

# 저주파 맥동전류를 갖는 LED 조명용 LLC 공진 컨버터 제어에 관한 연구

권민준, 이우철  
한경대학교

## A Study on the Control of LLC Resonant Converter for LED Driver with Low Frequency Ripple Current

Min Jun Kwon, Woo Cheol Lee  
Hankyong National Univ

### ABSTRACT

긴 수명과 높은 효율로 차세대 조명기구로 사용되는 LED를 구동하기 위하여, 일반적으로 역률 보정을 위한 PFC 단과 출력 조절을 위한 DC/DC 단이 직렬로 연결된 구조를 사용하게 된다. 이때 PFC 과정에서 DC 링크 전압이 120Hz 전압 맥동을 갖게 되는데, 이는 DC/DC 단에도 영향을 주며 최종 출력전류 역시 120Hz 저주파 맥동을 갖게 된다. 본 논문은 LED 조명용 LLC 공진 컨버터의 120Hz 저주파 맥동 전류 리플을 저감 방법에 관한 연구이다. 기존 제어기에 전류 리플을 보상하여 제어하는 방법에 대하여 설명하고 시뮬레이션을 통해 이를 확인한다.

### 1. 서 론

수명이 길며 높은 효율을 달성할 수 있는 광원 LED가 각광 받으면서, LED 조명에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그림 1은 LED 조명용 구동회로의 구성을 나타낸다. 일반적으로 LED 조명용 구동회로는 상용전원의 고조파 규제를 만족하기 위한 PFC(Power Factor Correction) 회로와, LED에 흐르는 전류를 일정하게 제어할 수 있는 전류제어 구동회로를 필요로 한다. 전류제어 구동회로는 안전규격을 만족하기 위하여 절연형 DC/DC 컨버터를 사용하게 되며, LLC 공진 컨버터를 전류제어 구동회로에 적용하는 것으로 고효율 및 높은 전력밀도를 달성할 수 있게 된다.<sup>[1][2]</sup>

일반적으로 60Hz 상용전원을 정류하는 과정에서 120Hz 전압 맥동이 발생하게 되는데 이는 DC 링크 전압에도 120Hz 맥동전압을 야기할 수 있다. DC 링크 맥동 전압을 입력으로 갖는 DC/DC 컨버터 역시 최종 출력에 120Hz 맥동을 가질 수 있게 되며 이는 LED에 흐르는 전류에도 맥동전류를 발생시키게 된다.<sup>[3]</sup>

LED 조명용 구동회로에 발생하는 맥동전류를 저감하기 위한 방법으로 PFC 단과 전류제어 구동회로 사이에 DC 링크 커패시터 용량을 크게 사용하는 방법이 간단하게 적용될 수 있으나, 커패시터 값이 크게 사용하게 되면 시스템 부피증가 및 재료비 증가의 단점을 동반하게 된다. 다른 방법으로 저주파 맥동전류의 원인인 DC 링크 커패시터 전압리플을 측정하여 보상하는 방법을 생각해 볼 수 있다. 하지만, 이 방법은 DC 링크 커패시터 전압리플을 측정을 위한 부가적인 회로를 필요로 한

다는 단점을 가지게 된다.<sup>[3]</sup>

이에 본 논문은 저주파 맥동 전류를 갖는 LED 조명용 LLC 공진 컨버터 제어에 관한 연구로 DC 링크 커패시터의 크기를 키우거나 회로를 추가하지 않고 발생하는 맥동전류 리플을 사용하여 출력 전류리플을 저감하는 방법을 제안한다. 제안한 맥동전류 보상기법은 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

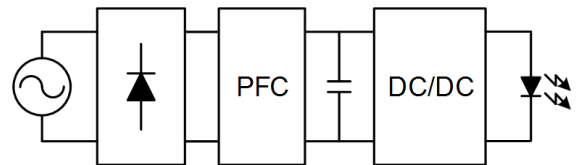


그림 1 LED 조명용 구동회로의 구성도  
Fig. 1 Circuit diagram of LED driver

### 2. 본 문

#### 2.1 LLC 공진 컨버터

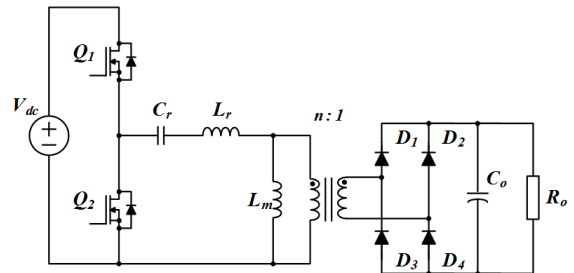


그림 2 LLC 공진 컨버터 회로  
Fig. 2 Circuit of LLC resonant converter

그림 2는 LLC 공진 컨버터의 회로이다. LLC 공진 컨버터는 크게 스위치로 구성된 구형과 발생단, 공진 회로 그리고 다이오드 정류회로로 구성되어 있다.

LLC 공진 컨버터는 공진 커패시턴스  $C_r$  과 공진 인덕턴스  $L_r$  그리고 자화인덕턴스  $L_m$  으로 구성된 공진 회로의 적용으로 ZVS(Zero Voltage Switching)를 달성하여 높은 효율을 보이며, 공진 인덕턴스의 별도 추가 없이 변압기의 누설 인덕턴스를 이용하여 높은 전력밀도 및 크기, 무게 저감효과를 볼 수 있다.<sup>[4]</sup>

LLC 공진 컨버터의 공진 주파수  $f$  은 다음과 같이 계산할

수 있다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (1)$$

### 1.2 LLC 공진 컨버터 특성분석

일반적으로 LLC 공진 컨버터를 분석하기 위해 널리 사용되는 방법 중 FHA(First Harmonic Approximation) 분석방법이 가장 대표적인 분석방법이다. FHA 분석방법은 LLC 공진 컨버터의 고조파 성분을 모두 제거하고 기본파 성분만으로 등가해 특성을 분석하는 방법으로 직렬 공진에 가까운 동작특성을 얻을 수 있어 LLC 공진 컨버터의 특성을 잘 보여준다.

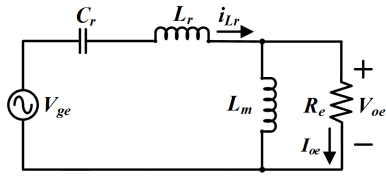


그림 3 LLC 공진 컨버터 등가회로  
Fig. 3 Equivalent circuit of LLC resonant converter

그림 3은 FHA 분석을 통해 얻을 수 있는 LLC 공진 컨버터 등가회로이다. 입력 구형파와 전압의 모든 고조파 성분을 제거하고 기본파 성분만으로 등가 되었다.

구형파와 입력전압의 기본파 성분은

$$V_{ge}(t) = \frac{2}{\pi} \times V_{dc} \times \sin(2\pi f_s t) \quad (2)$$

가 되며, 출력전압과 출력전류의 기본파 성분은

$$V_{oe}(t) = \frac{4}{\pi} \times n \times V_o \times \sin(2\pi f_s t) \quad (3)$$

$$i_{oe}(t) = \frac{\pi}{2} \times \frac{1}{n} \times I_o \times \sin(2\pi f_s t) \quad (4)$$

로 계산할 수 있다.

계산된 등가 출력 전압, 전류를 통해 등가 부하저항  $R_e$  는 다음과 같다.

$$R_e = \frac{8 \times n^2}{\pi^2} \times R_o \quad (5)$$

등가회로에 등가 입력전압과 등가 출력전압 사이의 관계들로 각 비율이나 이득을 표현할 수 있게 된다. LLC 공진 컨버터의 전압이득을 계산하게 되면

$$M = \left| \frac{L_n f_n^2}{L_n f_n^2 + (f_n^2 - 1)(1 + j f_n L_n Q)} \right| \quad (6)$$

이 된다. 이때,  $L_n = L_m / L_r$ ,  $f_n = f_s / f_r$ ,  $Q = \sqrt{L_r / C_r} / R_o$  이다. 계산된 LLC 공진 컨버터의 이득 수식을 통해 그림 4 와 같

은 LLC 공진 컨버터 특성곡선을 얻을 수 있다.

그림 4는 LLC 공진 컨버터의 이득특성 곡선으로 LLC 공진 컨버터의 이득은 부하특성 Q(Quality factor)에 따라 각기 다른 곡선을 그릴 수 있다. 또한 이득은 스위칭 주파수  $f_s$  와 공진 주파수  $f_r$  에 의해 정규화된 주파수  $f_n$  으로 표현 된다. 분석된 이득특성곡선은 LLC 공진 컨버터의 이득이 스위칭 주파수에 의해 조절될 수 있음을 보여준다.

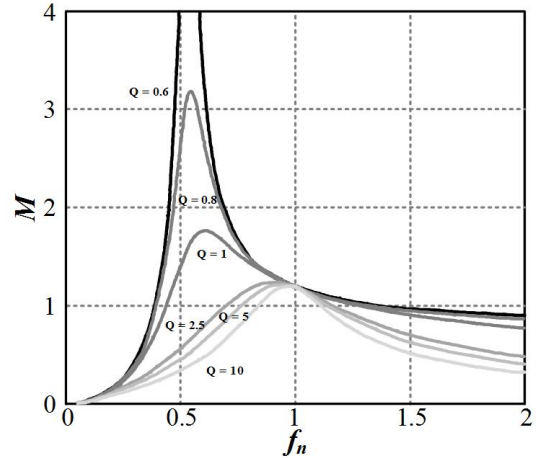


그림 4 LLC 공진 컨버터 이득특성곡선  
Fig. 4 Gain characteristics curve of LLC resonant converter

### 1.3 저주파 맥동전류 저감기법

일반적으로 PI 제어기를 통해 스위칭 주파수를 조절하는 것으로 LLC 공진 컨버터의 이득을 제어할 수 있다. 하지만 입력 DC 전압에 저주파 맥동 전압이 발생할 경우 기존의 제어방법만으로는 한계가 있다.

DC 링크 커패시터의 저주파 맥동 전압에 의한 저주파 맥동 전류를 저감하기 위한 방법으로 기존의 제어기에 저주파 맥동 전류 리플성분을 보상하는 것으로 간단하게 구성할 수 있다. 그림 5 는 제안하는 저주파 맥동 전류 저감기법 제어 블록도이다.

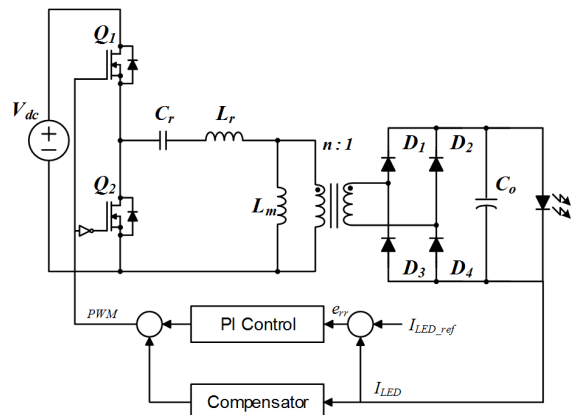


그림 5 제어 블록도  
Fig. 5 Control block diagram

제어 블록도는 기존에 LED 전류를 제어하기 위한 제어기 루프가 포함되어 있으며 맥동전류 성분을 보상하기 위한 루프가 포함되어 있다. 제안된 방법은 출력전류에 발생하는 맥동전

류의 리플성분을 이용하여 기존에 제어기에 보상해주는 방법이다. 기존의 제어기 루프 피드백 전류의 리플성분을 이용하기 때문에 추가적인 측정회로 없이 전류맥동을 보상하게 된다.

### 1.4 시뮬레이션

저주파 맥동 전류 저감기법을 적용한 LED 조명용 LLC 공진 컨버터의 동작을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션은 PSIM 프로그램을 사용하였다. 그림 6은 LLC 공진 컨버터 시뮬레이션 회로이며, 표 1은 시뮬레이션에 사용된 파라미터이다.

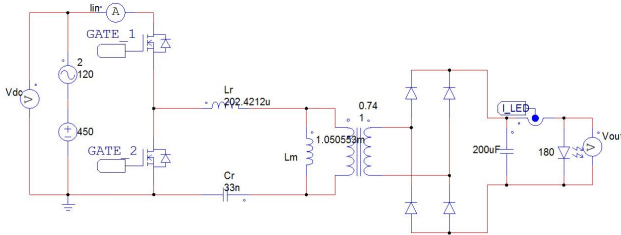


그림 6 시뮬레이션 회로  
Fig. 6 Simulation circuit

표 1 시뮬레이션 파라미터  
Table 1 Simulation parameter

Parameter	Value
Resonant Inductance, $L_r$	202.42[uH]
Magnetizing Inductance, $L_m$	1.05[mH]
Resonant Capacitance, $C_r$	33[nF]
Resonant Frequency, $f_r$	61[kHz]
DC Link Voltage, $V_{dc}$	450[V]
Switching Frequency, $f_s$	50~100[kHz]
LED module	180V/0.7A

LLC 공진 컨버터의 입력으로 DC 링크 커패시터의 120Hz 맥동을 DC 전압원과 120Hz AC 전압원의 직렬로 모델링을 하였다. 시뮬레이션에 사용된 LED는 180V 0.7A 규격의 LED 모델을 적용하였다.

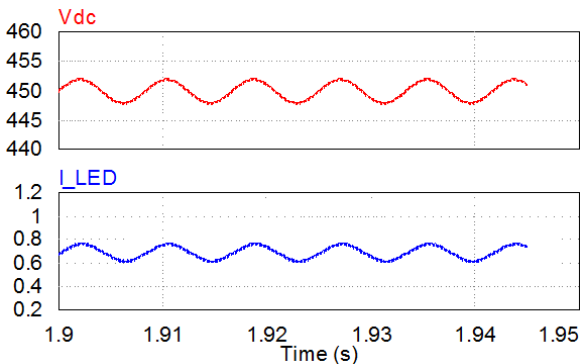


그림 7 기존의 제어 시뮬레이션  
Fig. 7 Conventional control simulation

그림 7은 맥동전류 저감기법을 적용하지 않고 기존의 PI 제어기만을 사용한 시뮬레이션 결과 파형이다. 파형은 120Hz 맥동 전압이 포함된 DC 링크 커패시터 전압과 그에 따른 LLC

공진 컨버터 출력전류 파형이다. 맥동전류 저감 기법을 적용하지 않는 LLC 공진 컨버터는 DC 링크 맥동전압에 의해 출력전류 또한 120Hz 맥동전류가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

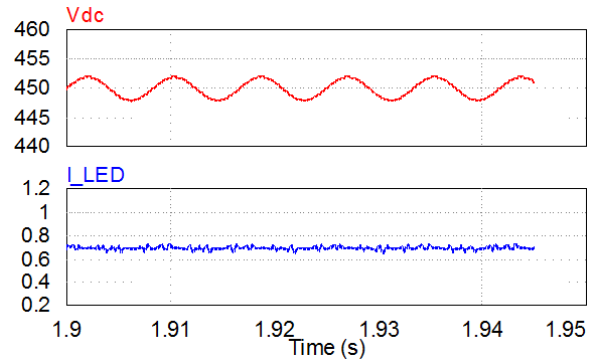


그림 8 제안된 제어기법 시뮬레이션  
Fig. 8 Proposed control simulation

그림 8은 맥동전류 저감기법이 적용된 시뮬레이션 결과 파형이다. 그림 7과 마찬가지로 DC 링크 커패시터 전압에는 120Hz 맥동 전압이 포함되어있지만, 맥동전류 저감기법을 적용한 LLC 공진 컨버터의 출력전류는 저감기법을 적용하지 않았을 때에 비하여 맥동전류가 크게 감소하는 것을 확인하였다.

## 3. 결론

본 논문은 저주파 맥동 전류를 갖는 LED 조명용 LLC 공진 컨버터 제어에 관한 연구로 DC 링크 커패시터의 크기 변화나 추가적인 측정회로 없이 맥동전류 리플을 사용하여 보상하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 맥동전류의 리플성분을 기존 제어기에 직접 보상하여 최종적으로 출력 전류에 발생하는 맥동전류를 저감하는 방법이다. 제안한 방법을 적용하면 기존 전류제어기에 사용되는 전류 성분을 사용하기 때문에 추가적인 측정을 필요로 하지 않는다. 제안된 맥동전류 저감 기법은 시뮬레이션을 통하여 확인되었다.

본 연구는 중소기업벤처부의 기술혁신개발사업의 일환으로 수행하였음.

[C0512432, 프로그램이 가능한 고효율 LED 컨버터 개발]

## 참고 문헌

- [1] 이상훈, "LED 조명 시스템을 위한 LED 및 직류전원 기술", 전력전자학회지, 제14권 제3호, 2009. 6.
- [2] 신대성, 정영진, 홍성수, 한상규, 장병준, 김종해, 이일운, 노정욱, "LLC 공진형 컨버터를 이용한 고효율 조명용 LED 구동 시스템" 전력전자학술대회논문집, pp. 450 452, 2009, July.
- [3] 김정범, 박남주, 이동운, 현동석, "단위 역률을 갖는 BIFRED 컨버터를 이용한 새로운 120Hz DC 출력 리플 전압 저감 제어 기법" 전력전자학술대회논문집, pp. 542 546, 2004, 7.
- [4] B. Yang, F. C. Lee, A. J. Zhabg, and G. Huang, "LLC Resonant Converter for Front End DC/DC Conversion," in *Proc. IEEE APEC'02*, pp. 1108 1112, 2002.