

# 단상 Boost PFC에서 대역폭 확산 변조 기법의 적용에 따른 EMI 저감 성능과 부작용에 관한 연구

송영준, 허경욱, 정지훈  
전기전자공학과, 울산과학기술원

## Study on EMI Mitigation Performance and Side-Effects of Spread Spectrum Modulation Applied to a Single-Phase Boost PFC

YoungJoon Song, Kyung-Wook Heo and Jee-Hoon Jung  
Electrical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

### ABSTRACT

부스트 PFC는 입력 전류의 역률 개선 및 DC-Link에 승압된 전압을 공급하기 위해 널리 사용된다. 이러한 부스트 PFC는 다른 전력변환장치와 마찬가지로 고속 스위칭으로 인해 EMI가 발생하며 관련 규제 대응이 필요하다. 기존에는 인덕터, 커패시터와 같은 수동소자로 구성된 EMI 필터가 여러 단 사용되었다. 이러한 수동 필터는 뛰어난 EMI 저감 성능을 보이나, 전력 변환장치의 전력밀도를 훼손하고 도통 손실을 통해 효율을 저하시킨다. 이에 대한 대안으로 스위칭 주파수 변동을 이용한 대역폭 확산 변조 기법(Spread Spectrum Modulation; SSM)이 연구되었다. SSM은 지정된 대역폭으로 EMI를 분산하여 EMI 필터의 의존성을 낮출 수 있다. 그러나, 부스트 PFC에 SSM을 적용하면 전 고조파 왜곡 증가(Total Harmonic Distortion; THD)와 같은 부효과가 관측된다. 본 논문에서는 다양한 SSM을 부스트 PFC에 적용하며 부효과를 확인하고자 한다. 1-kW급 Prototype Boost PFC 컨버터를 통해 실험적으로 실효성을 검증한다.

### 1. 서론

AC-DC 컨버터 중 하나인 부스트 PFC는 IEC61000-3-2와 같은 EMC 규제를 만족하기 위해 많이 사용되고 있다. 특히, Boost PFC의 CCM 모드는 다른 동작 모드와 비교하여 낮은 도통 손실로 인해 고전력 어플리케이션에 선호된다.

부스트 PFC는 여타 다른 전력변환장치와 마찬가지로 EMI가 발생된다. 인덕터 전류의 리플성분이 DM 노이즈를 유발하며, 기생 커패시터들이 CM 노이즈를 유발하는 것으로 알려져 있다. 기존에는 그림 2와 같이 X 커패시터와 공통 모드 초크를 사용하여 각각 DM, CM 노이즈를 저감하였다. 다만, EMI 규제를 만족하기 위해서는 이러한 수동소자 필터 여러 단을 사용해야 하여 비용 증가 및 전력밀도 감소로 이어진다.

위와 같은 수동소자 필터의 의존성을 줄이며 EMI 규제를 만족하기 위하여 대역폭 확산 변조기법(Spread Spectrum Modulation, SSM)을 컨버터에 적용하는 연구가 진행되었다<sup>[1]</sup>. SSM은 기존에 고정주파수로 동작하는 것을 변조 패턴을 지닌 채로 스위칭 주파수를 변동을 함에 따라, EM 노이즈를 분산시켜 침투값을 저감시킨다.

SSM은 스위칭 주파수 변동만을 이용해 노이즈 저감이 가능하다는 장점을 지니나, 스위칭 주파수 변동으로 인해 컨버터의

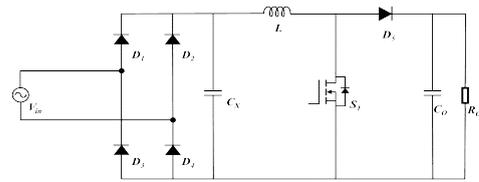


그림 1 단상 부스트 PFC  
Fig. 1 Single-Phase Boost PFC

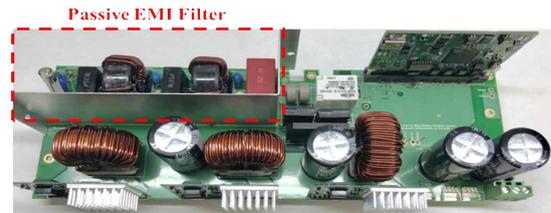


그림 2 토템폴 부스트 PFC에 사용된 EMI 필터 [2]  
Fig. 2 Passive EMI Filter used in Totem-Pole Bridgeless Boost PFC

부효과를 야기한다. 기존에 전압이득과 스위칭 주파수가 밀접한 관계를 지닌 공진형 컨버터에서 SSM 최적 설계 연구가 진행되었지만<sup>[3]</sup>, CCM 부스트 PFC에서는 부효과를 고려한 SSM 연구가 별로 진행되지 않았다. 이에 따라, 본 논문에서는 SSM을 CCM 부스트 PFC에 적용하여 SSM 파라미터(변조 패턴,  $f_m$ ,  $\Delta f$ )에 따른 부효과를 확인하고자 한다. SSM은 1-kW급 시작품을 통해 출력 전압 리플, THD를 평가하고자 한다.

### 2. SSM 및 부효과

#### 2.1 대역폭 확산 변조기법 (SSM)

그림 3에서는 SSM과 관련된 파형을 보여주고 있다.  $f_c$ 는 중앙주파수,  $\Delta f$ 는 스위칭 주파수의 변동 폭을 의미하며,  $f_m$ 은 변조 패턴의 변동 주파수를 의미한다. SSM은 변조 패턴에 따라 Periodic SSM 및 Random SSM으로 구분할 수 있다.

Periodic SSM은 스위칭 주파수( $f_s$ )가 주기적으로 변하는 변조 기법을 의미한다. 삼각형 모양으로 변조되는 Triangular SSM은 적은 계산량, 쉬운 구현 기법 및 Periodic SSM 중 EM 노이즈 저감 성능이 좋아 실제 컨버터에 적용되고 있다<sup>[1]</sup>. 무엇보다도, 성능지표로 인한 EM 노이즈 저감 값을 예측할 수 있으므로 컨버터 부효과와의 Trade-off를 통한 최적화 시 사용될 수 있다.

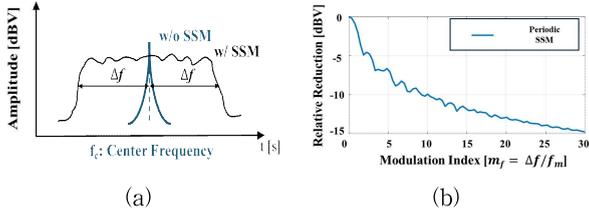


그림 3 SSM 특성: (a) SSM 적용 유무에 따른 EM 노이즈 파형, (b) 성능 지표에 따른 EMI 저감성능  
Fig. 3 Characteristics of the SSM: (a) EM noise with & without the SSM, (b) EMI Reduction Level vs Modulation Index

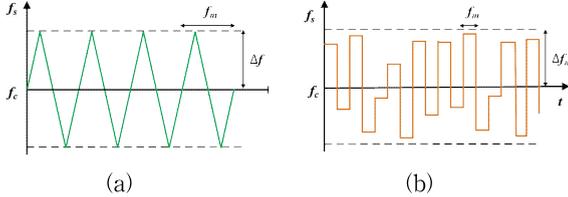


그림 4 변조 패턴에 따른 스위칭 주파수 파형: (a) 주기성 SSM (b) 무작위성 SSM  
Fig. 4 Waveforms of switching frequency conducted by SSMs: (a) Triangular SSM, (b) Random SSM

Random SSM은 스위칭 주파수가 랜덤하게 변하는 변조기법을 의미한다. Random SSM으로 분류되는 Pseudo Random Modulation(PSM)은  $f_m$ 이 일정하며  $\Delta f$ 가 랜덤하게 변동되는 기법으로, Periodic SSM보다 더욱 고르게 신호를 분산시킬 수 있다. [4]에서는 PSM을 IH 컨버터에 적용하여 Periodic SSM보다 EM 노이즈 저감 성능이 더욱 큼을 실험 및 시뮬레이션을 통해 보였다. 다만, PSM은 급격한 주파수 변동으로 인해, 컨버터에 해를 입힐 수 있으며 EM 노이즈 저감성능 오차가 큰 편이며 랜덤하게 움직이는 주파수 특성으로 인해 성능지표로 EM 노이즈 저감성능을 예측하기 어렵다는 단점이 있다.

## 2.2 SSM으로 인한 부효과

기존 연구들에 의하면, SSM을 AC/DC 컨버터에 적용 시, THD가 증가하는 것이 보고되었다. 부스트 PFC가 CCM으로 동작시 일부 구간에서는 DCM으로 동작이 되어 다음과 같은 수식으로 평균 입력전류를 표현할 수 있다.

$$\langle i_{in} \rangle = \frac{D^2 V_{in} V_o}{2L(V_o - V_{in})f_s} \quad (1)$$

여기서  $V_{in}$ 은 입력전압,  $V_o$ 는 출력전압,  $L$ 은 부스트 인덕턴스,  $f_s$ 는 스위칭 주파수를 의미한다. 해당 수식에 따르면, 입력전류는 스위칭 주파수에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있다. SSM을 적용 시 스위칭 주파수  $f_s$ 는 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$f_s = f_c + m(t)\Delta f \quad (2)$$

$f_c$ 는 중앙 주파수를 의미하며,  $m(t)$ 는 변조패턴,  $\Delta f$ 는 스위칭 주파수 리플을 의미한다. 이에 따라, boost PFC의 입력 전류는 변조패턴, 변조패턴의 주기인  $f_m$ ,  $\Delta f$ 에 따라 전부 영향을 받는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 여러 SSM 파라미터를 변경하면서 부스트 PFC에 적용하여 실험적으로 SSM과 컨버터의 상관관계를 확인하고자 한다.

표 1 프로토타입 컨버터 사양

Table 1 Specifications of the prototype converter

Parameter	Value
$P_o$	출력 전력 1 kW
$V_{in}$	입력 전압 220 Vac
$V_o$	출력 전압 380 V
$\Delta f$	주파수 변동폭 1 kHz, 1.5 kHz, 2 kHz
$f_m$	주파수 변동 주기 100 Hz, 500 Hz, 1 kHz

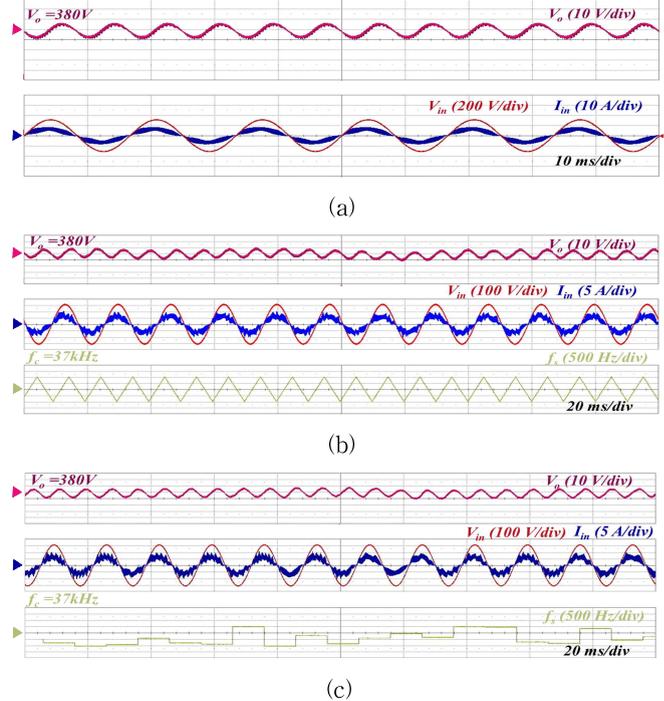


그림 5 정격부하에서의 부스트 PFC 입출력 전압, 입력 전류 및 스위칭 주파수 실험 파형: (a) SSM 적용 전, (b) 주기성 SSM, (c) 무작위성 SSM

Fig. 5 Experimental waveforms of input voltage, current, output voltage, and switching frequency at full load condition according to SSMs: (a) Without SSM, (b) Triangular SSM, (c) Random SSM

## 3. 실험 결과

부스트 PFC에 SSM을 적용 시 부효과를 측정하기 위해 디지털 제어기(TI - TMS320F28379D), 전력 분석기(Yokogawa - WT5000), AC 파워 서플라이(Kikusui - PCR\_6000LA), 전자 부하(Yokogawa - PLZ1004WH)를 포함하는 1 kW 프로토타입 부스트 PFC 시험 환경을 구성하였다. THD는 측정 시 입력전류의 40차 고조파까지 관측하였다. 표 1은 프로토타입 컨버터의 설계 사양을 보여준다.

SSM 변조패턴 및  $\Delta f$ ,  $f_m$ 에 따른 비교를 진행하기 위하여,  $\Delta f$ 는 1 kHz, 2 kHz,  $f_m$ 은 100 Hz, 1 kHz로 설정하여 비교를 진행하였다. 그림 5 (a)는 단상 Boost PFC의 정상상태 동작을 보여주고 있다. SSM 적용전에는 입력 전류 THD 8%, 출력 전압 리플 16 V를 보였다. 그림 5 (b), (c)에는 각각 Periodic SSM, Random SSM을  $\Delta f$  1 kHz,  $f_m$  100 Hz로 적용한 파형이다. 스위칭 주파수가 변조됨에 따라, 입력 전류의 파형의 일그러짐이 관측되었다. Periodic SSM, 랜덤 SSM은 THD가 각

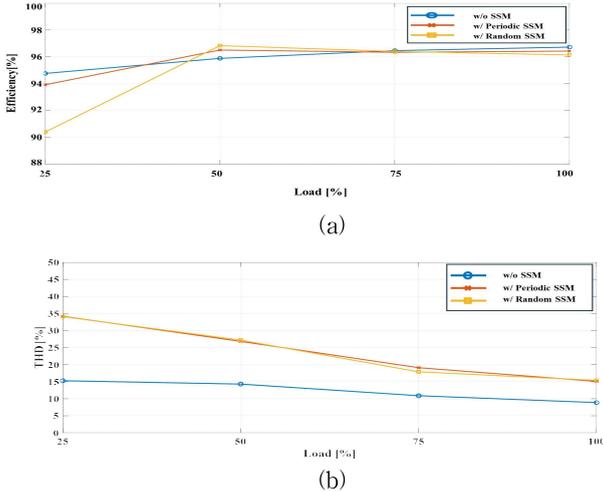


그림 6 부하별 부스트 PFC 효율 및 THD 비교: (a)SSM 적용 유무 및 변조패턴에 따른 효율 비교, (b) SSM 적용 유무 및 변조패턴에 따른 THD 비교

Fig. 6 Comparison of Efficiency and THD in Boost PFC under Various Loads: (a) Efficiency Comparison based on Modulation Method, (b) THD Comparison based on Modulation Method

15.1%, 15.4% 로 적용 전과 비교하여 증가하였으며, 출력 전압 리플은 21 V, 19.8 V로 비슷한 양상을 보였다.

그림 6.(a)는 SSM 적용 전,  $\Delta f$  1 kHz,  $f_m$  100 Hz의 파라미터를 가진 Periodic SSM, Random SSM의 부하에 따른 효율을 나타내고 있다. 정격부하 기준 SSM을 수행하지 않는 경우 96.72%로 가장 높은 효율을 보였으며, SSM 유무에 따른 효율 차이는 최대 0.5%로 관측되었다. Periodic SSM은 SSM 적용 전과 비교하여 효율이 크게 차이나지 않았으며, Random SSM은 경부하에서 변동이 크게 나타났다.

그림 6.(b)는 변조패턴 및 부하에 따른 THD를 나타내고 있다. SSM을 수행하지 않는 경우가 전 부하에서 가장 낮은 THD를 보이며, Random SSM과 Periodic SSM은 오차범위 내에 유사한 THD를 보인다.

그림 7, 8은 각각 Periodic SSM, Random SSM에서  $\Delta f$ ,  $f_m$ 의 부효과 경향을 나타낸다. Random SSM에서는 동일  $\Delta f$  조건에서  $f_m$ 를 증가 시, THD가 모두 오차범위 내에 있었으며, Periodic SSM에서도  $f_m$  1kHz를 제외 시 오차범위 내에 있는 것을 확인할 수 있다. 동일  $f_m$  조건에서  $\Delta f$  증가 시, Random 및 Periodic SSM 모두 THD가 증가하는 현상을 보였다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 단상 부스트 PFC에 대역폭 확산 변조 기법(SSM)을 적용하여 발생하는 부효과에 대해 연구하였다. 실험적으로 SSM 변조패턴 및 파라미터에 따른 부효과 경향을 확인하여 THD와  $\Delta f$ 와  $f_m$  부의 상관관계를 파악할 수 있었다. Periodic SSM은  $\Delta f$ 가 증가할수록 THD가 비례하여 증가하였으며,  $f_m$ 이 1kHz에서만 THD가 저감된 것을 확인할 수 있었다. 이는 전류 고조파가 계통 주파수의 40차수까지 관측됨으로 2.4 kHz 이상의 고조파 성분은 제거가 되어 줄어듦을 예상할 수 있다. Random SSM은  $f_m$ 의 영향성이 크지 않음을 확인하였으며, Periodic SSM과 마찬가지로  $\Delta f$ 에 비례하여 THD가 증가한 것을 확인하였다.

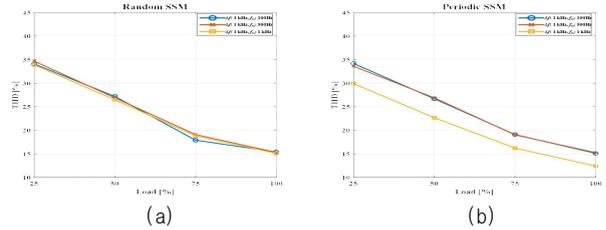


그림 7  $f_m$ 에 따른 부하별 부스트 PFC THD 비교: (a) 랜덤 SSM, (b) Periodic SSM

Fig. 7 Comparison of THD in Boost PFC under Different Loads as a Function of  $f_m$ : (a) Random SSM, (b) Periodic SSM

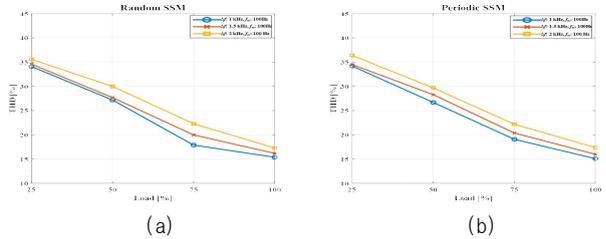


그림 8  $\Delta f$ 에 따른 부하별 부스트 PFC THD 비교: (a)랜덤 SSM, (b) Periodic SSM

Fig. 8 Comparison of THD in Boost PFC under Different Loads as a Function of  $\Delta f$  (a) Random SSM, (b) Periodic SSM

향후 연구에서는 EM 노이즈 저감성과 EM 노이즈 계측 장비의 분해능 대역폭(Resolution Bandwidth: RBW), SSM과 파라미터 ( $\Delta f$ ,  $f_m$  변조패턴) 및 컨버터의 부효과를 고려한 최적의 SSM 설계기법에 대해 연구를 이어가려 한다.

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022202090010B, 산업체 최적 전압관리를 위한 제어설비 기술개발 및 실증)  
이 논문은 2024년도 LG전자의 지원을 받아 수행된 선행 연구사업임. (NO. 2.240114.01)

#### 참고 문헌

- [1] F. Pareschi, R. Rovatti and G. Setti, "EMI Reduction via Spread Spectrum in DC/DC Converters: State of the Art, Optimization, and Tradeoffs," in IEEE Access, vol. 3, pp. 2857-2874, 2015
- [2] "Bidirectional Interleaved CCM Totem Pole Bridgeless PFC Reference Design Using C2000TM MCU". Texas Instruments Design Guide, Oct. 2020
- [3] H. -P. Park, S. Jeong, M. Kim, J. Kim and J. -H. Jung, "Spread Spectrum Technique for Decreasing EM Noise in High-Frequency APWM HB Resonant Converter With Reduced EMI Filter Size," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 11, pp. 10845-10855, Nov. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2019.2896619.
- [4] M. Kim, H. -P. Park and J. -H. Jung, "Spread Spectrum Technique With Random-Linear Modulation for EMI Mitigation and Audible Noise Elimination in IH Appliances," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 8, pp. 8589-8593, Aug. 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3102405.