

무손실 스너버를 갖는 부스트-플라이백 역률보상 컨버터 기반의 단일 스위치 AC-DC LED 드라이버

이신우, 도현락
서울과학기술대학교

A Single-Switch AC-DC LED Driver Based on a Boost-Flyback PFC Converter with Lossless Snubber

Sin Woo Lee, Do Hyun Lark
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문은 무손실 스너버를 갖는 부스트-플라이백 역률보상 컨버터 기반의 단일 스위치 AC-DC LED(Light Emitting Diode) 드라이버를 제안한다. 제안된 LED 드라이버는 높은 역률을 얻기 위한 부스트 역률 개선 회로와 전기적 절연을 위한 무손실 스너버를 갖는 DC-DC 플라이백 모듈로 구성된다. 무손실 스너버에 의해 스위치의 서지 전압 스트레스는 감소하며 누설 인덕터의 에너지가 DC 링크 커패시터에 저장되어 재사용된다. 또한 낮은 정격 전압의 DC 링크 커패시터를 사용할 수 있다. 제안된 컨버터는 이론적 해석과 100[W]급 하드웨어 시작품을 제작하여 검증하였다.

1. 서론

최근, 다양한 조명 응용분야에서 LED가 큰 주목을 받게 되면서 높은 효율과 낮은 고조파 왜곡을 가지는 능동형 역률개선 회로를 적용한 AC-DC LED 드라이버에 대한 요구가 급격히 증가하고 있다. 이러한 컨버터는 제어 기법에 따라 1단과 2단 타입으로 나뉘며, 2단 역률개선 컨버터는 역률개선 AC-DC 컨버터와 출력전압 제어 DC-DC 컨버터로 구성되며 고역률, 저전압 스트레스 등의 좋은 성능을 가지지만, 많은 부품수, 높은 가격, 1단 타입 대비 낮은 효율 등의 단점을 가진다. 따라서 저전력 분야에서 수많은 1단 역률개선 회로가 제안되어 왔다. [1]-[2]

기존의 부스트-플라이백 역률개선 컨버터는 단순한 구조와 낮은 비용의 장점을 가진다. 하지만 주 스위치의 큰 전압 스트레스와 하드 스위칭으로 인한 스위칭 손실이 크다. 또한 누설 인덕터에 흐르는 전류를 흡수하기 위하여 별도의 RCD스너버가 필요하다. 이는 전력변환 효율을 감소시킨다.

그림 1은 제안하는 AC-DC LED 드라이버이다. 높은 역률을 위하여 부스트 역률개선 셀은 불연속 모드로 동작한다. 전기적 절연을 위한 플라이백 DC-DC 모듈은 무손실 스너버에 의해 스위치의 서지 전압이 감소되었으며 누설 인덕터의 에너지는 스너버 다이오드에 의해 DC 링크 커패시터에 흡수되었다가 출력단으로 전달된다. 또한, 입력 전력의 일부는 출력으로 바로 전달되고 일부는 DC 버스 커패시터에 저장되어 낮은 정격 전압의 DC 버스 커패시터를 사용할 수 있다. 본 논문에서는 높은 역률과 효율 향상을 증명하기 위하여 제안된 회로의 동작원리를 설명하고, 시작품의 실험 결과를 분석한다.

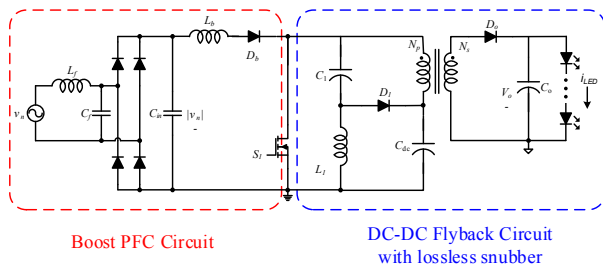


그림 1. 제안하는 LED 드라이버의 회로

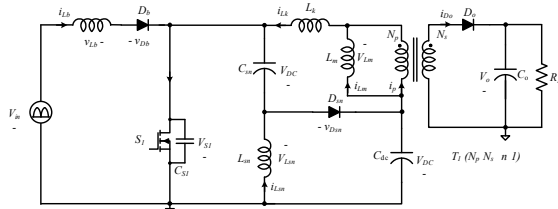


그림 2. 제안하는 LED 드라이버의 등가 회로

2. 이론적 해석

이론적 해석의 편의를 위하여 입력 필터와 브릿지 다이오드는 생략하고 입력전압은 정류된 전압 v_{in} 으로 표기한다. 부스트 역률개선 회로는 부스트 인덕터 L_b , 역저지 다이오드 D_b , 스위치 S_1 로 구성된다. DC-DC 플라이백 모듈은 다이오드 D_{sn} , 커패시터 C_1 , 인덕터 L_1 으로 구성되는 무손실 스너버 회로와 결합 인덕터 T_1 , DC링크 커패시터 C_{dc} , 출력 다이오드 D_o , 출력 커패시터 C_o 으로 구성된다. 결합인덕터 T_1 는 자화 인덕터 L_m , 누설 인덕터 L_k , 그리고 $n:1 (=N_p:N_s)$ 의 턴비를 가지는 이상적인 트랜스포머로 모델링 하였다. DC링크 커패시터와 출력 커패시터 전압은 V_{dc} 와 V_o 로 가정한다.

모드 1 [t_0, t_1] : 스위치가 켜지면 L_b 에 걸리는 전압은 V_{in} 이 되어 i_{Lb} 가 증가하며, L_1 과 L_m 에 걸리는 전압은 각각 $-V_{dc}$, $V_{dc}L_k/(L_m+L_k)$ 가 되어 i_{L1} 는 감소하고 i_{Lm} 는 증가한다.

모드 2 [t_1, t_2] : 스위치가 꺼지면 스위치의 C_{S1} 에 걸리는 전압은 $2V_{dc}$ 가 될 때까지 증가하며 C_{S1} 의 값이 매우 작기 때문에 이 구간의 시간 간격은 매우 짧아 생략이 가능하다.

모드 3 [t_2, t_3] : 스위치 전압이 $2V_{dc}$ 에 도달하면 누설 인덕터 전류에 의해 D_{sn} 은 도통된다. V_{Lb} 는 $-(2V_{dc}-V_{in})$ 이 되어 i_{Lb} 는 감소한다. L_1 과 L_m 는 각각 V_{dc} , $-nV_o$ 로 i_{L1} 는 증가하고 i_{Lm} 는 감소한다.

모드 4 [t_3, t_4] : D_{sn} 가 꺼지며 이 모드가 시작된다. L_b 와 L_m 에 걸리는 전압은 각각 $-(nV_o + V_{dc} - V_{Lk} - V_{in})$, $L_s[nV_oL_o - (V_{in} - nV_o - V_{dc})L_1]/L_bL_1$ 이 되어 전류가 감소한다. $1/L_s = (1/L_k) + (1/L_1) + (1/L_b)$.

모드 5 [t_4, t_5] : t_4 에서 i_{Lb} 가 0이 되고 D_b 는 영전류 스위칭 조건에서 꺼진다. i_{D_o} 는 $-(nV_o + V_{Lk})/L_1 - nV_o/L_m$ 기울기로 감소한다.

모드 6 [t_5, t_6] : t_5 에서 i_{Lm} 는 0이 되고 D_o 는 영전류 스위칭 조건에서 꺼진다. v_{S1} 는 C_{S1} 와 $L_m + L_k$ 의 공진에 의해 비선형으로 감소한다.

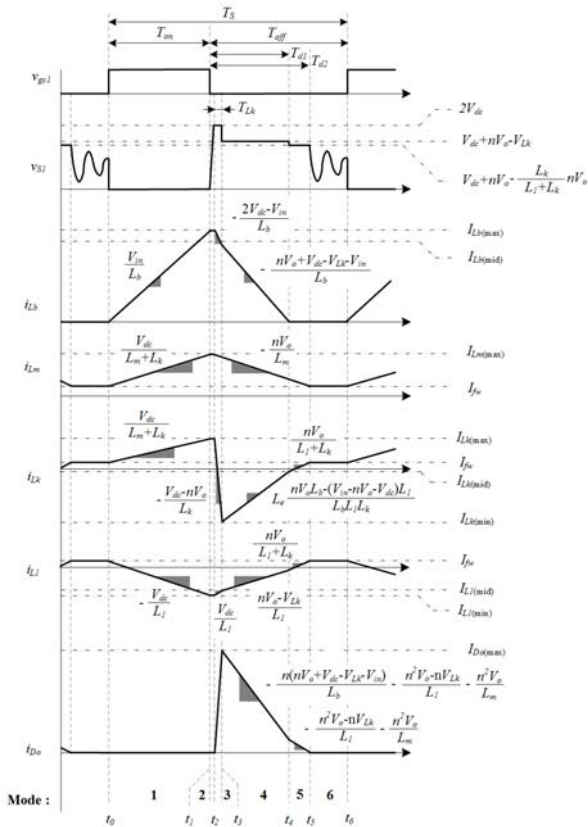


그림 3. 제안하는 LED 드라이버의 이론적 파형

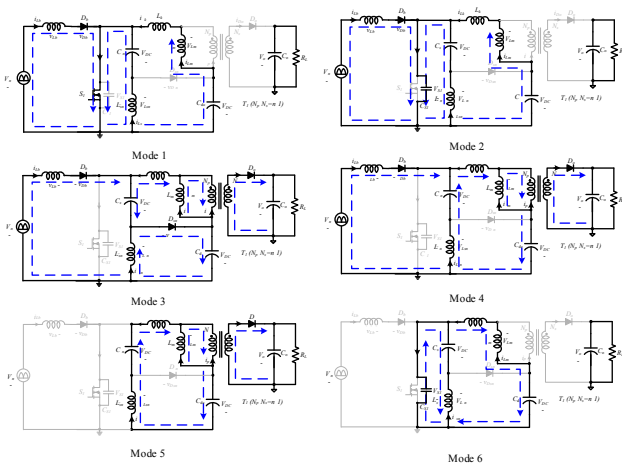


그림 4. 제안하는 LED 드라이버의 동작 모드

3. 실험 결과

표 1은 실험에 사용된 제안된 LED 드라이버의 설계 사양이다. 그림 5와 5은 입력 전압이 각각 100, 230[V_{ac}]일 때 주요 실험 파형을 측정된 것이다. 입력전류 파형이 정현파와 비슷하고 입력전압과 위상이 같기 때문에 높은 역률이 만족된다. 스위치의 서지 전압이 무손실 스너버에 의해 크게 줄어들었다. 파형을 통해 이론해석과 동일하게 컨버터가 동작하는 것을 알 수 있다. 최대부하에서 제안하는 컨버터의 최대 효율은 230[V_{ac}]에서 91.3[%], 그리고 역률은 0.98 이상으로 측정되었다.

표 1. 실험에 사용한 컨버터의 설계사양

v_{in}	100~230 [V _{ac}]	V_o	48 [V _{DC}]
f_{sw}	50 [kHz]	P_o	60 [W]
L_b	350 [μ H]	L_m	758 [μ H]
n	3 [Turn]	C_{dc}	47 [μ F]
C_o	1410 [μ F]		

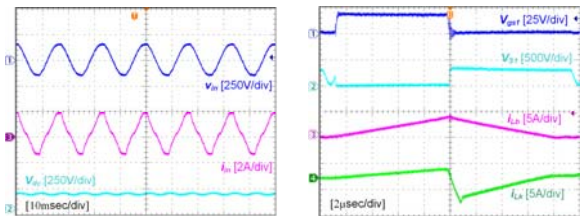


그림 5. 최대 부하에서 $v_{in}=110$ [V_{ac}]일 때, 주요 실험 파형

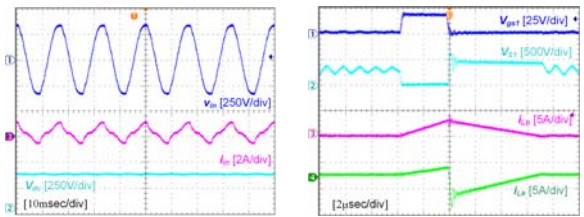


그림 6. 최대 부하에서 $v_{in}=230$ [V_{ac}]일 때, 주요 실험 파형

4. 결론

본 논문에서는 무손실 스너버를 갖는 부스트-플라이백 역률보상 컨버터 기반의 단일 스위치 AC-DC LED 드라이버를 제안하고 동작특성과 성능을 실험을 통하여 알아보았다. 부스트 모듈의 불연속 모드 동작으로 높은 역률이 만족되었고, DC-DC 플라이백 모듈의 무손실 스너버에 의해 스위치의 서지 전압이 감소였으며 누설 인덕터에 의한 손실을 최소화 하였다. 또한 낮은 정격 전압의 DC 링크 커패시터를 사용할 수 있다.

참고 문헌

- [1] N. Chen and H. S.-H. Chung, "An LED lamp driver compatible with low- and high-frequency sources," IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 5, pp. 2551-2568, May 2013.
- [2] Y.-C. Li and C.-L. Chen, "A Novel Primary-Side Regulation Scheme for Single-Stage High-Power-Factor AC-DC LED Driving Circuit," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 11, pp. 4978-4986, Nov. 2013.