

# CLLC 공진형 컨버터의 분석 정확도 향상을 위한 연구

장원용, 윤지현, 김민우, 박정욱  
연세대학교

## Study of Analysis Accuracy Improvement for CLLC Resonant Converter

Won-Yong Jang, Jihyeon Yun, Minwoo Kim, Jung-Wook Park  
Yonsei University

### ABSTRACT

본 논문에서는 CLLC 공진형 컨버터 분석 정확도 향상을 위한 시간 영역 분석 방법을 소개한다. 일반적으로 CLLC 공진형 컨버터를 분석할 때 공진 주파수만 고려하여 해석하는 first harmonic method (FHA) 방법을 이용한다. 하지만, 해당 방법은 스위칭 주파수가 공진 주파수에서 멀어질수록 분석 정확도가 저하되는 문제점이 발생하므로, 넓은 범위의 스위칭 주파수로 동작하는 CLLC 공진형 컨버터를 분석하기에 적합하지 않다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해 시간 영역 분석 방법이 등장하였고 이는 모든 영역에서 상당히 높은 정확도를 갖는다. 또한, 시간 영역 분석 방법의 정확성을 검증하고자 본 논문에서는 PSIM 시뮬레이션을 통해 FHA 방법과 비교하였다.

### 1. 서론

CLLC 공진형 컨버터는 DC-DC 컨버터 자체적으로 갈바닉 절연이 가능한 특징, 우수한 소프트 스위칭 동작, 양방향 전력 전달 및 높은 전력밀도를 갖는 특징으로 인해 최근에 많은 주목을 받고 있는 토폴로지이다. 따라서, CLLC 공진형 컨버터는 전기 자동차에서 vehicle-to-grid 동작이 가능한 탑재형 충전기, 무정전 전원 장치, 그리고 배터리 에너지 저장 시스템 등 다양한 분야에서 사용하기 위해 여러 연구가 진행되고 있다.

일반적으로 CLLC 공진형 컨버터를 분석할 때 공진 주파수만 고려하여 공진 탱크의 등가회로를 분석하는 first harmonic approximation (FHA) 방법을 사용한다<sup>[1]</sup>. 하지만, FHA 방법은 스위칭 주파수가 공진 주파수에서 멀어질수록 분석 정확도는 현저하게 감소한다는 문제점이 존재한다. 즉, FHA 방법은 넓은 범위의 스위칭 주파수로 동작하는 CLLC 공진형 컨버터를 분석하기에 적합하지 않다.

본 논문에서는 CLLC 공진형 컨버터의 분석 정확도 향상을 위한 시간 영역 분석 방법을 소개한다. 해당 분석 방법은 시간 영역에서 미분 방정식을 토대로 회로를 분석하기 때문에, 모든 영역에서 상당히 높은 정확도를 갖는다. 또한, PSIM 시뮬레이션으로 FHA 방법과 비교하여 시간 영역 분석 방법의 정확성을 검증하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 FHA 방법을 이용한 회로 분석

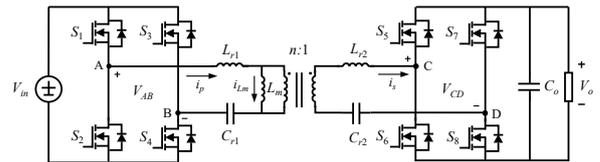


그림 1 CLLC 공진형 컨버터의 토폴로지  
Fig. 1 Topology of CLLC resonant converter

FHA 방법은 그림 1에 나와 있는 1차측 A, B 노드 사이의 전압을 의미하는  $V_{AB}$ 와 2차측 C, D 노드 사이의 전압을 의미하는  $V_{CD}$ 의 파형을 공진 주파수 성분만 고려하여 분석하는 방법이다. 이에 따라 공진 탱크의 등가회로에서 전압 분배 법칙을 이용하여 스위칭 주파수에 따른 전압 이득 ( $nV_o/V_{in}$ ) 곡선을 수식적으로 표현할 수 있게 되며, 이를 그래프로 나타내면 그림 2와 같다.

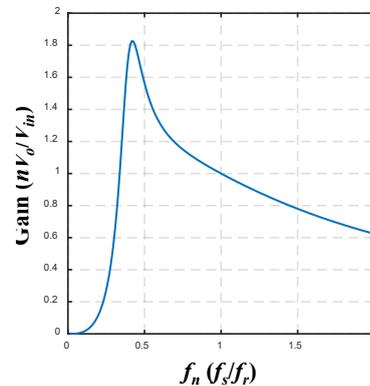


그림 2 FHA 방법을 이용한 전압 이득 곡선  
Fig. 2 Voltage gain curve using FHA method

#### 2.2 시간 영역 분석 방법을 이용한 회로 분석<sup>[2]</sup>

시간 영역 분석 방법은 시간 영역에서 미분방정식을 통해 공진 탱크의 등가회로를 해석하는 방법이다. 일반적으로 CLLC 공진형 컨버터는 공진 탱크의 출력 전압이 입력 전압과 동일한 부호로 고정되는 P stage, 반대 부호로 고정되는 N stage, 그리고 어떠한 전압으로도 고정되지 않는 O stage로 조합되어 동작한다.

본 논문에서는 분량상의 한계로 승압 구간을 의미하는 PO mode만 분석하였으며, 이를 구성하는 P stage와 O stage의 등가회로는 그림 3(a) 및 그림 3(b)에 나타내었다. 또한, 수식 표현

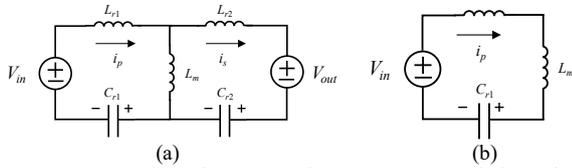


그림 3 승압 구간에서 CLLC 공진형 컨버터의 등가회로. (a) P stage. (b) O stage.

Fig.3 Equivalent circuits of CLLC resonant converter in step-up region (a) P stage (b) O stage

의 간단성을 위해 데드타임은 무시하였으며 변압기의 턴수비는 1, 그리고 공진 탱크의 파라미터들은 각각  $L_r$  및  $C_r$ 과 같다고 가정하였다. 먼저, P stage를 분석하고자 그림 3(a) 회로에 KVL을 적용하면 1차측 공진 커패시터 전압을 의미하는  $V_{cr1}$ , 그리고 2차측 공진 커패시터 전압을 의미하는  $V_{cr2}$ 에 대한 미분 방정식을 세울 수 있고 일반해를 구할 수 있게 되며, 이에 따라 1차측 전류를 의미하는  $i_p$  및 2차측 전류를 의미하는  $i_s$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} V_{cr1}(t) = P_1 \cos k_1 \omega_r t + P_2 \sin k_1 \omega_r t + P_3 \cos \omega_r t + P_4 \sin \omega_r t + V_{in} \\ V_{cr2}(t) = -P_1 \cos k_1 \omega_r t - P_2 \sin k_1 \omega_r t + P_3 \cos \omega_r t + P_4 \sin \omega_r t - V_{out} \\ i_p(t) = -C_r P_1 k_1 \omega_r \sin k_1 \omega_r t + C_r P_2 k_1 \omega_r \cos k_1 \omega_r t - C_r P_3 \omega_r \sin \omega_r t + C_r P_4 \omega_r \cos \omega_r t \\ i_s(t) = C_r P_1 k_1 \omega_r \sin k_1 \omega_r t - C_r P_2 k_1 \omega_r \cos k_1 \omega_r t - C_r P_3 \omega_r \sin \omega_r t + C_r P_4 \omega_r \cos \omega_r t \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $\omega_r$ 은 공진 각주파수를 의미하고,  $k_1 = \sqrt{1 + \frac{2L_m}{L_r}}$ ,  $V_{in}$ 과  $V_{out}$ 은 공진 탱크의 입력 및 출력 전압을 나타내며,  $P_1 \sim P_4$ 는 미지수를 의미한다.

다음으로 O stage를 분석하고자 그림 3(b) 회로에 KVL을 적용하면 앞선 식 (1)과 비슷한 형태로 미분 방정식을 나타낼 수 있게 된다. 이는 해당 방정식의 일반해를 수식적으로 구할 수 있어 O stage에서  $V_{cr1}$ 과  $i_p$ 는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} V_{cr1}(t) = O_1 \cos k_2 \omega_r (t - t_1) + O_2 \sin k_2 \omega_r (t - t_1) + V_{in} \\ i_p(t) = -C_r O_1 k_2 \omega_r \sin k_2 \omega_r (t - t_1) + C_r O_2 k_2 \omega_r \cos k_2 \omega_r (t - t_1) \end{cases} \quad (2)$$

여기서,  $t_1$ 은 O stage가 시작되는 시점을 의미하며,  $k_2 = \sqrt{1 + \frac{L_m}{L_r}}$ ,  $O_1$ 과  $O_2$ 는 미지수를 의미한다.

따라서, 승압 구간의 정확한 분석을 위해 총 7개의 미지수인  $t_1$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ ,  $O_1$ , 그리고  $O_2$ 의 값이 필요한 것을 알 수 있다. 해당 미지수들에 대한 값을 얻기 위해 동일한 개수의 방정식이 필요하며, 이는 CLLC 공진형 컨버터 전류 및 전압 파형의 특성인 대칭성과 연속성을 이용하여 세울 수 있다. 즉, 시간 영역 분석 방법은 해당 미지수들에 대한 값을 구할 수 있게 되어 모든 스위칭 주파수 영역에서 정확한 회로 분석이 가능한 것을 수식적으로 확인할 수 있다.

## 2.3 시뮬레이션

PSIM 시뮬레이션에서 시간 영역 분석 방법의 정확성을 검증하고자 CLLC 공진형 컨버터를 설계하였으며, 이에 대한 사양과 파라미터 값은 표 1과 같다.

표 1 CLLC 공진형 컨버터의 사양과 파라미터

Table 1 Specifications and parameters of CLLC resonant converter

| Specifications/Parameters  | Value [Unit] |
|----------------------------|--------------|
| Input voltage ( $V_{in}$ ) | 300 [V]      |
| Output voltage ( $V_o$ )   | 300-480 [V]  |

|   |               |
|---|---------------|
| Rated power ( $P_o$ )                       | 1.5 [kW]      |
| Turns ratio of transformer ( $n$ )          | 1             |
| Resonant inductors ( $L_{r1}$ , $L_{r2}$ )  | 25 [ $\mu$ H] |
| Resonant capacitors ( $C_{r1}$ , $C_{r2}$ ) | 100 [nF]      |
| Magnetizing inductor ( $L_m$ )              | 97 [ $\mu$ H] |
| Resonant frequency ( $f_r$ )                | 100 [kHz]     |

분석 방법 별 정확성을 비교하기 위해 정격 부하 환경에서 시뮬레이션, FHA 방법, 그리고 시간 영역 분석 방법의 스위칭 주파수에 따른 전압 이득 곡선을 그림 4에 나타내었다. 해당 그림에서 확인할 수 있듯이 FHA 방법은 시뮬레이션과 비교했을 때 스위칭 주파수가 공진 주파수에서 멀어질수록 전압 이득 오차가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

반면, 시간 영역 분석 방법은 시뮬레이션과 비교했을 때 모든 영역에서 1% 이내의 오차를 갖는 것이 확인되었다.

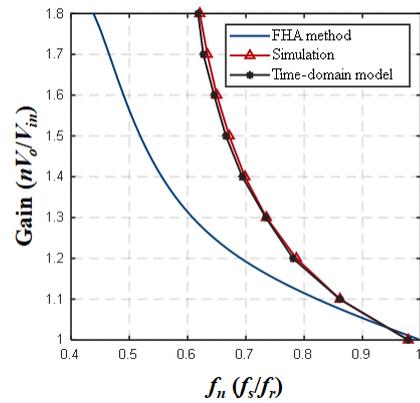


그림 4 각 분석 방법 별 전압 이득 곡선

Fig. 4 Voltage gain curve by different analysis methods

## 3. 결론

본 논문에서는 CLLC 공진형 컨버터의 분석 정확도를 향상시킬 수 있는 시간 영역 분석 방법에 대해 소개하였다. 해당 방법은 공진 주파수만 고려하여 해석하는 first harmonic approximation 방법과 다르게 모든 스위칭 주파수 영역에서 상당히 높은 정확도를 갖는 것을 수식적으로 확인했을 뿐 아니라, PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 즉, 시간 영역 분석 방법은 넓은 스위칭 주파수 영역에 걸쳐 정확한 분석이 요구되는 상황에 사용될 수 있다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2020R1A3B2079407).

## 참고 문헌

- [1] J. -H. Jung, H. -S. Kim, M. -H. Ryu and J. -W. Baek, "Design Methodology of Bidirectional CLLC Resonant Converter for High-Frequency Isolation of DC Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 1741-1755, April 2013.
- [2] Z. Lv, X. Yan, Y. Fang and L. Sun, "Mode analysis and optimum design of bidirectional CLLC resonant converter for high-frequency isolation of DC distribution systems," in *Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, 2015, pp. 1513-1520.