

3상 교류전원 LED 램프의 광 플리커

이동원¹, 김병철^{2,a}

¹ ACL(주)

² 경남과학기술대학교 전자공학과

Light Flicker of Three-Phase AC-powered LED Lamp

Dong Won Lee¹ and Byungcheul Kim^{2,a}

¹ ACL Co., Ltd., Seoul 153-031, Korea

² Department of Electronic Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology (GnTECH), Jinju 660-758, Korea

(Received February 18, 2014; Revised March 19, 2014; Accepted March 22, 2014)

Abstract: This study describes that light flicker of LED lamp is improved by placing an AC-powered LED block in each phase of three-phase AC power. Rectified current is considered as an instantaneous luminous flux because the current flowing through the LED block is proportional to the amount of light emitted by the LED block. Percent flicker is calculated simply by modeling the rectified current flowing through the LED block to a triangular wave current. Percent flicker is 100% in single-phase AC powered LED lamp. Percent flicker of the same level as that in an incandescent lamp (6%~14%) is however, achieved if light emission starts before 40° in each voltage phase of three-phase AC power.

Keywords: Percent flicker, Three-phase AC power, LED lamp, Lighting block

1. 서 론

광 플리커 (light flicker)는 시간에 따라서 빛의 밝기가 반복적으로 빠른 변화를 나타내는 현상으로서 조명기기에서 발생하는 광 플리커가 생체에 영향을 주지 않는 충분한 주파수는 5.4 kHz 이상으로 제시되고 있다 [1]. Wilkins 등은 LED 램프에서 광 플리커가 발생할 수 있으며, 발생된 광 플리커가 건강에 미치는 영향을 보고하였다 [2].

퍼센트 플리커는 광 플리커를 계량화한 척도로서

a. Corresponding author; bckim@gntech.ac.kr

순시 최댓값과 최솟값을 사용하여 계산한다 [3]. 전통적인 조명램프의 퍼센트 플리커는 40% 이하지만 교류구동 LED 램프는 100%를 나타내고 있다 [4-7]. SMPS 없이 교류로 직접 구동되는 LED 램프에서는 LED 블록의 문턱전압 이하에서 전류가 흐르지 않기 때문에 LED에서 빛의 방출이 없으며, 교류전압의 순시 최대 전압에서는 LED에서 최대의 빛을 방출한다. 따라서 빛의 밝기가 시간에 따라 고르지 못하고 변동하는 문제점이 있다. ASSIST (alliance for solid-state illumination systems and technologies)가 발표한 공식에 따르면 스트로브 스코프 효과 (stroboscopic effect)가 발생하지 않는 수준의 퍼센트 플리커는 50 Hz 상용전원은 10%, 60 Hz 상용전원은 14% 이하가 되어야 한다 [8]. 따라서 현재 퍼센트 플리커가 100%인 교류구동 LED 램프를 백열등 수준 (6%~14%)으

로 감소시키는 기술이 필요하다.

본 논문에서는 교류로 직접 구동되는 LED 램프로 부터 방출되는 빛의 순시 밝기 편차를 감소시키는 방안 에 대하여 연구하였다.

2. 실험 방법

단상 교류전원으로 직접 구동되는 LED 램플을 그림 1에 나타내었다.

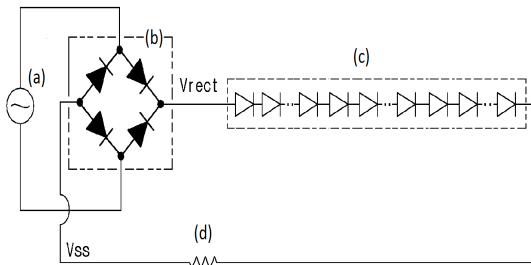


Fig. 1. Circuit diagram of single-phase AC-powered LED lamp.

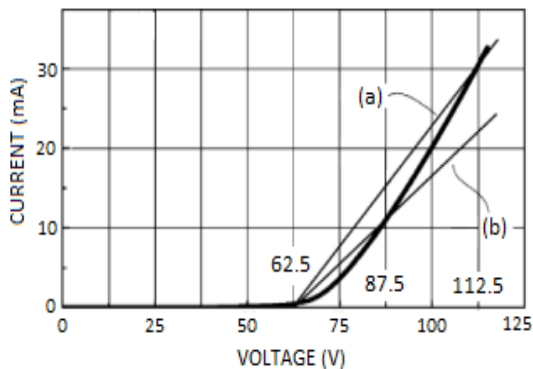


Fig. 2. Current-voltage characteristic curve of a LED block.

LED 램프는 교류전압을 공급하는 (a) 교류전원, 교류전원으로부터 공급받은 교류전압을 직류의 정류전압 (V_{rect})으로 변환하는 (b) 정류회로, 정류회로의 출력인 정류전압으로 구동되는 (c) LED 블록, 그리고 LED의 (d) 전류제한 소자로 구성되어 있다.

본 연구에 사용된 LED 블록의 전류-전압 특성곡 선을 그림 2에 나타내었다 [9].

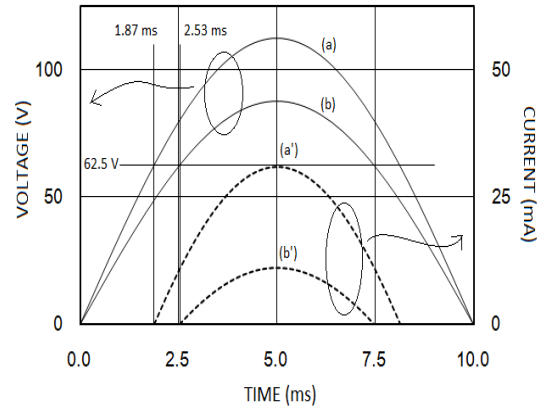


Fig. 3. The rectified voltage and current of a LED block when power frequency is 50 Hz.

그림 2에서 직선 (a)와 직선 (b)는 전류-전압 특성 곡선을 간단하게 직선으로 모델링한 것이다. 직선 (a)는 정류전압이 0 V~112.5 V일 때 모델링하기 위하여 사용하며, 문턱전압 62.5 V에서 전류는 0 mA, 112.5 V에서는 31 mA가 흐르는 것을 알 수 있다. 직선 (b)는 정류전압이 0 V~87.5 V일 때 모델링하기 위하여 사용하며 62.5 V에서 전류는 0 mA, 87.5 V에서는 11 mA가 흐르는 것을 알 수 있다. 이때, LED 블록에 흐르는 전류를 그림 2의 직선 (a)와 직선 (b)를 사용하여 전원 주파수가 50 Hz인 경우에 대하여 구하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

그림 2에서 정류 최대 전압 112.5 V를 적용한 직선 (a)의 경우, 그림 3에서 정류전압은 파형 (a), 정류전류는 파형 (a')로 나타내었다. 그리고 그림 2에서 정류 최대 전압 87.5 V를 적용한 직선 (b)의 경우, 그림 3에서 정류전압은 파형 (b), 정류전류는 파형 (b')로 나타내었다. 정류전압의 크기에 관계없이 LED 블록의 문턱전압은 62.5 V로 동일하지만, LED 블록의 점등 개시 시각은 정류전압 실효값이 높아질수록 빨라진다. 전원주파수 50 Hz에 대하여 정류 최대 전압 87.5 V와 112.5 V에 대하여 LED 블록의 문턱전압인 62.5 V를 통과하는 시각을 각각 계산해보면 2.53 ms와 1.87 ms이다. 이것을 교류전압 위상으로 환산하면 각각 $2.53/5 \times 90^\circ$ 와 $1.87/5 \times 90^\circ$ 이므로 위상 45.5° 와 33.7° 이다. 즉, 공급되는 정류 최대 전압이 87.5 V이면 전압위상 45.5° 이전에는 LED 블록의 문턱전압 이하로 전류가 흐르지 않으므로 빛의 방출이 없다. 또한, 정류 최대 전압이 112.5 V로 공급되면 전압위상 33.7° 이전에는

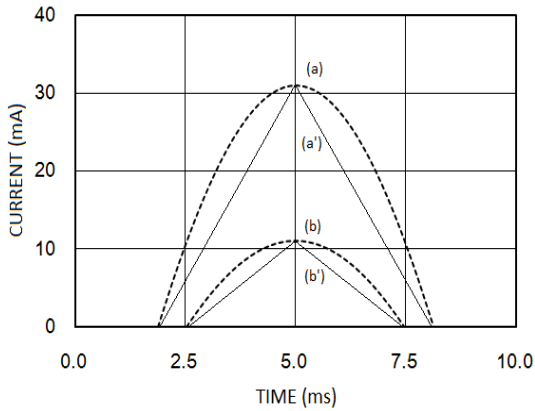


Fig. 4. Rectified current of a LED block approximated to a triangular wave.

LED 블록의 문턱전압 이하로 전류가 흐르지 않기 때문에 빛이 방출되지 않는다. 교류전압 위상 90°에서는 최대전류가 흐른다. 결과적으로 정류전압 실효값이 더 높아지면 LED 블록의 점등 개시 시각이 더 빨라져서 점등되는 시간이 더 길어지지만 LED 블록의 문턱전압 이하에서는 전류가 흐르지 않기 때문에 순시 최소 밝기와 순시 최대 밝기의 차가 크다는 문제점이 있다. LED 블록의 빛 방출량은 LED 블록에 흐르는 전류에 비례하므로 정류전류를 순시 빛 방출량으로 생각할 수 있다. 따라서 LED 블록에 흐르는 정류전류를 삼각파로 가정하여 퍼센트 플리커를 간단히 계산할 수 있다.

LED 블록에 흐르는 정류전류를 삼각파로 모델링한 결과를 그림 4에 나타내었다. LED 블록에 흐르는 전류는 LED 블록의 빛 방출량에 비례하므로 전류파형 (a)와 전류파형 (b)는 순시 빛 방출량으로 생각할 수 있다. 전류파형 (a)와 (b)를 삼각파로 가정하여 전류파형 (a')와 (b')로 근사시켜 퍼센트 플리커를 계산하면 100%의 값을 얻는다. 단상 교류전원에서는 LED 블록의 문턱전압 이하에서 전류가 흐르지 않기 때문에 순시 최소 밝기가 0인 구간이 존재하여 퍼센트 플리커는 항상 100%가 된다. 즉, 정류전류를 삼각파로 가정하여도 최고 밝은 순시값과 최고 어두운 순시값이 변하지 않기 때문에 퍼센트 플리커에는 영향을 미치지 않는다. 또한, LED 블록에 흐르는 전류는 그림 2에서는 실제보다 높게 직선으로 모델링되었고, 그림 4에서는 그림 2의 직선 모델링에 의한 전류량보다 낮게 삼각파로 모델링되어서 오차가 서로 상쇄되므로 실제오차는 낮을 것으로 판단된다.

3. 결과 및 고찰

LED에서 방출되는 빛의 순시 최소 밝기와 순시 최대 밝기의 차이를 감소시키기 위한 방안으로서 그림 5와 같이 3상 교류전원에서 3개의 각 상에 조명블록이 배치된 LED 램프를 제시하였다.

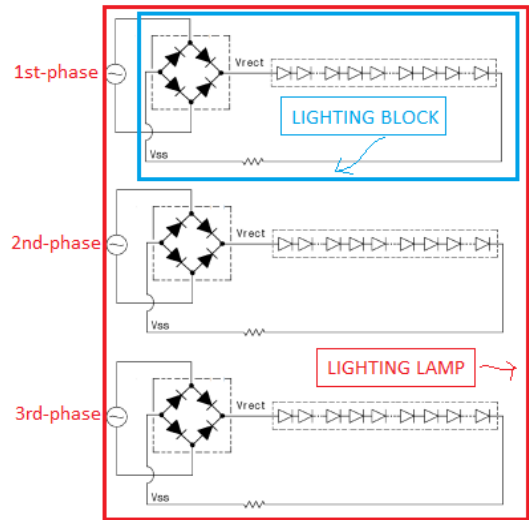


Fig. 5. Circuit diagram of three-phase AC-powered LED lamp.

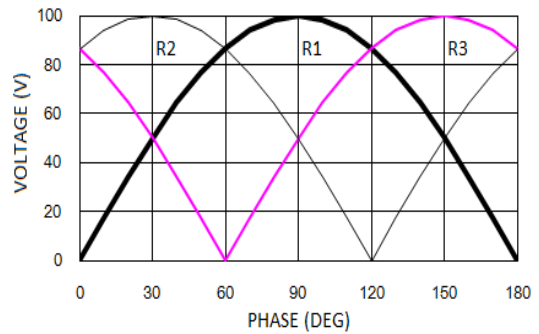


Fig. 6. Voltage waveforms of the rectified three-phase AC power.

3상 교류전원을 정류한 전압파형을 그림 6에 나타내었다. 전압위상 0°에서 출발한 제1상 정류전압 R1은 전압위상 90°에서 순시 최대정류전압이 나타난다. 전압위상 120°에서 출발하는 제2상 정류전압 R2를 따라 보면 전압위상 30°에서 순시 최대정류전압이 나

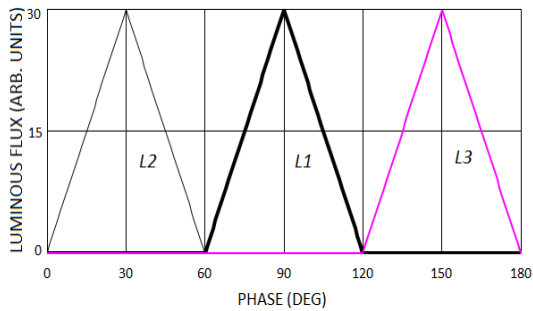


Fig. 7. Luminous flux of each phase in three-phase AC power when luminous flux is emitted at the voltage phase of 60°.

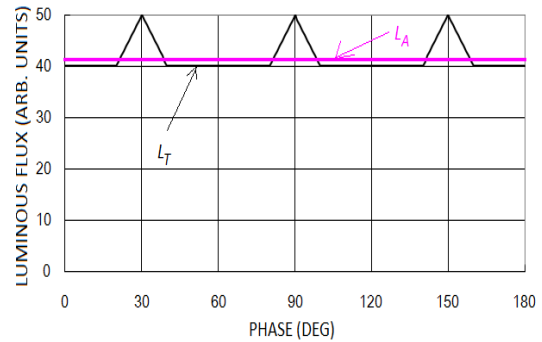


Fig. 9. Total waveform added up to the light emission in each phase in three-phase AC power.

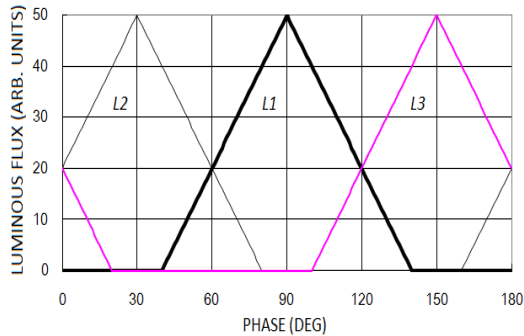


Fig. 8. Luminous flux of each phase in three-phase AC power when light emission begins at the voltage phase of 40°.

타난다. 그리고 전압위상 240°에서 출발하는 제3상 정류전압 R3는 150°에서 순시 최대 전압이 나타난다. 즉, 전압위상 30°, 90° 그리고 150°에서 각 상의 순시 최대정류전압이 나타난다.

그림 7에 3상 전원의 각 상에 배치된 조명블록이 전압위상 60°에서 빛 방출을 시작할 때 빛 방출량을 나타내었다.

그림 6에서 제1상 정류전압 R1이 전압위상 0°에서 출발하여 전압위상 90°에서 최대점이 된다. 그런데, 그림 7에서 제1상 빛 방출량 L1은 전압위상 0°에서 전압위상 60°까지 빛 방출량이 0이고, 60° 이후에서 빛이 방출되기 시작하여 제1상 정류전압의 최대점인 전압위상 90°에서 최대점이 되도록 빛 방출량이 선형으로 상승한다. 또한 전압위상 90° 이후에서는 값은 같지만 부호가 반대인 기울기로 하강한다. 그리고 빛

방출량이 0이 되면 다음 정류전압 사이클까지는 0 상태를 유지한다. 요약하면 제1상 빛 방출량 L1은 정류전압 위상보다 60° 늦게 빛 방출을 시작하며, 순시 최대 전압위상에서 빛 방출량이 최대가 되고, 정류전압 위상보다 60° 빨리 빛 방출을 마감하는 삼각과 모델이다. 제2상 빛 방출량 L2 및 제3상 빛 방출량 L3는 제1상 빛 방출량 L1과 동일한 원리로 구현된 것이므로 설명은 생략한다. 여기서, 제1상 빛 방출량 L1, 제2상 빛 방출량 L2, 그리고 제3상 빛 방출량 L3를 모두 합한 파형의 퍼센트 플리커는 100%이다. 즉, 퍼센트 플리커가 개선되기 위해서는 각 상의 전압위상 60° 이전에서 빛 방출이 시작되어야 함을 알 수 있다.

각 상의 전압위상 40°에서 빛 방출을 시작하는 퍼센트 플리커가 100%인 삼각과 모델을 그림 8에 나타내었다.

그림 8에서 L1은 제1상 LED 블록의 빛 방출량이고, L2는 제2상 LED 블록의 빛 방출량이며, 그리고 L3은 제3상 LED 블록의 빛 방출량이다. 3상전원에서 각 상의 빛 방출량을 모두 합한 결과를 그림 9에 나타내었다. 파형 L_T는 그림 8의 빛 방출량 L1과 빛 방출량 L2, 그리고 빛 방출량 L3의 순시 빛 방출량을 모두 합한 파형이다. 이 파형 L_T의 퍼센트 플리커는 11.1%이다. 그리고 직선파형 L_A는 전압위상 0°에서 180° 사이의 평균 빛 방출량을 나타낸 것이다. 따라서 단상전원에서는 퍼센트 플리커가 100%인 LED 램프를 3상전원에 적용하면 퍼센트 플리커가 11.1%로 개선된다.

빛 방출 개시 위상에 따른 퍼센트 플리커를 계산한 결과를 그림 10에 나타내었다. 빛 방출개시 위상이 45°인 경우는 퍼센트 플리커가 20%이며, 40°인 경우

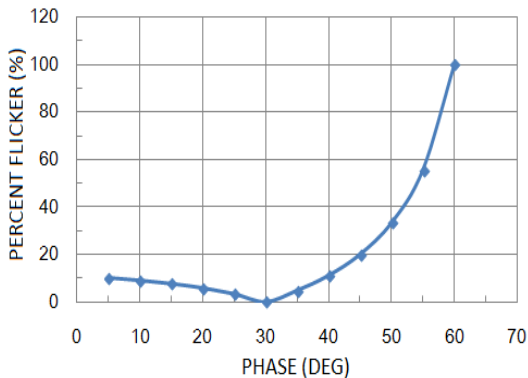


Fig. 10. Percent flicker at different voltage phases of luminous flux emitting angle.

는 11.1%이고, 35°인 경우는 4.8%이다. 특이하게 빛 방출개시 위상이 30°에서 퍼센트 플리커는 0이다. 그리고 빛 방출개시 위상이 30°보다 더 빨라질수록 퍼센트 플리커는 점점 더 나빠져서 전압위상 5°에서는 퍼센트 플리커가 10.2%가 되었다. 백열등의 퍼센트 플리커가 6%~14%임을 고려하면 전압위상 40° 이하에서 빛 방출이 시작되는 것이 바람직하다.

빛 방출 개시 위상은 부하를 구성하는 LED 블록이 몇 개의 LED로 구성되느냐에 따라서 결정된다. 빛 방출 개시 위상을 빠르게 하기 위하여 매우 적은 개수의 LED로 부하를 구성하는 경우는 정격전압에서 부하에 과전류가 공급되는 것을 제한하는 회로를 구비하여 정격전류가 흐르도록 하는 것이 좋다. 본 연구에서 사용된 그림 2의 특성을 갖는 LED 블록의 빛 방출 개시시각은 그림 3에 의하면 피크 입력전압이 87.5 V인 경우는 약 44.5°, 피크전압이 112.5 V인 경우는 약 33.7°이다.

제품을 만드는 입장에서 살펴보면 빛 방출개시 위상을 30°로 설정하여 3상 LED 램프를 만들면 광 플리커 특성이 제일 좋은 LED 램프가 제공된다. 본 연구에서 사용한 빛 방출량 모델의 정확도와 양산 LED 제품의 밝기 편차를 고려할 때 최상의 퍼센트 플리커를 얻을 수 있는 빛 방출개시 위상의 범위는 20° (퍼센트 플리커 5.9%)에서 35° (퍼센트 플리커 4.8%) 사이임을 확인할 수 있다. 이때 퍼센트 플리커 보증값을 표기한다면 10% 이하가 적당할 것이다. 각 상에 빛 방출 개시 위상이 40° 이하인 LED 블록을 배치하면 퍼센트 플리커가 11.1% 이하로 가능하다.

4. 결론

교류로 직접 구동되는 LED 램프에서는 LED 블록의 문턱전압 이하에서 전류가 흐르지 않기 때문에 LED에서 빛의 방출이 없으며, 교류전압의 순시 최대 전압에서는 LED에서 최대의 빛이 방출된다. 따라서 빛의 밝기가 시간에 따라 고르지 못하고 변동하는 문제점이 있다. 본 논문에서는 교류로 직접 구동되는 LED 램프에서 조명블록으로부터 방출되는 빛의 순시 최소 밝기와 순시 최대 밝기의 차를 감소시키기 위한 방안에 대하여 연구하였다. LED 블록에 흐르는 전류는 빛 방출량과 비례하므로 정류전류파형을 순시 빛 방출량으로 가정하였다. 퍼센트 플리커를 쉽고 간편하게 계산하기 위하여 삼각파형으로 가정하였다.

종래의 교류구동 LED 램프에서는 퍼센트 플리커가 100%이지만, 3상 교류전원에서 3개의 각 상에 조명블록을 배치하여 전압위상 40° 이하에서 빛이 방출되게 하면, 퍼센트 플리커는 11.1% 이하가 되므로 백열등 수준 (6%~14%)을 달성할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 경남과학기술대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] IEEE Standard P1789 Report, p. 9, 2010 <http://grouper.ieee.org/groups/1789/>
- [2] A. Wilkins, J. Veitch, and B. Lehman, *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (IEEE, Atlanta, USA, 2010) p. 171.
- [3] David DiLaura, Kevin Houser, Richard Mistrick, and Gary Steffy, *The Lighting Handbook, 10th ed.* (Illuminating Engineering Society, New York, 2011)
- [4] M. Poplawski and N. J. Miller, *Illuminating Engineering Society of North America Annual Conference* (IES, Austin, USA, 2011) p. 97.
- [5] S. Kitsinelis, L. Arexis, and G. Zissis, *Light & Engineering*, **20**, 25 (2012).
- [6] T. Kim, M. Rylander, E. J. Powers, W. M. Grady, and A. Arapostathis, *Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC)* (IEEE, Victoria, Canada, 2008) p. 1920.

- [7] J. Tan and N. Narendran, *Proc. SPIE 8835, LED-based illumination Systems*, ed. J. Jiao (SPIE, San Diego, USA, 2013) 883500 <http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/pdf/AR-Flicker.pdf>
- [8] Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies (ASSIST) 2012, **11**, Troy, N.Y.: Lighting Research Center [Online]
- [9] Technical Data Sheet: Acriche AX32X1 (Seoul Semiconductor) p. 9.