

다중 스위치가 연결된 스위칭 타입의 AC LED 구동회로

백종복, 박석인, 채수용
한국에너지기술연구원 에너지효율소재연구본부

AC LED driver using multiple bypass switches

Jongbok Baek, Sukin Park and Suyong Chae
Energy Efficiency and Materials Research Division, Korea Institute of Energy Research

ABSTRACT

본 논문에서는 스위칭 타입의 AC LED 구동회로를 제안한다. 제안한 회로는 inverted buck 토폴로지를 기반으로 LED string이 직렬로 연결된 구조를 가진다. 제안한 구동회로는 복수개의 bypass 스위치를 통해 입력 전압 레벨에 따라 LED 전압을 조절해가며 인덕터에 유기되는 전압을 조절함으로써 전류 리플 및 스위칭 주파수를 줄이도록 하였다. 이는 기존 선형 타입의 구동회로에 비해 효율을 향상시키면서 넓은 전압 영역에서 동작시킬 수 있다는 특징이 있다. 기본 구조와 동작원리를 제시하고, 110 V_{rms} 입력의 LED 구동회로 설계와 모의실험을 통해 타당성을 검증한다.

1. 서론

고휘도의 LED는 높은 발광 효율, 장수명, 높은 신뢰성 및 환경 친화적 특성으로 인해 백열등, 형광등 등의 조명장치를 빠르게 대체하고 있다. 일반적으로 LED 조명장치는 LED 반도체와 구동회로로 구성된다. 구동회로는 LED의 전류를 조절하고 더 높은 역률을 달성하는 역할을 하며, 일반적으로 크기, 비용, 수명, 그리고 효율과 같은 특성을 큰 영향을 미치는 요소이다. 따라서 LED 시스템의 장점을 극대화하기 위해 구동회로의 적절한 설계가 고려되어야 한다.

일반적으로 LED 구동회로는 선형 제어 방식과 스위치 제어 방식으로 구분된다 [1],[2]. 선형 타입의 구동회로는 구조가 비교적 간단하고 가격도 저렴한 편이지만, 입력 전압과 LED 전압의 차가 클수록 전력 손실이 크게 증가한다는 단점이 있다. 이러한 이유로 비교적 낮은 전력에서 사용된다. 반면 스위칭 타입의 구동회로는 고효율과 높은 전력 밀도가 가능하기 때문에 좀 더 높은 출력의 LED 시스템에 적합하다.

기본적인 스위칭 타입의 구동회로는 정류 다이오드, 벌크 캐패시터와 dc/dc 컨버터로 구성되며, 고전력 응용범위에서는 역률 보상회로를 포함하는 2 stage 구조가 주로 적용된다. 이는 비용상승과 복잡한 제어, 전력 변화 단계의 증가로 손실 증가 문제가 생길 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해 그림 1과 같은 단일 변환 구조를 가지는 inverted buck 토폴로지가 많이 사용되고 있으나 LED string의 순방향 도통 전압의 크기에 따라 dead angle이 발생하거나 전류 리플이 커지는 단점이 여전히 존재한다.

본 논문에서는 위 단점을 극복하기 위해 복수의 bypass 스위치를 적용한 스위칭 타입의 AC LED 구동회로를 제안한다. 제안한 구동회로의 동작원리를 분석하고, 110 V_{rms} LED 구동회로의 설계와 모의실험을 통해 그 타당성을 검증한다.

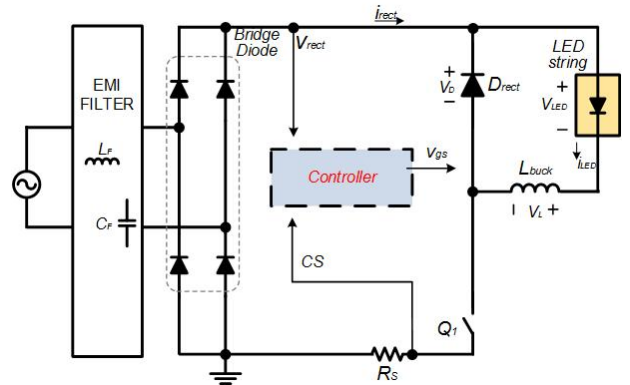


그림 1 기존 inverted buck 토폴로지의 LED 구동회로
Fig. 1 Typical inverted buck-derived LED driver

2. 제안한 AC LED 구동회로

2.1 회로구성

그림 2는 inverted buck 토폴로지를 기본으로 하는 AC LED 구동회로의 구조를 나타낸다. 제안한 회로는 EMI 필터, 브리지 정류 다이오드, 복수개의 bypass 스위치(Q1 to Q4), 인덕터(L_{buck}), 정류 다이오드(D_{rect}), PWM 스위치(Q_{pwm})로 구성된다. 인덕터는 LED 전류가 연속적으로 흐르게 하는 역할을 제공하며, 정류 다이오드는 스위치가 오프되는 동안 프리휠링 경로를 제공하는 역할을 한다. Bypass 스위치는 입력 전압의 크기에 따라 턴온되는 개수가 결정되며, 정류된 계통 전원의 주기에 따라 온/오프 동작이 이루어진다.

Bypass 스위치의 동작은 LED string의 순방향 도통전압의 크기를 가변하도록 하여 넓은 입력 범위에서 동작이 가능하도록 한다. 이러한 dead angle의 감소는 높은 효율을 유지하면서

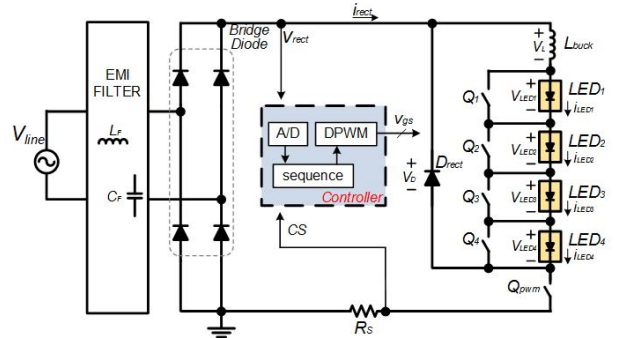


그림 2 제안한 AC LED 구동회로
Fig. 2 Proposed AC LED driver

서도 역률을 개선하는데 도움을 준다. 또 다른 특징으로 인덕터에 인가되는 전압이 제한되기 때문에 전류리플이 줄어들게 되며, 순방향 도통 전압이 높게 유지됨으로써 PWM 스위치에 인가되는 전압을 낮춰 스위칭 손실의 감소 결과를 가져 온다.

2.2 동작 원리

제안한 구동회로는 inverted buck 토폴로지를 기반으로 하였기에 기본적인 buck PFC 컨버터의 동작을 따른다. 그림 3은 제안한 회로의 주요 파형을 나타내며 구동모드는 크게 stage 1 (LED OFF)과 나머지 구간(LED ON)으로 구분할 수 있다. stage 1에서는 모든 LED string이 오프되는 구간으로 bootstrap 캐패시터를 충전하는 구간에 해당하며, 나머지 LED string의 턴온 구간은 bypass 스위치에 의해 결정되며 Q_{pwm} 스위치는 고주파 스위칭 동작을 통해 LED string의 전류를 제어한다. bypass 스위치의 동작 시퀀스는 다양한 방법으로 결정될 수 있으며, 본 논문에서는 LED 턴온 시간이 비교적 균등하도록 시퀀스를 순차적으로 쉬프트 하는 방법을 적용하였다.

상세한 동작의 설명을 위해 stage 3 구간 동안의 등가회로를 그림 4에 나타내었다. 이 구간에서는 Q_3 와 Q_4 가 항상 턴온되어 있으며, Q_{pwm} 이 높은 주파수로 스위칭 하고 있음을 알 수 있다. 인덕터 전류에 의해 LED string에는 연속적으로 전류가 흐르게 된다. 인덕터에 인가되는 전압은 모드에 따라 변하게 되며 식(1)과 같이 LED string의 가변 순방향 도통전압에 의해 결정된다.

$$\begin{cases} V_L = V_{rect} - \sum V_{LEDi}, & (\text{ON time}) \\ V_L = -\sum V_{LEDi}, & (\text{OFF time}) \end{cases} \quad i=1, \dots, n \quad (1)$$

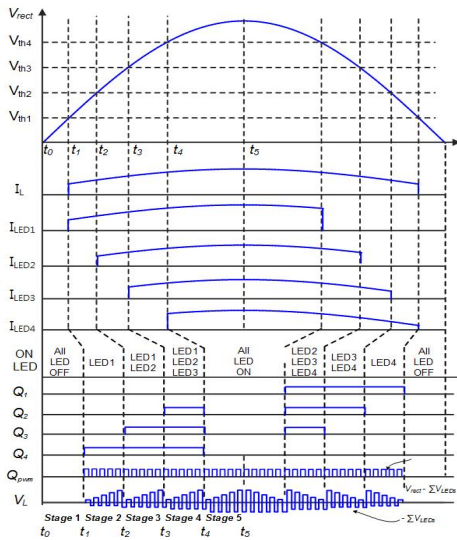


그림 3 제안한 구동회로의 주요 파형
Fig. 3 Key waveforms for the proposed LED driver

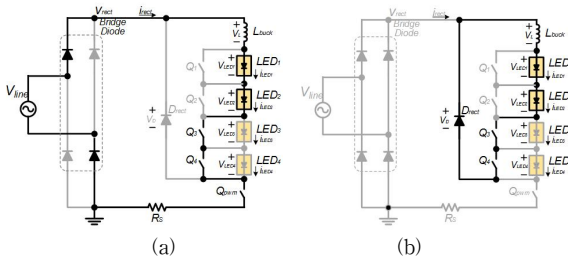


그림 4 Stage 3구간의 등가회로 (a) Q_{pwm} ON (b) Q_{pwm} OFF
Fig. 4 Operation equivalent circuits during stage 3

3. 모의실험 결과

제안한 방법을 검증하기 위해 110 V_{rms} 입력을 갖는 구동회로를 설계하고 PSIM을 이용하여 모의실험을 수행하였다. 모의실험에 사용된 회로의 구성은 그림 2와 동일하며, LED string의 순방향 도통전압은 약 20V 이고, 4개가 직렬로 연결된 구성을 가진다. 출력 필터로 1 mH 인덕터 (L_{buck})가 사용되었으며, Q_{pwm} 스위치는 65 kHz의 고정 주파수로 스위칭 동작을 수행하도록 설계되었다. LED전류의 지령은 입력 전압을 이용하여 생성하였으며, 따라서 고역률의 정현파 전류를 갖도록 하였다.

그림 5는 모의실험 결과 파형을 나타내며, 동작 원리에 따라 bypass스위치가 라인 주파수와 동일한 주기로 동작모드가 결정되며, PWM 스위치에 의해 LED 전류가 제어되는 것을 확인할 수 있다. LED 전류는 인덕터에 의해 연속적으로 흐르게 되며, 인덕터 양단에 인가되는 전압은 식(1)에서와 마찬가지로 전체 순방향 도통 전압에 비해 줄어든 것을 확인할 수 있다.

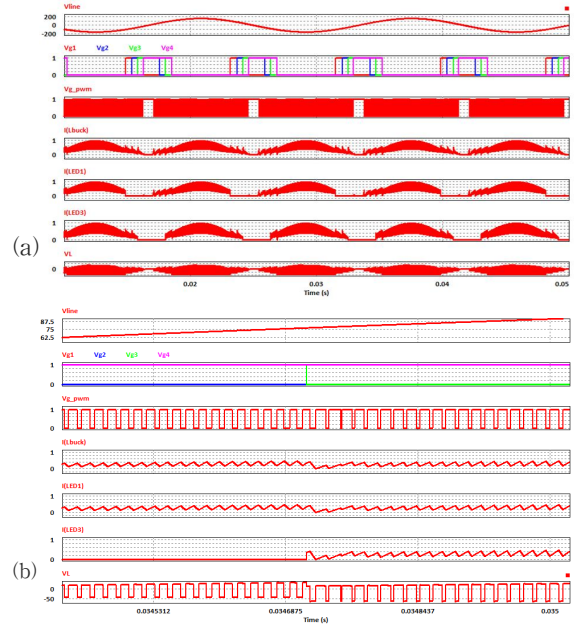


그림 5 제안한 회로의 모의실험 파형 (V_{line} , $V_{g1}-V_{g4}$, V_{g_pwm} , $I_{L_{buck}}$, I_{LED1} , I_{LED3} , $V_{L_{buck}}$) (a) 주요 파형 (b) 확대 파형

Fig. 5 Simulation waveforms of the proposed LED driver

4. 결론

본 논문에서는 직렬 연결된 bypass 스위치와 pwm 스위치로 구성된 AC LED 구동회로를 제안하였다. 제안한 회로는 inverted buck 토폴로지를 기반으로 하며, LED string의 순방향 도통 전압을 조절함으로써 dead angle을 줄이고 LED의 전류 리플을 줄일 수 있도록 하였다. 또한 기존 선형 타입의 LED구동회로에 비해 넓은 영역에서 고효율 동작이 가능하며, 고역률을 달성할 수 있음을 보였다. 제안한 회로는 110 V_{rms} 입력의 모의실험을 통해 그 적절성을 검증하였으며, 추후 하드웨어 실험을 통해 추가 성능 검증을 실시한다.

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업(B7 2415)을 재원으로 수행한 연구과제의 결과입니다.

참고 문헌

- [1] X. Lyu, Y. Li, G. Liu, and D. Cao, "A High-Efficiency Linear LED Driver With Concave Current Control for Low-Power Application," *IEEE Trans. Sel. Topics Power Electron.* vol. 3, no. 3, pp. 691-697, Sep. 2015.
- [2] X. Wu, J. Yang, J. Zhang, and Z. Qian, "Variable on-time (VOT) controlled critical conduction mode buck PFC converter for high-input ac/dc HB-LED lighting applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 11, pp. 4530 - 4539, Nov. 2012.