

# 보드 선도를 이용한 LLC 공진형 컨버터의 경 부하 레귤레이션 특징 분석

연철오, 박무현, 문건우  
한국과학기술원 (KAIST)

## Analysis for light load regulation of LLC resonant converter using bode plot

Cheol-O Yeon, Moo-Hyun Park, and Gun-Woo Moon  
Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

### ABSTRACT

일반적인 LLC 공진형 컨버터의 경우, 경 부하 시의 레귤레이션이 안 되는 문제가 존재한다. 본 논문에서는 경 부하 시 레귤레이션이 안 되는 문제점에 대하여 보드 선도를 이용하여 직관적인 해석을 유도한다. 또한 이러한 문제점을 개선하기 위한 방법을 제안하고, 이를 보드 선도를 이용하여 특성을 분석한다. 이를 통하여 일반적인 LLC 공진형 컨버터의 특성을 유지하면서, 경 부하 시의 레귤레이션 문제를 해결한다.

### 1. 서론

LLC 공진형 컨버터는 공진 탱크에 존재하는 공진 캐패시터 ( $C_r$ )와 공진 인덕터 ( $L_r$ ), 그리고 변압기의 인덕터 ( $L_M$ )의 공진을 이용하여 전력을 전달해주는 컨버터로, 주파수 변조 기법 (PFM)을 사용하여 출력 전압을 레귤레이션 시켜준다. 일반적인 전원 장치 설계 시 자성체 소자의 부피 감소 및 컨버터의 전력밀도 상승을 위해서 고주파 동작이 필요한데, 이러한 상황에서 LLC 공진형 컨버터는 고속 스위칭 동작에서도 고효율을 낼 수 있다는 장점을 가지고 있기 때문에 아주 매력적인 토폴로지라고 할 수 있다. 특히 경 부하 시에도 영전압 스위칭 (Zero voltage switching, ZVS)이 가능하고, 출력 인덕터가 없는 토폴로지이기 때문에 스위칭 손실과 코어 손실을 줄일 수 있어 앞서 언급한 고주파 동작 또는 경 부하 시의 효율을 올리기 위하여 다양한 분야에서 많이 사용되어 왔다.<sup>[1],[2]</sup>

이상적인 LLC 공진형 컨버터의 경우, Fundamental Harmonic Approximation (FHA)을 이용하여 그림 1과 같은 Gain Curve를 얻을 수 있는데, 이 때 그림 1에서 볼 수 있듯이 주파수가 감소할수록 LLC 공진형 컨버터의 Gain이 감소하는 것을 알 수 있다. 이를 이용하여 경 부하 시 고주파 동작을 하여 출력 전압을 레귤레이션 한다. 하지만 실제 LLC 공진형 컨버터의 경우, 스위치의 Output 캐패시터 ( $C_{oss}$ ) 등의 기생성분들로 인하여 고주파로 올라갈수록 LLC 컨버터는 출력 전압이 올라가는 문제점이 존재한다.<sup>[3],[4]</sup> 본 논문에서는 이러한 LLC 공진형 컨버터가 경 부하 시에 레귤레이션 되지 않는 문제를 보드 선도를 이용하여 직관적인 해석을 유도하고, 이를 기존 LLC가 가지는 장점을 그대로 가져가면서 경 부하 시 레귤레이션 되지 않는 문제만 개선하기 위한 방법을 보드 선도를 이용하여 제안한다. 또한 이를 검증하기 위하여 공진주파수 ( $f_0$ ) 110kHz, 출력 전력 200W (50V-4A)의 프로토타입 컨버터를 제작하였고, 실험을 통하여 그 효과를 입증하였다.

### 2. 동작 원리 및 회로 특징

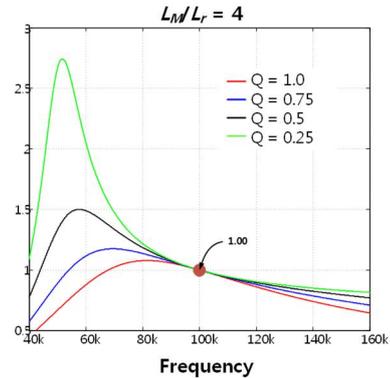


그림 1 이상적인 LLC 공진형 컨버터의 Gain Curve

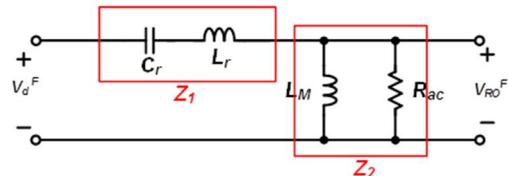


그림 2 이상적인 LLC 공진형 컨버터의 등가회로

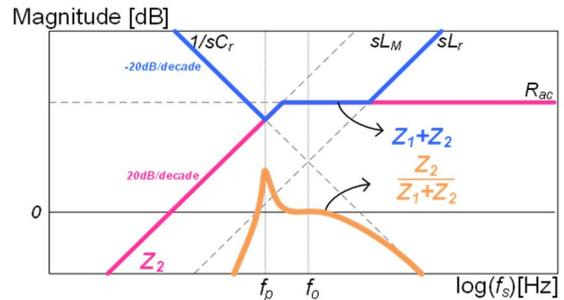


그림 3 보드 선도를 이용한 이상적인 LLC 컨버터의 특징

#### 2.1 이상적인 LLC 공진형 컨버터의 레귤레이션 특성

이상적인 LLC 공진형 컨버터의 경우, FHA를 이용하면 그림 2와 같이 1차 측에서 바라보는 등가회로를 얻을 수 있다. 이 때, Gain은  $Z_1$ 과  $Z_2$ 의 임피던스 비에 의해서 결정되며 이를 보드 선도를 이용하여 표현하면 그림 3과 같이 표시할 수 있다. 그림 3의 아래  $Z_2/(Z_1+Z_2)$  그래프에서 볼 수 있듯이, 이상적인 LLC 공진형 컨버터는 1차 측에서 바라본 등가저항 ( $R_{ac}$ )과  $L_r$ 에 의해 생기는 1 pole에 의해서 고주파로 갈수록 Gain이 작아지기 때문에 경 부하 시의 레귤레이션이 가능하다.

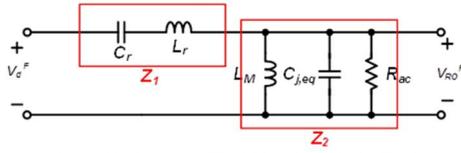


그림 4 실제 LLC 공진형 컨버터의 등가회로

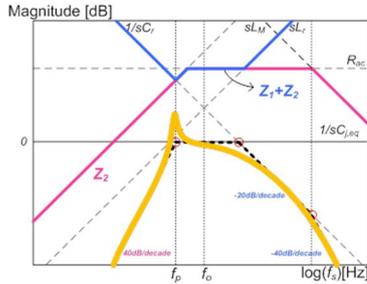


그림 5 보드 선도를 이용한 실제 LLC 공진형 컨버터의 특성

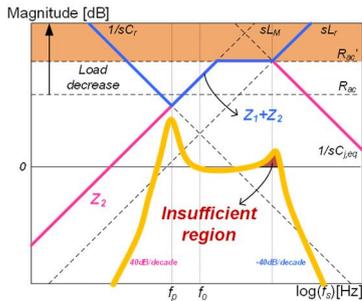


그림 6 경 부하 시에 발생하는 더블 pole로 인한 Gain의 변화

### 2.2 LLC 공진형 컨버터의 경 부하 시 레귤레이션 문제

앞서 연구된 논문에서 볼 수 있듯이, 경 부하 시 레귤레이션이 안 되는 가장 큰 원인은 LLC 공진형 컨버터의 2차 측에 존재하는 정류단의 기생 캐패시터(Junction capacitor,  $C_j$ )이다. [3],[4] 이러한 기생성분을 고려한 결과 실제 LLC 공진형 컨버터의 등가회로는 그림 4와 같고, 이를 통하여 보드 선도를 그리면 그림 5와 같은 그래프를 얻을 수 있다. 이 때, 그림 5에서 알 수 있듯이  $L_r$ 과  $R_{ac}$ 에 의한 pole 이외에 추가적으로  $R_{ac}$ 와  $C_{j,eq}$ 에 의한 pole이 한 개 더 존재하는 것을 알 수 있다.

LLC 공진형 컨버터는 경 부하로 갈수록  $R_{ac}$ 의 위치가 위로 올라가게 되며,  $C_{j,eq}$ 에 의한 또 하나의 pole에 의하여 부하가 작아지면  $L_r$ 과  $C_{j,eq}$ 가 만나는 지점에서 더블 pole이 그림 6과 같이 생기게 된다. 이 더블 pole의 영향으로 그림 6에서 알 수 있듯이 Gain이 고주파로 갈수록 상승하게 되고, 이는 LLC 공진형 컨버터의 레귤레이션 특성에 악영향을 미치게 된다.

### 2.3 제안하는 LLC 공진형 컨버터의 경 부하 레귤레이션

본 논문에서 제안하는 경 부하 레귤레이션 문제 해결 방법은 그림 7과 같이 공진 탱크에  $C_{add}$ 를 붙여 발생할 수 있는 더블 pole을 미리 없애는 방식이다. 이 방식을 사용하여 Gain curve를 그리면 그림 8과 같이 그려지며, 이 때,  $C_{add}$ 와  $L_r$ 의 공진점에서 발생하는 peak로 LLC 공진형 컨버터의 경 부하 레귤레이션을 달성할 수 있다. 이 때, 기존 LLC 공진형 컨버터의 특성을 그대로 가져가기 위하여  $C_{add}$  값의 범위를 아래와 같이 설정해 주어야 한다.

$$10 \times C_{j,eq} < C_{add} < 0.1 \times C_r \quad (1)$$

$$\sqrt{L_r / C_{add}} < R_{ac} \quad (2)$$

### 3. 실험결과

앞서 언급한대로 출력 전력 200W (50V-4A)의 프로토타입 컨버터를 제작하여 그 효과를 검증해 보았다. 그림 9는 제안하

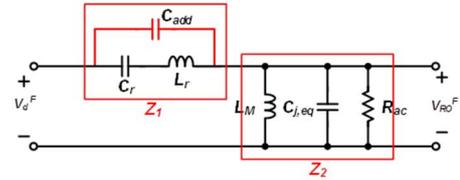


그림 7 제안하는 LLC 공진형 컨버터의 등가회로

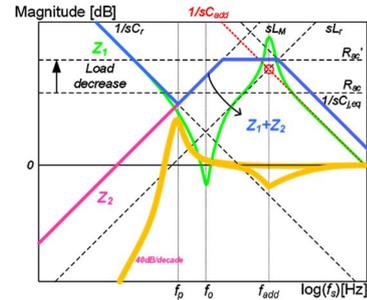


그림 8  $C_{add}$ 로 인한 더블 pole 제거와 Gain의 변화

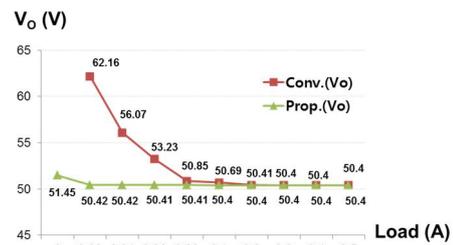


그림 9 부하 변화에 따른 출력 전압 레귤레이션 특성

는 컨버터와 기존 LLC 공진형 컨버터의 부하 조건 별 출력 전압 그래프를 나타낸다. 보이는 그림에서도 알 수 있듯이, 제안하는 컨버터는 기존 LLC 공진형 컨버터와 일반적인 조건에서 동일한 동작을 하며, 0.1A 이하의 극 경 부하 조건에서 레귤레이션 특성이 뛰어난 것을 확인하였다.

### 4. 결론

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 경 부하 레귤레이션 특성 개선을 위하여 보드 선도를 이용하여 그 특징을 분석하고, 추가  $C_{add}$ 를 이용하여 LLC 공진형 컨버터의 경 부하 특성을 개선시키는 방법을 제안하였다. 본 논문을 통하여 LLC 공진형 컨버터의 특징을 직관적으로 해석할 수 있으며, 별도의 부작용 없이 경 부하 특성을 개선하는 방식을 유도할 수 있다. 이를 통하여 기존 경 부하 레귤레이션 달성 기법 대비 더 나은 특성을 가지는 LLC 공진형 컨버터를 설계할 수 있다.

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2010-0028680)

### 참고 문헌

- [1] I.O. Lee, and G.W. Moon, "The k-Q analysis for an LLC series resonant converter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 1, pp. 13-16, Jan. 2014
- [2] J.H. Kim, C.E. Kim, J.B. Lee, Y.D. Kim, H.S. Youn, and G.W. Moon, "A simple control scheme for improving light-load efficiency in a full-bridge LLC resonant converter," in Proc. International Power Electronics Conference, IPEC'14, pp. 1743-1747, May. 2014.
- [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," in Proc. Telecommunications Energy Conference, INTELEC'09, pp. 1-6, Oct. 2009
- [4] J.H. Kim, C.E. Kim, and G.W. Moon, "Analysis for LLC resonant converter considering parasitic components at very light load condition," in Proc. Power