

버스트 모드 및 위상 천이 모드를 이용한 기생 파라미터를 고려한 LLC 공진 컨버터의 전압 제어 방법

오진균, 최종원

한남대학교 전기전자공학

Voltage control method of LLC converter considering parasitic parameters using burst mode and phase shift method

Jingyun Oh, Jongwon Choi

Dept, Electrical and Electronic Engineering, Hannam University

ABSTRACT

LLC 공진 컨버터 제작 시 발생하는 의도하지 않은 기생 캐패시터가 존재하게 된다. 이 기생 캐패시터는 특히 경 부하 운전 조건에서 LLC 공진 컨버터 전압 이득에 큰 왜곡을 발생시킨다. LLC 공진 컨버터는 Pulse frequency modulation(PFM) 방법으로, 스위칭 주파수를 변경하여 전압 이득 공식에 따라서 출력 전압이 결정된다. 기생 파라미터의 영향에 의해 발생하는 전압 이득의 왜곡은 의도하지 않은 출력 전압으로 운전하게 만들고, 주파수 기반 폐 루프 전압 제어에 문제를 발생시킨다. 본 논문은 LLC 공진 컨버터에 발생하는 기생 캐패시터의 영향을 분석 후, 전압 왜곡 현상을 해결하기 위한 버스트 모드와 위상 천이 모드를 동시에 사용하는 제어 방법을 제안한다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안한 방법을 검증하였다.

1. 서론

LLC 공진 컨버터 제작 시 여러 가지 기생 캐패시터 성분이 발생한다. 기생 캐패시터는 전압 이득 곡선에 왜곡 현상을 발생시키고 전압 제어에 영향을 준다. 여기서 하드웨어적인 해결 방법은 비용과 시간이 많이 소요되므로 하드웨어적인 방법이 아닌 소프트웨어적 해결 방안으로 다양한 전압 제어 방식을 사용하여 해결하는 방안이 필요하다. 따라서 본 논문은 기생 캐패시터의 영향으로 발생하는 전압 제어 문제를 해결하기 위한 위상 천이 모드와 버스트 모드를 사용한 전압 제어 방식을 제안한다.^[1]

2. LLC 공진 컨버터의 등가회로

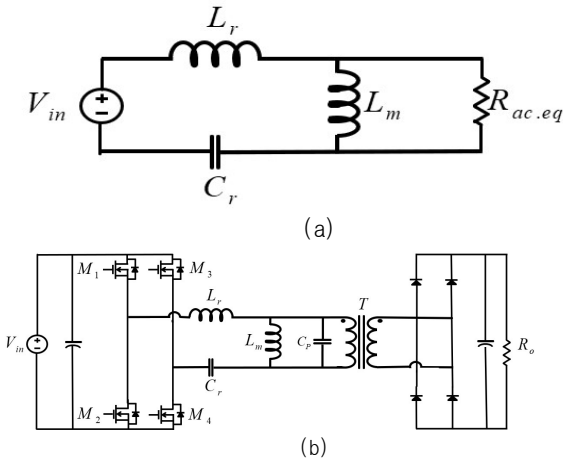


그림 1 (a)LLC 공진 컨버터 등가회로, (b)기생 캐패시터를 고려한 LLC 풀 브릿지 공진 컨버터 회로

Fig. 1 (a)LLC resonant converter equivalent circuit, (b)LLC full bridge resonance converter circuit considering parasitic capacitor

$$M(f_n, Q, l) = \frac{n V_o}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + l - \frac{1}{f_n^2}\right)^2 + Q^2 \left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)^2}}, (1)^{[2]} \quad l \text{은}$$

자화 인덕터(L_m)와 공진 인덕터의(L_r) 비율이며, $l = \frac{L_r}{L_m}$, Q

는 Q-factor이며, $Q = \frac{Z_0}{R_{eq.ac}}$, $R_{eq.ac}$ 는 등가회로에서 2차 등가

저항이며, $R_{eq.ac} = n^2 \frac{8}{\pi^2} \frac{V_o}{P_o}$ Z_0 은 특성 임피던스이며,

$Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$ f_n 은 스위칭 주파수(f_s)와 공진 주파수(f_r) 비율

이며, $f_n = \frac{f_s}{f_r}$ 이다. LLC 공진 컨버터의 탱크 파라미터 설계

시 그림 1(a)의 등가회로와 FHA(Fundamental Harmonic Analysis)를 사용한다. 따라서 설계 시 기생 캐패시터 성분들은 고려되지 않는다. 하지만 실제 제작 시 여러 가지 기생 캐패시터가 발생한다.^[3] 의도치 않은 기생 캐패시터는 전압 이득 곡선의 왜곡을 발생시킨다. LLC 공진 컨버터는 스위칭 주파수를 변화하여 전압 이득 곡선에 따라 출력 전압을 제어하므로, 경 부하 운전 시 원하지 않는 출력 전압으로 동작 하는 문제를 발생시킨다.

3. 위상 천이 모드와 버스트 모드를 사용한 전압 제어 방법

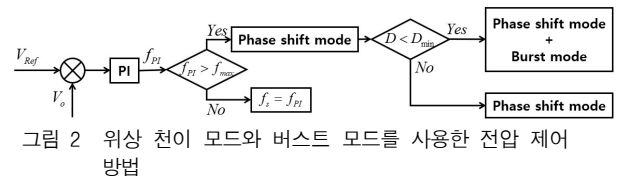


그림 2 위상 천이 모드와 버스트 모드를 사용한 전압 제어 방법

Fig. 2 Voltage control method using phase-shift mode and burst mode

그림 2는 본 논문에서 제안한 방법이다. 출력 전압(V_o)과 레퍼런스 전압(V_{ref})의 PI 제어기의 출력(f_{PI})은 주파수로 출력된다. 설정한 최대 제한 주파수(f_{max}) 이상으로 제어기 출력 주파수(f_{PI})가 출력되면, 위상 천이 모드로 전환 된다. 위상 천이 모드는 듀티를 변화시켜 그림 1(b)의 M_1 과 M_4 , M_2 과 M_3

이 동시에 ON 되었을 때의 시간에 따라서 출력 전압을 제어하는 방식이다. 듀티를 많이 감소하여 동작할 시 Zero Voltage Switching(ZVS)에 영향을 줄 수 있다. 그러므로 최소 듀티(D_{min})를 설정 후에 이보다 더 작은 듀티로 동작해도 목표 전압까지 제어되지 않으면 버스트 모드를 시작한다.

4. 실험 결과 정리

표 1 LLC 공진 컨버터 실험 사양

Table 1 Experimental specifications for LLC resonant converter

Parameter	Value	Unit
Resonant inductance(L_r)	20.4	μH
Resonant capacitor(C_r)	57.8	nF
Magnetizing inductance(L_m)	123.1	μH
Turn ratio	1.4	Turn

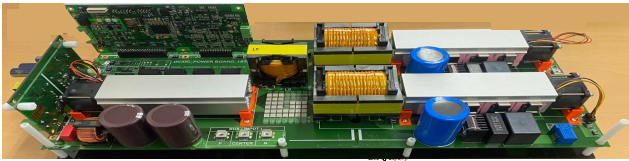


그림 3 실험에 사용한 LLC 공진 컨버터

Fig. 3 LLC resonant converter used in the experiment

실험에 사용한 그림 3의 LLC 공진 컨버터의 사양은 표 1과 같다. 실험 조건은 입력 전압 200V이며 주파수를 10kHz씩 증가시켜 80~200kHz까지의 출력 전압을 확인하고, 수식 (1)에 근거한 전압 이득 곡선과 비교하였다.

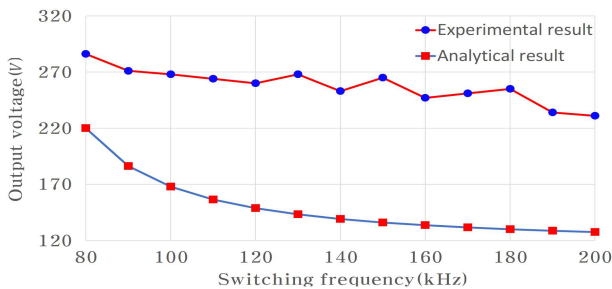
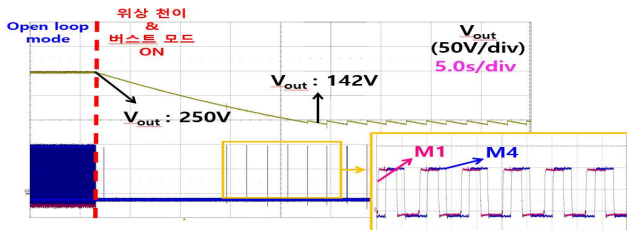


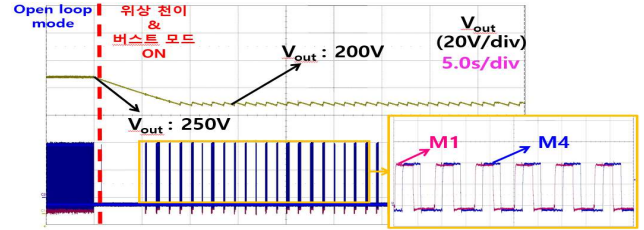
그림 4 LLC 공진 컨버터의 Open loop 실험 결과와 전압 이득 수식에 의한 결과

Fig. 4 Open loop experimental results of LLC resonant converter and results by voltage gain equation

그림 4는 그림 3의 LLC 공진 컨버터로 실험한 결과와, 수식 (1)에 근거한 이론값의 전압 이득 곡선을 비교한 그래프다. 수식 (1)에 근거한 이론값 그래프의 결과는 스위칭 주파수가 증가할수록 출력 전압이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림 3의 LLC 공진 컨버터의 open loop 실험 결과는 이론값의 결과보다 전체적으로 출력 전압이 큰 값을 가지고, 이론값과 다르게 스위칭 주파수의 증가에 따라 감소하는 경향성을 가지지 않고 왜곡이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 기생 커패시터에 의한 전압 이득 왜곡 현상으로 인하여 수식 (1)과 다른 출력 전압값을 가지게 되는 것을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 5 제안한 방법 적용한 실험 결과, (a) 목표 출력 전압 141V, (b) 목표 출력 전압 200V

Fig. 5 Experimental results using the proposed method, (a) reference output voltage 141V (b) reference output voltage 200V

그림 5는 본 논문에서 제안한 제어 방식을 적용한 실험 결과이며 출력 전압과 그림 1(b)의 M_1 과 M_4 의 게이트 입력을 확인한 파형이다. 입력 전압은 200V이며 120kHz에서의 open loop 출력 전압은 250V다. 목표 출력은 141V와 200V 두 전압으로 실험을 진행하였다. 최대 제한 주파수(f_{max})는 120kHz, 최소 듀티(D_{min}) 0.6으로 설정하였다. 그림 5(a)는 목표 출력 전압이 141V일 때 실험 파형이다. 처음에는 open loop 출력 전압인 250V로 동작을 하고, 141V 전압 제어를 시작하는 순간부터 위상 천이 모드와 버스트 모드로 운전한다. 이 경우 M_1 , M_4 게이트 입력 파형을 보면 더 낮은 전압으로 제어해야 하므로 버스트 모드의 ON 운전 시간이 매우 짧은 것을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 목표 출력 전압을 200V일 때의 실험 결과 파형이다. 이 경우도 동일하게 작동한다. 다른 점은 출력 전압 141V인 경우보다 M_1 , M_4 의 버스트 모드의 ON 운전시간이 더 긴 것을 확인할 수 있다. 이러한 실험 결과로 기생 커패시터에 의한 전압 왜곡 발생 시, 위상 천이 모드와 버스트 모드를 사용하여 전압 제어가 정상적으로 동작하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

기생 커패시터의 영향으로 인한 LLC 공진 컨버터에 발생하는 전압 제어 문제를 위상 천이 모드와 버스트 모드로 제어하였고 실험을 통하여 검증하였다

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

참고 문헌

- [1] 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, doi: 10.1109/TIE.2019.2898578.
- [2] 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, doi: 10.1109/TVT.2013.2287379.
- [3] B. -H. Lee, M. -Y. Kim, C. -E. Kim, K. -B. Park and G. -W. Moon, "Analysis of LLC Resonant Converter considering effects of parasitic components," INTELEC 2009 - 31st International Telecommunications Energy Conference, Incheon, Korea (South), 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/INTLEC.2009.5351740.