

# 작은 필터 Capacitor를 갖는 LLC 공진 컨버터 무부하 특성에 관한 연구

권민준, 김태훈, 이우철  
한경대학교

## A Study on the No-load Characteristic of LLC Resonant Converter with Small Filter Capacitor

Min Jun Kwon, Tae Hun Kim, Woo Cheol Lee  
Hankyong National Univ

### ABSTRACT

LLC 공진 컨버터는 고효율과 높은 전력밀도를 달성할 수 있다는 장점으로 인하여 다양한 분야에 적용되어지고 있다. 최근 플라즈마 공정 분야에도 LLC 공진 컨버터가 적용되고 있는데, 공정의 특성상 컨버터는 아크 방지를 위하여 출력 필터 Capacitor를 작은 값으로 사용하고, 초기 무부하 동작에 대한 제어를 필요로 한다. 하지만 기존의 LLC 공진 컨버터의 분석을 통한 특성은 실제 컨버터의 무부하 동작과 상이하다. 이에 본 논문에서는 작은 필터 Capacitor를 갖는 LLC 공진 컨버터의 무부하 특성 분석에 관한 연구로, 무부하 동작 특성을 분석하고 이를 해석하게 된다. 이렇게 분석된 무부하 특성은 시뮬레이션을 통하여 확인 하였다.

### 1. 서 론

LLC 공진 컨버터는 높은 전력밀도 및 고효율을 달성할 수 있다는 장점으로 인하여 DC 전원장치를 필요로 하는 많은 분야에 연구가 진행되고 있다.<sup>[1]</sup> 다양한 응용분야에 적용되려면 각 공정 특성에 맞는 조건을 만족해야 하며, 그 중에 플라즈마 DC 전원장치로 사용되기 위해서는 아크 방지를 위한 작은 출력 필터 Capacitor 값 설정과 초기 플라즈마를 생성하기 위한 이그니션 전압을 제어에 대한 조건을 만족해야 한다.

LLC 공진 컨버터는 지금까지 많은 연구를 통하여 분석내용과 이론이 적립되어있다. 일반적으로 LLC 공진 컨버터는 FHA(First Harmonic Approximation) 근사방법을 통하여 이득 특성을 분석하는 방법이 사용되는데, 이는 직렬 공진에 가까운 동작을 얻을 수 있으며 전부하 범위에서 특성을 잘 보여준다. 하지만 실제로 LLC 공진 컨버터가 무부하에서 동작할 경우 분석내용과 상이한 특성을 보인다는 것을 확인할 수 있었다.

이에 본 논문에서는 플라즈마 공정에 적용하기 위하여 출력 필터 Capacitor 값을 작게 설정한 LLC 공진 컨버터의 무부하 동작특성을 분석하고 해석하게 된다. 분석 내용은 시뮬레이션을 통하여 확인하게 된다.

### 2. 본 문

#### 2.1 LLC 공진 컨버터

LLC 공진 컨버터는 넓은 부하범위에서 공진을 이용한 ZVS(Zero Voltage Switching) 달성으로 고효율과 높은 전력밀

도를 얻을 수 있게 된다. 그림 1은 LLC 공진 컨버터의 기본 회로이다. LLC 공진 컨버터는 스위치의 동작으로 구형파를 발생시키는 구형파 발생회로, 공진 인덕턴스  $L_r$  과 자화인덕턴스  $L_m$  그리고 공진 커패시턴스  $C_r$  을 통하여 공진이 발생하는 공진 회로, 그리고 정류기로 구성하게 된다.

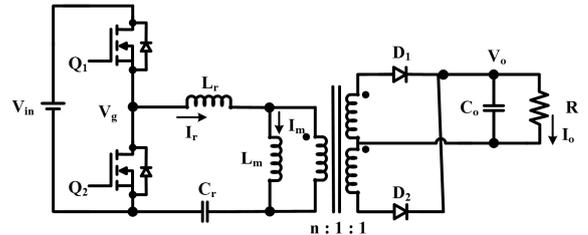


그림 1 LLC 공진컨버터의 회로  
Fig. 1 LLC resonant converter circuit

LLC 공진 컨버터의 변압기 턴 비  $n$  과 공진주파수  $f_o$  는 각각 수식

$$n = \frac{V_{in}/2}{V_o} \quad (1)$$

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

으로 정의할 수 있다.

#### 2.2 LLC 공진 컨버터 특성분석

FHA 근사 방법은 모든 고차 고조파를 무시하여 단일 기본 고조파에 근사화 하는 방식으로 직렬 공진에 가까운 동작을 얻을 수 있다. FHA 근사방법을 LLC 공진 컨버터에 적용하여 기본과 성분의 등가회로를 얻어는 것으로 특성을 분석할 경우 LLC 공진 컨버터 특성에 가까운 동작을 얻을 수 있게 된다.

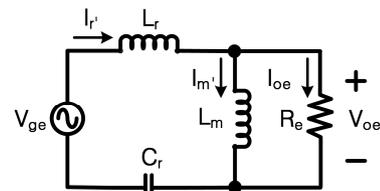


그림 2 LLC 공진컨버터의 등가회로  
Fig. 2 Equivalent circuit of LLC resonant converter

그림 2는 FHA 근사방법을 통해 얻어진 등가회로이다. 이 등가회로에서 LLC 공진 컨버터의 입출력 전압 관계식을 구하게 되면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$M = \left| \frac{L_n f_n^2}{L_n f_n^2 + (f_n^2 - 1)(1 + j f_n L_n Q)} \right| \quad (3)$$

이때,  $L_n = \frac{L_m}{L_r}$ ,  $f_n = \frac{f_{sw}}{f_o}$ ,  $Q = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{R}$  이다.

그림 3은 수식 (3)을 통해 그린 LLC 공진 컨버터의 이득 특성 곡선이다.

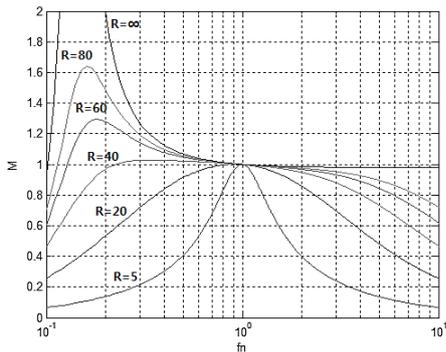


그림 3 LLC 공진컨버터의 전압 이득특성곡선  
Fig. 3 Voltage gain characteristics of LLC resonant converter

이득특성 곡선은 스위칭 주파수  $f_{sw}$ 와 공진 주파수  $f_r$ 를 정규화시킨  $f_n = (f_{sw} / f_o)$ 에 따른 이득  $M$ 을 나타낸다.

LLC 공진 컨버터의 이득은 부하 조건에 따라 공진점을 제외한 주파수지점에서 각각 다른 이득을 갖고 있으며 그림 3을 이를 잘 보여준다.

### 2.3 LLC 공진 컨버터 무부하 동작특성

FHA 근사방법을 통해 얻어진 이득특성은 부하범위에서 LLC 공진 컨버터의 동작을 잘 보여주지만, 무부하 또는 매우 낮은 경부하 조건에서의 실제 동작과는 상이한 결과를 보이게 된다.

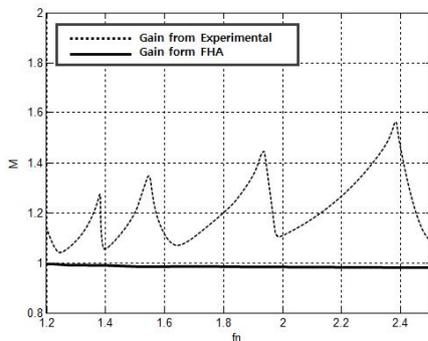


그림 4 FHA 분석과 실험을 통한 무부하 이득특성  
Fig. 4 No-load gain characteristic from FHA and experiment

그림 4는 FHA 분석과 실험을 통한 무부하 이득곡선이다. 실험 데이터를 통해 그린 무부하 이득곡선은 FHA 분석과는 다른 파형을 보이고 있다. 분석을 통한 이득곡선은 무부하 영역에서 크게 변하지 않고 주파수가 증가할수록 조금씩 낮아지

는 반면, 실제동작은 주파수가 상승하면 전압이득 함께 상승하고 그에 따른 전압이득이 주파수점에 따라 일정하게 상승하지 않는다. 이는 FHA 근사방법을 통한 분석에 고려되지 않은 기생성분에 의한 영향으로 정류기 다이오드 기생 Capacitance는 낮은 부하상태에서 이득특성에 영향을 준다.

### 2.4 시뮬레이션

Psim 시뮬레이션을 통해 LLC 공진 컨버터에 정류기 다이오드 기생 Capacitance를 추가하여 출력이득에 미치는 영향을 확인해 보았다.

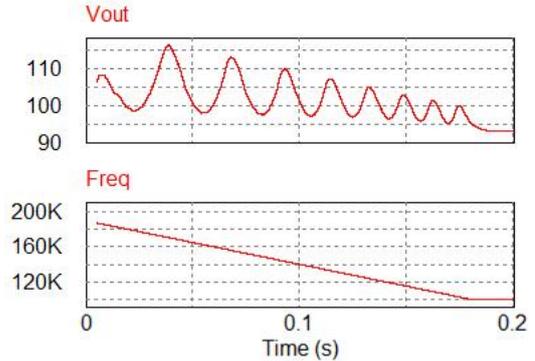


그림 5 시뮬레이션 결과  
Fig. 5 Simulation results

그림 5는 정류기 다이오드 기생 Capacitance를 고려한 무부하 LLC 공진 컨버터의 시뮬레이션 결과 파형이다. 시뮬레이션 파형은 스위칭 주파수  $f_{sw}$ 에 따른 전압 특성을 확인하기 위하여 스위칭 주파수를 200kHz에서 100kHz까지 Sweep 하면서 확인하였다. 시뮬레이션을 통하여 기생 Capacitance의 추가로 전압 이득에 영향을 주어 FHA 분석 내용과 다른 특성을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

## 3. 결론

일반적으로 LLC 공진 컨버터의 이득 특성을 분석하기 위한 방법으로 FHA 근사방법이 대표적으로 사용되고 있으며 이는 전부하 범위에서 공진 컨버터의 동작 특성을 잘 보여준다. 하지만 무부하 조건이나 매우 낮은 경부하에서는 FHA 분석된 이득특성과 실제 동작이 차이를 보이게 된다. 이에 본 논문에서는 LLC 공진 컨버터의 분석된 이득특성과 실제 컨버터의 이득특성을 비교하고 기생성분에 의한 영향을 살펴보았다. 분석 내용은 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있었다.

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

### 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.