

# LED 조명용 Single-Stage LLC 공진형 컨버터에 관한 연구

신 건, 이우철  
한경대학교

## Study on Single-stage Power Factor Corrected LLC Converter for LED Lighting

Geon Shin, Woo Cheol Lee  
Hankyong National Univ

### ABSTRACT

높은 효율과 긴 수명 등으로 형광등을 대체하며 차세대 조명 기구로 각광받고 있는 LED 는 필수불가결적으로 PFC 및 DC DC 컨버터 등으로 구성된 구동회로가 필요하다. 일반적으로 이러한 LED 구동회로의 조건으로 전체 90 % 이상의 고효율이 요구되고 있으나 Two Stage 로 구성된 구동회로의 하드 스위칭에 따른 손실 및 기타 요건들에 의한 전력소모로 인해 실질적으로 완벽하게 조건을 달성하기 까다롭다. 최근에는 이러한 구동조건을 달성하기 위해 브릿지리스 PFC 컨버터를 적용한 Two Stage 를 사용하거나 순환 전류 및 스위칭 손실이 보다 적은 LLC 공진 컨버터를 LED 용 구동회로에 접목하는 추세이다. 이에 따라서 본 논문은 LED 조명용 Single stage LLC 공진 컨버터를 구성하여 동작특성을 분석하였다.

### 1. 서론

현재 LED 는 일반적으로 가정 및 산업 현장에서 조명기구로 사용되는 형광등과 백열등을 점차적으로 대체해갈 뿐만 아니라 최근에는 텔레비전, 모니터, 휴대전화, 자동차, 식물 재배, 의료용 기구조명 등 매우 광범위한 범위에 적용되어 사용되고 있다. 이러한 LED 는 반도체 P N 접합 다이오드의 일종으로, 순방향으로 전압이 걸릴 때 단파장광이 방출되는 현상인 전기 발광효과를 이용한 소자이기 때문에 조명으로 구동 시 반드시 순방향 바이어스를 걸어줘야 한다. 따라서 일반적인 기기처럼 상용 교류 전원을 바로 사용할 수 없기 때문에 조명용 LED 를 위한 구동회로가 필요하다. 이 때 이 구동회로의 전력 효율은 LED 의 장점을 유지할 수 있도록 약 90 % 이상의 충분한 전체 효율을 갖으면서 LED 만큼 긴 수명을 가져야 한다.

일반적으로 LED 구동회로는 스위칭 레귤레이터 방식을 주로 사용하는데 이 방식은 입력 교류전원에 리액티브 부하가 인가되며 전압과 전류의 위상차이가 생기기 때문에 따로 역률을 보정해주는 PFC 단이 필요하다<sup>[1]</sup>. 따라서 기존의 일반적인 LED 구동회로에는 PFC 단과 함께 Boost 동작과 LED 의 제어 및 휘도 조절을 위한 절연/ 비절연형 DC DC 컨버터 단을 포함한 Two Stage 으로 그림 1 과 같이 구성된다.

하지만, 이러한 LED 구동 회로에서는 불필요한 도통 손실 및 하드 스위칭에 따른 손실에 의한 전력 손실로 인해 앞서 설명한 LED 성능을 충족시킬만한 충분한 고효율을 조건을 달성하기 어렵다.

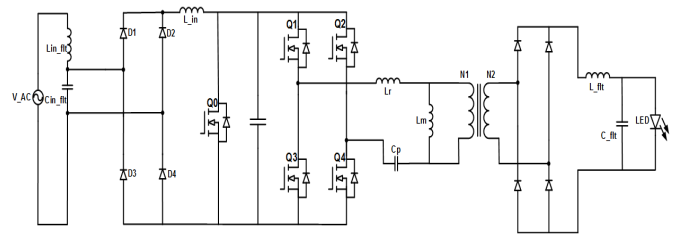


그림 1 기존의 Two-Stage LLC 컨버터  
Fig. 1 Two Stage LLC Converter

이에 따라 본 논문에서는 LED 구동용 회로를 PFC 단과 절연형 DC DC 컨버터 단을 구동 회로의 조건을 충족시킬 수 있도록 Single Stage 으로 구성하여 동작 특성을 분석하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 Single-Stage LLC 공진형 컨버터

기존의 LED 구동용 Single Stage PFC 컨버터 토폴로지는 Flyback, LLC 공진형 컨버터가 모두 사용이 가능하다. 이중 LLC 공진형 컨버터는 ZVS(Zero Voltage Switching) 달성으로 각각의 스위칭 손실이 적고 구조가 간단하다는 장점을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 이 LLC 공진형 컨버터를 사용하여 다음 그림 2 와 같은 PFC 기능을 포함하는 Single Stage 회로를 구성하여 동작모드에 따른 파형을 분석하였다.

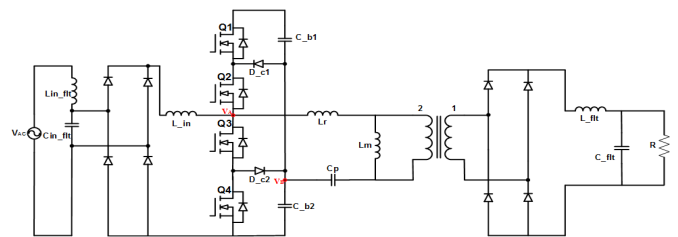


그림 2 Single-Stage LLC 공진형 컨버터  
Fig. 2 Single Stage LLC Converter

#### 2.2 동작 모드

동작 모드는 각 스위치의 온, 오프 동작에 따라 다음과 같이 총 6 가지 모드로 구분되며 각 동작모드에 따라 Single Stage 의 출력전압  $V_{AB}$  값이 만들어지게 된다.

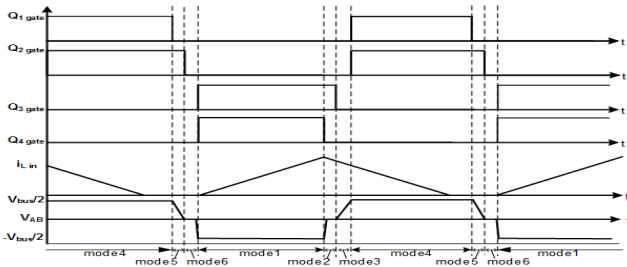


그림 3 Single-Stage LLC 공진형 컨버터의 동작 파형  
Fig. 3 Operating waveform of Single Stage LLC Converter

다음 그림 3 은 컨버터의 동작 파형이다. Mode 1 은 스위치 Q3 과 Q4 가 모두 켜진 경우로 스위치를 통해 흐르는 전류는 공진전류와 인덕터 전류의 합이 되고 출력 전압  $V_{AB}$  는  $V_{bus}/2$  가 된다. Mode 2 는 스위치 Q4 가 오프된 경우로 공진 전류는 스위치 Q3 과 다이오드  $D_{C2}$  를 통해 순환하며 출력 전압  $V_{AB}$  는 0 으로 감소한다. Mode 3 는 Q3 도 오프되어 모든 스위치가 꺼진 경우로 인덕터 전류와 공진전류가 상위 스위치 다이오드를 통해 흐르게 되며 출력 전압  $V_{AB}$  는  $V_{bus}/2$  가 된다.

Mode 4 는 스위치 Q1 과 Q2 가 모두 켜진 경우로 이 때 스위치를 통해 흐르는 전류는 공진전류와 인덕터 전류의 차가 되며 출력 전압  $V_{AB}$  는  $V_{bus}/2$  로 유지된다. Mode 5 는 Q1 이 오프된 경우로 인덕터 전류와 출력 전압  $V_{AB}$  는 0 이 되고 공진 전류만 Q2 과 다이오드  $D_{C1}$  을 통해 순환한다. Mode 6 는 Q2 도 오프되어 모든 스위치가 꺼진 경우로 이 때 공진전류는 방향이 전환되어 상위 스위치 커패시턴스를 방전하며 다음 Q3 과 Q4 가 동시에 켜지며 사이클을 반복한다<sup>[2]</sup>.

### 2.3 시뮬레이션

본 논문에서는 시뮬레이션 툴인 PSIM 을 이용하여 그림 2 과 같은 Single Stage LLC 공진형 회로를 구성하였다. LED 는 저항으로 등가 모델링 하였고 스위칭 주파수가 100 kHz 이고, DCM 으로 구동할 때 PFC 동작을 확인하기 위해 입력 전압과 입력 전류를 측정하여 결과를 확인하였다.

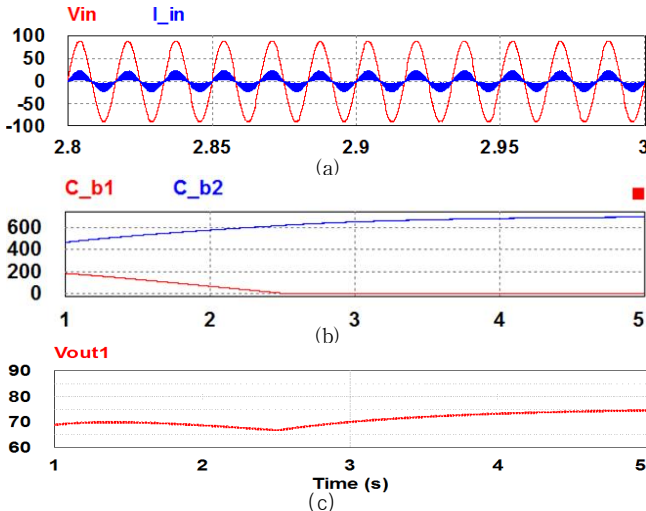


그림 4 Single-Stage LLC 공진형 컨버터 (a)입력 전압, 전류 와 (b) 커패시터 전압 (c) 출력 전압  
Fig. 4 Single Stage LLC Converter (a) Input voltage, current, (b) Capacitor voltage, (C) Output Voltage

시뮬레이션의 결과 Single Stage 로 구성된 회로에서도 입

력 전압과 전류가 동일한 위상을 갖으며 PFC 동작이 제대로 이루어진다는 것을 확인할 수 있었으나, 출력 전압  $V_{AB}$  가 LLC 공진형 컨버터 동작에 필요한 대칭형 구현과가 아니라 전압 불평형이 발생하는 것을 확인하였다. Single Stage 의 출력 전압이 대칭형이 되지 않는 가장 큰 원인은 그림 4 의 (b) 와 같이 커패시터  $C_{b1}$  과  $C_{b2}$  의 전압이 제어가 되지 않기 때문이므로 불평형을 해결할 수 있도록 중성점 제어를 진행하였다.

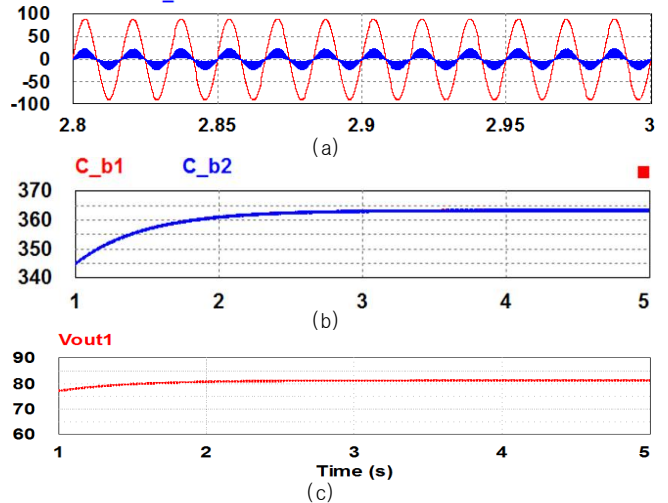


그림 5 중성점 제어된 Single Stage LLC 공진형 컨버터 (a) 입력 전압, 전류 와 (b) 커패시터 전압 (c) 출력 전압

Fig. 5 Neutral controlled Single-Stage LLC Converter (a) Input voltage, current, (b) Capacitor voltage, (C) Output Voltage

다음 그림 5 와 같이 커패시터  $C_{b1}$  과  $C_{b2}$  의 전압이 차이가 없으며 출력전압이 제어되는 것을 확인하였다.

### 3. 결론

본 논문에서는 LED 조명용 구동회로에 쓰이는 PFC 단과 DC DC 컨버터 단을 주로 Single Stage 로 구성하여 기존의 Two Stage 보다 우수한 효율을 갖도록 설계하였으며 ZVS 동작으로 스위칭 손실이 적은 LLC 공진형 컨버터를 사용하여 그 PFC 를 비롯한 동작 특성을 확인하고 분석하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 스위치 출력 파형이 LLC 컨버터 동작에 부적합한 불평형이 되는 것을 확인하였으며 그 원인을 분석하여 올바르게 동작하기 위해서 필요한 중성점 제어를 통해 이를 해결할 수 있도록 하였다.

연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업의 일환으로 수행하였음.  
[(GRRC환경2011 B04), 물류 자동화 시스템의 에너지 절약을 위한 전력변환 기술개발]

### 참고 문헌

- [1] 전용성, (2012). "LED 조명용 One Stage PFC Flyback 컨버터에서의 출력단 리플 저감과 전해 커패시터의 제거에 관한 연구". 전기학회 논문지, 61(11), 1625 1633.
- [2] Agamy, Mohammed S., "A three level resonant single stage power factor correction converter: analysis, design, and implementation." IEEE Transactions on Industrial Electronics 56.6 (2009).