

## 불평형 전원 시스템하의 위상각 검출에 의한 능동전력필터의 순시보상 전류제어

조재연\* 정영국\*\* 임영철\*  
\*전남대학교 \*\*대불대학교

### Instantaneous Compensating Current Control of Active Power Filters with Phase Angle Detecting Method Under Unbalanced Power System

Jae-Yun Cho\*, Young-Gook Jung\*\*, Young-Cheol Lim\*

\* Dept. of Electrical Eng. Chonnam National University

\*\* Dept. of Electrical Eng. Daebul University

#### ABSTRACT

This paper describes a new algorithm for active power filters which can be control source current symmetrically under unbalanced condition in power system. Positive sequence voltage is detected by symmetrical coordinate method, and compensating reference current of active power filters is calculated using by accurate phase angle information of positive sequence voltage. The basic principle of the proposed method is described in detail, and the conventional and proposed phase detecting methods are compared and discussed through the simulation results.

#### 1. 서론

3상 전원 시스템의 어느 한 상의 전압이 상승하거나 감소되는 경우, 불평형 전원시스템으로 되며 이러한 불평형은 계통에 정상분, 역상분, 영상분을 발생하여 전력 시스템에 여러 가지 악영향을 미치게 된다.<sup>[1]</sup> 특히 3상 전원의 불평형이 비선형 부하에 인가되는 경우, 비선형 부하의 고조파 및 무효전력을 보상하기 위한 능동전력필터의 성능은 전원전압의 불평형의 정도에 따라서 영향을 받게 된다.<sup>[2-3]</sup>

일반적으로 능동전력필터의 보상기준전류를 계산하기 위하여 전원전압의 위상각 정보가 필요하게 되는데, 전원전압의 불평형은 전원 위상각의 왜곡을 유발하게 한다. 왜곡된 위상각 정보를 기준으로 연산된 능동전력필터의 보상기준전류는 불평형이 되고 따라서 보상 후의 전원전류는 역시 전원전압과 같이 불평형을 이루게 된다.<sup>[4-5]</sup> 필터를 이용하여 정상분에 동기된 위상각을 검출하는 방법은 과도상태에서 검출시간 지연의 문제점이 있고, 또한 임의의 한상의

전압에 동기된 전원 위상각을 사용하는 방법은 보상 시스템의 하드웨어 부담을 가져온다.<sup>[6]</sup>

따라서 본 연구에서는 3상 불평형 교류전원 시스템하에서도 전원전류를 대칭적으로 유지할 수 있는 능동전력필터의 제어 알고리즘을 제시하였다. 대칭좌표법에 의해 불평형 전원전압의 정상분을 검출하였으며, 검출된 정상분 전원전압을 이용하여 위상각 정보를 간접적인 방법으로 구하였다. 정상분을 검출하지 않는 종래의 방법을 본 연구에서 제안된 이론과 비교한 결과, 제안된 이론의 우수성을 입증할 수 있었다.

#### 2. 제안된 이론

각각  $\frac{2}{3}\pi$  위상차가 나는 3상 전원전압이 불평형으로 되는 경우, 정상분과 역상분 그리고 영상분이 발생되며 중성선이 없는 경우에는 영상분은 부하측에 나타나지 않게 되어 식(1)로 표현된다.

$E_{pm}$ 은 정상분,  $E_{nm}$ 은 역상분을 의미하며, 식(1)을 공간벡터로 표현하면 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = E_{pm} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \theta_p) \\ \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \theta_p) \\ \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \theta_p) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$+ E_{nm} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \theta_n) \\ \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \theta_n) \\ \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \theta_n) \end{bmatrix}$$

$$E_{abc} = E_{pm} e^{j(\omega t + \theta_p)} + E_{nm} e^{-j(\omega t + \theta_n)} \quad (2)$$

따라서 불평형된 전원전압의 정상분을 대칭좌표법에 의하여 표현하며 식(3)과 같게 된다.

$$\begin{bmatrix} e_{ap} \\ e_{bp} \\ e_{cp} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{2} e_a + \frac{1}{(2\sqrt{3})j} (e_b - e_c) \\ -(e_{ap} + e_{cp}) \\ \frac{1}{2} e_c - \frac{1}{(2\sqrt{3})j} (e_a - e_b) \end{bmatrix} \quad (3)$$

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

불평형된 3상 전원전압이 식(3)의 연산과정을 거치면 정상분 전압이 얻어지므로 이를 정상분 검출기 (positive sequence detector: PSD)라 한다.

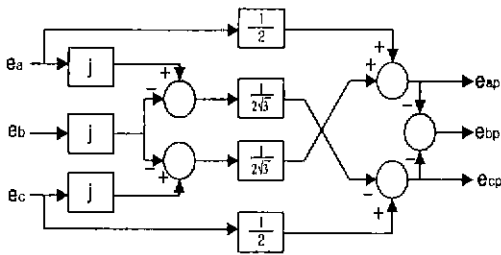


그림1. 불평형된 전원전압의 PSD의 블록선도  
Fig.1 block diagram of PSD under unbalanced power source.

동일한 방법으로 역상분 전압도 식(4)에 의해 구해지며 이를 역상분 검출기 (negative sequence detector: NSD)라 한다.

$$\begin{bmatrix} e_{an} \\ e_{bn} \\ e_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ a & 1 & a^2 \\ a^2 & a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{e_a}{2} - j\frac{1}{(2\sqrt{3})} (e_b - e_c) \\ -(e_{an} + e_{cn}) \\ \frac{e_c}{2} - j\frac{1}{(2\sqrt{3})} (e_a - e_b) \end{bmatrix} \quad (4)$$

불평형 전원전압이 PSD를 거치면, abc기준좌표상의 정상분이 얻어지게 되는 데, 이를  $\alpha$ - $\beta$ 기준좌표계로 표현하면 식(5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{ap} \\ e_{bp} \\ e_{cp} \end{bmatrix} \quad (5)$$

정상분 전원전압에 동기된 d-q좌표계상의 전류는 식(6), 식(7)와 같으며, 여기서 정상분에 동기된 전원전압의 위상각은 식(8)로 간접적인 연산이 가능하다.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{e_\alpha^2 + e_\beta^2}} \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\cos \omega t = \frac{e_\alpha}{\sqrt{e_\alpha^2 + e_\beta^2}} \quad \sin \omega t = \frac{e_\beta}{\sqrt{e_\alpha^2 + e_\beta^2}} \quad (8)$$

본 연구에서는 불평형된 전원전압을 그림1의 방법에 의해 정상분 전압을 검출한 후, 식(8)에 의해 구해진 동기각을 이용하여 전원전압의 정상분에 동기된 전류성분들을 구할 수 있다.

식(7)로 연산된 d-q동기좌표상의  $i_d$ 와  $i_q$ 를 고역통과필터(HPF)를 거치면 아래의 성분이 얻어진다.

$$\bar{i}_d = \bar{i}_d + \tilde{i}_d \quad \bar{i}_q = \bar{i}_q + \tilde{i}_q \quad (9)$$

$$\bar{i}_d = i_d \text{의 직류분} \quad \tilde{i}_d = i_d \text{의 교류분}$$

$$\bar{i}_q = i_q \text{의 직류분} \quad \tilde{i}_q = i_q \text{의 교류분}$$

능동전력필터는 고조파 및 무효성분을 전부 보상하기 위해서 식(10)의 보상기준전류를  $\alpha$ - $\beta$ 좌표에서 발생하면 된다.

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{e_\alpha^2 + e_\beta^2}} \begin{bmatrix} e_\alpha & -e_\beta \\ e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \quad (10)$$

그림2는 본 연구에서 제안된 불평형 전원시스템하의 능동전력필터를 제어하기 위한 알고리즘을 나타낸다.

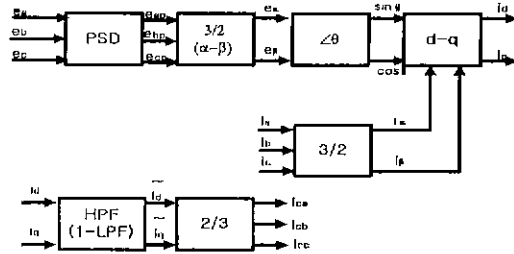


그림2. 불평형 전원하의 능동전력필터를 제어하기 위해 제안된 알고리즘

Fig.2 proposed algorithm of active power filters control under unbalanced power source

### 3. 보상성능 비교검토

본 연구에서 제시된 이론의 타당성을 입증하기 위해서, 불평형 교류 전원하에서 순시전력이론과 정상분을 검출하지 않는 종래의 이론을 MATLAB/ SIMULINK로 시뮬레이션 하였다.

그림3은 병렬형 능동전력필터와 비선형 부하 시스템을 보여주고 있으며, 그림4는 제안된 방법으로 제어되는 능동전력필터를 MATLAB/ SIMULINK에 의해 모델링한 것이다. 전원전압은 a상을 기준으로 하여, b상은 0.7 c상은 1.3의 불평형을 갖도록 하였으며 비선형 싸이리스터 부하의 점호각은 30°로 하였다.

그림5는 불평형된 전원전압으로부터 제안된 방법에 의하여 정상분을 검출한 결과를 나타내고 있다. 불평형에 무관하게 정상분의 검출이 확실함을 알 수 있다

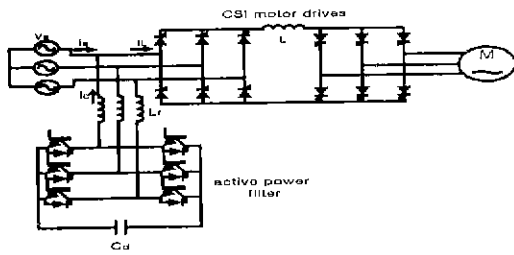


그림3. 능동전력필터와 비선형 부하 시스템  
Fig.3 active power filter and nonlinear load

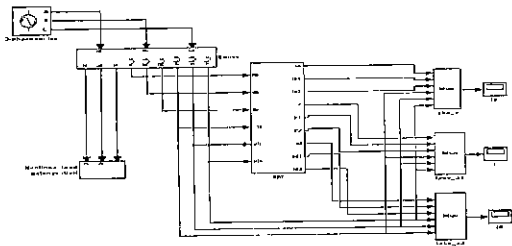
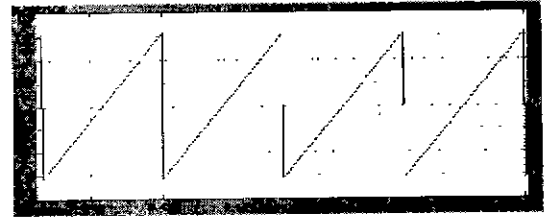
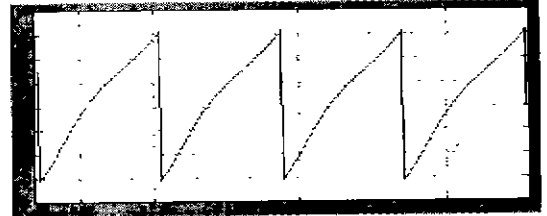


그림4. 제안된 보상 알고리즘의 MATLAB / SIMULINK 모델링  
Fig.4 MATLAB/SIMULINK Modeling of proposed compensation algorithm

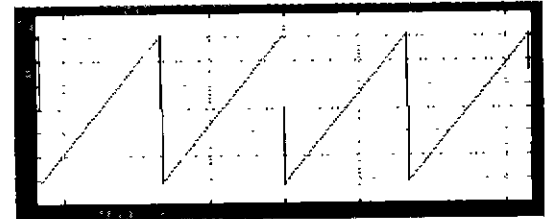
그림6은 각 방식에 따른 전원전압의 위상각을 나타내고 있다. PSD를 사용하지 않은 종전의 방법에 의해 검출된 위상각은 왜형되어 있으나, 제안된 방법은 3상이 평형된 경우의 위상각과 동일한 결과를 보여주고 있다.



(a)balanced condition



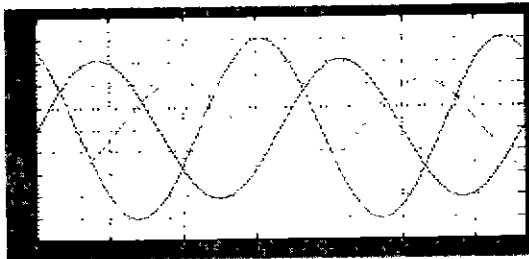
(b)without PSD



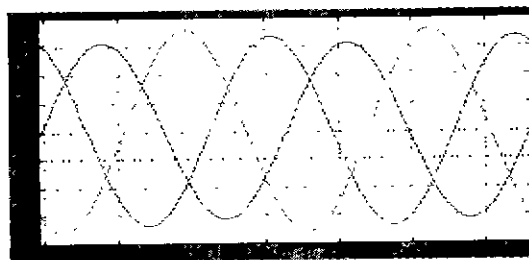
(c)with PSD

그림6. 검출된 위상각의 비교(a=1,b=0.7,c=1.3)  
Fig.6 detected phase angle (a=1,b=0.7,c=1.3)

그림7에는 보상전의 불평형된 전원전압과 전원전류 그리고 전원전류에 대한 FFT가 나타나 있다.

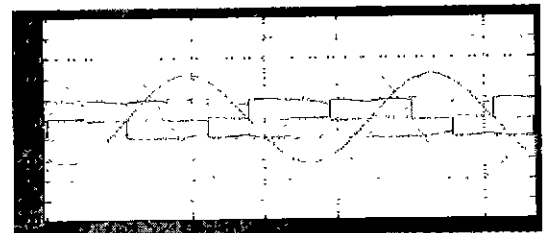


(a)unbalanced condition

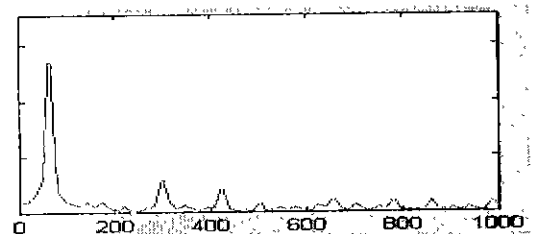


(b)with PSD

그림5. 불평형된 전원전압의 정상분 검출.  
(a=1,b=0.7,c=1.3)  
Fig.5 phase angle detection of unbalanced power condition (a=1,b=0.7,c=1.3)



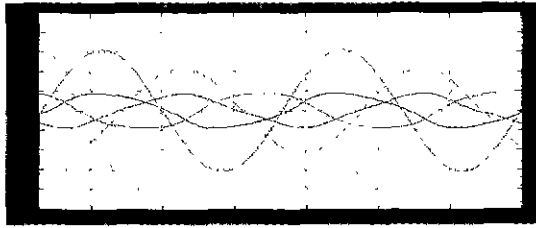
(a)



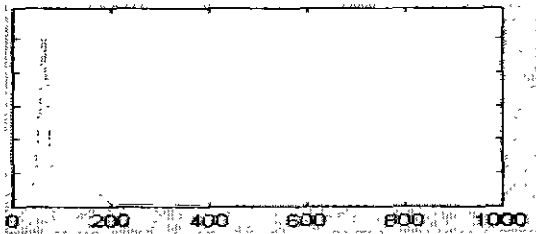
(b)

그림7. 보상 전의 전원전압과 전원전류 (a=1,b=0.7,c=1.3)  
a)전원전압과 전류 b)전류의 FFT스펙트럼  
Fig.7 source voltage and source current before compensated (a=1,b=0.7,c=1.3)  
a)source voltage and current b)current FFT spectrum

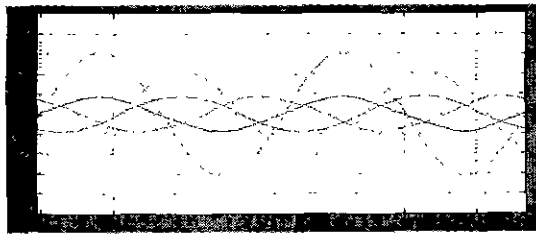
그림8은 각 방식의 보상결과를 비교한 것이다. 보상 후의 결과를 살펴보면 종전의 PSD를 사용하지 않은 방법은 3고조파가 감소되어 있긴 하지만 만족할 만한 결과는 아니며, 제안된 방법은 전원전압의 조건과 무관하게 전원전류를 대칭적으로 제어 가능하다.



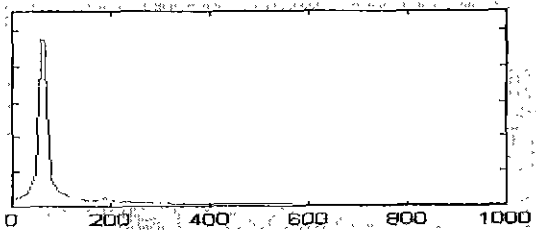
(a)



(b)



(c)



(d)

그림8.보상 후의 전원전압과 전원전류  
a),b)PSD가 없는 종래의 방법 c),d)제안된 방법  
Fig.8 source voltage and source current  
after compensated  
a),b)conventional theory c),d) proposed theory

#### 4. 결론

본 연구에서는 불평형 전원 시스템 하에서도 올바른 전원전압 위상각 정보를 제공하고 전원전류를 대칭적으로 제어할 수 있는 능동전력필터의 알고리즘을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 연구에서 제시된 대칭 좌표법에 의한 능동전력 필터의 보상기준전류 검출법은 종전의 방식에 비하여 불평형된 교류 전원하의 전원전류를 대칭이며 정현파로 제어 가능하였다.
- 2) 전원이 불평형이 된 경우에도, 전원전압의 정상분에 동기된 위상각을 연산에 의해 간접적으로 구할 수 있었다. 따라서 DSP를 이용한 능동전력필터 제어에 손쉽게 적용할 수 있는 알고리즘이라 할 수 있다.
- 3) 전원이 불평형이 되더라도 제안된 PSD에 의해 3상이 평형된 전원전압을 검출할 수 있었다.

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

#### 참 고 문 헌

- [1]S.D.Round,D.M.E.Ingram,"An Evaluation of Techniques for Determining Active Filter Compensating Currents in Unbalanced Systems",EPE,pp.4-767-4-771,1997
- [2]V.Valouch,"Active Filter Control Methods based on Different Power Theories", IEEE ISIE, pp. 521-526,1999
- [3]Y.Komatsu,T,Kawabata,"Characteristics of Three Phase Active Power Filter Using Extension pq Theory". IEEE ISIE, pp.302-307,1997
- [4]Chin.E.Lin,"Operation Strategy of Hybrid Harmonic Filter in Demand-Side System", IEEE IAS, pp.1862-1866,1995.
- [5]V.Soaes,"Active Power Filter Control Circuit based on the Instantaneous Active and Reactive Current  $i_d-i_q$  Method", IEEE PESC, pp. 1096-1101,1997.
- [6]이승요, 최규하,"3상 불평형 전원시스템의 새로운 위상각 검출기법을 이용한 순시전압보상기의 해결 및 제어", 전력전자학회 논문집4-3-7, pp.275-284, 1999