

# 스위칭 주파수의 대역확산기법을 적용한 전류원 LLC 공진형 컨버터

김민아, 박화평, 정지훈  
울산과학기술원

## Current-fed LLC Resonant Converter with Low Electromagnetic Interference Employing Spread Spectrum Technique

Mina Kim, Hwa-Pyeong Park, Jee-Hoon Jung  
Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

### ABSTRACT

스위칭 주파수의 대역 확산 기법(Spread Spectrum Technique; SST)은 전력 변환 장치에서 스위칭 시 발생하는 전자 방해 잡음(Electromagnetic Interference; EMI)을 추가 소자 없이 저감할 수 있는 기술이다. 하지만 공진형 컨버터의 경우 공진 네트워크의 전압 이득이 스위칭 주파수에 의해 결정되므로 SST를 적용하게 되면 출력 전압 리플이 크게 증가하게 된다. 본 논문에서는 전류원 LLC 공진형 컨버터에 SST를 적용하여 EMI를 줄이는 동시에 출력 전압 리플을 현저히 줄일 수 있는 공진 네트워크 디자인 방법을 제시하고자 한다. 제안하는 전류원 LLC 공진형 컨버터는 200 W의 시작품을 통해 성능을 검증하고자 한다.

### 1. 서론

스위칭 주파수의 대역 확산 기법 (Spread Spectrum Technique; SST)은 추가 소자 없이 EMI 발생을 줄일 수 있는 방법이다. 현재까지 SST가 적용되는 전력 변환 장치는 Buck, 연속 전류 모드 Flyback 컨버터 등 스위칭 주파수에 대하여 동작이 바뀌지 않는 토폴로지이다.<sup>[1]</sup> 제시된 토폴로지는 SST를 쉽게 적용할 수 있으나 전력 변환 장치의 용량을 증가시키기 어려운 단점이 있다.

공진형 컨버터는 스위칭 주파수에 따른 공진 네트워크의 입·출력 전압 이득을 통해 출력 전압을 제어하는 토폴로지로서 스위칭 주파수의 대역 확산 기법을 적용하기 어렵다. 그림 1은 전류원 LLC 공진형 컨버터의 회로 구성을 나타내고 그림 2는 전류원 LLC 공진형 컨버터의 이론적 동작 파형을 나타낸 것이다. 전류원 LLC 공진형 컨버터는 공진 네트워크의 유효 위상 값 ( $D_{eff}$ )을 조절하여 출력 전압을 제어할 수 있다. 기존의 LLC 공진형 컨버터보다 전압 이득 범위가 넓기 때문에 신재생 에너지와 같은 입력 전압 범위가 넓은 어플리케이션에 쓰인다.<sup>[2]</sup> 또한 전류원 LLC 공진형 컨버터는 유효 위상 값을 조절하여 출력 전압을 조절할 수 있기 때문에 SST를 적용할 수 있다.

본 논문에서는 전류원 LLC 공진형 컨버터에 SST를 적용하여 EMI를 저감하는 동시에 SST에 의해 발행하는 출력 전압 리플을 최소화할 수 있는 공진 네트워크 디자인 방법론을 제안한다. SST는 동작 주파수를 주기적으로 변경하기 때문에 공진 네트워크의 입·출력 전압 이득이 동작 주파수에 대해 둔감하게 설계하는 것이 중요하다. 이는 출력 전압 리플을 줄일 뿐만 아

니라 출력 전압 능력을 향상시킬 수 있다. 제안하는 전류원 LLC 공진형 컨버터는 200 W급 시작품을 통해 EMI 저감 성능 및 출력 전압 리플을 평가하고자 한다.

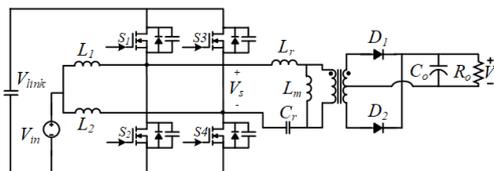


그림 1 전류원 LLC 공진형 컨버터의 회로 구성  
Fig. 1 Circuit diagram of current-fed LLC resonant converter

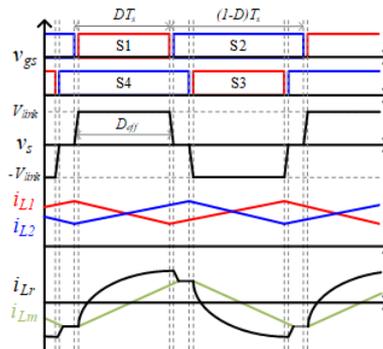


그림 3 전류원 LLC 공진형 컨버터의 이론적 동작 파형  
Fig. 2 Theoretical waveforms of current-fed LLC resonant converter

### 2. 공진 네트워크 설계

전류원 LLC 공진형 컨버터의 공진 네트워크는 동작 주파수에 대한 입·출력 전압 이득과 공진 네트워크의 유효 위상 값에 대한 입·출력 전압 이득을 가진다. 그림 3과 4는 인덕터 비율 ( $L_n = L_m/L_r$ )에 따른 동작 주파수와 유효 위상 값에 따른 입·출력 전압 이득을 나타낸다. 동작 주파수에 따른 전압 이득은 인덕터 비율이 높을수록 기준 동작 주파수 주변에서 평활한 그래프를 얻을 수 있다. 따라서 인덕터 비율이 높아지게 되면 기준 동작 주파수 주변에서 주파수를 변동시키는 SST를 수행하였을 시 출력 전압 리플이 상당히 줄어들게 된다. 그에 반해 유효 위상 값에 따른 전압 이득은 인덕터 비율의 영향을 거의 받지 않는 양상을 가진다. 따라서 SST를 수행하기 위하여 인덕터 비율을 증가하였음에도 유효 위상 값을 통한 제어 성능은 낮아지지 않게 된다.

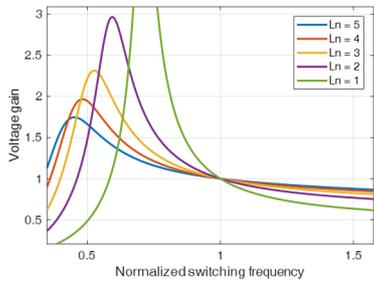


그림 3 LLC 공진 네트워크의 동작 주파수에 따른 입·출력 전압 이득  
Fig. 3 Input-to-output voltage gain curves of LLC resonant network according to operating frequency

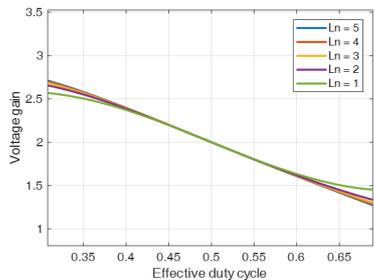


그림 4 LLC 공진 네트워크의 유효 위상 값에 따른 입·출력 전압 이득  
Fig. 4 Input-to-output voltage gain curves of LLC resonant network according to effective duty ratio

### 3. 실험 결과

표 1은 SST 수행 정보와 제안하는 공진 네트워크 설계를 이용한 전류원 LLC 공진형 컨버터 시작품의 설계 결과를 나타낸다. 이 때  $\Delta f$ 는 동작 주파수의 변동량을 나타내고,  $f_c$ 는 기준 동작 주파수를 나타낸다. 표 1에 따르면 동작 주파수는 기준 동작 주파수를 기준으로 20% 변동하게 된다. 그림 5는 SST를 수행하지 않는 전류원 LLC 공진형 컨버터의 정상상태 실험 결과를 나타낸다. 출력 전압의 리플은 1.26 V이며 동작 주파수가 변동하지 않기 때문에 전압 리플이 매우 낮은 것을 알 수 있다.

그림 6은 SST를 수행하는 전류원 LLC 공진형 컨버터의 정상상태 실험 결과이다. 동작 주파수의 변동에 따라 출력 전압이 흔들리며 이 때 출력 전압 리플은 2.06 V이다. 그림 7은 SST의 수행 여부에 따른 공통 모드와 차동 모드 노이즈 측정 결과이다. 공통 모드는 SST를 적용하였을 때 최댓값이 10 dBuV 감소하였고 차동 모드는 SST를 적용하였을 때 최댓값이 22.5 dBuV 감소하였다. 따라서 SST를 수행하였을 때 출력 전압 리플이 약 0.8 V 상승하지만 EMI 최댓값 감소 성능은 10 dBuV와 22.5 dBuV를 얻을 수 있다.

표 1 전류원 LLC 공진형 컨버터의 시작품 설계치  
Table 1 Design parameters of current-fed LLC resonant converter prototype

Modulating frequency	133 Hz	$P_{out}$	200 W
$\Delta f$	13 kHz	$L_m$	44.44 $\mu$ H
$f_c$	65 kHz	$L_k$	4.09 $\mu$ H
$V_{in}, V_{out}$	25 V, 200 V	$C_r$	1.36 $\mu$ F

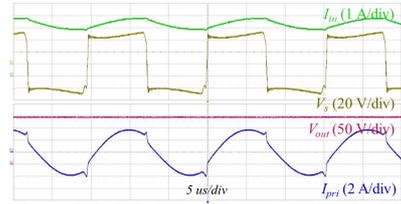


그림 5 전류원 LLC 공진형 컨버터의 정상상태 실험 파형  
Fig. 5 Experimental waveforms of current-fed LLC resonant converter

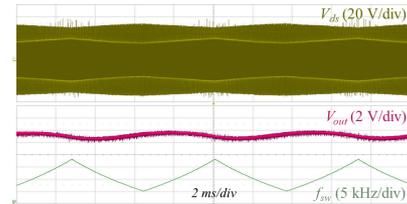


그림 6 SST를 수행하는 전류원 LLC 공진형 컨버터의 정상상태 실험 파형  
Fig. 6 Experimental waveforms of current-fed LLC resonant converter with SST in steady-state operation

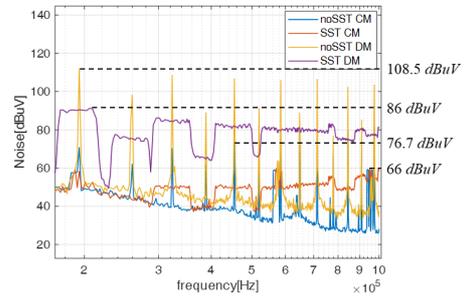


그림 7 전류원 LLC 공진형 컨버터의 EMI 측정결과  
Fig. 7 EMI measurements of current-fed LLC resonant converter

### 4. 결론

본 논문에서는 전류원 LLC 공진형 컨버터를 사용하여 SST 기능을 구현하였다. 제안하는 전류원 LLC 공진형 컨버터는 SST를 수행하였을 때 EMI 발생을 줄이면서도 출력 전압 리플을 감소시킬 수 있다. 출력 전압 리플과 EMI 감소 성능은 200 W급 전류원 LLC 공진형 컨버터를 통해 검증하였다.

이 논문은 2016년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구사업임 (NRF2016R1A2B4011934)

### 참고 문헌

- [1] D. A. Stone and B. Chambers, "Effect of spread-spectrum modulation of switched mode power converter PWM carrier frequencies on conducted EMI," in *Electronics Letters*, vol. 31, no. 10, pp. 769-770, 11 May 1995.
- [2] X. Sun, Y. Shen, Y. Zhu and X. Guo, "Interleaved Boost-Integrated LLC Resonant Converter With Fixed-Frequency PWM Control for Renewable Energy Generation Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 8, pp. 4312- 4326, Aug. 2015.