

Comparisom of Control Algorithm for Simultaneous Control of DC-DC Converter

朴孝植* · 韓宇勇** · 李公熙***
(Hyo-Sik Park · Woo-Yong Han · Gong-Hee Lee)

Abstract - This paper presents the comparison results of control algorithm for the simultaneous control of 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 the 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 : DC-DC converter, simultaneous control, PI, Fuzzy, comparison

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 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. 그러나 디지털 제어방식은 제어회로의 복잡한 구조로 인하여 제어기 자체가 차지하는 가격이 높기 때문에 아날로그 제어기에 비하여 그 응용폭이 매우 제한적이었다. 따라서 구조가 간단하고 저렴한 제어기의 필요성이 크게 대두되고 있으나 저용량 DC-DC 컨버터에 대해서 이러한 필요성을 만족시키는 시스템에 대한 연구는 거의 이루어지지 못하고 있는 실정이다[4]~[6]. 그러나, 최근에 고가의 제어

기로 인한 비실용성의 대안으로 사양 및 구조가 다른 별도의 컨버터 2개를 하나의 제어기를 사용하여 동시에 제어하는 동시제어에 관한 연구결과가 발표되었다[7].

본 논문에서는 하나의 DSP를 이용하여 사양이 다른 별도의 강압형 컨버터 및 승압형 컨버터를 동시에 제어하는 동시제어 시스템을 적용하고, 제어 알고리즘으로 PI 제어기 및 퍼지제어기를 적용하여 각각의 제어성능을 비교한 실험 결과를 통하여 강압형 및 승압형 컨버터가 동시에 독립적으로 제어됨을 보임으로써 하나의 디지털제어기에 의한 강압형 및 승압형 PWM DC-DC 컨버터 동시제어의 타당성을 입증한다. 또한, 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[8].

2. DC-DC 컨버터의 동시제어

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

* 正 會 員 : 全州工業大學 電氣科 專任講師 · 工博
 ** 正 會 員 : 全州工業大學 電氣科 副教授 · 工博
 *** 正 會 員 : 全州工業大學 電氣科 教授 · 工博
 接受日字 : 2002年 9月 16日
 最終完了 : 2002年 11月 1日

컨버터에 대한 제어가 독립적으로 이루어지므로 소프트웨어 스위치의 설정에 따라 PI 제어기 및 퍼지제어기를 혼용하여 적용하는 것도 가능하다.

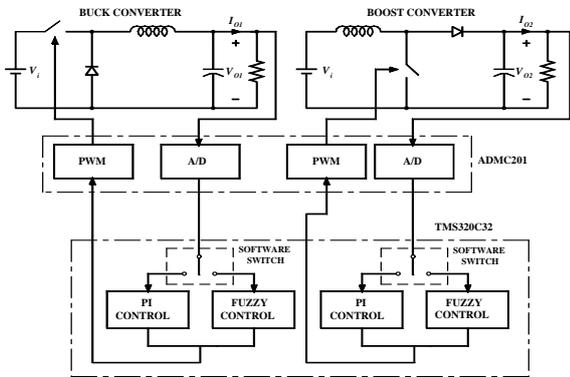


그림 1 DC-DC 컨버터의 동시제어 블록도
Fig. 1 Block diagram of the simultaneous control for DC-DC converter

3. PI 제어기에 의한 동시제어

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

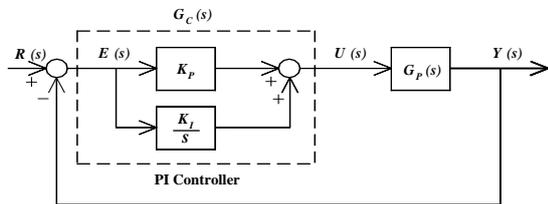


그림 2 PI 제어기 블록도
Fig. 2 Block diagram of PI controller

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

여기서 K_P 는 비례제어기 상수이며, K_I 는 적분제어기 상수이다.

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

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

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, $\sum_{z=1}^{k-1} e(z)$ 는 $(k-1)$ 번째까지의

오차의 합을 나타낸다.

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

4. 퍼지제어기에 의한 동시제어

퍼지제어기는 퍼지화, 추론, 비퍼지화 등의 3가지 과정으로 크게 나누어 생각할 수 있는데, 퍼지화란 입력데이터를 언어학적인 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.

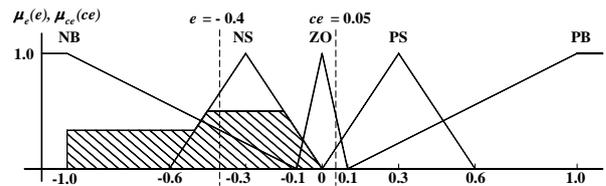


그림 3 퍼지 추론
Fig. 3 Fuzzy inference

표 3 퍼지 룰 테이블

Table 1 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 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 부분 집합은 (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 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.

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)로부터 산출하면 $N=4$ 이므로 $\delta d(k) = -0.598$ 이 되고, 시비율 보상값은 퍼지제어기 이득 n 를 곱한 $0.598n$ 이 된다. 따라서 이 순간의 최종적인 시비율은 식 (8)과 같이 주어진다.

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

5. 실험결과

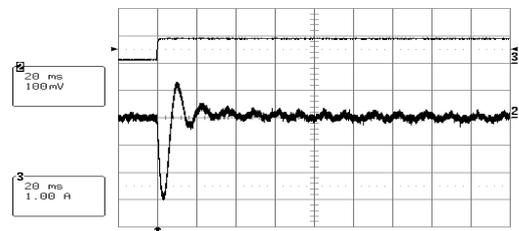
본 논문에서는 컨버터의 동시제어를 입증하기 위하여 표 2와 같은 사양의 강압형 컨버터 및 승압형 컨버터를 설계하여 실험한다.

표 2 컨버터 사양

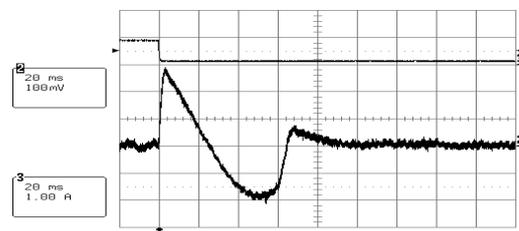
Table 2 Converter specification

| | Buck | Boost |
|---------------------------|------|-------|
| Input Voltage (V) | 15 | 15 |
| Output Voltage (V) | 5 | 24 |
| Output Current (A) | 1 | 1 |
| Switching Frequency (kHz) | 10 | 10 |

그림 4(a)는 PI 제어를 적용하여 강압형 컨버터의 부하전류를 0.2A에서 1A로 상승시켰을 때 출력전압의 변동을 나타낸 것으로 부하상승시 과도응답시간이 약 100msec, 오차의 최대값은 300mV 정도임을 알 수 있다. 이때 PI 제어기의 각 상수는 수차례의 반복적인 실험을 통하여 얻은 값으로서, $K_P = 0.2$, $K_I = 30$ 이다. 또한 그림 4(b)는 동일 조건하에서 부하전류를 1A에서 0.2A로 감소시켰을 때 출력전압의 변동을 나타낸 파형으로 200msec, 최대 오차값은 300mV 정도임을 알 수 있다.



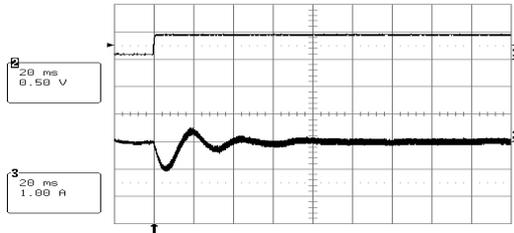
(a) 상승부하시 부하특성 (IO2=0.2→1A)
(a) Load regulation for rising load (IO2=0.2→1A)



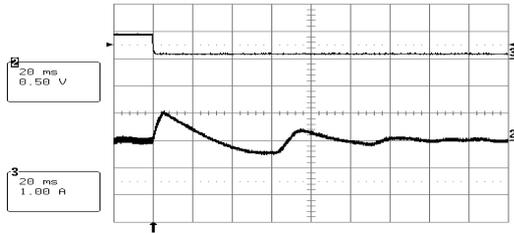
(b) 하강부하시 부하특성 (IO2=1→0.2A)
(b) Load regulation for falling load (IO2=1→0.2A)

그림 4 강압형 컨버터의 부하특성 : PI
Fig. 4 Load regulation of Buck converter : PI

또한 그림 5(a), 5(b)는 PI 제어기를 적용한 승압형 컨버터의 부하변동에 대한 과도응답을 측정한 파형으로서, 부하 상승시의 과도응답시간은 약 80msec이고, 최대오차값은 500mV 정도이며, 부하 하강시에는 각각 160msec, 500mV 정도임을 알 수 있다. 이때 PI 제어기의 상수는 각각 $K_P = 0.23$, $K_I = 17$ 이다.



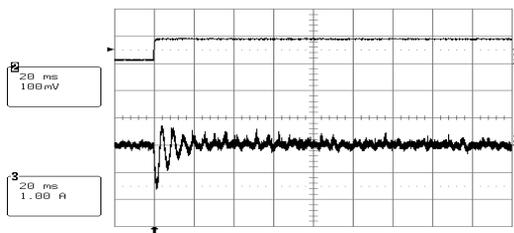
(a) 상승부하시 부하특성 (IO2=0.2→1A)
(a) Load regulation for rising load (IO2=0.2→1A)



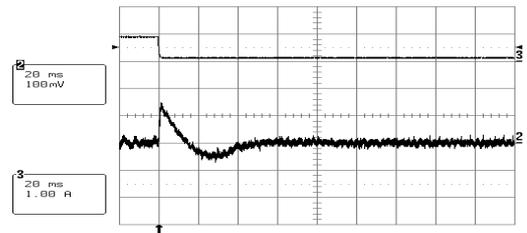
(b) 하강부하시 부하특성 (IO2=1→0.2A)
(b) Load regulation for falling load (IO2=1→0.2A)

그림 5 승압형 컨버터의 부하특성 : PI
Fig. 5 Load regulation of Boost converter : PI

그림 6(a)는 퍼지제어기를 적용하여 강압형 컨버터의 부하전류를 0.2A에서 1A로 상승시켰을 때 출력전압의 변동을 나타낸 것으로 부하상승시 과도응답시간이 약 40msec, 오차의 최대값은 150mV 정도임을 알 수 있다. 퍼지제어기의 이득은 반복적인 실험을 통하여 얻은 값으로서, $\eta = 0.0003$ 이다. 또한 그림 6(b)는 동일조건하에서 부하전류를 1A에서 0.2A로 감소시켰을 때 출력전압의 변동을 나타낸 파형으로 60msec, 최대 오차값은 150mV 정도임을 알 수 있다.



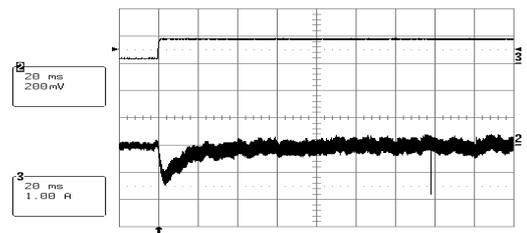
(a) 상승부하시 부하특성 (IO2=0.2→1A)
(a) Load regulation for rising load (IO2=0.2→1A)



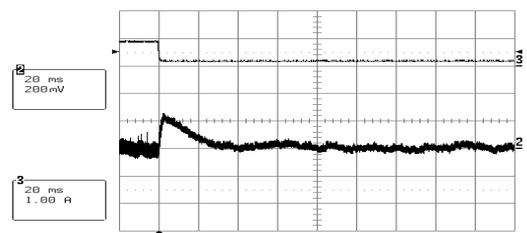
(b) 하강부하시 부하특성 (IO2=1→0.2A)
(b) Load regulation for falling load (IO2=1→0.2A)

그림 6 강압형 컨버터의 부하특성 : 퍼지
Fig. 6 Load regulation of Buck converter : Fuzzy

또한 그림 7(a), 7(b)는 퍼지제어기를 적용한 승압형 컨버터의 부하변동에 대한 과도응답을 측정한 파형으로서, 부하 상승시의 과도응답시간은 약 80msec이고, 최대 오차값은 300mV 정도이며, 부하 하강시에는 각각 50msec, 230mV 정도임을 알 수 있다. 이때 퍼지제어기의 이득은 $\eta = 0.0001$ 이다.



(a) 상승부하시 부하특성 (IO2=0.2→1A)
(a) Load regulation for rising load (IO2=0.2→1A)



(b) 하강부하시 부하특성 (IO2=1→0.2A)
(b) Load regulation for falling load (IO2=1→0.2A)

그림 7 승압형 컨버터의 부하특성 : 퍼지
Fig. 7 Load regulation of Boost converter : Fuzzy

각 제어기에 대한 최적의 이득을 얻기 위하여 여러번의 반복적인 실험을 시행한 결과, 그림 4~7에서 알 수 있듯이 강압형 및 승압형 컨버터 양쪽 모두 PI 제어기에 비하여 퍼지제어기가 우수한 제어성능을 보여주고 있다.

또한, 그림 8~11은 강압형 및 승압형 컨버터가 각각 동시에 독립적으로 제어되고 있음을 나타내주는 파형으로서, 컨버터 및 제어기가 각각 2종류이므로 아래와 같이 모두 4 종류의 조합이 가능하다.

- ① 강압형 컨버터 - PI 제어, 승압형 컨버터 - PI 제어
- ② 강압형 컨버터 - 퍼지제어, 승압형 컨버터 - PI 제어
- ③ 강압형 컨버터 - PI 제어, 승압형 컨버터 - 퍼지제어
- ④ 강압형 컨버터 - 퍼지제어, 승압형 컨버터 - 퍼지제어

여기서 각 파형의 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

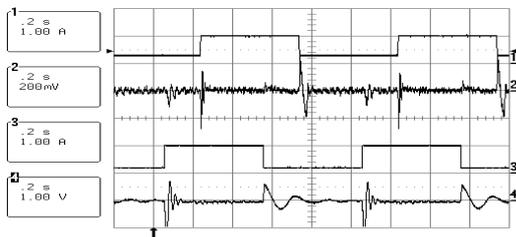


그림 8 PI(강압형), PI(승압형) 동시제어
Fig. 8 Simultaneous control by PI(Buck), PI(Boost)

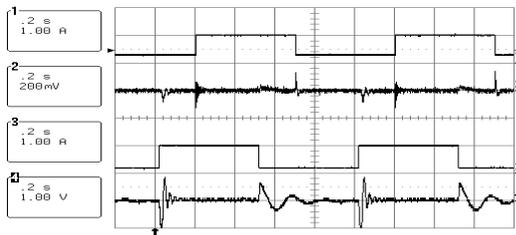


그림 9 퍼지(강압형), PI(승압형) 동시제어
Fig. 9 Simultaneous control by Fuzzy(Buck), PI(Boost)

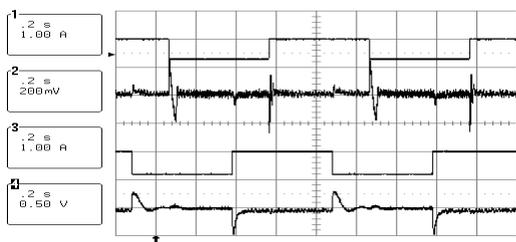


그림 10 PI(강압형), 퍼지(승압형) 동시제어
Fig. 10 Simultaneous control by PI(Buck), Fuzzy(Boost)

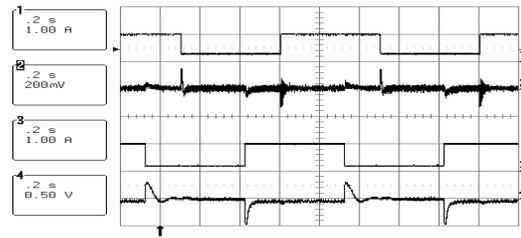


그림 11 퍼지(강압형), 퍼지(승압형) 동시제어
Fig. 11 Simultaneous control by Fuzzy(Buck), Fuzzy(Boost)

6. 결론

하나의 DSP를 이용하여 사양이 다른 별도의 강압형 컨버터 및 승압형 컨버터를 동시에, 독립적으로 제어하는 동시제어 시스템을 설계하고, PI 제어기 및 퍼지제어 알고리즘을 적용함으로써 제어성능이 우수하면서 제어구조가 간단한 디지털제어 다출력 전원을 제시한다. 또한 실험 결과를 통하여 강압형 및 승압형 컨버터가 부하의 변동 및 제어기 종류에 관계없이 동시에 독립적으로 제어됨을 보임으로써 하나의 디지털 제어기에 의한 강압형 및 승압형 PWM DC-DC 컨버터 동시제어의 타당성을 입증하고, PI 제어기 및 퍼지제어기의 제어성능을 비교하였다.

참고 문헌

- [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] 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.

[8] 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(공박). 1991~2002년 (주)현대엘리베이터 기술연구소 선임연구원. 현재 전주공업대학 전기과 전임강사

Tel : 063-220-3836

Fax : 063-220-3839

E-mail : hspark@jtc.ac.kr



한 우 용 (韓 宇 勇)

1964년 5월 23일생. 1986년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 대한전기학회 전문대학교육위원회 전북지부장. 현재 전주공업대학 전기과 부교수

Tel : 063-220-3834

Fax : 063-220-3839

E-mail : wyhan@jtc.ac.kr



이 공 희 (李 公 熙)

1950년 7월 16일생. 1973년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동국대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 벨기에 브뤼셀 대학 객원교수. 현재 대한전기학회 전문대학교육위원회 부회장. 현재 한국조명전기설비

학회 전북지부장. 현재 전주공업대학 전기과 교수

Tel : 063-220-3831

Fax : 063-220-3839

E-mail : ghlee@jtc.ac.kr