무효전력의 단위는 물리화학적 관점에서 순시 유효전력의 단위인 [W]와 같다고 할 수 있다. 이러한 순시 무효전력은 전송설비 내에서만 발생하고 외부로 전달되지 않으므로, 결과적으로 에너지 전송설비의 중대 요인이 된다. 전기공학상의 새로운 단위가 순시 무효전력에 도입될 수 있다. p-q 이론은 $p_{\alpha q}$ 와 $p_{\beta q}$ 를 결정하는 요인으로서 순시 허전력 $q_{\alpha\beta}$ 를 소개하였으며, 독립된 두 개의 순시 유효전력 p_0 , $p_{\alpha\beta}$ 와 함께 3차원 전력공간을 구성한다.

그림 4는 크로스벡터 이론에 근거한 전력흐름도이다. 식 (16)~(18)을 통하여 분명히 알 수 있는 것처럼, 크로스벡터 이론은 영상 회로와 a-상 회로, 그리고 β -상 회로를 동등하게 처리하는 특징이 있다. 이는 영상 전류 i_0 가 영상 순시 유효전류 i_{0p} 와 영상 순시 무효전

류 i_{0q} 로 분리될 수 있음을 의미한다. 그러나 p-q 이론과 크로스벡터 이론에서의 각상 순시 무효전력의 물리적 의미는 같으므로 식 (20)의 관계가 성립한다. 즉, $p_{\alpha q}$, $p_{\beta q}$, 그리고 p_{0q} 는 해당 각 상에서는 존재하지만 α - β -0 전체회로의 에너지 전달에는 기여하지 못한다.

식 (14)는 순시 허전력의 독립변수가 2개임을 암시하며, 3차원 전력공간상의 순시 실전력의 독립변수는 한 개이어야 한다.

식 (16)~(18)을 식 (6)에 대입함으로써, p-q 이론에서 정의한 p_0 , $p_{\alpha\beta}$ 그리고 $q_{\alpha\beta}$ 들과 크로스벡터 이론에서 정의한 p , q_{α} , q_{β} 그리고 q_0 간에는 다음의 관계가 파생된다.

$$p_0 = \frac{e_0^2}{e_{\alpha\beta 0}^2} p + \frac{e_0}{e_{\alpha\beta 0}^2} (e_{\beta} q_{\alpha} - e_{\alpha} q_{\beta}) \quad (21)$$

$$p_{\alpha\beta} = (1 - \frac{e_0^2}{e_{\alpha\beta 0}^2}) p - \frac{e_0}{e_{\alpha\beta 0}^2} (e_{\beta} q_{\alpha} - e_{\alpha} q_{\beta}) \quad (22)$$

$$q_{\alpha\beta} = q_0. \quad (23)$$

p-q 이론의 두 독립 순시 실전력들과 크로스벡터 이론의 순시 실전력 간에는 다음의 관계가 존재한다.

$$p_0 + p_{\alpha\beta} = p. \quad (24)$$

3.2 $e_0=0$ 이고 $i_0=0$ 인 경우

$e_0=i_0=0$ 를 식(6)과 식(13)에 대입하면, 식(6)에서 $p_0=0$ 가 되고, 식(13)에서 $q_a=q_b=0$ 가 되므로, $p_{a\beta}=p$ 그리고 $q_{a\beta}=q_0$ 임을 알 수 있다. 결과적으로 식(6)과 식(13)은 다음과 같이 간단히 된다.

$$\begin{bmatrix} p_{a\beta} \\ q_{a\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a & e_\beta \\ -e_\beta & e_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (25)$$

위의 식은 영상성분 전압이 없는 3상 3선 계통에서는 p-q 이론과 크로스벡터 이론이 똑같음을 말한다.

3.3 $e_0=0$ 이고 $i_0 \neq 0$ 인 경우

$e_0=0$ 의 조건에 의해 $p_0=p_p=p_{0q}=0$ 가 되므로 그림3과 그림4의 전력흐름도는 똑같아 진다. 다시 말해, $e_0=0$ 를 식 (21)과 (22)에 대입하면 식 (25)가 유도되어 진다. 이는 식 (9)에서 정의된 p-q 이론의 i_{ap} 와 i_{aq} 가 식 (17)에서 정의된 크로스벡터 이론의 i_{ap} , i_{aq} 와 똑같다는 의미를 함축한다. 또한, 식 (10)에서 정의된 p-q 이론의 $i_{\beta p}$ 와 $i_{\beta q}$ 도 식 (18)에서 정의된 크로스벡터 이론의 $i_{\beta p}$, $i_{\beta q}$ 와 각기 똑같다.

그러나, 두 이론은 이 경우의 영상성분 순시전류 i_0 에 대하여 해석을 달리한다. $e_0=0$ 이면 p_0 는 항상 제로이다. 그렇다면 이 경우 중성선을 통하여 흐르는 영상성분 전류는 순시 무효전류에 해당할 것이다. 그러나, p-q 이론에서는 영상성분 순시 무효전류에 대하여 정의하지 않고 있으므로, 이 경우의 영상성분 전류에 대하여는 아직 분명한 정의를 내리지 못하고 있다. 한편, 크로스벡터 이론에서는 영상성분 전류 i_0 를 순시 유효전류 i_{0p} 와 순시 무효전류 i_{0q} 로 분리하여 정의할 수 있다. 식 (16)에서 알 수 있는 바와 같이 $e_0=0$ 이면 $i_{0p}=0$ 이 되고, $i_0=i_{0q}$ 가 된다. 그러므로 크로스벡터 이론에서는 $e_0=0$ 일때의 영상성분 전류를 순시무효전류로 정의하는 타당성을 갖는다. 어찌하든, 5절의 시뮬레이션 결과에 보이는 것처럼, $e_0=0$ 일 때 중성선에 흐르는 영상전류 i_0 를 제거하는 데에 있어서, 두 이론 모두가 능동필터에서 에너지 저장요소를 필요로 하지 않는다.

3.4 $e_0 \neq 0$ 이고 $i_0=0$ 인 경우

$e_0 \neq 0$, $i_0=0$ 의 조건을 식 (6)에 대입하면, p-q 이론에

서는 $p_0=0$ 가 되고 $p_{a\beta}$ 및 $q_{a\beta}$ 는 식 (25)와 똑같은 값을 갖는다. 그 이유는 p-q 이론이 영상 회로를 다른 두 회로와는 독립된 단상회로로 다루기 때문이다. 같은 조건을 식 (13)에 대입하면, 크로스벡터 이론에서는 p , q_a , q_b , q_0 가 각각 유일하게 정의되며, 식 (16)에 의해 다음의 관계가 파악된다.

$$i_0 = i_{0p} + i_{0q} = 0$$

$$i_{0p} = \frac{1}{e_{a\beta}^2} e_0 (e_a i_a + e_\beta i_\beta) = -i_{0q}$$

위의 식들은 크로스벡터 이론이 3상 3선 계통에서도 영상전압이 포함되어 있는 경우는 i_0 를 i_{0p} 와 i_{0q} 로 분리할 수 있음을 보여준다. 그렇지만, 3상 3선 계통에서는 영상전류가 흐를 수 있는 통로가 없으므로, i_{0p} 와 i_{0q} 를 독립적으로 제어하기는 불가능하다.

4. 에너지저장요소를 사용하지 않는 능동필터의 제어전략

그림 5는 3상 4선 계통에서 영상전류와 순시무효전류를 보상하기 위한 능동필터의 기본 계통 구성을 보인다.

4.1 p-q 이론에 따른 제어전략

p-q 이론은 α - β -0좌표의 보상전류 $i_{c\alpha}$, $i_{c\beta}$, i_{c0} 를 다음과 같이 계산한다.

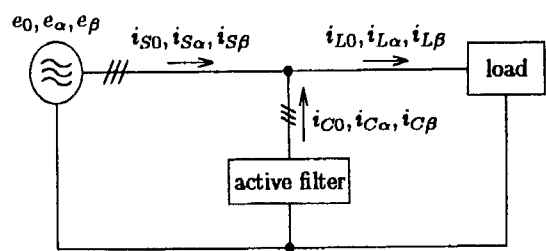


그림 5 α - β -0 좌표계에서의 시스템 구성
Fig. 5 System configuration on the α - β -0 coordinates

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \\ i_{c0} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_0 e_{a\beta}^2} \begin{bmatrix} 0 & e_0 e_a & -e_0 e_\beta \\ 0 & e_0 e_\beta & e_0 e_a \\ e_{a\beta}^2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{c0} \\ p_{c\alpha\beta} \\ q_{c\alpha\beta} \end{bmatrix} \quad (26)$$

위 식의 p_{c0} 와 $p_{c\alpha\beta}$ 는 독립적인 변수로서, 다음의 제어조건을 줄 수 있다.

$$p_C = p_{C0} + p_{Ca\beta} = 0. \quad (27)$$

이 조건은 $e_0 \neq 0$ 인 경우일지라도 능동필터에서 순시 실전력의 흐름이 발생하지 않음을 의미한다. 달리 말하면, $e_0 i_{C0}$ 의 순시 실전력을 영상회로와 α - β 상회로 사이에서 서로 교환시킨다는 것이다.

부하측에서 발생하는 순시 허전력을 모두 능동필터가 보상한다고 하면 $q_{Ca\beta}$ 는 다음과 같이 된다.

$$q_{Ca\beta} = q_{La\beta}. \quad (28)$$

식 (27) 및 (28)의 조건에 따라 다음과 같은 순시보상전력이 결정된다.

$$p_{C0} = p_{L0} = e_0 i_{L0} \quad (29)$$

$$p_{Ca\beta} = -p_{L0} = -e_0 i_{L0} \quad (30)$$

$$q_{Ca\beta} = e_\alpha i_{L\beta} - e_\beta i_{L\alpha}. \quad (31)$$

식 (29)~(31)을 식 (26)에 대입하면 보상전류는 다음과 같이 된다.

$$i_{C0} = i_{L0} \quad (32)$$

$$i_{Ca} = \frac{1}{e_{\alpha\beta}^2} (-e_0 e_\alpha i_{L0} + e_\beta^2 i_{L\alpha} - e_\alpha e_\beta i_{L\beta}) \quad (33)$$

$$i_{C\beta} = \frac{1}{e_{\alpha\beta}^2} (-e_0 e_\beta i_{L0} - e_\alpha e_\beta^2 i_{L\alpha} + e_\alpha^2 i_{L\beta}) \quad (34)$$

식 (32)에서 $i_{C0} = i_{L0}$ 의 관계가 존재하므로, $e_0 \neq 0$ 의 전원조건에서도 에너지저장요소를 사용하지 않는 능동필터로써 계통의 영상성분 전류를 완전히 보상할 수 있다. 식 (32)~(34)는 $e_0 \neq 0$ 의 조건을 가정하여 유도된 식이지만, 2절에서 설명한 바와 같이 $e_0 = 0$ 를 직접 식 (33)과 (34)에 대입함으로써 $e_0 = 0$ 인 전원조건에서의 보상전류를 구할 수 있다.

4.2 크로스벡터 이론에 따른 제어전략

크로스벡터 이론을 능동필터에 적용할 때 다음의 보상전류식이 수립된다.

$$\begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{C\beta} \\ i_{C0} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_{\alpha\beta}^2} \begin{bmatrix} e_\alpha & 0 & e_0 & -e_\beta \\ e_\beta & -e_0 & 0 & e_\alpha \\ e_0 & e_\beta & -e_\alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_C \\ q_{Ca} \\ q_{C\beta} \\ q_{C0} \end{bmatrix} \quad (35)$$

크로스벡터 이론에서 p_C 는 순시 실전력이므로, 에너지저장요소를 사용하지 않는 능동필터의 조건을 만족시키기 위해서는 $p_C = 0$ 의 제한조건을 가한다. 한편, 크로스벡터 이론에서는 두 개의 독립적인 순시허전력을 정의하므로 q_{Ca} , $q_{C\beta}$, q_{C0} 간에는 2의 자유도만 존재한다. 여기서 $q_{Ca} = q_{C\beta} = q_{C0} = 0$ 의 조건을 주는 것은 능동필터가 없는 것과 같으므로 의미가 없다. [14]에서 제시된 제어 알고리즘은 다음과 같다. 이 알고리즘은 $p_C = 0$ 로 하고 부하에서 발생하는 순시 허전력을 모두 능동필터에서 보상한다.

$$p_C = 0 \quad (36)$$

$$q_{C0} = q_{L0} \quad (37)$$

$$q_{Ca} = q_{La} \quad (38)$$

$$q_{C\beta} = q_{L\beta} \quad (39)$$

식 (36)~(39)를 식 (35)에 대입하면 다음과 같이 보상전류를 계산할 수 있다.

$$i_{C0} = \frac{1}{e_{\alpha\beta}^2} \{ (e_\alpha^2 + e_\beta^2) i_{L0} - e_0 e_\alpha i_{La} - e_0 e_\beta i_{L\beta} \} \quad (40)$$

$$i_{Ca} = \frac{1}{e_{\alpha\beta}^2} \{ -e_0 e_\alpha i_{L0} + (e_0^2 + e_\beta^2) i_{La} - e_\alpha e_\beta i_{L\beta} \} \quad (41)$$

$$i_{C\beta} = \frac{1}{e_{\alpha\beta}^2} \{ -e_0 e_\beta i_{L0} - e_\alpha e_\beta^2 i_{La} + (e_0^2 + e_\alpha^2) i_{L\beta} \} \quad (42)$$

$e_0 = 0$ 의 조건을 식 (33)~(34) 및 식 (40)~(42)에 대입하면 해당 방정식들은 서로 똑같이 된다는 것을 쉽게 알 수 있다. 그러므로, $e_0 = 0$ 인 한 p-q 이론에 근거한 제어전략이나 크로스벡터 이론에 근거한 제어전략은 똑같은 전류보상 성능을 갖게 된다. 하지만, $e_0 \neq 0$ 일 때 두 제어전략은 달라지며 해당 능동필터의 성능도 같지 않게 된다. 특히 식 (40)~(42)에 근거한 제어전략은 $i_{C0} \neq i_{L0}$ 이기 때문에 영상성분 전류를 완전히 제거하지 못한다.

5. 시뮬레이션 분석

이 절에서는 이상적인 조건하에서의 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 두 이론의 유사점과 차이점을 분명히 분석한다.

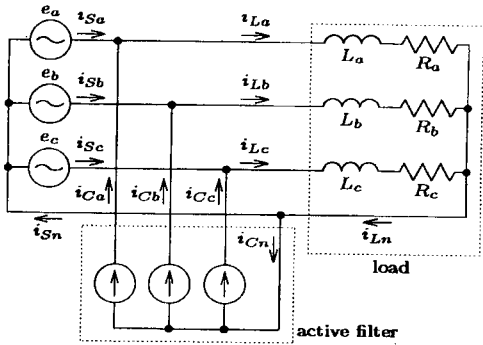


그림 6 a-b-c 좌표계의 시뮬레이션 모델
Fig. 6 Simulation model on the a-b-c coordinates

5.1 시뮬레이션 조건

그림 6은 a-b-c 좌표계의 시뮬레이션 모델이며 표 1은 시뮬레이션 조건을 정리한 것이다. 3상 전원은 다음과 같은 정현파로 가정하였다.

$$e_a = \sqrt{2}E_a \sin(\omega t)$$

$$e_b = \sqrt{2}E_b \sin(\omega t - 2\pi/3)$$

$$e_c = \sqrt{2}E_c \sin(\omega t + 2\pi/3).$$

표 1 시뮬레이션 조건

Table 1 Simulation Condition

Condition	I	II	III	IV	
Waveforms	Fig.7	Fig.8	Fig.9	Fig.10	
Voltage[V]	Ea	115	115	115	115
	Eb	115	115	115	115
	Ec	115	92	115	92
Theory	p-q 이론		크로스벡터 이론		

각 상전압의 실효값을 표 1에 보인다. 조건 I 및 III의 3상 정현전압에서는 영상성분 전압이 없으며, 조건 II 및 IV의 3상 정현전압에서는 영상 성분 전압이 있음에 유의한다. 두 이론의 차이점을 확실히 드러내기 위하여, 그림 5에 보이는 불평형 부하는 고조파를 발생하지 않는 세 개의 선형부하로 선정하였다. 부하의 파라미터는 다음과 같다.

$$R_a = 1.06\Omega, R_b = R_c = 1.32\Omega$$

$$L_a = 3.36mH, L_b = L_c = 4.20mH$$

다음의 시뮬레이션에서 능동필터의 전력회로는 그림 5에서 보인 것처럼 이상적인 전류원으로 가정한다. 그림 7~10은 조건 I~IV에 따라 시뮬레이션한 파형을 보인다.

표 2는 시뮬레이션 결과 보상전류에 포함되어 있는 3차 및 5차 고조파의 값을 각상의 기본파에 대한 퍼센트비[%]로 표시한 것이다. 계통의 전원 또는 부하측이 불평형 조건일 때 순시무효전력만을 보상하는 경우, 계통의 중성선 전류를 보상하는 반대급부로 선전류에 고조파성분이 포함되는 것을 볼 수 있다. 이때 p-q이론의 경우 크로스벡터 이론의 경우에 비하여 같은 회로조건에서 계통의 선전류에 발생하는 전류고조파의 크기가 작다.

표 2 능동필터 보상전류 파형의 고조파 분석.

Table 2 Harmonic analysis in the compensated current to the fundamental component in each phase

Condition	I	II	III	IV	
Waveforms	Fig.7	Fig.8	Fig.9	Fig.10	
i_{Ca}	3rd	4.8	4.3	4.8	11.3
	5th	0	0.3	0	0.7
i_{Cb}	3rd	5.9	4.3	5.9	13.8
	5th	0	0.3	0	0.9
i_{Cc}	3rd	5.5	3.7	5.5	12.7
	5th	0	0.3	0	0.9

5.2 p-q 이론에 따른 제어전략

그림 7 및 8은 p-q 이론에 근거한 제어전략을 능동필터에 적용하였을 때의 시뮬레이션 파형이다. $e_0=0$ 인 경우(그림 7), $p_{C0}=p_{L0}=e_0 \cdot i_{L0}=0$ 이므로 능동필터에 에너지저장요소가 필요하지 않다. 그러나, i_{Ca} , i_{Cb} , i_{Cc} 에는 표 2에 기술한 3차고조파가 포함되어 완전한 정현파가 되지 못한다. 그 이유는 $q_{Ca\beta}$ 에 포함되는 교류성분에 기인한다. 순시보상 허전력 $q_{Ca\beta}$ 는 직류성분 $\bar{q}_{Ca\beta}$ 와 선로주파수의 2배 주파수를 갖는 교류성분 $\tilde{q}_{Ca\beta}$ 으로 구성되어 있다. 능동필터는 $\tilde{q}_{Ca\beta}$ 를 포함한 $q_{Ca\beta}$ 전체를 보상한다. $p_{C0}=p_{Ca\beta}=0$ 및 $q_{Ca\beta}=\tilde{q}_{Ca\beta}$ 를 식 (26)에 대입하여 보면, i_{Ca} 와 i_{Cb} 에 3고조파가 발생되는 것이 확실함을 알 수 있다.

만일, 저역통과필터를 사용하여 $\tilde{q}_{Ca\beta}$ 성분을 $q_{Ca\beta}$ 로부터 추출하여 능동필터가 $\tilde{q}_{Ca\beta}$ 성분만을 보상하도록 한다면, i_{Ca} 와 i_{Cb} 에는 3고조파 전류가 나타나지 않을 것이다.

그림 8은 $e_0 \neq 0$ 인 경우의 시뮬레이션 파형이며, 능동필터가 중성선 전류를 완벽히 보상하고 있음을 보여준

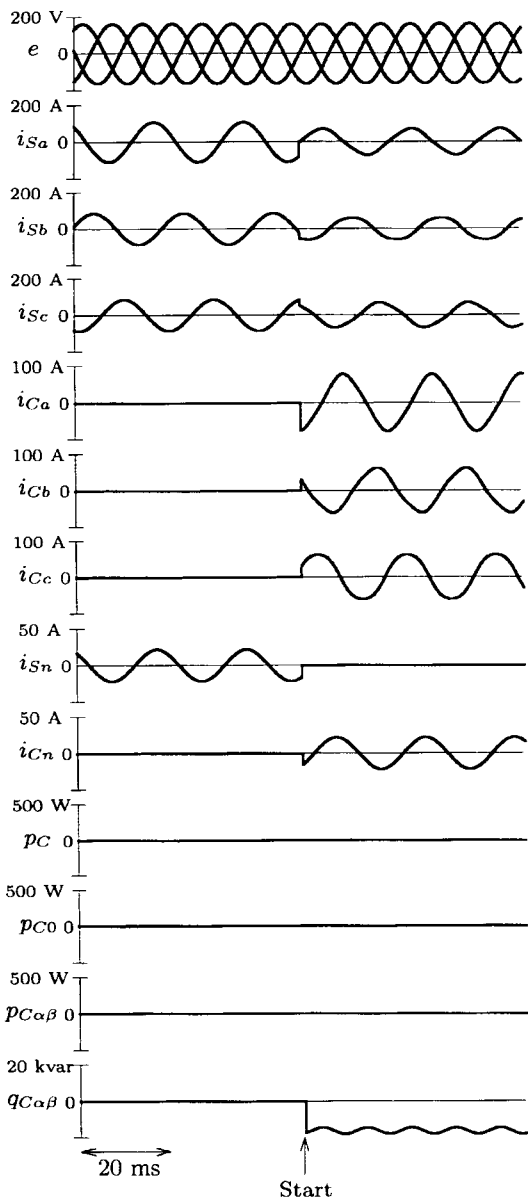


그림 7 조건I에서의 시뮬레이션 파형
Fig. 7 Simulated waveforms under condition I

다. 여기서는 중성선 전류를 보상하기 위한 영상 순시 보상전력 p_{C0} 를 α 및 β 상의 순시 보상 실전력 $p_{C\alpha\beta}$ 로 대체시킨다. 따라서 능동필터에서 에너지저장요소가 필요하지 않다. 그렇지만, i_c 와 i_s 에 3고조파를 포함하여 적지 않은 5차 고조파가 나타난다. 그 이유는 다음과 같다.

식 (33)과 (34)의 분모항 $e^2_{\alpha\beta}$ 의 값이 그림 7에서는 $E_a=E_b=E_c$ 이므로 일정하지만, 그림 8에서는 $E_a=E_b \neq$

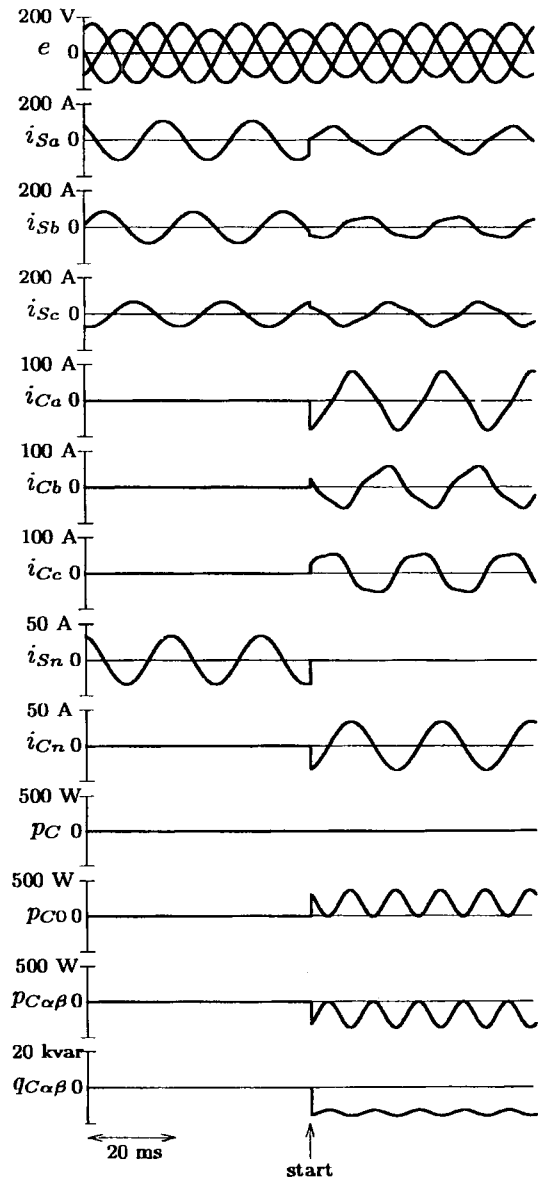


그림 8 조건II에서의 시뮬레이션 파형
Fig. 8 Simulated waveforms under condition II

E_c 이기 때문에 선로 주파수의 2배 주파수로 진동하기 때문이다.

5.3 크로스벡터 이론에 따른 제어전략

그림 9 및 10은 크로스벡터 이론에 근거한 제어전략을 능동필터에 적용할 경우의 시뮬레이션 파형이다. 앞에서 언급한 바와 같이 $e_0=0$ 일 때의 시뮬레이션 파형인 그림 9는 p-q 이론의 시뮬레이션 파형인 그림 7과

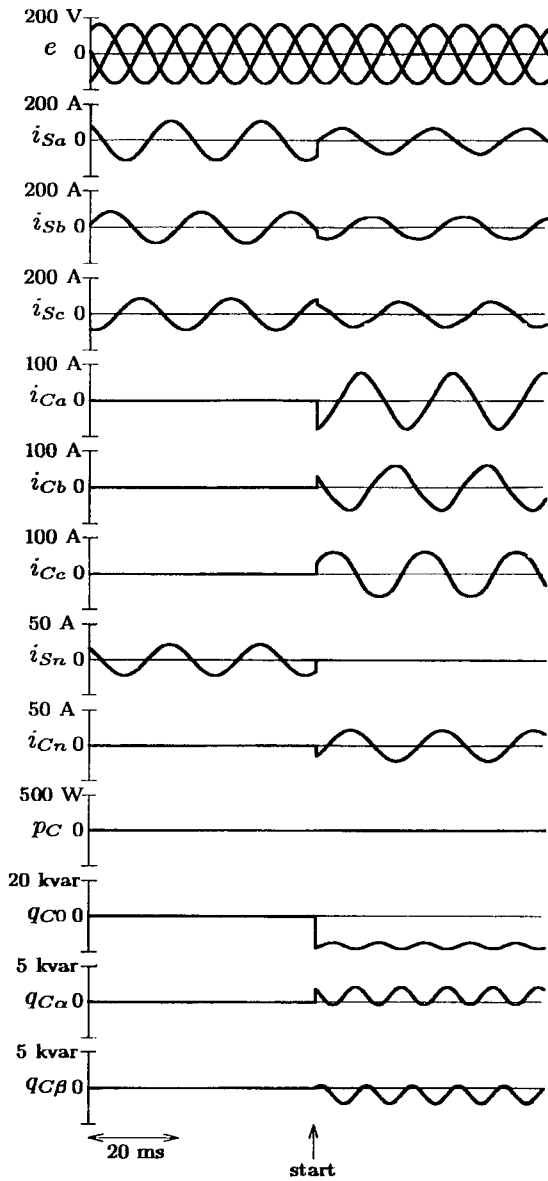


그림 9 조건III에서의 시뮬레이션 파형
Fig. 9 Simulated waveforms under condition III

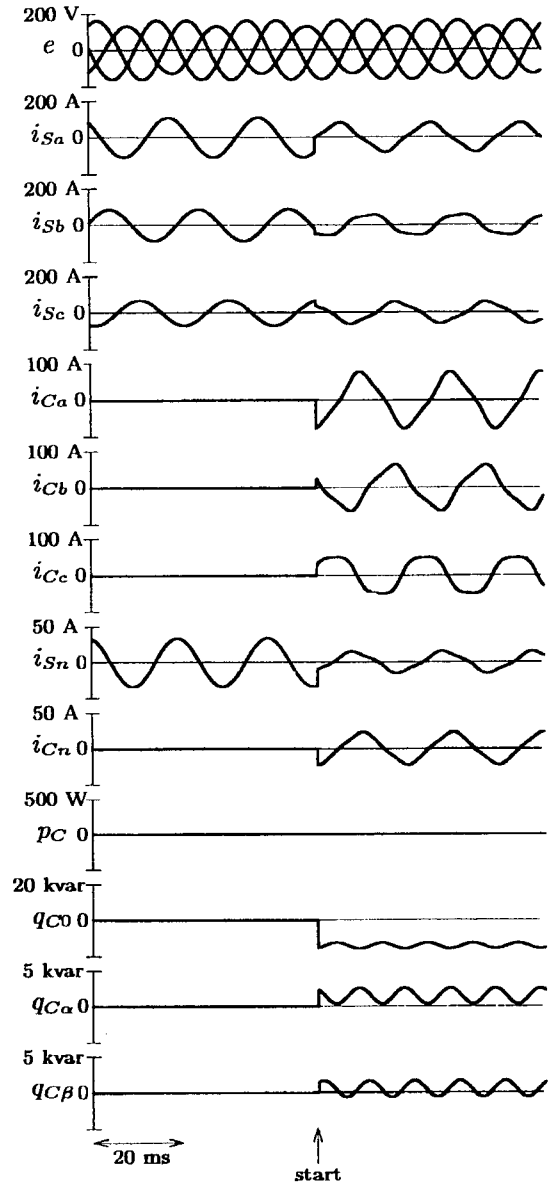


그림 10 조건IV에서의 시뮬레이션 파형
Fig. 10 Simulated waveforms under condition IV

똑같다. 더욱이, 그림 9의 q_{C0} 의 파형은 그림 7의 $q_{C\alpha\beta}$ 의 파형과 일치한다. $e_0 \neq 0$ 일 때, 그림 10의 i_{Sn} 파형을 보면 알 수 있듯이 능동필터가 중성선 전류를 완벽히 제거하지 못한다. 잔류하는 중성선 전류는 식 (16) 우측의 첫 번째 항인 영상 순시 유효전류 i_{op} 를 제거하지 않았기 때문에 기인한다.

본 논문의 저자가 제안한 “개선된” 제어전략을 크로

스벡터 이론에 적용한다면, $e_0 \neq 0$ 인 경우에서도 p-q 이론과 마찬가지로 에너지저장요소의 필요 없이 중성선 전류를 완벽히 제거할 수 있다^[19].

이 때 식 (36)~(39)의 제어 전략은 다음과 같이 수정된다.

$$p_c = 0 \tag{43}$$

$$q_{c0} = q_{L0} \quad (44)$$

$$i_{c0} = i_{L0} \quad (45)$$

여기서, 식 (14)에서 유도된 제한조건이 q_{ca} , q_{cb} , q_{c0} 에도 역시 적용됨에 유의할 필요가 있다.

$$e_a \cdot q_{ca} + e_b \cdot q_{cb} + e_0 \cdot q_{c0} = 0. \quad (46)$$

식 (35)와 식 (43)~(46)으로부터 이론적으로 유도되는 개선된 보상전류 i_{ca} , i_{cb} , i_{c0} 는 식 (32)~(34)와 각각 똑같으며, 결과적으로 그림 7에 보인 것과 똑같은 파형을 만들어낸다. 따라서 p-q 이론과 크로스벡터 이론을 비교할 때, 전력보상의 관점에서는 핵심적인 차이가 없지만, 순시 영상 전류에 대한 정의와 맵핑매트릭스의 정의에 차이가 있다.

6. 결 론

본 논문은 3상 4선 계통에 확장 적용되는 p-q 이론과 크로스벡터 이론의 유사점과 차이점을 비교하였다. 두 이론은 맵핑매트릭스가 상당히 다르며, 영상회로에 대한 관점에서도 현격한 차이점을 발견할 수 있었다. 두 이론의 차이점을 정리하면 다음과 같다.

- p-q 이론은 영상회로를 a-상 및 β-상 회로와는 독립된 단상회로로 간주하므로, a-β-0 좌표계에서의 적용에 유리하다.
- 크로스벡터 이론은 영상회로와 a-상, 그리고 β-상 회로를 동일하게 간주하며, 영상 순시전류에 대해서도 순시 유효전류와 순시무효전류로 구분하여 정의함으로써 수식적으로도 체계성을 갖는다. 그러므로 크로스벡터 이론은 a-b-c 좌표계에서의 응용에 유리할 것으로 보인다. 그러나 세 개의 순시 허전력 q_a , q_b , q_0 중에 한 개의 잉여(redundant) 변수가 존재하므로 제어전략을 구성하기가 복잡해지는 면이 있다.

또한 본 논문에서는 에너지저장요소를 사용하지 않는 능동필터로써 영상전류 및 각상의 순시 무효전력을 완벽히 보상하는 제어전략을 제시하였다.

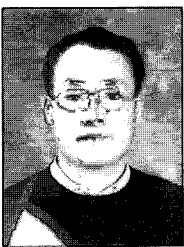
이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2004-041-D00274)

참 고 문 헌

- [1] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits," Proceedings of IEEJ International Power Electronics Conference (IPEC-Tokyo), pp.1375-1386, 1983.
- [2] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 20, no. 3, pp. 625-630, May/June 1984.
- [3] H. Akagi, A. Nabae and S. Atoh "Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 20, no. 3, pp. 460-465, May/June 1986.
- [4] I. Takahashi, "Analysis of instantaneous current and power using space switching functions," Proceedings of IEEE PESC, pp. 42-49, 1988.
- [5] T. Furuhashi, S. Okuma and Y. Uchiyama, "A study on the theory of instantaneous reactive power," IEEE Trans. Ind. Elect., vol. 37, no. 1, pp. 86-90, 1990.
- [6] A. Ferrero and G. Superti-Furga "A new approach to the definition of power components in three-phase systems under non-sinusoidal conditions," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.40, no.3, pp. 568-577, June 1991.
- [7] L. Rossetto and P. Tenti, "Using ac-fed PWM converters as instantaneous reactive power compensators," IEEE Trans. Power Elect., vol. 7, no. 1, pp.224-229, Jan. 1992.
- [8] J. L. Willems, "A new interpretation of the Akagi-Nabae power components for non-sinusoidal three-phase situations," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 41, no 6, pp.445-455, Nov/Dec. 1994.
- [9] M. Aredes and E. H. Watanabe, "New control algorithms series, and shunt three-phase four-wire active power filters," IEEE PES Winter Meeting, 95 WM240-2 PWRD, 1995.
- [10] P. Salmeron and J. C. Montano, "Instantaneous power components in polyphase systems under non-sinusoidal condition," IEE Proc.-Sci. Meas. Tech., vol 143, no. 2, pp.151-155, March 1996.
- [11] T. Yoshida, G Nalkagawa, H Kitamura and K. Iwatani, Active filters(multi-functional harmonic suppressors) used to protect the quality of power supply from harmonics and reactive power generated in loads," Meiden Review, vol.263, no 5, pp 13-17, 1998(in Japanese).
- [12] S Togaswa, T. Murase, H. Nakano and A. Nabae, "Reactive power compensation based on a novel cross-vector

- theory," IEEJ Trans. Ind. Appl., vol. 114, n. 3, pp. 340-341, March 1994(in Japanese).
- [13] A. Nabae, H. Nakino and S. Togasawa, "An instantaneous distortion current compensator without any coordinate transformation," Proceedings of IEEJ International Power Electronics Conference (IPEC-Yokohama), pp. 1651-1655, 1995.
- [14] A. Nabae, L. Cao and T. Tanaka, "A universal theory of instantaneous active-reactive current and power including zero-sequence component," Proceedings of 7th International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp. 90-95, Oct. 1996.
- [15] F. Z. Peng and J. S. Lai, "Generalized instantaneous reactive power for three-phase power systems," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 45, no. 1, pp. 293-297, Feb. 1996.
- [16] H. Akagi, "New trends in active filters for power conditioning," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 32, no. 6, pp. 1312-1322, Nov/Dec. 1996.
- [17] H. Kim and H. Akagi, "The instantaneous power theory based on mapping matrix in three-phase four-wire system," Proceedings of IEEE/IEEJ Power Conversion Conference (PCC-Nagaoka), pp. 361-367, 1997.
- [18] F. Z. Peng, G. W. Ott, Jr. and D. J. Adams, "Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive theory for three-phase four-wire systems," IEEE Trans. Power Elect., vol. 13, no. 6, pp. 1174-1181, Nov. 1998.

저 자 소 개



김효성(金孝城)

1958년 10월 20일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 충북대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~1997년 일본 오카야마대학 방문교수. 2000년~2001년 덴마크 Aalborg대학 방문교수. 1987년~2006 현재 공주대 전기전자

공학부 교수. 당 학회 편집위원.