

Forward-Flyback Converter를 이용한 입력 전압 가변형 시스템의 분석 및 설계 가이드 라인 제시

이승운, 조보형
서울대학교 전기컴퓨터공학부

An Analysis and Design Guideline of Forward-Flyback Converter for Input Voltage Varying System

S. W. Lee, B. H. Cho
School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University

ABSTRACT

본 논문은 전압 구동 형태와 전류 구동 형태의 특성을 모두 지니는 Forward-Flyback 컨버터의 특성을 이용하여 입력 전압 가변형 시스템에서의 적용에 대해 논의한다. Forward-Flyback 컨버터는 변압기의 턴비에 따라 입력 전압을 넘겨 Buck 컨버터처럼 동작하는 Forward 단과 변압기의 자화 인덕턴스에 흐르는 전류를 출력 단으로 넘겨 사용하는 Flyback 단이 존재하며 이 중 Forward 단의 동작 조건을 이용하여 출력 전압이 변할 경우 컨버터가 Forward-Flyback 컨버터와 Flyback 컨버터의 두 가지 형태 중 하나를 선택하여 동작하도록 분석 및 설계한다.

1. 서론

최근 배터리를 사용하는 시스템의 수요가 점점 늘어나면서 가변 입력 형태의 컨버터의 사용 역시 늘어나고 있다. 이러한 시스템은 대용량 뿐만이 아니라 소용량 형태의 시스템에도 적용되고 있으며 이는 기존 소용량 컨버터로 가장 많이 사용되었던 Flyback 컨버터는 출력 전압에 따라 정상 상태의 Duty가 지속적으로 변하면서 가변 범위가 클 경우 안정적인 효율을 보장해 주지 못한다는 단점을 보인다. 이를 해결하기 위한 방법으로 Series two stage 방식이 가장 많이 사용되고 있는데^[1], 이는 첫 번째 stage를 효율이 좋은 비 절연형 컨버터를 사용하여 링전압을 일정 전압으로 고정하고 두 번째 stage를 Forward나 Flyback등의 회로를 이용하여 효율이 가장 좋은 Duty에서 동작 시킴으로서 효율의 향상을 이루고 있다. 하지만 이 방법 역시 두 컨버터가 Series로 연결되어 생기는 효율 하락 문제 및 소자 수가 증가함으로써 생기는 가격 상의 문제로 좋은 대안이 되지는 못하고 있다. 본 논문은 이러한 문제의 해결책으로 Forward-Flyback 사용 및 설계 방법을 제안하고, 시뮬레이션을 통해 동작을 확인한다.

2. 분석 및 설계 가이드 라인 제시

2.1 회로 구성

본 논문에서 사용하는 회로는 그림 1과 같다. 이는 기본적으로 출력 리셋형 Forward 컨버터 또는 Forward-Flyback 컨버터라고 불리는 형태이며 이 컨버터는 Turn-on시에 입력 전압을 변압기의 턴 비를 통해 $V_g(N_2/N_1)$ 의 값으로 변화시켜 L_f

의 양단에 인가시켜 Buck 컨버터와 같은 동작을 하게 하는 Forward 출력 단과 Turn-on시에 L_m 에 축적된 에너지를 Turn-off시 출력 단으로 넘겨 주는 Flyback 출력 단의 두 가지 에너지 전달 경로를 가지고 있다.

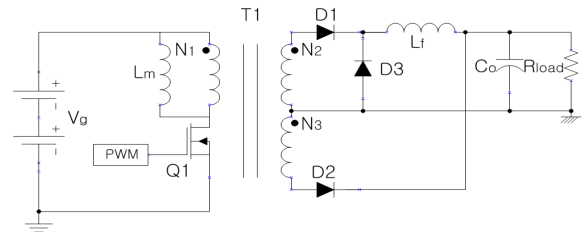


그림 1 Forward-flyback 회로
Fig. 1 Forward-flyback circuit model

본 논문은 이러한 두 가지 전달 경로를 이용하여 저 전압에서는 Flyback 출력 단만을 사용하고, 고 전압에서는 Flyback 출력 단과 Forward 출력 단을 모두 사용 하도록 설계를 진행한다. 즉 저 전압 입력 상태에서는 Forward 출력 단의 변압기에 걸리는 전압 $V_g(N_2/N_1)$ 가 출력 전압 V_o 보다 작게 만들어서 Forward 단의 동작을 막음으로서 저 전압과 고 전압 입력에서의 동작 상태를 의도적으로 분리하여 설계하도록 한다.

1.2 Forward 변압기 설계

본 논문에서 원하는 동작은 저 전압 입력일 때는 Forward 출력 단이 동작 하지 않고, 고 전압 입력일 때만 동작하도록 만드는 것이므로 가장 우선적으로 Forward 변압기의 턴 비 $N_1:N_2$ 를 설계해야 하며, 그 조건은 식 (1)과 같다.

$$V_{g,low} \times \frac{N_2}{N_1} < V_o < V_{g,high} \times \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

일반적으로 회로의 Duty 변화가 클 수록 효율이 많이 변하기 때문에 Duty 변화를 가장 줄이기 위해서는 변압기의 턴 비를 식 (2)의 조건에 따라 정하는 것이 가장 좋다.

$$\frac{V_{g,low} + V_{g,high}}{2} \times \frac{N_2}{N_1} = V_o \quad (2)$$

1.3 저 전압 입력 설계

저 전압 입력 상에서의 설계는 Flyback 컨버터의 최적 설계

와 동일하게 진행 된다. 이 때 주의 해야 할 점이 Forward-Flyback 컨버터에서 Forward 출력 단과 Flyback 출력 단이 모두 CCM이 될 수 있는 경우는 없다는 점이다. 두 출력단이 모두 CCM이 되기 위해서는 식 (3)을 만족해야 하며, 이는 현실적으로 불가능 하다. 이와 같은 이유로 본 논문에서는 DCM인 경우에 대해 설계를 진행하도록 한다.

$$\frac{N_2}{N_3} = \frac{1}{1-D} \quad (3)$$

DCM에서 Flyback 컨버터의 전압 이득은 식 (4)와 같으며, 우선 이 조건을 통해 적정한 Duty를 설정하고 이에 맞게 각 소자들을 선정하도록 한다.

$$\frac{V_o}{V_g} = D \sqrt{\frac{R_L}{2f_s L_m}} \quad (4)$$

또한 L_m 이 DCM조건으로 동작하기 위해서는 식 (5)의 조건 역시 만족해야 함을 고려한다.

$$L_m \leq \frac{1}{2} \left(\frac{N_1}{N_3} \right)^2 (1-D)^2 \frac{R_L}{f_s} \quad (5)$$

1.4 고 전압 입력 설계

Forward-Flyback Converter의 전압 이득 식을 Forward 출력단과 Flyback 출력 단에 흐르는 전류에 대한 식으로 나타내면 (6)과 같다.

$$\frac{V_o}{V_g} = \frac{D}{1+h} \left(\frac{N_2}{N_1} + \frac{1}{1-D} \frac{N_3}{N_1} h \right) \quad (6)$$

where, $h = \frac{\langle I_{fly} \rangle}{\langle I_{for} \rangle}$

또한 위의 $\langle I_{fly} \rangle$ 와 $\langle I_{for} \rangle$ 는 각 출력 단 전류의 평균 값으로 DCM조건에서 h를 정리하면 식 (7)로 구할 수 있다.

$$h = \frac{N_1^2 V_g^2 L_f}{N_2^2 L_m V_g^2 - N_1 N_2 L_m V_g V_o} \quad (7)$$

3. 시뮬레이션 결과

표 1 제안된 시뮬레이션 spec

Table 1 The design specification of the simulation

항목	값
입력 전압	150 ~ 400V
출력 전압	12V
최대 출력 전력	20W
스위칭 주파수	100kHz
턴비(N1:N2:N3)	40 : 2 : 5
자화 인덕턴스(Lm)	900uH
출력 인덕턴스(Lf)	2uH
출력 캐패시터	660uF

표 1과 같이 시뮬레이션 Spec을 결정하여 입력 전압이 변할 때 주요 전압 전류 파형을 관찰한다. 그림 2는 출력 전압, Forward 출력단의 다이오드 전류, Flyback 출력 단의 다이오드 전류 파형을 저 전압 입력과 고 전압 입력에 따라 나타낸 것이며, (a)는 150V 입력, (b)는 400V 입력에서의 시뮬레이션 결과를 각각 나타낸다.

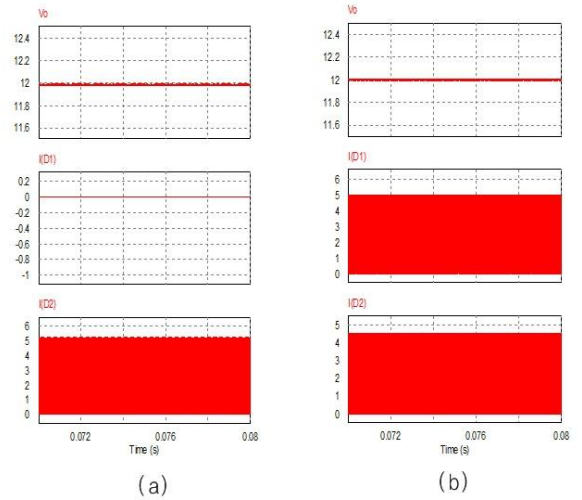


그림 2 . 150V 입력(a)와 400V 입력(b)에서의 시뮬레이션 동작 파형. 위에서부터 출력 전압, D1의 전류, D2의 전류
Fig 2 . Simulation waveform of the 150V input(a) and 400V input(b)

4. 결론

본 논문에서는 입력 전압 가변형 시스템에서 Forward-Flyback을 이용해 저 전압 입력과 고 전압 입력에 따라 Forward-Flyback과 Flyback의 두 가지 방식으로 동작하도록 설계하는 방법을 제안하였다. 제안한 방식은 입력 전압이 크게 변하는 상황에서도 Duty의 변화를 줄여 전 입력 범위에서의 효율 변동을 줄여 줄 수 있다는 장점을 가지고 있으며, 기존의 Forward 컨버터와 동일한 구조를 갖고 있어 추가적인 소자 필요가 없다. 본 논문에서는 회로의 정상 상태 분석을 통해 설계를 하기 위한 가이드 라인을 제시하였으며, 또한 제안한 방식의 설계법을 시뮬레이션을 통해 확인해 봄으로서 본 방식의 타당성을 검증하였다.

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 20104010100490)

참고 문헌

[1] Krismer, F. Biela, J. Kolar, J. W., "A Comparative evaluation of isolated bi-directional DC/DC converters with wide input and output voltage range", Proceeding of the Industry Applications Conference, pp. 599-606, vol. 1, 2005, Oct.