

넓은 범위의 출력 전압 확보를 위한 LLC 공진형 컨버터의 PWM 제어

오윤석, 한연호, 신범수, 조영훈
건국대학교

PWM Control Method Study On LLC Resonant Converter For Managing Wide Range Output Voltage

Yun-Suk Oh, Yeon-Ho Han, Bum-Soo Shin, Younghoon Cho
Konkuk University

ABSTRACT

본 논문에서는 두 종류의 스위치가 소프트 스위칭 동작을 해 적은 스위칭 손실의 장점을 가지는 LLC 공진형 컨버터의 PWM(Pulse Width Modulation) 제어에 대해 소개하고자 한다. 일정한 스위칭 주파수에 대해서 기존 PFM(Pulse Frequency Modulation) 제어는 소프트 스위칭 동작 및 부하에 따라 제한된 출력 전압의 범위를 가지게 되는데, 이를 PWM 제어를 통해 넓은 출력 전압을 확보할 수 있다는 것에 대하여 이론적 설명과 시뮬레이션을 통해 검증하고자 한다.

1. 서론

전기 자동차의 활성화와 더불어 충전 시스템의 중요성이 높아지면서 전력변환장치의 고밀도화 및 고효율화가 주목받는 과제가 되고 있다. 하지만, 고밀도화를 위해 절연형 DC-DC 컨버터 내의 변압기의 소형화가 필수적이며 고효율화를 위해 고주파 스위칭에 따라 발생하는 스위칭 손실을 줄여주는 공진형 컨버터를 사용한다.

공진형 컨버터 중 LLC 공진형 컨버터는 그림 2와 같이 하프-브릿지 혹은 풀-브릿지로 동작하는 구형파 발생부와 공진 커패시터, 공진 인덕터와 변압기의 자화 인덕터로 구성되는 공진 탱크와 다이오드, 부하 커패시터 및 부하 저항으로 구성된 전파 정류회로로 이루어져 있다. 구형파 발생부의 Mosfet은 ZVS 동작이 가능하며 전파 정류회로의 다이오드에서는 ZCS 동작이 가능하다. 두 종류의 스위치가 모두 소프트 스위칭을 함으로써 전력 전달 효율이 높다는 장점을 가지고 있다.

하지만, LLC 공진형 컨버터의 스위칭 주파수를 크게 변동할 경우, 출력 전압 범위를 일부 확보할 수 있지만, 공진 주파수에서 스위칭 주파수가 크게 벗어날수록 효율이 크게 떨어지는 단점이 존재한다. 이러한 단점들을 해결하기 위해 3-브리지 LLC 공진형 컨버터^[1] 및 보조스위치를 적용한 LLC 공진형 컨버터^[2] 등 다양한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 동일한 스위칭 주파수에 대해 LLC 공진형 컨버터의 기존 PFM 제어와 PWM 제어를 적용한 결과값을 비교하여 PWM 제어가 동일한 스위칭 주파수에 대해 더 넓은 범위의 전압이 출력되는 것을 MATLAB 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. 본론

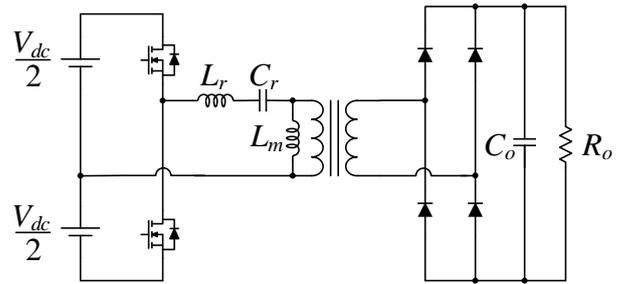


그림1 하프-브릿지 LLC 공진형 컨버터 회로
Fig.1 Half-bridge LLC resonant converter circuit

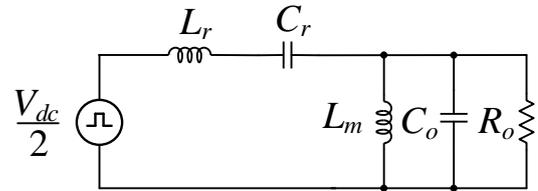


그림2 하프-브릿지 LLC 공진형 컨버터 개념도
Fig.2 Half-bridge LLC resonant converter concept

2.1 절 LLC 공진형 컨버터

풀-브릿지에 비해 적은 개수의 스위치 사용으로 더 적은 비용과 더 적은 스위칭 손실을 가지는 하프-브릿지 LLC 공진형 컨버터의 회로는 그림 1과 같다. LLC 공진형 컨버터는 공진 커패시터(C_r)와 공진 인덕터(L_r)로 인해 생성되는 공진 주파수(f_{r1})와 공진 커패시터, 공진 인덕터와 더불어 변압기의 1차측 자화 인덕턴스(L_m)로 인해 발생하는 공진 주파수(f_{r2})가 존재한다.

이때, LLC 공진형 컨버터의 부하 및 스위칭 주파수에 따른 출력 전압 특성을 확인하기 위해 회로의 제정수는 표 1과 같이 설정하였으며, 전압 이득식은 식 (1)과 같다.

$$G_v = \frac{f_n^2 \times (m - 1)}{\sqrt{(m \times f_n^2 - 1)^2 + Q^2 \times f_n^2 \times (f_n^2 - 1)^2 \times (m - 1)}} \quad (1)$$

$$R_{ac} = \frac{8 \times n^2}{\pi^2} \times R_o \quad (2)$$

식 (1)에서 $f_n = f_s/f_{r1}$ 이며, 스위칭 주파수를 공진 주파수에 대해 정규화한 값이다. 또한, 양호도 Q 는 $\sqrt{L_r}/R_{ac}$ 이며, $m =$

$(L_m + L_r)/L_r$ 이다. 식 (2)의 R_{ac} 는 변압기 2차측 회로를 등가저항으로 계산한 값이다.

2.2 절 LLC 공진형 컨버터 부하별 동작 영역

식 (1)의 f_n 를 x축, G_v 를 y축으로 표 1의 주어진 제정수를 이용해 다양한 부하 조건에서 전압 이득 그래프를 나타내면 그림 3과 같다. 그림 3의 표시된 영역에서 ZVS 동작과 ZCS 동작이 동시에 이루어진다. 이때, 두 동작이 가능한 f_n 의 범위는 약 0.5774에서 1사이이고, G_v 는 Q가 3이므로 약 0.2에서 0.8 사이이다.

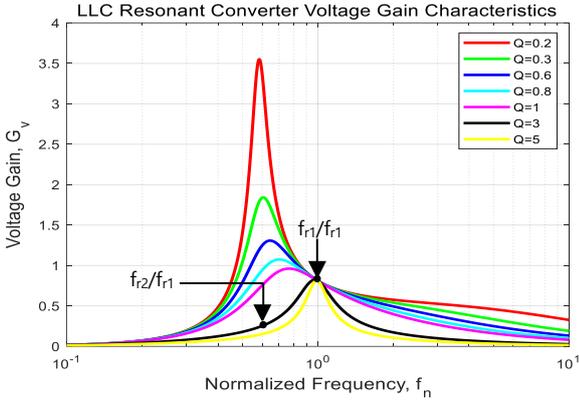


그림3 전압 이득 특성 그래프
Fig.3 Voltage Gain Characteristics

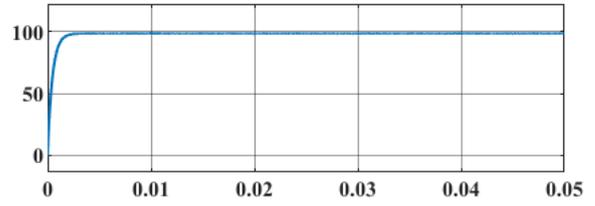
3. 시뮬레이션

그림 1의 회로도를 이용하여 MATLAB에서 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에 적용한 제정수는 표 1과 같다.

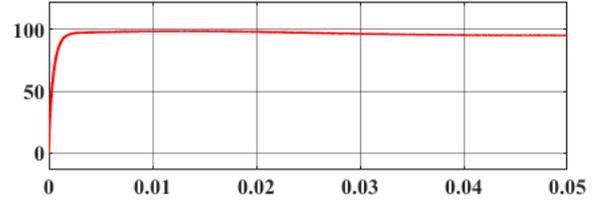
그림 3의 Q의 값이 3일 경우에 그림4의 결과 파형을 보면 PFM 제어에서 출력 전압은 평균 98V로 제한되는 것을 알 수 있다. 하지만, PWM 제어를 이용했을 때, 동일한 스위칭 주파수에 대하여 최소 10V에서 최대 95V까지 출력 전압의 범위가 확보된 것을 알 수 있다. 따라서, 그림 4를 통해 일정한 스위칭 주파수에 대해서 PFM 제어방식보다 PWM 제어를 적용하였을 때, 넓은 출력 전압 범위를 가질 수 있는 것을 알 수 있다.

표 1 MATLAB 시뮬레이션 시스템 제정수
Table 1 MATLAB simulation system parameters

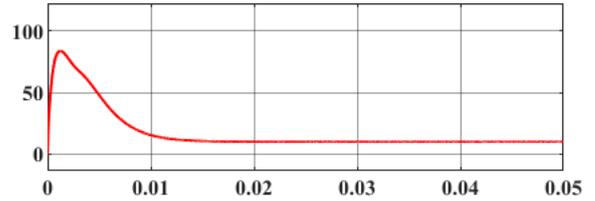
DC Input Voltage(V_{dc})	400V
Resonant Inductance(L_r)	16 μ H
Resonant Capacitor(C_r)	165nF
Magnetizing Inductance(L_m)	32 μ H
Turn Ratio(n)	0.9091
Output Capacitor(C_o)	100 μ F
Output Resister(R_o)	4.83 Ω
Resonant Frequency(f_{r1})	98kHz
Resonant Frequency(f_{r2})	56.5kHz
Switching Frequency(f_o)	69kHz



(a)



(b)



(c)

그림4 LLC 공진형 컨버터 시뮬레이션 결과 그래프 (a) PFM 제어 (b) PWM 제어 최대 출력 전압 (c) PWM 제어 최소 출력 전압

Fig.4 Graph of LLC Resonant Converter simulation results (a) PFM Control (b) Maximum output voltage of PWM control (c) Minimum output voltage of PFM control

4. 결론

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 동작 특성에 대하여 설명하고, MATLAB 시뮬레이션을 통해 같은 스위칭 주파수에 대해서 PFM 제어방법보다 PWM 제어를 할 때, 넓은 범위의 출력 전압이 확보된다는 것을 확인하였다.

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 대학혁신지원사업에서 지원을 받아 수행된 연구임

참고 문헌

- [1] 우정원, 장기찬, 김은수.(2021). 넓은 출력전압 제어범위를 가지고 동작 가능한 3-브리지 LLC 공진컨버터. 전력전자학회 학술대회 논문집,(),432-433.
- [2] 김민지, 오재성, 이지철, 전용석, 김은수, 국윤상.(2017). 넓은 입·출력전압 범위에서 제어 가능한 보조스위치 적용 LLC 공진컨버터. 전력전자학회 학술대회 논문집,(),185-186.