

# 2차 Space Dithered Sigma-Delta Modulation 기반의 Random PWM 스위칭 기법을 이용한 강압형 DC-DC 컨버터의 성능 개선

김서형\*, 주성탁\*, 정해광\*, 이교범\*, 정규범\*\*

\* 아주대학교 전자공학부

\*\* 우석대학교 전기전자공학과

## Performance Improvement of a Buck Converter using a 2nd-order Space Dithered Sigma-Delta Modulation based Random PWM Switching Scheme.

Seo-Hyeong Kim\*, Seong-Tak Ju\*, Hea-Gwang Jung\*, Kyo-Beum Lee\*, and Gyu-Beum Jung\*\*

\* Division of Electrical and Computer Engineering Ajou University

\*\* Department of Electrical and Electronic Engineering Woosuk University

### ABSTRACT

본 논문에서는 강압형 DC-DC 컨버터의 성능 개선을 위한 스위칭 기법인 2차 SDSDM(Space Dithered Sigma-Delta Modulation)방식을 제안한다. PWM 방식은 일정 스위칭 주파수 대역에서의 고조파로 인해 소음, 전자파 장애, 스위칭 손실 등을 초래한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 DSDM 방식의 일종인 1차 SDSDM은 랜덤 디더(Random Dither) 발생기가 1차 SDM의 양자화기(quantizer) 입력단에 위치하여 스위칭 주파수가 분산된다. 강압형 DC/DC 컨버터에 제안하는 2차 SDSDM의 방식을 적용한 실험 결과를 통해 타당성을 검증한다.

### 1. 서론

PWM(Pulse Width Modulation) 방식은 여러 전력변환 장치에서 사용된다. 스위칭 주파수 대역에서의 고조파로 인해 반도체 소자의 스위칭 손실, 전자파 장애 등의 문제가 있다.<sup>[1]</sup>

앞서 언급한 PWM방식의 문제를 보완하기 위해 1차 SDM(Sigma-Delta Modulation)과 랜덤 디더 발생기(Random Dither generator)로 구성된 DSDM(Dithered Sigma-Delta Modulation) 방식이 사용된다. DSDM은 간단한 소프트웨어, 하드웨어로 구현가능하다.<sup>[2]</sup> 1차 SDM은 일종의 스위칭 변조 방식으로 스위칭 펄스의 스펙트럼이 저주파 성분은 줄어들고 고주파 영역으로 밀리는 noise shaping 특성이 있어 PWM 방식에서 발생하는 스위칭 주파수 대역에서의 고조파 발생을 저감시킬 수 있다. 하지만 낮은 변조 지수(Modulation index)에서 1차 SDM도 스위칭 주파수 대역에 다소의 고조파를 가진다. 이러한 고조파를 저감시키기 위해서, DSDM의 일종인 SDSDM(Space Dithered SDM)이 사용된다. SDSDM은 랜덤 디더 발생기를 1차 SDM의 양자화기(quantizer)의 입력에 추가하는 구조를 가진다.

고조파의 분산에 대해 확인하기 위하여, 한 스위칭 주기 동안 샘플링 수의 표준편차를 이용한다. 본 논문에서는 제안하는 2차 SDSDM을 설명하고 강압형 DC/DC 컨버터에 적용한 실험 결과로 타당성을 입증하고자 한다.

### 2. 제안하는 2차 SDSDM 방식

#### 2.1 SDM(Sigma-Delta Modulation)

SDM은 양자화 잡음이 백색 잡음(white noise)이 아닌 고주파 영역으로 밀리는 noise shaping 특성을 띤다.<sup>[3]</sup> 1차 SDM은 그림 1과 같이 적분기와 양자화기로 구성된다.

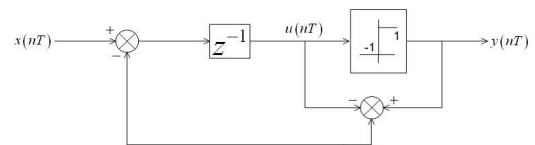


그림 1 1차 SDM의 블록 다이어그램  
Fig. 1 Block diagram of the 1st-order SDM

그림 2는 저주파 성분이 감소한 대신 고주파 성분이 증가하는 1차 SDM의 noise shaping 특성을 나타낸다. SDM의 주파수 특성에 의해 공진형 컨버터<sup>[4]</sup>, DC/DC 컨버터<sup>[5]</sup> 등에 사용되었다. 그러나 SDM은 낮은 변조지수에서 스위칭 주파수대역에 다소의 고조파를 가지고 있는 단점이 있다.

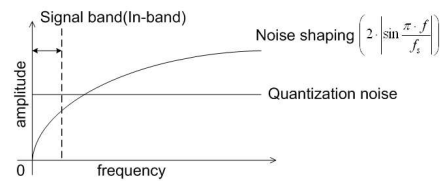


그림 2 1차 SDM의 주파수 특성  
Fig. 2 Frequency characteristics of the 1st-order SDM

#### 2.2 DSDM(Dithered SDM)

DSDM 방식은 1차 SDM의 스위칭 주파수 대역의 다소의 고조파를 저감시키기 위해 랜덤 디더 발생기를 추가하는 구조를 가진다. 랜덤 디더 발생기를 1차 SDM의 양자화기 입력에 추가하는 방식을 SDSDM이라 한다.

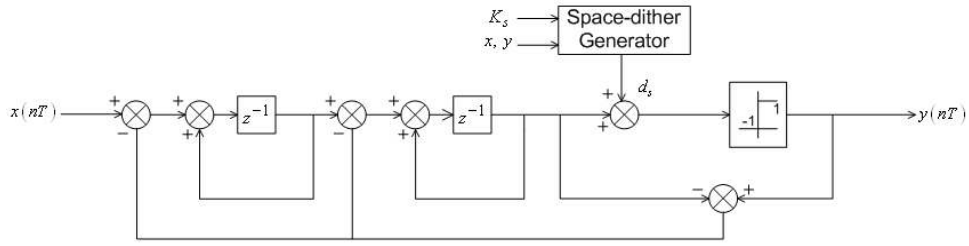


그림 3 2차 SDSDM의 블록 다이어그램  
Fig. 3 Block diagram of 2nd-order SDSDM

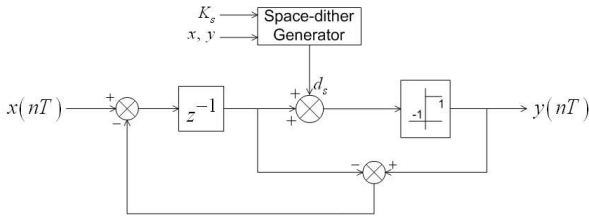


그림 4 SDSDM의 구조  
Fig. 4 Configuration of SDSDM

그림 4는 SDSDM의 구조를 나타낸다. 여기서  $x$ 는 입력,  $y$ 는 출력,  $d_s$ 는 공간 디더(space-dither)의 값 그리고  $K_s$ 는 공간 디더의 파라미터(magnitude adjustment parameter)를 나타낸다. 이러한 1차 SDSDM은 1차 SDM 방식의 고조파를 넓은 주파수 영역에서 스위칭이 이루어지도록 하여 스위칭 주파수 대역을 고루 분산시킨다.

### 2.3 샘플링 수(Sampling number)의 표준 편차

스위칭 주파수 분산의 정도를 확인하기 위해, 아래와 같은 한 주기 당 샘플링 수( $n_s$ )의 분포인 표준편차( $\sigma$ )를 사용한다. 공간 디더의 크기가 커질수록  $n_s$ 의 값은 커지고 따라서 표준 편차  $\sigma$ 는 증가하게 되어 스위칭 주파수 분산의 정도가 커진다.

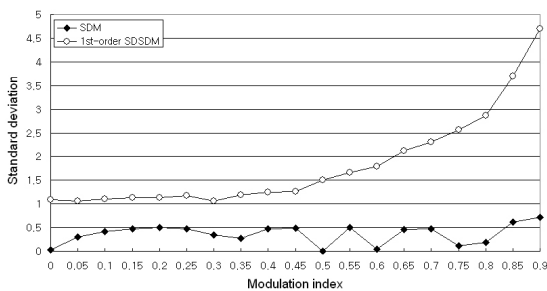


그림 5 1차 SDM과 1차 SDSDM의 변조 지수( $m$ )에 따른  $n_s$ 의 표준 편차  
Fig. 5 Standard deviation of  $n_s$  vs.  $m$  for 1st-order SDM and 1st-order SDSDM

그림 5은 1차 SDM과 1차 SDSDM의 변조 지수에 따른  $n_s$ 의 표준편차를 나타낸다. 전 변조 지수 영역에 걸쳐 1차 SDSDM이 좋은 성능을 보인다.

### 2.4 제안한 2차 SDSDM

1차 SDSDM의 경우 그림 1에서  $x(nT)$ 의 값에 따라 양자

화 잡음이 결정된다. 이것은 입력에 따라서 양자화잡음이 작거나 없는 경우가 발생할 수 있음을 의미한다. 이러한 문제점을 해결하고 noise shaping 효과가 큰 2차 SDSDM을 제안한다.

그림 3은 2차 SDSDM의 블록 다이어그램을 나타낸다. 2차 SDSDM의 이산신호 모델은 다음과 같이 식 (1)로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} u(nT) &= x((n-1)T) + (-2e((n-1)T) + e((n-2)T)) \\ e(nT) &= y(nT) - u(nT) \\ y(nT) &= +1 \quad (\text{if } u(nT) \geq 0) \\ &= -1 \quad (\text{if } u(nT) < 0) \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 출력 잡음( $u(nT)$ )은 양자화 잡음을 두 번 미분한 형태로 나타난다. 따라서 1차 SDSDM만을 사용했을 때보다 저주파 대역의 고조파 성분이 줄어들게 된다.

그림 6은 이러한 고조파의 분산에 대해서 1차 SDSDM과 2차 SDSDM의  $n_s$ 의 표준편차의 비교를 나타낸다. 2차 SDSDM은 1차 SDSDM보다 표준편차의 값이 전 변조 지수영역에 걸쳐 큰 값을 가지게 되어 이는 noise shaping의 효과가 높아짐을 보인다. 전자과 장애 등을 야기하는 스위칭 주파수 대역에서의 고조파가 2차 SDSDM 방식에서는 효과적으로 저감됨을 의미한다.

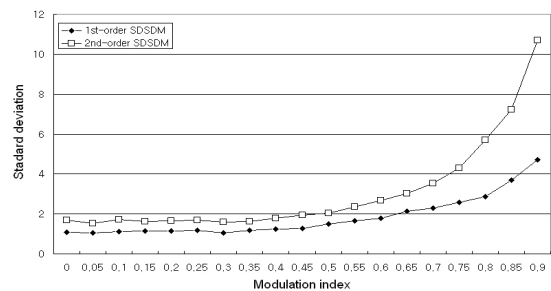


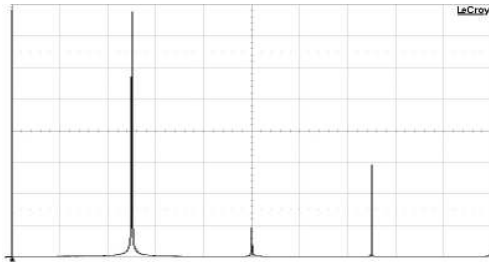
그림 6 1차 SDSDM과 2차 SDSDM의 변조 지수( $m$ )에 따른  $n_s$ 의 표준 편차  
Fig. 6 Standard deviation of  $n_s$  vs.  $m$  for 1st-order SDSDM and 2nd-order SDSDM

## 4. 실험결과

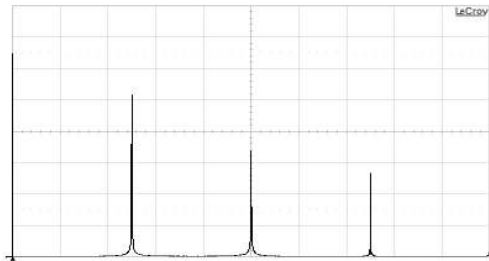
2차 SDSDM을 적용한 강압형 DC/DC 컨버터의 성능 개선을 확인하기 위해 실험을 수행하였다. 이 강압형 DC/DC 컨버터는 DC 50[V], 출력 100[W]급, 샘플링 주파수는 25[kHz]로 설계하였다. 변조 지수는 0.2, 스위칭 주파수는 5[kHz]이다.

그림 7은 실험을 통해 측정된 SPWM, 1차 SDM, 1차 SDSDM, 2차 SDSDM의 스위칭 FFT 파형이며, 그림 8은 실험에 사용된 시스템의 구성도를 나타낸다.

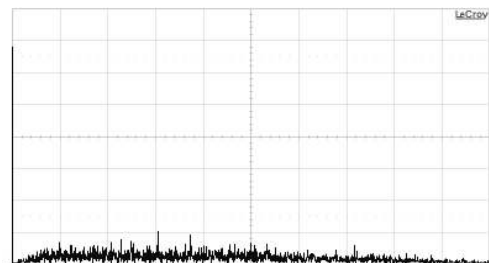
기존 SPWM 방식의 경우 고조파가 스위칭 주파수에 집중된다. 하지만 1차 SDM 방식은 스위칭 주파수 대역의 고조파가 다소 저감되고 1차 SDSDM 방식은 고조파가 전 주파수 대역으로 고르게 분산됨을 알 수 있다. 제안하는 2차 SDSDM의 경우 고조파의 분산효과가 더욱 효과적으로 나타난다.



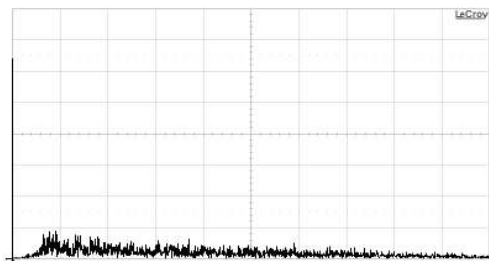
(a) SPWM



(b) 1차 SDM



(c) 1차 SDSDM



(d) 2차 SDSDM

그림 7 SPWM, 1차 SDM, 1, 2차 SDSDM 스위칭 FFT 실험 파형

(x축: 2[kHz]/div, y축: 1[V]/div)

Fig. 7 Experimental FFT waveforms of switching signal

(x-axis:2[kHz]/div, y-axis:1[V]/div)

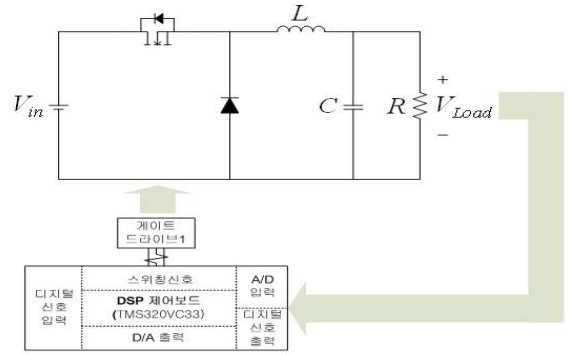


그림 8 2차 SDSDM을 이용한 강압형 DC/DC 컨버터 회로도  
Fig. 8 Schematic of a Buck converter using 2nd-order SDSDM

## 5. 결 론

본 논문에서는 기존의 PWM 방식에서 발생하는 스위칭 주파수 대역에서의 고조파 저감을 위해 2차 SDSDM 방식을 제안하였다. PWM의 고조파 저감을 위한 SDM, 1차 SDSDM의 고조파 저감에 대해서 설명하고, 제안한 2차 SDSDM이 PWM, SDM, 1차 SDSDM과 비교해서 우수한 성능을 나타냄을 실험을 통한 FFT 분석을 통해 검증하였다.

본 연구논문은 교육과학기술부 과학기술위성 3 호 개발 사업의 예산지원을 받아 작성되었으며, 연구비 지원에 깊은 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] N. Mohan, T.M. undeland, and W.P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.
- [2] C.H. Bae, J.H. Ryu, and K.W. Lee, "Suppression of Harmonic Spikes in Switching Converter Output using Dithered Sigma-Delta Modulation," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 38, No. 1, PP. 159-166, Jan/Feb. 2002.
- [3] 이성희, 최태영, 구자성, 원충연, 김규식, 최세완, "Sigma-Delta 변조기법을 이용한 Boost Converter의 전도 노이즈 저감," 전력전자학술대회논문집, pp. 494-497, 2002년 7월.
- [4] Divan et al, "Modulator for resonant link converters," United States Patent, Patent number: 5619406, April 1997.
- [5] A. Hirota, S. Nagai, and M. Nakaoka, "A Novel Delta-Sigma Modulated DC-DC Power Converter operating under DC Ripple Voltage," IECON'99 Proceedings, Vol 1, pp. 180-184, 1999