

직·병렬 능동 전력필터 시스템을 이용한 불평형 전원전압 보상

論 文

56-4-11

The Compensating Unbalanced Source Voltages for Unified Active Power Filter System

姜旻衡^{*} · 金榮石^{*}

(Min-Hyung Kang · Young-Seok Kim)

Abstract - This paper suggests of a 3-phase 3-wire unified active power filter. The system is composed of a series active power filter and a parallel active power filter. The proposed series active power filter compensating unbalance source voltage and current harmonics of the parallel active power filter improves power factor. The proposed algorithm which improves for power factor and harmonic reduction are calculated by the performance function, and which compensates for the unbalanced source voltage is calculated based on the symmetrical component analysis. We composed a combined system of the series active power filter and parallel active power filter to confirm a validity of the proposed control methods. The effectiveness of the proposed algorithm is confirmed by the experiments.

Key Words : Unified active power filter, Voltage unbalance, Current harmonics, Power factor, Performance function

1. 서 론

최근 전력품질 문제에 의해 발생하는 피해사례가 늘어나면서 전력품질에 대한 소비자의 관심이 증가하고 있다. 따라서, 이러한 소비자의 요구에 대처해 손실을 줄여야 하는 전력품질 개선을 위한 시스템 도입이 가장 시급하다. 전력품질의 개선은 앞으로 전력사업의 경쟁체제하에서 가장 중요한 부분을 차지하게 될 것이며, 전력 공급업자 역시 개선된 전력품질을 소비자에게 공급하여야 할 것이다[1]. 전력품질의 문제는 크게 전류와 전압의 문제로 구분 지을 수 있는데, 그 중 전류의 문제는 고조파와 역률 저하 등이 있으며, 전압의 문제로는 순간 정전, 순간전압강하, 순간전압 상승, 3상의 전원전압 불평형 등이 있다. 전원전압의 불평형으로 인해 발생하는 문제는 순간전압강하에 의한 문제와 전류 고조파에 의한 문제보다 직접적이고 그 규모도 크다 할 수 있다. 전압의 문제로 인해 각종 컴퓨터 시스템으로 동작하는 기기들이 민감한 부하의 오동작이나 고장 등을 유발할 수 있으며, 비선형 부하에 저주파수의 고조파를 발생시키고, 시스템의 용량을 증대시키는 요인으로 작용할 수 있다[2][3]. 이러한 시대의 흐름에 따라 전력품질 개선에 대한 많은 관심과 함께 UPQC(Unified Power Quality Conditioner)에 대해 많은 연구가 진행되어지고 있다.

UPQC에 대한 종류를 살펴보면, 고조파 전류를 직접 주입해주는 병렬형 능동전력필터와 결합 변압기를 통해서 보상전압을 주입하는 방식의 직렬형 능동전력필터 그리고 직렬형, 병렬형 능동전력필터의 결합형인 직·병렬 능동전력필

터 등으로 나눌 수 있다[4]. 병렬형 능동전력필터의 경우 다이오드 정류기의 부하단에 인덕터 성분이 크면, 부하에 일정 전류가 흐르게 되어 전류를 주입함으로써 적절한 보상이 가능하게 된다. 하지만 커패시터와 같은 성분이 존재하여 용량성 부하가 될 경우에는 부하측이 고조파 전압원으로 작용하고, 능동전력필터가 주입하는 보상 전류가 부하측에도 흐르게 되므로 고조파를 제거할 수 없음은 물론 직렬 공진에 의해 오히려 다이오드 정류기에 흐르는 고조파 전류를 증대시켜 과전류를 초래할 위험이 있다. 그러므로 병렬형 능동전력필터에 직렬 리액터를 삽입하여 이를 보완하고자 하는 연구가 진행되었으나 이는 전압강하를 일으킬 뿐만 아니라 비경제적이다. 이러한 문제들을 해결하고자 직렬형 능동전력필터가 새로이 연구되었다. 직렬형 능동전력필터는 시스템에 결합변압기를 이용하여 직렬로 접속되어 고조파에 대해 큰 임피던스로 작용하여 이를 차단시키는 효과가 있다. 이로 인해 용량성 부하에 대해서도 효과적인 고조파 보상을 가능하게 했으며, 또한 각종 사고에 의한 전원전압 상승, 강하 등의 전원전압 변동에 대해서도 우수한 보상 특성을 보여준다[5]-[7]. 현재 이러한 능동전력필터들의 장점을 취합하여 전력품질 개선을 위해 직·병렬 능동전력필터 시스템에 대한 연구가 활발히 연구 중이다. 직·병렬 능동전력필터는 직렬형 능동전력필터와 병렬형 능동전력필터의 결합형으로서 직류 커패시터를 공유하는 형태로 구성되어 있으며, 선로 상에서 발생하는 전압변동, 고조파보상, 역률개선 등의 기능을 수행할 수 있으며, 병렬형이나 직렬형의 능동전력필터를 하나만 사용하는 것보다 필요한 용량이 적어 경제적이란 점이 있다[8]-[10].

본 논문에서는 직·병렬 능동전력필터의 구성 형태로, 고조파 전류원의 부하상태에서 발생빈도와 영향이 가장 큰 고조파와 역률을 보상하고, 동시에 불평형 전원전압을 보상할 수 있게 되어 있으며, 직렬형 능동전력필터에서 전압품질 문

[†] 교신저자, 正會員 : 仁荷大 工大 電氣工學科 碩士
E-mail : ddanggu79@hanmail.net

^{*} 正會員 : 仁荷大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博
接受日字 : 2006年 11月 13日
最終完了 : 2007年 1月 22日

제를, 병렬형 능동전력필터에서는 전류품질 문제를 다룰 수 있게 구성되어 있다. 제안된 알고리즘은 능동전력필터와 무효전력의 관계를 이용하여 성능함수를 정의하였으며, 이 성능함수를 최소화함으로써 전원측에 발생하는 고조파를 최소화하고 역률을 개선시킬 수 있게 하였다. 그리고 전원단에 발생한 전압의 변동 문제 발생시에도 보상 작용을 할 수 있도록 대칭좌표법을 이용한 알고리즘을 실험을 통해 증명하였다. 본 실험은 직·병렬 능동전력필터 12kVA 축소형 시스템을 구성 후 제작하여 수행하였으며, 실험 결과를 통해 제안된 알고리즘과 시스템의 유효성을 입증하였다.

2. 보상원리

2.1 직렬형 능동 필터의 보상 원리

기존의 능동전력필터의 제어에서 다루어왔던 순시 무효전력은 부하에 의해 발생된 무효전력을 의미했지만 본 절에서 제안하는 알고리즘에서는 능동전력필터로부터 발생된 무효전력을 순시무효전력이라 정의한다. 이는 전력 시스템 상의 어느 한 상을 통해서 능동전력필터로 유입되는 전력은 다른 상으로 즉시 공급되므로 능동 전력필터는 유효전력을 발생하지 않기 때문에 유효한 것이다.

따라서, 새롭게 정의된 순시무효전력 q_k 는 능동 전력필터의 각 상에서 발생되는 전력으로 나타낸다.

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

식 (1)에서 k 는 3상의 각 상을 나타내는 a상, b상, c상이며, v_{ck} 는 능동 전력필터가 발생시키는 각 상의 보상 전압, i_{sk} 는 각 상의 전원 전류를 나타낸다. 또한, 능동전력필터는 순시유효전력을 발생하지 않으므로, 능동전력필터에서 발생되는 모든 전력은 부하로 전달되지 않고, 각 상 사이에서 회전하는 무효전력 성분이 된다. 따라서 식 (1)을 식 (2)와 같이 능동전력필터에서 발생되는 전력의 합을 0으로 나타낼 수 있다.

$$\sum_{k=a,b,c} q_k = v_{ca}i_{sa} + v_{cb}i_{sb} + v_{cc}i_{sc} = 0 \quad (2)$$

본 논문에서 다루는 3상 3선식 전력계통의 경우는 전원전압이 평형인 경우 중성선이 존재하지 않기 때문에 3상 전압과 전류의 영상분이 존재하지 않는다. 따라서 능동전력필터에서 발생되는 보상 전압은 또한 다음의 식 (3)을 만족한다.

$$v_{ca} + v_{cb} + v_{cc} = 0 \quad (3)$$

능동전력필터의 보상 전압은 식 (2)와 식 (3)을 만족하면서 다음에 정의하는 성능함수를 최소화시키는 전압으로 결정된다.

$$L = (v_{La} - v_{ca})^2 + (v_{Lb} - v_{cb})^2 + (v_{Lc} - v_{cc})^2 \quad (4)$$

식 (4)에서 v_{La} , v_{Lb} , v_{Lc} 는 각 상의 부하 전압을 나타내며, 각 항들은 각 상 부하 전압과 보상 전압의 차의 제곱의 형태를 갖는다. 부하 전압은 보상 전압의 첨가로 인하여, 고조파 성분이 제거되어 정현파의 형태를 갖게 되며, 부하 전압이 정현파에 가까워질수록 식 (4)는 최소값이 된다. 그러므로 3상 3선식 시스템에서 고조파 전압원으로 동작하는 용량성 부하에 의해 발생된 고조파를 능동전력필터에서 보상하기 위해, 식 (4)의 성능함수를 최소화하는 v_{ca} , v_{cb} , v_{cc} 를 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 식 (5)를 통해 유도해 내야만 한다.

$$\frac{dL}{dv_{ca}} = 0, \frac{dL}{dv_{cb}} = 0, \frac{dL}{dv_{cc}} = 0 \quad (5)$$

식 (5)를 통해 유도된 v_{ca} , v_{cb} , v_{cc} 는 제안된 능동전력필터의 보상 지령 전압으로 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} v_{ca} &= \frac{\sqrt{3}(i_{sb} - i_{sc}) \cdot q}{2(i_{sa}^2 + i_{sb}^2 + i_{sc}^2 - i_{sa}i_{sb} - i_{sb}i_{sc} - i_{sc}i_{sa})} \\ v_{cb} &= \frac{\sqrt{3}(i_{sc} - i_{sa}) \cdot q}{2(i_{sa}^2 + i_{sb}^2 + i_{sc}^2 - i_{sa}i_{sb} - i_{sb}i_{sc} - i_{sc}i_{sa})} \\ v_{cc} &= \frac{\sqrt{3}(i_{sa} - i_{sb}) \cdot q}{2(i_{sa}^2 + i_{sb}^2 + i_{sc}^2 - i_{sa}i_{sb} - i_{sb}i_{sc} - i_{sc}i_{sa})} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} \{ (i_{sb} - i_{sc})v_{La} + (i_{sc} - i_{sa})v_{Lb} + (i_{sa} - i_{sb})v_{Lc} \} \quad (7)$$

식 (6)은 식 (2)의 조건을 만족함으로써 얻어진 결과식이므로, 식 (7)의 순시무효전력 q 는 기존의 'p-q 이론'에서의 순시무효전력의 정의식인 식(8)에 식 (9)와 식 (10)을 대입하여 연산함으로써 증명할 수 있다.

$$q = v_{La}i_{sb} - v_{Lb}i_{sa} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} v_{La} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left[v_{La} - \frac{1}{2}v_{Lb} - \frac{1}{2}v_{Lc} \right] \\ v_{Lb} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\frac{\sqrt{3}}{2}v_{Lb} - \frac{\sqrt{3}}{2}v_{Lc} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} i_{sa} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left[i_{sa} - \frac{1}{2}i_{sb} - \frac{1}{2}i_{sc} \right] \\ i_{sb} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\frac{\sqrt{3}}{2}i_{sb} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{sc} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} q &= \frac{1}{\sqrt{3}} (v_{La}i_{sb} + v_{Lb}i_{sc} + v_{Lc}i_{sa} - v_{La}i_{sc} - v_{Lb}i_{sa} - v_{Lc}i_{sb}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} \{ (i_{sb} - i_{sc})v_{La} + (i_{sc} - i_{sa})v_{Lb} + (i_{sa} - i_{sb})v_{Lc} \} \end{aligned} \quad (11)$$

따라서, 보상 지령 전압 안에는 순시무효전력의 직류성분과 교류성분을 모두 포함하고 있으며, 고조파만 보상할 경우 순시무효전력의 교류성분만을 보상 성분으로 사용하면 된다. 그러므로 고조파 보상을 위한 능동전력필터의 최종 보상 지령 전압은 다음의 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned}
 V^*C_a &= \frac{\sqrt{3}(i_{sb}-i_{sc})\bar{q}}{2(i_{sa}^2+i_{sb}^2+i_{sc}^2-i_{sa}i_{sb}-i_{sb}i_{sc}-i_{sc}i_{sa})} \\
 V^*C_b &= \frac{\sqrt{3}(i_{sc}-i_{sa})\bar{q}}{2(i_{sa}^2+i_{sb}^2+i_{sc}^2-i_{sa}i_{sb}-i_{sb}i_{sc}-i_{sc}i_{sa})} \\
 V^*C_c &= \frac{\sqrt{3}(i_a-i_{sb})\bar{q}}{2(i_{sa}^2+i_{sb}^2+i_{sc}^2-i_{sa}i_{sb}-i_{sb}i_{sc}-i_{sc}i_{sa})}
 \end{aligned} \tag{12}$$

그림 1은 직렬형 능동전력필터에서 제안된 제어 알고리즘의 제어 블록다이어그램을 나타낸다. 3상 전원전류와 3상 부하전압으로부터 식 (7)에 의해 순시무효전력 q 를 연산하고, 이를 저역통과 필터를 통해 순시무효전력의 직류 성분을 검출해 내어 이를 다시 순시무효전력에서 빼줌으로써 순시무효전력의 교류성분 \bar{q} 를 검출한다. 이렇게 얻어진 보상치와 대칭좌표법을 이용하여 구한 전압의 지령치와 비교하여 최종적인 보상전압 성분을 도출해 낸다. 이렇게 산출되어 얻어진 보상전압으로 전원전압의 불평형에 대한 부하 보상과 고조파 성분에 대한 보상을 한다.

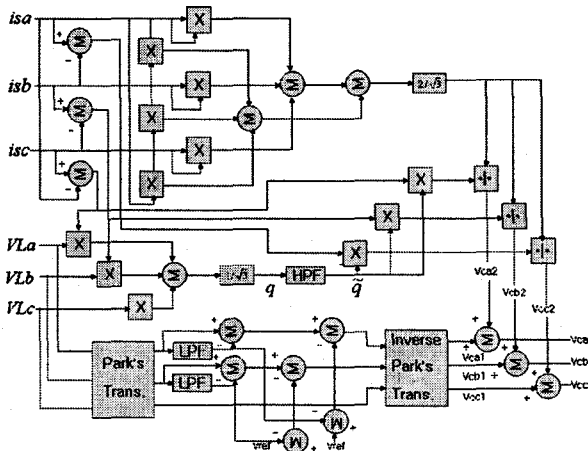


그림 1 직렬형 능동전력필터의 제어 알고리즘
Fig. 1 Control algorithm of the series active power filter.

2.2 병렬형 능동 필터의 보상 원리

역률 보상을 위한 제어는 병렬형 능동전력필터에서 수행하며, 보상 목적이 역률 개선에 있으므로, 순시무효전력의 직류성분 \bar{q} 만을 구해 보상해 준다. 직렬형 능동전력필터의 보상치를 구하는 방법과 같은 이론에서 출발하여 보상치를 도출해내며, 역률 개선을 위한 병렬형 능동전력필터의 보상 전류를 구하면 다음의 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned}
 i_{Ca}^* &= \frac{\sqrt{3}(i_{sb}-i_{sc})\bar{q}}{2(i_{sa}^2+i_{sb}^2+i_{sc}^2-i_{sa}i_{sb}-i_{sb}i_{sc}-i_{sc}i_{sa})} \\
 i_{Cb}^* &= \frac{\sqrt{3}(i_{sc}-i_{sa})\bar{q}}{2(i_{sa}^2+i_{sb}^2+i_{sc}^2-i_{sa}i_{sb}-i_{sb}i_{sc}-i_{sc}i_{sa})} \\
 i_{Cc}^* &= \frac{\sqrt{3}(i_{sa}-i_{sb})\bar{q}}{2(i_{sa}^2+i_{sb}^2+i_{sc}^2-i_{sa}i_{sb}-i_{sb}i_{sc}-i_{sc}i_{sa})}
 \end{aligned} \tag{13}$$

그림 2는 병렬형 능동전력필터의 역률 보상을 위해 제안된 알고리즘의 제어 블록다이어그램을 나타낸다. 3상 부하전압과 3상 전류전원으로부터 순시무효전력 q 를 연산하고 이를 저역통과 필터를 통해 순시무효전력의 직류성분 \bar{q} 를 검출해 낼 수 있다.

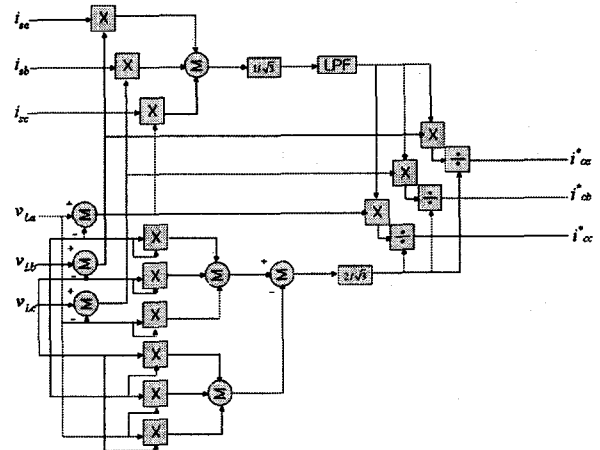


그림 2 병렬형 능동전력필터의 제어 알고리즘
Fig. 2 Control algorithm of the parallel active power filter.

2.3 불평형 전원 전압 보상 원리

불평형 전원전압은 대칭좌표법에 의하여 아래의 식 (14)과 같이 정상분, 역상분 그리고 영상분의 세 가지 요소로 나뉘어 질 수 있다. 3상 전압이 평형 하다면 정상분만이 나타나게 되지만, 불평형 할 경우에는 정상분 외에 역상분과 영상분이라는 성분이 나타난다. 그러므로 보상기에 의해서 역상분과 영상분을 보상해 준다면 불평형 한 전압은 평형한 상태로 회복될 것이며, 또한 정상분의 크기를 조정해 준다면 3상 전압의 크기를 원하는 만큼 조정할 수 있게 된다.

$$\begin{pmatrix} V_{ah} \\ V_{bh} \\ V_{ch} \end{pmatrix} = V_1 \begin{pmatrix} \sin \omega t \\ \sin \left(\omega t - \frac{2}{3}\pi \right) \\ \sin \left(\omega t + \frac{2}{3}\pi \right) \end{pmatrix} + V_2 \begin{pmatrix} \sin \omega t \\ \sin \left(\omega t + \frac{2}{3}\pi \right) \\ \sin \left(\omega t - \frac{2}{3}\pi \right) \end{pmatrix} + V_0 \begin{pmatrix} \sin \omega t \\ \sin \omega t \\ \sin \omega t \end{pmatrix} \tag{14}$$

식 (14)에서 첨자 1은 정상분, 첨자 2는 역상분, 첨자 0은 영상분을 각각 나타낸다. 제안하는 알고리즘은 부하측 3상 전압을 센싱하고, 그것을 식 (15)의 Park's 변환식을 이용하여 회전좌표로 변환하고 간단한 필터링에 의하여 역상분과 영상분을 검출해 낸다. 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 (14)와 같이 정상분, 역상분 그리고 영상분으로 구성되고, 식 (15)의 Park's 변환식을 이용하여 회전좌표로 좌표변환하면 식 (16)과 같이 나타난다.

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos wt & \cos\left(wt - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(wt + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin wt & \sin\left(wt - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(wt + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (15)$$

변환된 결과인 식 (16)에서 볼 수 있듯이 $d-q-0$ 축으로 표현되는 정상분에 동기하는 회전좌표 상에서 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 정격전압과 비교하여 부하 전압조정을 위한 지령 전압을 구하는데 사용한다.

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{pmatrix} = [P] \begin{pmatrix} V_{La} \\ V_{Lb} \\ V_{Lc} \end{pmatrix} \quad (15)$$

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

기존의 연구에서는 전원전압 불평형을 보상하기 위해서는 전원측의 전압을 이용하고, 부하 전압의 크기 조정을 위해서는 부하측의 전압을 이용하는 방법을 취하였다. 하지만 본 논문에서 제시하는 알고리즘은 부하측 전압에 의해서 전원전압의 불평형은 물론 부하 전압의 크기 조정까지 수행하고 있으며, 순시적으로 부하 전압을 센싱하고 보상전압을 연산하여 보상해 주기 때문에 전압보상이 궤환제어의 형태로서 수행되어 진다. 이것은 전원측 전압을 이용하여 불평형을 보상하는 경우보다 더 안정적으로 부하측 전압을 평형상태로 만들어 줄 수가 있다.

3. 시스템의 구성

본 논문에서는 직렬형 능동전력필터와 병렬형 능동전력필터를 병용하여 전력품질 개선하고자 통합된 능동전력필터 시스템을 그림 3에 제시하였다. 부하는 고조파 전류원 부하로 설정하여 3상 3선식 직·병렬 능동전력필터 시스템을 구성하였고, 직렬형 능동전력필터는 3상 전압형 PWM 인버터를 교류 전원과 비선형 부하 사이에 3개의 결합변압기로 계통에 직렬 접속하였고, 병렬형 능동전력필터는 3상 전류형

히스테리시스 인버터를 부하와 병렬로 계통에 접속하였다.

그림 4는 제안된 직·병렬 능동전력필터의 제어회로에 대한 블록 다이어그램을 나타내었다. PT(Power Transducer)와 CT(Current Transducer)를 통해 $\pm 10[V]$ 의 전압 값으로 변환되어 DSP로 입력된다. DSP에서는 이를 실제 전압, 전류 값으로 변환한 후에 각각의 제어알고리즘에 의해서 보상기준 값들을 연산해내게 된다. 연산된 보상 기준 값들은 다시 D/A 변환기를 통해 아날로그 신호로 변환되어 각 인버터의 PWM 발생회로로 넘겨지게 되고, 직렬형 능동전력필터의 PWM 회로에서 이 D/A 출력 신호와 삼각파를 비교하여 발생된 인버터 제어 신호가 구동회로를 거쳐 인버터를 구동시켜 주도록 제어회로를 구성 하였다. 병렬형 능동전력필터의 PWM 회로에서 이 D/A 출력신호와 인버터 출력전류로 히스테리시스 제어를 통해 인버터를 구동시켜 주도록 제어회로를 구성하였다. 또한, IGBT Drive IC를 사용해서 Gate Drive 회로를 구성하였으며 능동전력필터의 정확하고 신속한 제어를 위해 실시간 제어에 적합한 TI사의 TMS320C6701 DSP를 사용하여 제어 하였다.

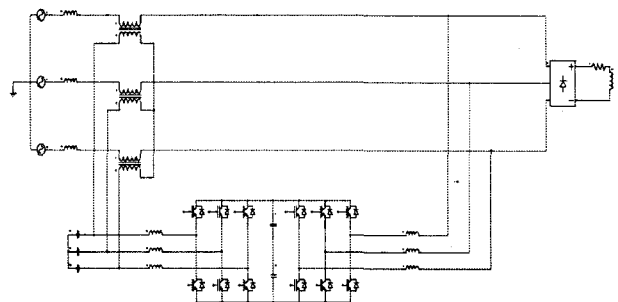


그림 3 직·병렬 능동전력필터
Fig. 3 Unified Active Power Filter.

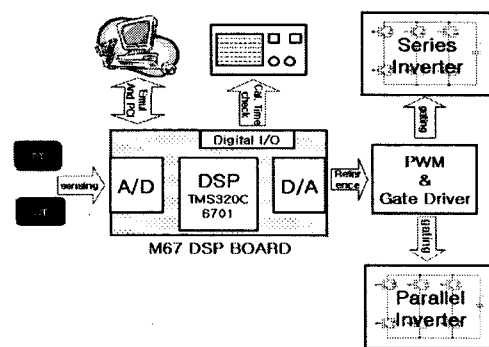


그림 4 직·병렬 능동전력필터 제어회로의 블록 다이어그램
Fig. 4 Block diagram of series-parallel active power filter control circuit.

표 1에는 실험을 위해 12kVA의 축소형 모델로 제작된 3상 3선식 직·병렬 능동전력필터 시스템의 회로 정수를 나타낸다.

표 1 시스템 회로 정수

Table 1 System parameter.

전원 전압 V_s	100[V], 60[Hz]
전원 인덕턴스 L_s	0.1[mH]
결합 변압기 권수비	2:1
부하 인덕턴스	15[mH]
부하 저항	30[Ω]
인버터 DC link 커패시턴스	4700[μF]

4. 실험결과

본 절에서는 고조파 전류원에 대한 실험 결과를 제시하였다. 즉, 3상 3선식 직·병렬 능동전력필터를 사용하여 고조파 전류원에서의 고조파와 역률에 대한 보상전과 보상 후 파형들을 보여주고 있으며, 다음으로 각종 사고 등의 이유로 전원단의 전압이 강하하여 부하단인 산업 시스템 등에 전원 불평형 등의 문제가 발생하는 경우 이를 보상하고자 직렬형 능동 전력필터에서 불평형 전원전압 보상을 실시하였다.

4.1 고조파 제거와 무효전력 보상

그림 5는 3상 3선식 직·병렬 능동전력필터의 고조파 전류원에서의 a상 보상전 전원단 전압과 전류 파형이다. 전류 THD(Total Harmonic Distortion)는 22.4%이며, 역률은 약 0.94이다. 그림 6은 a상 전류의 보상전 고조파 스펙트럼파형이다. 고조파 전류원 부하에 의해 전원단 전압과 전류 파형이 상당히 왜곡되어 있음을 알 수 있다.

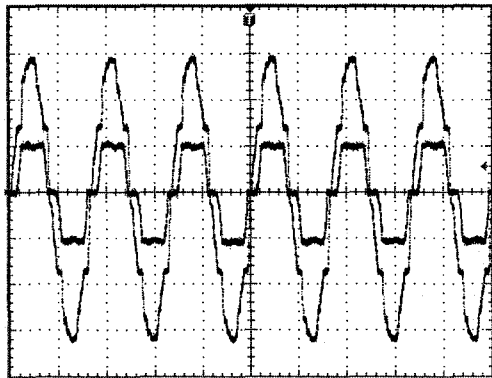


그림 5 3상 3선식 고조파 전류원 부하시 보상전 파형
Fig. 5 Source voltage and current waveforms in the 3-phase 3-wire harmonic current source before compensation. (10A/50V div, 10ms/div)

그림 7은 3상 3선식 직·병렬 능동전력필터 시스템에 성능함수를 이용한 제어 알고리즘을 적용하여 고조파와 무효전력이 보상된 a상의 전원단 전압과 전류 파형이다. 전류 THD는 2.24%이고 역률은 0.992로써 거의 1이 됨을 알 수 있다. 그림 8은 a상 전류의 보상 후 고조파 스펙트럼 파형이고, 기본파 60Hz 성분만 존재함을 알 수 있다.

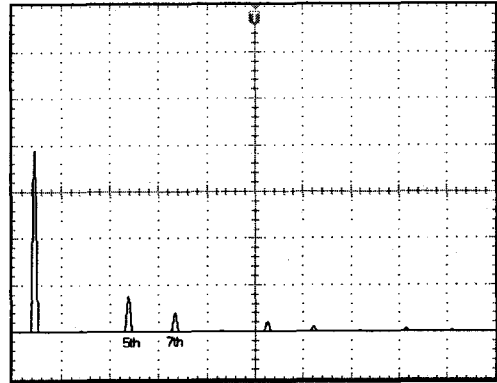


그림 6 고조파 전류원에 대한 고조파 스펙트럼
Fig. 6 Waveforms for the harmonic spectra current source before compensation. (2A/div, 125Hz/div)

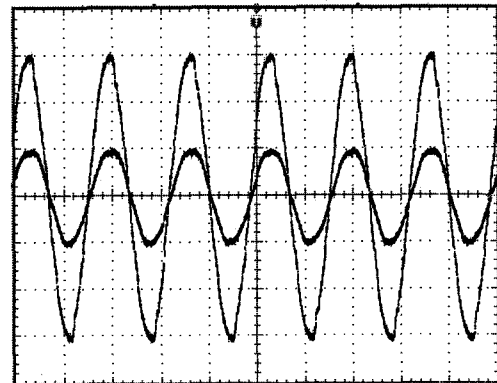


그림 7 3상 3선식 고조파 전류원 부하시 보상 후 파형
Fig. 7 Source voltage and current waveforms in the 3-phase 3-wire harmonic current source after compensation. (10A/50V div, 10ms/div)

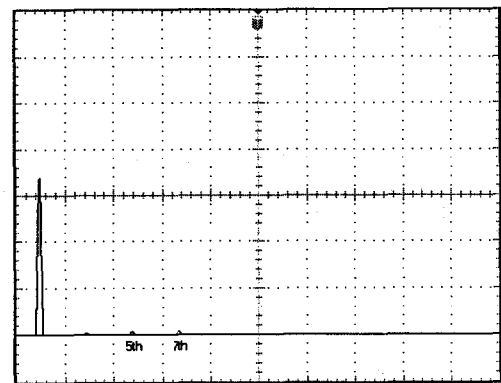


그림 8 보상 후 고조파 전류원에 대한 고조파 스펙트럼
Fig. 8 Waveforms for the harmonic spectra current source after compensation. (2A/div, 125Hz/div)

그림 9와 10은 성능함수 알고리즘에 의해 DSP에서 연산 후 출력된 각 능동전력필터의 기준파형이다. 직렬형 능동전력필터는 그림 9의 기준파형과 삼각파 비교방식을 사용하여 PWM신호를 발생시키고, 병렬형 능동전력필터는 그림 10의 기준파형과 인버터 출력 전류와의 히스테리시스 제어를 통해 PWM신호를 발생시킨다.

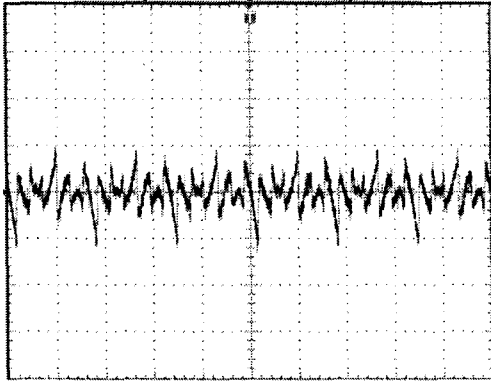


그림 9 직렬형 능동전력필터의 기준파형
Fig. 9 Reference waveform of the series active power filter. (10V/div, 10ms/div)

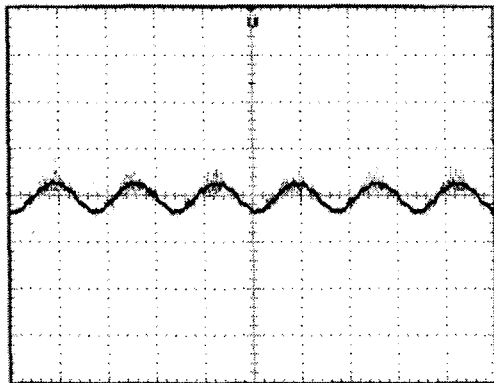


그림 10 병렬형 능동전력필터의 기준파형
Fig. 10 Reference waveform of the parallel active power filter. (10V/div, 10ms/div)

실험결과 고조파 보상과 역률 보상에 대해 효과적인 동작을 하고 있음을 알 수 있다. 고조파 함유율이 IEE std. 519의 고조파 규제치인 THD 5%미만의 우수한 고조파 보상 결과를 얻을 수 있고, 무효전력보상으로 전원단 역률이 0.94로써 거의 1에 가깝게 나올 정도로 효과적이므로 직·병렬 능동전력필터가 양호한 동작을 하고 있음을 증명해 보이는 결과이다.

4.2 고조파 전류와 불평형 전원전압 보상

전원전압의 불평형 조건을 만들기 위하여 전원측의 슬라이더스 변압기를 사용하였고, 단상 전압 강하의 경우를 실험하였다. 부하는 3상평형 부하인 3상 다이오드 정류기를 사용하였다.

그림 11과 12는 불평형 3상 전원이 인가된 상태에서 전압 보상을 행한 결과를 보여주고 있다. 전원전압의 불평형 계수(UF:Unbalance Factor)는 7.12%이고 크기 계수(MF:Magnitude Factor)는 93.31%이다. 제안한 알고리즘을 적용한 결과 불평형 계수는 1.16%, 크기 계수는 101.25%로 우수한 보상 특성을 보임을 알 수 있다.

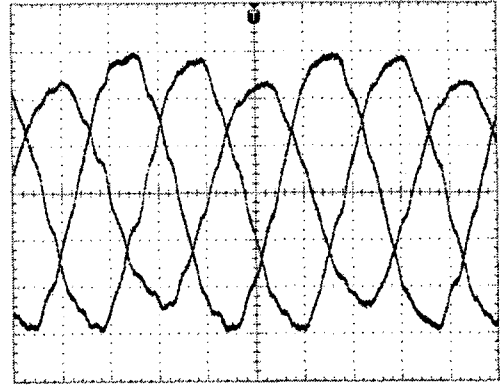


그림 11 불평형 전원전압
Fig. 11 Unbalanced source voltage. (50V/div, 4ms/div)

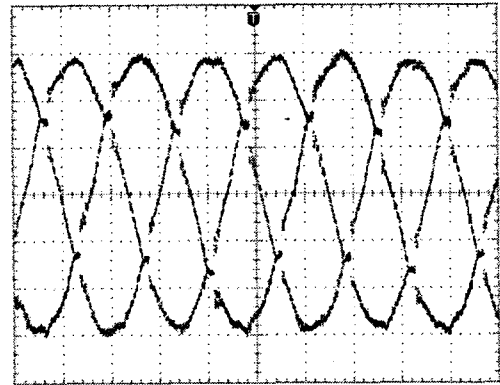


그림 12 보상 후 3상 부하전압
Fig. 12 3-phase load voltage after voltage compensation. (50V/div, 4ms/div)

그림 13과 14는 그림 11의 전원전압 상태에서 고조파 전류와 불평형 전원전압 보상을 실시했을 경우에 전원측의 3상 전류를 나타내고 있다. THD 분석 결과 2.82%로 고조파 전류 보상도 우수하게 수행되고 있음을 알 수 있다.

제안된 알고리즘에 의하여 실험을 실시한 결과, 전원전압 불평형 보상 알고리즘에 의해 전원측의 전원상태에 무관하게 부하측의 전압을 일정 크기의 평형한 3상 전원상태로 유지할 수 있었으며, 불평형 계수와 크기 계수가 각각 0%와 100%에 근사한 보상 결과를 보였고, THD는 2.82%로 권장치인 5%이하를 만족하는 보상 결과를 보임으로써 제안한 알고리즘에 의해서 고조파 전류 보상은 물론 전원측의 전압 불평형을 보상하여 부하측 전압을 일정 크기의 평형한 3상 전원 조건으로 만들 수 있음을 확인하였다.

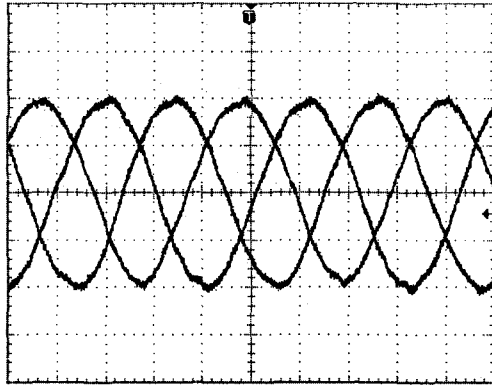


그림 13 3상 전원전류
Fig. 13 3-phase source currents. (10A/div, 4ms/div)

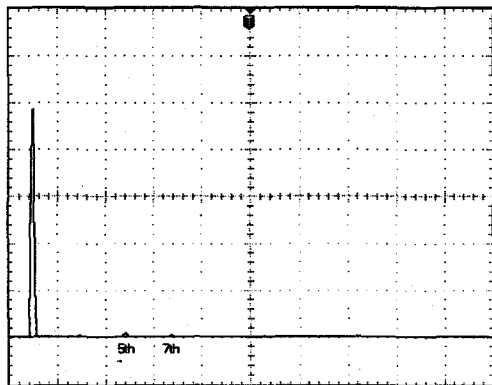


그림 14 보상 후 전원전류의 고조파 스펙트럼
Fig. 14 Waveforms for the harmonic spectra current source after compensation. (2A/div, 125Hz/div)

4. 결 론

본 논문에서는 전력품질 개선을 위해 3상 3선식 직·병렬 능동전력필터를 이용한 불평형 전압보상 시스템에 대해 성능함수 이론을 이용하여 제어 알고리즘을 제안하였고, 다음과 같이 실험을 통하여 증명하였다.

알고리즘 적용을 위해 직·병렬 능동전력필터의 통합 시스템을 제안하였고, 이는 고조파 보상과 역률 개선에 대해 각각 별개의 동작을 하도록 제어 되었으며, 제시된 실험 결과를 통해 제안된 알고리즘 및 시스템이 우수한 보상 특성을 나타냄을 확인 하였다. 또한, 불평형 전압보상 알고리즘은 부하측의 3상 전압을 이용하는 것으로 대칭좌표법에 의해 부하측 전압을 보다 안정적으로 계통에서 원하는 평형상태로 만들어 줄 수 있도록 하였다. 전압보상 불평형을 보상하기 위해 전압측의 3상 전압을 이용하고, 부하측 전압의 크기를 일정하게 유지하기 위해 부하의 3상 전압을 이용하던 기존의 방법에 비하여 제안 알고리즘은 더 효과적이고 경제적으로 원하는 성과를 얻을 수 있었다. 제안된 실험 결과들로부터 직·병렬 능동전력필터 시스템을 구동하는 경

우 부하 특성에 따른 다양한 고조파와 역률 저하의 문제들을 개선하는데 유효한 보상 특성을 가짐을 입증하였고, 각종 사고 등에 의한 전압 불안정에 대해서도 보상 특성의 우수함을 보였기에, 최근 들어 관심이 집중되고 있는 다양한 장애로부터 전력품질을 개선하여 소비자들에게 크게 기여할 수 있으리라 기대된다.

감사의 글

이 논문은 인하대학교의 지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] N. G Hingorani, "Introducing Custom Power", IEEE Spectrum, pp.41-48, 1995. 42권, pp. 9-18, 1993. 9.
- [2] K. Haddad, et. al., "Distribution System Voltage Regulation under Fault Conditions Using Static Series Regulators", IEEE IAS Conf. Record, pp.1383-1389, 1997.
- [3] L. Moran, et. al., "Series Active Power Filter Compensates Current Harmonics and Voltage Unbalance simultaneously", IEE Proc-Gener. Trans. Distrib, Vol.147, No.1, pp.31-36, 2000.
- [4] M. Aredes, K. Heumann, E. H. Watanabe, "An Universal Active Power Line Conditioner", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.13, No.2, pp.545-551, 1998.
- [5] T. Furuhashi, et. al., "A Study on the theory of Instantaneous Reactive Power", IEEE Trans. Ind. Electronics, Vol.37, No.1, pp.86-90, 1990.
- [6] Z. Wang, Q. Wang, "A Series Active Power Filer Adopting Hybrid Control Approach", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.16, No.3, pp.301-310, 2001.
- [7] S. Bhattacharya, et al. "Parallel Active Filter System Implementation and Design Issues for Utility Interface of Adjustable Speed Drive Systems", IAS Vol.2, pp.1032-1039, 1996.
- [8] H. Fujita, H. Akagi, "The Unified Power Quality Conditioner: the Integration of Series and Shunt Sctive Filter", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.13, No.2, pp.315-322, 1998.
- [9] Y. Chen, X. Zha, J. Wang, etc. "Unified Power Quality Conditioner(UPQC): The Theory, Modeling and Application", Power System Technology, 2000 proceedings. Power Con 2000. International Conference on, Vol.3, pp.1329-1333, 2000.
- [10] M. Aredes, etc. "A Combined Series and Shunt Active Power Filter", IEEE/KTH Stockholm Power Tech Conference, Stockholm. Sweden, pp.18-22, 1995.

저 자 소 개



강민형 (姜旻衡)

1979년 12월 11일생. 2005년 호서대 전기공학과 졸업. 2007년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사).

Tel : 032-860-7397

Fax : 032-863-5822

E-mail : ddangu79@hanmail.net



김영석 (金榮石)

1951년 6월 11일생. 1977년 인하대 전기공학과 졸업. 1987년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1987년~1989년 전기연구원 전력전자연구실장. 현재 인하대 전기공학과 교수.

Tel : 032-860-7397

Fax : 032-863-5822

E-mail : youngsk@inha.ac.kr