

전류 고조파와 불평형 전원 전압 보상을 위한 직렬형 능동전력필터에 관한 연구

오재훈\*, 한윤석\*, 김영석\*, 원충연\*\*, 최세완\*\*\*

\* 인하대학교 전자·전기·컴퓨터 공학부, \*\* 성균관대학교 전기공학과, \*\*\* 서울산업대학교 제어계측공학과

A Study on the Series Active Power Filter for Harmonic Reduction and Unbalanced Source Voltage Compensation

Jaehoon Oh\*, Yoonseok Han\*, Youngseok Kim\*, Chungyuen Won\*\*, Sewan Choi\*\*\*

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

**Abstract** - In this paper, we propose a series active power filter control method to compensate current harmonics and unbalanced source voltage. The system is composed of series active power filter and shunt passive filter that are tuned 5th and 7th harmonics. In this conventional system, series active power filter complements drawbacks of the shunt passive filter, namely improves harmonic compensation characteristics, and compensates unbalanced source voltage.

In the proposed algorithm, compensation voltage for harmonic reduction is calculated by performance function, and compensation voltage for unbalanced source voltage is calculated in based on a synchronous reference frame. So, ultimate compensation voltage is sum of those two compensation voltages.

By computer simulation, we verify the excellency of proposed method.

1. 서 론

전력계통에서 비선형 부하의 운영은 여러 가지 바람직하지 못한 현상을 야기하고 있다. 그 중 중요한 문제로 고조파의 발생, 무효전력의 증가 그리고 전원 전압의 불평형과 같은 것들을 들 수 있겠다.

반도체 전력변환장치의 사용으로 인한 고조파 전류는 전원 전압의 왜곡, 발전기·송전선과 변압기 등 전력설비의 용량증대를 초래하며, 전기 기기, 케이블, 진상 콘덴서 등의 전력 계통 장치들에 열 및 소음을 발생시키고 나아가 절연파괴, 수명 단축을 야기할 수 있다.

과거에는 고조파 전류를 제거하기 위해 수동필터를 많이 사용하였다. 인덕터와 커패시터의 조합으로 구성되는 수동필터는 특정한 차수의 고조파 성분만을 제거할 수 있는 단점을 가지고 있으므로 전력계통에 광범위한 차수의 고조파가 존재하는 경우에는 만족스러운 보상 효과를 얻을 수 없다. 따라서 이러한 수동필터의 단점을 보완하기 위한 능동전력필터의 연구가 활발히 이루어지고 있다.

능동전력필터는 계통의 비선형 부하로부터 발생된 고조파 전류를 보상하기 위한 전력변환 시스템으로 그 시스템의 구성에 따라 크게 병렬형 능동전력필터, 직렬형 능동전력 필터, 하이브리드형 능동전력필터로 나누어진다. 그 중 본 논문에서는 하이브리드형 능동전력필터의 형태를 택하여 연구를 수행하였다.

하이브리드형 능동전력필터는 수동필터와 능동전력필터의 조합에 의해서 고조파 보상 특성의 극대화를 꾀하고 있다. 특정차수의 고조파는 그 주파수에 동조된 수동필터에 의해서, 그리고 나머지의 고조파는 직렬형 능동필터에 의해서 보상함으로써 계통 고조파 전류의 저감을 꾀하고 있다. 수동필터와 능동전력필터가 각각 고조파 보상역할을 분담함으로써 능동전력필터의 용량이 작아질 수 있

고, 또 현재 계통에 수동필터가 이미 설치되어져 있음을 고려할 때 상당히 합리적인 방법이라 할 수 있다.

또, 계통에 불평형한 부하가 사용된다면 변압기나 선로에서는 불평형한 전압강하가 발생할 것이고 이것은 공통 접속점(PCC ; Point of Common Coupling)에서 불평형한 전압으로 나타날 것이다. 그러므로 이 공통 접속점에 연결된 부하선로는 불평형한 전원전압을 공급받게 되는 것이므로 정상적인 부하의 동작을 기대할 수 없다. 3상 전원의 불평형은 비선형 부하에 저주파수의 고조파 성분을 발생시키고 제반 여러 소자나 시스템의 용량을 증가시키는 요인으로 작용하며, 각종 기기의 손실을 증가시키는 주요한 원인이 된다.

교류 계통의 전압 불평형의 경우 일반적으로 병렬로 연결된 Thyristor-Controlled 정지형 무효전력 보상기(SVC : Static VAR Compensator)에 의해 보상되어졌다. 하지만 이 방법은 응답 속도가 너무 늦고, 계통에 고조파가 유입되고, 큰 용량의 수동소자가 필요해 진다는 단점을 갖고 있다. 그래서 최근에는 응답속도도 빠르고, 저렴하게 구현 가능하며, 효율적인 전압형 인버터에 의해서 보상 전압을 직렬로 계통에 주입하는 능동적인 전압 보상 방법에 대해서 연구되어 지고 있다.

더 나아가 이러한 기능들을 하나의 보상기로서 구현하기 위한 연구 또한 활발히 진행중이며, 국·내외에서 많은 연구결과들이 계속해서 발표되어 지고 있다.

본 논문에서는 고조파 전류 보상과 불평형 전원 전압 보상을 동시에 수행할 수 있는 직렬형 능동 전력 필터의 제어 알고리즘을 연구하였으며 그 타당성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

2. 본 론

2.1 시스템 구성

그림 1은 직렬형 능동전력필터와 병렬 수동필터의 병용시스템을 나타낸다. 이 시스템에서 수동필터는 비선형 부하와 병렬로 연결되어 부하에서 발생한 특정 차수의 고조파를 흡수하는 기능을 하며, 직렬형 능동전력필터는 전원과 부하 사이에 3개의 단상 결합 변압기를 통해 계통에 직렬로 접속되어 부하에서 발생한 고조파를 차단하는 역할을 한다. 직렬형 능동전력필터의 주 회로는 3상 전압형 PWM 인버터로 구성된다. 부하로는 고조파 전류 원으로 작용하는, 2차측에 저항과 인덕터 성분을 갖는 3상 전 브릿지 다이오드 정류기를 사용하였다.

2.2 고조파 전류의 보상

기존의 직렬형 능동전력필터의 제어 알고리즘에서 다루었던 순시 무효전력은 부하에 의해 생성된 양을 의미한

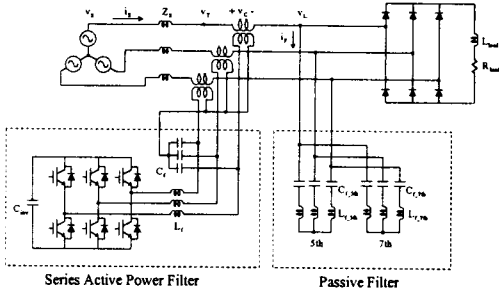


그림 1 직렬형 능동전력필터와 병렬 수동필터의 병용시스템

전원전압	100[Vrms], 60[Hz]	
전원측 인덕턴스(L <sub>s</sub> )	0.1[mH]	
결함변압기 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]

표 1 시스템 회로정수

다. 그러나 본 논문에서 사용하는 알고리즘에서는 직렬형 능동전력필터로부터 발생된 각 상의 전력을 순시 무효전력으로 나타낸다. 즉, 순시무효전력  $q_k$ 는 직렬형 능동전력필터의 각 상에서 발생하는 전력으로 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 3상의 각 상을 나타내는  $a, b, c$ ,이며,  $v_{Ck}$ 는 직렬형 능동전력필터가 생성하는 각 상의 보상 전압,  $i_{Sk}$ 는 각 상의 전원전류이다. 또한, 직렬형 능동전력필터는 순시 유효전력을 발생하지 않으므로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

그림 1과 같은 3상 3선식 전력계통의 경우 중성선이 없으므로, 전압과 전류의 영상분이 존재하지 않는다. 따라서 직렬형 능동전력필터에서 발생하는 보상 전압은 식 (3)을 만족한다.

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

직렬형 능동전력필터의 보상 전압은 식 (2)와 식 (3)을 만족하면서, 다음 정의하는 성능함수(Performance function)를 최소화하는 전압으로 결정한다.

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

식 (4)의 성능함수에서 우변의 각 항들은 각 상 부하 입력전압과 보상전압의 차의 제곱의 형태를 갖기 때문에 성능함수가 최소가 되는 것은 전원측 전압의 고조파 성분이 최소가 되는 것을 의미한다.

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.

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

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

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

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

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

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 결과식 이므로, 식 (6)내의  $q$ 는 기존의 순시 무효전력의 정의식과 일치한다. 따라서 보상 지령 전압 내에는 순시 무효전력의 직류성분과 교류성분을 모두 포함하고 있다.

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

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

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

따라서, 식 (7)과 같이 순시 무효전력을 직류성분과 교류성분으로 분리해 낼 수 있으며, 고조파만 보상할 경우 기존의 알고리즘과 마찬가지로 순시무효전력의 교류성분만을 보상분으로 사용하면 된다. 고조파만을 보상할 경우의 보상 지령전압을 식 (8)에 나타내었다.

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

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

$$v_{Cc} = \frac{\sqrt{3}(i_{Sa} - i_{Sb}) \cdot \tilde{q}}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})} \quad (8)$$

### 2.3 불평형 전원 전압의 보상

불평형 전원 전압은 대칭좌표법에 의하여 아래의 식 (9)와 같이 정상분(Positive Sequence Component), 역상분(Negative Sequence Component) 그리고 영상분(Zero Sequence Component)으로 나누어질 수 있다. 그 중 역상분과 영상분을 보상에 준다면 부하단에는 정상분만으로 구성되는 평형한 3상 전압이 인가되어지게 된다.

$$\begin{pmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{pmatrix} = V_1 \begin{pmatrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi) \\ \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \end{pmatrix} + V_2 \begin{pmatrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \\ \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi) \end{pmatrix} + V_0 \begin{pmatrix} \sin \omega t \\ \sin \omega t \\ \sin \omega t \end{pmatrix} \quad (9)$$

위의 식 (9)에서 첨자 1은 정상분, 첨자 2는 역상분 그리고 첨자 0은 영상분을 각각 나타낸다. 식(9)로 표현되는 불평형 3상 전원 전압을 정상분에 동기하는 회전 좌표축 상으로 표현하기 위해 아래 식 (10)의 Park's 변환 행렬식을 이용하면 식(11)과 같이 표현되어진다.

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2}{3} \pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi) & \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{pmatrix} = [P] \begin{pmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{pmatrix} \quad (11)$$

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

식 (11)에서 볼 수 있듯이 정상분에 동기하는 회전 좌표상에서 정상분은 DC값으로, 역상분은 정상분의 2배 주파수에 해당하는 값으로 그리고 영상분은 그대로 영상분으로 표현됨을 알 수 있다.

그러므로, 동기 좌표축 상에서 간단한 필터링으로 역상분에 해당하는 성분을 얻어낼 수 있으며 이를 영상분과 함께 보상 지령치로 사용하는 방법으로 전원 전압 불평형을 보상할 수 있다.

### 2.4 전체 제어 알고리즘

불평형 전원 전압과 전류 고조파를 보상하는 직렬형 능동전력필터를 구현하기 위하여 사용한 전체 제어 알고리즘을 그림 2의 블록 다이어그램으로 나타내었다.

전류 고조파를 보상하기 위하여, 성능함수에 의해 구해진 순시 무효전력의 고조파 성분만을 보상하는 수식 (8)을 사용하여 보상 지령치를 계산하였다. 그리고 전원 전압 불평형을 보상하기 위하여, 동기 좌표상에서 역상분과 영상분을 추출하였다. 최종 인버터 출력 보상 전압은 전류 고조파를 보상하기 위한 전압과 전원 전압 불평형을 보상하기 위한 전압의 합으로 이루어진다.

그림 2에서  $V_{Ca1}, V_{Cb1}, V_{Cc1}$ 은 고조파 전류 보상 알고리즘에 의한 보상 전압을,  $V_{Ca2}, V_{Cb2}, V_{Cc2}$ 은 불평형 전원 전압 보상 알고리즘에 의한 보상 전압을 나타내며,  $V_{Ca}, V_{Cb}, V_{Cc}$ 은 최종 인버터 출력 보상 전압을 나타낸다.

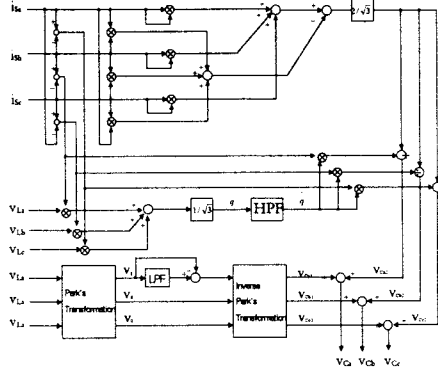


그림 2 전체 제어 블록선도

### 2.5 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 표 1에 제시된 시스템 변수들로 구성된 모의 시스템에서 수행되었다. 고조파 보상 알고리즘에 대한 검증(그림 3), 불평형 전원 전압 보상에 대한 검증(그림 4) 그리고 두 가지 기능을 동시에 수행하는 알고리즘에 대한 검증(그림 5, 6)의 순으로 모의 실험을 수행하였으며 아래에 차례로 그 결과를 보였다.

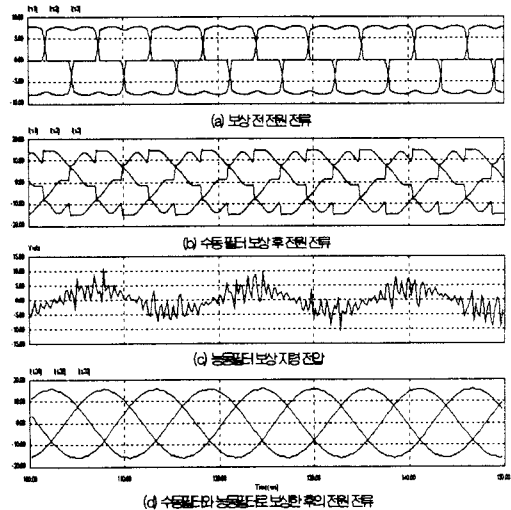
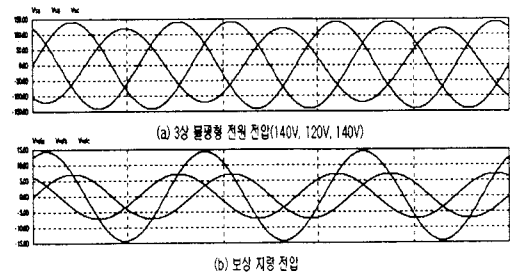


그림 3 고조파 전류 보상



(b) 보상 지령 전압

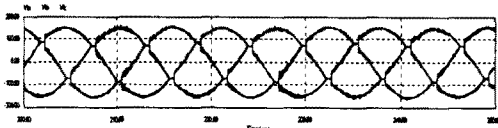
### 3. 결 론

본 논문에서는 불평형 전원 전압과 고조파 전류를 동시에 보상할 수 있는 직렬형 능동전력필터의 제어 알고리즘을 연구하였으며 컴퓨터 모의 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다. 보상 후 전류 THD는 1% 이하로 나타났다고, 부하측의 전압도 거의 평형상태를 유지하는 결과를 볼 수 있었다. 제안하는 알고리즘은 우수한 보상 특성을 보일 뿐 아니라 능동전력필터에 추가적인 기능을 첨가함으로써 다른 장치의 추가없이 전력품질을 한층 더 개선할 수 있다는 점에서 더 큰 가치가 있다고 하겠다.

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

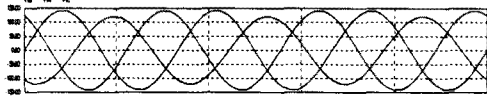
### [참 고 문 헌]

- [1] F. Z. Peng et al., "A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems - A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filter", IEEE Trans. Industry Application, vol. 26, no. 6, pp. 983, 1990
- [2] S. Bhattachaya et al., "Synchronous Frame Harmonic Isolator using Active Series Filter", EPE FIRENZE Conf. Record, 1991, vol. 3, pp. 30
- [3] Alexandre Campose et al., "Analysis and Design of a Series Voltage Unbalance Compensation Based on a Three-Phase VSI Operating with Unbalanced Switching Functions", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 9, no. 3, pp. 269, 1994
- [4] H. Fujita et al., "The Unified Power Quality Conditioner : The Integration of Series- and Shunt-Active Filters", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 13, no. 2, pp. 315, 1998
- [5] 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

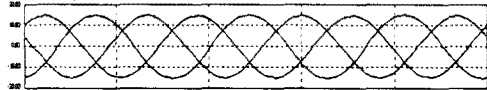


(c) 보상 후 부하측 3상 전압

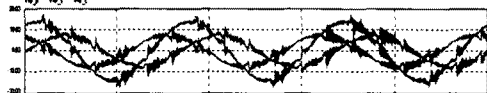
그림 4 불평형 전원 전압 보상



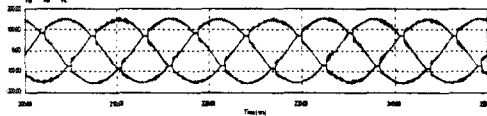
(a) 불평형 3상 전원 전압(140V, 120V, 140V)



(b) 보상 후 전류 전류

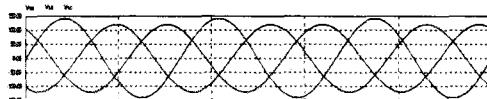


(c) 보상 전류 전압

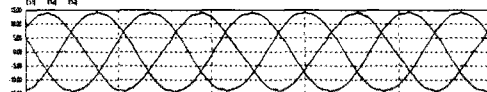


(d) 보상 후 부하측 3상 전압

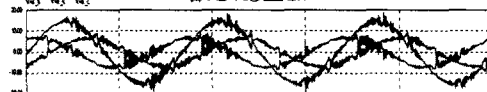
그림 5 불평형 전원 전압과 고조파 전류의 보상



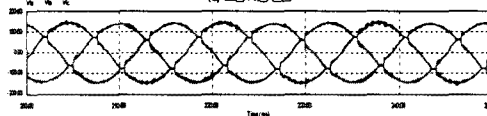
(a) 불평형 3상 전원 전압(140V, 120V, 120V)



(b) 보상 후 3상 전류 전류



(c) 보상 전류 전압



(d) 보상 후 부하측 전압

그림 6 불평형 전원 전압과 고조파 전류 보상 II

불평형 전원 전압 보상에 대한 모의 실험은 한 상의 전압이 정상 전압에서 15% 감소한 경우와, 두 상의 전압이 동시에 15% 감소한 경우의 두 가지 경우를 보였다.