

# 디지털로 구현된 LLC 컨버터의 전하제어

강상우, 조보형  
서울대학교 전기정보공학부

## Digitally Implemented Charge Control for LLC Resonant Converters

Sang Woo Kang, and Bo Hyung Cho

Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

### ABSTRACT

LLC 컨버터는 동작범위에 따라 특성이 바뀌는 전달함수로 인해 제어기 설계와 최적화에 어려움이 따른다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 새로운 방식의 전하제어를 제안한다. 먼저, 소신호 등가모델을 분석해 공진 캐패시터 전압이 공진 전류와 같은 위상을 가진다는 것을 보인 후, 캐패시터가 resettable integrator가 될 수 있음을 밝힌다. 이를 바탕으로 디지털 구현에 적합한 전하제어를 제안한다. 그리고 실험을 바탕으로 제안한 제어의 타당성을 검증한다.

### 1. 서론

고효율 및 고밀도에 대한 관심으로 인해 최근 LLC 컨버터에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다. 하지만, 동작영역에 따라 공진방식이 달라지는 다중 공진 특성으로 인해 LLC 컨버터의 소신호 전달함수는 동작 조건에 따라 변하는 특징이 있다. 이로 인해, 널리 쓰이는 전압제어를 사용하게 되는 경우 시스템의 동특성을 결정하는 전압제어루프가 동작 조건에 따라 변해 최적화가 어렵다는 단점이 존재한다.<sup>[1]</sup>

이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 새로운 방식의 전하제어를 제안한다. 우선, 소신호 등가모델 분석을 통해 공진 캐패시터 전압이 공진 전류와 같은 위상을 가진다는 것을 보이고, 공진 캐패시터가 resettable integrator로 사용될 수 있음을 밝힌다. 이를 바탕으로 디지털 구현에 적합한 전하제어를 제안하고, 실험을 통해 제안한 제어의 타당성을 검증한다.

### 2. 제안한 전하제어

#### 2.1 공진 캐패시터의 소신호 특징

그림 1은 Describing function 모델을 사용한 공진 캐패시터의 소신호 모델이다. 일반적으로 공진 캐패시터는 그림 1(a)처럼 캐패시터, 임피던스 및 전류원으로 표현이 된다. 이 때, 그림 1(a)는 스위칭 주파수보다 낮은 범위에서 그림 1(b)에 나와 있는 직렬연결된 인덕터, 임피던스 및 전압원으로 등가적으로 치환이 가능하다.<sup>[2]</sup> 이 모델을 바탕으로, 공진 캐패시터와 공진 전류사이의 소신호 특징을 유도하면 다음과 같다.

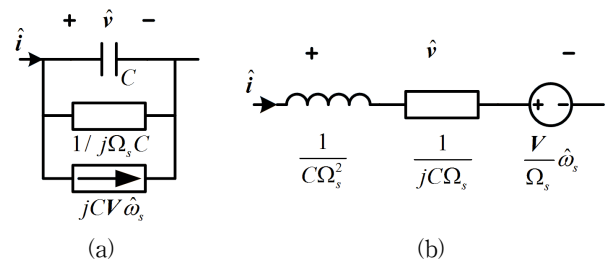


그림 1 공진 캐패시터의 소신호 모델 (a) 기존 Describing Function (b) 간략화된 형태<sup>[2]</sup>

Fig 1 Resonant capacitor with (a) conventional describing function model and (b) simplified model

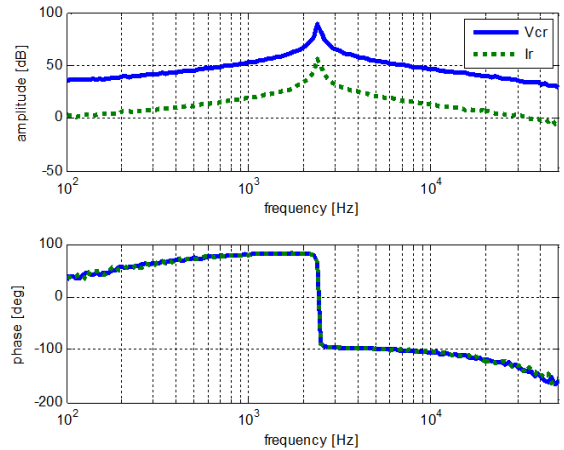


그림 2 시뮬레이션을 통해 추출한 공진캐패시터 전압( $V_{cr}$ )과 공진 전류( $I_r$ )의 소신호를 추출한 그림

Fig 2 Small signal transfer function of resonant voltage  $V_{cr}$  and resonant current  $I_r$  using time domain simulation

$$\hat{v} = \frac{1}{C\Omega_s} \hat{i} \quad (1)$$

소신호상에서 전압과 전류사이에는 위상차가 존재하지 않고, 크기에서만 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이 결과는 시뮬레이션을 기반으로 소신호를 추출한 결과인 그림 2와 일치한다. 한편, 식 (1)은 PWM 컨버터에 널리 사용되고 있는 전하제어

의 입력전류 캐패시터 전압의 관계와 매우 유사한데 이를 토대로 공진형 컨버터의 전하제어를 공진 캐패시터의 전압을 이용해서 구성할 수 있음을 알 수 있다.

## 2.2 제안하는 전하제어

그림 3은 제안하는 전하제어의 구조를 나타낸다. 바깥의 전압루프는 출력전압을 이용해 전압제어기의 결과로 공진 캐패시터 전압의 지령치를 내보낸다. 내부의 전하루프는 공진 캐패시터 전압을 센싱한 후, 지령치와 비교를 통해 주파수를 생성한다. 제안하는 방식은 공진 캐패시터 전압을 샘플링한 결과값과 제어기 출력값을 비교하므로, 기본적으로 디지털 제어방식에 적합하다.

## 3. 실험결과

제안한 제어의 타당성을 검증하기 위해, 프로토타입 LLC 컨버터를 이용해 실험을 수행하였다. 그림 4는 정격용량의 20%, 40%, 60%, 80%, 100% 부하에 대한 회로의 정상상태 파형을 나타낸다. 부하범위 변동에 대해 안정적으로 회로가 동작하는 것을 알 수 있으며, 공진캐패시터 전압의 지령치가 부하에 따라 증감하는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 정격대비 2% 부하에서 실험한 결과이다. 기존 전하제어 방법에서 경부하 sub harmonic oscillation 문제가 발생한 것과 달리 제안된 전하제어에서는 제어기의 수정 없이 안정적으로 경부하에서 동작하는 것을 확인할 수 있다.

## 4. 결론

본 논문에서는 디지털로 구현된 전하제어를 제안하였다. 공진캐패시터의 소신호 등가모델로부터 공진전압과 전류사이에 위상차 없이 크기만이 차이가 난다는 것을 이용해, 공진 캐패시터 전압을 이용한 전하 제어를 구성하였다. 제안한 방법은 공진 캐패시터 전압을 한주기에 한번만 센싱하고, 별도의 추가회로 구성이 필요하지 않기 때문에 특히 디지털 제어에 적합하다. 프로토타입 LLC 컨버터를 통해 제안된 회로의 타당성을 검증하였으며 모든 부하에서 안정적으로 회로가 동작하는 것을 확인하였다.

이 논문은 2016년도 두뇌한국21플러스사업에 의하여 지원되었음.

## 참고 문헌

- [1] S. W. Kang, H. J. Kim, and B. H. Cho, "Adaptive voltage controlled oscillator for improved dynamic performance in LLC resonant converter," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 52, no. 2, pp. 1652-1659, Mar/Apr. 2016.
- [2] S. Tian, F. C. Lee, and Q. Li, "A simplified equivalent circuit model of series resonant converter," *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 31, no. 5, pp. 3922-3931, Aug. 2015.

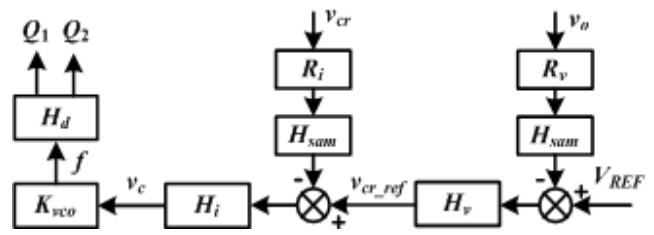


그림 3 제안한 방법의 제어기 구조  
Fig 3 Control structure of the proposed method.

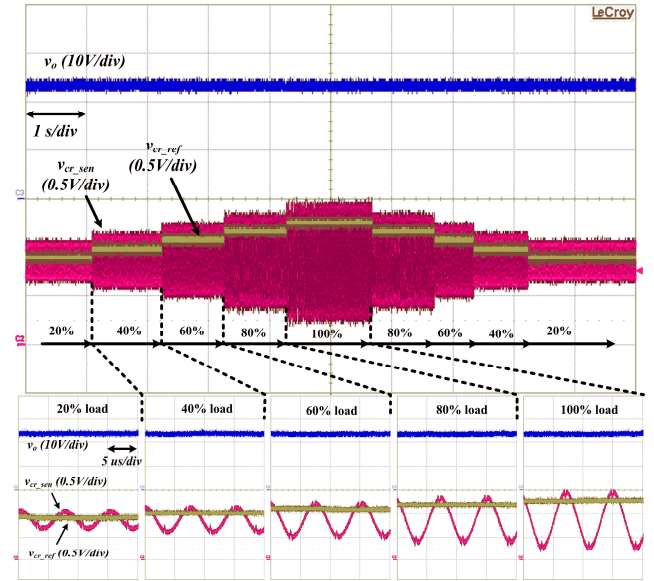


그림 4 제안한 제어를 통해 실험한 출력용량(20% 100%)에 따른 정상상태 파형 및 확대파형: 출력전압( $v_o$ ), 캐패시터 센싱 전압( $v_{cr\_sen}$ ), 캐패시터 전압 지령치( $v_{cr\_ref}$ )  
Fig 4 Steady state and enlarged waveforms of  $v_o$ ,  $v_{cr\_sen}$ , and  $v_{cr\_ref}$  according to 20%, 40%, 60%, 80%, and 100% load conditions.

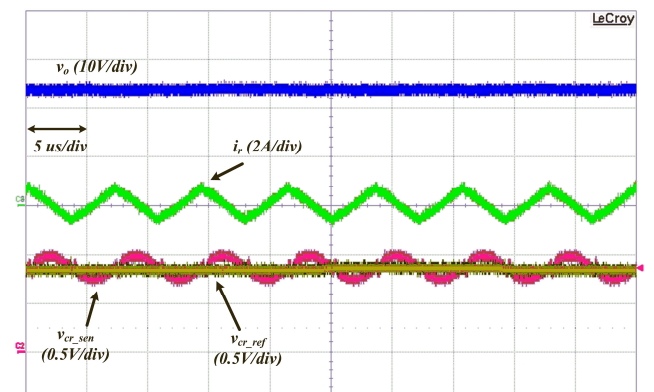


그림 5 제안한 제어의 경부하(2% 출력부하)에서의 파형: 출력 전압( $v_o$ ), 공진전류( $i_r$ ), 캐패시터 센싱 전압( $v_{cr\_sen}$ ), 캐패시터 전압 지령치( $v_{cr\_ref}$ )  
Fig 5 Steady state waveform of  $v_o$ ,  $i_r$ ,  $v_{cr\_sen}$ , and  $v_{cr\_ref}$  with light load condition of 2% load level.