

정전류 구동에서 LED 고장 보상 회로 설계

이광* · 장민호**

Design of Compensation Circuits for LED Fault in Constant Current Driving

Kwang Lee* · Min-Ho Jang**

요약

밝기가 동작 전류에 비례하는 LED 조명은 다수의 LED를 직렬 연결하여 정전류원으로 구동하는 방식을 널리 사용하고 있다. 이러한 방식에서는 일부 LED가 고장으로 개방되면 전류 통로가 끊어져 직렬 연결된 모든 LED가 꺼지게 된다. 본 논문에서는 LED 동작 전압보다 약 0.4V 정도 높은 항복전압을 갖는 제너 다이오드를 개별 LED와 병렬로 연결하여 LED 고장 시 전류 우회로를 확보하므로 이러한 문제점을 해결하는 회로를 설계하였다. 시뮬레이션과 실험을 통해 LED 정상 동작 시에는 제너 다이오드로 전류가 거의 흐리지 않고, LED 고장 시에는 제너 다이오드가 안정적으로 전류 우회로로 동작함을 확인하였다.

ABSTRACT

Since brightness is proportional to the operating current, a method of connecting several LEDs in series and driving with a constant current source is widely used for driving circuits of LED lights. Because several LEDs are connected in series, if some LEDs open due to a fault, the current path is broken and all other LEDs connected in series are turned off. In this paper, we designed a circuit to solve this problem by connecting a Zener diode having a breakdown voltage of about 0.4V higher than the LED operating voltage in parallel with each LED to create a current bypass in case of LED failure. Through simulations and experiments, it was confirmed that the current of the Zener diode hardly flows when the LED is operating normally, and that the Zener diode stably operates as a current bypass when the LED fails.

키워드

LED Driver, Constant Current Driving, Zener Diode, LED Fault
LED 구동, 정전류 구동, 제너 다이오드, LED 고장

1. 서론

LED(Light Emitting Diode)는 반도체 공정으로 제작되므로 소형 제작이 가능하고 여러 개를 조합하여 다양한 형태의 조명 기구를 만들 수 있다. 그리고 기

존 조명보다 내구성과 품질이 우수하고 친환경적이다. 이러한 여러 가지 장점으로 가정 및 산업 전반에 널리 사용되고 있다[1-5].

LED의 밝기는 전류에 비례하므로 밝기 조절을 위해서는 전류를 직접 제어할 수 있어야 한다. 전류는

* 교신저자: 울산과학기술대학교 전기전자공학부

** 울산과학기술대학교 전기전자공학부(mhjjang@uc.ac.kr)

• 접수일 : 2021. 11. 16

• 수정완료일 : 2022. 01. 01

• 게재확정일 : 2022. 02. 17

• Received : Nov. 16, 2021, Revised : Jan. 01, 2022, Accepted : Feb. 17, 2022

• Corresponding Author : Kwang Lee

School of Electrical and Electronic Engineering, Ulsan College,

Email : Klee@uc.ac.kr

LED 순방향 전압의 지수 함수로 나타나며, 순방향 문턱전압은 온도에 따라 변하므로 전압으로 LED를 구동하는 것은 적합하지 않다. 따라서 LED 조명의 신뢰도를 위해서 전류를 정확히 제어할 수 있는 전류 구동 방식을 널리 사용하고 있다[6-8].

LED 조명에서는 여러 개의 LED를 사용하므로 모든 LED를 동일한 전류로 구동하는 것이 중요하다 [9-10]. 그림 1(a)는 직렬 연결된 각 열의 LED를 별도의 정전류원으로 구동하는 것으로 널리 사용되는 구조이다. 그림 1(b)는 직렬 연결된 모든 열의 LED를 단일 정전류원으로 구동하는 것으로 구조가 간단하고 비용 절감 효과가 있으나 LED 하나가 고장으로 개방되면 해당 열에는 전류가 흐르지 않고 다른 열에 전류가 과도하게 흐를 수 있는 단점으로 인해 그림 1(b)과 같은 방식은 실제 사용하기 어렵다[4].

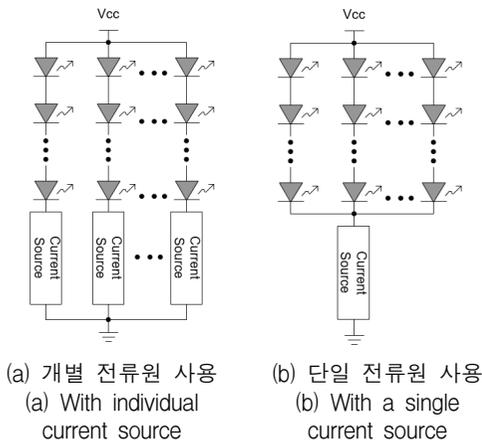


그림 1. 전류원을 사용한 다수의 LED 구동
Fig. 1 Multiple LED driving by current source

본 논문에서는 기존 논문[4]에서 단일 정전류원으로 다수의 열을 동시에 구동하며 하나의 LED가 고장으로 개방되더라도 해당 열에 직렬 연결된 나머지 LED가 켜질 수 있는 회로를 그림 2와 같이 제안하였다. 행1에 있는 D01이 고장으로 개방된 경우를 살펴보면, D01과 같은 열에 있는 D02와 D03에 전류가 흐를 수 있다. 하지만 D01 전류가 행1에 있는 정상 동작하는 LED로 분배되어 흐르므로 D11-D91 전류는 11% 정도 증가함을 알 수 있다. LED가 고장으로 개방되는 수가 증가할수록 동일행의 나머지 정상 동작

LED에 더 많은 전류가 흐르게 된다. 따라서 LED가 고장으로 개방될 때 정상 동작하는 LED 전류가 정격을 초과하여 LED가 연속적으로 고장이 날 수 있다. 이러한 일부 LED 고장 시 동일행의 정상 동작 LED의 과전류 문제점을 극복하기 위해 디지털제어기(Digital Controller)를 사용하여 전류를 제어하는 방법을 기존 논문에서 제안하였고, 기본 개념은 다음과 같다. 행1에서 하나 이상의 LED 고장으로 정상 동작하는 LED의 전류가 증가하면 VD1 전압이 증가하므로 Vout과 Vfb 전압은 감소한다. 따라서 Vfb 전압변화를 관찰하면 임의의 다이오드에서의 과전류를 감지할 수 있다. 디지털제어기는 Vfb 전압을 지속적으로 감지하면서 Vfb 전압 감소량이 특정 임계값을 초과하게 되면 PWM 제어를 통해 정전류원 전류를 단계적으로 감소시켜 정상 동작하는 LED 전류가 정격을 초과하지 않도록 제어한다.

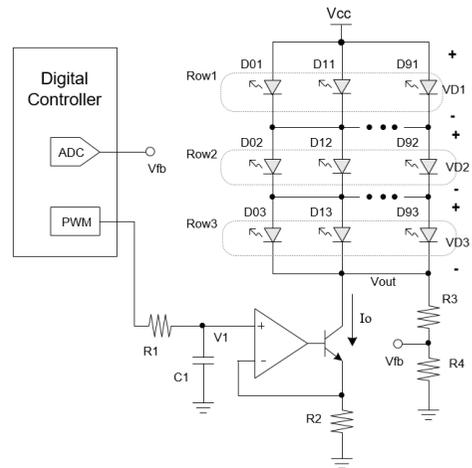


그림 2. 이전에 제안된 LED 고장 보상 회로
Fig. 2 Previously proposed compensation circuit for LED fault

기존에 제안된 회로는 직렬 연결된 LED를 정전류로 구동하는 회로에서 일부 LED가 고장으로 개방될 경우 해당 열의 LED가 모두 꺼지는 문제점을 해결하는 것이 주요 목적이었다. 하지만 그림 2의 구조는 열이 하나인 LED 조명에는 사용할 수 없다. 그리고 각 LED의 문턱전압과 등가 저항의 편차로 인해 전류가 각 열에 균일하게 분배된다고 보장할 수 없으므로 단

일 정전류원으로 다수 열의 LED를 구동하는 것은 문제점이 있다.

II. LED 고장 보상 회로 설계

여러 개의 LED를 직렬 연결하고 정전류원으로 구동할 경우 하나의 LED가 고장으로 개방되면 해당 열의 모든 LED가 꺼지는 문제점이 있다[10]. 기존 논문 [4]에서는 직렬 연결된 각 열의 LED 중 동일한 행에 있는 LED(그림 2에서 D0x-D9x, 단 x는 0-3)를 서로 병렬로 연결하여 하나의 LED가 개방되더라도 정상 동작하는 LED로 전류를 우회시켜 개방된 열의 나머지 LED가 꺼지는 문제를 해결하였다. 하지만 병렬 연결된 각 LED에 전류가 균일하게 분배되지 않고 특정 LED에 많은 과전류가 흐를 수 있는 단점이 있다. 본 논문에서는 각 LED에 우회(bypass) 전류 경로를 만들어 줌으로 고장으로 LED 개방되어도 해당 열의 다른 LED가 꺼지는 문제를 해결하고자 한다.

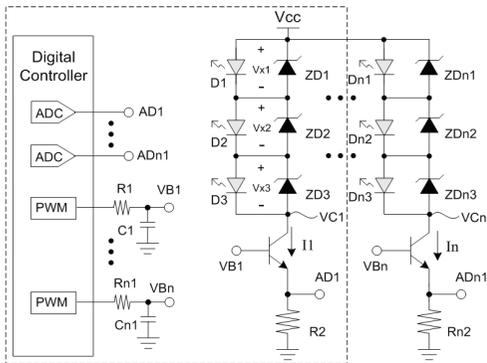


그림 3. 제안된 LED 정전류 구동 회로

Fig. 3 Proposed constant current driving circuit for LEDs

고장으로 개방된 LED 전류는 제너 다이오드를 통해 우회하는 구조로 그림 3과 같이 제안하였다. 각 열은 세 개의 LED를 직렬 연결하고 별도의 정전류원을 사용하였다. 정전류원은 BJT, 저항 그리고 디지털 제어기로 구성하였다. AD1 단자의 전압(V_{AD1})을 감지하여 V_{AD1} 이 $I1 \cdot R2$ 가 되도록 VB1을 PWM으로 제어하여 동작 전류 I1을 설정하였다. LED가 정상 동작할

때는 제너 다이오드에 흐르는 전류는 전력 손실과 직결되므로 전류는 모두 LED로 흘러야 한다. 따라서 제너 다이오드는 LED의 순방향 전압보다 큰 항복전압(V_Z)을 갖는 것으로 선정해야 한다. 제너 다이오드의 항복전압이 클수록 정상 동작 상태에서는 유리하나, LED 고장으로 제너 다이오드로 우회하는 경우 전압 강하가 증가하므로 큰 전원 전압을 사용해야 한다. 이로 인해 전력 효율이 떨어지게 된다. 따라서 적절한 항복전압을 갖는 제너 다이오드 선정이 중요하다. LED 순방향 전압은 동작 전류와 LED 종류에 따라 값이 달라지므로 사용하는 LED에 맞는 제너 다이오드를 선정해야 한다. 본 논문에서는 먼저 시뮬레이션을 통해 제너 다이오드를 통한 전류 우회로의 기본 기능을 확인한 후 실제 회로를 구성하고 실험을 통해 검증하기로 한다. 디지털과 아날로그 회로를 포함하는 혼합 모드(mixed mode) 시뮬레이션이 용이한 프로테우스(Proteus) 툴을 사용하여 그림 3의 회로를 구성하고 시뮬레이션 하였다. 제안된 그림 3의 회로는 직렬 연결된 각 열을 개별 정전류원으로 구동하므로 점선으로 표기된 부분과 같이 직렬 연결된 하나의 열만 시뮬레이션으로 검증하였다.

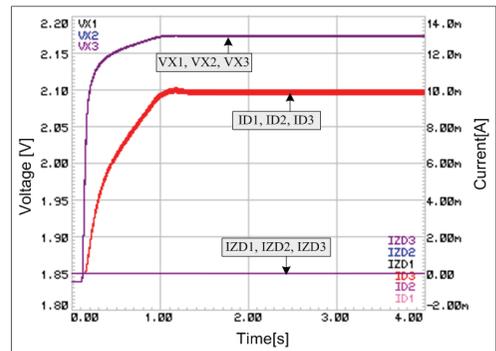


그림 4. 시뮬레이션 결과(@정상 동작)

Fig. 4 Simulation Results(@normal operation)

정격 전류가 20mA인 백색 LED를 사용하여 시뮬레이션을 통해 LED의 동작 전류에 따른 순방향 전압을 측정하였고, 전류가 10mA와 20mA에서 순방향 전압은 각각 2.17V 그리고 2.22V임을 확인하였다. 이를 기준으로 LED 순방향 전압보다 높은 2.4V의 항복전압을 갖는 제너 다이오드(1N4370)를 각 LED에 병렬

로 연결하였다. 그림 4는 구동 전류를 10mA로 설정한 후 모든 LED가 정상 동작할 때의 시간응답을 보여 주고 있다. 정상 동작 시 LED D1-D3를 통해 구동 전류가 흐르며 제너 다이오드에는 전류가 거의 흐르지 않고, V_{x1} - V_{x3} 전압은 LED 동작 전압으로 약 2.17V임을 확인하였다.

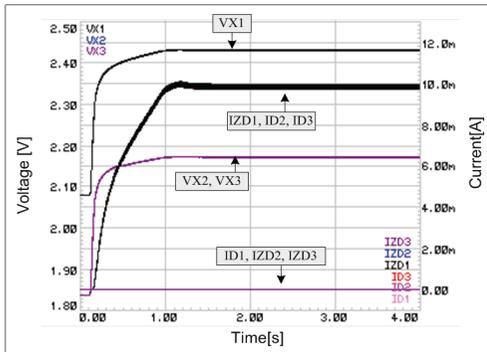


그림 5. 시뮬레이션 결과(@D1 개방)
Fig. 5 Simulation Results(@ D1 Open)

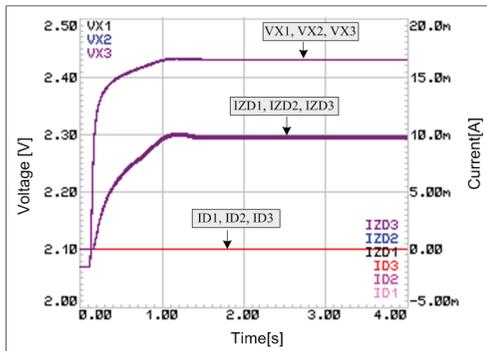


그림 6. 시뮬레이션 결과(@D1-D3 모두 개방)
Fig. 6 Simulation Results(@ D1-D3 all Open)

그림 5는 LED D1이 고장으로 개방되었을 때 D1의 전류가 제너 다이오드 ZD1으로 우회해서 흐르고 V_{x1} 은 제너 다이오드의 항복전압으로 2.44V 정도 되는 것을 보여 주고 있다. D1과 D2가 개방되었을 때 그림 5와 유사하게 전류는 ZD1과 ZD2로 우회해서 흐르며 V_{x1} 과 V_{x2} 는 제너 항복전압으로 2.44V가 되고, V_{x3} 는 LED 순방향 전압으로 2.17V가 됨을 확인하였다. 그림 6은 LED D1-D3 모두가 개방되었을 때 전류가 제너 다이오드를 통해서만 흐름을 보여 주고 있

다. V_{x1} - V_{x3} 의 전압 강하 합은 약 7.3V($3 \times 2.44V$) 정도가 되므로 VC1은 전원 전압인 V_{cc} 보다 7.3V 낮게 된다. 이 경우는 모든 다이오드가 꺼진 상태이므로 VC1 전압을 디지털 제어기에서 검출하여 일정 전압 (예를 들면 $V_{cc}-7.2$) 이하가 되면 PWM 제어를 통해 정전류원의 전류를 차단할 수도 있다.

이상에서 직렬 연결된 LED의 정전류 구동에서 LED가 고장으로 개방되었을 때 나머지 LED가 정상 동작하는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

프로테우스에서 제공되는 백색 LED는 10mA 기준으로 순방향 전압이 약 2.17V 정도였다. 그러나 실험을 위해 사용한 원통형 백색 LED는 동일 조건에서 순방향 전압이 약 2.6V 정도였고, 이 값은 정확한 데이터 시트를 구할 수 없어 실험을 통해 확인하였다. 따라서 전류 우회를 위한 제너 다이오드는 여유를 두고 항복전압이 3V인 1N4372를 사용하였다.

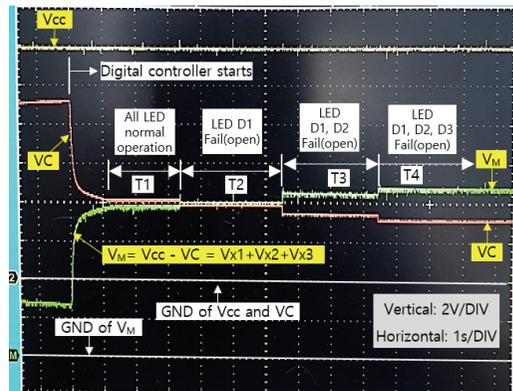


그림 7. 실험결과(25°C)

Fig. 7 Experimental results at around 25°C

그림 7은 상온(25°C)에서 정전류원이 10mA가 되게 설정하고 정상 동작 상태에서 D1-D3의 LED를 순차적으로 개방시켰을 때의 실험 결과를 보여 주고 있다. 3개의 LED 모두가 정상 동작하는 T1 구간에서 3개의 LED에 걸리는 전압(V_M)은 약 7.8V 정도로 각 LED의 전압 강하가 2.6V임을 알 수 있다. LED D1에서 D3까지 순차적으로 개방(T2: D1 개방, T3: D1과

D2 개방, T4: D1-D3 모두 개방)하였을 때 V_M 전압의 평균 변화량은 약 0.4V 정도이다. 이를 통해 LED 하나가 개방될 때마다 V_M 전압의 변화가 LED 순방향 전압(2.6V)과 제너 항복전압(3V)의 차인 0.4V가 됨을 확인하였다.

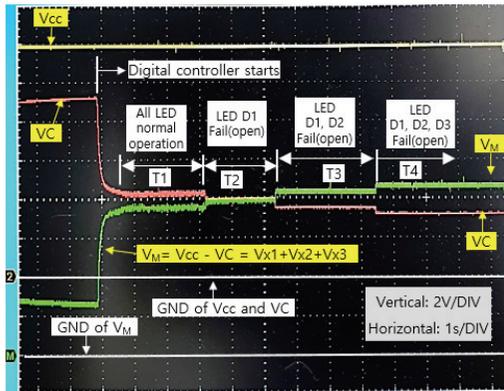


그림 8. 실험결과(65°C)

Fig. 8 Experimental results at around 65°C

LED에서 소모 전력의 일부는 열로 변환되므로 LED 조명은 보통 50°C 이상의 열이 발생 된다[11]. 온도 변화에 따른 회로의 안정성 검증을 위해 65°C에서도 측정하였고, 그 실험결과는 그림 8과 같다. 온도 상승으로 인해 정상 동작 시 LED 3개에 걸리는 전압 V_M 이 100mV 정도 감소하였다. 이를 통해 사용한 LED 순방향 전압의 온도 변화가 약 $-1\text{mV}/^\circ\text{C}$ 임을 알 수 있다. LED 3개가 모두 개방될 경우 V_M 은 20mV 정도 감소하였다. 이 값은 40°C 온도 변화에 따른 제너 다이오드 3개가 직렬 연결된 것이므로, 제너 다이오드의 항복전압 변화는 약 $-0.2\text{mV}/^\circ\text{C}$ 정도 임을 알 수 있다. 일반적으로 제너 다이오드 항복전압의 온도 계수는 양의 값이나, 항복전압이 5V 이하인 경우는 음의 온도 계수를 가지며 그 변화량은 $0.1\%/^\circ\text{C}$ 미만인 것으로 알려져 있다[12]. 이는 본 실험을 통해서도 확인되었다.

제너 다이오드의 항복전압이 LED의 순방향 전압과 비슷하거나 낮게 된다면 정상 동작 시에도 전류가 제너 다이오드로 흐를 수 있다. 하지만, 실험과 고찰을 통해 온도 변화에도 제너 다이오드의 항복전압이 LED 순방향 전압보다 항상 높게 유지됨을 확인하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 LED 조명을 위해 직렬 연결된 다수의 LED를 정전류로 구동할 때 하나 이상의 LED가 고장으로 개방되면 다른 모든 LED가 꺼지는 문제점이 있다. 본 논문에서는 제너 다이오드를 각 LED에 병렬로 연결하여 전류 우회 경로를 만들어 줌으로 이러한 문제점을 해결할 수 있는 회로를 설계 제작하였다. 프로테우스 툴을 이용한 시뮬레이션으로 회로의 기본 동작을 확인하고, 실험을 통해 온도 변화에도 안정적으로 동작하는 것을 확인하였다.

References

- [1] C. Wu, T. Wu, J. Tsai, Y. Chen, and C. Chen, "Multistring LED backlight driving system for LCD panels with color sequential display and area control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 10, 2008, pp. 3791 - 3800.
- [2] D. Kwon and S. Kim, "Experimental Demonstration of Micro LED-to-LED Visible Light Communications," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 2, 2021, pp. 219-226.
- [3] H. Sim, K. Lee, J. Kim, and S. Han, "Design of Micro-Magnetic Energy Harvest Power Management Circuit for Emergency Lighting LED Driving in Underground Facility for Public Utilities," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 3, 2020, pp. 495-502.
- [4] K. Lee, "Design of Adaptive Current Control Circuits for LEDs," *J. of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 29, no. 12, 2015, pp. 8-14.
- [5] X. Hao and C. Kim, "Design and Implementation of LED Lighting Control System Using Arduino Yun and Cloud in IoT," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 11, no. 11, 2016, pp. 983-988.

- [6] C. Park, J. Song, and J. Yoo, "The Reduction Method of Strings Current Unbalancing in LED Lighting Driving System," *J. of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 27, no. 5, 2013, pp. 26-32.
- [7] C. Kim, J. Lee, and Y. Goh, "The UV LED Bar Optimal Design with Human Detection and Control Function," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 6, 2017, pp. 1219-1226.
- [8] I. Park and W. Lee, "Development of Current Control System Appropriate to a Big-Capacity LED Lamp using Microprocessor," *J. of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, vol. 15, no. 4, 2015, pp. 191-198.
- [9] J. Yun and P. Jang, "A New Current Mirror Balancing Circuit for AC-LED Lighting," in *IEEE Access*, vol. 9, Aug. 2021, pp. 113475-113488.
- [10] Y. Kim, "Module Diagnosis and Current Balancing Technology to Extend LED Lighting Life," *J. of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 33, no. 8, 2019, pp. 1-13.
- [11] D. Lee, H. Choi, S. Jeong, C. Jeon, D. Lee, J. Lim, C. Byon, and J. Choi, "A study on the measurement and prediction of LED junction temperature," *J. of Heat and Mass Transfer*, vol. 127, Part B, 2018, pp. 1243-1252.
- [12] Microsemi Corporation, "Zener Voltage Regulation with Temperature," *Micro-Notes*, no. 203, 1995.

저자 소개



이광(Kwang Lee)

1995년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1997년 KAIST 전기및전자공학부 졸업(공학석사)

2003년 KAIST 전기및전자공학부 졸업(공학박사)

2003년 ~ 2012년 삼성전자 DMC연구소

2012년 ~ 현재 울산과학기술대학교 전기전자공학부 교수

※ 관심분야 : 회로설계, 이동통신시스템



장민호(Min-Ho Jang)

2002년 연세대학교 전기전자공학부 졸업(공학사)

2004년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업(공학석사)

2009년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박사)

2009년 ~ 2011년 삼성전자 DMC연구소

2011년 ~ 현재 울산과학기술대학교 전기전자공학부 교수

2019년 ~ 2020년 미국 메릴랜드대학교 방문교수

※ 관심분야 : 오류정정부호, 이동통신시스템