

## 불평형 전원전압을 보상하는 3상3선식 직렬형 능동전력필터에 관한 연구

오재훈\*, 김영석\*, 한윤석\*\*, 원충연\*\*\*, 최세완<sup>§</sup>

\*인하대학교 전자·전기·컴퓨터공학부, \*\*(주)아크로센스

\*\*\* 성균관대학교 전기·전자·컴퓨터공학부, § 서울산업대학교 제어계측공학과

### A Study of Series Active Power Filter Compensating Unbalanced Source Voltage in 3phase-3wire system

Jaehoon Oh\*, Youngseok Kim\*, Yoonseok Han\*\*, Chungyuen Won\*\*\*, Sewan Choi<sup>§</sup>

\*Inha Univ., \*\*Acrosence Inc., \*\*\*Sung Kyun Kwan Univ., § Seoul National Univ. of Tech.

#### ABSTRACT

In this paper, a 3phase-3wire series active power filter compensating current harmonics and unbalanced source voltages is presented. The system is composed of series active power filter and shunt passive filters that are tuned 5th and 7th harmonics. In this system, series active power filter improves harmonic compensation characteristics of the shunt passive filters and compensates the unbalanced source voltages.

In the proposed algorithm, compensation voltage for harmonic reduction is calculated by a performance function, and compensation voltage for the unbalanced source voltage is calculated in based on the synchronous reference frame.

Some results obtained from the experimental model using the proposed method are presented to demonstrate and confirm its validity.

#### 1. 서 론

최근 컴퓨터를 이용한 전기, 전자 장비, 각종 고정밀기기 등과 여러 가지 비선형 부하의 사용 급증은 기존에는 큰 문제시되지 않았던 전력품질이라는 요소를 전력 공급자측이나 수용가측에 커다란 문제점으로 대두시키고 있다. 전력품질 저하의 문제는 크게 전류와 전압의 문제로 대별 할 수 있고, 그 중 전류의 문제로는 고조파 전류와 역률 저하 등을 그리고 전압의 문제로는 순간 정전, 순간 전압 강하, 순간 전압 상승, 3상의 전압 불평형 등을 들 수 있다.

고조파 전류가 전력계통에 흐름에 따라 전원 전압이 왜곡되어 지고, 발전기·송전선과 변압기의 용량이 증대되며, 각종 전력 장치들에 열 및 진동

을 발생시키고 이에 따라 절연 파괴의 문제 및 수명 단축의 문제를 야기할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 전통적인 방법으로 인덕터와 커패시터의 공진 회로를 이용한 수동필터를 들 수 있다. 하지만 수동 필터는 동조된 공진 주파수에 해당하는 고조파만을 제거할 수 있는 제한이 있고, 부파가 크다는 단점을 갖고 있다. 이에 최근에는 수동필터의 단점을 극복하고 더 우수한 성능을 보일 수 있는 능동전력필터와 그 여러 가지 토폴로지에 대한 연구가 활발하며, 국외에서는 어느 정도의 가시적인 성과도 나타나고 있는 실정이다.

한편 전원 전압 불평형이나 전압 강하에 의한 문제는 전류 고조파에 의한 문제보다 직접적이고 그 규모도 크다 할 수 있다. 전압의 문제로 인해 각종 컴퓨터 시스템으로 동작하는 민감한 부하의 오동작이나 고장 등을 유발할 수 있으며, 비선형 부하에 저주파수의 고조파를 발생시키고, 제반 여러 소자나 시스템의 용량을 증대시키는 요인으로 작용할 수 있다. 이러한 전압의 문제를 해결하기 위한 일반적인 방법으로 정지형 무효전력 보상기가 사용되어졌지만 이것은 응답속도가 늦고, 계통에 고조파가 유입될 수 있으며, 큰 용량의 수동소자가 필요하다는 단점을 가지고 있다. 이에 최근에는 응답속도도 빠르고, 저렴하며 효율적인 전압형 인버터를 이용한 능동적인 전압 보상 방법이 활발히 연구되어지고 있다.

본 논문에서는 능동전력필터에 전원 전압 불평형을 보상하는 기능을 부가하여 고조파 보상 뿐 아니라 전반적인 전력품질 개선을 목적으로 하는 제어 알고리즘을 연구하였으며 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

#### 2. 본 론

## 2.1 고조파 전류 보상

본 논문에서 사용하는 알고리즘에서는 직렬형 능동전력필터로부터 발생된 각 상의 전력을 순시 무효 전력으로 나타낸다. 즉, 순시무효전력  $q_k$ 는 직렬형 능동전력필터의 각 상에서 발생하는 전력으로 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_k = v_{Ck} \cdot i_{Sk} \quad (k = a, b, c) \quad (1)$$

식 (1)에서  $k$ 는 각 상을 나타내는  $a, b, c$  이며,  $v_{Ck}$ 는 직렬형 능동전력필터가 생성하는 각 상의 보상전압,  $i_{Sk}$ 는 각 상의 전원 전류를 나타낸다.

직렬형 능동전력필터는 순시 유효전력을 발생하지 않으므로 다음 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{Ca}i_{Sa} + v_{Cb}i_{Sb} + v_{Cc}i_{Sc} = 0 \quad (2)$$

본 논문에서 다루는 3상3선식 전력계통의 경우 중성선이 존재하지 않기 때문에, 전압과 전류의 영상분이 존재하지 않고 따라서 직렬형 능동전력필터에서 발생하는 보상 전압은 다음 식 (3)을 만족한다.

$$v_{Ca} + v_{Cb} + v_{Cc} = 0 \quad (3)$$

직렬형 능동전력필터의 보상 전압은 식 (2)와 식 (3)을 만족하면서, 다음에 정의하는 성능 함수를 최소화하는 전압으로 결정된다.

$$L = (v_{La} - v_{Ca})^2 + (v_{Lb} - v_{Cb})^2 + (v_{Lc} - v_{Cc})^2 \quad (4)$$

성능함수를 최소로 만드는 직렬형 능동전력필터의 보상 전압  $v_{Ca}, v_{Cb}, v_{Cc}$ 는 식 (2)와 식 (3)을 이용하면서 식 (5)의 미분식을 통해 유도된다.

$$\frac{dL}{dv_{Ca}} = 0, \frac{dL}{dv_{Cb}} = 0, \frac{dL}{dv_{Cc}} = 0 \quad (5)$$

식 (5)를 통해 유도된  $v_{Ca}, v_{Cb}, v_{Cc}$ 는 제안된 직렬형 능동전력필터의 보상 지령 전압으로 다음 식 (6)과 같이 구해진다.

$$v_{Ca} = \frac{\sqrt{3}(i_{Sb} - i_{Sc}) \cdot q}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})}$$

$$v_{Cb} = \frac{\sqrt{3}(i_{Sc} - i_{Sb}) \cdot q}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})}$$

$$v_{Cc} = \frac{\sqrt{3}(i_{Sa} - i_{Sb}) \cdot q}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})}$$

여기서,

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(i_{Sb} - i_{Sc})v_{La} + (i_{Sc} - i_{Sa})v_{Lb} + (i_{Sa} - i_{Sb})v_{Lc}] \quad (6)$$

식 (6)은 식 (2)의 조건을 만족함으로써 얻어진 결과식이므로, 식 (6)의  $q$ 는 기존의 순시 무효전력의 정의식과 일치한다. 따라서 보상 지령 전압 내에는 순시 무효전력의 직류성분과 교류성분을 모두

포함하고 있으며, 고조파만 보상할 경우 기존의 알고리즘과 마찬가지로 순시무효전력의 교류성분만을 보상분으로 사용하면 된다. 따라서 고조파 보상을 위한 능동전력필터의 최종 보상 지령 전압은 다음 식 (7)과 같다.

$$v_{Ca} = \frac{\sqrt{3}(i_{Sb} - i_{Sc}) \cdot \tilde{q}}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})}$$

$$v_{Cb} = \frac{\sqrt{3}(i_{Sc} - i_{Sa}) \cdot \tilde{q}}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})}$$

$$v_{Cc} = \frac{\sqrt{3}(i_{Sa} - i_{Sb}) \cdot \tilde{q}}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})} \quad (7)$$

## 2.2 불평형 전원 전압 보상

불평형 전압은 대칭 좌표법에 의하여 아래의 식 (8)과 같이 정상분(Positive Sequence Component), 역상분(Negative Sequence Component) 그리고 영상분(Zero Sequence Component)으로 나누어질 수 있다. 그 중 역상분과 영상분을 보상해 준다면 3상 평형한 전압을 얻을 수 있으며, 또한 정상분의 크기를 일정 지령값으로 조정한다면 원하는 전압 크기를 갖는 3상 평형한 전압 조건을 만들 수 있다.

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = V_1 \begin{pmatrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{pmatrix} + V_2 \begin{pmatrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \end{pmatrix} + V_0 \begin{pmatrix} \sin \omega t \\ \sin \omega t \\ \sin \omega t \end{pmatrix} \quad (8)$$

위의 식 (8)에서 첨자 1은 정상분, 첨자 2는 역상분 그리고 첨자 0은 영상분을 각각 나타낸다. 식 (8)로 표현되어지는 불평형 3상 전원 전압을 정상분에 동기하는 회전 좌표축 상으로 표현하기 위해 아래 식 (9)의 Park's 변환 행렬식을 이용하면 다음 식 (10)과 같이 표현되어진다.

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (9)$$

식 (10)에서 볼 수 있듯이 정상분에 동기하는 회전 좌표상에서 정상분은 DC값으로, 역상분은 2배 주파수에 해당하는 값으로 그리고 영상분은 그대로 영상분으로 표현됨을 알 수 있다.

제안하는 전압 보상 방법은 부하측 전압을 위의 식들을 이용하여 회전 좌표상으로 변환하고 필터링을 통하여 DC값 이외의 값들을 보상 지령치로 취

하고 또한 DC값을 원하는 부하측 전압 크기와 비교하여 그 에러값을 보상 지령치에 더해 줌으로써 부하측을 원하는 전압 크기를 갖는 3상 평형한 전압 상태로 만들어 낸다.

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{pmatrix} = [P] \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$= \begin{pmatrix} 0 \\ V_1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_2 \sin 2\omega t \\ -V_2 \cos 2\omega t \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ V_0 \sin \omega t \end{pmatrix}$$

### 2.3 시스템 구성

그림 1은 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 검증하기 위해 구성된 시스템을 나타낸다.

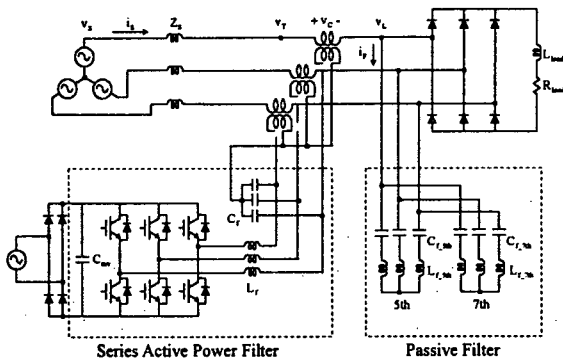


그림1 직렬형 능동전력필터와 병렬 수동필터 병용 시스템

Fig.1 A combined system of series active power filter and shunt passive filter

표 1 시스템 회로 정수  
Table 1 The system parameter

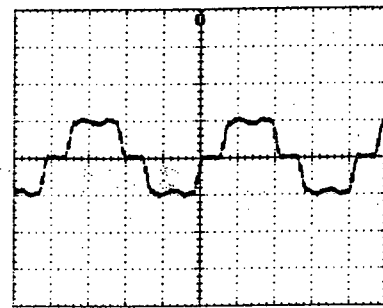
전원전압	100[Vrms], 60[Hz]	
전원측 인덕턴스(L <sub>s</sub> )	0.1[mH]	
결합변압기 권수비	1 : 1	
부하 인덕턴스(L <sub>load</sub> )	15[mH]	
부하 저항(R <sub>load</sub> )	30[Ω]	
인버터 DC링크 콘덴서	2350[uF]	
LC필터 인덕턴스(L <sub>f</sub> )	4[mH]	
LC필터 콘덴서(C <sub>f</sub> )	0.5[uF]	
5차 수동필터	인덕터	2[mH]
	커패시터	140[uF]
7차 수동필터	인덕터	2[mH]
	커패시터	70[uF]

전체 시스템은 병렬 수동필터와 직렬형 능동전력 필터의 병용시스템으로 구성되었다. 수동필터는 5차와 7차 고조파에 동조되었으며, 직렬형 능동전력 필터는 전원과 부하 사이에 3개의 단상 결합 변압기를 통해 계통에 직렬로 접속되었다. 직렬형 능동전력 필터의 주 회로는 3상 전압형 PWM 인버터로 구성되었으며, 부하로는 고조파 전류원으로 작용하는 2차측에 저항과 인덕터 성분을 갖는 3상 전 브릿지 다이오드 정류기를 사용하였다.

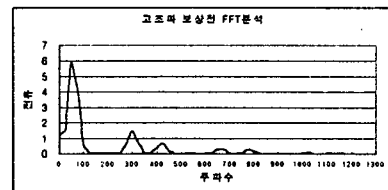
표 1에는 구성된 시스템의 각 회로 정수 값들을 나타내었다.

### 2.4 실험 결과

그림 1과 표 1에서 보여진 것처럼 시스템을 구성하였으며, 정확한 보상 지령 전압 연산을 위하여 DSP(TMS 320C31)를 사용하였으며, 스위칭 주파수는 7kHz로 하였다.



(a) 고조파 보상전 a상 전류(10A/div)

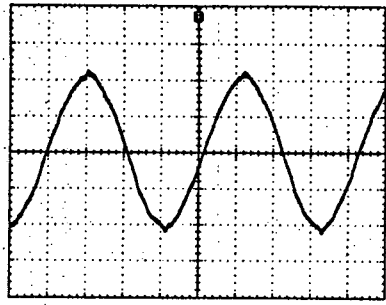


(b) 고조파 보상전 a상 전류 FFT 분석

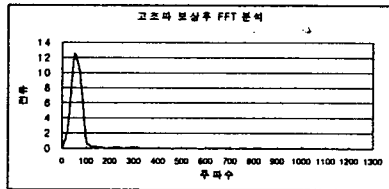
그림 2 고조파 보상 전 a상 전원 전류와 FFT분석  
Fig. 2 Source current and it's FFT analysis before harmonic compensation

그림 2는 보상 알고리즘을 적용하기 전의 a상의 전류 파형과 그 FFT 분석을 나타낸다. THD는 31.63%이다. 다음의 그림 3은 고조파 보상 알고리즘만을 적용하였을 경우의 a상 전류와 그 FFT 분석을 나타낸다. THD는 2.49%로 우수한 보상 특성을 보임을 알 수 있다.

그림 4는 불평형 3상 전원이 인가된 상태에서 고조파 보상과 전압 보상을 동시에 시행한 결과를 보여주고 있다.



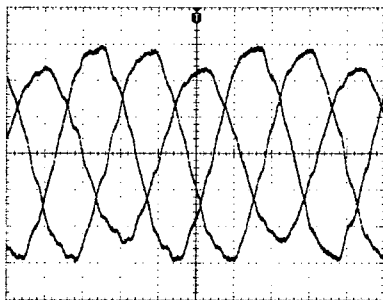
(a) 고조파 보상 후 a상 전류(10A/div)



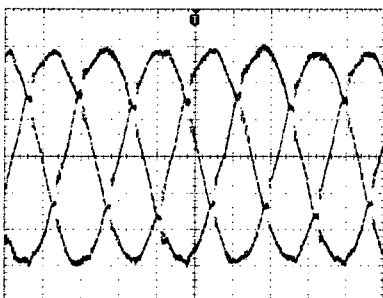
(b) 고조파 보상 후 a상 전류 FFT 분석

그림 3 고조파 보상 후 a상 전류 전류와 FFT분석  
Fig. 3 Source current and it's FFT analysis after harmonic compensation

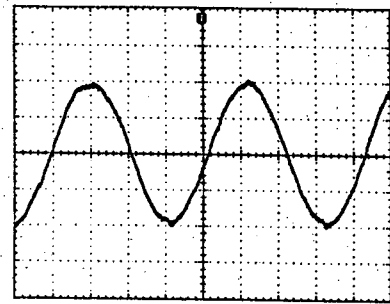
전원 전압의 불평형 계수(UF)는 7.14%이고 크기 계수(MF)는 93.33%이다. 제안한 알고리즘을 적용한 결과 불평형 계수는 1.18%, 크기 계수는 101.67%로 우수한 보상 특성을 보임을 알 수 있다. 또한 a상 전류의 THD분석 결과도 2.84%로 전류 고조파 보상도 우수하게 수행되고 있음을 알 수 있다.



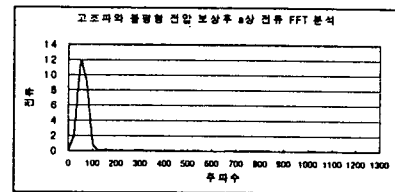
(a) 3상 전원측 전압(50V/div)



(b) 전압 보상 후 부하측 3상 전압 (50V/div)



(c) 보상 후 a상 전원측 전류(10A/div)



(d) 보상 후 a상 전류 FFT 분석 결과

그림 4. 전류 고조파 및 전압 전압 불평형 보상 결과  
Fig. 4 Results of current harmonics and unbalanced voltage compensation

### 3. 결 론

본 논문에서는 고조파 보상과 전원 전압 불평형을 동시에 보상하는 직렬형 능동 전력 필터의 제어 알고리즘을 제안하였으며, 실험을 통하여 그 우수한 보상 특성을 확인하였다.

본 연구(관리번호 98-중-03)는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음.

### 참 고 문 헌

- [1] L. Moran et al., "Series active power filter compensates current harmonics and voltage unbalance simultaneously", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 147, No. 1, pp. 31, 2000.
- [2] S. Bhattachaya et al., "Synchronous Frame Harmonic Isolator using Active Series Filter", EPE FIRENZE Conf. Record, 1991, vol. 3, pp. 30.
- [3] F. Z. Peng et al., "A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems - A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filter", IEEE Trans. Industry Application, vol. 26, no. 6, pp. 983, 1990.