

파워 LED의 수학적 모델링 및 정전류 적응 제어기 설계에 관한 연구

(A Study on the Mathematical Modeling and Constant Current Adaptive Controller Design for Power LEDs)

김용석* · 김영태**

(Eung-Seok Kim · Young-Tae Kim)

Abstract

In this paper, a mathematical model of the power LED system including the drive circuit will be presented to control the power LEDs current. Using this mathematical model, the constant current adaptive controller will be designed. A constant current drive circuit for power LEDs will be configured using Buck-type converter. Precise constant current controller design is enabled by presenting the mathematical model of power LEDs including the current driving circuits. Using the mathematical model of power LEDs and its drive circuits, the constant current adaptive controller will be designed to obtain the robustness for the parameter uncertainties. In order to verify the validity of the proposed controller, computer simulations are performed.

Key Words : Power LED, Buck Converter, Current Control, Adaptive Control

1. 서 론

1.1 연구의 배경

최근 국내외적으로 현재 사용되고 있는 조명을 Power LED로 교체함으로써 낮은 전력소모와 현저히 긴 수명으로 많은 에너지를 절약함으로써 온실가스를 감축하려는 연구가 진행되고 있다. 단적으로 국내 조명의 약 30%를 Power LED로 교체할 경우, 매년 160

억[kW/h]의 전력절감과 약 680만톤의 이산화탄소를 절감할 수 있다. 또한 빛의 조도, 휘도, 파장 등 여러 부분을 제어할 수 있어 이를 통한 응용부분 또한 확대 되고 있다.

Power LED의 단점으로는 발열이 심하고 이로 인한 반도체의 특성열화로 인하여 전류량이 변화하고 밝기가 변화한다. 또한 기존의 정전압회로를 통하여 Power LED를 구동할 경우 밝기가 불안정하여 조명으로써의 역할을 할 수 없을 뿐만 아니라 Power LED 자체가 소손될 수 있다. 이를 방지하기 위하여 Power LED의 정전류 구동은 필수 불가결한 요소이고 현재 Power LED사업에 있어 정전류 구동 드라이버가 가장 취약한 부분이라 할 수 있다.

기존의 Power LED의 정전류 구동 시스템은 LLC

* 주저자 : 한라대학교 제어계측공학과
** 교신저자 : 강릉원주대학교 전기공학과
Tel : 033-760-1248, Fax : 033-760-1241
E-mail : eskim@halla.ac.kr
접수일자 : 2011년 7월 11일
1차심사 : 2011년 7월 20일
심사완료 : 2011년 8월 12일

구동방식과 BUCK 타입 구동방식이 있다[1-9]. 이들 방식은 모두 설계파라미터를 기준으로 전류제어를 위한 스위칭 주파수를 고정하거나, 단순 비례-적분 제어를 이용하고 있다. 따라서 조도 및 파장을 정밀 제어할 필요가 있는 시스템에는 적용하더라도 성능을 보장하기 어려운 문제가 있다. 따라서 Power LED 및 구동부에 대한 정확한 수학적 모델을 기반으로 정밀한 제어시스템을 설계할 필요가 있다.

본 논문에서는 Power LED의 정전류 구동을 위한 제어기 설계 및 구현 문제를 다루고자 한다. LED의 정전류 구동을 위해서는 정전류 구동부, 전류측정부 및 전류제어부가 적절히 설계되고 작동될 수 있어야 한다. LED구동 전류는 벡(buck) 방식을 이용하여 구현한다. LED 및 구동회로의 파라미터 불확실성을 고려한 수학적 모델을 정립하고, 이를 적용 전류제어기 설계에 적용한다. 전체 시스템의 구성은 디지털제어기와 아날로그회로가 혼합된 형태이다. 본 논문의 구성은 제2장에서 LED 및 벡 컨버터의 비선형특성을 고려한 제어기설계 모델을 제시하고, 제3장에서 적용 전류제어기 설계문제를 다루며, 제4장에서 시뮬레이션 결과를 검토하고, 제5장에서 결론을 맺기로 한다.

2. LED 전류제어 모델

LED의 정전류 제어를 위해서 여러 종류의 컨버터를 설계에 반영할 수 있으나 본 논문에서는 벡 타입(Buck Type) 컨버터를 적용하기로 한다. 벡 타입 DC/DC 컨버터는 스위치의 ON/OFF 동작을 반복하므로 회로는 비선형이 되고 동작해석의 모델링은 매우 복잡하다. 본 논문에서는 회로평균화기법을 이용하여 컨버터를 모델링한다.

그림 1은 Buck 컨버터의 등가회로를 나타내고 있다. 여기서 입력전압은 DC-Link의 전압인 V_{DC} 이며, 출력전압은 커패시터 C 의 양단 전압 v_c 가 된다. 그림 1에서 R_s 는 전류측정용 저항이고, R_L 은 LED등가저항이다. 커패시터의 등가저항과 인덕터의 등가저항은 LED등가저항 R_L 및 전류측정저항 R_s 에 포함된 것으로 간주하기로 한다[1-5].

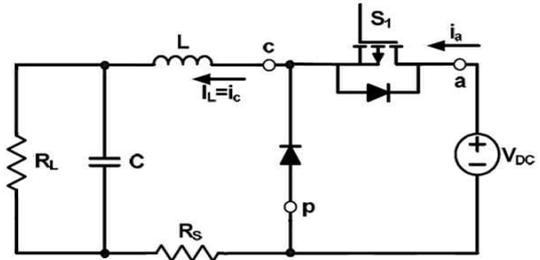


그림 1. 벡 컨버터를 이용한 LED 구동 회로
Fig. 1. The power LED drive circuit using buck type converter

스위치 S_1 의 입력과 다이오드의 입력, 스위치와 다이오드의 연결점을 그림 1과 같이 a, p, c 단자로 놓고 각각에 전압과 전류를 구하면 식 (1), 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$i_a(t) = \begin{cases} i_c(t) & \text{if } S_1 \text{ ON} \\ 0 & \text{else } S_1 \text{ OFF} \end{cases} \quad (1)$$

$$v_{ap}(t) = \begin{cases} v_{cp}(t) & \text{if } S_1 \text{ ON} \\ 0 & \text{else } S_1 \text{ OFF} \end{cases} \quad (2)$$

이를 스위치의 듀티비 D 를 적용하여 한 주기 동안의 평균을 구하면 식 (3), 식 (4)를 도출할 수 있다.

$$i_a = D i_c \quad (3)$$

$$v_{ap} = D v_{cp} \quad (4)$$

v_{cp} 를 입력전압으로 보고 식 (4)를 이용하면 위의 그림 1의 회로를 다음의 그림 2와 같이 다시 그릴 수 있다. 이때 v_{cp} 는 회로에 인가되는 평균전압으로 간주할 수 있다[1].

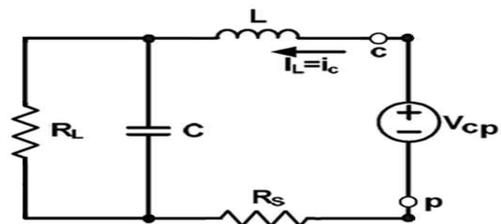


그림 2. LED 구동 등가회로
Fig. 2. The power LED drive equivalent circuit

그림 2에서 LED 구동부의 입력전압 v_{cp} 와 출력전류 i_L 과의 관계는 아래의 식과 같이 인덕턴스(L)와 전류 측정저항(R_S)의 합성임피던스 Z_L 과 커패시터(C)와 LED저항(R_L)의 합성 임피던스의 Z_{CR} 와의 관계로부터 나타낼 수 있다.

$$\frac{i_L}{v_{cp}} = \frac{1}{Z_L + Z_{CR}} \quad (5)$$

$$Z_L = sL + R_S \quad (6)$$

$$Z_{CR} = \frac{R_L}{1 + sCR_L} \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)을 이용해서 식 (5)를 정리하면 입력 전압에 따른 출력전류의 변동을 알 수 있다.

$$\frac{i_L}{v_{cp}} = \frac{CR_L s + 1}{LCR_L s^2 + (L + CR_L R_S)s + R_S + R_L} \quad (8)$$

전류제어기 설계모델 표현식을 이용해 위의 식 (8)을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{y}{u} = \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} \quad (9)$$

여기서 $y = i_L$, $u = v_{cp}$, $b_1 = \frac{1}{L}$, $b_0 = \frac{1}{LCR_L}$,
 $a_1 = \frac{L + CR_L R_S}{LCR_L}$, $a_0 = \frac{R_S + R_L}{LCR_L}$ 이다.

LED 구동용 벽 컨버터 회로를 구성할 때 커패시터(C)를 생략할 수도 있는데, 이는 실제로 전체 시스템의 전류특성에는 큰 변화가 없기 때문이기도 하다. 그러나 커패시터를 생략할 경우에는 인덕터(L) 용량을 충분히 크게 설계해야 한다[6]. 또는 커패시터의 크기는 인덕터와 저항 등에 비해 상대적으로 매우 작으므로 실제 회로 구현 시 커패시터를 포함하더라도 제어기 설계를 위한 모델링에서는 무시할 수도 있다. 이 경우 식 (7)의 $Z_{CR} = R_L$ 이 되므로 식 (9)의 제어기 설계모델은 다음과 같이 1차 시

스템으로 저차화할 수 있다.

$$\frac{y}{u} = \frac{1}{Ls + R_S + R_L} = \frac{b_0}{s + a_0} \quad (10)$$

여기서 $y = i_L$, $u = v_{cp}$, $b_0 = \frac{1}{L}$, $a_0 = \frac{R_S + R_L}{L}$ 이다.

3. 정전류 적응제어기 설계

이 절에서는 기준모델 적응제어기[7-8]를 이용한 LED 정전류 구동 제어기를 설계하기로 한다. 위의 식 (10)의 저차화 시스템 모델에 대하여 다음의 가정이 성립한다.

가정 :

(A1) 시스템

단일입출력 선형시스템이고 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{y}{u} = P(s) = k_p \frac{n_p(s)}{d_p(s)} = k_p \frac{1}{s + a_0} \quad (11)$$

시스템은 strictly proper하고 최소위상이다. 여기서

$$k_p = b_0 = \frac{1}{L}, \quad a_0 = \frac{R_S + R_L}{L} \text{ 이다.}$$

(A2) 기준모델

$$\frac{y_m}{r} = M(s) = k_m \frac{n_m(s)}{d_m(s)} = k_m \frac{1}{s + a_{m0}} \quad (12)$$

$M(s)$ 의 차수는 $P(s)$ 와 같으며, 안정하고 최소위상이다.

본 논문에서는 기준모델 적응제어기를 다음과 같이 설계하기로 한다.

$$u = c_0 r + \frac{\hat{c}(s)}{\hat{\lambda}(s)}(u) + \frac{\hat{d}(s)}{\hat{\lambda}(s)}(y) = c_0 r + d_0 y \quad (13)$$

여기서 c_0 는 상수이고, $\hat{c}(s)$, $\hat{d}(s)$ 그리고 $\hat{\lambda}(s)$ 는 각

각의 차수가 n-2, n-1 그리고 n-1인 다항식이다. 따라서 식 (11)로 주어진 LED 구동시스템에 대해서 $\hat{c}(s) = 0$, $\hat{d}(s) = d_0$ 그리고 $\hat{\lambda}(s) = 1$ 로 설계한다. 위의 식 (13)에서 전달함수로 표현된 부분은 다음과 같이 미분방정식을 이용해 구현할 수 있다.

$$u = c_0 r + d_0 y = \theta^T w \tag{14}$$

여기서 $\theta^T = [c_0 \ d_0]$ 이고, $w^T = [r \ y]$ 이다. 위의 식 (14)를 식 (10) 또는 식 (11)의 시스템에 대입해서 정리하면 다음과 같다.

$$y = \frac{b_0 c_0}{s + (a_0 - b_0 d_0)} r \tag{15}$$

위의 식 (15)의 전달함수가 식 (12)의 기준모델의 전달함수와 같기 위한 조건은 아래와 같다.

$$c_0 = k_m / k_p = k_m / b_0, \tag{16a}$$

$$d_0 = (a_0 - a_{m0}) / b_0 \tag{16b}$$

만일 시스템 파라미터를 정확히 알 수 있다면, 위의 식 (16)을 이용해서 식 (14)의 제어입력을 계산할 수 있다. $b_0 (= 1/L)$ 는 비교적 정확히 알 수 있는 값이지만, $a_0 (= (R_s + R_L)/L)$ 는 LED의 임피던스 R_L 이 시스템 상태에 따라 조금씩 변하는 값이기 때문에 정확한 값을 알기는 어렵다. 물론 LED의 양단 전압과 구동 전류를 정확히 측정한다면 매 순간 변동하는 R_L 을 알 수는 있겠지만, 이를 직접 측정할 수 있도록 회로를 구성하고, 아날로그 측정값을 디지털 값으로 정확히 변환해서 제어기설계에 반영하고자 하더라도 다소의 오차는 감수해야 하며, 이러한 불확실한 요소를 고려하여 제어기를 설계하는 것이 시스템 구현을 위해서는 반드시 필요하다고 할 수 있다. 시스템 파라미터 a_0, b_0 의 정확한 값을 모를 경우에 파라미터 적응치를 도입할 수 있다. 실제 파라미터에 대한 적응 파라미터를 $\hat{\theta}^T = [\hat{c}_0 \ \hat{d}_0]$ 로 정의하고 식 (14)의 제어기를 적응제어기로 대체하면

$$u = \hat{c}_0 r + \hat{d}_0 y = \hat{\theta}^T w \tag{17}$$

이 된다. 출력오차를 $e_0 = y - y_m$ 으로 정의하고, 식 (17)을 식 (11)의 시스템에 대입해서 정리하면 오차 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{e}_0 = -a_{m0} e_0 + b_0 \tilde{\theta}^T w \tag{18}$$

여기서 $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$ 는 파라미터 적응오차이다. Lyapunov 후보 함수를 $W = \frac{1}{2} e_0^2 + \frac{b_0}{2g} \tilde{\theta}^T \tilde{\theta}$ 와 같이 정의하면 그 1계 도함수는

$$\dot{W} = -a_{m0} e_0^2 + b_0 \tilde{\theta}^T \left\{ w e_0 + \frac{1}{g} \dot{\tilde{\theta}} \right\} \tag{19}$$

가 된다. 여기서 g 는 적응이득으로 양의 상수이다. 파라미터 적응칙은 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$\dot{\tilde{\theta}} = -g w e_0 \tag{20}$$

위의 식 (20)을 풀어서 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\dot{\hat{c}}_0 = -g e_0 r \tag{21a}$$

$$\dot{\hat{d}}_0 = -g e_0 y \tag{21b}$$

식 (20)을 식 (19)에 대입해서 정리하면

$$\dot{W} \leq -a_{m0} e_0^2 \tag{22}$$

가 된다. 위의 결과로부터 오차가 점근적으로 '0'으로 수렴하게 됨을 알 수 있으며, 전체 시스템 또한 점근적으로 안정함을 알 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과검토

이제 앞에서 언급한 적응제어기에 대한 타당성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 알아보기로 한다. 적응제어기를 다시 정리하면 다음의 표 1과 같다.

표 1. 시스템 파라미터 및 제어기 수식
Table 1. The system parameters and the equations of the controller

파라미터	$L = 300[\mu H], C = 0[F], R_S = 0.15[\Omega], R_L = 10[\Omega]$	
제어대상	$\frac{y}{u} = k_p \frac{1}{s + a_0}$	$k_p = 3333.3, a_0 = 33833.3$
기준모델	$\frac{y_m}{r} = k_m \frac{1}{s + a_{m0}}$	$k_m = 1000, a_{m0} = 1000$
제어기	$u = \hat{c}_0 r + \hat{d}_0 y$	
적응칙	$\begin{aligned} \dot{\hat{c}}_0 &= -g e_0 r \\ \dot{\hat{d}}_0 &= -g e_0 y \end{aligned}$	$g = 30000$

시스템 파라미터는 참고문헌 [6], [9]에서 사용한 것과 동일하다. 미분방정식은 계산시간을 줄이기 위하여 가장 간단한 오일러 공식을 이용하여 해를 구하였다. 제어대상 플랜트의 적분간격은 $0.1[\mu sec]$ 로 하였고, 기준모델과 제어기 및 적응칙은 모두 $0.1[msec]$ 로 하였다. LED 구동부는 일반적인 백 타입 컨버터와 FET 스위치를 적용하였고, 전류의 측정은 검출저항 양단 전압을 측정하여 환산하는 방식을 채택하였다. 전류 측정치는 ADC로 입력하여 적응제어 알고리즘에 적용하고 연산 결과는 PWM 듀티비로 환산하는 것으로 설계하였고, PWM 듀티비 분해능은 $10[bit]$ 로 설정하였다.

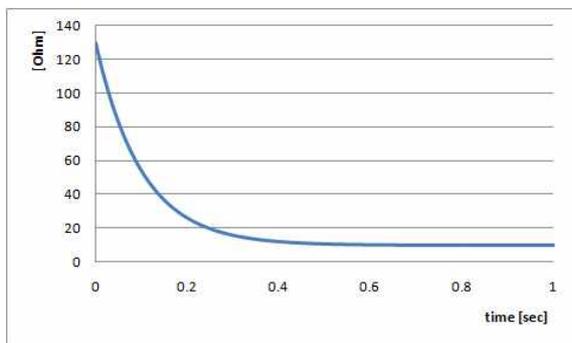


그림 3. 파워 LED의 임피던스
Fig. 3. The impedance of power LED

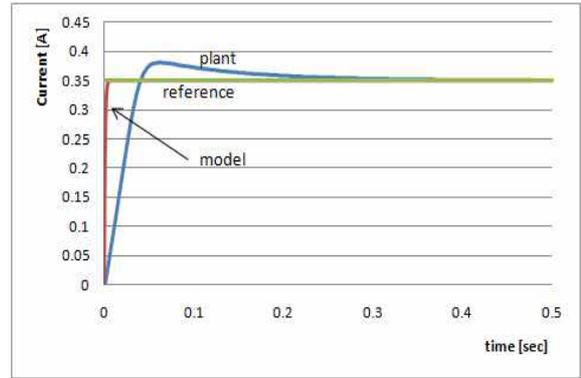


그림 4. 기준모델 및 시스템의 출력 전류
Fig. 4. The output currents

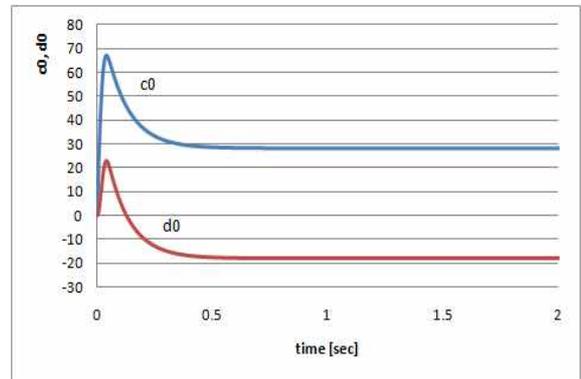


그림 5. 파라미터 추정치
Fig. 5. The parameters estimates

그림 3은 파워 LED의 임피던스 정규치가 $R_L = 10[\Omega]$ 일 때의 시간에 따른 임피던스 변동을 보여주고 있다. 본 시뮬레이션에서 사용한 파워 LED(Golden Dragon LUW W5AM)의 V-I 특성 및 시간에 따른 임피던스 변동 특성을 고려하여 변동패턴을 구성하였다. 그림 4는 시간에 따라 파워 LED의 임피던스가 변동할 때의 시스템의 출력전류를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 LED 시스템 시작 직후 약 $7.5[msec]$ 이후부터 기준입력(350 mA)를 잘 추종하고 있다. 적응칙의 이득(g)을 더 크게 선정할 수 있다면 추종시간은 더 짧아 질 수 있으나 본 논문에서 사용한 C-컴파일러의 정수형 변수의 허용크기(≤ 32767) 내에서 이득 값을 정하였다. 그림 5는 파라미터 추정치를 나타내고 있다. 실제 값과는 다소 차이가 나지만 파워 LED의 임피던스 변동을 잘 추정하고 있음을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 Power LED의 정전류 구동을 위한 제어기 설계문제를 다루었다. LED의 정전류 구동을 위한 정전류 구동부, 전류 측정부 및 전류제어부의 설계 시 LED 비선형 임피던스 특성을 고려하였다. LED의 비선형특성을 고려한 수학적 모델을 정립하고, 이를 파라미터 적응형 전류제어기 설계에 적용하였다. LED구동 전류는 벡(buck) 방식을 이용하여 설계하였다. LED 조명 시스템의 장시간 작동에 의한 L, C, R의 열화변형 및 LED 구동전류 변동에 의한 LED 임피던스 변동 등 LED 구동시스템의 파라미터 변동 영향을 고려한 적응제어기의 타당성을 컴퓨터시뮬레이션을 통해 분석 검토하였다. LED의 임피던스 변동에도 적응제어기의 파라미터 추정 및 정전류 구동특성이 원하는 특성으로 빠르게 수렴하는 것을 볼 수 있었다. 전체 시스템의 파라미터 및 상태가 변동하더라도 LED 구동전류는 일정하게 기준전류를 유사하게 추종함을 확인할 수 있었다.

References

[1] R. Sheehan, "Current-Mode Modeling for Peak, Valley and Emulated Control Methods-Reference Guide for Fixed-Frequency, Continuous Conduction-Mode Operation," National Semiconductor, <http://www.tedonline.com>, July 2007.

[2] A.F. Witulski and R.W. Erickson, "Design of the Series Resonant Converter for Minimum Stress", IEEE Trans on Aerosp. Electron System, Vol. AES-22, pp.356-363.

[3] B.Yang, F.C.Lee et al., "Over current Protection Methods for LLC Resonant Converter", APEC 2003,pp605-609.

[4] Yilei Gu, Zhengyu, et al, "Three-level LLC series resonant DC-DC converter". IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 20, July 2005, pp781-789.

[5] Sheehan, Robert, "Emulated Current Mode Control for Buck Regulators Using Sample and Hold Technique," Power Electronics Technology Exhibition and Conference, PES02, October 2006.

[6] Stephen Bowling, A Digital Constant Current Power LED Driver, Microchip Technology Inc. Application Notes AN1138, November 2007.

[7] S. Sastry and M. Bodson, Adaptive Control - Stability, Convergence, and Robustness, Prentice-Hall Advanced Reference Series, 1989.

[8] K. S. Narendra and A. M. Annaswamy, Stable Adaptive Systems, Prentice-Hall International Editions, 1989.

[9] C. J. Kim, N. J. Choi, H. J. Lee, E. S. Kim, "A Digital LED Controller design with Constant Current", KIEE Proceeding, CD PEP 34, Jul. 2009.

◇ 저자소개 ◇



김응석 (金應錫)

1962년 11월 9일생. 1993년 2월 한양대학교 전기공학과 졸업, 공학박사. 1993~1994년 한국과학기술연구원 Post Doc. 1994~1999년 삼성종합기술원 전문연구원. 1999년~현재 원주 한라대학교 제어계측공학과 부교수.



김영태 (金永泰)

1960년 1월 29일생. 1996년 8월 한양대학교 전기공학과 졸업(박사). 1997년 8월~현재 국립 강릉원주대학교 전기공학과 교수.