

플라즈마 전원장치용 LLC 공진컨버터의 이득 특성 분석

Analysis of the Gain Characteristic in LLC Resonant Converter for Plasma Power Supply

권민준* · 김태훈* · 이우철†
(Min-Jun Kwon · Tae-Hun Kim · Woo-Cheol Lee)

Abstract - The plasma process is applied to various industrial fields such as high-tech IT industry, textiles and medical. Therefore, there is increasing interest in the plasma power supply, and demand for power devices of high efficiency and high power density is increased. Plasma power supply for process must solve the arc problem, when the plasma is unstable. The output capacitor is closely related to the arc problem. If the output capacitor is smaller, the damage from the arc problem is reduced. However, the small value of the output capacitor affects the operating characteristics of the power supply. In this paper, a LLC resonant converter is adopted, because it can achieve high efficiency and power density in the plasma DC power supply. However, due to the small value of the output capacitor, the converter is operated as a LLC resonant converter. Therefore, a gain characteristic of LLC resonant converter is analyzed by using the FHA (First Harmonic Approximation) in plasma power supply. Simulation and experimental results are presented to verify the characteristic analysis of LLC Resonant Converter.

Key Words : LLC resonant converter, LLC, Plasma power supply

1. 서론

플라즈마 공정은 반도체, LCD (Liquid Crystal Display), PDP (Plasma Panel Display) 등 첨단 IT 산업에서부터 섬유분야, 의료분야 등 많은 분야에서 사용되고 있는 산업기술이다. 플라즈마 공정에는 플라즈마를 생성하기 위한 전원장치를 필요로 하게 되는데, 수요와 관심이 늘어나면서 플라즈마 공정용 전원장치의 고효율화 대한 요구 또한 늘어나고 있다. 이러한 전원장치로 높은 전력밀도와 ZVS (Zero Voltage Switching)를 통해 고효율을 달성할 수 있는 LLC 공진컨버터가 DC 플라즈마 공정용 전원장치로 적용될 수 있게 된다[1][2].

플라즈마 공정에는 플라즈마가 불안정할 경우 아크(arc)가 발생할 수 있다는 문제점이 있다[3][4]. 아크가 발생할 경우 제품의 불량률 만들고 전체 시스템에도 손상을 줄 수 있기 때문에 플라즈마 전원장치는 아크 문제에 대한 해결책과 요구조건을 만족해야만 한다. 아크의 영향을 줄이기 위한 방법 중 하나로, 출력 커패시턴스 값을 작게 설정하는 방법을 사용하게 된다. 이러한 설정은 아크에 의한 손상을 줄일 수 있는 반면 전원장치의 동작

특성에 영향을 미치게 되는데, LLC 공진컨버터 또한 기존과 다른 동작특성을 보이게 된다[5].

본 연구에서는 LLC 공진컨버터를 플라즈마 전원장치에 적용하기 위하여 출력 커패시턴스 값이 작을 경우 LLC 공진 컨버터에 미치는 영향을 분석하게 된다. 분석을 위하여 출력 커패시턴스를 고려한 LLC 공진컨버터를 LLC 공진컨버터로 분류하였으며 기존의 LLC 공진컨버터의 이득특성 분석 방법인 FHA (First Harmonic Approximation) 방법을 적용하여 해석하였다. 기존의 LLC 공진컨버터와 출력 커패시터를 고려한 LLC 공진컨버터의 이득특성을 비교 분석하였으며, 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증하였다.

2. 본 문

2.1 LLC 공진컨버터의 기본구조

LLC 공진 컨버터는 넓은 부하조건에서 ZVS 달성을 통한 고효율과 높은 전력밀도로 다양한 응용분야에 적용되고 각광 받고 있는 토폴로지이다[1].

그림 1은 LLC 공진 컨버터의 기본 회로로 LLC 공진컨버터는 스위치를 이용한 구형파 발생회로(Square Wave Generator), 공진 인덕턴스 L_r 과 공진 커패시턴스 C_r , 그리고 변압기 자화인덕턴스 L_m 으로 이루어진 공진 회로(Resonant Network), 그리고 정류기단(Rectifier Network)으로 구성이 되어 있다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Electronic & Control Engineering, Institute for information technology convergence, Hankyong National University, Korea
E-mail : woocheol@hknu.ac.kr

* Dept. of Electrical Electronic & Control Engineering, Hankyong National University, Korea

Received : August 23, 2016; Accepted : November 11, 2016

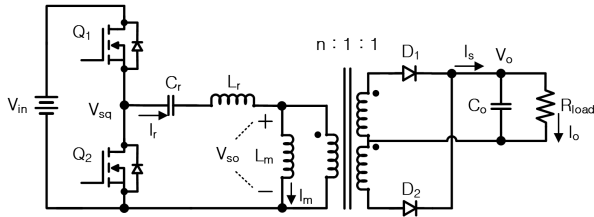


그림 1 LLC 공진컨버터의 회로
Fig. 1 LLC resonant converter circuit

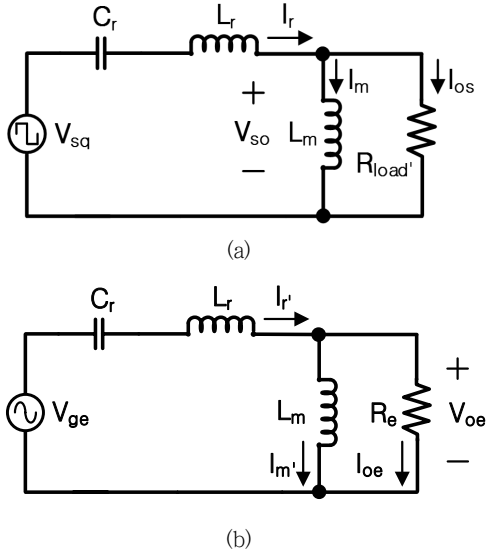


그림 2 LLC 공진컨버터의 등가회로
(a) 구형파 등가회로, (b) AC 등가회로.
Fig. 2 Equivalent circuit of LLC resonant converter
(a) Square wave equivalent circuit, (b) AC equivalent circuit.

구형파 발생회로는 그림 1에서는 Half bridge 로 구성이 되어 있으며, 응용분야에 따라 Full bridge로 구성할 수도 있다. 다이오드 정류기 회로는 Center Tapped, Full bridge, Voltage Doubler 등 다양하게 적용될 수 있다.

2.2 LLC 공진컨버터 전압이득 특성

LLC 공진컨버터의 전압이득특성을 분석하기 위해서는 일반적으로 FHA 근사방법이 사용된다. 구형파에는 실제 다수의 고조파 성분이 포함되어 있어 정현파 직렬 공진과 상이하기 때문에, FHA 방법을 통해 기본파 성분만을 고려하여 정현파 직렬공진에 가까운 동작으로 설계결과를 얻을 수 있게 된다[5][6]. FHA 근사방법은 구형파를 단일 기본파로 근사하고 모든 고차 고조파를 무시하여 기본파만을 해석하는 방식으로, FHA 를 적용함으로써 LLC 공진 컨버터의 AC 등가회로를 얻을 수 있다.

그림 2는 LLC 공진 컨버터의 등가회로이며 (a)는 일반적으로 등가할 수 있는 구형파 등가회로, (b)는 FHA 근사 방법을 통해

얻을 수 있는 AC 등가회로이다. 그림 2(a)의 등가회로는 입력전압 V_{sq} 를 Peak로 갖는 구형파 입력전압 V_{sq} 와 턴 비를 이용하여 1차 측으로 등가한 저항 R_{load} 와 저항 R_{load} 에 흐르는 I_{so} 로 표현할 수 있다. I_{so} 는 다음의 수식으로 표현할 수 있다.

$$I_{os} = V_{so} / R_{load}' \quad (1)$$

이러한 등가회로 (a)는 고조파 성분을 포함하고 있기 때문에 설계결과가 직렬공진에 근접한 결과를 얻기 힘들다는 것을 알 수 있다. 그럼으로 그림 2(b)와 같은 FHA 근사방법을 통해 새로운 등가회로를 구성해야만 한다.

그림 2(b)를 통해 LLC 공진컨버터의 전압이득을 도출하기 위하여 회로간의 각 변수와의 관계를 정리하는 과정을 거치게 된다. 입력 측 구형파와 전압의 기본파와 전압은 푸리에 급수 변환을 통하여 얻을 수 있다.

기본파 등가 입력전압 V_{ge} 는

$$V_{ge}(t) = \frac{2}{\pi} \times V_{in} \times \sin(2\pi f_{sw}t) \quad (2)$$

으로, RMS 값은

$$V_{ge} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \times V_{in} \quad (3)$$

이 된다.

출력 측 기본전압 V_{oe} 는

$$V_{oc}(t) = \frac{4}{\pi} \times n \times V_o \times \sin(2\pi f_{sw}t - \phi_V) \quad (4)$$

이며, 여기서 ϕ_V 는 V_{oe} 와 V_{ge} 간의 위상각이다. 출력전압의 RMS는

$$V_{oe} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \times n \times V_o \quad (5)$$

가 된다.

V_{oe} 와 I_{oe} 에 해당하는 기본구성전류는 그림 1에서 다이오드 전류를 통해 출력전류를

$$I_o = \frac{1}{T} \int_0^T I_d(t) dt \quad (6)$$

와 같이 정리하고, I_d 를 턴 수로 i_{oe} 를 등가 하는 것으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$i_{oe}(t) = \frac{\pi}{2} \times \frac{1}{n} \times I_o \times \sin(2\pi f_{sw}t - \phi_i) \quad (7)$$

여기서 ϕ_i 는 i_{oe} 와 V_{ge} 사이의 위상각 이다. 출력 전류의 RMS는

$$I_{oe} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \times \frac{1}{n} \times I_o \quad (8)$$

이다.

여기서 AC 등가부하저항 R_e 는 등가 출력전압 V_{oc} 의 수식 (5)와 출력전류 I_{oc} 에 대한 수식 (8)을 통하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R_e = \frac{V_{oc}}{I_{oc}} = \frac{8 \times n^2}{\pi^2} \times \frac{V_o}{I_o} = \frac{8 \times n^2}{\pi^2} \times R_{load} \quad (9)$$

각 주파수를

$$\omega = \omega_{sw} = 2\pi f_{sw} \quad (10)$$

와 같이 간단하게 나타내게 된다면, 커패시턴스, 인덕턴스의 리액턴스 C_n , L_r 그리고 L_m 은 $X_{cr} = 1/\omega C_n$, $X_{Lr} = \omega L_r$, $X_{Lm} = \omega L_m$ 이며, 그림 2(b)의 자화전류 I_m 의 RMS 는 식 (11) 과 같다.

$$I_{m,rms} = \frac{V_{oc}}{\omega L_m} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{n \times V_o}{\omega L_m} \quad (11)$$

다음과 같은 LLC 공진컨버터의 AC 등가회로의 변수관계를 통해서 전압이득 함수를 유도하게 된다.

DC 입력전압과 출력전압은 스위칭 모드로 변환되고 AC 전압 비율의 $M_{g,AC}$ 의 V_{ge} 와 V_{oe} 에 의한 근사화 될 수 있다.

$$M_{g,AC} = \frac{V_{oc}}{V_{ge}} \quad (12)$$

식을 표준화 된 형식으로 표현하기 위해 먼저 정규화된 주파수로 표현하면

$$f_n = \frac{f_{sw}}{f_0} \quad (13)$$

이며, 여기서 f_{sw} 는 스위칭 주파수, f_0 는 공진주파수이다.

또한 두 개의 인덕턴스를 결합하여 인덕턴스 비율로 정규화 하게 되면

$$L_n = \frac{L_m}{L_r} \quad (14)$$

이 되며, 직렬공진회로의 Q Factor는 다음과 같이 정의된다.

$$Q_e = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{R_e} \quad (15)$$

이러한 정정의 도움으로, 전압이득 함수는 정규화될 수 있으며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M_g = \left| \frac{L_n \times f_n^2}{[(L_n + 1) \times f_n^2 - 1] + j[(f_n^2 - 1) \times f_n \times Q_e \times L_n]} \right| \quad (16)$$

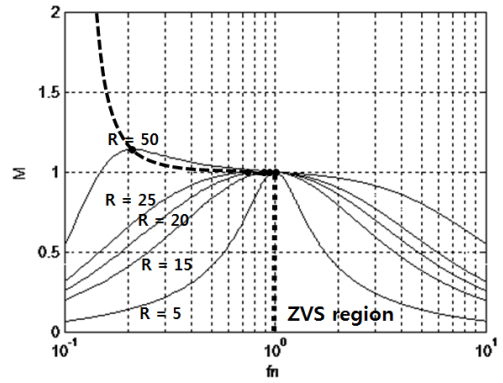


그림 3 LLC 공진컨버터의 전압이득 특성

Fig. 3 Voltage gain characteristics of LLC resonant converter

유도된 전압이득 수식을 통해 LLC 공진컨버터의 이득곡선을 그려보게 되면 다음 그림 3과 같은 곡선을 그릴 수 있다.

그림 3은 일반적인 LLC 공진 컨버터의 이득특성을 나타내는 곡선으로 부하조건에 따라 다음과 같은 특성을 보이게 된다. 부하가 작아질수록 최대이득 주파수 점이 왼쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. LLC 공진컨버터는 부하조건에 따라 최대이득을 갖는 스위칭 주파수가 공진주파수보다 낮은 영역에 존재한다는 특징을 갖는다.

또한 공진점 ($f_n=1$)에서 최대 이득을 갖는 곡선의 우측상단 영역은 ZVS 영역으로, 이 영역에서 동작할 경우 ZVS 조건을 달성하여 높은 효율을 낼 수 있게 된다.

2.3 LLCC 공진컨버터 전압이득 특성

다음은 출력 커패시턴스를 고려한 LLCC 공진 컨버터의 전압이득 특성을 분석하기 위하여 기존의 LLC 공진 컨버터와 같이 FHA 분석방법을 사용하고 출력 커패시터 인 C_o 를 고려하여 분석하였다.

그림 4는 LLCC 공진 컨버터의 등가회로로 (a)는 구형파 등가회로, (b)는 FHA 근사방법을 통해 얻어진 AC 등가회로이다. 그림 4(a)는 LLC 공진컨버터와 마찬가지로 일반적으로 등가화할 수 있는 구형파 등가회로이며 여기서 출력커패시턴스 C_o '는 변압기 턴 비에 의해 그림 1에서 2차 측의 C_o 를 1차 측으로 변환한 값이다. 마찬가지로 등가회로 (a)는 고조파 성분을 포함하고 있기 때문에 그림 4(b)와 같은 FHA 근사 등가회로를 다시 구성해야 한다.

기존의 LLC 공진 컨버터는 출력 Capacitance 값이 충분히 크기 때문에 공진에 영향이 작아 이득특성 해석에 고려하지 않게 된다. 하지만 플라즈마 공정용 LLC 공진 컨버터에서는 출력단 Capacitance 값을 작게 설정하게 되면서 기존의 LLC 공진컨버터와는 다른 이득특성을 보이게 된다. 이렇게 변화하는 이득특성을 분석하기 위해 C_o 값이 작은 경우 C_o 도 함께 고려한 LLC 공진 컨버터, 즉 LLCC 공진컨버터의 이득특성을 분석하게 된다.

그림 4(b)의 C_{oe} 는 LLCC 공진컨버터의 출력 커패시터 C_o 의 AC 등가 Capacitor이다. AC 등가 커패시터 C_{oe} 는 앞서 설명한

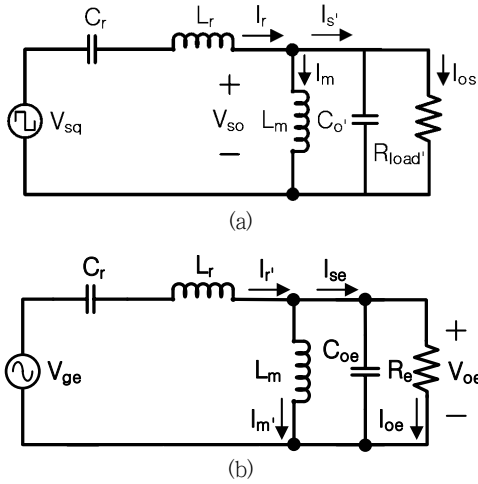


그림 4 LLCC 공진컨버터의 등가회로

(a) 구형파 등가회로, (b) AC 등가회로.

Fig. 4 Equivalent circuit of LLCC resonant converter

(a) Square wave equivalent circuit, (b) AC equivalent circuit.

것과 같이 FHA 분석 방법을 통하여 등가회로를 구성하고, 등가 출력 전압 V_{oe} 와 2차 측 등가 전류 I_{se} 를 기본회로와의 관계를 유도하고 도출하는 것을 적용하였다. 마찬가지로 전압이득을 도출하기 위하여 등가회로의 각 변수와 관계를 정리하게 되면, 입력 구형파 전압의 기본파 전압인 V_{ge} , 출력 기본파 전압 V_{oe} 는 수식 (2)~(5)이며, 이는 기존의 LLC 공진컨버터와 같은 관계가 된다. 또한 기존의 LLC 공진컨버터에서는 출력 I_{oe} 에 해당하는 출력 전류를 계산하는 방법을 통해 등가 부하저항과의 관계를 정리하였지만 LLCC 공진컨버터에서는 C_{oe} 가 추가되었기 때문에 등가저항 R_e 와 등가커패시턴스 C_{oe} 의 병렬 임피던스 합 Z_{se} 에 흐르는 전류 I_{se} 의 계산하는 것으로 등가 커패시턴스와의 관계를 정리하게 된다.

$$I_{se}(t) = \frac{\pi}{2} \times \frac{1}{n} \times I_s \times \sin(2\pi f_{sw} t - \phi_i) \quad (17)$$

이때, 전류 I_s 는 그림 1의 출력 커패시터 C_o 와 부하저항 R_{load} 를 통해 흐르는 전류의 합이 된다. 여기서 ϕ_i 는 I_{oe} 와 V_{ge} 사이의 위상각 이다.

AC 등가 부하저항 R_e 와 등가 출력 커패시터 C_{oe} 의 병렬 임피던스의 합 Z_{se} 는 수식 (5)와 (17)를 통하여 다음과 같이 계산할 수 있게 된다.

$$Z_{se} = \frac{8n^2}{\pi^2} Z_s \quad (18)$$

여기서 $Z_{se} = R_e \parallel (1/j\omega C_{oe})$, $Z_s = R_{load} \parallel (1/j\omega C_o)$ 이며, 부하저항 R_{load} 와 출력 커패시터 C_o 의 병렬 임피던스의 합 Z_s 와의 관계식으로 표현할 수 있게 된다. 등가 출력 커패시터와 부하저항의 병렬 임피던스 합인 Z_{se} 를 통하여 출력 커패시터 C_o 를 수식적으로

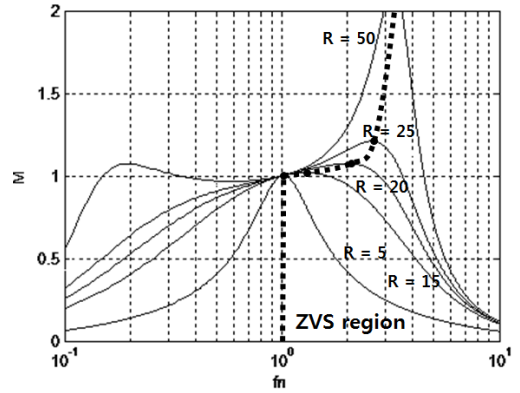


그림 5 LLCC 공진컨버터의 전압이득 특성

Fig. 5 Voltage gain characteristics of LLCC resonant converter

고려할 수 있게 된다. LLC와 마찬가지로 DC 입력 전압과 출력전압은 스위칭 모드로 변환되고 AC 전압비율의 $M_{g,AC}$ 의 V_{ge} 와 V_{oe} 에 의해 근사화 될 수 있다.

$$M_g = \frac{V_{oe}}{V_{ge}} = \left| \frac{(j\omega L_m \parallel \frac{1}{j\omega C_{oe}} \parallel R_e)}{(j\omega L_m \parallel \frac{1}{j\omega C_{oe}} \parallel R_e) + j\omega L_r + \frac{1}{j\omega C_r}} \right| \quad (19)$$

그리고 $Z_{se} = R_e \parallel (1/j\omega C_{oe})$ 로 정리하면

$$M_g = \left| \frac{(j\omega L_m \parallel Z_{se})}{(j\omega L_m \parallel Z_{se}) + j\omega L_r + \frac{1}{j\omega C_r}} \right| \quad (20)$$

가 되며, 정규화 관계수식 (10)~(15)을 통해 다음과 같이 전압이득 함수를 정리할 수 있게 된다.

$$M_g = \left| \frac{jL_n \times f_n}{jf_n (1 + L_n - \frac{1}{f_n^2}) + L_n (1 - f_n^2)} \sqrt{\frac{L_r}{C_r} \frac{1}{Z_{se}}} \right| \quad (21)$$

유도된 수식을 통해 LLCC 공진컨버터의 전압이득 곡선을 그려보게 되면 그림 5와 같은 전압 이득곡선을 그릴 수 있게 된다.

그림 5는 값이 작은 출력 Capacitance 를 고려한 LLCC 공진컨버터의 이득곡선이다. LLCC 공진컨버터는 기존의 LLC 공진컨버터와 마찬가지로 부하조건에 따라 각기 다른 이득곡선을 그릴 수 있다. 하지만 부하가 작아질수록 최대이득을 갖는 주파수 점이 공진점 오른쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 분석을 통하여 출력 Capacitance 값을 작게 설정할 경우 기존의 LLC 공진컨버터와는 다른 이득특성을 보이게 되는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 플라즈마 공정용 전원장치로 LLC 공진 컨버터가 응용되기 위해서는 기존의 LLC 공진 컨버터의 설계조건이 아닌

LLCC 공진 컨버터의 분석내용에 따라 결정되어야 한다. 운전 범위는 부하특성에 따라 결정되는 ZVS 영역에서 동작하여야 한다. 설계된 운전범위는 플라즈마 공정의 초기 기동시 무부하 조건에서 동작하기 때문에 이그니션 전압은 ZVS 영역이 아닐 수도 있다.

2.4 시뮬레이션 및 실험

분석된 LLCC 공진컨버터의 이득특성을 확인하기 위하여 PSIM 프로그램을 이용한 시뮬레이션과 실제 하드웨어를 구성하여 실험하였다. 실험 및 시뮬레이션 절차는 동일한 입력에서 부하조건과 스위칭 주파수에 따라 변화하는 이득 데이터를 얻어 이를 통해 분석하는 방식을 사용하였다.

표 1 시뮬레이션 및 실험 조건

Table 1 Test condition

Parameter	Value
Switching frequency, fs	50 [kHz]~[150kHz]
Resonant frequency, fr	79 [kHz]
Resonant Inductance, Lr	14.98 [uH]
Magnetizing Inductance, Lm	714.8803 [uH]
Resonant Capacitance, Cr	270.28 [nF]
Output Capacitance, Co	0.03 [uF]
Input Voltage, Vin	100 [V]

표 1은 시뮬레이션 및 실험 조건이다. LLCC 공진 컨버터의 공진주파수 fr은 79 kHz, 스위칭 주파수의 범위는 50 kHz에서 150 kHz로 선정하였으며 출력 필터 Capacitance 값은 0.03 uF으로 작게 설정하였다. 출력 필터 Capacitance의 경우 실험을 통해 아크발생시 허용되는 전류 값을 참조하여 시행착오 방법을 사용하여 설정하였다.

2.4.1 LLCC 공진컨버터의 이득특성 시뮬레이션

먼저 LLCC 공진컨버터의 이득특성의 분석내용을 확인하기 위한 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션은 스위칭 주파수를 50 kHz에서 150 kHz까지 Sweep 하면서, 출력전압을 확인해 보았다.

그림 6은 LLCC 공진컨버터의 시뮬레이션 결과 파형이다. 시뮬레이션파형은 (a)는 부하 5Ω, (b)는 15Ω 그리고 (c)는 25Ω에서의 각 주파수에 따른 출력 전압 V_{out1} 과 출력전압을 필터링한 V_{ft} 값을 보여준다. 마지막 (d) 파형은 PSIM DLL기능을 통해 스위칭 주파수를 보여주는 파형이다. 출력 Capacitance 값이 작기 때문에 실제 출력 전압 파형은 리플이 크게 나오는 것을 알 수 있다. 이득특성을 비교하기 위하여 출력전압을 필터를 통하여 측정된 V_{ft} 을 함께 측정하였다. 결과 파형을 정리해 보면 다음과 같은 곡선을 그릴 수 있다.

그림 7은 LLCC 공진컨버터의 시뮬레이션 결과 파형을 정리한 그래프이다. 시뮬레이션 결과를 통해 C_o 값이 작을 경우 부하특성에 따라 최대이득이 되는 주파수점이 높아지는 것을 확인할 수 있

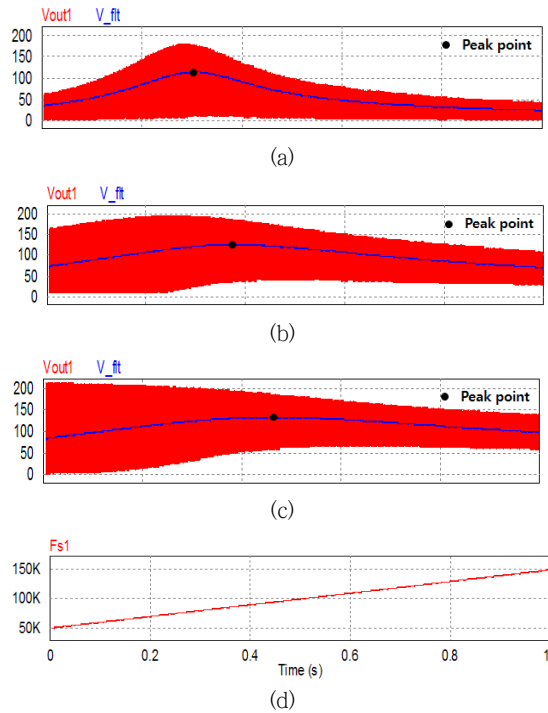


그림 6 LLCC 공진컨버터 시뮬레이션 결과 (a) 5Ω 부하에서의 출력전압, (b) 15Ω 부하에서의 출력전압, (c) 25Ω 부하에서의 출력전압, (d) 스위칭 주파수.

Fig. 6 Simulation results of LLCC Resonant converter (a) Output voltage at the load 5Ω, (b) Output voltage at the load 15Ω, (c) Output voltage at the load 25Ω, (d) Switching Frequency.

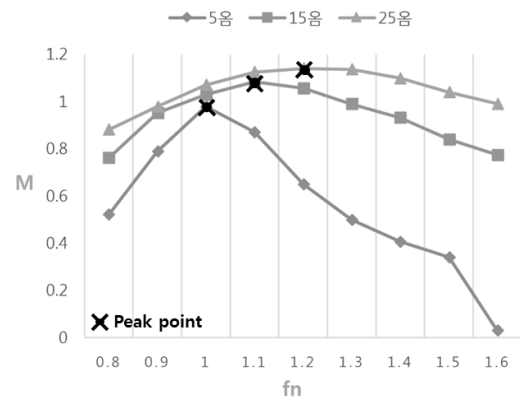


그림 7 시뮬레이션 결과 그래프

Fig. 7 Simulation results graph

으며, 해석된 이득특성 결과와 유사한 것을 확인할 수 있다.

2.4.2 LLCC 공진컨버터의 이득특성 실험

다음은 LLCC 공진컨버터의 실험을 통하여 이득특성 분석내용

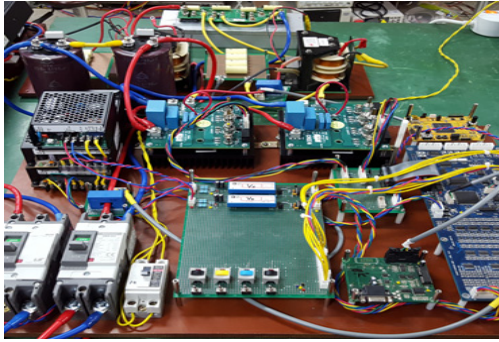
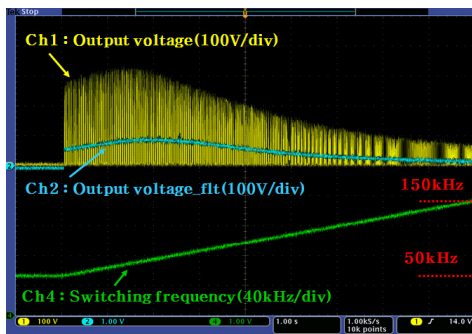


그림 8 실험회로
Fig. 8 Experiment circuit

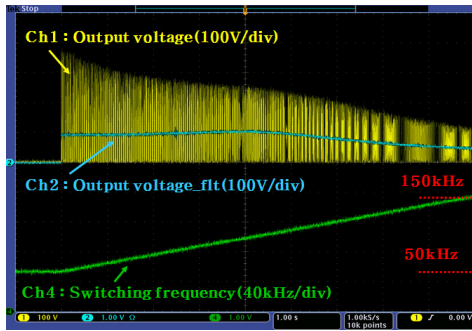
을 확인하였다.

그림 8은 플라즈마 공정용 LLCC 공진컨버터의 실험 회로이다. 실험 회로는 TI 사의 TMS320F28335를 이용하여 디지털로 구현하였으며, 높은 스위칭주파수로 동작시키기 위하여 CREE 사의 SiC MOSFET을 사용하였다. 또한 변압기는 1차 권선과 2차 권선이 각각 나누어져 있는 LLT(Inductor-Inductor-Transformer) 변압기를 사용하였다[7].

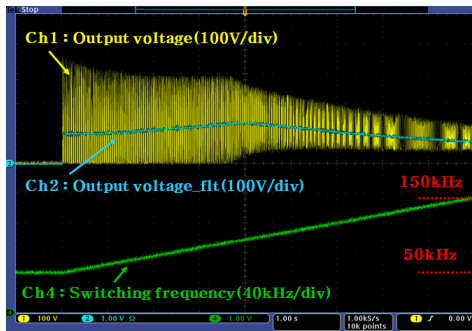
실험은 시뮬레이션과 마찬가지로 스위칭 주파수에 따른 전압 이득특성을 분석하기 위하여 부하에 따른 출력전압 파형을 측정해 보았다.



(a)

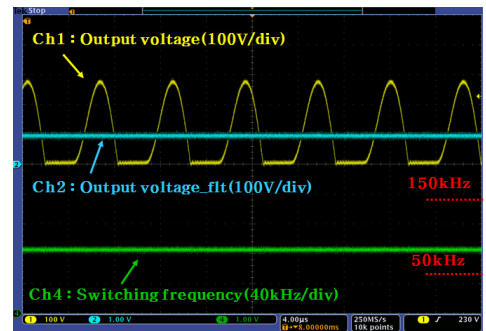


(b)

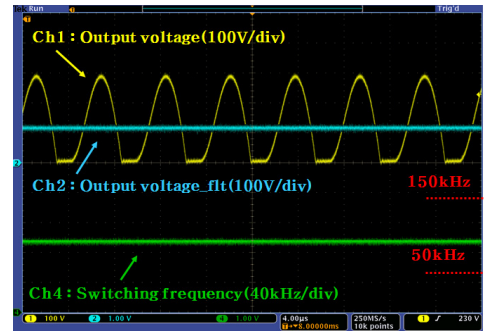


(c)

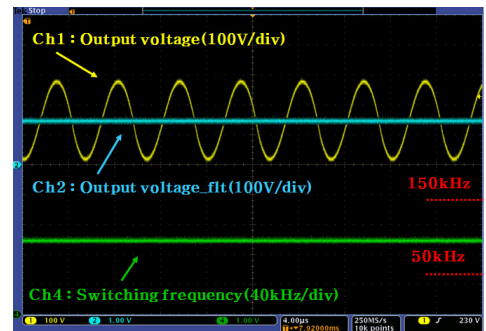
그림 9 LLCC 공진컨버터 실험 파형
(a) 부하 5Ω, (b) 부하 15Ω, (c) 부하 25Ω.
Fig. 9 LLCC resonant converter experiment waveform
(a) Load 5Ω, (b) Load 15Ω, (c) Load 25Ω.



(a)



(b)



(c)

그림 10 LLCC 공진컨버터 실험 파형 (최대점) (a) 부하 5Ω, (b) 부하 15Ω, (c) 부하 25Ω.
Fig. 10 LLCC resonant converter experiment waveform (Peak point) (a) Load 5Ω, (b) Load 15Ω, (c) Load 25Ω.

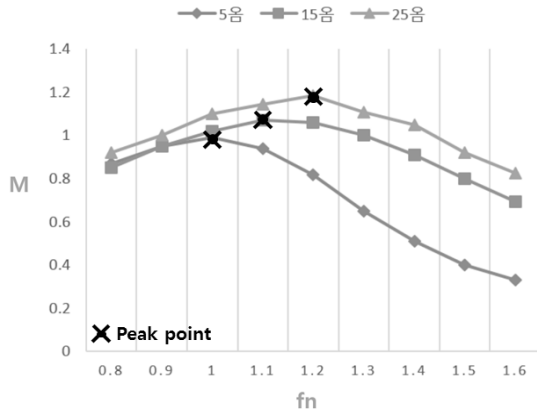


그림 11 실험 결과 그래프
 Fig. 11 Experiment results graph

그림 9는 LLC 공진컨버터의 실험 파형으로 (a), (b), (c)는 각각 부하 5Ω, 15Ω 그리고 25Ω 조건에서의 측정 파형이다. 실험파형은 출력전압 Output voltage와 출력전압을 필터링한 Output voltage_filt 그리고 DA 보드를 통한 스위칭 주파수를 측정하였다. 시뮬레이션과 마찬가지로 출력 Capacitance 값을 작게 설정하였기 때문에 출력 전압파형 Output voltage가 리플이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 작은 출력 Capacitance 에 의하여 출력전압 리플이 커지는 것은 LLC 공진 컨버터를 인터리브드 방식에 적용하는 것으로 감쇄 시킬 수 있으며 추후에 연구를 진행해 나갈 예정이다.

전압이득을 측정해 비교하기 위하여 출력전압을 필터링한 파형을 함께 측정하고 그 값을 통해 비교하였으며, DA 보드를 통한 스위칭 주파수의 측정으로 50 kHz에서 150 kHz로 스위칭 주파수를 움직여 측정하였다는 것을 확인할 수 있었다.

그림 10은 그림 9와 같은 실험에서 최대이득 점에서의 확대파형이다. 파형 (a), (b), (c)는 각각 부하 5Ω, 15Ω 그리고 25Ω 조건에서 측정 파형이다. 부하 5Ω은 79.30 kHz, 15Ω은 88.44 kHz 그리고 25Ω은 93.39 kHz에서 최대이득을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 실제 전압파형은 출력 커패시턴스 값을 작게 설정했기 때문에 리플이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 그림 9, 10 실험을 통하여 얻은 데이터를 정리한 실험 결과 그래프 이다. 실험결과 각 부하조건에 따라 각기 다른 전압 이득특성을 보이는 것을 확인할 수 있었으며, 앞에서 분석한 LLC 공진 컨버터의 이득특성과 같이 부하 특성에 따른 최대 전압이득을 갖는 주파수 점이 공진점이 되는 fn=1인 지점보다 오른쪽 (더 높은 주파수)지점에 위치하는 것을 확인할 수 있었다.

시뮬레이션 및 실험을 통하여 출력 Capacitance를 고려한 LLC 공진컨버터의 이득특성을 확인해 본 결과 기존의 LLC 공진컨버터와 다른 이득특성을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션에서는 기생성분등을 고려하지 않아 실제 실험결과와는 다소 차이가 있지만 전체적인 양상은 같은 결과를 보이는 것을 확인하였다. 기존의 LLC 공진컨버터는 부하특성에 따른 최대이득을 갖는 주파수 점이 공진점이 되는 fn=1인 지점보다 왼쪽으로

이동하는 반면 작은 출력 Capacitance를 고려한 LLC 공진컨버터의 경우 최대 이득을 갖는 주파수점이 공진점 보다 오른쪽으로 이동하는 것을 확인하였다. 이러한 특성 분석을 통하여 플라즈마 공정용 LLC 공진 컨버터의 설계시 응용분야의 부하특성 및 공진주파수에 따라 동작 범위를 설정할 수 있게 된다.

3. 결 론

플라즈마 공정이 다양한 분야에 적용되면서 플라즈마를 제어할 수 있는 전원장치에 대한 관심과 연구가 늘어나게 되었다. 이에 본 논문에서는 플라즈마 공정용 전원장치로 높은 전력밀도와 고효율을 달성할 수 있는 LLC 공진 컨버터를 적용시키기 위한 연구를 진행 하였으며, 공정의 특성상 플라즈마의 불안정으로 인한 아크 (arc)가 발생할 경우를 대비하기 위한 조건을 만족해야 하는 것을 설명하였다. 출력 Capacitance를 줄이는 방법을 통해 아크발생시 실질적인 데미지를 감소시키는 것으로 피해를 줄일 수 있는 반면, LLC 공진컨버터의 경우 기존의 분석된 이득특성과는 다른 특성을 보이는 것을 확인하였다. 특성이 변하는 것을 분석하기 위하여 작은 출력 Capacitance를 고려한 LLC 공진컨버터를 LLC 공진컨버터로 분류하고 기존의 LLC 공진컨버터의 이득특성 분석에 사용된 FHA 근사방법을 적용하여 LLC 공진컨버터의 이득특성을 분석하였다.

출력 Capacitance를 고려한 LLC 공진컨버터의 경우 기존의 공진컨버터와 다르게 부하특성에 따라 최대 이득을 갖는 주파수 점이 공진점 보다 높은 위치에 존재하는 것을 알 수 있었다. 분석된 내용은 PSIM 프로그램을 통한 시뮬레이션과 하드웨어를 구성을 통한 실험으로 확인해 볼 수 있었다. 이를 통해 플라즈마 공정과 같이 출력 Capacitance를 작게 설정할 경우 LLC 공진컨버터의 변화하는 이득특성은, 출력 Capacitance 를 고려하여 해석하는 것으로 더 정확하게 분석할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 분석 내용을 통하여 플라즈마 공정용 LLC 공진컨버터의 설계 시 공정의 부하특성, 공진주파수 등의 스펙에 따라 정확한 동작 범위를 설정하는데 적용할 수 있게 된다.

추후 연구내용으로는 출력 Capacitance 값을 작게 설정함에 따라 증가하는 출력전압 리플을 줄이기 위하여 LLC 공진컨버터에 인터리브드 방식을 적용할 것이며, 플라즈마생성 조건을 만족하기 위한 초기 무부하 동작 특성에 대하여 연구를 이어 나갈 것이다.

감사의 글

본 연구는 경기도의 경기도지역 협력연구센터(GRRC) 사업의 일환으로 수행하였음. [(GRRC환경2011-B04), 클린 및 농식품 물류센터를 위한 에너지 절약형 전력변환장치 상용화 개발]

References

- [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] C. Corbella, "Plasma Parameters of Pulsed-dc discharges in methane used to deposit diamondlike carbon films," Journal of Applied Physics, Vol. 106, 03302, 2009.
- [3] Noborn Kuriyama, Yutaka Yatsu "POWER SUPPLY UNIT FOR SPUTTERING DEVICE" U. S. Patent 6,416,638 B1, Jul, 9, 2002.
- [4] J. H. Ban, H. M. Hee, and J. S. Kim, "A Study on Energy Recovery Circuit in Sputtering Plasma Power supply for arc Discharge Prevention," The transaction of the korean institute of electrical engineers p. 61(3), pp. 116-121, 2012.
- [5] J. H. Kim, "Analysis and Design for LLC Resonant Converter Considering Output Capacitance of MOSFET", Master's Thesis, KAIST, 2011.
- [6] B. H. Lee, M. Y. Kim, C. E. Kim, K. B. Park and G. W. Moon, "Analysis of LLC Resonant Converter Considering Effect of Parasitic Components" in Proc. INTELEC'09, pp. 1-6, Oct. 2009.
- [7] H. K. Lee, E. S. Kim, D. Y. Huh, G. S. Lee, B. G. Chung, and S. I. Kang, "Operating Characteristics of LLC Series Resonant Converter Using a LLT Transformer." The Transactions of the Korea Institute of Power Electronics, vol. 11, no. 5, pp. 409-416, 2006.
- [8] J. Sellers, "Asymmetric bipolar pulsed DC: Theenabling technology for reactive PVD," Surface and Coatings Technology. vol. 98, no. 1, pp. 1245-1250(6), January 1998.



김 태 훈 (Tae-Hun Kim)

1989년 3월 6일생. 2014년 한경대학교 전기공학과 졸업. 2014년 2월~2016년 2월 한경대학교 대학원 전기전자제어공학과 졸업. 2016년 2월~현재 한경대학교 전기전자제어공학과 일반대학원 박사과정
 Tel : 031-670-5328
 Email : light411@naver.com



이 우 철 (Woo-Cheol Lee)

1964년 3월 24일생. 1987 한양대학교 전기공학과 졸업. 1989년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업. 1988~1998년 효성중공업 기술연구소 책임연구원. 1995~2001년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2007~2009년 Virginia Polytechnic Institute and State University USA Visiting Professor. 현재 한경대학교 전기전자제어공학과 교수. 2016년~현재 전력전자학회 학술위원장.
 Tel : 031-670-5323
 Email : woocheol@hknu.ac.kr

저 자 소 개



권 민 준 (Min-Jun Kwon)

1989년 6월 14일생. 2015년 한경대학교 전기공학과 졸업. 2015년 2월~현재 한경대학교 전기전자제어공학과 일반대학원 석사과정.
 Tel : 031-670-5328
 Email : 614mj@naver.com