

전력전자 변환장치를 위한 고정 스위칭 주파수로 동작하는 3상 및 2상 변조 SRP-PWM기법

오승열^{o*} 정영국^{**} 임영철^{*} 위석오^{***}

*전남대학교 전기공학과 **대불대학교 컴퓨터정보공학부 ***한국천문연구원

3-Phase and 2-Phase Modulated SRP-PWM Technique with a Fixed Frequency for Power Electronics Converters

^{o*}S.Y. Oh ^{**}Y.G. Jung ^{*}Y.C. Lim ^{***}S.O. Wi

^{*}Chonnam National University ^{**}Daebul University and ^{***}Korea Astronomy Observatory

ABSTRACT

In this paper, Inverter drives adopting 3-phase and 2-phase SRP-PWM (Separately Randomized Pulse Position PWM) with fixed switching frequency is proposed. In the proposed SRP-PWM scheme, each of 3 or 2 phase pulses is located randomly in each switching interval. The experimental results show that the voltage / current harmonics and the switching noise harmonics are spread to a wide band area. Also, the performance of the 3-phase SRP-PWM and the 2-phase SRP-PWM 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 PWM기법을 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 가칭 스위칭 소음을 완화하는 기법들이 제시되고 있는데, Optimum PWM^[3], RPWM^[4-11] 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^[4,5]은 전압 지령부와 스위

칭 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 문제점이 있다.

랜덤 펄스 위치 공간벡터 PWM기법^[6-11]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 (Separately Randomized Pulse Position PWM) 등 여러 방법에 의해 구현이 가능하다. 이 중에서 SRP-PWM기법^[1,8-11]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-PWM 및 2상 SRP-PWM기법의 성능을 비교하고 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 3상 및 2상 SRP-PWM이 동일함을 확인할 수 있었다. 또한 모터의 전압 및 전류 스펙트럼의 광대역화 효과는 3상 SRP-PWM이 우수하나, 스위칭 소음 스펙트럼의 광대역화의 관점에서는 2상 SRP-PWM이 3상 SRP-PWM에 비하여 우수함을 확인할 수 있었다.

2. 3상 및 2상 SRP-PWM기법

그림 1은 본 연구에서 제안한 3상 및 2상 공간벡터 SRP-PWM기법을 적용한 인버터 구동 시스템을 나타내고 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 지령속도 w^* 와

속도 측정부에서 얻어진 속도 w 와의 차이인 속도 오차 e 는 PI제어기의 제어입력이 되고 PI제어기는 지령 동기 주파수를 출력하며 일정 v/f 제어기는 지령 주파수에 따라 전압을 발생하고 있다.

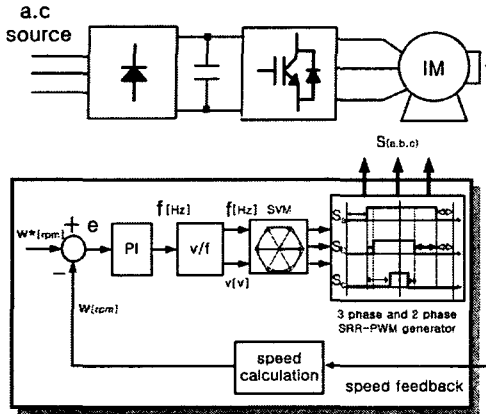


그림 1 제안된 SRP-PWM기반 인버터 구동 시스템
Fig.1 The proposed SRP-PWM based inverter drives

지령 주파수와 전압을 이용하여 매 제어 주기마다 지령 공간 전압벡터가 얻어지고 공간 전압벡터 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.

지령전압 벡터 V^* 가 그림 2로 나타난 공간 벡터도의 1번 섹터에 있을 때, 1주기 동안의 3상 및 2상 변조 SRP-PWM을 그림 3에 나타내었다. 3상 변조 SRP-PWM의 경우에는 랜덤 변위 T_{RAND} 가 세 번이 필요한 반면 2상 변조 SRP-PWM의 경우 두 번의 랜덤 변위만으로 구현이 가능하다. 본 연구에서 구현된 3상 및 2상 변조 SRP-PWM은 SVM을 통하여 얻어진 펄스의 변위를 랜덤하게 지정하는 방법으로 랜덤 함수^[1,8-11]를 사용한다.

SRP-PWM을 구현하기 위한 과정이 그림 3에 자세히 도시되어 있다. 먼저 그림 3(a)를 보면 3상의 펄스 모두를 영 벡터 $V(000)$ 의 범위 내에서의 결정된 랜덤 변위 ($T_{RAND 1}$)만큼 이동시킨다. 그리고 작은 펄스를 랜덤 변위 ($T_{RAND 2}$) 만큼 이동하고, 마지막으로 T_{01} 과 T_{12} 을 유지하면서 랜덤 변위 ($T_{RAND 3}$)만큼 이동시키게 되면 지령 전압벡터를 충실히 추종하는 3상 변조 SRP-PWM이 구현된다. 2상 변조 SRP-PWM은 그림 3(b)에서 보는 바와 같이 3상 변조 SRP-PWM과 동일하나 랜덤 변위 $T_{RAND 3}$ 의 과정이 생략된다는 점이 다르다.

여기서 랜덤 변위 T_{RAND} 와 펄스를 배치하는 방법에 따라서 우측 정렬 후 T_{RAND} 에 따라 각상의 펄스를 좌측으로 배치하는 방법^[10,11]과 곧바로 T_{RAND} 를 계산하여 각상의 펄스 배치에 위배되지 않도록 직접 배열하는 방법^[1,8,9]이 저자들에 의하여 구현된 바 있다. 이 두가지 방법은 연산 및 구현의 속도에 근본적인 차이는 없으

나, 전자는 SRP-PWM을 전반적으로 도식적인 설명하는 데 용이하다는 점이 있다.

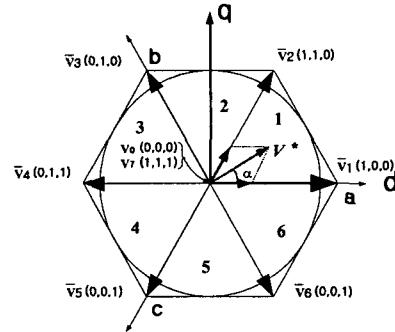
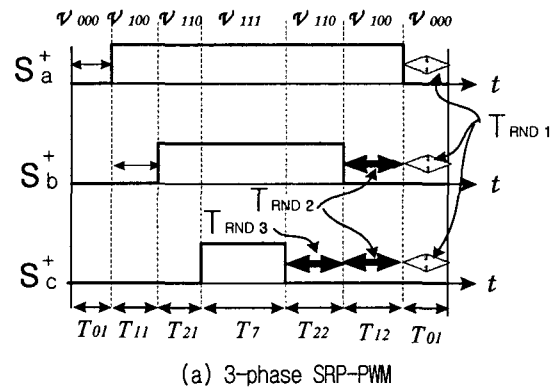
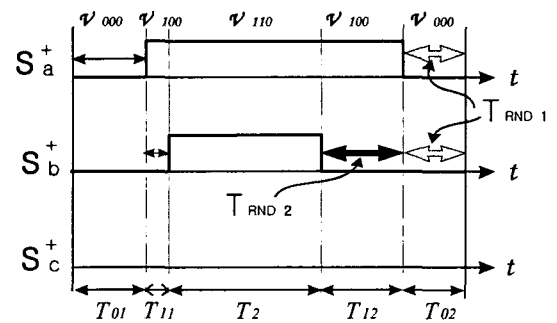


그림 2 공간 벡터도
Fig.2 Space Vector Diagram



(a) 3-phase SRP-PWM



(b) 2-phase SRP-PWM

그림 3 SRP-PWM의 각 상별 펄스 위치
Fig.3 Each phase pulse of SRP-PWM

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서 제안된 3상 및 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 설정하

기 위하여, EPLD (Erasable Programmable Logic Device)를 사용하여 구현하였다.

3.1 지령속도 추종 특성

부하가 있는 상태에서 3상 유도모터를 지령 주파수 (속도) $f_0 = 40\text{Hz}$, 스위칭 주파수 $f_{sw} = 3\text{kHz}$ 그리고 변조지수 $M = 0.7$ 로 폐루프 속도제어 하였을 때, 3상 변조 SRP-PWM과 2상 SRP-PWM의 속도 추종 특성을 그림 4와 그림 5에 각각 나타내었다. 그림 4와 그림 5에서 보는 바와 같이 속도 프로파일 곡선은 스탭지령, 램프 지령으로 하였다.

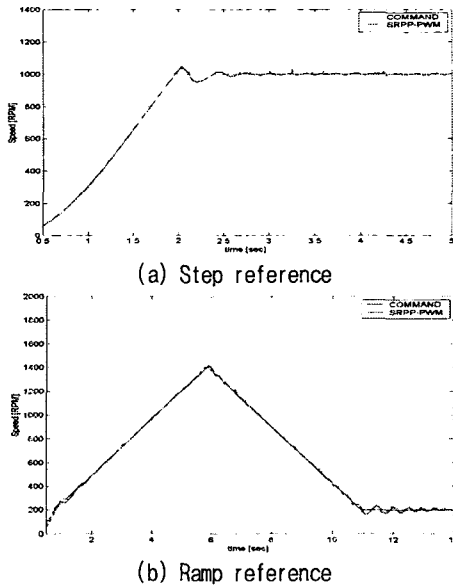
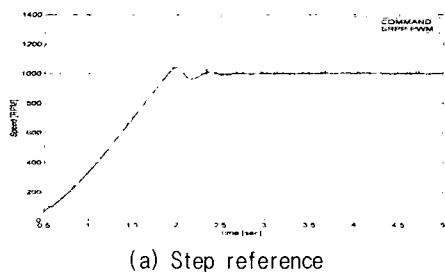


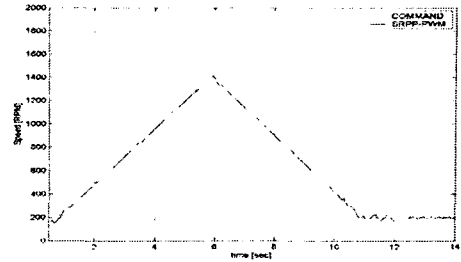
그림 4 3상 SRP-PWM의 측정된 속도 추종 특성 ($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$, $M=0.7$)

Fig.4 Measured speed response of the 3-phase SRP-PWM ($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$, $M=0.7$)

그림 4(a)와 그림 5(a)는 50rpm에서 1000rpm으로 급격한 속도 지령치를 인가한 경우의 추종특성을 보여주고 있다. 두 방식 모두 2.5초 후에 이르러 정상상태에 도달함을 알 수 있다. 그림 4(b)와 그림 5(b)는 150rpm에서 1400rpm까지 선형적으로 속도를 증가한 후, 다시 200rpm까지 속도 지령치를 감소한 경우의 속도 추종 특성을 비교한 것이다. 두 방식 모두 6초만에 최고 속도에 도달하였고 12초에 이르러 최저 속도를 유지하고 있다. 이는 두 방식의 속도 추종 성능이 동일하다는 것을 의미하며, 그림 1의 제안된 시스템은 모터속도 제어 기로서의 성능을 잘 유지하고 있다는 것을 나타낸다.



(a) Step reference



(b) Ramp reference

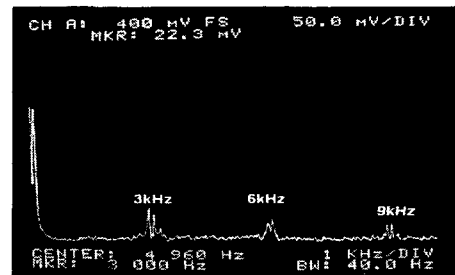
그림 5 2-phase SRP-PWM의 측정된 속도 추종 특성 ($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$, $M=0.7$)

Fig.5 Measured speed response of the 2-phase SRP-PWM ($f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$, $M=0.7$)

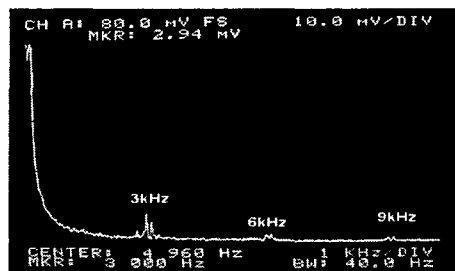
3.2 스위칭 소음의 광대역화 특성

3상 및 2상 SRP-PWM방식에 의한 유도모터의 선간 전압과 전류 그리고 스위칭 소음 스펙트럼을 그림 6과 그림 7에 각각 나타내었다. 우선 그림 6(a)와 그림 6(b)로 나타낸 3상 SRP-PWM의 전압 및 전류 스펙트럼은, 스위칭 주파수의 1배 주파수 3kHz, 스위칭 주파수의 2배 주파수 6kHz 그리고 3배의 주파수 9kHz영역에 걸쳐 거의 고른 스펙트럼 분포를 보이고 있다. 그러나 그림 7(a)와 그림 7(b)로 나타낸 2상 SRP-PWM의 경우에는 스위칭 주파수 3kHz에서의 강한 고조파를 제외하면 전 영역에서 거의 백색잡음에 가까운 고조파 분포를 하고 있다.

스위칭 소음 스펙트럼을 나타내고 있는 그림 6(c)와 그림 7(c)는, 전압 스펙트럼 분포와 비슷하게 스위칭 주파수의 정수배 주파수에서 소음 성분이 집중된 현상을 볼 수 있다. 특히 3상의 경우는 2상 보다는 2배 스위칭 주파수인 6kHz 주파수대에 소음의 강한 성분이 있음을 볼 수 있다. 그리고 스위칭과 상관없는 주파수대인 750Hz 및 1.8kHz대에 약간의 소음성분이 존재함을 알 수 있다.



(a) voltage



(b) Current

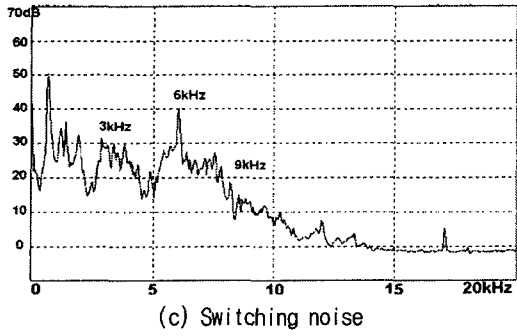
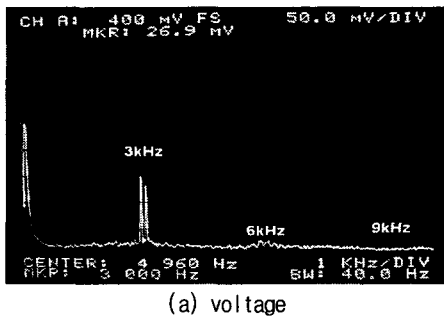
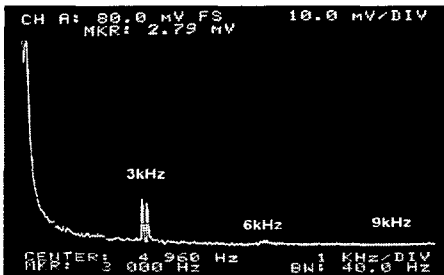


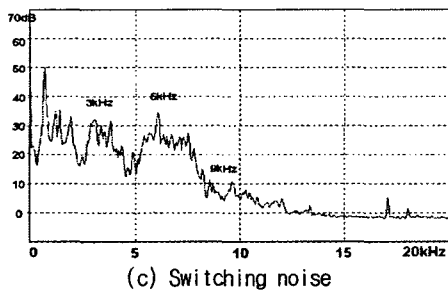
그림 6 3-phase SRP-PWM의 측정된 스펙트럼 ($f_0=60\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$, $M=0.7$)
 Fig.6 Measured spectrum of the 3-phase SRP-PWM ($f_0=60\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$, $M=0.7$)



(a) voltage



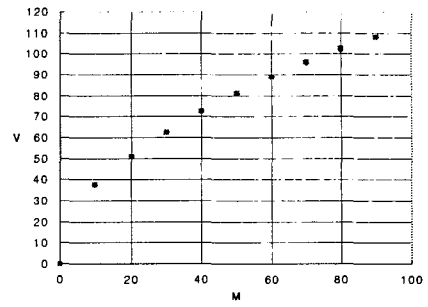
(b) Current



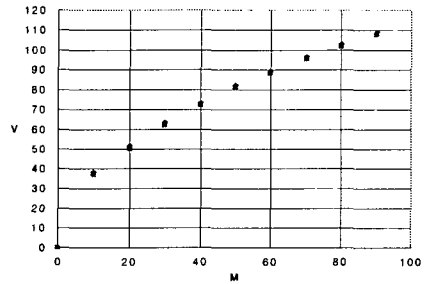
(c) Switching noise

그림 7 2-phase SRP-PWM의 측정된 스펙트럼 ($f_0=60\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$, $M=0.7$)
 Fig.7 Measured spectrum of the 2-phase SRP-PWM ($f_0=60\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$, $M=0.7$)

그림 8은 3상 과 2상 SRP-PWM의 M의 변화에 따른 인버터 출력전압(rms)을 나타낸 것이다. M과 출력전압은 비교적 선형관계를 잘 유지하고 있으며 각 방식의 결과는 서로 동일함을 알 수 있다.



(a) 3-phase SRP-PWM



(b) 2-phase SRP-PWM

그림 8 측정된 변조지수(M)와 출력 전압 (rms)과의 관계
 (x-axis: M,y-axis:rms, $f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$)
 Fig.8 Measured result of modulation index(M) vs.inverter output voltage(rms)
 (x-axis: M,y-axis:rms, $f_0=40\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$)

3.3 전도 노이즈 특성

그림 9는 모터구동 시스템의 전도 노이즈 측정 시스템을 보이고 있다. 전도 노이즈는 제작된 모터 구동 시스템의 전원측에 LISN(Line Impedance Stabilization Network)과 EMI필터를 설치한 후에 측정하였으며, IEC규정에 의해 150kHz에서 30MHz범위를 EMI (Electromagnetic Interference)레벨 측정 주파수로 하였다^[12]. EMI 필터는 상용 제품을 사용하고 있으며, LISN은 전원과 피 측정 기기 사이에 위치하여 전도성 EMI측정에 필수적이다. LISN은 전원단자에 안정된 표준 임피던스를 제공하고 과도상태에 임피던스 변동방지 및 전원으로부터의 노이즈 차단 역할을 한다.

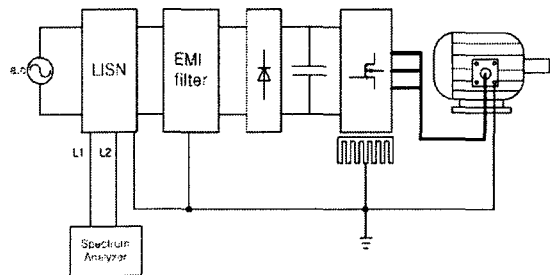
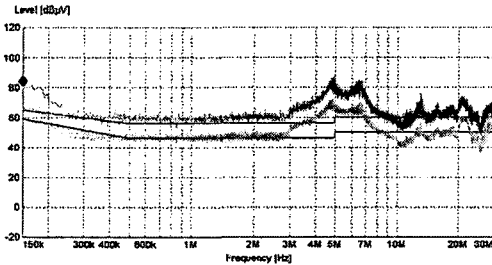
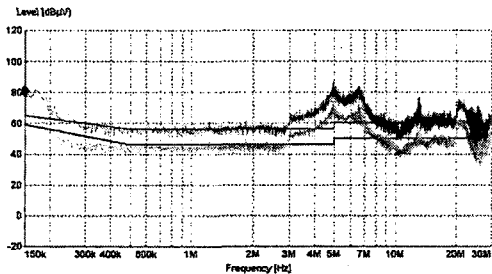


그림 9 전도노이즈 측정 시스템
 Fig.9 Conducted noise measuring system

그림 10은 무 부하 상태에서 측정된 전도 노이즈를 나타내고 있다. 각각 전도 노이즈 스펙트럼의 위쪽은 peak값을 나타내며, 아래쪽은 average값을 나타내고 있다. 소음 저감만을 목적으로 모터 구동시스템을 제작했기 때문에 전도 노이즈는 거의 허용레벨 한계치(limit)에 도달하고 있다.



(a) 3-phase SRP-PWM



(b) 2-phase SRP-PWM

그림 10 무 부하시 측정된 전도 노이즈의 스펙트럼 ($f_0=60\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$, $M=0.9$)
 Fig.10 Measured conducted noise spectrum in case of no load condition ($f_0=60\text{Hz}$, $f_{sw}=3\text{kHz}$, $M=0.9$)

본 연구는 모터 소음 저감이 목적이며 이에 따른 전도 노이즈를 확인하는데 있기 때문에 이점은 크게 문제가 되지 않는다 생각된다. 전도 노이즈 계측장비로는 「ROHDE & SCHWARTZ」^[13]이며 3상 SRP-PWM과 2상 SRP-PWM의 전도 노이즈의 결과는 서로 동일함을 알 수 있다. 이는 고정 스위칭 주파수를 갖는 랜덤 펄스 위치 PWM에 속하는 제안된 기법이 3kHz 저 스위칭 주파수로 동작하기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 3상 및 2상의 펄스를 완전히 랜덤하게 배치 할 수 있는 고정 스위칭 주파수의 3상 및 2상 SRP-PWM기법을 제안하였다. 제안된 방법은 마이크로 콘트롤러로 쉽게 구현가능하며, v/f 제어 유도모터 구동시스템에 적용한 결과, 3상 및 2상 모두 동일한 속도 추종 특성을 보임을 알 수 있었다.

그러나 제안된 인버터 출력 전압 및 전류의 고조파 스펙트럼의 광대역화의 관점에서는 3상이 2상 보다는 더 우수하였다. 또한 유도모터로부터 발생하는 불쾌한 가청 스위칭 소음 저감의 관점에서는 2상이 3상 보다 우수하게 평가되었다. 전도 노이즈의 관점에서는 3상

및 2상 모두 동일한 스펙트럼 분포를 하고 있었다. 다음의 연구과제로서 센서리스 벡터제어 기반의 시스템 구현이 필요하리라 생각된다.

본 연구는 한국과학재단 지정 전남대 고품질전기 전자부품 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. Kirilin 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. Kirilin, 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 with fixed switching frequency for three-phase power converters", IEEE Trans. Power Electron., vol.15, no.4, pp.753-761, 2000.
- [8] 임영철, 나석환, "Random Position PWM을 이용한 유도전동기의 가청 스위칭 소음 저감", 전력전자 논문지, 제3권 제4호, pp.287-297, 1998.
- [9] 위석오, 정영국, 나석환, 임영철, "새로운 2상 랜덤 펄스 위치 PWM기법", 전력전자 논문지, 제7권 제2호, pp.194-204, 2002.
- [10] 위석오, 정영국, 나석환, 임영철, "모터 구동장치의 가청 소음 저감을 위한 새로운 3상 Lead-Lag 랜덤 펄스 위치 PWM기법", 대한전기학회 논문집 51B-7-8, pp.387-398, 2002.
- [11] S.O. Wi, Y.C. Lim, Y.G. Jung, and S.H. Na, "Separately randomized position PWM technique with fixed switching frequency for power electronics converters", in Proc. ICEE'02, 2002, pp.780-785.
- [12] 정세교, 신회범 "가전기기용 교류 전동기 구동시스템의 EMI 특성 및 필터 설계", 전력전자학회 논문지, 9권 제1호, pp.81-87, 2004.
- [13] S. Bolognani, R. Conton and M. Ziglitto, "Experimental analysis of the reduction in PWM inverters using random space vector modulation", in Proc. IEEE ISIE'96, 1996, pp.482-487.