

피드백 요소를 고려한 전류모드 제어기의 안정도해석

김철진*, 송요창*, 진용선**
 한라대학교*, (주)성신**

The stability analysis of current mode controller considering feedback element

Cherl-Jim Kim*, Yo-Chang Song*, Young-Sun Jin**
 Halla University* Sungshin Co.**

Abstract - Recently, the power supply equipments have tendency to take multiple feedback loop paths. In this paper, the state space averaging technique is applied for the analysis of flyback type current mode control circuit. We made real converter for the guarantee of stable output characteristic and proper design of feedback circuit. The validity of proposed method is verified from test results. The improvement of stability is confirmed by sinusoidal signal injection method with isolated transformer. It is known that phase margin is sufficient and gain crossover frequency f_c is nearly 1/5 of switching frequency f_s from the experimental result with frequency response analyzer.

제어 전류의 최대값을 제한 함으로써 스위치 소자의 최대 전류를 직접 제어 할 수 있다. 또한 병렬 운전시 각 컨버터의 전류의 밸런스를 취할 수 있고 컨버터의 과전류 보호가 용이하며 공통의 제어 신호에 의한 복수의 컨버터의 병렬운전이 가능하다는 점 등 고출력 전원에 응용하는 경우에 적합한 특징을 가지고 있다.

본 연구에서는 전류모드제어 방식을 적용한 단일 또는 다중 출력에 적합한 플라이백 방식의 컨버터를 대상으로 연구하였다. 여기에 상태공간평균화법을 적용, 소신호 모델링 과정에서 도출된 수식을 시뮬레이션하여 소신호 모델링에 따른 주파수 영역 해석을 수행 하였으며 실험 결과로부터 제안한 방법의 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

대부분의 아날로그와 디지털 전자시스템은 일정한 값을 갖는 정전압 직류전원 장치를 필요로 하며 산업의 각 분야에서 정전압 직류전원장치를 적용한 전력변환 기술은 매우 중요한 의미를 갖는다.

본 연구에서는 중.소 경량화에 적합한 AC-DC 컨버터를 설계, 제작하였으며 저전력의 단일 또는 다중 출력 컨버터를 고려한 전류모드제어 방식에 의한 플라이백 회로를 채택하였다. 이러한 컨버터는 스위치의 반복적인 도통, 차단으로 회로가 비선형이 되어 그 동작의 해석이 매우 복잡하나 컨버터는 직류 전력을 출력하기 위해 저역통과 필터를 이용하고 있으므로 통상 스위칭 주파수는 회로의 고유주파수에 비하여 충분히 높게 설정하고 있다. 이런 이유로 한 주기당 인덕터 전류 및 캐패시터 전압의 변화는 선형으로 근사할 수 있다. 이 경우에 전류 혹은 전압의 한 주기당 평균값을 상태 변수로 설정함으로써 스위치를 포함하는 비선형 회로를 선형 회로로 취급할 수 있으며 이러한 상태 공간 평균화 방법은 상태공간 모델링에 비해 해석이 용이 하며 모든 형태의 DC-DC 컨버터의 동작을 해석할 수 있는 일반성을 가지고 있다. 또한 해석 결과는 회로의 선형 평균화 모델링에 그대로 적용할 수 있어 회로의 물리적인 성격도 충분히 설명해 줄 수 있다.

컨버터의 제어방안으로는 스위치를 ON/OFF 시킴으로써 변화하는 시비율을 제어하는 기존의 PWM 제어방법과는 다르게, 일정 주파수의 클럭으로 스위치를 도통시키고 스위칭 전류 또는 인덕터 전류가 설정값에 도달한 순간에 차단시키는 제어 방법인 전류모드제어(current mode control)방법을 적용한다. 이 방법은

2. 전류모드 플라이백 컨버터

2.1 소신호에 의한 컨버터 해석

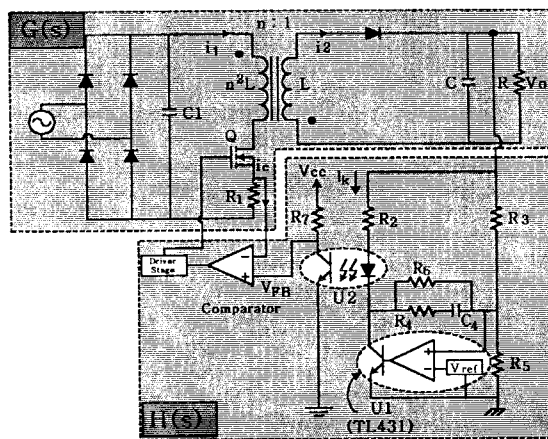


그림 1. 전류모드 플라이백 컨버터 회로
 Fig 1. Current mode controlled flyback converter

그림1은 본 연구에서 제작한 전류모드 제어 방식의 D C-DC 플라이백 컨버터의 기본 회로도이다.

제시한 그림1의 제어 회로는 2개의 루프를 가지고 있으며 하나는 스위치 소자를 통과하는 전류검출 제어 루프 (i_c)와 또 다른 하나는 출력전압을 감지하여 피드백하는 외부 전압 루프 (V_{FB})이며 스위치Q가 on 했을시 에너지를 저장하고 스위치Q가 off시 에너지를 부하측으로 전달하는 플라이백 방식의 컨버터이다.

U1(programmable zener diode)은 오차증폭기이며

U2(optocoupler)는 절연형 컨버터의 전원측과 제어회로의 절연을 목적으로 사용한다.

회로해석을 하기 위하여 인덕터 L 을 경유하는 전류 i 와 출력 캐패시터단의 전압 v_c 를 상태변수로 두어 상태공간 평균화법을 적용하여 해석하였으며 컨버터의 on, off 동작에 따른 상태 평균화 방정식과 입력전압, 시비율에 미소변동을 고려하여 그림1에 제시한 전류모드 제어형 플라이백 컨버터 회로($G(s)$)로부터 소신호에 의한 전달함수를 식(1)과 같이 구할 수 있다.

식(2)는 on 시간일 때의 상태 방정식을 나타내며 식(3)은 off 시간일 때의 상태방정식을 나타낸다. A 와 B 는 $A=D a_1 + D' a_2$ 와 $B=D b_1 + D' b_2$ 로 표현되며 D 와 D' 는 on,off시간일 때의 시비율을 각각 의미하며 a_1, b_1 과 a_2, b_2 는 각각 정상상태에서 on,off시 인덕터전류 i_2 와 캐패시터전압 v_c 의 상태 변수에 따른 계수를 의미한다.

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + B\hat{v}_i + \{(a_1 - a_2)X + (b_1 - b_2)V_i\} \hat{d} \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = a_1x + b_1v_i \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di_2}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_1}{n^2L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_2 \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{nL} \\ 0 \end{bmatrix} v_i$$

$$\frac{dx}{dt} = a_2x + b_2v_i \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di_2}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_2}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_2 \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_i$$

여기서 n 은 트랜스포머 1,2차 간의 권수비이며, r_1, r_2 는 권선저항을 의미한다.

식(2),(3)을 식(1)에 대입하여 제어전달함수를 표현하면 다음의 식(4)로 표현할 수 있으며 미소 듀티비의 변동에 대한 출력의 변화는 다음과 같다.

$$G_c(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{i}_c(s)} = \frac{G_o \left(1 - \frac{s}{\omega_z}\right)}{\Delta} \quad (4)$$

여기서

$$\Delta = s^2 + 2\delta\omega_0s + \omega_0^2$$

$$\omega_0 = \frac{D'^2}{LC} \left[1 + \frac{Z_0 + (2+J)Z_1 + Z_2}{R}\right]$$

$$2\delta\omega_0 = \frac{1}{CR} + \frac{D'^2[Z_0 + (J+1)Z_1 + Z_2]}{L}$$

$$\omega_z = \frac{D'^2R}{L} \cdot \left[J + \left(1 + \frac{V_i}{nV_0}\right) - \frac{Z_0}{R}\right]$$

$$Z_0 = \frac{r^*}{D'^2}, \quad Z_1 = \frac{h'V_0}{nD'^2}, \quad Z_2 = \frac{h'V_i}{n^2D'^2}$$

$$r^* = \frac{D}{n^2} r_1 + D' r_2$$

이다.

이때 식(4)에 따른 MATLAB 시뮬레이션 결과($G(s)$)는 그림 2와 같이 얻을 수 있으며 0[dB]과 교차되는 교차주파수(f_c)는 2[kHz] 부근에서 나타나므로 이를 토대로 보상회로($H(s)$) 설계 기준을 세울 수 있다.

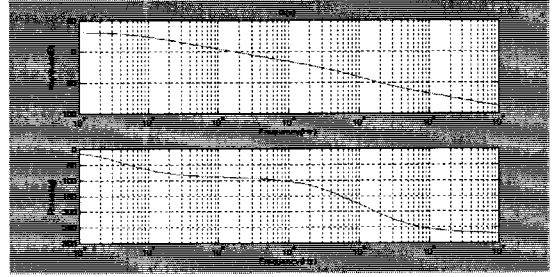


그림 2. 입출력제어전달함수

Fig 2. Simulation result of input and output controlled transfer function

2.2. 보상회로

DC-DC 컨버터에서 퀘환 루프의 안정성을 확보하기 위해서는 통상 오차 증폭기에 극·영점 보상을 통하여 충분한 위상여유를 확보함으로써 이루어질 수 있다. 그림1에서 전압 피드백 루프()의 전압 V_{FB} U2의 다이오드가 발광되는 정도에 따라 반비례적으로 제어 되므로 이에 대한 관계식은 식(5)와 같이 표현 할 수 있다.

$$H(s) = \frac{V_{FB}}{V_0} = \frac{R_3[1 + sC_4(R_4 + R_6)]}{R_6(1 + sC_4R_4)} \quad (5)$$

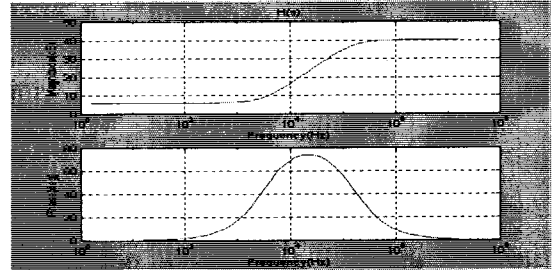


그림 3. 보상회로

Fig 3. Simulation result of compensation

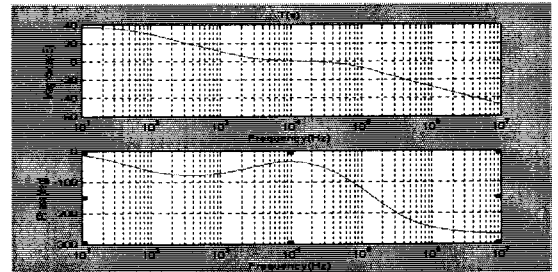


그림 4. 개루프 시뮬레이션

Fig 4. Simulation result of open loop

식(5)에 따른 MATLAB 시뮬레이션 결과($H(s)$) 그림3과 같은 결과를 나타낸다. 따라서 본 연구에서 제작한 플라이백 컨버터의 전체 루프이득 $T(s)$ 는 다음의 식(6)과 같이 나타나며 시뮬레이션 결과는 그림4와 같이 나타난다.

$$T(s) = G(s) \cdot H(s) \quad (6)$$

3. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 실험을 위하여, 그림 1에 제시한 전류 모드 제어 방식의 컨버터를 기본으로 회로를 설계 제작하였으며, 제작한 컨버터 회로의 기본설계사양을 다음의 표1에 제시한다.

표1. 실험용 컨버터 회로의 파라미터
Table1. Parameters of experimental converter

V_i [V]	V_o [V]	P [W]	L [μ H]	C [μ F]	f_s [kHz]
AC 220	80	24	281	180	100
n	r_{11} [Ω]	r_{12} [Ω]	R [Ω]	R_1 [k Ω]	R_2 [Ω]
0.93	2.6	2.6	100	10	100
R_g [k Ω]	C_1 [μ F]				
5	0.01				

본 연구에서 제작한 컨버터의 스위칭 주파수(f_s)는 100[kHz]이다. 다음의 그림5는 실험을 위하여 설계 및 제작한 전류 제어 방식의 플라이백 컨버터의 MOSFET의 드레인과 소스간의 스위칭 전압파형과 이때의 1차측 인덕터 전류의 실험 파형을 나타낸 그림이다.

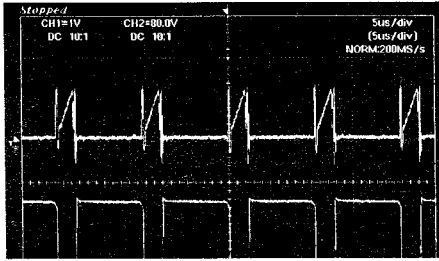


그림 5. 스위치 전압 및 전류 실험 파형
Fig 5. Experimental waveform of switching device and current sensor

다음의 그림 6은 주파수 영역 해석을 위한 신호주입회로를 나타낸 그림이다. 그림에서 주파수 응답 분석장비의 주입 신호원이 컨버터의 동작에 전기적 영향을 가지 않도록 절연 트랜스포머를 사용하였다.

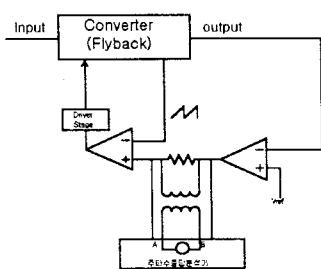


그림 6. 주파수 영역 해석을 위한 신호주입회로
Fig 6. Signal injection circuit for frequency response analysis

그림 7은 제작한 컨버터에 그림 6에 제시한 신호 주입 방안을 적용한 주파수 응답특성을 실험으로 나타낸 결과이다. 그림의 결과로부터, 루프의 대역폭은 스위칭 주파수 f_s 의 약 1/5 에 해당하는 약 20[kHz] 로서 적절한 대역폭과 양호한 출력응답특성을 나타내고 있다. 또한 저주파수에서의 이득이 충분히 높아 양호한 정전압 출력특성을 나타내며, 이득교차주파수 f_c 에 이를 때 까지의 이득저감은 -20 [dB/dec] 로서 안정된 응답특성을 나타내고 있다.

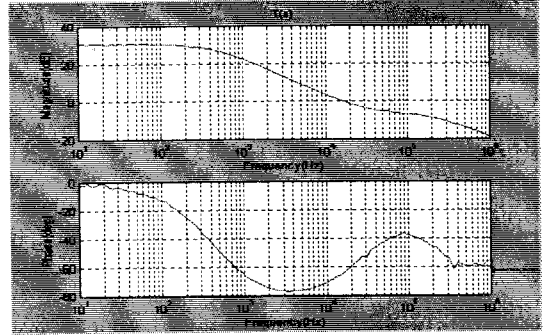


그림 7. 주파수 응답 특성곡선
Fig 7. Experimental result of frequency response analysis

4. 결 론

최근의 전원장치는 전류모드 제어기법을 이용한 다중루프 피드백 회로를 적용하는 경향이 있다. 본 연구에서는 상태공간 평균화법을 적용하여 플라이백 방식의 에너지 변환 특성을 갖는 전류모드 제어회로를 기준으로 회로를 모델링 하였으며, 전류검출에 의한 내부 전류루프의 제어전압을 기준으로 출력전압의 전달특성을 해석하였다. 제작한 컨버터의 정전압 특성을 확보하기 위한 적절한 피드백 회로의 설계와 안정도 향상을 기하기 위해 전류 모드 제어회로 주변에 절연 트랜스포머를 사용하여 직렬로 정현파 신호를 주입하는 방법을 사용하였다. 주파수 분석장비를 이용한 실험 결과, 충분한 위상여유의 확보와 동작 주파수의 약 1/5 에 해당하는 20[kHz] 부근에서 이득교차 주파수 f_c 가 존재하며 입력 및 부하의 변동에 대하여 안정된 동작이 이루어지는 것을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Huai Wei, Issa Batarseh, Guangyong Zhu, Peter Kornetzky, "A Single-Switch AC-DC Converter with Power Factor Correction", IEEE Trans. Power Electron., vol. 15, pp. 421-430, May. 2000.
- [2] 김철진, "평균전류모드 제어기법을 이용한 플라이백 컨버터의 모델링 및 안정도에 관한 연구" '대한 전기학회 하계학술대회 논문집', 1999.7, pp 2682-2687
- [3] S.S. Keller and F.C. Lee, "The effects of an adaptive feedforward Compensation Scheme on Converter Dynamic Characteristics," Proceeding of Powercon 10, 1983
- [4] G. Chryssis, "High Frequency Switching Power Supplies", 1984
- [5] Robert W. Erickson, "DC-DC Power Converters", University of Colorado, 1998.
- [6] B. Holland, "Modelling Analysis and Compensation of the Current-Mode Converter," Proceedings of the Powercon 11 I-2, pp. 1-6, 1984.
- [7] 윤명중, 직류전원장치, 한국과학기술원 최종보고서, 1998.