

누적방지 기법을 적용한 3상 4선식 능동전력필터 시스템의 직류전압 제어

鄭敎範*

Anti-Windup Scheme to Control DC Voltage of Three-Phase Four-Wire Active Power Filter

Gyo-Bum Chung

요 약

본 논문은 3상 4선식 전력시스템내의 고조파전류 및 중성선에 흐르는 영상 전류를 저감하기 위한 3상 4선식 능동전력필터의 직류전압 제어를 위한 누적방지기법 적용에 관한 연구를 수행한다. 비선형 스위칭 부하에 의해 발생한 고조파 전류를 효율적으로 저감하고 전력시스템의 전체 성능을 개선하기 위해서, 전력시스템의 운전 특성에 따라 3상 4선식 능동전력필터의 내부 직류전압을 제어할 필요가 있다. 직류전압 제어를 위해서 일반적으로 PI 제어기를 사용하나, 적분기에 의한 누적 오차는 직류전압 제어기의 동특성에 영향을 준다. 따라서 본 논문은 누적방지 기법의 사용을 제안하며, 3상 4선식 능동전력필터의 직류 전압 제어기의 동특성이 개선됨을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 증명한다.

ABSTRACT

This paper investigates the application of the anti-windup scheme to control DC voltage of the three-phase four-wire active power filter, installed in a three-phase four-wire power system. In order to reduce efficiently the harmonic currents caused by the switching loads and to improve the whole performance of the power system, the DC voltage of the three-phase four-wire active power filter should be properly controlled. PI controller can be applied to the DC voltage controller of the three-phase four-wire active power filter. However, a large error input to PI controller leads to a windup phenomenon which deteriorate the dynamic characteristics of the DC voltage controller. Therefore, the application of the anti-windup scheme for the DC voltage controller is proposed and the improved performances of the anti-windup DC voltage controller are proved through the computer simulation study.

Key Words : Three-Phase Four-Wire Active Power Filter, Anti-Windup Scheme, Neutral Line, Harmonics

1. 서 론

*정회원, 홍익대학교 전자·전기·컴퓨터공학부 부교수

E-mail : gbchung@wow.hongik.ac.kr

접수일자 : 2002.11. 7

1차심사 : 2002.11.12

심사완료 : 2003. 2. 4

2차심사 : 2003. 1. 2

3상 3선식 전력시스템과 비교하여 3상 4선식 전력시스템은, 비선형 스위칭 부하에 의해 발생한 3배수 고조파 전류에 의한 영상(zero-sequence) 전류가 중성선에 과도하게 흐르는 문제점이 있다. 고조파 저감 대책

으로 수동필터를 많이 사용하여 왔으나, 최근 전력전자 기술의 발달로 인해 능동전력필터의 연구가 활발히 이루어지고 있다^{[1][2]}. 능동전력필터는 고조파 전류 보상뿐만 아니라, 무효전력 공급을 통한 역률 개선, 순간적인 전압 보상 및 중성선 고조파 전류 저감의 장점이 있다. 따라서 3상 4선식 전력시스템 내의 고조파 저감 대책으로 능동 전력필터를 사용하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

3상 4선식 능동전력필터의 출력 전류 제어를 위해 부하 전류를 측정하고, 저역통과 필터를 사용하여 기본파 성분을 제거한 후, Hysteresis 제어기를 이용하여 스위칭 신호를 발생하는 일반적인 방법이 있다. 비대칭 3상 부하의 경우에는 고조파 전류의 제거와 부하단 역률 개선을 동시에 도모하는 연구가 수행되었다^[3]. 부하가 소모하는 순시 유효/무효 전력을 측정하고, 고조파 전력 성분을 $\alpha\beta\theta$ 상에서 계산하여 스위칭 신호를 생성하는 방법과 순시 부하전류의 q축/d축 성분을 제어하는 방법에 대한 연구^{[4]-[6]} 및 전력시스템의 고조파 제거 및 역률 개선을 동시에 수행하는 3상 4선식 능동 전력필터를 사용한 연구가 수행되었다^{[7][8]}.

전력시스템 내의 고조파 전류 저감뿐만 아니라 전력시스템의 역률 및 능동전력필터의 스위칭 효율의 개선을 위해서, 3상 4선식 능동전력필터 내부 직류전압의 적절한 제어가 필요하며, 이를 위하여 PI 제어기의 사

용을 제안하였다^{[4][5]}. 그러나, 단순한 PI제어기는 전력시스템내의 운전 조건의 변화에 따른 과도한 오차 변화에 대해서 적절한 대응을 하지 못하고^{[9]-[11]}, 적분기의 누적오차는 3상 4선식 능동전력필터의 내부 직류전압의 오버슈트, 또는 전압 붕괴를 초래할 수 있다.

따라서 본 논문에서는, 능동전력필터의 효율적인 동작을 위해서, 누적방지 기법을 적용한 직류전압 제어기의 사용을 제안한다. 그리고, 컴퓨터 시뮬레이션으로, 전력시스템 내에 과도한 운전 조건의 변동이 발생한 경우에 누적방지 기법에 의한 직류전압 제어기의 효율성을 증명하였다.

2. 3상 4선식 능동전력필터

그림 1은 3상 4선식 능동전력필터가 설치된 3상 4선식 전력시스템을 보인다. 각상에 설치된 단상부하는 다이오드 정류기 및 RL특성의 부하로 구성되어 있다. 단상부하와 능동전력필터의 출력필터의 회로도도 는 부록 그림 1과 부록그림 2와 같다.

2.1 3상 4선식 능동전력필터의 출력 전류

삼상 전력 시스템의 순시 상전압 및 순시 선전류는 $abc/\alpha\beta\theta$ 변환을 이용하면 식 (1), (2)와 같다.

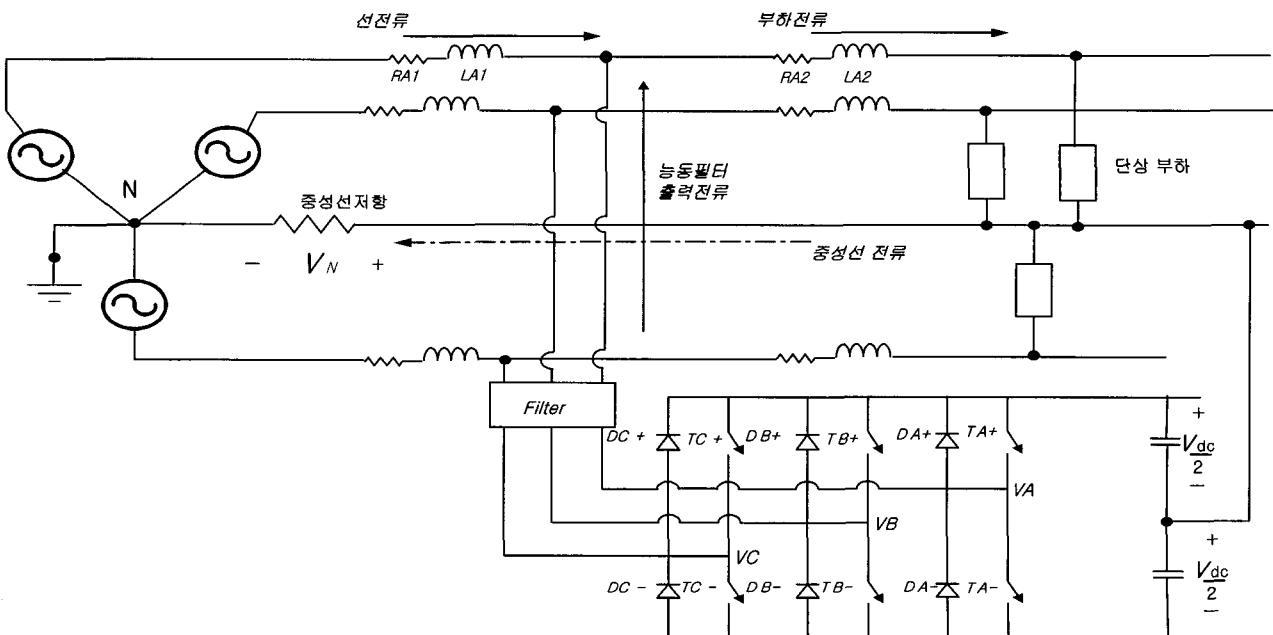


그림 1 3상 4선식 전력시스템과 3상 4선식 능동전력필터
Fig. 1 Three-Phase Four-Wire Active Power Filter in a Three-Phase Four-Wire Power System

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $abc/\alpha\beta$ 변환은 Power Invariant 변환이며 Stationary Reference Frame으로의 변환과 동일하다.

순시 유효전력 p , 순시 무효전력 q 및 순시 영상전력 p_0 는 식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a & v_\beta & 0 \\ -v_\beta & v_a & 0 \\ 0 & 0 & v_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

상전압 및 선전류의 기본과 성분은 순시 유효전력 p 및 순시 무효전력 q 의 직류 성분 P_{AC}, Q_{AC} 로 변환되고, 상전압 및 선전류의 고조파 성분은 순시 유효전력 p 및 순시 무효전력 q 의 교류성분 p_h, q_h 로 변환된다. 순시전력은 식 (4), (5)와 같다.

$$p = P_{AC} + p_h = v_a \cdot i_a + v_\beta \cdot i_\beta \quad (4)$$

$$q = Q_{AC} + q_h = v_a \cdot i_\beta - v_\beta \cdot i_a \quad (5)$$

고주파 필터(High-pass filter)를 이용하여 순시전력 p, q 의 기본과 성분을 제거하고, 교류성분 p_h 및 q_h 를 추출할 수 있으며, 영상 성분은 그 자체로 고조파 전력이다. 따라서 능동필터가 공급해야 할 고조파전류 성분은 식 (6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a & v_\beta & 0 \\ -v_\beta & v_a & 0 \\ 0 & 0 & v_0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} p_h \\ q_h \\ p_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

위 식을 정리하면 식 (7), (8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_a^2 + v_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} v_a & -v_\beta \\ v_\beta & v_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_h \\ q_h \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$i_0 = \frac{p_0}{v_0} \quad (8)$$

따라서 능동전력필터가 발생해야 할 출력 선전류는 식 (9)와 같다.

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.2 3상 4선식 능동전력필터의 직류전압 제어

능동전력필터가 전력시스템 내의 고조파 전류를 제거하고, 인버터 스위칭에 의한 전력손실을 보상하고, 전력시스템의 역률을 개선할 수 있으려면, 능동전력필터내의 DC 캐패시터가 충분한 크기의 전압을 가지고 있어야 할뿐만 아니라, 동작점 변화에 따라 적절한 크기로 조절되어야 한다. 따라서, 능동전력필터는 직류전압 제어를 필요로 한다.

그럼 1에서 직류 캐패시터 전압을 v_{DC} 라고 하면, 직류측 전력 p_{DC} 와의 관계는 식 (10)과 같다.

$$p_{DC} = C \frac{dv_{DC}}{dt} \cdot v_{DC} \quad (10)$$

DC 동작점에 근처에서 미소변동분이 발생한다고 가정하면

$$P_{DC} + p_{dc} = C \frac{d(V_{DC} + v_{dc})}{dt} \cdot (V_{DC} + v_{dc}) \quad (11)$$

식 (11)을 동작점 근처에서 선형화하여 정리하면 식 (12)와 같다.

$$p_{dc} \approx v_{dc} \cdot C \frac{dV_{DC}}{dt} + V_{DC} \cdot C \cdot \frac{dv_{dc}}{dt} \quad (12)$$

식 (12)를 라플라스 변환하여 능동전력필터 내의 직류전력 미소 변동분 p_{dc} 와 직류 캐패시터 전압 미소 변동분 v_{dc} 에 대한 전달함수를 구하면 식 (13)과 같다.

$$G(s) = \frac{v_{dc}}{p_{dc}} = \frac{1}{a_1 \cdot s + a_2} \quad (13)$$

직류전압 제어를 위한 보상기 $C(s)$ 를 포함하여 지령치 v_r 과 출력전압 v_{dc} 와의 관계는 그림 2와 같으며, p_{dc} 는 식 (4)의 기본파 전력의 변화량 ΔP_{AC} 와 같다. 따라서 직류 전압 제어시스템의 전달함수는 식 (14)와 같다.

$$\frac{v_{dc}}{v_r} = \frac{C(s) \cdot G(s)}{1 + C(s) \cdot G(s)} \quad (14)$$

식 (14)에서 보상기 $C(s)$ 는 계단입력에 대한 정상상태에서의 오차가 0이 되기 위해서 PI 보상기를 사용해야 하며, 식 (15)와 같다^[12].

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (15)$$

직류전압을 조절하기 위해서는 유효전력의 기본파 성분이 직류 측으로 유입되어야 한다. 따라서 직류전압 제어기에 의해 새로이 설정되는 능동전력필터의 출력전류 i_α, i_β 는 식 (16)과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_h + p_{dc} \\ q_h \end{bmatrix} \quad (16)$$

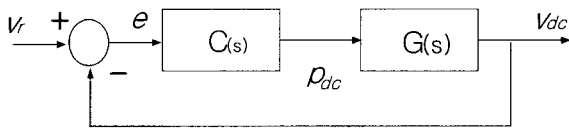


그림 2 능동전력필터의 직류전압 제어 블록도
Fig. 2 DC Voltage Control Scheme of Active Power Filter

3. 누적방지 기법

능동전력필터 내의 전압, 전류는 허용 동작범위 내에서 변화한다. 따라서 제어기의 출력은 제한된 범위

내의 값을 가져야 하며 이를 “공정 입력제한”이라고 한다^[10]. 과도한 입력신호의 변화에 의한 오차 발생은 공정 입력제한에 의해서 제어기의 출력과 실제 공정입력이 다르게 되어 제어기의 성능을 감소시킬 수 있다. 이를 누적현상(Windup)이라 하고, 적분기를 포함한 제어기는 누적현상의 영향을 받을 가능성이 매우 높다. 따라서 병렬형 능동필터의 직류전압 제어기의 성능 개선을 위해 누적방지(Anti-windup) 기법을 고려한다.

그림 3은 누적방지 기법을 적용한 3상 4선식 능동전력필터의 직류전압 제어기를 보인다. 직류전압 제어기는 PI 보상기 $C(s)$ 와 제어기 출력을 제한하여 공정입력을 전달하는 리미터 및 비례이득 K_a 를 갖는 누적방지 기구로 구성되어 있다. Plant(A.F.)는 능동필터 내의 직류전력 미소 변동분 p_{dc} 와 직류 캐패시터 전압 미소변동분 v_{dc} 에 대한 전달함수 $G(s)$ 에 의해 모델링된다.

4. 시뮬레이션 및 결과 비교

4.1 능동필터의 특성

그림 1과 그림 3에 표현된 3상 4선식 전력시스템과 누적방지 기법을 채택한 직류전압 제어기의 성능을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 사용한 프로그램은 PSIM이며, 시스템 사양은 표 1과 같다.

각 상마다 RL 교류 부하와, 캐패시터 필터를 부착된 저항 부하를 갖는 다이오드 정류기 부하가 병렬조합으로 설치되어 있다. 능동필터의 제어를 위해 전압전류 측정을 위한 샘플링 주파수는 10kHz로 설정하였으며, 히스테리시스 제어를 하였다.

그림 4는 전력시스템에 능동전력필터가 없는 경우의 선전류 파형을 보인다. 10[Ω]의 저항 부하를 갖는 다이오드 정류기 부하와 병렬로 연결되어 있는 4[Ω] 저항 및 20[mH] 인덕터의 교류부하에 의해서 3고조파 전류 성분을 포함한 선전류 파형이 보인다.

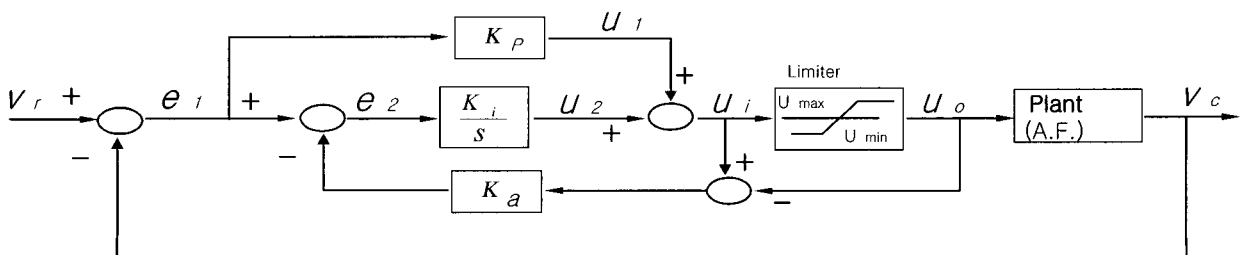


그림 3 누적방지기법을 적용한 3상 4선식 능동전력필터의 직류전압 제어 블록도
Fig. 3 DC Voltage Controller of Three-Phase Four-Wire Active Filter with Anti-Windup Scheme

표 1 3상 4선식 전력시스템 사양
Table 1 Three-Phase Four-Wire Power System

시스템 전압	381 _{Peak}	전원측 선로 정수 (RA1,LA1)	0.5Ω+10mH
시스템 주파수	60Hz	60Hz 부하 단상 성분 (RA3,LA3)	4Ω+20mH
부하측 선로 정수 (RA2,LA2)	1Ω+2mH	단상 정류기부하 (RDC)	10Ω
출력필터(전원측) (LAF1)	2mH	출력 필터 (RAF1, CAF)	0.1Ω+2μF
인버터 제어기 샘플링 주파수	10kHz	직류 Capacitor	1mF 2개 직렬 연결
출력필터(인버터측) (LAF2)	0.5mH	중성선 저항	10Ω

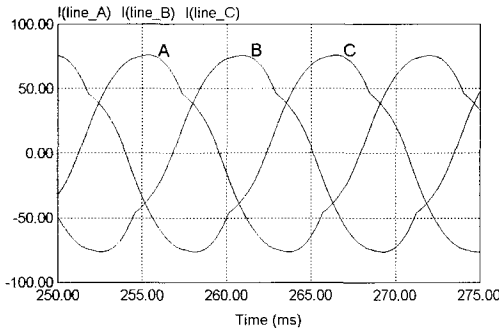


그림 4 삼상 교류 선전류 (능동전력필터없음)
Fig. 4 Line Currents with No Active Power Filter

그림 5는 중성선의 전류를 보인다. 다이오드 정류기 부하에 의한 3고조파 전류 성분을 주로 포함하고 있으며, 최대값은 9[A] 정도이다.

그림 6은 3상 4선식 능동전력필터를 설치한 경우, A 상의 전원측 전류, 부하전류 및 능동전력필터의 출력 전류 파형을 보인다. 전원측 전류는 정현파 파형을 취한다.

그림 7은 능동전력필터에 의해서 부하 전류의 고조파를 제거할 때, 3상 4선식 전력시스템의 중성선 전류를 보인다. 다이오드 정류기 부하에 의해 3고조파 전류 성분이 주로 포함하고 있으며, 초기 과도상태에서 최대값은 12[A], 정상상태에서 최대값은 2[A] 정도이다. 그림 5의 경우와 비교할 때, 중성선의 전류의 최대치가 9[A]에서 2[A]로 줄어들음을 알 수 있으며, 정상상태에 도달하기까지는 0.1[ms] 정도의 시간이 걸린다.

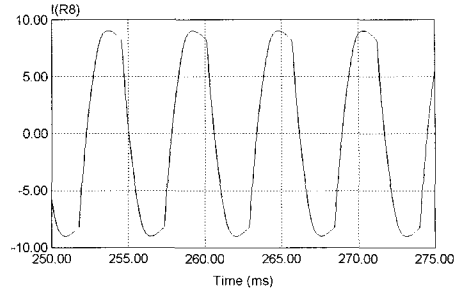


그림 5 중성선 전류 (능동전력필터없음)
Fig. 5 Neutral Line Current with No Active Power Filter

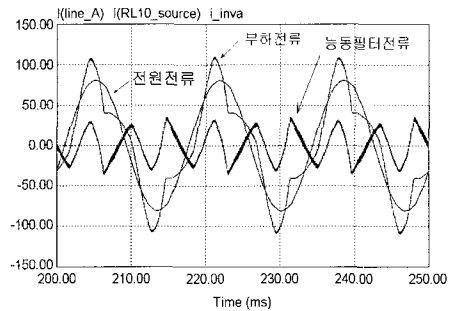


그림 6 3상 4선식 전력시스템의 전류파형 (능동필터 설치)
Fig. 6 Current Waveforms in Three-Phase Four-Wire Power System

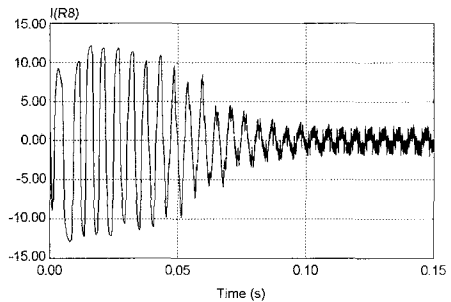


그림 7 비선형부하가 있는 3상 4선식 전력시스템의 중성선 전류 (능동전력필터 있음)
Fig. 7 Neutral Line Current in Three-Phase Four-Wire Power System with Active Power Filter

4.2 3상 4선식 능동전력필터의 직류전압 제어

그림 1과 그림 3에 표현된 3상 4선식 전력시스템과 누적 방지 기법을 채택한 직류전압 제어기의 성능을 평가하기 위하여 능동전력필터의 직류전압의 시뮬레이션 파형을 비교하였다. 직류전압 v_{DC} 의 초기치는 1000[V]로 설정하였으며, 제어기의 동특성을 시험하기

위해 직류전압 설정치를 0.06 [ms]에서 1005[V]로, 0.18 [ms]에서 다시 1000[V]로 변경하였다.

그림 8은 직류전압 제어기 없이 시뮬레이션을 수행한 결과 파형이다. 직류전압 v_{DC} 는 4.8 [ms]에 최소치 474.8 [V]의 값을 취한 후에 최종치는 4 [s] 이후에 1761.3 [V]를 취한다. 능동전력필터는 부하전류의 고조파 전류 보상을 위해 동작함으로써, 직류전압 제어기 없는 경우는 유효전력의 직류측으로의 유입에 많은 시간이 걸린다.

그림 9 (a)는 PI 제어기($K_p = 1000, K_i^{-1} = 0.0001$)를 이용하여 직류전압을 제어한 결과 파형이다. 초기의 과도한 적분기의 누적오차에 의해 정상상태에 이르지 못하고 직류전압이 붕괴되었다.

그림 9 (b)는 PI 제어기($K_p = 10, K_i^{-1} = 0.1$)를 이용하여 직류전압을 제어한 결과 파형이다. 적분기의 이득을 작게 하여 초기의 과도한 누적오차에 의한 문제점을 극복했으나, 정상상태에서 직류전압 v_{DC} 는 오랜 시간 동안 설정치 1000 [V]에 이르지 못하고 있다.

그림 9 (c)는 PI 제어기의 적분기의 이득($K_p = 10, K_i^{-1} = 0.01$)을 크게 한 결과 파형이다. 그림 9 (b)와는 다르게 적분기 이득이 커서, 직류전압에 오버슈트가 발생하였다. 그러나, 적분기 누적오차로 인하여 정상상태에서 직류전압 v_{DC} 는 오랜 시간 동안 설정치 1000 [V]에 이르지 못하고 있다.

그림 10은 누적방지를 위한 간단한 방법으로 과도한 오차입력이 발생한 초기에 제어기의 동작을 중지시키고 과도상태가 사라진 후에 제어기를 다시 동작시킨 경우이다. 따라서, 초기의 과도한 누적오차를 피하기 위해서 PI 제어기($K_p = 1000, K_i^{-1} = 0.0001$)는 0.05[s]에서 동작을 시작한다. 그러나, 제어기가 투입되는 0.05[s] 이후의 과도현상에 의한 누적오차에 의해서 PI 제어기는 직류전압 설정치 $V_{dc,r}$ 를 빠르게 추적하지 못하고 있음을 알 수 있다.

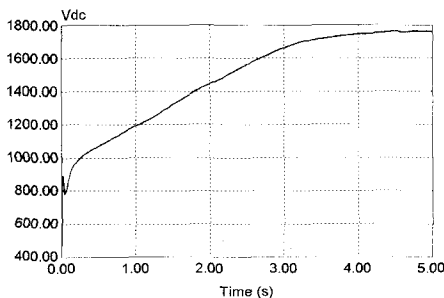
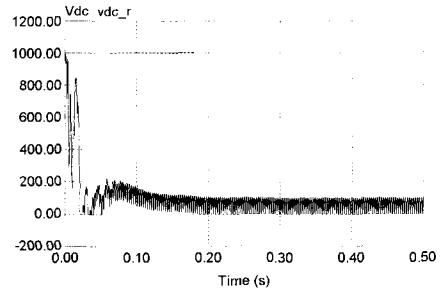
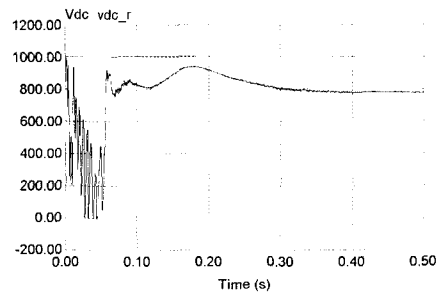


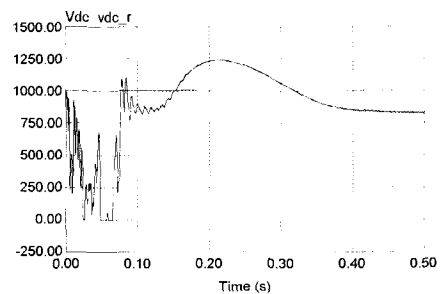
그림 8 직류 캐패시터 전압
Fig. 8 DC Voltage of the Capacitor



(a)



(b)



(c)

그림 9 PI 제어기를 사용한 캐패시터 직류전압 제어

- (a) $K_p=1000, K_i^{-1}=0.0001$
- (b) $K_p=10, K_i^{-1}=0.1$
- (c) $K_p=10, K_i^{-1}=0.01$

Fig. 9 DC Capacitor Voltage with PI Controller

- (a) $K_p=1000, K_i^{-1}=0.0001$
- (b) $K_p=10, K_i^{-1}=0.1$
- (c) $K_p=10, K_i^{-1}=0.01$

그림 11은 PI 제어기를 디지털 누적방지 기법으로 구현한 경우이다. 제어기의 동특성을 시험하기 위해 직류전압 목표치 $V_{dc,r}$ 을 0[ms]에서 1000[V], 0.06 [ms]에서 1005[V]로, 0.18 [ms]에서 1000[V]로, 0.6[ms]에서 1050[V]로 변경하였다. 디지털 PI 제어기의 이득 변화는 표 2와 같다.

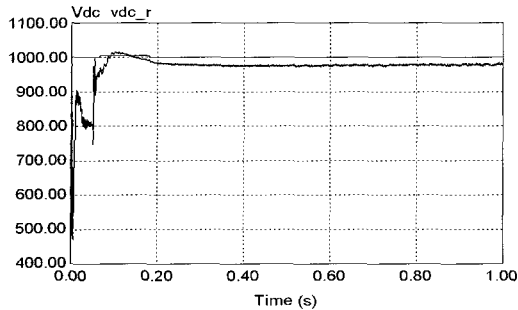


그림 10 과도한 누적 오차를 회피한 PI 제어기
Fig. 10 PI Controller avoiding the windup

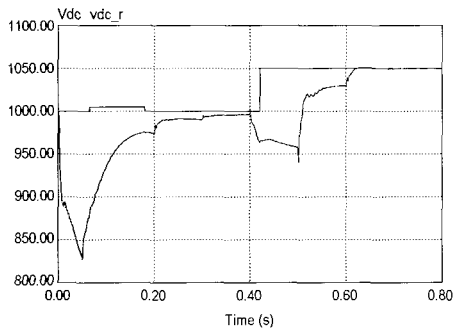


그림 11 디지털 누적방지 기법을 사용한 직류전압 제어
Fig. 11 DC Capacitor Voltage with Digital Anti-Windup Scheme

과도한 누적오차를 방지하기 위하여 디지털 제어기의 이득을 조금씩 증가시켜서 능동전력필터가 직류전압 붕괴없이 동작하고, 직류전압 설정치를 추적함을 보인다. 그러나, 디지털 제어기의 이득은 전력시스템의 운전점에 따라 적절히 조절되어야 하는 문제점이 있다.

그림 12는, 그림 3의 누적방지 기법을 적용하여 PI 제어기 ($K_p = 1000$, $K_i^{-1} = 0.0001$) 및 누적방지기구 ($K_a = 0.1$)를 사용한 직류전압의 결과 파형이다. PI 제어기는 0.001[s]에서 동작을 시작하며, 리미터는 $U_{min} = -10000$, $U_{max} = 10000$ 이다. 능동전력필터의 직류 캐패시터 전압은, 0[ms]에서 1000[V], 0.06[ms]에서 1005[V], 0.18[ms]에서 1000[V]로 변화하는 목표치 $V_{dc,r}$ 을 오버슈트없이 빠르게 추정하고 있다.

그림 13은 누적방지 기법을 적용한 능동전력필터가 설치된 3상 4선식 전력시스템의 중성선 전류를 보인다. 그림 7과 비교하여 누적방지 기법을 적용한 3상 4선식 능동전력필터에 의해서 중성선 전류는 약 0.025[s]정도 빠르게 정상상태에 도달하였다.

표 2 디지털 누적방지 기법을 위한 이득 변화
Table 2 Gain for Digital Anti-Windup Scheme

구 간 [sec.]	K_p	K_i^{-1}
0 ~ 0.05	10	0.1
0.05 ~ 0.2	100	0.01
0.2 ~ 0.3	500	0.001
0.3 ~ 0.4	1000	0.0001
0.4 ~ 0.5	100	0.01
0.5 ~ 0.6	500	0.001
0.6 ~ 0.8	1000	0.0001

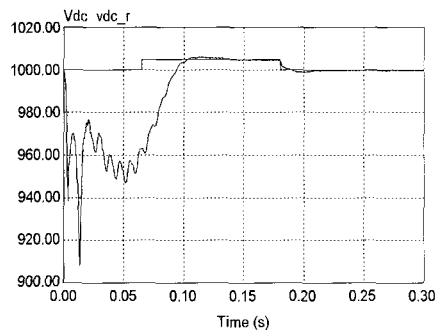


그림 12 누적방지기법을 사용한 직류전압 파형
Fig. 12 DC Capacitor Voltage of Anti-Windup Scheme

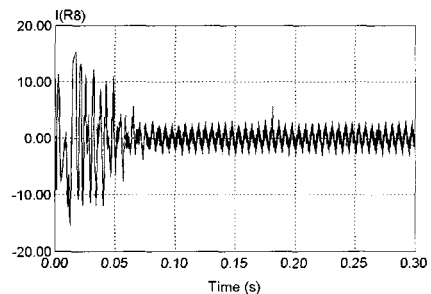


그림 13 누적방지기법을 이용한 중성선 전류
Fig. 13 Neutral Line Current using Anti-Windup Scheme

5. 결 론

본 논문은 3상 4선식 전력시스템 내에서 비선형 스위칭 부하에 의해 발생한 고조파 전류의 저감 및 중성선에 흐르는 영상 전류의 저감을 위한 3상 4선식 능동전력필터에 관한 연구를 수행하였다.

전력시스템 내의 고조파 전류의 저감을 위해 제안된 3상 4선식 능동전력필터가 보상 전류를 생성하기 위해

서, 삼상 상전압, 선전류의 $abc/\alpha\beta$ 변환을 수행한 후, $\alpha\beta$ 상에서 고조파 유효전력, 고조파 무효전력 및 영상 전력 해석을 수행하였으며, 능동필터의 출력 전류 제어를 위해서 Hysteresis 제어 기법을 사용하였다.

그러나, 전력시스템 내의 고조파 전류 저감뿐만 아니라 전력시스템의 역률 및 능동전력필터의 스위칭 효율 개선을 위해서, 3상 4선식 능동전력필터 내부 직류 전압의 적절한 제어가 필요하다. 단순한 PI제어기는 전력시스템 운전조건에 따른 오차변화에 대해서 적절한 대응을 하지 못하고, 적분기의 누적 오차는 3상 4선식 능동전력필터 직류전압의 오버슈트, 직류전압 붕괴, 또는 응답 안정화까지의 시간이 길어지는 문제를 발생시킨다. 이를 개선하기 위해서, 본 논문에서는 직류전압 제어를 위한 누적방지 기법의 사용을 제안하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션으로 3상 4선식 능동전력필터의 직류전압이 효과적으로 제어됨을 보였다.

참 고 문 헌

[1] T. Thomas, K. Haddad, G. Joos, and A. Jaafari, "Design and Performance of Active Power Filters", IEEE Industry Appl. Magazine, Vol. 4, Issue 5, pp. 38~46, Sept./Oct. 1998.

[2] Fang Zheng Peng, G.W. Ott, and D.J. Adams, "Harmonic and Reactive Power Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-phase Four-wire Systems", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 13, Issue 6, pp. 1174~1181, Nov. 1998.

[3] David Nedeljkovic, Janez Nastran, and Vanja Ambrozic, "Symmetrization of Line Currents in Three-Phase Four-Wire Loads", ISIE '99 proceedings, pp. 849~852.

[4] V. Soares, P. Verdelho, and G.D. Marques, "Active Power Filter Control Circuit Based on the Instantaneous Active and Reactive Current i_d-i_q Method", Proceedings of PESC '97, pp. 1096~1101, 1997.

[5] V. Soares, P. Verdelho, and G.D. Marques, "An instantaneous active and reactive current component method for active filters", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 15 Issue 4, pp. 660~669, July 2000.

[6] M. Aredes, J. Hafner, and K. Heumann, "Three-phase four-wire shunt active filter control strategies", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.

12, Issue 2, pp. 311~318, March 1997.

[7] S. Kim and P.N. Enjeti, "Control strategies for active power filter in three-phase four-wire systems", Proceeding of APEC 2000, Vol. 1, pp. 420~426.

[8] 고수현, 한윤식, 김영석, "고조파와 부하불평형에 대한 3상 4선식 직렬형 능동전력필터 시스템", 전력전자학회 하계 학술대회 논문집, pp. 603~606, 2002년 7월.

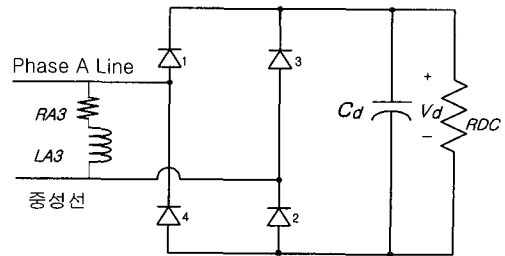
[9] 이지명, 이동춘, 이현동, "인버터의 포화를 고려한 전류제어기의 Anti-windup", 대한전기학회 논문지 47권 9호, pp. 1399~1405, 1998년 9월.

[10] 류지수, 김영곤, 박태건, 이기상, "PID 제어기를 위한 누적방지 기법에 관한 연구", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, pp. 2323~2326, 2000년 7월.

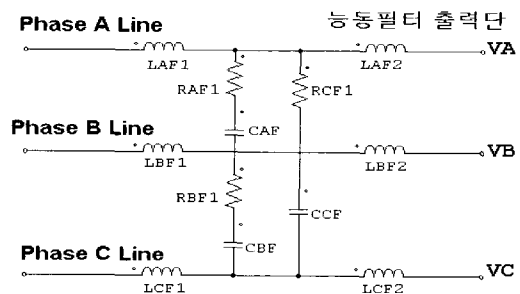
[11] O.J. Rojas and G.C. Goodwin, "A Simple Strategy for State Constrained Linear Control", 15th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control, Pap. #1849, Barcelona, July 2002.

[12] Norman S. Nise, "Control Systems Engineering", 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc. 2000.

부 록



부록 그림 1 단상부하 회로도
Appendix. Fig. 1 Circuit Diagram of Single-Phase Load



부록 그림 2 3상 4선식 능동전력필터의 출력필터 회로도
Appendix. Fig. 2 Output Filter of Three-Phase Four-Wire Active Power Filter

저 자 소 개



정교범(鄭敎範)

1959년 12월 20일생. 1983년 서울대 전기 공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 Univ. of Florida (박사). 1992년~1993년 Virginia Tech. Post Doc. 1993년~1995년 한국전기연구원 선임연구원. 1995년~현재 홍익대 전자·전기·컴퓨터공학부 부교수.