

버스트모드와 위상 천이를 이용한 저전압 출력에서 LLC 컨버터 효율 향상 연구

오성준, 최종원

한남대학교 모터제어 및 전력변환연구실

Efficiency Improvement Study of LLC Converter for Low Voltage Output Using Burst Mode and Phase

Sungjun Oh, Jongwon Choi

Dept. Electrical and Electronic Engineering Hannam University

ABSTRACT

본 논문에서는 저부하 저전압 조건에서 풀-브릿지 LLC 공진형 컨버터의 효율 문제를 해결하기 위해 실험을 통해 분석하였다. LLC 공진형 컨버터는 저전압 출력에서 효율이 저하됨을 볼 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 위상천이, 버스트제어+위상천이, 하프브릿지 제어를 사용해서 저전압 출력의 구동 성능을 개선하는 방안을 제시하였다. 이 세 가지 방법을 통해서 상대적으로 효율적인 구동방법을 도출하기 위해 열 포화온도를 비교 분석하였다. 비교 분석 결과 세 제어 방법 중 하프 브릿지가 열 포화온도가 가장 낮아 저전압에서 효율이 좋음을 확인하였다.

1. 서론

최근 저탄소시대에 발맞춰서 전기차의 보급 속도가 증가되고 있다. 특히 다양한 자동차 크기에 목적에 따라서 상용 전기차의 배터리의 정격전압은 보급형은 400V 그리고 고급형은 800V로 매우 넓은 출력전압 범위를 사용하고 있다. 전력변환 시스템에 특성상 효율과 시스템의 열 관리가 중요하다.^[1] 풀-브릿지 LLC 공진 컨버터는 모든 부하에서 Zero Voltage Switching(ZVS)가 가능하다는 점으로 충전용 컨버터로 널리 사용되고 있다. 그러나 LLC 공진 컨버터는 저부하 저전압 출력조건에서 효율 및 제어 문제점이 발생한다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 버스트제어와 위상천이 방법을 사용하는 방법과, 위상천이 방법만으로, 하프 브릿지 제어를 사용한다.^{[2][3]} 하지만 LLC 공진형 컨버터는 스위칭 주파수를 변경하여 전압 이득 곡선에 따라 출력 전압을 제어하는 Pulse frequency modulation(PFM) 방법을 사용하기 때문에 스위칭 주파수로 인한 MOSFET의 on loss와 off loss, conduction loss가 고려된다.

본 논문에서는 앞에서 언급된 세가지 제어 기법들의 장단점을 분석하여 어떤 방법이 손실면에서 우위를 갖는지 열포화 실험을 통해 비교 분석하였다.

2. LLC 공진 컨버터

2.1 풀-브릿지 LLC 공진형 컨버터

그림 1(a)는 풀-브릿지 LLC 공진형 컨버터 등가회로이다. 그림 2(b)는 FHA 모델을 사용한 등가 모델이고, 주파수 영역에 대한 수식은 다음과 같다.

$$M = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{j\omega L_m || R_{eq}}{j\omega L_r + \frac{1}{j\omega C_r} + j\omega L_m || R_{eq}} \quad (1)$$

식(1)을 f_n, Q, l 에 대한 함수로 정리하면, 최종적으로 전압 이득(M) 수식은 식(2)와 같다.

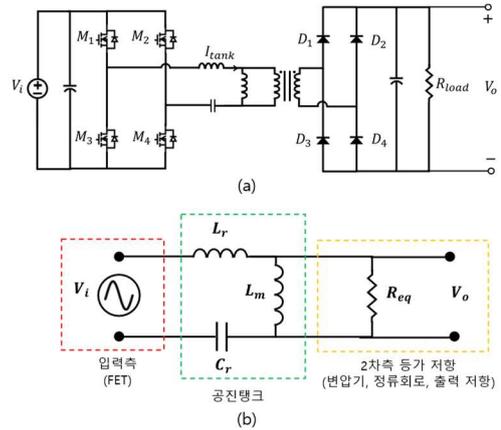


그림 1. LLC 공진형 컨버터 등가모델, (a)풀-브릿지 LLC 공진 컨버터, (b)FHA 모델
Fig. 1 (a)LLC full bridge resonance converter circuit, (b)FHA equivalent model circuit

$$M(f_n, Q, l) = \frac{nV_o}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + l - \frac{l}{f_n^2}\right)^2 + Q^2 \left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)^2}} \quad (2)$$

이때 식(2)에서

$$l = \frac{L_r}{L_m}, Q = \frac{Z_{o1}}{R_{eq}}, Z_{o1} = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}, f_n = \frac{f_s}{f_{r1}}, f_{r1} = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$$

이고, L_m 와 L_r 은 자화 인덕터와 공진 인덕터의 비율, Q 는 부하 Quality factor이며 Z_{o1} 은 공진주파수의 특성 임피던스, f_n 은 스위칭 주파수(f_s)와 기본 공진주파수(f_{r1})의 비율, R_{eq} 는 그림 1(a)의 변압기, 정류회로, 출력 저항을 등가 한 저항이다. LLC 공진형 컨버터의 전압 이득으로 컨버터의 성능과 공진 주파수의 최적 작동 포인트를 결정할 수 있다.

2.2 저전압 영역에서 LLC 공진형 컨버터 제어기법 설명

저전압 영역에 LLC 공진형 컨버터에서 세 가지 방법으로 출력전압을 제어할 수 있다.

- Method1: Full bridge with phase shift.
- Method2: Full bridge with phase shift and burst control.
- Method3: Half bridge with burst control.

Method1은 듀티조절에 의해 출력전압을 조절한다. 하지만 듀티가 작아질수록 ZVS 제어에 영향을 준다. Method2은 Method1에서의 ZVS 제어에 영향을

주는것을 보완하기 위해 일정한 듀티와 버스트제어를 결합해 출력전압을 조절한다. Method3은 하프브릿지로 구동을 함으로써 입력전압을 0.5배 줄이고 버스트제어를 함으로써 ZVS 제어를 한다.+

2.3 실제 실험 결과

실험한 LLC 공진형 컨버터의 파라미터는 표 1 와 같다. 입력 전압(V_i) 600V이며 스위칭 주파수는 200kHz, 출력전압(V_o)은 100V를 유지하고 부하전류는 5A로 구동하였다. 그림 2(a), (b), (c)는 각각 Method1, Method2, Method3의 실험결과 파형이고 입력 전압(V_i), 출력전압(V_o), 탭크전류(i_{tank})를 측정한 파형이다.

표 1. LLC 공진형 컨버터 파라미터
Table 1 Parameters for LLC resonant converter

Parameter	Value	Unit
Resonant inductance (L_r)	20.4	[μ H]
Resonant capacitor (C_r)	57.8	[nF]
Magnetic inductance (L_m)	123.1	[μ H]
Turn ratio (n)	1.4	Turn

Method1은 스위치 M1와 M3의 스위칭 손실은 off시 ZCS 제어가 되지 않아 손실이 있으며 M2와 M4는 스위칭 on시 그림 2(a), (b)에 파란색 원으로 표시된 부분에서 ZVS 제어가 되지 않아 많은 손실이 있다. MOSFET소자 특성상 턴온 손실이 턴오프 손실에 비해 약 1.5~2배정도 크다. Method2은 스위치 M1, M2, M3, M4의 턴오프시 스위칭 손실만 있으며 버스트 제어로 인해 스위칭 횟수가 Method1보다 작다. Method3은 M1, M3의 턴오프시 스위칭 손실만 있으며 M2와 M4는 스위칭을 하지 않기 때문에 스위칭 손실이 없다. 또한 버스트 제어로 인해 스위칭 횟수가 Method1보다 작다.

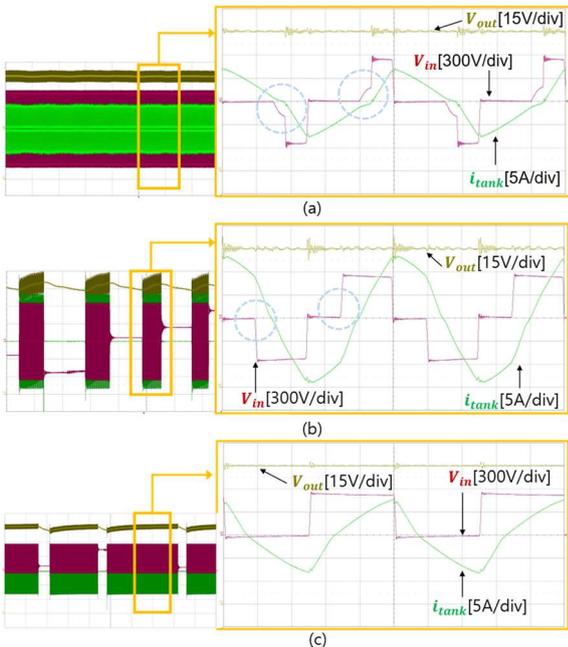


그림 2. 세 가지 제어기법, (a) Method1, (b) Method2, (c) Method3
Fig. 2 Three control method, (a) Method1, (b) Method2, (c) Method3

그림 3(a), (b), (c)는 각각 Method1, Method2, Method3방법으로 컨버터를 10분간 구동 시켰을 때 포화온도를 열화상 카메라로 찍은 사진이다. 각 그림에서 왼쪽부터 그림 1(a)의 M1, M3, M4, M2 mosfet 스위칭 소자이다.

Method1의 포화온도를 보면 앞에서 언급한 턴온시 스위칭 손실로 인한 포화온도가 M1와 M3보다 M2와 M4가 높은 것을 볼 수 있다. Method2의 포화온도를 보면 턴오프 스위칭 손실만 있으므로 Method1의 포화온도보다 낮은 것을 볼 수 있다. Method3의 포화온도는 Method2와 비슷하지만 M2와 M4가 스위칭 동작을 하지 않기 때문에 전체 온도를 비교하였을 때 가장 낮은 것을 볼 수 있다.

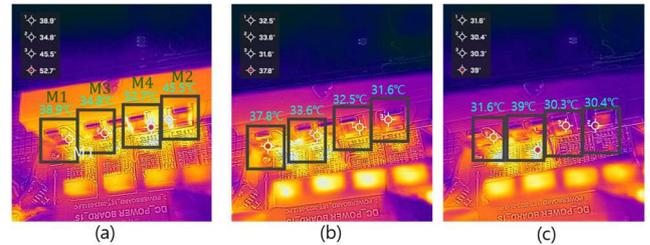


그림 3. MOSFET 온도, (a) Method1, (b) Method2, (c) Method3 구동 시 포화 온도 실험결과
Fig. 3 MOSFET temperature, (a) Method1, (b) Method2, (c) Method3 saturation temperature at runtime

3. 결론

세 가지 방법을 이용하여 비교 실험을 진행하였으며 각 방법의 열 포화 온도를 측정하였다. 분석결과는 Method3 (Half bridge with burst control)이 Method2 (Full bridge with phase shift and burst control)와 Method1 (Full bridge with phase shift)에 비해 상대적으로 높은 효율을 보였다. 이는 저부하 저전압 조건에서 Method3의 제어 기법이 열 관리에 있어 더욱 효과적이다.

실제 실험결과를 통해 각 제어기법의 성능을 알 수 있었고 실제 실험을 통하여 검증하였다.

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2021R111A3059676)

참고 문헌

- [1] J. Deng, S. Li, S. Hu, C. C. Mi and R. Ma, "Design Methodology of LLC Resonant Converters for Electric Vehicle Battery Chargers," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 4, pp. 1581–1592, May 2014.
- [2] L. Shi, B. Liu and S. Duan, "Burst-Mode and Phase-Shift Hybrid Control Method of LLC Converters for Wide Output Range Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 2, pp. 1013–1023, Feb. 2020.
- [3] R. L. Steigerwald, "A comparison of half-bridge resonant converter topologies," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 3, no. 2, pp. 174–182, April 1988.