

2상 Random PWM기법에 의한 유도모터 v/f 일정 속도 제어 시스템의 전자기적 스위칭 소음저감

김정근[°] 임영철[°] 위석오[°] 정영국[°]
 °전남대 전기공학과 "한국천문연구원" °대불대 컴퓨터정보공학부

Reduction of Electromagnetic Switching Noise in v/f Induction motor Drives by Two-Phase Random PWM Scheme

J. G. Kim[°] Y. C. Lim[°] S. O. Wi[°] Y. G. Jung[°]
 °Chonnam National University "Korea Astronomy Observatory" °Daebul University

Abstract - In this paper, Inverter drives adopting 2 phase space vector SRP-PWM (Separately Randomized Pulse Position PWM) with fixed switching frequency is proposed. The proposed 2 phase space vector SRP-PWM scheme is based on the 3 phase SRP-PWM. In the proposed SRP-PWM scheme, each of two phase pulses is located randomly in each switching interval. The experimental results show that the voltage and acoustic noise harmonics are spread to a wide band area. Also, the performance of the proposed 2 phase SRP-PWM and the conventional center aligned SVM are compared to each other. In result, the speed response is nearly similar to each other from the viewpoint of the v/f constant control.

1. 서 론

현재 산업현장에서 사용되는 대부분의 전력변환시스템은 스위칭 주파수가 일정한 PWM 기법을 사용하고 있다. 이러한 방식은 스위칭 주파수의 정수배의 주파수에 잡음 전력을 집중시켜 매우 불쾌한 소음을 유발하는 단점을 가지고 있다^[1].

이러한 문제점을 해결하기 위해 가장 쉽게 생각할 수 있는 기법으로 초음파 주파수의 스위칭에 의한 PWM기법을 생각할 수 있다^[2]. 이 방법은 소음발생을 근본적으로 제거할 수 있는 장점을 갖고 있으나 스위칭 주파수가 높아짐에 따라 발생하는 스위칭 손실과 스위칭 소자 및 제어기의 고가화를 초래하는 문제점을 갖고 있는데 대용량 시스템일수록 이러한 현상은 더욱 심하다. 이와 같이 높은 스위칭 주파수를 이용하는 대신 낮은 스위칭 주파수를 그대로 유지하면서 스위칭 패턴을 변경하여 가정 스위칭 소음을 완화하는 기법들이 제시되고 있는데, Optimum PWM^[3], RPWM^[4-7] 등이 주목을 받고 있다. 특히 RPWM 기법은 PWM 주파수를 랜덤하게 변경하여 소음 전력을 광대역화하는 기법으로 비교적 최근에 연구되고 있는 분야이다. 이러한 기법 중 공간벡터 방식의 랜덤 캐리어 주파수 PWM^[4-5]은 전압 지령부와 스위칭 부를 동기화하려면 제어 알고리즘의 연산시간이 스위칭 주파수의 최대값을 제한하는 요소로 작용하게 된다. 이는 복잡한 제어루프를 이 방식으로 구성하는 경우, 최대 스위칭 주파수는 어느 한계를 갖는다는 문제점을 있다.

랜덤 펄스 위치 공간벡터 PWM기법^[6,7]은 펄스의 위치만을 랜덤하게 변경하여 RPWM 효과를 나타내는 방법이다. 이 방법은 펄스의 위치가 매 변조구간에서 변경되므로 고정된 주파수로 스위칭을 하더라도 스위칭 주파수가 변하는 것과 같은 효과를 갖고 있다. 랜덤 펄스 위치 PWM 기법은 RLL(Random Lead-Lag PWM), RCD (Random Centered Distribution PWM), RZV(Random Zero Vector Distribution PWM), SRP (Separately Randomized Pulse Position PWM) 등 여러 방법에 의해 구현이 가능하다. 이

중에서 SRP기법^[1]은 랜덤하게 배치된 a상의 펄스 범위내에서 나머지 상의 펄스 위치를 서로 독립적으로 랜덤하게 배치할 수 있기 때문에, 고조파 및 소음 저감특성이 매우 우수한 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 3상 SRP-PWM기법^[1]을 2상에 적용한 고정 스위칭 주파수의 공간벡터 SRP-PWM기법을 제안하고 이를 산업현장에 적용 가능한지를 검증하기 위하여, 속도 피드백 실험을 행하였다. 속도 제어는 부하가 있는 상태에서 3상 유도모터의 v/f 일정 제어를 기반으로 행하였다. 실험 결과, 제안된 방법의 v/f 일정 제어의 성능은 기존의 2상 고정 주파수 SVM의 경우와 동일함을 확인할 수 있었다. 또한 모터의 전압 및 소음 스펙트럼의 광대역화의 관점에서는 제안된 방법이 종전의 방법에 비하여 우수함을 확인할 수 있었다.

2. 본 론

그림1은 본 연구에서 제안한 2상 공간벡터 SRP-PWM 기법을 적용한 인버터 구동 시스템을 나타내고 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 지령속도 w^* 와 속도 측정부에서 얻어진 속도 w 와의 차이인 속도오차 e 는 PI제어기의 제어입력이 되고 PI제어기는 지령 속도를 출력하며 일정 v/f 제어기는 지령 주파수에 따라 전압을 발생하고 있다.

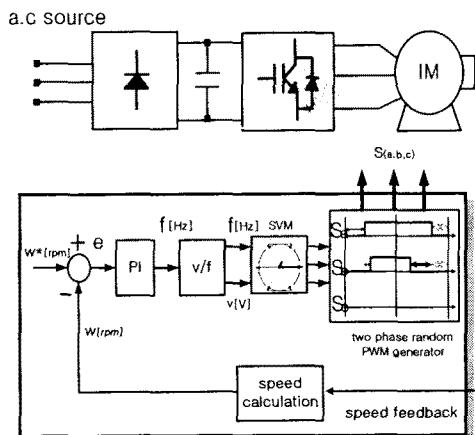


그림1 제안된 RPWM 인버터 시스템

Fig.1 The proposed RPWM inverter system

지령 주파수와 전압을 이용하여 매 제어 주기마다 지령 공간 전압벡터가 염어지고 공간전압벡터 변조법에 의하여 각상의 펄스 듀티비가 계산된다. 계산된 듀티비는 랜덤 펄스 위치 PWM 발생기에 의하여 듀티비 값을 펄스 평형으

로 변환하며, 이 펄스 파형이 인버터의 게이트에 인가되면 원하는 랜덤 펄스 위치 PWM이 적용된 지령전압을 얻을 수 있다.

그림2(a)는 종전의 2상 중앙정렬 SVM에 의해 얻어진 펄스를 중앙 정렬하여 4주기 동안을 도시한 펄스패턴이다. 여기서 T_s 는 샘플링 주기를 나타내고 있다. 그림2(b)는 본 연구에서 제안한 2상 공간벡터 SRP-PWM의 스위칭 기법을 나타낸 것이다. 제안된 방법은 2상 변조 SVM을 기반으로 하기 때문에 1 샘플링 주기 동안 2개의 상만이 2번의 펄스 교번(commutation)이 이루어 1 샘플링 주기동안 두 상에만 펄스가 존재하게 된다. 이렇게 얻어진 두개의 펄스는 그 위치를 랜덤하게 정할 수 있는데 각 펄스별로 자유롭게 그 위치를 정할 수 있다.

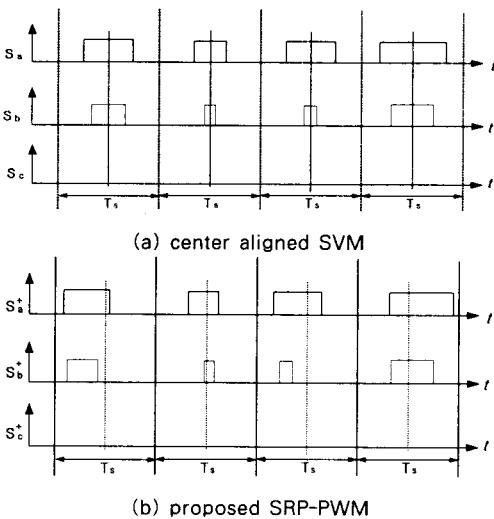


그림 2 2상 공간벡터 PWM 패턴
Fig.2 2 Phase Space Vector PWM pattern

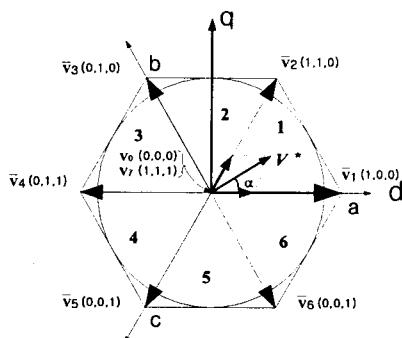


그림 3 공간벡터도
Fig.3 Space Vector Diagram

지령전압 벡터 V^* 가 그림3으로 나타낸 공간 벡터도의 1 번 섹터에 있을 때, 1주기 동안의 2상 변조 SRP-PWM을 그림4에 나타내었다. 3상 변조 SRP-PWM의 경우에는 랜덤 변위 T_{RND} 가 세 번이 필요한 반면 제안된 2상 변조 SRP-PWM의 경우 두 번의 랜덤 변위 만으로 구현이 가능하다. 즉 구현이 더 용이함을 알 수 있다. 본 연구에서 구현된 2상 변조 SRP-PWM은 SVM을 통하여 얻어진 우측 정렬된 두개의 펄스 위치를 좌측으로 어느 정도 변위 시킬 것인가를 랜덤하게 지정하는 방법으로 이를 위해 랜덤함수^[1]를 사용한다. 이를 구현하기 위한 과정이 그림4에

자세히 도시되어 있다. 먼저 그림4(b)를 보면 두개의 펄스 모두를 영벡터(V_{000})의 범위 내에서의 결정된 랜덤 변위 (T_{RND1})만큼 좌측으로 이동시킨다. 그리고 작은 펄스를 T_1 범위에서 결정된 랜덤 변위(T_{RND2}) 만큼 좌측으로 이동하면 지령전압벡터를 충실히 구현하면서 2상 변조 SRP- PWM이 구현된다.

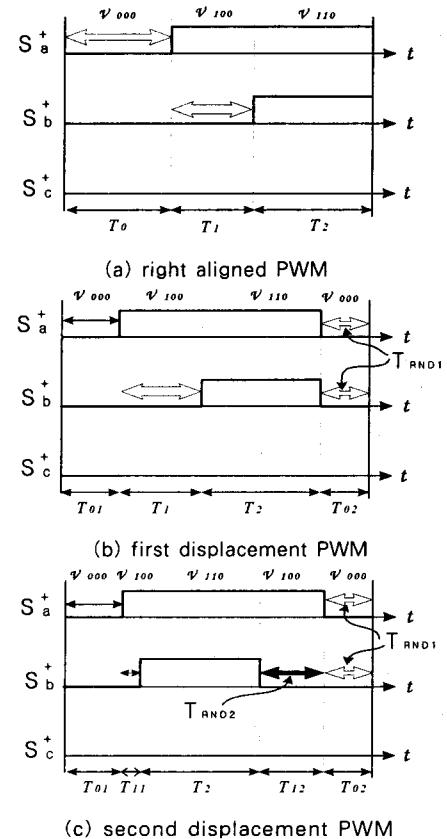


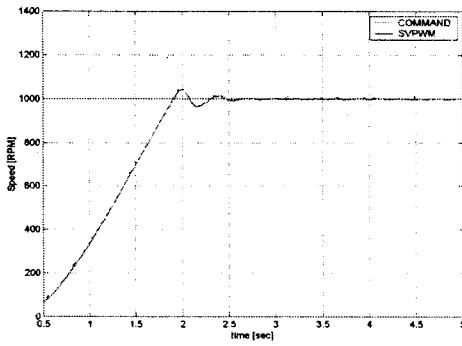
그림4 2상 SRP-PWM 발생 과정
Fig.4 The procedure of 2 phase SRP-PWM generation

3. 실험결과 및 고찰

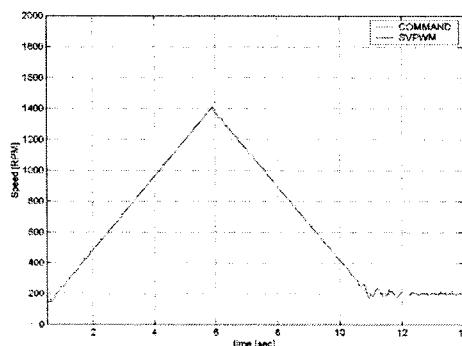
본 연구에서 제안된 2상 변조 SRP-PWM기법을 산업현장에서 많이 사용하고 있는 3상 유도모터에 적용하여 속도 추종 성능을 검증하였다. 속도 추종 시스템의 객관성과 안정성을 위하여 속도 추종 알고리즘은 일반적으로 적용되고 있는 v/f 일정제어를 사용하였다. 3상 유도모터는 3상 교류전원을 정류시킨 전압원 인버터에 의해서 구동되며 TMS320C31 DSP를 사용하여 전체적인 알고리즘이 수행되고 있다. 고정된 스위칭 주파수를 갖는 PWM 펄스의 위치를 랜덤하게 설정하기 위하여, EPLD (Erasable Programmable Logic Device)를 사용하여 구현하였다.

3.1 지령속도 추종 특성

부하가 있는 상태에서 3상 유도모터를 지령 주파수(속도) $f_0 = 40Hz$, 스위칭 주파수 $f_{sw} = 2kHz$ 그리고 변조지수 $M = 0.7$ 로 폐루프 속도제어 하였을 때, 종전의 2상 중앙정렬 SVM 방식과 제안된 2상 SRP-PWM방식의 속도 추종 특성을 그림5와 그림6에 각각 나타내었다. 그림5와 그림6에서 보는 바와 같이 속도 프로파일 곡선은 스텝지령, 램프지령치로 하였다.



(a) step speed reference

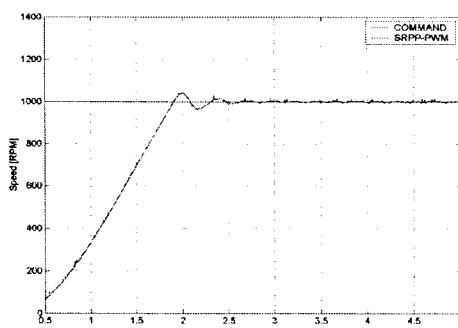


(b) ramp speed reference

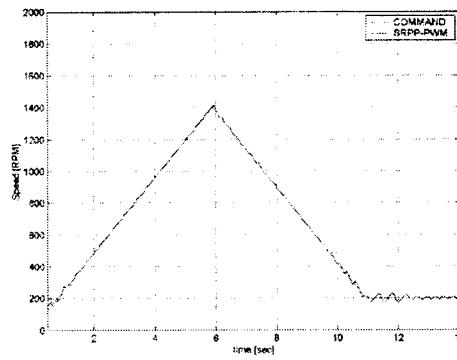
그림5 중앙정렬 SVM의 측정된 속도 추종 특성
($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=2\text{kHz}$, $M=0.7$)

Fig.5 Measured speed response of the center aligned SVM ($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=2\text{kHz}$, $M=0.7$)

그림5(a)와 그림6(a)는 50rpm에서 1000rpm으로 급격한 속도 지령치를 인가한 경우의 추종특성을 보여주고 있다. 두 방식 모두 2.5초 후에 이르러 정상상태에 도달함을 알 수 있다. 그림5(b)와 그림6(b)는 150rpm에서 1400rpm까지 선형적으로 속도를 증가한 후, 다시 200rpm까지 속도 지령치를 감소한 경우의 속도 추종 특성을 비교한 것이다. 중앙정렬 SVM과 SRP -PWM방식 모두 6초만에 최고 속도에 도달하였고 12초에 이르러 최저 속도를 유지하고 있다. 이는 제안된 2상 SRP-PWM기법은 종전의 2상 중앙정렬 SVM과 속도 추종 성능이 동일하다는 것을 의미하며, 그림1의 제안된 시스템은 모터속도 제어기로서의 성능을 잘 유지하고 있다는 것을 나타낸다.



(a) step speed reference



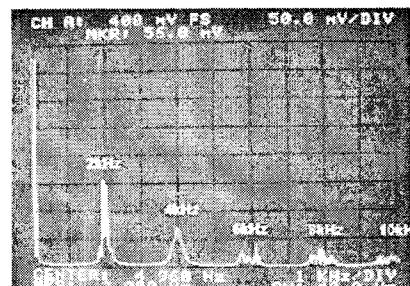
(b) ramp speed reference

그림6 SRP-PWM의 측정된 속도 추종 특성
($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=2\text{kHz}$, $M=0.7$)

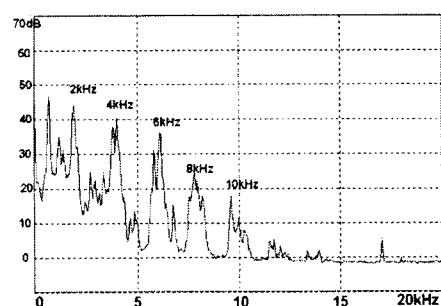
Fig.6 Measured speed response of the SRP-PWM ($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=2\text{kHz}$, $M=0.7$)

3.2 스위칭 소음의 광대역화 특성

종전의 2상 중앙정렬 SVM 방식과 제안된 2상 SRP-PWM방식에 의한 유도모터의 선간전압과 소음 스펙트럼을 그림7과 그림8에 각각 나타내었다. 우선 그림7(a)로 나타낸 중앙정렬 SVM의 전압 스펙트럼은, 스위칭 주파수의 1배 주파수 2kHz 부근에서 고조파의 가장 강한 성분이 있고 스위칭 주파수의 2배 주파수 4kHz 영역에 두 번째로 강한 고조파 성분이 존재하고 있다.



(a)spectrum of the voltage(1kHz/div.)



(b)spectrum of the switching noise
(5kHz/div.)

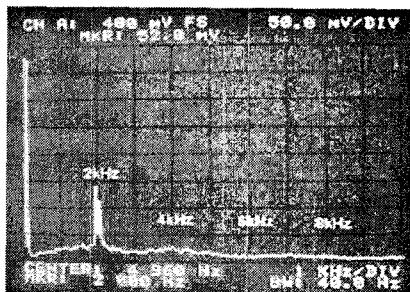
그림7 중앙정렬 SVM기반 인버터 구동시스템

($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=2\text{kHz}$, $M=0.7$)

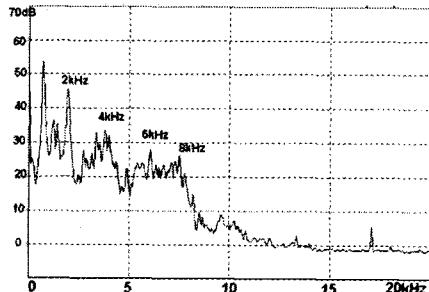
Fig.7 Center aligned SVM based inverter drives($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=2\text{kHz}$, $M=0.7$)

소음 스펙트럼을 나타내고 있는 그림7(b)의 경우, 전압 스펙트럼 분포와 비슷하게 1배 스위칭 주파수인 2kHz 주파수대에 소음의 가장 강한 성분이 있음을 볼 수 있으며 스위칭 주파수의 정수배 주파수에서 소음 성분이 집중된 현상을 볼 수 있다. 그리고 스위칭과 상관없는 주파수대인 750Hz 및 1.8kHz대에 약간의 소음성분이 존재함을 알 수 있다.

제안된 2상 SRP-PWM를 나타내고 있는 그림8(a)의 경우, 1배 스위칭 주파수인 2kHz 대역을 제외하고 2배, 3배 스위칭 주파수대 고조파 성분의 크기가 현격하게 감소되어 광대역 효과가 뚜렷하게 나타나고 있음을 관찰할 수 있다. 그림8(b)는 소음 스펙트럼을 나타내고 있다. 전압 스펙트럼에서 유추할 수 있는 바와 같이 스위칭 주파수인 2kHz에서는 기존의 것과 비슷한 소음이 있으나 기타 다른 주파수 영역에서는 소음의 광대역화가 확실하게 이루어지고 있음을 관찰할 수 있다. 그런데 이 경우 SVM에서는 작았던 1kHz 이하의 주파수 성분이 증가하였음을 볼 수 있다. 이는 모터의 고유 주파수와 랜덤 주파수가 중첩되어 기계적인 공진을 유발하여 발생한 현상으로 추측되고 있다.



(a)spectrum of the voltage(1kHz/div.)



(b)spectrum of the switching noise
(5kHz/div.)

그림8 SRP-PWM기반 인버터 구동시스템
($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=2\text{kHz}$, $M=0.7$)

Fig.8 SRP-PWM based inverter drives
($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=2\text{kHz}$, $M=0.7$)

4. 결 론

본 연구에서는 랜덤하게 배치된 a상의 펄스 범위내에서 나머지 상의 펄스 위치도 완전히 랜덤하게 배치 할 수 있는 고정 스위칭 주파수의 2상 공간벡터 SRP-PWM기법을 제안하였다.

제안된 방법은 스위칭 주파수를 제외한 전 주파수 영역에서 매우 우수한 광대역 특성을 갖고 있으며 v/f 일정 속도 제어를 수행한 결과, 기존의 2상 중앙정렬 SVM 방법과 거의 일치하는 속도 추종 성능을 얻을 수 있었다. 또한 제안된 기법은 종전의 기법과 비교하여 유도모터로부터 발

생되는 불쾌한 가정 스위칭 소음을 현저하게 완화시킬 수 있었다. 다음의 연구과제로서 센서리스 벡터제어 기반의 시스템과 EMI 저감 효과 그리고 스위칭 손실의 비교 분석이 필요하리라 생각된다.

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

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] S. Legowski and A. M. Trzynadlowski, "Power-MOSFET, hypersonic inverter with high quality output current," in Conf. Rec. IEEE APEC'90, 1990, pp.3-7.
- [3] I. Takahashi and H. Mochikawa, "Optimum PWM waveforms of an Inverter for decreasing acoustic noise of an induction motor", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.22, no.5, pp.828-834, 1986.
- [4] F. Blaabjerg and J. K. Pedersen, "Implementation and test of a digital quasi-random modulated SFAVM PWM in a high performance drive system", in Conf. Rec. IEEE IECON'93, 1993, pp.265-270.
- [5] A. M. Trzynadlowski, J. K. Pedersen, R. L. Kirlin and S. Legowski, "Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.44, no.2, pp.173-181, 1997.
- [6] R. L. Kirlin, S. Kwok, S. Legowski and A. M. Trzynadlowski, "Power spectra of a PWM inverter with randomized pulse position", IEEE Trans. Power Electron., vol.9, no.5, pp.463-471, 1994.
- [7] 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.