

4-SWITCH 3상인버터를 이용한 3상 유도전동기 구동을 위한 새로운 RPWM 기법

이효상, 권수범, 박종진, 김남준
대전대학교 전기공학과

New RPWM techniques for three-phase induction motor drive using four-switch three-phase inverter

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

ABSTRACT

본 논문에서는 고주파 스위칭 시 스위칭 손실의 감소, 구현의 용이성 및 인버터 제어를 위하여 요구되는 연산 시간 감소 등 다양한 장점을 가진 2-LEG 인버터를 대상으로, 새로운 RPWM(Random PWM) 기법에 의한 3상유도전동기 구동 방식에 대하여 서술한다.

기존의 RPWM 방식과 비교하여 제안한 RPWM 기법으로부터, 10000[rpm] 이상의 고속운전 영역에서의 인버터 출력전류의 고조파 스펙트럼을 넓은 주파수 영역으로(특정주파수의 side band) 고루 분산시켜 RPWM의 고조파 저감효과에 대한 우수성을 입증하고자 한다.

이러한 과정에서 제안된 RPWM 기법을 적용한 알고리즘에 대하여 DSP를 이용한 IGBT 인버터에 의한 실험을 수행하여, 이로부터 그 결과를 검토하여 제안된 기법의 타당성을 검증하고자 한다.

1. 서 론

최근 유도전동기 구동에 있어 구현은 용이하지 않지만 빠른 응답 특성 및 우수한 전류제어 성능을 가진 공간전압벡터 PWM (Space Vector PWM) 방식을 사용하고 있다. 그리고 SVPWM 경우 선형적으로 제어가 가능한 전압의 영역이 삼각파 비교 PWM 방식보다 15.5% 증가함은 이미 알려져 있다.

본 논문에서는 산업현장에서 사용 가능한 고정밀성, 생산단가 저감을 위한 고속 유도전동기 구동을 위하여 새로운 2상 SRP-PWM(Separately Random Pulse Position PWM)^[1]을 구현하는 기법을 제안하며, 제안된 기법의 타당성을 검증하기 위하여 v/f 제어를 기반으로 한 Open Loop 방식의 실험을 수행하였다. 제안된 기법의 타당성의 검증은 특정고조파 대역에서의 고조파의 저감 비율을 근거로 하여 제안한 SRP-PWM 타당성을 입증하며, 그 결과 기존의 SRP-PWM 보다 더 높은 Random의 효

과를 확인 하고자 한다.

2. 회로결선 및 정의

그림 1은 본 연구에서 사용한 3상 정류기를 통한 4-스위치 3상 dc/ac 컨버터를 나타낸다. B4 인버터는 두개의 선간전압 V_{ab}, V_{ca} 를 발생하기 위한 4개의 스위치와 4개의 다이오드를 사용하며, 선간전압 V_{bc} 는 분리된 2개의 커패시터 뱅크에 의해 Kirchhoff's 전압법칙에 따라 발생한다. 따라서 구성된 회로에 의해 최대 피크 선간전압은 $\frac{V_{dc}}{2}$ 다.

두개의 출력 전압은 두개의 dc링크전압(V_1, V_2)과 4-스위치의 게이팅 신호에 의해 정해진다. 본 연구에서는 두개의 dc링크전압이 같아서 두개의 출력전압에 영향을 끼치지 않도록 dc링크 필터를 충분히 크게 하여 일정한 전압 $\frac{V_{dc}}{2}$ 를 유지할 수 있게 하였다. 따라서 스위칭 함수에 따른 출력전압은 표 1과 같으며 B4 인버터에서의 스위칭 벡터는

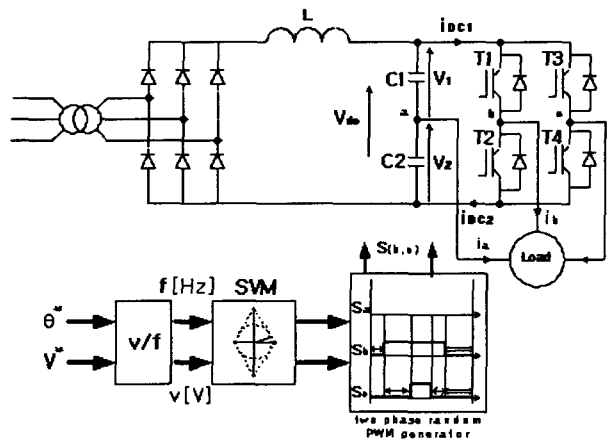


그림 1 3상 dc/ac 컨버터에 의한 B4 인버터
Fig. 1 Three phase dc/ac converter for B4 Inverter

표 1 B4 인버터의 스위칭 함수와 출력 상전압
Table 1 Switching Function and the output V_{phase}

Vector		Output phase-voltage		
S1	S2	Van	Vbn	Vcn
0	0	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{6}$	$-\frac{V_{dc}}{6}$
0	1	0	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$\frac{V_{dc}}{2}$
1	0	0	$\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$
1	1	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{6}$	$\frac{V_{dc}}{6}$

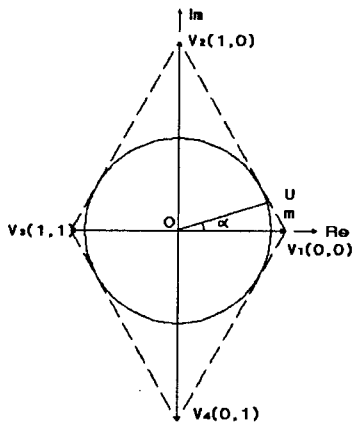


그림 2 B4 인버터 스위칭 벡터
Fig. 2 Switching vector in B4 Inverter ($V_1 = V_2$)

그림 2와 같다.^[2]

3. 변조 및 SRP-PWM Random 기법

인버터에서 V_{ref} 전압을 발생하는 기본 원리는 한 주기 내에서 기준 전압 벡터와 평균적으로 동일한 전압을 인버터의 유효 벡터들을 이용하여 합성해 내는 것이다. 3상 인버터와 비교하면 B4 인버터에서는 무효벡터가 없으므로 샘플링 시간동안 V_{ref} 와 가장 근접한 벡터와 그것의 인접한 2개의 벡터를 사용한다. V_{ref} 의 위치에 따른 사용벡터와 크기는 식 (1)-(4)와 같으며 스위칭 패턴은 그림 3에 나타나 있다.^[3]

$$-\frac{\pi}{4} \geq \alpha < \frac{\pi}{4}$$

$$t_{00} = \frac{3TV_{ref}}{V_{dc}} \cos(\alpha)$$

$$t_{10} = \frac{T_s}{2} - \frac{\sqrt{3}T_s V_{ref}}{V_{dc}} \cos(\alpha + \frac{\pi}{6})$$

$$t_{01} = \frac{T_s}{2} - \frac{\sqrt{3}T_s V_{ref}}{V_{dc}} \cos(\alpha - \frac{\pi}{6}) \quad (1)$$

$$\frac{\pi}{4} \leq \alpha < 3\frac{\pi}{4}$$

$$t_{10} = \frac{\sqrt{3}T_s V_{ref}}{V_{dc}} \cos(\alpha)$$

$$t_{11} = \frac{T_s}{2} - \frac{\sqrt{3}T_s V_{ref}}{V_{dc}} \cos(\alpha + \frac{\pi}{3})$$

$$t_{00} = \frac{T_s}{2} - \frac{\sqrt{3}T_s V_{ref}}{V_{dc}} \cos(\alpha - \frac{\pi}{3}) \quad (2)$$

$$3\frac{\pi}{4} \geq \alpha < 5\frac{\pi}{4}$$

$$t_{11} = \frac{3T_s V_{ref}}{V_{dc}} \cos(\alpha)$$

$$t_{10} = \frac{T_s}{2} - \frac{\sqrt{3}T_s V_{ref}}{V_{dc}} \cos(\alpha - \frac{\pi}{6})$$

$$t_{01} = \frac{T_s}{2} - \frac{\sqrt{3}T_s V_{ref}}{V_{dc}} \cos(\alpha + \frac{\pi}{6}) \quad (3)$$

$$5\frac{\pi}{4} \leq \alpha < -\frac{\pi}{4}$$

$$t_{01} = \frac{\sqrt{3}T_s V_{ref}}{V_{dc}} \cos(\alpha)$$

$$t_{00} = \frac{T_s}{2} - \frac{\sqrt{3}T_s V_{ref}}{V_{dc}} \cos(\alpha + \frac{\pi}{3})$$

$$t_{11} = \frac{T_s}{2} - \frac{\sqrt{3}T_s V_{ref}}{V_{dc}} \cos(\alpha - \frac{\pi}{3}) \quad (4)$$

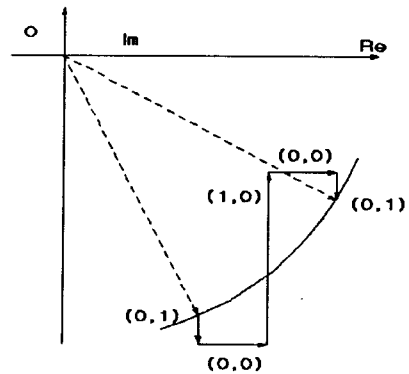


그림 3 선택된 3개의 벡터를 이용한 스위칭 순서
Fig. 3 Switching sequence utilizing chosen three voltage vectors

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 랜덤수를 발생시키기 위해서는 0부터 I_m 사이의 정수를 식(5)에 의해 발생시키고, J_{min} 에서부터 J_{max} 사이에서 정수를 발생시키고자 할 때 식(6)에 의해 발생시킨다.

$$J_{ran+1} = (J_{ran} * I_a + I_c) \% I_m \quad (5)$$

$$J = J_{min} + \frac{((J_{max} - J_{min} + 1) * J_{ran})}{I_m} \quad (6)$$

I_c 는 소수(prime number) 이어야 하며, I_c 와 I_m 은 식(7)과 같은 관계를 가져야 한다.^[4]

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

기존의 SVPWM방식에서는 우측정렬을 한 후 발생된 랜덤수 만큼 펄스를 재 위치시키므로 많은 연산시간이 필요하지만, 제안한 SRP-PWM방식은 2상 변조방식에서 각 상의 위치를 재정렬을 하지 않고, 각 상의 펄스 위치를 발생된 부호에 따라 랜덤수 만큼 랜덤하게 위치시키는 방식으로 그림 4와 같다. 이 결과로 인해 프로세서의 연산속도를 현저히 줄일 수 있게 된다.

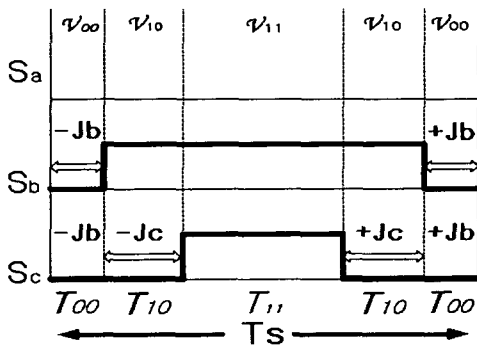


그림 4 발생된 랜덤수를 이용한 각 상 펄스 이동($T_s = 100\mu s$)
Fig 4 Phase shift using generated random numbers

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 PWM 및 전압-전류 파형

본 연구에서는 제안된 2상 변조 SRP-PWM기법을 10000 RPM 이상급 고속용 3상 유도전동기를 대상으로 Open-Loop방식의 V/F 일정제어를 사용하여 수행하였다.

스위칭 주파수는 10KHz 이며 인버터 출력주파수(F_{out})가 180[Hz]일때 Center aligned SVM 과 SRP-PWM 파형을 그림 5에 나타나 있다. 각 PWM패턴에 따른 출력 상 전압 과 출력 상 전류를 그림 6 과 그림 7에서 나타내었다.

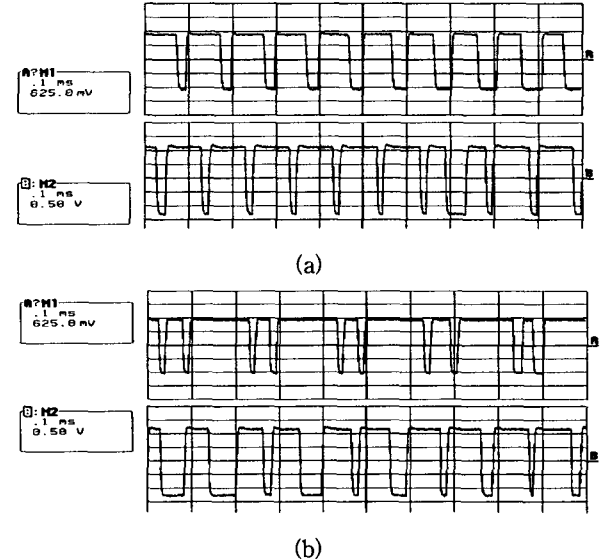


그림 5 EPLD PWM 출력파형

- (a) 2상 중앙정렬
- (b) 제안된 2상 SRP-PWM

Fig. 5 Output PWM waveform of EPLD

- (a) 2-phase Center aligned SVM
- (b) Proposed 2-phase SRP-PWM

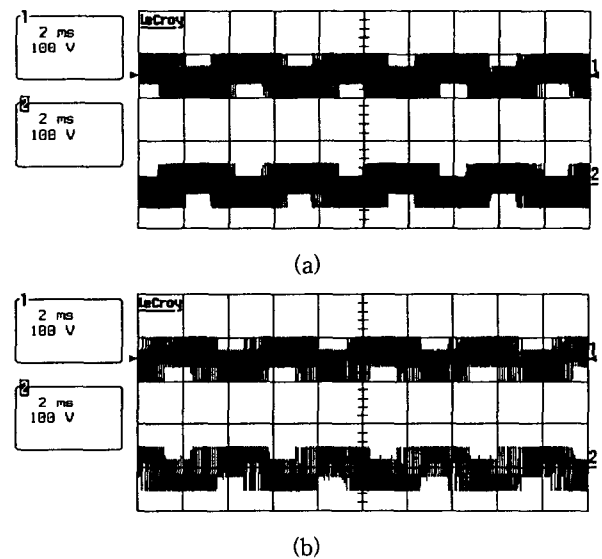


그림 6 상 전압 출력 파형 ($V_{dc}=100[V]$, $F_{out}=220[Hz]$)

- (a) 2상 중앙정렬
- (b) 제안된 2상 SRP-PWM

Fig. 6 Phase-voltage waveform ($V_{dc}=100[V]$, $F_{out}=220[Hz]$)

- (a) 2-phase Center aligned SVM
- (b) Proposed 2-phase SRP-PWM

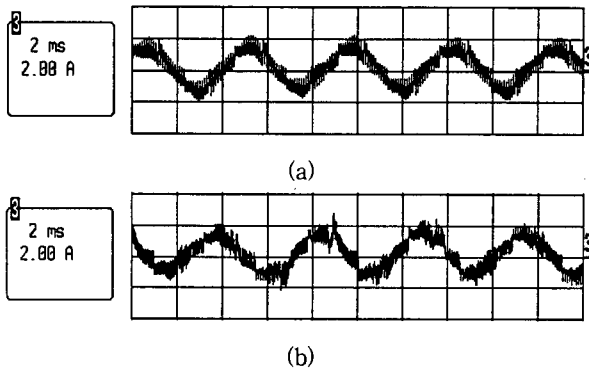


그림 7 출력 상 전류 파형 ($V_{dc}=150[V]$, $F_{out}=220[Hz]$)
 (a) 2상 중앙정렬
 (b) 제안된 2상 SRP-PWM
 Fig. 7 phase-current waveform($V_{dc}=150[V]$, $F_{out}=220[Hz]$)
 (a) 2-phase Center aligned SVM
 (b) Proposed 2-phase SRP-PWM

4.2 전류 스펙트럼 분석

전류의 스펙트럼 분석은 기본적으로 스위칭 주파수의 정수배에 해당하는 대역에서의 고조파의 분석이 이루어졌다.^[5] 또한 랜덤기법이 스위칭 주파수에 해당하는 특정 주파수에 고조파가 집중적으로 나타나는 것을 분산 시키는 효과를 가지고 있으므로, 특정 주파수 대역의 고조파만의 크기를 비교하여 제안된 2상 SRP-PWM 기법의 타당성을 검증한다.

표 2는 Center aligned PWM 과 SRP-PWM의 출력주파수 및 V_{dc} 전압의 변화에 따른 전류 THD 크기를 보여주고 있다. 표 2와 그림 8을 보면 180Hz 이상대역에서 상당히 랜덤의 효과가 있음을 알 수 있다. 그림 9에서는 출력주파수가 200Hz에서 V_{dc} 전압에 따른 전류 스펙트럼을 보여주고 있다.

스위칭 주파수의 2배수인 20KHz 이상에서 고조파 성분들이 많이 감소됨을 볼 수 있으며, 특정 고조파의 크기가 많이 감소되었음을 알 수 있다.

표 2 전류 THD 변화추이
 Table 2 THD index of Current by Voltage and F_{out}

Inverter switching frequency 10KHz						
V_{dc} 전압 [V]		$F_{out}[Hz]$				
		100	150	180	200	220
100	Proposed SRP	16.2088	15.7581	16.5482	18.9934	19.5618
	Center aligned	20.4802	20.0379	21.9195	19.3215	24.2432
150	Proposed SRP	16.2154	14.725	17.3637	16.6788	17.0467
	Center aligned	18.4853	20.8658	19.1684	23.2273	24.3511
200	Proposed SRP	16.2082	13.6605	15.3817	13.109	20.5416
	Center aligned	17.5843	18.9883	18.767	22.4794	31.2667

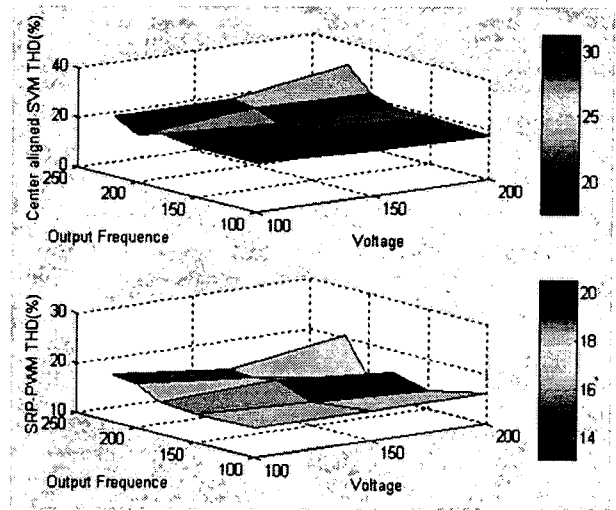


그림 8 V_{dc} 전압 및 인버터 출력주파수별 THD 그래프
 Fig 8 THD magnitude graph by V_{dc} and F_{out}

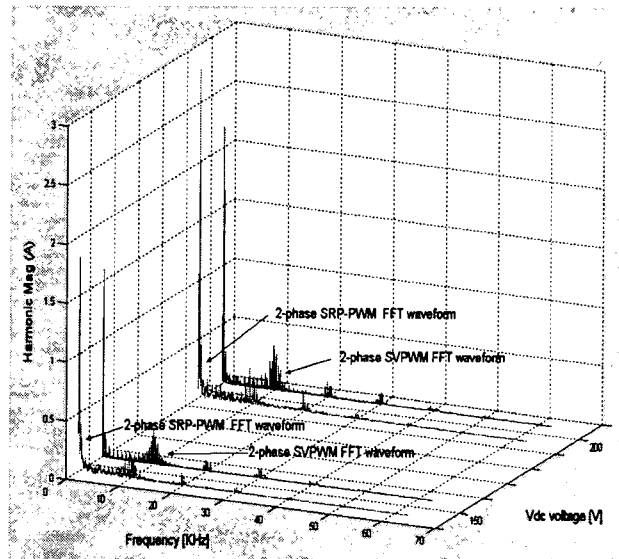


그림 9 인버터 출력전류 스펙트럼(출력주파수가 200Hz)
 Fig 9 Output current spectrum of Inverter($F_{out}=200Hz$)

5. 결 론

본 연구에서는 고속 유도전동기를 대상으로 Center aligned 상태의 펄스를 발생된 부호에 따라 좌우측으로 랜덤수 만큼 랜덤하게 배치시키는 새로운 2상 SRP-PWM기법을 제안하였다. 제안된 기법을 적용한 2상 인버터 시스템에 적용한 결과 높은 주파수에도 특정주파수에서의 고조파의 크기가 주위대역으로 넓게 분포되어 감소됨을 확인할 수 있었다. 차후의 연구과제로는 B4 인버터에서 4개의 출력벡터를 이용하여 토크리플과 고조파 감소를 위한 정교한 스위칭 패턴을 개발하여 분석하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] M.M. Bech, J.K. Pedersen, F. Blaabjerg, "Random modulation techniques with fixed switching frequency for three-phase power converters". IEEE PESC '99, pp. 544-551, 1999.
- [2] P. Enjeti and A. Rahman, "A new single phase to three phase converter with active input current shaping for low cost ac motor drives," in Proc.IAS '90, pp. 935-939
- [3] F. Blaabjerg, John K. Pedersen, Dorin O. Neacsu, "Adaptive svm to compensate dc-link voltage ripple for four-switch three-phase voltage-source inverters". IEEE Trans. Power Electronics, vol. 14, no. 4, pp. 743-752, 1999 .
- [4] PRESS, W.H, FLANNERY, B.P, TEUKOLSKY, S.A and VETTERLING, W.T, 'Numerical recipes in C: the art of scientific computing', (Cambridge University Press, New York, 1998)
- [5] R. Lynn Kirlin, Sam Kwok, Stanislaw Legowski, Andrzej M. Trzynadlowski, "Power spectra of a pwm inverter with randomized ulse position". IEEE Trans. Power Electornics, vol. 9, no. 5, pp. 463-472, 1994.