

자기증폭기를 이용한 플라이백 컨버터의 제어루프 특성분석

김철진*,홍대식*,윤신용**,김영태***
 한라대학교*,동국대학교**,원주대학***

Analysis on the Control-Loop Characteristics of Flyback Converter with Magnetic Amplifier

Cherl-Jin Kim*, Dae-Shik Hong*,Sin-Yong Yoon**,Young-Tae Kim***
 Halla University.*, Dongguk University**, Won-ju College***

Abstract- The continuing need for more compact and reliable switching power supplies have aroused a renewed interest in a well founded control technique the Magnetic Amplifier(Magamp). Magamp have some advantages of higher power density, simple control circuit, good regulation, high frequency and high performance. The control method with magamp become attractive solutions for high current post regulated output applications. In this study, it is proposed that the magamp technique in flyback converters with multiple output windings. Operation principle of the proposed approach is described and a description of magamp control loop behavior is given first from a circuit level point of view. Then the focus is shifted to look at the same issue from the block diagram point of view. Experimental verifications on 50W multiple output flyback converter are conducted. Simulations and experimental results show that the proposed approach is high efficiency and voltage regulation of the auxiliary output is excellent.

1. 서론

최근, 스위칭 전원 공급 장치의 소형 경량화 및 출력 안정화를 위한 지속적인 연구가 진행되고 있다. 이것은 전력용 반도체 소자의 발전과 제어 방식의 진보에 따라 스위칭 주파수를 고주파화 시킴으로써 충족 할 수 있지만, 이에 따른 스위칭 손실이 비례적으로 증가하는 문제점을 가지게 된다. 이에 따라 고주파대역에서 특성이 우수한 저손실, 고투자율의 재료가 개발되고, 일반화됨으로써 자기증폭기를 이용한 2차단 안정화 기술이 주목을 받기 시작하였다. 이 기술은 소형, 고효율을 필요로 하는 전원 공급 장치에서 2차단의 출력을 안정화 시키는 응용분야에서 적합하게 사용되고 있다. 또한, 100W 이하 저전력 응용분야에서 포워드형 컨버터의 방식보다 적은 수의 부품과 회로 구성이 간단한 플라이백 컨버터의 이용이 늘고 추세이다. 또한 자기증폭기를 이용한 플라이백 컨버터는 입력전압 및 부하 변동에 따른 부하단 안정화를 이룰 수 있다.

본 연구에서는 PWM제어로는 주출력단을 안정화시키고, 보조 출력단은 가변정밀 병렬안정기인 TL431을 이용하여 부하 변동에 따른 자기증폭기의 동작 특성과 출력단의 안정화를 확인하였으며, 시스템의 안정도를 검토하기 위해 자기증폭기의 개루프 전달특성을 분석하였다. 또한 부하변동에 따른 자기증폭기의 시비율의 변화를 실험을 통해 제시하였고, 50W 다출력 플라이백 컨버터의 실험 결과로 타당성을 제시하였다.

2. 회로 해석

2.1 기본 동작원리

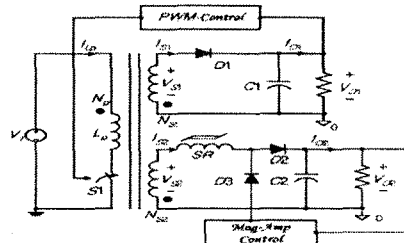


그림 1. 자기증폭기를 이용한 플라이백 컨버터의 회로

자기증폭기를 이용한 플라이백 컨버터의 출력동작은 주 스위치 S1의 On모드, Off모드로 구분된다. 스위치가 On 모드에서 자기증폭기는 차단상태이며, 트랜스포머는 에너지를 축적한다. 반면 스위치가 Off 모드에서 에너지는 자기증폭기가 포화될 때까지만 주출력으로 전달되고, 그 이후부터는 보조출력에 동시에 전달된다. 이때 주출력은 PWM 제어에 의해 안정화되고, 보조출력은 TL431의 출력에 따른 자기증폭기의 제어에 안정화된다.

2.2 모드별 동작

다음의 그림2는 회로의 모드별 동작을 나타낸다.

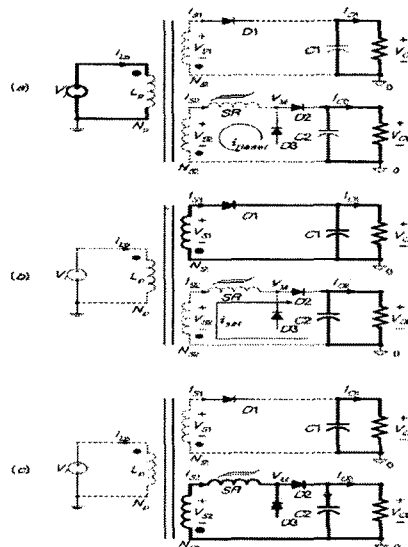


그림 2. 자기증폭기를 이용한 플라이백 컨버터의 동작 모드

Mode 1

스위치는 On 되고, 입력전압 V_1 은 트랜스포머의 자화 인덕턴스 L_p 를 축적하고, C_1 에 충전된 에너지가 V_{o1} 으로 전달되게 된다. 이 때 트랜스포머는 인덕터와 트랜스포머로써 작용한다. 또한 자기증폭기는 역2차 권선전압 V_2 와 자기증폭기의 제어전압 V_m 의 전압차에 의해서 Reset된다.

Mode 2

스위치는 Off되고, 트랜스포머의 자화인덕턴스는 V_{s1} 이 축적될 때까지 주출력 V_{o1} 으로만 에너지를 방출한다. D_1 은 도통되고, 자기증폭기는 차단 상태이고, 2차권선 전압 V_2 와 보조출력 전압 V_m 사이의 전압차에 의해 Set된다. 이상적인 경우 트랜스포머에 저장된 에너지는 주출력만으로 전달된다.

Mode 3

스위치는 Off되고, V_{s1} 이 축적된 이후부터 자기증폭기는 포화되고, D_2 는 도통되어 보조출력 V_{o2} 로 전달된다. 보조출력 V_{o2} 에 의한 역기전력으로 인해 V_{s1} 의 전압이 V_{o1} 보다 더 작게 된다. 따라서 D_1 에는 역 바이어스가 인가되어 D_1 은 차단되고, C_1 에 충전된 에너지가 V_{o1} 로 전달된다.

2.3 제어루프 동작 및 특성분석

보조출력의 안정화를 위한 제어기는 TL431, 자기증폭기, 그리고 능동트랜지스터로 구성된다.

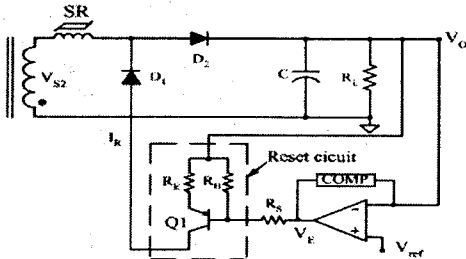


그림 3. 자기증폭기 제어회로

출력전압이 상승시 검출된 전압이 TL431의 ref 단자로 인가되고, 기준전압(V_{ref})과 비교하여 증폭된 부(-)의 오차전압(V_E)로 인해 R_B 양단 전압차가 증가하여 트랜지스터의 컬렉터 전류가 상승한다.

결국, 리셋전류가 증가하여 자기증폭기의 전압차단시간이 증가함으로써 자기증폭기의 시비율이 감소하여 출력전압의 상승을 억제한다. 출력 전압이 하강시 이와 반대의 작용으로 정전압이 유지된다.

그림3 회로의 제어 블록선도는 다음과 같이 나타낸다.

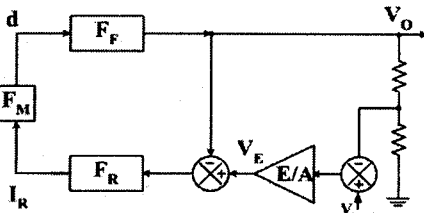


그림 4. 제어 루프의 블록도

시스템의 제어루프 전달특성을 분석하기 위해서 소신호 제어모델의 전달함수를 다음의 식으로 나타낸다.

$$F_R = \frac{\hat{f}_R}{\hat{V}_E} = \frac{R_B}{(R_B + R_S)R_E} \quad (1)$$

$$F_M = \frac{\hat{d}}{\hat{f}_R} = \frac{0.4\pi \cdot \mu_M \cdot N^2 \cdot A_e \cdot F_S}{l_c \cdot V_s \cdot 10^8} \quad (2)$$

$$F_F = \frac{\hat{v}_o}{\hat{d}} = \frac{V_o}{DD'} \cdot \frac{\left(1 - \frac{DL_c s}{R}\right)(1 + sCr_c)}{1 + \left(\frac{L_c}{R} + Cr_c\right)s + \frac{L_c(R + r_c)}{R}s^2} \quad (3)$$

(μ_M : 평균 투자율, l_c : 자로 길이(cm), F_S : 스위칭 주파수, A_e : 코어의 유효단면적(cm^2), N : 권수, V_s : 2차권선 양단전압)

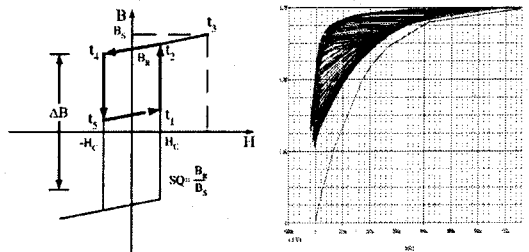
플라이백 컨버터의 제어전달함수는 DC-DC컨버터의 평균화 모델을 사용하여 식(3)과 같이 나타낸다. 또한 그림 4에서 자력리셋 방식의 자기증폭기 제어회로[4]는 개루프 전달함수에 내부 피드백 요소가 포함하며, 식 (1),(2),(3)로부터 외부보상 요소를 제외한 개루프 전달함수인 식(4)으로 표현된다.

$$G_O(s) = \frac{V_o}{V_E} = \frac{F_R F_M F_F(s)}{1 + F_R F_M F_F(s)} \quad (4)$$

식(4)의 개루프 전달함수를 통해 시스템에 적합한 보상 요소를 설계할 수 있다[5].

3. 시뮬레이션

그림 5(a)는 자기증폭기에 적용되는 자성체의 이상적인 B-H곡선을 나타낸다. 자성체는 반도체 스위치와 같이 PWM 자기스위치로 스위칭 동작을 함으로써 출력단의 평균전압을 제어하기 때문에 보자력(H_c)이 적고 포화자속밀도(B_s)가 크고, 고각형비의 특성이 요구된다. 자기증폭기의 동작은 t_1-t_2 구간에서 고 임피던스로써 OFF 상태로 동작하며, t_3-t_4 구간에서 저 임피던스로써 ON 상태로 동작한다.



(a) 이론 곡선 (b) 시뮬레이션 곡선

그림 5. 자기증폭기의 B-H곡선

그림 5(b)는 시뮬레이션에 의한 자기증폭기의 B-H곡선으로 이론적인 B-H곡선(a)과 유사함을 확인하였다.

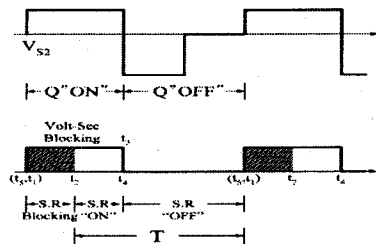


그림 6. 자기증폭기의 시비율

그림 6은 리셋전류의 변화에 따른 자기증폭기의 시비율 ($d = (t_4 - t_2)/T$)이 변화하는 동작파형을 나타낸다. 자기증폭기의 전압차단구간($\Delta t = t_2 - t_1$)을 ΔB 로 제어하여 부하변동시 정전압을 유지한다.

식(4)의 개루프 전달함수를 통해 시스템의 Bode Plot을 시뮬레이션으로 나타내고, 그에 따른 이득 및 위상 여유를 확인하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

자기증폭기 전원회로 파라미터	
f_s : 125 [KHz]	L : 6.87[mH]
C : 1000[μ F]	R_B : 1 [K Ω]
R_B : 470 [Ω]	R_S : 1 [K Ω]
R_L : 80 [Ω]	D : 25 [%]
가포화 리액터의 파라미터	
재질:Metglas 2714A	A_c : 0.041[cm ²]
K_c : 1.05	l_e : 3.50 [cm]

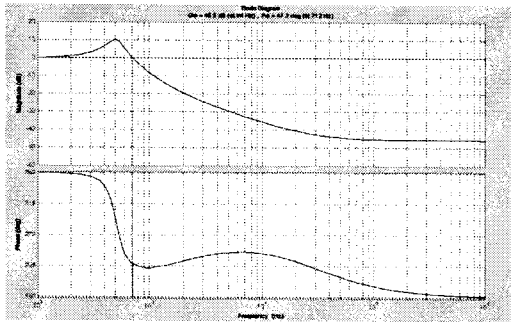


그림 7. 개루프 전달함수의 Bode Plot

4. 실험 결과 및 고찰

실험을 위하여, 그림 1에 제시한 자기 증폭기를 이용한 플라이백 컨버터 회로를 설계·제작하였으며 설계사양은 다음의 표2와 같다.

표 2. 설계 파라미터

입력전압(V_i)	90~220 [Vac]
입력주파수(f)	60 [Hz]
스위칭 주파수(f_s)	125 [kHz]
주 출력(V_o)	5 [V]/0~5 [A]
보조 출력(V_{o2})	12 [V]/0~2 [A]
부하(load)	0.3~2 [A]

그림 8.(a),(b)는 주출력 I_{o1} 과 보조출력 I_{o2} 의 전류파형이다. 측정결과 실험파형과 이론파형이 유사함을 확인하였다.

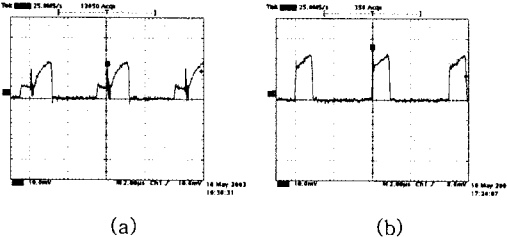


그림 8. (a) 주출력전류 I_{o1} (1A/div)
(b) 보조출력전류 I_{o2} (1A/div)

그림 9.(a)는 보조출력단 부하가 0.3[A]인 경우 V_{o2} 의

출력전압이고, (b)는 2[A]인 경우 V_{o2} 의 출력전압을 나타낸다. 그림9.(c),(d)는 자기증폭기의 양단전압을 측정함으로써 보조출력단의 부하가 0.3[A] → 2[A]로 변동함에 따른 자기증폭기의 시비율이 0.4 μ s(c)에서 0.7 μ s(d)로 변화되어 리액터 양단의 전압강하($V_{L2} - V_m$)가 변화되고 출력전압(V_{o2})는 설정값에 추종하게 되어 보조출력단의 안정화를 확인할 수 있다.

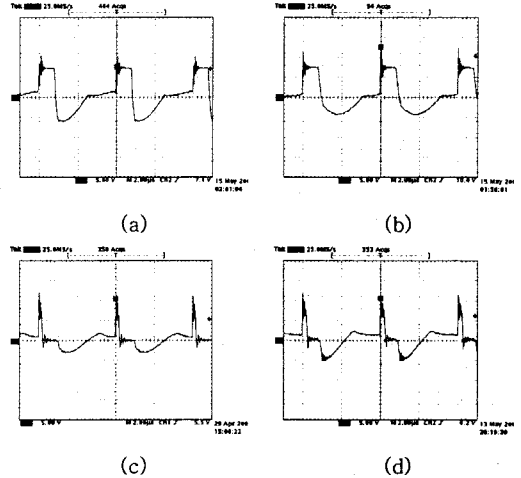


그림 9. (a) 0.3[A]시 보조출력전압 V_{o2} (5V/div)
(b) 2.0[A]시 보조출력전압 V_{o2} (5V/div)
(c) 12[V],0.3[A]시 자기증폭기의 양단전압(5V/div)
(d) 12[V],2.0[A]시 자기증폭기의 양단전압(5V/div)

5. 결 론

본 연구에서는 자기증폭기를 사용한 플라이백 컨버터를 설계하고, TL431을 이용하여 자기증폭기의 시비율을 제어함으로써 효율을 높이고, 자기증폭기를 적용하여 부하수를 줄임으로써 경제성 및 소형·경량화 요구에 부합하였다. 또한, 연속 모드에서 개루프 제어특성을 검토하여 시뮬레이션을 통해 분석하였으며, 이에 따라 자기증폭기를 사용한 플라이백 컨버터의 개루프 전달특성은 자기증폭기, 리셋 회로, 전원회로의 파라미터에 의존성을 갖기 때문에 보상회로의 설계시 각 변수의 변화에 대응한 보상설계가 요구됨을 확인하였다. 실험의 타당성을 확인하기 위하여 Pspice, Matlab을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 설계된 자기증폭기를 이용한 플라이백 컨버터 회로의 실험파형을 통하여 부하단의 안정화가 이루어지는 것을 확인하였다.

[참고 문헌]

- [1] Chau-Chun Wen, Chem-Lin Chen, Wei Chen and Jian Jiang, "Magamp post Regulator in Fly-Back Converter", Power Electronics Specialties Conference, PP. 333-338, 2001
- [2] Milan M. Jovanovic, Laszlo Huber, "Small-Signal Modeling of Magamp PWM Switch", Applied Power Electronics Conference, PP 922-928,1997.
- [3] C. H. Yang, D. Y. Chen, C. Jamerson, and Y. P. Wu, "Stabilizing magamp control loop by using an inner-loop compensation.", IEEE Trans. Power Electron., vol.6, pp. 419-429, July 1991.
- [4] I. J. Lee, D. Y. Chen, Y. P. Wu, and C. Jamerson, "Modeling of control loop behavior of magamp post regulator." IEEE Trans. Power Electron.,vol.5,pp 476-483, Oct. 1990.
- [5] 김희준, "스위치모드 파워 서플라이", 성안당 pp 101-111