

3상 직렬형 능동필터의 입력전압변동에 대한 전향보상이득에 관한 연구

권형남, 남중하, 강병희, 최규하, 한석우*
 전국대학교 전기공학과, 경문대학*

A Study on Gain of Feedforward Compensator about Source Voltage Variation of Three-phase Series Active Power Filter

H.N. Kwon, N.J. Nam, B.H. Kang, G.H. Choe, and S.W. Han*
 Dept. of Electrical Eng Konkuk Univ., Kyungmoon College*

ABSTRACT

Recently, as the development of industry, the nonlinear load becomes increased. Because of nonlinear load, the variation of source voltage is generated by the impedance of source side flowed harmonic currents. For blocking harmonic currents by nonlinear load, a series active power filter operates blocking resistance of harmonic currents. The value of blocking resistance shows ideal compensating characteristic out of theoretically infinite value. But the blocking resistance is limited by the problem of the system stability and the capacity of inverter. In this paper, the value of optimum blocking resistance is found by a simulation in the applied system. In the case of unbalanced source voltages, each relation of the blocking resistance is shown. It is proved that blocking resistance of series active power filter relates to a passive filter.

1. 서 론

급속한 산업 및 경제발전과 국민 생활수준의 향상으로 현재 국내의 최대전력수요는 높은 증가율을 보이고 있다. 사회가 고도화 될수록 사회의 전력에 대한 의존도는 더욱 증대되고 있으며, 전력 공급의 질적 향상에 대한 사회적 요구를 더욱 증대시키고 있다. 전력용 반도체소자를 사용한 시스템들은 고도의 기능을 가지는 반면 전원측 전력의 질적 저하를 초래하고 있다. 반도체 소자의 스위칭으로 인하여 교류 전원에는 전류 파형을 왜곡시켜 지상 역률을 발생시킨다. 또한 지상 역률 및 펄스 혹은 구형파 전류는 선로에 고조파 및 무효전력을 발생시키며, 전력 설비의 전압용량을 증가시키고 변동 및 유도

장해를 일으킨다.

고조파 전류에 대한 보상으로서 능동전력필터는 부하 측의 고조파 전류와 전류제어를 통한 무효전류 성분까지도 보상을 하여 전원의 저고조파 및 고역율화를 꾀할 수 있다. 그러나 능동전력필터는 전원측 전압변동과 같은 전원 이상현상이 발생하는 경우 그 성능을 다 하기가 어려우며 전원측 불평형을 고려하여 능동전력 필터를 설계한다 해도 전원측의 이상전압 발생으로 부하에 인가되는 전압변동 현상은 방지할 수 없는 문제점을 가지고 있다. 따라서 기존의 보상장치들의 단점을 개선하여 전원측 전압변동 및 비선형 부하에 의한 고조파 전류를 보상하는 시스템으로 1대의 컨버터와 수동필터인 고역통과필터(H.P.F)로 구성된 3상 하이브리드형 직렬 능동전력필터에 대한 연구를 하였다. 본 논문에서는 부족전압이 발생시 PI제어기에 의하여 보상하고 있다. 고조파전류 제어의 경우 전압제어기에 전향보상성분으로 제어가 된다. 입력전압과 부하에 의한 고조파의 함유량에 따라 전향보상이득(K)의 값이 달라지게 되는데 이 관계를 시뮬레이션으로 보여주었다.

2. 직렬 능동필터 시스템

2.1 시스템 구성 및 동작원리

그림 1은 제안된 전력품질 보상시스템의 구성을 보여준다. 시스템은 병렬 연결된 수동필터와 선로에 직렬로 연결된 능동전력필터를 갖는 3상 하이브리드형 직렬 능동전력필터로 구성된다.

컨버터는 전원전압 이상현상으로 인한 전원전압 변동과 비 선형 부하에 의해 발생하는 고조파 전류 보상에 능동적으로 대처하기 위한 것으로, 전력계통에 보상전압을 결합하기 위하여 3개의 전압 주입용 변압기를 통하여 전원 임피던스에 직렬 결합된다.

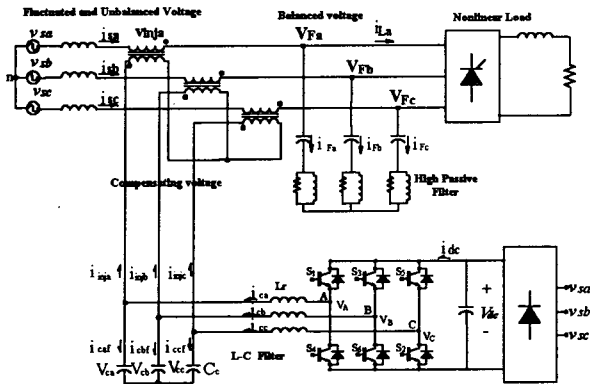


그림 1 보상시스템의 구성

컨버터는 부하의 고조파 보상을 직접적으로 하지 않고 수동필터의 보상성능을 강화시킨다. 즉, 능동전력필터는 고조파 전류를 저지하여 고조파를 계통과 절연시키고 수동필터는 저 임피던스회로로 동작하여 부하 고조파전류를 흡수하므로 전압제어도 가능해진다. 따라서 컨버터의 정격은 기존의 능동전력필터보다 적어지며 이상적인 기능을 발휘하게 된다. 또한 고조파전류 보상과 전원전압 변동을 한꺼번에 보상하기 때문에 컨버터의 이용률이 증대된다.

전원전압 변동이 없을 경우 컨버터는 기본파 주파수에서 임피던스는 영을 나타내며 부하 고조파 주파수에서 $K[\Omega]$ 의 순수한 저항 값으로 나타낼수 있다. 그림2는 고조파와 전원전압변동 보상에 대한 단상 등가회로를 나타낸다.

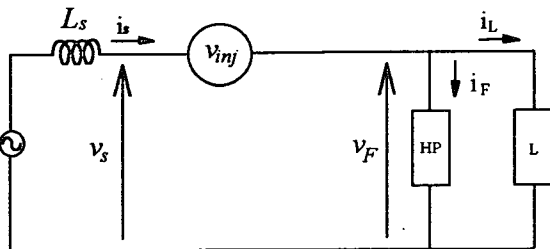


그림 2 단상 등가회로

그리고 보상기가 전원 임피던스보다 더 큰 저항으로 제어가 가능하므로 전원 임피던스는 수동필터의 보상 특성에 영향이 없으며 고조파 전류는 전원 전류에 영향을 주지 않으므로 필터 특성을 개선시킨다. 따라서 보상기는 고조파의 제동저항으로 동작되며 무한대의 저항 값을 가질 때 이상적인 보상 특성을 가진다.

보상전압 V_{inj} 은 전원전압 변동분과 고조파 전류 보상분으로 식 (1)과 (2)를 이용하여 식 (3)으로 얻어진다.

$$i_{sh} = i_s - i_{s1} \quad (1)$$

$$\Delta V = V_F^* - V_s \quad (2)$$

$$V_{inj} = \Delta V - K \times i_{sh} \quad (3)$$

여기서 i_{sh} : 전원전류의 고조파 성분

i_s : 전원전류, i_{s1} : 전원전류의 기본파 성분

ΔV : 전원전압 변동분, V_s : 전원전압

V_F^* : 부하단 기준전압, K : 보상기의 게인

V_{inj} : 보상분 혹은 주입 전압

이다.

2.2 제어 알고리즘

제어 알고리즘은 고조파 전류와 전압 변동분을 분리하여 제어하며 고조파 검출은 p-q 변환을 이용한다. 먼저 상전압과 전류를 $\alpha-\beta$ 좌표 변환하면

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos(-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\frac{2\pi}{3}) \\ \sin 0 & \sin(-\frac{2\pi}{3}) & \sin(\frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos(-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\frac{2\pi}{3}) \\ \sin 0 & \sin(-\frac{2\pi}{3}) & \sin(\frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

얻어진다. 여기서 v_{an}, v_{bn}, v_{cn} 은 부하단에서 검출한 상전압 이며, i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} 는 전원전류이다.

그림 3에서 p와 q는 식 (4), (5)를 p-q변환하여 행렬로 표현하면

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{p} \\ \hat{q} \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)이 얻어진다.

여기서 \bar{p}, \bar{q} 는 p, q의 직류성분으로 기본파 전압 전류의 곱이고, \hat{p}, \hat{q} 는 p, q의 교류성분이다. 순시유효전력 p와 순시무효전력 q의 고조파성분 p_h 와 q_h 는 p와 q를 고역통과필터에 입력시켜 얻어지며 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} p_h \\ q_h \end{bmatrix} = G_{HPF}(j\omega) \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (7)$$

전원전류 i_s 의 고조파 성분 i_{sh} 는

$$\begin{bmatrix} i_{sh\alpha} \\ i_{sh\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_h \\ q_h \end{bmatrix} \quad (8)$$

로 표현된다.

이상과 같이 고조파 전류에 대한 보상전압 V_{hc}^* 는

$$V_{hc}^* = K i_{sh} \quad (9)$$

로 얻어진다^[2].

그리고 전원전압 변동에 따른 보상전압 ΔV_C 는 식 (10)과 같이 부하단의 기준전압 V_F^* 와 전원측 전압 V_S 와의 차로써 얻어진다.

$$\Delta V = V_F^* - V_S \quad (10)$$

주입용 변압기에 최종적으로 주입하여야 할 전압 V_{inj}^* 은 전원전압의 변동분에서 고조파 전류에 대한 보상전압을 뺀 값으로 식 (11)로 표현된다.

$$V_{inj}^* = \Delta V - V_{hc}^* \quad (11)$$

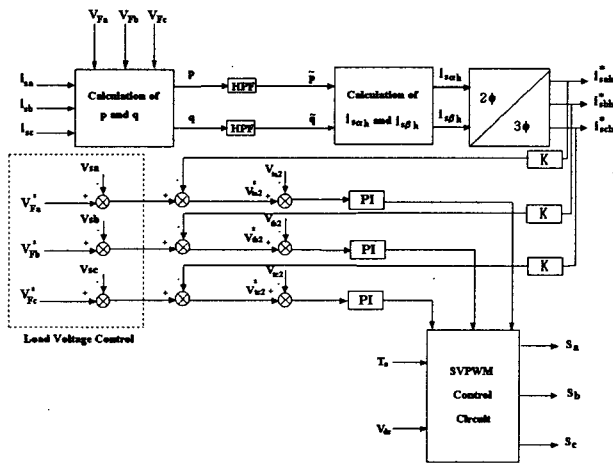


Fig. 3 제어 블록 선도

V_{inj}^* 를 표현하면

$$V_{inj}^* = [v_{Fkn}^* - v_{skn}] - K i_{skh} \quad (12)$$

(k = a, b, c)

가 된다.

여기서 i_{sah} , i_{sbh} , i_{sch} 는

$$\begin{bmatrix} i_{sah} \\ i_{sbh} \\ i_{sch} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sah} \\ i_{sbh} \end{bmatrix} \quad (13)$$

으로 표현된다.

2.3 제어기의 설계

보상기의 전체적인 제어는 전압보상기로 사용되는 3상 PWM 컨버터의 출력전압을 제어하기 위하여 각상의 전압제어를 한다.

그림 1로부터 전압 보상시스템의 전압방정식은 식 (14)과 같고 전압 방정식의 각상의 제어를 위하

여 각상에 대하여 나타내면 다음의 식과 같다.

$$V_{AX} = V_{injk} + L_f \frac{di_{ca}}{dt} \quad (14)$$

(k = a, b, c)

PI제어기를 사용하여 변압기의 출력단의 전압제어식은 식 (14)로부터 다음과 같이 구성을 할 수가 있다.

$$V_{AX} = (K_p + \frac{K_I}{s})(V_{injk}^* - V_{injk}) + L_f \frac{di_{ca}}{dt} \quad (15)$$

(k = a, b, c)

따라서 각상의 전압제어기의 전달함수를 각각 구하면 식 (16)과 같다.

$$\frac{V_{injk}}{V_{injk}^*} = \frac{sK_p + K_I}{s(1 + K_p) + K_I} \quad (16)$$

(k = a, b, c)

여기서 K_p 및 K_I 는 PI 제어기로 구성된 각상의 전압제어기 비례 및 적분이득을 나타낸다.

전류제어기의 경우 외란의 형태로 전압제어기에 들어가게 되며, 전향보상의 성분으로 들어가게 된다. 고조파 전류를 전압의 형태로 바꾸기 위한 보상이득 "K"의 계수를 가지게 되며, 보상이득의 값 "K"의 선정과 입력전압의 변동과 고조파의 보상의 관계에 대하여 시뮬레이션과 실험으로 알아보았다.

3. 시뮬레이션 및 실험

최적의 고조파 보상을 알아보기 위하여 전류의 THD의 변화를 시뮬레이션으로 알아보았다.

시뮬레이션은 PSIM4.0을 이용하였으며 시뮬레이션을 위한 파라미터의 값은 표 1과 같다.

전향보상기의 이득의 범위를 결정하기 위하여, 입력전압이 평형일 경우의 전류 THD를 비교하여 K값의 변동에 따른 변화는 그림 4에서 보여주는 것처럼 K=0에서 줄어들기 시작하여 K=5에서 최소의 값을 가진 후 점차 증가하여, K=8로 크게 증가 후 일정하게 되므로 K=0에서 8까지의 값의 범위를

표 1 시뮬레이션 파라미터

항목	용량
H.P.F	L=0.26[mH] C=300[μF] R=3[Ω]
컨버터의 출력필터	L=760[μH] C=2[μF]
전원	220[V], 60[Hz]
부하	5[kVA]
스위칭 주파수	10[kHz]

선정하여 입력전압의 변동에 대한 전류의 THD의 값의 변화를 알아보았다. 그림 5에서 보여주는 그림은 1상 불평형에서의 전류 THD를 보여주고 있으며, 이때의 최소의 전류의 THD는 K=7에서 5.6% 의로 최소의 값을 가진다. 그림 6에서는 2상 불평형의 전류의 THD는 K=7에서 가장 낮은 전류의 THD를 보상을 보여 주고 있다. 삼상 입력전압의 불평형 그림 7에서는 K=8에서 5.13%으로 가장 작을 값을 가지고 있다. 그림 8, 9는 K값의 범위에서 K=5에서 7사이의 범위에서 전류 THD와 전압의 보상이 가장 좋은 K=6의 파형을 보여주고 있다.

실험의 파형은 삼상 불평형 전압이 인가가 되었을 경우의 파형을 보여주고 있다. 불평형 전압이 인가가 되었으나, 보상후의 전압은 시뮬레이션에서 보요 준 입력전압의 97%까지의 전압의 보상이 이루어졌으며, 고조파 전류의 THD의 경우 4.7%의 THD를 보여주고 있다.

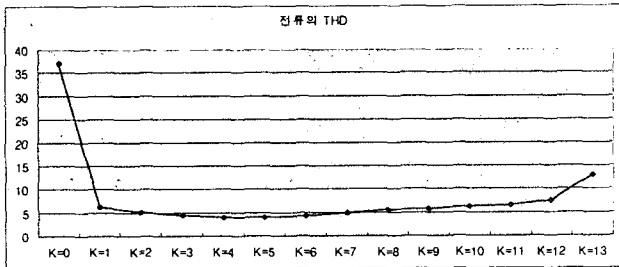


그림 4 3상평형에서의 전류 THD

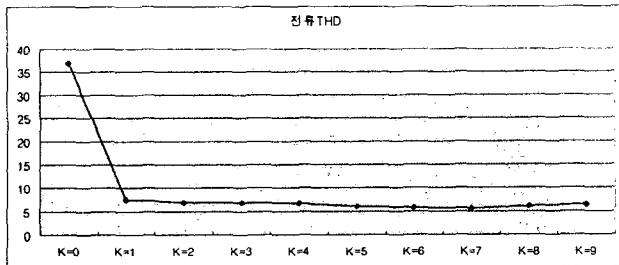


그림 5 1상(a상) 불평형의 전류 THD, 보상전압

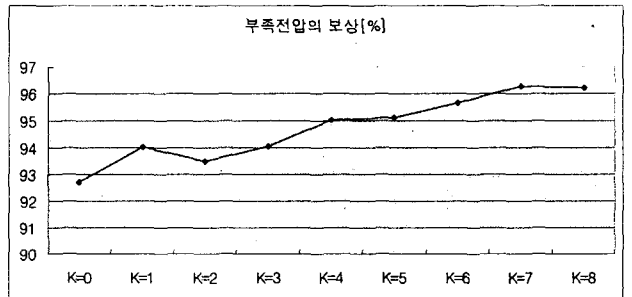
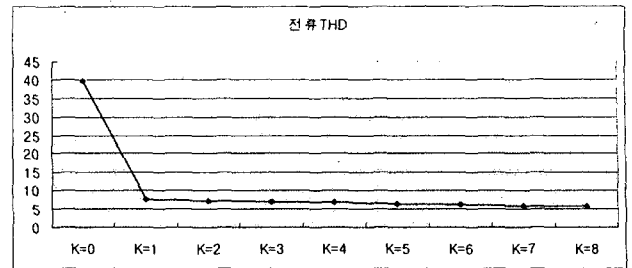
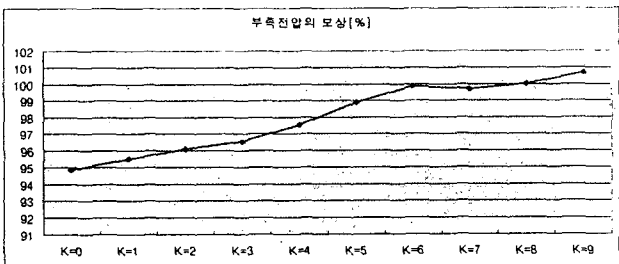


그림 6 2상 불평형의 전류 THD, 보상전압

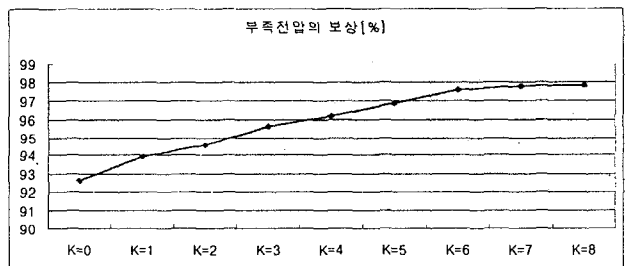
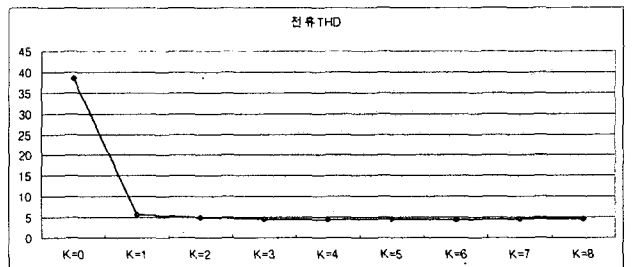


그림 7 3상(56, 78, 89%) 불평형의 전류 THD, 보상전압

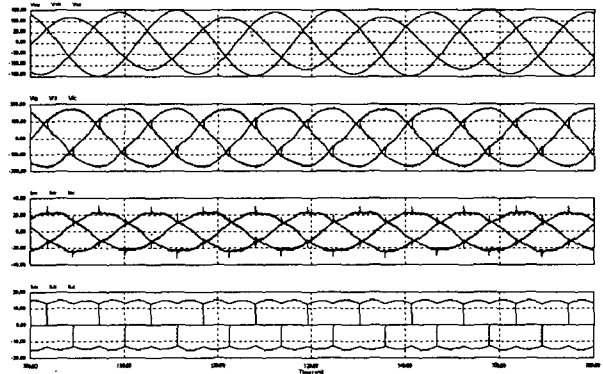


그림 8 3상 불평형 전압 : 56, 78, 89[%]; K=6
(a) 전원전압 (b) 부하전압
(c) 전원전류 (d) 부하전류

5. 결 론

본 논문에서는 3상직렬능동필터 시스템에서의 입력전압의 변동을 보상을 하며, 고조파의 보상을 하고 있는 것을 보여주고 있다. 입력 전압의 변동으로 인한 고조파의 전향보상의 이득에 따른 전류의 THD의 변화의 관계와 전압의 보상의 관계를 시뮬레이션으로 보여 주었으며 최적의 전향보상이득으로 입력전압의 보상과 고조파의 보상을 보여 주었다.

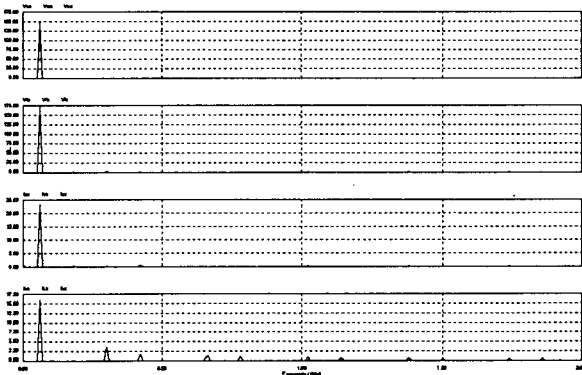
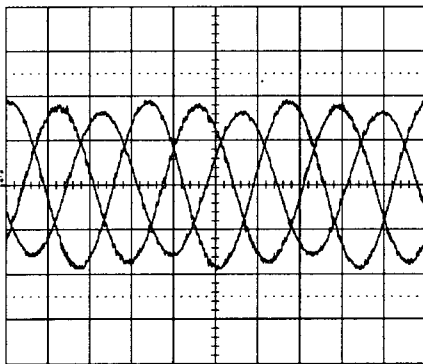
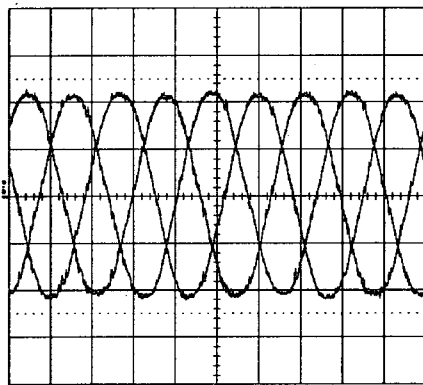


그림 9 FFT 결과 (a) 전원전압 (b) 부하전압
(c) 전원전류 (d) 부하전류



(a) 전원 전압 [80V/div, 5ms/div]



(b) 보상후 부하전압



(c) 전원전류[10A/div] / 부하전류[10A/div, 5ms/div]

그림 10 K=6에서의 실험 파형
(3상 불평형전압 : 56, 78, 89[%])

이 논문은 한국학술진흥재단의 연구비 지원에 의하여 연구되었습

참 고 문 헌

- [1] S.Y. Lee, S.W. Han, H.S. Mok, G.H. Choe, "A Novel Active Series Voltage Compensator with Harmonic Current Compensating Capability," *PEDS'99*, Vol. 2, 1054~1060, June, 1999.
- [2] H. Akagi, et. al., "New trends in active filters for power conditioning," *IEEE Trans. Industry Appl.*, vol. 32 no. 6, pp. 1312~1322, Nov./Dec. 1996.
- [3] 이승요, 고재석, 목형수, 최규하, "3상 불평형 전원 시스템의 새로운 위상각 검출기법을 이용한 순간전압 보상기의 해석 및 제어," *전력전자학회논문지*, 제4권, 제3호, pp. 275~284, 1999년 6월.
- [4] F. Z. Peng, et. al., "Compensation characteristics of the combined system of shunt passive and series active filters," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 29, no. 1, pp. 144~152, Jan./Feb. 1993.
- [5] H. Fujita, et. al., "A hybrid active filter for damping of harmonic resonance in industrial power systems," *IEEE PESC*, 1998, pp. 209~216.
- [6] H.Akagi, et. al., "Unified Power Quality Conditioner : The Integration of Series-and Shunt-Active Filters," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 13, no. 2, pp. 315~322, March, 1998.