

## 부하전류 전향보상기를 이용한 강압쇼퍼의 동특성 향상

(Dynamic Characteristics Improvement of a Step-Down Chopper Using Load Current Feed-Forward Compensator)

전지용\* · 전기영\*\* · 정춘병 · 한경희

(Ji-Young Chun · Kee-Young Jeon · Chun-Byung Chung · Kyung-Hee Han)

### 요 약

본 논문에서는 부하전류의 급격한 변화에도 안정적인 출력전압을 얻기위하여 강압쇼퍼의 전압제어기를 개선하는 방법으로 부하전류 전향보상기를 제시하였다. 제시된 부하전류 전향보상기의 특성을 확인하기 위해 메이슨(Mason)의 이득공식을 이용하여 기존의 전압제어기가 포함된 전체 시스템의 전달함수와 부하전류 전향보상기가 추가된 전체 시스템의 전달함수를 각각 근궤적선도와 보드선도 상에서 비교하였다. 그 결과 시스템의 극점이 개선되고, 공진주파수에서의 첨두값의 크기 및 절점주파수의 위상여유가 양호한 것을 확인하였다. 따라서, 제시된 제어기법이 강압쇼퍼의 정상상태 및 동특성을 향상시키고 출력에 나타나는 외란에 의한 영향을 감소시킨 것을 확인할 수 있었다.

### Abstract

In this paper, The author present a load current feed-forward compensator by method that improve voltage controller of Step-down Chopper to get stable output voltage to sudden change of load current. To confirm the characteristics of a presented load current feed-forward compensator compared each transfer function of whole system that load current feed-forward compensator is added with transfer function of whole system that existent voltage controller is included using Mason gains formula in Root locus and Bode diagram.

As a result the pole of system is improved, extreme point of the wave and system improves, and size of peak value and phase margin of break frequency in resonance frequency confirmed that is good. Therefore, presented control technique could confirm that reduce influence by perturbation and improves stationary state and dynamic characteristics in output of Step-down Chopper.

Key Words : Feed-Forward, Resonance Frequency

\* 주저자 : 아주자동차대학 자동차계열 부교수

\*\* 교신저자 : 중소기업진흥공단 과장

Tel : 031-496-1032, Fax : 031-496-1037

E-mail : kyjeon@sbc.or.kr

접수일자 : 2007년 12월 26일

1차심사 : 2008년 1월 3일

심사완료 : 2008년 11월 6일

## 1. 서 론

일반 산업현장에서 많이 사용되고 있는 강압쇼퍼는 대체로 안정적인 전압을 공급하기 위하여 직류단 전압이 PI제어기에 의해 제어된다. PI제어기가 출력측 전압제어를 위해 사용되는 경우 예측 불가능한 부하의 순시적인 변화로 인하여 출력전압에 리플이 생기는 문제가 발생하게 된다.

즉 급격한 부하의 변화가 전압제어기의 외란으로 작용하여 전압 제어기의 성능을 저하시키게 된다 [1-3].

본 논문에서는 부하전류의 급격한 변화에도 출력 전압의 안정적인 제어를 하기 위해 강압쇼퍼의 전압 제어기를 개선하는 방법으로 부하전류 전향보상기를 제시하였다. 일반적인 전향보상기의 사용목적은 강압쇼퍼의 입력 기준신호의 큰 스텝 변화에 의해 생기는 정상상태 출력 에러를 보상하기 위함이다. 이는 정상상태 및 동특성을 향상시키고 강압쇼퍼의 출력에 나타나는 외란의 효과를 줄이는 작용을 한다. 이러한 전향보상기는 시스템의 안정도에는 영향을 미치지 않으며, 구성이 용이하다는 장점을 가지고 있다.

전향보상루프는 전압제어기의 출력에 삽입하여 구성하였다. 이는 전압제어를 위해 전원측 전류와 부하측 전류를 계산하여 제어입력에 이용함으로써 부하변동에 대한 영향을 최소화하여 과도응답 및 정상상태응답을 향상시키는 효과를 보게 된다. 이와 같은 제어 알고리즘을 구현하기 위하여 고성능 DSP 소자인 TMS320LF2406을 이용한 강압쇼퍼를 제작하여 제안된 알고리즘을 시뮬레이션과 실험을 통하여 제어기의 우수성과 강인함을 확인하였다.

## 2. 강압쇼퍼의 제어기 설계

### 2.1 강압쇼퍼의 제어조건

본 논문에 서술되는 강압쇼퍼는 10[kW]급으로 전력부는 스위칭 주파수 10[kHz]에서 10[%]이상의 부하에서 연속 모드로 운전하도록 구성되어 있다. 출력 전압의 리플은 1[%]이하가 되도록 하였다. 또한 전력변환기는 정전력부하를 포함한 광범위한 부하

변화에 대하여 안정하여야 한다.

스위칭 주파수는 IGBT에서 스위칭 손실에 의한 온도제약조건을 고려하여 10[kHz] 되도록 하였다. 전력 변환기의 상세요구조건은 부하조건에 예상변화가 광범위하기 때문에 과도 응답에 대한 요구조건은 포함되지 않았다. 그러나, 일반적으로 과도응답은 짧은 상승시간과 정착시간 그리고 오버슈트 전압은 작거나 없도록 고려하여야 한다. 그렇기 때문에, 상승시간에 대한 적정한 값은 2[%] 이내, 정착 시간과 최대 백분율 오버슈트는  $t_r \leq 1$  [ms],  $t_s \leq 5$  [ms] 그리고  $M_p \leq 5$  [%] 이내로 하여야 한다.

### 2.2 전향보상기의 설계 및 시스템해석

강압쇼퍼는 부하에 안정적인 전원을 공급하기 위해 과도한 부하 외란 조건에서도 DC링크 전압을 빠른시간내에 안정하게 유지하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 과도한 부하전류의 변동이 강압쇼퍼의 제어기성능을 저해하지 않도록 강압쇼퍼의 제어기를 개선하는 방법으로 전향보상기를 사용하였다. 일반적인 전향보상기의 사용목적은 컨버터 입력 기준신호의 큰 스텝 변화에 의해 생기는 정상상태 출력 에러를 보상하기 위함이다. 이는 정상상태 및 동특성을 향상시키고 컨버터 출력에 나타나는 외란의 효과를 줄이는 작용을 한다. 이러한 전향보상기는 시스템 안정도에는 영향을 미치지 않으며, 구성이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 전향보상루프는 전압 제어기 출력에 삽입하여 구성한다. 이는 전압제어를 위해 전원측으로 흘러야 할 전류와 부하측으로 흘러야 할 전류를 계산하여 입력측에 흐르게 함으로써 부하변동에 대한 영향을 최소화하여 과도응답 및 정상상태응답을 향상시키는 효과를 보게 된다.

전향보상기를 포함한 전압제어기는 식 (1)과 같으며, 제어블록도는 그림 1과 같다 여기서  $k_f$ 는 전향보상이득이며 부하전류에 대한 출력전압의 주파수 응답특성을 통하여 최적의 값을 선정한다.

$$d(t) = k_p (v_{ref}(t) - v_o(t)) + k_i \int (v_{ref}(t) - v_o(t)) dt - k_f \frac{di_o(t)}{dt} \quad (1)$$

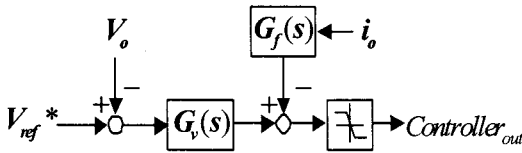


그림 1. 전향보상기를 포함한 시스템 제어블록도  
Fig. 1. Control block diagram including feedforward compensator

### 2.3 강압쇼퍼 디자인 방정식

DC-DC 컨버터의 전력부는 그림 2와 같다. 강압 쇼퍼의 인덕턴스는 2가지의 설계조건에 의해 결정된다. 첫 번째의 설계조건은 정격부하의 10[%] 이상의 부하에 대하여 연속모드로 강압쇼퍼를 운전하여야 한다. 두 번째 조건은 사용 가능한 인덕터의 코어에 의해 결정된다.

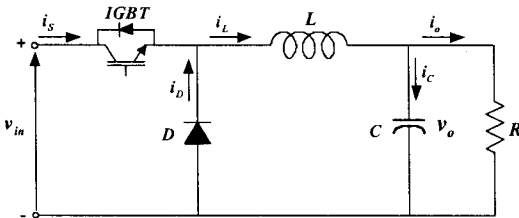


그림 2. 강압쇼퍼  
Fig. 2. Step-down chopper

식 (2)는 임계 인덕턴스에 대한 방정식을 나타낸다[4].

$$L = \frac{R}{2f_s} (1 - D) \tag{2}$$

실제 시스템은 70[%]의 시비율에 스위칭주파수  $f_s = 5$  [kHz], 부하저항  $R_{chop} = 16$  [ $\Omega$ ] (정격 전력의 10[%])이므로 인덕턴스 값은 480[uH] 값이 된다.

커패시터는 출력 전압 리플이 1[%] 보다 작거나  $\Delta v_o < 3$  [V]가 되도록 설계한다. 식 (3)은 커패시터의 크기를 산출하기 위한 방정식이다[4].

$$C = \frac{D}{8Lf_s^2 \Delta v_o} (v_{in} - v_o) \tag{3}$$

식 (3)으로부터 커패시터의 크기는 243[ $\mu$ F]보다 큰 값으로 설정하면 된다. 본 연구의 시뮬레이션에서 적용한 시스템의 파라미터는 시스템의 출력전류 리플향상 및 출력전압의 맥동향상을 위해서 인덕턴스 및 커패시터의 산출치보다 큰 1.1[mH]와 4700[ $\mu$ F]으로 하였다.

### 2.4 제안된 알고리즘의 제어특성

제안된 시스템의 제어특성을 알아보기 위해서, 전압지령에 대한 출력전압의 응답을 전달함수로 나타내었다.

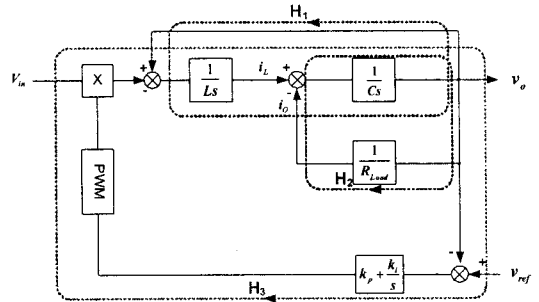


그림 3. 일반적인 PI전압제어기가 포함된 시스템  
Fig. 3. General PI controller without load current feedforward

그림 3은 일반적인 전압제어기가 포함된 시스템이다. 여기에서 식 (4)는 그림 3의 제어블록을 Mason 방정식에 따라 closed-loop로 구성하면  $H_1 \sim H_3$ 로 나타낼 수 있다[5-6].

시스템의 전향경로 이득

$$P_1 = \frac{k_p s + k_i}{s} \cdot \frac{1}{Ls} \cdot \frac{1}{Cs}$$

각각의 루프들의 이득  $H_1 \sim H_3$

$$H_1 = -\frac{1}{Ls} \cdot \frac{1}{Cs} \quad H_2 = -\frac{1}{RCs}$$

$$H_3 = -\frac{k_p s + k_i}{s} \cdot \frac{1}{Ls} \cdot \frac{1}{Cs} \quad \Delta_1 = H_1 + H_2 + H_3$$

부하전류 전향보상기를 이용한 강압효과의 동특성 향상

$$\frac{v_o}{v_{ref}} = \frac{P_1}{1 - \Delta_1} = \frac{\frac{k_p s + k_i}{s} \cdot \frac{1}{LCs^2}}{1 + \left( \frac{1}{LCs^2} + \frac{1}{RCs} + \frac{k_p s + k_i}{s} \cdot \frac{1}{LCs^2} \right)}$$

$$= \frac{\frac{1}{LC} k_p s + \frac{1}{LC} k_i}{s^3 + \frac{1}{RC} s^2 + \left( \frac{k_p + 1}{LC} \right) s + \frac{1}{LC} k_i} \quad (4)$$

그림 4는 제안된 부하전류 전향보상기가 포함된 전체 시스템의 블록도이다. 여기에서 식 (5)는 그림 4의 제어블럭을 Mason 방정식에 따라 closed-loop 로 구성하면  $H_1 \sim H_4$ 로 나타낼 수 있다.

시스템의 전향경로이득

$$P_1 = \frac{k_p s + k_i}{s} \cdot \frac{1}{Ls} \cdot \frac{1}{Cs}$$

각각의 루프의 이득  $H_1 \sim H_4$

$$H_1 = -\frac{1}{Ls} \cdot \frac{1}{Cs} \quad H_2 = -\frac{1}{RCs}$$

$$H_3 = -\frac{k_p s + k_i}{s} \cdot \frac{1}{Ls} \cdot \frac{1}{Cs} \quad H_4 = -\frac{1}{Ls} \cdot \frac{1}{Cs} \cdot \frac{k_i s}{R}$$

$$\Delta_1 = H_1 + H_2 + H_3 + H_4$$

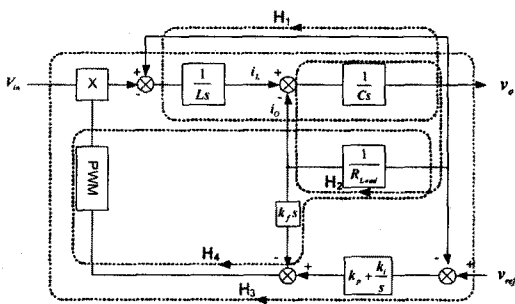


그림 4. 부하전류 전향보상기가 추가된 시스템  
Fig. 4. PI controller with load current feedforward

제안된 시스템의 응답특성을 알아보기 위해 식 (4)와 식 (5)를 각각 근계적선도와 주파수응답 상에서 비교해보았다.

그림 5에서 보는 것과 같이 동일한 PI이득( $k_p=70$ ,  $k_i=200$ ) 및 부하조건( $R=16[\Omega]$ )에서 기존의 전압제

어가 포함된 시스템의 극점 $s=-5.24 \pm j3890$ 으로 이동하였고 이때의 오버슈트는 99.6[%]이다. 반면, 부하전류 전향보상기가 추가된 시스템의 극점  $s=-3330 \pm j2000$ 으로 이동하였고 이때의 오버슈트는 0.535[%]이다.

$$\frac{v_o}{v_{ref}} = \frac{P_1}{1 - \Delta_1} = \frac{\frac{k_p s + k_i}{s} \cdot \frac{1}{LCs^2}}{1 + \left( \frac{1}{LCs^2} + \frac{1}{RCs} + \frac{k_p s + k_i}{s} \cdot \frac{1}{LCs^2} + \frac{1}{LCs^2} \cdot \frac{k_i s}{R} \right)}$$

$$= \frac{\frac{1}{LC} k_p s + \frac{1}{LC} k_i}{s^3 + \left( \frac{k_p + 1}{RLC} \right) s^2 + \left( \frac{k_p + 1}{LC} \right) s + \frac{1}{LC} k_i} \quad (5)$$

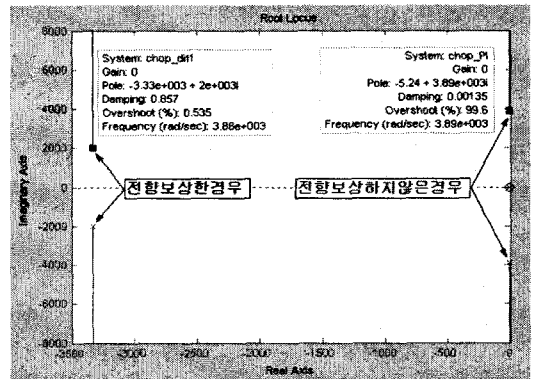


그림 5. 부하전류 전향보상기에 따른 시스템의 근계적  
Fig. 5. The Root locus of system based on load current feedforward

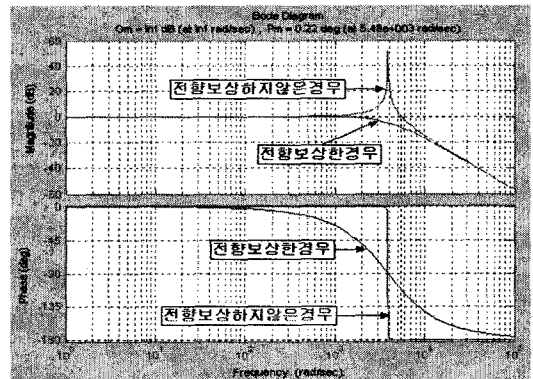


그림 6. 부하전류 전향보상기에 따른 시스템 주파수 응답  
Fig. 6. The frequency response of system based on load current feedforward

그림 6에서는 시스템의 주파수 응답특성을 나타내며 공진주파수에서 공진점두값의 크기 및 절점주파수의 위상여유가 부하전류 전향보상기가 포함된 시스템이 일반적인 전압제어기가 포함된 시스템보다 양호한 것을 확인하였다. 따라서, 제시된 부하전류 전향보상기를 적용하였을 경우 그림 5와 그림 6에서와 같이 시스템의 응답속도가 빨라지고 과도상태 및 동특성이 향상된 것을 확인할 수 있었다.

### 3. 시뮬레이션 및 실험결과

본 연구에서 제안된 전향보상기를 이용한 알고리즘을 강압초퍼에 적용하였다. 전체적인 제어특성을 알아보기 위해서 본 연구에서는 그림 7과 같이 MATLAB을 이용하여 제어 블록을 구성하였다.

표 1은 시뮬레이션에 이용된 강압 초퍼의 파라미터를 나타내고 있다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Parameters of simulation

강압초퍼의 파라미터			
$V_m$	400[V]	$V_o$	300[V]
$f$	10[KHz]	$L$	2[mH]
$C$	4700[ $\mu$ F]	$R$	1.6[ $\Omega$ ]

시뮬레이션에 이용된 전체적인 제어구조는 그림 7에 나타나 있는 것 같이 구성되어 있다. 그리고 본 연구에서의 시스템 파라미터는 표 1과 같이 입력전압 400[V]일 때 출력 전압은 300[V]로 하였다. 이러한 시스템에 대한 시뮬레이션의 목적은 10[kW]의 강압초퍼로 이루어진 DC 전원공급장치의 DC 링크 전압 제어에 대한 특성을 알아보기 위한 것이다. 이때 시뮬레이터의 스위칭 주파수는 10[kHz], 리액터는 1[mH]로 하였다.

#### 3.1 시뮬레이션

그림 8은 일반적인 PI제어기로 구성된 회로에 있어서 출력전압 및 전류를 나타내고 있다.

시험조건은 부하의 10[%](16.36[ $\Omega$ ]) - 100[%](1.636[ $\Omega$ ]) - 10[%](16.36[ $\Omega$ ])로 부하를 투입하였다.

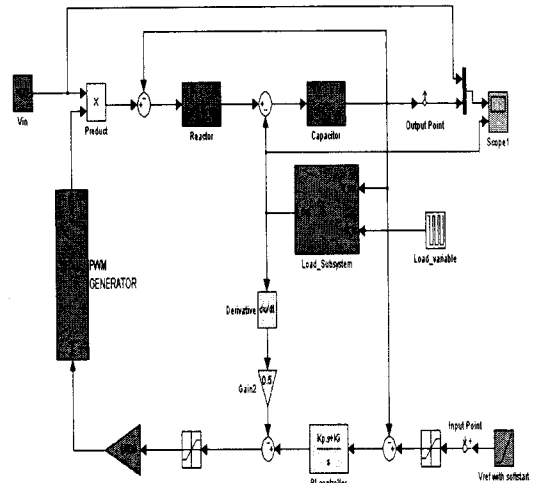


그림 7. 강압초퍼의 simulink 블록도  
Fig. 7. Simulink block diagram of Step-down chopper

그림 8과 그림 9의 시뮬레이션 결과로부터 부하전류 전향보상기를 적용하였을 경우 그림에서 볼 수 있듯이 출력전압의 과도특성 및 정상상태 특성이 현저하게 개선되었음을 보여주고 있다. 따라서, 본 시스템에서 요구하는 동특성에 해당하는 특성을 얻을 수 있었다.

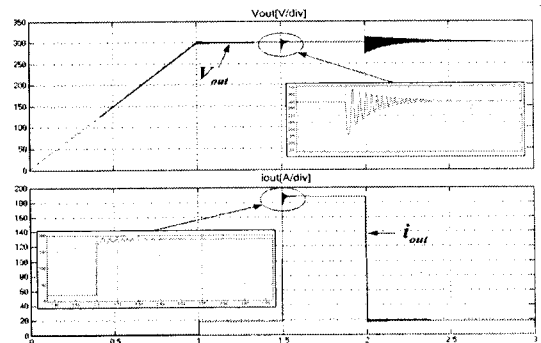


그림 8. PI제어기만 적용한 경우  
Fig. 8. PI controller without load current feedforward

부하전류 전향보상기를 이용한 강압쇼퍼의 동특성 향상

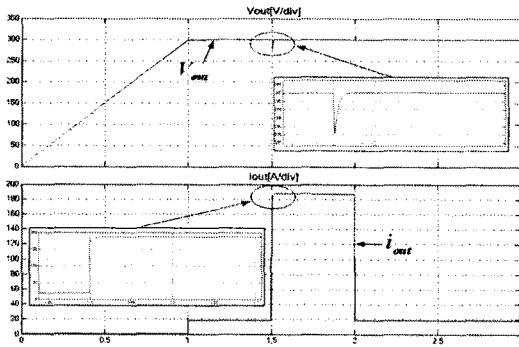


그림 9. 부하전류 전향보상기를 적용한 경우  
Fig. 9. PI controller with load current feedforward

그림 10은 식 (5)에 해당하는 제어기를 사용하였을 경우 제어기의 제어항 및 각부의 파형을 나타낸 것이다. 첫 번째 파형은 출력전압이며, 두 번째 파형은 부하전류 전향보상기에 의한 보상 전압항, 세 번째 파형은 입력 전압에 대한 출력전압의 오차를 보상할 수 있는 PI제어기의 제어신호를 나타내고 있다.

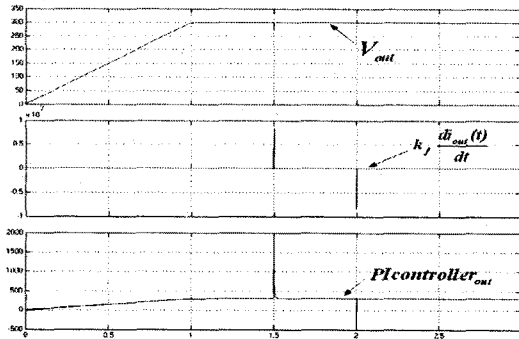


그림 10. 부하전류 전향보상기를 적용한 경우 제어기 각부 파형  
Fig. 10. Each part waveform of the PI controller with load current feedforward

3.2 실험결과

본 논문에서 제안한 부하전류 전향보상기에 의한 강압쇼퍼의 특성을 확인하기 위한 실험결과 파형이다. 실험은 시뮬레이션과 같은 파라미터를 갖는 시스템을 사용하였으며 스위칭 소자로는 600[V]/100[A]의 IGBT를 사용하였다. IGBT를 구동하기 위한 스위칭 주파수는 10[kHz]로 하였다.

그림 11은 일반적인 PI제어기로 구성된 회로에 있어서 출력전압 및 전류를 나타내고 있다.

시험 조건은 0[Ω]-10[Ω]-5[Ω]-0[Ω]으로 부하를 투입하였다.

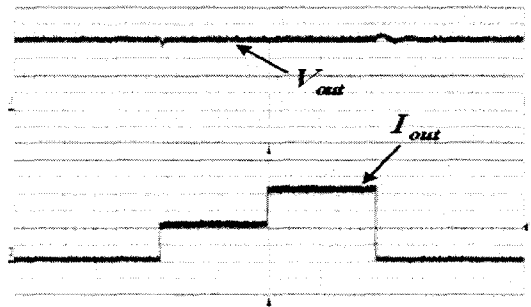


그림 11. PI제어기만 적용한 경우 강압쇼퍼의 출력파형  
Fig. 11. Output waveforms of a step-down chopper with PI controller(3. 50[V/Div], 4. 10[A/Div] Time Div 200[msec])

그림 12는 PI전압제어기와 부하전류 전향보상기를 함께 적용하였을 때의 파형이다. 이때의 부하전류 전향보상기의 이득 즉  $k_f$ 는 0.5로 하였다.

그림 13은 부하전류 전향보상기의 이득 즉  $k_f$ 를 4로 하였을 경우의 실험 파형이다. 그림 12와 13에서 보는 것과 같이 강압쇼퍼의 출력특성은 부하전류 전향보상기의 이득에 따라 결정될 수 있음을 확인하였다.

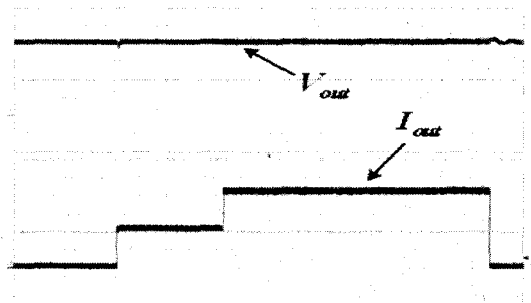


그림 12. 부하전류 전향보상기를 적용한 경우 출력파형 ( $k_f=0.5$ )  
Fig. 12. Output waveforms of step-down chopper with load current feed-forward compensator( $k_f=0.5$ )(3. 50[V/Div], 4. 10[A/Div] Time Div 200[msec])

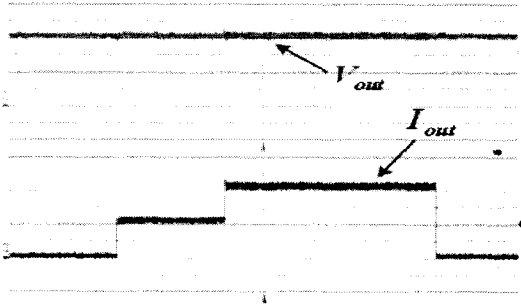


그림 13. 부하전류 전향보상기를 적용한 경우 출력파형 ( $k_f=4$ )  
 Fig. 13. Output waveforms of step-down chopper with load current feed-forward compensator ( $k_f=4$ ) (3. 50(V/Div), 4. 10(A/Div) Time Div 200(msec))

#### 4. 결 론

본 연구에서는 강압효과에 안정한 전원을 얻기 위해 부하전류 전향보상기를 이용한 알고리즘을 제시하여 급격한 전류 변화에 의한 강압효과의 출력전압 리플을 최소화시켰으며, 순간적인 전압강하 및 과전압 현상에 대하여 빠른 응답특성을 갖음을 확인하였다. 또한, 부하전류 전향보상기를 적용한 결과 시스템의 극점이 개선되고, 공진주파수에서의 첨두값의 크기 및 절점 주파수에서의 위상여유가 양호한 것을 확인 하였으며, 부하전류를 PI전압제어기에 전향보상 함으로써 과도한 부하전류의 변동에도 안정된 제어가 이루어짐을 확인하였다.

#### References

[1] R. W Ashton, J.G. Ciezki, M.G. Badorf, "The Synthesis and Hardware Validation of DC-to-DC Converter Feedback Control," IEEE, pp65-71, 1998.  
 [2] P. Kazmierkowski and Luigi Malesani, "Current Control Technique for Three-Phase Voltage-Sour PWM Converter : A Survey", IEEE Trans. Indus. Elec., Vol.45, No. 5, pp. 30-36, 1993.

[3] M. T. Tsai and W. I. Tsaim, "Analysis and Design of Three Phase AC-to-DC Converters with High Power Factor and Near-Optimum Feedforward", IEEE Trans. Indus Elec., Vol. 46, No. 3, pp. 535-543, 1999.  
 [4] B. Choi, B. Cho, F. Lee and R. Ridley, "Three-Loop Control for Multimodule Converter Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 8, No.4, pp. 466-474, Oct 1993.  
 [5] F. Garofalo, P. Marino, S. Scala and F. Vasca, "Control of DC-DC Converters with Linear Optimal Feedback and Nonlinear Feedforward", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 9, No. 6, pp. 667-615, Nov 1991.  
 [6] P. Liu and P. Sen, "A Novel Method to Achieve Zero-Voltage Regulation in Buck Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 10, No. 3, pp.292-301, May 1995.

#### ◆ 저자소개 ◆

##### 전지용 (全智鏞)

1962년 10월 20일생. 1986년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년 3월~현재 아주자동차대학(구 대천대학) 자동차제열 부교수.

##### 전기영 (全基英)

1971년 8월 15일생. 1994년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 1998년 명지대학교 전기공학과 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 중소기업진흥공단 과장.

##### 정춘병 (鄭春炳)

1948년 7월 4일생. 명지대학교 전기공학과 졸업. 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 명지대학교 대학원 전기공학과 박사과정. (주)신한 이사. (주)이산. 건축 전기설비. 전기용융기술사. 한국 조명설비학회 임원. 한국기술회 이사.

##### 한경희 (韓慶熙)

1943년 4월 9일생. 1967년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 명지대 전기제어정보공학부 명예교수.