

전류제어형 DC-DC컨버터의 안정도 향상에 관한 연구

김철진* 송요창*
한라대학교*

A Study on the stability improvement of current-mode controlled DC-DC Converter

Cherl-Jin Kim* Yo-Chang Song*
Halla University*

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 gurantee 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.

는 상태공간 평균화법에 의한 소신호 모델링을 하였고 주파수 영역에 대한 실험결과와 해석결과의 비교 검토를 통하여 제안한 해석 방안의 타당성을 입증하였다.

2. 전류모드 제어 방식의 컨버터

다음의 그림1에 본 연구에서 적용한 전류모드제어 방식의 DC-DC 컨버터의 기본회로를 제시한다. 그림1의 제어회로는 스위치 소자를 통과하는 전류를 검출하여 제어를 행하는 내부 전류 제어루프와 출력전압을 감지하여 피드백하는 외부 전압 루프로 구성되어 있다. 회로를 해석하기 위하여 인덕터 L 을 경유하는 전류 i 와 캐패시터단의 전압 v 를 상태변수로 두고 상태공간 평균화법을 적용하여 해석하였다.

1. 서 론

최근 고속,대용량 및 자기소호용 반도체 소자의 개발과 더불어 전동기제어, 전원공급장치, 자동화 추진 시스템 등의 응용 기술이 눈부신 발전을 해왔으며 산업의 각 분야에서 컨버터를 적용한 전력변환기술은 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 특히, 안정된 전압을 공급하는 기능을 갖는 전원 장치의 경우는 소형·경량화뿐만 아니라 고신뢰성을 갖는 기기의 개발에 대한 요구가 증가되고 있는 추세이다.[1]
기존의 전압제어 방식의 경우는 회로의 비선형성과 회로 변수의 변화 또는 외란의 영향으로 인해 전달 특성이 변화하게 되면 원하는 제어성능을 유지할 수 없게 되는 단점이 존재한다.

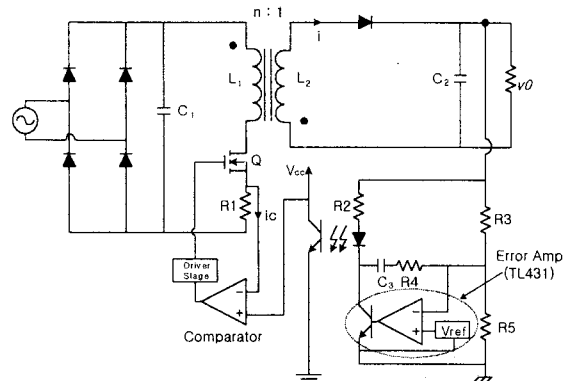


그림 1. 전류모드 플라이백 컨버터 회로
Fig 1. Current mode controlled flyback converter

컨버터의 ON, OFF 동작에 따른 상태 평균화 방정식과 입력전압과 시비율의 미소변동을 고려하여 그림1에 제시한 전류모드 제어형 플라이백 컨버터 회로로부터 다음의 식(1),(2)와 같이 상태변수에 대한 방정식을 정의할 수 있다.

$$\frac{d}{dt}(X + \hat{x}) = (a + \frac{\partial a}{\partial d} \hat{d})(X + \hat{x}) \tag{1}$$

$$+ (b + \frac{\partial b}{\partial d} \hat{d})(V_i + \hat{v}_i)$$

$$Y + \hat{y} = (c + \frac{\partial c}{\partial d} \hat{d})(X + \hat{x}) \tag{2}$$

그러나 전류모드 제어 방식의 경우는 최대 출력 전류가 제어전류에 의해 직접 결정되므로 스위치 소자의 최대전류를 직접제어할 수 있을 뿐만 아니라 병렬운전시 각 컨버터의 과전류 보호가 용이하며, 공통의 제어신호에 의한 복수의 컨버터의 병렬 운전이 가능한 장점을 갖는다.
본 연구에서는 여러 가지 형식의 컨버터 방식중 단일 또는 다중 출력에 적합한 플라이백 방식의 컨버터를 연구의 대상으로 하여 해석과 실험을 행하였다. 제작된 컨버터는 정전압 유지를 위하여 폐루프로 형성되어 있으므로 위상 지연을 발생하며 반도체 소자의 순방향 포화전압을 비롯하여 인덕터 및 트랜스의 권선저항, 캐패시터의 등가직렬저항(esr) 등의 기생요소가 존재한다. 이러한 기생요소는 DC-DC 컨버터의 동작에 직접적인 영향을 미치게되어 전력손실에 따른 효율저하와 함께 출력전압의 불안정 특성을 발생시키는 요인이 된다.
본 연구에서는 기존의 전압제어형 PWM제어방식에 비해 제어성능이 우수하며, 일정 주파수의 클럭에 의해 동작하여 인덕터 전류가 설정값에 도달하는 순간 제어가 가능한 전류모드제어 방식을 적용한 DC-DC 컨버터의 안정도 향상에 관한 특성을 고찰하였다.[2]-[3] 제작한 컨버터

여기서, X 는 정상상태에서 ON, OFF 시 인덕터전류 i 와 캐패시터전압 v 를 표현하는 상태변수이며, Y 는 정

상상태에서 ON, OFF 시 출력전압을 나타내는 상태변수이다. 또한 a 와 b 는 $a=Da_1+D'a_2$ 및 $b=Db_1+D'b_2$ 로 표현되며 D 와 D' 는 ON, OFF 시의 시비율을 각각 의미하며 a_1, b_1 과 a_2, b_2 는 각각 정상상태에서 ON, OFF 시 인덕터전류 i 와 캐패시터전압 v 의 상태 변수에 따른 계수를 의미한다.

$$\hat{y}(s) = \alpha(sI - a)^{-1} [b\hat{v}_i(s) + ((a_1 - a_2)X + (b_1 - b_2)V_i)] \hat{d}(s) \quad (3)$$

$$a_1 = \begin{bmatrix} -\frac{r_1}{n^2L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_2R} \end{bmatrix}, \quad a_2 = \begin{bmatrix} -\frac{r_2}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{C_2R} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$b_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{nL} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad b_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

여기서, n 은 트랜스포머 1, 2 차 간의 권수비율, r_1, r_2 는 각각 L_1, L_2 의 권선저항을 의미한다.

그리고 정상상태에서는 $\frac{dx(t)}{dt} = 0$ 이므로 식(5)와 같이 상태변수를 표현할 수 있다.

$$X = -a^{-1}bV_i \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{nD}{Dr_1 + n^2D'r_2 + n^2RD^2} \\ \frac{nRDD'}{Dr_1 + n^2D'r_2 + n^2RD^2} \end{bmatrix} V_i$$

식(4), (5)를 식(3)에 대입하여 제어전달함수를 표현하면 다음의 식(6)으로 표현할 수 있으며 미소 듀티의 변동에 대한 출력의 변화는 다음과 같다.

$$G_s(s) = \frac{\hat{v}_0}{\hat{d}} = \frac{F(1-Q)}{A} \frac{s}{\omega_m} \left(1 - \frac{s}{\omega_m}\right) \quad (6)$$

여기서

$$\Delta = \frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{2\delta}{\omega_0} s + 1$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{D^2(1+P)}{C_2}}, \quad F = A \left(\frac{nV_0 + V_i}{nD} \right)$$

$$A = \frac{n^2R - n^2D^2R}{2nV_0 + V_i}, \quad \omega_m = \frac{D^2R(nV_0 + V_i)}{nLV_0}$$

$$P = \frac{Dr_1 + D'r_2n^2 + (2nV_0 + V_i)A}{Rn^2D^2}$$

$$Q = \frac{V_0(Dr_1 + D'r_2n^2)}{R(nV_0 + V_i) \cdot (D^2n)}$$

$$\delta = \frac{1}{\omega_0} \frac{\{Dr_1 + D'r_2n^2 + (nV_0 + V_i)A\}}{2n^2D^2L} + \frac{1}{2RC_2}$$

따라서 플라이백 컨버터의 전체 루프이득 $T(s)$ 는 다음의 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(s) = G_s(s) \cdot H(s) \cdot \frac{1}{V_{ref}} \quad (7)$$

여기서 보상기의 전달이득 $H(s)$ 에 대하여 본연구에서는 회로의 안정성을 고려하여 다음의 식(8)의 형태를 적용하였다.

$$H(s) = \frac{(R_3R_4C_3s + R_3)}{R_5(R_4C_3s + R_3C_3s + 1)} \quad (8)$$

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 표 1에 제시한다.

또한 회로의 안정성을 확보하기 위한 보상기의 설계는 식(8)을 기준으로 다음과 같이 설계하였다.

($R_5 = 10.68[k\Omega], R_4 = 100[\Omega], R_3 = 22[k\Omega], C_4 = 2.2[\mu F]$)

표 1. 실험용 컨버터 회로의 파라미터
Table 1. Parameters of experimental converter

$V_i[V]$	AC 110	$R[\Omega]$	100
$V_0[V]$	70	$r_1[\Omega]$	2.6
$P[W]$	24	$r_2[\Omega]$	2.6
$L[\mu H]$	281	n	0.93
$C[\mu F]$	180	$f_s[kHz]$	100

다음의 그림 2 와 3 은 각각 본 연구에서 설계 및 제작한 전류 제어 방식의 플라이백 컨버터의 MOSFET 의 드레인 과 소스간의 스위칭 전압파형과 이때의 1차측 인덕터 전류의 시뮬레이션과 실험 파형을 나타낸 그림이다.

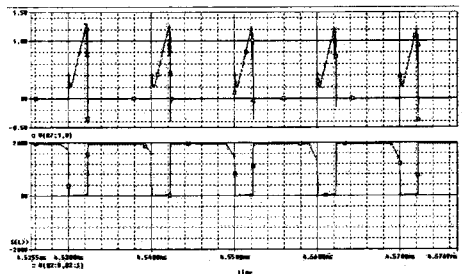


그림 2. 스위치 소자의 전압 및 전류 파형
Fig 2. Analysis waveform of switching device and current sensor

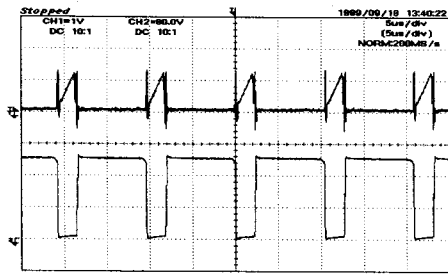


그림 3. 스위치 전압 및 전류 실험 파형
Fig 3. Experimental waveform of switching device and current sensor

다음의 그림 4 는 주파수 영역 해석을 위한 신호주입회로를 나타낸 그림이다. 그림에서 주파수 응답 분석장비의 주입 신호원이 컨버터의 동작에 전기적 영향을 가하지 않도록 절연 트랜스포머를 사용하였다.

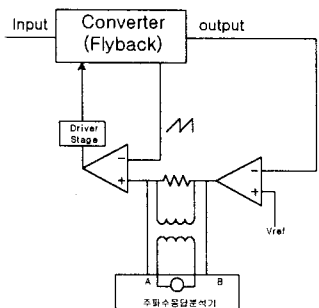


그림 4. 주파수 영역 해석을 위한 신호주입회로
Fig 4. Signal injection circuit for frequency response analysis

그림 5 는 제작한 컨버터에 그림 4에 제시한 신호 주입방안을 적용한 주파수 응답특성을 나타낸 것이다. 그림의 결과로부터, 루프의 대역폭은 스위칭 주파수 f_s 의 약 1/5 에 해당하는 약 20[KHz] 로서 신속한 응답특성을 예견할 수 있다. 또한 저주파수에서의 이득이 충분히 높아 양호한 정전압 출력 특성을 나타내며, 이득교차주파수 f_c 에 이를 때 까지의 이득저감은 -20 [dB/dec] 로서 안정된 응답특성을 나타내고 있다.

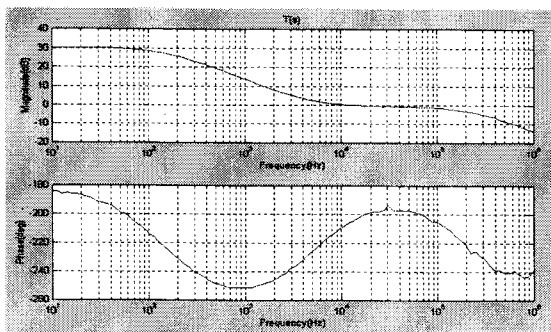


그림 5. 주파수 응답 특성곡선
Fig 5. Experimental result of frequency response analysis

다음의 그림 6은 컨버터의 스텝응답을 나타낸 것으로, 정상상태까지 약 3(ms)가 소요되며 양호한 응답특성을 보이고 있다.

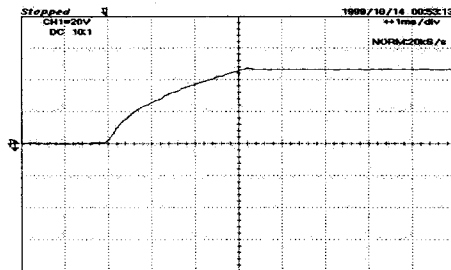


그림 6. 스위치ON 시의 실험에 의한 스텝 응답
Fig 6. Experimental waveform of step response

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 전류모드 제어 회로 주변에 절연 트랜스포머를 사용하여 직렬로 정현파 신호를 주입하는 방법을 사용하였다. 주파수 분석장비를 이용한 실험 결과, 충분한 위상여유 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] 김희준, "스위치 모드 파워 서플라이", 성안당, 1996
- [3] 김철진, "평균전류모드 제어기법을 이용한 플라이백 컨버터의 모델링 및 안정도에 관한 연구" 『대한 전기학회 하계학술대회 논문집』, 1999.7, pp 2682-2687
- [4] S.S. Keller and F.C. Lee, "The effects of an adaptive feedforward Compensation Scheme on Converter Dynamic Characteristics," Proceeding of Powercon 10, 1983
- [5] G. Chrysis, "High Frequency Switching Power Supplies", 1984
- [6] Robert W. Erickson, "DC-DC Power Converters", University of Colorado, 1998.
- [7] B. Holland, "Modelling Analysis and Compensation of the Current-Mode Converter," Proceedings of the Powercon 11 I-2, pp. 1-6, 1984.
- [8] 윤명중, 직류전원장치, 한국과학기술원 최종보고서, 1998.
- [9] Marty Brown, "Practical Switching Power Supply Design", ACADEMIC PRESS, INC, 1990.