

Totem-Pole AC/DC 변환기 구동의 구형과 전류제어형 LED드라이버

김재섭*, Gedeon Niyitegeka* 최재호*
충북대학교*

A Squarewave current control LED driver of Totem-Pole AC/DC Converter Driving

Jaesub Kim*, Gedeon Niyitegeka*, Jaeho Choi*
Chungbuk National University*

ABSTRACT

본 논문에서는 LED드라이버의 지속적인 과제인 고역률, 효율개선 및 장수명화를 위한 연구를 진행하였다. 전체적인 토폴로지는 역률개선 및 출력전류제어의 성능을 자세히 관찰하기 위하여 두 스테이지 토폴로지를 선정하였으며, 1차측은 고효율을 위하여 Bridgeless타입의 Totem Pole bridgeless rectifier를 선정하였으며, 2차측은 LED드라이버의 수명을 좌우하는 DC 커패시턴스를 줄이기 위한 전류제어를 하기 위하여 Flyback DC DC컨버터 토폴로지를 적용하였다. 일반적인 두 스테이지 토폴로지와 본 논문에서 제안한 토폴로지의 시뮬레이션 및 실험을 통하여 성능적인 분석을 통하여 LED드라이버의 효율증대 및 수명증가에 대한 내용을 다루었다.

1. 서론

LED는 기존의 광원을 넘는 우수한 특성 때문에 미래의 주요 광원으로 널리 알려져 있다. LED의 주요 응용분야는 차량 조명, 주택용 조명 및 장식 조명, 가로등, LCD 배면광, 신호등 등이 있다. LED의 수요가 급격히 증가하게 된 이유는 적절한 환경요건에서 100,000시간 이상의 우수한 수명과 무수, 재활용 가능한 반도체 활용과 같은 친환경적인 측면 이외에도 150lm/W보다 더 뛰어난 밝기 효율, 또한 다양한 색상을 제공함으로써 LED응용분야를 더욱 유연하게 만든다는 이점이 있기 때문이다. 이러한 이점에도 불구하고 LED는 전기적, 온도 그리고 광자변화에 매우 민감한 단점이 있다. 예를 들어 LED 양단의 약간의 전압변동은 LED의 다이오드 V I 특성에 의해 큰 전류변동을 야기할 수 있다. 결과적으로 LED 전류변화는 광 출력의 변화를 야기할 수 있다. 그러므로 적절한 운전방법 및 제어방법이 채택되어야 한다. 따라서 LED드라이버의 설계 고려사항으로 수명과 성능은 기본이 되는 요소이다. 그러므로 여러 가지 토폴로지와 제어방법 중에서 적절한 토폴로지 및 제어방법의 선정은 설계자들의 중요한 선택사항이다. LED는 고효율, 친환경적, 긴 수명등의 이점에 대한 차세대 광원으로 여겨지고 있다. LED의 제조절차의 상당한 개선과 함께 LED는 다양한 분야에서 적용될 것이다. 그리고 광원으로써 일반적으로 사용될 것이다. 그러나 어떻게 LED가 높은 효율, 긴 수명, 저가로 운전될 것인가는 여전히 우리 앞에 놓여진 주요 도전과제이다.[1]

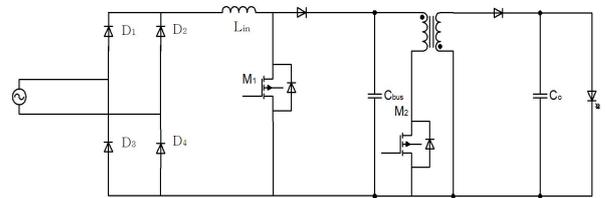


그림 1. 전통적인 2-스테이지 LED드라이버
Figure 1. Conventional 2-stage LED Driver

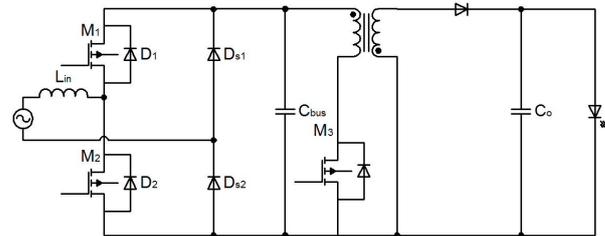


그림 2. Totem-Pole bridgeless AC-DC LED드라이버
Figure 2. Totem-Pole bridgeless AC-DC LED Driver

2. Totem-pole PFC AC/DC 변환기

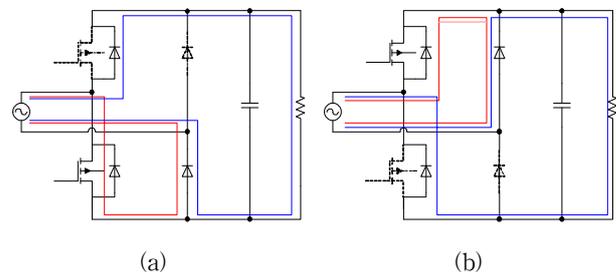


그림 3. 각 반주기에 대한 부스트 등가회로
(a)동작회로의 양의 반주기
(b)동작회로의 음의 반주기
Fig. 3 Equivalent boost circuit for each half-line cycle
(a)Positive half cycle operation circuit
(b)Negative half cycle operation circuit

지금부터 제안된 AC/DC변환기의 회로동작을 분석하겠다.

2.1 Stage 1 [t_0, t_1]

t_0 에서 M_2 는 턴 오프 된다. 입력 인덕터 전류 $i_{L_{in}}(t)$ 는 D_1 다이오드를 통해 프리휠링하며 서서히 감소한다. t_1 에서 입력 인덕터 전류는 0이 된다. 이 때의 입력전류는 다음과 같이 표현된다.

$$i_{L_{in}}(t) = I_{L_{in}}(t_0) - \frac{[V_o - v_{in}(t)]}{L_{in}}t \quad (1)$$

이 스테이지는 t_1 에서 인덕터 전류가 0으로 떨어지면 끝난다.

2.2 Stage 2 [t_1, t_2]

t_1 에서 다이오드 D_1 의 역회복이 시작된다. t_1 이후 인덕터 전류는 역방향으로 흐르기 시작하고 다음과 같이 표현된다.

$$i_{L_{in}}(t) = \frac{-[V_o - v_{in}(t)]}{L_{in}}t \quad (2)$$

음 전류가 적극적으로 저장된 소수 전하를 제거하기 시작한다. D_1 의 P N접합면 부근에서 저장된 전하가 소진되었을 때 실제 다이오드 D_1 은 역바이어스되고 출력전압을 막는다. 이 스테이지는 t_2 에서 D_1 이 출력전압을 막을 때 끝난다.

$t_1 < t < t_2$ 구간동안 D_{s2} 는 D_1 보다 역회복이 느림으로써 D_{s2} 는 D_1 에 저장된 소수전하가 제거될지라도 여전히 온 상태로 남아있다.

2.3 Stage 3 [t_2, t_3]

t_3 에서 모스펫 M_2 가 턴 온 되고 입력 인덕터 전류 $i_{L_{in}}(t)$ 는 선형적으로 증가한다. 이를 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{L_{in}}(t) = -I_{L_{in}}(t) + \frac{v_{in}(t)}{L_{in}}t \quad (3)$$

이 단계는 t_3 에서 M_2 가 턴 오프 될 때 끝난다. t_3 시간 이후 새로운 스위칭 주기가 시작한다.[2]

3. 구형파 출력전류제어

전통적으로 LED 드라이버는 PFC 컨버터와 DC/DC 컨버터 스테이지로 구성된다. 여기서 DC 커패시터는 입력전력과 출력전력 차이를 다루기 위해 사용된다. 전해커패시터는 전류리플, 라인주파수와 스위칭 주파수에 따라 1Watt 당 1.0~1.2 μF 이 요구된다. 전해커패시터는 신뢰성 문제와 짧은 수명으로 인한 드라이버의 수명단축이라는 점이 단점으로 작용한다. 그래서 LED드라이버의 전해커패시터를 제거하는 것은 예상수명보다 5년 더 늘어나는 효과가 있다. 최근에 몇몇 문헌은 전해커패시터 대신 필름커패시터를 사용하는 몇몇 방법을 제안하였다. 필

름커패시터의 에너지 밀도는 전해커패시터 보다 약 20배 높다. 두 타입의 커패시터 사이의 비용과 비슷한 크기라는 전제하에 만약 필름커패시터로 변화시키려면 1Watt당 0.06 μF 으로 선정된다. 두 배 라인주파수 맥동 운전전류는 DC 커패시터의 에너지 저장정도와 커패시턴스를 줄이는데 도움을 준다. 그러나 맥동전류는 최대 전류제한, 효율, 신뢰성, 수명, 플리커 현상 등을 포함하는 성능에 영향을 줄 수 있다. 첫 번째 최대전류제한에 대한 문제는 최대 정방향 DC전류와 정격전류의 비의 최소비는 1.42로 안정성 여유 5%의 비율을 가하여 1.35보다 낮은 범위에서는 LED의 안정성을 보장할 수 있다. 또한 LED의 수명은 최대전류와 정격전류의 비가 1.6보다 낮으면 감소하지 않는다는 연구가 있다. 사람의 눈의 뉴런들은 맥동하는 빛의 저 대역폭 필터와 같은 특성을 가진다. 이것은 저주파수 빛에 대해서 더 민감하다는 것을 의미한다. 30~50Hz의 주파수의 플리커 현상은 사람의 눈으로 쉽게 관찰되어진다. 하지만 이보다 높은 주파수에서의 광변조를 알아차리는 것은 쉽지 않다. 따라서 100Hz이상의 플리커 현상은 자연스럽게 해결될 것이다. 이와 같은 이유에서 출력 맥동운전전류는 받아들여질 수 있다. 투스태이지 LED드라이버의 기본 회로는 앞에서 보였다. DC 커패시터는 입출력전력사이에 두 배 라인 주파수 전력차이를 다루기 위해 사용되었다. 입력전압이 $v_{in}(t) = V_m \sin(\omega t)$ 이고 역률이 1이라 가정하면 입력전력은 다음과 같이 표현된다.

$$p_{in}(t) = \frac{1}{2} V_m I_m - \frac{1}{2} V_m I_m \cos 2\omega t \quad (4)$$

$$p_{in}(t) = P_o (1 - \cos 2\omega t) \quad (5)$$

여기서 V_m 과 I_m 은 입력전압과 전류의 피크값이다. ω 는 각주파수이고 P_o 는 평균출력전력이다.

$$c_{DC} = \frac{P_o}{\omega \Delta V_{c_ripple} V_{c_avg}} \quad (6)$$

여기서 ΔV_{c_ripple} 과 ΔV_{c_avg} 는 각각 커패시터의 전압리플과 커패시터 양단의 평균전압이다. DC커패시턴스는 입출력 전력차이인 ΔE 에 비례한다. 만일 ΔE 가 상당히 줄어든다면 전해커패시터는 필름커패시터로 대체될 수 있다. 이와 같이 출력맥동운전전류를 구형파로 운전하게 되면 다음과 같이 표현될 수 있다.

zero low level 구형파 운전전류에 해당하는 에너지변화량을 구하면 다음과 같다.

$$\Delta E = \int \frac{P_c(\omega t)}{\omega} d(\omega t) = \frac{B \cdot P_o}{\omega} \quad (7)$$

여기서 $B = [\sin(2\alpha) - \sin(2\beta)]/2 + k_p(\alpha - \beta)$ 이다. 그리고 α 와 β 는 두 배수 라인주파수에서 DC커패시터의 최소와 최대전압에 상응하는 위상각이다.

$$\Delta E = \frac{1}{2} C_b (V_{c_max}^2 - V_{c_min}^2) \quad (8)$$

(7)식과 (8)식을 통해 다음과 같은 식을 도출할 수 있다.[3]

$$C_{DC} = \frac{B \cdot P_o}{\omega \cdot \Delta V_{c_ripple_s} \cdot V_{c_avg}} \quad (9)$$

4. 시뮬레이션 결과

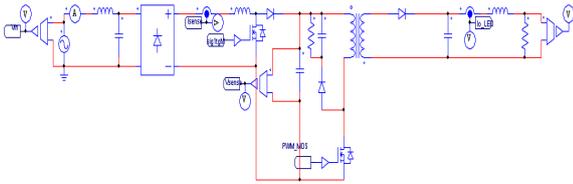


그림 4. 전통적인 2-스테이지 LED드라이버 시뮬레이션 회로도
Fig. 4 Simulation circuit of Conventional LED Driver

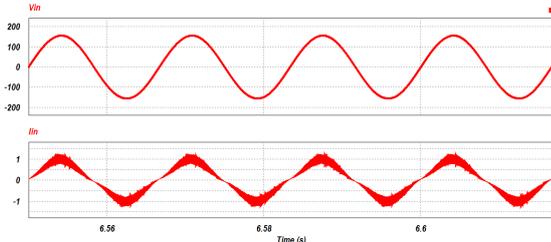


그림 5. 전통적인 토폴로지의 입력전압과 입력전류 파형
Fig. 5 Input Voltage and Current Waveforms of Conventional topology

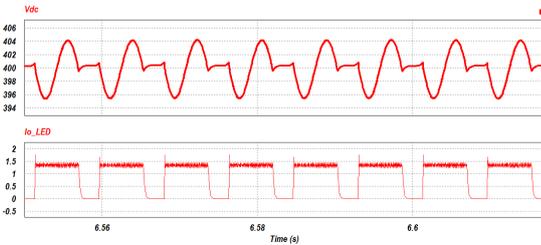


그림 6. 전통적인 토폴로지의 DC전압과 출력전류파형
Fig 6. DC Voltage and output current waveform of Conventional topology

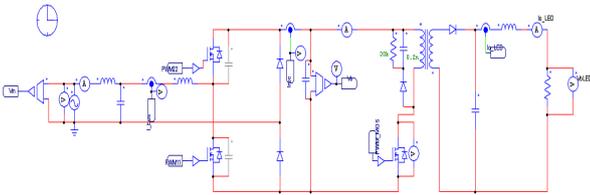


그림 7. Totem-Pole AC/DC LED드라이버 시뮬레이션 회로도
Fig. 7 Simulation circuit of Totem-Pole AC/DC LED Driver

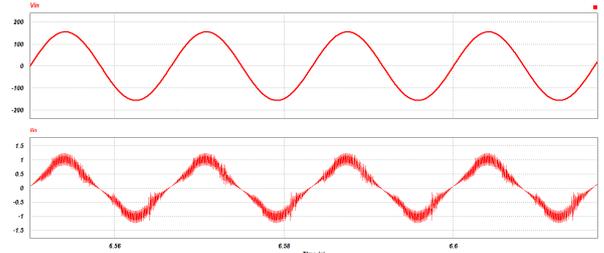


그림 8. Totem-Pole 토폴로지의 입력전압과 입력전류 파형
Fig 8. Input Voltage and Current Waveforms of Totem-Pole topology

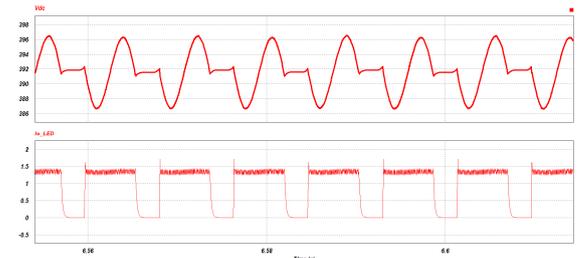


그림 9. Totem-Pole 토폴로지의 DC전압과 출력전류파형
Fig 9. DC Voltage and output current waveform of Totem-Pole topology

시뮬레이션 결과 입력 역률은 전통적인 LED드라이버의 경우 96.5%의 결과를 나타내었고 Totem Pole 토폴로지의 경우 95.6%의 결과를 나타내고 있다. 입·출력효율은 Totem Pole 토폴로지가 전통적인 LED드라이버의 경우보다 5%높게 측정되었다.

5. 결론

본 논문에서는 기존의 LED드라이버의 효율적인 측면을 개선하고 출력구형과전류제어를 통하여 LED드라이버의 수명을 좌우하는 전해커패시터의 용량을 줄여 필름커패시터로 대체함으로써 장수명화 하는 것을 목표로 시뮬레이션을 하였다. 이론적으로 Bridgeless타입 중에서 가장 적은소자의 수로 구성되는 Totem Pole AC/DC Rectifier를 적용함으로써 기존의 LED드라이버에서의 다이오드 도통손실을 줄임으로써 그 효율을 증대시켰다. 또한 출력구형과전류제어를 통하여 수명을 16~20배 줄임으로써 장수명화에 대한 문제도 일부 해결하였다.

참고 문헌

- [1] Linlin Gu, "Means of Eliminating Electrolytic Capacitor in AC/DC Power Supplies for LED Lightings", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 24, No. 5, pp. 1399 1408, 2009.
- [2] Bin Su, "Totem Pole Boost Bridgeless PFC Rectifier With Simple Zero Current Detection and Full Range ZVS Operating at the Boundary of DCM/CCM", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 26, No. 2, pp. 427 435, 2011.
- [3] Fanghua Zhang, "High Power Factor AC DC LED Driver with Film Capacitors", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 28, No. 10, pp. 4831 4840, 2013.