

## 인버터 구동 시스템을 위한 새로운 공간벡터 Random PWM기법

羅 碩 煥, 鄭 榮 國\*, 任 永 徹

### A New Space Vector Random PWM Scheme for Inverter Fed Drive Systems

Seok Hwan Na, Young-Gook Jung, and Young Cheol Lim

#### 요 약

본 연구에서는 펄스의 위치를 랜덤하게 함으로써 효율적인 RPWM (Random PWM)을 구현할 수 있는 새로운 공간 벡터 RPPWM(Random Position PWM)방식을 제안하였다. 제안한 방식은 마이크로 컨트롤러에 적용하기 쉬운 공간벡터 변조에 의하여 각 상의 듀티비를 연산한 다음, 스위칭 순서를 유지하며 각 3상 펄스들의 위치를 변조 구간내에서 임의의 위치에 랜덤하게 배치함으로써 RPWM을 구현하는 방식이다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 펄스위치의 랜덤화, 공간벡터 변조, 인버터 및 3상 유도 전동기를 포함하는 전체 시스템을 모델화하였다. 종전의 공간벡터 PWM 및 Lead Lag PWM 그리고 제안된 RPPWM에 의한 인버터 출력 전압, 전류의 고조파 성분을 시뮬레이션에 의하여 비교 검토하였으며, 제안된 방법의 유용성을 입증할 수 있었다.

#### ABSTRACT

In this paper, a new space vector RPPWM(Random Position PWM) is proposed. In the proposed RPPWM, each of three phase pulses is located randomly in each switching interval. Based on the space vector modulation technique, the duty ratio of the pulses is calculated. Along with the randomization of the PWM pulses, we can obtain the effects of spread spectra of voltage, current as in the case of randomly changed switching frequency. To verify the validity of the proposed RPPWM, simulation study was tried using Matlab/Simulink. The main model described in Simulink block diagrams includes the space vector modulation block, pulse position randomization block, inverter block, 3 phase induction motor block, and so on. By the simulation study, the harmonics of the output voltage, and the current of inverter are predicted in different PWM methods-SVPWM, LLPWM, proposed RPPWM.

**Key Words** : A New Space Vector Random PWM, Inverter fed Drive Systems

#### 1. 서 론

\*대불대 전기공학과 교수  
E-mail : jyg@mail.daebul.ac.kr

접수일자 : 2001. 7.25

1차심사요청일 : 2001. 8.21. 2차심사요청일 : 2001.10. 8

심사완료일 : 2001.11. 2

일반적인 모터 구동장치로서의 인버터의 온/오프 PWM스위칭은 고정 스위칭 주파수로 동작되며, 스위칭 주파수가 커질수록 이에 비례하여 전류는 정현파에 가깝게 된다. 이 방법은 협대역의 특정 스위칭 주파수의 고조파가 인버터의 출력전압 및 전류에 포함되는 문제점이 있다.

최근 들어 스위칭 주파수의 고조파를 저감시키는

PWM 방법으로써, PWM의 스위칭 주파수를 특정하게 고정시키지 않고 넓은 주파수 영역에서 스위칭이 이루어지도록 하는 RPWM에 대한 연구가 진행중이다<sup>1)~2)</sup>. 이 방법은 인버터의 출력전압과 전류에 포함되어 있는 고조파 스펙트럼을 넓은 주파수 영역으로 고루 분산시켜서 모터의 가청 스위칭 소음이 사람에게 주는 불쾌감을 저감시키는 PWM방식이다. RPWM 기법은 랜덤 함수에 의해 인버터의 매 스위칭 순간마다 다른 스위칭 주파수로 온 또는 오프 되도록 하여 인버터의 출력전압과 전류의 고조파 및 모터의 전자기적 소음의 스펙트럼이 광대역으로 분산되는 효과가 있다.

이러한 RPWM에 관한 연구로는, 삼각파 주파수를 랜덤하게 변조하는 삼각파에 의한 RFPWM (Random Frequency PWM)<sup>3)~4)</sup>, 속도 지령치 전압 공간벡터가 인가되는 스위칭 구간의 시간을 랜덤하게 제어하는 공간벡터에 의한 RFPWM<sup>5)~6)</sup>이 있다.

또한 한 변조 구간에서 충분한 수의 랜덤수를 발생시켜 지령치 듀티비와 비교하여 지령치가 발생된 랜덤수 보다 더 큰 경우에 스위칭 온하여 결국 지령치 듀티비에 해당하는 펄스 온 시간을 갖도록 하는 RSPWM (Random Switching PWM)<sup>7)</sup>, 매 스위칭 구간의 시간은 일정하지만 펄스의 위치를 변조구간 내의 앞 또는 뒤에 랜덤하게 변경시키는 LLPWM (Lead-Lag PWM)<sup>8)~9)</sup> 등은 최근에 보고되고 있다.

그런데 삼각파 방식의 RFPWM은 캐리어를 발생시키기 위한 아날로그회로가 요구될 뿐만 아니라, 공간벡터 변조방식에 비해 인버터의 최대 변조지수가 낮은 단점이 있으며, 공간벡터 방식의 RFPWM은 제어 알고리즘의 요구되는 계산량에 따라 최대 스위칭 주파수가 매우 민감하게 제한을 받는다는 단점이 있다.

또한 RSPWM은 매우 높은 스위칭 주파수를 요구하므로 전력소자 선택에 제한을 주며, LLPWM은 간단히 구현할 수 있는 장점이 있는 반면 스펙트럼을 광대역에 고루 분포시키는 데는 한계가 있다. 그러나 LLPWM 방식은 다른 방법에 비하여 비교적 마이크로컨트롤러로 간단하게 구현할 수 있으며 인버터의 출력전압 및 전류의 고조파를 광대역으로 분포시킴으로써 모터의 가청소음 저감 효과가 우수하다.

따라서 본 연구에서는 LLPWM의 펄스 위치를 랜덤하게 함으로써 효율적인 RPWM을 구현 할 수 있는 새로운 방식의 RPPWM(Random Position Pulse Width Modulation)을 제안하였다. 제안된 방식은 각 3상 펄스들의 위치를 변조 구간내의 임의의 위치에 랜덤하게 배치함으로써 스위칭에 의한 고조파의 스펙

트럼을 광대역화 하는 RPWM 방식이다.

제안된 RPPWM의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 소프트웨어로는 기본적인 산술 연산은 물론 여러 가지 툴 박스들에 의하여 전기 기계 및 전력 전자 장치 시뮬레이션에서도 좋은 성능을 발휘하는 Matlab/Simulink를 사용하였다. 공간벡터 변조, 펄스 발생회로, 3상 유도전동기 등에 대한 블록을 서브시스템 또는 S-Function으로 구성하여 RPPWM 시스템 전체를 모델링하였다. 모델 내에서 사용자가 전동기 회전 속도에 해당하는 기본 주파수, 스위칭 주파수, 변조 지수, 그리고 시뮬레이션하고자 하는 각 PWM 방식을 변경하면서 스위칭 함수, 전압 및 전류의 파형 그리고 전압, 전류의 스펙트럼을 미리 예측할 수 있었다.

시뮬레이션에 의하여 현재 일반적으로 많이 쓰이고 있는 공간벡터 변조방식의 고정 주파수 SVPWM, Lead-lag PWM, 그리고 제안된 공간벡터 RPPWM에 의한 고조파 스펙트럼을 분석한 결과, 제안된 RPPWM 방식에 의하여 인버터 출력전압, 전류의 고조파 성분이 넓은 영역에 고루 분포됨을 알 수 있었다.

## 2. 일반적인 RPWM기법

일반적인 PWM 인버터의 온/오프 스위칭은 고정 스위칭 주파수로 동작되며, 스위칭 주파수의 정수배에 해당하는 주파수대에 이산치의 강한 고조파 성분이 나타난다. 그러나 고정 주파수가 아닌 여러 주파수가 혼재하는 PWM 스위칭을 한다면 전압, 전류, 소음 등의 스펙트럼을 광대역화 할 수 있다. 이렇게 할 경우 특정 스위칭 주파수 대에 강하게 존재하던 고조파 성분의 세력이 약해진다.

즉 연속치 성분의 스펙트럼은 다소 증가하지만 EMI, 진동, 소음 등에 좋지 않은 영향을 미치는 이산치 성분의 스펙트럼은 현저히 감소하게 된다. 이산치 성분의 크기는 고조파 성분의 크기를 의미한다. 이산치 성분의 크기가 감소되면 EMI, 기계진동 및 소음 저감에 효과가 있다.

이를 위해서 전력소자의 스위칭 주파수를 연속적으로 변경시키고, 또한 이 때의 스위칭 주파수는 넓은 주파수 대역에 균일하게 분포되도록 하는 방법이 있다. 이러한 PWM 스위칭 방식을 RPWM이라 한다.

그림 1에는 RPWM에 의하여 전압 및 전류의 스펙트럼이 광대역화된 경우를 나타내고 있다.

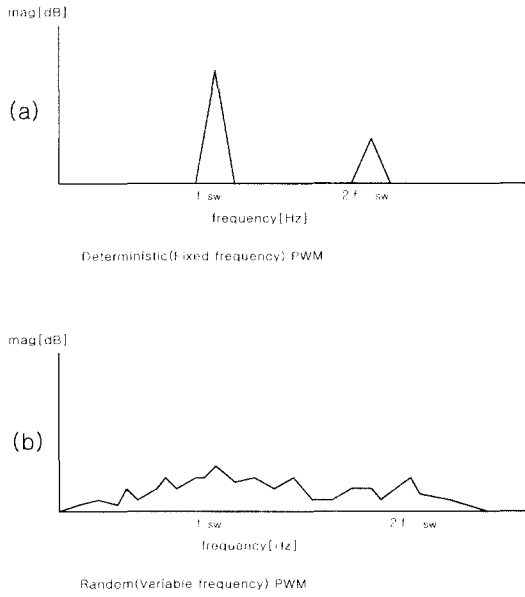


그림 1 Random PWM의 효과 (a) 고정주파수 (b) 랜덤주파수  
Fig. 1 Effects of random PWM  
(a) fixed frequency (b) random frequency

그림 1(a)는 일반적인 고정 주파수로 동작시켰을 때 스위칭에 의한 고조파가 특정 주파수대에 집중되어 있는 상태를 보이며, 그림 2(b)는 랜덤한 주파수를 갖는 스위칭에 의하여 고조파가 넓은 대역에 분산되어 있는 상태를 보이고 있다.

스위칭 주파수가 일정 또는 가변 되는 PWM 시스템에서 k차 고조파에 의한 신호의 세기  $P_k$ 는 n번째 스위칭 구간에서 온(on)되는 시점  $\theta_n$  및 기본파 1주기의 스위칭 횟수 N에 대해 다음과 같은 관계가 있다.

$$P_k \propto \left| E \left\{ \sum_{n=1}^N \frac{\sin(\pi \frac{k}{N} \bar{a}_n)}{\pi \frac{k}{N} \bar{a}_n} e^{-j2\pi k / N n} e^{-j2\pi k / N \theta_n} \right\} \right|^2 \quad (1)$$

여기서,  $E(\cdot)$ 는 통계적 기대치를 의미하며,  $\bar{a}_n$ 은 n번째 스위칭 구간의 듀티비를 나타낸다.

식 (1)은 정현파 함수의 합으로 PWM 삼각파 주파수가 일정하다면  $\sum_{n=1}^N \sin(\pi \frac{k}{N} \bar{a}_n) = 0$  이 되므로 통계적 기대치( $E(\cdot)$ )도 0이 된다. 또한 이것은 스위칭 주파수의 정수배에 해당하는 주파수대에서 펄스 모양처럼 파워 스펙트럼의 세기가 강하게 나타나며, 파워 스펙트럼의 피크를 잇는 포락선은 정현파 형태가 됨을

의미한다.

$\theta_n$ 이 랜덤변수라면, 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_k \propto \left| \sum_{n=1}^N \frac{\sin(\pi \frac{k}{N} \bar{a}_n)}{\pi \frac{k}{N} \bar{a}_n} e^{-j2\pi k / N n} \cos \left[ \pi \frac{k}{N} (1 - \bar{a}_n) \right] \right|^2 \quad (2)$$

식 (2)는 급수의 각 항들이 여현함수 형태로 감소하며, k가 증가함에 따라 파워 스펙트럼의 세기가 감소함을 의미한다. 이상에서 인버터 스위칭 온/오프 각을 제어함에 따라 인버터 출력전압 및 전류 그리고 모터의 전자기적 소음의 파워 스펙트럼의 분포를 제어할 수 있다.

### 3. 제안된 공간벡터 RPPWM기법

본 연구에서 제안하는 새로운 공간벡터 RPWM기법은 펄스의 위치를 랜덤하게 하는 것이다. 이는 서론에서 앞서 설명한 LLPWM을 개선한 방식이다.

그림 2는 LLPWM 방식의 스위칭 기법을 나타낸 것이다. LLPWM 방식은 펄스의 위치가 1주기의 앞과 뒤 중의 하나만이 선택되므로 랜덤 스위칭에 의하여 스펙트럼을 고루 분포시키는 데는 한계가 있다. 그러나 제안된 RPPWM방식은 변조구간 내의 어느 위치에도 펄스를 배치할 수가 있기 때문에 스펙트럼 분포의 효과가 훨씬 크다. 본 연구에서 제안한 RPPWM 방식의 스위칭 함수를 그림 3에 나타내었으며 LLPWM에 비해서 매 변조구간에서 펄스의 위치가 랜덤하게 변하고 있음을 알 수 있다.

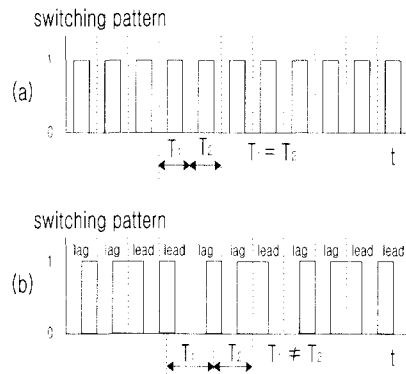


그림 2 Lead-lag PWM의 스위칭 패턴 (a) SVPWM (b) LLPWM  
Fig. 2 Switching pattern with Lead-lag PWM.  
(a) SVPWM (b) LLPWM

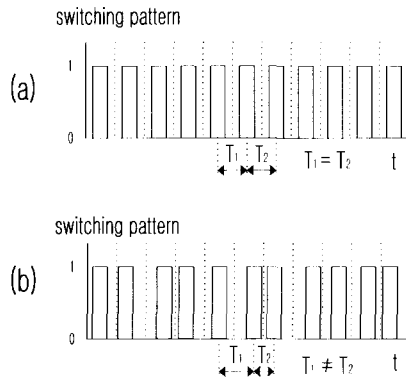


그림 3 제안된 상태공간 RPPWM의 스위칭 패턴  
 (a) SVPWM (b) RPPWM  
 Fig. 3 Switching pattern with proposed RPPWM  
 (a) SVPWM (b) RPPWM

3.1 랜덤수의 발생 기법

한 변조 구간 내에서 펄스의 위치가 고루 분포되도록 하기 위해서는 펄스 위치를 결정할 수 있는 어떠한 방법이 필요하다. 이를 위해 균일한 분포를 갖는 미리 정의된 함수가 필요한데 여기에 랜덤함수를 사용할 수가 있다. 랜덤함수는 대개 컴파일러의 라이브러리 형태로 제공된다. 그러나 이와 같이 시스템에서 제공하는 랜덤함수를 사용할 경우 주의할 점이 있다. 몇 가지 예를 들면,

- 발생된 랜덤수의 범위는 충분한가.
- 균일한 분포를 갖는가.
- 범위 내에서 주기성을 확실히 피할 수 있는가.

하는 것들이다. 시스템에서 제공되는 거의 대부분의 랜덤함수들은 선형 일치 발생기(linear congruential generator)이며, 정해진 범위내의 정수를 발생하도록 되어 있다. 그러나 공학적으로 이러한 랜덤함수를 이용할 경우에 랜덤수의 범위가 너무 적은 경우가 있다.

ANSIC 규정은 이 범위를 RAND\_MAX라는 상수로써 겨우 32767로 정해 두고 있다. 더우기 연속적으로 랜덤함수를 호출하면 발생된 랜덤수는 어느 주기를 가지며 반복적인 것이 되기 쉽다는 점이다. 실제로 IBM에서 제공한 랜덤함수도 이러한 문제점이 발견되기도 하였다. 따라서 시스템에 독립적이면서 사용자의 요구에 맞는 랜덤함수를 직접 작성하는 것이 안전한 방법이라 할 수 있다. 랜덤수를 발생시키기 위하여 다음의 식(C언어 코딩)들을 사용할 수 있다. 먼저 0부터  $i_m$ 사이의 정수를 다음 식에 의해 발생시키고,

$$j_{ran} = (j_{ran} * i_a + i_c) \% i_m \tag{3}$$

만일 0부터 1사이의 실수를 랜덤하게 발생하려면,

$$ran = \frac{(float)j_{ran}}{(float)i_m} \tag{4}$$

만일  $j_{lo}$ 부터  $j_{hi}$ 사이의 정수를 원한다면,

$$j = j_{lo} + \frac{((j_{hi} - j_{lo} + 1) * j_{ran})}{i_m} \tag{5}$$

에 의하여 원하는 랜덤수를 구할 수 있다. 여기서  $i_a$ ,  $i_c$ ,  $i_m$ 는 선택된 상수로써 각각 multiplier, increment, modulus라 불린다. 그리고  $j_{lo}$ ,  $j_{hi}$ 는 발생할 랜덤수의 최소값 및 최대값이다.

이렇게 구현된 랜덤발생기는 다른 프로세서나 마이크로 컨트롤러에서도 공통으로 사용될 수 있다. 그러나 선택된 상수들을 사용하여 연산하는 도중에 오버플로우가 발생하지 않도록 주의하여야 한다. 또한 이때  $i_a$ ,  $i_c$ ,  $i_m$ 은 신중히 선택되어야 한다.  $i_c$ 는 소수(prime number)이어야 하며,  $i_c$ 와  $i_m$ 은

$$i_c \approx (\frac{1}{2} - \frac{1}{6}\sqrt{3})i_m \tag{6}$$

인 관계를 가져야 한다<sup>[10]</sup>. 그러나 이러한 상수들을 선택하는데 있어서 완전히 자유롭지는 못하다. 균일한 분포의 랜덤수 발생기를 위한 몇 가지의 상수를 표 1에 나타내었다.

표 1 균일한 분포를 갖기 위한 랜덤수를 위한 상수  
 Table 1 Constants for portable random number

Overflow at	$i_m$	$i_a$	$i_c$
$2^{20}$	6075	106	1283
$2^{21}$	7875	211	1663
$2^{22}$	7875	421	1663
$2^{23}$	11979	430	2531
	6655	936	1399
	6075	1366	1283
$2^{24}$	53125	171	11213
	11979	859	2531
	14406	967	3041

3.2 공간벡터 변조

원하는 전압을 인버터에 인가하기 위해서 공간벡터 변조법이 널리 이용되고 있다. 공간벡터 변조법은 교류 전동기를 구동하는 경우에 직류 링크의 전압을 최대한 많이 사용할 수 있어서 다른 종류의 PWM방식보다 우수하다고 알려져 있다. 또한 정상상태에서 삼각파 비교 방식의 PWM에 비해 전류의 고조파 성분을 크게 억제할 수 있음이 밝혀져 있다.

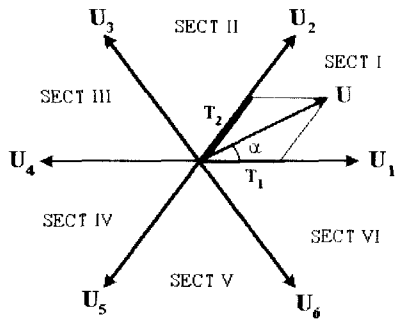


그림 4 공간 벡터도  
Fig. 4 Diagram for space vector modulation

본 연구에서는 제안된 공간벡터 RPPWM을 구현하기 위하여 공간벡터 변조 방식을 적용한다. 그림 4에서 기준 전압벡터  $U$ 를 합성하기 위해서는  $U_1, U_2$ 를 어떤 계산된 시간만큼 적절히 나누어 인가해줌으로써 가능하다. 기준벡터  $U$ 가 섹터 I에 위치한 경우 이 전압은 기준 벡터와 가장 가까운 벡터인  $U_1, U_2$  그리고 영벡터의 시간적인 합성으로 나타낼 수 있다. 이러한 원리를 바탕으로 전압에 대한 한 주기 내에서의 적분으로부터 각 유효벡터의 인가 시간을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\int_0^{T_s} U^* dt = \int_0^{T_1} U_n dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} U_{n+1} dt + \int_{T_1+T_2}^{T_s} U_0 dt \quad (7)$$

벡터  $U$ 의 각이  $\alpha$ 라면 한 변조 주가동안 벡터  $U_1$ 을 인가해야 할 시간  $T_1$ 과 벡터  $U_2$ 를 인가해야 할 시간  $T_2$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$T_1 = T_s \cdot M \frac{\sin(60^\circ - \alpha)}{\sin 60^\circ} \quad (8)$$

$$T_2 = T_s \cdot M \frac{\sin \alpha}{\sin 60^\circ} \quad (9)$$

$$T_0 = T_s - T_2 - T_1 \quad (10)$$

여기서,  $T_1$  : Time duration of vector  $U_1$   
 $T_2$  : Time duration of vector  $U_2$   
 $T_0$  : Time duration of zero vector  
 $T_s$  : Sampling period

3.3 공간벡터 변조에 기반한 펄스위치 랜덤화

공간벡터 변조에 의하여 세 제어 구간마다 각 상의 펄스의 듀티비가 구해지면 RPPWM을 수행하기 위하여 펄스의 위치를 랜덤하게 하는 작업이 필요하다.

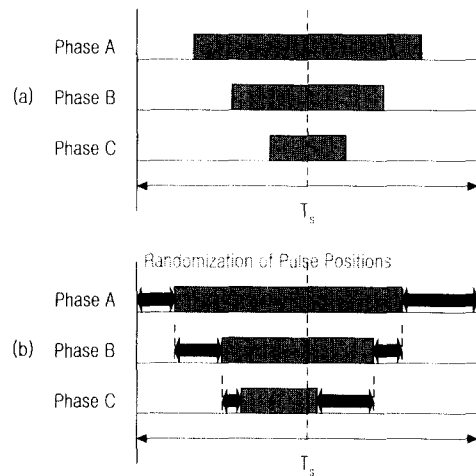


그림 5 RPPWM을 수행할 때 각상의 펄스에 대한 위치 범위  
 (a) SVPWM (b) proposed RPPWM  
 Fig. 5 Range for each phase pulse with RPPWM  
 (a) SVPWM (b) proposed RPPWM

전술한 식 (3)에 의한 랜덤 발생 기법에 의하여 생성된 랜덤수를 펄스가 위치할 수 있는 범위 안에 들도록 식 (5)를 이용하여 공간을 재설정한다. 공간을 재설정할 때, 발생된 랜덤수에 나머지 연산자를 적용하여 임의로 공간을 설정하는 것이 옳은 듯 보일 수도 있으나, 이는 주기성을 유발할 가능성이 있어 좋지 않다. 각 펄스들이 위치 할 수 있는 범위는 현재 지령치 전압벡터가 6개의 섹터 중 어느 위치에 있는가에 따라 달라진다. 만일 섹터I에 지령치 공간벡터가 있어서 벡터  $U_1, U_2$ 가 시분할로 인가되어야 할 때 각 3상 펄스의 상대적인 크기와 펄스가 위치할 수 있는 영역을 그림 5에 나타낸다.

이 경우 a상 펄스가 위치 할 수 있는 범위는 변조지수가 1이라고 가정하면, 변조 구간내의 어느 위치에도 올 수 있으며, b상 펄스는 a상 펄스의 한계를 벗어나지 않는 범위 내에 위치해야 하며, 마찬가지로 c상 펄

스도 b상 펄스의 한계를 벗어나지 않는 범위 내에 들어야 한다. 만일 어느 하나의 펄스라도 한계를 벗어나면 3상 펄스의 조합에 따라 결정된 스위칭 상태가 변경되므로 전혀 엉뚱한 스위칭을 추가로 하게 된다. 한계를 벗어나지 않는다면 한 변조구간 내에서 펄스의 위치가 변경되더라도 영벡터와 두개의 유효벡터가 인가되는 각각의 시간에는 변함이 없음을 알 수 있다.

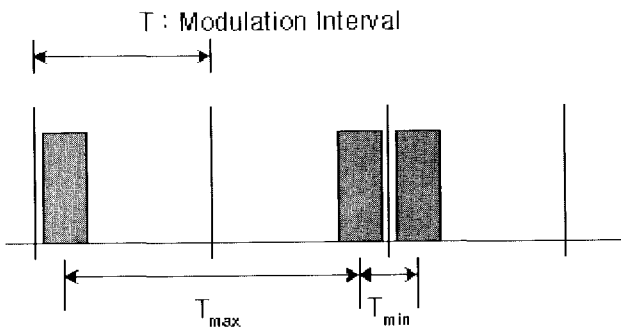


그림 6 최대 및 최소 유효 스위칭 주파수  
Fig. 6 Maximum and minimum effective switching frequency

펄스의 위치가 매 변조구간에서 변경되므로 이는 스위칭 주파수가 변하는 것과 같은 효과를 갖게 된다. 이를 위하여 '유효 스위칭 주파수'라는 용어를 편의상 도입하기로 한다. 이 유효 스위칭 주파수 최대 값은 그림 6에서 보듯이 이전 변조구간에서 펄스가 가장 뒷부분에 위치하고 다음 변조구간에서 구간의 시작 부분에 위치할 때이므로 영벡터가 인가되는 시간폭의 역수인 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$f_{\max} = \frac{1}{T_{\min}} = \frac{1}{T_s M \left( \frac{\sin(60^\circ - \alpha) - \sin \alpha}{\sin 60^\circ} \right)} \quad (11)$$

또한 유효 스위칭 주파수의 최소 값은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$f_{\min} = \frac{1}{T_{\max}} = \frac{1}{T_s \left( 2 - M \left[ \frac{\sin(60^\circ - \alpha) - \sin \alpha}{\sin 60^\circ} \right] \right)} \quad (12)$$

여기서  $T_s$  : modulation interval  
 $M$  : modulation index

이상에서 기술한 제안된 RPPWM을 구현하기 위한 과정을 요약하면 다음과 같다.

- ① 공간벡터변조 PWM기법에 의하여 각상의 듀티비를 계산.
- ② 균일한 분포를 갖는 랜덤수 발생.
- ③ a, b, c 각 상중에서 가장 펄스폭이 큰 상을 선택.
- ④ 변조 구간 내에서 펄스가 위치할 수 있는 범위 설정.
- ⑤ 범위내에 들도록 랜덤수를 발생하여 여기에 펄스를 위치시킴.
- ⑥ 두번째로 펄스폭이 큰 상의 펄스를 첫 번째 펄스폭을 벗어나지 않는 범위 내의 임의의 위치에 오도록 함.
- ⑦ 세번째 상의 펄스 위치도 같은 방식으로 결정함.

#### 4. 제안된 공간벡터 RPPWM 시뮬레이션

제안된 RPPWM에 의한 인버터 출력전압 및 전류 스펙트럼의 분포를 예측하기 위해 Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표 2에 본 연구의 시뮬레이션 환경을 나타내었다.

전체 시스템을 위한 모델은 공간벡터 변조부, 펄스 위치 랜덤화 부, PWM 패턴 발생부, IPM 인버터 부, 유도모터 부로 구성되어 있다. 유도모터 부는 3상/2상 변환부, D축 연산부, Q축 연산부, 회전자부 등으로 구성되어 있다. 이중 공간벡터 변조부, 펄스 위치 랜덤화 부 및 PWM 패턴 발생부는 블록도 내부에 기본 제공되는 라이브러리 블록 대신에 S-Function을 사용하여 직접 코딩되었다.

표 2 시뮬레이션 환경  
Table 2 Simulation conditions

시뮬레이션 S/W	Matlab 5.1/Simulink 2.1
CPU	Intel Pentium 3-600MHz
Operation System	Windows 98
모터 정격 및 상수	정격 : 60Hz, 200V, 1hp 고정자저항 : 3.35 ohm 회전자저항 : 1.99 ohm 인덕턴스 : 163.73mH 누설인덕턴스 : 6.94mH 관성계수 : 0.1kgm <sup>2</sup>

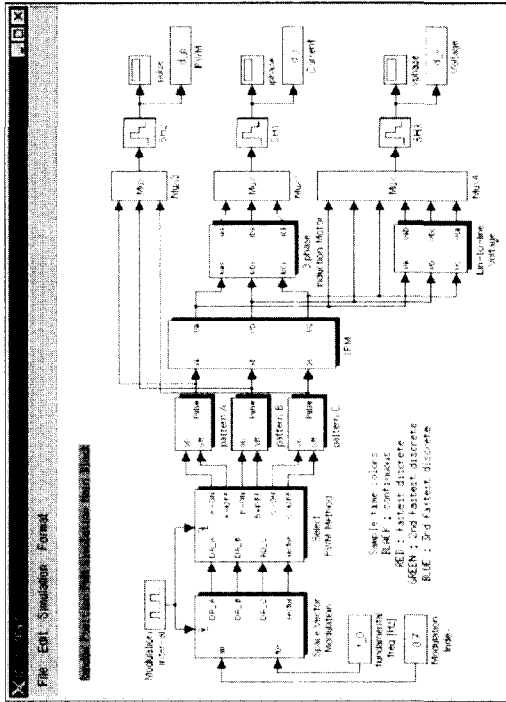


그림 7 RPPWM의 시뮬레이션 주 모델  
Fig. 7 Main model for RPPWM simulation

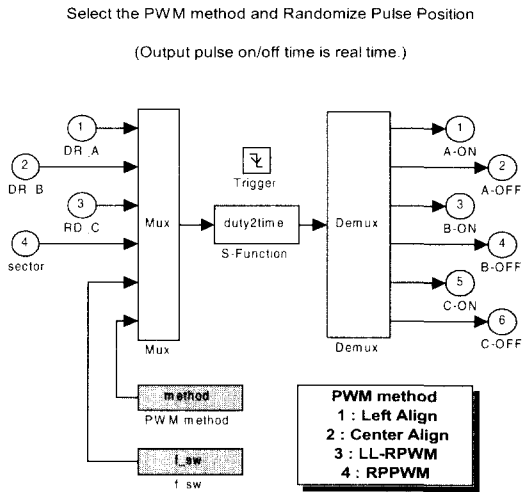


그림 8 PWM 방법선택과 위치 랜덤화를 위한 블록선도  
Fig. 8 Block diagram for PWM method selection and position randomization

그림 7은 시뮬레이션 주 모델을 나타내고 있으며 그림 8은 PWM 선택과 위치 랜덤화를 위한 블록선도를 보여주고 있다.

## 5. 결과 및 고찰

### 5.1 PWM패턴, 전압 및 전류의 파형

각 스위칭 방법 즉, SVPWM, LLPWM 및 RPPWM에 따른 PWM 패턴, 인버터 출력전압 그리고 전류의 파형을 관찰하였다. 먼저 그림 9는 각 스위칭 방식에 따른 PWM 패턴을 나타내고 있다.

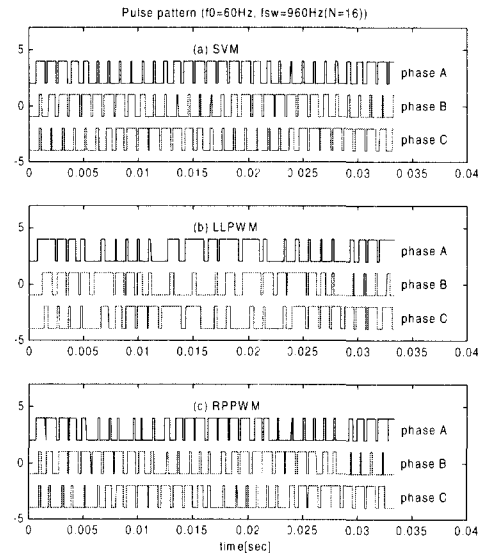


그림 9 각 PWM방식의 펄스패턴  
(a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM.

Fig. 9 Pulse patterns of each PWM method  
(a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM

그림 10은 각 스위칭 방식에 따른 인버터의 출력전압 즉 모터의 입력 상전압의 파형이며, 그림 11은 각 스위칭 방식에 따른 모터의 입력 선간전압의 파형을 보이고 있다.

또한 각 스위칭 방식에 따른 모터의 입력 전류의 파형을 그림 12에 나타내었다. Random한 PWM 배열 특성상 다른 방식에 비해 제안된 방식의 전류 파형은 다소 맥동이 존재하고 있다. 전류 파형의 맥동은 모터의 토크 맥동을 유발할 우려가 있으나, 본 연구에서의 주 관심은 토크 맥동보다는 새로운 random PWM기법을 제시하고 전압과 전류파형 및 각각의 스펙트럼을 확인하는데 있기 때문에 이점은 크게 고려하지 않아도 된다.

PWM 패턴 및 전압 파형을 살펴보면 SVPWM방식에서는 균일하나, LLPWM 및 RPPWM에서는 매우 불규칙적임을 알 수 있다. LLPWM의 경우, 같은 변조

주기를 갖더라도 실제로 일어난 스위칭 횟수는 다른 방식에 비해 약 0.75 배임을 알 수 있다.

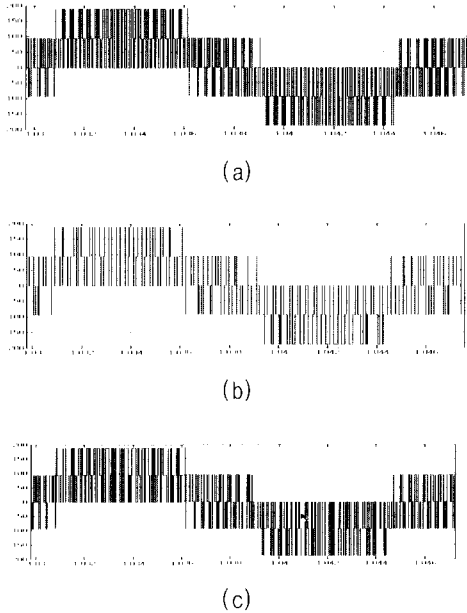


그림 10 각 PWM방식의 상전압 (a)SVPWM (b)LLPWM (c)RPPWM  
 Fig. 10 Phase voltage of each PWM method  
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM

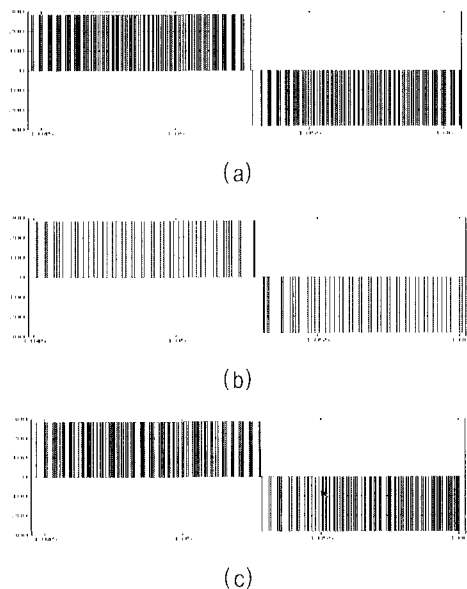


그림 11 각 PWM방식의 선간전압 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM  
 Fig. 11 Line to line voltage of each PWM method  
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM

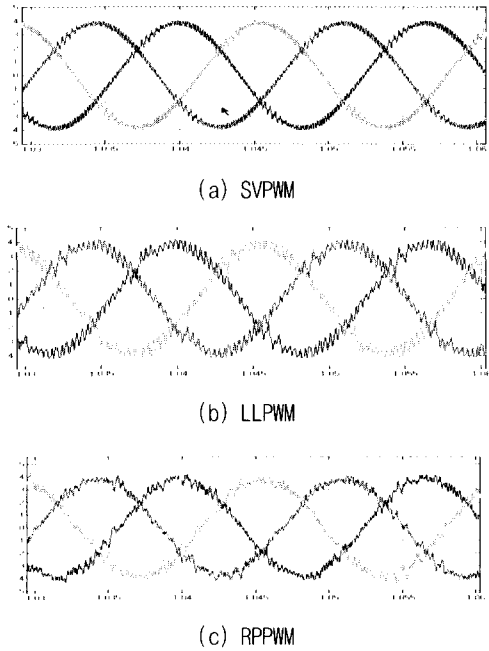


그림 12 각 PWM방식의 전류파형  
 Fig. 12 Current waveforms of each PWM method  
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM

### 5.2 인버터 출력전압의 고조파 스펙트럼

전력 전압 스펙트럼의 시뮬레이션 결과를 그림 13부터 그림 16에 보이고 있다. 시뮬레이션 조건은 실제 실험할 경우와 같도록 기본 주파수는 40Hz, 60Hz이며 스위칭 주파수 3kHz, 4kHz인 경우로 하였다.

모터를 무부하, 40Hz의 지령속도, 3kHz의 스위칭 주파수로 오픈 루프 운전하였을 때의 전압에 대한 고조파의 스펙트럼을 그림 13에 나타내었다.

그림 13(a)는 SVPWM를 수행한 경우이며, 그림 13(b)는 LLPWM을 수행한 경우이며, 그림 13(c)는 본 연구에서 제안한 RPPWM을 수행한 경우이다. 그림 13(a)의 경우 스위칭 주파수의 2배 주파수 영역에 고조파의 가장 강한 성분이 있고 스위칭 주파수의 1배 주파수 영역에 두 번째로 강한 고조파 성분이 존재함을 알 수 있다. 그림 13(b)의 경우는 LLPWM방식에 의한 결과로써, 2배 스위칭 주파수대의 강한 고조파가 현저히 줄었으며, 대신 1배 스위칭 주파수대의 고조파가 상당히 증가하였다. 그림 13(c)의 경우 1배 스위칭 주파수대, 2배 스위칭 주파수대 및 3배 스위칭 주파수대 모두 고조파 성분의 크기가 매우 줄어들었음을 알 수 있다. 또한 고정주파수 스위칭 시에는 존재하지 않았던 연속지 성분이 생기는 것을 알 수 있다.



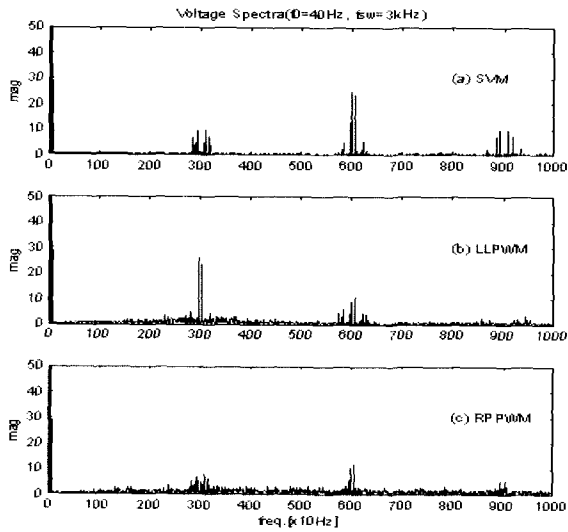


그림 13 전압스펙트럼 ( $f_0=40\text{Hz}$ ,  $f_{sw}=3\text{kHz}$ )  
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM  
 Fig. 13 Voltage spectra in case  $f_0=40\text{Hz}$ ,  $f_{sw}=3\text{kHz}$   
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM

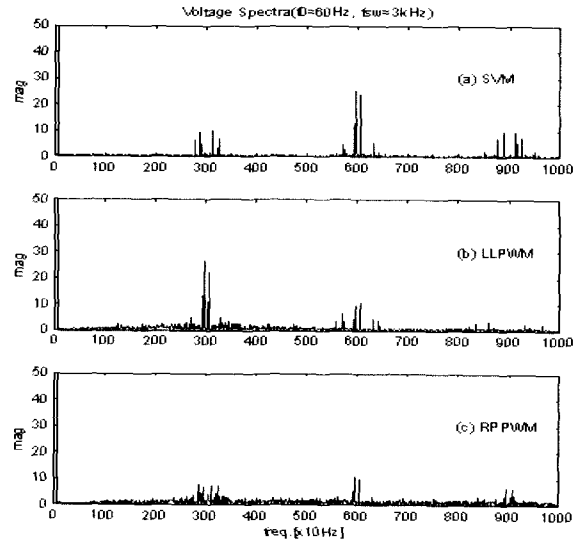


그림 15 전압스펙트럼 ( $f_0=60\text{Hz}$ ,  $f_{sw}=3\text{kHz}$ )  
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM  
 Fig.15 Voltage spectra in case  $f_0=60\text{Hz}$ ,  $f_{sw}=3\text{kHz}$   
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM

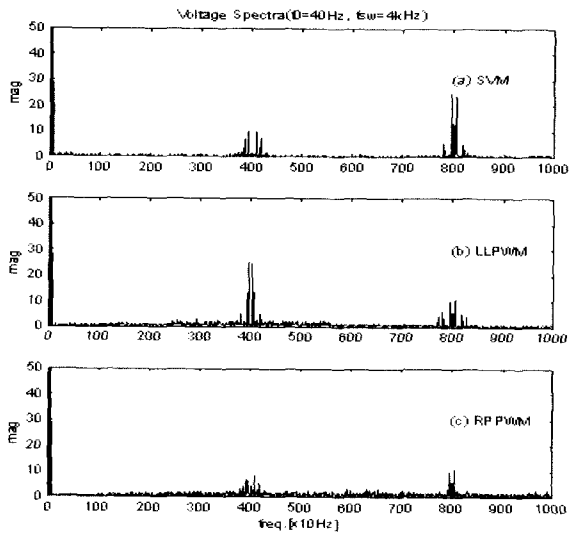


그림 14 전압스펙트럼 ( $f_0=40\text{Hz}$ ,  $f_{sw}=4\text{kHz}$ )  
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM  
 Fig. 14 Voltage spectra in case  $f_0=40\text{Hz}$ ,  $f_{sw}=4\text{kHz}$ ;  
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM

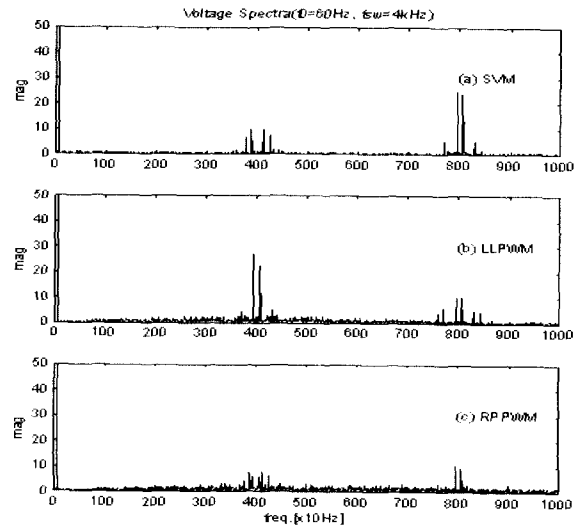


그림 16 전압스펙트럼 ( $f_0=60\text{Hz}$ ,  $f_{sw}=4\text{kHz}$ )  
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM  
 Fig. 16 Voltage spectra in case  $f_0=60\text{Hz}$ ,  $f_{sw}=4\text{kHz}$   
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM

그림 14~그림 16은 스위칭 주파수가 4kHz이며 기본 주파수가 40Hz인 경우와 스위칭 주파수가 각각 3kHz, 4kHz이며 기본 주파수가 60Hz인 경우의 전압 고조파를 나타낸 것이다.

시뮬레이션 결과를 살펴보면 전압의 고조파 성분은 모터의 지령속도 및 스위칭 주파수에 그리 커다란 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

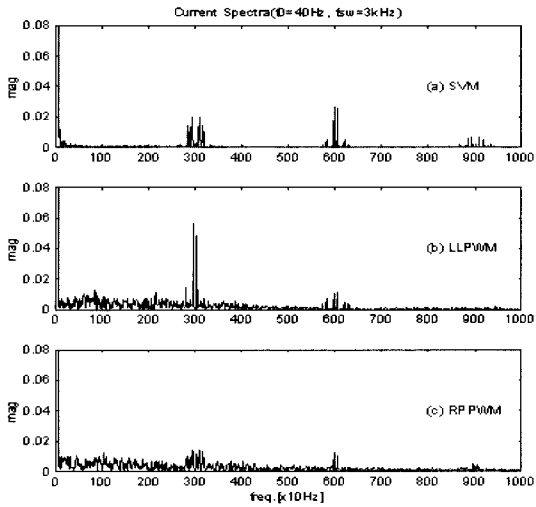


그림 17 전류스펙트럼( $f_0=40\text{Hz}$ ,  $f_{sw}=3\text{kHz}$ )  
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM  
 Fig. 17 Current spectra in case  $f_0=40\text{Hz}$ ,  $f_{sw}=3\text{kHz}$   
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM

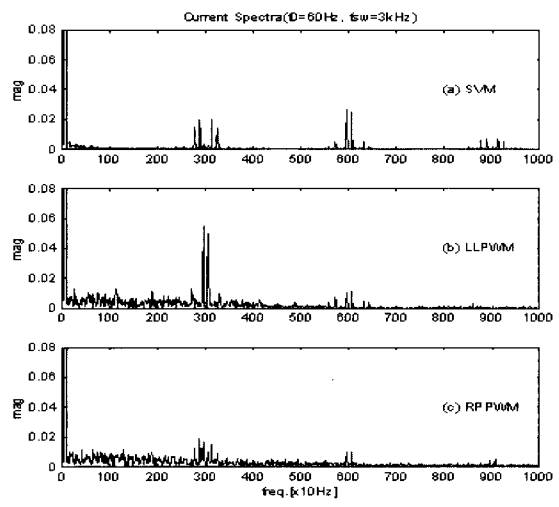


그림 19 전류스펙트럼( $f_0=60\text{Hz}$ ,  $f_{sw}=3\text{kHz}$ )  
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM  
 Fig. 19 Current spectra in case  $f_0=60\text{Hz}$ ,  $f_{sw}=3\text{kHz}$   
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM

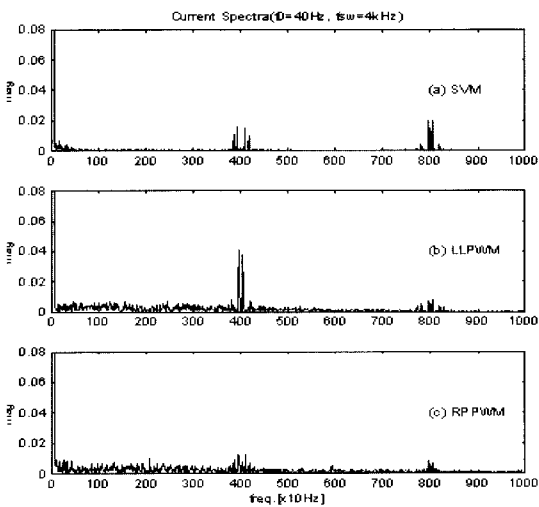


그림 18 전류스펙트럼( $f_0=40\text{Hz}$ ,  $f_{sw}=4\text{kHz}$ )  
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM  
 Fig. 18 Current spectra in case  $f_0=40\text{Hz}$ ,  $f_{sw}=4\text{kHz}$   
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM

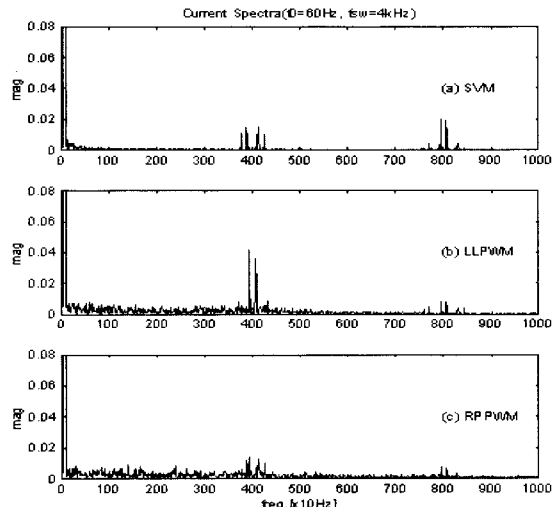


그림 20 전류스펙트럼( $f_0=60\text{Hz}$ ,  $f_{sw}=4\text{kHz}$ )  
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM  
 Fig. 20 Current spectra in case  $f_0=60\text{Hz}$ ,  $f_{sw}=4\text{kHz}$   
 (a) SVPWM (b) LLPWM (c) RPPWM

5.3 인버터 출력전류의 고조파 스펙트럼

모터를 무부하, 40Hz의 지령속도, 3kHz의 스위칭 주파수로 오픈 루프 운전하였을 때의 인버터 출력전류에 대한 고조파의 스펙트럼을 그림 17에 나타내었다.

SVPWM과 LLPWM 그리고 본 연구에서 제안한 RPPWM의 경우 모두, 전압의 스펙트럼 분포와 거의 비슷한 양상을 보이고 있다.

그림 18에 40Hz의 지령속도, 4kHz의 스위칭 주파수로 운전하였을 때의 전류의 고조파의 스펙트럼을, 그림 19에 60Hz의 지령속도, 3kHz의 스위칭 주파수로 운전하였을 때의 전류의 고조파의 스펙트럼을, 그림 20에 60Hz의 지령속도, 4kHz의 스위칭 주파수로 운전하였을 때의 전류의 고조파의 스펙트럼을 나타내고 있다.

5.4 변조지수의 변화에 따른 고조파의 분포

각 스위칭 방법의 변조지수 변화에 따른 전압 스펙트럼의 시뮬레이션 결과를 그림 21~그림 23에 나타내었다. 시뮬레이션 조건은 기본주파수 60Hz 및 스위칭 주파수 3kHz인 경우이다.

표 3 3의 홀수 배수인  $m_f$  에 대한 3상 인버터의 선간전압의 고조파 크기

Table 3 Harmonics of line voltage in case that  $m_f$  is odd multiples of 3 in PWM inverter

h	$m_f$	0.2	0.4	0.6	0.8	1
1		0.112	0.245	0.367	0.490	0.612
$m_f \pm 2$		0.010	0.037	0.080	0.135	0.195
$m_f \pm 4$					0.005	0.011
$2m_f \pm 1$		0.116	0.200	0.227	0.192	0.111
$2m_f \pm 5$					0.008	0.020
$3m_f \pm 2$		0.027	0.085	0.124	0.108	0.038
$3m_f \pm 4$			0.007	0.029	0.064	0.096

삼각파 캐리어의 정현파 변조에 의한 PWM 스위칭에 의하여 전압 고조파가 발생하는 주파수는 다음과 같다.

$$f_h = (jm_f \pm k)f_1 \tag{13}$$

여기서,  $m_f$  는 주파수 변조비,  $f_1$ 은 기본 주파수이다. 즉 고조파의 차수 h는 다음과 같이 주파수 변조비에 j 배 한 값의 k번째 측파대가 된다.

$$h = jm_f \pm k \tag{14}$$

여기서, 기본파는 h=1일 때이며, 고조파는 j값이 홀수이면 짝수인 k값에서 만 존재하고 j가 짝수이면 홀수의 k값에서만 존재한다. 큰 값이며 3의 홀수 배수인 주파수변조비에 대한 삼각파 캐리어 방식의 3상 인버터에서의 선간전압의 고조파의 크기를 정리하면 표 3과 같다. 주파수 변조비가 작을 때(<=21)에는 짝수 고조파를 제거하려면 동기 PWM을 사용하여야 하고 주파수 변조비는 홀수이어야 하며, 선간전압에서 가장 주된 고조파를 제거하기 위해서는 주파수 변조비는 3의 배수이어야 한다.

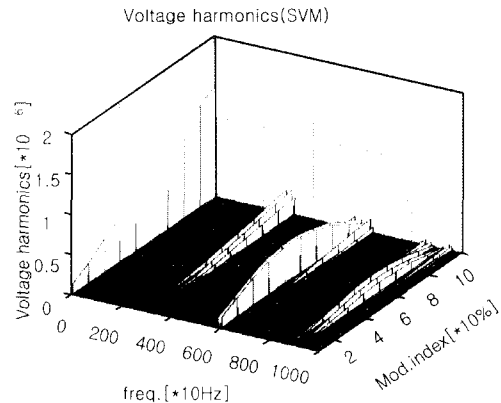


그림 21 변조지수의 변화에 따른 SVPWM의 전압고조파  
Fig. 21 Voltage harmonics at different modulation index with SVPWM

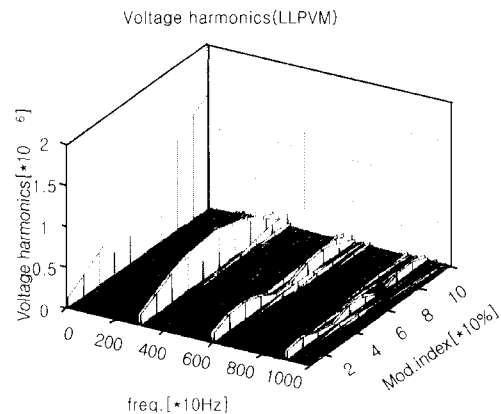


그림 22 변조지수의 변화에 따른 LLPWM의 전압고조파  
Fig. 22 Voltage harmonics at different modulation index with LLPVM

본 시뮬레이션 조건은 주파수 변조비가 50 (=3kHz/60Hz)으로써 홀수 및 3의 배수는 아니지만 21에 비하여 상당히 큰 값이므로 짝수 고조파 및 가장 주된 고조파에 대한 영향은 적을 것으로 생각된다.

그림 21은 기본주파수 60Hz, 스위칭 주파수 3kHz, SVPWM방식의 변조지수의 변화(0~1)에 따른 고조파 분포도이다. 표 3과 거의 일치하는 형태를 보이고 있다. 삼각파 캐리어에 의한 스위칭은 SVPWM 방식과 펄스가 배치되는 위치는 같으므로 이는 당연한 결과로 여겨진다.

그림 22는 LLPWM방식의 변조지수 변화에 따른 고조파 분포도이다.

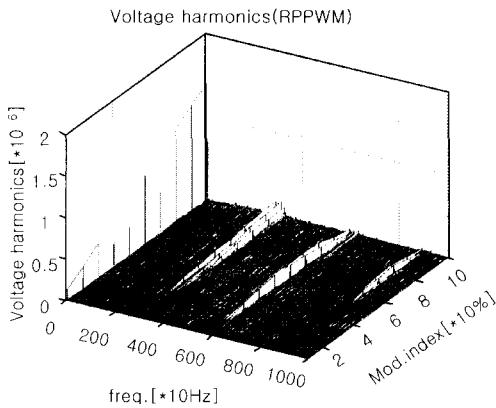


그림 23 변조지수의 변화에 따른 RPPWM의 전압고조파  
 Fig. 23 Voltage harmonics at different modulation index with RPPWM

그림 23은 제안된 RPPWM방식의 변조지수 변화에 따른 고조파 분포도이다. 제안된 RPPWM 에 의하여 1배, 2배 및 3배 스위칭 주파수에 대해 고조파의 양이 현저히 줄어 있음을 알 수 있다.

### 6. 결 론

본 연구에서는 펄스의 위치를 랜덤하게 함으로써 효율적인 RPWM을 구현할 수 있는 새로운 공간벡터 RPPWM방식을 제안한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 제안된 RPPWM은 매 변조구간마다 각 3상 펄스의 위치를 랜덤하게 배치하여 스위칭 주파수가 일정하지 않다. 그 결과 인버터의 출력 전압 및 전류의 불연속적이고 강한 고조파 성분을 광대역에 연속적인 성분으로 분산시킬 수 있었다.

2) 고정 주파수 SVPWM 방식, LLPWM 방식 및 제안된 RPPWM 방식에 의한 인버터 출력 전압, 전류의 스펙트럼을 비교 검토한 결과, 제안된 RPPWM 방식이 불연속 성분 전압 및 전류의 고조파를 줄이는 데는 탁월한 효과가 있었다.

3) LLPWM 방식에서는 펄스가 위치할 수 있는 경우의 수 두가지로 매우 제한 되어 있었기 때문에 만족할 만한 전압 및 전류 스펙트럼의 광대역화를 이룩하지 못했다. 그러나 제안된 RPPWM 방식은 다른 상 펄스위치의 경계를 벗어나지 않는 한 어느 위치에서도 연속적인 위치가 가능하므로 펄스 위치 선정에 있어서

매우 자유도가 높은 RPWM방식임을 알 수 있었다.

4) 제안된 RPPWM은 중전의 SVPWM을 적용할 수 있는 대부분의 인버터 구동 장치에 성능 저하 또는 제한 사항 없이 적용 가능하리라 사료된다.

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

### 참 고 문 헌

- [1] A. M. Trzynadlowski, F. Blaabjerg, J. K. Pedersen, R. L. Kirlin, S. Legowski, "Random pulse width modulation techniques for converter fed drive systems- A Review", IEEE Trans. IA, vol. 30, no. 5, pp. 1166~1174, 1994.
- [2] A. M. Trzynadlowski, S. Legowski, R. L. Kirlin, "Random pulse width modulation technique for voltage controlled power inverters", IEEE IA Conf. Rec, pp. 863~868, 1987.
- [3] T. G. Habetler, D. M. Divan, "Acoustic noise reduction in sinusoidal PWM drives using a randomly modulated carrier", IEEE PESC, pp. 665~671, 1989.
- [4] T. G. Habetler and D. M. Divan, Acoustic noise reduction in sinusoidal PWM drives using a randomly modulated carrier, IEEE Trans. PE, vol. 6, no. 3, pp. 356~363, 1991.
- [5] F. Blaabjerg, J. K. Pedersen, Digitally implemented random modulation strategies for a.c. and switched reluctance drives, in Proc. IECON'93, pp. 676~682, 1993.
- [6] J. K. Pedersen and F. Blaabjerg, Digital quasi random modulated SFVPM PWM in an AC drive system, IEEE Trans., IA, vol. 41, no. 5, pp. 518~525, 1994.
- [7] S. Legowski and A. M. Trzynadlowski, Hypersonic MOSFET based power inverter with random pulse width modulation, in Conf. Rec, IEEE IAS Ann. Mtg., pp. 901~903, 1989
- [8] R. L. Kirlin, S. Kwok, S. Legowski, and A. M. Trzynadlowski, Power spectra of a PWM inverter with randomized pulse position, in Proc. PESC'93, pp. 1041~1047, 1993.
- [9] S. Legowski and A. M. Trzynadlowski, Analysis and implementation of a grey noise PWM technique based on voltage space vectors, in Proc. APEC'92, pp.

586~593, 1992.

- [10] D. E. Knuth, Seminumerical Algorithms, 2<sup>nd</sup> ed., vol. 2 of The Art of the Computer Programming, Addison Wesley, 1981.

### 저 자 소 개



#### 나석환(羅碩煥)

1963년 4월 3일생. 1991년 전남대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 한국과학재단 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터(RRC) 연구원. 현재 (주)하우 무선데이터 통신 연구소 책임연구원.



#### 정영국(鄭榮國)

1963년 11월 10일생. 1986년 전남대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년 일본 오카야마대학 연구방문. 현재 대불대 전기공학과 전임강사. 한국과학 재단 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터(RRC) 연구원.



#### 임영철(任永徹)

1953년 4월 22일생. 1975년 전남대 전기공학과 졸업. 1977년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년 오스트레일리아 모나시대학 Visiting Scholar. 현재 전남대 전기공학과 교수. 한국과학재단 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터(RRC) 소장. 당 학회 편집이사.