

조명용 RGB LED를 위한 저전압 스트레스 고효율 구동 회로

박규민, 한상규, 홍성수, 홍영근*, 이효범*, 이광일**, 노정욱
 국민대학교 전력전자연구소, *삼성전기(주) P&M 사업부, 페어차일드코리아 반도체(주)

Low Voltage Stress And High Efficiency Driver Circuit For Lighting Using RGB LED

Kyu-Min Park, Sang-Kyoo Han, Sung-Soo Hong, Young-Gun Hong*, Hyo-Bum Lee*,
 Kwang-Il Lee**, Chung-Wook Roh

Kookmin Univ. Power Electronics Center, *Samsung Electro-Mechanics Co., LTD, **FairChild Korea
 Semiconductor Co., LTD.

ABSTRACT

본 논문은 조명용 RGB LED 구동 장치를 위한 새로운 방식의 Two-stage RGB LED 구동 회로를 제안한다. 제안된 회로는 PFC Flyback Converter의 다중 출력을 이용하여 LED 구동 회로의 전압 스트레스를 줄이면서 효율을 높일 수 있는 새로운 방식의 LED 구동 회로이다. 제안된 회로는 Universal Input에서 25W 이상 조명 장치에 적용되는 IEC61000-3-2 Class C 규제를 만족하며, RGB LED의 개별적인 Digital Dimming을 사용하여 다양한 색을 구현할 수 있다. 본 논문에서는 제안된 회로의 동작 원리를 설명하고, 시뮬레이션 및 RGB LED에 실제 적용 실험하여 제안 회로의 유용성을 입증하였다.

1. 서론

현재 사용하는 조명기기는 여러 가지 다양한 종류가 있지만 향후 소형, 박형, 경량화, 장수명 및 다양한 색상으로 표현 가능하고, 현재 세계적으로 이슈화 되고 있는 친환경, 즉 수은이 없는 조명기기로 LED 조명이 각광 받고 있다. 특히 정량적인 밝기만을 제공하는 조명에서 인간의 감성적인 부분을 표현하기 위해 다채로운 색채를 이용한 조명이 요구되고 있다. 이러한 감성조명적인 조명 제품이 향후 1,2 년 내 시장에 많이 보급될 것으로 판단하고, 이에 여러 업체에서 연구 개발 중이다.

LED 구동 회로는 크게 Single-stage 방식과 Two-stage 방식 이렇게 두가지로 구분할 수 있다. Single-stage 방식은 저 가격화에 유리하지만 Dimming 시 역률 보정을 하지 못하여 25W 이상 조명기구에 요구되는 IEC61000-3-2 Class C 규제를 만족하지 못 한다. 반면, Two-stage 방식은 PFC단의 출력에 정전류 제어가 가능한 DC/DC단을 추가하는 방식으로 회로가 비교적 복잡하지만 조명용 제품에 필요한 절연, Dimming 시 역률 보정등 모든 규제를 만족한다. 하지만 LED 모듈과 같이 많은 LED를 직렬 구동하는 경우, 필요한 LED 구동 전압이 높

표 1 RGB LED가 각각 18EA 일 때의 Turn-on/off 전압

	Red LED	Green LED	Blue LED
ON	41.4 V	62.28 V	64.98 V
OFF	28.62 V	40.86 V	44.46 V

아저서 DC/DC단의 전력 효율 감소 및 고전압 소자 사용에 의한 단가 상승의 문제점이 있다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 조명용 RGB LED를 위한 저전압 스트레스 고효율 구동 회로를 제안한다. 제안하는 방법은 Two-stage를 기반으로 RGB LED 각각의 개별 Dimming을 보장하며, Dimming 시 역률 규제를 만족한다. 또한 DC/DC 단의 소자 내압을 감소시킬 수 있어 반도체 소자의 단가 저감이 가능하고 사용하

는 인덕터의 크기 및 부피가 저감되어 회로 전체의 효율이 개선되고 보드 가격 및 크기를 줄일 수 있어 LED SMPS 제품의 저 가격화에 기여할 수 있다.

2. 조명용 RGB LED를 위한 저전압 스트레스 고효율 구동 회로

2.1 RGB LED의 특성

LED가 Turn-on 되어 전력을 소비하면 LED junction 온도가 상승하게 되는데, LED는 junction 온도에 따라 VI 특성이 변하므로 온도에 따른 LED의 VI 특성을 파악하는 것이 중요하다.^[1] 온도 별 RGB LED의 특성을 파악하기 위해서 삼성전기의 RGB LED ("SLHNNRAL33ANT", "SLHNNRAL33ANT", "SLHNNBAL33ANT")를 온도 챔버에서 넣고 온도를 변화시켰을 때의 LED VI 특성을 파악하였다. RGB LED 각각 18EA를 기준으로 LED의 Turn-on/off 전압은 표 1과 같다.

2.2 조명용 RGB LED를 위한 저전압 스트레스 고효율 구동 회로

그림 1은 본 논문에서 제안하는 조명용 RGB LED를 위한 저전압 스트레스 고효율 구동 회로의 개념도이다. PFC Flyback을 이용하여 PFC 동작 및 절연 문제를 해결하고 V_{o1} 및 V_{o2} 의 두 개의 출력 전압을 구성한다. RGB LED는 PFC Flyback의 출력 전압 V_{o1} , V_{o2} 를 입력으로 갖는 Boost에 의해 동작한다. Boost는 각 LED의 정전류 및 Dimming 동작을 수행한다. LED는 Turn-on 전압 이상 인가되어야 전류가 흐르고 Turn-on 전압 이하에서는 전류가 흐르지 않는 특성이 있다. 이러한 특성을 이용하여 제안 회로는 해당 LED를 구동시키는 Boost 동작을 on/off 함으로써 Dimming 동작을 수행한다. 따라서 Boost가 동작하지 않을 경우 LED가 구동되지 않게 하기

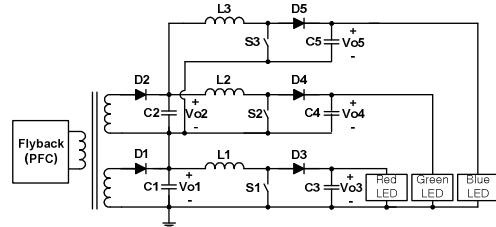


그림 1 조명용 RGB LED를 위한 저전압 스트레스 고효율 구동 회로

위해 각 Boost의 입력 전압이 LED의 Turn-on 전압보다 작아야 한다. 즉, V_{o1} 은 Red LED의 Turn-on 전압보다 작아야하고 $V_{o1}+V_{o2}$ 전압은 Blue LED의 Turn-on 전압과 Green LED의 Turn-on 전압보다 작아야한다.

제안 회로는 Green과 Blue LED를 Turn-on 시키기 위한 전압보다 Vo4와 Vo5의 크기가 작으므로 Green LED와 Blue LED를 구동시키기 위한 Boost 회로에 작은 내압의 소자를 사용할 수 있다. 또한 인덕터 양단의 전압 저감으로 동일한 전류 리플을 발생하기 위한 인덕턴스가 줄어들어 인덕터의 코어 부피 및 권선 수 저감이 가능하여 저 가격화에 기여할 수 있다.

기존 회로는 LED에 전달되는 모든 전력이 Boost를 통해서 전달되므로 전체 효율이 $\eta_1\eta_2$ 이다. 하지만 제안 회로는 PFC Flyback에서 k만큼 전력을 전달하고 나머지 $(1-k)$ 만큼의 전력을 Boost를 통해서 전달하므로 전체 효율은 $\eta_1\eta_2+k(1-\eta_2)\eta_1$ 이다. 즉, 제안 회로는 기존 회로에 비해 $k(1-\eta_2)\eta_1$ 만큼 효율이 상승한다.

2.2.1 PFC Flyback 회로의 설계

제안 회로는 PFC Flyback 회로를 사용하여 역률 보정 및 절연 문제를 해결한다. PFC Flyback의 Spec.은 표 2과 같다.

Universal Input을 만족하므로 $V_{in,min}$ 은 127V이고 최소 스위칭 주파수는 30kHz라고 설정하였다. Flyback의 1차측에 리플렉트되는 전압을 83V라고 설정하면 트랜스포머의 턴 비와 최소 Duty는 다음과 같다.^[2]

$$n = \frac{V_r}{V_o} = 2.08 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$D_{min} = \frac{nV_o}{nV_o + V_{ipk}} = 0.40 \quad \dots\dots\dots (2)$$

그림 2는 PFC Flyback의 입력 전압 및 전류를 나타낸다. 역률을 1로 가정하면 Power balance law에 의해 다음과 같다.

$$\frac{I_{ipk}}{\sqrt{2}} = \frac{P_o}{V_{irms}\eta} \quad \dots\dots\dots (3)$$

트랜스포머의 1차측 전류의 최대치 I_{Lpk} 는 다음과 같다.

$$I_{Lpk} = \frac{V_{ipk}}{L_m} D_{min} T_s \quad \dots\dots\dots (4)$$

한 주기 동안 입력 평균 전류의 면적은 L_m 에 흐르는 전류면적과 같으므로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$I_i(t) T_s = \frac{1}{2} I_{Lpk} D_{min} T_s \quad \dots\dots\dots (5)$$

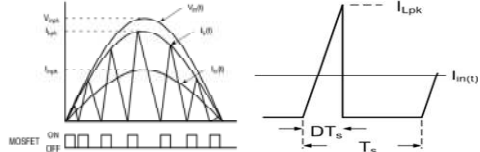


그림 2 PFC Flyback의 입력 전압 및 전류 파형
표 2 PFC Flyback 회로의 Spec.

V_i	90 ~ 264 V
V_{o1}	25 V
V_{o2}	13 V
I_{o1}	1.34 A
I_{o2}	1.89 A
f_{sw}	30 kHz

표 3 DCM Boost 회로의 Spec.

	Red	Green	Blue
V_i	25 V	13 V	13 V
V_o	41 V	37 V	40 V
I_o	0.35 A	0.35 A	0.35 A
f_{sw}	150 kHz	150 kHz	150 kHz

표 4 RGB LED를 구동하기 위한 각각의 DCM Boost 회로의 시비율, 인덕터 피크 전류 그리고 인덕턴스

	Red	Green	Blue
Duty	0.31	0.52	0.54
I_{Lpk}	1.44 A	2.49 A	2.69 A
Inductance	36.26 μ H	18.06 μ H	17.38 μ H

식 (4)와 (5)를 이용하여 Spec.에 주어진 최소 주파수를 갖는 L_m 은 다음과 같다.

$$L_m = \frac{1}{2} \frac{V_{ipk}}{I_{Lpk}} D^2 T_s = 312\mu H \quad \dots\dots\dots (6)$$

주어진 PFC Flyback의 Spec.을 이용하여 Control to Output 함수를 구하면 다음과 같다.^[3]

$$\frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_{cont}} = \eta \frac{KV_i V_r}{2R_s V_o} \frac{V_i}{V_r + V_i} \frac{R_o(1 + C_o R_{csr})}{1 + s C_o R_o} \quad \dots\dots\dots (7)$$

2.2.2 DCM Boost 회로의 설계

제안 회로는 정전류 제어 및 Dimming 동작을 Boost 회로에서 담당한다. Dimming 동작은 앞에서 설명한 바와 같이 Boost의 on/off를 통해서 Digital Dimming을 수행한다. 출력 캐패시터가 크다면 Boost 회로를 on에서 off로 했다고 해도 Boost 회로의 출력 전압이 변하지 않아 Dimming 동작이 제대로 동작하지 않으므로 Boost 회로의 출력 캐패시터의 크기는 작은 값을 갖게 한다. 출력 캐패시터가 작은 경우 출력 전압의 리플이 커지므로 이런 문제를 해결하기 위해 Boost의 동작 주파수를 높게 한다.

동작 주파수를 크게 하면 출력 캐패시터가 커진 것과 같은 효과를 얻어 정상 동작 시 출력 전압의 리플이 작아진다.

DCM Boost 회로의 Spec.은 표 3와 같다.

Boost 회로의 Spec.이 위와 같고 k를 0.8로 설정하면 Boost의 시비율과 인덕터 피크 전류, 인덕턴스는 다음과 같다.^[2]

$$D = \frac{k(V_o - V_i)}{V_o} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$I_{Lpk} = \frac{2I_o}{k - D} = 3.89A \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$L = \frac{V_i}{I_{Lpk}} D T_s \quad \dots\dots\dots (10)$$

위의 수식 (8),(9) 그리고 (10)을 이용하여 RGB LED 각각을 구동하는 DCM Boost 회로의 시비율과 인덕터 피크 전류, 인

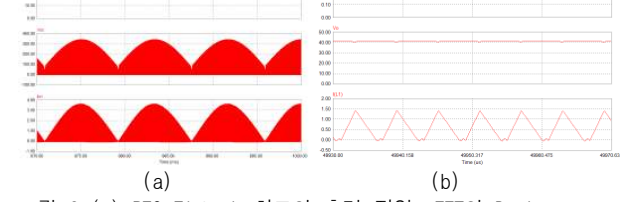


그림 3 (a) PFC Flyback 회로의 출력 전압, FET의 Drain-source

전압 그리고 1차측에 흐르는 전류 (b) DCM Boost 회로의 출력 전류, 출력 전압 그리고 인덕터 전류

덕턴스는 표 4과 같다.

주어진 Boost의 Spec.을 이용하여 Control to Output 함수를 구하면 다음과 같다.^[2]

$$\frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_{cont}} = \frac{1}{D} \frac{2V_o(M-1)}{(2M-1) + s(M-1)R_oC_o} \dots\dots\dots$$

$$\text{where } M = \frac{1 + \sqrt{2R_oD^2T_s/L}}{2}$$

(11)

2.2.3 제안 회로의 Simulation

앞에서 설계한 PFC Flyback과 DCM Boost 회로가 올바르게 설계되었는지를 알아보기 위해 앞에서 계산한 소자값을 사용하여 Psim Simulation을 수행하였다. PFC Control IC로 사용된 L6561과 Opto-coupler인 TLP421 그리고 PWM IC KA7552는 Psim에서 Subscript로 실제 IC와 동일한 동작을 하도록 제작을 했다. DCM Boost의 경우 Red LED를 구동하기 위한 회로를 대표로 Simulation하였다.

그림 3 (a)는 PFC Flyback 회로의 Simulation 결과 파형이다. 정전압 제어를 하면서 역률 보정 동작을 수행하고 있음을 보여준다. 그림 3 (b)는 DCM Boost 회로의 Simulation 파형이다. Red LED에 흐르는 전류를 0.35A로 일정하게 제어하고 있고 인덕터에 흐르는 전류가 DCM Mode로 동작하고 있음을 알 수 있다.

2.2.4 제안 회로의 실험 결과

설계한 값을 바탕으로 Psim Simulation을 수행해 본 결과 회로가 원하는 바대로 동작하고 있음을 확인하였으므로 실제 회로로 구현을 하여 회로의 동작을 확인하였다. RGB LED는 삼성전기의 "SLHNNR33ANT", "SLHNNG33ANT", "SLHNNB33ANT"을 각각 18EA 직렬로 사용하였다. PFC Flyback 회로의 PFC Control IC로는 ST사의 L6561을 사용하였다. 트랜스포머는 턴비가 50 : 15 : 9 : 10 이고, Lm값은 300μH이다. DCM Boost 회로의 PWM Control IC로는 삼성전기의 KA7552를 사용하였고, Red LED를 구동하기 위한 DCM Boost의 인덕턴스는 36μH를 사용하였고, Green과 Blue를 구동하기 위한 DCM Boost의 인덕턴스는 18μH를 사용하였다.

그림 4는 Universal Input에서 PFC Flyback의 역률 보정 동작 파형을 측정된 것이다. Psim Simulation에서 확인한 것과 같이 역률 보정이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

그림 5은 입력 전류의 고조파를 측정된 그래프로서 제안 회로가 25W 이상의 조명 기구에 적용되는 IEC61000-3-2 Class C 규제를 만족하고 있음을 보여준다.

그림 6은 RGB LED를 구동하기 위한 DCM Boost 회로에 의한 Digital Dimming 시 LED에 흐르는 전류 파형이다. 위의

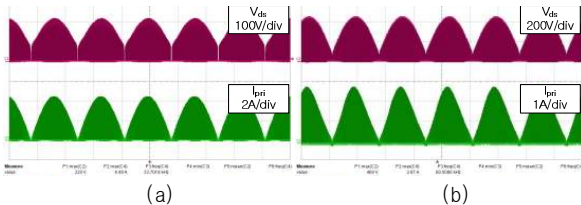


그림 4 (a) 입력 전압 90Vac에서 FET의 Vds와 1차측 전류
(b) 입력 전압 264Vac에서 FET의 Vds와 1차측 전류

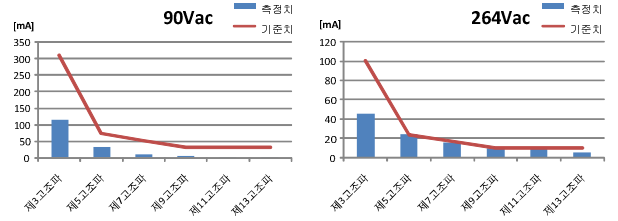


그림 5 입력 전압에 따른 고조파 측정 그래프



그림 6 Digital Dimming 시 RGB LED 각각에 흐르는 전류 파형 (50% Dimming 동작)

파형에서 Boost 회로가 동작할 때 LED의 전류가 350mA가 흐르고 Boost 회로가 동작하지 않을 때 LED의 전류가 흐르지 않음을 알 수 있다. 또한 RGB LED 모두 개별적으로 Digital Dimming이 가능하여 다양한 색의 조합을 통해 감성 조명으로서 제안 회로가 적합함을 알 수 있다

Psim Simulation과 실제 실험을 통하여 제안 회로가 25W이상의 조명기구에 적용되는 IEC61000-3-2 Class C 규제를 만족하고, RGB LED 각각의 개별적인 Digital Dimming이 가능하며 DCM Boost 회로에 사용되는 소자의 내압을 줄 일수 있음을 확인하였다.

3. 결론

본 논문에서는 조명용 RGB LED를 위한 저전압 스트레스 고효율 구동 회로를 제안하였다. 제안 회로는 PFC Flyback의 출력을 이용하여 역률 보정 및 절연 문제를 해결하고, DCM Boost 회로를 이용하여 RGB LED 각각에 흐르는 전류를 제어하면서 개별적인 Dimming 기능을 수행한다. 또한 PFC Flyback의 다중 출력을 이용하여 Green과 Blue LED를 구동하기 위한 Boost 회로의 소자 내압이 줄어들어 고성능 고효율의 소자를 사용하여 가격 및 발열 저감, 효율 상승을 이룰 수 있으며, 인덕턴스의 감소로 인한 부피 및 원가 저감을 이룰 수 있는 장점이 있다. 이를 Psim Simulation과 실제 실험을 통하여 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 장우진 외, "고출력 LED 및 고체 광원 조명 기술", 아진
- [2] Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics" : Second Edition
- [3] 정영진, 박규민 외, "BCM PFC 플라이백 컨버터 회로의 모델링 및 설계", 전력전자학회