

Random Position PWM을 이용한 유도전동기의 가청 스위칭 소음 저감

任永徹, 羅碩煥

Reduction of Audible Switching Noise in Induction Motor Drives Using Random Position PWM

Young-Cheol Lim, Seok-Hwan Na

요 약

RPWM(Random Pulse Width Modulation)은 인버터의 스위칭 주파수를 랜덤하게 변화 시킴으로써 전압, 전류의 고조파 및 소음의 스펙트럼을 광대역에 분산시키는 PWM 기법이다. 스위칭 주파수 또는 펄스의 위치를 랜덤하게 변화 시켜 고조파의 불연속적인 이산치 성분을 넓은 영역에 분산시켜 EMI, 진동 등에 좋은 효과를 낼 수 있을 뿐만 아니라, 전력소자의 스위칭에 의해 발생하는 가청 스위칭 소음을 저감할 수 있으므로 근래에 매우 각광 받고 있다. 본 연구에서는 펄스의 위치를 랜덤하게 함으로써 가청 스위칭 소음을 저감할 수 있는 새로운 RPPWM(Random Position Pulse Width Modulation) 방식을 제안 및 구현하였다. 제안된 방식은 각 3상 펄스들의 위치를 변조 구간 내의 임의의 위치에 랜덤하게 배치함으로써 RPWM을 구현하는 방식이다. 이를 위하여 16bit 고성능 마이크로 컨트롤러인 C167을 사용하여, 공간 벡터 변조에 의하여 각 변조 구간에서의 듀티비를 구한 후, 랜덤수 발생기를 이용하여 균일한 분포로 각 상의 펄스를 배치하였다. 그리고 제안된 RPPWM을 이용하여 실험한 결과, 전압, 전류 및 소음의 스펙트럼이 광대역화 되어 전력소자의 스위칭에 의해 발생하는 전동기의 가청 스위칭 소음이 현저히 저감 됨을 확인하였다.

ABSTRACT

RPWM(Random Pulse Width Modulation) is a switching technique to spread the voltage and current harmonics on wide frequency area. Using randomly changed switching frequency of the inverter, the power spectrum of the electromagnetic acoustic noise can be spread into the wide-band area. And the wide-band noise is much more comfortable and less annoying than the narrow-band one. So RPWM have been attracting an interest as an excellent reduction method of acoustic noise on the inverter drive system. In this paper a new RPPWM(Random Position PWM) is proposed and implemented. Each of three pulses is located randomly in each switching intervals. Along with the randomization of PWM pulses, the space vector modulation is processed on the C167 microcontroller also. The experimental results show that the voltage and current harmonics were spread into wide band area and that the audible switching noise was reduced by proposed RPPWM method.

Key Words: PWM, RPWM, random position, harmonics, acoustic noise, EMI

1. 서 론

전동기의 인버터 구동 장치에서 PWM (Pulse Width

Modulation) 기법은 구동 성능에 영향을 미치는 중요한 요소 중의 하나이다. 지금까지 보고되고 있는 PWM 기법에 관한 연구는 주로 전압 및 전류의 고조파 손실, 구동 장치의 효

을 등에 주안점을 두어 왔다.⁽¹⁾ 그런데 최근 전자파 및 소음 저감 등의 환경 개선에 대한 관심이 고조됨에 따라 손실, 효율 뿐만 아니라 전동기 구동 시 발생하는 가청 소음을 저감시키기 위한 전동기 설계, 구동 장치의 스위칭 구조와 방법의 개선 및 유지보수 방법 등 다양한 측면에서 여러 연구가 시도되고 있다. 유도전동기 구동 시 발생하는 소음은 크게 전동기의 방열 팬에 의한 소음, 가동부 베어링 등의 기계적인 마찰에 의한 소음, 전동기 및 가동부의 고유진동수와 관계된 공진에 의한 소음 및 인버터 스위칭에 의한 전자기적 소음 등으로 나눌 수 있다.⁽²⁾ 기계적 소음은 주로 방열 팬의 회전 수 또는 전동기의 회전 수와 관련된 비교적 저주파 대에서 발생하지만, 인버터 스위칭에 의한 전자기적 소음은 협대역의 고주파 대에 발생하여 통신 장애 및 사람에게 고통을 유발한다.⁽³⁾

일반적인 PWM 인버터의 온/오프 스위칭은 고정 스위칭 주파수로 동작되며, 스위칭 주파수가 커질수록 이에 비례하여 전압, 전류의 고조파 성분의 차수는 고차로 옮겨가고 크기는 적어지며, 이러한 고정 스위칭 주파수 PWM으로 구동되는 전동기 전류는 이 스위칭 주파수에 관계한 협대역의 고조파로 인해 스위칭 소음을 심각하게 유발한다. 현재 주로 사용되고 있는 전력용 반도체 스위칭 소자들의 예를 보면, SCR, GTO 등은 1~2kHz 정도, BJT는 4kHz 정도, IGBT는 15kHz 이하 정도의 주파수로 동작시키는 것이 일반적이다. 이런 스위칭에 의한 전자기적 소음은 20Hz~20kHz의 가청 주파수 영역에 있기 때문에 산업용 전동기의 경우에도 주변에 있는 사람이 괴로움을 느낄 수 있는 정도이며, 특히 전동기가 대용량화 됨에 따라 전동기에 흐르는 전류는 커지게 되어 전자기적 소음도 더욱 커지게 된다. 그런데, 심리학적인 연구 결과에 의하면 광대역 소음보다는 협대역 소음이 사람에게 훨씬 고통을 주는 것으로 알려져 있다.^(2, 3) 그리고 이러한 가청 소음 저감에 관한 연구로써는, 스위칭 주파수를 인간의 가청 소음 영역 보다 더 높은 주파수로 스위칭하는 법^(4, 5), 운전 조건에 따라 전류 고조파를 최소화 하는 스위칭 온/오프 각을 ROM에 저장해 두고 이것에 의해 스위칭이 제어되는 고조파 제거형 PWM 방식을 사용하는 법⁽⁶⁾ 등이 보고되었다.

그러나 최근 들어 매우 각광 받는 가청 스위칭 소음 저감 PWM 방법으로써, PWM의 스위칭 주파수를 특정하게 고정시키지 않고 넓은 주파수 영역에서 스위칭이 이루어지도록 하여, 소음의 스펙트럼을 넓은 주파수 영역으로 고루 분산시켜 사람에게 고통을 주는 가청 스위칭 소음을 저감시키고자 하는 RPWM에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. RPWM 기법은 랜덤 함수에 의해 인버터의 매 스위칭 순간마다 다른 스위칭 주파수로 온 또는 오프 되도록 하여 전압, 전류 및 소음의 스펙트럼을 광대역에 분산시키는 PWM 방식이다. RPWM 기법은 비교적 간단한 연산에 의하여 랜덤한 주파수를 갖는 스위칭 패턴을 얻을 수 있으므로 가청 스위칭 소음

저감을 위한 PWM 기법으로서 많은 관심을 불러일으키고 있으며, 전동기용 범용 인버터 뿐만 아니라 DC 초퍼, 델타인버터, 초음파인버터 등에도 적용되어 유용한 결과를 얻고 있다. 이러한 RPWM에 관한 연구로는, 삼각파 주파수를 랜덤하게 변조하는 '삼각파에 의한 RFPWM(Random Frequency PWM)'^(7, 8), 속도 지령치 전압 공간벡터가 인가되는 스위칭 구간의 시간폭을 랜덤하게 제어하는 '공간벡터에 의한 RFPWM'⁽⁹⁾, 한 변조 구간에서 충분한 수의 랜덤수를 발생시켜 지령치 듀티비와 비교하여 랜덤수만큼의 스위칭을 하여 결국 지령치 듀티비에 해당하는 펄스 온 시간을 갖도록 하는 RSPWM(Random Switching PWM)⁽¹⁰⁾, 매 스위칭 구간의 시간은 일정하지만 펄스의 위치를 변조구간 내의 앞 또는 뒤에 랜덤하게 배치시키는 LLPWM (Lead-Lag PWM)⁽¹¹⁾ 등이 보고되었다. 그런데 삼각파 방식의 RFPWM은 캐리어를 발생시키기 위한 아날로그회로가 요구될 뿐만 아니라 공간벡터 변조방식에 비해 인버터의 최대 변조지수가 낮다는 단점이 있으며, 공간벡터 방식의 RFPWM은 제어 알고리즘의 요구되는 계산량에 따라 최대 스위칭 주파수가 매우 민감하게 제한을 받는다는 단점이 있다. 또한 RSPWM은 매우 높은(수백 kHz) 스위칭 주파수를 요구하므로 전력소자 선택에 제한을 주며, LLPWM은 간단히 구현할 수 있는 장점이 있는 반면 스펙트럼을 광대역에 고루 분포 시키는 데는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 펄스의 위치를 랜덤하게 함으로써 효율적인 RPWM을 구현 할 수 있는 새로운 방식의 RPPWM(Random Position Pulse Width Modulation)을 제안 및 구현하였다. 제안된 방식은 각 3상 펄스들의 위치를 변조 구간 내의 임의의 위치에 랜덤하게 배치함으로써 스위칭에 의한 고조파의 스펙트럼을 광대역화 하는 RPWM 방식이다. 이를 위하여 16bit 고성능 마이크로 컨트롤러인 C167을 사용하여, 공간 벡터 변조에 의하여 각 변조 구간에서의 듀티비를 구현 후, 균일한 분포를 갖는 랜덤수 발생 함수를 이용하여 각 상의 펄스를 랜덤하게 배치하였다.

그리고 제안된 RPPWM을 이용하여 실험한 결과 전압, 전류 및 소음의 스펙트럼이 광대역화 되었으며, 또한 이 때 전력소자의 스위칭에 의해 발생하는 전동기의 가청 스위칭 소음이 현저히 저감 됨을 확인하였다.

2. Random PWM

일반적인 PWM 인버터의 온/오프 스위칭은 고정 스위칭 주파수로 동작되며, 스위칭 주파수가 커질수록 이에 비례하여 전압, 전류의 고조파 성분의 차수는 고차로 옮겨가고 크기는 작아지며, 이러한 고정 스위칭 주파수 PWM으로 구동되는 전동기 전류는 이 스위칭 주파수에 관계한 협대역의 고조

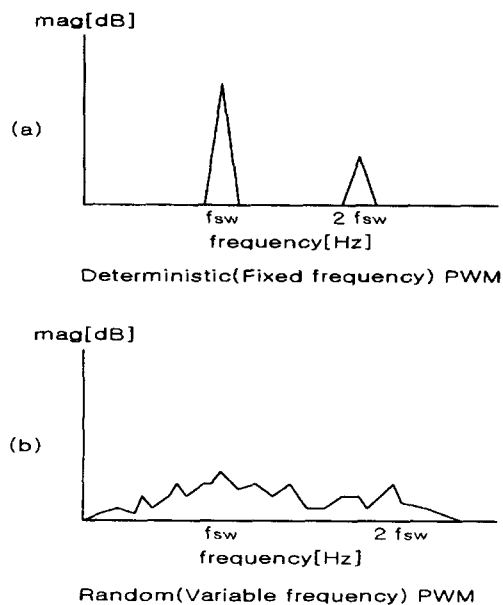


그림 1 랜덤 PWM의 효과: (a) 고정주파수, (b)랜덤주파수
 Fig. 1 Effects of random PWM: (a)fixed frequency, (b) random frequency

파로 인해 가청 스위칭 소음을 심각하게 유발한다. 그러나 고정 주파수가 아닌 여러 주파수가 혼재하는 PWM 스위칭을 한다면 전압, 전류, 소음 등의 스펙트럼을 광대역화 하여 특정 주파수(스위칭 주파수) 대에 강하게 존재하던 고조파 성분의 세력을 약하게 할 수 있다. 즉 연속치 성분의 고조파는 다소 증가하지만 EMI, 진동, 소음 등에 좋지 않은 영향을 미치는 이산치 성분의 고조파는 현저히 감소하게 된다. 이렇게 할 수 있는 좋은 방법은 전력소자의 스위칭 주파수를 연속적으로 변경시키고, 또한 이 때의 스위칭 주파수는 넓은 주파수 대역에 균일하게 분포되도록 하는 방법이다. 이러한 PWM 스위칭 방식을 RPWM(Random Pulse Width Modulation)이라 한다. Fig. 1에 RPWM에 의하여 전압 및 전류의 스펙트럼이 광대역화 된 경우를 보인다. 이론적으로 모든 주파수의 성분이 고루 분포한다면 백색잡음(White Noise)이 되지만 실제로 RPWM을 구현하기 위해서는 소자의 스위칭 능력을 감안하여 특정한 영역으로 스위칭 주파수의 제한을 해야만 한다. 정해진 스위칭 주파수 대 내에서 고른 스펙트럼의 분포를 위해 랜덤발생기를 이용한다.

스위칭 주파수가 일정 또는 가변 되는 PWM 시스템에서 스위칭에 의한 k 차 고조파 신호의 세기 P_k 는 n 번째 스위칭 구간에서 온 되는 시점 θ_n 및 기본파 1주기의 스위칭 횟수 N 에 대해 다음과 같은 관계가 있다.^[14]

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

여기서, $E\{\cdot\}$ 는 통계적 기대치를 의미하며, a_n 은 n 번째 스위칭 구간의 듀티비의 지령치를 나타낸다. 식(1)에서 PWM 주파수가 일정하다면 통계적 기대치($E\{\cdot\}$)는 0이 되며, 이것은 스위칭 주파수의 정수배에 해당하는 주파수대에서 펄스 형태로 신호의 세기가 강하게 나타나며, 스펙트럼 상에서 피크를 잇는 포락선은 정현파 형태가 됨을 의미한다.

θ_n 이 랜덤변수라면, 식(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

또한, N 이 랜덤변수라면 식(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_k \propto \left\{ \frac{1}{K} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^N \bar{a}_n \frac{\sin\left(\pi \frac{k}{N_i} \bar{a}_n\right)}{\pi \frac{k}{N_i} \bar{a}_n} \cdot e^{-j2\pi \frac{k}{N_i} n} \right\}^2 \quad (3)$$

식(3)에서 K 는 발생할 수 있는 랜덤수의 가지 수를 나타내며, 일정하지 않은 스위칭 횟수 N_i 가 증가함에 따라 스펙트럼은 높은 주파수 영역으로 이동하게 된다. 만일 N 이 랜덤하게 변화하면 k 차 고조파의 세기는 연속적인 스펙트럼의 형태로 분산되어 나타난다. 이상과 같이 인버터 스위칭 온/오프 각 또는 기본파 1주기 내의 스위칭 횟수를 제어하여 스펙트럼의 분포를 광대역화 할 수 있다.

3. Random Position PWM

본 연구에서 제안하는 새로운 RPWM기법은 펄스의 위치를 랜덤하게 하는 것이다. 이는 서론에서 언급한 Lead-Lag PWM을 개선한 방식이다. Lead-Lag PWM 방식에서는 펄스의 위치가 두 가지 중의 하나에서 선택이 된다. 결국 랜덤 스위칭에 의하여 스펙트럼을 고루 분포 시키는 데는 한계가 있다. 그러나 제안된 RPPWM (Random Position PWM) 방식은 변조구간 내에서 훨씬 자유롭게 펄스를 배치할 수가 있기 때문에 스펙트럼 분포의 효과가 훨씬 크다. 발생된 PWM의 예를 Fig. 2의 (a)에 현재 일반화된 가운데 정렬 방

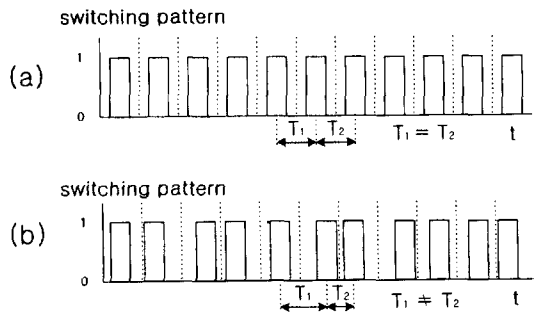


그림 2 스위칭 함수: (a)가운데 정렬, (b)RPPWM
Fig. 2 Switching function: (a)SVM, (b)RPPWM

식의 PWM 스위칭 함수를, (b)에 본 연구에서 제안한 RPPWM 방식의 스위칭 함수를 보인다. (a)에서는 펄스의 위치가 항상 중앙에 위치하게 되지만 (b)의 경우에는 펄스의 위치가 매 변조 구간마다 임의의 위치에 랜덤하게 배치된다.

3.1 랜덤수의 발생

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. 물론 랜덤함수가 아닌 정현함수 등을 사용할 수도 있지만, 본 연구에서 요구되는 균일 분포 외에 비 주기성도 만족시키기 위해서는 랜덤함수가 더 적당한 것으로 인식되고 있다.

랜덤함수는 대개 컴파일러의 라이브러리 형태로 제공된다. 그러나 이와 같이 시스템에서 제공하는 랜덤함수를 사용할 경우 주의할 점이 있다. 몇 가지 예를 들면,

- 1) 발생된 랜덤수의 범위는 충분한가.
- 2) 균일한 분포를 갖는가.
- 3) 범위 내에서 주기성을 확실히 피할 수 있는가. 하는 것들이다. 시스템에서 제공되는 거의 대부분의 랜덤함수들은 선형 일차 발생기(linear congruential generator)이며, 정해진 범위내의 정수를 발생하도록 되어 있다. 그러나 공학적으로 이러한 랜덤함수를 이용할 경우에 랜덤수의 범위가 너무 적은 경우가 있다. ANSI C 규정은 이 범위를 RAND_MAX라는 상수로써 겨우 32767로 정해 두고 있다. 더욱 좋지 않은 것은 연속적으로 랜덤함수를 호출하면 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 *im*사이의 정수를 다음 식에 의해 발생 시키고

$$jran = (jran * ia + ic) \% im \quad (4)$$

만일 0부터 1사이의 랜덤한 실수를 원한다면,

$$ran = (float)jran / (float)im \quad (5)$$

만일 *jlo*부터 *jhi*사이의 정수를 원한다면,

$$j = jlo + ((jhi - jlo + 1) * jran) / im \quad (6)$$

에 의하여 원하는 범위의 랜덤수를 구할 수 있다. 여기서 *ia*, *ic*, *im*은 선택된 상수로써 각각 multiplier, increment, modulus라 불린다. 그리고 *jlo*, *jhi*는 발생시킬 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 *ia*, *ic*, *im*은 신중히 선택되어야 한다.^[12] *ic*는 소수(prime number)이어야 하며, *ic*와 *im*은

$$ic \approx \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{6}\sqrt{3}\right)im \quad (7)$$

인 관계를 가져야 한다.^[13] 그러나 이러한 상수들을 선택하는데 있어서도 완전히 자유롭지는 못하며 여러 가지 가능한 경우 중 몇 가지를 정리하면 표 1과 같다.

표 1 균일한 분포를 갖기 위한 랜덤수를 위한 상수.

Overflow at	<i>im</i>	<i>ia</i>	<i>ic</i>
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

Fig. 3은 적절한 상수에 의한 랜덤 분포 결과로써, modulus, multiplier, increment가 각각 6075, 106, 1283인 경우이다. 적절한 상수에 의해 각 랜덤수가 발생한 횟수는 약 500번의 고른 분포를 보임을 알 수 있다. Fig. 4는 부적절

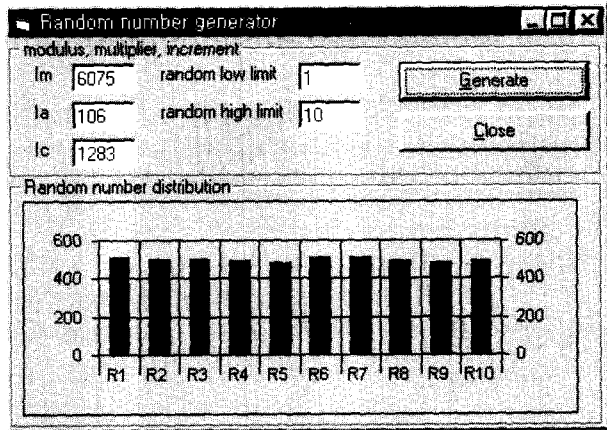


그림 3 적절한 상수에 의한 균일한 랜덤 분포 (Im = 6075, Ia = 106, Ic = 1283)

Fig. 3 Random distribution with proper chosen constants (Im=6075, Ia=106, Ic=1283)

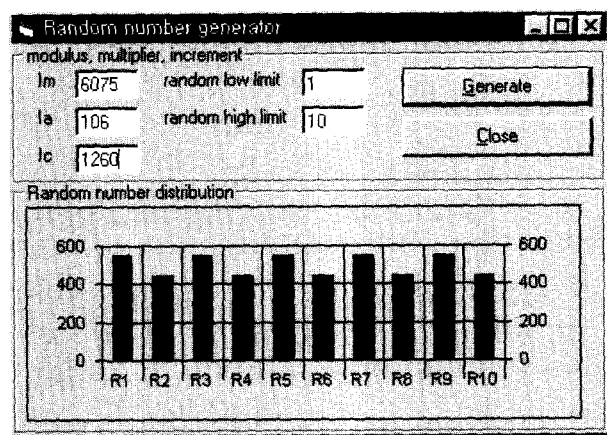


그림 4 부적절한 상수에 의한 균일하지 않은 랜덤 분포 (Im = 6075, Ia = 106, Ic = 1260)

Fig. 4 Random distribution with bad chosen constants (Im=6075, Ia=106, Ic=1260)

한 상수에 의한 랜덤 분포의 결과이다. increment Ic를 1283 대신에 소수가 아닌 1260을 선택한 경우이다. 이렇듯 랜덤수를 발생시키는 데는 상수의 선택이 매우 중요함을 알 수 있다.

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. 본 연구에서는 제안된 RPPWM을 구현하기 위하여 공간벡터 변조

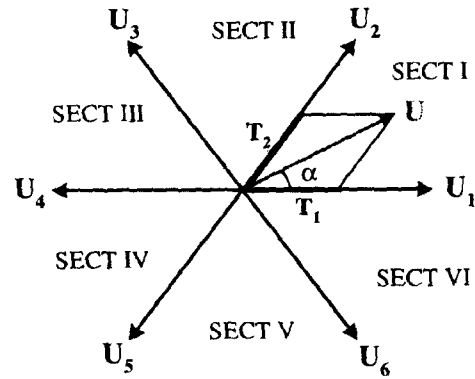


그림 5 공간벡터도

Fig. 5 Diagram for space vector modulation

방식을 적용한다. Fig. 5에서 지령치 전압벡터 U를 합성하기 위해서는 U₁, U₂를 어떤 계산된 시간 만큼 적절히 나누어 인가해줌으로써 가능하다. 벡터 U의 각이 라면 한 변조 주기 동안 벡터 U₁을 인가해야 할 시간 T₁ 과 벡터 U₂를 인가해야 할 시간 T₂는 다음식에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 T_1 &= T \cdot M \cdot \frac{\sin(60^\circ - \alpha)}{\sin 60^\circ} \\
 T_2 &= T \cdot M \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin 60^\circ} \\
 T_0 &= T - T_2 - T_1
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

여기서 T₁ : Time duration of vector U₁, T₂ : Time duration of vector U₂, T₀ : Time duration of zero vector, T : Sampling period 이다.

3.3 공간벡터 변조에 기반한 펄스위치 결정

공간벡터 변조에 의하여 매 제어 구간마다 각 상의 펄스의 듀티비가 구해지면 RPPWM을 수행하기 위하여 펄스의 위치를 랜덤하게 하는 작업이 필요하다. 전술한 식 (4)에 의한 랜덤 발생 기법에 의하여 생성된 랜덤수를 펄스가 위치할 수 있는 범위 안에 들도록 식(6)을 사용하여 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.^[12] 각 펄스들이 위치 할 수 있는 범위는 현재 지령치 전압벡터가 6개의 섹터 중 어느 위치에 있는가에 따라 달라진다. 만일 섹터 1에 지령치 공간벡터가 있어서 벡터 U₁, U₂가 시분할로 인가되어야 할 때 각 3상 펄스의 상대적인 크기와 펄스가 위치할 수 있는 영역을 Fig. 6에 나타낸다. 이 경우 a상 펄스가 위치할 수 있는 범위는 변조지수가 1이라고 가정하면, 변조 구간

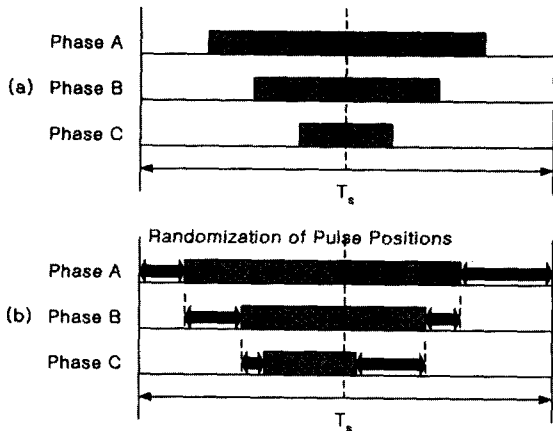


그림 6 RPPWM을 수행할 때 각 상의 펄스가 위치할 수 있는 범위:
 (a) 가운데 정렬, (b) 랜덤 위치
 Fig. 6 Range for each phase pulse with RPPWM:
 (a) SVM, (b) RPPWM

내의 어느 위치에도 올 수 있으며, b상 펄스는 a상 펄스의 한계를 벗어나지 않는 범위 내에 위치해야 하며, 마찬가지로 c상 펄스도 b상 펄스의 한계를 벗어나지 않는 범위 내에 들어야 한다. 만일 어느 하나의 펄스라도 한계를 벗어난다면 3상 펄스의 조합에 따라 결정된 스위칭 상태가 변경되므로 부적절한 스위칭을 추가로 하게 된다. 한계를 벗어나지 않는다면 한 변조구간 내에서 펄스의 위치가 변경되더라도 영벡터와 두개의 유효벡터가 인가되는 각각의 시간에는 변함이 없음을 알 수 있다.

펄스의 위치가 매 변조구간에서 변경되므로 이는 스위칭 주파수가 변하는 것과 같은 효과를 갖게 된다. 이를 위하여 '유효스위칭주파수'라는 용어를 편의상 도입하기로 한다. 이 유효스위칭주파수 최대 값은 Fig. 7에서 보듯이 이전 변조구간에서 펄스가 가장 뒷 부분에 위치하고 다음 변조구간에서 구간의 시작 부분에 위치할 때이므로 영벡터가 인가되는 시간폭의 역수인 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$f_{max} = \frac{1}{T \cdot M \left(\frac{\sin(60^\circ - \alpha) - \sin \alpha}{\sin 60^\circ} \right)} \quad (9)$$

또한 유효스위칭주파수의 최소값은 다음식으로 표현할 수 있다.

$$f_{min} = \frac{1}{T \left(2 \cdot M \frac{\sin(60^\circ - \alpha) - \sin \alpha}{\sin 60^\circ} \right)} \quad (10)$$

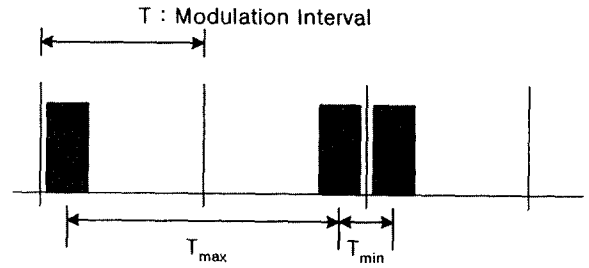


그림 7 최대 및 최소 유효 스위칭 주파수
 Fig. 7 Maximum and minimum effective switching frequency

여기서 T : modulation interval, M : modulation index 이다.

제안된 RPPWM은 다른 RPWM에 비해 다음과 같은 장점이 있다.

삼각파 캐리어 RFPWM 방식을 사용할 경우에는 캐리어 발생을 위한 아날로그회로가 필요하다. 또한 고주파의 캐리어를 선형성을 유지하면서 연속적인 변조를 하기 위해서는 매우 정교한 샘플/홀드 회로도 요구된다. 제안된 방식은 이러한 것들이 불필요하고 단지 마이크로 컨트롤러 하나로서 모든 것이 해결된다. 뿐만 아니라 공간벡터 방식의 삼각파 캐리어 방식에 대한 커다란 잇점인 더 높은 최대 변조지수를 얻을 수 있다.

공간벡터에 기반한 RFPWM 방식을 사용할 경우 매 변조구간의 시간폭을 랜덤하게 변화 시키게 되는데 전압 지령부와 스위칭부를 동기 시키려한다면 제어 루프를 위한 알고리즘의 연산 시간은 바로 스위칭 주파수의 최대값을 제한하는 요소로 작용하게 된다. 즉, 복잡한 제어 루프를 구성할 경우 최대 스위칭 주파수는 어느 한계를 갖게 된다는 점이다. 본 연구에서 제안한 RPPWM은 매 변조구간의 시간폭이 일정하기 때문에 매 변조구간마다 실행되어야 하는 인터럽트 서비스 루틴에 할당되는 시간이 일정하므로 자유롭게 제어 알고리즘을 구사할 수 있다.

RSPWM 방식으로 RPWM을 구현할 경우에 만일 1kHz의 주파수로 지령치를 인가하고 매 변조구간에서 충분히 많은, 예를 들어 100번의 랜덤수 발생시킨다면 전력 소자는 100 kHz의 스위칭에 견딜 수가 있어야 한다. 그러나 실질적으로 요즘 가장 많이 쓰이는 IGBT 전력소자인 경우의 최대 스위칭주파수는 20kHz 내외이므로 대 전력 장치에는 적용하기 어려운 점이 있다. 제안된 RPPWM은 5kHz 내외의 스위칭으로 전압, 전류 및 소음의 스펙트럼을 광대역화 할 수 있다.

LLPWM 방식은 랜덤한 스위칭 주파수를 갖기는 하나 매우 제한적이다. 발생된 랜덤수는 오직 0과 1 두 가지 뿐이다. 따라서 구현에 있어서는 간단하다는 이점이 있지만 스펙트럼

을 광대역에 분산시키는 효과는 그리 많지 않다. 제안된 RPPWM은 이에 비해 펄스 위치 선택의 폭이 넓기 때문에 훨씬 넓은 대역으로 스펙트럼을 분산시킬 수 있다.

4. 장치의 구성

제안한 Random Position PWM을 구현하기 위한 장치를 제작하였다. 본 연구의 내용은 주로 PWM의 발생 기법에 있으므로 응답성이 좋은 고성능의 폐루프 제어 방식 대신 간단한 개루프 전압제어 방식을 택하였다. 장치는 크게 나누어 C167 마이크로 컨트롤러 보드, IPM 인버터, 1.5kW 유도전동기, 제어 프로그램, 호스트 프로그램 등으로 구성되어 있다. 장치의 전체 구성도를 Fig. 8에 나타낸다.

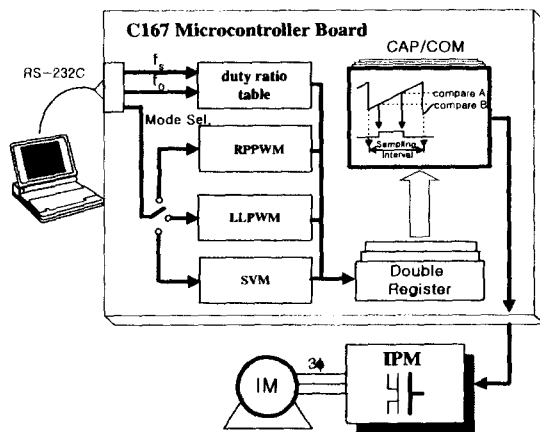


그림 8 장치의 전체 구성도
Fig. 8 System configurations

4.1 C167마이크로 컨트롤러 보드

주 제어기로서 Siemens사의 C167 마이크로 컨트롤러를 사용하였다. C167은 16bit RISC 구조이며 직류전동기는 물론 3상 브러시리스 전동기, 3상 교류기를 제어하는 데도 적합하며, 특히 3상 유도전동기의 자속기준제어 등의 고성능 시스템에 적합한 컨트롤러로 알려져 있다. 공간벡터 변조 및 랜덤 수 발생 등의 모든 연산은 C167내의 제어 프로그램에 의해 수행될 뿐만 아니라 C167 마이크로 컨트롤러의 포트 출력은 바로 IPM을 게이팅할 수 있는 신호이다. 즉 PLD(Programmable Logic Device)를 사용하지 않고 마이크로 컨트롤러에 내장된 CAP/COM(Capture Compare) 기능을 사용하여 저비용의 전력제어 장치를 구현하였다.

4.2 IPM 인버터

직류 전압을 3상 PWM으로 변환하기 위하여 인버터가 사

용된다. 인버터를 만들기 위해서는 3상의 상/하위 암(arm)에 위치하는 전력소자(전력 TR, MOSFET, IGBT 등)가 기본적으로 필요하고, 각 전력소자에는 스위칭 순간 발생하는 전압 역전 시 지연전류를 흡수할 수 있는 freewheeling diode, 암 단락 등에 대한 보호 회로, 전력소자의 게이트를 충분한 전압, 또는 전류로 제어할 수 있는 구동회로가 필요하다. 이상의 모든 것들이 하나의 소자 안에 들어 있는 것이 IPM이다. 본 연구에서는 PMC20U060 (Temic Inc.)을 사용하였다.

5. 실험 결과

소음을 측정하기 위해서는 정격 부하가 연결된 상태에서 정격속도로 운전하여 시행하는 것이 원칙이다. 그러나 이것은 전동기, 인버터의 전자기적 소음 뿐만 아니라, 구동장치 및 부하의 기계적인 소음 등을 종합적으로 측정하려고 할 경우에 적합하다. 본 연구에서 관심의 대상은 기계적인 소음이 아니라 인버터의 스위칭에 의하여 전동기로부터 발생하는 전자기적 소음이므로 부하가 연결되지 않은 상태에서 더 정확히 측정이 가능하다. 따라서 모든 실험은 무부하 상태에서 행해졌다. 그리고 전동기로부터 발생하는 가청 소음의 스펙트럼은 전동기 소음 측정을 위해 사면이 흡음재로 밀폐되도록 특별히 설계된 삼성전자 광주공장의 무향실에서 측정되었다. 실험 결과의 분석에 사용된 데이터는 유도전동기의 축 방향으로 1m 떨어진 곳과 상측 반지름 방향으로 1m 떨어진 곳 등 2지점에 설치된 마이크로로부터 측정된 값을 사용하였다.

5.1 전압의 스펙트럼

전동기를 무부하, 40Hz의 지령속도, 3kHz의 스위칭 주파수로 운전하였을 때의 전압의 고조파의 스펙트럼을 Fig. 9에 보인다. (a)는 고정주파수 가운데 정렬방식의 공간벡터 변조(SVM)를 수행한 경우이며, (b)는 Lead-lag PWM(LLPWM)을 수행한 경우이며, (c)는 본 연구에서 제안한 Random Position PWM(RPPWM)을 수행한 경우이다. (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. 만일 가장자리 정렬 방식의 PWM스위칭을 한다면 스위칭 주파수의 1배 주파수대에 가장 강한 고조파 성분, 그리고 스위칭 주파수의 2배 주파수대에 두 번째로 강한 고조파 성분이 존재하게 된다. (b)의 경우는 LLPWM방식에 의한 결과로써, 고조파 성분의 크기의 순서는 가장자리 정렬 PWM 방식과 비슷하다. LLPWM에 의하여 2배 스위칭 주파수대의 강한 고조파가 현저히 줄었으며, 대신 1배 스위칭 주파수대의 고조파가 상당히 증가하였다. (c)의 경우 1배 스위칭 주파수대, 2배 스위칭 주

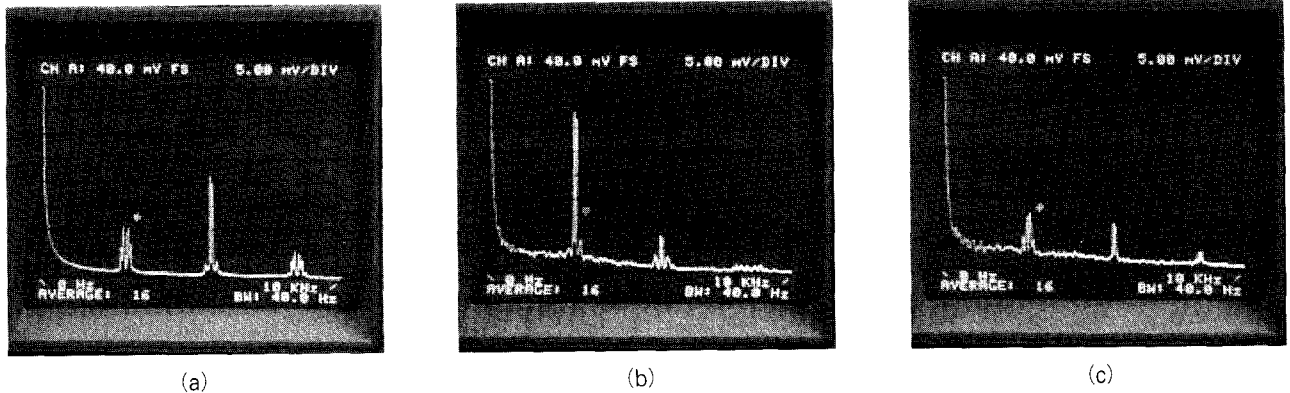


그림 9 전압의 스펙트럼(40Hz, 3kHz): (a) SVM, (b) LLPWM, (c) RPPWM
 Fig. 9 Voltage spectra(40Hz, 3kHz): (a) SVM, (b) LLPWM, (c) RPPWM

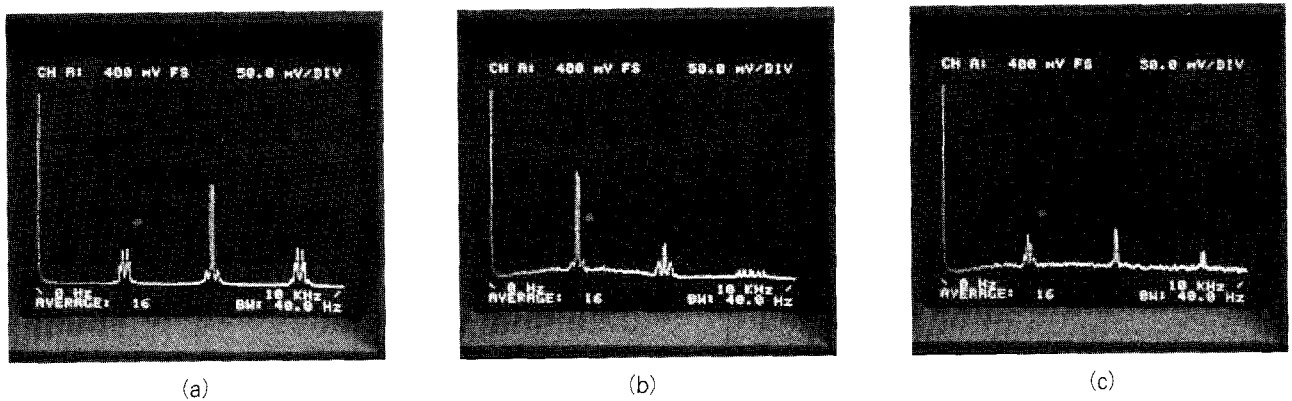


그림 10 전류의 스펙트럼(40Hz, 3kHz) ; (a) SVM, (b) LLPWM, (c) RPPWM
 Fig. 10 Current spectra(40Hz, 3kHz): (a) SVM, (b) LLPWM, (c) RPPWM

파수대 및 3배 스위칭주파수대 모두 고조파 성분의 크기가 매우 줄어들었음을 알 수 있다. 또한 2장에서 언급하였듯이 고정주파수 스위칭 시에는 존재하지 않았던 연속치 성분이 생기는 것을 알 수 있다.

5.2 전류의 스펙트럼

전동기를 무부하, 40Hz의 지령속도, 3kHz의 스위칭 주파수로 운전하였을 때의 전류의 고조파의 스펙트럼을 Fig. 10에 보인다. (a)는 고정주파수 가운데 정렬방식의 공간벡터 변조를 수행한 경우이며(SVM), (b)는 Lead-lag PWM(LLPWM)을 수행한 경우이며, (c)는 본 연구에서 제안한 Random Position PWM(RPPWM)을 수행한 경우이다. 전압의 스펙트럼 분포와 거의 비슷한 양상을 보이고 있다.

5.3 소음의 스펙트럼

전동기를 무부하, 40Hz의 지령속도, 3kHz의 스위칭 주파수로 운전하였을 때의 소음의 고조파의 스펙트럼을 Fig. 11

에 보인다. (a)는 고정주파수 가운데 정렬방식의 공간벡터 변조를 수행한 경우이며(SVM), (b)는 Lead-lag PWM(LLPWM)을 수행한 경우이며, (c)는 본 연구에서 제안한 Random Position PWM(RPPWM)을 수행한 경우이다. 그래프는 로그 스케일이며 격자 1눈금 당 10dB, 최대 70dB, 최소 10dB이다. 그리고 그래프의 주파수 축의 영역은 0 ~ 20 kHz이다. (a)의 경우 2배 스위칭주파수대 소음의 가장 강한 성분이 있고 1배 스위칭주파수대에 두 번째로 강한 소음의 성분이 존재함을 알 수 있다. 그리고 스위칭과 상관없는 주파수대인 750Hz 및 1800Hz대에 약간의 소음 성분이 존재함을 알 수 있다. (b)의 경우는 1배 스위칭주파수대 소음 성분은 미소하게 증가, 2배 스위칭주파수대 소음의 성분은 현저히 감소하였음을 알 수 있다. 그러나 750Hz대의 소음 성분은 상당히 증가함을 보이고 있다. (c)의 경우는 (a)의 경우와 비교하여 1배 스위칭주파수대 성분은 약간 감소, 2배 스위칭주파수대 성분 현저히 감소함을 보이고 있다. 이것이 바로 RPWM이 목적하는 바임은 이미 설명하였다. 그런데 이 경우

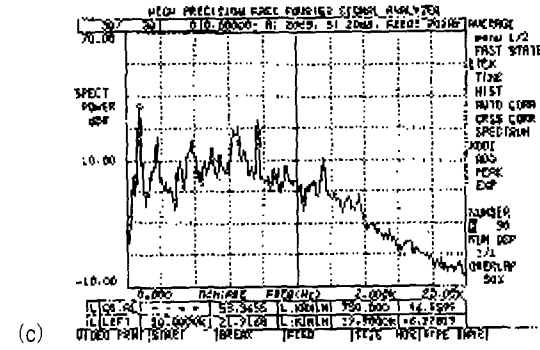
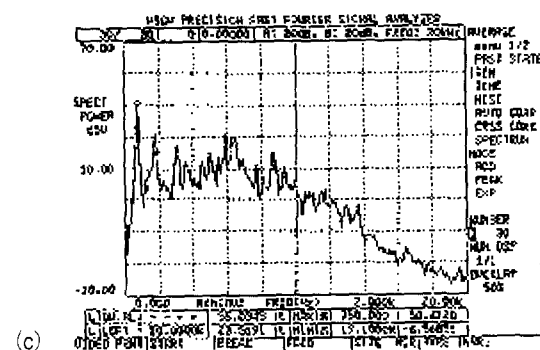
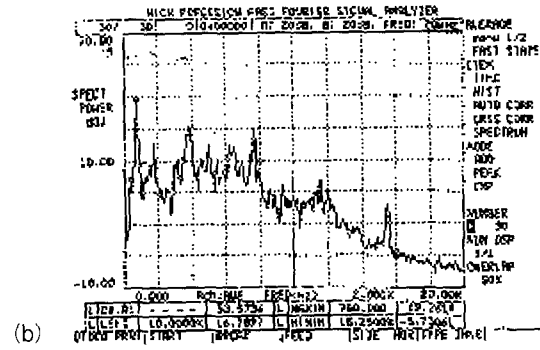
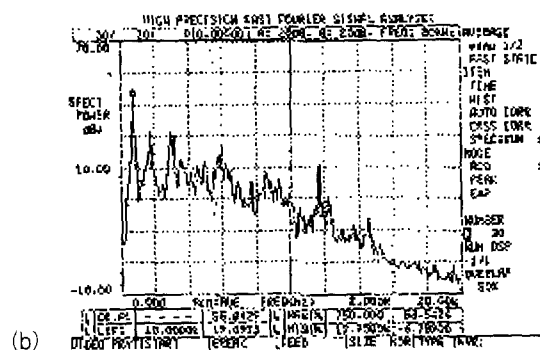
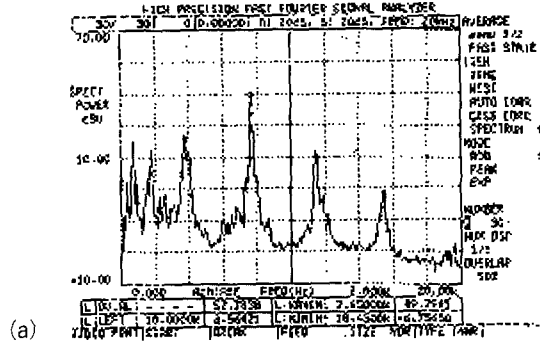
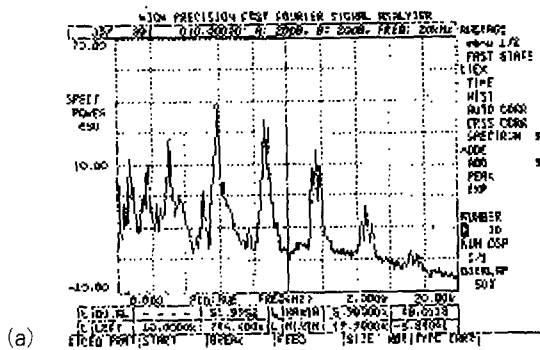


그림 11 소음의 스펙트럼(40Hz, 3kHz); (a) SVM, (b) LLPWM, (c) RPPWM

Fig. 11 Noise spectra(40Hz, 3kHz); (a) SVM, (b) LLPWM, (c) RPPWM

그림 12 소음의 스펙트럼(40Hz, 4kHz); (a) SVM, (b) LLPWM, (c) RPPWM

Fig. 12 Noise spectra(40Hz, 4kHz); (a) SVM, (b) LLPWM, (c) RPPWM

도 (b)의 경우와 마찬가지로 작았던 750Hz대 성분이 상당히 증가 하였음을 알 수 있다.

Fig. 12에 40Hz의 지령속도, 4kHz의 스위칭 주파수로 운전하였을 때의 소음의 스펙트럼을 보인다. 3kHz의 스위칭을 수행한 경우와 거의 비슷하게 1배 스위칭주파수대 및 2배 스위칭 주파수대의 소음의 성분이 RPPWM에 의하여 현저히 줄었음을 알 수 있다. 그러나 여기서 주의해서 관찰해야 하는 점은 750Hz대의 성분이다. 스위칭 주파수가 변경되었음에도 불구하고 여전히 같은 주파수대의 성분이 LLPWM,

RPPWM 경우 모두 유지되고 있다.

Fig. 13에 60Hz의 지령속도, 3kHz의 스위칭 주파수로 운전하였을 때의 소음의 스펙트럼을 보인다. 이는 전동기의 지령속도를 정격 지령 속도로 변경한 것이다. RPWM에 의하여 1배 및 2배 스위칭 주파수대 소음이 현저히 감소하였음을 확실히 보이고 있다. 그러나 특이한 점은 고정주파수의 SVM에 의한 경우에 분명히 존재하였던 750Hz의 소음 성분이 매우 줄어들었음을 알 수 있다. 그러나 LLPWM이나 RPPWM은 여전히 이 성분이 존재한다.

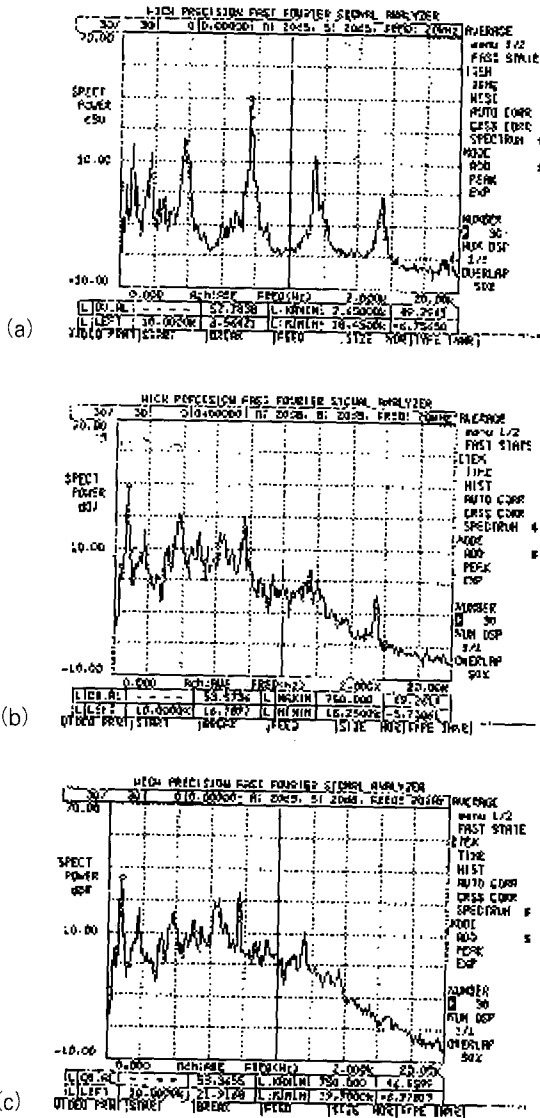


그림 13 소음의 스펙트럼(60Hz, 3kHz); (a) SVM, (b) LLPWM, (c) RPPWM
 Fig. 13 Noise spectra(60Hz, 3kHz); (a) SVM, (b) LLPWM, (c) RPPWM

6. 실험결과 고찰

제안된 RPPWM에 의한 전압, 전류 및 소음의 스펙트럼을 종합적으로 고찰한다.

고정주파수의 SVM 스위칭을 하는 경우에도 정격 속도로 운전하지 않을 경우에는 스위칭 주파수와 관계없는 주파수대의 소음이 상당히 존재한다. 이것으로 미루어 보아 실험에 사용된 전동기는 정격 주파수로 운전할 경우에 발생 소음(기계적인 소음 포함)이 최소가 되도록 설계되었음을 알 수 있다.

RPWM방식에 의하여 전압, 전류, 소음의 불연속치 성분을 현저히 줄일 수 있는 반면, 소음의 스펙트럼의 경우에는 고정 주파수 PWM수행 시에는 그렇게 큰 문제가 되지는 않았던 750Hz 저주파대의 소음이 상당히 강하게 나타나는 경우가 자주 있었다. 이는 여러 가지 지령속도 및 스위칭 주파수로 실험하여도 같은 주파수대에 나타나는 것으로 보아 스위칭과 관계없는 기계적인 소음으로 판명된다. 또한 이것이 RPPWM을 수행하는 경우에 두드러지는 것으로 보아 이미 보고되었듯이(9) 랜덤한 주파수로 스위칭을 할 경우에 전동기의 고유진동수와 관계되는 주파수와 중첩이 되어 기계적 공진을 일으킨 것으로 생각된다.

또한 스펙트럼상에 나타난 결과를 보면 RPPWM을 수행하였다 하여도 불연속치 성분이 완전히 없어지지 않았음을 보이고 있다. 이 이유는 각 펄스의 위치 선정 시 전술한 제한 사항이 있기 때문이다. 즉 가장 넓은 폭을 갖는 펄스가 변조구간 내의 어느 위치에 배치된 후 다음으로 넓은 폭을 갖는 펄스는 가장 넓은 펄스폭 내에 위치 해야만 한다는 것 때문이다. 이는 변조지수가 최대, 즉 1에 가까운 경우 제일 폭이 넓은 펄스가 움직일 수 있는 범위가 좁아지기 때문에 더욱 두드러지게 되어 스펙트럼을 광대역화 하는 효과가 적어진다. 그러나 유사한 방식인 LLPWM에 비하여 스펙트럼의 광대역화 및 가청 소음 저감에 있어서는 월등함을 알 수 있다.

7. 결 론

전동기를 PWM 방식에 의해 운전할 때 전력소자를 스위칭 함으로써 발생하는 가청 스위칭 소음을 저감하기 위한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 새로운 방식의 RPPWM(Random Position Pulse Width Modulation)을 제안 및 구현하였다. 스위칭에 의한 불연속적이고 강한 고조파 성분을 광대역에 연속적인 성분으로 분산시켜 불연속적인 강한 고조파에 의한 진동, EMI, 가청 스위칭 소음 등을 줄이기 위하여 매 변조구간마다 각 3상 펄스의 위치를 랜덤하게 하여 스위칭 주파수가 고정되지 않게 하는 방법을 사용하였다.
- 2) 제안된 RPPWM에 의하여 전동기 입력 전압, 전류 및 전동기로부터 발생하는 소음의 스펙트럼을 광대역화 하여 스위칭 주파수대 가청 스위칭 소음을 저감할 수 있음을 확인하였다.
- 3) 본 연구와 유사한 LLPWM 방식에서는 펄스가 위치할 수 있는 선택의 가지수가 2로 매우 제한 되어있었다. 따라서 전압, 전류, 소음의 스펙트럼을 광대역화 하는데 불충분하였지만 제안된 RPPWM 방식은 다른 상 펄스위치의 경계를 벗어나지 않는 한 어느 위치에든지 연속적으로 위치할 수 있는

므로 펄스 위치 선정에 있어서 매우 자유도가 높은 RPWM방식이라 할 수 있다.

4) 고정주파수 PWM방식, LLPWM방식 및 제안된 RPPWM방식에 의한 전압, 전류, 소음의 스펙트럼을 비교 관찰한 결과 LLPWM방식 및 RPPWM방식 에서는 불연속치 성분의 고조파를 줄이는 데는 확실한 효과가 있었다. 그러나 소음의 스펙트럼의 경우에는 고정주파수 PWM수행 시에는 그리 크지 않았던 저주파대의 소음이 RPWM을 수행할 경우 상당히 강하게 나타나는 경우가 자주 있었다. 이는 랜덤한 주파수로 스위칭을 할 경우에 전동기의 고유진동수와 관계되는 주파수와 중첩이 된다면 기계적 공진을 일으킬 수 있음을 보이고 있다.

본 연구는 한국과학재단 지정 '전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템연구센터'의 연구비 지원에 의해 연구되었음(98-가-1).

참고 문헌

- [1] J. M. D. Murphy, M. G. Egan, "A Comparison of PWM strategies for inverter-fed induction motors", IEEE Trans., IA, vol. 19, no. 3, pp.363-369, 1983.
- [2] S. J. Yang, Low-noise electrical motors, Clarendon Press, Oxford, 1981.
- [3] K. D. Kryter, The effects of noise on man, Academic Press, 1985.
- [4] D. A. Grnat, "PWM AC motor drive employing ultrasonic carrier," in Proc. IEE Conf. on Power Electron. And Var. Speed Driv., 1984, pp.237~240.
- [5] J. Holtz, P. Lammert, and W. Lotzkat, "High-speed drive system with ultrasonic MOSFET PWM inverter and single-chip microprocessor control," IEEE Trnas. Industry Applicat., vol. IA-23, no. 6, pp.1010~1015, 1987.
- [6] I. Takahachi, H. Mochikawa, "Optimum PWM waveforms of an inverter for decreasing acoustic noise of an induction motor," IEEE Trans., IA vol. 22, no. 5, pp.828~834, 1986.
- [7] T. G. Habetler and D. M. Divian, "Acoustic noise reduction in sinusoidal PWM drives using a randomly modulated carrier," IEEE Traras. Power Electronic., vol. 6, no. 3, pp.356~363, 1991.
- [8] 나석환, 최창률, 양승학, 김광현, 임영철, 박종건, "유도전동기의 스위칭 주파수대 소음 저감을 위한 실시간 RPWM 인버터", 한국조명전기설비학회, 11권 6호, pp.64~73, 1997
- [9] J. K. Pedersen and F. Blaabjerg, "Digital quasi-random modulated SFAVM PWM in an AC-drive system," IEEE Trans., IA, vol. 41, no. 5, pp.518~525, 1994.
- [10] S. Legowski and A. M. Trzynadlowski, "Hypersonic MOSFET basedpower inverter with random pulse width modulation," in Conf. Rec. 1989 IEEE-IAS Ann. Mtg., pp. 901~903
- [11] R. I. 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.
- [12] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing, New York: Cambridge University Press, 1988.
- [13] D. E. Knuth, Seminumerical Algorithms, 2nd ed., vol. 2 of The Art of the Computer Programming, Addison Wesley, 1981.
- [14] 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.

〈 저 자 소 개 〉



나석환(羅碩煥)

1963년 4월 3일생. 1991년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 전남대 대학원 전기공학과 박사과정.



임영철(任永徹)

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