

DSP 디지털 제어기법에 의한 DC-DC 컨버터의 동시제어

論 文

50B - 12 - 4

Simultaneous Control of DC-DC Converter by DSP Digital Controller

朴孝植* · 金熙峻**
(Hyo-Sik Park · Hee-Jun Kim)

Abstract - This paper presents a multi output converter system that controls, simultaneously and independently, the separate Buck converter and Boost converter with the different specification by one DSP digital controller. As two separate converters are regulated by only one DSP, it is possible to achieve the simple digital control circuit for regulating multi output DC-DC converter. By setting the software switch state, PI and Fuzzy controller can be applied as a controller for each converter without any change of hardware. Also, it is included the control characteristics comparison between PI and Fuzzy controller. The control characteristics of each PWM DC-DC converter is validated by experimental results.

Key Words : DSP, DC-DC Converter, Simultaneous control

1. 서 론

전자기기 전반에 걸쳐 폭넓게 사용되고 있는 DC-DC 컨버터는 지속적인 연구개발을 통하여 고효율, 안정성 개선 및 소형화를 위한 많은 성과를 거두고 있으나 아날로그 제어방식을 이용한 소자 개선, 회로 구조변경, 또는 제어특성 개선 등의 연구개발이 대부분을 차지하고 있다. 그러나 아날로그 제어방식의 경우 비선형 시스템에 대한 수학적 모델링이 어렵기 때문에 고성능의 제어기 및 제어 알고리즘을 설계하는데 많은 어려움이 뒤따르게 된다[1]~[3].

최근에 산업분야의 전반에 걸쳐 나타나고 있는 디지털화에 따라 DC-DC 컨버터의 디지털 제어에 관한 연구도 서서히 이루어지고 있으며, 상용화를 위한 연구발표도 이어지고 있다. 기존의 아날로그 제어방식에 비하여 디지털 제어방식은 마이크로 컨트롤러를 이용하기 때문에 DC-DC 컨버터 내부 파라미터의 모니터링이 가능하며, 원격 감시 및 제어가 가능하고, 필요시 하드웨어 변경 없이 프로그램의 수정만으로 시스템의 동작조건을 간단히 변경할 수 있다는 장점이 있다. 또한 제어기 설계에 있어 적절한 제어 알고리즘을 적용함으로써 고성능의 제어기를 구현할 수 있는데, 특히 연산 처리 속도가 매우 빠른 DSP를 적용하여 퍼지 알고리즘 및 유전 알고리즘 등을 탑재한 제어기를 구현하여 비선형 시스템에 대한 복잡한 수학적 모델링을 생략하고 인간의 언어

학적인 요소를 제어 알고리즘에 적용함으로써, 매우 용이하게 시스템의 고성능 실시간 제어를 구현하고 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고, 제어회로의 복잡한 구조로 인하여 디지털 제어방식의 상용화가 활발히 진행되지 못하고 있기 때문에 제어성능이 우수하면서도 구조가 간단한 디지털 제어회로의 필요성이 크게 대두되고 있다[4]~[8].

본 논문에서는 복잡한 디지털 제어기의 단점을 보완하기 위한 대안으로 하나의 DSP를 이용하여 사양이 다른 별도의 강압형 컨버터 및 승압형 컨버터를 동시에 제어하는 동시제어 시스템을 적용하고, 제어 알고리즘으로 PI 제어기 및 퍼지제어기를 선택하여 프로그램의 간단한 수정에 의하여 제어 알고리즘을 용이하게 수정할 수 있도록 하였으며, ① 강압형-PI, 승압형-PI, ② 강압형-퍼지, 승압형-PI, ③ 강압형-PI, 승압형-퍼지, ④ 강압형-퍼지, 승압형-퍼지 등 선택된 제어기에 관계없이 모든 경우에 대하여 각 컨버터가 동시에 독립적으로 제어되고 있음을 확인함으로써 하나의 디지털제어기에 의한 강압형 및 승압형 PWM DC-DC 컨버터 동시제어의 타당성을 입증한다.

실험에 적용된 강압형 컨버터의 사양은 스위칭 주파수 10KHz, 출력전압 5V, 출력전류 1A이고, 승압형 컨버터는 스위칭 주파수 10KHz, 출력전압 24V, 출력전류 1A의 컨버터이며, DSP는 TMS320C32가 적용되었다[9].

2. DC-DC 컨버터의 동시제어

그림 1은 디지털 제어기에 의한 강압형 및 승압형 PWM DC-DC 컨버터의 동시제어에 대한 블록도이다. 먼저 각 컨

* 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 博士課程 卒業

** 正 會 員 : 漢陽大 電子·컴퓨터工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2001年 7月 14日

最終完了 : 2001年 10月 30日

버터의 출력전압을 A/D 컨버터를 통해 샘플링 한 후, 각 제어기의 입력변수로 설정한다. 각 컨버터의 제어기는 프로그램의 간단한 수정에 의하여 동작조건 등을 바꿀 수 있는 디지털 제어기의 장점을 활용하여 그림에서와 같이 DSP 프로그램의 소프트웨어 스위치를 이용하여 각 컨버터의 제어기를 PI 또는 퍼지제어기 중에 선택하게 된다. 선택된 제어기에 의하여 PWM DC-DC 컨버터의 시비율 보상값을 결정하게 되면 이를 PWM 파형으로 변환하여 각 컨버터를 동시에 독립적으로 제어하게 된다. 강압형 및 승압형 컨버터에 PI 제어기 또는 퍼지제어기를 적용할 수 있을 뿐만 아니라, 각 컨버터에 대한 제어가 독립적으로 이루어지므로 소프트웨어 스위치의 설정에 따라 PI 제어기 및 퍼지제어기를 혼용하여 적용하는 것도 가능하다.

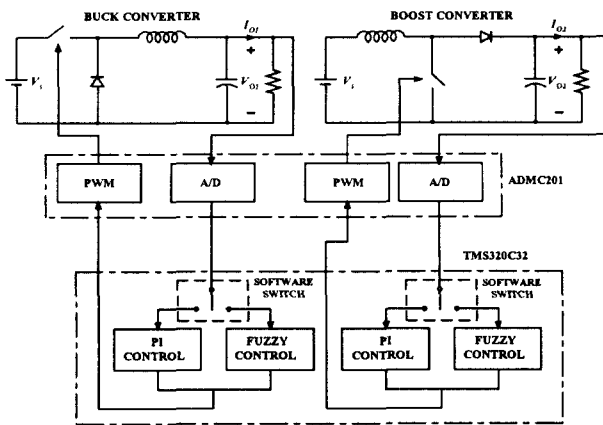


그림 1 DC-DC 컨버터의 동시제어 블록도
Fig. 1 Block diagram of the simultaneous control for DC-DC converter

3. PI 제어기에 의한 동시제어

그림 2는 PI 제어기의 블록선도를 나타낸 그림으로 비례제어기와 적분제어기로 구성되어 있으며, 비례적분제어기의 전달함수는 식 (1)과 같다.

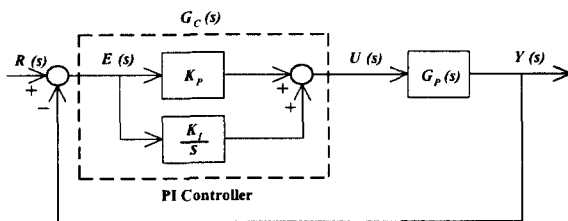


그림 2 PI 제어기 블록도
Fig. 2 Block diagram of PI controller

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (1)$$

여기서 K_P 는 비례제어기 상수이며, K_I 는 적분제어기 상

수이다.

비례적분제어기를 DC-DC 컨버터의 제어에 적용하기 위한 결과식은 식 (2)와 같다.

$$U(k) = K_I \left[\sum_{z=1}^k e(z) + e(k) \right] + K_P \cdot e(k) \quad (2)$$

여기서 $e(k)$ 는 식 (3)과 같이 기준전압 V_{ref} 와 k 번째에 샘플링된 출력전압 $V_O(k)$ 와의 차이를 나타내는 출력전압의 오차값을 의미하며, $\sum_{z=1}^k e(z)$ 는 $(k-1)$ 번째까지의 오차의 합을 나타낸다.

$$e(k) = V_{ref} - V_O(k) \quad (3)$$

4. 퍼지제어에 의한 동시제어

퍼지제어기는 퍼지화, 추론, 비퍼지화 등의 3가지 과정으로 크게 나누어 생각할 수 있는데, 퍼지화란 입력데이터를 언어화적인 값이나 함수로 변환시켜 주는 과정을 말하고, 추론이란 퍼지제어 룰에 의하여 입력값에 대한 보상값을 결정하는 과정을 말한다. 또한 비퍼지화란 결정된 보상값을 시스템 제어를 위한 출력값으로 변환시키는 과정을 말한다. 퍼지제어기의 입력은 각 컨버터의 기준전압에 대한 출력전압의 오차값 $e(k)$ 와 오차의 변동값 $ce(k)$ 로 정의하며, 이에 대한 표현식은 식 (4)와 같다.

$$e(k) = V_{ref} - V_O(k) \quad (4)$$

$$ce(k) = e(k) - e(k-1)$$

여기서 k 는 k 번째 샘플링값을, $(k-1)$ 은 $(k-1)$ 번째 샘플링값임을 의미한다. 또한 V_O 는 컨버터의 출력전압값을, V_{ref} 는 컨버터의 기준전압값을 각각 의미한다.

퍼지제어기의 출력은 각 컨버터의 시비율 $D(k)$ 로 정의되며, 식 (5)와 같이 표현한다.

$$D(k) = D(k-1) + \eta \cdot \delta d(k) \quad (5)$$

여기서 η 는 퍼지제어기의 이득을 의미하며, $\delta d(k)$ 는 퍼지제어기의 추론에 의하여 산출한 시비율의 보상값을 의미한다.

퍼지변수에 대한 퍼지함수의 수는 시스템에 따라 다르게 결정되지만 본 논문에서는 2개의 컨버터를 동시에 제어하여야 하기 때문에 계산용량을 고려하여 표 1과 같이 PB(Positive Big), PS(Positive Small), ZO(Zero), NS(Negative Small), NB(Negative Big) 등 5개 퍼지 룰의 조합으로 이루어지는 부분집합들로 구성하며, 강압형 PWM 컨버터 및 승압형

PWM 컨버터의 경우 시비율의 증감에 따른 출력전압의 증감형태가 일치하기 때문에 하나의 퍼지 룰을 선정하여 같이 적용한다. 또한 퍼지소속함수의 형태는 복잡한 계산을 피하기 위하여 그림 3과 같이 삼각형의 형태를 갖는 퍼지소속함수로 결정한다.

표 1 퍼지 룰 테이블
Table1 Fuzzy rules table

$e \backslash ce$	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB
NS	ZO	NS	NS	NS	NS
ZO	PS	ZO	ZO	ZO	NS
PS	PS	PS	PS	PS	ZO
PB	PB	PB	PB	PB	PB

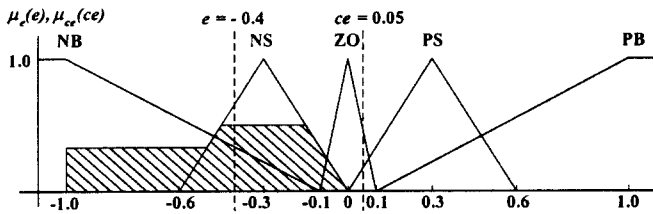


그림 3 퍼지 추론
Fig. 3 Fuzzy inference

그림 3과 같은 퍼지소속함수를 갖는 시스템에서 임의의 샘플링 순간에 퍼지입력 e , ce 가 소속될 수 있는 소속함수의 개수는 최대 2개에 불과하므로 그 순간에 고려하여야 할 퍼지 룰의 개수도 최대 4개로 줄일 수 있다. 예를 들어 $e = -0.4$, $ce = 0.05$ 인 순간을 가정하면 출력전압 오차값 e 는 그림 3에서 알 수 있듯이 소속함수 NS, NB에 소속되고, 오차의 변동값 ce 는 ZO, PS 에 소속되어 e 와 ce 의 부분집합은 (NB,ZO), (NB,PS), (NS,ZO), (NS,PS) 의 4개로 되며, 이때 각 입력에 대한 퍼지함수의 값은 $\mu_{NS}(e) = 0.67$

$\mu_{NB}(e) = 0.33$, $\mu_{ZO}(ce) = 0.5$, $\mu_{PS}(ce) = 0.17$ 이 된다. 추론결과는 각 룰에 대한 가중치 w_i 와 룰 테이블에 의해 결정되는 시비율 변화의 크기 C_i 등의 2가지로 구성되며, Mamdani의 min fuzzy implication을 적용한 각 룰의 추론 과정은 그림 4에 나타나 있으며, 추론결과는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$z_i = \min\{\mu_e(e), \mu_{ce}(ce)\} \cdot C_i = w_i \cdot C_i \quad (6)$$

여기서 z_i 는 i 번째 룰에 의해 추론된 시비율의 보상값을 나타낸다.

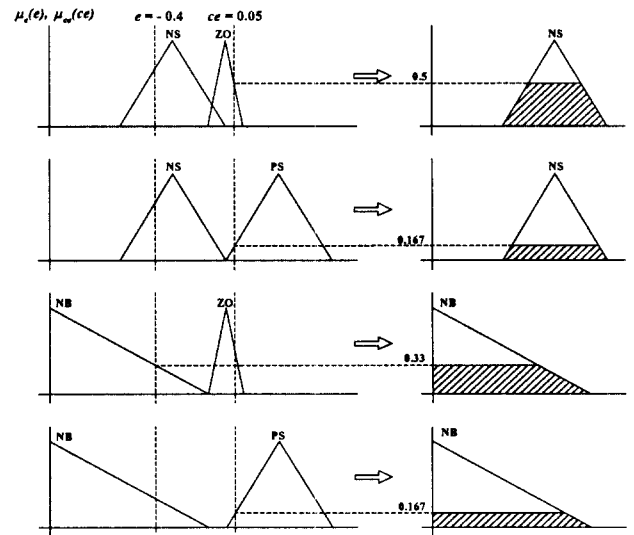


그림 4 퍼지 추론
Fig. 4 Fuzzy inference

식 (6)에서 추론된 시비율 보상값 z_i 는 언어학적인 형태의 결과이므로 이를 비퍼지화 과정을 통하여 퍼지제어기 출력값으로 변환하는 과정이 필요하며, 일반적으로 많이 사용되고 있는 무게중심법을 적용하여 표현하면 식 (7)과 같다.

$$\delta d(k) = \frac{\sum_{i=1}^N z_i}{\sum_{i=1}^N w_i} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (7)$$

앞에서 가정하였던 $e = -0.4$, $ce = 0.05$ 순간의 추론결과를 식(7)로 산출하면 $N=4$ 이므로 $\delta d(k) = -0.598$ 이 되고, 시비율 보상값은 퍼지제어기 이득 η 를 곱한 0.598η 이 된다. 따라서 이 순간의 최종적인 시비율은 식 (8)과 같이 주어진다.

$$D(k) = D(k-1) + (-0.598) \cdot \eta \quad (8)$$

5. 실험결과

본 논문에서는 컨버터의 동시제어를 입증하기 위하여 표 2와 같은 사양의 강압형 컨버터 및 승압형 컨버터를 설계하여 실험한다. 특히 DSP의 타이머 인터럽트를 이용하여 각 컨버터의 출력전압을 샘플링하고, 제어 알고리즘을 이용하여 이에 대한 보상값을 결정하며, PWM 스위칭 파형을 출력하도록 하는 모든 과정을 $100 \mu\text{sec}$ 이내에 이루어지도록 함으로써 PWM 펄스당 1회의 타이머 인터럽트가 발생하도록 하여 10kHz의 스위칭 주파수를 갖는 PWM 파형을 발생시키도록 하였다. 그림 5는 이에 대한 프로그램의 흐름도를 나

타낸다.

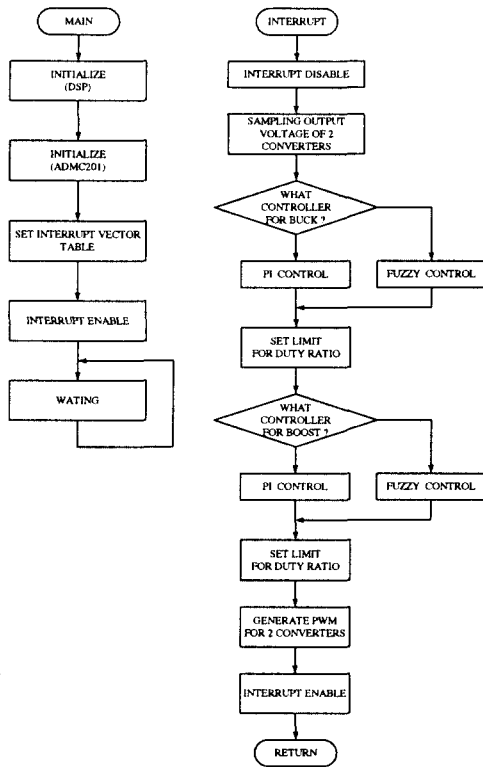


그림 5 프로그램 흐름도
Fig. 5 Program flow chart

표 2 컨버터 사양

Table 2 Converter specification

	Buck	Boost
Input Voltage (V)	15	15
Output Voltage (V)	5	24
Output Current (A)	1	1
Switching Frequency (KHz)	10	10
Proportional Gain K_P	0.2	0.23
Integral Gain K_I	30	17
Fuzzy Gain η	0.0003	0.0001
Main Switch	TIP122	IRF540
Filter Inductance (μH)	505	533
Filter Capacitance (μF)	2200	2200

그림 6은 퍼지제어기를 적용하였을 때 강압형 컨버터의 스위칭 전압파형 및 출력전압의 리플을 나타낸 그림이며, 그림 7은 승압형 컨버터의 스위칭 전압파형 및 출력전압의 리플을 나타낸 그림이다. 그림 6, 7을 통해 강압형인 경우 약 $\pm 20mV$, 승압형인 경우 약 $\pm 30mV$ 정도의 출력전압 리플을 포함하고 있음을 알 수 있다.

또한, 그림 8~11은 소프트웨어 스위치를 이용하여 강압형 컨버터 및 승압형 컨버터의 제어기를 PI 제어기 및 퍼지제

어기 중에서 선택할 수 있도록 하여 부하전류를 0.2A에서 1A로 500msec 간격으로 주기적으로 변화시켰을 때의 실험 파형을 나타내는 그림이다. 그림 8은 강압형 컨버터 및 승압형 컨버터에 모두 PI 제어기를 적용하였을 때의 그림을 나타내며, 그림 9는 강압형 컨버터에는 PI 제어기를, 승압형 컨버터에는 퍼지제어기를 각각 적용하였을 때의 파형을 나타낸다. 또한 그림 10은 강압형 컨버터에는 퍼지제어기를, 승압형 컨버터에는 PI 제어기를 적용하였을 때의 결과이며, 그림 11은 강압형 및 승압형 모두 퍼지제어기를 적용하였을 때의 실험결과 파형을 나타낸다.

강압형 컨버터의 경우 부하상승시 과도응답시간이 100msec, 과도상태시 오차의 최대값은 300mV 정도로 나타난 PI 제어기에 비하여 퍼지제어기는 응답시간 40msec, 최대값 150mV 정도로 PI 제어기에 비하여 우수한 제어특성을 나타냄을 알 수 있다. 또한 부하하강시에도 PI 제어기의 응답시간 및 최대값이 200msec, 300mV인 것에 비하여 퍼지제어기는 60msec, 150mV로 제어성능이 우수함을 알 수 있다.

승압형 컨버터의 경우 부하상승시 PI 제어기는 80msec, 500mV의 제어특성을 나타내고 퍼지제어기는 80msec, 300mV를 나타내고 있다. 또한 부하하강시 PI 제어기는 160msec, 500mV의 제어특성을 나타내고 퍼지제어기는 50msec, 230mV의 특성을 나타냄으로써 강압형 및 승압형 모두 퍼지제어기의 제어특성이 다소 우수한 것으로 나타나고 있다.

그림 8~11의 채널1~4의 설정상태는 다음과 같다.

채널 1 : 강압형 컨버터의 부하전류

채널 2 : 강압형 컨버터의 출력전압 변동분

채널 3 : 승압형 컨버터의 부하전류

채널 4 : 승압형 컨버터의 출력전압 변동분

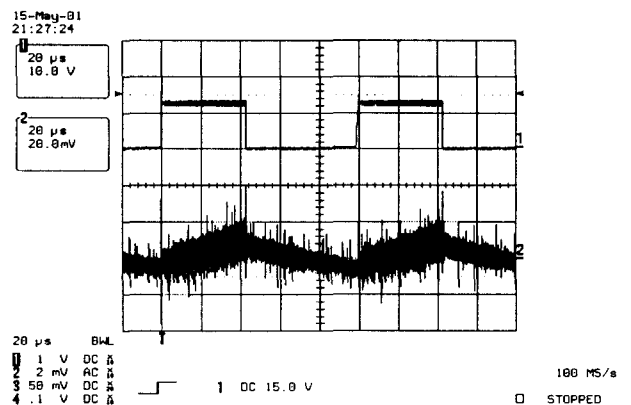


그림 6 강압형 컨버터의 스위칭 및 리플 파형:퍼지제어
Fig. 6 Switching and ripple waveform of Buck:Fuzzy
Ch1 : Voltage(V_D) of freewheeling diode
Ch2 : Ripple of output voltage (V_O)

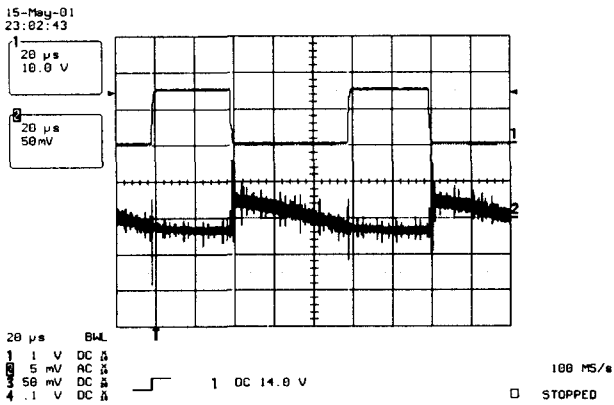


그림 7 승압형 컨버터의 스위칭 및 리플 파형:퍼지제어
Fig. 7 Switching and ripple waveform of Boost :Fuzzy
 Ch1 : Switching voltage(V_{GS})
 Ch2 : Ripple of output voltage (V_{O2})

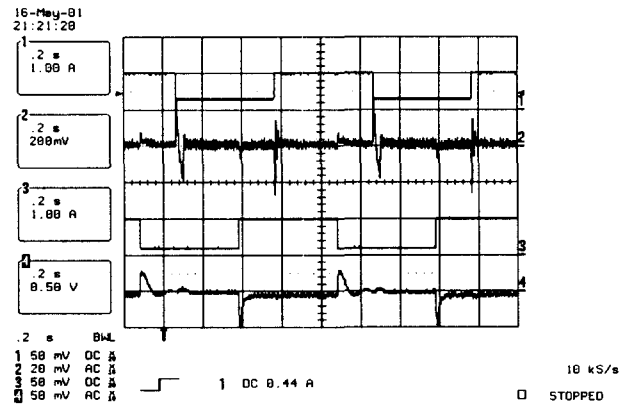


그림 10 PI(강압형), 퍼지(승압형) 제어에 의한 동시제어
Fig. 10 Simultaneous control by PI(Buck), Fuzzy(Boost)

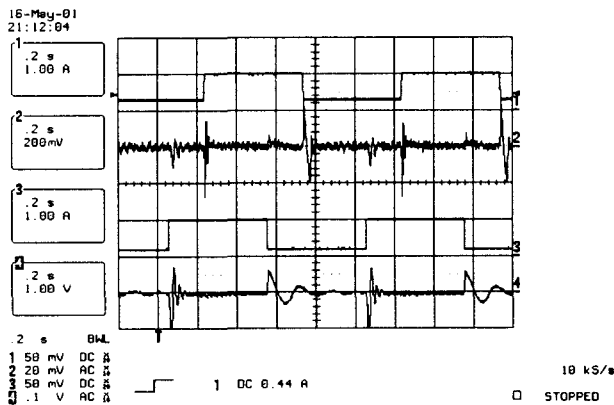


그림 8 PI(강압형), PI(승압형) 제어에 의한 동시제어
Fig. 8 Simultaneous control by PI(Buck), PI(Boost)

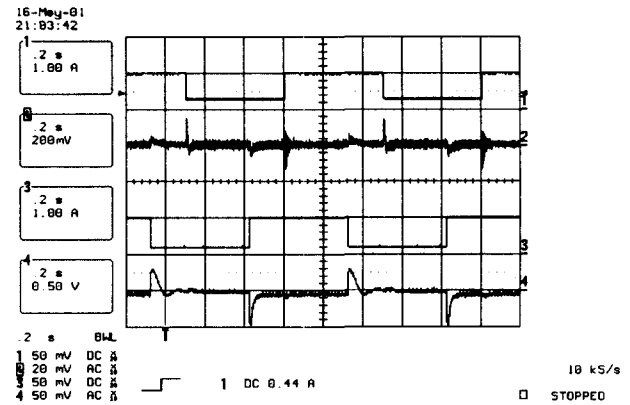


그림 11 퍼지(강압형), 퍼지(승압형) 제어에 의한 동시제어
Fig. 11 Simultaneous control by Fuzzy(Buck), Fuzzy(Boost)

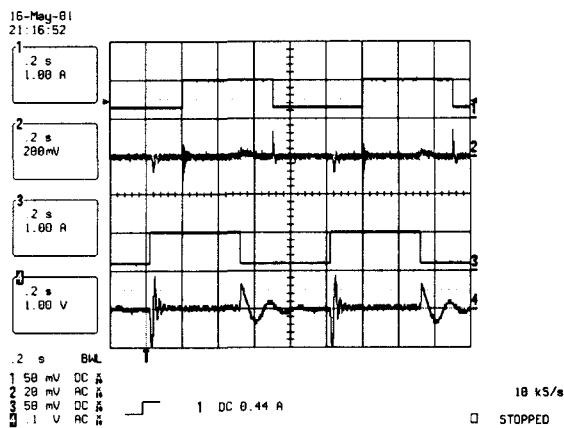


그림 9 퍼지(강압형), PI(승압형) 제어에 의한 동시제어
Fig. 9 Simultaneous control by Fuzzy(Buck), PI(Boost)

본 논문의 실험에 적용한 DSP는 TMS320C32로서 32비트 부동소수점 연산(Floating point operation)이 가능하며, 40ns의 명령어 처리시간(Instructuin cycle time)을 갖으며, 제어 알고리즘을 탑재하여 강압형 및 승압형 DC-DC 컨버터의 동시제어 시스템의 제어를 담당한다. 또한 ADMC201은 Motion coprocessor로서 내장된 A/D 컨버터는 11 비트의 분해능으로 샘플링 시간 $1.6\mu\text{sec}$ 내에 4개의 채널을 동시에 샘플링하며, 채널당 변환시간은 $3.2\mu\text{sec}$ 로 변환시간이 빠른 특징을 가지고 있다. 또한 주파수 1.5kHz~25kHz의 PWM 스위칭 파형을 발생시킬 수 있다.

6. 결 론

DC-DC 컨버터의 디지털 제어에 있어서, 지금까지 지적되어 온 복잡한 구조의 제어회로로 인한 문제점을 해결하기 위한 대안으로, 하나의 DSP를 이용하여 사양이 다른 별도의 강압형 컨버터 및 승압형 컨버터를 동시에, 독립적으로 제어하는 새로운 시스템을 제안하였다. 특히 각 컨버터는 소프트웨어 스위치에 의하여 제어 알고리즘을 독립적으로 선택할 수 있기 때문에 하나의 DSP에 의하여 제어됨에도

불구하고 다른 컨버터의 제어 알고리즘과 상관없이 독립적으로 제어할 수가 있다. 본 논문에서는 PI 제어기 및 퍼지제어 알고리즘을 선택하여 프로그램의 간단한 수정에 의하여 제어 알고리즘을 용이하게 수정할 수 있도록 하였으며, ① 강압형-PI, 승압형-PI, ② 강압형-퍼지, 승압형-PI, ③ 강압형-PI, 승압형-퍼지, ④ 강압형-퍼지, 승압형-퍼지 등 선택된 제어기에 관계없이 모든 경우에 대하여 각 컨버터가 동시에 독립적으로 제어되고 있음을 확인하였다. 또한 실험 결과를 통하여 강압형 및 승압형 컨버터가 부하의 변동에 관계없이 동시에 독립적으로 제어됨을 보임으로써 본 논문에서 제안한 하나의 퍼지제어기에 의한 강압형 및 승압형 PWM DC-DC 컨버터 동시제어의 타당성을 입증한다.

참 고 문 헌

[1] V. Vorperian, "Simplified Analysis of PWM Converters Using the Model of the PWM Switch, Part I:Continuous Conduction Mode, Part II:Discontinuous Conduction Mode", VPEC Seminar, September 1989.

[2] Kwang-Hwa Liu, Ramesh Oruganti and Fred C. Lee, "Resonant Switches-Topologies and Characteristics", IEEE PESC Rec. pp.106-116, 1985.

[3] 김희준, "스위치 모드 파워 서플라이", 성안당, 1996.

[4] F. Ueno, T. Inoue, I. Oota and M. Sasaki, "Regulation of Cuk Converters using fuzzy controllers," INTELEC '91 Record, pp.261-267, 1991.

[5] W. C. So, C. K. Tse and Y. S. Lee, "Development of a Fuzzy Logic Controller for DC/DC Converters : Design, Computer Simulation and Experimental Evaluation", IEEE Transaction Vol.11, No. 1, pp. 24-32, January 1996.

[6] 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 Transaction on Industrial Electronics, Vol. 44, No.5, October 1997.

[7] T. L. Liao, and N. S. Huang, "Genetic Algorithm-Based Self Learning Fuzzy PI Controller for Buck Converter", ETEP, Vol. 9, No. 4, July/August 1999.

[8] Hyo-Sik Park, Hee-Jun Kim, "Simultaneous Control of Buck and Boost DC-DC Converter by Fuzzy Controller", IEEE ISIE Proc. Vol.2, pp. 1021-1025, June 2001.

[9] Texas Instruments TMS320C3X User's Guide, Texas Instruments Inc., 1993.

저 자 소 개



박 효 식 (朴 孝 植)
1965년 8월 21일생. 1989년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1991~현재 (주)현대엘리베이터 기술연구소 선임연구원.

Tel : 031-644-5121, Fax : 031-636-8523
E-mail : pposik@netian.com



김 희 준 (金 熙 峻)
1976년 한양대 공대 전자공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1986년 3월 일본 큐슈대 대학원 전자공학과 졸업(공학박). 1987년~현재 한양대 전자·컴퓨터공학부 교수. 1991~1992년 미국 버지니아공대 방문교수. 현재 대한전기학회 평의원, 대한전기학회 B부문학회 재무이사.

Tel : 031-400-5164, Fax : 031-407-9930
E-mail : hjkim@hanyang.ac.kr