

# 경부하에서 넓은 출력 범위를 가지는 Single-Stage LLC 공진 컨버터 분석

박상범 이우철

한경대학교 전기전자제어공학과

## Analysis of Single-Stage LLC resonant converter with wide output range under light load

Sang-Beom Park, Woo-Cheol Lee

Hankyung National Univ

### ABSTRACT

현재 LLC 공진 컨버터는 넓은 주파수 범위에서 ZVS(zero voltage switching) 달성을 통하여 고효율 및 높은 전력 밀도를 얻을 수 있어 널리 사용되는 추세이다. 일반적인 LLC 공진 컨버터는 중부하에서 주파수 제어를 통해 이득을 조절할 수 있다. 하지만 경부하에서는 주파수 작동 범위에 제한으로 이득을 조절하지 못하는 문제점이 있다. 이에 본 논문은 Single-Stage LLC 공진 컨버터를 통해 경부하 조건에서 넓은 출력 범위를 가지는 것을 분석하였으며 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

### 1. 서론

최근 기술이 발전하면서 제품은 크기 및 무게 저감, 고효율 및 높은 전력 밀도 특성이 요구되고 있다. 이러한 특성을 만족하기 위해 많은 ZVS DC/DC 컨버터들이 연구되어왔고, 이를 만족하는 LLC 공진 컨버터가 널리 적용되고 있다. LLC 공진 컨버터는 넓은 주파수 범위에서 ZVS달성을 통하여 고효율 및 높은 전력 밀도를 얻을 수 있다<sup>[1]</sup>. 일반적인 Two-Stage로 구성된 회로는 스위칭 손실 및 기타 요건들에 의한 전력 소모있다. 이러한 점을 보완하기 위해 PFC 컨버터를 적용한 Two-Stage를 사용하거나 스위칭 손실이 적고 고효율인 LLC 공진 컨버터를 접합시켜 사용하는 추세이다<sup>[2]</sup>

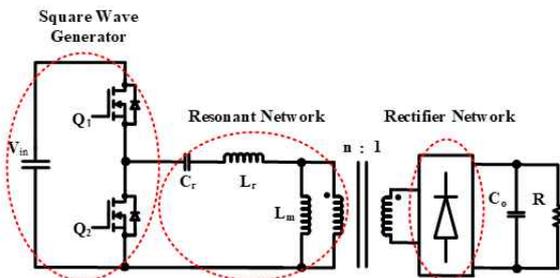


그림 1 LLC 공진 컨버터의 기본 구조  
Fig. 1 Structure of LLC resonant converter

그림1은 일반적인 Half-Bridge LLC 공진 컨버터의 기본 회로이다. LLC 공진 컨버터는 중부하에서 주파수를 통해 이득을 조절할 수 있다. 하지만 경부하에서는 주파수 작동 범위에 제한으로 인해 이득을 조절하지 못하는 문제점이 있다.

이에 따라 본 논문에서는 경부하 조건에서 Single-Stage

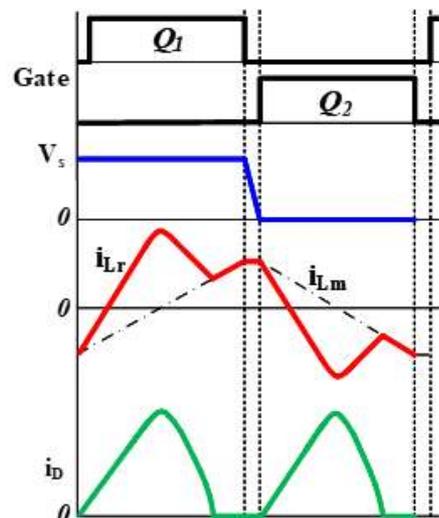
LLC 공진 컨버터에 주파수, 시비율, On-Off 제어를 통해 넓은 출력 이득 범위를 하였으며 동작 특성을 분석하였다.

### 2. 본론

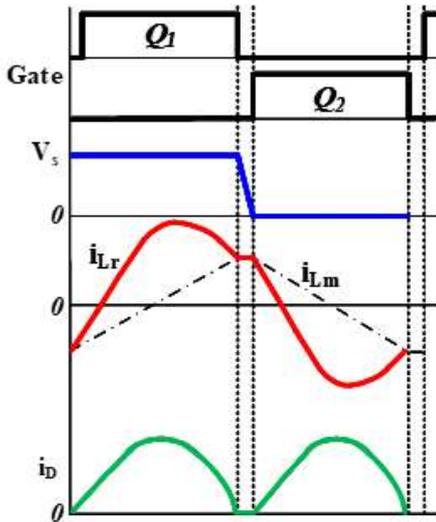
#### 2.1 LLC 공진 컨버터의 기본 구조

그림 1에서 보는 것처럼 LLC공진 컨버터는 크게 3가지로 구성된다. Half-Bridge 형태로 이루어진 스위치를 스위칭하여 입력 DC 전압을 피크 전압을 갖는 구형파 전압을 발생 시키는 구형파 발진 회로(Square Wave Generator), 공진 인덕턴스( $L_r$ ), 공진 커패시턴스( $C_r$ ) 변압기 자화 인덕턴스( $L_m$ )로 구성된 공진 네트워크(Resonant Network)의 회로를 이용하여 공진 현상을 발생시켜 ZVS를 달성하고, 변압기를 통해 발생된 2차 측 전압을 다이오드로 이루어진 정류기 단(Rectifier Network)를 통하여 전압을 정류하여 직류로 변환하는 구조로 이루어져 있다.

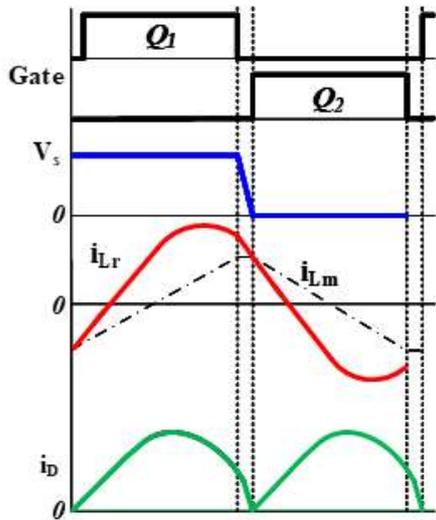
LLC 공진 컨버터는 공진 주파수( $F_r$ , Frequency Resonant)와 스위칭 주파수( $F_s$ , Frequency Switching)의 관계에 따라 그림 2과 같이 3가지 모드로 분류 할 수 있으며 이득 특성 또한 변화하게 된다.



(a) 스위칭 주파수가 공진 주파수 아래에서 동작할 때  
(a) When the switching frequency operates below the resonant frequency



(b) 스위칭 주파수가 공진 주파수와 같을 때  
 (b) When the switching frequency is equal to the resonant frequency



(c) 스위칭 주파수가 공진 주파수 위에서 동작할 때  
 (c) When the switching frequency is operating above the resonant frequency

그림 2 LLC 공진 컨버터의 주파수에 따른 동작 모드  
 Fig. 2 Operation mode according to frequency of LLC resonant converter

그림 2는 LLC 공진 컨버터의 주파수에 따른 동작 모드에 따른 동작 파형 설명은 다음과 같다.

(a)  $f_r > f_s$  : 스위칭 반 주기가 공진 반 주기보다 길어서 공진 반 주기가 종료되어도 계속 유지된다 다른 반 주기를 시작하게 된다.

(b)  $f_r = f_s$  : 스위칭 반 주기와 공진 반 주기가 같으며 2차 측 정류기 다이오드 단으로 흐르는 전류는 연속적이다.

(c)  $f_r < f_s$  : 스위칭 반 주기가 공진 반 주기보다 짧아서 공진 반 주기가 끝나기 전에 스위칭이 끝나 2차 측 정류기 다이오드 단에 흐르는 전류는 불연속적이다.

## 1.2 Single-Stage LLC 공진 컨버터

그림 3은 PFC 단과 비 절연형 DC/DC 컨버터 단으로 구성되어 있는 일반적인 Two-Stage LLC 공진 컨버터이다. 일반적으로 구동회로는 고효율이 요구되지만 Two-Stage로 구성된 회로는 스위칭 손실 및 기타 요건들에 의한 전력 소모로 인하여 실질적으로 조건에 달성하기 어려움이 있다.

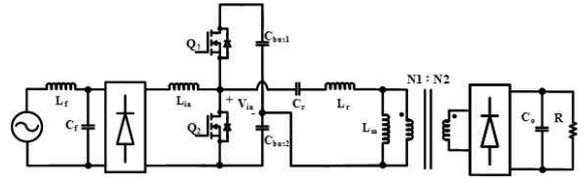


그림 3 Two-Stage LLC 공진 컨버터  
 Fig. 3 Two-Stage LLC resonant converter

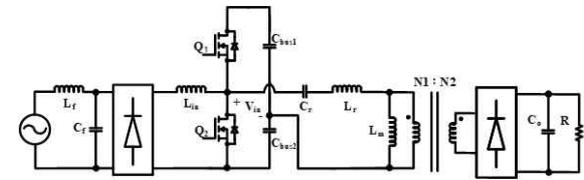


그림 4 Single-Stage LLC 공진 컨버터  
 Fig. 4 Single-Stage LLC resonant converter

그림 4는 PFC 단과 DC/DC 컨버터 으로 이루어진 Two-Stage LLC 공진 컨버터에서 PFC 단과 DC/DC 컨버터 단을 통합하여 소자 개수를 줄여 효율을 높인 Single-Stage LLC 공진 컨버터 이다. 기존 회로에 비해 스위치, 다이오드 소자를 줄여 스위칭 및 도통 손실을 줄여 효율이 향상되었을 것으로 예상된다. 실제로 LLC공진 컨버터의 ZVS 달성을 통해 90% 높은 효율을 얻었다는 연구 결과도 있다.<sup>[3]</sup>

### 1.2.1 Single-Stage LLC 공진 컨버터의 경부하 조건에서 제어 방법

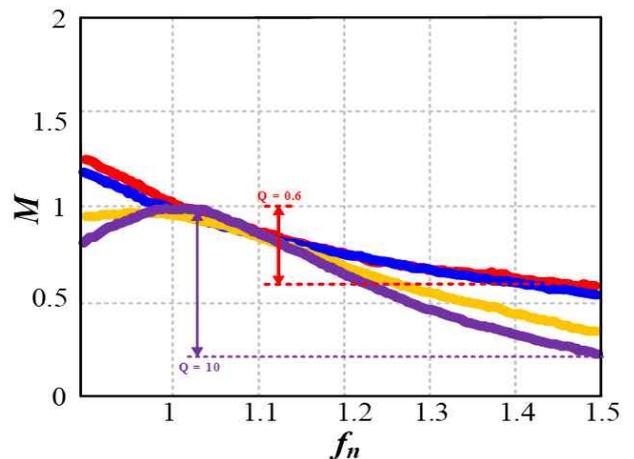


그림 5 LLC 공진 컨버터의 주파수에 따른 이득 곡선  
 Fig. 5 Gain curve according to frequency of LLC resonant converter

일반적인 LLC 공진 컨버터의 동작점은 고효율을 얻기 위해 스위칭 주파수가 공진 주파수보다 큰 지점을 동작점으로 잡는다. 여기서 LLC 공진 컨버터는 주파수 제어를 통해 이득을 조절할 수 있다. 주파수 및 부하 변화에 각각 다른 이득을 가지

고 있으며 그림 5는 이를 잘 보여주는 LLC 공진 컨버터의 이득 곡선이다. 중부하에서는 주파수 제어를 통해 이득 조절이 충분히 가능하다. 하지만 경부하의 경우에는 주파수 제어로 이득이 크게 변하지 않는다.

이에 따라 본 논문에서는 경부하 조건에서 넓은 범위의 출력이 가능하도록 하기 위해 다음과 같이 구성하였다. 먼저 주파수 제어하여 출력 이득을 조절한다. 이 때 주파수 동작 범위 제한에 걸리는 영역에서는 시비율 제어를 통해 출력 이득을 조절한다. 여기서 Single-stage LLC 공진 컨버터는 상단, 하단 스위치가 시비율이 일정한 범위 이상으로 차이가 나게 되면 PFC가 비정상적으로 작동을 하게 되는데 이는 부스트 동작 및 PFC 동작에 관여하는 스위치의 비율이 작아지기 때문이다.

PFC가 비정상적으로 동작하는 것을 방지 하기 위해서 Single-Stage LLC공진 컨버터의 상단 스위치만 ON 또는 OFF 하는 방법을 적용시켜 하단 스위치는 계속하여 부스트 동작 및 PFC 동작을 하도록 하여서 경부하 시에 출력 전압이 보다 넓은 범위를 가질 수 있도록 제어한다.

### 1.3 시뮬레이션

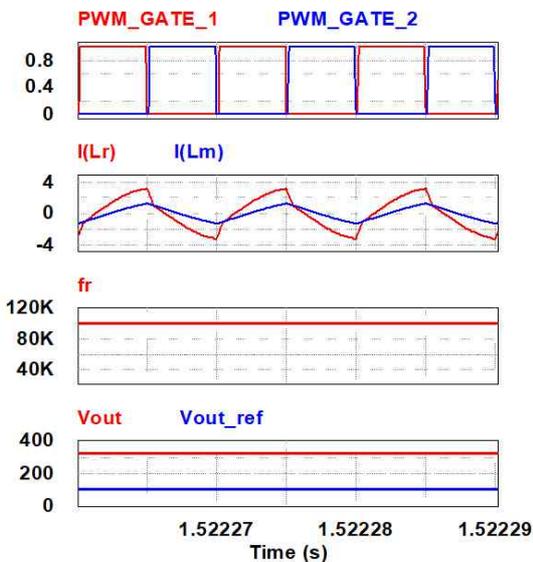


그림 6 시뮬레이션 파형  
Fig. 6 simulation waveform

그림 6는 Single-Stage LLC 공진 컨버터의 경부하 조건에서 이득을 조절하기 위해 주파수 제어를 이용한 시뮬레이션 파형이다. 경부하 조건에서 설정한 주파수 영역 내에서 가장 높은 주파수 대역에서 출력 전압이 제어가 되지 않는 것을 알 수 있다. 이는 그림 5에서 볼 수 있는 것처럼 경부하 조건에서는 주파수 제어를 통해 이득을 조절하는 것이 어렵다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 2.(C)와 같이 스위칭 주파수가 공진 주파수보다 클 때의 전류 특성을 볼 수 있다.

그림 7은 Single-Stage LLC 공진 컨버터의 경부하 조건에서 시비율 제어 및 ON/OFF 제어를 통해 이득을 조절한 시뮬레이션 파형이다. 주파수 제한이 걸리는 영역인 100kHz로 고정된 후 시비율을 제어를 통해 조절을 하지만 PFC가 비정상적으로 작동하는 시비율 지점에서 시비율을 고정시키고 ON/OFF 제어를 통해 경부하 조건에서 출력 전압을 제어가 가

능함을 확인하였다.

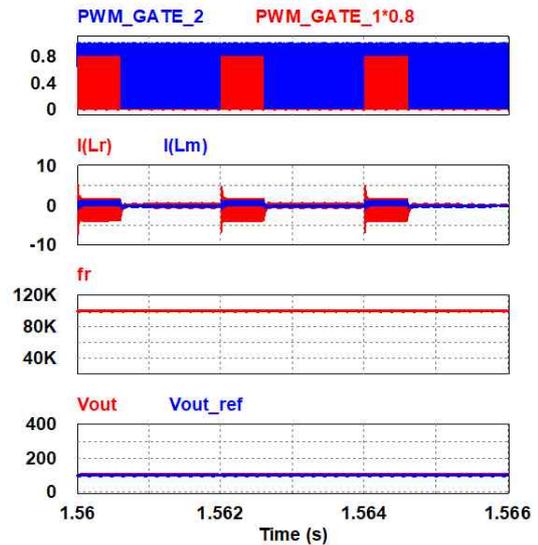


그림 7 시뮬레이션 파형  
Fig. 7 simulation waveform

### 3. 결론

본 논문에서는 PFC단과 DC-DC단으로 구성 되어 있는 일반적인 Two-Stage LLC 공진 컨버터를 소자 개수, 스위칭 및 도통 손실을 줄이고 ZVS동작으로 고효율을 가진 Single-stage LLC 공진 컨버터를 사용하였다. 중부하 시에는 주파수를 통해 이득을 조절할 수 있지만 경부하 시에는 주파수 작동 범위에 제한으로 인해 이득을 조절하지 못하게 되는데 이 때 주파수 제한이 걸리는 영역에서 주파수를 고정하고 시비율을 제어 통해 조절하고 PFC가 비정상적으로 작동하는 시비율 지점에서 시비율을 고정시키고 ON/OFF제어를 통해 이득을 제어하여 경부하 조건에서 넓은 출력 범위를 가지는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임  
(No. NRF-2019R1D1A1B03031532)

### 참고 문헌

- [1] 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.
- [2] Junming Zhang, Jianfeng Wang, Guoxing Zhang, Zhaoming Qian "A hybrid driving scheme for full-bridge synchronous rectifier in LLC resonant converter", in *Proc. IEEE Trans. Power Electron.*, vol, 27, no. 11, pp. 4549-4561, Nov. 2012
- [3] LAI, Ching-Ming, et al. "Design and implementation of a single-stage LLC resonant converter with high power factor" In: *Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on.* IEEE, 2007. P.455-460