

論文2003-40SC-3-14

DSP를 이용한 강압형 DC-DC 컨버터의 원격제어

(A Remote Control of a Buck-typed DC-DC Converter using DSP)

金潤瑞*, 梁 呑*

(Youn Seo Kim and Oh Yang)

요약

기존의 아날로그 제어방식과는 달리 디지털 제어 방식은 기본적으로 마이크로프로세서를 포함하고 있기 때문에 아날로그 제어방식에서는 할 수 없었던 DC-DC 컨버터 내부 파라미터에 대한 모니터링이 가능하며, 아날로그 제어방식에서는 처음의 사양에 의해 고정된 출력전압을 얻었지만 디지털 제어 방식에서는 PC와 DC-DC 컨버터의 통신을 통하여 사용자가 원하는 임의의 전압을 얻어낼 수 있고 원격제어가 가능하다. 또한 PC와의 통신을 통해 원거리에서 있는 DC-DC 컨버터에 정확한 전압이 출력되고 있는지를 알 수 있는 원격 감지도 할 수 있다. 본 논문에서는 DSP(TMS320C31)을 이용한 DC-DC 컨버터를 설계하기 위해 간단한 Buck 컨버터를 구성하였으며, Buck 컨버터는 15V 입력으로부터 DSP의 에플레이터를 이용하여 PC상에서 원격으로 0V에서 5V까지 다양한 출력 전압을 만들 수 있다. PWM의 듀티(Duty) 제어를 위한 제어기로써는 DSP를 이용하여 간단하면서도 가장 많이 사용되는 PID제어기 중에서 PD제어기를 사용하였으며, 이 디지털 제어방식 컨버터의 실용성을 검토하기 위해 과도상태의 특성과 정상 상태의 특성을 비교, 분석하여 본 논문에서 설계된 DC-DC 컨버터의 우수성을 확인하였다.

Abstract

Because the digital control includes microprocessor different from an analog control, the digital control enables to monitor internal parameters of DC-DC converter and to control output voltage remotely by communicating with a Window based PC and also to monitor whether exact voltage is output or not. These things are impossible in an analog control. In this paper, a simple buck converter controlled by DSP(TMS320C31) is implemented. This converter outputs 0V to 5V from 15V input voltage and is controlled by a PD algorithm using DSP. Finally the response characteristics of a step reference voltage and in a steady state are analyzed to verify the usefulness of this digital controlled converter.

Keyword : DC-DC converter, microprocessor, digital control, PD, DSP.

I. 서론

* 正會員, 淸州大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Engineering Chong-ju Univ.)

※ 본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 청주대

학교 정보통신 연구센터의 지원에 의한 것입니다.

接受日字:2002年11月22日, 수정완료일:2003年4月23日

전자기기의 전반에 걸쳐 폭넓게 사용되고 있는 DC-DC 컨버터는 고효율, 안정성 개선 및 소형화를 위한 지속적인 연구개발을 통하여 많은 성과를 거두고 있으나 소자 개선, 회로 구조변경, 또는 제어특성 개선 등의 아날로그적인 제어 방식에 대한 연구개발이 대부분을

차지하고 있다^{1,2)}. 그러나 아날로그적인 제어 방식은 비선형 시스템에 대한 수학적 모델링이 어렵기 때문에 고성능의 제어기나 제어 알고리즘을 설계하는데는 어려움이 있으며 스위칭 컨버터를 위한 아날로그 제어기는 노이즈와 스위칭 작용과 노이즈가 섞인 출력전압으로 인한 컴포넌트의 출력변화에 상당히 민감하다는 단점이 있다^{2,3)}. 그러나 최근에는 산업 분야의 전반에 걸쳐 나타나고 있는 디지털화에 따라 DC-DC 컨버터의 디지털 제어에 관한 연구도 서서히 이어지고 있으며 상용화를 위한 연구발표도 이어지고 있다. 더욱이 전자기기의 소형화에 대한 요구가 증가함에 따라 많은 전자기기 중에 DC-DC 컨버터는 필수적인 부분이 되고 있으며, 새로운 반도체 전력소자와 새로운 구조 그리고 새로운 IC 제어기들의 개발로 인해 더 높은 스위칭 주파수가 DC-DC 컨버터의 전력변환 효율을 높이기 위해 사용되어지고 있다.

기존의 아날로그 제어방식에 비하여 디지털 제어방식은 기본적으로 마이크로프로세서를 포함하고 있기 때문에 디지털 제어 스위칭 컨버터는 종래의 아날로그 제어 스위칭 컨버터보다 좀더 지능적이고 좀더 많은 다양성을 가지고 있으며, 디지털 제어기는 소프트웨어의 수정을 통하여 스위칭 컨버터의 어떠한 부하변동 요구 특성에도 적용시킬 수가 있다. 이것의 한 예로서 디지털 제어 스위칭 컨버터는 컨버터 내부의 파라미터에 대한 모니터링이 가능하며 원격 제어 및 원격 감시 또한 가능하고, 하드웨어 변경 없이 프로그램의 수정만으로 시스템의 동작 조건을 변경하거나 원하는 임의의 전압을 만들어 낼 수 있는 등 몇가지의 장점이 있는데 다음과 같다.

- (1) 디지털 소자들은 소자노화(aging)와 주위 환경의 변화에 쉽게 영향을 받지 않는다.
- (2) 노이즈에 덜 민감하다.
- (3) 제어기의 변경으로 하드웨어를 교체할 필요가 없다.
- (4) 디지털 제어기는 파라미터의 변화에 향상된 반응을 나타낸다³⁾.

이러한 장점에도 불구하고 스위칭 주파수의 한계 및 제어회로의 높은 가격 때문에 아직까지는 디지털 제어방식이 널리 실용화되지 못하고 있지만 현재 퍼지제어 알고리즘이나 PI 제어기를 이용한 연구가 진행 · 발표되고 있으며 본 논문에서도 탁월한 연산 속도 및 제어

성능으로 비교적 높은 스위칭 주파수의 디지털 제어가 가능한 DSP를 이용하여 DC-DC 컨버터의 원격제어에 적용하였으며, 디지털 제어기의 실용성을 검토하였다.

본 논문에는 강압형 컨버터로써 Buck 컨버터를 사용하였으며 15[V]의 입력전압으로부터 0V에서 5[V]까지의 가변 출력 전압을 내며, 출력전류 1[A], 스위칭 주파수 20KHz의 사양으로 선정하였다. 디지털 제어기는 40MHz로 구동되는 TI사의 TMS320C31의 DSP를 사용하여 구성하였으며, PWM의 생성은 디지털 제어를 보다 쉽게 구현하기 위해 전용의 PWM 발생을 위한 로직(ASIC)을 사용하였다. 이 ASIC은 PWM의 발생뿐만 아니라 PWM의 주기에 따라 인터럽트를 발생시키는 구조로 되어 있다. 12 비트의 AD 컨버터를 이용하여 출력전압을 샘플링 하였으며, 이렇게 하여 얻어진 출력전압을 PWM제어에 이용하였다.

지금까지의 연구 발표된 논문들을 보면 퍼지 알고리즘을 이용하여 디지털 제어기를 구성한 것이 대다수를 이루며⁴⁻⁷⁾, 소수의 PI 제어기를 이용한 것이 있다⁸⁾. 퍼지 제어기를 이용한 논문들에서는 퍼지 제어기의 특성상 제어 입력값을 얻기 위해서는 많은 양의 계산을 필요로 한다. 이것으로 부하 변동시에 오버슈트나 언더슈트가 생기거나 기준 입력값에 빠르게 따라가지 못한다. 이러한 현상은 PI제어기를 사용했을 때에도 똑같이 나타날 수 있다. 일반적으로 PI제어기에서 I(적분)제어에 의해 정상상태의 오차는 줄일 수 있지만 속응성에 문제가 되고 속응성을 위해 P 계수를 높이면 정상상태에서 커다란 과도현상이 나타날 수 있다. 이러한 이유에서 본 논문에서는 제어입력을 위한 계산량을 줄이고 부하변동이나 과도상태에서 빠른 응답특성을 얻기 위해 PD 제어기를 이용하여 제어기를 구성하였다.

본 논문에서는 이렇게 하여 구성된 제어기를 Buck 컨버터의 원격제어에 적용하였으며, 과도 상태에서의 출력 특성, 정상 상태에서의 출력 특성, 리플 전압 그리고 부하전류에 따른 출력전압의 변화 등을 관찰하여 PD제어기로 구성된 디지털 제어기의 성능을 확인하였다. 또한 PC상에서 출력전압의 상태, PWM의 Duty, 기준값과의 오차 그리고 PD 제어기의 내부 파라미터 등을 모니터링 하였으며, PC상에서 기준값을 변경하면서 출력 전압의 값을 관찰하여 원격제어가 잘 이루어지는지를 확인하였다.

II. 디지털 제어 Buck 컨버터

1. 디지털 제어 Buck 컨버터의 구조

본 논문에서 사용한 컨버터는 <그림 1>과 같이 기본적인 Buck 컨버터^[9]로 구성하였으며, 크게 Buck 컨버터, 20KHz의 PWM과 인터럽트를 발생시키는 ASIC, AD 변환한 값으로부터 PWM의 Duty를 조정하는 DSP, 그리고 모니터링과 원격제어를 하기 위한 PC인 4 부분으로 구성된다.

ASIC에서는 다양한 주파수의 PWM 발생이 가능하고 스위칭 주파수에 따른 인터럽트를 발생한다. 본 논문에서는 20KHz의 PWM을 사용하였으며, 이것으로부터 50us마다 인터럽트가 발생되어 이것이 DSP의 외부 인터럽트를 발생시킨다. DSP에서는 50us마다의 외부 인터럽트에 의해 컨버터의 출력 전압을 샘플링하고, 이 값과 기준 전압 값의 오차로부터 PWM의 레퍼런스 값을 갱신하여 Duty를 제어한다.

DSP는 TI사의 TMS320C31을 사용하였고, AD 컨버터는 12 비트의 분해능을 가지고 있는 Analog Device사의 AD7891을 사용하여 시스템을 구현하였다. <표 1>에는 Buck 컨버터를 구성하고 있는 각각의 소자들을 나타내고 있다.

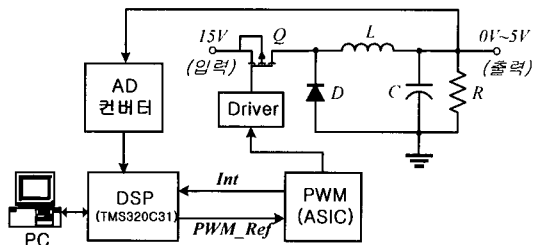


그림 1. Buck 컨버터의 구성
Fig. 1. The configuration of a Buck converter.

표 1. Buck 컨버터의 구성 소자
Table 1. The part value of Buck converter.

필터 인덕터	L	115[uH]
필터 캐패시터	C	2200[uF]
		1000[uF]
		470[uF]×3
저항	R	100[Ω]
스위칭 소자	Q	IRF9530
환류 다이오드	D	FE3D

2. PWM 파형 생성

마이크로프로세서 기반의 PWM 컨버터에서 PWM을 만들기 위해 사용하는 내부 타이머의 최소 타이밍 사이클에 의한 PWM 해상도(resolution)의 제약으로 고성능의 마이크로프로세서나 DSP를 사용한다 하더라도 고주파수의 PWM 컨버터의 응용에는 문제점이 있다^[10]. 본 논문에서는 PWM 파형은 전용의 ASIC을 통해서 만들어 낸다. 전용의 ASIC 내부에서는 설정된 주파수의 삼각파가 만들어지며 삼각파가 최대값을 가질 때마다 인터럽트를 발생하도록 되어 있다. PWM은 삼각파의 값과 DSP로부터 연산된 PWM 레퍼런스 값을 비교하여 PWM의 Duty를 조절하게 된다. PWM 파형의 생성에 대한 예를 <그림 2>에 나타내었다.

출력전압의 제어를 위해 50us 간격으로 출력전압을 샘플링해서 기준 전압과의 오차를 구한다. 여기에서 표현되는 값들은 모두 디지털 값들이며 식 (1)과 같다.

$$V_{err} = V_{REF} - V_{AD\ Sample} \quad (1)$$

3. PWM 제어기

정확한 출력 전압을 얻기 위해서는 정확한 PWM의 제어가 이루어져야 한다. PWM의 제어는 식 (1)로부터 얻어진 전압 오차에 상응되는 양만큼 PWM 레퍼런스에 가감되어 <그림 2>에서처럼 PWM의 Duty값을 보상하게 된다. 이를 식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$PWM_{ref}(k) = PWM_{ref}(k-1) + \Delta PWM_{ref}(k) \quad (2)$$

이 식을 Duty에 대한 식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$D(k) = D(k-1) + \Delta D(k) \quad (3)$$

그러나 식 (1)에 의해서 얻어진 전압 오차만으로 Duty를 보상하게 되면 응답 속도가 매우 늦으므로 급격한

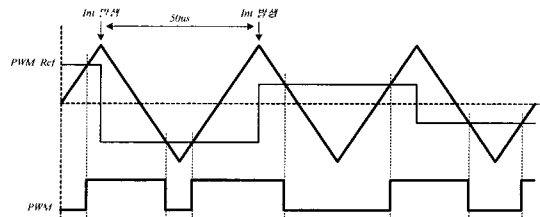


그림 2. ASIC에서의 PWM 발생 로직
Fig. 2. PWM logic in ASIC.

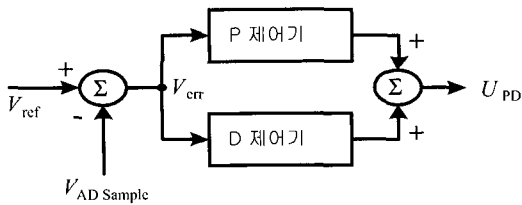


그림 3. PD 제어기의 구조
Fig. 3. The structure of PD controller.

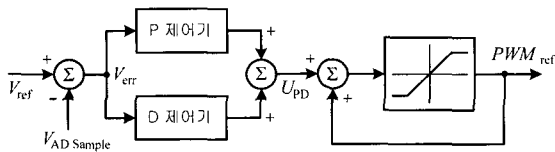


그림 4. PD제어기를 이용한 PWM 제어기
Fig. 4. The PWM controller using PD controller.

부하변동으로 인한 출력전압의 변동시 빠른 응답 특성을 갖도록 하기 위해 기존의 PI제어기와는 달리 PD제어기로 구성하였다. PD 제어기의 구조는 <그림 3>과 같으며 출력값은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 U_{PD}(k) &= K_P \cdot V_{err}(k) + K_D \frac{dV_{err}(k)}{dt} \\
 &= K_P \cdot V_{err}(k) + K_D \left(\frac{V_{err}(k) - V_{err}(k-1)}{\text{sampling 시간}} \right) \\
 &= \Delta PWM_{ref}(k)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

전압 오차에 대한 PD 제어 값은 PWM의 레퍼런스로 사용되어야 하기 때문에 PWM의 Duty 범위(0~100%)를 벗어날 수 없다. 그래서 Duty의 범위를 벗어날 경우 Duty의 최소, 최대값으로 범위를 제한시켜 이 값을 PWM의 레퍼런스 값으로 사용하였다. <그림 4>에 PD제어기를 이용한 PWM 제어기의 구조를 나타내었다.

따라서 출력 전압은 PD 제어기에 의해 기준 전압을 더 빨리 따라가도록 PWM의 레퍼런스를 조정하게 된다.

III. 실험 결과 및 검토

1. Buck 컨버터의 사양

본 논문에서 사용한 Buck 컨버터는 15[V]의 입력전압으로부터 0V에서 5[V]까지의 가변 출력 전압을 내며,

표 2. Buck 컨버터의 사양

Table 2. The specification of Buck converter.

입력 전압	15[V]	
출력 전압(default)	5[V]	
출력 전류	최소	0.05[A]
	최대	1[A]
스위칭 주파수	20[KHz]	

표 3. PD 제어기의 파라미터

Table 3. The parameter of PD controller.

P 게인	2
D 게인	0.0025
샘플링 시간	50us

출력전류 1[A]로 선정하였다. 사용가능한 스위칭 주파수는 50KHz까지 가능하였는데 그중 10KHz에서는 제어가 잘 이루어지지 않았으며, 20KHz이상(40KHz와 50KHz)에서는 20KHz와 비슷한 제어 결과를 보여 스위칭 주파수는 PWM의 해상도가 높은 20KHz를 선택하였다.

50us마다 출력 전압을 샘플링 하여 PD 제어기에 의해 PWM의 Duty를 갱신하며, PD 제어기의 파라미터는 시행착오에 의한 방법으로 결정되었다. <표 2>와 <표 3>에 Buck 컨버터의 사양과 PD제어기의 파라미터를 나타내었다.

실험은 1[A]의 부하를 사용하여 과도 응답 특성과 정상상태에서의 출력전압의 리플을 측정하였다.

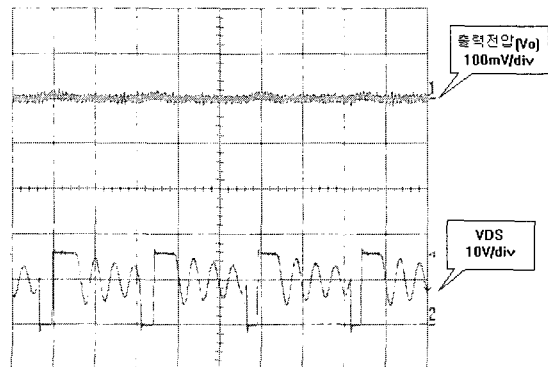


그림 5. 무부하시의 출력전압(Vo)과 스위칭 파형(VDS)
Fig. 5. The output voltage(Vo) and the drain-source voltage(VDS) in no load.

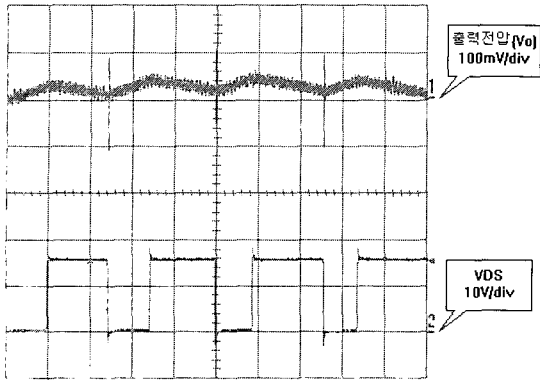


그림 6. 1[A] 부하시의 출력전압(V_o)과 스위칭 파형 (VDS)

Fig. 6. The output voltage(V_o) and the drain-source voltage(VDS) in 1[A] load.

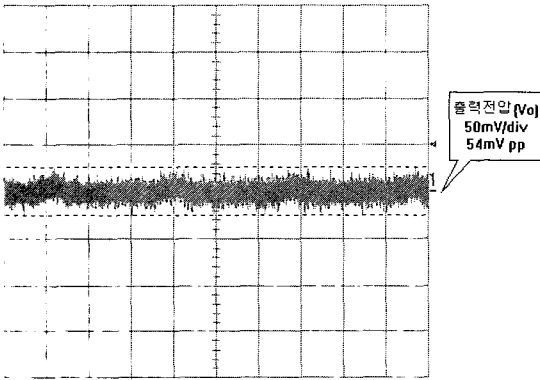


그림 7. 무부하에서의 정상 상태 리플 전압

Fig. 7. The ripple voltage in no load.

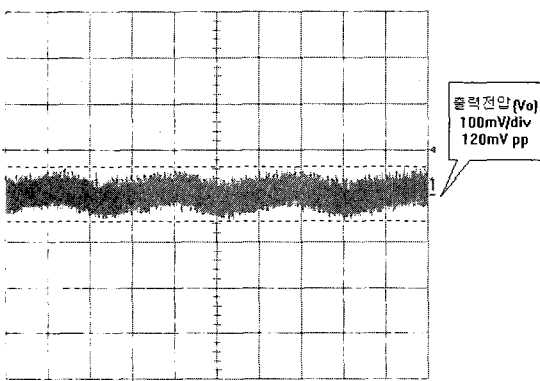


그림 8. 1[A] 부하시의 정상 상태 리플

Fig. 8. The ripple Voltage in 1[A] load.

2. 정상 상태의 응답 특성

지금까지의 PD제어기에 의한 Buck 컨버터의 출력특성을 살펴보면 다음과 같다. <그림 5>와 <그림 6>에

서는 무부하시의 1[A]의 부하를 인가했을 때의 출력전압과 스위칭 파형을 나타내며, 시간은 20us/div을 나타낸다.

<그림 7>과 <그림 8>은 무부하와 부하시의 출력전압 리플을 보여 주는 것으로 무부하시의 리플전압은 약 54mVpp 정도로 나타나며, 1[A] 부하에서의 리플전압은 약 120mVpp 정도 나타나고 있으며, 시간은 1s/div이다.

3. 과도 상태의 응답 특성

<그림 9>와 <그림 10>에서는 1[A] 부하 인가시와 무부하시의 출력에 대한 과도특성을 나타낸 출력 파형이다. 부하를 인가할 때와 해제할 때를 살펴보면 오버슈트나 언더슈트는 보이지 않고 리플의 크기만 증가하는 형태를 보이며, <그림 11>은 부하전류에 따른 출력전압의 변동을 나타낸 실험 결과이다.

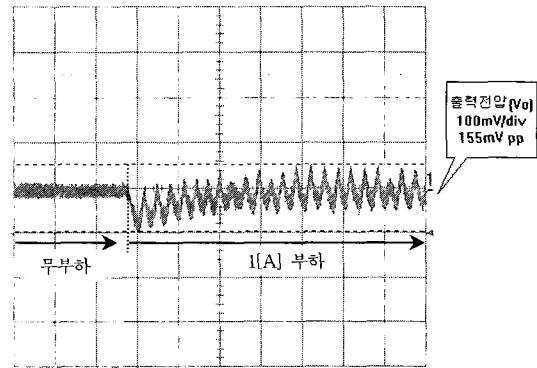


그림 9. 무부하에서 1[A] 부하 인가시의 과도응답 특성

Fig. 9. The transient response in no load current to 1[A] load.

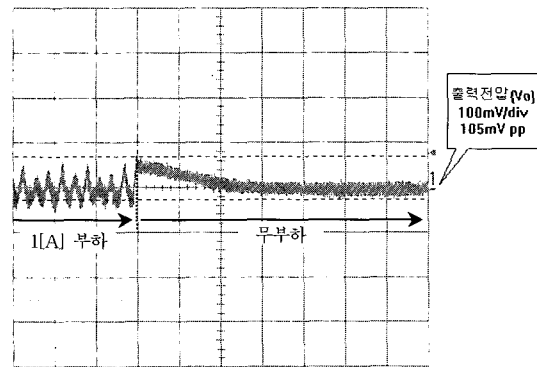


그림 10. 1[A] 부하에서 무부하시 과도응답 특성

Fig. 10. The transient response in 1[A] load current to no load.

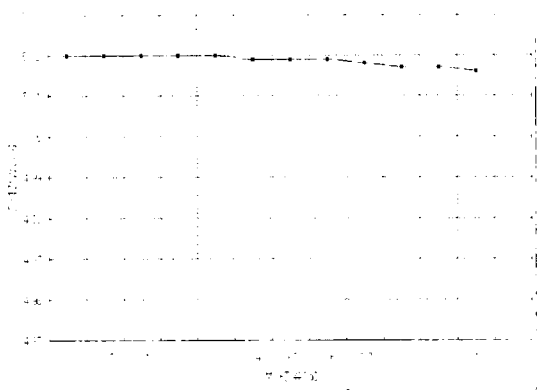


그림 11. 부하전류에 따른 출력 전압 변동
Fig. 11. The trend of output voltage corresponding to load current.

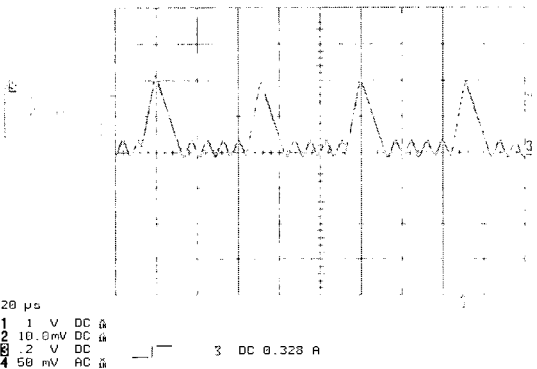


그림 12. 무부하에서의 인덕터 전류(DCM)
Fig. 12. The inductor current in no load(DCM).

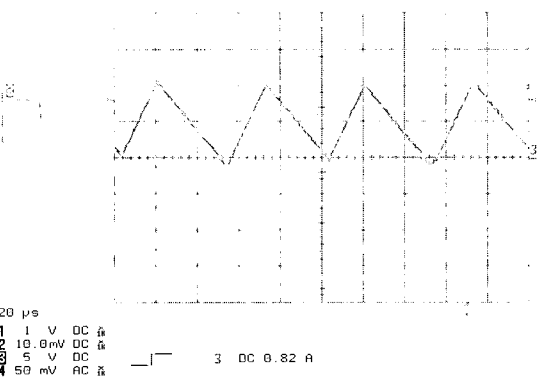


그림 13. DCM에서 CCM으로의 전환점에서의 인덕터 전류
Fig. 13. The inductor current at changing point from DCM to CCM.

다른 논문에서의 출력 특성을 살펴보면 퍼지 제어를 이용한 곳에서는 오버슈트나 언더슈트가 2[V]~3[V]

가량 나타나며 정상상태 도달 시간이 5[ms]정도 나타나거나⁶⁾, 10[A]부하인가시 2[V]~3[V]의 과도응답과 정상상태 도달 시간이 1초정도 나타난다⁷⁾.

<그림 12>는 무부하 상태에서의 인덕터에 흐르는 전류 파형으로 DCM 운전 상태를 나타낸 것이며, 이때의 전류는 약 200[mA](평균값)정도이다. <그림 13>은 부하전류를 천천히 증가시킴으로써 DCM 운전상태에서 CCM 운전상태로의 전환되는 시점에 인덕터에 흐르는 전류 파형이다. 이때의 부하전류는 약 0.49[A](평균값)를 나타낸다.

4. 원격제어 및 모니터링

디지털 제어기의 가장 큰 장점중의 하나가 컨버터의 내부 파라미터를 모니터 할 수 있고 하드웨어의 변경 없이 소프트웨어의 변경만으로 출력전압을 가변할 수 있다는 것이다. <그림 14>는 컨버터의 여러 파라미터

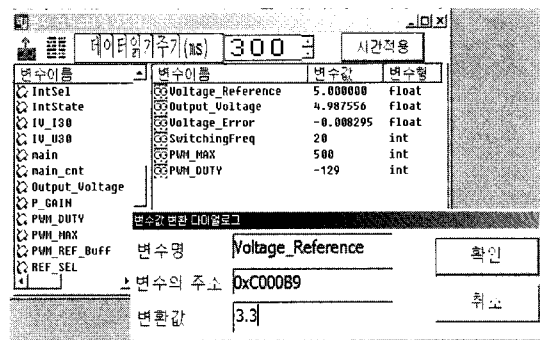


그림 14. 컨버터 내부 파라미터 모니터링과 원격제어를 위한 출력 전압값 변경
Fig. 14. Monitoring the parameters and Changing the reference voltage.

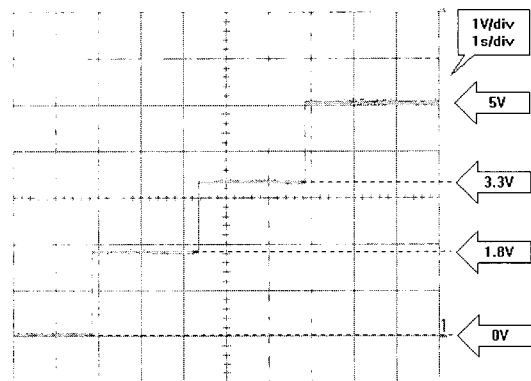


그림 15. 1[A] 부하상태에서 출력전압의 가변
Fig. 15. The remote control of output voltage in 1[A] load.

들에 대한 값의 모니터링과 출력 전압의 원격제어를 하는 그림이며, <그림 15>는 출력전압을 0V, 1.8V, 3.3V, 5V로 가변 했을 때의 출력 파형을 나타낸 것이다.

IV. 결 론

지금까지 아날로그 제어방식에 비하여 구조가 간단한 디지털 제어를 구성하여 Buck 컨버터에 적용하였으며, 실험을 통하여 이 컨버터의 출력 특성을 확인하였다. 지금까지의 실험 결과에서 알 수 있듯이 PD제어를 사용하므로 써 부하변동이나 과도상태에서 빠른 응답특성을 나타내며, 오버슈트나 언더슈트는 나타나지 않고 부하전류에 따른 리플 전압의 크기만 증가함을 확인하였다.

디지털 제어방식의 컨버터는 PC상에서 출력전압을 원하는 값으로 가변할 수 있고, 출력 전압을 모니터 할 수 있다는 것이 가장 큰 장점이라 할 수 있다. 원격지인 PC에서 컨버터의 전압이 정확히 출력되고 있는지, 스위칭 주파수가 얼마인지 또는 PWM의 Duty가 얼마인지를 감시 할 수 있었고, PC에서의 기준전압값 변경만으로 컨버터의 출력이 원격 제어됨을 실험을 통하여 볼 수 있었다. 이로써 디지털 제어 방식에 의한 우수한 출력 특성을 확인하였다.

또한 디지털 제어 방식은 아날로그 제어 방식보다 저렴하게 구현될 수 있는 장점이 있지만 DSP를 사용해서는 저가격화를 이루기 어렵다. 따라서 더 저렴하고 구조가 간단한 CPU의 사용과 함께 더 안정적인 제어를 위한 PWM 제어 알고리즘을 보완하여 더 값싸고 안정적인 디지털 제어를 구현함으로써 저 가격화와 실용화를 이루는 것이 앞으로의 과제로 남아 있다.

참 고 문 헌

- [1] 김희준, "스위칭 모드 파워 서플라이", 성안당, 1996
- [2] 박효식, 김희준, "디지털 제어기에 의한 강압형 및 승압형 DC-DC 컨버터의 동시제어", KIEE, Vol 5B, No 3, pp. 141~146, 2001
- [3] T. W. Martin, S.S. Ang, "Digital Control for Switching Converters", Industrial Electronics IEEE, Vol. 2, pp. 480~484, 1995.
- [4] W.C.So, C.K. Tse and Y.S. Lee, "An Experimental Fuzzy Controller for DC-DC Converters", Power Electronics Specialists Conference IEEE, Vol. 2, pp. 1339~1345, 1995.
- [5] M. Smyey, A. Cheriti, "Fuzzy Logic Controller For a DC to DC Controller", Electrical and Computer Engineering IEEE, Vol. 2, pp. 1020~1023, 1999.
- [6] Lam H.K, Lee T.H, Leung F.H.F, Tam P.K.S, "Fuzzy control of DC-DC switching converters : Stability and Robustness Analysis", Industrial Electronics Society, IECON, Vol. 2, pp. 899~902, 2001.
- [7] Tarun Gupta, R. R. Boudreaux, R. M. Nelms, and John Y. Hung, "Implementation of a Fuzzy Controller for DC-DC Converters Using an Inexpensive 8-b Microcontroller", IEEE Trans on Industrial Electronics, Vol. 44, No. 5, pp. 661~669, October 1997.
- [8] Alvarez-Ramires J, Cervantes I, Espinosa-Perez G, Maya P, Morales A, "A Stable Design of PI Control for DC-DC Converters with an RHS Zero", IEEE Transactions, Vol. 48, NO.1, pp. 103~106, 2001.
- [9] 김희준, "스위칭 전원의 기본 설계", 성안당, 2002
- [10] Li Peng, Xuejuan Kong, Yong Kang, and Jian Chen, "A Novel PWM Technique in Digital Control and Its Application to an Improved DC/DC Converter", Power Electronics Specialists Conference IEEE, Vol. 1, pp. 254~259, 2001.

저 자 소 개

金潤瑞(正會員)

1998년 : 청주대학교 전자공학과 졸업. 2002년 : 청주대학교 전자공학과 석사. 현재 : 동 대학원 박사과정.

梁 吾(正會員) 第39卷 SC編 第2號 參照