論文 8-3-3

2002 추계학술대회 우수추천논문

고정 스위칭 주파수를 갖는 2상 공간벡터 SRP-PWM기법을 적용한 인버터 구동 시스템

鄭榮國*, 魏昔吾**, 任永徹***, 梁承學****

Inverter Drives Adopting the Two-Phase Space Vector SRP-PWM Scheme with Fixed Switching Frequency

Young-Gook Jung, Seog-Oh Wi, Young-Cheol Lim, and Seung-Hak Yang

요 약

본 연구에서는 3상 SRP-PWM기법을 2상에 적용한 고정 스위칭 주파수의 공간벡터 SRP-PWM (Separately Randomized Pulse Position PWM) 기법을 제안하고 이를 산업현장에 적용 가능한가를 검증하기 위하여, 속도 피드백 실험을 행하였다. 제안된 2상 SRP-PWM은 랜덤하게 배치된 a상의 펄스 범위 내에서 나머지 상의 펄스 위치를 완전히 랜덤하게 배치 할 수 있는 변조기법이다. 제안된 방법이 적용된 속도 피드백 시스템은 부하와 연결된 3상 유도모터의 v/f 일정 제어를 기반으로 하였다. 실험 결과, 제안된 방법이 적용된 기존의 2상 중앙정렬 SVM의 경우와 비교하여 모터의 v/f 일정 제어의 성능은 동일함을 확인할 수 있었으며, 모터의 전압 및 소음 스펙트럼의 광대역화 효과는 제안된 방법이 훨씬 우수함을 입증할 수 있었다.

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.

Key Words : SRP-PWM (Separatley Randomized Pulse Position PWM), Inverter Drives, Acoustic Noise, Speed Feedback System

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[1-3].

이러한 문제점을 해결하기 위해 가장 쉽게 생각할

* 정회원, 대불대학교 컴퓨터정보공학부 조교수
E-mail : jyg@mail.daebul.ac.kr
** 정회원, 한국천문연구원 위촉연구원
*** 정회원, 전남대학교 전기공학과 교수
**** 정회원, 호남대학교 전기공학과 부교수
접수일자 : 2003. 2.21
1차심사 : 2003. 3.31
심사완료 : 2003. 4.10

수 있는 기법으로 초음파 주파수의 스위칭에 의한 PWM기법을 생각할 수 있다[4]. 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 가청 스위칭 소음을 완화하는 기법들이 제시되고 있는데, RPWM[6-10], Optimum PWM[5] 등이 주목을 받고 있다. 특히 RPWM기법은 PWM 주파수를 랜덤하게 변경하여 소음 전력을 광대역화하는 기법으로 비교적 최근에 연구되고 있는 분야이다. 이러한 기법 중 공간벡터 방식의 랜덤 캐리어 주파수 PWM[6][7]은 전압 지령부와 스위칭 부를 동기화하려면 제어 알고리즘의 연산시간이 스위칭 주파수의 최대값을 제한하는 요소로 작용하게 된다. 이는 복잡한 제어 루프를 이 방식으로 구성하는 경우, 최대 스위칭 주파수는 어느 한계를 갖는다는 문제점이 있다.

랜덤 펄스 위치 공간벡터 PWM기법[8][9]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 PWM기법은 RLL (Random Lead-Lag PWM), RCD (Random Centered Distribution PWM), RZV (Random Zero Vector Distribution PWM), SRP (Separatley Randomized Pulse Position PWM) 등 여러 방법에 의해 구현이 가능하다. 이 중에서 SRP기법[1-3]은 랜덤하게 배치된 a상의 펄스 범위 내에서 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[1-3]을 2상에 적용한 고정 스위칭 주파수의 공간벡터 SRP-PWM기법을 제안하고 이를 산업현장에 적용 가능한가를 검증하기 위하여, 속도 피드백 실험을 행하였다. 속도제어는 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

그림 1은 본 연구에서 제안한 2상 공간벡터 SRP-PWM기법을 적용한 인버터 구동 시스템을 나타내고 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 지령속도 w^*와 속도 측정부에서 얻어진 속도 w와의 차이인 속도오차 e는 PI제어기의 제어입력이 되고 PI제어기는 지령 동기 주파수를 출력하며 일정 v/f 제어기는 지령 주파수에 따라 전압을 발생하고 있다.

지령 주파수와 전압을 이용하여 매 제어 주기마다 지령 공간 전압벡터가 얻어지고 공간전압벡터 변조법에 의하여 각상의 펄스 듀티비가 계산된다. 계산된 듀티비는 랜덤 펄스 위치 PWM 발생기에 의하여 듀티비 값을 펄스 파형으로 변환하며, 이 펄스 파형이 인버터의 게이트에 인가되면 원하는 랜덤 펄스 위치 PWM이 적용된 지령전압을 얻을 수 있다.

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

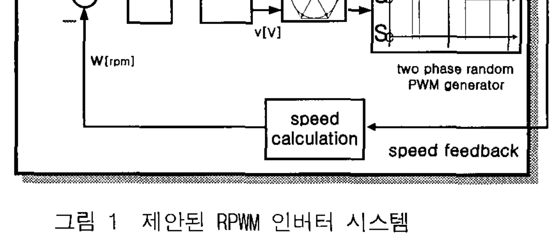
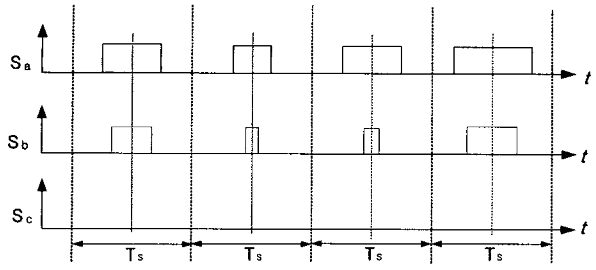
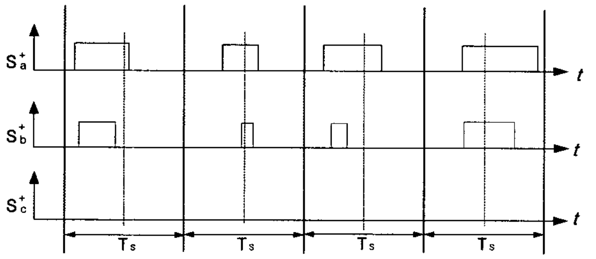


그림 1 제안된 RPWM 인버터 시스템
Fig. 1 The proposed RPWM inverter system



(a) center aligned SVM



(b) proposed SRP-PWM

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

지령전압 벡터 V^*가 그림 3으로 나타낸 공간 벡터도의 1번 섹터에 있을 때, 1주기 동안의 2상 변조 SRP-PWM을 그림 4에 나타내었다. 3상 변조 SRP-PWM의 경우에는 랜덤 변위 T_{RAND}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-PWM는 SVM을 통하여 얻어진 우측 정렬된 두개의 펄스 위치를 좌측으로 어느 정도 변위시킬 것인가를 랜덤하게 지정하는 방법으로 이를 위해 랜덤함수[1-3]를 사용한다.

이를 구현하기 위한 과정이 그림 4에 자세히 도시되어 있다. 먼저 그림 4(b)를 보면 두개의 펄스 모두를 영벡터(V_{000})의 범위 내에서의 결정된 랜덤 변위($T_{RAND\ 1}$)만큼 좌측으로 이동시킨다. 그리고 작은 펄스를 T_1 범위에서 결정된 랜덤 변위($T_{RAND\ 2}$) 만큼 좌측으로 이동하면 지령전압벡터를 충실히 구현하면서 2상 변조 SRP-PWM이 구현된다.

그림 5는 제안된 2상 SRP-PWM을 구현하기 위한 흐름도이다. 제안된 기법을 구현하기 위해서는 우선 우측 정렬된 2상 SVM을 구현하고, 이를 바탕으로 펄스위치를 우측 정렬, 또는 좌측 정렬을 행하여야 한다. 이를 구현하기 위해 SVM기법에 의해 얻어진 유효벡터 인가시간 T_1, T_2와 영벡터 인가시간 T_0를 적절히 재배치해야 한다.

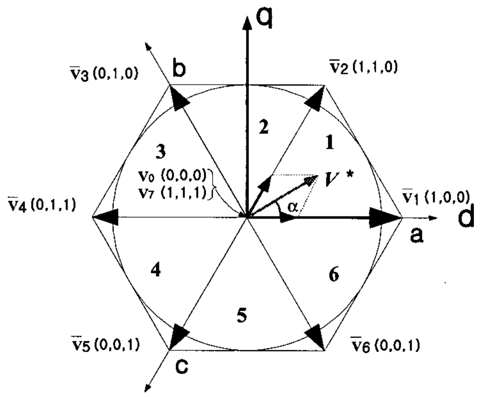
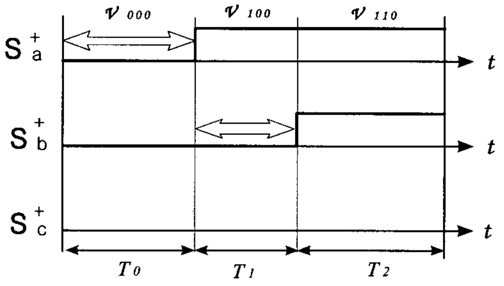
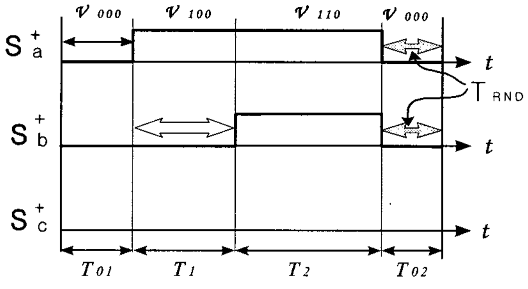


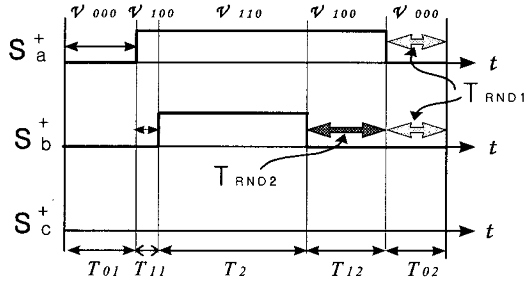
그림 3 공간벡터도
Fig. 3 Space Vector Diagram



(a) right aligned PWM



(b) first displacement PWM



(c) second displacement PWM

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

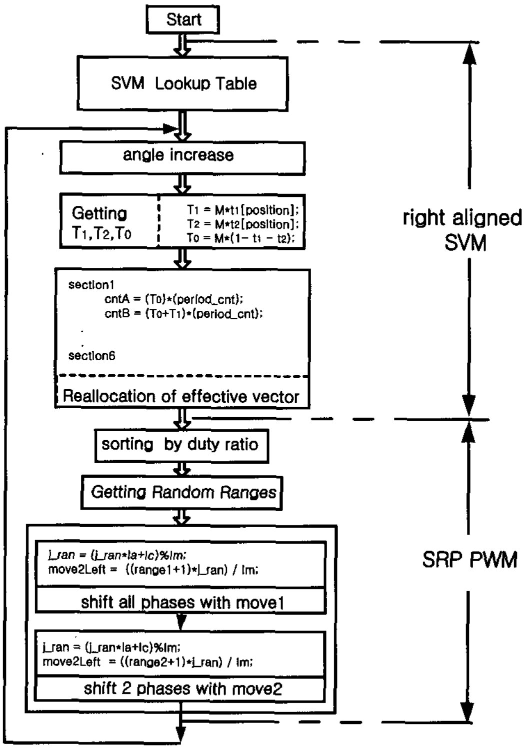


그림 5 2상 SRP-PWM의 구현 흐름도
Fig. 5 Implementation flowchart for 2 phase SRP-PWM

SVM은 벡터 공간상의 2개의 유효 스위칭 벡터의 시간적인 합성을 통하여 벡터 공간상의 전압지령을 자유롭게 구현할 수 있는 변조기법이다. 유효벡터 인가시간 T_1, T_2를 구하기 위해 사용되는 초월함수는 알고리즘 상에서 많은 시간이 소요되기 때문에 지령벡터의 각도에 따른 T_1, T_2의 비율을 초기화 과정에서 구하고, PWM을 발생시키기 위한 알고리즘 내에서 변조지수 M을 곱하여 2개의 유효벡터들의 인가시간을 구해낸다. 그런데 실제의 각 상의 펄스는 한 제어 주기동안 한번의 온과 한번의 오프만을 행하여 스위칭 회수를 최소화하여야 한다. 이를 위해서 T_0, T_1, T_2의 배치를 적절히 행하여야 한다.

가장 간단한 펄스배치 방법인 우측 정렬된 PWM 펄스를 구현하기 위해서는, 지령벡터가 홀수 섹터에 있으면, T_0, T_1, T_2의 순서의 배치, 짝수 섹터이면, T_0, T_2, T_1,순서의 배치를 하여야 한다. 이렇게, 섹터의 홀수 및 짝수 여부에 따라 지령벡터의 합성순서를 재배치하여야 쉽게 각 상별 듀티비를 구할 수 있다. 이와 같이 구해진 각 상별 듀티비에 적절한 정수를 곱하여 PWM 발생용 카운터에 인가될 데이터를 구할 수 있게 된다.

본 연구에서 제안된 2상 SRP-PWM는 SVM에 의해 얻어진 T_0, T_1, T_2의 재배열 방법에 의해 얻어질 수 있다. 우측정렬을 선택할 것인가, 좌측정렬을 선택할 것인가에 대한 선택은 랜덤함수에 의해 결정되며, 우측정렬, 좌측 정렬 여부에 관계없이 구현된 PWM 펄스는 지령 전압벡터 구현에 충실하면서 랜덤 PWM 효과를 잘 나타내게 된다.

3. 실험결과 및 고찰

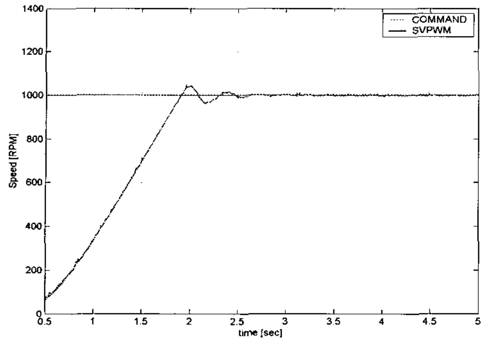
3.1 지령 속도 추종 특성

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. 표 2에 속도제어용 모터와 부하의 사양을 나타내었다.

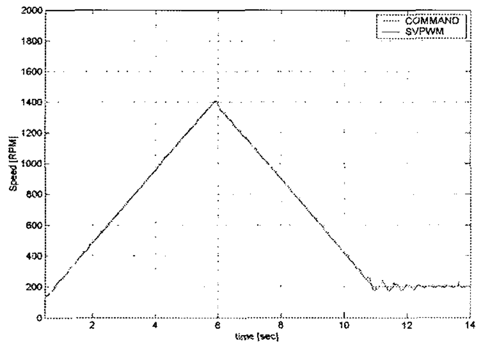
부하가 있는 상태에서 3상 유도모터를 지령 주파수(속도) $f_0 = 40Hz$, 스위칭 주파수 $f_{sw} = 2kHz$ 그리고 변조지수 $M = 0.7$로 폐루프 속도제어 하였을 때, 종전의 2상 중앙정렬 SVM 방식과 제안된 2상 SRP-PWM방식의 속도 추종 특성을 그림 6과 그림 7에 각각 나타내었다. 그림 6과 그림 7에서 보는 바와 같이 속도 프로파일 곡선은 스텝지령, 램프지령 그리고 다단 스텝 지령으로 하였다. 본 연구에서는 제어기의 성능에 관심을 갖기보다는 여러 가지 지령 속도 프로파일에 대해 제안된 방법의 속도 추종 특성이 종전의 방법과 비교하여 얼마만큼 유사한 특성을 갖고 있는가에 중점을

표 2 모터와 부하의 사양
Table 2 Specifications of motor and load

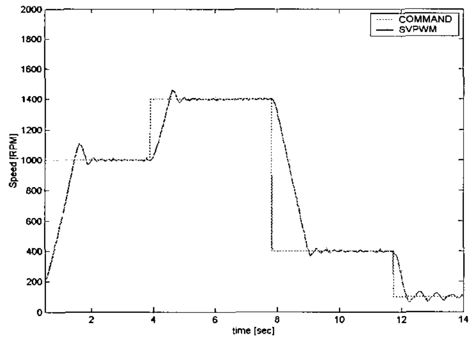
Motor	· 3 phase, squirrel cage type induction motor · 1.5kw(2HP), 4pole, 220v/380v, 5.9A/3.4A · Torque : 0.85N-m · Speed : 1730rpm (slip=3.8%)
Load	· 3phase, squirrel cage type induction motor · 4pole, 0.75KW(1HP), 220v/380v, 3.5A/2.0A



(a) step speed reference



(b) ramp speed reference



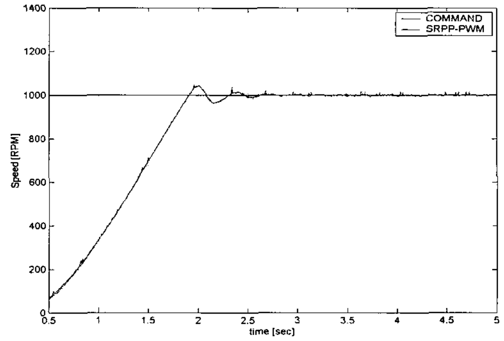
(c) multi-step speed reference

그림 6 중앙정렬 SVM의 측정된 속도 추종 특성
(f_0 = 40Hz, f_{sw} = 2kHz, M = 0.7)

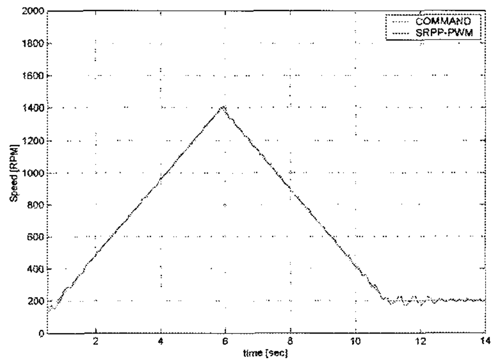
Fig. 6 Measured speed response of the center aligned SVM (f_0 = 40Hz, f_{sw} = 2kHz, M = 0.7)

두어야 한다. 각 방식의 PI제어기 파라미터는 모두 동일한 조건으로 실험을 하였다.

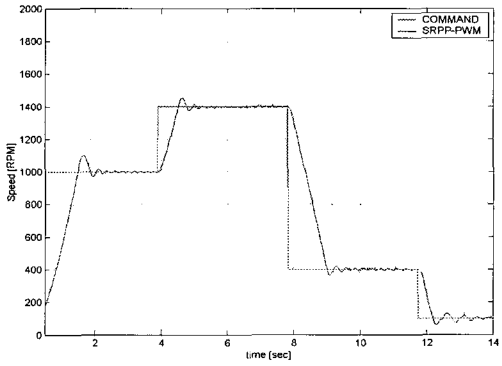
그림 6(a)과 그림 7(a)는 50 rpm 에서 1000 rpm 으로 급격한 속도 지령치를 인가한 경우의 추종특성을 보여주고 있다. 두 방식 모두 2.5초 후에 이르러 정상상태에 도달함을 알 수 있다. 그림 6(b)와 그림 7(b)는 150 rpm 에서 1400 rpm 까지 선형적으로 속도를 증가한 후, 다시 200 rpm 까지 속도 지령치를 감소한 경우의 속도 추종 특성을 비교한 것이다. 중앙정렬 SVM과 SRP-PWM 방식 모두 6초만에 최고 속도에 도달하였고 12초에 이르러 최저 속도를 유지하고 있다.



(a) step speed reference



(b) ramp speed reference



(c) multi-step speed reference

그림 7 SRP-PWM의 측정된 속도 추종 특성
(f_0 = 40Hz, f_{sw} = 2kHz, M = 0.7)

Fig. 7 Measured speed response of the SRP-PWM (f_0 = 40Hz, f_{sw}= 2kHz, M = 0.7)

특히 그림 6(c)와 그림 7(c)에서 보여준 200 rpm → 1000 rpm → 1400 rpm → 400 rpm → 100 rpm의 다단 스텝 속도 지령치에 따른 속도 응답 특성을 관찰하면 두 방식 모두 오버슈트 특성 및 세팅 타임이 거의 비슷한 특성을 보이고 있음을 확연하게 알 수 있다. 이는 제안된 2상 SRP-PWM 기법은 종전의 2상 중앙정렬 SVM과 속도 추종 성능이 동일하다는 것을 의미하며, 그림1의 제안된 시스템은 모터속도 제어기로서의 성능을 잘 유지하고 있다는 것을 나타낸다.

3.2 스위칭 소음의 광대역화 특성

본 연구에서 인버터로 구동되는 3상 유도모터의 스위칭 소음의 파워 스펙트럼을 얻기 위한 실험은 6면이 모두 흡음제로 밀폐되도록 특별하게 설계된 무향실에서 수행되었다. 소음 측정 장비로는 소음 및 진동신호에 대한 분석이 가능한 전용 측정기 「OROS OR-25」를 사용하였다. 실험 결과의 분석에 사용된 데이터는 유도모터로부터 측면방향으로 0.25 m 떨어진 곳에서 얻은 값을 사용하였다. 그림 8은 소음 측정을 위한 실험 시스템을 나타내고 있다.

가청 스위칭 소음의 광대역화 특성 실험은 속도 추종 실험과는 달리 무부하에서 수행되었다. 일반적으로 인버터 구동 유도모터는 정격부하 상태에서 정격속도로 운전하는 것이 원칙이다. 이 경우, 모터 구동 장치로부터 발생되는 소음은 모터, 인버터의 전자기적인 소음 뿐 만 아니라, 구동장치 및 부하의 기계적인 소음 등이다. 본 연구에서 관심의 대상은 기계적인 소음이 아니라 인버터의 스위칭 상태에 따른 모터의 전자기적인 가청 소음이므로 부하가 연결되지 않은 상태에서 측정하는 것이 더 바람직하다.

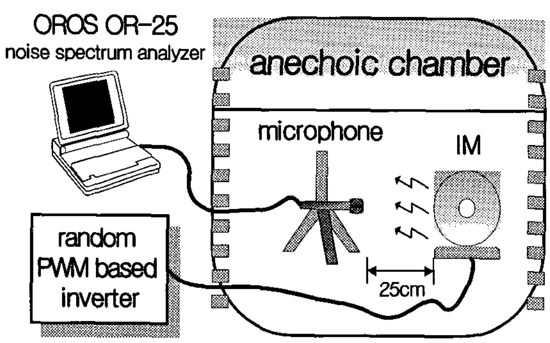
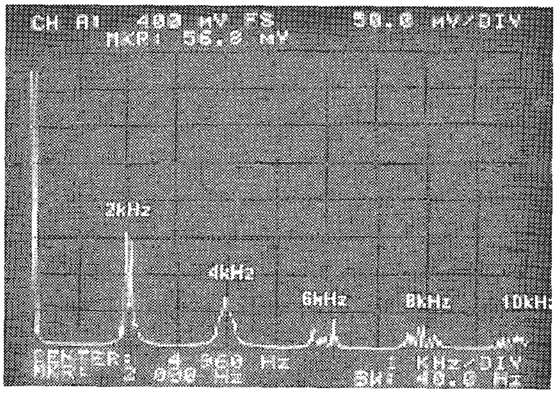


그림 8 소음 측정을 위한 실험 시스템

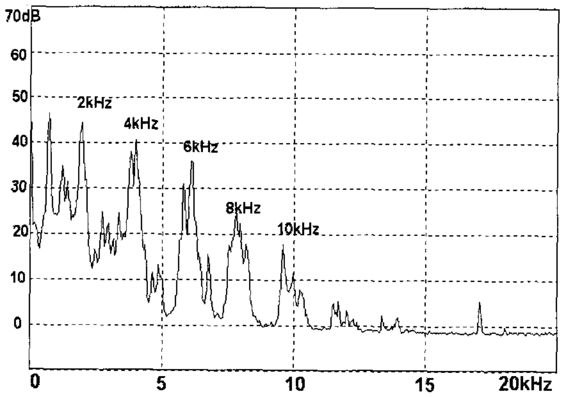
Fig. 8 Experimental setup for measuring the acoustic noise

종전의 2상 중앙정렬 SVM 방식과 제안된 2상 SRP-PWM방식에 의한 유도모터의 선간전압과 소음 스펙트럼을 그림 9와 그림 10에 각각 나타내었다. 우선 그림 9(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.

소음 스펙트럼을 나타내고 있는 그림 9(b)의 경우, 전압 스펙트럼 분포와 비슷하게 1 배 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.



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



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

그림 9 중앙정렬 SVM기반 인버터 구동시스템 (f_0 = 40Hz, f_{sw} = 2kHz, M = 0.7)

Fig. 9 Center aligned SVM based inverter drives (f_0=40Hz, f_{sw}=2kHz, M=0.7)

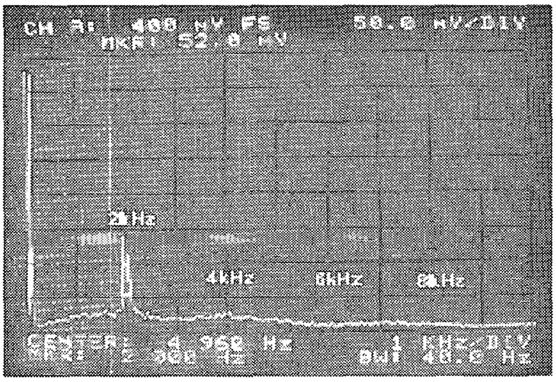
제안된 2상 SRP-PWM를 나타내고 있는 그림 10(a)의 경우, 1배 스위칭 주파수인 2kHz 대역을 제외하고 2배, 3배 스위칭 주파수대 고조파 성분의 크기가 현격하게 감소되어 광대역 효과가 뚜렷하게 나타나고 있음을 관찰할 수 있다.

그림 10(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[10].

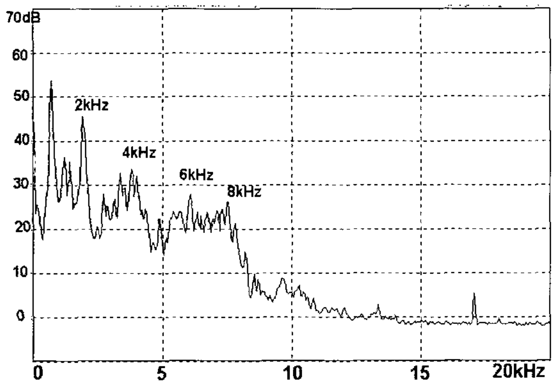
표 3과 표 4는 선간 전압 스펙트럼과 소음 스펙트럼에 대해 스위칭 주파수의 정수배 주파수에서 나타나는 이산적인 스펙트럼의 정량적인 값을 나타내고 있다. 선간 전압 스펙트럼의 단위는 mV이며 소음 스펙트럼의 단위는 dB이다. 변조지수가 0.7인 상태에서 스위칭 주파수 2kHz, 3kHz의 경우 선간 전압과 소음 스펙트럼의 광대역화는 모두 2상 SRP-PWM 방식에서 우수하게 나타나고 있다. 반면에 중앙정렬 SVM방식은 스위칭 주파수의 정수배 주파수에만 강하게 이산적인 특성이 나타난다.

그림 11은 스위칭 주파수를 2kHz로 고정한 상태에서 변조지수의 변화에 따른 전압 스펙트럼을 3차원적인 그래픽으로 나타낸 것이다. 그림 11은 전압 스펙트럼을 나타내고 있지만 잘 관찰해보면 그림 9(b)와 그림 10(b) 그리고 표 4에 나타난 소음 특성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

이상의 전압 스펙트럼의 특성은 곧바로 소음 특성에 영향을 미치고 있다. 여러 개 집중된 스펙트럼을 갖는 2상 중앙정렬 SVM보다는 어느 특정 주파수에만 단일하게 집중된 전압 스펙트럼을 갖는 2상 SRP-PWM이 소음 개선에는 더 유리함을 알 수 있다. 결국 소음의 광대역화의 관점에서 생각하면 2상 SRP-PWM의 스위칭 주파수 대역의 단일하게 집중된 전압 스펙트럼은 모터로부터 발생되는 스위칭 소음의 광역화에 악영향을 주는 것은 아니라 생각된다.



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



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

그림 10 SRP-PWM기반 인버터 구동시스템 (f_0= 40Hz, f_{sw}=2kHz, M=0.7)

Fig. 10 SRP-PWM based inverter drives (f_0=40Hz, f_{sw}=2kHz, M=0.7)

표 3 전압 스펙트럼의 불연속 성분 (Unit: mV)

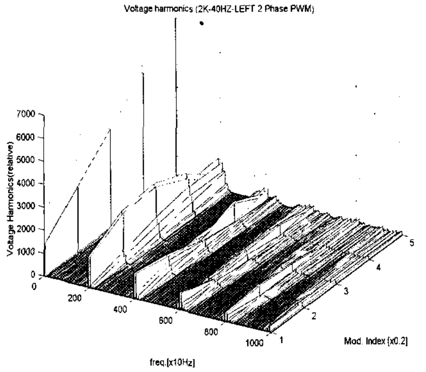
Table 3 Discrete Components of Voltage Spectrum

f_{sw}	freq / PWM	f_{sw}×1	f_{sw}×2	f_{sw}×3
2kHz	SVM	160	70	30
	SRP	130	25	10
3kHz	SVM	130	70	40
	SRP	115	25	5

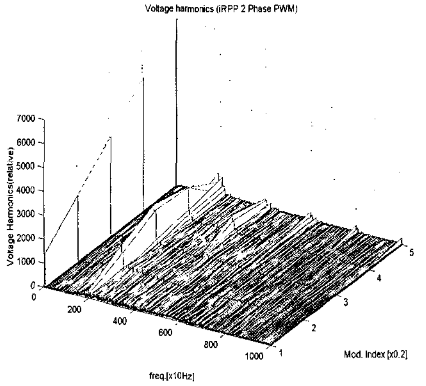
표 4 소음 스펙트럼의 불연속 성분 (Unit: dB)

Table 4 Discrete Components of Acoustic Noise Spectrum

f_{sw}	freq / PWM	f_{sw}×1	f_{sw}×2	f_{sw}×3	f_{sw}×4
2kHz	SVM	44	40	37	25
	SRP	45	35	28	25
3kHz	SVM	35	40	19	15
	SRP	32	35	10	5



(a) 2 phase center aligned SVM



(b) 2 phase SRP-PWM

그림 11 변조지수에 따른 전압의 스펙트럼
Fig. 11 Voltage spectrum for different modulation index

4. 결 론

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

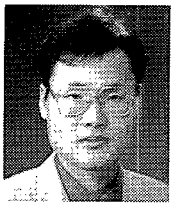
제안된 방법은 스위칭 주파수를 제외한 전 주파수 영역에서 매우 우수한 광대역 특성을 갖고 있으며 v/f 일정 속도제어를 수행한 결과, 기존의 2상 중앙정렬 SVM 방법과 거의 일치하는 속도 추종 성능을 얻을 수 있었다. 또한 제안된 기법은 종전의 기법과 비교하여 유도모터로부터 발생되는 불쾌한 가청 스위칭 소음을 현저하게 완화시킬 수 있었다. 다음의 연구과제로서 센서리스 벡터제어 기반의 시스템과 EMI 저감 효과 그리고 스위칭 손실의 비교 분석이 필요하리라 생각된다.

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

참 고 문 헌

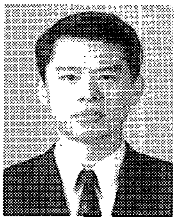
[1] Y.G. Jung, S.H. Na, Y.C. Lim, and S.H. Yang, "Reduction of audible switching noise in induction motor drives using random position PWM", IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 149, no. 3, May, pp. 195~202, 2002.
[2] 나석환, 정영국, 임영철, "인버터 구동 시스템을 위한 새로운 공간벡터 Random PWM기법", 전력전자학회 논문지 제6권 제6호, pp. 525~537, 2001.
[3] 위석오, 정영국, 나석환, 임영철, "모터 구동 장치의 가청 스위칭 소음 저감을 위한 2상 및 3상 랜덤 펄스 위치 PWM기법의 성능 비교", 전력전자학회 논문지 제7권 제3호, pp. 224~236, 2002.
[4] S. Legowski and A. M. Trzynadlowski, "Power-MOSFET, hypersonic inverter with high quality output current", in Conf. Rec. IEEE APEC '90, pp. 3~7, 1990.
[5] 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.
[6] 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, pp. 265~270, 1993.
[7] 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.
[8] 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.
[9] 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.
[10] J.K. Pedersen and F. Blaabjerg, "Determination of mechanical resonances in induction motors by random modulation and acoustic measurement", in Conf. Rec. EPE '93, pp. 319~324, 1993.

저 자 소 개



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. 한국과학재단 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터(RRC) 연구원. 현재 대불대 컴퓨터정보공학부 조교수.

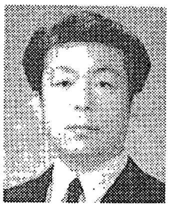


위석오(魏昔吾)

1968년 12월 20일생. 1993년 전남대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국천문연구원 위촉연구원.

임영철(任永徹)

1953년 4월 22일생. 1975년 전남대 전기공학과 졸업. 1977년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 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 부회장.



양승학(梁承學)

1958년 12월 6일생. 1982년 전남대 계측공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 일본 동경대 대학원 전기전자공학과 졸업(박사). 현재 호남대 전기공학과 부교수. 당 학회 학술위원.