

전류 고조파와 불평형 전원 전압을 보상하는 직렬형 능동전력 필터와 병렬형 수동전력필터 병용시스템의 새로운 제어법

論 文

50B - 12 - 5

A Novel Control Method of Combined System consists of Series Active Power Filter and Parallel Passive Power Filter to Compensate Current Harmonics and Unbalanced Source Voltages

吳 在 勳* · 韓 潤 錫** · 金 榮 石*** · 元 忠 淵§ · 崔 世 琬§§

(Jae-Hoon Oh · Yoon-Seok Han · Young-Seok Kim · Chung-Yuen Won · Se-Wan Choi)

Abstract - In this paper, we study a series active power filter to compensate current harmonics and unbalanced source voltages. Conventional control methods for compensating unbalanced source voltages use source voltages to calculate compensation voltages, and in addition use load voltages to regulate load voltages. But the proposed control method uses load voltages to compensate unbalanced source voltages and regulate load voltages. And we propose a control method to reduce current harmonics which can calculate compensation voltages directly from source currents and load voltages. By well-matched operation of two control methods, the series active power filter can compensate current harmonics, unbalanced source voltages, and regulate load voltages. We compose a combined system of the series active power filter and parallel passive filters to confirm a validity of proposed control methods. The results from experiments are presented to demonstrate effectiveness of the proposed method.

Key Words : Series active power filter, Passive power filter, Current harmonics, Voltage unbalance, Voltage regulation

1. 서 론

산업 사회의 발전에 따라 각종 초정밀 기기나 컴퓨터를 사용하는 전자 제품 등 전원에 민감한 부하의 사용이 급증하고 있는 요즘 고조파 전류나 선간/상간 전압 불평형과 관련한 피해가 늘어나고 있다.

고조파 전류는 반도체 소자를 사용하는 전력변환 회로와 같은 비선형 부하에 의해 전력계통에 발생하게 된다. 이러한 고조파 전류는 각종 전력장치들에 열 및 진동을 발생시켜서 절연 파괴 더 나아가 수명 단축을 야기할 수 있으며, 계통 모든 기기나 전력용 소자들의 용량 증대의 주요한 요인이 된다. 고조파 전류에 대한 대책으로 널리 사용된 방법은 수동 소자인 리액터와 커패시터를 이용한 수동전력필터가 되겠다. 수동전력필터는 동조된 주파수에 해당하는 고조파를 제거하지만 그 특성이 계통 임피던스에 큰 영향을 받기 때문에 항상 좋은 성능을 기대하기 어려우며[1], 폭넓은 고조파가 발생했을 경우 그것을 보상하기 위해서는 그에 상응하는 수동전력필터가 추가되어야 하기 때문에 수동전력필터의 부피가 커

지고 비용도 또한 증가되는 문제점이 있다. 이러한 수동전력필터의 약점을 극복하고 보다 더 우수한 전류 고조파 보상 성능을 위해서 연구되어 지고 있는 것이 능동전력필터이다. 현재 능동전력 필터는 전력계통에 보상 전류를 주입해 주는 병렬 방식과[2], 결합 변압기를 통해 계통과 연결되어서 보상 전압을 주입하는 직렬 방식[3] 그리고 기존의 수동전력필터와 함께 사용하는 병용 방식[1][4][5]등 여러 가지 토폴로지(topology)들이 연구되어 지고 있다.

전압 불평형이나 전압 강하와 같은 현상은 3상 선로에 불평형한 부하가 접속되거나 또는 선로 단락이나 고장과 같은 3상 선로 자체의 문제에 의해 발생할 수 있다. 전압과 관련된 문제는 고조파 전류에 의한 문제보다 더 심각하고 직접적인 피해를 야기 할 수 있다. 각종 컴퓨터 제어 장치에 의해 동작하는 설비의 고장이나 오동작을 유발할 수 있으며, 비선형 부하에 저주파수의 고조파를 발생시켜서 필요한 전력장치의 용량을 증대시킬 수도 있다. 이러한 전압과 관련된 문제에 대한 대책으로는 수동전력필터인 정지형 무효 전력 보상기나 병렬형 TCRs (Thyristor Controlled Reactors) 등이 사용되어 졌으나 이러한 방법은 낮은 스위칭 주파수에 의해 계통에 고조파가 유입될 수도 있으며, 또한 큰 용량의 수동소자가 필요하다는 단점을 가지고 있다. 이에 최근에는 빠른 응답속도를 가지며, 저렴하고 효율적인 전압형 인버터를 이용한 능동적인 보상기에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[6,7].

한편, 최근에는 능동전력필터를 이용하여 고조파 전류 보상뿐 아니라 다른 부가적인 기능을 추가하여 복합적인 보상 기로서의 역할을 할 수 있도록 하는 제어 알고리즘에 대한

* 準 會 員 : 仁荷大 工大 電氣工學科 碩士課程

** 正 會 員 : (주)아크로센스 前任研究員 · 工博

*** 正 會 員 : 仁荷大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

§ 正 會 員 : 成均館大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

§§ 正 會 員 : 서울産業大 工大 制御計測科 助教授 · 工博

接受日字 : 2001年 7月 27日

最終完了 : 2001年 11月 28日

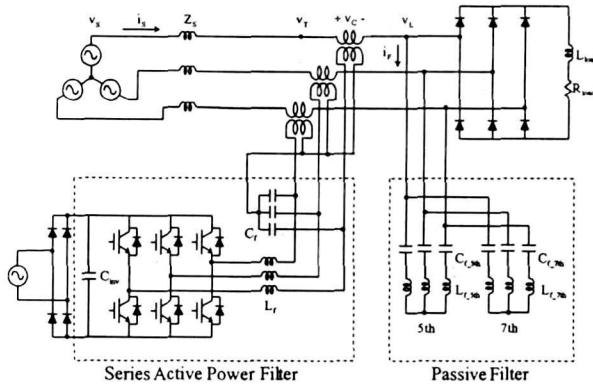


그림 1 직렬형 능동전력필터와 병렬형 수동필터의 병용 시스템

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

연구도 진행되어지고 있다[8][9]. 여러 부가적인 기능들 중에서 본 논문에서는 수동전력필터와 직렬형 능동 전력필터의 병용시스템을 이용하여 전류 고조파 억제와 물론 전원 전압의 불평형까지도 보상 할 수 있는 제어 알고리즘에 대해 연구하였다. 직렬형 능동전력필터는 고조파 전압원 부하인 2차 측에 필터 커패시터를 갖는 정류기 부하에 적합한 방식이지만 고조파 전류원 부하인 2차측에 리액터를 갖는 정류기 부하에는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다. 하지만 직렬형 능동 전력필터를 수동 전력필터와 함께 사용하면 고조파 전류원 부하나 고조파 전압원 부하 모두에 대해서 적절한 보상 특성을 보일 수 있다[10]. 또한, 기존의 전력계통에 설치되어져 있는 수동전력필터를 활용할 수 있으며, 직렬형 능동전력필터가 직렬형 전압 보상기와 같은 구조를 갖기 때문에 알고리즘을 추가시켜서 전압 보상의 기능도 쉽게 구현 할 수 있다. 그리고, 병용 시스템은 능동전력필터와 수동전력필터가 고조파 전류 보상 역할을 분담함으로써 능동전력필터의 용량을 작게 만들 수 있다는 장점도 있다. 즉, 능동전력필터는 수동전력필터의 보상 능력을 극대화 시켜주며, 넓은 분포를 갖는 고차 고조파 전류를 보상하는 역할을 하게 된다.

본 논문에서 제시하는 고조파 전류 보상 알고리즘은 고조파 전류를 계산한 후 일정 게인 값을 곱하여 보상 전압을 얻어내던 기존의 방식[1][4]과는 달리 보상 전압을 전원측 전류와 부하측 전압에 의해 직접 구해내기 때문에 조금 더 간단하게 보상 전압을 얻을 수 있다. 그리고, 불평형 전원 전압 보상을 위한 알고리즘은 전원측으로부터 불평형 전압 성분을 구하던 기존의 방법[6][7]과 달리 부하측 전압의 상변환에 의하여 보상 전압을 계산하는 제한 제어 방식으로 보다 안정적인 전압 보상이 가능하다. 제안된 두 가지 알고리즘의 조화로운 작용에 의해 전력 계통에는 고조파 전류가 제거되고 평형한 부하 전압 조건을 갖게 된다. 제안하는 알고리즘의 타당성을 보이기 위해 그림 1과 같은 시스템을 구성하고 실험을 수행하였다.

2. 보상원리

2.1 고조파 전류의 보상원리

전력 계통에서 전압과 전류는 각각 벡터 형식으로 나타낼 수 있으며, 부하 전압 v_L 과 전원 전류 i_S 를 다음 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{순시 부하전압벡터 } v_L &= [v_{La} \ v_{Lb} \ v_{Lc}]^T \\ \text{순시 전원전류벡터 } i_S &= [i_{Sa} \ i_{Sb} \ i_{Sc}]^T \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)의 $a-b-c$ 좌표상의 순시 부하전압벡터와 순시 전원전류벡터를 3상 2상 좌표 변환을 통하여 다음 식 (2)와 같이 $\alpha-\beta-0$ 좌표상으로 나타낼 수 있다[2][11].

$$\begin{aligned} v_{L(\alpha, \beta, 0)} &= [v_{La} \ v_{L\beta} \ v_{L0}]^T \\ i_{S(\alpha, \beta, 0)} &= [i_{Sa} \ i_{S\beta} \ i_{S0}]^T \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $v_{L0} = \frac{1}{3} (v_{La} + v_{L\beta} + v_{Lc})$ 이고

$i_{S0} = \frac{1}{3} (i_{Sa} + i_{S\beta} + i_{Sc})$ 이다.

식 (2)의 순시 전압벡터 $v_{L(\alpha, \beta, 0)}$ 와 순시 전류벡터 $i_{S(\alpha, \beta, 0)}$ 를 이용하여 순시 유효전력 p 와 순시 무효전력 q 를 다음 식 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} p &= v_{L(\alpha, \beta, 0)}^T \cdot i_{S(\alpha, \beta, 0)} \\ &= v_{La}i_{Sa} + v_{L\beta}i_{S\beta} + v_{L0}i_{S0} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} q &= v_{L(\alpha, \beta, 0)} \times i_{S(\alpha, \beta, 0)} \\ &= \begin{pmatrix} q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{L\beta} v_{L0} - i_{S\beta} i_{S0} \\ v_{L0} v_{La} - i_{S0} i_{Sa} \\ v_{La} v_{L\beta} - i_{Sa} i_{S\beta} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

위의 식 (3), (4)와 다음의 수식 (5) 그리고 벡터 곱에 관한 공식인 식(6)을 이용하여 순시유효전력을 발생하는 전압벡터 v_p 와 순시 무효전력을 발생하는 전압벡터 v_q 를 아래의 식 (7), (8)과 같이 구해 낼 수 있다[2].

$$v_{L(\alpha, \beta, 0)} = v_{p(\alpha, \beta, 0)} + v_{q(\alpha, \beta, 0)} \quad (5)$$

$$(u \times v) \times w = (u \cdot w)v - (v \cdot w)u \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{p(\alpha, \beta, 0)} &= \text{Proj}_p \mathbf{v}_{L(\alpha, \beta, 0)} = \frac{\mathbf{v}_{L(\alpha, \beta, 0)} \cdot \mathbf{p}}{\|\mathbf{p}\|^2} \mathbf{p} \\ &= \frac{\mathbf{p}}{\mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)} \cdot \mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)}} \mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\mathbf{v}_{q(\alpha, \beta, 0)} = \frac{\mathbf{q}(\alpha, \beta, 0) \times \mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)}}{\mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)} \cdot \mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)}} \quad (8)$$

위의 식에서 $\mathbf{q}$ 는 기존의 pq이론[12]에서 정의된 무효 전력값과 같은 값을 나타낸다. 식 (7)과 (8)의 전압 성분으로부터 직렬형 능동전력필터의 보상 지령 전압을 다음 식 (9)와 같이 유효 전력의 맥동 성분과 무효 전력으로 나타낼 수 있다[2][12].

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{c(\alpha, \beta, 0)} &= \frac{\tilde{\mathbf{p}}}{\mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)} \cdot \mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)}} \mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)} \\ &+ \frac{\mathbf{q}(\alpha, \beta, 0) \times \mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)}}{\mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)} \cdot \mathbf{i}_{S(\alpha, \beta, 0)}} \end{aligned} \quad (9)$$

보상 지령 전압을 나타내는 식 (9)에서 $\tilde{\mathbf{p}}$ 는 유효전력의 맥동 성분을 나타내고, 무효 전력 $\mathbf{q}$ 는 기본과 성분인 $\overline{\mathbf{q}}$ 와 맥동 성분인 $\tilde{\mathbf{q}}$ 를 포함하고 있다.

본 연구에서는 무효전력의 맥동 성분인 $\tilde{\mathbf{q}}$ 만을 보상하는 방법으로 고조파 전류 억제 실험하였다.

2.2 불평형 전원 전압 보상원리

3상 불평형 전압은 대칭 좌표법에 의하여 아래의 식 (10)과 같이 정상분, 역상분 그리고 영상분의 세가지 요소로 나뉘어 질 수 있다. 3상 전압이 평형 하다면 정상분만이 나타나게 되지만, 불평형 할 경우에는 정상분 외에 역상분과 영상분이라는 성분이 나타난다. 그러므로 보상에 의해서 역상분과 영상분을 보상해 준다면 불평형한 전압은 평형한 상태로 회복될 것이며, 또한 정상분의 크기를 조정해 준다면 3상 전압의 크기를 원하는 만큼 조정할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} &= V_1 \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi) \\ \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \end{bmatrix} + V_2 \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \\ \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi) \end{bmatrix} \\ &+ V_0 \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \sin \omega t \\ \sin \omega t \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 첨자 1은 정상분, 첨자 2는 역상분 그리고 첨자 0은 영상분을 각각 나타낸다. 제안하는 알고리즘은 부하측 3상 전압을 센싱하고 그것을 Park's 변환식[11]을 이용하여

여 회전좌표로 변환하고 간단한 필터링에 의하여 역상분과 영상분을 검출해 내고 또한 정상분의 크기를 부하측 정격 전압과 비교하여 그 차를 보상 전압에 더하여 줌으로써 부하전압을 원하는 크기를 갖는 평형한 3상 전원으로 만들어 준다.

부하 전압도 식 (10)과 같이 정상분, 역상분 그리고 영상분으로 구성되고, 식 (11)의 Park's 변환식을 이용하여 회전좌표로 좌표 변환하면 식 (12)와 같이 나타난다.

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2}{3} \pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi) & \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

변환된 결과인 식 (12)에서 볼 수 있듯이 d-q-0 축으로 표현되는 정상분에 동기하는 회전 좌표상에서 정상분은 직류성분으로, 역상분은 2배 주파수 성분으로 그리고 영상분은 그대로 영상분으로 변환되어 진다. V_q 의 성분을 필터링에 의하여 직류 성분과 교류 성분으로 분리하고, 그 중 교류 성분은 V_d , V_0 성분과 함께 불평형 전압을 보상하기 위한 지령전압이 되고, 직류 성분은 부하의 정격 전압과 비교하여 부하 전압조정을 위한 지령 전압을 구하는데 사용한다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} &= [P] \begin{bmatrix} V_{La} \\ V_{Lb} \\ V_{Lc} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ V_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -V_2 \sin 2\omega t \\ -V_2 \cos 2\omega t \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ V_0 \sin \omega t \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

기존의 연구에서는 전원 전압 불평형을 보상하기 위해서는 전원측의 전압을 이용하고, 부하 전압의 크기 조절을 위해서는 부하측의 전압을 이용하는 방법을 취하였다[6][7]. 하지만 본 논문에서 제시하는 알고리즘은 부하측 전압에 의해서 전원 전압의 불평형은 물론 부하 전압의 크기 조정까지 수행하고 있으며, 순시적으로 부하전압을 센싱하고 보상전압을 연산하여 보상해 주기 때문에 전압보상이 쾌한 제어의 형태로서 수행되어 지고 이것은 전원측 전압을 이용하여 불평형을 보상하는 경우보다 더 안정적으로 부하측 전압을 평형상태로 만들어 줄 수가 있다.

그림 2는 본 연구에서 제안하고 사용한 제어 알고리즘을 간략히 블록 다이어그램으로 나타내었다. 전원 전류와 부하 전압으로부터 순시 유효, 무효 전력을 구하고 그 중 무효 전력을 고역통과필터(H.P.F)를 통하여 맥동 성분(q_h)을 분리해 내고 그것으로부터 보상 지령 전압을 구한다. 또한 부하 전압을 회전 좌표로 변환하고, V_q 성분을 저역통과필터(L.P.F)를 통하여 직류성분과 맥동 성분으로 분리하여 불평형 전압 보상 및 부하 전압조정을 위한 지령 전압을 구한다. 그리고 최종적인 보상 지령전압은 구해진 각 보상 지령 전압의 합으로 한다.

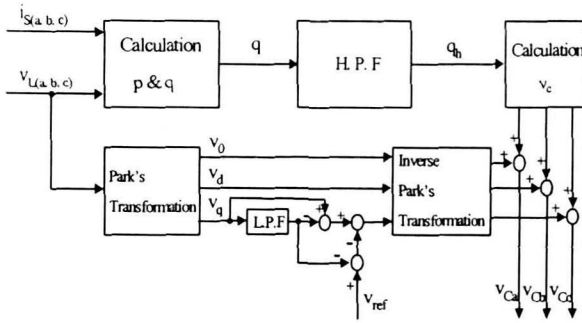


그림 2 고조파와 불평형 전원 전압 보상을 위한 직렬형 능동전력필터의 제어 블록선도
Fig. 2 A control block diagram of the series active power filter for current harmonics and unbalanced source voltage compensation

3. 시스템 구성

표 1. 시스템 회로 정수

Table 1. A system parameter

전원 상전압	100[Vrms], 60[Hz]	
전원측 인덕턴스(L _s)	0.1[mH]	
결합변압기 권수비	1 : 1	
부하 인덕턴스(L _{load})	15[mH]	
부하 저항(R _{load})	30[Ω]	
인버터 DC링크 콘덴서	2350[μF]	
LC필터 인덕턴스(L _f)	4[mH]	
LC필터 커패시턴스(C _f)	0.5[μF]	
5차 수동전력필터	인덕턴스	2[mH]
	커패시턴스	140[μF]
7차 수동전력필터	인덕턴스	2[mH]
	커패시턴스	70[μF]

전체 시스템은 그림 1에서 보인 것처럼 직렬형 능동전력필터와 수동전력필터의 병용시스템으로 구성하였다. 직렬형 능동전력 필터의 주 회로는 3상 전압형 PWM인버터이며, 교류전원과 비선형 부하 사이에 3개의 단상 결합 변압기를 통해 계통에 직렬 접속하였다. 또한, 인버터의 출력 측에는 스위칭 리플을 저감시키기 위한 LC필터가 구성되었다. 수동필터는 5차와 7차 고조파를 제거하기 위한 공진 주파수를 갖도록 구

성하여 능동전력필터와 부하 사이에 병렬로 접속하였다. 비선형 부하로는 직류측에 리액터와 저항값을 갖는 3상 전 브릿지 다이오드 정류기를 사용하였으며, 이 부하는 고조파 전류원으로 동작하게 된다.

또한, 불평형한 전원 조건을 만들기 위해 전원측에는 단권 변압기 구조의 슬라이더스를 설치하였으며, 이것을 이용하여 전원 전압의 크기를 조정할 수 있다. 슬라이더스는 1차측은 △결선, 2차측은 3상3선식 비접지 Y 결선 하였다 직렬형 능동전력필터의 제어와 보상 전압의 연산을 위해 DSP (TMS320C31)를 사용하였으며, 샘플링 시간은 143 μsec로 하였다. 게이트 인가 신호는 Co-processor인 ADMC201을 사용하여 구현하였다. 표 1에는 본 실험에 사용된 시스템의 각 회로정수들을 나타내고 있다.

4. 실험 결과

제안하는 알고리즘을 이용한 실험 결과를 고조파 전류 보상만 하였을 경우, 그리고 고조파 전류 보상과 불평형 전압 보상을 동시에 하였을 경우의 순으로 보였다. 보상 전과 후의 비교를 위하여 고조파 전류 보상의 경우 THD(Total Harmonic Distortion)를, 전원 전압 불평형 보상의 경우 IEC(International Electrotechnical Commission)에서 규정하고 있는 불평형 계수(UF ; unbalance factor)와 크기 계수(MF ; magnitude factor)를 각각의 평가 기준으로 하였고, 그 정의는 각각 아래의 식 (13), (14), (15)와 같다.

$$THD = \frac{1}{I_1} \left(\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \right) \times 100 [\%] \quad (13)$$

$$UF = \frac{V_2}{V_1} \times 100 [\%] \quad (14)$$

$$MF = \frac{V_1}{V_{ref}} \times 100 [\%] \quad (15)$$

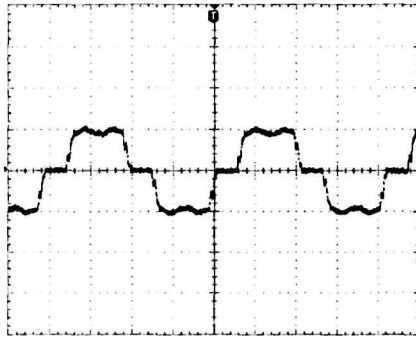
식 (13)에서 I_1 은 전류의 기본파 실효치를 I_n 은 전류의 n차 고조파 실효치를 나타내며, 식 (14)에서 V_1 과 V_2 는 각각 전압의 정상분과 역상분을 그리고 식 (15)에서 V_{ref} 는 정격 전압을 나타낸다.

4.1 고조파 전류 보상의 경우

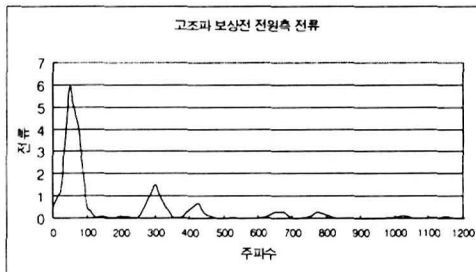
먼저 고조파 전류 보상 알고리즘만 적용한 경우의 보상 결과를 보였다. 전원 전압은 평형한 3상 전원이고, 부하도 3상 평형 부하이므로 3상의 전류는 각각 같은 양상을 보인다. 따라서, 보상 전과 후의 전류 파형은 a상 전류 파형을 대표로 보이도록 하였다.

그림 3은 고조파 전류를 보상하기 전의 a상의 전원측 전류와 그 주파수 분석(FFT ; Fast Fourier Transform) 파형을 나타내고 있다. 비선형 부하에 의해 전류가 많은 고조파를 포함하고 있음을 알 수 있다. 분석 결과 THD 는 32.27%로

매우 높은 수치를 나타내고 있다.



(a) Source current waveform
(10A/div, 4ms/div)

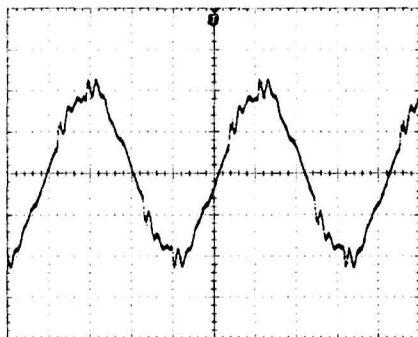


(b) FFT analysis of source current

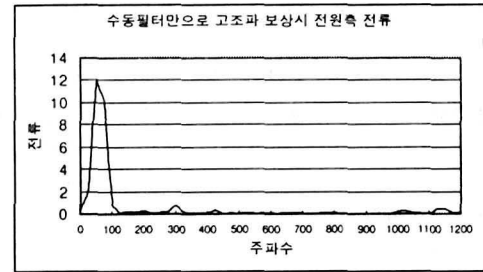
그림 3 고조파 보상 전 전원 전류와 주파수 분석

Fig. 3 A source current and its FFT analysis before harmonic compensation

그림 4는 병렬형 수동전력필터만을 사용하여 보상하였을 경우의 a상의 전원 전류와 그 주파수 분석 결과를 나타내고 있다. 전원 전류가 많이 개선되었지만 여전히 미흡함을 볼 수 있다. 분석 결과 THD는 10.08%로 나타난다.



(a) Source current waveform
(10A/div, 4ms/div)

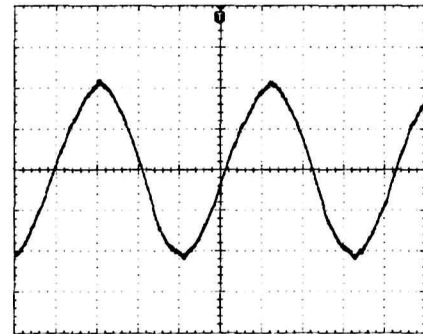


(b) FFT analysis of the source current

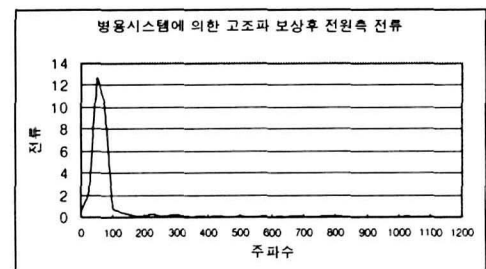
그림 4 수동필터만으로 고조파 보상 후 전원 전류와 주파수 분석

Fig. 4 A source current and its FFT analysis after harmonic compensation by shunt passive filters

그림 5는 병렬형 수동전력필터와 직렬형 능동전력필터의 병용 시스템에 고조파 전류 보상 알고리즘만을 적용한 후의 a상 전원 전류와 그 주파수 분석을 나타내고 있다. 전원 전류는 거의 완전한 정현 파형으로 개선되었으며, 고조파도 거의 제거되었음을 볼 수 있다. 분석 결과THD는 2.3%로 수치 상으로도 우수한 보상 특성을 보임을 확인 할 수 있다.



(a) Source current waveform
(10A/div, 4ms/div)



(b) FFT analysis of the source current

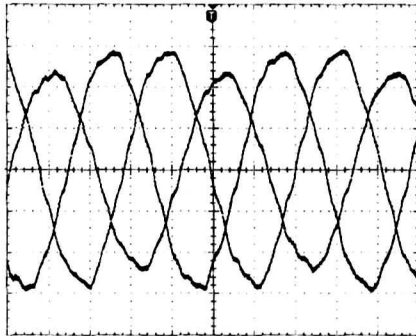
그림 5 병용시스템으로 고조파 보상 후 전원 전류와 주파수 분석

Fig. 5 A source current and its FFT analysis after harmonic compensation by combined system

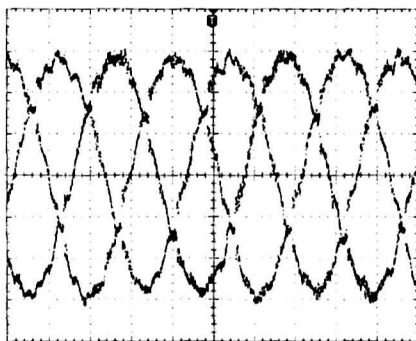
4.2 고조파 전류 및 불평형 전원 전압 보상의 경우

다음은 고조파 전류 보상과 불평형 전원 전압 보상을 동시에 수행하였을 경우의 결과를 보여준다. 전원 전압의 불평형 조건을 만들기 위하여 전원측의 슬라이더스 변압기를 조정하였으며, 단상 전압 강하와 2상 전압 강하의 경우를 실험하였다. 부하는 앞서와 마찬가지로 3상 평형 부하인 3상 다이오드 정류기를 사용하였다.

그림 6은 단상 전압 강하의 경우 전원 전압과 보상후의 부하측의 전압을 나타내고 있다. 전원 전압의 불평형 계수는 7.14%, 크기 계수는 93.33% 인 상태이고 보상 후 부하측의 전압은 불평형 계수는 1.17%, 크기 계수는 100.37%로 나타나고 있다. 제안하는 알고리즘에 의해 부하측 전압이 전원측 전압의 불평형을 극복하고 평형한 전압 상태를 보임을 알 수 있다. 하지만, 직렬형 능동전력필터가 불평형 전원 전압 보상을 위한 성분뿐 아니라 고조파 전류를 보상하기 위한 전압 성분도 포함하고 있기 때문에 보상 후 부하측의 전압이 깨끗한 정현 파형을 보이지는 않는 것을 볼 수 있다.



(a) Unbalanced source voltages
(50V/div, 4ms/div)

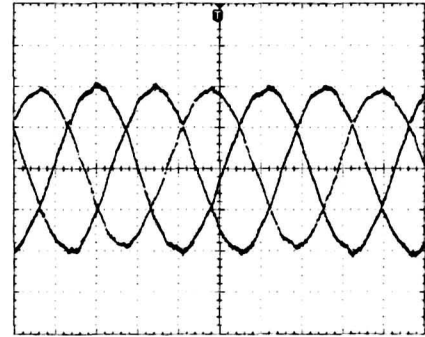


(b) 3-phase load voltages after
voltage compensation
(50V/div, 4ms/div)

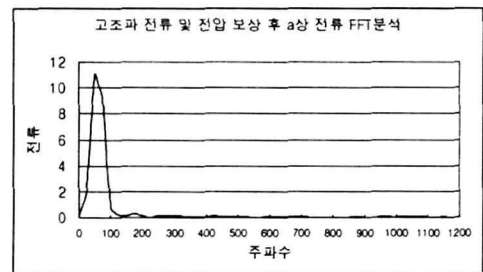
그림 6 3상 불평형 전원 전압과 불평형
보상 후의 부하측 3상 전압

Fig. 6 3-phase unbalanced source
voltages and load voltages after
unbalance voltage compensation

그림 7은 그림 6의 전원 전압 상태에서 고조파 전류와 불평형 전원 전압 보상을 실시했을 경우의 전원측의 3상 전류를 나타내고 있다. THD는 3.05%로 고조파만 보상했을 경우 보다는 0.5%정도 높아 졌지만 여전히 우수한 고조파 보상 특성을 보임을 알 수 있다.



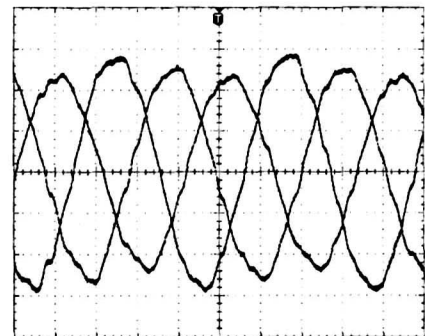
(a) 3-phase source currents
(10A/div, 4ms/div)



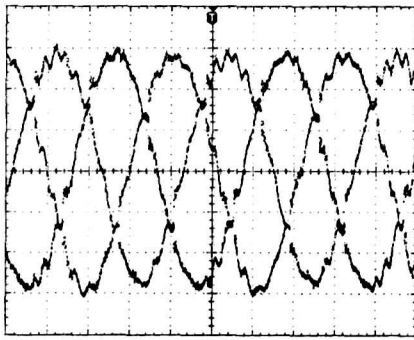
(b) FFT analysis of the phase a
source current

그림 7 그림 6의 전압 조건에서 전류 및 전압
보상 후 3상 전원 전류와 a상에 대한
주파수 분석 결과

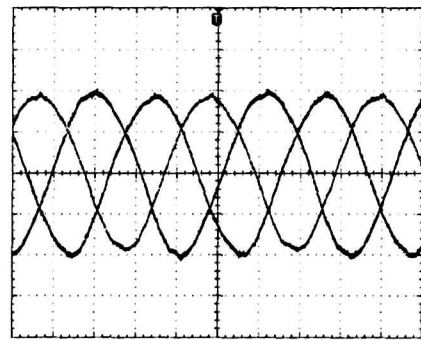
Fig. 7 Three phase source currents and FFT
analysis after current and voltage
compensation in the source voltage
condition of fig 6



(a) Unbalanced source voltages
(50V/div, 4ms/div)



(b) 3-phase load voltages after
voltage compensation
(50V/div, 4ms/div)



(a) 3-phase source currents
(10A/div, 4ms/div)

그림 8 3상 불평형 전원 전압과 불평형
보상 후의 부하측 3상 전압

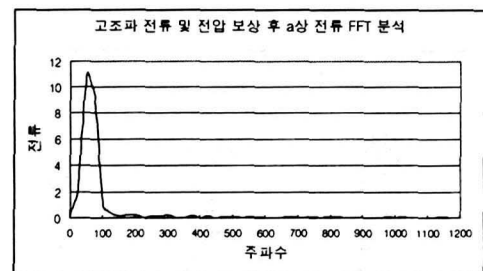
Fig. 8 3-phase unbalanced source
voltages and load voltages after
unbalance voltage compensation

그림 8은 2상 전압 강하의 경우를 보이고 있다. 보상 전 불평형 계수는 6.42%, 크기 계수는 89.99% 이었으나 보상 후 부하측 전압은 불평형 계수는 1.3%, 크기 계수는 99.56%로 나타나고 있다. 앞서와 마찬가지로 제안하는 불평형 전압 보상 알고리즘에 의해서 우수한 보상 특성을 얻을 수 있었다.

그림 9는 보상 후의 3상 전원 전류와 a상에 대한 주파수 분석 결과를 나타내고 있다. 분석 결과 THD는 3.12%로 역시 우수한 고조파 보상 특성을 알 수 있다.

실험 결과 비선형 부하에 의한 전류 고조파는 수동전력필터에 의해서 감소되었으나 미흡한 수준의 보상 결과를 보였다. 하지만 제안하는 고조파 전류 보상 알고리즘을 적용한 직렬형 능동전력필터와의 병용 시스템에서는 2% ~ 3% 정도의 THD분포를 보임으로써 좀 더 우수한 보상 특성을 얻을 수 있었다. 또한 제안하는 전원 전압 불평형 보상 알고리즘과 함께 작용하였을 경우에도 고조파 전류 보상 성능에 큰 차이가 없었다. 단지, 전원측 전압이 불평형 해짐에 따라 계통에 약간의 3고조파가 흐르게 되어서 0.5% 정도의 THD 증가 요인이 생겼다. 그리고 제안하는 전원 전압 불평형 보상 알고리즘에 의해 전원측의 전원 상태에 무관하게 부하측의 전압을 일정 크기의 평형한 3상 전원 상태로 유지할 수 있었으며, 불평형 계수와 크기 계수가 각각 0%와 100%에 근사한 보상 결과를 보임으로써 제안하는 보상 알고리즘의 우수한 보상 특성을 확인하였다.

다음의 그림 10, 11, 12에서는 보상 전과 후의 전원전류 THD와 부하측 전압의 불평형 계수, 크기 계수를 도표로 정리하였다.



(b) FFT analysis of the phase a
source current

그림 9 그림 8의 전압 조건에서 전류 및 전압
보상 후 3상 전원 전류와 a상에 대한
주파수 분석 결과

Fig. 9 Three phase source currents and FFT
analysis after current and voltage
compensation in the source voltage
condition of fig 8

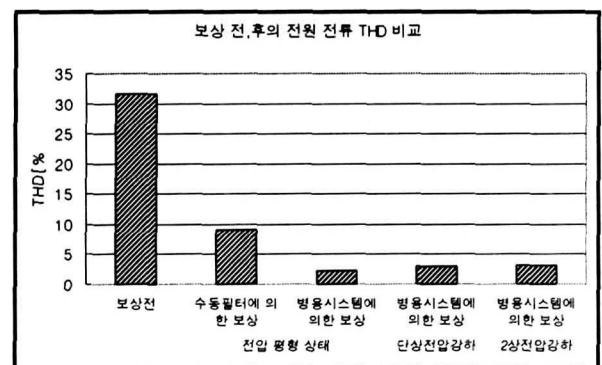


그림 10 보상 전 · 후의 전원 전류 THD 비교

Fig. 10 A Comparison of source current THD before
and after compensation

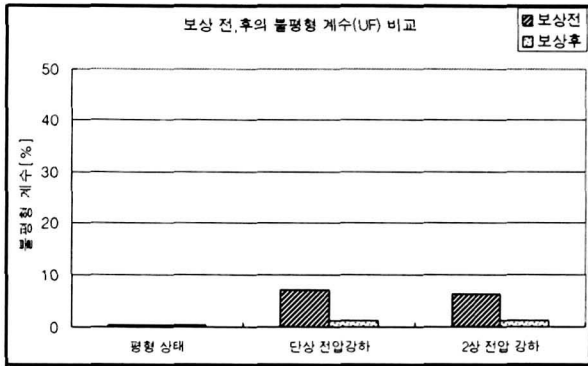


그림 11. 보상 전·후의 부하 전압 불평형 계수(UF) 비교

Fig. 11 A Comparison of load voltage unbalance factor before and after compensation

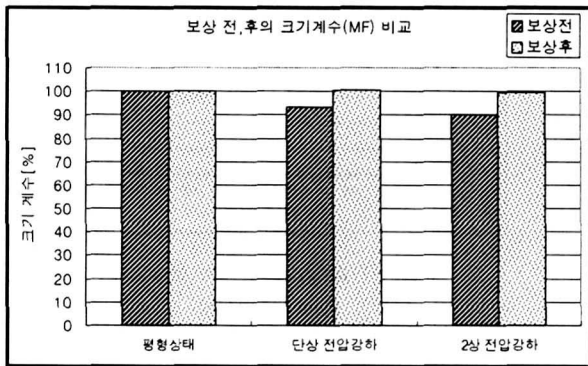


그림 12 보상 전·후의 부하 전압 크기 계수(MF) 비교

Fig. 12 A Comparison of load voltage magnitude factor before and after compensation

5. 결 론

본 논문에서는 불평형 전원 전압 보상 기능을 갖는 직렬형 능동전력필터의 제어 알고리즘을 제안하고 그 타당성을 증명하였다.

고조파 전류 보상 알고리즘은 순시 유효, 무효 전력 이론을 바탕으로 하는 알고리즘으로써, 기존의 제어 알고리즘이 고조파 전류를 구하고 그것에 일정 계인값을 곱하여 보상 전압을 얻어내던 것과 달리, 제안하는 알고리즘은 연산된 유효·무효 전력으로부터 보상 전압을 직접 얻어내므로 좀 더 쉽게 보상 전압을 얻어낼 수 있었다. 전압 보상 알고리즘은 부하측의 3상 전압을 이용하는 것으로 궤환 제어에 의해 부하측 전압을 보다 안정적으로 계통에서 원하는 평형상태로 만들어 줄 수 있도록 하였다. 전원 전압 불평형을 보상하기 위해 전원측의 3상 전압을 이용하고, 부하측 전압의 크기를 일정하게 유지하기 위해 부하의 3상 전압을 이용하던 기존의 방법에 비하여 제안하는 알고리즘은 더 효과적이고 경제적으로 원하는 성과를 얻어낼 수 있었다.

제안한 알고리즘을 직렬형 능동전력필터와 병렬형 수동전력필터의 병용시스템에 적용하여 그 효용성을 확인하였으며, 두 가지의 알고리즘이 조화롭게 작용하여 고조파 전류 보상

은 물론, 불평형 전압 보상과 부하 전압 크기 조정의 기능을 수행할 수 있음을 확인하였다. 이것은 직렬형 능동전력필터의 활용도를 극대화함으로써 보다 저렴하게 전력 품질의 개선에 접근할 수 있음을 보인 것으로, 본 연구의 결과는 앞으로 전력 품질 개선을 위한 보상 시스템의 구성에 있어서 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] F. Z. Peng, H. Akagi and A. Nabae, "A New Approach to Harmonic Compensation in Power System - A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filter", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 26, no. 6, pp. 983 ~ 990, 1990
- [2] F. Z. Peng, Jih-Sheng Lai "Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three Phase Power Systems", IEEE Trans. Instru. and Meas., vol. 45, No. 1, pp. 293 ~ 297, 1996
- [3] Zhaoan Wang, Qun Wang, "A Series Active Power Filter Adopting Hybrid Control Approach", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 16, no. 3, pp. 301 ~ 310, 2001
- [4] S. Bhattacharya, D. M. Divan and B. Banerjee, "Synchronous frame harmonic isolator using active series filter", EPE FRENZE Conf. Record, vol. 3, pp. 30 ~ 35, 1991
- [5] F. Z. Peng, H. Akagi and A. Nabae, "Compensation Characteristics of the Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29, no. 1, pp. 144 ~ 152, 1993
- [6] A. Campos, G. Joos, P. D. Ziogas and J. F. Lindsay, "Analysis and Design of a Series Voltage Unbalance Compensator Based on a Three-Phase VSI Operating With Unbalanced Switching Functions", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 9, no. 3, pp. 269 ~ 274, 1994
- [7] K. Haddad and G. Joos, "Distribution System Voltage Regulation under Fault Conditions Using Static Series Regulators", IEEE IAS Conf. Record, pp. 1383 ~ 1389, 1997
- [8] Ambrish Chandra, B. N. Singh, "An Improved Control Algorithm of Shunt Active Filter for Voltage Regulation, Harmonic Elimination, Power Factor Correction, and Balancing of Nonlinear Loads", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 15, no. 3, pp. 495 ~ 507, 2000
- [9] L. Moran, I. Pastorini, J. Dixon and R. Wallace, "Series active power filter compensates current harmonics and voltage unbalance simultaneously", IEE Proc.-Gener.

- Transm. Distrib., vol. 147, no. 1, pp. 31 ~ 36, 2000
- [10] F. Z. Peng, "Application Issues of Active Power Filters", IEEE Industry Application Magazine, Sep./Oct. pp. ~ 30, 1998
- [11] Peter Vas, "Vector Control of AC Machines", CLARENDON PRESS, 1990

- [12] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 20, pp. 625 ~ 630, 1984

저 자 소 개



오 재 훈 (吳在勳)

1974년 8월 20일 생. 2000년 2월 인하대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 032-860-7397, Fax : 032-863-5822

E-mail : activefilter@hanmail.net



한 윤 석 (韓潤錫)

1972년 8월 5일 생. 1995년 2월 인하대 전기공학과 졸업. 1997년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 (주)아크로센스 선임 연구원

Tel : 032-860-7397, Fax : 032-863-5822

E-mail : yoonseokhan@hanmail.net



김 영 석 (金榮石)

1951년 6월 11일 생. 1977년 인하대 전기공과 졸업. 1987년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1987년~1989년 전기연구원 전력전자연구실장. 현재 인하대 전기공학과 교수

Tel : 032-860-7397, Fax : 032-863-5822

E-mail : youngsk@inha.ac.kr



원 충 연 (元忠淵)

1955년 5월 10일 생. 1978년 성균관대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1991년~1992년 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문교수. 1988

년 3월~현재 성균관대 전기전자 및 컴퓨터 공학부 교수

Tel : 031-290-7115, Fax : 031-290-7169

E-mail : won@yurim.skku.ac.kr



최 세 완 (崔世琬)

1963년 3월 3일 생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 1992년 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~1997년 삼성전기 종합연구소 수석연구원. 1997년~현

재 서울산업대 제어계측공학과 조교수

Tel : 02-970-6542, Fax : 02-949-2654

E-mail : schoi@duck.snut.ac.kr