

오프셋 전압을 이용한 일정 스위칭 주파수의 Random PWM 기법

김도겸¹, 김상훈[†]

A Novel Random PWM Technique with a Constant Switching Frequency Utilizing an Offset Voltage

Do-Kyeom Kim¹ and Sang-Hoon Kim[†]

Abstract

This study proposes a novel random pulse-width modulation (PWM) technique with a constant switching frequency utilizing a random offset voltage. The proposed PWM technique spreads switching harmonics by varying the position of an active voltage vector without a switching frequency variation. The implementation of the proposed PWM technique is simple because it does not require additional hardware and complex algorithm. The proposed random PWM technique is compared with the conventional PWM technique on the factors of harmonic spectrum, total harmonic distortion, and harmonic spread factor to confirm the harmonic spread effect. The validity of the proposed method is verified by simulations and experiments on a three-phase inverter drive system.

Key words: Random PWM, Harmonic spectrum, HSF(Harmonic Spread Factor), THD(Total Harmonic Distortion)

1. 서 론

최근 교류 전동기 구동 분야와 교류 전원장치 분야에서 통상 PWM 인버터가 사용된다. PWM 인버터를 제어할 시 인버터의 고조파 특성은 인버터 변조기법의 주요 평가요소 중 하나이다. PWM 출력전압에는 스위칭 주파수와 그 배수의 주파수 및 이들 성분들의 측파대(Sideband)에 해당하는 특정 주파수 대역에서 고조파가 집중적으로 발생한다^[1]. 이런 고조파들은 소음과 진동을 유발하며 전자기파 간섭(EMI) 문제도 발생시키게 된다^[2]. 이와 같이 특정 대역에 분포하는 고조파로 인한 영향을 줄이기 위한 여러 연구가 진행되어 왔다^[3]. 그 예로, 20kHz 이상으로 스위칭 주파수를 높여 가청주파수

대역에서 발생하는 소음을 줄이는 방법이 대표적이다. 하지만 스위칭 주파수가 높을수록 스위칭 손실은 증가하게 되고 대용량의 인버터에서는 스위칭 주파수를 높이기 힘든 어려움이 있다.

스위칭 주파수를 높이지 않고 이런 문제를 해결하기 위한 PWM 기법으로는 Random PWM(RPWM) 기법이 있다^[4]. RPWM 기법은 구현 기법에 따라 스위칭 주파수를 랜덤하게 변조하는 Random Carrier Frequency PWM(RCFPWM) 기법^{[5],[6]}과 스위칭 주파수를 일정하게 유지하면서 전압변조주기 내에서 유효 전압의 위치를 변동시키는 Random Pulse Position PWM(RPPPWM) 기법^[7]의 두 가지 형태로 분류된다. RCFPWM 기법은 가변 주파수 반송파를 발생시키기 위한 아날로그 회로가 필요하고 전압 변조 주기가 지속적으로 바뀌기 때문에 전류 대역폭 선정에 대한 영향이 있다. RPPPWM 기법은 각 상의 게이트 펄스의 크기를 고려하여 스위칭 시간을 계산한 후 프로그램을 해야 하고 전압 변조 지수(MI)가 높은 경우에는 랜덤 특성이 낮아지는 단점이 있다.

본 논문에서는 일정 스위칭 주파수의 3상 인버터 구동 시스템에서 오프셋 전압 변동을 이용하는 새로운

Paper number: TKPE-2017-22-1-9

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: kshoon@kangwon.ac.kr, Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Kangwon National University

Tel: +82-33-250-6293 Fax: +82-33-259-5674

¹ Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Kangwon National University

Manuscript received Nov. 1, 2016; revised Nov. 16, 2016; accepted Dec. 7, 2016

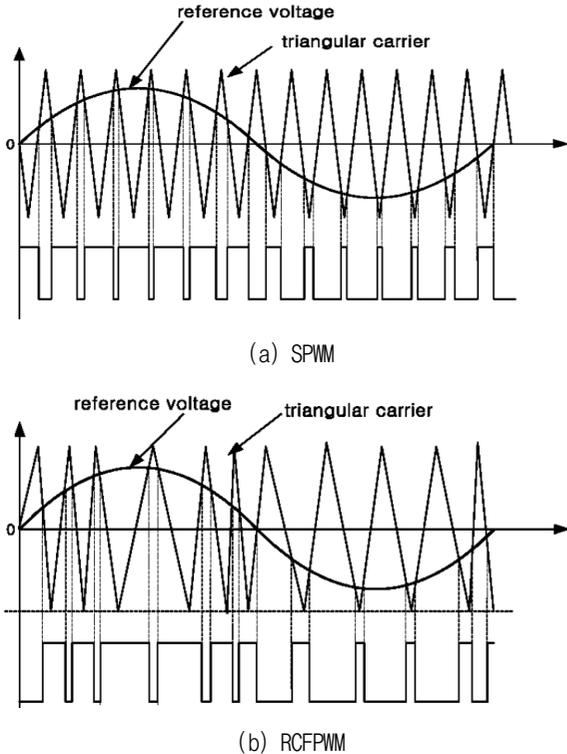


Fig. 1. Switching patterns with PWM technique.

Random PWM 기법을 제안한다. 제안된 기법은 추가적인 회로 및 복잡한 알고리즘의 요구 없이 간단하게 구현할 수 있다. 3상 인버터 구동 시스템에 대한 시뮬레이션 및 실험을 통해 제안된 기법이 특정 주파수 대역에 집중된 고조파를 적절하게 확산시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 일반적인 PWM 기법과 제안된 기법을 사용하여 얻어진 HSF(harmonic spread factor)와 THD를 통해 본 연구의 타당성을 확인하였다.

2. Random PWM 기법

RPWM 기법은 그 구현 기법에 따라 두 가지 형태로 시도 되었는데 스위칭 주파수를 가변 하는 RCFPWM 기법과 스위칭 주파수를 가변하지 않는 RPPPWM 기법으로 나뉘게 된다.

2.1 Random Carrier Frequency PWM

이 기법은 삼각 반송파의 주파수를 매 스위칭 구간마다 랜덤하게 변화시키는 방법이다. 이 때, 삼각 반송파의 파형은 연속적이어야 할 뿐만 아니라 선형성도 유지해야한다. 이 조건을 만족시키기 위해서는 파형이 첨두치에 도달하였을 때 반송파의 기울기를 제어할 수 있도록 정교한 샘플/홀드(sample/hold) 회로가 필요하다. 이 기법은 부가적인 하드웨어가 필요하기 때문에 시스템이 복잡하게 되고 비용이 증가하는 단점을 가진다. 또한 전압 제어 주기가 지속적으로 바뀌기 때문에 전류 제어대역폭 선정에 영향을 준다. 그림 1은 통상적인 SPWM

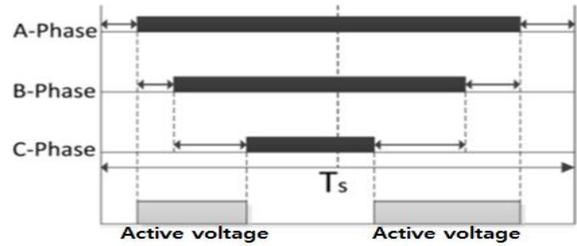


Fig. 2. Range for each phase gate pulse with RPPPWM technique.

기법과 RCFPWM 기법에서의 스위칭 패턴을 비교하고 있다.

2.2 Random Pulse Position PWM^[8]

이 기법은 삼각 반송파의 주파수는 일정하게 유지시키면서 유효전압의 위치를 변조 구간 내에 앞 또는 뒤로 랜덤하게 위치시켜 반송파 주파수를 변경하는 방법과 비슷한 효과를 얻는 방식이다. 이 RPPPWM 기법의 구현과정은 다음과 같다.

먼저 PWM 기법에 의한 각상의 게이트 펄스를 계산하고, 각 상중에서 가장 게이트 펄스가 큰 상을 선택한다. 전압 변조 구간 내에서 게이트 펄스가 위치할 수 있는 범위를 설정하고, 이 범위 내에 들도록 랜덤 수를 발생하여 게이트 펄스를 위치시킨다. 그 다음에 크기가 두 번째로 큰 게이트 펄스가 가장 큰 게이트 펄스의 폭을 벗어나지 않는 범위 내의 임의의 위치로 위치시킨다. 세 번째 상의 게이트 펄스 위치도 같은 방식으로 결정한다. 그림 2는 RPPPWM 기법을 적용했을 때 각 상 게이트 펄스의 크기와 위치할 수 있는 영역을 나타낸다.

이와 같이 이 기법은 각 상의 게이트 펄스의 크기를 고려하여 스위칭 시간을 계산해야 하는 복잡성이 존재하고, 전압 변조 지수(MI)가 커질수록 유효 전압을 랜덤하게 위치시킬 수 있는 자유도의 감소에 따라 랜덤 특성이 감소한다는 단점이 있다. 제안된 Random PWM 기법은 위와 같은 구현과정 없이 단순히 전압 변조 지수를 계산하여 Random 육상 전압을 사용하는 것만으로 간단하게 적용이 가능하다.

3. 제안된 Random PWM

본 논문에서는 일정 스위칭 주파수의 인버터 구동 시스템에서 육상 전압 변동을 이용하는 새로운 Random PWM 기법을 제안한다.

3.1 육상 전압을 이용한 전압 변조 방식^[9]

육상 전압을 이용한 전압 변조 방식은 기존의 여러 전압 변조 기법들을 통합적인 개념으로 쉽게 구현할 수 있도록 하는 통합형 전압 변조 기법이다. 그림 3과 같이

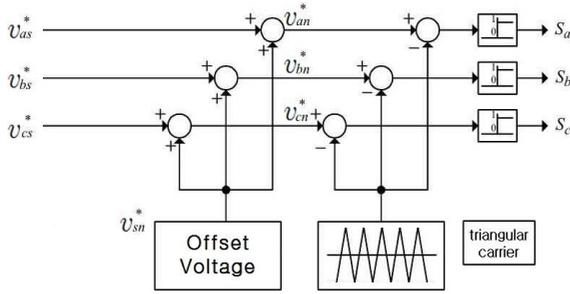


Fig. 3. Voltage modulation using an offset voltage.

여러 변조 기법들을 삼각파 비교 방식으로 구현할 수 있다. 인버터의 출력 전압인 극전압은 각 상 스위치 On/Off 상태에 따라 바로 결정된다. 역으로 보면 각 상 스위치의 상태를 결정하는 전압(삼각 반송파와 비교되는 전압)은 극전압 지령이라 할 수 있다. 극전압 지령은 식 (1)과 같이 상전압 지령과 옵셋 전압의 합으로 표현된다.

$$v_{an}^* = v_{as}^* + v_{sn} \quad (1)$$

SPWM에서는 상전압 지령이 바로 극전압 지령이다. 따라서 옵셋전압 v_{sn} 은 0이다. SVPWM 방식의 경우 유효 전압은 언제나 전압 변조의 한주기 내에 정중앙에 위치한다. 이 원리를 이용하여 구현해준다면 기존의 대칭 공간 벡터 전압 변조 방식을 삼각파 비교 PWM 기법으로 구현할 수 있다. 이를 위해 다음과 같은 조건을 만족시키는 옵셋 전압을 이용하면 된다^[9].

$$\begin{aligned} V_{max}^* + v_{sn} &= -(V_{min}^* + v_{sn}) \\ \Rightarrow v_{sn} &= -\frac{V_{max}^* + V_{min}^*}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

전압 변조 시 상전압 지령은 순수 정현파로 항상 동일하지만 옵셋 전압에 따라 극전압 지령이 달라질 수 있으며 이에 따라 선형 변조 영역의 범위, 고조파 특성, 스위칭 손실 등의 여러 변조 성능이 달라질 수 있다. 이러한 옵셋 전압 v_{sn} 은 임의의 값으로 선정 할 수 있다. 상전압 지령에 동일한 옵셋 전압을 더해 주어 생성된 극전압을 가지고 전압을 변조하더라도, 실제 부하의 선 간전압과 상전압에는 그 전압 성분은 나타나지 않기 때문이다. 그러나 이러한 옵셋 전압의 크기에는 제한이 있다. 선형 변조 영역에서의 동작을 위해 삼각 반송파와 비교되는 극전압 지령치가 항상 다음과 같은 조건을 만족하도록 옵셋 전압의 크기를 선정해야 한다.

$$-\frac{V_{dc}}{2} \leq v_{an}^*, v_{bn}^*, v_{cn}^* \leq \frac{V_{dc}}{2} \quad (3)$$

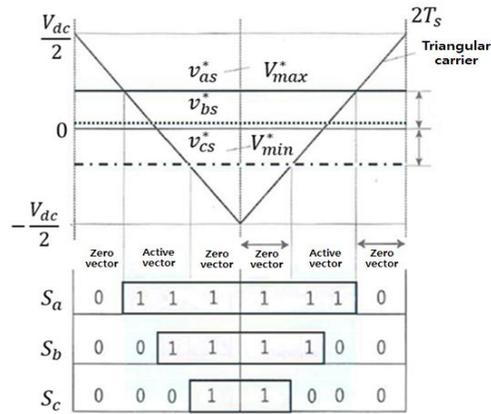


Fig. 4. SVPWM using an offset voltage.

이 범위 내에서 임의로 옵셋 전압을 선정하여 다양한 극전압 지령의 생성을 가능하게 한다. 따라서 옵셋 전압은 다양한 변조 방식의 생성을 위한 자유도라 할 수 있다. 그림 4는 옵셋 전압을 이용하여 대칭 공간 벡터 변조 방식을 구현한 것을 보여준다.

3.2 옵셋 전압을 이용한 Random PWM

본 논문에서 제안된 RPWM 다음과 같다. Random 변수를 옵셋 전압으로 활용하였으며 SPWM과 SVPWM 기법 두 가지 기법에 대해서 추가적인 Random 옵셋 전압으로 스위칭 주기마다 변하는 Random 변수를 더해 주어 유효전압의 위치를 랜덤하게 위치시키는 Random PWM 기법을 구현하였다. Random 변수는 v_{rd} 로 표현한다. 또한, 편의상 SPWM 기법에서 v_{rd} 를 활용한 Random PWM을 Random(S), SVPWM 기법에서 v_{rd} 를 활용한 Random PWM을 Random(SV)로 표현하였다. 즉, 상전압 지령과 극전압 지령이 정현파로 동일한 SPWM을 활용한 Random(S)의 옵셋 전압 v'_{sn} 은

$$v'_{sn} = v_{rd} \quad (4)$$

SVPWM을 활용한 Random(SV)의 옵셋 전압 v''_{sn} 은

$$v''_{sn} = -\frac{V_{max}^* + V_{min}^*}{2} + v_{rd} \quad (5)$$

로 표현할 수 있다.

앞 절에서 언급했듯이 극전압 지령은 $-\frac{1}{2}V_{dc} \sim \frac{1}{2}V_{dc}$ 범위 내의 값을 가져야 한다. 제안된 기법을 적용할 때도 이 범위내의 값을 가지도록 v_{rd} 의 범위를 지정하였다. 예를 들어 MI가 0.2인 조건일 경우, 최대 MI가 1인 Random(S)에서는 Random 변수의 값을 0.8의 MI에 해당하는 값으로 범위를 지정하였고 최대 MI가 1.15인

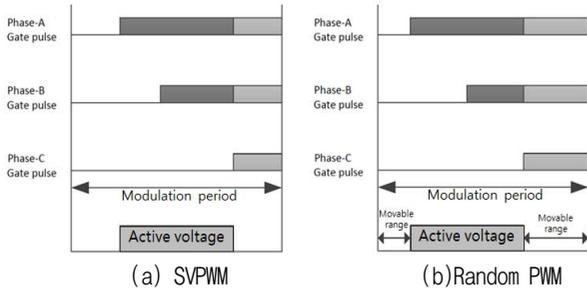


Fig. 5. Active voltage of 3-phase inverter.

Random(SV)에서는 0.95에 해당하는 값으로 범위를 지정하였다.

정현파 전압 변조 방식의 경우 유효 전압이 정중앙이 아닌 임의의 위치에 위치하게 되지만 대칭 공간 벡터 전압 변조 기법에서는 유효 전압의 위치는 항상 스위칭 주기 내에서 정중앙에 위치하게 된다. 제안된 기법을 활용하여 일정한 스위칭 주파수에서 유효 벡터의 위치를 랜덤하게 위치시켜 집중된 고조파들을 확산시켰다. 대칭 공간 벡터 전압 변조 기법과 제안된 Random PWM의 유효 전압 위치는 그림 5에 나타내었다.

제안된 Random PWM 기법의 고조파 스펙트럼 확산 효과를 평가하기 위해 확률이론의 표준편차 개념인 고조파 확산 지수(HSF: Harmonic Spread Factor)를 도입한다^[10].

$$HSF = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j>1}^N (H_j - H_0)^2} \quad (6)$$

$$H_0 = \sum_{j>1}^N (H_j) / (N-1) \quad (7)$$

여기서 H_j 는 j 번째의 개별 고조파의 크기를 말하며, H_0 는 'N-1'개의 고조파의 평균을 의미한다. 최상의 고조파 확산효과는 HSF가 0인 경우이며, 이는 이상적인 백색 잡음의 조건과 같다. 또한, Random PWM 기법을 적용함으로써 고조파 특성이 나빠 질수도 있기 때문에 전고조파 왜율(THD: total harmonic distortion)에 대해서도 분석했다.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{j>1}^N V_j^2}}{V_1} \quad (8)$$

식(8)에서 V_1 은 출력전압 기본파의 rms 값이고 V_j 는 j 차고조파의 rms 값을 의미한다.

4. 시뮬레이션 결과

제안된 Random PWM 기법에 대한 타당성을 시뮬레이션을 통해 확인했다. PSIM을 시뮬레이션 프로그램으

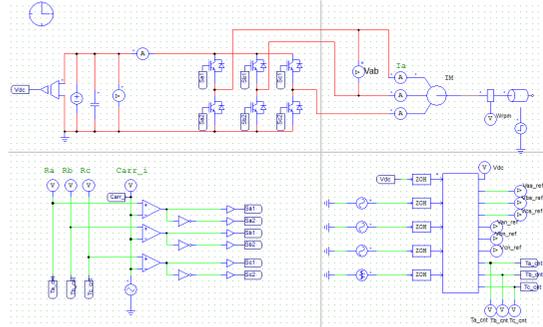
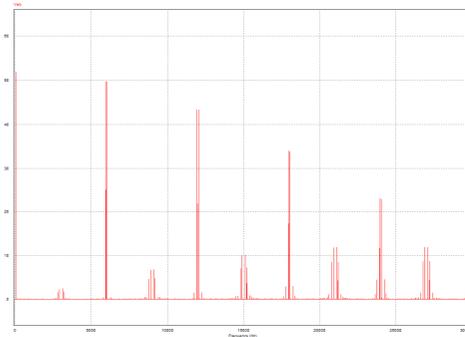
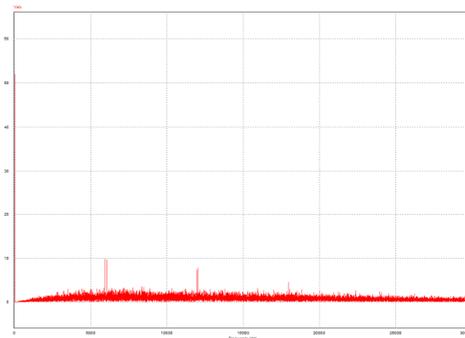


Fig. 6. Simulation block diagram.



(a) SVPWM (MI = 0.2)

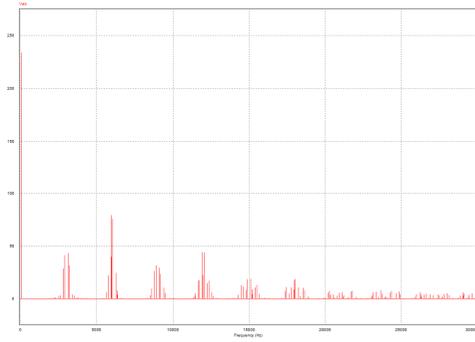


(b) Random PWM (MI = 0.2)

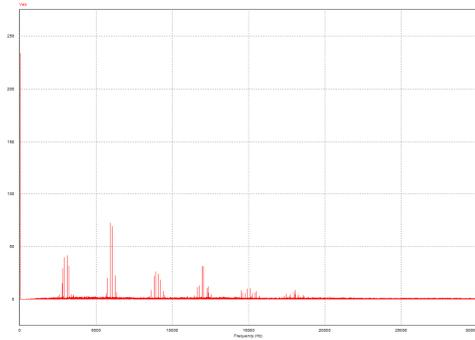
Fig. 7. Harmonic spectrum : simulation results.
(x-axis : 5[kHz/DIV], y-axis: 10[V/DIV])

로 사용하였고 PSIM 내의 C-block을 이용하여 디지털 제어를 수행했다. 시뮬레이션은 스위칭 주파수 3kHz, 운전 주파수 50Hz인 조건에서 실행되었으며 0.2에서 0.9까지의 MI에 대해서 고조파 특성을 확인하였다. 추가적으로 낮은 스위칭 주파수 조건에서 제안된 기법의 유효성을 알아보기 위해 1kHz의 스위칭 주파수에서도 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 6은 시뮬레이션 블록도를 보여준다.

그림 7, 8, 9는 스위칭 주파수가 3kHz인 조건에서의 고조파 스펙트럼 및 HSF의 결과를 보여준다. 그림 7(a)는 MI가 0.2일 때, SVPWM 기법에서 선간전압의 고조파 스펙트럼을 보여준다. 스위칭 주파수의 정수배인 특정 주파수 대역에서 고조파가 집중됨을 알 수 있다. 가



(a) SVPWM (MI = 0.9)



(b) Random PWM (MI = 0.9)

Fig. 8. Harmonic spectrum : simulation results.
(x-axis : 5[kHz/DIV], y-axis: 50[V/DIV])

장 크기가 큰 고조파는 기본파 크기의 95% 정도의 크기를 가진다. 그림 7(b)는 제안된 Random PWM 기법에서의 고조파 스펙트럼이다. 특정 주파수 대역에 집중된 고조파가 확산되었으며 가장 크기가 큰 고조파의 크기도 기본파 크기의 약 19%로 현저히 줄었다. 그림 8(a)는 MI가 0.9일 때, SVPWM 기법에서 선간전압의 고조파 스펙트럼을 보여준다. MI가 0.2인 조건에서와 마찬가지로 특정 주파수 대역에서 고조파가 집중되긴 하였지만 가장 크기가 큰 고조파의 상대적인 크기는 기본파 크기의 약 35%로 줄어들었음을 확인할 수 있다. 그림 8(b)는 제안된 Random PWM 기법에서의 고조파 스펙트럼이다. MI가 0.2인 조건과 비교하여 고조파 확산의 효과가 줄어들었으며 가장 크기가 큰 고조파의 상대적인 크기도 기본파 크기의 약 31%로 감소량도 줄어들었다.

그림 8(a)는 MI가 0.9일 때, SVPWM 기법에서 선간전압의 고조파 스펙트럼을 보여준다. MI가 0.2인 조건에서와 마찬가지로 특정 주파수 대역에서 고조파가 집중되긴 하였지만 가장 크기가 큰 고조파의 상대적인 크기는 기본파 크기의 약 35%로 줄어들었음을 확인할 수 있다. 그림 8(b)는 제안된 Random PWM 기법에서의 고조파 스펙트럼이다. MI가 0.2인 조건과 비교하여 고조파 확산의 효과가 줄어들었으며 가장 크기가 큰 고조파의 상대적인 크기도 기본파 크기의 약 31%로 감소량도 줄어들었다.

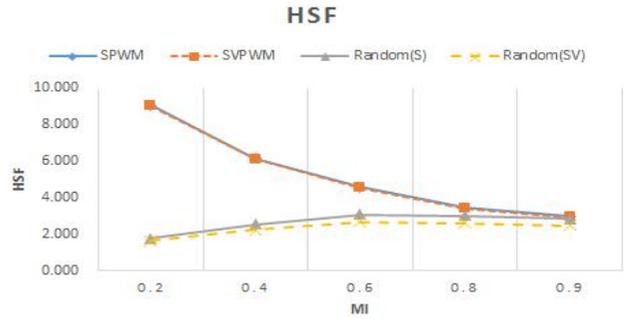


Fig. 9. HSF : simulation result ($f_{sw} = 3\text{kHz}$).

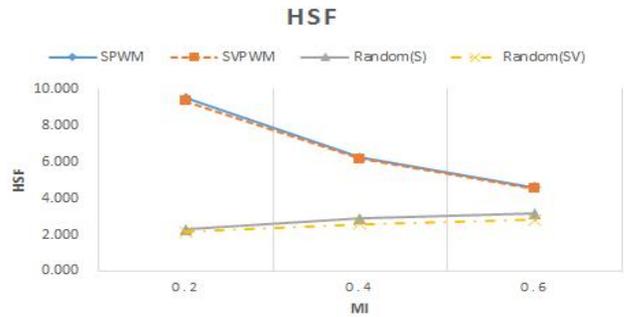


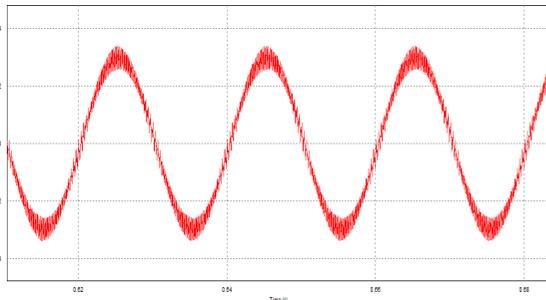
Fig. 10. HSF : simulation result ($f_{sw} = 1\text{kHz}$).

스위칭 주파수가 3kHz일 때, HSF의 결과는 그림 9에 나타난다. 일반적인 PWM 기법의 경우 MI가 커질수록 HSF가 감소했다. 이는 그림 7(a)와 그림 8(a)의 비교로도 확인 가능하다. 제안된 Random PWM은 일종의 Random Pulse Position PWM 기법이기 때문에 MI가 낮을수록 유효전압을 랜덤하게 위치시킬 수 있는 자유도의 증가로 더욱 좋은 랜덤 특성을 보였으며 SVPWM을 이용한 Random(SV)가 Random(S)보다 조금 더 우수한 특성을 보였다. HSF의 감소율에 대해서 분석해보면, Random PWM을 적용했을 경우 일반적인 PWM을 적용했을 때보다 HSF가 M=0.2인 조건에서 약 82% 감소했으며 MI=0.9인 조건에서는 약 17% 감소했다. 그림 10에는 스위칭 주파수가 1kHz로 낮은 조건에서의 고조파 확산효과가 표현되어있다. 3kHz의 스위칭 주파수에서의 결과와 마찬가지로 MI가 낮을수록 집중된 고조파 확산 효과가 좋았고 Random(SV)가 Random(S)보다 조금 더 좋은 랜덤 특성을 보였다. HSF의 감소율은 MI=0.2인 조건에서 Random PWM을 적용했을 때 일반적인 PWM 기법을 적용했을 때보다 HSF가 약 78% 감소했으며 MI=0.6인 조건에서는 약 38% 감소했다.

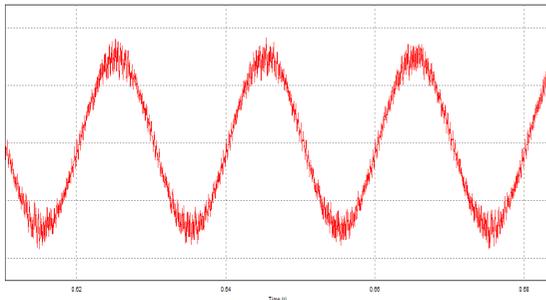
표 1은 3kHz의 스위칭 주파수 조건에서 각각의 PWM 기법에 대한 선간전압의 THD 결과이다. MI가 낮아질수록 THD 특성은 나빠졌으며 동일한 MI에서 제안된 Random PWM 기법을 적용해도 선간전압의 THD는 거의 동일했다.

TABLE I
THD(LINE VOLTAGE) : SIMULATION RESULT

MI	THD			
	SPWM	SVPWM	Random(S)	Random(SV)
0.2	252.31%	251.66%	252.09%	252.48%
0.4	163.66%	163.34%	163.59%	163.69%
0.6	120.38%	120.24%	120.58%	120.49%
0.8	91.53%	91.53%	91.63%	91.46%
0.9	79.52%	79.51%	79.55%	79.60%



(a) SVPWM (MI = 0.6)



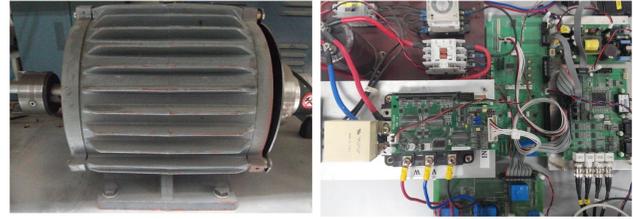
(b) Random PWM (MI = 0.6)

Fig. 11. Phase current waveforms of each PWM method.

그림 11은 3kHz의 스위칭 주파수 조건에서 MI가 0.6일 때, SVPWM 기법과 제안된 Random PWM 기법에 대한 상전류의 파형이다. 유효전압을 랜덤하게 위치시켜 특정 주파수 대역에 집중된 고조파를 확산시키는 제안된 기법의 특성상 상전류의 THD는 SVPWM 기법의 경우 약 9%에서 제안된 기법을 적용하였을 경우 약 10.5%로 전류 THD 특성에 약 1.5% 정도 영향을 주었다. 하지만 제안된 기법을 적용함에 따른 효율의 변화는 거의 없었다.

5. 실험 결과

실험을 통해서도 제안된 기법의 타당성을 확인 하였다. 실험을 위해 그림 12와 같은 실험시스템을 구성하였다. 제안된 기법을 적용하기 위해 디지털 제어보드의

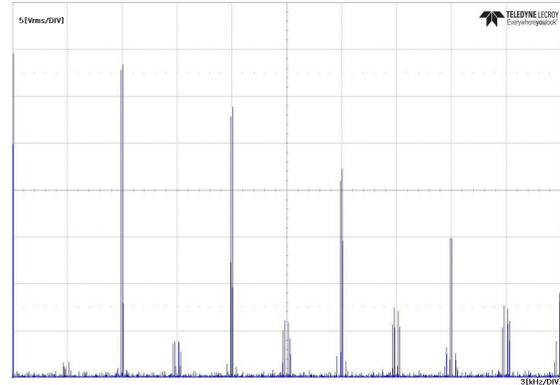


(a)

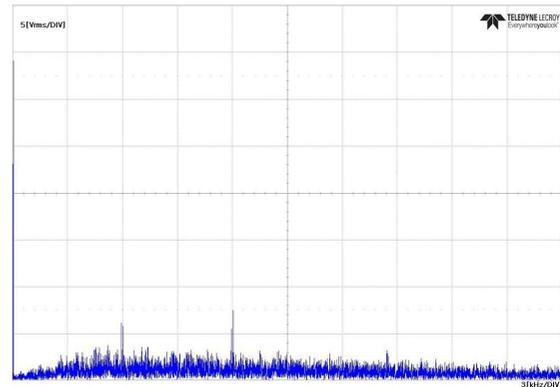
(b)

Fig. 12. Experimental system.

(a) 3.7kW induction motor (b) control board and inverter



(a) SVPWM (MI=0.2)

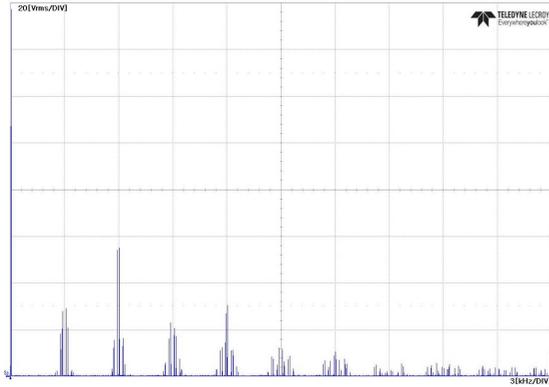


(b) Random PWM (MI=0.2)

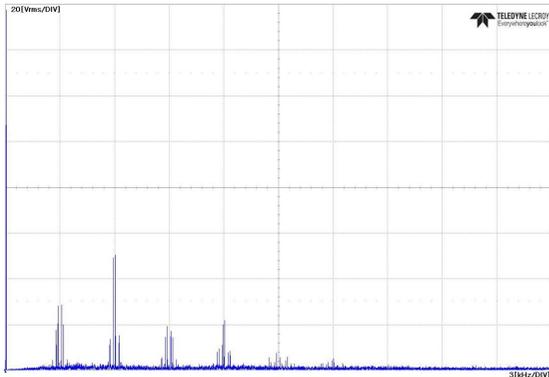
Fig. 13. Harmonic spectrum : experimental results.
(x-axis : 3[kHz/DIV], y-axis: 5[Vrms/DIV])

CPU는 Texas Instruments사의 TMS320F28335(DSC: Digital system controller)를 사용하였고, 3상 IGBT 인버터를 사용하였다. 실험은 시뮬레이션 조건과 마찬가지로 스위칭 주파수 3kHz, 운전주파수 50Hz인 조건에서 0.2에서 0.9까지의 전압 변조 지수에 대한 고조파 특성을 살펴보았다.

그림 13은 MI가 0.2인 조건일 때, SVPWM 기법과 제안된 Random PWM 기법에 대한 선간전압의 고조파 스펙트럼을 보여준다. 일반적인 PWM 기법을 적용하였을 경우 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 특정 주파수 대역에 고조파가 집중되었으며 가장 크기가 큰 고조파의 상대적인 크기도 기본파 크기의 약 95% 정도로 고조파



(a) SVPWM (MI=0.9)



(b) Random PWM (MI=0.9)

Fig. 14. Harmonic spectrum : experimental results. (x-axis : 3[kHz/DIV], y-axis: 20[Vrms/DIV])

확산 효과의 측면에선 나쁜 특성을 가진다. 제안된 Random PWM 기법을 적용하였을 경우 집중된 고조파들을 확산시킬 수 있었으며 크기가 가장 큰 고조파의 상대적인 크기도 약 18%로 매우 줄어들었다. MI가 0.9인 조건에서 선간전압의 고조파 스펙트럼은 그림 14에 보인다. 제안된 Random PWM 기법을 적용하였을 때의 고조파 확산 효과는 MI가 0.2일 때에 비해서 미미하였으며 가장 크기가 큰 고조파의 상대적인 크기에 대해서 검토해보면 SVPWM 기법에서는 기본파 크기의 약 35%, 제안된 Random PWM 기법의 경우 기본파 크기의 약 32% 정도의 크기를 가졌다.

그림 15는 실험을 통해 구한 HSF를 보여준다. MI가 낮을수록 제안된 기법의 고조파 확산 효과가 더욱 좋았으며 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 Random(SV)를 적용시켰을 때 Random(S)의 경우보다 조금 더 우수한 랜덤 특성을 보였다. HSF의 감소율은 MI=0.2인 조건에서 Random PWM 기법을 적용했을 때, 일반적인 PWM 기법을 적용했을 때보다 HSF가 약 76% 감소했으며 MI=0.9인 조건에서는 약 16% 감소했다. 기존의 Random PWM 기법 중 하나인 RCFPWM 기법의 경우 MI가 0.2인 조건에서 일반적인 PWM 기법과 비교하여 HSF가 약 18% 감소하였으며 MI가 0.8인 조건에서 약 25% 감

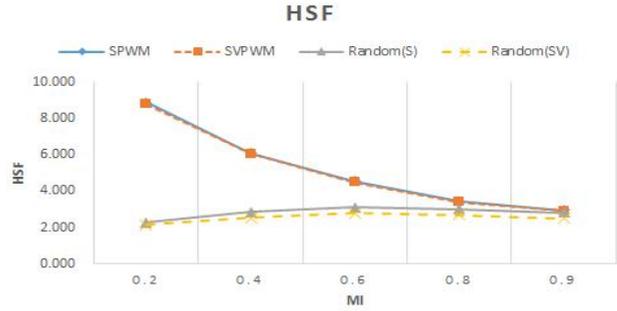


Fig. 15. HSF : experimental result.

TABLE II
THD(LINE VOLTAGE) : EXPERIMENTAL RESULT

MI	THD			
	SPWM	SVPWM	Random(S)	Random(SV)
0.2	236.08%	230.09%	235.68%	235.14%
0.4	157.61%	157.63%	157.76%	157.31%
0.6	121.49%	121.55%	121.45%	121.52%
0.8	95.53%	95.50%	95.54%	95.40%
0.9	76.86%	76.91%	76.85%	76.70%

소하였다^[11]. 제안된 Random PWM 기법은 전압 변조 지수가 낮은 조건에서 더욱 좋은 랜덤 특성을 보임을 기존의 Random PWM 기법과의 비교를 통해서도 확인할 수 있다.

표 2는 실험을 통해 구한 선간전압의 THD를 보여준다. 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 MI가 높아질수록 THD 특성이 좋아졌으며 제안된 기법을 적용해도 선간전압의 THD 특성에는 영향을 주지 않는다는 것을 실험을 통해서도 증명하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 일정한 스위칭 주파수에서 Random 육섯 전압을 이용하는 새로운 Random PWM 기법을 제안하였다. 제안된 Random PWM 기법은 유효 전압의 위치를 전압 변조 구간 내에서 랜덤하게 위치시켜 소음과 진동을 유발하게 되는 특정 주파수 대역에 집중된 고조파들을 확산시키는데 목적을 두었다. 시뮬레이션과 실험을 통해 구한 HSF를 확인하여 제안된 기법의 유효성을 확인하였다. 스위칭 주파수가 일정한 상태에서 유효전압 위치의 변화로 집중된 고조파들을 확산시키는 제안된 기법의 특성상 유효 전압을 랜덤하게 위치시킬 수 있는 자유도의 영향을 받기 때문에 MI가 낮은 조건에서 더욱 우수한 랜덤 특성을 보였다. 또한, 동일한 MI 조건에서 제안된 기법을 사용함에 따른 선간전압의 THD의 변화는 거의 없었으며 상전류의 THD 특성에 약 1.5%정도 영향을 주기는 하였지만 효율에는 변화가 없음 3상

인버터 구동시스템에 대한 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 제안된 기법은 낮은 스위칭 주파수 조건에서도 동일한 효과를 보였으며 대용량의 3상 및 단상 인버터 구동시스템에서 적용가능하다. 또한, 제안된 Random PWM 기법은 SPWM 기법과 SVPWM 기법에만 국한되지 않고 어떠한 PWM 기법에도 적용가능하며 종전에 연구되었던 Random PWM 기법들과 비교하여 추가적인 하드웨어 및 복잡한 알고리즘에 대한 어려움 없이 간단하게 구현할 수 있다.

본 논문은 2016년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음.(관리번호-520160224)

References

- [1] C. M. Liaw, Y. M. Lin, C. H. Wu, and K. I. Hwu, "Analysis, design and implementation of a random frequency PWM inverter," *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 15, No. 5, pp. 843-854, Aug. 2000.
- [2] Y. S. Lai, "New random technique of inverter control for common mode voltage reduction of inverter-fed induction motor drives," *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 14, No. 4, pp. 1139-1146, Aug. 1999.
- [3] J. Holtz, P. Lammert, and W. Lotzkat, "High-speed drive system with ultrasonic MOSFET PWM inverter and single-chip microprocessor control," *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. 23, No. 6, pp. 1010-1015, Apr. 1987.
- [4] B. R. Lin, "Implementation of non-deterministic pulse width modulation for inverter drives," *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System*, Vol. 36, No. 2, pp. 482-490, Apr. 2000.
- [5] Y. C. Lim, S. O. Wi, J. N. Kim, and Y. G. Jung, "A pseudo random carrier modulation scheme," *IEEE Transactions on Power Electronic*, Vol. 25, No. 4, pp. 797-805, Apr. 2010.
- [6] T. G. Habetler and D. M. Divian, "Acoustic noise reduction in sinusoidal PWM drives using a randomly modulated carrier," *IEEE Transactions on Power Electronic*, Vol. 6, No. 3, pp. 356-363, Jul. 1991.
- [7] M. M. Bech, F. Blaabjerg, and J. K. Pedersen, "Random modulation techniques with fixed switching frequency for three-phase power converters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 15, No. 4, pp. 753-761, Jul. 2000.
- [8] S. H. Na, Y. G. Jung, and Y. C. Lim, "A new space vector random PWM scheme for inverter fed drive systems," *Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 6, No. 6, pp. 525-537, Dec. 2001.
- [9] S. H. Kim, Motor Control - DC, AC, BLDC, CHAPTER 8, 2014.
- [10] K. S. Kim and Y. G. Jung, "A new hybrid random PWM scheme," *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 24, No. 1, pp. 192-200, Jan. 2009.
- [11] P. Sreeja and L. P. Suresh, "Center boosted sinusoidal pulse width modulation for three phase voltage source inverter," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, Vol. 8, No. 5, pp. 2195-2207, 2015.



김도겸(金道謙)

1991년 1월 31일생. 2015년 강원대 전기전자공학과 졸업. 2015년~현재 동 대학원 전기전자공학과 석사과정.



김상훈(金相勳)

1964년 9월 11일생. 1987년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1994년~1996년 대우중공업 철도차량 연구소 선임연구원. 1997년~현재 강원대 전기전자공학부 교수.