

Coupled Inductor를 적용한 다중 출력 LED 조명용 LLC 공진 컨버터에 관한 연구

박상범 이우철

한경대학교 전기전자제어공학과

A Study on the LLC Resonant Converter for Multi-Output LED Driver with Coupled Inductor

Sang-Beom Park, Woo-Cheol Lee

Hankyung National Univ

ABSTRACT

친환경적이고 수명이 길며 높은 효율을 가지고 있는 LED(Light Emitting Diode) 조명은 각광 받고 있다. LED는 응용 분야별로 필요한 용량에 따라 다양하게 정하지 않고 용량을 한가지로 표준화하여 직, 병렬로 연결하여 모듈 형태로 사용하고 큰 용량이 필요한 경우, 여러 개의 모듈로 이용하는 특징을 갖는다. 따라서 LED 구동하기 위한 컨버터는 LED 모듈을 최소 하나에서 여러 대를 구동할 수 있는 PFC 및 DC/DC 컨버터를 요구한다. 기존 단일 출력 컨버터로 LED 모듈을 구성하면 LED 시스템의 높은 효율, 높은 전력 밀도, 대용량화 및 활용도가 떨어지며 효과적으로 유지 보수가 어렵다는 문제점이 있다. 또한, 다중 출력 LED 컨버터는 각 출력이 정전류 특성을 유지하고 LED 보호 기능을 가지려면 독립적인 컨버터가 채널마다 필요하게 된다. 이에 본 논문은 다중 출력으로 복수의 LED 모듈을 문제없이 구동할 수 있는 LLC 공진 컨버터에 관한 연구이며 이를 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

1. 서론

최근 조명시장에서는 친환경, 저소비전력, 높은 효율 및 긴 수명을 특징으로 지닌 새로운 조명으로 정의되는 차세대 조명 LED가 각광 받고 있다.^[1] LED는 백열등과 형광등을 대체하며 텔레비전, 모니터, 휴대전화 등 사용되는 곳에 따라 연구가 늘어나고 있다.^[2] LED 조명은 여러 응용 분야 별로 필요한 용량에 따라 정하지 않고 용량을 한가지로 표준화하여 직, 병렬로 연결하여 모듈 형태로 사용하고 큰 용량이 필요할 경우, 여러 개의 모듈로 사용하는 특징을 갖는다.

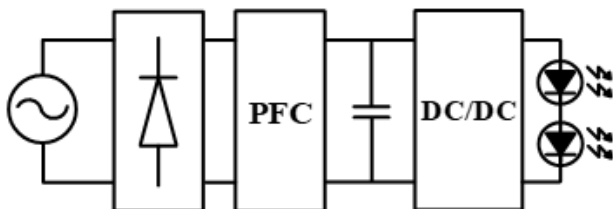


그림 1 LED 조명용 구동 회로 구성도
Fig. 1 Circuit Diagram Of LED Driver

그림 1은 LED 조명용 구동 회로의 구성도이다. LED 조명

은 일반적인 가전 기기처럼 상용 교류 전원을 바로 사용할 수 없다. 따라서, LED 조명용 구동회로가 별도로 필요하다. LED 조명용 구동회로는 상용전원의 고조파 규제를 만족하기 위한 PFC(Power Factor Correction) 회로와 LED 조명에 흐르는 전류를 일정하게 제어할 수 있는 구동회로를 필요로 한다. 전류 제어 구동회로는 절연형 DC/DC 컨버터로 안전 규격을 만족하기 위하여 용량에 따라 사용하게 되며, LLC 공진 컨버터는 ZVS(Zero Voltage Switching)달성과 공진 회로를 통해 높은 효율 및 높은 전력 밀도를 달성할 수 있다는 장점으로 전류제어 구동회로 사용된다.^{[3][4]}

일반적으로 LED 모듈을 구동하는데 사용되는 기존 단일 출력 컨버터 회로는 LED 모듈 시스템의 높은 효율, 높은 밀도 대용량화 및 활용도가 떨어지며 LED 모듈이 고장이 발생하는 경우 효과적으로 유지 보수가 어렵다는 문제점이 있다. 또한, 다중 출력 LED 컨버터는 각 출력이 정전류 특성을 유지하고 LED 보호 기능을 가지려면 독립적인 구동 회로 즉, 컨버터가 LED 채널 마다 필요하게 된다.

이에 본 논문에서는 다중 출력으로 복수의 LED 모듈을 문제없이 구동할 수 있으며 문제가 발생하는 경우 다른 LED 모듈은 계속해서 정상적으로 동작을 하는 다중 출력 LED 구동 회로를 제안한다. 제안된 회로는 ZVS DC/DC 컨버터인 LLC 컨버터에 4 Coupled Inductor를 적용하여 정전류 제어와 복수의 LED 모듈을 다중 출력으로 문제없이 구동할 수 있도록 하였다.

2. 본론

2.1 LLC 공진 컨버터

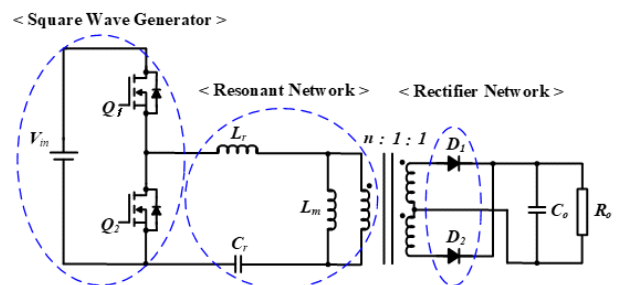


그림 2 LLC 공진 컨버터의 기본 구조
Fig. 2 Structure Of LLC Resonant Converter

그림 2는 일반적인 Half-Bridge LLC 공진 컨버터의 기본 구조이다. LLC 공진 컨버터는 크게 3가지로 나눌 수 있다. Half-Bridge 형태의 스위치를 스위칭하여 DC 전압을 갖게 하는 구형파 발생단(Square Wave Generator), 공진 인덕턴스 L_r 와 공진 커패시턴스 C_r 그리고 자화 인덕턴스 L_m 로 구성된 공진 탱크(Resonant Network)의 회로를 이용하여 공진 현상을 발생시켜 ZVS를 달성하여 높은 효율을 얻을 수 있으며, 변압기의 누설 인덕턴스를 이용하면 공진 인덕턴스의 별도 추가 없이 높은 전력 밀도 및 무게, 크기 저감 효과를 볼 수 있다. 공진 회로와 변압기를 통해 발생된 2차 측 전압을 다이오드로 이루어진 정류기 단(Rectifier Network)을 통하여 전압을 정류하여 직류로 변환하는 구조로 이루어져 있다.^[5]

LLC 공진 컨버터의 공진 주파수 f_r 와 변압기 턴 비 n 은 다음과 같은 수식으로 계산할 수 있다.

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

$$n = \frac{V_o}{V_{in}} \quad (2)$$

2.2 다중 출력 LED 구동회로 구성

Coupled Inductor는 Transformer와 동일한 클래스의 구조로, 사용 목적에 따라 이름이 다르다는 것을 알 수 있다. Transformer는 기본적으로 전력을 전송 목적으로 사용하는 장치이며, 권선 사이의 결합이 가능한 좋게 하려면 누설 인덕턴스를 0으로 만들면 된다. Coupled Inductor는 커플링을 활용하는 것을 기본으로 하며 각 권선을 독립적인 인덕턴스로 사용한다. 따라서 누설 인덕턴스는 큰 문제가 되지 않는다.

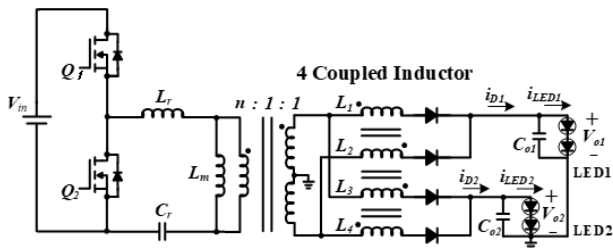


그림 3 4 Coupled Inductor를 적용한 다중 출력 LED 조명용 LLC 공진 컨버터

Fig. 3 LLC Resonant Converter for Multi-Output LED Driver with 4 Coupled Inductor

그림 3은 LLC 공진 컨버터에 4 Coupled Inductor를 적용하여 정전류 제어와 LED 다중 출력이 가능하도록 제한하는 구동회로이다. 4 Coupled Inductor의 L_1, L_2 단은 LED1 모듈에 연결되어 있으며, L_3, L_4 단은 LED2 모듈에 연결되어 각 LED모듈이 병렬연결 되어있다. 회로는 LLC 공진 컨버터의 정전류 제어 회로를 기본으로 하며 제어된 전류는 L_1, L_3 와 L_2, L_4 를 통해 한번씩 도통된다. 4 Coupled Inductor는 각 Dot 방향이 LED1 모듈에 연결된 인덕터 L_1, L_2 가 반대로 되어있으며, LED2 모듈에 연결된 인덕터 L_3, L_4 의 방향도 반대 방향으로 연결되어 있다. 마찬가지로 전류가 도통되게 되는 L_1, L_3 와 L_2, L_4 각각 Dot 방향이 반대로 연결되어 있다. 이렇게 되

면 4 Coupled Inductor는 서로 상호 영향을 받게 된다. 하지만 회로가 정상적인 동작을 하고 있는 경우에는 서로 영향이 상쇄된다. 결과적으로 그림4와 같이 일반적인 Inductor 즉 Non-Coupled Inductor가 적용된 다중 출력 LED 조명용 LLC 공진 컨버터와 같은 역할을 하게 된다.

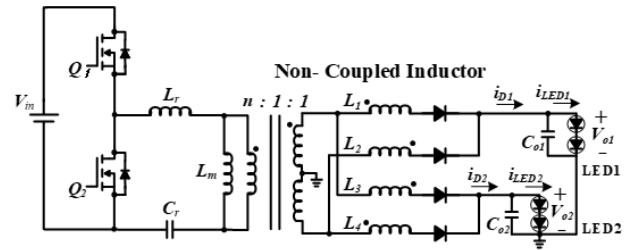


그림 4 Non-Coupled Inductor를 적용한 다중 출력 LED 조명용 LLC 공진 컨버터

Fig. 4 LLC Resonant Converter for Multi-Output LED Driver with Non-Coupled Inductor

2.3 시뮬레이션

시뮬레이션 프로그램 PSIM을 통해 Non-Coupled Inductor와 4-Coupled Inductor를 적용한 다중 출력 LED 조명용 LLC 공진 컨버터 동작을 확인하였다.

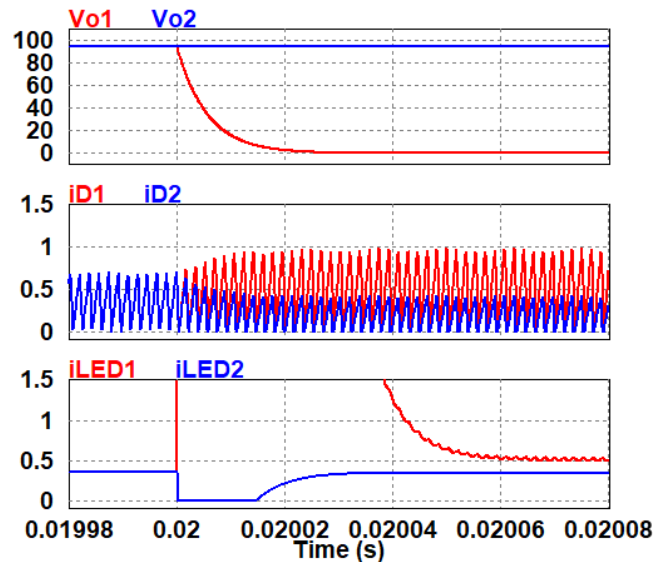


그림 5 시뮬레이션 파형

Fig. 5 Simulation Waveform

그림 5는 Non-Coupled Inductor를 적용한 다중 출력 LED 조명용 LLC 공진 컨버터의 시뮬레이션 결과 파형이다. 시뮬레이션 결과 파형은 위에서부터 순서대로 출력단(LED1, LED2 모듈)의 전압, Non-Coupled Inductor에서 LED 모듈로 공급되는 전류, LED 모듈에 흐르는 전류를 보여준다. 시뮬레이션에서 0.02s 이전까지는 정상 동작 상태를 유지하며 이때 LED1, LED2 모듈에 출력되는 전압, 공급되는 전류, LED 모듈에 흐르는 전류는 동일한 것을 확인할 수 있다.

0.02s에서 LED1 모듈을 고장(Short) 시키게 되면 LED1 모듈의 출력 전압이 감소하게 되며, LED1 모듈에 공급되는 전류

는 증가하고, 반대로 LED2 모듈에 공급되는 전류가 감소하는 것을 확인할 수 있다. LLC 공진 컨버터를 이용해 정전류 제어 회로를 사용하고 있어 두 개의 LED 모듈로 들어가는 전류의 총합은 정상 동작 상태와 고장(Short) 동작 상태가 같다. 하지만 고장(Short) 발생시 LED1 모듈에 더 많은 전류가 흐르게 되고, LED2 모듈에는 정상적인 전류가 공급되지 않게 된다. 결과적으로 LED1 모듈 고장에 의해 LED2 모듈에 흐르는 전류가 감소하게 되는 영향을 받아 LED2 모듈은 정상적으로 동작을 하지 못하게 된다.

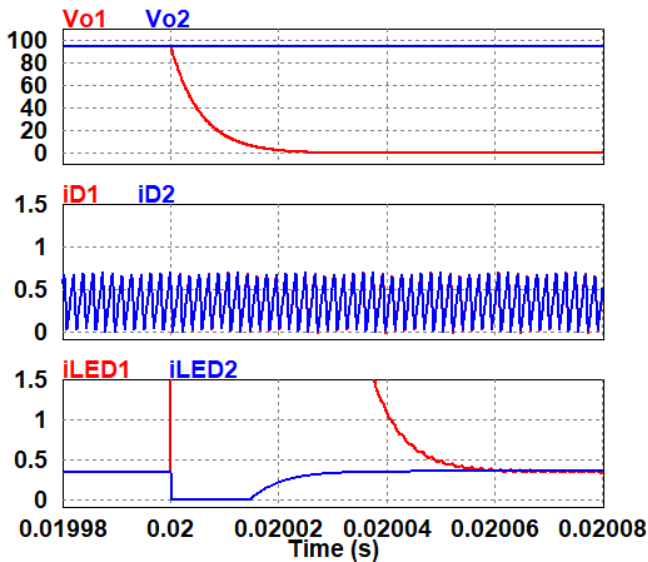


그림 6 시뮬레이션 파형
Fig. 6 Simulation Waveform

그림 6는 4 Coupled Inductor를 적용한 다중 출력 LED 조명용 LLC 공진 컨버터의 시뮬레이션 결과 파형이다. 시뮬레이션 파형의 순서와 0.02s에서 고장(Short) 발생 시 조건은 그림5의 시뮬레이션 결과 파형과 같은 조건으로 하였다. 정상 동작 상태일 때는 Non-Coupled Inductor와 4 Coupled Inductor가 똑같이 동작하지만, 고장(Short) 발생할 때 LED 모듈에 공급되는 전류와 LED 모듈에 흐르는 전류가 차이점을 보이는 것을 알 수 있다.

LED 모듈에 공급되는 전류는 Non-Coupled Inductor를 적용하였을 때 고장(Short)이 발생하면 전류가 서로 차이가 나게 되고 그로 인해 LED 모듈에 흐르는 전류까지 차이가 나게 된다. 하지만 4 Coupled Inductor를 사용하면 고장(Short)이 발생해도 정상 동작할 때와 같이 각 LED 모듈에 공급되는 전류는 같은 것을 확인할 수 있다. 그림 5, 6에 LED 모듈에 흐르는 전류는 고장(Short) 발생 전에는 LED 모듈에 병렬로 연결된 커패시터가 리플 전류를 흡수해서 같은 전류가 흐르는 것을 확인할 수 있다. 고장(Short) 발생 전에 커패시터의 임피던스보다 출력 임피던스 즉, LED 내부저항이 훨씬 크게 되어 LED 단에 DC 성분만 흐르게 되는데 0.02s 이후, 고장(Short) 발생 후에는 LED 모듈에 흐르는 전류가 리플이 증가하게 된다. 이는 고장(Short) 발생 후에 LED 자체의 내부저항이 없어지게 되어 출력 임피던스가 줄어들게 되어 전류 리플이 LED 모듈에 흐르는 전류에 발생하게 된다. Non-Coupled Inductor를 적용한 경우에는 0.02s 이후 고장(Short) 발생한 LED1 모듈에는 전류

가 정상 동작 상태보다 증가한 전류가 흐르게 되며, 고장(Short)이 발생하지 않은 LED2 모듈에 흐르는 전류는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 반면에 4 Coupled Inductor의 경우에는 고장(Short) 후에 LED1 모듈에 흐르는 전류 리플은 증가하였지만, Non-Coupled Inductor를 사용하는 경우와는 다르게 LED 모듈 간에 전류 차이도 줄었으며 고장이 발생하지 않은 LED2 모듈에 흐르는 전류가 감소하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 4 Coupled Inductor를 적용한 다중 출력 LED 조명용 LLC 공진 컨버터는 정상 동작 상태뿐만 아니라 고장(Short) 발생하여도 고장(Short)이 발생하지 않은 LED 모듈이 정상 동작을 유지하는 것을 확인할 수 있었다.

3. 결론

본 논문에서는 다중 출력으로 LED 모듈을 문제없이 구동할 수 있게 4 Coupled Inductor를 적용한 다중 출력 LED 조명용 LLC 공진 컨버터를 제안하였다. 기존의 단일 출력 컨버터로 LED 모듈을 구성하면 높은 효율, 높은 전력 밀도, 대용량화 및 활용도가 떨어지게 되며, 고장 발생시 효과적으로 유지 보수가 어렵다는 점과 다중 출력 LED 컨버터는 정전류 제어특성과 LED 보호 기능을 가지려면 독립적인 컨버터가 LED 모듈마다 필요하며 LED 모듈에 문제가 생기면 나머지 LED 모듈도 정상적으로 동작하기 어렵다는 문제점이 있다. 이에 본 논문에서 제안하는 회로는 정전류 제어 회로로 ZVS DC/DC 컨버터인 LLC 공진 컨버터를 이용하여 높은 효율 및 높은 전력 밀도를 달성하고 4 Coupled Inductor를 적용하여 복수의 LED 모듈을 문제없이 다중 출력으로 구동할 수 있게 하였다. 또한, 다중 출력 시에 하나의 LED 모듈의 고장(Short)이 발생하여도 나머지 LED 모듈은 문제없이 동작할 수 있도록 하였다. 이러한 다중 출력 LED 구동 회로를 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

본 연구는 한국전력공사의 2020년 선정 기초연구개발 과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호 : P20XC02-37)

참고 문헌

- [1] 장성원, “고효율, 친환경으로 각광받는 LED조명”, 삼성경제연구소, 2008
- [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] D. S. Sin, Y. J. Jung, S. K Han, S. S. Hong, I. O. Lee, D. S. Oh, H. B. Lee, and C. W. Roh, “A High Efficiency LED Driver Circuit using LLC Resonant Converter,” in Proc. of The Korean Institute of Power Electronics Annual Conference, pp. 450-452, 2009
- [4] 이상훈, “LED 조명 시스템을 위한 LED 및 직류 전원 기술”. 전력전자학회지, 제 14권 제3호, 2009.6
- [5] 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