

# 고속 3상 유도전동기 구동을 위한 새로운 RPWM 기법

권수범, 박종진, 이효상, 김남준  
 대전대학교 전기공학과

## New RPWM techniques for high speed three-phase induction motor drive

Soo-Bum Kwon, Jong-Jin Park, Hyo-Sang Lee, and Nam-Joon Kim  
 Department of Electrical Engineering, Daejin University

### ABSTRACT

본 논문에서는 PWM 펄스를 랜덤하게 위치시킬 수 있는 새로운 3상 공간벡터 RPWM (Random PWM) 기법을 제안하고 있다. 기존의 RPWM 방식과 달리 SVPWM에 의해 발생된 PWM 펄스를 랜덤하게 위치시키는 원리를 각 섹터마다 달리 적용하여 쉽게 RPWM을 구현하는 기법을 제안한다. 제안된 기법의 타당성 검증을 위하여, 제안된 RPWM (Random PWM) 기법 알고리즘에 대해 DSP를 이용한 IGBT 인버터 구성에 의한 실험을 수행하였다. 이에 대한 결과 중, 특히 10000 rpm 이상의 고속운전특성에서의 인버터 출력 전압 및 전류의 고조파 스펙트럼을 넓은 주파수 영역으로 고루 분산시켜 제안된 RPWM의 특정고조파의 저감효과를 입증하고자 한다

### 1. 서 론

현대 산업 개발 체계는 고정밀, 고효율을 지향하며, 저 비용의 모터를 이용하고자 한다. 그래서 가능한 그 기술을 습득하기 위해 엄청난 투자를 하고 있다. 이에 부응하여 고정밀의 토크 및 속도 제어가 가능한 유도전동기 서보 시스템이 산업계의 전반적인 분야로 확대되고 있다.

최근 유도전동기 구동의 구현은 용이하지 않지만, 빠른 응답 특성 및 우수한 전류제어 성능을 가진 공간전압벡터 PWM (Space Vector PWM) 방식을 사용하고 있다. 또한 SVPWM 경우, 선형적으로 제어가 가능한 출력전압의 영역이 삼각파 비교 PWM 방식보다 15.5% 증가함은 이미 알려져 있다.<sup>[2]</sup> 그러나, 이러한 SVPWM은 대부분 고정 스위칭 주파수를 사용하여 스위칭 주파수의 정수배에

해당하는 특정 주파수 대역에서 고조파가 집중적으로 발생하게 된다. 이러한 고조파는 불쾌한 소음을 유발하며, EMI(Electromagnetic interference) 문제도 발생시키게 된다.<sup>[3][4]</sup>

최근 이러한 문제점을 개선하기 위하여 스위칭 주파수를 가변하여 적용하는 시스템 RS(Random Switching Frequency) PWM을 구현한다. 그리고 스위칭 주파수는 변하지 않지만 펄스의 위치를 랜덤하게 하여 스위칭 주파수가 변하는 효과를 얻을 수 있는 시스템인 RPP(Random Pulse Position) PWM 방식을 구현하고 있다.<sup>[5][6]</sup>

본 논문에서는 산업현장에서 사용 가능한 품질이 좋은 고속 유도전동기 구동을 위하여 새로운 RPP-PWM을 구현하는 기법을 제안한다. 제안된 기법의 타당성을 검증하기 위하여  $v/f$  제어를 기반으로 한 Open-Loop 방식의 실험을 수행하며, 특정고조파 대역에서의 고조파의 저감 비율을 근거로 하여 기존의 RPP-PWM 보다 더 높은 RPWM의 효과를 확인 하고자 한다.

### 2. 제안된 Random PWM 기법

#### 2.1 공간전압벡터 변조 기법

RPWM 기법을 적용하기 위해서는 SVPWM (Space Vector PWM)에 의해 발생된 각 상의 스위칭 펄스가 필요하다. 즉 SVPWM에 의해서 발생된 각 상의 펄스를 기준으로 여기에 발생된 랜덤 함수를 적용하여 펄스의 위치를 랜덤하게 위치시키게 된다. SVPWM의 3상 대칭 변조기법의 경우, 임의의  $\alpha$ 각에 따른 맥동전류의 궤적을 그렸을 때 그 면적의 합이 0이 되어 전체전류의 평균값에 영향을 주지 않게 되어 PWM 인버터를 구현하는데 성능이 우수한 것으로 알려져 있다.<sup>[5][7]</sup>

그림 1은 3상 인버터 시스템을 나타낸다.

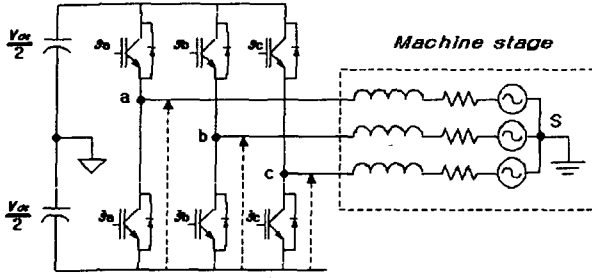


그림 1 3상 전압형 인버터 구성도  
Fig. 1 Configuration Diagram of a three-phase VSI

3상 인버터 시스템에서 각상의 스위치를 각각 상보형(Complementary)으로 동작 시킨 결과, 스위칭 조합에 따른 출력 전압벡터는 유효벡터 6개 ( $V_1 \sim V_6$ ), 무효벡터 2개( $V_0, V_7$ )가 발생하게 된다. 그림 2는 이 8개의 벡터를 표시한 것이다.

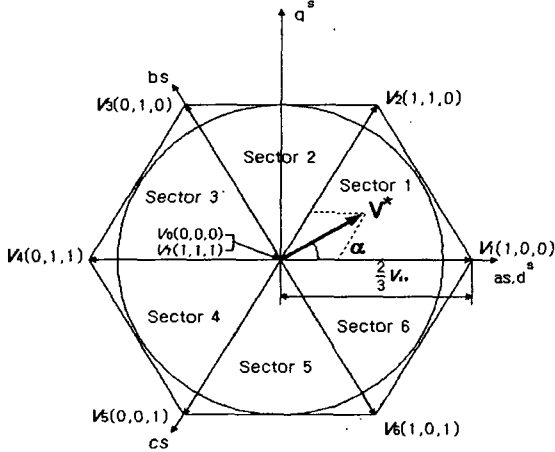


그림 2 인버터 출력 전압 벡터  
Fig 2 Inverter output voltage vector

SVPWM 방식으로 인버터에서  $V^*$  전압을 발생시키는 기본 원리는 한 주기 내에서 기준 전압 벡터와 평균적으로 동일한 전압을 인버터의 유효 벡터들을 이용하여 합성해 내는 것이다. 즉  $V^*$ 의 양 변에 있는 유효벡터와 무효벡터를 조합하여 지령 전압  $V^*$ 를 발생하게 된다.  $V^*$  양 변의 유효벡터를 인가하는  $T_1$  및  $T_2$  시간과 무효벡터 인가시간  $T_0$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>[1]</sup>

$$\int_0^{T_s} V^* dt = \int_0^{T_1} V_1 dt + \int_{T_1}^{T_2} V_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_s} V_{0,7} dt \quad (1)$$

식(1)은  $T_s$  시간동안  $V_{dc}$ 와  $V^*$ 가 변하지 않는다면 식(2)로 쓸수 있다.

$$V^* T_s = V_1 T_1 + V_2 T_2 \quad (2)$$

지령 전압벡터  $V^*$ 를 발생하기 위한 유효벡터 인가 시간 및 영벡터 인가시간은  $V^*$ 가 위치하는 sector를 판별한뒤 식(2)를 정지좌표계로 변환하여 스위칭 시간을 구하게 된다. 최종적으로 일반화된 스위칭 시간은 식(3),(4),(5)와 같다.

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_s}{V_{dc}} [\sin(\frac{\pi}{3}m)V_{ds}^* - \cos(\frac{\pi}{3}m)V_{qs}^*] \quad (3)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3}T_s}{V_{dc}} [-\sin(\frac{\pi}{3}(m-1))V_{ds}^* + \cos(\frac{\pi}{3}(m-1))V_{qs}^*] \quad (4)$$

$$T_0 = T_s - (T_1 + T_2) \quad (5)$$

식(3),(4)에서,  $m = \text{sector } (1,2,\dots,6)$

스위칭 시간이 결정되고 나면 3상 대칭 변조 기법에 의한 스위칭 함수를 구한다.

## 2.2 제안된 SRP-PWM 변조 기법

기존의 RPP-PWM(Random Pulse Position - PWM) 기법의 경우는 3상대칭 변조기법에서의 대칭 축을 랜덤하게 변하게 하는 RCD (Random Displacement of the Pulse Center) 방식, 펄스의 위치를 오른쪽 또는 왼쪽으로 정렬을 시키는 RLL(Random Lead-Lag Modulation) 방식, 그리고 각 상의 펄스를 오른쪽으로 정렬을 시킨 뒤 왼쪽으로 랜덤 함수에 의해 이동시켜 랜덤한 펄스의 위치를 발생시키는 변조방법 등이 있다.<sup>[5][6][7]</sup>

본 논문에서 제안한 RPP-PWM 방식은 SRP-PWM (Separately Random Pulse Position - PWM) 방식으로 3상 대칭 변조방식에서 각 상의 위치를 재 정렬을 하지 않고 각 상의 펄스 위치를 랜덤하게 위치시키는 방식이다.

먼저, 한 변조 구간 내에서 펄스의 위치가 고루 분포되도록 하기 위해서는 펄스 위치를 결정할 수 있는 랜덤함수를 사용하여 정해진 범위 내에서 정수를 발생하도록 한다. 주기성 없이 사용자의 요구에 맞는 랜덤 함수를 발생시키기 위해서는 0부터  $I_m$  사이의 정수를 식(6)에 의해 발생시킨다.  $J_{min}$ 에서부터  $J_{max}$ 사이에서 정수를 발생시키고자 할 때는 식(7)로 정리될 수 있다.<sup>[7][8]</sup>

$$J_{ran+1} = (J_{ran} * I_a + I_c) \% I_m \quad (6)$$

$$J = J_{\min} + \frac{((J_{\max} - J_{\min} + 1) * J_{ran})}{I_m} \quad (7)$$

$I_c$ 는 소수(prime number)이어야 하며,  $I_c$ 와  $I_m$ 은 식(7)과 같은 관계를 가져야 한다.

$$I_c \approx \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{6}\sqrt{3}\right) * I_m \quad (7)$$

식(6)과 식(7)에 의해 랜덤 수가 발생되면, 제안한 방식으로 RPP-PWM을 구현한다.

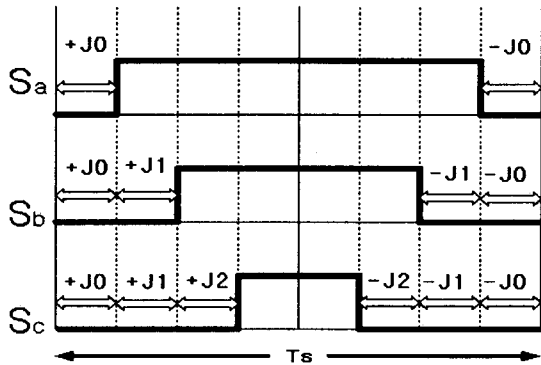


그림 3 3상 발생된 랜덤수를 이용한 각 상의 펄스 이동 ( $T_s : 100\mu s$ )

Fig 3 Phase shift using generated random numbers

그림 3에서 보듯이 가장 큰 스위칭 함수를 가진 상을 선택한 뒤 발생된 랜덤수 ( $J_0$ )를 이동시킨다. 다음으로 큰 스위칭 함수를 가장 큰 스위칭 패턴을 벗어나지 않는 영역내에서 발생된 랜덤수 ( $J_1$ )를 이동시킨다. 끝으로 나머지 상도 스위칭 패턴을 벗어나지 않는 한도내에서 발생된 랜덤수 ( $J_2$ )만큼 이동시킨다. 이 결과 매 스위칭 주기마다 각기 다른 스위칭 함수가 만들어지게 된다. 랜덤한 스위칭 함수를 정렬의 과정을 거치지 않고, 3상 대칭 변조 스위칭 함수에서 랜덤 스위칭 함수를 만들어 내므로 연산 시간을 단축시킬 수 있다.

PWM 방식을 사용한 인버터의 경우 보통  $M_f$  (Frequency Modulation Ratio)를 21이상으로 하지만 본 논문에서는 고조파의 영향을 최소화 하고, 고속 운전을 하기 위하여 50이상의  $M_f$ 를 가지도록 하였다.

SVPWM 변조기법을 구현하기 위하여 sector 판별, sector에 따른 스위칭 시간 및 스위칭 함수를 구하는데 있어 많은 연산 시간을 필요로 하게 된다. RPP-PWM의 연산의 경우는 랜덤함수가 포함되어 있어 연산 시간은 더욱 커지게 된다. 만약 여기에 3상 대칭변조 기법에 의해 만들어진 스위칭 함수를 재 정렬하고, 크기에 따른 상의 스위칭 함수를 결정한 뒤 랜덤함수를 적용하게 되면 더욱 많

은 연산 시간을 필요로 하게 될 것이다. 따라서 연산시간을 단축하기 위한 방법으로 제안한 SRP-PWM 방식을 고속 유도 전동기 운전 에 적용한다. 3상 대칭 변조기법과 제안한 SRP-PWM 기법의 PWM 파형은 그림 4와 그림 5와 같다.

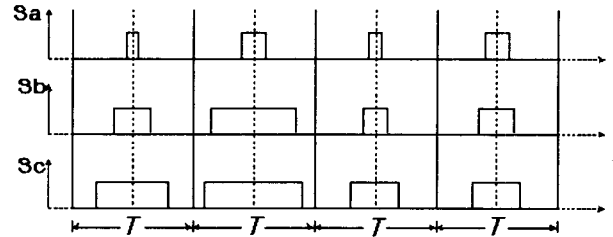


그림 4 3상 대칭 변조기법의 pwm 파형  
Fig 4 3-phase symmetrical modulation pwm waveform

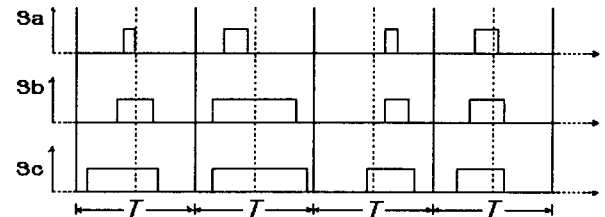


그림 5 3상 SRP-PWM 파형  
Fig 5 3-phase SRP-PWM waveform.

### 3. 인버터 실험 시스템의 구성

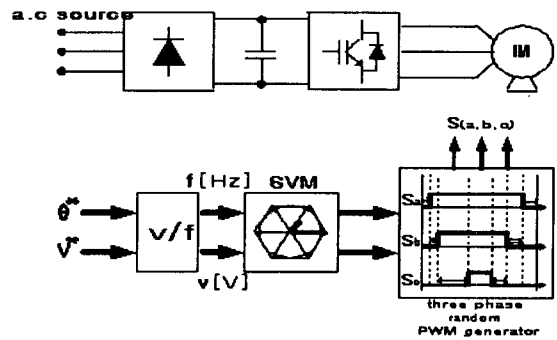


그림 6 실험 시스템 구성도  
Fig 6 Configuration Diagram of a Experimental system

그림 6은 제안된 방식의 타당성을 검증하기 위한 실험 시스템 구성도이다. 기본적으로 Open-Loop 방식을 채택하였다.  $v/f$  제어 및 지령전압 벡터  $V^*$  및  $\theta^*$ 의 발생은 빠른 연산수행능력을 가진 DSP(TMS320C31)를 사용하였고, 16bit Up Counter를 사용하여 한상의 PWM 패턴을 구현하였다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 PWM 패턴 및 전압 전류 파형

본 논문에서는 10000[rpm] 이상의 고속용 유도전동기를 대상으로 제안된 SRP-PWM 기법을 적용하여 13200[rpm] 까지 Open-Loop 방식의  $v/f$  제어를 사용하여 실험을 수행하였다.

그림 7과 그림 8은 각각 SVPWM 과 제안한 SRP-PWM의 각 상의 PWM 패턴을 보여주고 있으며,  $T_s$ 는 100us이다.

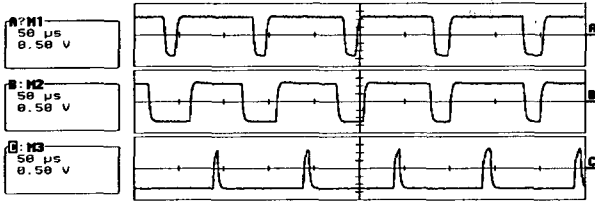


그림 7 SVPWM 적용시 PWM 파형  
Fig 7 PWM waveform by SVPWM

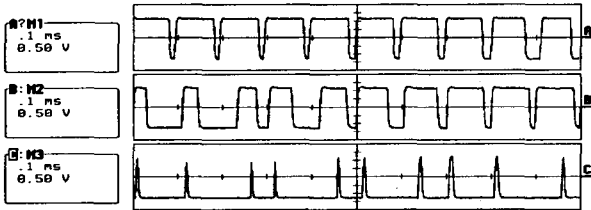


그림 8 제안된 SRP-PWM 적용시 PWM 파형  
Fig 8. PWM waveform by proposed SRP-PWM

그림 9와 그림 10은  $V_{dc}$  전압을 150[V]로 하고 출력 주파수를 220[Hz]로 하였을 때 인버터 출력 전류의 파형을 보여주고 있다.

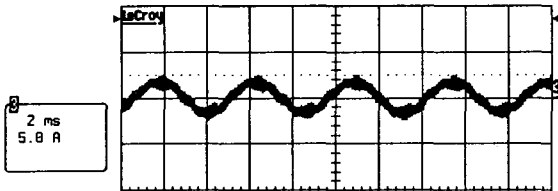


그림 9 SVPWM 적용시 출력 전류 파형  
Fig 9 Output current waveform by SVPWM

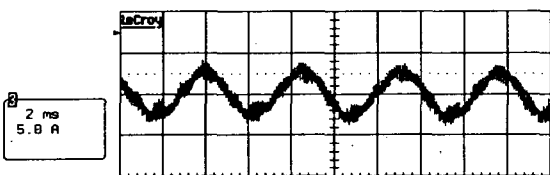


그림 10 제안된 방식 SRP-PWM 출력 전류 파형  
Fig 10 Output Current waveform by SRP-PWM

그림 11과 그림 12는  $V_{dc}$  전압이 250[V], 출력주파수가 220[Hz]일때의 선간전압을 보여주고 있다.

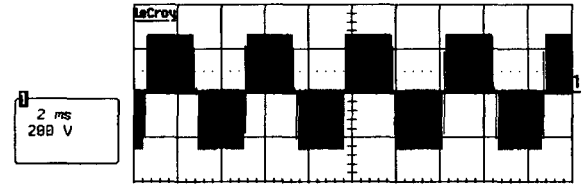


그림 11 SVPWM의 선간전압 파형  
Fig 11  $V_{L-L}$  waveform of SVPWM

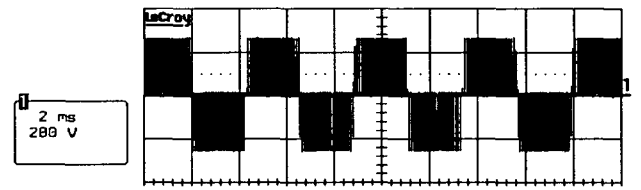


그림 12 제안한 SRP-PWM의 선간전압 파형  
Fig 12  $V_{L-L}$  waveform of SRP-PWM

### 4.2 인버터 출력 전류의 스펙트럼 분석

전압 및 전류의 스펙트럼 분석은 기본적으로 스위칭 주파수의 정수배에 해당하는 대역에서의 고조파의 분석으로 이루어졌다. 좀더 정확한 분석은 정수배의 고조파만이 아닌 실수배의 고조파 까지를 분석해야 하지만, 본 논문에서는 실수배 고조파의 크기는 고려하지 않는다. 또한 RPWM 기법이 전체 고조파를 저감하는 효과가 아닌, 스위칭 주파수에 해당하는 특정 주파수에 고조파가 집중적으로 나타나는 것을 고조파 발생 주파수 대역을 분산시키는 효과를 가지고 있으므로<sup>[9]</sup>, 특정 주파수 대역의 고조파만의 크기를 비교하여 제안된 SRP-PWM 기법의 타당성을 검증하였다. 표 1은 SVPWM과 SRP-PWM의 출력주파수 및 입력단  $V_{dc}$  전압의 변화에 따른 전류 THD 크기를 보여주고 있다. 그림 13을 보면 180Hz에서 200Hz대역에서 RPWM의 효과가 상당히 크음을 알 수 있으며, 220Hz에서는 크기가 비슷함을 알 수 있다. 그 이유는 랜덤함수를 적용함에 있어 홀수 및 짝수 섹터로 2개의 그룹으로 구분하여 랜덤함수를 적용하였기에 오히려 주기성이 발생하는 결과를 초래하였고, 이로 인해 랜덤의 효과가 높은 주파수에서 낮게 나타나게 되었다. 두개의 그룹으로 분리하여 적용하지 않은 경우에는 RPWM의 효과가 전체적으로 낮게 나타났으며 특히 220Hz에서 표 1에서의 수치보다 매우 낮게 나타남을 확인하였다.

표 1  $V_{dc}$  전압 및 출력주파수별 THD(%) 크기

Table 1 THD magnitude by  $V_{dc}$  and Output Freq

$V_{dc}$ 전압(V)	출력주파수(Hz)	100	150	180	200	220
	100	SRP-PWM	7.5	9.0	7.5	9.9
	SVPWM	7.8	10.0	10.9	10.8	12.3
150	SRP-PWM	6.6	7.78	7.4	9.7	12.2
	SVPWM	7.0	9.8	10.8	10.9	11.9
200	SRP-PWM	5.4	7.1	6.9	9.5	13.1
	SVPWM	5.7	9.2	10.5	10.6	11.8
250	SRP-PWM	0	6.8	6.9	8.3	12.6
	SVPWM	0	8.4	9.4	10.4	11.3

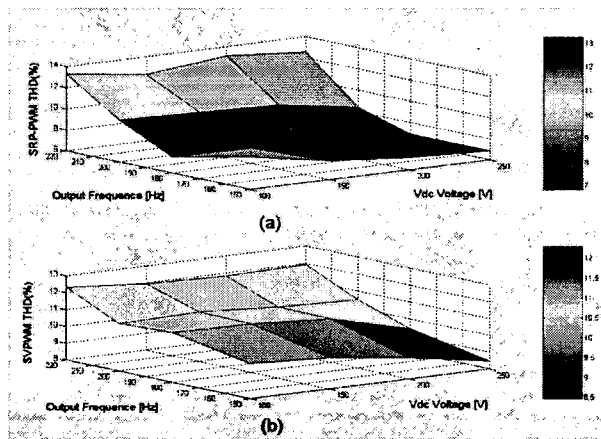


그림 13  $V_{dc}$  전압 및 출력주파수별 THD 그래프

- (a) 제안된 SRP-PWM 적용시 THD 그래프
- (b) SVPWM 적용시 THD 그래프

Fig 13 THD magnitude graph by  $V_{dc}$  and  $f_{out}$

- (a) THD magnitude graph by SRP-PWM
- (b) THD magnitude graph by SVPWM

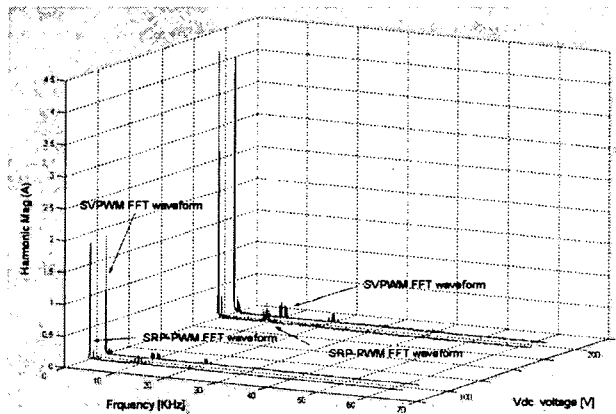


그림 14 출력주파수가 180Hz시 출력 전류 스펙트럼

Fig 14 Output current harmonic Spectrum

그림 14에서는 출력주파수가 180Hz에서  $V_{dc}$  전압에 따른 전류 스펙트럼을 보여 준다. 스위칭 주파수의 2배수인 20KHz 이상에서 고조파 성분들이

많이 감소됨을 볼 수 있으며, 특정 고조파의 크기가 많이 감소되었음을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 논문에서 고속 유도전동기를 구동하기 위한 새로운 SRP-PWM 기법을 제안하였다. 제안된 기법을 적용한 3상 인버터 시스템에 적용한 결과 높은 인버터 출력 주파수에서도 특정주파수에서의 고조파의 크기가 감소됨을 확인하였으며, 그 결과 유도전동기의 고속 운전 시 품질 좋은 인버터 구동 시스템을 구성할 수 있었다.

본 논문에서는 가청 스위칭 소음을 측정하진 않았으나 제안된 SRP-PWM 기법을 적용한 인버터 시스템에서 소음이 저감됨을 알 수 있었다. 앞으로 진행해야할 연구 과제로는 스위칭 주파수의 정수배의 고조파만을 고려한 방법이 아닌 실수배의 고조파까지 고려한 FFT 알고리즘을 개발하여 실수배 고조파까지 분석이 되어야 하겠다.

### 참고 문헌

- [1] 윤덕용, 홍순찬, "공간전압벡터 PWM 기법을 이용한 영구 자석형 동기전동기 속도제어", 전기학회논문지, 제 43권, 제7호, PP. 1112 ~1120, 1994.
- [2] S. Ogasawara, H. Akagi and A. Nabae, "A Novel PWM Scheme of Voltage Source Inverters Based on Space Vector Theory", *EPE Conf. Rec.*, pp, 1197 ~ 1202, 1989
- [3] M.M Bech, J.K Pedersen, and F. Blaabjerg, "Random modulation techniques in power conversion- an update", *PEMC '96*, pp. 3/357~3/365, 1996.
- [4] R.L. Kirlin, S. Kwok, S. Legowski, and A.M. Trzynadlowski, "Power Spectra of a PWM Inverter with Randomized Pulse Position", *IEEE Trans, PE*. vol. 9, no. 5, pp. 463~471, 1994.
- [5] M.M Bech, J.K Pedersen, and F. Blaabjerg, "Random modulation techniques width fixed switching frequency for three-phase power converters", *PESC '99*, pp. 544~551, 1999.
- [6] S. Legowski and A. M Trzynadlowski, "Advanced random pulse width technique for voltage-controlled inverter drive systems," in *Proc. 6th Ann. IEEE Appl. Power Electron. Conf.*, pp. 100-106, 1991.
- [7] 위석오, 정영국, 나석환, 임영철, "모터 구동 장치의 가청 스위칭 소음 저감을 위한 2상 및 3상 랜덤펄스 위치 PWM기법의 성능비교", *전력전자학회 논문지, 제7권, 제3호*, pp224~236, 2002
- [8] J.K Pedersen, and F. Blaabjerg, "Implementation and Test of A digital Quasi-random modulated SFAVM PWM in a High performance drive system", *PEMC '92*, pp 265~270, 1992
- [9] A. M. Trzynadlowski, F. Blaabjerg, J. K. Pedersen, R. L. Kirlin, and S. Legowski, "Random pulse width modulation techniques for converter-fed drive systems - A review", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 30, pp. 1166~1175, Sept./Oct. 1994.