

이중강압 DC-DC 컨버터를 이용한 새로운 LED 전류 밸런싱 기법

A New LED Current Balancing Scheme Using Double-Step-Down DC-DC Converter

김기수* · 도득뜨완* · 김흥근* · 차헌녕†
 (Kisu Kim · Do Duc Tuan · Heung-Geun Kim · Honnyong Cha)

Abstract - This paper presents a new LED current balancing scheme using double-step-down dc-dc converter. With the proposed structure, the two channel LED currents are automatically balanced without using any dedicated control or auxiliary circuit. In addition, switching loss of the switching devices in the proposed LED driver is lower than that of the conventional buck LED driver. To verify the operation of the proposed LED driver, a hardware prototype is built and tested with different number of LED.

Key Words : Capacitor, Current balancing, Current regulator, Double-step-down, LED driver.

1. 서론

LED(Light Emitting Diode)는 긴 수명, 고효율, 친환경 등의 장점으로 차세대 조명 소자로 각광받고 있다. 이에 따라 조명 시장에서 LED의 사용이 증가하고 있으며 다양한 LED 구동용 전력 변환 장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-5]. 대표적인 회로로서 그림 1과 같은 벡 회로를 이용한 LED 구동 회로가 있다[6]. LED는 전류로 구동되기 때문에 일정한 출력 전류가 유지되어야 한다. 하지만 LED는 온도에 의한 가변성을 지니고 있기 때문에 일정한 LED 전류를 출력하기 위해서는 전류 제어가 요구된다[6,7]. 그림 2와 같이 만약 n-채널의 LED가 사용되는 경우에는, n개의 전류 제어가 요구된다[8-10]. 이는 시스템 전체 부피를 증가시키며 제작단가를 높이는 단점이 된다. 또한 벡 회로는 높은 정격전압을 가진 스위치와 다이오드가 요구되기 때문에 제작단가가 증가하고 높은 효율을 확보하지 못하는 문제점을 가진다. 따라서 산업계에서는 1개의 전류 제어를 이용하여 회로 내부의 동작에 의해 두 개 이상의 출력 전류가 평형을 이루는 회로들에 대한 연구가 이루어지고 있다.

W. Jianfeng은 하프 브릿지, 풀 브릿지 등 기존의 절연형 회로에 커패시터를 추가한 회로들을 소개했다[11]. 이들은 커패시터의 Charge balance 조건에 의해 2-채널 LED 전류의 평형을 유지한다. L. Xueshan는 공진 커패시터를 추가하여 4개의 LED 전류가 평형을 이루는 절연형 회로를 소개한다[12]. 하지만 이들은 많은 수의 소자를 사용하고 있으며 트랜스포머를 사용하기 때

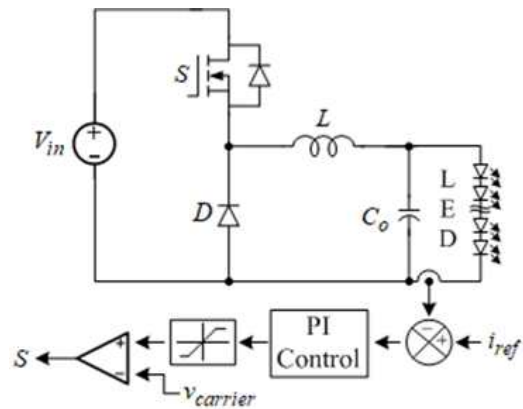


그림 1 벡 LED 구동 회로
 Fig. 1 Buck LED driver

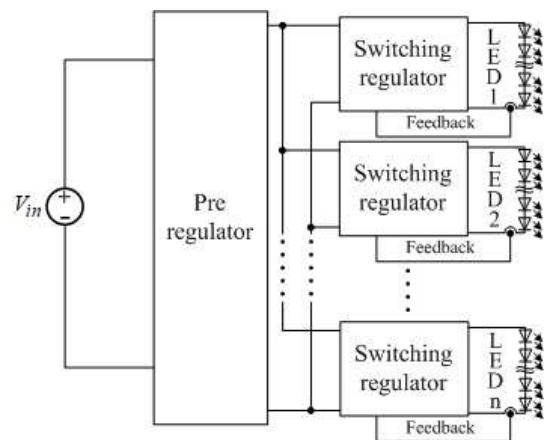


그림 2 n-채널 LED 구동 회로
 Fig. 2 n-channel LED driver

† Corresponding Author : School of Energy Engineering, Kyungpook National University, Korea.
 E-mail: chahonny@knu.ac.kr

* School of Energy Engineering, Kyungpook National University, Korea.

Received : August 3, 2017; Accepted : September 22, 2017

문에 시스템 부피가 증가하며 제작단가를 높이는 단점이 있다.

K. I. Hwa는 영전압 스위칭과 2-채널 출력 전류의 평형을 이루는 비 절연형 2-채널 LED 구동 회로를 소개했다[13]. 하지만 이는 결합 인덕터를 사용하기 때문에 결합 인덕터의 누설 인덕턴스로 인한 전압 스파이크 문제가 있다. 이는 높은 정격전압을 가진 스위칭 소자를 사용하도록 하며 그로인해 회로의 효율이 떨어지며 제작단가가 높아질 수 있다. 또한 이는 불연속적인 출력 전류 때문에 큰 출력 커패시터가 요구되는 단점이 있다. Y. Yuanmao는 스위치드-커패시터 기술을 이용하여 출력 전류의 평형을 이루는 다 채널 LED 구동 회로를 소개하였다[14]. 이는 스위치를 한 개만 사용하기 때문에 게이트 드라이버를 최소화할 수 있는 장점이 있다. 하지만 이는 입력과 출력의 접지가 다르며 출력 전류가 불연속적인 문제점이 존재한다.

본 논문에서는 이중강압(혹은 직렬-커패시터) 회로[15-17]를 이용하여 추가적인 피드백회로나 소자없이 두 개의 출력 전류의 평형을 이루는 2-채널 LED 구동 회로를 제안한다. 제안한 LED 구동 회로는 출력 전류가 연속적이며 누설 인덕턴스로 인한 문제가 없다. 또한 이중강압 특징을 그대로 유지하기 때문에 입력과 출력이 공통접지를 공유하며 두 개의 벡 LED 구동 회로에 비해 스위칭소자의 스위칭 손실이 작다. 제안한 LED 구동 회로는 또한 3-채널 이상으로 개선이 가능하다. 그렇기에 n-채널로 개선된 제안한 LED 구동 회로는 1개의 전류제어기로 n개의 LED 전류 평형을 유지할 수 있다. 본 논문은 시제품을 이용한 실험결과를 통해 제안한 LED 구동 회로의 타당성을 검증하였다.

2. 본 문

그림 3은 본 논문에서 제안한 LED 구동 회로를 나타낸다. 이 회로는 두 개의 LED가 온도에 따른 가변성에 의해 상태가 서로 달라지더라도 2-채널 LED 전류의 평형을 이룰 수 있다. 이는 모드분석 이후에 자세한 설명이 다루어질 것이다. 제안한 LED 구

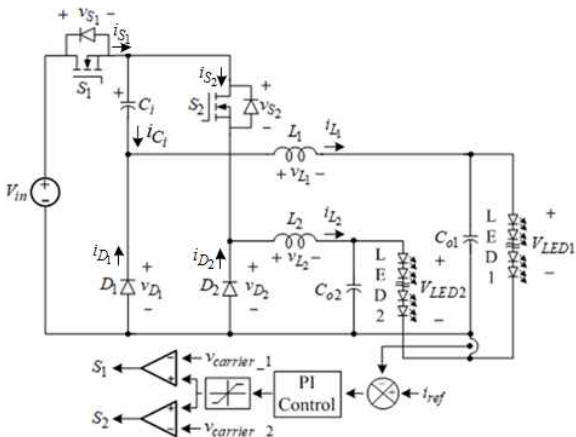


그림 3 제안한 LED 구동 회로
Fig. 3 Proposed LED driver

동 회로는 두 개의 인덕터(L_1, L_2), 한 개의 커패시터(C_i), 두 개의 스위치(S_1, S_2)와 두 개의 다이오드(D_1, D_2)로 구성되어진다. LED가 온도에 의해 가변성을 지니기 때문에 온도에 따라 LED 전류가 변할 수 있다. 출력 전류를 일정하게 유지하기 위해 PI 제어기를 활용한 전류 제어기가 이용된다[6,7]. 2-채널 LED 전류의 합을 이용하기 때문에 전류 제어기는 1개만 사용된다. 스위치 S_1 과 S_2 는 동일한 주기와 시비율(D)로 동작하며, 스위치 S_2 의 신호는 스위치 S_1 의 신호와 반주기 위상차를 가진다. 두 스위치 모두 시비율은 0.5보다 작아야 한다.

2.1 동작모드 분석

그림 4는 제안한 LED 구동 회로의 동작모드를 나타낸다. 또한

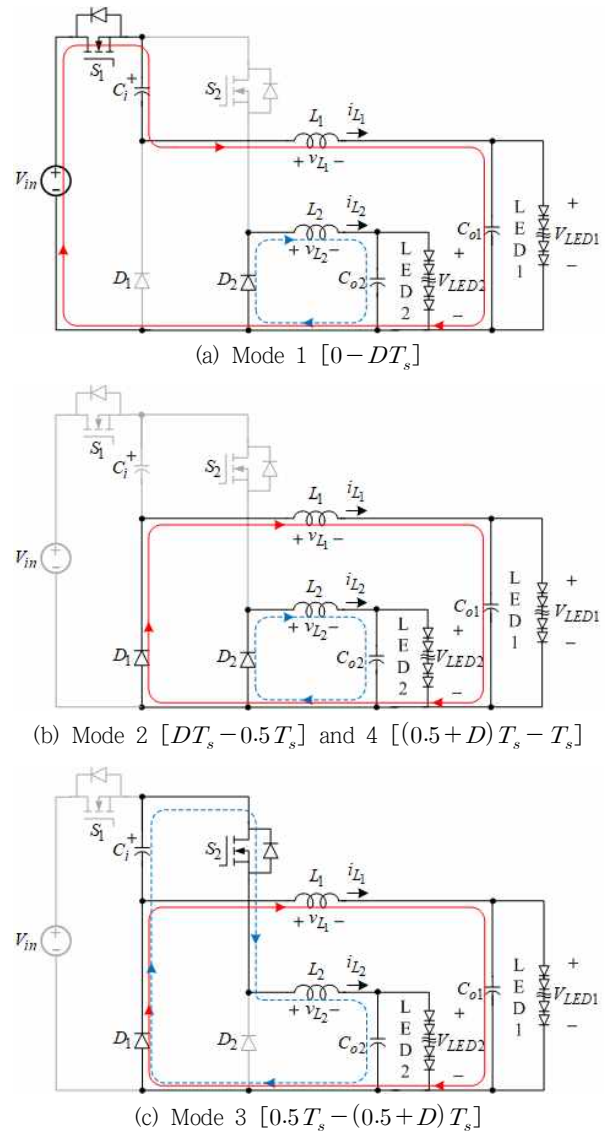


그림 4 제안한 LED 구동 회로의 동작모드
Fig. 4 Operation modes of the proposed LED driver

제안한 LED 구동 회로의 주요 동작 파형은 그림 5에 나타내었다. 모든 소자가 이상적으로 동작한다고 가정이 된 상태에서 제안한 LED 구동 회로를 해석하였다. 제안한 LED 구동 회로의 기본적인 동작원리는 다음과 같다.

1) 모드 1 [0 - DT_s]

모드 1에서는 스위치 S₁과 다이오드 D₂가 턴 온 되며 스위치 S₂와 다이오드 D₁이 턴 오프 된다. 스위치 S₂에 입력전압 V_{in}이 인가된다. 인덕터 L₁의 전류는 스위치 S₁과 커패시터 C_i를 통해서 흐른다. 따라서 인덕터 L₁과 커패시터 C_i는 에너지를 저장한다. 인덕터 L₂의 전류는 다이오드 D₂를 통해 환류하며 그로 인해 인덕터 L₂는 출력으로 에너지를 방전한다. 이때 인덕터 L₁과 L₂의 전압과 커패시터 C_i의 전류는 다음과 같다.

$$\begin{cases} v_{L_1} = V_{in} - V_{C_i} - V_{LED1} \\ v_{L_2} = -V_{LED2} \end{cases} \quad (1)$$

$$i_{C_i} = i_{L_1} \quad (2)$$

2) 모드 2 [DT_s - 0.5T_s]

모드 2에서는 다이오드 D₁과 D₂가 턴 온 되고 스위치 S₁과 S₂는 턴 오프 된다. 인덕터 L₁과 L₂의 전류는 각각 다이오드

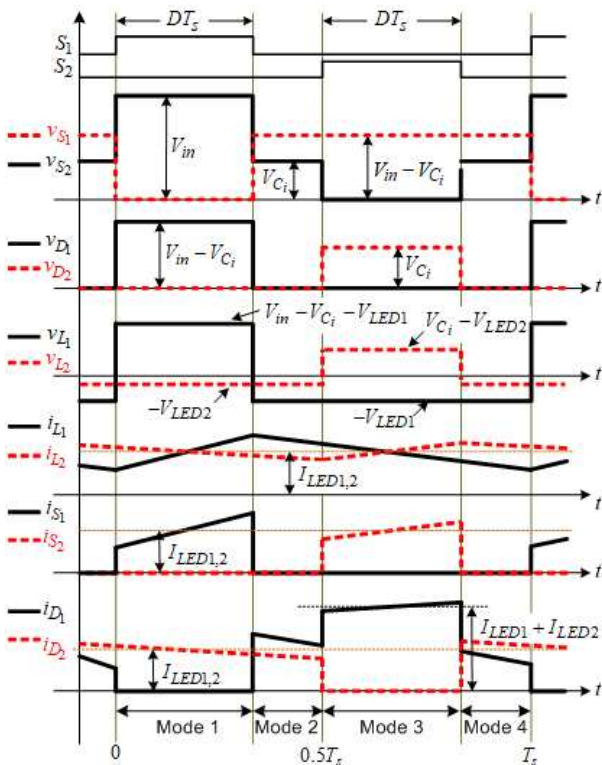


그림 5 제안한 LED 구동 회로의 주요 파형
Fig. 5 Key waveforms of the proposed LED driver

D₁과 D₂를 통해 환류한다. 이 모드에서 인덕터 L₁과 L₂의 전압과 커패시터 C_i의 전류는 다음과 같다.

$$\begin{cases} v_{L_1} = -V_{LED1} \\ v_{L_2} = -V_{LED2} \end{cases} \quad (3)$$

$$i_{C_i} = 0 \quad (4)$$

3) 모드 3 [0.5T_s - (0.5+D)T_s]

모드 3에서는 모드 1과 반대로 스위치 S₂와 다이오드 D₁이 턴 온 되며 스위치 S₁과 다이오드 D₂가 턴 오프 된다. 인덕터 L₁의 전류는 다이오드 D₁을 통해 환류한다. 따라서 인덕터 L₁은 출력으로 에너지를 방전한다. 인덕터 L₂의 전류는 다이오드 D₁, 커패시터 C_i 스위치 S₂를 통해 흐르며 그로 인해 커패시터 C_i는 방전하여 인덕터 L₂를 충전시킨다. 다이오드 D₁으로 인덕터 L₁과 L₂의 전류의 합이 흐른다. 이때 인덕터 L₁과 L₂의 전압과 커패시터 C_i의 전류는 다음과 같다.

$$\begin{cases} v_{L_1} = -V_{LED1} \\ v_{L_2} = V_{C_i} - V_{LED2} \end{cases} \quad (5)$$

$$i_{C_i} = -i_{L_2} \quad (6)$$

4) 모드 4 [(0.5+D)T_s - T_s]

모드 4의 동작모드는 모드 2의 동작모드와 같다.

2.2 출력 전류의 평형 유지

2-채널 LED를 모두 같은 소자로 할 경우 두 개의 출력 전류는 평형이 요구된다. 제안한 LED 구동 회로는 커패시터 C_i의 Charge balance 조건에 의해 두 개의 출력 전류의 평형을 이룬다. 그리고 1개의 전류 제어기를 통해 출력 전류를 일정하게 유지한다. 커패시터 C_i의 전류는 그림 6에 나타나 있다. 커패시터 C_i의 Charge balance 조건에 의한 인덕터 전류 i_{L1}과 i_{L2}의 관계는

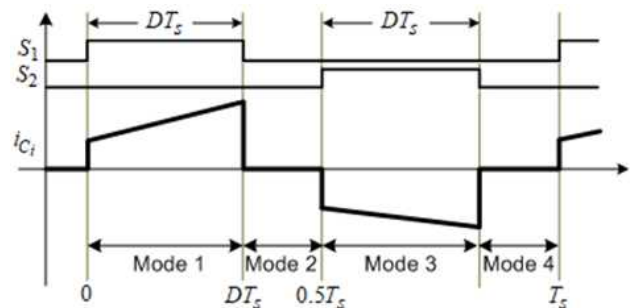


그림 6 제안한 LED 구동 회로의 커패시터 전류 (i_{Ci})
Fig. 6 Capacitor current (i_{Ci}) of the proposed LED driver

다음과 같이 나타내어진다.

$$i_{L_1}DT_s = -(-i_{L_2})DT_s \quad (7)$$

$$i_{L_1} = i_{L_2} \quad (8)$$

스위치 S_1 과 S_2 의 주기와 시비율(D)이 같기 때문에 인덕터 전류 i_{L_1} 과 i_{L_2} 는 동일하다. 따라서 두 개의 LED 전류는 온도에 의한 LED의 변화와 관계없이 동일하다.

이중강압 회로는 스위치 두 개와 커패시터 하나를 추가하여 삼중강압, 혹은 그 이상으로 강압특징을 가질 수 있다. 이를 이용하여 제안된 회로를 n 개의 출력을 가진 LED 구동 회로로 개선할 수 있다. 따라서 제안한 LED 구동 회로는 하나의 전류 제어기로 n개의 LED 전류 평형을 유지 하도록 개선할 수 있다. 이는 가격단가 면에서 큰 장점을 가진다. 그림 7은 3-채널의 제안한 LED 구동 회로이다.

2.3 정격 전압과 정격 전류

인덕터 L_1 과 L_2 의 Flux balance 조건에 의하여 식 (9)가 성립되며 이는 식 (10)으로 정리할 수 있다.

$$\begin{cases} L_1 : (V_{in} - V_{C_i} - V_{LED1})DT_s = V_{LED1}(1-D)T_s \\ L_2 : (V_{C_i} - V_{LED2})DT_s = V_{LED2}(1-D)T_s \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} L_1 : (V_{in} - V_{C_i})D = V_{LED1} \\ L_2 : V_{LED2} = V_{C_i}D \end{cases} \quad (10)$$

식 (10)을 연립하여 커패시터 전압을 구할 수 있다.

$$V_{C_i} = \frac{V_{LED2}}{V_{LED1} + V_{LED2}} V_{in} \quad (11)$$

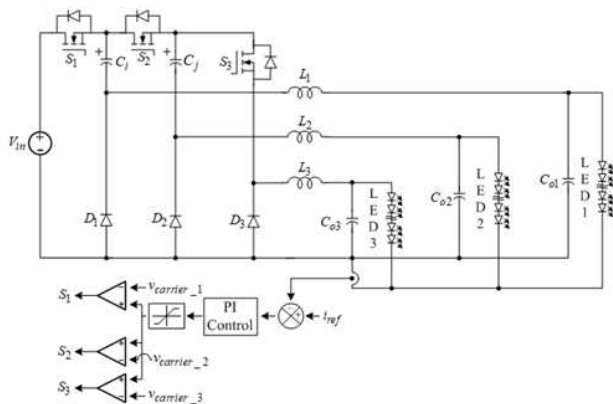


그림 7 3-채널 제안한 LED 구동 회로
Fig. 7 Three-channel proposed LED driver

표 1 제안한 회로의 정격 전압과 정격 전류

Table 1 Voltage and current stress of the switching device.

	Voltage stress	Current stress
S_1	$\frac{V_{LED1}}{V_{LED1} + V_{LED2}} V_{in}$	I_{LED1}
S_2	V_{in}	I_{LED2}
D_1	$\frac{V_{LED1}}{V_{LED1} + V_{LED2}} V_{in}$	$I_{LED1} + I_{LED2}$
D_2	$\frac{V_{LED2}}{V_{LED1} + V_{LED2}} V_{in}$	I_{LED2}

표 2 제안한 회로의 전기적 사양

Table 2 Electrical specifications of the proposed LED driver

Input voltage (V_{in})	400 [V]
LED voltage (V_{LED1}, V_{LED2})	70-105 [V]
The number of LED string 1 and 2	36 and 24
Switching frequency (f_s)	50 [kHz]
Switch (S_1, S_2)	FQP1N60C
Diode (D_1, D_2)	ST1300A
Inductor (L_1, L_2)	10 [mH]
Capacitor (C_i)	2.2 [μ F]
Capacitor (C_{o1}, C_{o2})	100 [μ F]

앞서 구한 인덕터 전류 관계와 커패시터 전압을 통해 스위치와 다이오드의 정격 전압과 정격 전류를 도출할 수 있다. 두 채널의 LED의 편차와 상관없이 스위치 S_2 의 정격 전압은 입력 전압과 같으며 다이오드 D_1 의 정격 전류는 두 채널 출력 전류의 합이다. 그 외의 스위치와 다이오드는 입력 전압보다 낮은 정격 전압과 각각의 출력 전류만큼의 정격 전류를 가진다. 표 1은 제안한 LED 구동 회로의 스위치와 다이오드 정격 전압과 정격 전류를 나타낸다.

3. 실험 결과

제안한 LED 구동 회로의 성능 검증을 위해 시제품을 제작하여 실험을 진행하였다. 표 2는 실험에 사용된 시제품의 전기적 사양이다. 2-채널 LED의 출력이 서로 다른 상태에서 실험을 진행하기 위해 LED 1에는 36개, LED 2에는 24개의 LED를 사용하였다.

그림 8에서 그림 10은 $i_{ref} = 300mA$ 로 설정한 상태에서의 실험 결과 파형이다. 그림 8을 통해 스위치와 다이오드의 전압 ($v_{S_1}, v_{S_2}, v_{D_1}, v_{D_2}$)을 확인할 수 있다. 모드 1의 영역에서 스위치 S_2 는 입력 전압과 동일한 것을 볼 수 있다. 그림 9는 인덕터

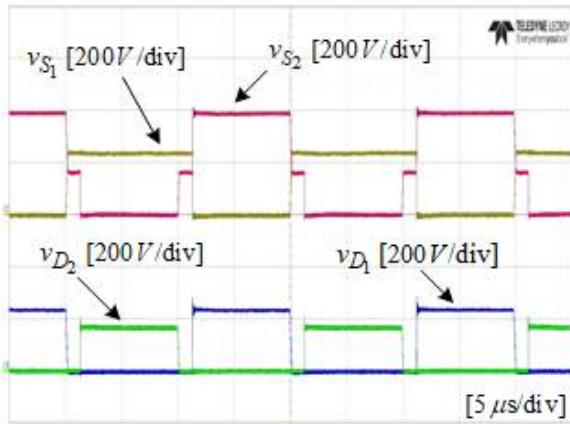


그림 8 $i_{ref} = 300\text{mA}$ 일 때 스위치와 다이오드 전압
Fig. 8 Experiment waveforms of the switch and diode voltages when $i_{ref} = 300\text{mA}$

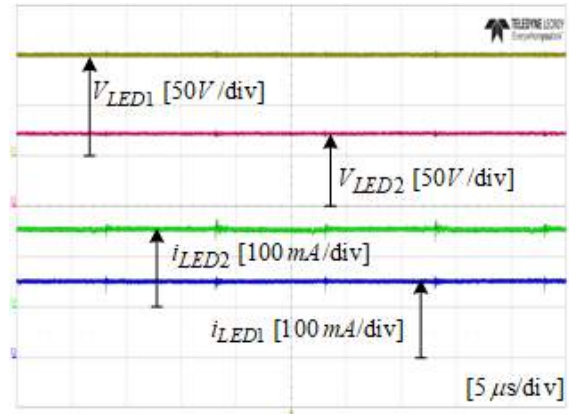
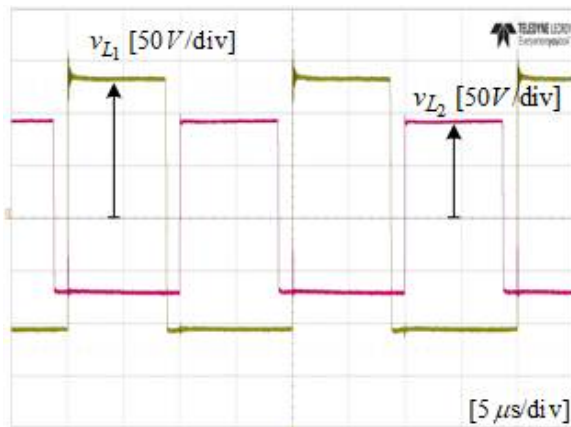
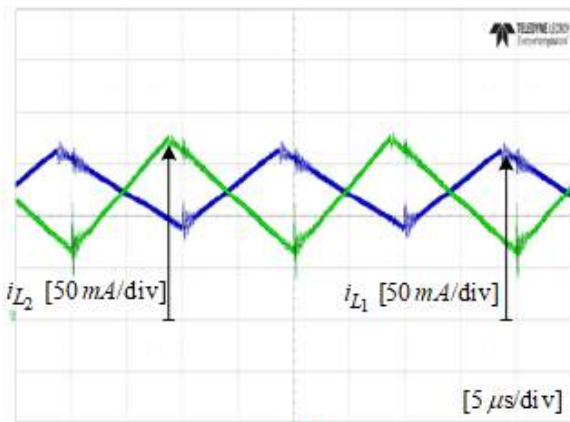


그림 10 $i_{ref} = 300\text{mA}$ 일 때 LED의 전압과 전류
Fig. 10 Experiment waveforms of the LED voltages and currents when $i_{ref} = 300\text{mA}$

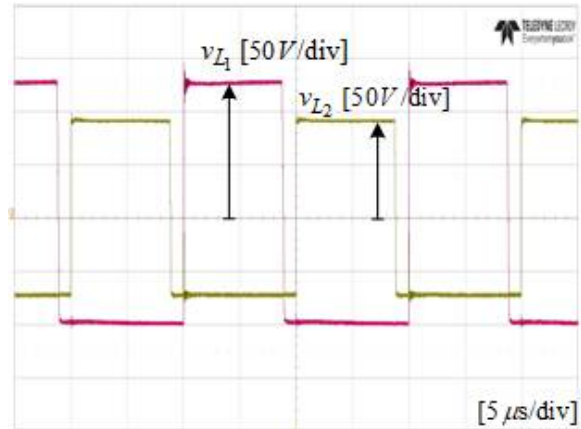


(a)

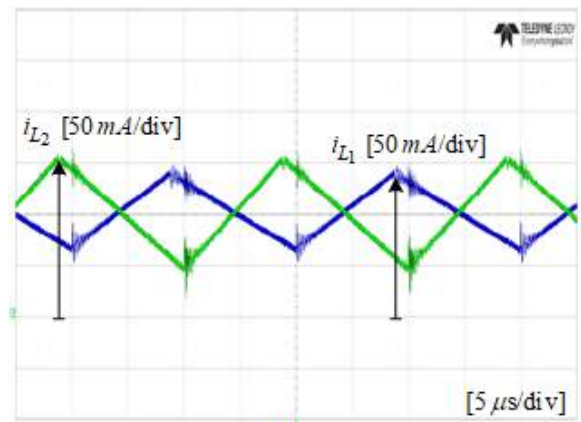


(b)

그림 9 $i_{ref} = 300\text{mA}$ 일 때 인덕터 전압과 전류
Fig. 9 Experiment waveforms of the inductor voltages and currents when $i_{ref} = 300\text{mA}$



(a)



(b)

그림 11 $i_{ref} = 200\text{mA}$ 일 때 인덕터 전압과 전류
Fig. 11 Experiment waveforms of the inductor voltages and currents when $i_{ref} = 200\text{mA}$

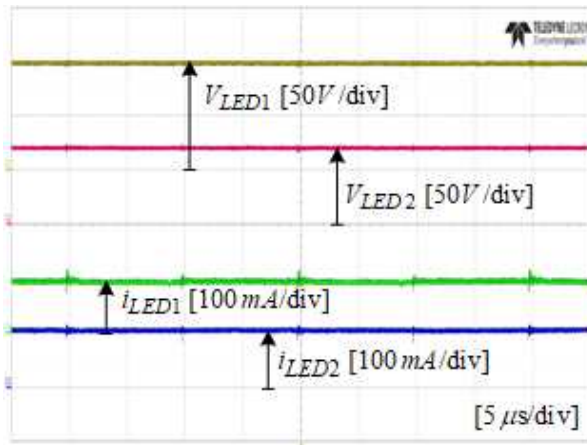


그림 12 $i_{ref} = 200\text{mA}$ 일 때 LED의 전압과 전류

Fig. 12 Experiment waveforms of the LED voltages and currents when $i_{ref} = 200\text{mA}$

의 전압(v_{L_1} , v_{L_2})과 전류(i_{L_1} , i_{L_2})를 나타내고 있다. 두 개의 인덕터 전압 파형이 서로 다르기 때문에 두 개의 인덕터 전류 리플은 서로 다르다. 하지만 인덕터 전류의 평균이 같은 것을 확인할 수 있다. 그림 10은 LED의 전압과 전류를 나타낸다. 출력 LED의 상태가 다르더라도 LED 1과 2의 전류가 150 mA로 동일한 것을 확인할 수 있다. 또한 LED 전류를 동일하게 맞추기 위해 출력 LED 전압이 3 : 2의 비를 가지는 것을 볼 수 있다. 그림 11과 12는 $i_{ref} = 200\text{mA}$ 로 설정한 상태에서의 실험 결과 파형이다. 그림 11은 인덕터 전압(v_{L_1} , v_{L_2})과 전류(i_{L_1} , i_{L_2})를 나타내고 있으며 그림 12는 LED 전압(v_{LED1} , v_{LED2})과 전류(i_{LED1} , i_{LED2})를 나타낸다. 이 또한 전류가 100 mA로 평형을 이루는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 기존 이중강압 dc-dc 컨버터를 2-채널 LED 구동 시스템에 적용한 LED 구동 회로를 제안하였다. 비록 2-채널 LED가 온도 및 다른 요인에 의해 가변성을 지니더라도 제안한 LED 구동 회로의 2-채널 LED 전류는 추가적인 제어나 소자 없이 이중강압 회로의 전류 평형 특성으로 인해 자동으로 평형을 이루게 된다. 즉, 하나의 전류제어기만 사용하여 두 개의 LED 전류를 제어할 수 있다. 이는 가격단가와 하드웨어의 크기 면에서 장점을 가진다. 또한 제안한 LED 구동회로는 기존의 벡 컨버터를 이용한 LED 구동 회로에 비해 작은 스위치 정격 전압을 가지고 있기 때문에 스위치의 가격단가를 낮출 수 있으며 스위칭 손실을 줄일 수 있다. 제안한 LED 구동 회로는 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다. (No. 20174030201490)

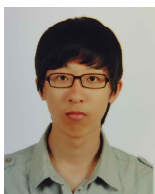
References

- [1] H. Shih-Chang, S. Ming-Hwa, H. Po-Yu, and C. Kuan-Cheng, "Auto tracking DC/DC converter for adaptive LED driving system," IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), pp. 1-4, May. 2017.
- [2] D. R. Weisz and F. A. Himmelstoss, "LED converter with limited duty cycle," 2014 ELEKTRO, pp. 406-410, May. 2014.
- [3] X. Chen, D. Huang, Q. Li, and F. C. Lee, "Multichannel LED driver with CLL resonant converter," IEEE J. Emerging Sel. Topics Power Electron., vol. 3, no. 3, pp. 589-598, Sep. 2015.
- [4] H. J. Chiu and S. J. Cheng, "LED backlight driving system for large-scale LCD panels," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 5, pp. 2751-2760, Oct. 2007.
- [5] Y.-K. Lo, K.-H. Wu, K.-J. Pai, and H.-J. Chiu, "Design and implementation of RGB LED drivers for LCD backlight modules," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 12, pp. 4862-4871, Dec. 2009.
- [6] K. Marn-Go, "Proportional-Integral (PI) Compensator Design of Duty-Cycle-Controlled Buck LED Driver," IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 7, pp. 3852-3859, Jul. 2015.
- [7] M. Tavazoei, "From traditional to fractional PI control: A key for generalization," IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 6, no. 3, pp. 41-51, Sep. 2012.
- [8] C.-Y. Park, J.-W. Song, J.-W. Yoo, "The reduction method of strings current unbalancing in LED lighting driving system," Journal of KIEE, vol. 27, no. 5, pp. 26-32, May. 2013.
- [9] S.-H. Lee, S.-H. Cho, C.-W. Roh, S.-S. Hong, S.-K. Han, "A new current-balancing multi-channel LED driver for a large screen LCD backlight unit," Journal of KIPE, vol. 15, no. 2, pp. 111-118, Apr. 2010.
- [10] H. Yuequan, M. M. Jovanovic, "LED Driver With Self-Adaptive Drive Voltage," IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, no. 6, pp. 3116-3125, Nov. 2008.
- [11] W. Jianfeng, Z. Junming, H. Xiucheng, and X. Lianghui, "A Family of Capacitive Current Balancing Methods for Multi-Output LED Drivers," Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp.

2040-2046, Mar. 2011.

- [12] L. Xueshan, Y. Qi, Z. Qun, X. Jianping, and Z. Guohua, "Single-Stage Single-Switch Four-Output Resonant LED Driver With High Power Factor and Passive Current Balancing," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 6, pp. 4566-4576, Jul. 2017.
- [13] K. I. Hwa and W. Z. Jiang, "Nonisolated Two-Channel LED Driver With Automatic Current Balance and Zero-Voltage Switching," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 12, pp. 8359-8370, Dec. 2016.
- [14] Y. Yuanmao, K. W. Eric, L. Jionggang, and W. Daohong, "Single-Switch Multichannel Current-Balancing LED Drive Circuits Based on Optimized SC Techniques," *IEEE Ind. Electron.*, vol. 62, no. 8, pp. 4761-4768, Aug. 2015.
- [15] Y. Jang, M. M. Jovanovic, and Y. Panov, "Multi-phase buck converters with extended duty cycle," in *Proc. 21st Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, pp. 38-44, Mar. 2006.
- [16] B. S. Oraw, and R. Ayyanar, "Voltage Regulator Optimization Using Multiwinding Coupled Inductors and Extended Duty Ratio Mechanisms," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 6, pp. 1494-1505, June. 2009.
- [17] Shenoy, P. S., M. Amaro, J. Morroni, and D. Freeman, "Comparison of a Buck Converter and a Series Capacitor Buck Converter for High-Frequency, High-Conversion-Ratio Voltage Regulators," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 10, pp. 7006-7015, Oct. 2016.

저 자 소 개



Kisu Kim

He received his B.S. degree in Electrical Engineering from Kyungpook National University, Daegu, Korea, in 2015 and his M. S. degree in Energy Engineering from Kyungpook National University, Daegu, Korea, in 2017. He is currently working towards his Ph.D. at the School of Energy Engineering, Kyungpook National University, Korea. His current research interests include magnetic design, buck and boost inverters, and three-phase transformer design.



Do Duc Tuan

He was born in Vietnam. He received his M.S degree in Electrical Engineering from ThaiNguyen University of Technology, Vietnam in 2012. He is currently working towards his Ph.D degree at the School of Energy Engineering at Kyungpook National University. His current research interests include high-frequency link converters, magnetically coupled converters and power conversion for renewable energy.



Heung-Geun Kim

He was born in Korea in 1956. He received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Seoul National University in 1980, 1982 and 1988, respectively. Since 1984, he has been with the Department of Electrical Engineering at Kyungpook National University, where he is currently a full professor and the director of the Microgrid Research Center. He was a Visiting Scholar at the Department of Electrical and Computer Engineering in the University of Wisconsin-Madison from 1990 to 1991, and at the Department of Electrical Engineering in the Michigan State University, USA from 2006 to 2007. His current research interests are ac machine control, PV power generation, and micro-grid system.



Honnyong Cha

He received his B.S. and M.S. degrees in Electronics Engineering from Kyungpook National University, Daegu, Korea, in 1999 and 2001, respectively, and his Ph.D. in Electrical Engineering from Michigan State University, East Lansing, Michigan, in 2009. From 2001 to 2003, he was a Research Engineer with the Power System Technology (PSTEK) Company, An-san, Korea. From 2010 to 2011, he worked as a Senior Researcher at the Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), Changwon, Korea. In 2011, he joined Kyungpook National University as an Assistant Professor in the School of Energy Engineering. His current research interests include high power dc-dc converters, dc-ac inverters, Z-source inverters, and power conversion for electric vehicles and wind power generation.