

# 대역폭 확산 변조 하에서 엄격한 출력 전압 달성을 위해 부분 전력 제어 개념을 이용한 LLC 공진형 컨버터

허경욱, 정지훈  
전기전자공학과, 울산과학기술원

## LLC Resonant Converter Employing Partial Power Processing Concept for Tight Output Voltage Regulation under Spread Spectrum Modulation

Kyung-Wook Heo and Jee-Hoon Jung

Electrical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

### ABSTRACT

본 논문은 대역폭 확산 변조 기법 하에서 엄격한 출력 전압 달성을 위해 부분 전력 제어 개념을 이용한 LLC 공진형 컨버터를 제안한다. LLC 공진형 컨버터는 DC 변압기로 동작하여 출력 전압 제어 없이 SSM을 수행하며 대부분의 전력을 전달한다. 반면, 부분 전력 컨버터인 벽 컨버터는 대역폭 확산 변조로 인한 출력 전압 변동을 보상하기 위해 부분 전력만을 사용하여 출력 전압을 보상한다. 부분 전력만으로 출력 전압 변동을 보상함으로써 높은 전력 변환 효율, 전자기 노이즈 저감 및 우수한 출력 제어 성능을 동시에 달성할 수 있다. 또한, 출력 전압 제어를 위해 사용된 벽 컨버터는 작은 정격의 소자들로 구성되어 높은 비용 효율성을 가진다. 제안하는 방법은 500-W 급 프로토타입 컨버터를 통해 검증된다.

### 1. 서론

LLC 공진 컨버터는 소프트 스위칭을 기반으로 수십 kHz부터 수 MHz의 스위칭 주파수로 동작할 수 있어 우수한 전력 밀도로 널리 사용되어 왔다. 그러나 빠른 스위칭 동작은 전자기 노이즈를 발생시켜 다양한 전기 및 전자 회로의 오동작을 유발할 수 있다. 따라서 시장 출시 제품에 대해 규정에 따라 전자기 노이즈 제한하고 있다. 규정을 준수하기 위해 PCB 레이아웃, 접지, 차폐 및 EMI 필터와 같은 전자기 노이즈 감소 방법이 주로 사용되어 왔다. 그러나 이러한 방법들은 전력변환장치의 전력 밀도를 낮추고 비용을 증가시키는 문제가 있다.

대안으로 대역폭 확산 변조 (Spread Spectrum Modulation, SSM)가 활용될 수 있다. SSM은 변조 패턴에 따라 스위칭 주파수를 변동시킴으로써 전자기 노이즈를 줄일 수 있으며 식 (1)과 같이 변조된 스위칭 신호로 표현될 수 있다.<sup>[1]</sup>

$$s(t) = A_o \cos \left[ 2\pi f_c t + 2\pi \Delta f \int_{-\infty}^t \xi(\tau) d\tau \right] \quad (1)$$

$A_o$ 는 진폭,  $\xi(\tau)$  ( $-1 \leq \xi(\tau) \leq 1$ )는 변조된 주파수 패턴을 나타내며,  $f_c$ 는 중심 주파수,  $\Delta f$ 는 주파수 변동폭을 의미한다. 스위칭 주파수가  $[f_c - \Delta f, f_c + \Delta f]$  범위 내에서 변할 때, 좁은 대역의 피크 전자기 노이즈 신호가 인접 주파수 대역으로 분산되어 그림 1과 같이 전자기 노이즈를 저감할 수 있다.

그러나 LLC 공진형 컨버터의 전압이득은 스위칭 주파수에 관한 함수로 표현되므로, 스위칭 주파수 변동은 큰 출력 전압 변동을 초래한다. 이를 해결하기 위해 주파수 제어와 위상 제

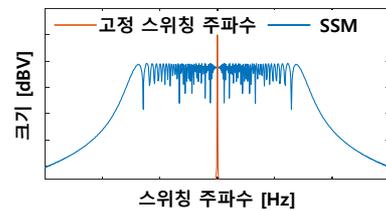


그림 1 SSM에 따른 노이즈 저감  
Fig. 1 Electromagnetic noise reduction according to the SSM.

어를 결합한 하이브리드 제어 알고리즘<sup>[2]</sup>, 2개의 LLC 공진형 컨버터를 입력 병렬 출력 직렬로 구성하여 180도의 위상차를 갖도록 대역폭 확산 변조를 수행하는 방법<sup>[3]</sup>이 제안되었다. 그러나 이들 방법은 풀 브릿지 구조와 다수의 컨버터가 요구되어 전력밀도가 낮고, 주파수 제어를 사용하므로 경부하에서 낮은 효율을 갖는다.

본 논문에서는 SSM 하에서 엄격한 출력 전압 달성을 위해 부분 전력 제어 개념을 이용한 LLC 공진형 컨버터를 제안한다. LLC 컨버터는 SSM을 수행하며 항상 공진점에서 동작하고, 부분 전력 제어 컨버터를 통해 출력전압이 제어된다. 따라서 높은 전력 변환 효율과 전자기 노이즈 감소를 달성할 수 있다. 또한, 부분 전력 제어 컨버터는 낮은 정격을 갖는 소자로 구성되어 기존 방법에 비해 높은 비용 효율성을 갖는다. 제안하는 방법은 500-W 급 프로토타입 컨버터를 통해 검증된다.

### 2. 부분 전력 제어 개념을 활용한 SSM

#### 2.1 부분 전력 제어 LLC 공진형 컨버터

그림 2는 부분 전력 제어 LLC 공진형 컨버터의 구성도를 보여준다. LLC 공진형 컨버터는 대부분의 전력을 공급하고, 출력 전압 제어 없이 전자기 노이즈를 완화하기 위해 고정된 50% 듀티 비로 SSM을 수행하는 직류 변압기로 작동한다. 여기서  $L_r$ 은 변압기의 누설 인덕터로 구현된 공진 인덕터이며,  $L_m$ 은 자화 인덕터이고,  $C_r$ 은 공진 커패시터이다.  $n_1, m_1, m_2$ 는 변압기의 1차, 2차, 3차 측 턴 수를 의미한다. 3차 측 턴 수는 1턴으로 가정된다. 벽 컨버터는 출력 전압 제어를 위해 변압기의 3차측에 연결되며 출력단이 LLC 공진형 컨버터의 출력단과 직렬로 연결된다. LLC 공진형 컨버터와 달리 벽 컨버터는 부분 전력을 제어한다.

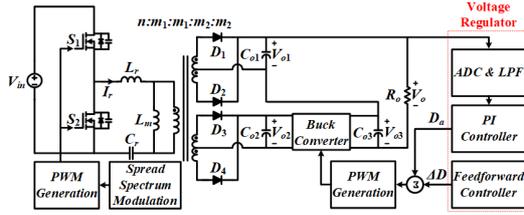


그림 2 부분 전력 제어 LLC 공진형 컨버터  
Fig. 2 Partial power processing LLC resonant converter.

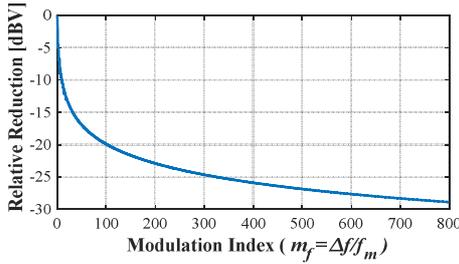


그림 3 변조 지수에 따른 상대 전자기 노이즈 저감 성능  
Fig. 3 Relative reduction performance according to modulation index.

## 2.2 SSM

전자기 노이즈를 줄이기 위해 LLC 공진형 컨버터는 SSM을 수행한다. SSM에 의한 전자기 잡음 감소 성능은  $\Delta f f_m$ 으로 표현되는  $m_f$ 의 변조 지수에 의해 결정된다. 본 논문에서는 삼각형 변조 패턴을 갖는 SSM을 수행하는 것으로 가정한다. 그림 3은 변조 지수  $m_f$ 에 따른 상대적 전자기 노이즈 감소 성능을 보이며  $m_f$ 가 클수록 전자기 노이즈를 효과적으로 저감할 수 있다. 대역폭 확산 변조를 적용하여 -26 dBV의 저감 성능을 달성하기 위하여  $\Delta f$ 는 40 kHz,  $f_m$ 은 100 Hz로 선정하였다.

### 2.2 공진형 컨버터에서의 출력 전압 변동

1차 고조파 근사에 의해 LLC 공진형 컨버터의 전압 이득은 주파수에 관한 식으로 다음과 같이 표현된다.

$$G(f_s) = \left| \frac{L_n(f_s/f_{r1})^2}{(L_n+1)(f_s/f_{r1})^2 - 1 + j((f_s/f_{r1})^2 - 1)(f_s/f_{r1})QL_n} \right| \quad (2)$$

여기서  $f_s$  ( $=1/T_s$ )는 스위칭 주파수,  $f_{r1}$ 은 직렬 공진 주파수,  $L_n$ 은 공진 인덕턴스에 대한 자화 인덕턴스 비율이며,  $Q$ 는 품질계수이다. 전압이득이 스위칭 주파수에 관한 함수이므로 SSM은 큰 출력 전압 변동을 유발한다. SSM에 따른  $V_{o1}$ 과  $V_{o2}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta V_{o1} = \frac{m_1}{2n} V_{in} [G(f_c - \Delta f) - G(f_c + \Delta f)] \quad (3)$$

$$\Delta V_{o2} = \frac{1}{2n} V_{in} [G(f_c - \Delta f) - G(f_c + \Delta f)] \quad (4)$$

### 2.3 부분 전력 제어 개념을 활용한 SSM

SSM으로 인한 출력 전압 변동은 부분 전력 컨버터인 벡 컨버터의 듀티비 제어를 통해 보상이 가능하다.  $V_{o3}$ 과  $V_{o1}$ 이 180도 위상차를 갖는 동일한 진폭을 가질 때 부분 전력 제어 LLC 공진형 컨버터의 출력 전압은 그림 4와 같이 엄격하게 제어될 수 있다.  $V_{o3}$ 의 전압 변동과  $V_{o1}$ 을 보상하는 데 필요한 듀티비의 변화는 다음과 같이 도출된다.

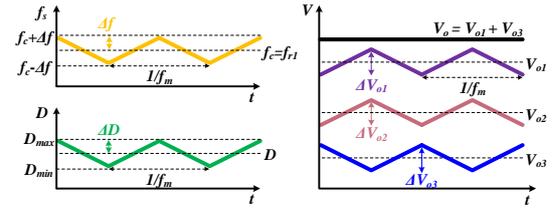


그림 4 SSM에 따른 출력 전압 변동  
Fig. 4 Output voltage fluctuations according to the SSM.

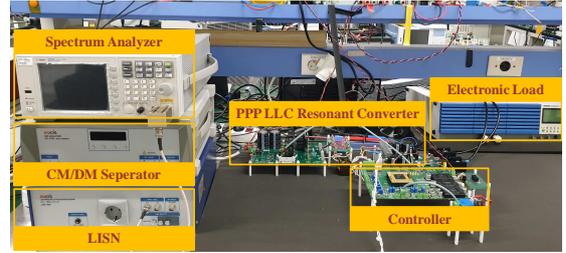


그림 5 500-W 프로토타입 컨버터 및 전자기 노이즈 측정 환경  
Fig. 5 500-W prototype converter and electromagnetic noise measurement environment.

$$\Delta V_{o3} = \frac{V_{in}}{2n} [G(f_c + \Delta f)D_{max} - G(f_c - \Delta f)D_{min}] \quad (5)$$

$$\Delta D = \frac{2[G(f_c - \Delta f) - G(f_c + \Delta f)](m_1 + D_a)}{G(f_c - \Delta f) + G(f_c + \Delta f)} \quad (6)$$

여기서  $D_a$ 는 듀티비의 평균값,  $D_{max}$ 와  $D_{min}$ 은 각각  $D_a + \Delta D$ 와  $D_a - \Delta D$ 이다. 이를 달성하기 위하여 그림 2와 같이 정상상태 오차와 출력전압 변동을 각각 보상할 수 있는 PI 제어기와 피드포워드 제어기가 구성된다.  $\Delta D$ 는 고정된 값이며 그림 4와 같이  $1/f_m$ 의 주기로 변화하여 SSM과 동기화된다. 따라서 벡 컨버터의 듀티비는  $[D_a - \Delta D, D_a + \Delta D]$  범위 내에서 스위칭한다. 결과적으로  $\Delta V_{o3}$ 이  $\Delta V_{o1}$ 과 같은 크기로 제어됨으로써 SSM에 의한 변동을 부분 전력 컨버터에 의해 보상될 수 있다.

## 3. 실험 결과

그림 5는 디지털 제어기(TMS320F28379D, TI), 스펙트럼 분석기(9320B, Keysight), LISN(LN-16N, EMCIS), CM/DM 노이즈 분리기(EA-2100, EMCIS)를 포함하는 500W 프로토타입 컨버터의 실험 환경을 보여준다. 또한, 프로토타입 컨버터의 효율을 측정하기 위해 전력분석기(WT5000, YOKOGAWA)를 사용하였다. 표 1은 프로토타입 컨버터의 설계 사양을 보여준다.

그림 6은 부분 전력 제어 LLC 공진형 컨버터의 정상상태를 보여준다. SSM을 수행하지 않는 경우  $0.74 V_{pp}$ 로 엄격하게 출력 전압이 제어된다. 그러나 SSM을 수행하는 경우 LLC 공진형 컨버터의 스위칭 주파수에 의존적인 전압 이득 특성으로 인해  $4.36 V_{pp}$ 로 크게 출력 전압이 변동한다. 이를 보상하기 위하여 부분 전력 제어 LLC 컨버터는 피드포워드 제어기를 통해 LLC 공진형 컨버터의 출력전압과 180도의 위상차를 갖도록 제어함으로써  $1.02 V_{pp}$ 의 엄격한 출력 전압을 달성한다.

그림 7은 측정된 전도성 노이즈를 보여준다. SSM을 수행함으로써 공통 및 차동 모드 노이즈를 약 25 dB 저감한다. 또한, 부분 전력 제어를 수행함에 따른 측정된 전자기 노이즈의 차이

표 1 제안하는 컨버터 설계 사양

Table 1 Specifications of the proposed converter

Parameter	Value
$P_o$	출력 전력 500-W
$V_{in}$	입력 전압 400 V
$V_o$	출력 전압 48 V
$L_r$	공진 인덕턴스 6.1 $\mu$ H
$L_m$	자화 인덕턴스 112 $\mu$ H
$\Delta f$	주파수 변동폭 40 kHz
$f_m$	주파수 변동 주기 50 kHz
$f_{r1}, f_c$	공진 주파수, 중심 주파수 300 kHz
$n : m_1 : m_2$	턴 비 13:3:1

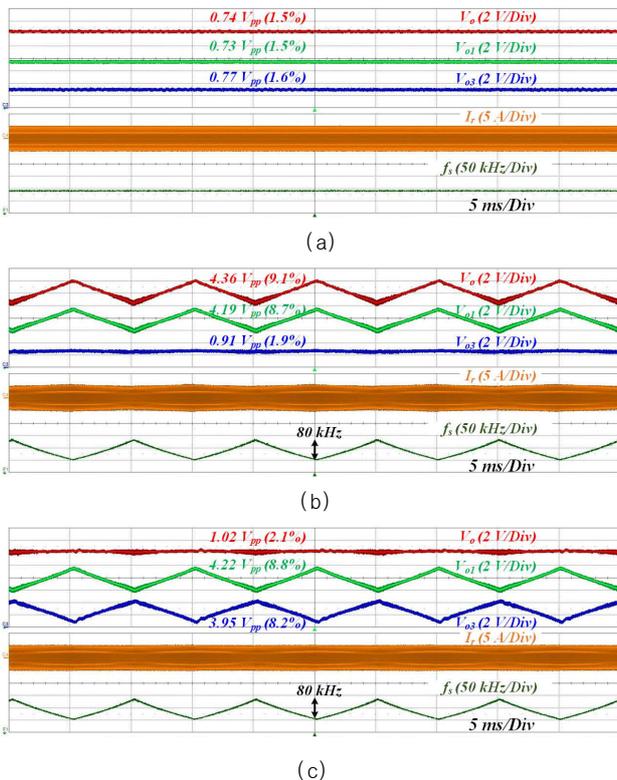


그림 6 부분 전력 제어 LLC 공진형 컨버터의 정상상태 파형: (a) SSM을 수행하지 않는 경우, (b) SSM 수행 하 부분 전력 제어를 하지 않는 경우, (c) SSM 수행 하 부분 전력 제어를 수행 하는 경우  
Fig. 6 Experimental waveforms of the partial power processing LLC resonant converter in the steady state at 500 W: (a) No SSM, (b) SSM without partial power processing, (c) SSM without partial power processing.

는 없다.

제안하는 컨버터는 최대 95.6%의 효율을 가지며, 그림 8과 같이 SSM에 따른 효율 변화는 없다. 부분 전력 컨버터가 없는 경우에 비해 약 0.4%의 효율을 희생하여 SSM에 의한 전압 변동 보상과 EM 노이즈 저감을 모두 달성한다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 SSM 하에서 LLC 공진형 컨버터의 엄격한 출력 전압 달성을 위하여 부분 전력 제어 개념을 이용한 LLC

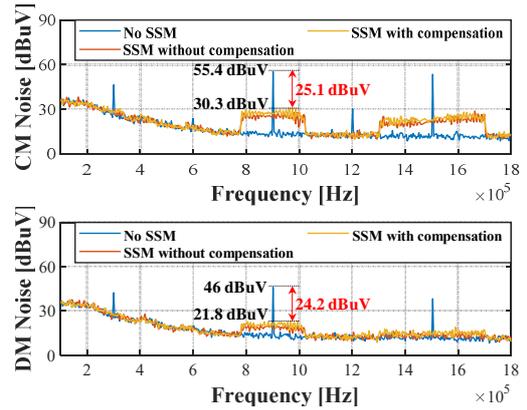


그림 7 측정된 전도성 전자기 노이즈

Fig. 7 Measured conducted electromagnetic noises.

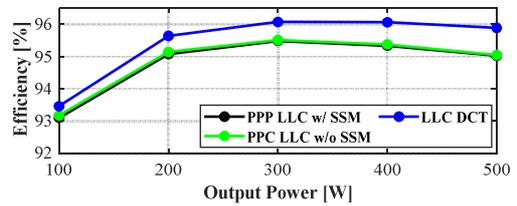


그림 8 측정된 전력 변환 효율

Fig. 8 Measured power conversion efficiency curves.

공진형 컨버터를 제안하였다. 이를 검증하기 위하여 500-W급 프로토타입 컨버터를 통해 실험성을 검증하였다. SSM을 수행함에도 불구하고  $1.02 V_{pp}$ 의 엄격한 출력 전압 제어를 달성하였으며 25 dB의 EM 노이즈를 저감하였다. 또한, 95.6 %의 높은 전력 변환 효율로 전자기 노이즈 저감 및 우수한 출력 전압 제어 성능을 모두 달성하였다.

이 논문은 2023년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00219443)

#### 참고 문헌

- [1] F. Pareschi, G. Setti, R. Rovatti and G. Frattini, "Practical Optimization of EMI Reduction in Spread Spectrum Clock Generators With Application to Switching DC/DC Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 9, pp. 4646-4657, Sept. 2014.
- [2] H. -P. Park, M. Kim and J. -H. Jung, "Spread Spectrum Technique to Reduce EMI Emission for an LLC Resonant Converter Using a Hybrid Modulation Method," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 5, pp. 3717-3721, May 2018.
- [3] H. -P. Park, M. Kim and J. -H. Jung, "Spread-Spectrum Technique Employing Phase-Shift Modulation to Reduce EM Noise for Parallel-Series LLC Resonant Converter," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 2, pp. 1026-1031, Feb. 2019.