

3상 불평형 및 왜형 전원조건을 고려한 순시전력이론

정광식** 정영국** 조재연* 임영철*
*전남대학교 전기공학과 **대북대학교 전기공학과

Instantaneous Power Theory
Considering Three Phase Unbalanced/Distorted Power Conditions

*Kwang-Sik Jung **Young-Gook Jung *Jae-Yun Cho *Young-Cheol Lim

*Dept.of Electrical Eng. Chonnam National University **Dept.of Electrical Eng. Daebul University

Abstract - 본 연구에서는 3상 비대칭이며 왜형된 전원 시스템하에도 탁월한 고조파 및 무효전력 보상 특성을 갖는 순시전력이론을 다루고 있다. 제안된 알고리즘은 불평형 전원전압의 정상분을 검출하고 이를 바탕으로 순시보상전력을 계산한다. 전원전압이 왜형되고 불평형인 정상상태와 과도상태에서 전력전자전용 시뮬레이터인 PSIM에 의해 정상분 전압 검출이 없는 종전의 순시전력이론과 제안된 이론을 비교하였으며 그 타당성을 검토하였다.

1. 서 론

순시전력이론[1]은 고조파 및 기본파 무효전력을 순시적으로 보상할 수 있기 때문에 현재 능동전력필터등과 같은 전력품질 개선 시스템에 광범위하게 적용되고 있다. 이와 같은 순시전력이론은 행렬에 의해 해석되므로 전개과정이 구조화되며 따라서 수학적인 이해가 용이한 점이 있다. 또한 해석 과정에 있어서 많은 전류성분과 전력성분이 얻어지며 이들 성분들을 각기 제어 가능한 능동전력필터를 구현할 수도 있다.

그러나 순시전력이론은 대칭적인 정현적인 전원조건인 3상 3선 전력 시스템에서는 근본적으로 보상 특성이 탁월하나 3상 4선식 전원계통이나 왜형된 전원조건 또는 불평형이 발생되면 보상 효과는 현저히 저하된다. [2] 이 와 같은 문제점을 개선하기 위해서 순시전력이론과는 별개의 알고리즘[3-5]을 개발하거나 순시전력이론을 전반적으로 수정[6-7]하는 등 많은 노력이 진행 중이다.

본 연구에서는 순시전력이론을 수정함이 없이 왜형과 불평형에 강인하며 3상3선 계통에 적용 가능한 순시전력이론을 제안한다. 제안된 이론은 왜형 또는 불평형된 전원전압으로부터 정상분 전압성분을 검출하는 방법을 사용하고 있으며, 이를 바탕으로 하여 순시전력이론의 3상/2상 변환 행렬을 계산한다. 본 연구의 타당성을 입증하기 위하여 정상분 전압 검출부가 없는 순시전력이론과 제안된 전압 검출부가 있는 순시전력이론을 전력전자전용 시뮬레이터인 PSIM에 의하여 보상 결과를 비교 검토하였다.

2. 이 론

(1)로 나타낸 3상 전원전압이 불평형으로 되는 경우, 정상분과 역상분 그리고 영상분이 발생되며 중성선이 없는 경우에는 영상분은 부하측에 나타나지 않게 되어 식 (2)로 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} e_a &= E_m \sin \omega t \\ e_b &= E_m \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) \\ e_c &= E_m \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} &= E_{pm} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \theta_p) \\ \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \theta_p\right) \\ \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \theta_p\right) \end{bmatrix} \\ &+ E_{nm} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \theta_n) \\ \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \theta_n\right) \\ \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \theta_n\right) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

E_{pm} 은 정상분, E_{nm} 은 역상분을 의미하며, (2)를 공간 벡터로 표현하면 다음과 같다.

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

따라서 불평형된 전원전압의 정상분을 대칭좌표법에 의해 표현하며 (4)와 같게 된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} e_{ap} \\ e_{bp} \\ e_{cp} \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{2} e_a + \frac{1}{(2\sqrt{3})j} (e_b - e_c) \\ -(e_{ap} + e_{cp}) \\ \frac{1}{2} e_c - \frac{1}{(2\sqrt{3})j} (e_a - e_b) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

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

불평형되거나 왜형된 3상 전원전압이 (4)의 정상분 검출기(positive sequence detector: PSD)를 거치게 되면 전압의 정상분이 구해지며 그림1에 PSD의 블록선도를 나타내었다.

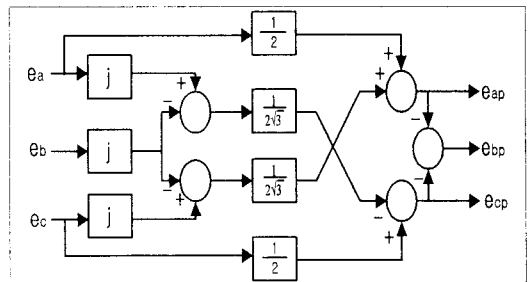


Fig.1 Block diagram of positive sequence detector(PSD)

왜형되고 비대칭인 전원전압이 PSD를 거치면, abc기준 좌표상의 정상분이 얻어지게 되는데, 이를 $\alpha-\beta$ 기준좌표로 다시 표현하면 다음과 같다.

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

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

정상분 전압에 의해 계산된 순시유효전력 p 및 순시무효 전력 q 는 (7)로 구해진다.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a & e_\beta \\ -e_\beta & e_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

(7)의 p 와 q 는 저역통과필터(LPF)를 거치게 되면 $\hat{p}, \hat{p}, \hat{q}, \hat{q}$ 이 얻어진다. 능동전력필터가 고조파 및 무효성분을 전부 보상하기 위해서는 (8)의 보상전류를 α - β 좌표에서 발생하면 된다.

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a & e_\beta \\ -e_\beta & e_a \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\hat{p} \\ -(q + \hat{q}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

α - β 기준좌표에서 연산된 보상기준전류를 abc 기준좌표로 변환하면 보상기준전류는 (9)와 같게 된다.

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

그림2는 본 연구에서 제안된 왜형되고 불평형인 3상 전원 시스템하에서 능동전력필터를 제어하기 위한 순시전력이론을 나타내고 있다.

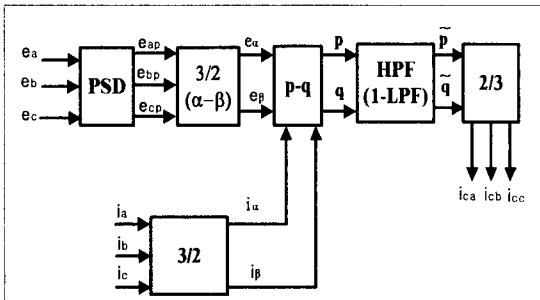


Fig.2 Proposed algorithm for controlling active power filters under unbalanced/distorted power source

3. 시뮬레이션 모델링

그림3은 본 연구에서 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 전력전자전용 PSIM 시뮬레이터에 의해 제안된 시스템을 모델링한 것을 나타내고 있으며, 표1은 시뮬레이션 파라미터를 보여주고 있다.

보상장치는 3상 전압원 병렬형 능동전력필터를 사용하고 있고, 삼각파 비교방식 PWM 변조기를 이용하였다. 능동전력필터는 스위칭 손실과 인덕터 L_r 등에 손실이 없다고 가정하였으며 능동전력필터의 직류단 캐패시터는 직류 정전압원으로 하였다. 비선형 부하는 점호각 변동에 의해서 직류전압이 제어되는 싸이리스터 제어정류기를 사용하였다. a상 110V 전원전압을 기준으로 하여 불평형이 30%인 경우를 $e_a=1, e_b=0.7, e_c=1.3$ 으로 하였으며 비선형 싸이리스터 부하의 점호각은 30° 이다.

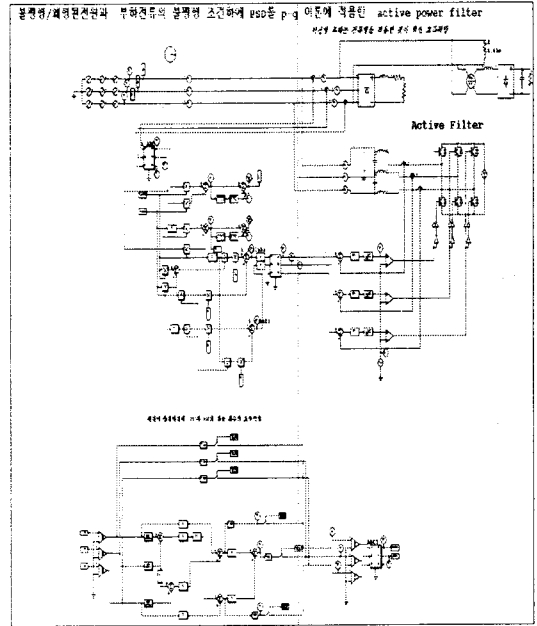


Fig.3 PSIM simulation model of proposed system

Table 1 System Parameters

Source voltage/current	110V/60Hz, 50A
Load	R=4Ω C=3300uF L=1mH Firing angle=30(deg.)
L-C filter	L _r =1mH C _r =15uF
d.c voltage	E _d =800V
PWM frequency	10KHz

4. 결과 및 고찰

단상 다이오드 정류 부하에 의해 3상 비선형 부하가 불평형을 이루고 있고, 또한 왜형되고 30% 불평형인 전원전압을 그림4(a)에 나타내었다. 그림4(b)에서 보는 바와 같이 PSD가 있는 경우에는 불평형되고 왜형인 각상의 전압은 평형된 정현파 전압으로 검출되며 이는 (5)의 전압 항으로 입력된다. 그러나 PSD가 없는 경우에는 왜형되고 불평형된 전압이 그대로 (5)의 전압항으로 입력된다. 그림5는 PSD가 있는 경우와 없는 경우가 p, q 와 \hat{p}, \hat{q} 성분에서 미치는 영향을 나타낸 것이다.

그림6에는 불평형을 이룬 비선형 부하의 전류파형을 각상 별로 나타낸 것이다. 그림7은 PSD가 있는 경우와 없는 경우의 보상 효과를 비교한 결과이다. PSD가 있는 순시전력이론은 불평형을 이룬 비선형 전류를 효과적으로 보상하고 있다. 그러나 PSD를 사용하지 않은 방법은 전원 전류가 왜형되고 있다. 그림8은 비선형 부하 전류, 순시전력이론 그리고 PSD를 사용한 순시전력이론에 의해 보상한 경우의 FFT스펙트럼 결과이다. PSD가 없는 순시전력이론은 5고조파와 7고조파가 잔류하고 있으나 PSD에 의한 순시전력이론은 PSD가 없는 방법

과 비교하여 양호한 보상능력을 가지고 있다. 결과적으로 PSD에 의한 순시전력이론은 3상 3선 전력계통의 경우, 불평형과 왜형인 전원 및 비선형 부하의 조건과 무관하게 탁월한 고조파 및 무효전력의 보상 능력을 가지고 있음을 알 수 있다.

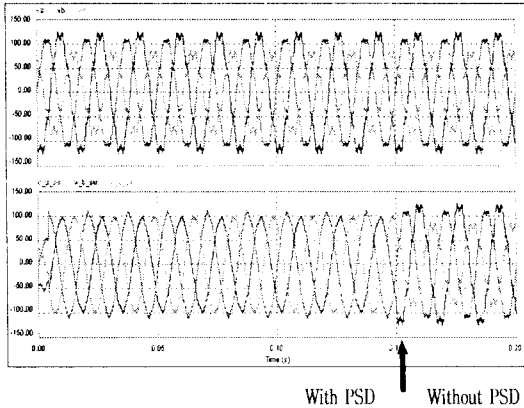


Fig.4 Detection of voltage waveform with PSD and without PSD (unbalance index 30%)

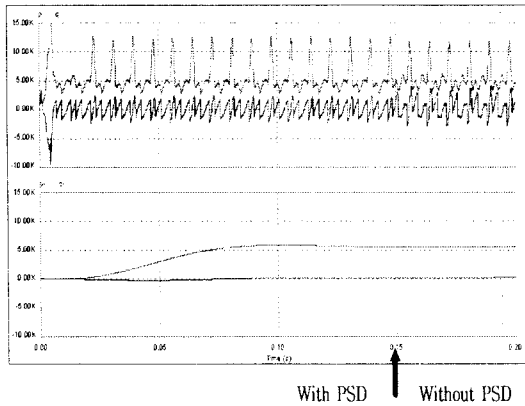


Fig.5 p,q and p-q components with PSD and without PSD

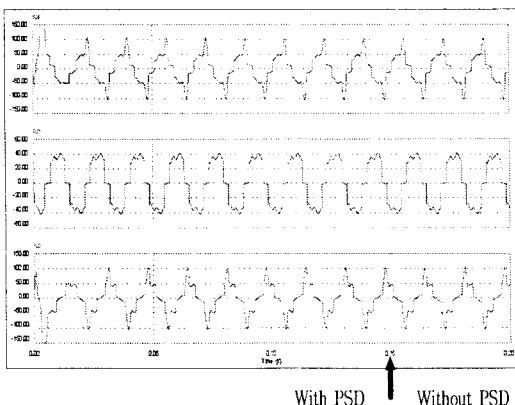


Fig.6 Waveforms of unbalanced nonlinear load current

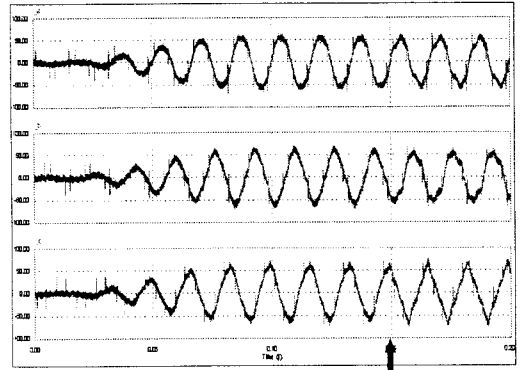


Fig.7 Source current waveforms with PSD and without PSD

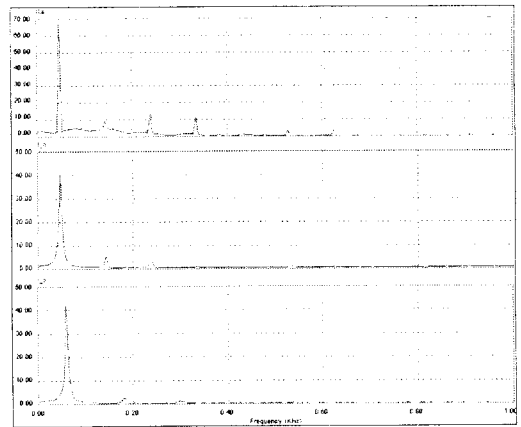


Fig.8 FFT spectrum of source currents with PSD and without PSD

5. 결 론

본 연구에서는 왜형되고 비대칭인 전원 및 부하 조건 하에서도 전원전류를 대칭이며 정현파로 제어할 수 있는 능동전력필터의 알고리즘을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 본 연구에서 제시된 PSD에 의한 순시전력이론은 불평형되고 왜형된 교류 전원 뿐만 아니라 불평형된 부하전류 조건하에서도 전원전류를 대칭적인 정현파로 제어 가능하였다.

2) 제안된 방법은 순시전력이론의 3상/2상 변환 행렬의 전압 정보만을 올바르게 함으로써, 탁월한 보상 효과를 얻을 수 있었으며, 또한 전원 및 부하 조건과 무관한 순시전력이론을 3상 3선식 계통하에서의 개발하기 위한 수고를 줄일 수 있었다.

3) 전원이 왜형되고 불평형이 되더라도 PSD에 의해, 평형된 3상 정현파 전압을 검출할 수 있었다.

4) 능동전력필터 제어 알고리즘의 전압 검출부에 PSD가 추가된다면, 기존의 시간영역, 주파수 영역 d-q좌표의 보상 알고리즘은 왜형되고 불평형인 전원 시스템으로 곧바로 확장되리라 사료된다.

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

(참 고 문 헌)

- [1] H. Akagi, A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-20, No. 3, 1984.
- [2] 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
- [3] Y. G. Jung, Y. C. Lim, 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.
- [4] L. Moran, R. Wallace, "A Series Active Power Filter Which Compensates Current Harmonics and Voltage Unbalance Simultaneously", IEEE PESC, pp. 222-227, 1995
- [5] C. Lin, W. Su, "Operation Strategy of Hybrid Harmonic Filter in Demand Side System", IEEE IAS, pp. 1862-1866, 1995
- [6] Y. Komatsu, T. Kawabata, "Characteristics of Three Phase Active Power Filter Using Extension pq Theory", IEEE ISIE, pp. 302-307, 1997
- [7] S. Bhattacharya, D. M. Divan, "Flux based Active Filter Controller", IEEE IAS, pp. 2483-2491, 1995