

# LLC 공진형 직류-직류 변환기의 전류형 제어

정민재, 장진행\*, 최병조  
경북대학교, LG전자\*

## Current Mode Control of LLC Series Resonant Dc-to-Dc Converters

Minjae Joung, Jinhaeng Jang\*, Byungcho Choi  
Kyungpook National University, LG Electronics\*

### ABSTRACT

본 논문에서는 넓은 입출력 변동 범위를 가지는 LLC 공진형 직류-직류 변환기의 전류형 제어에 대해서 소개한다. 먼저, 전류형 제어의 개념과 목적을 설명하고 전류형 제어를 적용한 변환기를 소신호 해석을 이용해 전원단의 동특성을 확인한다. 그리고 동특성 해석을 바탕으로 전압 보상기 회로를 구성한 후, 변환기의 성능을 실험과 시뮬레이션을 통해 비교 및 검증한다. 마지막으로 전압형 제어를 이용한 변환기와 비교를 통해 전류형 제어의 우수성을 확인한다.

### 1. 서론

LLC 공진형 컨버터는 여러가지 장점들로 인해 많은 연구와 응용 제품에서 활용되고 있다. 일반적으로 공진형 컨버터는 전압형 제어방식을 사용한다. 이럴 경우, 동작 조건이 변하면 전원단의 동특성이 크게 변하는 LLC 공진형 컨버터는 제어기 설계가 까다롭고 동작 조건에 따른 성능의 차이가 나타난다. 본 논문에서는 150 W LLC 공진형 컨버터를 이용하여 전체 동작 영역에서 일관되게 우수한 성능을 제공하고, 기존의 전압형 제어의 한계를 극복할 수 있는 전류형 제어를 제안한다. 이것은 출력전압의 피드백 신호와 전류감지회로를 이용하여 감지된 공진전류를 제어신호로 이용하는 것이다. 전류형 제어를 적용한 컨버터의 동특성과 페루프 성능을 전압형 제어를 적용한 경우와 비교를 통하여 전류형 제어의 우수성을 확인하였다.

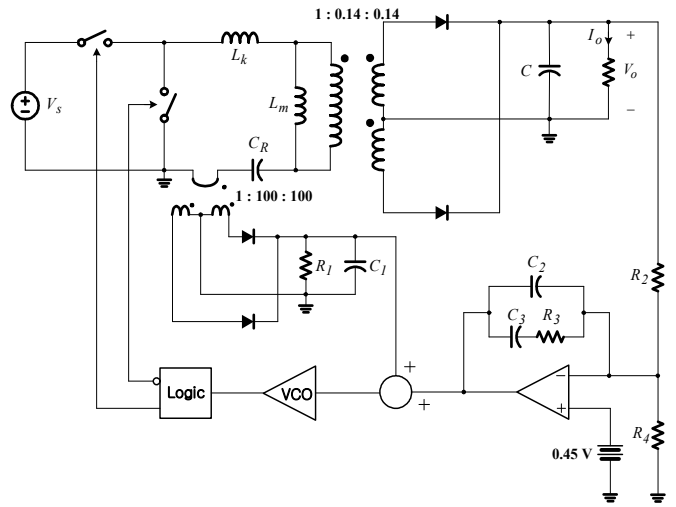
### 2. 전류형 제어를 적용한 LLC 공진형 컨버터

#### 2.1 회로 구성과 동작 영역

그림 1은 전류형 제어가 적용된 LLC 공진형 컨버터의 간략화된 구조이다. 하프브릿지로 스위치단이 구성되어 있고, 공진 캐패시터( $C_R$ )와 변압기의  $L_k$ 와  $L_m$ 을 이용해 공진단을 구성하였다. 공진단 뒤에는 정류단과 출력단이 있으며, 공진전류를 감지하기 위한 전류감지회로와 오차증폭기 주변에 전압 보상기가 위치한다.

컨버터의 동작 영역은 그림 1에 명시된 입력전압과 부하전류의 변화에 따라 다음과 같이 정의하였다.

- A:  $V_S = 340\text{ V}$   $I_O = 6\text{ A}$     B:  $V_S = 390\text{ V}$   $I_O = 6\text{ A}$
- C:  $V_S = 340\text{ V}$   $I_O = 1\text{ A}$     D:  $V_S = 390\text{ V}$   $I_O = 1\text{ A}$



$V_S = 340 \sim 390\text{ V}$ ,  $V_O = 24\text{ V}$ ,  $I_O = 1 \sim 6\text{ A}$ ,  $L_k = 160\mu\text{H}$ ,  
 $L_m = 1.24\text{ mH}$ ,  $C_R = 47\text{ nF}$ ,  $C = 2\text{ mF}$ ,  $R_1 = 50\ \Omega$ ,  $C_1 = 0.1\mu\text{F}$ ,  
 $R_2 = 968\ \Omega$ ,  $C_2 = 2.2\text{ nF}$ ,  $R_3 = 4.7\text{ k}\Omega$ ,  $C_3 = 136\text{ nF}$ ,  $R_4 = 19\ \Omega$

그림 1 전류형 제어를 적용한 LLC 공진형 컨버터  
Fig. 1 LLC series resonant converter using current mode control

#### 2.2 전원단 동특성과 전류형 제어의 적용

그림 2 (a)는 동작점이 B에서 A로 변할때의 전압형 제어를 적용한 컨버터의 제어 대 출력 전달함수의 양상이다. 그림에서 나타나는 특징은 이미 잘 알려져 있다.<sup>[1]</sup> 전류형 제어는 동작점이 변하면서 나타나는 전원단 동특성의 변화가 제어 대 공진전류 전달함수에도 나타난다면 식 (1)과 같이 동작 조건이 변하면서 나타나는 전원단 동특성의 변화를 서로 상쇄할 수 있다. 식 (1)에서  $\hat{v}_o(s)/\hat{f}_s(s)$ 는 주파수 대 출력 전달함수이고,  $\hat{i}_T(s)/\hat{f}_s(s)$ 는 주파수 대 공진전류 전달함수이다.  $F_{vco}$ 는 VCO 이득이며,  $H_i(s)$ 는 전류감지회로의 전달함수이다. 그 결과, 동작 조건이 변함에 따라 나타난 동특성의 변화가 나타나지 않게 되었다. 그림 2 (b)는 전류형 제어를 적용한 경우로 동작점의 변화에 무관하게 일관된 동특성을 확인할 수 있다.

$$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_c(s)} = \frac{F_{vco} \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{f}_s(s)}}{1 + F_{vco} \frac{\hat{i}_T(s)}{\hat{f}_s(s)} H_i(s)} \approx \frac{F_{vco} \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{f}_s(s)}}{F_{vco} \frac{\hat{i}_T(s)}{\hat{f}_s(s)} H_i(s)} \quad (1)$$

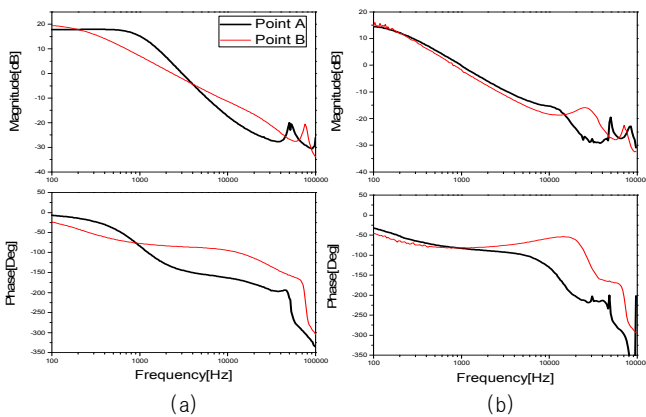


그림 2 제어 대 출력 전달함수  
(a) 전압형 제어 (b) 전류형 제어  
Fig. 2 Control to output transfer function  
(a) Voltage mode control (b) Current mode control

### 2.3 보상기 설계와 루프 이득

전류형 제어를 적용해서 동작 조건이 변해도 전원단 동특성이 일정하게 되었다. 따라서, 보상기의 구조를 간단화하면서 모든 동작 영역에서 일관적이고 우수한 폐루프 성능을 보장하는 보상기의 설계가 가능하다. 보상기로 2극점 1영점 구조를 이용했다. 식 (2)는 2극점 1영점 보상기의 식이며, 출력전압의 DC 레귤레이션을 위해 원점에 극점이 있고, 저주파에 위치한 극점을 보상하여 크로스오버 주파수에서 충분한 위상여유를 제공하기 위한 영점( $\omega_z$ )을 배치하였다. 그리고 출력 캐패시터의 esr에 의한 esr 영점을 상쇄하고 고주파 노이즈를 억제하기 위해 극점( $\omega_p$ )을 위치시켰으며  $K_m$ 은 이득으로 7500으로 조정하였다.

$$F_v(s) = \frac{K_m (1 + s/\omega_z)}{s (1 + s/\omega_p)}$$

$$\omega_z = 1.6 \times 10^3 [r/s] \quad \omega_p = 10 \times 10^4 [r/s] \quad K_m = 7500$$

(2)

그림 3은 설계된 보상기를 적용한 루프 이득이다. 동작점 A는 3.3kHz의 크로스오버 주파수에서 43°의 위상여유를 가지고, 동작점 B는 2.7kHz의 크로스오버 주파수에서 53°의 위상여유를 가진다. 두 경우 모두 충분한 위상여유와 크로스오버 주파수의 위치를 통해 우수한 안정성을 확인할 수 있다.

### 2.4 과도 응답 특성

그림 4는 부하 변화에 따른 컨버터의 안정성을 확인하기 위해 계단부하 응답을 측정한 것이다. 그림 4 (a)는 전압형 제어의 경우이고, 그림 4 (b)는 전류형 제어의 경우이다. 동작점 A에서 C로 변하는 경우에는 두 경우 모두 큰 차이가 나타나지 않는다. 그 이유는 전압형 제어의 경우, 동작점 A를 기준으로 제어기를 설계하였기 때문이다. 따라서 필연적으로 우수한 과도응답 특성을 확인할 수 있다. 하지만 동작조건이 B에서 D로 변화할 경우는 과도응답 특성에 차이가 나타난다. 발진없이 안정적인 과도응답 상태를 나타내지만 A에서 C로 변하는 경우에 비해 오버슈트, 언더슈트, 그리고 정착시간에서 차이가 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 앞에서 설명한 LLC 공진형 컨버터의 동작 조건의 변화에 따른 전원단 동특성의 변화에 기인한 문제이다. 그림 4 (b)에 나타나는 전류형 제어의 경우를 살펴보면 동작점이 A에서 C로 변하는 경우와 B에서 D로 변하는 경우가 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 전원단 동특성의

일관화를 통해 나타난 특징이다. 이러한 점으로부터 전류형 제어의 우수성을 확인할 수 있다.

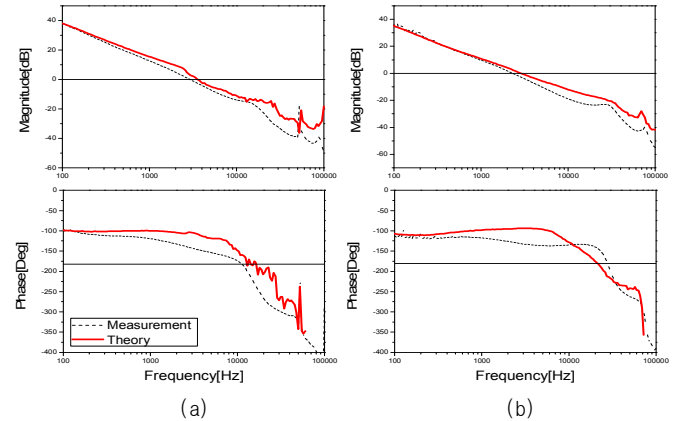


그림 3 루프 이득 (a) 동작점 A (b) 동작점 B  
Fig. 3 Loop gain (a) Point A (b) Point B

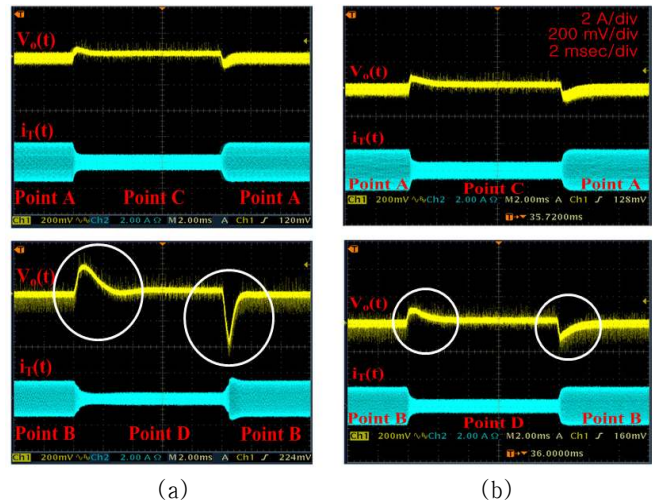


그림 4 계단부하 응답 (a) 전압형 제어 (b) 전류형 제어  
Fig. 4 Step load response  
(a) Voltage mode control (b) Current mode control

## 3. 결론

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 전류형 제어를 제안했다. 전류형 제어는 기존의 전압형 제어보다 우수한 폐루프 성능을 보여주었다. 앞으로 전류형 제어는 성능이 우수한 공진형 컨버터를 제작하기 위한 제어 IC와 응용제품에 활용될 수 있을 것이다.

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.  
(No. 2009-0075088)

## 참고 문헌

[1] Jinhaeng Jang, Minjae Joung, Byungcho Choi, and Heung-geun Kim, "Dynamic analysis and control design of optocoupler-isolated LLC series resonant converters with wide input and load variations", ECCE2009, pp. 758-765