

# 랜덤 삼각파 캐리어를 적용한 하이브리드 랜덤 PWM(HRPWM)방식의 파워 스펙트럼

金起善<sup>\*</sup>, 鄭榮國<sup>†</sup>, 任永徹<sup>\*\*</sup>, 朴晟濬<sup>\*\*</sup>, 金坵憲<sup>\*\*</sup>

## Power Spectra of the Hybrid Random PWM(HRPWM) Technique Adopting a Random Triangular Carrier

Ki-Seon Kim, Young-Gook Jung, Young-Cheol Lim, Sung-Jun Park and Kwang-Heon Kim

### 요 약

본 연구에서는 유도 전동기의 파워 스펙트럼 확산을 위한 LF2407 DSP기반 하이브리드 랜덤 PWM(HRPWM)을 제안하였다. 제안된 방법은 Lead-Lag 랜덤 비트를 갖는 PRBS (Pseudo-Random Binary Sequence)와 논리적으로 비교를 하기 위한 랜덤 삼각파 캐리어로 구성된다. 또한 DSP에 의하여 랜덤 수 및 PRBS 그리고 3상 기준 정현파를 실시간으로 발생하며, DSP외부의 주파수 변조기 MAX038에 의하여 랜덤 주파수의 캐리어를 발생한다. 본 연구의 타당성 검증을 위하여 제안된 기법을 3상 가변속 구동장치에 적용하였으며, 종전의 방법과 전압 및 전류 그리고 전동기 소음의 파워 스펙트럼을 비교 검토하였다.

### ABSTRACT

This paper proposes a Hybrid Random PWM(HRPWM) technique using a LF2407 DSP board in order to spread the power spectra of an induction motor. The proposed method is composed to the PRBS (Pseudo-Random Binary Sequence) with the Lead-Lag random bit and the random triangular carrier for the logical comparison. Also, a DSP generates the random number, the PRBS and the three-phase reference signal, a MAX038 chip operating as frequency modulator generates the random triangular carrier. For verification of the proposed method, the experiments were conducted with a three-phase adjustable speed a.c drives, and the results of simulations and experiments are presented.

**Key Words** : Hybrid Random PWM(HRPWM), Random Bit Generator, PRBS(Pseudo Random Binary Sequence), Power Spectra Spread

### 1. 서 론

현재 산업현장의 가변속 장치로 광범위하게 적용되

고 있는 PWM 인버터 구동 유도전동기의 스위칭 소음은 쾌적한 작업 환경의 질을 저하시키는 증대한 요소로서 작용하고 있다. 고정 스위칭 주파수로 동작하는 인버터의 스위칭 소음 문제를 해결하기 위한 방법으로 랜덤 PWM이 주목 받고 있다<sup>[1]</sup>. 랜덤 PWM은 랜덤화된 펄스 위치 PWM(RPP)방법과 랜덤 스위칭 주파수 PWM(RSF)방법으로 나눌 수 있으며 여러 연구<sup>[2-4]</sup>에서 이들 방법들의 장단점들이 지적되고 있다.

한편 B.R. Lin<sup>[5,6]</sup>은 하드웨어만으로 랜덤 비트 발생

<sup>†</sup>교신저자 : 정희원, 대불대 컴퓨터정보공학부 조교수  
E-mail : jyg@mail.daebul.ac.kr  
<sup>\*</sup>학생회원, 전남대 대학원 전기공학과 석사과정  
<sup>\*\*</sup>정희원, 전남대 전기공학과 교수  
접수일자 : 2005. 6. 14      1차 심사 : 2005. 8. 30  
심사완료 : 2005. 9. 8

기의 PRBS 출력과 고정 주파수 캐리어에 상응하는 펄스를 논리적으로 비교하여 RPP를 구현하였다. B.R. Lin이 RPP를 위해 적용한 방법은 시프트 레지스터의 출력에 고정 주파수의 톱니파 또는 고정 주파수의 삼각파를 적용한 것이다. 톱니파에 의한 방법은 RLL(Random Lead-Lag)특성을 지니고 있으며, 삼각파에 의한 방법은 SVM(Space Vector Modulation)과 RLL이 혼합된 특성을 갖는다. 따라서 이 방법으로는 RPP의 근본적인 정수배 스위칭 주파수의 잔존 문제를 해결하기가 어렵다.

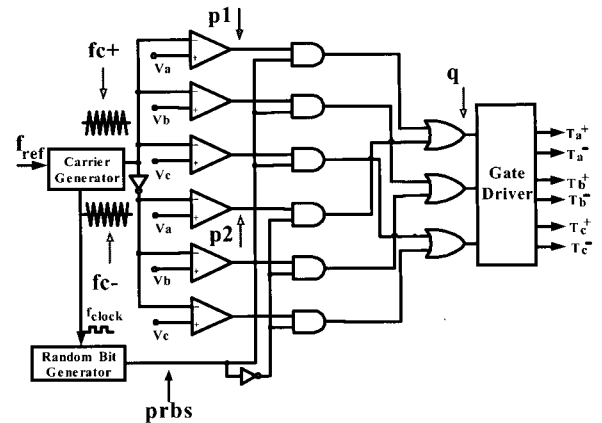
본 연구에서는 시프트 레지스터와 XOR게이트로 구성된 랜덤 비트 발생기의 PRBS와 논리적인 비교를 위한 삼각파 캐리어를 랜덤하게 하여 유도전동기 구동 장치의 파워 스펙트럼의 분산 효과를 개선하기 위한 하이브리드 랜덤 PWM(HRPWM)기법을 제안한다. 제안된 방법은 RPP의 특징과 RSF의 특징을 모두 갖고 있는 혼합형 랜덤 PWM의 모습을 보이고 있다. 본 연구의 타당성을 확인하기 위하여 LF2407 DSP기반의 1.5kW급 3상 유도전동기 구동장치를 제작하여 전동기 전압 및 전류 파형을 검토하였다. 전동기의 부하로는 기계적인 소음이 발생되지 않는 ECB(Eddy Current Brake)를 사용하였다. 그 결과, 전류파형은 종전의 고정 주파수 캐리어방법과 거의 동일한 파형을 유지하고 있으며, 전동기 전압 및 전류 그리고 전동기의 소음 스펙트럼은 종전의 방법보다 광대역 주파수로 확산할 수 있었다.

## 2. 이 론

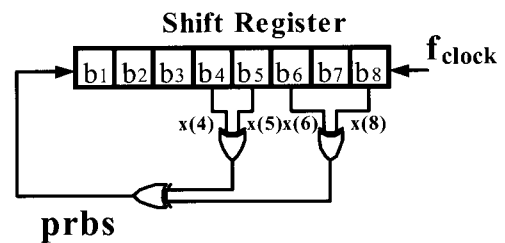
그림 1은 전형적인 논리조합을 사용한 HRPWM 발생회로<sup>[5-6]</sup>이며, 각 부분에 대한 파형을 그림 2와 그림 3에 각각 나타내었다. 우선 그림 1의 랜덤 비트 발생기는 시프트 레지스터와 XOR게이트의 조합으로 이루어져 있으며, Lead-Lag 랜덤 비트를 발생한다. 랜덤 비트 발생기의 출력 prbs는 다음으로 결정된다.

$$prbs = x(4) \oplus x(5) \oplus x(6) \oplus x(8) \quad (1)$$

여기서  $\oplus$ 기호는 XOR연산자를 의미하며,  $x(i)$ 는 레지스터의  $i$ 번째 비트이다. (1)로 정의되는 Lead-Lag 랜덤 비트를 갖는 PRBS는 캐리어에 상응하는 펄스  $p1$  및  $p2$ 와의 논리적인 비교로 펄스 위치를 랜덤하게 배치한다. 즉 RPP와 RSF를 서로 논리적으로 혼합하여 랜덤 펄스를 발생한다.



(a) Logical comparison circuit



(b) Random bit generator

그림 1 전형적인 HRPWM 발생회로  
Fig. 1 Typical HRPWM generation circuit

그림 2와 그림 3에는 각 부분에 대한 자세한 파형들을 나타내고 있다. 종전의 방법은 3상 정현파 신호  $V_{(abc)}$ 와 비교하기 위한 캐리어로 그림 2의  $fc+$ 와  $fc-$ 의 고정 주파수의 삼각파를 사용하고 있으며, 이때  $fc+$ 와  $fc-$ 는 서로 위상이 정반대이다. 이 방법은 비록 PRBS의 출력이 랜덤 비트의 prbs를 갖는다 해도 고정 주파수 삼각파로 인한 결과적인  $q$ 가 형성되므로  $q$ 에는 고정 스위칭 주파수 성분이 존재한다.

그림 3은 본 연구에서 제안된 방식을 나타내고 있다. 이 방법은 그림 3에서 나타난  $fc+$ 와  $fc-$ 의 랜덤 삼각파 캐리어를 사용하기 때문에 그림 2의 고정 주파수 캐리어로부터 발생하는 특정 주파수대의 스펙트럼을 광대역으로 확산시킬 수 있다. 랜덤 PWM방식의 스펙트럼 확산효과를 평가하기위해서 확률이론의 표준편차 개념인 고조파 확산 지수(HSF : Harmonics Spread Factor)<sup>[7]</sup>를 도입한다.

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

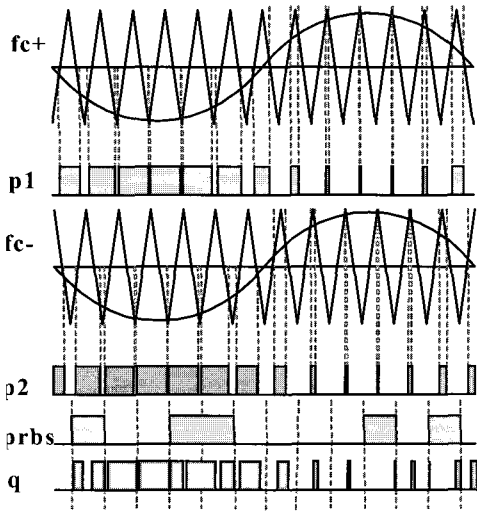


그림 2 종전의 HRPWM방식  
Fig. 2 Conventional HRPWM method

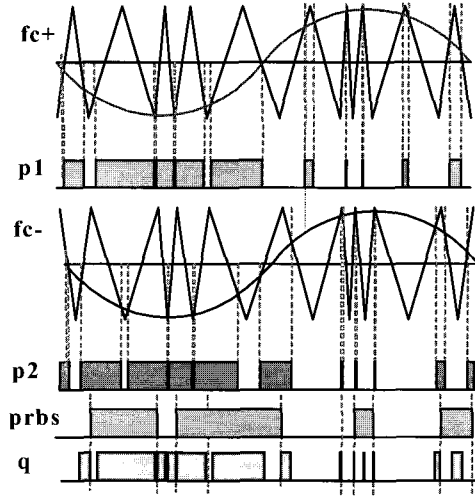


그림 3 제안된 HRPWM방식  
Fig. 3 Proposed HRPWM method

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

여기서  $H_j$ 는  $j$ 번째의 개별 고조파의 크기를 말하며,  $H_0$ 는  $N$ 번째까지의 고조파 크기의 평균치를 의미한다. 따라서 (2)에 의하여 최상의 고조파 확산효과는  $HSF=0$ 인 경우이며, 이는 이상적인 백색잡음의 조건과 같다.

그림 3에서  $fc+$ 를 발생하기 위해서는 균일분포의 조건을 갖는 LCG(Linear Congruential Generator) 알고리즘<sup>[3,4]</sup>이 필요하다. LCG에 의하여 랜덤 수를 발생하는 과정은 다음과 같다. 먼저  $i_a$ ,  $i_c$ ,  $i_m$ 이 선택된 상수로써 각각 승산계수(multiplier), 증분계수(increment), 나머지 계수(modulus)라 할 때, 0부터  $i_m$ 사이의 정수는 다음 식에 의해 발생된다.

$$f_{ran+1} = (f_{ran} i_a + i_c) \% i_m \quad (4)$$

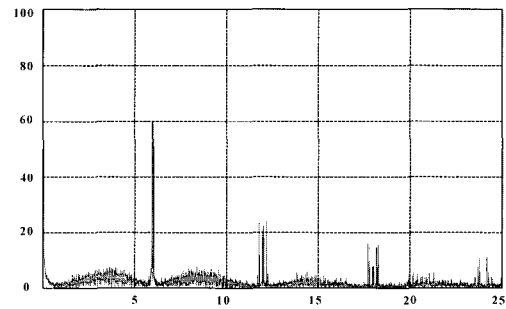
(4)에 의해 발생된 랜덤 수를 0부터 1사이의 실수로 변환하기 위해서는 (5)의 과정이 필요하다.

$$ran = \frac{(float)f_{ran}}{(float)i_m} \quad (5)$$

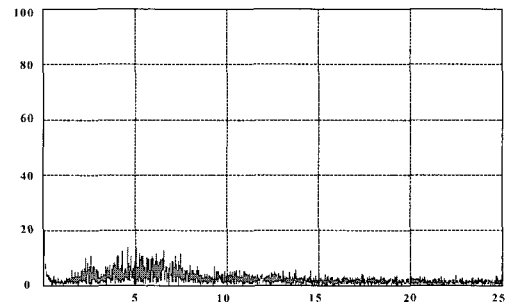
만일  $j_{low}$ 부터  $j_{high}$ 사이의 정수를 원한다면,

$$f = f_{low} + \frac{((f_{high} - f_{low} + 1)f_{ran})}{i_m} \quad (6)$$

에 의하여 원하는 랜덤 수를 구할 수 있다. 여기서  $f_{low}$ ,  $f_{high}$ 는 발생할 랜덤 수의 하한 및 상한이다.



(a) Conventional method ( $fc=3kHz$ )



(b) Proposed method ( $fc=3kHz \pm 1kHz$ )

그림 4 전압 스펙트럼의 시뮬레이션 결과  
(x-axis:5kHz/div., y-axis:20mv/div.)  
Fig. 4 Simulated voltage spectra  
(x-axis:5kHz/div., y-axis:20mv/div.)

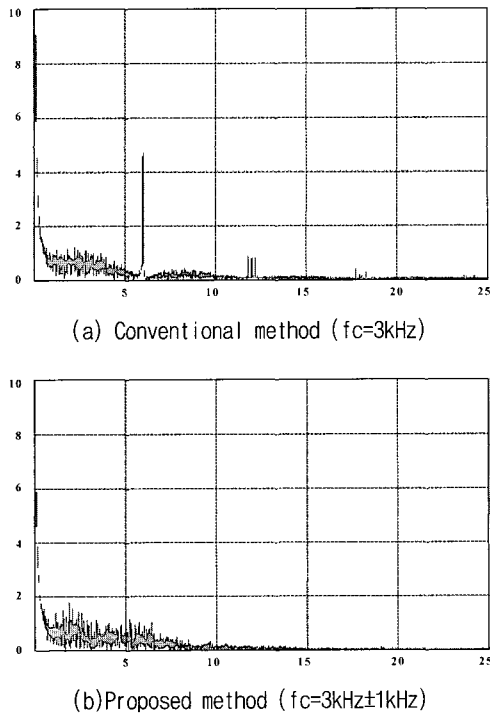


그림 5 전류 스펙트럼의 시뮬레이션 결과  
(x-axis:5kHz/div.,y-axis:2mv/div.)  
Fig. 5 Simulated current spectra  
(x-axis:5kHz/div.,y-axis:2mv/div.)

이상의 과정에 의해 변조지수  $M=0.8$ , 스위칭 주파수  $f_c=3\text{kHz}$ , 2.5A 부하조건하에서 시뮬레이션 한 결과를 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 그림 4와 그림 5는 3상 유도전동기의 출력전압 및 전류에 대한 스펙트럼이다. 종전의 방법은  $f_c=3\text{kHz}$  성분을 제외한 정수배 특히 6kHz 주파수대에서 강한 고조파 성분이 존재하며, 각 정수배 고조파 사이에는 정현파 형태의 스펙트럼이 분포되어 있다. 그러나 제안된 방법은 매우 강한 6kHz 성분을 비롯하여 정수배의 고조파 성분이 모두 광대역으로 확산 분포함을 보여준다.

### 3. 실험 장치 구성

그림 6에는 제안된 HRPWM을 적용한 3상 유도전동기 구동장치를 나타내었다. LF2407 DSP 제어기는 랜덤 수 및 PRBS 랜덤 비트와 3상 기준 정현파 발생을 담당하고 있다. DSP 외부에는 DSP가 발생한 랜덤 수로부터 랜덤 주파수의 캐리어를 발생하기 위한 주파수 변조기 MAX038과 여러 가지 논리회로 등으로 구성되어 있다.

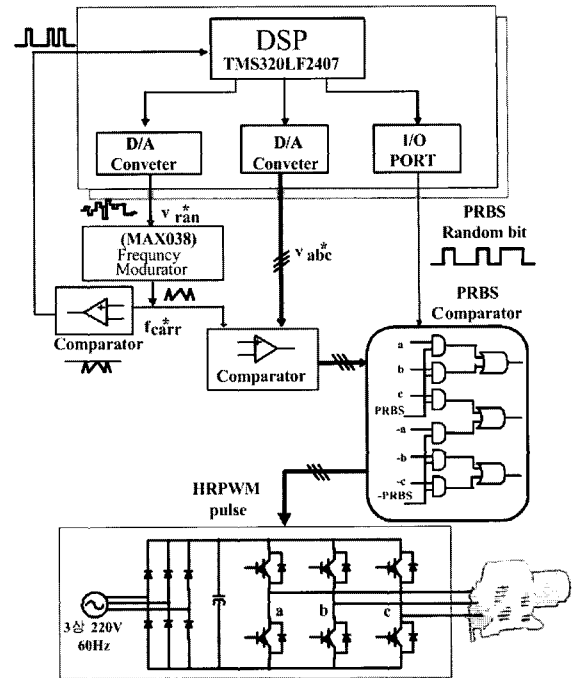


그림 6 제안된 시스템  
Fig. 6 Proposed system

그림 6 회로에 대한 동작원리를 살펴보면 다음과 같다. 우선 LCG 알고리즘과 외부 인터럽트에 의하여 랜덤 수를 연산하고, DA 변환기를 통하여 랜덤 수  $v_{ran}^*$ 를 출력한다. 랜덤 수는 unsigned long형이며 따라서 DA 변환기로 출력되는 랜덤 수는  $0\sim 2^{12}$  ( $0\sim 4095$ )이 된다. DA 변환기를 통해 출력된  $v_{ran}^*$  신호는 MAX038로 인가되며, 여기서 MAX038은 삼각파를 생성하는 IC 소자로서 본 시스템에서는 DA 변환기의 출력 신호인  $v_{ran}^*$ 을 주파수 변조하여 랜덤 주파수의 삼각파 캐리어  $f_{carr}^*$ 를 발생하고 있다. PRBS 랜덤 비트는 소프트웨어적인 방법으로 8비트 랜덤 비트를 구현하였으며, 외부에서 입력되는 삼각파 캐리어의 피크검출(상승예지) 신호의 인터럽트에 동기되어서 DSP의 I/O 포트에 PRBS 랜덤 비트를 출력한다.

3상 기준 정현파  $v_{abc}^*$ 는 DSP의 타이머 인터럽트를 이용하여 정확한 시간을 계산하고, 메모리된 테이블 값을 순차적으로 호출하여 구할 수 있다. 테이블 값은 12비트 데이터 버스를 이용하기 때문에  $0x000\sim 0xffff$ 의 범위로 정하였으며, 1주기당 360개 구간으로 나누어 테이블 값을 데이터 버스로 출력하였다. 3상 기준 정현파  $v_{abc}^*$  신호의 출력은 I/O 확장 번지를 통하여 선택된 외부 DA 변환기로 보내어지며, 각각  $120^\circ$ 의 위상차가 있는 3상 정현파를 출력한다.

### 4. 실험 및 고찰

그림 7은 3상 기본파 주파수 60Hz, 변조지수 0.8,  $3\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$  랜덤 대역폭을 갖는 랜덤 주파수의 삼각파 캐리어와 8비트 PRBS의 조건 하에서 발생된 여러 펄스를 측정된 결과이다.

실효치가 220v인 인버터 출력전압을 ECB(Eddy Current Brake)와 연결된 1.5kW급 3상 유도전동기에 인가하였을 때의 측정된 220v 전동기 전압과 2.3A 전동기 전류 파형을 그림 8에 나타내었다.

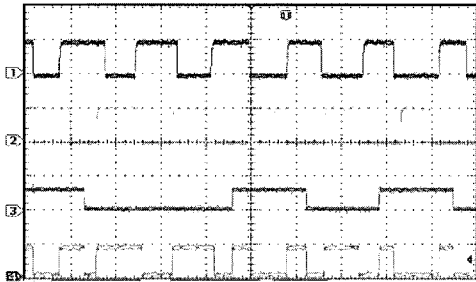
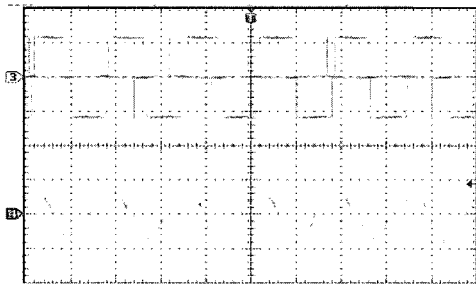
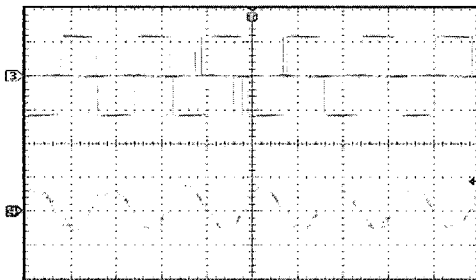


그림 7 측정된 제안된 방법의 펄스(p1,p2,prbs,q)  
Fig. 7 Measured pulses of the proposed method (p1,p2,prbs,q)

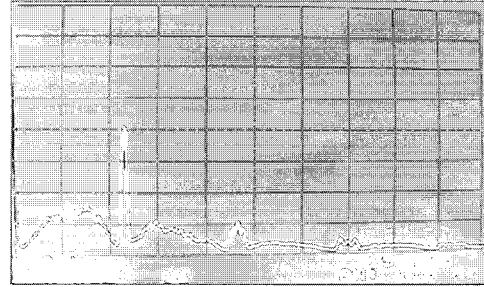


(a)Conventional method (fc=3kHz)

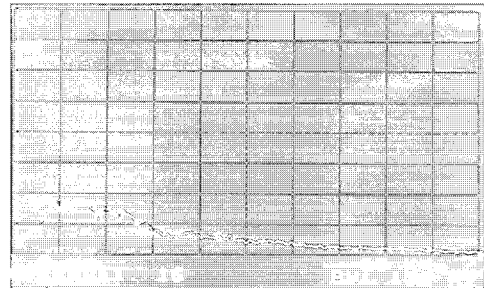


(b) Proposed method (fc=3kHz±1kHz)

그림 8 측정된 전압과 전류 파형  
(voltage:250v/div., current:5A/div.)  
Fig. 8 Measured voltage and current waveforms  
(voltage:250v/div., current:5A/div.)

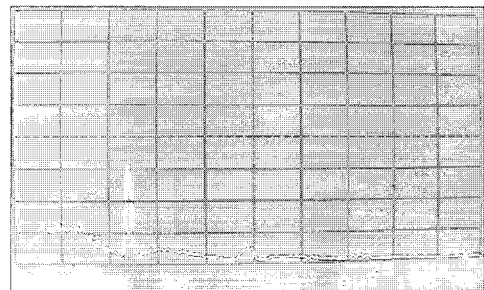


(a) Conventional method (fc=3kHz)

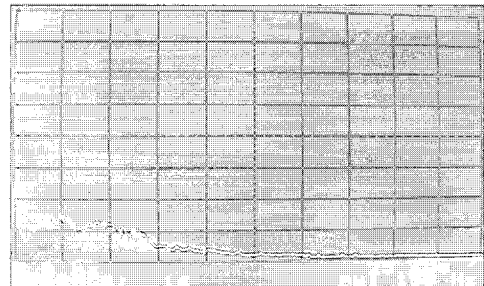


(b)Proposed method (fc=3kHz±1kHz)

그림 9 측정된 전압 스펙트럼  
(x-axis:2.5kHz/div., y-axis:200mv/div.)  
Fig. 9 Measured voltage spectra  
(x-axis:2.5kHz/div., y-axis:200mv/div.)



(a)Conventional method (fc=3kHz)



(b)Proposed method (fc=3kHz±1kHz)

그림 10 측정된 전류 스펙트럼  
Fig. 10 Measured current spectra  
(x-axis:2.5kHz/div., y-axis:10mv/div.)

ECB는 자체적인 기계 소음이 없으며 전동기와 연결하여 부하로서 사용 가능한 전기기계이다. 그림 8(a)는 종전의 방법으로서 3kHz 고정 주파수 삼각파를 사용한 HRPWM의 결과이다. 그림 8(b)는 3kHz 중심 주파수에 대하여  $\pm 1\text{kHz}$  대역폭을 갖는 랜덤 삼각파를 사용한 제안된 방식의 결과이며, 이때 각 방식의 전류파형과 비교해보면 제안된 방식이나 종전의 방식이 거의 동일하다는 것을 알 수 있다.

그림 9와 그림 10은 종전의 방식과 제안된 방식의 전압과 전류 파형에 대한 스펙트럼이다. 그림 9(a)와 그림 10(a)로 나타낸 종전의 방법은 전압과 전류 스펙트럼에 모두 스위칭 주파수 3kHz의 정수배인 6kHz와 12kHz에 강한 고조파 성분이 존재한다. 그러나 제안된 방법은 그림 9(b)와 그림 10(b)에서 보는 바와 같이 6kHz와 12kHz성분을 거의 완전하게 광대역으로 분산시키고 있다. 이상의 결과는 그림 4와 그림 5에서 나타낸 시뮬레이션 결과와 매우 유사하다. 결과적으로 제안된 방법에 의한 전류파형은 양호한 전류파형과 고조파 스펙트럼의 광대역화 특성을 모두 가지고 있음을 알 수 있다. 표 1에는 그림 9와 그림 10에 대한 HSF를 나타내었다.

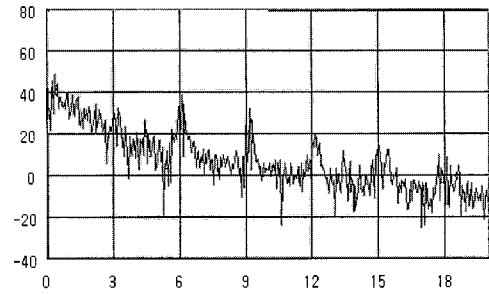
표 1 전압 및 전류 스펙트럼의 HSF  
Table 1 HSF of the voltage and current spectra

Spectra \ HSF	Conventional method	Proposed method
Voltage	30.1	21.1
Current	23.5	16.8

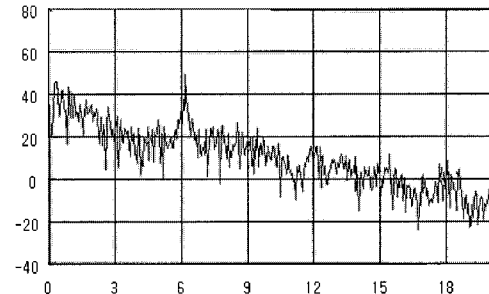
그림 11은 2.3A부하의 경우, 전동기로부터 발생하는 스위칭 소음 스펙트럼을 나타내고 있다. 먼저 그림 11(a)는 3kHz 고정 삼각파 캐리어만을 사용한 경우로서 3kHz 스위칭 주파수의 정수배 파워 스펙트럼이 모두 존재하는데, 특히 6kHz, 9kHz와 12kHz의 스펙트럼이 매우 강한 분포를 보인다. 그림 11(b)는 종전의 고정 주파수의 삼각파 캐리어를 적용한 HRPWM 방식으로 전압과 전류의 경우와 동일하게 6kHz 고조파 성분이 매우 강하게 존재하고 있다.

그림 11(c)는  $3\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$  스위칭 대역폭을 갖는 제안된 방법의 소음 스펙트럼 결과로서 6kHz주파수대의 강한 고조파 성분이 저감됨을 알 수 있다. 그림 11(d)는  $3\text{kHz} \pm 2\text{kHz}$ 의 대역폭을 갖는 제안된 방법의 소음

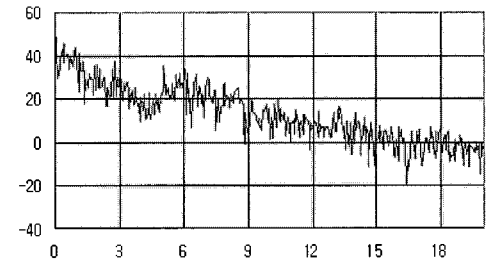
스펙트럼 결과이다. 대역폭이  $3\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$ 인 그림 11(c)의 경우보다도 0~21kHz 전 주파수대에 걸친 스펙트럼의 확산도가 매우 양호해짐을 알 수 있다.



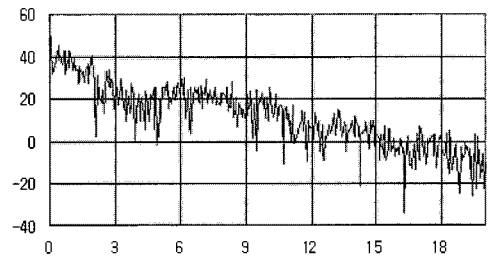
(a) Fixed frequency ( $f_c=3\text{kHz}$ )



(b) Conventional method ( $f_c=3\text{kHz}$ )



(c) Proposed method ( $f_c=3\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$ )



(d) Proposed method ( $f_c=3\text{kHz} \pm 2\text{kHz}$ )

그림 11 측정된 전동기의 스위칭 소음 스펙트럼  
(x-axis:3kHz/div., y-axis:20dB/div.)  
Fig. 11 Measured motor switching noise spectra  
(x-axis:3kHz/div., y-axis:20dB/div.)

### 5. 결 론

본 연구에서는 종전의 고정 주파수의 삼각파 캐리어를 적용한 하이브리드 랜덤 PWM(HRPWM)방식의 문제점을 개선하기 위해 랜덤 삼각파 캐리어를 적용한 HRPWM기법을 제시하였다. 제안된 방법을 1.5kW급 3상 유도전동기 구동장치에 적용하여 전동기 전압과 전류 및 소음 스펙트럼을 측정하였다.

그 결과, 제안된 기법은 랜덤 PWM의 특징인 파워 스펙트럼의 광대역화 특징을 가지면서도 전류 파형은 종전의 방법과 유사하였다. 또한 종전의 방법은 스위칭 주파수의 2배 주파수에서 매우 강한 파워 스펙트럼을 보였으나, 제안된 방법은 특정 주파수대에 집중하지 않고 전 주파수대로 확산된 선형적인 파워 스펙트럼 분포를 하였다.

본 연구는 한국과학재단 지정 전남대 고품질전기전자부품 및 시스템 연구센터 연구비 지원에 의하여 연구된 결과임.

### 참 고 문 헌

[1] A. Cichowski, J. Nieznanski and A. Wojewodka, "Shaping the SPL spectra of the acoustic noise emitted by inverter fed induction motors", in Proc. IEEE IECON'03, 2003, pp.2923-2928.

[2] M. M. Bech, J. K. Pedersen and F. Blaabjerg, "Random modulation techniques width fixed switching frequency for three-phase power converters", IEEE Trans. Power Electron., Vol.15, no.4, pp.753-761, 2000.

[3] Y. G. Jung, S. H. Na, Y. C. Lim and S. H. Yang, "Reduction of audible switching noise in induction motor drives using random position PWM", IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol.149, no.3, May, pp.195-202, 2002.

[4] 위석오, 정영국, 나석환, 임영철, "전동기 구동 장치의 가청 스위칭 소음 저감을 위한 2상 및 3상 랜덤 펄스 위치 PWM기법의 성능 비교", 전력전자학회 논문지 제7권 제3호, pp.224-236, 2002.

[5] B.R. Lin, "Implementation of non-deterministic pulse width modulation for inverter drives", IEEE Trans. aerospace and electronic system, Vol.36, No.2, pp.482-490, 2000.

[6] B.R. Lin and H.H. Lu, "Three-phase ac/dc/ac/converter with random pulse position PWM", in Conf. Rec. EPE'99, 1999, in CD ROM.

[7] B. Huo and A.M. Trzynadlowski, "Novel random pulse width modulation with constant sampling frequency based on the TMS320C240 DSP controller", in Proc. IEEE IECON'99, 1999, pp.342-347.

### 저 자 소 개



#### 김기선(金起善)

1979년 2월 8일생. 2004년 대불대 전기공학과 졸업. 2005년 전남대 대학원 전기공학과 석사과정. 현재 한국과학재단 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터(RRC) 연구원.



#### 정영국(鄭榮國)

1963년 11월 10일생. 1986년 전남대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 2000년 일본 오카야마대학교 연구방문. 현재 대불대 컴퓨터정보

공학부 조교수.



#### 임영철(任永徹)

1953년 4월 23일생. 1975년 전남대 전기공학과 졸업. 1977년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1997년 호주 모나시대학 Visiting Scholar. 현재 전남대 전기공

학과 교수. 산업자원부 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터 소장. 당 학회 부회장.



#### 박성준(朴晟濬)

1965년 3월 20일생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 졸업(석사). 1996년 동 대학원 졸업(공박). 2002년 동 대학원 지능기계공학과 졸업(공박). 1996년~2000년 거제대학 조교수. 2000~

2003년 동명대학 조교수. 2003년~현재 전남대 전기공학과 조교수.



#### 김광현(金堯憲)

1960년 12월 27일생. 1983년 전남대 계측 제어공학과 졸업. 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 전남대 전기공학과 교수.