

## 캐리어 주파수 변조에 의한 실시간 RPWM 구동장치

나석환\*, °최칭철\*, 양승화\*\*, 임영철\*, 김광현\*, 박종근\*  
 \* 전남대학교 전기공학과, \*\* 호남대학교 전기공학과

### Real Time RPWM Drive System by Carrier Frequency Modulation Technique

S.H. Na\*, C.R. Choi\*, S.H. Yang\*\*, K.H. Kim\*, Y.C. Lim\*, J.K. Park\*  
 \* Chonnam University, \*\* Honam University

#### ABSTRACTS

A main research topic in PWM inverter drive system is to reduce the generated acoustic noise. One method to reduce the acoustic noise is to cause the switching pattern to be random. This RPWM(Random Pulse Width Modulation) technique for voltage controlled inverters is a kind of good solutions for reduction of acoustic noise and suppression of vibration.

This paper describes a carrier frequency modulated real-time RPWM inverter. Changing the carrier frequency randomly, the power spectrum of the acoustic noise was spread over the wide-band area. And experimental results showed that emitted noise is much more comfortable and less annoying

#### 1. 서론

지금까지의 PWM에 관한 연구는 주로 전압 및 전류의 고조파 손실, 구동장치의 효율 등에 주안점을 두고 연구되어 왔으나, 최근 환경의식의 향상에 따라 전동기 구동시 발생하는 가청소음을 저감하기 위한 방법들이 다양하게 연구되고 있다. 유도전동기에서 발생하는 소음중에서도 인버터 스위칭에 의한 전자기적 소음은 협대역의 고주파수로 발생하여 통신장애 및 사람에게 불쾌감을 주게 된다.

일반적인 PWM 인버터의 On/Off 스위칭은 고정 캐리어 주파수로 동작되는데 현재 주로 사용되고 있는 전력용 반도체 스위칭소자인 SCR, GTO, BJT, IGBT 등의 스위칭 주파수는 가청주파수 영역에 있기 때문에 주변에 있는 사람이 느낄 수 있는 정도이며, 특히 전동기가 대용량화됨에 따라 전동기에 흐르는 전류는 커지게 되어 전자기적 소음도 더욱 크게 된다. 이러한 전자기적 가청소음과 관련된 연구들 중에서 히스테리시스 전류제어기에 의한 스위칭 패턴은 전류 지령값과 실제 전류 순시값의 비교에 의해 결정되기 때문에 과도상태에서의 스위칭 주파수는 일정하지 않으며, 이는 파워 스펙트럼의 분산을 의미하며 전자기적 가청소음을 저감시키는 효과는 있으나, 정상상태에서의 스위칭 패턴은 주기적인 것이 되어 부하조건에 영향을 받는 소음을 유발한다. 고조파 제거형(Harmonic Elimination) PWM에 의한 방법은 특정 주파수의 음조(tone)를 제어하기 위한 스위칭 펄스의 On/Off 각을 ROM

에 저장하여 운전 중에 참조한다. 그러나 원하는 파형을 만들기 위한 데이터의 저장용량이 커야 하며 정상상태에서만 소음저감의 효과가 나타나, 잦은 과도상태를 수반하는 전류제어형 구동장치에는 적합하지 않다.

본 연구에서는 삼각파 캐리어 주파수 변조방식의 RPWM 기법을 이용하여 유도전동기의 전자기적 가청소음 저감을 위한 인버터 구동장치를 구현하였다. 실험 측정된 소음의 파워 스펙트럼으로부터 전동기 소음원에 대하여 고찰하였으며, 고정주파수 PWM 방식과 RPWM 방식에 의한 소음의 파워 스펙트럼 비교분석, 그리고 삼각파 캐리어 주파수 변화폭에 따른 소음의 저감효과를 고찰하였다.

#### 2. 스위칭에 의한 고조파 신호의 세기

스위칭 주파수가 일정한 PWM 시스템에서 k차 고조파에 의한 신호의 세기  $P_k$  는 n 번째 스위칭 구간에서 On 되는 시점  $\theta_n$  및 기본파 1주기당 스위칭 횟수 N에 대해 다음과 같은 관계가 있다.

$$P_k \propto \left| E \left[ \sum_{n=0}^N \bar{a}_n \frac{\sin(\pi \frac{k}{N} \bar{a}_n)}{\pi \frac{k}{N} \bar{a}_n} e^{-jkn/Nn} e^{-j\theta_n/N} \right] \right|^2 \quad (1)$$

이것은 스위칭 주파수의 정수배에 해당하는 주파수대에서 파워 스펙트럼의 세기가 강하게 나타나며, 파워 스펙트럼의 피크를 잇는 포락선은 정현파 형태가 됨을 의미한다.  $\theta_n$ 이 랜덤변수라면 식(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_k \propto \left| \sum_{n=0}^N \bar{a}_n \frac{\sin(\pi \frac{k}{N} \bar{a}_n)}{\pi \frac{k}{N} \bar{a}_n} e^{-jkn/Nn} \cos\left[\pi \frac{k}{N}(1 - \bar{a}_n)\right] \right|^2 \quad (2)$$

식(2)는 급수의 각 항들이 우현 함수 형태로 감소하며, k가 증가함에 따라 파워 스펙트럼의 세기가 감소함을 의미한다. 또한 N이 랜덤변수라면 식(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_k \propto \left| \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \bar{a}_n \frac{\sin(\pi \frac{k}{N} \bar{a}_n)}{\pi \frac{k}{N} \bar{a}_n} e^{-j\theta_n \frac{k}{N}} \right|^2 \quad (3)$$

식(3)에서  $N_k$ 가 증가함에 따라 파워 스펙트럼은 높

은 주파수 영역으로 이동하게 된다. 만일  $N$ 이 랜덤하게 변화하면  $k$ 차 고조파의 세기는 연속적인 스펙트럼의 형태로 분산되어 나타난다. 이상에서 인버터 스위칭 On/Off 각 또는 기본파 1주기당 스위칭 횟수를 제어함에 따라 전자기적 소음의 파워스펙트럼의 분포를 제어하여 사람이 느끼기에 편하도록 할 수 있다.

### 3. 캐리어 주파수 변조에 의한 실시간 RPWM

고정주파수의 삼각파 캐리어를 이용한 일반적인 PWM 방식의 경우와 변조함수에 의해 변조된 경우를 각각 그림1, 2에 나타내었다.

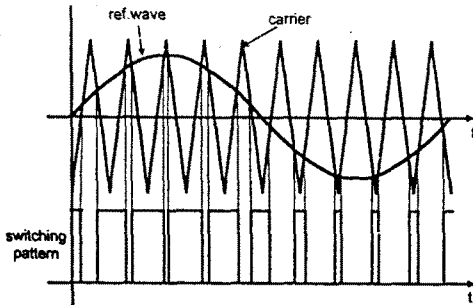


그림1. 고정주파수 삼각파 캐리어 신호와 전압 지령치에 의한 스위칭 패턴

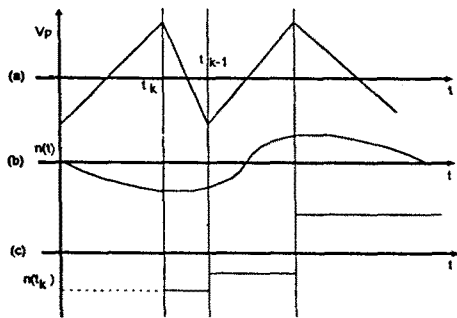


그림2. RPWM의 신호 파형  
(a)캐리어, (b)변조함수, (c)샘플링 후의 변조함수

랜덤함수를 사용하여 RPWM을 수행할 경우에서 생성되는 스위칭 주파수는 현재 산업용 전력변환기에 이용되는 전력용 반도체 스위칭 소자의 스위칭 주파수 한계를 고려하여 캐리어 랜덤주파수의 최대값과 최소값을 설정하여야 한다. 본 연구에서는 스위칭 소자로 사용한 IGBT의 최대 권장 스위칭주파수인 15kHz를 랜덤주파수의 최대값으로 설정하고 토크맥동을 감안하여 최소 스위칭 주파수를 1kHz로 하였다. 중심 스위칭 주파수로 8kHz를 선택하여 RPWM에 의한 소음저감 효과를 고찰하였다. 이러한 랜덤 주파수의 변조는 DSP TMS320C31을 이용하여 VVVF제어에 의한 속도제어와 동시에 실시간적으로 수행될 수 있도록 하였으며, 넓은 운전범위(10~90Hz)에서 RPWM이 가능하도록 하였다.

### 4. 실험장치 구성

그림3은 본 연구에서 실험된 캐리어주파수 변조에 의한 실시간 RPWM 구동장치의 구성도이다. 실험장치는 크게 '속도제어 지령치 및 변조함수 발생부', '캐리어 주파수 변조부', 'PWM 발생부', '인버터부 및 유도전동기'로 구성되어 있다.

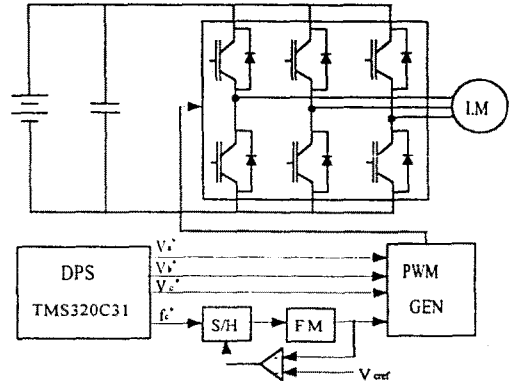


그림3. 캐리어 주파수 변조방식의 RPWM 인버터 구성

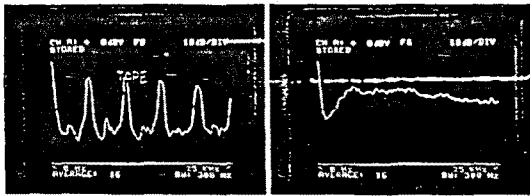
DSP TMS320C31을 이용하여 실시간적으로 삼각파 캐리어 주파수가 랜덤하게 변조되도록 하였고, 연속적이고 빠른 응답성을 유지하기 위해 주파수 변조기 MAX038를 사용하였다. PWM 발생부에서는 전압 지령치와 삼각파 캐리어를 비교하는 전압 비교기, 인버터 단락방지를 위한 데드타임 삽입/조정 회로, 인버터의 게이트 차단회로, 삼각파 발생기, 삼각파 캐리어 신호의 이득 조정회로와 삼각파 동기화 회로 등이 내장되어 있는 PWM 발생기 MWPWM-TV를 사용하였다. 인버터부에는 고속 스위칭에도 신뢰성과 안정성 있게 동작되며 내장된 보호회로에 의해 사용자의 부주의로 인한 파파 가능성이 적고 주변회로 구성이 간단하여 최근 많이 사용되는 IPM(Intelligent Power Module)을 사용하였다. 스위칭 신호를 발생시키는 PWM 발생부와 전력회로의 전기적 절연을 위해 최대 스위칭 주파수가 1MHz 정도인 Photo Coupler TLP559를 사용하였다.

### 5. 실험결과

정격 주파수 60Hz, 무부하 상태에서 1.5kW 산업용 유도전동기를 RPWM 인버터에 의해 구동할 때와 고정주파수 PWM에 의해 구동할 때의 전동기 입력전압 및 전류의 파워 스펙트럼, 그리고 無響室에서 측정된 소음의 파워 스펙트럼을 비교 분석하였다.

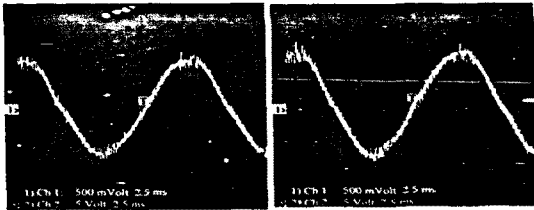
그림4는 전동기 입력전압에 대한 파워스펙트럼이다. 그림4(a)는 5kHz 고정 주파수 PWM에 의한 것으로 전압의 파워 스펙트럼이 특정주파수에 집중된 형태이다. 그러나 캐리어 주파수가 1~9kHz로 변화하고 있는 RPWM에 의한 그림4(b)에서는 전압의

파워 스펙트럼이 넓은 주파수 영역에 걸쳐 분산된 형태임을 알 수 있다.



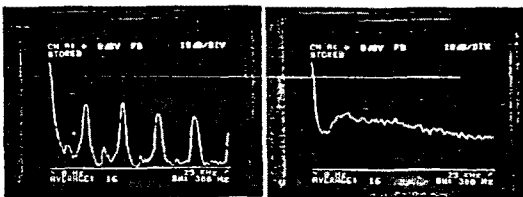
(a) (b)  
그림4. 전동기 입력전압의 파워 스펙트럼  
(a) 5kHz 고정주파수 PWM, (b) 1~9kHz RPWM

그림5는 전동기에 흐르는 전류파형을 측정하여 고정 주파수 PWM에 의한 전류와 RPWM에 의한 것과는 외견상 큰 차이가 없으며, 모두 정현파 모양을 갖고 있다.



(a) (b)  
그림5. 전동기 입력전류의 파형  
(a) 5kHz 고정주파수 PWM, (b) 1~9kHz RPWM

그림6은 전동기 입력전류에 대한 파워 스펙트럼이다. 속도제어 알고리즘으로부터 출력되는 전압 지령치 신호가 정현파이므로 전류에 대한 파워 스펙트럼도 전압의 파워 스펙트럼과 비슷한 모양이 된다. 전류의 고조파는 전자기적 소음에 밀접한 영향을 미치므로 RPWM을 수행할 경우 소음에 대한 스펙트럼도 전류의 파워 스펙트럼과 비슷하게 넓은 주파수 영역으로 분산된 형태일 경우로 예측된다.



(a) (b)  
그림6. 전동기 입력전류의 파워 스펙트럼  
(a) 5kHz 고정주파수 PWM, (b) 1~9kHz RPWM

그림7, 8은 전동기로부터 발생하는 소음만을 측정하기 위해서 무향실에서 소음 및 진동신호 전용 측정기인 「RION SA-74」를 사용하여 얻어진 결과이다. 그림7은 각각 5, 8, 10kHz의 고정 주파수

삼각과 캐리어 신호에 의한 스위칭 패턴으로 전동기를 구동하였을 때의 소음에 대한 파워 스펙트럼이다. 각각의 인버터 스위칭 주파수의 정수배에 해당하는 협대역의 주파수 영역에서 소음의 파워 스펙트럼의 세기가 강함을 알 수 있다. 그리고 그림6(a)의 전류에 대한 파워 스펙트럼과 비교하여 보았을 때, 약 2kHz 이하의 소음에 대한 파워 스펙트럼은 스위칭 주파수와는 거의 관계없는 기계적인 소음에 의한 것임을 알 수 있다. 그림7의 실험은 무부하로 운전한 경우 이므로 전기적인 소음보다 기계적인 소음이 더 크게 나타나고 있으나, 전동기의 부하가 증가하게 되면 전동기에 흐르는 전류가 증가하고 이에 따른 전자기적 소음도 증가할 것으로 예측된다.

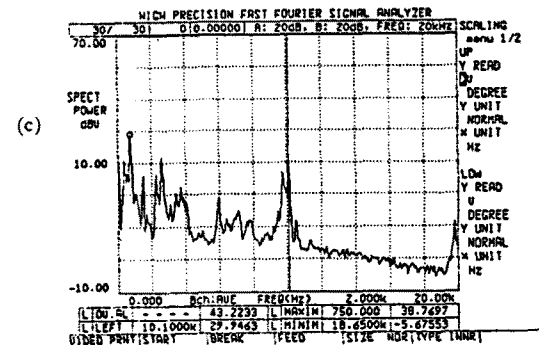
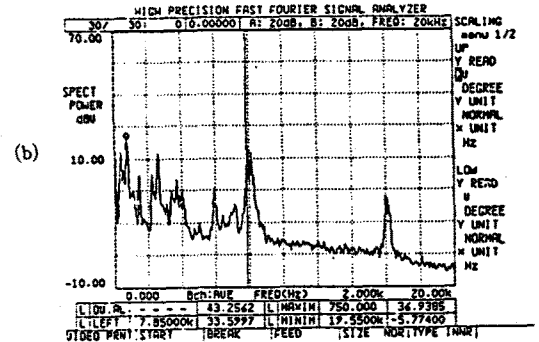
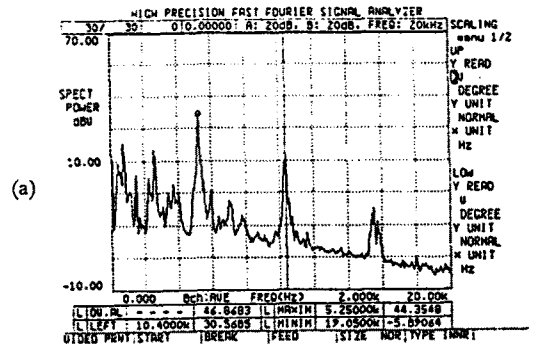


그림7. 고정 주파수 PWM에서 스위칭 주파수 fs에 따른 소음의 파워 스펙트럼  
(a) fs=5kHz, (b) fs=8kHz, (c) fs=10kHz

그림8은 중심 스위칭 주파수를 약 8kHz로 하고 캐리어 랜덤주파수의 변화폭이 2, 4, 8, 12kHz인 경우 각각의 소음에 대한 파워 스펙트럼이다. 그림7과 비교하여 볼 때 RPWM에 의해서 전체적인 소음의 양은 거의 같은 수준으로 나타나지만 협대역 소음이 광대역 주파수의 소음으로 변화하여 불쾌감을 주게되는 소음은 감소함을 알 수 있다. 또한 캐리어 랜덤 주파수 변화폭이 커짐에 따라 특정 주파수에 집중된 것처럼 나타났던 소음의 파워 스펙트럼의 세기가 점차로 감소하고, 넓은 주파수 영역으로 소음의 파워 스펙트럼이 분산되어 감을 알 수 있다.

### 6. 결론

삼각파 캐리어 주파수 변조에 의한 실시간 RPWM 인버터 장치를 구성하였다. 속도제어와 랜덤 주파수 변조의 실시간 제어를 위해 DSP TMS320C31을 사용하였다. 무향실에서 실험한 결과, 전동기 성능에는 거의 영향을 주지 않으면서 전동기에서 발생하는 전자기적 가청소음은 고정 주파수 PWM 방식보다 RPWM 방식에 의한 파워 스펙트럼이 광대역 주파수 영역으로 고른 분포를 보이고, 사람에게 주는 불쾌감을 훨씬 줄일 수 있었다. 캐리어 주파수 변조 RPWM의 스위칭 주파수 변화폭이 커짐에 따라 특정 주파수에 집중된 소음의 파워 스펙트럼의 세기가 넓은 주파수 영역으로 분산되는 것을 알 수 있었는데, 따라서 RPWM 스위칭 주파수의 최소값은 전동기의 토크 맥동을 고려하여 설정할 필요가 있고 최대값은 반도체 스위칭 소자의 한계를 고려하여 설정하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 파워 스펙트럼 분석결과, 저주파대 영역의 소음원은 주로 기계적인 소음이며, 그 이상의 주파수대 영역의 주된 소음원은 PWM 인버터의 스위칭 동작에 기인한 소음임을 확인하였다.

본 연구에서는 전동기의 속도와 부하가 변화하는 과도상태에서의 실험 결과는 제시하지 않았으나, 실시간제어를 위해 DSP를 사용하였으므로 과도상태에서도 캐리어 주파수 변조에 대한 적응성과 안정성이 그대로 유지되어 앞에서 설명한 소음저감에 효과가 있을 것으로 사료된다.

### 참고문헌

- [1] D.M.Brod, D.W.Novotny, "Current control of VSI-PWM inverters", IEEE Trans.IA, vol.21, no.4, pp769-775, 1984
- [2] A.M.Trzynadlowski, Sheng, J.S.Legowski, "Random pulse width modulation of delta inverter for automotive applications", IEEE IA, pp826-833, 1991.
- [3] A.M.Trzynadlowski, Sheng J.S.Legowski, R.L. Kirlin, "Random pulse width modulation technique for voltage controlled power inverters", IEEE IA, Conf.Rec, pp863, 1987.

- [4] T.G.Habetler, D.M.Divan, "Acoustic noise reduction in sinusoidal PWM drive using a randomly modulated carrier", IEEE PESC, pp665-671, 1989.
- [5] A.M.Trzynadlowski, "Random pulse width modulation Techniques for converter-fed drive systems- A Review", IEEE Trans.IA, vol.30, no.5, pp1166-1174, 1994

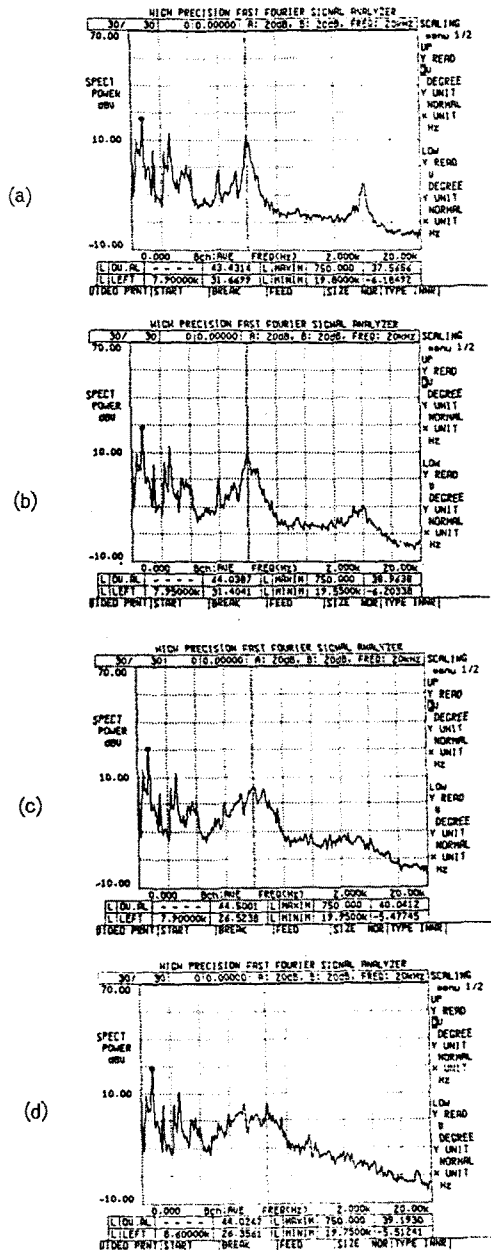


그림 8. RPWM 캐리어 주파수의 변화폭  $f_{BW}$  에 따른 소음의 파워 스펙트럼  
(a)  $f_{BW} = 2\text{kHz}$ , (b)  $f_{BW} = 4\text{kHz}$ , (c)  $f_{BW} = 8\text{kHz}$ , (d)  $f_{BW} = 12\text{kHz}$