

고승압비 응용을 위한 전류연속 모드 탭인덕터 부스트 컨버터의 무손실 스너버

강정일*, 한상규**, 한종희*
삼성전자*, 국민대학교**

Non-dissipative Snubber for Tapped-inductor Boost Converter in Continuous Conduction Mode for High Step-up Application

Jeong il Kang*, Sang Kyoo Han**, Jonghee Han*
Samsung Electronics*, Kookmin University**

ABSTRACT

본 논문에서는 전류연속 모드로 동작하는 탭인덕터 부스트 컨버터를 위한 무손실 스너버를 제안하고 그 동작을 분석하며, 실험을 통해 그 유효성을 검증한다.

1. 서론

탭인덕터 부스트 회로는 기존의 부스트 회로대비 MOSFET 내압의 추가적 상승 없이 보다 높은 승압이 가능한 장점이 있으나, 탭인덕터의 누설 인덕턴스에 의한 턴 오프 ringing 때문에 전압 클램핑이 되도록 회로를 변경하거나 적절한 스너버를 적용해야 한다.^[1~2] 본 논문에서는 고승압 응용에 적합한 전류연속 모드로 동작하는 탭인덕터 부스트 컨버터를 위한 무손실 스너버를 제안하고 그 동작을 분석하며, 12V 입력, 120V 30W급 출력의 LED 조명 사례를 통해 유효성을 검증한다.

2. 제안된 회로의 동작

제안된 스너버는 그림 1(a)에 보인 것과 같이 클램프 커패시터 C_c , 클램프 다이오드 D_c , 공진 커패시터 C_r , 공진 보조 다이오드 D_1 과 D_2 로 구성이 된다. N_1 와 N_2 는 탭인덕터의 1차 및 2차 턴 수, L_m 과 L_k 는 1차측에서 본 탭인덕터의 자화 인덕턴스 및 누설 인덕턴스, C_{ds} 는 MOSFET M의 드레인 소스 커패시턴스를 나타내며, 전개의 편의 상 $k=1+N_2/N_1$ 이라고 한다. 제안된 회로의 주요 동작 파형은 그림 1(b)와 같다.

그림 1(b)에는 유한한 L_m 에 의한 전류의 변화가 표현되어 있지만, 이를 고려하면 회로의 분석이 매우 복잡해지기 때문에 스너버 동작 중 L_m 에 흐르는 전류는 일정하게 유지된다고 가정한다. 또한, V_i , V_o , I_o 도 리플 없이 일정하게 유지되며, L_k , C_{ds} 를 제외한 비이상적 요소는 모두 무시하고, $C_c \gg C_r \gg C_{ds}$ 라고 가정한다. C_c 가 C_r 또는 L_k 와의 상호작용하여 발생하는 V_c 의 변동을 무시할 만큼 작다고 가정하면, V_c 는 아래와 같이 V_o 와 V_i 를 탭인덕터의 턴 비로 분배한 값으로 구해진다.

$$V_c = \frac{N_1 V_o + N_2 V_i}{N_1 + N_2} \quad (1)$$

스너버 없는 기존 회로와 동일한 모드를 제외하면, 제안된 스너버의 동작은 그림 2와 같이 총 5개의 모드로 나뉜다.

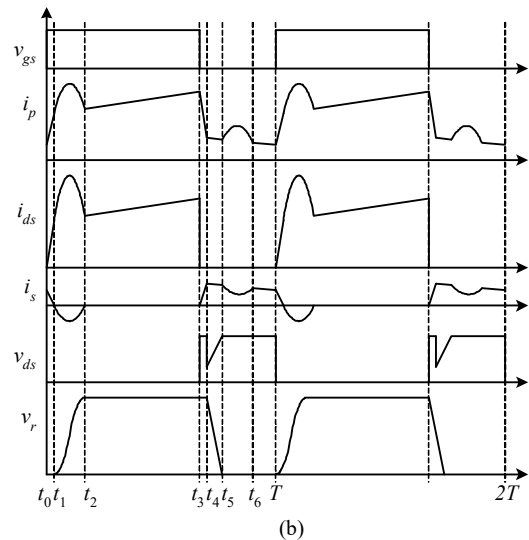
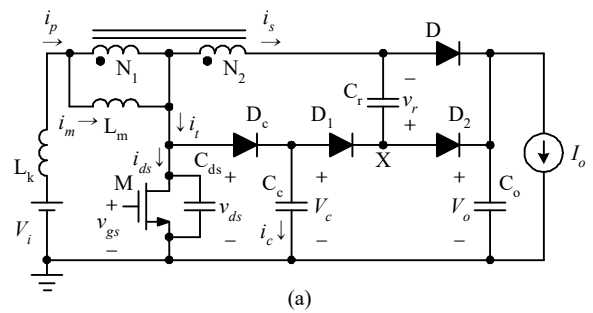


그림 1 (a) 제안된 회로와 (b) 주요 동작 파형
Fig. 1 (a) Proposed circuit and its (b) Key waveforms

온 모드 1($t_0 \sim t_1$): L_m 에 흐르는 전류 i_m 은 I_{M1} 과 같고, C_r 은 완전히 방전되어 있는 상태에서 M이 턴 온되면서 시작된다. D_1 , D_2 , D_c 는 모두 오프되고 등가회로는 그림 2(a)와 같이 된다. 주요 전류는 L_k 에 의한 유한한 기울기로 변화하며, 1차측 전류 i_p 가 모두 M으로 옮겨져 2차측 전류 i_s 가 0이 되면서 이 모드는 종료된다.

온 모드 2($t_1 \sim t_2$): $t=t_1$ 에서 0이 된 i_s 가 방향을 바꿈에 따라 D_1 이 턴 온되어 그림 2(b)의 회로가 형성되면서 시작된다. $C_c \gg C_r$ 이라 가정하였으므로 V_c 의 변동은 무시한다. L_k 와의 공진을 통해 C_c 이 충전되는 모드로, 주요 전류, 전압 및 C_r 의 충전을 위해 C_c 가 잃은 전하는 아래와 같이 표현된다.

$$i_s(t) = \frac{N_1}{N_2} (I_{M1} - i_p(t)) = -\sqrt{\frac{C_r}{L_k}} \left(V_i + \frac{N_1}{N_2} V_c \right) \sin \omega_1 (t - t_1) \quad (2)$$

$$v_r(t) = \left(\frac{N_2}{N_1} V_i + V_c \right) \{ 1 - \cos \omega_1 (t - t_1) \}, \omega_1 = \frac{N_1}{N_2} \frac{1}{\sqrt{L_k C_r}}$$

$$Q_c = \int_{t_1}^{t_2} -i_s(t) dt = 2C_r \left(\frac{N_2}{N_1} V_i + V_c \right)$$

공진 반주기 경과 후 $i_s(t_2)=0$ 이 되고 v_r 은 최대 전압으로 충전이 된다. 이 때, 만약 1차측에서 본 $v_r(t_2)$ V_o 전압이 V_i 보다 크게 되면 i_s 가 방향을 바꾸고 D_2 가 도통하면서 L_k 와 C_r 의 추가적인 공진 모드가 발생하는데, 되도록 짧고 간단한 스너버 동작이 바람직하므로 본 논문에서는 이와 같은 추가적인 공진이 발생하지 않는 아래 조건을 제안한다. 이후의 동작은 스너버 없는 기존의 탭인덕터 부스트 컨버터와 동일하다.

$$V_o > \frac{N_2}{N_1} \frac{N_2 + 3N_1}{N_2 - N_1} V_i \quad (3)$$

오프 모드 1($t_3 \sim t_4$): M이 턴 오프되면서 시작되는 모드이다. L_m 에 흐르는 정전류 I_{M2} 에 의해 C_{ds} 가 충전되면서 v_{ds} 는 V_c 에 클램프되고 X점은 V_o 에 클램프되는데, 이에 소요되는 시간은 매우 짧으므로 무시한다. 이후, 회로는 그림 2(c)와 같이 되며, $C_c \gg C_{ds}$ 라 가정하였으므로 권선 탭의 전류 모두 C_c 로 흐르며, 각 전류는 L_k 에 의한 유한한 기울기로 변화한다. 탭 전류 i_k 가 0이 되는 순간 $i_p=i_s$ 가 되면서 이 모드는 종료된다.

오프 모드 2($t_4 \sim t_5$): L_k 와 C_{ds} 의 공진에 의한 고주파 성분과 I_{M2} 에 의해 C_r 이 방전되는 저주파 성분의 중첩으로 이루어지는 모드로, 고주파 공진은 자유롭게 이루어지지 못하고 V_c 에 클램프되어 감쇄된다. 오프 모드 1에서의 V_i 의 변동을 무시하면 고주파 성분을 제외한 주요 전압은 아래와 같고, 등가회로는 그림 2(d)와 같으며, $t=t_5$ 에서 C_r 이 완전히 방전되면서 종료된다.

$$v_{ds}(t) = \frac{I_{M2}}{k^2 C_r} (t - t_4) + \frac{N_2 V_c - N_1 V_c - 2N_2 V_i}{N_1 + N_2} \quad (4)$$

$$v_r(t) = -\frac{I_{M2}}{k C_r} (t - t_4) + 2 \left(\frac{N_2}{N_1} V_i + V_c \right)$$

오프 모드 3($t_5 \sim t_6$): C_r 이 완전히 방전된 후 D가 온되고 D_2 가 오프되면서 시작되는 모드로, $C_c \gg C_{ds}$ 라 가정하였으므로 등가회로는 그림 2(e)와 같이 형성된다. 오프 모드 1에서 L_k 의 방전에 의해 C_c 에 공급된 전하를 무시하면, 이 모드에서 L_k 와 C_c 의 공진 반주기동안 C_c 에 공급된 전하는 식 (2)의 Q_c 와 같아야 하며, 이 때, i_c 는 아래와 같이 얻어진다. 공진 반주기 후 $i_c(t_6)=0$ 이 되면서 이 모드는 종료된다. 이후의 동작은 스너버 없는 기존의 탭인덕터 부스트 컨버터와 동일하다.

$$i_c(t) = \frac{k C_r}{\sqrt{L_k C_c}} \left(V_i + \frac{N_1}{N_2} V_c \right) \sin \omega_2 (t - t_5), \omega_2 = \frac{N_1}{N_2} \frac{k}{\sqrt{L_k C_c}} \quad (5)$$

정상상태 방정식: L_k 에 의해 전류의 스위칭에 소요되는 시간에 해당하는 온 모드 1과 오프 모드 1은 고려하지 않는다. 그러나, 수식의 정확도를 높이기 위해 I_{M1} 과 I_{M2} 를 소거하여 I_o 로 표현함에 있어서 L_m 의 영향은 고려한다. 제안된 회로의 정상상태 입출력 전압비는 아래와 같이 얻어진다.

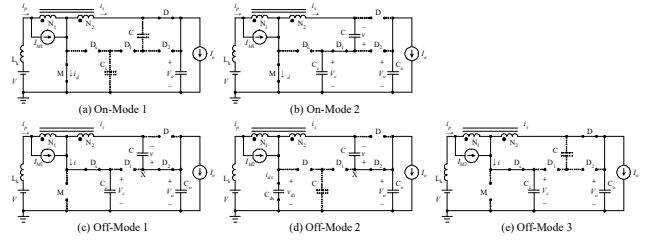


그림 2 제안된 회로의 동작 모드 별 등가회로

Fig. 2 Equivalent circuit of proposed circuit at each mode

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\left(1 + \frac{N_2}{N_1} D \right) + (1+k) \frac{N_2}{N_1} \alpha}{1-D-\alpha}, \alpha = 2C_r f V_i \frac{1}{\frac{1-D}{1-D} + \frac{N_2}{N_1}} \frac{1}{\frac{kI_o}{1-D} + \frac{DV_i}{2L_m f}} \quad (6)$$

3. 실험 결과

그림 3은 12V 입력, 120V/240mA 출력의 조명용 LED 사양에 대해 $N_2/N_1=3$, $L_m=80\mu H$, $C_c=330nF$, $C_r=4.7nF$ 와 같이 설계하여 제안된 회로의 주요 동작 파형을 실험으로 확인한 것으로, 본 논문에서 분석한 내용이 유효함을 확인할 수 있다. 측정된 L_k 는 $2\mu H$ 와 같고, $D=0.68$ 과 같다.

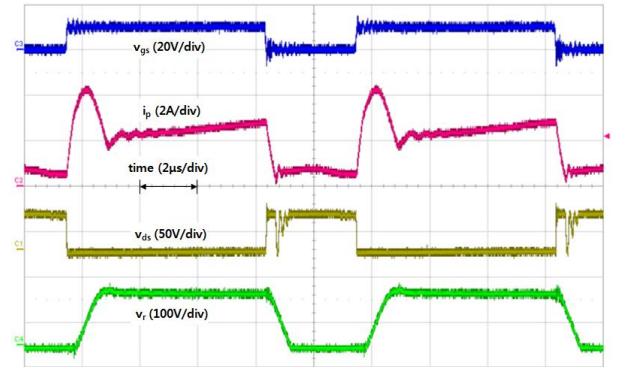


그림 3 30W 12V-120V LED 구동회로 시작품의 주요 실험 파형

Fig. 3 Key waveforms from 30W 12V-120V LED driver prototype

4. 결론

본 논문에서는 전류연속 모드로 동작하는 고승압비 탭인덕터 부스트 컨버터를 위해 별도의 보조 인덕터를 사용하지 않는 무손실 스너버를 제안하고 그 동작을 분석하였으며, 실험을 통해 그 동작을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 강정민, 이상현, 홍성수, 한상규, “고승압비를 갖는 전압 클램프 탭인덕터 부스트 컨버터”, 전력전자학회 논문지, 제 17권, 제 1호, pp. 34 40, 2012년, 2월.
- [2] N. Vazquez, L. Estrada, C. Hernandez, E. Rodriguez, “The Tapped Inductor Boost Converter”, IEEE ISIE, pp. 538 543, 2007, June.