
디지털 방식을 이용한 LED 구동 드라이브 설계

이상훈* · 송성근**

Design of a LED driver using digital control method

Sang-Hun Lee* · Sung-Geun Song**

이 논문은 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2011T100200304)

요 약

LED는 기존 광원에 비하여 낮은 전력 소모량과 긴 수명, 작은 크기 등의 장점으로 예상보다 더 큰 성장을 가져올 것이라는 전망도 있다. LED 조명시스템에서 LED를 동작시키기 위해서는 구동 시스템이 필요하다. 대용량에서는 Switched Mode Power Supply (SMPS)가 Linear Regulator 보다 효율이 높기 때문에 주로 사용되고, 아날로그 방식 혹은 디지털 방식으로 이를 제어하고 있다. 디지털 제어방식은 중앙처리장치인 MCU나 DSP가 기존의 아날로그 제어 칩에 비해 단가가 비싸기 때문에, SMPS 시장에 진입이 쉽지 않았다. 하지만 LED 조명시스템처럼 하나의 MCU안에 다양한 디지털 제어 기능들을 통합시켜 전체 시스템을 구현함으로써 이득을 취할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 디지털 제어방식을 적용함에 있어 저가형 MCU를 이용하여 LED 구동 전류를 개선할 수 있는 알고리즘을 제안하고자 한다.

ABSTRACT

A drive system is necessary to operate LED by an LED illumination system. Because Switched Mode Power Supply (SMPS) is higher in efficiency in the large capacity than Linear Regulator, it is used mainly and controls this in an analog form or digital method. A MCU and a DSP of the digital control central processing unit were higher in a unit price than existing analog control chip, so that an approach was not easy for application of SMPS. But it can take the earnings by it lets you integrate various digital control features like an LED illumination system in one MCU, and realizing a whole system. In this paper, we suggest the algorithm that can improve LED driving current in applying such a digital control method using low-priced type MCU.

키워드

발광다이오드, LED 조명, 디지털 제어, MCU

Key word

LED(Light Emitting Diode), LED Light, Digital control, MCU(Main Control Unit)

* 정회원 : 한국승강기대학교(purme@kic.ac.kr)

접수일자 : 2012. 07. 02

** 정회원 : 전자부품연구원

심사완료일자 : 2012. 09. 09

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2012.16.9.2003>

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

LED 조명시스템에서 LED를 동작시키기 위해서는 구동 시스템이 필요하다.[1][2] 대용량에서는 Switched Mode Power Supply (SMPS)가 Linear Regulator 보다 효율이 높기 때문에 주로 사용되고, 아날로그 방식 혹은 디지털 방식으로 이를 제어하고 있다. 기존의 아날로그 제어 방식은 무엇보다 값이 싸고, 오랫동안 사용되어왔기 때문에 많은 디자인 가이드라인들이 있고, 따라서 구현이 용이한 장점이 있다. 그러나 구현을 위해서는 많은 소자들이 사용되기 때문에 시스템이 커지며 제어의 용이성이 떨어진다. 그에 반해 디지털 제어방식은 아날로그 방식과는 사뭇 다른 특징들을 갖는다. 다양한 방식의 제어 알고리즘을 적용할 수 있으며, 엔지니어 입장에서 LED 숫자의 변화 또는 구동 플랜트 숫자의 변화 등, 시스템 파라미터 변동에 대해 대처가 쉽다. 더욱이, 여러 가지 상황들을 모니터링 할 수 있어, 사용자로 하여금 신뢰성을 갖게 하기 쉽다. 또한 디지털은 아날로그 방식과 달리 유저인터페이스를 만들기가 매우 쉽다. 원하는 형태의 입력방식을 선택할 수 있으며, 통신이나 디지털 신호를 사용해 상위제어기로의 연결이 쉽다. 이러한 장점에도 불구하고, 디지털 제어방식은 중앙처리장치인 MCU나 DSP가 기존의 아날로그 제어칩에 비해 단가가 비싸기 때문에, SMPS 시장에 진입이 쉽지 않았다. 하지만 LED 조명시스템처럼 하나의 MCU안에 다양한 디지털 제어 기능들을 통합시켜 전체 시스템을 구현함으로써 이득을 취할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 디지털 제어방식을 적용함에 있어 저가형 MCU를 이용하여 LED 구동 전류를 개선할 수 있는 알고리즘을 제안하고자 한다.

II. 본 론

2.1. LED 구동 드라이브

기존의 LED 구동 드라이브의 경우 전류형 방식인 부스트 컨버터를 주로 많이 이용하고 있다.[3] 그러나 부스트 컨버터에는 몇가지 단점을 가지고 있다. 원하는 전류가 흐르도록 제어하기 위해서는 용량이 큰 캐패시터를 사용하여야 한다. 이 캐패시터를 충전 혹은 방전하면서 전류의 오버슈트나 긴 과도 구간 때문에 동적 특성이나 빠진다. 부스트 컨버터의 동작모드에는 크게 두 동작 모

드, Continuous Conduction Mode (CCM)과 Discontinuous Conduction Mode (DCM)가 있다. CCM에서 큰 인덕턴스를 사용하면, 전류의 리플을 줄일 수 있는 장점이 있고, 이것은 적은 conduction loss와 빠른 충전과 방전을 위해 작은 output 캐패시터를 사용할 수 있다. 그러나, di/dt 특성이 느리고, 제어 측면에서는 우측에 영점이 위치하기 때문에, 그림 1에서처럼 전류가 크게 튀는 오버슈트가 발생한다. 그림 1의 아래쪽은 오버슈트 부분을 확대한 것이다.

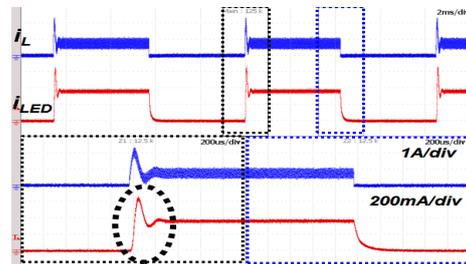


그림 1. CCM모드에서의 전류 파형
Fig. 1 Current wave of CCM mode

반면에 DCM에서는 CCM과는 사뭇 다른 경향을 보인다. 작은 인덕턴스 때문에 큰 di/dt 특성은 오버슈트 없이 곧바로 정상 상태에 이르게 한다. 그러나, 작은 인덕턴스로 인해 큰 전류 리플이 발생한다.

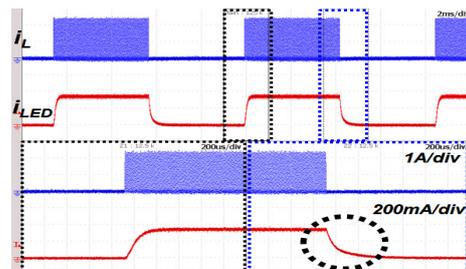


그림 2. DCM모드에서의 전류 파형
Fig. 2 Current wave of DCM mode

이것은 큰 conduction loss와 큰 output 캐패시터를 요구한다. 이런 큰 캐패시터는 그림2에서처럼 긴 과도 구간을 필요로 한다. 이들은 광량이 전류의 의해 비례하는 LED의 경우 조명 품질에 영향을 끼쳐 플리커와 같은 빛의 깜박거림 현상을 일으키는 주요 요인이 된다.

output 캐패시터에 의한 원치 않는 동적 특성 때문에, 그림 3에서처럼 산업계에서는 LED 모듈에 스위치를 추가하여 동작시키는 방법을 사용하고 있다. 이 방법으로 스위치가 켜지고 꺼짐에 따라 LED 모듈 역시 켜지고 꺼짐을 반복하게 된다. 이것은 기존에 LED의 dimming을 위해서 부스트 컨버터의 output 캐패시터를 충전하고 방전하는 것보다 더 효율적이다. 이렇게 dimming 스위치를 첨가함으로써 컨버터의 output 캐패시터의 전압 레벨은 거의 일정하게 유지되고, 캐패시터의 과도 구간은 최소가 된다. CCM과 DCM의 두 가지 모드에 대한 파형이 그림 4에 나타나 있다.

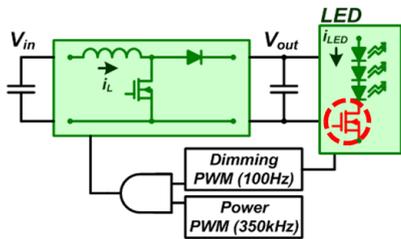


그림 3. Dimming 스위치와 부스트 컨버터
Fig. 3 Dimming switch and Boost converter

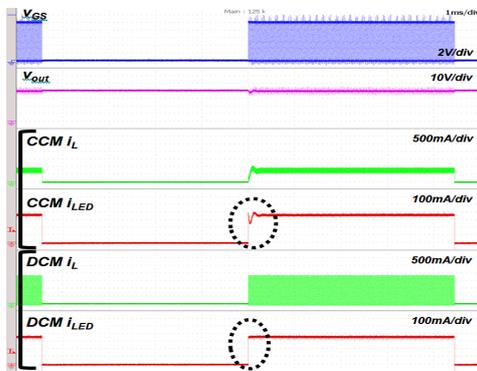


그림 4. Dimming 스위치와 부스트 컨버터에서의 전류 파형
Fig. 4 Current wave of Dimming switch and Boost converter

그러나 여전히 우반구에 영점이 위치하기 때문에 CCM에서는 전류의 언더슈트가 발생하고 이는 dimming resolution에 왜곡이 만든다. 따라서 DCM 동작+dimming switch 조합이 색 제어에 있어서 더 유리하다.

2.2. 기존 디지털 제어의 문제점

DCM 동작+dimming switch 조합처럼 별도의 스위치가 첨가하지 않고서도 동적 특성을 향상시키기 위해서는 다른 접근이 필요하다. 그것은 MCU를 이용한 디지털 제어 시스템에서 구현가능한데, 아래 그림 5와 같이 CCM동작을 하는 double loop PI 제어 기술을 사용하는 것이다.

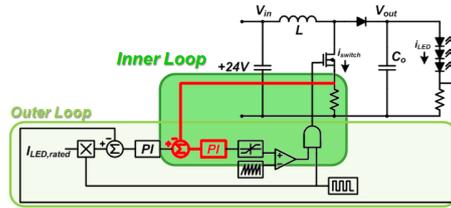


그림 5. CCM double-loop PI 제어
Fig. 5 CCM double-loop PI control

2차 시스템에 대해서 느린 outer loop는 전류가 정상상태를 유지하도록 제어 한다. 빠른 inner loop는 작은 오버슈트를 갖도록 과도 구간에서 큰 bandwidth를 갖도록 한다. 그 결과, 이 제어 방법은 남은 과도 구간에 따라 dimming resolution에서 약간의 손실을 보게 되지만, CCM과 DCM의 장점들을 모두 갖게 된다. MCU를 이용하는 디지털 제어에서는 이러한 기술의 구현할 경우 세심한 고려가 필요하다. 그림 6에 나타난 일련의 순서는 컨버터의 outer loop 제어를 위한 MCU의 동작 방법을 나타내고 있다.

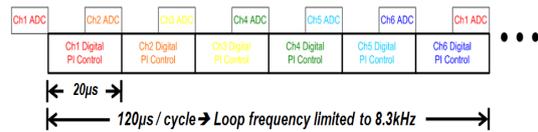


그림 6. Outer loop control에 대한 MCU 동작
Fig. 6 MCU operation for outer loop control

A/D converter의 데이터는 미리 얻어놓고, 이 데이터를 이용하여 MCU는 PI 제어 과정을 수행한다. 각 컨버터는 대략 PI 제어를 하는데 있어 20µs의 시간을 소모한다. 만약 6 채널 시스템이라면, 하나의 컨버터를 위한 PI 제어는 8.3 kHz의 동작을 갖게 된다. 이것은 MCU가 수행할 수 있는 최고 동작 속도이다. 따라서 350kHz로 동

작하는 컨버터에 대해서는 빠른 속도로 제어를 수행할 수 없게 된다. 물론, 더 높은 주파수 동작이 가능한 고사양의 MCU 혹은 DSP를 사용하여 구현한다면 이러한 요구 특성을 만족할 수는 있겠지만 가격 대비 성능을 따진다면 이것이 최선의 선택일 수 없다. 그리하여 낮은 동작 속도를 갖는 MCU에서도 double-loop 제어의 장점을 갖도록 하기 위한 두 가지 듀티 제어 방법에 대하여 제안한다.

2.3. Direct Duty Cycle Control

결국 double loop 제어를 디지털 방식으로는 직접적으로 구현하기가 힘들기 때문에 direct duty cycle 제어라는 새로운 방법을 제안한다. Inner loop control에 대해 closed loop를 이용하는 대신, 변하지 않는 소자(인덕턴스, 캐패시턴스, 로드 저항, dimming/SMPS 주파수) 값과 변하는 소자(전원 전압, outer loop duty cycle) 값을 가지고 계산된 duty cycles를 만들어 내는 open loop 제어 2가지 알고리즘을 만들 수 있다. 이 방식으로 인덕터 전류는 바로 제어되며, 최소한의 전류 오버슈트를 갖는 이상적인 파형을 만들 수 있다. 이를 위해, 인덕터 전류와 캐패시터 전압의 정확한 계산이 필요하며 2개의 모드에 따라 나뉜다.

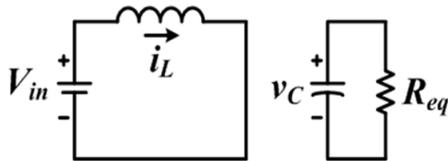


그림 7. 부스트 컨버터 : turn-on
Fig. 7 Boost converter : turn-on

첫 번째 모드는 스위치가 켜져 있는 동안이다. 전류와 전압 식은 미분 방정식과 선형화를 통해 초기상태로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i_{Ln} = \frac{V_{in}D}{Lf} + i_{Ln-1} \tag{1}$$

$$v_{Cn} = v_{Cn-1} e^{-\frac{D}{R_{eq}Cf}} \tag{2}$$

여기서 D는 duty cycle을, f는 컨버터의 주파수를 의미한다. 두 번째 모드는 스위치가 꺼졌을 때이다. 등가 회로는 그림 8와 같다.

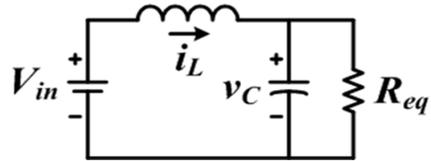


그림 8. 부스트 컨버터 : turn-off
Fig. 8 Boost converter : turn-off

이 경우, 미분 방정식은 복잡해지며, 정확한 해법을 찾기란 쉽지 않다. 이때, 디지털 컨트롤러를 사용하게 되면, 쉽게 선형화 과정을 거치면서 해를 찾을 수 있다. 솔루션은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i_{Ln} = \frac{T_s}{L}(V_{in} - v_{Cn-1}) + i_{Ln-1} \tag{3}$$

$$v_{Cn} = \frac{T_s}{C} i_{Ln-1} + \left(1 - \frac{T_s}{CR_{eq}}\right) v_{Cn-1} \tag{4}$$

여기서 Ts는 샘플링 시간이다. Ts만큼 시간을 증가시키면서 전류와 전압을 쉽게 계산할 수 있다. 샘플링 시간 Ts가 작으면 작을수록 보다 정확한 값을 계산할 수 있지만, 계산 시간은 길어지는 문제가 있다. 첫 번째 제어 알고리즘은 Optimized Sequence Control방법이다. 그림 10에서처럼 이 알고리즘은 인덕터 전류에 제한을 가하면서 정확한 전류 파형을 갖도록 한다. 총 4개의 과정을 거친다. 첫 번째 과정은 인덕터 전류의 제한선에 도달하는 full duty cycles을 계산하는 것이다. 이 과정에서 각 duty cycle을 계산하는 동안, 전류와 전압은 정상상태에 도달할 때까지 각각 똑같은 turn off 시간 동안 계산된다. 세 번째 과정은 전류와 전압이 정상상태에 도달할 때까지 몇 개의 full duty cycles 동안 컨버터를 꺼주는 것이다. 네 번째 과정은 발생할 수 있는 변동을 최소화하도록 남은 duty cycle을 조절하는 과정이다. 그림 9는 실험 결과이며, 로드 전류의 오버슈트가 최소가 되는 것을 보여주고 있다.

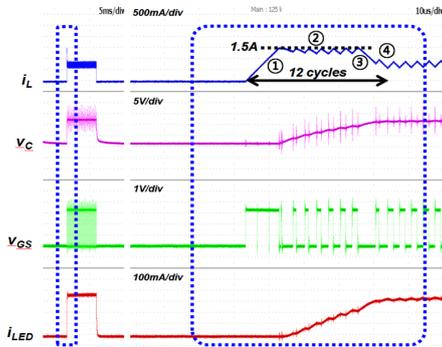


그림 9. Optimized sequence control 알고리즘 실험 파형
Fig. 9 Optimized sequence control algorithm experiment waveforms

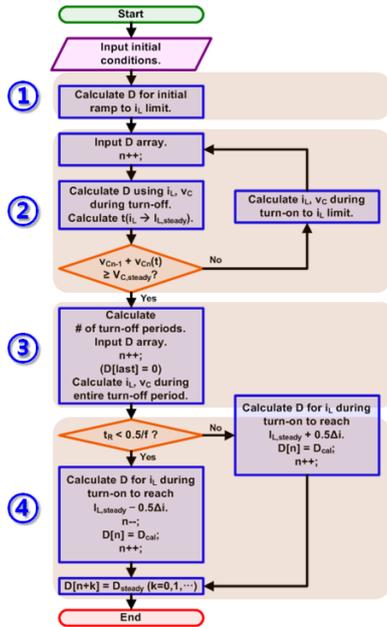


그림 10. Optimized sequence control 알고리즘
Fig. 10 Optimized sequence control algorithm

Optimized sequence control은 세밀하게 제어할 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 이 방법은 MCU가 감당하기에는 너무 많은 과정을 수행하며, 어느 정도의 성능을 보여주는데 이렇게 복잡한 제어 방법이 필요하지는 않다. 따라서 보다 단순화된 제어 방법을 소개하고, 이는 그림 12에 나타나 있다.

이 새로운 제어 방법은 2개의 과정으로 이루어져 있다. 첫 번째 과정은 outer loop로부터 duty cycle를 계속해서 이용하는 과정이다. 이 duty cycle동안, 스위치가 꺼져있는 시간은 앞서 optimized sequence control방법의 두 번째 과정처럼 계산된다. 다음 두 번째 과정은 첫 번째 과정에서 계산된 duty cycles 동안 컨버터를 꺼주는 과정이다. 실험 파형이 그림 11에 나타나 있다.

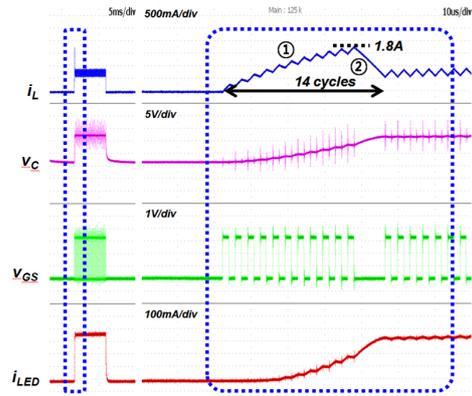


그림 11. 간단한 sequence control 알고리즘 실험 파형
Fig. 11 Simplified sequence control algorithm experiment waveforms

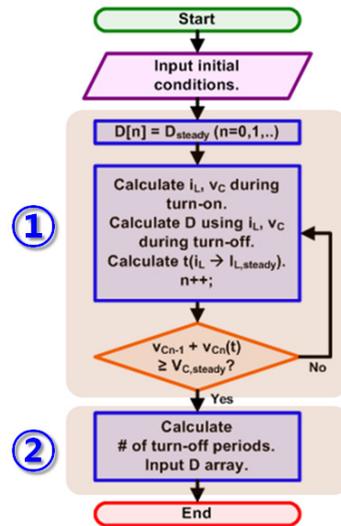


그림 12. 간단한 sequence control 알고리즘
Fig. 12 Simplified sequence control algorithm

이 두 번째 방법의 단점은 각 과정들을 수행하는데 조금 더 시간을 소모하는 것이며, 인덕터 전류의 최대값이 조금 높고, 또한 첫 번째 방법에서의 네 번째 과정을 생략하기 때문에 조그마한 변동이 생길 수 있다.

로드 스위치가 있는 부스트 컨버터와 제안된 제어 방법을 갖는 부스트 컨버터를 비교하였다. 그림 13에서 볼 수 있듯이 효율적인 측면에서는 제안된 방법이 기존 방법보다 2~3% 더 높은 효율을 얻을 수 있었다.

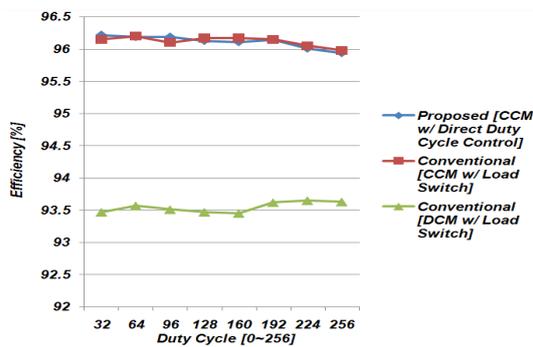


그림 13. 효율비교
Fig. 13 Efficiency comparison

III. 결 론

본 논문에서는 이러한 디지털 제어방식을 적용함에 있어 저가형 MCU를 이용하여 LED 구동 전류를 개선할 수 있는 알고리즘을 제안하고자 한다. 기존의 부스트 컨버터의 CCM 모드 운전의 경우 우반구에 영점이 위치하기 때문에 CCM에서는 전류의 언더슈트 발생하고 이는 dimming resolution에 왜곡이 만든다. 이러한 단점을 보완하기 위해 direct duty cycle 제어라는 새로운 방법을 제안한다. Inner loop control에 대해 회로 파라미터 값을 이용하여 계산된 duty cycles를 만들어 내는 open loop 제어 2가지 알고리즘을 만들 수 있다. 저가형 MCU를 사용하기 위한 방법으로 Optimized sequence control을 이용하여 낮은 clock 속도에서도 전력제어가 가능하도록 하였다.

참고문헌

- [1] 굿모닝신한증권(주) “LED 조명” 시장동향서, 2009
- [2] “LED 조명기술의 최신동향[하]”, 월간 전기기술, 2006
- [3] 김응석외 1명, “ 파워 LED 구동을 위한 정전류 제어 기 설계”, 대한전기학회, 전기학회논문지 제59권 제3호 2010, 3, pp.555-561
- [4] 이종규외 1명, “ LED 조명을 위한 정전류 전원”, 한국 조명 · 전기설비학회, 한국조명 · 전기설비학회 2010 추계학술대회 논문집 2010, 9, pp.305-307

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2011T100200304)

저자소개



이상훈(Sang-Hun Lee)

2006년 부산대학교 메카트로닉스 협동과정 공학박사
2010년~한국승강기 대학 승강기 전기설계과 조교수

※관심분야: 모터구동드라이브, 에너지전력변환장치, 조명용 LED 드라이브 등



송성근(Sung-Geun Song)

2007년 전남대학교 전기공학과 공학박사
2008년~전자부품연구원 디지털 컨버전스연구센터 센터장

※관심분야: 에너지전력변환장치, 모터구동드라이브, DC배전 등