

## 인터리브드 RPWM Buck 컨버터의 전도성 노이즈 감소에 대한 연구

## Reduction of Conducted Emission in Interleaved RPWM Buck Converter

이 승 현 · 이 근 봉\* · 나 완 수

Seunghyun Lee · Keunbong Lee\* · Wansoo Nah

## 요 약

본 논문에서는 DC-DC Converter에서의 고조파로 인한 전자기적 잡음을 줄이기 위해 Random PWM을 적용한 Interleaved Buck Converter(IBC) 시스템을 제안한다. PWM 직류전원장치에서 스위칭 방식을 사용하는 경우 스위칭 손실 및 EMI 문제가 발생하기 때문에 많은 고조파를 포함하고 있어 선간 전압의 왜곡 등을 유발한다. 따라서 이에 대한 해결 방법으로 PRBS를 이용한 IBC를 최초로 제안한다. 이 방식의 회로 구조는 2개의 능동형 스위치를 가지며 180도의 위상차를 갖는 2개의 PWM 신호를 이용하여 회로를 제어한다. IBC는 1세트의 스위치를 추가하기 때문에, 비용 측면 등에서는 불리 할 수 있으나 전력분배, 출력전류 리플 감소, 빠른 회로 반응속도, 수동소자크기 감소의 이점을 가진다. 본연구의 타당성을 확인하기 위하여 PSIM 시뮬레이터를 이용하여 Random PWM을 적용한 IBC 회로를 설계하여 기존의 PWM과 RPWM 방식만을 사용하는 Buck-converter 회로를 PSIM 시뮬레이터를 이용하여 결과를 확인하고 분석하였다.

## Abstract

This paper presents a Interleaved Buck Converter(IBC) system with Random PWM to reduce electromagnetic noise by harmonics. Switched mode power supply generally controlled by high switching frequency have a electromagnetic interference(EMI) issue due to the high-voltage/high-current switching to regulate the voltage in buck converter. To solve the problem, we present a novel IBC system with PRBS. IBC system has two active switches with 180 phase difference that controll the cicuit with two PWM signal. IBC system may be disadvantageous for the cost due to the addition of one set of switch, but it has advantages of power distribution, current ripple cancellation, fast transient response, and passive component size reduction. To verify the validity of study, simulation program has been built using PSIM and the experimental results of IBC system using RPWM was compared with the conventinal PWM and randomized PWM.

Key words: DC/DC Converter, Interleaved Buck Converter(IBC), Random PWM(RPWM), PRBS, Harmonics

## I. 서 론

현재 전자 산업에서는 각종 규격과 맞는 제품을 설계, 제작함에 따라 EMC(Electro-Magnetic Compatibility)의 중

요성이 대두되고 있다. 또한, IoT 시대가 도래함에 따라 사용 주파수 대역이 혼잡해지고 있으며, 전자기기 간의 상호 간섭 문제 또한 빈번하게 발생하고 있다. 이에 대하여 전자파 방출량에 대한 규제가 국제적으로 강화되고

「이 성과는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1A2B4015020).」

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

\*SK 하이닉스(SK Hynix)

· Manuscript received February 14, 2017 ; Revised March 8, 2017 ; Accepted April 11, 2017. (ID No. 20170214-011)

· Corresponding Author: Wansoo Nah (e-mail: wsnah@skku.edu)

있으며, EMI(Electro-Magnetic Interference) 잡음 억제 시스템이 규제되고 있다.

배터리 전원을 받아 칩 내부에서 전원을 공급하는 전원 회로는 Switching Mode Power Supply(SMPS)가 사용된다. 배터리로 동작하는 시스템의 경우, 고효율 전원공급 회로가 필요하기 때문에 SMPS인 DC-DC 컨버터가 선호된다. DC-DC 컨버터에서는 일정한 주파수를 갖는 PWM 신호를 스위칭 제어하여 전류제어기의 디지털화를 용이하게 하는 장점을 가지고 있으나, 스위칭 주파수의 정수 배에 해당하는 고조파 성분이 출력전압에서 스위칭 잡음을 포함하고 있어 RF system의 안정성을 떨어트려 정상적으로 동작하는데 방해가 된다.

스위칭 잡음뿐만 아니라, SMPS 내 ESL(Equivalent Series Inductance) 그리고 ESR(Equivalent Series Resistance)은 고주파에서 간섭을 유도하고, 기계적 적정 EMC 기준을 초과시켜 오동작을 유발한다<sup>[1]</sup>. 이러한 EMI 문제를 일으키는 고조파를 줄이기 위한 방식으로 RPWM(Random Pulse Width Modulation) 방식이 있다<sup>[2],[3]</sup>. RPWM 방식은 스위칭 주파수 및 펄스의 위치를 범위 내에서 랜덤하게 변경시키는 방식으로 특정 주파수 대역에 집중된 고조파를 넓은 대역으로 분산시킨다. 이러한 방식을 이용하여 EMI, 기계 및 회로에서의 잡음 저감에 효과가 있다. 또한, 기존의 Buck 컨버터구조에서 스위치를 하나 더 추가한 형태의 Interleaved Buck Converter(IBC) 시스템을 이용하여 고조파 제어를 더 효과적으로 하고자 한다<sup>[4]</sup>. 이는 180도의 위상차를 갖는 2개의 PWM 신호를 이용한 회로 제어방식이며, 전력분배, 출력전류 리플 감소, 빠른 회로 반응속도, 수동소자 크기 감소의 이점을 준다. 본 논문에서는 듀티비 50 %로 제어하여 입력 전압 6 V, 출력전압 3 V의 Buck 컨버터를 기존의 PWM, RPWM, IBC with RPWM 방식을 각각 PSIM 시뮬레이터를 이용하여 비교분석하였다. 또한 마이크로 컨트롤러(ATmega 128 Pro-a)를 사용한 디지털 제어를 가지는 폐환 회로 시스템을 설계하였으며, 각각의 방식을 시간 영역과 주파수 영역에서의 전류 고조파성분을 비교하였고, 고조파 성분을 최소화 할 수 있는지에 대하여 분석하였다.

## II. 기존 Buck 컨버터의 동작특성

Buck 컨버터는 DC-DC 컨버터 중 입력 전압보다 출력 전압이 낮은 특성을 가진다. 출력전원에서 포함된 불필요한 교류성분을 제거해 주어야 하기 때문에, 저역통과필터를 포함한 구조를 가진다. 입력전압이  $V_i$ 일 때 저역통과필터가 이상적이라면 출력전압  $v_o$ 은 교류성분이 제거되어 필터 전단의 전압  $v_D$ 의 직류성분과 같으며, 이는 듀티비가 곱해진  $D \cdot V_i$ 와 같게 된다. 입력 전압이 출력측에 전달되는 전압 전달비  $G_V$ 에 대한 식은 다음과 같다.

$$G_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{D \cdot V_i}{V_i} = D \quad (1)$$

위 식 (1)에 따르면 듀티 비  $D$ 에 따라 출력 전압이 달라지게 되며, 그림 1에서와 같이 입력 전압이 6 V일 때 듀티 비  $D$ 가 0.5로 동작한다면 출력전압이 3 V인 것을 그림 1에서와 같이 확인할 수 있다.

### 2-1 기존 PWM 제어방식

PWM(Pulse Width Modulation)은 그림 2와 같은 구성을 가진다. 비교기(Comparator)의 입력에 삼각파 또는 톱니파를 입력하고, 인버팅 입력에 제어 신호를 입력한다. 비교기 출력에 입력 신호의 레벨 변화에 따라 펄스 폭이 다른 출력이 나타나게 되며, 이것이 PWM 제어 방식이다.

일정한 주파수의 스위칭을 이용한 PWM 제어방식은 협대역에서 고조파를 발생시키며, 각각의 스위칭 주파수

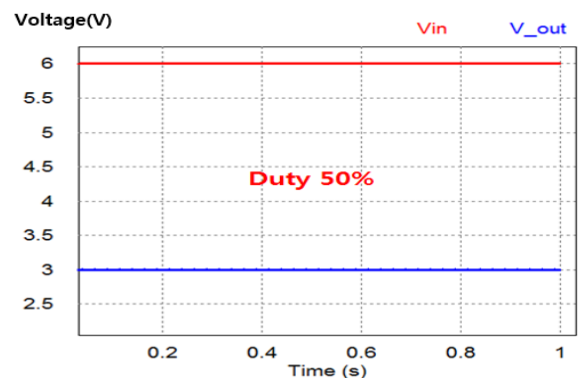


그림 1. 앞으로 언급될 그림 3의 회로를 이용한 Buck 컨버터 입력, 출력전압

Fig. 1. Input, output voltage of Buck converter using the circuit in Fig. 3

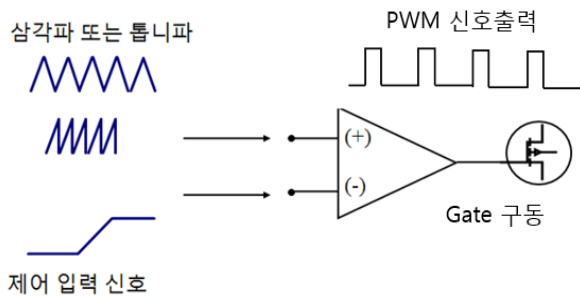


그림 2. 일정한 주기를 갖는 삼각파를 이용한 PWM의 동작원리

Fig. 2. Principle of operating PWM method using periodic triangular waveform.

마다 주요한 고조파가 발생되는 것을 볼 수 있다. 이러한 주요 고조파는 EMI 문제를 야기시키며, 다른 전자기기에 영향을 미칠 수 있다. EMC 기준에 충족시키기 위하여 다음의 제안하는 방식을 사용하고자 한다.

## 2-2 기존의 PWM을 이용한 Buck 컨버터 설계 및 제작

그림 3은 기본적인 PWM 제어방식의 Buck 컨버터 구조이다. 입력전압이 6 V, 듀티비가 50 %일 때 출력전압은 3 V로 되며, 그 때 스위칭 주파수는 1.66 kHz로 동작한다. 듀티비를 변경하면 거기에 맞는 출력전압이 출력이 되며, 본 논문에서는 듀티비를 50 %로 고정하여 전체 논문을 기술하였다. 스위치는 MOSFET을 사용하며, 정전압을 유

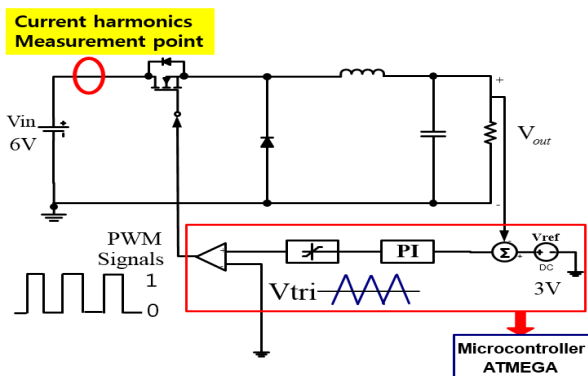


그림 3. 기본적인 PWM Buck 컨버터 회로  
Fig. 3. Conventional PWM Buck converter scheme.

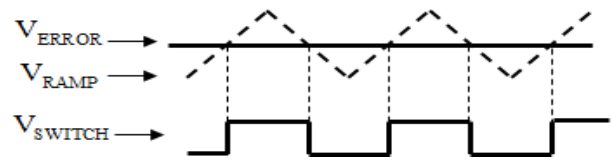


그림 4. 궤환 제어를 위한 PWM 신호 생성  
Fig. 4. Generate PWM signal for feedback control.

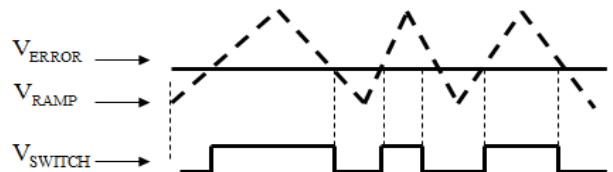


그림 5. 앞으로 언급될 PRBS를 이용한 RPWM 신호 생성  
Fig. 5. Generate RPWM signal by PRBS.

지하기 위해서는 출력전압을 궤환시켜 어떤 기준 전압과 비교하고, 그 차만큼 PWM을 제어하는 부분이 필요하다. 그림 4와 같이 출력전압과 기준전압의 차를 이용한 에러 신호를 만들어 1.66 kHz의 삼각파와의 비교기를 통하여 일정한 스위칭 주파수를 갖는 PWM 제어신호를 만들어 MOSFET의 게이트단을 구동시키며, 일정한 전압을 갖는 궤환 회로제어를 갖는다.

그림 6은 PSIM 9.0 시뮬레이터를 이용하여 MOSFET 앞에서의 전류에 대한 고조파를 출력한 결과이며, 일정한 스위칭 주파수인 1.66 kHz마다 고조파가 발생하는 것을

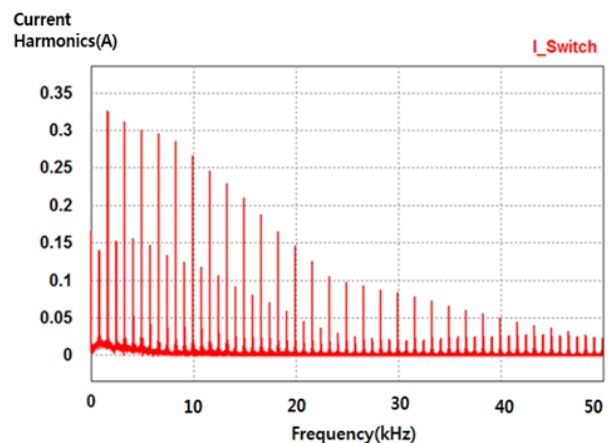


그림 6. PWM에서의 전류 고조파 시뮬레이션 결과  
Fig. 6. Simulation result of current harmonics in PWM.

확인할 수 있다.

### 2-3 RPWM 제어 방식

Random PWM(RPWM)은 기존의 PWM 방식에서의 일정한 주파수에서의 스위칭 방식이 아닌, 임의의 주파수에서의 스위칭 방식을 사용한다. 그림 7은 기존의 PWM 방식과 RPWM 방식의 고조파의 차이를 나타낸다. 기존의 PWM 방식과 달리 RPWM 제어방식은 주파수 영역으로 분산시키며, 고조파성분의 크기 또한 줄이는 장점을 가지고 있다. RPWM에서의 고조파 저감을 알 수 있는 지표를 HSF(Harmonic Spread Factor)라고 부르며, 식은 다음과 같다<sup>[5]</sup>.

$$HSF = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j>1}^N (H_j - H_0)^2} \quad (2)$$

$$H_0 = \frac{1}{N} \sum_{j>1}^N (H_j) \quad (3)$$

이 식 (2), (3)에서  $H_j$ 는  $j$ 번째 고조파 성분의 진폭을 나타내며,  $H_0$ 는  $N$ 차 고조파까지 진폭의 평균값을 나타낸다. HSF는 임의의 PWM의 확산효과를 값으로 정량화한 것이며, 이것의 크기는 작아야 한다.

그림 7은 해당주파수 내에서 스위칭 주파수와 전력과의 관계를 표현하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 7의 (b)는 스위칭 주파수가 변함에 따라서 전력분포가 흩어짐을 확인할 수 있다<sup>[6]</sup>.

### 2-4 RPWM 제어방식을 이용한 Buck 컨버터 설계 및 제작

그림 8은 임의의 신호 생성의 토대가 되는 회로이다. 이 회로는 PRBS(Pseudo Random Bit Sequence)라고 하며 각각은 쉬프트 레지스터(shift register)와 배타적 논리 합 회로(EXCLUSIVE OR gate)로 구성되어 있다<sup>[7]</sup>. 이 장치들은 lead-lag 임의의 비트의 연속을 생성하며, 쉬프트 레지스터는  $m$ -bits로 실험 및 시뮬레이션에서는 8비트로 사용하였으며, 고정 주파수  $f_{clock}$  마다 동작한다. 배타적 논리 합 회로는 쉬프트 레지스터 비트들의 궤환을 받아 입력 신호를 발생시킨다.  $m$ -bits의 레지스터의 가능한 최대

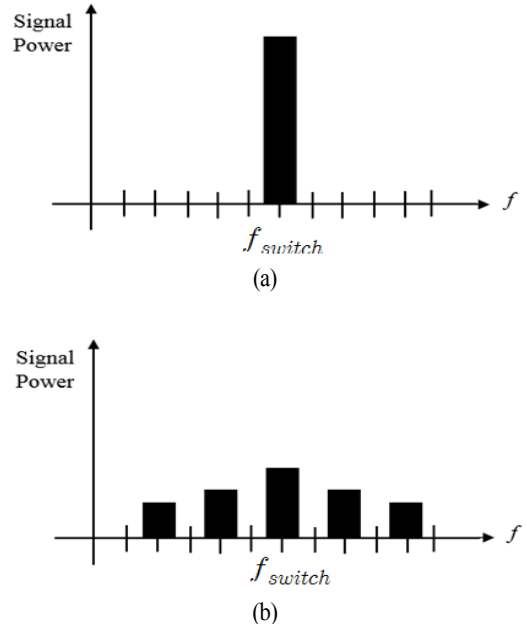


그림 7. (a) 기존 PWM 고조파 성분, (b) RPWM 고조파 성분  
Fig. 7. (a) Conventional PWM harmonics, (b) RPWM harmonics

state 수는  $K = 2^m - 1$  과 같다. 각각의 상태는 K-clock 펄스가 반복된 이후에 발생된다. PRBS의 랜덤한 값은 펄스 위치를 결정하는데 사용되며, 배타적 논리 합 회로의 출력에 따라 달라진다. PRBS 임의의 비트 발생기는 다음 식 (4)에 의해 결정된다. PRBS 임의의 비트 발생은 레지스터의 비트 수에 따라 달라지게 된다(8, 10~비트).

$$PRBS = (x(4) \oplus x(5)) \oplus (x(6) \oplus x(8)) \quad (4)$$

$\oplus$ 은 배타적 논리 합 회로 연산을 의미하며,  $x(i)$ 는  $i$ 번째 레지스터의 값을 의미한다. 이러한 과정을 통하여 임의의 비트들의 펄스를 만들게 되고, 이는 멀티플렉서(Multiplexer)에 입력되어 그림 8의 Pseudo random frequency carrier를 만드는데 사용된다.

그림 8을 보면 일정하게 고정된 주파수  $C$ 의 삼각파와 위상이 반대이며, 고정 주파수  $\bar{C}$ 를 가진 삼각파가  $2 \times 1$ 의 멀티플렉서에 입력으로 들어가는 것을 볼 수 있다. 각각의 삼각파는 동일한 주파수를 가진다.

출력  $R$ 에서  $C$ 와  $\bar{C}$ 가 선택되는 것은  $P$ 의 상태에 따라 결정된다. 아래의 진리표는  $P$ 의 상태에 따른  $R$ 값의 결과

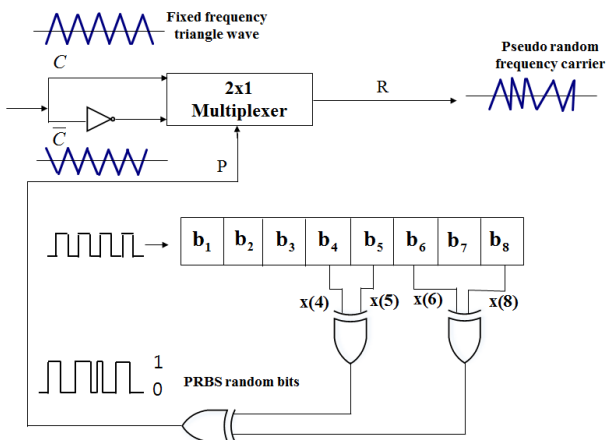


그림 8. Pseudo random carrier 생성회로의 원리도

Fig. 8. Basic principle of the pseudo random carrier generation circuit.

를 나타낸다.  $P$ 가 0일 때  $R$ 값은  $\bar{C}$ 로 출력되며,  $P$ 가 1일 때  $C$ 가 선택되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 방식으로 일정한 주파수의 삼각파는 출력  $R$ 에서 임의의 주파수를 가진 삼각파로 나타나게 되며, 이 과정을 PSIM의 시뮬레이션에서 확인할 수 있다.

최종적으로 그림 9에서의 출력된 임의의 삼각파의 진폭은  $-1$ 과  $1$ 을 반복하는데,  $0$ 과  $1$  디지털 신호로 바뀌기 위해서 차동증폭기로 이루어진 오프셋(Offset) 회로를 이용한다. 그림 9는 출력전압을 바꾸기 위한 4개의 저항과 차동증폭기의 회로이며, 두 입력의 차를 입력단의 저항의 크기에 따라 출력 전압이 제어할 수 있다. 이의 오프셋회로의 식은 다음과 같다.

$$I_1 = I_2$$

$$\frac{V_1 - v^-}{R_1} = \frac{v^- - V_{out}}{R_2}, \quad v^- = \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot V_2 \quad (5)$$

이 식을 대입하여 바꾸면

$$V_{out} = \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) V_2 - \left( \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot V_1 \quad (6)$$

이며, 식 (6)에 시뮬레이션에서의 저항

$$R_1 = R_3 = 100 \text{ k}\Omega, R_2 = R_4 = 50 \text{ k}\Omega \text{ 을 대입하면}$$

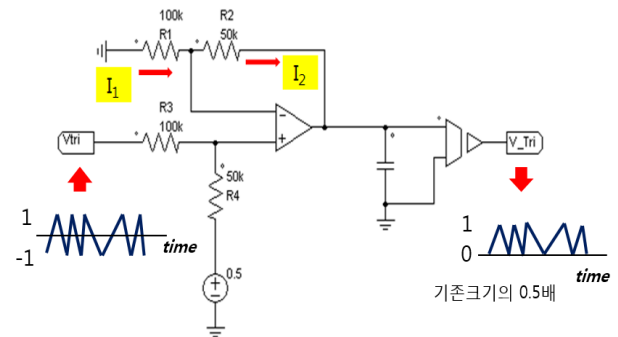


그림 9. 임의의 디지털 제어 삼각파 생성을 위한 오프셋 회로

Fig. 9. Offset circuit for generating digital random triangle waveform.

$$\begin{aligned} V_{out} &= \left( \frac{50 \text{ k}\Omega}{100 \text{ k}\Omega + 50 \text{ k}\Omega} \right) \cdot \left( \frac{100 \text{ k}\Omega + 50 \text{ k}\Omega}{100 \text{ k}\Omega} \right) [V_{\text{삼각파}}] \\ &= \left( \frac{1}{3} \right) \cdot \left( \frac{3}{2} \right) V_{\text{삼각파}} \quad (V_1 = 0 \text{ V}) \\ &= \left( \frac{1}{2} \right) \cdot V_{\text{삼각파}} \end{aligned} \quad (7)$$

차동증폭기의 저항 비를 이용하여 입력 전압에 대한 출력전압을 증폭시키거나 감소시킬 수 있으며, 시뮬레이션 내에서 저항 비를  $0.5$ 배로 조절하여 임의의 삼각파의 진폭의 크기를 줄일 수 있었다.  $-1$ 과  $1$ 로 반복되는 신호를  $-0.5$ 와  $0.5$ 로 크기를 줄이고, 이에 DC 오프셋전압  $0.5 \text{ V}$ 를 인가하여 디지털신호인  $0$ 과  $1$  사이에서 반복되는 임의의 신호를 만들 수 있으며, 그림 9는 이 회로를 보인다.

그림 10은 RPWM 제어방식의 Buck 컨버터 구조이다. 기존의 PWM Buck 컨버터와 구조는 같으며, PWM 신호 생성 원리 및 출력이 다르다. 듀티 비  $50 \%$ 로 입력전압  $6 \text{ V}$ , 출력전압  $3 \text{ V}$ , 스위칭 동작 주파수는  $1.66 \text{ kHz}$ 이다. 시뮬레이션 상에서 PRBS 생성기는  $1 \text{ V}$  구형파를 입력받아  $8$ 비트 쉬프트 레지스터로 구성을 하였으며, 이 결과 그림 11과 같이  $0$ 과  $1$ 이 반복되는 임의의 구형파가 출력되는 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 상에서 삼각파와  $180^\circ$  위상차를 갖는 인버팅된 삼각파를 멀티플렉서에 입력하여 멀티플렉서의 결과에 따라 임의의 삼각파가 출력된다. PRBS가 High 상태일 때는 발생시킨 삼각파가 Low 상태일 때는 반전된 삼각파가 출력되는 것을 그림 12의 시뮬레이션 결과를 통해 알 수 있다. 임의의 삼각파

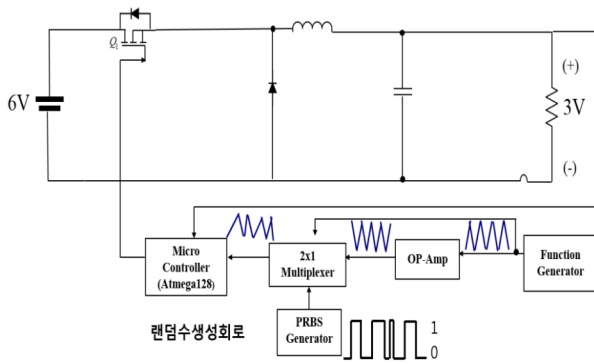


그림 10. RPWM Buck 컨버터 회로  
Fig. 10. RPWM Buck converter scheme.

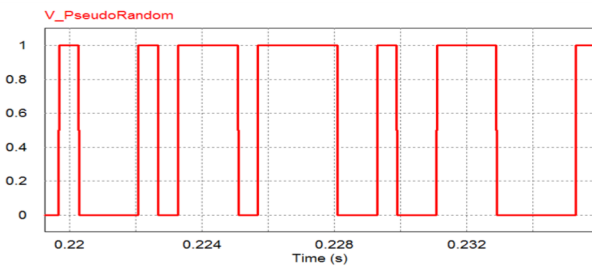


그림 11. Peseudo Random Bit Sequence(PRBS) 출력  
Fig. 11. Simulation result of Peseudo Random Bit Sequence (PRBS).

는 기존의 일정한 주파수를 갖는 삼각파와 달리 임의의 주파수에서 스위칭을 이용하여 출력전압과 기준전압 차를 이용한 에러와 비교를 통하여 RPWM의 신호를 만든다. 그림 13은 RPWM 신호를 이용한 스위치 앞단에서의 전류 고조파 성분을 본 것이며, 앞의 시뮬레이션 결과와

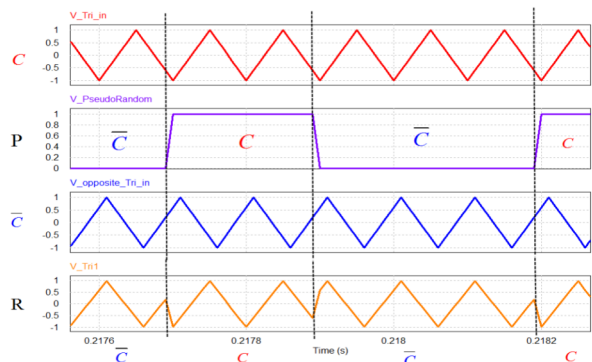


그림 12. PRBS의 상태에 따른 임의의 삼각파 출력  
Fig. 12. Output of random triangular waveform by PRBS state.

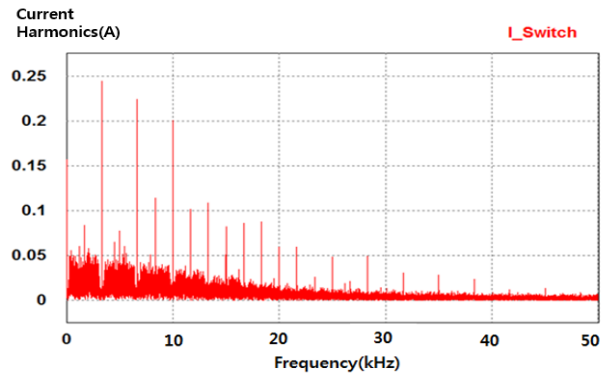


그림 13. RPWM에서의 전류 고조파 시뮬레이션 결과  
Fig. 13. Simulation result of current harmonics in RPWM.

달리 전체적으로 광대역의 주파수 대역으로 고조파성분이 분포되어 있는 것을 볼 수 있으며, 그 크기 또한 확연히 줄어든 것을 확인할 수 있다.

## 2-5 제안하는 인터리브드 RPWM Buck 컨버터 구조

그림 14는 인터리브드 Buck 컨버터의 회로도를 나타낸 것이다. 회로도의 구성은 기존의 Buck 컨버터에 인덕터, 스위치, 다이오드를 병렬로 추가하여 연결된 형태이며, 게이트에 다른 PWM의 신호를 걸어주기 위해서는 전류 제어기가 하나 더 추가되어야 한다.

그림 15는 디지털 제어기의 블록다이어그램을 자세히

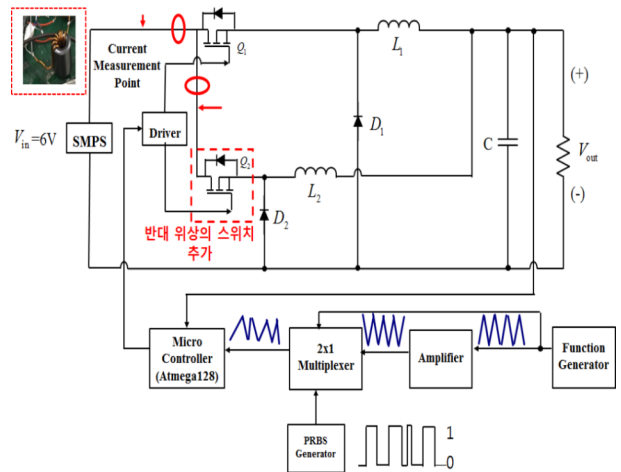


그림 14. 제안하는 인터리브드 RPWM Buck 컨버터회로  
Fig. 14. Block diagram for the proposed interleaved RPWM Buck converter scheme.

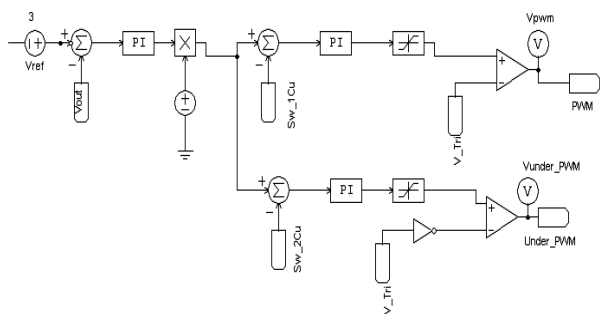


그림 15. 인터리브드 RPWM 컨버터의 디지털 제어 블록 다이어그램

Fig. 15. Digital control block diagram of interleaved RPWM Buck converter.

표현한 것이다. 그림의 다이어그램과 같이 출력전압을 센싱하여 전압제어를 거친 전압이 전파 정류된 입력전압과 곱해져서 인덕터 전류의 기준 신호가 된다. 그러므로 인덕터 전류는 전파 정류된 사인파형을 추종하게 되며, 이로 인해 전압과 전류의 위상을 맞춰 역률보정을 하게 된다. 또한, 스위칭 펄스의 위상을 180도 차이를 두어 입력 전류의 리플을 감소시키는 시스템이다. 또한, 인터리브드 방식을 사용하면 수동소자의 사이즈를 줄이고, 회로 내의 전력 분배의 이점을 가진다.

## 2-6 인터리브드 RPWM 제어 방식을 이용한 Buck 컨버터 설계 및 제작

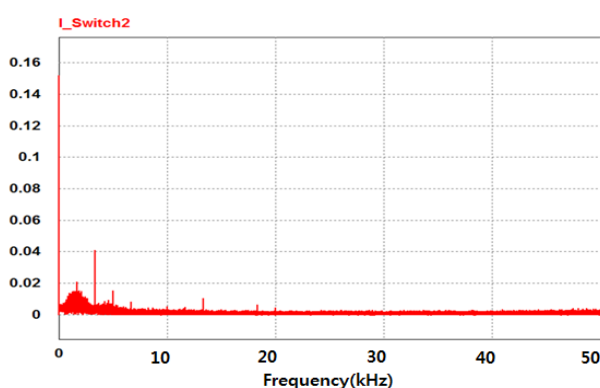


그림 16. 전원단에서의 Interleaved RPWM Buck 컨버터 전류 고조파

Fig. 16. Current harmonics in Interleave RPWM Buck converter at power line.

앞선 이론들을 바탕으로, 인터리브드 Buck 컨버터는 그림 10 RPWM Buck 컨버터에 스위치가 하나 더 추가된 구조이며, 그림 14와 같은 회로를 가진다. 스위치가 하나 더 추가가 되었기 때문에 상위와 하위 대칭형의 2개의 스위칭신호를 만들기 위해서는 블록다이어그램에서의 전류제어기가 하나 더 추가가 되어야 하며, 그림 15와 같으며 시뮬레이션 틀에 적용하였다.

기존의 시뮬레이션과 같은 환경에서 시뮬레이션하였고, 전원 단에서의 전류 고조파성분을 나타낸 것이 그림 16과 같다.

## III. 실험 및 고찰

전도성 노이즈 저감에 대한 인터리브드 RPWM 컨버터의 타당성을 알아보기 위하여 DC/DC 컨버터 중 Buck 컨버터를 이용하여 실험을 진행하였다.

시뮬레이션 결과와 원활한 비교를 위하여 스위칭 주파수는 1.66 kHz로 하였으며, 그림 17은 실제 실험에서 사용한 컨버터의 모습이다. 저역통과필터(LPF) 역할을 하는 수동형 소자의 크기는  $L=100\text{ }\mu\text{H}$ ,  $C=2,200\text{ }\mu\text{F}$ ,  $R=10\text{ }\Omega$ 의 시멘트 저항을 사용하였으며, 전류 고조파 측정은 빨간색 화살표로 표시된 MOSFET의 앞단에서 측정하였다. 앞의 이론을 이용하여 실험을 진행하였고, 임의의 삼각파의 출력을 이용한 임의의 PWM 신호를 만들기 위하여 증폭기를 이용하였다. 그림 18과 같이 180도의 위상차를 갖는 비 반전 삼각파와 반전증폭기를 이용한 반전 삼

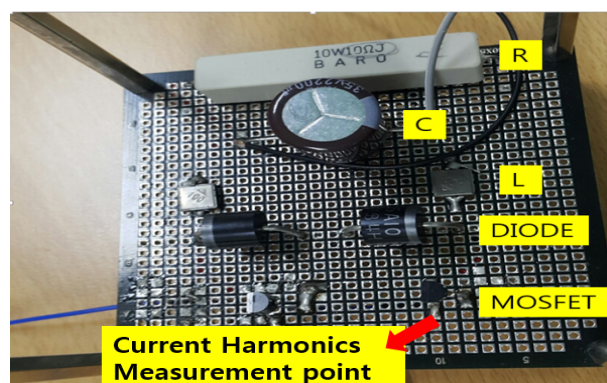


그림 17. 실험에서 사용된 Buck 컨버터 외형

Fig. 17. Buck converter in experiment.

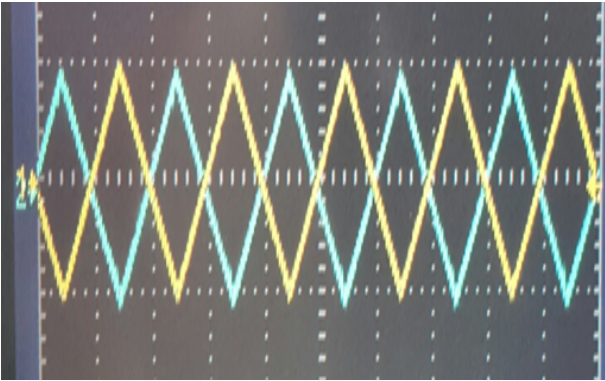


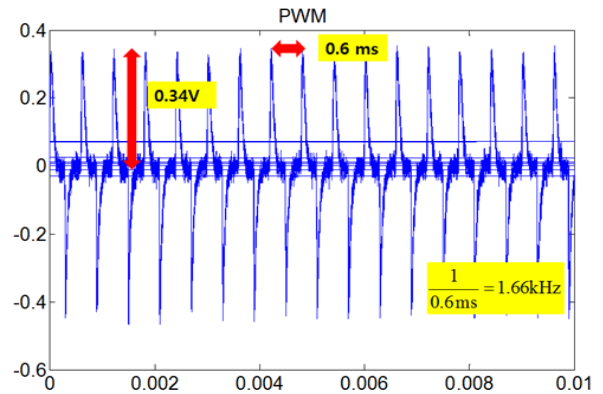
그림 18. Op-amp를 이용한 비반전, 반전삼각파  
Fig. 18. Non-inverting, inverting triangular waveform with op-amp.

각파를 멀티플렉서에 입력시켜 그림 11의 PRBS의 상태에 따라 그림 19의 임의의 삼각파가 출력하도록 설계하였다. PRBS는 시뮬레이션 상과 같이 8비트 레지스터를 이용하지 않고, 사용자가 임의로 진폭, 주파수 등을 조절할 수 있는 Keysight사의 33522b 장비를 이용하였다. PRBS가 High 상태일 때는 반전, Low 상태일 때는 비반전 삼각파가 출력되는 것을 그림 19에서 확인할 수 있으며, 이 임의의 삼각파를 오프셋 회로, 그림 15와 같은 디지털 제어의 블록다이어그램을 ATmega 128 pro-a 모듈을 이용하여 실험을 진행하였다. 전압 센싱을 이용한 출력전압을 기준전압과의 에러를 임의의 삼각파와의 비교를 통한 PWM 신호를 만드는 과정인데, 마이크로컨트롤러의 코딩 과정을 통하여 실시간으로 신호를 생성하여 Buck 컨버터의 게이트에 입력되도록 설계하였다. 이는 궤환 제어로 출력전압이 정전압을 이루도록 제어한다.

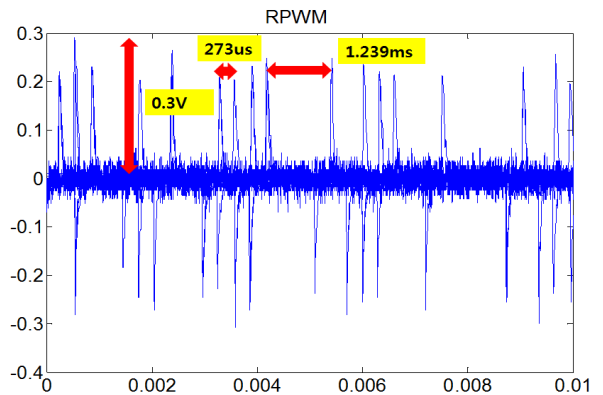


그림 19. 임의의 삼각파 실험결과  
Fig. 19. Experimental result of random triangular waveform.

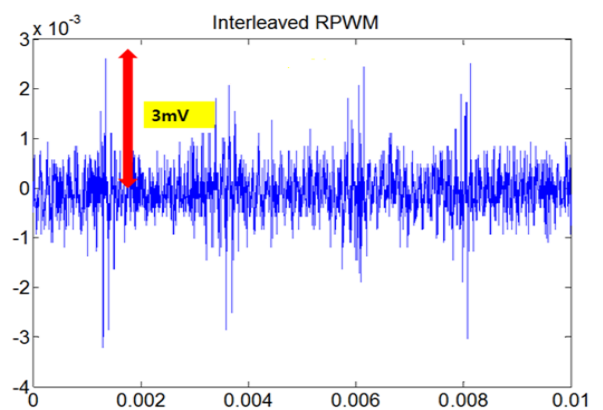
그림 20은 전원단에서의 전류 고조파성분을 각각의 방식을 이용하여 시간영역에서 출력한 그래프들이다. 그림 20



(a) PWM



(b) RPWM



(c) Interleaved RPWM

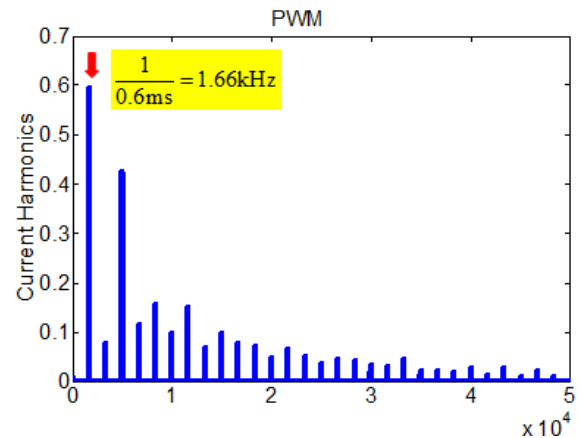
그림 20. 시간영역에서의 전류 파형  
Fig. 20. Current waveform in time domain.

(a)는 일정한 주기를 가지고 반복되는 패턴을 가지고 있으며, 그림 20(b)는 일정한 패턴을 가지지는 않지만 피크치가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 그림 20(a)와 같이 피크치가 일정한 주기별로 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 그림 20(c)의 경우 피크가 (a)와 (b)에 비해 확연히 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

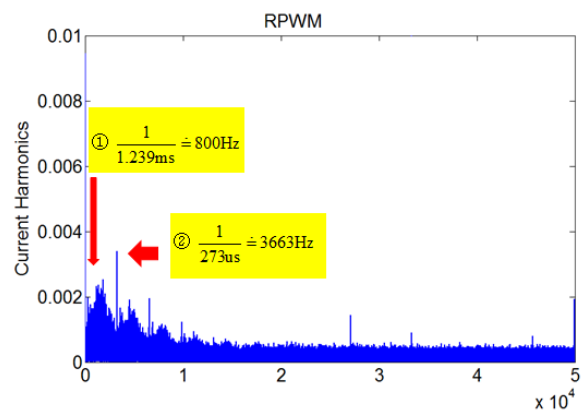
더욱이 그림 20(a)의 경우는 0.6 ms의 주기성이 매우 강함을 알 수 있고, (b)의 경우는 주기성이 상당히 완화되었으며, (c)의 경우에는 주기성이 더욱더 완화되었음을 알 수 있다.

고조파 저감 효과를 확인하기 위하여 주파수영역에서 각각을 비교하였다. 그림 21의 (a)는 스위칭 주파수인 1.66 kHz마다 고조파가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 20(a)의 주기가 0.6 ms이므로  $\frac{1}{0.6 \text{ ms}} = 1.66 \text{ kHz}$ 가 되고 정량적으로 이러한 결과가 나오는 것을 확인할 수 있다. (b)의 경우, 피크치가 발생하는 것이 일정한 주기성을 가지는 것이 아니고, 임의의 주기를 가지는 것을 그림 20(b)에서 확인할 수 있다. 그림 20(b)에서 273  $\mu\text{s}$ 를 갖는 주기로 보았을 때  $\frac{1}{273 \text{ } \mu\text{s}} = 3,663 \text{ Hz}$ 가 되고, 그림 21(b)에서 발생하는 고조파의 주파수와 일치하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 각각의 그래프는 약 1.239 ms 마다의 주기를 갖는데  $\frac{1}{1.239 \text{ ms}} = 800 \text{ Hz}$ 가 되며, 이 주

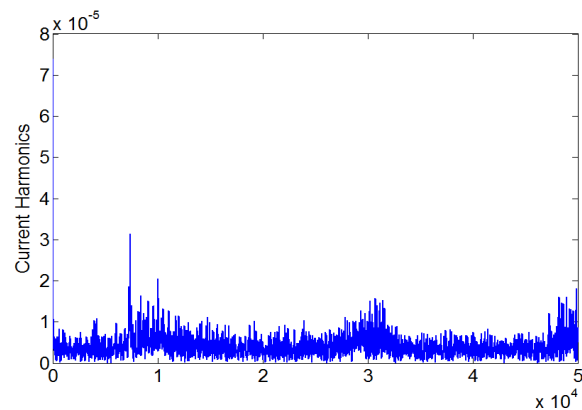
파수 대역에서 고조파 성분이 집중되어 있는 것을 확인할 수 있으며, 이는 낮은 주파수에서 고조파가 집중되어 있는 이유를 설명할 수 있다. (a)에서 특정주파수에서만 발생하는 주요한 고조파를 광대역으로 분산시켜 크기를 줄였지만 어느 정도의 주기성을 가지고 있어 특정 주파수 대역에서 고조파를 확인할 수 있다. 이는 앞선 그림 6에서와 볼 수 있듯이, 스위칭 주파수 내에서 크기 감소 효과를 가져오지만, 제거를 하는 방식이 아닌 주변 주파수로의 확산을 통한 크기 감소라고 볼 수 있다. (c)의 경우, 그림 20(c)를 보면 피크치가 발생하는 빈도수는 임의의 값을 가지며, 그 크기 또한 (a)와 (b)에 비해 확연히 작은 것을 볼 수 있다. 고조파의 크기가 시간영역에서 볼 수 있듯이 주파수영역에서도 감소되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 180도 위상차를 가지는 두 개의 스위치를 통하여 전류 리플을 감소시킬 뿐 아니라, 전체의 전력분배 등을 통



(a) PWM



(b) RPWM



(c) Interleaved RPWM

그림 21. 주파수 영역에서의 전류 고조파  
Fig. 21. Current harmonics in frequency domain.

하여 고조파를 제거 하는데 기존의 방식보다 더 좋은 효과를 보인다.

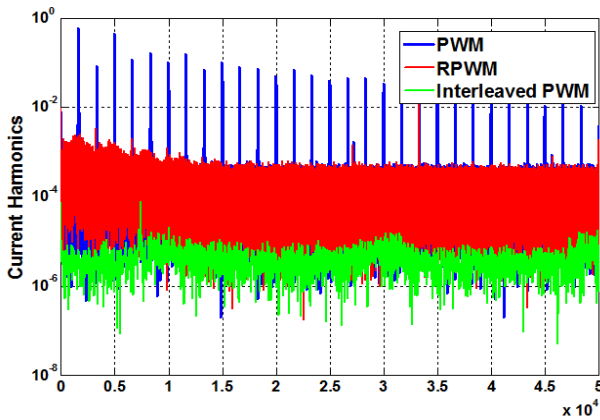


그림 22. 주파수 영역에서의 로그스케일로 표현된 전류 고조파 성분을 비교한 그림

Fig. 22. Comparison current harmonics in frequency domain by log scale.

그림 19는 y축 값을 로그스케일로 변환하여 각각의 방법을 비교한 것이며, 앞의 결과를 더욱더 잘 보여주는 그래프이다. 제안하는 방식인 인터리브드 방식이 시뮬레이션과 실험 결과 모두 제일 우수하며, 기존의 방법의 단점을 보완하는 방식임을 증명하였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 DC-DC 컨버터의 전도성 노이즈 감소를 위하여 Random PWM 기술을 적용한 인터리브드 Buck 컨버터에 대한 시스템을 제안하였다. 실험 내에서 Pseudo random bit sequence(PRBS)를 이용하여 PRBS의 상태에 따라 임의의 신호를 만들었으며, 이를 이용하여 Buck 컨버터를 구동하는 RPWM 신호를 만들 수 있었다. 임의의 신호를 이용하여 기존에 스위칭 주파수마다 주요하게 발생하는 고조파를 넓은 주파수 대역으로 확산시켜 크기를 줄일 수 있었으나, 그 크기의 감소폭은 크지 않았다. 이에 따라 본 논문에서는 인터리브드 Buck 컨버터 시스템을 제안하였으며, 이는 하나의 스위치를 더한 구조이며 각각의 스위치가 서로 180도의 위상차를 두어 회로 내의 발생하는 리플을 감소시키며, 스위칭 손실을 감소시켜, 스위칭을 할 때마다 생기는 잡음을 억제하는 것을 시간영역

과 주파수영역에서 모두 확인할 수 있었다. 기존의 PWM과 RPWM 방식을 이용하였을 때와 비교하였을 때 시뮬레이션과 실험결과, 모두 제안하는 방식인 인터리브드 방식에서 고조파가 제일 효율적으로 저감되는 것을 확인할 수 있었다.

#### References

- [1] Henry W. Ott, *Electromagnetic Compatibility Engineering*, John Wiley & Sons, pp. 172-184, 2009.
- [2] K. K. Tse, Henry Shu-hung Chung, "A comparative investigation on the use of random modulation schemes for DC/DC converters", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 2, pp. 253-263, Apr. 2000.
- [3] Ki-Seon Kim, Young-Gook Jung, and Young-Cheol Lim, "A new hybrid random PWM scheme", *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 24, no. 1, pp. 192-200, Jan. 2009.
- [4] Morteza Esteki, Behzad Poorali, Ehsan Adib, and Hosein Farzanehfard, "Interleaved buck converter with continuous input current, extremely low output current ripple, low switching losses, and improved step-down conversion ratio", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 8, pp. 4769-4776, Aug. 2015.
- [5] V. Krishnakumar, V. Kamaraj, and S. Jeevananthan, "Random pulse width modulation for performance improvement of brushless DC motor drive", *IEEE Transaction on Electrical Energy Systems*, pp. 157-163, Jan. 2014.
- [6] Yen-Shin Lai, "Novel random-switching PWM Technique with constant sampling frequency and constant inductor average current for digitally controlled converter", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 8, pp. 3126-3135, Aug. 2013.
- [7] Young-Cheol Lim, Seog-Oh Wi, Jong-Nam Kim, and Young-Gook Jung, "A pseudorandom carrier modulation scheme", *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 25, no. 4, pp. 797-805, Apr. 2010.

이 승 현



2014년 8월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학사)  
2014년 9월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정  
[주관심분야] EMI/EMC, Filter Design

나 완 수



1984년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)  
1986년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)  
1991년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학박사)  
1991년~1993년: SSCL Guest Collaborator  
1993년~1995년: 한국전기연구원 선임연구원  
1995년~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 교수  
[주관심분야] Signal Integrity, Power Integrity, EMI/EMC

이 근 봉



2014년 2월: 충북대학교 전기공학과 (공학사)  
2016년 2월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학석사)  
2016년 3월~현재: SK 하이닉스 연구원  
[주관심분야] EMI/ EMC, Filter Design