커패시터를 사용한 초저가의 교류전원 LED 최적 구동회로 개발

이병훈*, 김현재*, 김봉철**, 임춘택*

* Dept. of Nuclear and Quantum Eng, KAIST
** OPTOMIND Company

Abstract

커패시터 소자와 브릿지 다이오드만을 사용한 교류전원 LED 구동회로를 분석하여, 초저손실 고효율 특성과 더불어 입력전류의 고조파 및 역률특성이 양호해지는 동작점을 찾아내었다. 커패시터 소자는 교류전원에 직렬로 연결되어 전력손실 없이 LED 전류를 제한하는 역할을 하게 되며, 브릿지 다이오드 정류회로는 LED 어레이를 교류전원의 2배 주파수로 구동시키게 한다. 분석결과, 제안된 LED 구동회로는 LED 어레이의 전압강하가 입력 교류전압 최대치의 절반이 될 때 역률특성과 효율이 최고가 되며, 동작온도 변화에 따른 LED 어레이 전압 변동에 대해 출력이 변하지 않는 특징을 갖는다. 이러한 LED 구동회로는 스윗칭 레귤레이터나 IC 등이 없이 단순 수동소자만을 사용함으로써 제품원가 최소화와 효율향상을 동시에 달성할 수 있으며, 실험을 통해 특성이 확인되었다.

1. Introduction

LED는 전력 소모가 적고 긴 수명을 가지며 기존의 조명 장치에 필적할 정도의 휘도(brightness)특성을 갖는 등 장점이 많으므로, 현재 전 세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있으며 차츰 조명 광원으로서 널리 사용되고 있는 추세다. 현재 교류전압(통상 220V)을 이용해서 LED를 구동하기 위해서는 교류전압을 낮은 직류전압으로 바꾸어주는 AC/DC 컨버터 등을 필요로 하게 된다[1]. 이러한 추가적인 회로의 구성은 구동회로를 복잡하게 만들고 추가적인 전력 소모를 야기하며, 제품의 원가를 상승시키고 전체 효율을 낮게 하는 주요 원인이 된다.

이에 따라 단순히 수동소자만을 이용하여 LED를 구동하기 위한 연구가 진행되어 왔는데, 간단하면서도 교류전원을 이용하여 LED를 구동할 수 있는 회로 중 하나는 저항과 다이오드 브릿지로 전류를 제한하는 방식이다[2]. 이 방식은 특별한 능동소자를 사용하지 않고 수동소자만을 사용하여 교류전원으로 LED를 구동할 수 있는 장점이 있으나, 직렬저항을 통해 전류가 흐르게 되므로 불필요한 전력낭비가 발생하는 것을 피할 수 없다.

본 논문에서는 저손실 고효율이면서 입력전류의 고조파와 역률특성이 양호하게 되는, 커패시터 수동소자만을 이용한 교류 전원 구동 LED 회로를 제안하였다.

2. AC LED Circuit

Fig. 1은 커패시터와 브릿지 다이오드만으로 이루어진

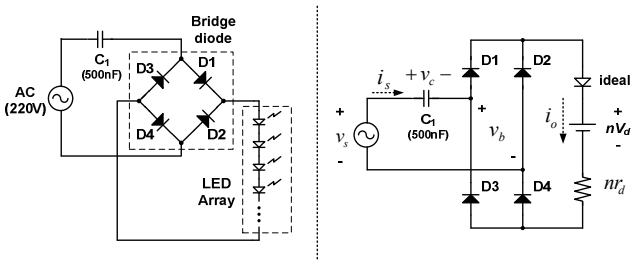

Fig. 1 커패시터와 브릿지 다이오드를 이용한 교류 전원 LED 회로(좌)와 등가회로 모델(우)

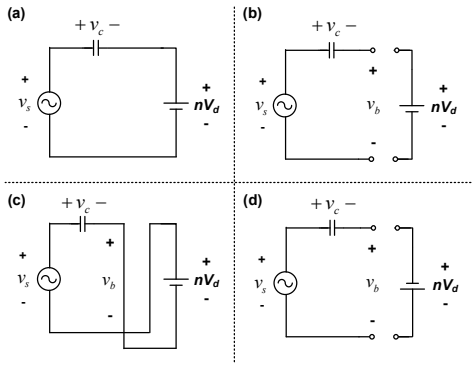

Fig. 2 교류 전원 한 사이클 동안의 등가회로 (a) D1, D4가 on이며 D2, D3가 off (b) D1, D2, D3, D4 off (c) D2, D3가 on이며 D1, D4가 off (d) D1, D2, D3, D4 off

교류 전원 LED 회로(좌)와 그것의 등가모델(우)을 나타낸 것이다. 커패시터 C_1은 교류 전원과 직렬로 연결되어 전류를 제한하는 역할을 하게 되고, 브릿지 다이오드 D1, D2, D3, D4은 LED 어레이를 교류 전원의 2배 주파수로 구동시키는 것을 목적으로 한다. 입력 전압을 v_s, 입력 전류를 i_s, C_1 양단의 전압을 v_c, 브릿지 다이오드 양단을 v_b, 출력전류를 i_o, 그리고 n개의 LED 어레이의 전압강하를 nV_d라고 정의하면, 회로 내부루프에 의한 전압식은 식 (1)과 같이 표시할 수 있다.

$$v_s = v_c + v_b = V_m \sin(\omega t) \tag{1}$$

여기서 V_m은 교류 전원의 최대 전압을 나타낸다. 회로의 중요한 특징만 보기 위해서 우선 r_d은 0이고 브릿지 다이오드 및 입력 전원은 이상적이라고 가정하였을 때, 교류 전원의 한 사이클 동안의 각각의 등가회로는 Fig. 2의 (a), (b), (c), (d)와 같다. Fig. 2(a), (c)와 같은 경우 회로에 흐르는 전류는 입력 전압에 의해 결정되며 식 (2)와 같다.

$$i_s = C_1 \frac{dv_c}{dt} = C_1 \frac{d(v_s \pm nV_d)}{dt} = \omega C_1 V_m \cos(\omega t) \tag{2}$$

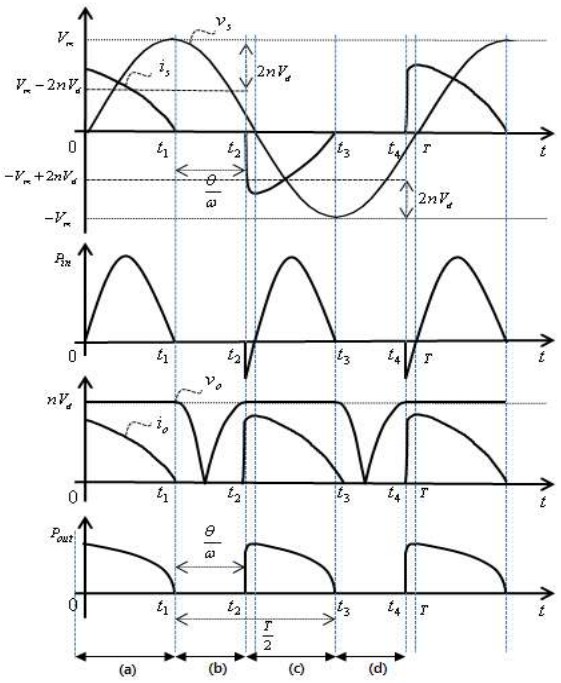

Fig. 3 교류 전원 한 사이클 동안의 입출력 전압, 전류 및 출력

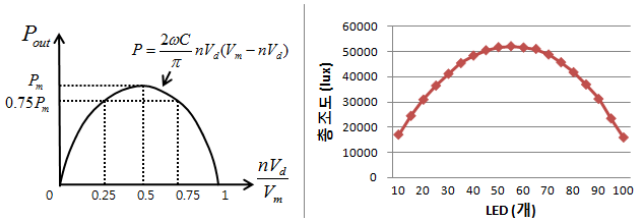

Fig. 4 V_m과 nV_d 의 비에 따른 전력 P_{out}(좌)와 LED 개수 변화에 따른 전체 조도 실험 그래프(우)

Fig. 3은 Fig. 2(a), (b), (c), (d) 각각의 경우에 입출력 전압과 전류 및 전력소모를 나타낸 것이다. 이 경우 한 사이클 동안 LED에서 소모되는 평균 전력은 식 (3)과 같다.

$$P = nV_d\overline{i_o(t)} = nV_d\frac{1}{T}\int_0^T |i_s(t)|dt$$

$$= \frac{2nV_d}{T}\int_{\frac{T}{4}+\frac{\theta}{\omega}}^{\frac{3T}{4}} |\omega C_1 V_m \cos\omega t|dt$$

$$= \frac{2\omega C_1}{\pi} nV_d(V_m - nV_d) \qquad (3)$$

Fig. 4(좌)는 식 (3)의 V_m 과 nV_d 값에 대한 전력 P 를 그래프로 나타낸 것이다. LED 에 소모되는 전력은 nV_d 값에 대해 포물선이며, nV_d 가 V_m 의 절반일 때 최대가 된다는 것을 알 수 있다. 또한 LED 에서 발생하는 열이나 주변온도에 의하여 V_d가 변화하더라도 nV_d/V_m=0.5 의 경우 최대출력 P_m 값이 거의 변하지 않는다는 점이다. 예컨대, V_d 값이 ±10% 변동하더라도 P_m 값은 ±1% 밖에 변동하지 않는다. 하지만 이런 특성은 nV_d /V_m 이 0.5 부분을 상당히 벗어난다면 전혀 얻을 수 없게 된다. 결과적으로, LED 의 휘도가 온도변화에 대해 거의 영향을 받지 않고 역률 특성이 좋으면서 최대 효율을 얻을 수 있는 경우는 nV_d /V_m 가 0.5 일 때뿐이라는 것을 알 수 있다. Fig. 4(우)는 C_1이 0.5uF 이고 LED 한 개의 V_d가 2.8V 인 경우, 상용

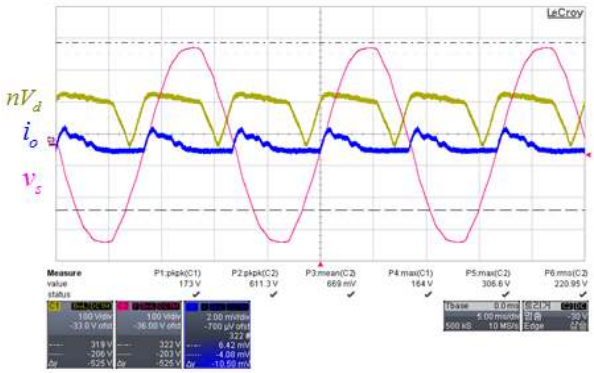

Fig. 5 nV_d/V_m 이 0.5인 경우의 동작특성 측정 결과

교류 전원 220V(Vm=311V)에서의 LED 개수 변화에 따른 조도를 측정한 결과다. 측정 결과 LED 의 개수가 55 개인 경우 nV_d /V_m 이 0.5 가 되어 전체 조도가 최대가 되는 것을 확인할 수 있었다. LED 개수가 40~70 개 사이에서는 육안으로 식별가능한 수준의 조도 차이는 발생하지 않으며, 이는 LED 의 순방향 전압이 온도에 의해 변동하였을 때도 마찬가지다.

Fig. 5 는 nV_d /V_m 이 0.5 인 경우의 실제 회로 동작을 측정한 것이다. v_s는 입력전압, nV_d는 LED 어레이의 전압, 그리고 i_o 는 출력전류다. 이 경우, 출력전류는 입력전압과 같은 극성으로 동작하고 이론치와 유사하다. 또한 nV_d /V_m 이 0.5 인 경우에는 입력전류가 입력전압이 0 인 지점에서 흐르기 시작하게 되며, 실제 다이오드의 지수함수적 전압-전류 특성 때문에 LED 전류 값은 스위칭 순간에 갑자기 증가하지 않고 서서히 증가하는 특성을 갖게 된다. 이로 인해 입력전류에 심각한 고조파가 발생하지 않도록 억제하는 특성이 있다.

본 실험에서의 LED 소비전력은 2.9W 이고, 전체 전력전달 효율은 약 98%로 매우 높다.

3. Conclusion

본 논문에서 제안된 LED 구동회로는 매우 단순한 구조를 가지면서도 높은 효율과 부하나 온도변화에 내성이 강해 실용적이다. 3W급에 대해 실험했지만 100W 정도까지 이 방식으로 구현하는데 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

이와 같은 LED 구동회로가 널리 보급된다면, 커패시터 성분의 무효전력 보상효과를 부수적으로 거둘 수 있다. 국내 전원의 평균역률을 0.80으로 가정하고, 국내 전력 소모의 20%에 달하는 조명용 기기[3]에 본 논문에서 제안된 역률 0.71의 LED 구동회로를 50% 정도만 적용하더라도 전체 역률을 0.84로 개선시킬 수 있다.

본 LED 구동회로는 2010년에 국내특허 출원되었다.

Acknowledgment

본 연구는 산학 협력의 일환으로 옵토마인드의 지원으로 진행되었다.

Reference

[1] 신대성, 정영진 외, "LLC 공진형 컨버터를 이용한 고효율 조명용 LED 구동회로", 전력전자학회논문지, 제 15 권 제 1 호, pp. 35-42, 2010. 2.
[2] 이건영, 대한민국특허청, 10-2006-0094150
[3] 한국전력공사 전력통계, 2009, July.