

직렬 능동전력필터와 병렬 수동필터를 이용한  
고조파 전류 저감 및 불평형 전원 전압 보상에 관한 연구

오재훈\*, 고수현\*, 한운석\*\*, 김영석\*

\* 인하대학교 전자·전기·컴퓨터 공학부, \*\* (주)아크로센스

A Study on Current Harmonics Reduction and Unbalanced Source Voltage Compensation Using Series Active Power Filter and Parallel Passive Filter

Jaehoon Oh\*, Suhyun Ko\*, Yoonseok Han\*\*, Youngseok Kim\*

\*Inha Univ., \*\*Acrosence Inc.

**Abstract** - This paper deals with current harmonics and unbalanced source voltages compensation using combined filter system. Filter system consists of a series active filter and parallel passive filters. Passive filters were a traditional method to compensate current harmonics, so those were installed in power system widely. The active filter can be a substitution to improve filtering characteristics and complement drawbacks of the passive filter. The combined system of the active power filter and passive filter can has a better compensation performances and economical goods.

The series type active power filter injects compensation voltage into power system by transformers. It's compensation principle is able to applicate for voltage compensation. A new control algorithm for series active filter to compensate current harmonics and unbalanced source voltages is proposed.

In the proposed algorithm, a compensation voltage for harmonic reduction is calculated directly by instantaneous reactive power theory, and a compensation voltage for unbalanced source voltage is calculated in based on a synchronous reference frame. By experiments, we show validity of proposed compensation method.

1. 서 론

최근의 전력부하는 과거의 선형부하와는 달리 각종 반도체 스위칭 소자를 사용하는 전력전자 기술에 바탕을 둔 비선형 부하가 대부분을 차지하고 있다. 전력전자 기술의 비약적인 발전으로 인해 좀 더 편리하고 성능좋은 장치들이 많이 등장하고 있으나 그로 인한 부작용도 간과할 수 없는 실정이다. 즉, 인위적인 스위칭으로 인하여 부하측에서는 원하는 전압이나 전류 파형을 얻어낼 수 있으나 그 영향으로 전원측에는 고조파 전류가 발생하게 된다. 각종 컴퓨터 제어장치나 고정밀 기기들이 많이 사용되는 요즘 고조파 전류는 이들 장치에 치명적인 악영향을 미칠 수 있다. 기기의 손상은 물론 오동작으로 인한 예상치 못한 피해가 발생할 수 있다. 고조파 전류에 의한 피해는 이러한 고정밀 기기뿐만 아니라 각종 전력장치의 용량을 증대시키며 심지어는 절연파괴나 수명단축등을 발생시킬 수 있다. 이러한 고조파 전류에 대한 해결책으로 인덕터와 커패시터를 이용한 수동필터가 예전부터 전력계통에 사용되어져 왔다. 하지만 수동필터는 제거할 수 있는 고조파 전류가 한가지 주파수에 한정되어 있기 때문에 광범위한 고조파 전류가 발생하였을 경우 이것을 보상하기 위해서는 여러개의 수동필터를 설치하여야 하는 부담이 있다. 또한 수동필터는 계통의 인덕

턴스나 커패시터스에 의해 영향을 받아서 원하는 성능을 얻어내지 못하는 경우도 발생 할 수 있다. 이러한 약점을 극복하고 더 우수한 보상 특성을 얻기 위해서 최근 연구되어지고 있는 것이 능동전력필터가 되겠다. 능동전력필터는 계통으로부터 고조파 전류 성분을 계산해 내고 이것을 전압형 또는 전류형 인버터를 통해서 계통에 주입시킴으로써 해서 고조파 전류를 상쇄 또는 억제하는 원리를 갖는다. 계산되어진 고조파 성분을 인버터를 통해 만들어내기 때문에 광범위한 고조파 성분을 한번에 보상할 수 있으며, 전력계통상의 전류 또는 전압으로부터 고조파 성분을 계산하기 때문에 계통상의 인덕턴스나 커패시턴스에 의해 보상 성능이 영향을 받지 않는다. 이러한 장점으로 인해 능동전력필터는 기존의 수동필터를 대체할 수 있는 보상기로서 활발히 연구되어 지고 있고 조금씩 실제 계통에 적용하는 단계에 이르고 있다[1].

전류 고조파에 의한 피해 못지 않게 부하의 작동에 영향을 미치는 요소로 불평형 전원 전압을 들 수 있다. 이것은 3상 선로에 불평형한 부하가 사용되거나 또는 전력계통의 사고에 의해서 발생할 수 있다. 민감한 부하의 경우 불평형한 3상 전압에 의해 동작을 멈춰버릴 수가 있으며 이것은 고조파 전류에 의한 피해보다 더 직접적인 경제적 피해를 발생시킬 수 있다. 또한 고조파 전류와 마찬가지로 여러 전력 장치의 수명을 단축시키며 절연 파괴 등을 야기할 수 있다. 이러한 전압 불평형을 보상하기 위해 인버터를 이용하여 보상 전압을 전력계통에 주입시켜 주는 보상 방식에 대한 연구가 활발하다[2]. 이러한 방식은 능동전력필터 중 직렬형 방식과 같은 방식으로 본 연구에서는 이 점에 착안하여 직렬형 능동전력필터를 이용하여 불평형 전압 보상은 물론 고조파 전류 보상까지 수행할 수 있는 직렬형 능동전력필터의 제어 알고리즘을 연구하였다[3]. 그리고 기존에 설치되어져 있는 수동필터를 이용하여 능동전력필터의 부담을 줄이고, 더 우수한 보상 특성을 얻기 위해 직렬형 능동전력필터와 병렬수동필터의 병용시스템을 구성하여 제안하는 보상 알고리즘을 평가하였다[4].

2. 본 론

2.1 불평형 전원 전압 보상 원리

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = V_P \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi) \\ \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \end{bmatrix} + V_N \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \\ \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi) \end{bmatrix} + V_0 \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \sin \omega t \\ \sin \omega t \end{bmatrix} \quad (1)$$

3상 불평형 전원 전압은 위의 식 (1)과 같이 대칭좌표법에 의해서 정상분과 역상분 그리고 영상분으로 나누

어 질 수 있다. 식 (1)에서 아래첨자 P로 표시되는 것이 정상분에 해당하는 것으로 평형한 3상 전원 상태에서는 이러한 성분만 나타나게 된다. 정상분은 전원 전압과 같은 상회전 방향을 가지며, 평형상태에서는 3상 전원 전압과 같은 크기를 갖는다. 아래첨자 N으로 표시되는 것은 역상분에 해당하는 성분으로 정상분과 반대의 상회전 방향을 갖는 성분이다. 전원 전압에 불평형이 생기게 되면 나타나는 성분이다. 아래첨자 0으로 표시되는 것은 영상분으로 3상이 모두 동일한 위상각으로 나타나며 역시 3상에 불평형 성분이 포함되면 나타나는 성분이다. 3상 전원이 불평형 없이 평형한 조건이라면 정상분만으로 구성되겠지만 불평형 조건이 형성되게 되면 정상분 외에 역상분과 영상분에 해당하는 성분이 더 나타나게 된다. 따라서 보상기에 의해서 역상분과 영상분에 해당하는 성분을 보상해 준다면 부하측에는 정상분만으로 구성되는 평형한 전원 조건을 만들어 줄 수 있다. 또한 정상분의 크기를 보상기에 의해서 조정해 준다면 부하측의 평형한 전원 크기까지도 조정할 수 있다.

본 연구에서는 불평형 전원 전압을 정상분과 역상분 그리고 영상분으로 나누기 위해 정상분에 동기하는 회전좌표를 사용하였다. 아래 식 (2)에 나타나는 Park's 변환식에 의해서 간단하게 불평형 전압을 회전좌표로 좌표변환 할 수 있다.

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

식(1)로 표현되는 불평형 3상 전압에 식(2)의 Park's 변환식을 적용하여 회전좌표로 좌표변환을 하면 다음의 식(3)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 \\ V_P \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_N \sin 2\omega t \\ -V_N \cos 2\omega t \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ V_0 \sin \omega t \end{bmatrix}$$

식(3)에서 볼 수 있듯이 정상분에 동기하는 회전좌표상에서 정상분은 직류성분으로, 역상분은 2배 주파수 성분으로 그리고 영상분을 그대로 영상분으로 나타남을 볼 수 있다. 따라서 회전좌표로의 좌표변환을 이용한다면 간단한 필터링에 의해서 역상분과 영상분을 분리해 낼 수 있다. 본 연구에서는 부하측의 전압을 이용하여 보상 전압을 구하였다. 전원측의 불평형 전압을 보상하기 위한 보상 전압을 부하측 전압으로부터 구하기 때문에 보상기와 부하측 전압사이에 케환제어 루프가 형성되고, 이것으로부터 더욱 안정적이고, 확실하게 부하측 전압을 제어할 수 있다. 보상 전압은 부하측 전압을 식(3)과 같이 변환하고 필터링에 의해서 역상분과 영상분을 추출하여 이를 보상성분으로 하였으며, 또한 직류 성분을 원하는 부하측의 정격 전압값과 비교하여 그 차이만큼을 보상치에 더해 줌으로써 불평형 전압 보상은 물론 부하측 전압을 일정하게 유지하는 기능까지 수행하였다.

## 2.2 고조파 전류의 보상 원리

전력계통에서 전압과 전류는 각각 벡터 형식으로 나타낼 수 있으며, 부하 전압  $v_L$ 과 전원 전류  $i_S$ 를 다음 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\text{순시부하전압벡터 } v_L = [v_{L\alpha} \ v_{L\beta} \ v_{L\gamma}]^t \quad (4)$$

$$\text{순시전원전류벡터 } i_S = [i_{S\alpha} \ i_{S\beta} \ i_{S\gamma}]^t$$

식(4)의 순시 부하 전압 벡터와 순시 전원 전류 벡터를 3상 2상 변환을 통하여 다음의 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{L(\alpha,\beta,0)} = [v_{L\alpha} \ v_{L\beta} \ v_{L0}]^t \quad (5)$$

$$i_{S(\alpha,\beta,0)} = [i_{S\alpha} \ i_{S\beta} \ i_{S0}]^t$$

식(5)의 순시 전압 벡터  $v$ 와 순시 전류 벡터  $i$ 를 이용하여 순시 유효전력  $p$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = v_{L(\alpha,\beta,0)} \cdot i_{S(\alpha,\beta,0)} \quad (6)$$

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

또한 순시무효전력 벡터  $q$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = v_{L(\alpha,\beta,0)} \times i_{S(\alpha,\beta,0)} \quad (7)$$

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

영상분 전압  $v_{L0}$ 와 영상분 전류  $i_{S0}$ 가 없는 3상 3선식 시스템에서 식(7)은 다음 식(8)과 같이 쓸 수 있다.

$$q = v_{L(\alpha,\beta,0)} \times i_{S(\alpha,\beta,0)} \quad (8)$$

$$= \begin{bmatrix} q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_{L\alpha} v_{L\beta} \\ i_{S\alpha} i_{S\beta} \end{bmatrix}$$

식(6)과 식(8)로부터 순시유효전력을 발생시키는 전압 벡터  $v_p$ 와 순시 무효전력을 발생시키는 전압 벡터  $v_q$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{p(\alpha,\beta,0)} = \frac{p}{i_{S(\alpha,\beta,0)} \cdot i_{S(\alpha,\beta,0)}} i_{S(\alpha,\beta,0)} \quad (9)$$

$$v_{q(\alpha,\beta,0)} = \frac{q_{(\alpha,\beta,0)} \times i_{S(\alpha,\beta,0)}}{i_{S(\alpha,\beta,0)} \cdot i_{S(\alpha,\beta,0)}} \quad (10)$$

위의 식에서  $q$ 는 기존의 pq이론에서 정의된 무효 전력값과 같은 값을 나타낸다. 식(9)와 식(10)의 전압 성분으로부터 직렬형 능동전력필터의 보상 지령전압을 다음 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{c(\alpha,\beta,0)}^* = \frac{\tilde{p}}{i_{S(\alpha,\beta,0)} \cdot i_{S(\alpha,\beta,0)}} i_{S(\alpha,\beta,0)} \quad (11)$$

$$+ \frac{q_{(\alpha,\beta,0)} \times i_{S(\alpha,\beta,0)}}{i_{S(\alpha,\beta,0)} \cdot i_{S(\alpha,\beta,0)}}$$

보상 지령 전압을 나타내는 식(11)에서  $\tilde{p}$ 는 유효 전력의 맥동 성분을 나타내고, 무효 전력  $q$ 는 직류 성분인  $\bar{q}$ 와 맥동 성분인  $\tilde{q}$ 를 포함하고 있다.

본 연구에서는 무효 전력의 맥동 성분인  $\tilde{q}$ 만을 고려하여 보상 전압을 계산하여 보상하였다. 식(11)에서 무효 전력의 맥동 성분만을 고려하여 구해진 보상 지령 전압을 다시 2상-3상 역변환을 통하여 3상분에 해당하는 전압으로 환원하여서 최종적인 보상 지령 전압으로 하였다.

### 2.3 시스템의 구성

그림 1은 본 논문에서 제안하는 제어알고리즘을 평가하기 위해 구성된 직렬형 능동전력필터와 병렬형 수동필터의 병용시스템을 나타내고 있다. 병렬형 수동필터는 5차와 7차 주파수에 동조된 필터를 사용하여, 5차와 7차 고조파 전류를 제거하도록 하였다. 직렬형 능동전력필터는 3개의 단상 변압기를 통해 계통에 연결되었으며 주회로는 3상 전압형 PWM 인버터로 구성되었다. 인버터의 커패시터측에는 단상 정류기를 통하여 외부에서 전력을 공급받아 고조파 전류와 불평형 전압 보상을 위한 충분한 전력을 확보하도록 하였다. 부하로는 고조파 전류원으로 알려진 2차측에 저항과 인덕턴스 성분을 갖는 3상 전 브릿지 다이오드 정류기를 사용하였다.

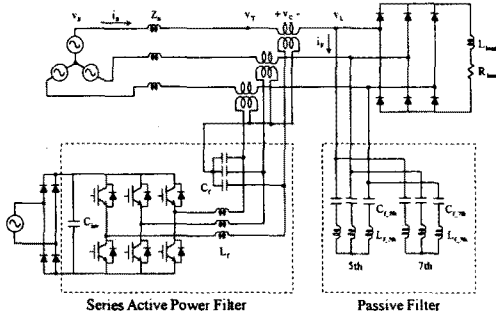


그림1 보상 시스템의 구성

Fig.1 A construction of compensation system

표 1에는 구성된 시스템의 각 회로 정수값들을 나타내었다.

표1. 시스템 회로 정수

Table 1. The system parameter

전원전압	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( $\Omega$ )
인버터 DC링크 콘덴서	2350( $\mu F$ )
LC필터 인덕턴스( $L_f$ )	4(mH)
LC필터 콘덴서( $C_f$ )	0.5( $\mu F$ )

표 2. 수동필터 회로 정수

Table 2. The passive filter parameter

5차 수동필터	인덕터	2(mH)
	콘덴서	140( $\mu F$ )
7차 수동필터	인덕터	2(mH)
	콘덴서	70( $\mu F$ )

그림 2는 전체 제어 블록선도를 나타내고 있다. 부하측 전압과 전원측 전류로부터 무효 전력을 구해내고 필터링에 의하여 직류 성분을 제외한 맥동 성분을 얻어내어 이것을 고조파 전류를 보상하기 위한 성분으로 한다. 또, 부하측 전압을 회전좌표로 변환하여 필터링에 의해 역성분을 구해내어 영상분과 함께 불평형 전압을 보상하기 위한 지령 전압으로 한다. 그리고 회전좌표 상에서의 직류 성분을 부하 전압의 정격과 비교하여 부하측 평형 전압의 크기를 원하는 값으로 유지한다.

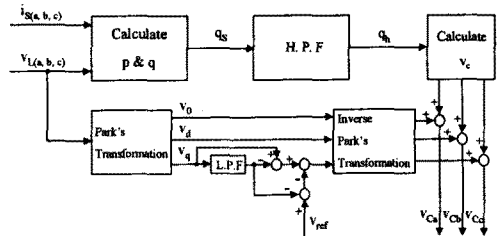
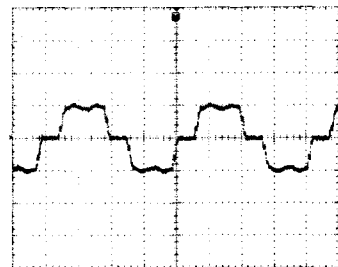


그림 2 전체 제어 블록선도

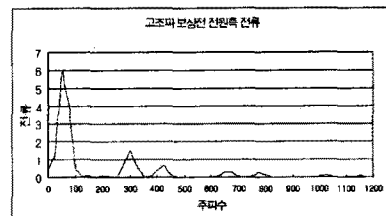
Fig. 2 The block diagram of control algorithm

### 2.4 실험 결과

제안하는 보상 알고리즘을 평가하기 위해 그림 1과 표 1 그리고 표 2에 따라 시스템을 구성하였다. 직렬형 능동전력필터의 제어와 보상 전압의 연산을 위하여 DSP(TMS320C31)를 사용하였으며, 샘플링 시간은 143  $\mu sec$ 으로 하였다. 게이트 인가 신호는 Coprocessor인 ADCMC 201을 사용하여 구현하였다.



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



(b) FFT analysis of source current

그림 3. 고조파 보상전 전원 전류와 FFT 분석

Fig 3. A source current and it's FFT analysis before harmonic compensation

그림 3은 수동필터와 능동전력필터를 사용하기 전의 전원측 전류 파형과 그 FFT(Fast Fourier

Transform) 분석을 나타내고 있다. 외형만 보아도 전류 파형이 정현파형에서 많이 벗어나 있음을 알 수 있으며 FFT 분석 결과를 보게 되면 60Hz 기본 주파수 이외의 5차와 7차 그리고 11차와 13차 고조파들이 많이 포함되어 있음을 알 수 있다. 그 이상의 고차 고조파도 어느 정도 포함되어 있으나 13차 이하의 고조파에 비하면 그 포함되는 양이 미미함을 알 수 있다. THD(Total Harmonic Distortion)는 약 32%로 매우 높은 수치를 나타내고 있다.

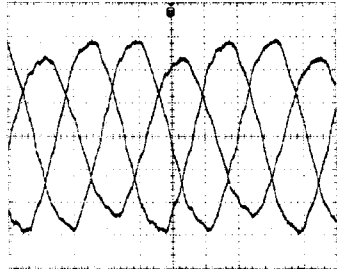
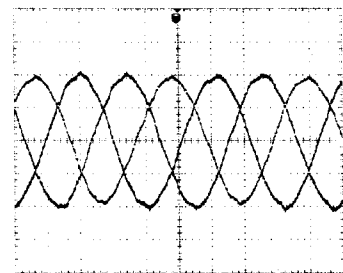
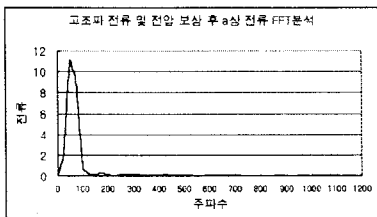


그림 4 불평형 전원측 전압  
Fig.4 Unbalanced source voltages  
(50V/div, 4ms/div)

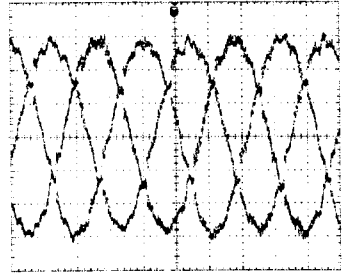
그림 4는 불평형한 전원측( $v_T$ ) 전압을 나타내고 있다. 불평형 조건은 전원측에 설치된 단권 변압기 구조의 슬라이드스를 조정하여 한 상의 전압을 강하시켰다. 불평형 계수는 약 7%이고 크기 계수는 약 93%이다. 그림 5는 고조파 전류 보상과 불평형 전압 보상을 동시에 수행하였을 경우의 보상 결과이다. 그림 5(a)는 보상 후의 3상 전원측 전류로 보상전의 경우와는 달리 정현 파형에 가까운 형태를 나타냄을 볼 수 있다. 그림 5(b) FFT 분석 결과를 보아도 고조파가 효과적으로 제거되었음을 알 수 있다. THD는 약 3%로 우수한 보상 특성을 확인 할 수 있다. 그림 5(c)는 보상 후의 부하측의 3상 전압으로 불평형한 전원 전압과는 달리 보상에 의해서 부하측에는 평형한 전압이 인가되어짐을 알 수 있다. 불평형 계수는 약 1%이고 크기 계수는 약 100%로 우수한 보상 특성을 보임을 알 수 있다.



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



(b) FFT analysis of the phase a source current



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

그림 5. 전압 및 고조파 전류 보상 후 전원 전류와 부하측 전압  
Fig. 5 Source currents and load voltages after current and voltage compensation

### 3. 결 론

본 논문에서는 고조파 전류와 불평형 전원 전압을 동시에 보상할 수 있는 직렬형 능동전력필터의 제어 알고리즘에 대하여 연구하였다. 고조파 전류 보상은 순시 유효·무효 전력 이론에 기반한 알고리즘에 의하여 보상 전압을 결정하였으며, 불평형 전원 전압의 보상은 회전좌표이론을 이용하여 보상 전압을 구하였다. 각각의 알고리즘을 동시에 능동전력필터에 적용하여 각 알고리즘이 추구하는 보상 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구에 의하여 직렬형 능동전력필터를 이용한 전류 고조파의 보상과 전압 보상의 가능성을 확인하였으며, 날로 그 중요성이 부각되는 전력 품질이라는 요소의 향상에 직렬형 능동전력필터가 중요한 역할을 할 수 있음을 확인하였다.

### (참 고 문 헌)

- [1] F. Z. Peng et al., "Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three Phase Power System", IEEE Trans. Instru. and Meas., Vol. 45, No. 1, pp. 293 ~ 297, 1996
- [2] A. Campos et al., "Analysis and Design of a Series Voltage Unbalance Compensator Based on a Three-Phase VSI Operating With Unbalanced Switching Functions", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 9, No. 3, pp. 269 ~ 274, 1994
- [3] 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 ~ 36, 2000
- [4] 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 Trans. on Ind. Application, Vol. 26, No. 6, pp. 983 ~ 990, 1990