

고주파 LLC 공진형 컨버터의 소신호 분석과 제어기 설계

박화평, 이상중, 정지훈
UNIST(울산과학기술대학교)

Small signal analysis of LLC resonant converter for high switching frequency

Hwapyeong Park, SangJung Lee, and Jeehoon Jung
UNIST(Ulsan National Institute of Science and Technology)

ABSTRACT

높은 동작 주파수를 가지는 LLC 공진형 컨버터는 수동 소자들의 사이즈가 작아져 전력밀도가 증가하는 장점이 있다. 하지만 높은 전력 밀도를 구현하기 위한 작은 수동 소자들은 컨버터 개루프 이득을 변동시키고 기존의 피드백 제어기를 사용할 경우 불안정한 동작을 가진다. 따라서 적절한 위상 및 이득 여유를 가지는 루프 이득을 구현하기 위하여 작은 수동 소자 사용에 따른 개루프 이득을 분석하여 적절한 피드백 제어기를 설계한다. 본 논문은 500 kHz의 동작 주파수를 가지는 LLC 공진형 컨버터를 설계 및 제작하고 수동 소자의 크기에 따른 소신호를 분석한다. 이를 바탕으로 적절한 제어기를 설계하고 안정한 동작을 검증하였다.

1. 서 론

최근 산업계에서 요구하는 중소규모의 TV, LED 등의 가전 제품을 위해서는 고효율과 높은 전력밀도 및 가격 경쟁력이 높은 절연형 컨버터가 필요하다. 이와 같은 요구 사항을 만족하기 위한 방법으로 높은 동작 주파수를 이용한 LLC 공진형 컨버터가 변압기와 커패시터와 같은 수동 소자들의 크기를 줄여 높은 전력 밀도를 얻기 위해 사용된다. 이때 변압기 및 공진형 커패시터의 크기는 스위칭 주파수가 올라감에 따라 기존의 LLC 공진형 컨버터의 디자인에 의해 줄어든다. 출력 측 커패시터의 경우 출력 전압 리플을 허용하는 범위 안에서 전력밀도를 높이기 위해 작은 값을 가지는 커패시터가 선택된다.

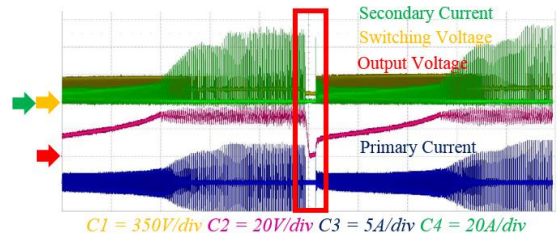
하지만 작은 출력 커패시터는 컨버터의 작은 위상 여유를 유도하여 컨버터의 안정도에 문제를 야기한다. 그러므로 LLC 공진형 컨버터의 소신호 모델을 유도하여 출력 커패시터의 커패시턴스 및 기생 저항에 따른 주파수 응답을 도출하고 개루프 이득에서 위상 지연 및 이득 여유의 변동을 확인한다. 위의 개루프 이득의 출력 커패시터에 따른 위상 및 이득 여유의 변동을 보상하는 피드백 루프를 설계하여 폐루프 이득에서 적절한 위상 및 이득 여유를 가지도록 한다.

본 논문에서 500 kHz의 동작 주파수를 가지는 컨버터를 MATLAB을 이용하여 출력 커패시터의 조건에 따른 이론적인 개루프 이득을 확인하고, 피드백 루프를 설계하여 폐루프 이득을 확인하였다. 이론적으로 설계된 폐루프 이득을 실험을 통하여 검증하였다.

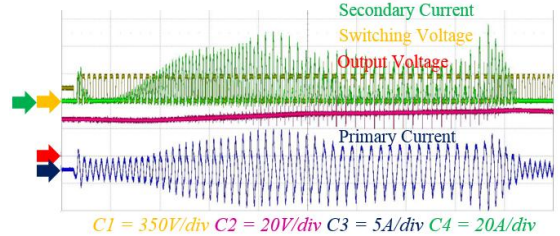
2. 본 론

2.1 고주파 LLC 공진형 컨버터의 소신호 분석

그림 1은 작은 출력 커패시터에 따른 컨버터의 불안정한 동작을 보여준다. 급격한 주파수의 변동이 일어나며, 이는 1차측의 높은 피크 전류를 만들어 Brownout Protection을 일으키게 된다.



A. 높은 1차측 전류에 의한 Brownout Protection



B. 급격한 동작 주파수의 변동으로 불안정한 동작

그림 1 500 kHz LLC공진형 컨버터의 불안정한 동작 파형

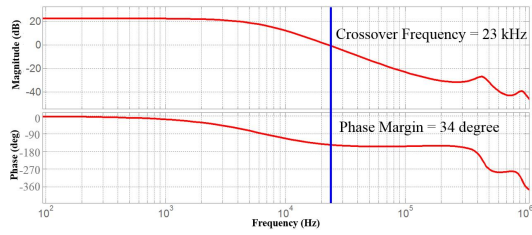
Fig. 1 Unstable operation of 500 kHz LLC resonant converter.

적절한 피드백 제어기를 설계하기 위해 Extended Describing Function(EDF)를 사용하여 출력 커패시터에 따른 개루프 이득을 분석한다 [1], [2]. 표 1은 500 kHz LLC 공진형 컨버터의 설계 조건을 나타낸다. 이를 이용하여 그림 2는 출력 커패시턴스에 따른 개루프 이득을 나타낸다. 1047 μF 의 경우 6600 μF 의 경우에 비해 높은 이득 여유와 작은 위상 여유를 가지고 이는 상대적으로 높은 불안정함을 나타낸다.

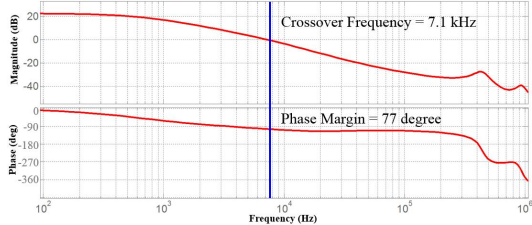
표 1 500 kHz LLC 공진형 컨버터 실험 조건

Table 1 Specification of 500 kHz LLC resonant converter

입력 전압	420 V	공진 커패시턴스	4 nF
출력 조건	30 V, 10 A	출력 커패시턴스	1049 μF 5.6 m Ω
자화 및 누설 인덕턴스	63 μH	도선의 기생저항	2 Ω
	20 μH	공진 주파수	563 kHz



A. 1047 μF 의 출력 커패시턴스의 경우



B. 6600 μF 의 출력 커패시턴스의 경우

그림 2 출력 커패시턴스에 따른 개루프 이득

Fig. 2 Open-loop gain according to output capacitance.

그림 3은 개루프의 높은 크로스오버 주파수와 작은 위상 여유를 보상하기 위한 2 pole 1 zero 시스템의 피드백 회로를 보여준다. 위의 회로는 식 (1)로 표현되며, k factor approach 방법을 사용하여 개루프의 첫 번째 극점보다 약간 높은 주파수에서 루프의 크로스오버 주파수 및 위상 여유를 결정한다.

$$V_{err}(s) = \frac{R_{pullup}}{R_{LED}} \times CTR \times \frac{1 + s(R_1 + R_2)C_1}{sR_1C_1(1 + sR_{pullup}C_2)} \quad (1)$$

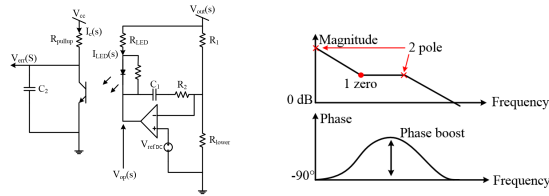
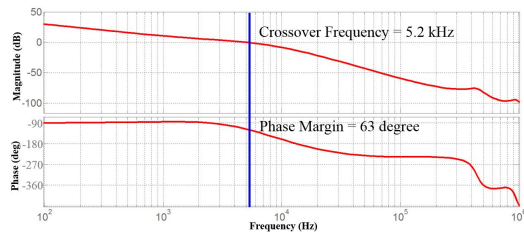
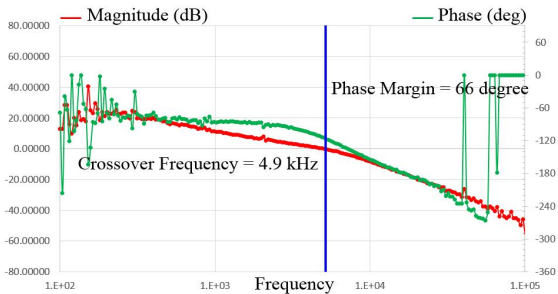


그림 3 1 pole 2 zero 피드백 보상기 회로 및 보드 플롯

Fig. 3 Circuit diagram and bode plot of the two-pole one-zero feedback compensator.



A. MATLAB을 이용한 페루프 이득



B. 페루프 이득 실험 결과

그림 4 500 kHz 소신호 응답의 이론 및 실험 결과

Fig. 4 Theoretical and experimental result of 500 kHz small-signal response.

위의 개루프 이득을 이용하여 작은 출력 커패시턴스의 경우를 피드백 루프로 보상하면 그림 4(A)와 같은 페루프 이득을 얻을 수 있다. 또한 그림 4(B)를 통해 제안하는 이론적 설계의 타당성을 실험적으로 증명할 수 있다.

2.2 실험 결과

그림 5는 1047 μF 의 출력 커패시터를 사용하였을 때 전 부하에서 정상동작을 나타낸다. 영진압 스위칭과 영전류 스위칭 동작을 보인다. 그림 6은 Step load 실험 결과를 보여준다. 이를 통해 제안하는 제어를 사용하면 작은 용량의 출력 커패시터를 사용함에도 컨버터가 안정된 동작을 보임을 확인할 수 있다.

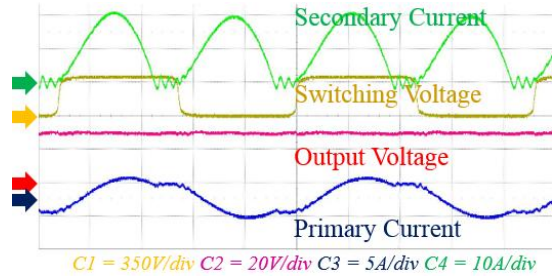


그림 5 전부하시 정상 동작 파형

Fig. 5 Operational waveform at full load condition.

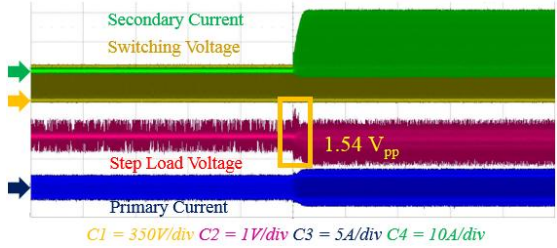


그림 6 Step load 실험 파형

Fig. 6 Experimental waveform of step load response.

3. 결론

LLC 공진형 컨버터는 동작 주파수가 올라감에 따라 수동소자들의 크기가 줄어들어 높은 전력밀도를 얻을 수 있으나 페루프 제어의 안정성이 문제가 될 수 있다. 본 논문에서는 높은 전력밀도를 위한 작은 용량의 출력 커패시터에 의해 컨버터의 이득 여유와 위상 여유가 변동함을 보였고 이를 적절히 보상하여 제어가 충분한 위상 및 이득 여유를 가짐을 확인하였다. 또한 정상 상태 동작 및 Step load 실험을 통해 검증하였다.

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF 2013R1A1A1009632).

참고 문헌

- [1] B. Cheng, F. Musavi, W. G. Dunford, "Novel Small Signal Modeling and Control of an LLC Resonant Converter", Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Proceeding of the IEEE, pp. 2828-2934, 2014
- [2] M. Shaik, R. Kankanala, "Digital Compensator Design for LLC Resonant Converter", Microship Technology Inc, 2012