

교류 LED 조명의 빛 밝기 편차를 최소화하는 방법에 대한 연구

이동원¹, 이봉희², 김병철³ 

¹ 신일기술

² 포항대학교 제철산업과

³ 경상국립대학교 융합전자공학부

A Study on How to Minimize the Luminance Deviation of AC-LED Lighting

Dong Won Lee¹, Bong Hee Lee², and Byungcheul Kim³

¹ Shin-il Technology, Busan 46057, Korea

² Department of Steel Industry, Pohang University, Pohang 37655, Korea

³ Department of Convergence Electronic Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

(Received February 1, 2023; Revised February 20, 2023; Accepted February 22, 2023)

Abstract: In order to spread LED lighting, LED lighting technology directly driven by alternating current (AC) commercial power has recently been introduced. Since current does not flow at a voltage lower than the threshold voltage of the LED, a non-conductive section occurs in the current waveform, and the higher the threshold voltage of the LED, the more discontinuous current waveforms are generated. In this paper, multi-LED modules are connected in series so that the threshold voltage can be adjusted according to the number of LED modules. A small number of LED modules are driven at a low instantaneous rectified voltage, and a large number of LED modules are driven at a high instantaneous rectified voltage to lengthen the overall lighting time of AC-LED lighting, thereby minimizing the luminance deviation of AC-LED lighting. In addition, the load current flowing through the LED module is adjusted to be the same as the design current even at the maximum rectified voltage higher than the design voltage, so that the light brightness of the LED module is kept constant. Therefore, even if the rectified voltage applied to the LED module changes, the AC-LED lighting in which the light brightness is constant and the luminance deviation is minimal has been realized.

Keywords: AC-LED, Multi-LED modules, Threshold voltage, Luminance deviation, Current source

1. 서론

LED (light emitting diode)는 백열등이나 형광등과 같은 전통적인 광원에 비해 수명이 길고 소비전력이 낮을 뿐

✉ Byungcheul Kim; philip-b.kim@gnu.ac.kr

Copyright ©2023 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

만 아니라 친환경적인 특성 때문에 조명시장에서 주요 광원으로 주목받고 있다. 백열등, 형광등은 교류 상용전원을 그대로 사용하지만 LED 조명은 직류전원을 공급하기 위한 교류-직류(AC-DC) 컨버터가 필요하다 [1-4]. 이러한 전력변환장치는 대부분 변압기와 전해 콘덴서를 사용하기 때문에 LED 조명의 수명을 단축시킬 뿐만 아니라 가격을 낮추는 것이 어려운 실정이다. 그러나 최근에는 별도의 전원장치가 필요 없이 교류전원을 직접 사용하는 LED 조명 기술이 소개되었다 [5].

교류전원 직접구동에 의한 LED 조명은 초기에 anti-parallel 방식 [6]이 사용되었다. 이 방식을 먼저 상용화한 서울반도체의 아크리치(acrich)는 순방향 LED 발광 모듈을 구성하고 있는 LED마다 역방향 LED 발광 모듈에 있는 LED를 서로 연결하여 역방향 LED 발광 모듈의 전압 파괴를 방지할 수 있는 것이 장점이지만, 점등되는 LED 칩면적효율은 50%에 불과하였다. ladder 방식 [7]은 역방향으로 연결된 LED가 파괴될 가능성이 높으므로 면적효율을 향상시키는 데 한계가 있다. 브릿지 다이오드 방식 [8]은 LED를 순방향으로만 배열할 수 있기 때문에 100%의 면적효율을 실현할 수 있다.

교류 구동 LED 조명기술은 교류전원을 브릿지 다이오드에 의해 전파정류한 맥류(pulsating current)전원으로 LED를 직접 구동하기 때문에 정류전압이 LED의 정격전압(threshold voltage)보다 높은 경우에 LED가 점등되며, 낮은 경우에는 LED가 소등되므로 전류파형에서 비전도 구간이 발생한다. 그리고 LED의 정격전압이 높을수록 불연속 전류파형이 더 많아져 빛 밝기 편차가 커진다. 따라서 전류파형에서 최대한 불연속 구간을 제거하여 교류 LED 조명의 역률(power factor), 고조파왜곡(total harmonic distortion) 그리고 광 플리커(light flicker)를 개선하는 방법이 연구되고 있다 [9-14]. 또한, LED에 인가되는 정류전압이 커지면 LED 발광 모듈의 점등 시작 시간이 더 빨라져서 점등시간이 길어지고, 전류량도 더 증가하므로 LED 발광 모듈의 밝기가 변하게 된다 [15].

본 논문에서는 LED 발광 모듈에 인가되는 정류전압이 변해도 LED 조명의 빛 밝기 편차를 최소화하고, LED 발광 모듈의 빛 밝기가 일정하도록 설계전압보다 큰 정류전압에서도 LED 발광 모듈의 밝기를 설계전류와 같은 밝기로 조절할 수 있는 교류 LED 조명기술에 대하여 연구하였다.

2. 실험 방법

여러 개의 LED 발광 모듈을 직렬로 연결한 교류 LED 조명을 그림 1에 나타내었다.

그림 1에 나타낸 교류 LED 조명은 브릿지 정류회로, LED 발광 모듈 1, 2, 3, LED 발광 모듈에 흐르는 전류를 제어하는 전류원 CS1, 그리고 제어기(sine generator current level controller)로 구성하였다. 정류회로로부터 전류를 공급받는 부하는 3개의 LED 발광 모듈로 구성하였다. 점등되는 LED 발광 모듈의 직렬 개수를 제어하도록 스위치 S11은 LED 발광 모듈 1의 출력단과 전류원 입력단 사이에, 스위치 S12는 LED 발광 모듈 2의 출력단과

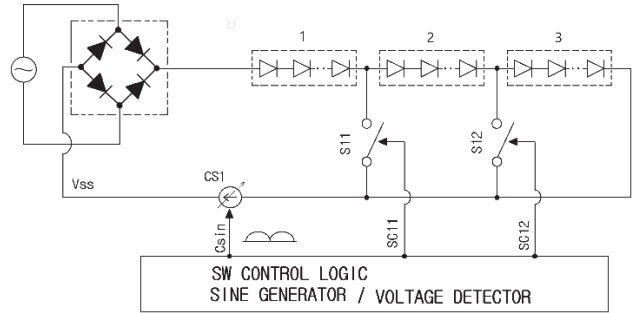


Fig. 1. The AC-LED lighting with multi-LED modules.

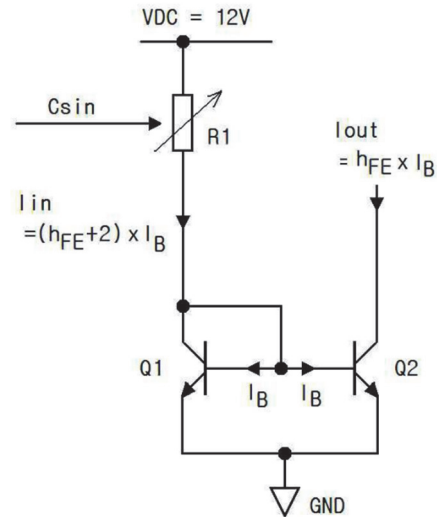


Fig. 2. Current source circuit.

전류원 입력단 사이에 연결된다. 낮은 순시 정류전압에서는 적은 개수의 LED 발광 모듈을 구동하고, 높은 순시 정류전압에서는 많은 개수의 LED 발광 모듈을 구동하여 교류 LED 조명의 전체적인 점등시간을 길게 함으로써 교류 LED 조명의 빛 밝기 편차가 최소화된다. 단상 교류전원이 공급되는 LED 조명의 퍼센트 플리커는 여전히 100%이지만, 3상 교류전원에서 3개의 각 상에 LED 발광 모듈을 배치하여 전압위상 40도 이하에서 빛이 방출되도록 점등되는 LED 개수를 조절할 수 있다. 3상 교류 LED 조명의 퍼센트 플리커는 11.1% 이하가 되므로 백열등 수준(6~14%)을 달성할 수 있다 [14].

그림 2에 전류원 회로를 나타내었다.

그림 2에서 트랜지스터 Q2의 콜렉터가 개방되어 있으나 부하인 LED 발광 모듈에 의하여 정류 전압에 연결되어 있는 것을 그림 1에서 확인할 수 있다.

가변저항 R1에 흐르는 조절전류(Iin)는 트랜지스터 Q1의 콜렉터-이미터 양단전압[Vce (Q1)]을 직류전압(VDC)

에서 I_{in} 전압을 저항 R1 값으로 나눈 값이며, 식 (1)과 같이 Q1의 콜렉터 전류[$I_C(Q1)$]와 베이스 전류[$I_B(Q1)$], 그리고 Q2의 베이스 전류[$I_B(Q2)$]의 합으로 표현할 수 있다.

$$I_{in} = I_C(Q1) + I_B(Q1) + I_B(Q2) \quad (1)$$

Q1과 Q2의 전기적 특성이 동일하면 두 트랜지스터의 베이스 전류(I_B)는 같다고 생각할 수 있다. 그리고 $I_C(Q1)$ 은 Q1의 I_B 를 전류증폭률(h_{FE})로 곱한 것과 같기 때문에 식 (1)을 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$I_{in} = (h_{FE}I_B) + I_B + I_B = I_B(h_{FE} + 2) \quad (2)$$

그리고 Q2의 콜렉터 전류가 전류원의 출력전류(I_{out})이므로 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$I_{out} = h_{FE}I_B \quad (3)$$

따라서 가변저항 R1에 의해 전류 I_{in} 을 조정하면, 전류원의 출력전류(I_{out})가 조절된다.

제어기는 역률이 개선되도록 교류전압과 같은 위상의 정현파 신호를 발생시킨다. 이 신호를 정류하고, 정류된 정현파의 크기를 조절하여 전류량 조절신호 C_{sin} 을 생성하며, 이 신호를 전류원에 공급한다. 또한, 순시 정류전압을 측정하여 스위치 S11과 S12를 제어하는 스위치 제어신호 SC11과 SC12를 발생시킨다.

LED 발광 모듈에 흐르는 부하전류가 설계전류보다 큰 경우에는 전류원 전압강하가 조절되도록 하여 LED 발광 모듈에 설계전류만 흐르게 하고, 설계전류보다 작은 경우에는 전류원에는 전압강하 없이 LED 발광 모듈에만 부하전류가 흐르도록 제어기가 전류원을 조절한다. 따라서 LED 발광 모듈에 흐르는 전류가 계단파가 아닌 정현파 형태를 나타내기 때문에 THD 특성이 개선된다.

3. 결과 및 고찰

그림 3에 Curve tracer (Tektronix 370A)로 측정된 LED 발광 모듈의 전압-전류 특성곡선을 나타내었다.

그림 3에서 LED 발광 모듈의 전압-전류 특성곡선은 그림 1에서 LED 발광 모듈 1, 2, 3이 모두 직렬 연결된 경우이다. 정류 전압이 0~87.5 V일 때 직선 c는 LED 발광 모듈 3개 모두 점등한 경우로서 62.5 V에서 전류는 0 mA이고, 87.5 V에서는 전류가 11 mA인 것을 알 수 있다.

직선 b는 3개의 LED 발광 모듈 중 2개의 LED 발광 모

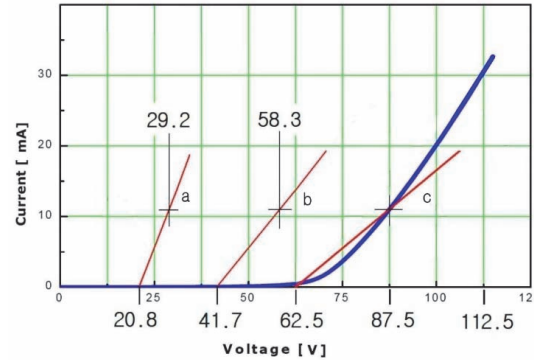


Fig. 3. Current-voltage characteristic curve of the LED modules.

듈을 직렬 연결한 경우로서 LED 발광 모듈 1과 LED 발광 모듈 2를 점등하고 LED 발광 모듈 3은 소등한 경우에 해당한다. LED 발광 모듈 1과 2의 등가직렬저항(equivalent series resistance)이 LED 발광 모듈 3개의 2/3이므로 LED 발광 모듈 1과 2의 문턱전압은 LED 발광 모듈 3개의 2/3인 41.7 V가 된다. 3개의 LED 발광 모듈은 62.5 V의 문턱전압에서 25 V가 증가하였을 때 11 mA의 전류가 흘렀으나, 2개의 LED 발광 모듈 1과 2를 직렬 연결한 경우는 25 V의 2/3 전압인 16.67 V가 증가한 58.3 V에서 11 mA의 전류가 흐르게 된다.

직선 a는 3개의 LED 발광 모듈 중 1개의 LED 발광 모듈만을 점등한 경우로서 LED 발광 모듈 1은 점등하고 LED 발광 모듈 2와 3은 소등한 경우이다. LED 발광 모듈 1의 등가직렬저항은 LED 발광 모듈 3개의 1/3이므로 문턱전압은 LED 발광 모듈 3개의 1/3인 20.8 V가 되고, 3개의 LED 발광 모듈은 문턱전압에서 25 V가 증가하였을 때 11 mA가 흘렀으나, 1개의 LED 발광 모듈 1만을 점등하는 경우는 25 V의 1/3 전압인 8.3 V가 증가한 29.2 V에서 11 mA가 흐르게 된다.

LED 발광 모듈의 전압-전류 특성곡선으로부터 전원주파수가 50 Hz이고 최대 정류 전압이 87.5 V인 경우의 전류와 전압을 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

정류 전압은 전압파형 V로 나타내었으며, LED 발광 모듈 1, 2, 3이 모두 연결된 부하에 흐르는 정류전류는 전류파형 I로 나타내었다. 그림 4에서 a와 a'는 그림 3의 직선 a를 이용하여 정류전압에 대한 부하전류를 나타낸 것이다. 마찬가지로 b와 b'는 그림 3의 직선 b를 이용하여 정류전압에 대한 부하전류를 나타낸 것이다. 그리고 전류파형 DI는 설계전류로서 최고 순시 전류가 11 mA이며, 전류파형 CI는 제어기에 의하여 스위치가 적절히 조절된 경우에 흐르는 정류전류를 나타내었다. 그림 1에 나타낸 교류 LED 조명 회로에서 교류전원과 직렬로 저항을 연결하여 LED 발

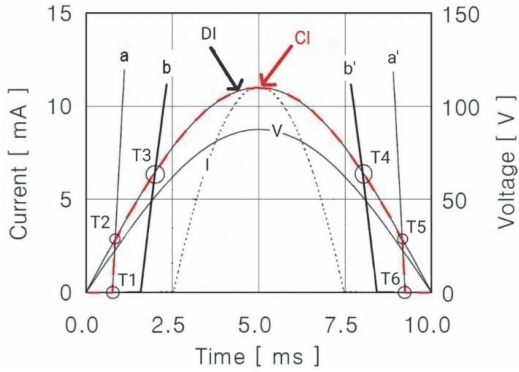


Fig. 4. Current and voltage of the LED modules for maximum pulsating voltage of 87.5 V and power frequency of 50 Hz.

광 모듈에 흐르는 정류전류를 측정하였다.

T1은 정류전압이 LED 발광 모듈 1의 문턱전압일 때이고, T2는 전류 a와 설계전류 DI가 교차할 때이고, T3는 전류 b와 설계전류 DI가 교차할 때이며, T4는 전류 b'와 설계전류 DI가 교차할 때이고, T5는 전류 a'와 설계전류 DI가 교차할 때이며, T6은 정류전압이 LED 발광 모듈 1의 문턱전압일 때이다.

0 ms에서 T1은 정류전압이 LED 발광 모듈 1의 문턱전압 이하이므로 LED 발광 모듈 1은 소등된 상태이다.

T1을 지나서 T2 미만까지는 LED 발광 모듈 1이 점등된다. 이 구간에서는 전류원이 포화영역으로 작동하므로 전류원의 양단전압은 거의 0 V이다.

T2를 지나서 T3 미만까지는 LED 발광 모듈 1이 여전히 점등되어 있다. 전류원 양단에 전압강하가 발생하여 부하양단 전압이 조절되며 설계전류 DI가 부하에 공급된다. 전류원의 전압강하는 시간에 따라 계속 증가한다.

T3에서는 LED 발광 모듈 2가 추가로 점등된다. LED 발광 모듈 1과 2에 흐르는 전류 b가 설계전류보다 클 경우에 제어기는 스위치 S11을 차단하고 S12를 도통시킨다. 스위치 절환이 일어나기 전에는 전류원 양단의 전압강하는 스위치 변경 후 문턱전압과 변경 전 문턱전압의 차이지만, 스위치가 절환되면 전류원의 포화전압(V_{sat}) 정도로 감소된다.

T3에서 전압위상 90도까지는 LED 발광 모듈 1과 2가 점등되어 있다. 전류원 양단에 전압강하가 일어나서 부하양단 전압이 조절되며 설계전류 DI가 부하에 공급된다. 전류원의 전압강하는 시간에 따라 계속 증가한다. 이 구간에서 전류 I가 설계전류 DI보다 커지지 않기 때문에 제어기는 더 이상 스위치 절환을 수행하지 않는다.

전압위상 90도에서 T4 미만까지는 LED 발광 모듈 1과 2가 여전히 점등되어 있다. 전류원 양단에 전압강하가 일

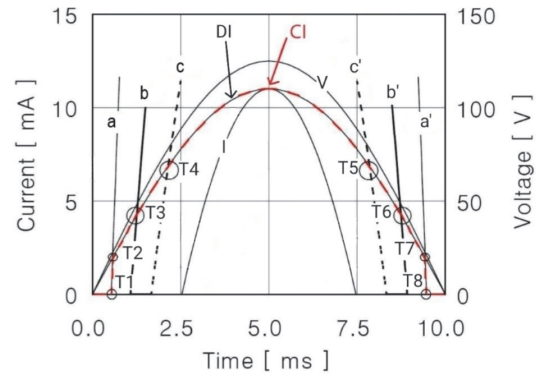


Fig. 5. Current and voltage of the LED modules for maximum pulsating voltage of 125 V and power frequency of 50 Hz.

어나서 부하양단 전압이 조절되어 설계전류 DI가 부하에 공급된다. 전류원 출력단의 전압강하는 시간에 따라 계속 감소한다. 이 구간에서 제어기는 전류원의 출력단 전압이 포화전압 이하로 떨어지기 전에 스위치 S11을 도통시켜 LED 발광 모듈 2를 소등한다.

T4에서 T6 미만까지는 LED 발광 모듈 1은 계속 점등되어 있다. 전류원 양단에 전압강하가 일어나서 부하양단 전압이 조절되어 설계전류 DI가 부하에 공급된다. 전류원 출력단의 전압강하는 시간에 따라 계속 감소한다.

T6에서 다음 정류 주기가 시작되기 전까지는 모든 LED 발광 모듈이 소등 상태를 유지한다.

전류주파수가 50 Hz이고 최대 정류 전압이 125 V일 때 LED 발광 모듈의 전압과 전류를 그림 5와 같이 나타내었다.

그림 5에서 a와 a'는 그림 3의 직선 a를 이용하여 정류 전압에 대한 부하전류를 나타낸 것이다. 마찬가지로 b와 b'는 그림 3의 직선 b를 이용하여 정류전압에 대한 부하전류를 나타낸 것이고, c와 c'는 그림 3의 직선 c를 이용하여 정류전압에 대한 부하전류를 나타낸 것이다. 그리고 전류 파형 DI는 최고 순시 전류가 11 mA인 설계전류를 나타낸 것이며, 전류파형 CI는 정류전류를 나타낸 것이다.

T1은 정류전압이 LED 발광 모듈 1의 문턱전압일 때이고, T2는 전류 a와 설계전류 DI가 교차할 때이며, T3는 전류 b와 설계전류 DI가 교차할 때이다. T4는 전류 c와 설계전류 DI가 교차할 때이며, T5는 전류 c'와 설계전류 DI가 교차할 때이고, T6는 전류 b'와 설계전류 DI가 교차할 때이다. T7은 전류 a'와 설계전류 DI가 교차할 때이고, T8은 정류전압이 LED 발광 모듈 1의 문턱전압일 때이다.

0 ms에서 T1은 정류전압이 LED 발광 모듈 1의 문턱전압 이하이므로 LED 발광 모듈 1이 미점등되어 있다.

T1을 지나서 T2 미만까지는 LED 발광 모듈 1이 점등된다. 이 구간에서는 전류원이 포화영역으로 작동하여 전류

원의 양단전압이 거의 0 V이다.

T2를 지나서 T3 미만까지는 LED 발광 모듈 1이 여전히 점등되어 있다. 전류원 양단에 전압강하가 일어나서 부하 양단 전압이 조절되며 설계전류 DI가 부하에 공급된다. 전류원의 전압강하는 시간에 따라 계속 증가한다.

T3에서는 LED 발광 모듈 2가 더 점등된다. LED 발광 모듈 1과 2에 흐르는 전류 a가 설계전류보다 클 경우에 제어기는 스위치 S11을 차단하고 S12를 도통시키는 스위치 절환을 수행한다. 스위치가 절환되기 전에는 전류원 양단의 전압강하는 스위치 변경 후 문턱전압과 변경 전 문턱전압의 차이지만, 스위치가 절환되면 전류원 양단의 전압강하는 전류원의 포화전압 정도로 감소된다.

T3을 지나서 T4 미만까지는 LED 발광 모듈 1과 2가 여전히 점등되어 있다.

T4에서는 스위치 절환이 일어나서 LED 발광 모듈 3이 더 점등된다.

T4에서 전압위상 90도까지는 LED 발광 모듈 1, 2, 3이 모두 점등되어 있다. 전류원 양단에 전압강하가 일어나서 부하양단 전압이 조절되며 설계전류 DI가 부하에 공급된다. 모든 LED 발광 모듈이 이미 점등되어 있으므로 제어기에 의한 추가 스위치 절환 없이 전류원 양단의 전압강하는 시간에 따라 계속 증가한다.

전압위상 90도에서 T5 미만까지는 모든 LED 발광 모듈이 여전히 점등되어 있다. 전류원 양단에 전압강하가 일어나서 부하양단 전압이 조절되며 설계전류 DI가 부하에 공급된다. 전류원 출력단의 전압강하는 시간에 따라 계속 감소한다.

T5에서는 스위치 절환이 일어나서 LED 발광 모듈 1과 2만 점등된 상태가 된다. 제어기는 전류원의 출력단 전압이 포화전압 이하로 떨어지기 전에 스위치를 제어하여 LED 발광 모듈 3을 소등한다.

T5에서 T6 미만까지는 LED 발광 모듈 1과 2가 계속 점등되어 있는 상태이다. 전류원 양단에 전압강하가 일어나서 부하양단 전압이 조절되며 설계전류 DI가 부하에 공급되며 전류원 출력단의 전압강하는 시간에 따라 계속 감소한다.

T6에서는 스위치 절환이 일어나서 LED 발광 모듈 2가 소등되고, LED 발광 모듈 1만 점등된다.

T6에서 T8 미만까지는 LED 발광 모듈 1이 계속 점등되어 있는 상태이다. 전류원 양단에 전압강하가 일어나서 부하양단 전압이 조절되며 설계전류 DI가 부하에 공급되며, 전류원 양단의 전압강하는 시간에 따라 계속 감소한다.

T8에서 다음 정류 주기가 시작되기 전까지 모든 LED 발광 모듈은 소등 상태를 유지한다.

그림 4와 그림 5를 비교해 보면 교류전압이 높을수록 LED 발광 모듈의 점등시간이 더 빨라져서 역률이 개선되며, 전류가 흐르는 시간이 더 길어지므로 LED 발광 모듈의 밝기가 더 밝아진다는 사실을 알 수 있다. 따라서 교류전압이 설계전압보다 높아지면 전류원의 설계전류를 낮추어서 설계전압보다 높은 교류전압에서도 LED 발광 모듈의 밝기를 설계전류와 같도록 조절할 수 있으므로 LED 발광 모듈과 전류원의 소비전력을 절감하고 열 발생을 낮출 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 LED 발광 모듈의 빛 밝기 편차를 최소화하기 위하여 LED 발광 모듈의 개수에 따라 정격전압이 조절되도록 여러 개의 LED 발광 모듈을 직렬로 연결하였다. 낮은 순시 정류전압에서는 적은 개수의 LED 발광 모듈을 구동하고, 높은 순시 정류전압에서는 많은 개수의 LED 발광 모듈을 구동하여 교류 LED 조명의 전체적인 점등시간을 길게 함으로써 교류 구동 LED 조명의 빛 밝기 편차가 최소화된다. 그리고 설계전압보다 높은 정류전압에서도 LED 발광 모듈에 흐르는 부하전류가 설계전류와 같도록 조절하여 LED 발광 모듈의 빛 밝기를 일정하게 하였다. 그리고 3상 교류전원에서 3개의 각 상에 LED 발광 모듈을 배치하고, 전압위상 40도 이하에서 빛이 방출되도록 LED 점등 개수를 조절하여 백열등 수준(6~14%)인 11.1% 이하의 퍼센트 플리커를 만족하였다. 따라서 LED 발광 모듈에 인가되는 정류전압이 변해도 LED 발광 모듈의 빛 밝기 편차를 최소화하고, LED 발광 모듈의 빛 밝기가 일정하며, 백열등 수준의 퍼센트 플리커를 만족하는 3상 교류 LED 조명을 실현하였다.

ORCID

Byungcheul Kim

<https://orcid.org/0000-0001-7756-8671>

REFERENCES

- [1] S. C. Sakong, H. S. Park, J. I. Kang, and S. K. Han, *Trans. Korean Inst. Power Electron.*, **19**, 91 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.6113/TKPE.2014.19.1.91>]
- [2] H. Y. Shin, *J. Korean Inst. Electron. Commun. Sci.*, **10**, 111 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.13067/JKIECS.2015.10.1.111>]
- [3] G. Y. Jeong, *J. Inst. Korean Electr. Electron. Eng.*, **22**, 767

- (2018). [DOI: <https://doi.org/10.7471/iikeee.2018.22.3.767>]
- [4] D. S. Park, T. K. Kim, and S. C. Oh, *J. Korea Acad. Ind. Coop. Soc.*, **20**, 491 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.3.491>]
- [5] R. Dayal, K. Modepalli, and L. Parsa, *Proc. 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (IEEE, Raleigh, USA, 2012) p. 4230. [DOI: <https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342248>]
- [6] J. P. Ao, H. Sato, T. Mizobuchi, K. Morioka, S. Kawano, Y. Muramoto, Y. B. Lee, D. Sato, Y. Ohno, and S. Sakai, *Phys. Status Solidi A*, **194**, 376 (2002). [DOI: [https://doi.org/10.1002/1521-396X\(200212\)194:2<376::AID-PSSA376>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1521-396X(200212)194:2<376::AID-PSSA376>3.0.CO;2-3)]
- [7] G. A. Onushkin, Y. J. Lee, J. J. Yang, H. K. Kim, J. K. Son, G. H. Park, and Y. J. Park, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **21**, 33 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1109/LPT.2008.2008204>]
- [8] J. Cho, J. Jung, J. H. Chae, H. Kim, H. Kim, J. W. Lee, S. Yoon, C. Sone, T. Jang, Y. Park, and E. Yoon, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46**, L1194 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.46.L1194>]
- [9] K. I. Hwu and W. C. Tu, *IEEE Trans. Ind. Inf.*, **9**, 1330 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2226042>]
- [10] K. Seo, V. H. Nguyen, J. Jung, J. Park, and H. Song, *Inst. Electron., Inf. Commun. Eng., Electron. Express*, **11**, 20140810 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1587/elex.11.20140810>]
- [11] J. Kim and S. Park, *J. Semicond. Technol. Sci.*, **15**, 390 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.5573/JSTS.2015.15.3.390>]
- [12] Y. Gao, L. Li, and P.K.T. Mok, *IEEE J. Solid-State Circuits*, **52**, 1424 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JSSC.2017.2656147>]
- [13] Y. Yoon, *J. Inst. Internet Broadcast. Commun.*, **20**, 205 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2020.20.1.205>]
- [14] D. W. Lee, H. M. An, and B. Kim, *J. Nanoelectron. Optoelectron.*, **10**, 234 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1166/jno.2015.1737>]
- [15] D. W. Lee, H. M. Ahn, and B. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **35**, 466 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.5.7>]