

단상 5-레벨 캐스케이드 인버터에 적용한 간단한 유사 랜덤 주파수 캐리어 PWM(PRC-PWM)

김종남^{o*} 정영국^{**} 임영철^{*}

^{*}전남대학교 전기공학과 ^{**}대불대학교 컴퓨터정보공학부

A Simple Pseudo-Random Frequency Carrier PWM(PRC-PWM) for Single Phase 5-Level Cascaded Inverter

^{o*}J.N. Kim ^{**}Y.G. Jung and ^{*}Y.C. Lim

^{*}Chonnam National University ^{**}Daebul University

ABSTRACT

본 연구에서는 고정 주파수를 갖는 유사 랜덤 주파수 캐리어 PWM(PRC-PWM)을 제안하고 단상 5-레벨 캐스케이드 인버터에 적용하였다. 제안된 PRC-PWM의 펄스는 고정 주파수를 갖는 삼각파 캐리어와 그 역상의 삼각파 캐리어를 랜덤 비트 발생기(PRBS)에 의하여 랜덤하게 선택함으로써 새롭게 합성된 랜덤 주파수의 캐리어에서 얻고 있다. 제안된 PRC-PWM은 고정 주파수의 캐리어 합성만으로 랜덤 주파수의 캐리어를 매우 간단하게 구현할 수 있으며, R-L부하와 연결된 단상 5-레벨 캐스케이드 인버터를 제작하여 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

최근 전력전자 기술의 눈부신 발전은 세탁기, 에어컨, 냉장고등 모터가 필요한 생활 가전기기에 PWM 인버터를 필수적인 전기전자부품으로 자리잡게 하고 있다. 그런데 이들 PWM 인버터는 고정 주파수로 스위칭하기 때문에 PWM 주파수의 정수배 고조파에 잡음 전력을 집중시키고 스위칭 소음을 유발하는 문제점이 있다. 이상의 문제점은 전체 인버터 시스템의 성능의 저하 없이 랜덤 PWM기법에 의하여 쉽게 해결 가능하다^[1].

랜덤 PWM기법은 마이크로 컨트롤러를 기반으로 한 공간벡터 방법^[2-4]과 하드웨어에 의하여 구현하는 방법^[5-8]으로 나눈다. 또한 그 각각에는 랜덤 펄스 위치 PWM(Random Pulse Position PWM)^[2,3,7,8]과 랜덤 주파수 캐리어 PWM (Random Frequency Carrier PWM)^[4-6]으로 구분된다. 일반적으로 랜덤 펄스 위치 PWM은 마이크로 컨트롤러로 구현이 용이하고, 저주파수로 동작 가능하기 때문에 스위칭 손실, EMI, 누설 전류 등을 고려하지 않아도 된다. 그러나 PWM 주파수의 정수배 고조파가 잔존하고 이론이 복잡하다는 점이 있다. 한편 랜덤 주파수 캐리어 PWM을 마이크로 컨트롤러로 구현하

기 위해서는 주어진 랜덤 값으로부터 듀티 시간을 계산하고 이를 펄스로 만들기 위해 고성능의 DSP제어기가 필요하다. 랜덤 주파수 캐리어 PWM을 외부 하드웨어 회로로 구현하기 위해서는 랜덤한 주파수를 갖는 캐리어 발생회로가 필요하다. 랜덤 주파수 캐리어 발생회로는 복잡하고 정밀한 아날로그 및 디지털 소자 등이 요구된다.

본 연구에서는 고정 캐리어 주파수를 갖는 랜덤 캐리어 PWM(PRC-PWM : Pseudo-Random Frequency Carrier PWM)을 적용한 단상 5-레벨 캐스케이드 인버터를 제안하였다. PWM 펄스를 발생하기 위해서 고정 주파수를 갖는 삼각파 캐리어와 역상의 삼각파 캐리어를 PRBS(Pseudo Random Binary Sequence)^[7-8]에 의하여 랜덤하게 선택하여 새롭게 합성된 랜덤 주파수의 캐리어를 사용하고 있다. 이 캐리어를 PD(Phase Disposition)로 배치한 후 EXAR사의 XR2206에서 출력된 정현파 기준치와 비교하면 PWM펄스가 얻어지게 된다. 시프트 레지스터로 구성된 PRBS의 출력에 의해 캐리어의 랜덤한 선택이 이루어지며 이 부분은 2x1 멀티플렉서가 담당하고 있다. 2x1 멀티플렉서로는 CMOS 4066 양방향 스위치가 사용되며 고정 주파수의 삼각파 캐리어 발생과 동기 클럭 발생을 위하여 EXAR사의 XR-2207이 사용된다.

제안된 PRC-PWM을 적용한 단상 5-레벨 캐스케이드 인버터를 제작한 결과, 랜덤 주파수의 캐리어 발생 없이 고정 주파수의 캐리어 합성만으로 랜덤 주파수의 캐리어 특성을 간단하게 구현할 수 있었다. 또한 제안된 방법에 의해 단상 5-레벨 캐스케이드 인버터의 출력 전압 및 전류 고조파 스펙트럼은 정수배 스위칭 주파수에 집중되지 않고 광대역으로 분산되었으며, 특히 전류파형은 RPWM을 적용하였음에도 불구하고 고정 주파수를 적용한 것과 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

2. 제안된 PRC-PWM기법

그림 1은 본 연구에서 제안된 PRC-PWM의 캐리어

발생 원리를 나타낸 블록선도이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 고정 주파수의 삼각파 캐리어 C와 역상인 캐리어 \overline{C} 가 2입력 1출력의 멀티플렉서에 입력되면, 랜덤 비트 발생기의 출력비트 P에 따라서 C와 \overline{C} 가 랜덤하게 출력된다. 이때 C와 \overline{C} 의 결정은 랜덤 비트 발생기의 출력 P에 전적으로 의존되며 P가 High인 경우에는 C, Low인 경우에는 \overline{C} 가 선택된다. 시프트 레지스터로 구성된 PRBS 발생기는 N개의 플립플롭을 사용하여 $2^N - 1$ 개의 불규칙 수열을 발생시키는 회로이다.

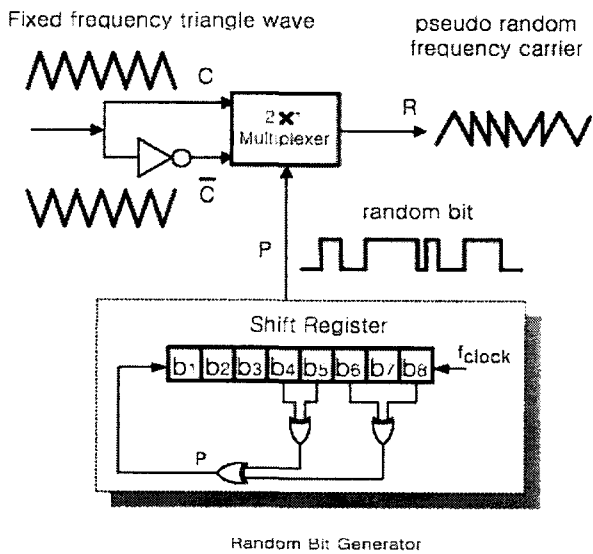


그림 1 제안된 PRC-PWM 발생원리
Fig.1 Principle of the proposed PRC-PWM generation

표 1은 중간 출력 R_1 과 R_0 를 도입하여 나타낸 입력 P와 출력 R사이의 진리표를 나타낸다. 중간 출력은 입력에 따라서 2개의 중간 출력중 하나의 출력에만 입력이 출력되고 나머지 출력에는 0이 나오므로, 최종 출력 R은 2개의 중간 출력을 OR 조합하면 얻을 수 있고 이를 논리식으로 표현하면 다음과 같다.

$$R_1 = CP \quad (1)$$

$$R_0 = \overline{C} \overline{P} \quad (2)$$

$$R = R_1 + R_0 \quad (3)$$

따라서 고정 주파수의 C와 \overline{C} 의 합성만으로 결과적인 R이 얻어지며 R은 C의 반주기와 \overline{C} 의 반주기, C의 상승부분과 \overline{C} 의 하강부분이 합성된 삼각파 그리고 각각의 역상이 P의 랜덤 비트와 혼합하여 유사 랜덤 주파수를 갖는 캐리어 형태를 보이게 된다.

표 1 멀티플렉서의 진리표
Table 1 Truth Table of Multiplexer

input P	R1	R0	output R
0	0	\overline{C}	\overline{C}
1	C	0	C

그림 2는 그림 1로 나타낸 제안된 방법의 입출력 펄스를 구체적으로 나타낸 것이다. 랜덤 비트 발생기의 출력 펄스 P는 전통적인 랜덤 lead-lag PWM^[3]과 거의 유사하다. 랜덤 lead-lag PWM은 랜덤 PWM중에서 가장 초기 버전이며 고정 스위칭 주파수를 갖는 펄스들이 샘플링 주기의 전단과 후미부에 랜덤하게 위치하고 있다. 그림 2에서 P가 High인 기간동안은 C가 선택되고 Low인 펄스구간에는 \overline{C} 가 선택되어 유사 랜덤 주파수의 캐리어 R이 만들어진다. R은 고정 주파수의 삼각파 2개를 합성하여 랜덤과 유사한 효과를 내기 때문에 유사 랜덤 캐리어라 한다.

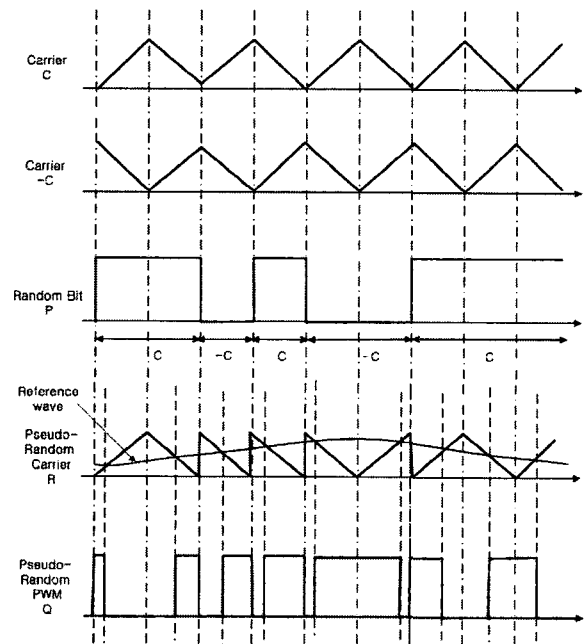
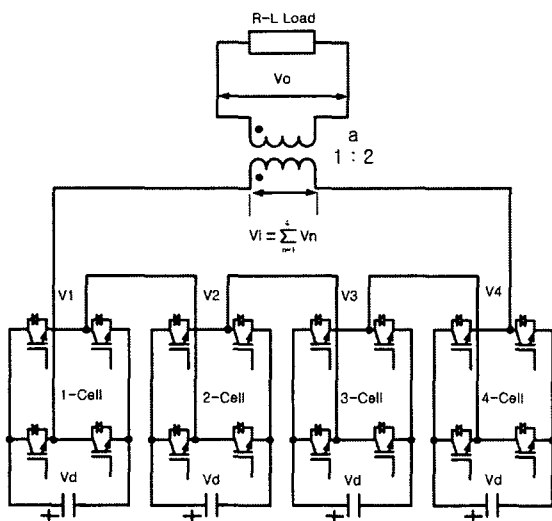


그림 2 제안된 기법의 입 출력 펄스
Fig. 2 Input and output pulses of the proposed method

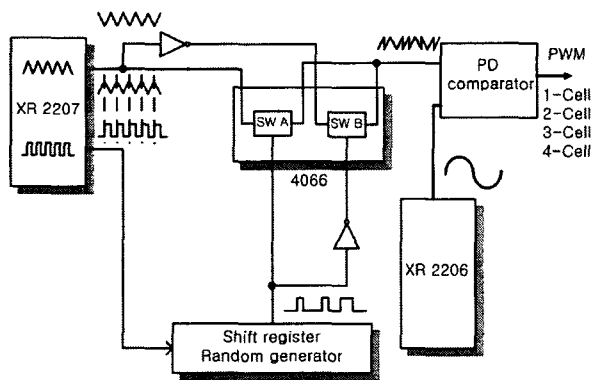
3. 하드웨어 구성

그림 3은 본 연구에서 제안된 PRC-PWM을 적용한 단상 5-레벨 캐스케이드 인버터를 나타내고 있다. 단상 캐스케이드 인버터는 H-브리지 4개가 직렬로 연결되어 있으며, 각각의 출력 V_1 - V_4 는 그림 3과 같이 변압기로 연결되어 있다. 변압기는 그림 3이 태양광 발전이

나 UPS와 같이 직류전원 V_d 가 일정한 경우, 권선비 a 를 조절하여 교류 출력 V_o 를 가변할 수 있으며, 또한 변압기 1차 측과 2차 측의 절연 효과도 얻을 수 있다. 본 연구에서는 각 H-브리지 cell 직류전압으로 24v의 SMPS를 사용하였다. 고정 주파수의 삼각파 캐리어 발생은 EXAR사의 XR2207을 그리고 기준 정현파는 XR2206을 사용하였다. 랜덤 비트 발생기로서의 PRBS는 시프트 레지스터 74164와 XOR게이트 4030에 의하여 구현하였다. MUX로는 양방향 스위치 4066을 사용하였으며, 이 MUX로 출력되는 유사랜덤 캐리어를 PD(Phase Disposition)로 배치한 후 정현파 기준치와 비교하면 본 연구에서 제시된 PRC-PWM펄스가 얻어지게 된다.



(a) Power circuit of 5-level cascaded inverter



(b) Proposed PRC-PWM generator

그림 3 제안된 시스템
Fig. 3 The proposed system

4. 실험 결과 및 고찰

그림 4는 고정 주파수 3kHz, 12비트 PRBS를 기반으로 제작한 PRC-PWM 발생기의 각 부분에서 측정된 파

형을 나타내고 있다. 그림 4의 top은 3kHz 고정 주파수의 삼각파 C , middle top은 3kHz 고정 주파수의 역상 삼각파 \overline{C} , middle은 PRBS의 출력 P 그리고 bottom은 이들의 조합에 의해 발생된 결과적인 랜덤 주파수 캐리어 R 의 출력이다. 그림 5는 그림 4와 그림 3(b)에서 나타난 PD비교기 출력 1-cell, 2-cell, 3-cell, 4-cell의 PWM 패턴을 보여주고 있다.

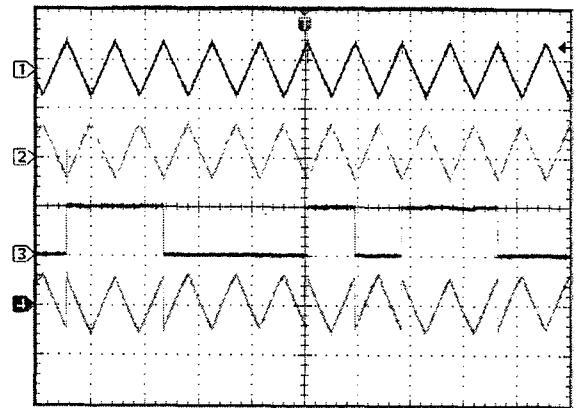


그림 4 측정된 캐리어의 파형(C=3kHz, P=12 bit)
Fig. 4 Measured carrier waveforms
(C=3kHz, P=12 bit)

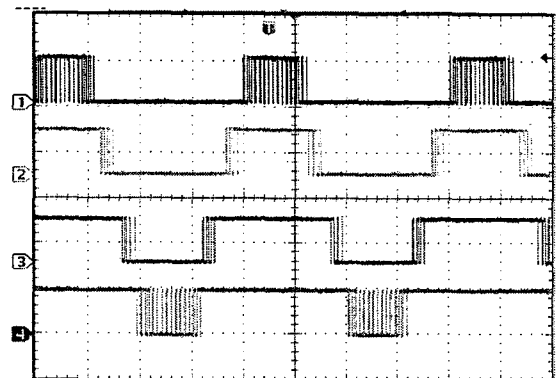


그림 5 측정된 1~4 cell의 PWM패턴
Fig. 5 Measured 1-4 cell PWM patterns

그림 6은 그림 4의 bottom에서 보여준 제안된 유사랜덤 주파수 캐리어 R 의 스펙트럼 결과이다. 3kHz를 중심으로 0과 6kHz사이를 고조파가 정규 분포를 하고 있다. 일반적으로 PRBS의 시프트 레지스터의 비트에 따른 PRC-PWM의 캐리어 R 의 스펙트럼은 8비트, 10비트, 12비트의 순서로 랜덤도가 양호하다. 본 연구에서는 12비트 시프트 레지스터와 XOR게이트를 PRBS로 채택하였다.

그림 7은 단상 5-레벨 캐스케이드 인버터의 출력 전압과 전류 파형을 측정된 것이다. 그림 7(a)는 3kHz 고정 주파수의 경우이며 그림 7(b)는 제안된 방법의 결과이다. 제안된 방법의 전류에는 RPWM을 적용하였음에

도 불구하고 일반적인 RPWM 적용 시 발생하는 전류의 맥동이 거의 없음을 알 수 있다. 이는 2개의 고정 주파수에 의하여 유사 랜덤 캐리어를 합성하였기 때문에 발생하는 현상이라 생각된다.

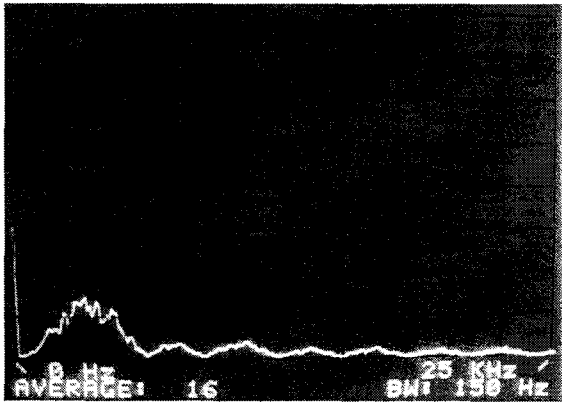
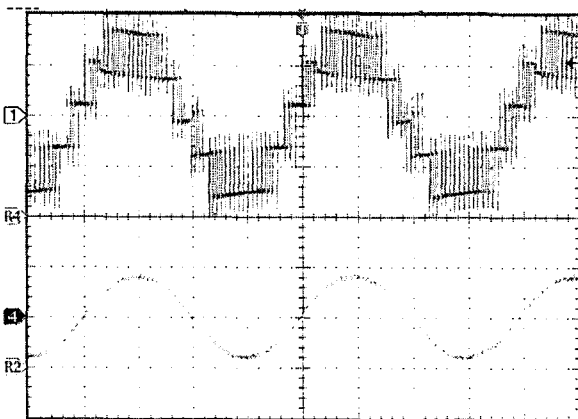
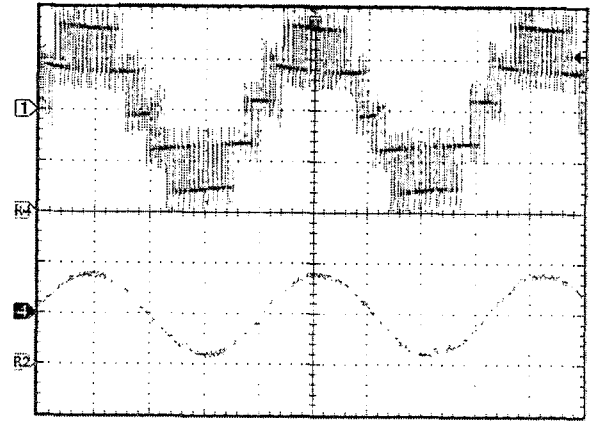


그림 6 유사 랜덤 주파수 캐리어의 스펙트럼
Fig. 6 Spectra of pseudo random frequency carrier
(x-axis:2.5kHz/div., C = 3kHz, p=12 bit)

그림 8과 그림 9에는 그림 7로 나타낸 5-레벨 출력 전압과 전류에 대한 스펙트럼을 각각 나타내고 있다. 그림 8(a)와 그림 9(a)에서 보는 바와 같이 3kHz 고정 주파수 기법은 3kHz의 정수배 측대 고조파가 강하게 나타나고 있다. 그러나 제안된 방법은 그림 8(b)와 그림 9(b)에서와 같이 3kHz 성분을 비롯한 정수배 고조파를 광대역으로 분산시키고 있음을 알 수 있다. 제안된 PRC-PWM 기법은 다른 RPWM 기법에 비하여 매우 단순한 구조로 되어져 있으며 고정 주파수의 캐리어로 랜덤한 주파수의 캐리어를 발생시킬 수 있는 장점이 있다. 제안된 기법이 에어컨, 청소기, 냉장고 등의 생활가전 모터 구동 시스템에 적용되는 경우, 스위칭 소음과 그에 따른 진동 등이 저감되리라 생각된다.

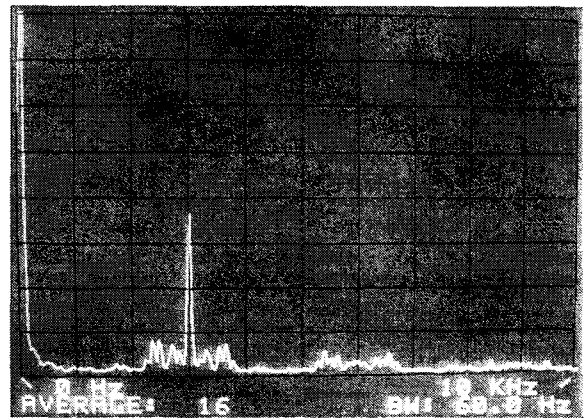


(a) Fixed frequency PWM (C = 3kHz)

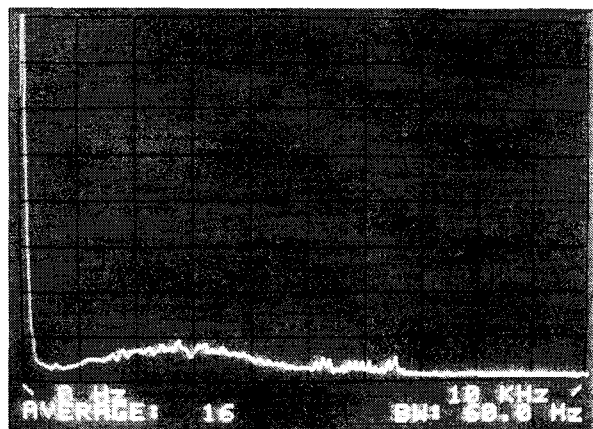


(b) proposed PRC-PWM (C = 3kHz)

그림 7 측정된 출력 전압과 전류 파형
(voltage : 50v/div., current=0.5A/div.)
Fig. 7 Measured output voltage and current
(voltage : 50v/div., current=0.5A/div.)



(a) Fixed frequency PWM (C = 3kHz)



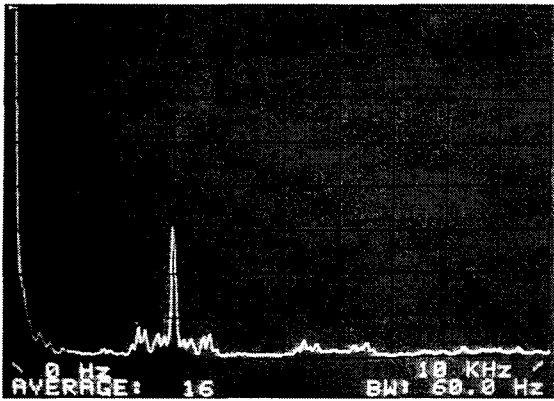
(b) Proposed PRC-PWM (C = 3kHz)

그림 8 측정된 출력 전압의 스펙트럼
(x-axis:800mv, y-axis:1kHz/div.)
Fig. 8 Measured output voltage spectra
(x-axis:800mv, y-axis:1kHz/div.)

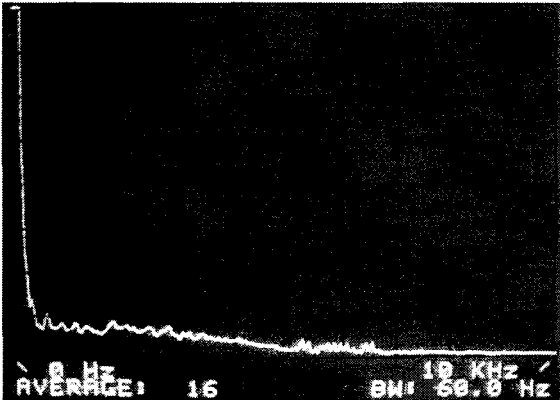
본 연구는 한국과학재단 지정 전남대 고품질전기 전자부품 및 시스템 연구센터 연구비 지원에 의하여 연구된 결과임.

참 고 문 헌

- [1] A.M. Trzynadlowski, K. Borisov, Y. Li, and L. Qin, "A novel random PWM technique with minimum computational overhead and constant sampling frequency for high volume, low cost applications", in Proc. IEEE APEC'04, 2004, pp.473-478.
- [2] 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 space vector PWM", IEE Proc. Electr. Power Appl., vol.149, no.3, May, pp.195-200, 2002.
- [3] 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.
- [4] F. Blaabjerg and J. K. Pedersen, "Digital implemented random modulation strategies for ac and switched reluctance drives", in Conf. Rec. of IEEE IECON'93, pp.676-682. 1993.
- [5] C.M. Liaw and Y.M. Lin, "Random slope PWM inverter using existing system background noise : analysis, design and implementaion", IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 147, no.1, pp.45-54, 2000.
- [6] K.K. Tse, H.S.H. Chung, S.Y. Hui and H.C. So, "Analysis and spectral characteristics of a spread spectrum technique for conducted EMI suppression," IEEE Trans. Power Electron., vol.15, no.2, pp.399-410, 2000.
- [7] B.R. Lin, "Implementation of non-deterministic pulse width modulation for inverter drives", IEEE Trans. aerospace and electronic system, vol.36, no.2, pp.482-490, 2000.
- [8] B.R. Lin and H.H. Lu, "Three-phase ac/dc/ac/converter with random pulse position PWM", in Conf. Rec. EPE'99, 1999, in CD ROM.



(a) Fixed frequency PWM (C = 3kHz)



(b) Proposed PRC-PWM (C = 3kHz)

그림 9 측정된 출력 전류의 스펙트럼
(x-axis: 8mv, y-axis: 1kHz/div.)
Fig. 9 Measured output current spectra
(x-axis: 8mv, y-axis: 1kHz/div.)

5. 결 론

본 연구에서는 랜덤 주파수 캐리어 발생기가 필요하지 않은 고정 주파수의 캐리어의 합성에 의한 유사 랜덤 주파수 캐리어 발생기법(PRC-PWM)을 제시하였다. 제안된 PRC-PWM을 기반으로 하여 실효치 110V 출력의 단상 5-레벨 캐스케이드 인버터 시스템을 제작하였다. 제안된 방법은 진정한 랜덤 캐리어가 아닌 유사 캐리어임에도 5-레벨 출력 전압 및 전류의 고조파 스펙트럼을 광대역으로 분산하는 성능이 탁월하였다. 또한 일반적으로 RPWM에서 발생하는 전류파형의 맥동이 거의 발생하지 않았다.

제안된 PRC-PWM은 단순한 구조로 되어져 있기 때문에 저가격의 RPWM을 구현할 수 있으며, 모터 구동 장치를 포함하는 생활 가전기기에 적용하는 경우, 스위칭 소음 및 진동 저감의 효과도 있다. 끝으로 제안된 방법은 3상 멀티레벨 인버터로 확장이 가능하며 대부분의 전력변환 시스템의 PWM발생기에 적용 가능하리라 생각된다.