

낮은 전압스트레스를 갖는 고효율 탭인덕터 부스트 컨버터

금문환, 강정일*, 한상규
 국민대학교 POESLA, 삼성전자*

Soft switching tap-inductor boost converter for high efficiency and high step-up

Moon Hwan Keum, Jeong il Kang*, Sang Kyoo Han
 Power Electronics System Laboratory, Kookmin Univ., *Samsung Electronics.

ABSTRACT

본 논문은 낮은 전압 스트레스와 고효율을 갖는 탭인덕터 부스트 컨버터를 제안한다. 기존의 탭인덕터 부스트 컨버터는 스위치의 기생 캐패시턴스와 누설 인덕턴스의 공진으로 인하여 반도체 소자에 높은 전압 스트레스가 발생하고 이를 저감하기 위한 손실스너버의 추가로 전력변환효율이 떨어진다. 하지만 제안회로는 손실스너버없이 스위치와 다이오드를 전압원으로 클램핑하여 낮은 전압스트레스를 가진다. 또한, 탭인덕터의 누설인덕턴스를 이용한 스위치의 영전류 스위칭 턴 온과 캐패시터를 이용한 영전압 스위칭 턴 오프로 스위칭 손실을 매우 저감시켜 높은 전력변환효율을 가진다. 제안회로의 타당성을 증명하기 위하여 이론적 해석과 실험결과 제시하였다.

1. 서론

일반적인 부스트 컨버터는 간단한 구조와 연속적인 입력전류, 스위치 전압의 클램핑의 장점으로 많은 분야에서 사용중이다. 그러나 기생성분으로 인하여 최대 3 4배로 승압이 제한되고 출력 다이오드에 심각한 역회복 특성으로 EMI 문제와 효율이 낮아진다.^[1] 최근에는 보다 높은 승압을 위하여 탭인덕터 부스트가 제안되었다. 부스트 컨버터보다 높은 승압은 가능하지만 탭인덕터의 누설 인덕턴스와 기생 캐패시터의 공진으로 인하여 반도체 소자에 심각한 ringing이 발생한다.^[2] 본 논문은 모든 반도체 소자들의 클램핑이 가능하며 스위칭 손실을 저감시켜 고효율로 동작하는 탭인덕터 부스트 컨버터를 제안한다.

2. 제안 탭인덕터 부스트 컨버터

제안 탭인덕터 부스트 컨버터는 그림 1에 보인 것과 같이 탭인덕터 부스트 컨버터에 승압비를 높이기 위한 캐패시터 C_c , 영전압 스위칭을 위한 캐패시터 C_s , 클램핑을 위한 다이오드 D_1 , D_2 로 구성된다. 탭인덕터의 1차측과 2차측은 턴수는 1:N, L_m 과 L_k 는 1차측에서 본 탭인덕터의 자화 인덕턴스 및 누설인덕턴스를 나타내며, 제안 회로의 주요동작 파형은 그림 2에 나타내었다.

명확한 회로 분석을 위하여 탭인덕터 자화인덕터의 전류 리플은 무시 될 만큼 매우 크며, 그림 1의 모든 소자는 이상적이라고 가정한다. 또한 출력 캐패시터 C_o 와 DC 블로킹 캐패시터 C_c 의 전압인 V_o 와 V_c 는 전압 리플이 무시 될 만큼 매우 크다고 가정한다.

제안 컨버터는 정상상태로 동작하며, 총 6개 모드로 나뉜다.

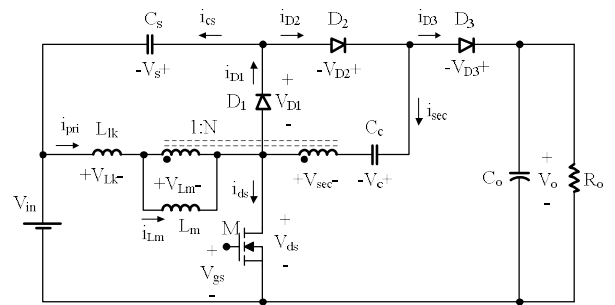


그림 1 제안 고효율 탭인덕터 부스트 컨버터

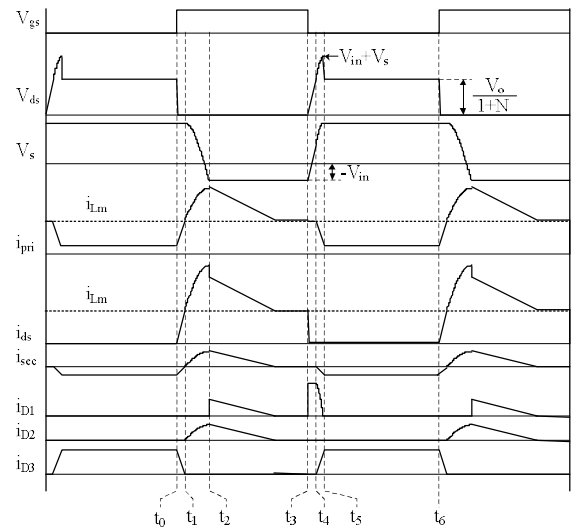


그림 2 제안 컨버터 주요파형

모드 1(t_0 t_1) : 탭인덕터의 자화인덕터에 저장된 에너지는 출력다이오드 D_3 를 통해 출력으로 에너지가 전달되는 상태에서 스위치 M이 턴 온 되면서 시작된다. 스위치 양단 전압이 $V_o/(1+N)$ 에서 0V로 급격한 기울기로 떨어지며, 이와 동시에 i_{sec} 는 서서히 0A로 감소하고 i_{pri} 는 서서히 증가한다. 따라서 스위치 전류(i_{pri} i_{sec})도 서서히 증가하므로 턴 온 시 전압과 전류의 겹치는 부분인 스위칭 손실이 거의 없다.

$$i_{ds}(t) = \frac{(N+1)V_o}{N^2L_k}(t-t_0) - \frac{i_{Lm}}{N} \quad (1)$$

모드 2(t_1 t_2) : 탭인덕터의 1차측 전류 i_{pri} 가 증가하여 자화인덕터 전류 i_{Lm} 과 같아지는 시점에 모드 2가 시작된다. 이때

다이오드 D_3 는 오프되고 다이오드 D_2 가 도통하여 그림 2의 파형과 같이 C_s 와 N^2L_k 가 공진하여 C_s 전압이 V_{in} 을 향해 감소한다. 이 시점에 다이오드 D_3 전압은 다이오드 D_2 의 도통에 의해 V_o , V_{in} , V_s 전압으로 클램핑된다.

모드 3(t_2 t_3) : V_s 전압이 V_{in} 에 도달하면 다이오드 D_1 이 도통하면서 모드 3이 시작된다. 탭인덕터에는 입력전압 V_{in} 이 인가되어 자화인덕터 L_m 에는 에너지가 저장되며 같은 시점에 캐패시터 C_c 는 탭인덕터의 턴비에 의해 NV_{in} 으로 충전된다. 캐패시터 C_c 의 충전이 완료되면 다이오드 D_1 과 D_2 가 오프되며 모드가 종료할 때까지 자화인덕터 L_m 은 에너지가 저장된다.

모드 4(t_3 t_4) : 스위치 M이 턴 오프되면 그림 2와 같이 스위치 전류는 i_{Lm} 에서 0A로 급격한 기울기로 떨어진다. 이와 동시에 탭인덕터의 누설인덕터 L_k 와 자화인덕터 L_m 에 저장된 에너지는 다이오드 D_1 을 통해 C_s 를 충전시키므로 C_s 전압은 V_{in} 에서부터 서서히 증가하기 시작하고 스위치 양단전압은 $V_{in}+V_{cs}$ 이므로 0V에서부터 서서히 증가하기 시작한다. 따라서 스위치 양단전압이 서서히 증가하므로 턴 오프 시 전압과 전류가 겹치는 부분인 스위칭 손실이 대폭 저감 될 수 있다.

모드 5(t_4 t_5) : 스위치 전압 V_{ds} 가 $V_o/(1+N)$ 에 도달하면 다이오드 D_3 가 도통하게 되고 C_s 와 L_k 는 서로 1/4 주기동안 공진하여 V_s 와 V_{ds} 는 증가하며 이후 다이오드 D_1 전류 i_{D1} 은 0이 되고 동시에 i_{sec} 전류가 $i_{Lm}/(N+1)$ 에 도달하게 되면 모드 5은 종료된다. 이 시점까지 스위치 전압 V_{ds} 는 $V_{in}+V_s$ 의 전압으로 클램핑된다.

모드 6(t_5 t_6) : i_{sec} 전류가 $i_{Lm}/(N+1)$ 에 도달하게 되면 탭인덕터에 저장된 에너지를 출력 측으로 전달한다. 이후 스위치 M이 다시 턴 온 될 때 모드 6이 종료된다.

전압관계식 : 전압관계식 유도를 간단히 하기 위하여 t_0 t_2 와 t_3 t_5 기간은 고려하지 않고 L_k 는 L_m 보다 매우작다고 가정한다. 탭인덕터 2차측의 전압 V_{sec} 는 스위치 M이 턴 온한 DT_s 시간 동안 V_c 전압이 인가되고, 턴 오프한 $(1-D)T_s$ 시간동안 $(V_o - V_c - V_{in})N/(N+1)$ 전압이 인가되므로 전압시간 평형조건을 적용하면 다음과 같다.

$$DT_s V_c = (1-D)T_s \frac{N}{1+N} (V_o - V_c - V_{in}) \quad (2)$$

위의 식을 정리하면 V_c 는 아래와 같이 얻어진다.

$$V_c = NV_{in} \quad (3)$$

또한, 탭인덕터 1차측 전압 V_{Lm} 은 스위치 턴 온한 DT_s 시간동안 V_{in} 전압이 인가되고, 턴 오프한 $(1-D)T_s$ 시간동안 $(V_o - V_{in} - V_c)/(1+N)$ 전압이 인가되므로 탭인덕터 1차측에 대한 전압시간 평형조건을 적용하면 다음과 같다.

$$DT_s V_{in} = (1-D)T_s \frac{(V_o - V_c - V_{in})}{1+N} \quad (4)$$

식 (4)와 (5)로부터 전압관계식은 아래와 같이 얻어진다.

$$V_o = \frac{N+1}{1-D} V_{in} \quad (5)$$

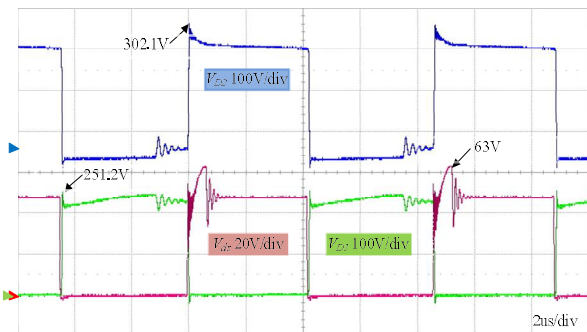
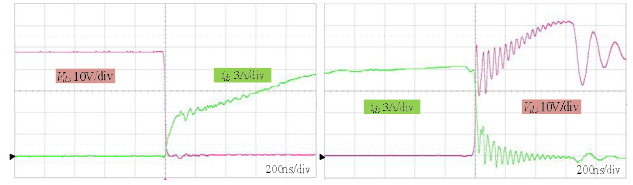


그림 3 제안 탭인덕터 부스트 컨버터 주요 실험 파형



(a) 스위치 턴-온 파형 (b) 스위치 턴-오프 파형
그림 4 제안 컨버터의 소프트 스위칭 파형

3. 실험결과

제안 탭인덕터 부스트 컨버터의 이론의 타당성을 검증하기 위하여 450W급 시제품을 제작하여 실험결과를 제시한다. 시제품의 주요 사양은 24V 입력, 280V/1.6A 출력, $f_{sw}=116kHz$, $N_1:N_{26}=7:29$, $C_c=2.2\mu F$, $C_s=200nF$, $L_m=9\mu H$, $L_k=0.9\mu$ 로 인터리브드 방식으로 구동하였다. 그림 3은 다이오드와 스위치의 클램핑 파형으로 스위치 M=134.2V, 다이오드 $D_2=301.1V$, 다이오드 $D_3=251.2V$ 로 전압이 클램핑되어 손실스터버 없이도 전압 클램핑이 가능함을 확인하였다. 또한 그림 4는 스위칭 동작시 스위치 전류와 전압의 파형으로 (a)는 스위치 턴 온시 파형으로 영전류 스위칭을 통해 전류와 전압이 겹치는 부분이 거의 없어 스위칭 손실이 매우 작다는 것을 확인할 수 있고, (b)는 스위치 턴 오프 파형으로 캐패시터 C_s 를 이용한 영전압 스위칭을 수행한다. 턴 오프 구간에서 V_{ds} 상승 기울기를 높히고 전류와 전압의 겹치는 부분을 줄여 스위칭 손실이 감소시킨다는 것을 확인할 수 있다.

이론을 바탕으로 제안회로의 효율이 높음을 검증하기 위하여 위의 사양으로 30분간 aging 후에 효율을 측정하였다. 제안 컨버터 450W에서의 효율은 96.7%의 매우 높은 효율이 측정되었고, 손실스너버없이 반도체 소자의 클램핑과 턴 온과 턴 오프 모두 스위칭 손실을 줄였기 때문에 고효율 달성하였다.

4. 결론

본 논문은 낮은 전압 스트레스와 고효율을 갖는 탭인덕터 부스트 컨버터를 제안하였다. 기존의 탭인덕터 부스트 컨버터는 스위칭 시에 반도체 소자에 과도한 전압 스트레스와 스위칭 손실이 발생하여 발열 및 효율이 저하된다. 반면 제안 컨버터는 손실스너버 없이 메인스위치와 다이오드를 전압원으로 클램프 할 수 있고, 캐패시터에 에너지를 저장하였다고 입력 에너지와 함께 출력으로 전달하기 때문에 기존보다 높은 인출력 전압비를 가질수 있다. 또한 영전압 스위칭 턴 오프와 영전류 스위칭 턴 온을 통하여 450W급 시제품 실험에서 효율을 96.7%의 높은 효율을 가질 수 있다. 따라서 본 논문은 고승압비가 요구되는 배터리 응용, 전기 자동차, fuel cell 시스템, 에너지 저장장치등 많은 응용분야에 매우 적합할 것으로 사료된다.

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학ICT 연구센터육성 지원사업의 연구 결과로 수행되었음
(NIPA 2014 H0301 14 1005)

[1] K. C. Tseng and T. J. Liang, "Novel high efficiency step up converter," Inst. Electr. Eng. Proc. Electr. Power Appl., vol. 151, no. 2, pp. 182-190, Mar. 2004.
[2] Narasimharaju, B. L., S. P. Dubey, and S. P. Singh, "A novel voltage clamped CI BDC converter and its control for battery storage applications," in PEDES & 2010 Power India, 2010 Joint International Conf., 2010, pp. 1-7.