

## 고조파와 부하불평형에 대한 3상4선식 직렬형 능동전력필터 시스템

고수현, 한윤석\*, 김영석  
 인하대학교, \*(주)아크로센스

### 3-Phase 4-Wire Series Active Power Filter System for Harmonics and Unbalanced Loads

Soo-Hyun Ko, Yoon-Seok Han\*, Young-Seok Kim  
 INHA UNIV., \*Acrosence INC.

#### ABSTRACT

This paper introduces a control algorithm for 3-phase 4-wire series active power filter. This control algorithm compensates harmonics and neutral line currents which are generated by balanced or unbalanced nonlinear loads. The advantage of this control algorithm is direct extraction of compensation voltage references. Therefore calculation time is shortened and the performance of series active power filter is improved. Compensation principle of the proposed control algorithm is presented in detail. Experimental results are shown to verify the effectiveness of the proposed control algorithm.

#### 1. 서 론

PC, TV, 고효율의 전등과 같은 가정용 전자장비와 UPS, 대형 컴퓨터시스템, HVDC 송전 시스템 등의 산업용 시스템들이 산업화와 정보화를 거치면서 널리 보급되고, 사용되어지고 있다. 이러한 장치들은 전원단에 다이오드 정류기나 사이리스터 정류기 등의 반도체 스위칭 디바이스를 사용함으로써 비선형부하로 동작하게 되고, 전원단에 심각한 고조파를 발생시키게 된다. 비선형 부하에 의해 발생된 고조파들은 전원전압을 왜곡시키고, 발전기나 송전선, 변압기 등의 전력계통 장치들의 VA용량 증대를 가져오게 된다. 또한, 각종 전기기기, 케이블, 진상 콘덴서 등의 전력계통소자들에 열 및 소음을 발생시키고 더 나아가 절연파괴 또는 수명단축을 초래한다. 특히 최근에는 컴퓨터, 복사기, 팩스, 에어컨 등 고조파 전압원 형태의 부하들이 급속히 증가함으로써 고조파 전압원에 대한 대책이 절실히 요구되고 있다.

이러한 고조파에 대한 대책으로 수동필터가 오래

전부터 사용되고 있는데, 수동필터는 동조된 특정 차수의 고조파만을 제거할 수 있기 때문에 전원단에 발생할 수 있는 광범위한 차수의 고조파 제거를 위해서는 각각의 주파수에 동조된 수동필터들이 설치되어야만 한다. 따라서, 전원단의 광범위한 고조파를 모두 제거하고자 하는 경우에는 부피가 증가하게 되고, 비용도 커지게 된다. 또한, 전력시스템의 전원측 임피던스와 공진을 일으킬 위험성도 항상 내재하고 있다.[1] 이러한 수동필터의 결점을 보완하기 위해서 1970년대 말부터 능동전력필터에 대한 연구가 시작되었다. 중성선이 없는 3상 3선식 시스템에 대한 능동전력필터는 오래전부터 많은 연구가 수행되어 성공적으로 개발되었고, 실제 산업 현장에 적용되고 있다.[2] 그러나, 기존의 3상 3선식 알고리즘은 상업용이나 업무용 빌딩에 채택되는 3상 4선식 시스템에 대해서는 그 성능을 확실히 보장해줄 수가 없기 때문에 3상 4선식 시스템에 대한 새로운 알고리즘이 요구되고 있다.[3]

본 논문에서는 고조파 전압원 부하를 가지는 3상 4선식 시스템에서 비선형 부하로부터 발생하는 고조파와 상전류의 약 1.5배에 이르는 중성선 전류를 효과적으로 제거하기 위한 직렬형 능동필터의 제어 알고리즘을 제안하였다. 그리고, 실험결과를 통해서 제안된 알고리즘의 유효성을 입증하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 3상 4선식 직렬형 능동전력필터의 제어 알고리즘

3상 전력시스템에서 3상 순시전압  $v_a, v_b, v_c$ 와 3상 순시전류  $i_a, i_b, i_c$ 는 각각 순시 공간벡터  $v$  와  $i$ 로 나타낼 수 있으며, 부하 전압  $v_L$ 과 전원 전류  $i_S$ 를 다음 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{v}_L = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_S = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

식(1)의 순시 부하전압벡터  $\mathbf{v}_L$ 과 순시 전원전류벡터  $\mathbf{i}_S$ 를 3상/ $\alpha, \beta, 0$  변환행렬 식 (3)을 이용해서 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{v}_{L(\alpha, \beta, 0)} = [F] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)} = [F] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix}$$

여기에서  $[F]$ 는 3상/ $\alpha, \beta, 0$  변환행렬을 나타낸다.

$$[F] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (2)의 순시 부하전압벡터  $\mathbf{v}_L$  와 순시 전원전류벡터  $\mathbf{i}_S$  를 이용하여 순시 유효전력  $p$ 를 다음식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p = \mathbf{v}_{L(\alpha, \beta, 0)} \cdot \mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)} \quad (4)$$

$$= v_{L\alpha} i_{S\alpha} + v_{L\beta} i_{S\beta} + v_{L0} i_{S0}$$

또한 순시무효전력 벡터  $\mathbf{q}$  는 다음과 같이 순시 부하전압벡터와 순시 전원전류벡터의 외적으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{q} = \mathbf{v}_{L(\alpha, \beta, 0)} \times \mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)} \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{vmatrix} v_{L\beta} & v_{L0} \\ i_{S\beta} & i_{S0} \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} v_{L0} & v_{L\alpha} \\ i_{S0} & i_{S\alpha} \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} v_{L\alpha} & v_{L\beta} \\ i_{S\alpha} & i_{S\beta} \end{vmatrix} \end{bmatrix}$$

식(1)-(5)로부터 순시유효전력을 발생하는 전압 벡터  $\mathbf{v}_p$  와 순시 무효전력을 발생하는 전압 벡터  $\mathbf{v}_q$  를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{v}_{p(\alpha, \beta, 0)} = \frac{p}{\mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)} \cdot \mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)}} \mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)} \quad (6)$$

$$\mathbf{v}_{q(\alpha, \beta, 0)} = \frac{\mathbf{q}_{(\alpha, \beta, 0)} \times \mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)}}{\mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)} \cdot \mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)}} \quad (7)$$

위의 식에서  $\mathbf{q}$  는 기존의 p-q이론에서 정의된 무효 전력값과 같은 값을 나타낸다. 식(6)과 식(7)의 전압 성분으로부터 직렬형 능동전력필터의 보상 지령전압을 다음 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{v}_{c(\alpha, \beta, 0)}^* = \frac{\tilde{p}}{\mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)} \cdot \mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)}} \mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)} + \frac{\mathbf{q}_{(\alpha, \beta, 0)} \times \mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)}}{\mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)} \cdot \mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)}} \quad (8)$$

보상 지령 전압을 나타내는 식(8)에서  $\tilde{p}$  는 유효 전력의 맥동 성분을 나타내고, 무효 전력  $\mathbf{q}$  는 직류 성분인  $\bar{q}$  와 맥동 성분인  $\tilde{q}$  를 포함하고 있다.

따라서, 식 (8)을 보상 지령전압으로 사용하면 고조파 성분뿐만 아니라 불형형 부하인 경우에 상전류에 대한 불평형 까지 보상이 가능해지게 된다.

## 2.2 3상 4선식 직렬형 능동전력필터 시스템

그림 1은 3상 4선식 직렬형 능동전력필터와 제어 알고리즘을 보여준다. 실험 수행을 위해서 그림 1과 같이 전형적인 고조파 전압원 형태의 3상 4선식 직렬형 능동전력필터를 구성하였다. 부하로는 단상 다이오드 정류기에 RC부하를 연결하여 고조파 전압원을 구성하였다. 그리고, 부하와 전원사이에 중성선을 연결하여 3상 4선식 전력시스템을 구성하였다.

표1. 시스템 회로 정수  
Table 1. The system parameter

전원전압	110[Vrms], 60[Hz]
전원측 인덕턴스( $L_s$ )	0.1[mH]
결합변압기 권수비	1 : 1
부하 커패시터( $C_{load}$ )	2400[ $\mu$ F]
부하 저항( $R_{load}$ )	20[ $\Omega$ ]
인버터 DC링크 콘덴서	2350[ $\mu$ F]
LC필터 인덕턴스( $L_f$ )	4[mH]
LC필터 콘덴서( $C_f$ )	0.5[ $\mu$ F]

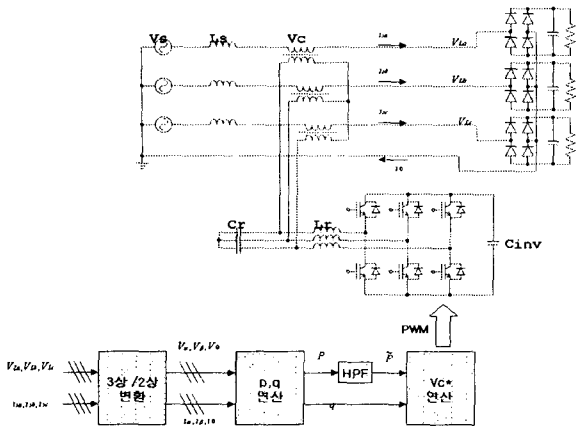


그림 1. 3상 4선식 직렬형 능동전력필터 회로도  
제어 알고리즘의 블록 다이어그램  
Fig 1. 3-Phase 4-Wire series active power filter and the block diagram of control algorithm

고, 능동전력필터는 3상 Voltage Source Inverter를 변압기를 통해서 직렬로 3상 4선식 전력시스템에 결합하였다. 또한, 인버터의 출력단에는 스위칭 리플을 저감시키기 위해서 LC 필터를 연결하였다.

그림 1에 나타난 제어 알고리즘은 위에 제시된 식들을 사용해서 구현 하였다. 3상 부하 전압과 3상 전류를 PT와 CT를 통해서 받아온 후에 3상 2상 변환행렬을 이용해서 2상 좌표계로 변환시켰다. 그리고, 부하에서 발생하는 유효전력과 무효전력을 계산해 낸 후에 간단한 필터링을 통해서  $\hat{d}$ 를 구해 내었고, 식 (8)을 사용해서 보상기준전압을 연산하였다. 제어시스템을 효율적으로 구성하기 위해서 실시간 제어에 적합한 TI사의 TMS320C6701 DSP를 사용해서 모든 연산이 20[ $\mu$ S]이내에 수행되도록 하였고, 20[kHZ]의 속도로 인버터를 구동하였다.

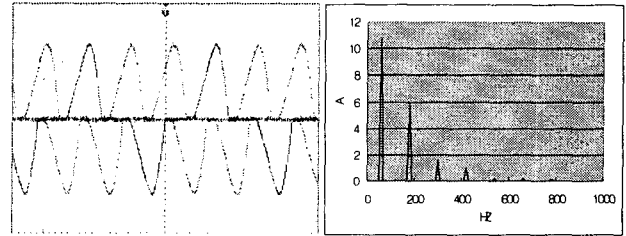
표 1에 시스템 구성을 위해 사용되어진 시스템 회로정수 값들을 나타내었다.

### 2.3 실험결과

그림 2와 그림 3은 평형부하인 경우의 보상전 상 전류파형과 상전류의 spectrum, 중성선전류 파형을 보여준다. 3상전류의 THD는 각각 A상 57.29%, B상 57.20%, C상 57.75%이다. 그리고, 중성선 전류의 크기는 실효치가 약 18.6[A]로 상전류 실효치의 약 1.5배에 해당하는 큰 전류가 흐르게 됨을 알 수 있다.

그림 4와 그림 5는 3상 4선식 직렬형 능동전력필터를 써서 고조파와 무효전력을 보상한 경우의 파형을 보여주고 있다. 3상전류의 THD는 각각 A상 2.72%, B상 2.55%, C상 3.19%로 IEEE519의 규제

치를 만족하는 우수한 보상결과를 보임을 알 수 있다. 중성선전류의 크기 또한 피크치가  $\pm 1$ [A] 이내로 제한됨을 보여주고 있다. 이것은 중성선 전류의 감소율이 1/20 이상으로 직렬형 능동필터가 중성선 전류를 아주 효과적으로 제거할 수 있음을 보여주고 있다.



a) 3상 전류파형 b) A상전류의 스펙트럼

그림 2 평형부하인경우의 보상전 3상전류파형과 A상전류의 스펙트럼.  
10[A]/div, 4[mS]/div

Fig 2. Three phase currents waveforms and spectrum of  $i_w$  before compensation when loads are balanced.

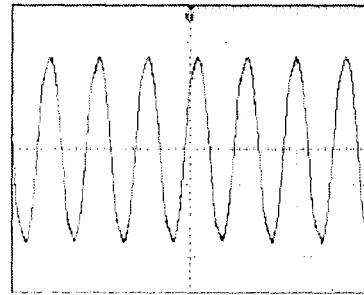
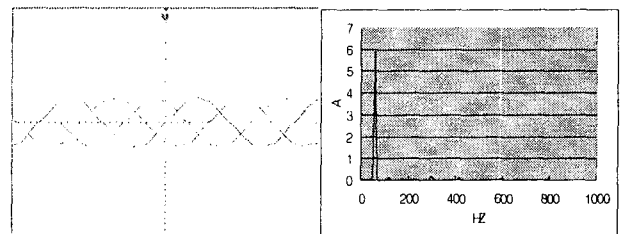


그림 3. 평형부하인 경우의 보상전 중성선 전류파형  
10[A]/div, 4[mS]/div

Fig 3. Neutral line current waveform before compensation when loads are balanced



a) 3상 전류파형 b) A상전류의 스펙트럼

그림4. 평형부하인경우의 보상후 3상전류파형과 A상전류의 스펙트럼.  
10[A]/div, 4[mS]/div

Fig 4. Three phase currents waveforms and spectrum of  $i_w$  after compensation when loads are balanced.

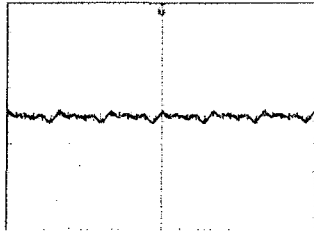


그림 5. 평형부하인 경우의 보상후 중성선 전류파형  
2[A]/div, 10[ms]/div

Fig 5. Neutral line current waveform after compensation when loads are balanced

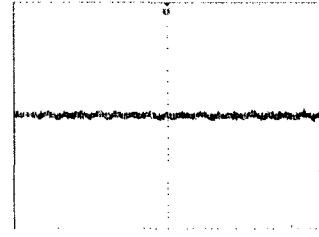
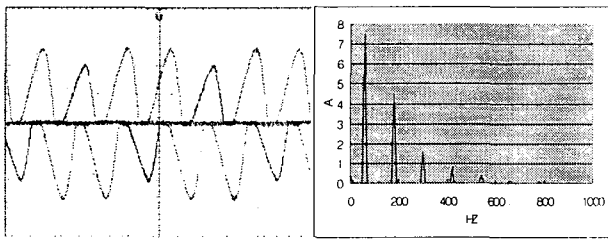


그림 9. 불평형부하인 경우의 보상후 중성선전류파형  
2[A]/div, 10[mS]/div

Fig 9. Neutral line current waveform after compensation when loads are unbalanced



a) 3상 전류파형      b) A상전류의 스펙트럼

그림 6. 불평형부하인 경우의 보상전 3상전류파형과 A상 전류의 spectrum.

Fig 6. Three phase currents waveforms and spectrum of  $i_w$  before compensation when loads are unbalanced

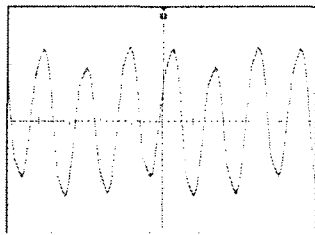
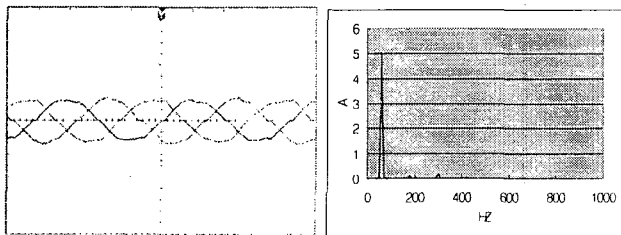


그림 7. 불평형부하인 경우의 보상전 중성선전류파형  
10[A]/div, 4[mS]/div

Fig 7. Neutral line current waveform before compensation when loads are unbalanced



a) 3상 전류파형      b) A상전류의 스펙트럼

그림 8. 불평형부하인 경우의 보상전 3상전류파형과 A상전류의 spectrum.

10[A]/div, 4[mS]/div

Fig 8. Three phase currents waveforms and spectrum of  $i_w$  before compensation when loads are unbalanced.

그림 6과 그림 7은 불평형 부하인 경우의 3상전류와 상전류의 spectrum, 중성선전류 파형을 보여주고 있다. 부하불평형에 따른 3상전류의 불평형이 발생하고 있는데, 3상전류의 불평형율이 11.6%이다. 그리고 중성선에도 역시 실효치 17.5[A]의 큰 전류가 흐르게 된다.

그림 8과 그림 9는 보상후의 파형을 보여주고 있다. 보상후 상전류의 THD는 각각 A상 4.6%, B상 4.9%, C상 6.4%이고, 3상전류의 불평형율은 1.3%로 개선되었다. 그리고, 중성선 전류는 피크치가 평형부하인 경우와 마찬가지로  $\pm 1[A]$  이내로 제한되고 있음을 볼 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 3상 4선식 직렬형 능동전력필터에 대한 새로운 알고리즘을 제시하였다. 평형부하인 경우와 불평형 부하인 경우에 대해서 실험을 수행하였고, 그 결과를 제시하였고, 실험결과를 통해서 고조파와 불평형을 보상하는 제안된 알고리즘의 유효성을 입증하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] F. Z. peng, et al. "A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems-A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters" IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 26, No. 6, pp 983-990, 1990.
- [2] Mauricio Aredes, et al. "Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter Control Strategies" IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 12, No. 2, pp 311-318, 1997, March
- [3] F. Z. Peng, et al. "Harmonic and Reactive Power Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for 3-Phase 4-Wire Systems" PESC '97 Record., 28th Annual IEEE, Vol. 2, pp 1089-1095, 1997.