

신경회로망을 이용한 DC-DC 컨버터의 출력전압제어

황계호, 김동희, 남승식*, 배상준**, 이봉섭^, 심광열^^, 안항목§
 영남대학교, *경일대학교, **여주대학, ^삼척대학교, ^^울산과학대학, §안양과학대학

Neural network controller based approach to the output voltage control of DC-DC converter

G.H. Hwang, D.H. Kim, S.S. Nam*, S.J. Bae**,
 B.S. Lee^, K.Y. Sim^^, and H.M. An§

Yeungnam University, *Kyungil University, **Yejoo College,
 ^Samchok National Univ., ^^Ulsan College, §Anyang College

ABSTRACT

Recently, Research that output voltage control using several control methods to dc-dc converter that is non-linear system is gone. This paper describes control algorithm of the Buck type DC-DC converter using neural network controller.

We conform a rightness theoretical analysis by comparing a theoretical values, simulation values obtained from simulation tool and experimental values obtained from experiment. the neural network controller got better special characteristic than the hysteresis controller. This paper is thought to be applied to several power conversion system use neural network controller.

1. 서 론

반도체 관련 산업이 발달함에 따라 각종 산업용 전기기기, 통신장비, 가전기기 등에 전력용 반도체 고속 스위칭 소자를 이용한 소형·경량화 및 고신뢰성을 갖는 정지형 전력변환 장치가 광범위하게 사용되고 있다. 이에 따른 전력변환장치 중의 하나인 DC-DC 컨버터도 많은 연구자에 의해 여러 가지 형태로 제안되었고, 이를 제어하는 방법도 다각도로 연구되고 있다.^[1]

또한, 스위칭 모드로 동작하는 전력변환장치들은 고속 스위칭 동작으로 인해서 그의 동작특성이 심한 비선형성을 나타내고 있다.^{[2][3]} 이를 보완하기 위해 신경회로망(이하 뉴럴 네트워크 제어기)에 관해 관심을 가지게 되었다.^[2] 또한, 기존의 히스테리시스 제어기를 이용한 제어방법과 함께 컨버터의 이론해석을 통한 여러특성 이는 비선형계통의 modeling 이나, 그의 역을 평가하거나, plant의 제어등과 같은분야

에는 많이 응용되고 있지만, 극히 일부에서만 전력 변환장치에 이를 적용하고 있다.

비선형 계통인 DC-DC 컨버터에 여러 다른 제어 방법을 이용하여 출력전압을 제어하는 연구가 진행되고 있으나,^[1] 본 연구에서는 Buck type DC-DC 컨버터에 제어 알고리즘을 뉴럴 네트워크를 적용한 제어방법을 제시하였고, 또한 기존의 히스테리시스 제어기를 이용한 제어방법과 함께 컨버터의 이론해석을 통한 여러 특성과 Psim을 이용한 시뮬레이션, DSP(TMS320C32)를 이용한 실험을 통한 특성을 비교·검토하고자 한다.

2. Buck type DC-DC converter

2.1 회로해석

그림 1은 PI제어기를 이용한 일반적인 Buck type DC-DC 컨버터의 출력전압을 제어하는 블록 선도를 보여주고 있다. 그림 1에서 보듯이 일반적인 buck type DC-DC 컨버터에 PI제어기 대신에 본 논문에서는 히스테리시스 제어기와 뉴럴 네트워크 제어기를 이용하여 특성을 서로 비교·검토하였다.

먼저, 그림 1에서 Buck type DC-DC 컨버터에 대해서 살펴보면, 본 컨버터의 회로 동작은 스위칭 소자가 ON인 경우, 입력이 출력으로 전달되고, 스위칭 소자가 OFF인 경우, 다이오드를 통해 출력으

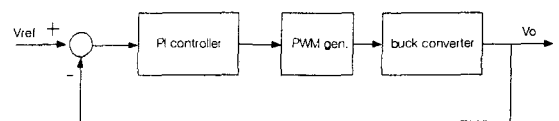


그림 1 PI 제어기를 이용한 Buck type DC-DC 컨버터의 블록다이아그램

Fig. 1 Block diagram of Buck type DC-DC converter with PI controller

로 에너지가 전달된다. 따라서, 스위칭 소자와 다이오드의 ON, OFF 상태에 따라 아래와 같이 2개의 동작 모드가 생성된다.

모드 1 : 스위치가 ON, 다이오드는 OFF.

모드 2 : 스위치는 OFF, 다이오드가 ON.

표 1 무차원화 파라미터
Table 1 Normalized parameter

parameter	reference value	normalized value
voltage	$E_b = E$	$V^* = \frac{v}{E_b}$
time	$T_b = \sqrt{L_b C_b}$	$dz = \frac{dt}{T}$
impedance	$Z_b = \sqrt{\frac{L_b}{C_b}}$	$R^* = \frac{R}{Z_b}$
current	$I_b = \frac{E_b}{Z_b}$	$I^* = \frac{i}{I_b}$
inductance	$L_b = L$	$L^* = \frac{L}{L_b}$
capacitance	$C_b = C$	$C^* = \frac{C}{C_b}$

이 컨버터의 각 동작모드에 따른 각 모드별 회로 상태방정식을 회로해석의 범용성 즉, 정량화를 부여하기 위해 표 1에서 나타난 무차원화 파라미터를 도입하였다. 본 컨버터의 회로상태방정식을 표 1을 이용하여 각각의 모드별 무차원화 상태방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{X}^* = A^* X^* + B^* U^* \quad (1)$$

여기서, $X^* = [i_L^* \ v_c^*]^T$ 이고, 각 모드에 따른 A^* , B^* 는 다음과 같이 된다.

모드 1

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -\frac{1}{R^*} \end{bmatrix} \quad B^* = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

모드 2

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -\frac{1}{R^*} \end{bmatrix} \quad B^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

2.2 제어방법

무차원화 상태방정식을 슬라이딩 모드 제어기의 형태로 표현하기 위해, 무차원화 상태방정식인 식 (1)의 상태변수 오차의 선형조합으로 나타내어지는 스위칭표면은 다음의 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \frac{d(v_c^* - v_r^*)}{dt^*} + (v_c^* - v_r^*) \quad (2)$$

여기서, v_r^* 은 reference voltage의 값으로 일정하

므로, 식(2)을 다시 정리하면, 식 (3)와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\epsilon = (i_L^* - \frac{v_c^*}{R^*}) + (v_c^* - v_r^*) \quad (3)$$

식 (3)의 결과식으로 제어 동작은 $\epsilon < 0$ 이면, 스위치 S가 ON이 되고, $\epsilon > 0$ 이면, 스위치 S가 OFF가 된다. 또한, 이 컨버터의 출력전압을 슬라이딩 모드 제어기로 제어하는 방법은 plant parameter의 변화에 강인한 특성을 가지지만, 스위칭 주파수가 제한되므로 실제 계통이 추종할 수 없다. 따라서 이상적인 경우와 비슷하게 동작시키는 많은 방법이 제안되었는데, 이 중에서 히스테리시스 방법과 일정한 샘플링 주파수방법, 일정한 온-타임 방법이 양호한 특성을 나타내었다. 그 중에서 히스테리시스 제어방법이 가장 양호한 특성을 가지는 것을 알 수 있었다.^[1]

3. 제어기

3.1 히스테리시스 제어기

그림 2은 히스테리시스 제어기를 이용하여 Buck type DC-DC 컨버터의 블록선도를 보여주고 있다. 그림 3에서 보듯이 스위칭 평면인 식(3)을 적용하였다. 또한 히스테리시스 제어기는 스위칭 표면 부근에서 0이 아닌 상하 대칭되는 값을 선정해서 스위칭 동작을 행하도록 하였다. 여기서 히스테리시스 폭은 ± 0.01 인 0.02으로 선정하였다.

표 2은 히스테리시스 제어기에 대한 스위칭 표면에 따른 스위칭 소자의 ON, OFF의 상태에 대하여

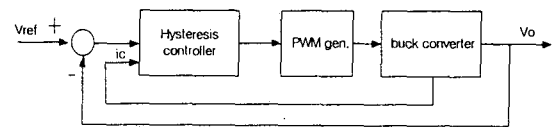


그림 2 히스테리시스 제어기를 이용한 Buck type DC-DC 컨버터의 블록다이어그램

Fig. 2 Block diagram of Buck type DC-DC converter with Hysteresis controller

표 2 히스테리시스 방법

Table 2 The Hysteresis method

control methods	control action	switch state
hysteresis method	$\epsilon < -\Delta\epsilon$	ON
	$\epsilon > \Delta\epsilon$	OFF
remark	ϵ : Error between switching surface and actual switching, $2\Delta\epsilon$: The hysteresis band	

보여주고 있다. 히스테리시스 제어기의 제어동작은 표 2에서 보듯이 $\epsilon < -\Delta\epsilon$ 이면, 스위치 S가 ON이고, $\epsilon > \Delta\epsilon$ 이면, 스위치 S가 OFF가 되도록 하였다.

3.2 뉴럴 네트워크 제어기

그림 3는 식(3)을 적용하여 뉴럴 네트워크 제어기를 이용한 Buck type DC-DC 컨버터의 블록선도를 보여주고 있다.

그림 4은 식(1)의 무차원화 상태방정식으로 설명되는 시스템의 출력전압 v_c^* 를 신경회로망으로 제어하는 Buck type DC-DC 컨버터의 블록선도를 보여주고 있다.

그림 4에서 보듯이 이 컨버터의 출력전압을 제어하는 방법을 알고 있기 때문에 신경회로망을 직접적인 제어기로 사용할 수 있다. 이 제어기는 3층 feedforward 신경회로망으로 구성하였고, 이 제어기의 구성으로 입력층, hidden층과 출력층의 뉴런 수는 각각 2개 3개 1개로 하였다. 뉴럴 네트워크 제어기의 입력은 출력 커패시터의 전압과 전류 그리고 기준전압으로 결정되는 식 (4)와 같고, 출력은 컨버터의 스위칭 신호이다.

$$I_{n1} = i_L^* - \frac{v_c^*}{R^*} \quad (4)$$

$$I_{n2} = v_c^* - v_r^*$$

뉴럴 네트워크 제어기의 입력들을 사용해서 뉴런 사이의 weight를 새롭게 조정하는 학습규칙은 다음과 같이 검출된 전압과 전류에 의해 결정된다.

$v_c^* - v_r^* < -\Delta\epsilon$ 이면 스위치 S는 ON

$v_c^* - v_r^* > \Delta\epsilon$ 이고, $i_c^* > \Delta\epsilon$ 이면 스위치 S는 OFF

$v_c^* - v_r^* > \Delta\epsilon$ 이고, $i_c^* > -\Delta\epsilon$ 이면 스위치 S는 ON

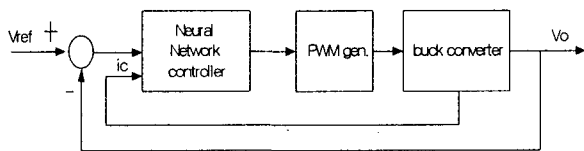


그림 3 뉴럴네트워크 제어기를 이용한 Buck type DC-DC 컨버터의 블록선도

Fig. 3 Block diagram of Buck type DC-DC converter with Neural network controller

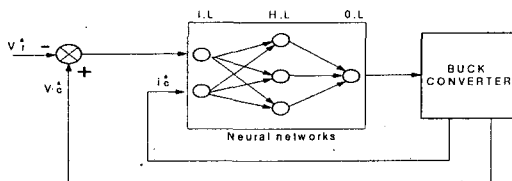


그림 4 뉴럴 네트워크 제어기의 블록선도

Fig. 4 Block diagram of neural network controller

여기서 v_r^* 와 v_c^* 와 i_c^* 는 각각 무차원화된 기준전압, 출력전압, 커패시터에 흐르는 전류를 나타내고, ϵ 는 오차값이다.

표 3은 신경회로망 제어기의 각 상태에 따른 학습패턴을 보여주고 있으며, 1, 0은 스위치의 ON-OFF 상태를 나타낸다. 각 패턴에 따라서 입력층, hidden층, 출력층의 접속강도(weight)는 일반화된 delta rule을 사용하여 오차를 줄일 수 있는 back propagation algorithm을 사용하여 학습을 충분히 시켰으며, 학습률과 모멘텀은 각각 $\eta=0.1$, $\mu=0.3$ 으로 하였고, 활성화함수는 시그모이드함수를 사용하였다.

표 3의 학습 패턴에 의해서 학습이 끝난 신경회로망의 접속 weight는 출력전압의 제어 과정 중에는 학습되지 않고 고정된다.

4. 시뮬레이션 및 실험

psim을 이용한 시뮬레이션 및 DSP(TMS320C32)를 사용한 실험에 사용된 회로정수는 다음과 같다. 입력전압 : 20[v], 출력전압: 5[v], duty ratio : 0.25, $r=5[\Omega]$, 스위칭 주파수 : 20[kHZ], $L = 0.84[mH]$, $C = 220[\mu F]$ 이다.

그림 5는 히스테리시스 제어기를 이용한 기준전압의 변화에 따른 출력커패시터 전압, 출력커패시터 전류와 인덕터 전류의 이론파형과 출력커패시터 전압의 시뮬레이션파형, 출력커패시터 전압의 실측한 실험파형을 보여주고 있다. 그림 5에서 보듯이 임의의 시간 10에서 기준 전압을 0.6에서 0.3으로 1/2 감소시킨 경우와 다시 임의의 시간 20에서 기준전압을 0.3에서 0.6으로 2배 증가시킨 경우를 살펴보면, 전반적으로 리플이 많으며, 오버슈트가 많이 발생함을 알 수 있다.

그림 6은 뉴럴 네트워크 제어기를 이용한 기준전압의 변화에 따른 출력커패시터 전압, 출력커패시터 전류와 인덕터 전류의 이론파형과 출력커패시터 전압의 시뮬레이션파형, 출력커패시터 전압의 실측한 실험파형을 보여주고 있다. 그림 6에서 보듯이

표 3 학습패턴

Table 3 Learning pattern

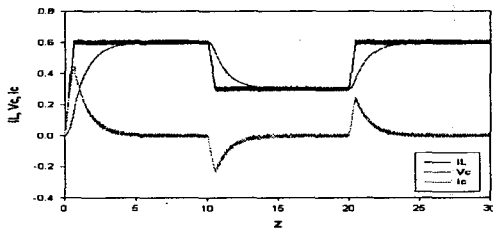
pattern number	input signal		target value
	I_{n1}	I_{n2}	
1	0.01	0.01	0
2	0.01	-0.01	1
3	-0.01	0.01	1
4	-0.01	-0.01	1

임의의 시간 10에서 기준 전압을 0.6에서 0.3으로 1/2 감소시킨 경우와 다시 임의의 시간 20에서 기준전압을 0.3에서 0.6으로 2배 증가시킨 경우를 살펴보면, 전반적으로 리플이 감소하며, 오버슈트가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

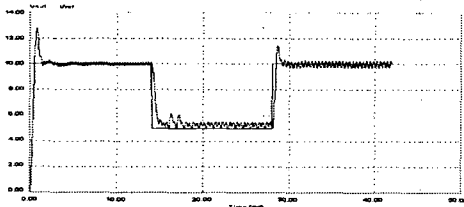
그림 5와 그림 6에서 보는 바와 같이 뉴럴 네트워크 제어기를 사용한 경우에 부하 변화에 관계없이 빠른 응답 시간에 추종하고, 일정한 출력전압을 유지한다는 것도 알 수 있으며, 또한 이론파형과 psim을 이용한 시뮬레이션파형, 실측한 실험파형의 경향이 거의 일치함을 알 수 있다.

5. 결 론

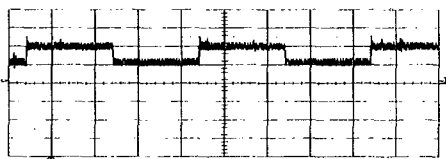
본 연구에서는 비선형시스템인 buck type DC-DC 컨버터의 출력전압을 제어하기 위해 백프라피게이션 뉴럴네트워크방법에 의해 슬라이드 모드 알고리즘으로 뉴럴 네트워크를 학습시켰으며, 또한, 기존의 히스테리시스 제어기를 이용한 제어 방법과 함께 컨버터의 이론해석을 통한 여러특성



(a) i_L , V_c , i_c 의 이론 파형
(a) Theoretical waveforms of i_L , V_c , i_c



(b) V_c , V_{ref} 의 시뮬레이션 파형
(b) Simulation waveforms of V_c and V_{ref}



(c) V_c 의 실험파형(5[V/div] 0.5[s/div])
(c) Experimental waveform of V_c

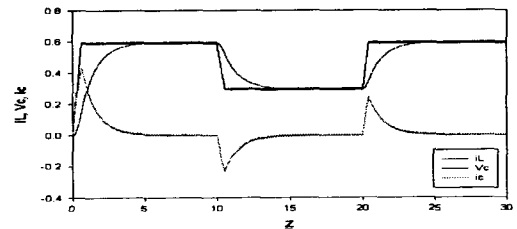
그림 5 히스테리시스 제어기를 이용한 i_L , V_c , i_c , V_{ref} 의 파형

Fig. 5 Waveforms of i_L , V_c , i_c and V_{ref} . hysteresis controller.

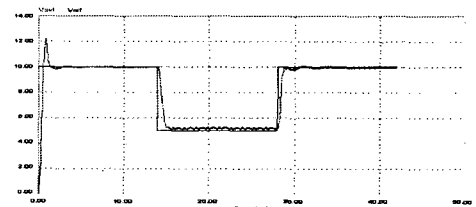
과 psim을 이용한 시뮬레이션, 실험을 통한 특성을 비교 검토한 결과, 신경회로망을 이용한 제어기가 양호한 특성을 얻었으며, 향후, 뉴럴 네트워크 제어기를 이용한 여러 다른 전력변환장치에 유용하게 적용될 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

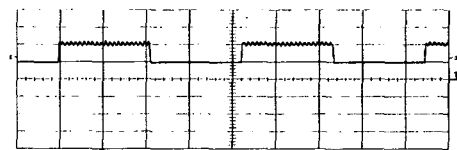
- [1] B. J. Cardoso Fo., B. R. Menezes, A. F. Moreira and P. C. Cortizo, "Analysis of Switching Frequency Reduction Applied to Sliding Mode Controlled DC-DC Converters", Proceedings of the IEEE, 1992.
- [2] Toshio Fukuda, Takanori Shibata, Masatoshi Tokita, and Toyokazu Mitsuoka, "Neuromorphic control : Adaptation and Learning", IEEE Trans. Ind. Elect., Vol. 39, No. 6, pp.497-503, 1992, Dec.
- [3] Heng-Ming Tai, Junli Wang and Kaveh Ashenayi, "A Neural Network-Based Tracking Control System", IEEE Trans. Ind. Elect., Vol. 39, No. 6, pp.504-510, 1992, Dec.



(a) i_L , V_c , i_c 의 이론 파형
(a) Theoretical waveforms of i_L , V_c , i_c



(b) V_c , V_{ref} 의 시뮬레이션 파형
(b) Simulation waveforms of V_c and V_{ref}



(c) V_c 의 실험파형(5[V/div] 0.5[s/div])
(c) experimental waveform of V_c

그림 6 뉴럴 네트워크 제어기를 이용한 i_L , V_c , i_c , V_{ref} 의 파형

Fig. 6 Waveforms of i_L , V_c , i_c and V_{ref} . neural network controller.