

유도전동기의 스위칭 주파수대 소음 저감을 위한 실시간 RPWM 인버터

(A Real-Time RPWM Inverter for Reduction
of Switching Frequency Band Noise in the Induction Motor)

나석환* · 최창률** · 양승학*** · 김광현**** · 임영철***** · 박종건*****

(Seok-Hwan Na · Chang-Ryool Choi · Seung-Hak Yang · Kwang-Heon Kim ·
Young-Cheol Lim · Jong-Kun Park)

요 약

RPWM(Random Pulse Width Modulation)은 인버터의 스위칭 주파수를 랜덤(random)하게 변화시킴으로써 고조파 및 소음의 파워 스펙트럼을 광대역에 분산시켜 사람이 불쾌하게 느낄 수 있는 전자기적 가청 소음을 줄이기 위한 PWM 기법으로써 근래에 매우 각광받고 있다. 본 연구에서는 삼각파(반송파, carrier wave)의 주파수를 랜덤하게 변화시키는 방식의 RPWM에 의한 인버터 유도전동기 구동 장치를 구성하였다. 무항실에서 실험 측정된 소음의 파워 스펙트럼으로부터, 소음원에 대한 분석과 삼각파 주파수 변화 폭에 따른 스위칭 주파수대 소음의 저감 효과를 분석하였다. 고속의 DSP TMS320C31을 사용하여 속도 제어와 더불어 RPWM이 실시간적으로 가능하도록 하여, 부하 조건이 다양하게 변화하는 구동 장치에서도 삼각파 주파수의 중심 주파수 및 대역폭을 자유롭게 변화시킴으로써 효과적으로 스위칭 주파수대 가청 소음을 저감하였다.

Abstract

RPWM(Random Pulse Width Modulation) techniques have been attracting an interest as an excellent reduction method of acoustic noise on the inverter drive system. Using randomly changed switching frequency of the inverter, the power spectrum of the electromagnetic acoustic noise can be spread out into the wide-band area. The wide-band noise is much more comfortable and less annoying than the narrow-band one.

*정회원 : 전남대학원 전기공학과 박사과정

**정회원 : 전남대 대학원 전기공학과 석사과정

***정회원 : 호남대 전기·전자 공학부 조교수

접수일자 : 1997. 4. 18

****정회원 : 전남대 공대 전기공학과 조교수

*****정회원 : 전남대 공대 전기공학과 교수

*****정회원 : 전남대 공대 전기공학과 교수

This paper describes an implementation of the triangular carrier frequency modulated RPWM inverter drive system. The power spectrum of the noise emitted from the induction motor was measured in the anechoic chamber. The analysis of the sources for the acoustic noise and the effects of the noise reduction are confirmed by the measured spectra of the noise. Real-time RPWM along with the speed control was achieved by high speed DSP(Digital Signal Processor) TMS320C31. By changing the center frequency and the bandwidth of the carrier, this real-time RPWM scheme can be used as an efficient switching frequency band acoustic noise reduction method for the inverter drive system with variant load conditions.

1. 서 론

유도전동기의 인버터 구동 장치에서 PWM(Pulse Width Modulation) 기법은 구동 성능에 영향을 미치는 중요한 요소 중의 하나이다. 지금까지 보고되고 있는 PWM 기법에 관한 연구는 주로 전압 및 전류의 고조파 손실, 구동 장치의 효율 등에 주안점을 두고 연구되어 왔다[1]. 최근 전자파와 소음 저감 등의 환경 개선에 대한 관심이 고조됨에 따라 전동기 구동시 발생하는 가청 소음을 저감시키기 위해 전동기 설계, 구동 장치의 스위칭 구조와 방법의 개선 및 유지보수 방법 등 다양한 측면에서 여러 연구가 시도되고 있다. 유도전동기 구동시 발생하는 소음은 크게 전동기의 방열팬에 의한 소음, 가동부 베어링 등의 기계적인 마찰에 의한 소음 및 인버터 스위칭에 의한 전자기적 소음 등으로 나눌 수 있다[2]. 기계적 소음은 주로 방열팬의 회전수 또는 전동기의 회전수에 관계한 비교적 광대역의 저주파수로 발생하지만, 인버터 스위칭에 의한 전자기적 소음은 협대역의 고주파수로 발생하여 통신장애 및 사람에게 고통을 유발한다.

일반적인 PWM 인버터의 온/오프 스위칭은 고정 스위칭 주파수로 동작되며, 스위칭 주파수가 클수록 이에 비례하여 전류의 고조파 성분의 차수는 고차로 옮겨가고 크기는 적어져 정현파 전류에 가깝게 할 수 있다. 현재 주로 사용되고 있는 전력용 반도체 스위칭 소자의 스위칭 주파수의 최대 한계와 스위칭 손실에 의한 발열 때문에 SCR, GTO 등은 1~2 [kHz] 정도, BJT는 4[kHz] 정도, IGBT는 10~20 [kHz] 정도의 주파수로 동작시키는 것이 일반적이다. 이런 스위칭 주파수에 의한 전자기적 소음은 2

[Hz]~20[kHz]의 가청 주파수 영역에 있기 때문에 산업용 전동기의 경우에도 주변에 있는 사람이 느낄 수 있는 정도이며, 특히 전동기가 대용량화됨에 따라 전동기에 흐르는 전류는 커지게 되어 전자기적 소음도 더욱 크게 된다.

또한, 고정 스위칭 주파수 PWM으로 구동되는 전동기 전류는 이 스위칭 주파수에 관계한 협대역의 고조파가 존재한다. 심리학적 연구 결과에 의하면 광대역 소음보다는 협대역 소음이 사람에게 훨씬 고통을 주는 것으로 알려져 있다[3]. 이러한 가청소음 저감에 관한 연구로는, 인버터 스위칭이 전동기 부하 조건에 따라 불규칙적으로 변동하는 히스테리시스 전류제어기의 고유 특성에 의한 저감 효과, 운전 조건에 따라 전류 고조파를 최소로 하는 스위칭 온/오프 각을 ROM에 저장해 두고 이것에 의해 스위칭이 제어되는 고조파 제거형 PWM 방식을 사용하는 법[4] 등이 보고되었다. 또한 PWM의 스위칭 주파수를 특정하게 고정시키지 않고 넓은 주파수 영역에서 스위칭이 이루어지도록 하여 소음의 파워 스펙트럼을 넓은 주파수 영역으로 고루 분산시켜 사람에게 고통을 주는 가청 소음을 저감시키고자 하는 RPWM에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. RPWM 기법은 랜덤 함수에 의해 인버터의 매 스위칭 순간마다 다른 스위칭 주파수로 온 또는 오프 되도록 하여 전자기적 소음의 파워 스펙트럼이 광대역으로 분산되는 효과를 갖는 PWM 방식이다.

RPWM 기법은 삼각파 주파수를 랜덤하게 변조하는 방법, 속도 지령치 전압 공간벡터가 인가되는 스위칭 구간의 시간을 랜덤하게 제어하는 방법, 매 스위칭 구간의 시간은 일정하지만 펄스의 위치를 랜덤하게 변경시키는 방법 등 여러 가지가 있다.

본 연구에서는 삼각파 주파수 변조 방식의 RPWM 기법을 이용하여 유도전동기의 전자기적 가청 소음 저감을 위한 인버터 구동 장치를 구현하였다. 삼각파 주파수 변조에 의한 RPWM은 공간벡터에 의한 RPWM에 비해 한 스위칭 구간에 대한 듀티비 설정을 위한 계산 과정이 필요 없기 때문에 스위칭 패턴을 매우 간단하게 얻을 수 있다는 장점이 있다.

2. 협대역 가청소음 저감 방법과 Random Modulation 기법

1) 기존의 전자기적 가청소음 저감 방법의 검토
스위칭 주파수가 일정 또는 가변 되는 PWM 시스템에서 k 차 고조파에 의한 신호의 세기 P_k 는 n 번째 스위칭 구간에서 온(on)되는 시점 θ_n 및 기본과 1 주기의 스위칭 횟수 N 에 대해 다음과 같은 관계가 있다[8].

$$P_k \propto \left| E \left\{ \sum_{n=1}^N \frac{\sin(\pi \frac{k}{N} \bar{a}_n)}{\pi \frac{k}{N} \bar{a}_n} e^{-jnk/Nn} e^{-j2\pi k/N\theta_n} \right\} \right|^2 \quad (1)$$

여기서, $E\{\cdot\}$ 는 통계적 기대치를 의미하며, \bar{a}_n 은 n 번째 스위칭 구간의 듀티비를 나타낸다.

식(1)은 정현파 함수의 합으로 PWM 삼각파 주파수가 일정하다면 $\sum_{n=1}^N \sin(\pi \frac{k}{N} \bar{a}_n) = 0$ 이 되므로 통계

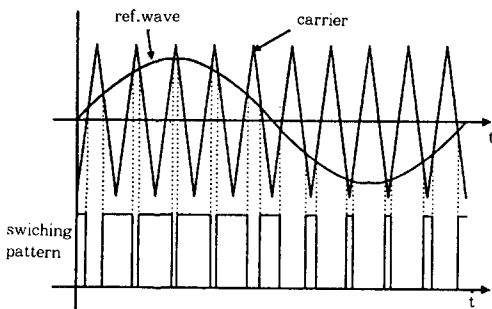


그림 1. 고정 주파수 삼각파 캐리어 신호와 전압 지령치에 의한 스위칭 패턴

Fig. 1. Fixed frequency triangular carrier signal, reference wave and resulting switching pattern

적 기대치($E\{\cdot\}$)도 0이 된다. 또한 이것은 스위칭 주파수의 정수배에 해당하는 주파수대에서 펄스 모양처럼 파워 스펙트럼의 세기가 강하게 나타나며, 파워 스펙트럼의 피크를 잇는 포락선은 정현파 형태가 됨을 의미한다. 고정 주파수의 삼각파를 이용한 일반적인 PWM 방식인 경우의 삼각파, 전압 지령치, 그리고 PWM 스위칭 패턴을 그림 1에 나타낸다. 스위칭 패턴은 전압 비교기에 의해 전압 지령치와 삼각파를 비교하여 결정된다.

θ_n 이 이 랜덤변수라면, 식(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

식(2)는 급수의 각 항들이 여현 함수 형태로 감소하며, k 가 증가함에 따라 파워 스펙트럼의 세기가 감소함을 의미한다.

또한, N 이 랜덤변수라면 식(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_k \propto \left| \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \sum_{n=1}^N \bar{a}_n \frac{\sin(\pi \frac{k}{N_i} \bar{a}_n)}{\pi \frac{k}{N_i} \bar{a}_n} e^{-j2\pi \frac{k}{N_i} n} \right|^2 \quad (3)$$

식(3)에서 K 는 발생할 수 있는 랜덤수의 가짓수를 나타내며, 일정하지 않은 스위칭 횟수 N_i 가 증가함에 따라 파워 스펙트럼은 높은 주파수 영역으로 이동하게 된다. 만일 N 이 랜덤하게 변화하면 k 차 고조파의 세기는 연속적인 스펙트럼의 형태로 분산되어 나타난다. 이상에서 인버터 스위칭 온/오프 각 또는 기본과 1주기 내의 스위칭 횟수를 제어함에 따라 전자기적 소음의 파워 스펙트럼의 분포를 제어하여 사람이 느끼기에 편하도록 할 수가 있다.

고조파 제거형 PWM에 의한 소음 저감 방법은 특정 주파수의 음조를 제어하기 위한 스위칭 펄스의 온/오프 각을 ROM에 저장하여 운전 중에 참조한다[4]. 그러나 이 방법은 원하는 파형을 만들기 위한 데이터의 저장 용량이 커야 하며 정상상태에서만 소음 저감의 효과가 나타나, 잦은 과도상태를 수반하

는 전류 제어형 구동 장치에는 적합하지 않다.

스위칭이 랜덤하게 이루어지도록 하여 소음의 파워 스펙트럼을 분산시키는 RPWM 방식 중에는 양자화기(quantizer)와 고정 주파수 삼각파 신호를 조합하여 랜덤한 스위칭 패턴을 생성한 방법이 있다 [5]. 이는 스위칭 시각이 이산화되어 고정 주파수 PWM 방식과 똑같은 성능을 갖기 위해서는 높은 주파수의 스위칭이 필요하다는 단점이 있다. 또 다른 연구로는 어느 시간 구간에서 전압 지령치를 결정한 후, 이 특정 구간을 더 작은 여러 개의 구간으로 나누어 매 작은 구간마다 균일한 분포를 갖는 랜덤 스위칭 함수를 생성하고, 이것을 전압 지령치와 비교하여 온/오프 스위칭을 결정하는 방법이 있다[6]. 한 지령치 구간에 대하여 매 스위칭을 위한 작은 구간이 충분히 많게 된다면 스위칭 함수의 평균치는 전압 지령치에 근사하게 되어, 출력 전압의 파워 스펙트럼을 거의 연속적인 형태로 유지할 수 있다. 그러나, 이 방법에서 만족할 만한 성능을 얻기 위해서는 높은 주파수의 스위칭이 필요하다. 예를 들어, 기본파 주파수가 60[Hz]인 출력 전압을 얻기 위해서는 스위칭 주파수가 거의 320[kHz] 정도가 된다고 분석된 바 있다. 또 다른 연구로써 삼각파 주파수 변조에 의한 방법도 시도되었다[7]. 이 연구에서는 삼각파 캐리어의 랜덤 주파수를 생성하기 위해서 랜덤 데이터를 미리 ROM에 저장한 후, 실행 중에 룩업 테이블로써 참조하도록 구성하였다. 따라서, 피크 검출기, 카운터, ROM, A/D변환기, 삼각파 발생 회로 등 여러 가지 하드웨어 장치가 요구될 뿐만 아니라 부하 조건의 변화에 속응성과 정확성을 가지고 대응할 수 있는 실시간 RPWM이라고 말하기 어렵다. 또한, ROM에 저장된 데이터의 한계 때문에 출력 전압의 기본파 주파수가 17[Hz]인 경우 중심 스위칭 주파수를 1[kHz]로 실험하여 그 결과를 분석함으로써, 삼각파의 랜덤 주파수 변화의 폭에 대한 고찰이 부족하였다.

2) 가청소음 저감을 위한 실시간 RPWM

본 연구에서는 삼각파 주파수 변조에 의한 RPWM을 속도 제어와 더불어 효율적으로 수행할

수 있고, 부하 조건의 변화에 능동적으로 대처하기 위하여 변조 함수가 실시간적으로 변화할 수 있도록 하였다. 변조 함수는 파워 스펙트럼의 고른 분산을 위해 정현 함수를 고려해 볼 수도 있지만, 연구 보고에 의하면 랜덤 함수가 가장 적합한 것으로 나타났다[7]. 주의 깊게 랜덤 함수를 선택하여 RPWM이 수행된다면 전압, 전류 및 소음의 전체적인 파워 스펙트럼의 세기에는 별 영향을 미치지 않으면서 스위칭 주파수만을 넓은 광범위하게 변화시킬 수 있음은 식(2)와 식(3)에서 알 수 있었다. 변조 함수에 의해 변조되었을 때 삼각파의 파형, 변조 함수의 파형 및 샘플링 후의 변조 함수의 파형을 그림 2에 나타낸다.

랜덤 함수를 사용하여 RPWM을 수행할 경우에 생성되는 스위칭 주파수는 이상적으로 수[MHz]정도까지 되어 모든 주파수 영역의 스펙트럼이 고루 나타날 수 있지만, 현재 산업용 전력변환기에 이용되는 전력용 반도체 스위칭 소자의 스위칭 주파수에는 한계가 있다. 따라서 랜덤 함수의 출력은 스위칭 소자의 주파수 한계를 감안하여 삼각파 랜덤 주파수의 최대값과 최소값을 설정하여야 한다. 본 연구에서는 스위칭 소자로 사용한 IPM(Intelligent Power Module)의 권장 최대 스위칭 주파수인 15[kHz]를

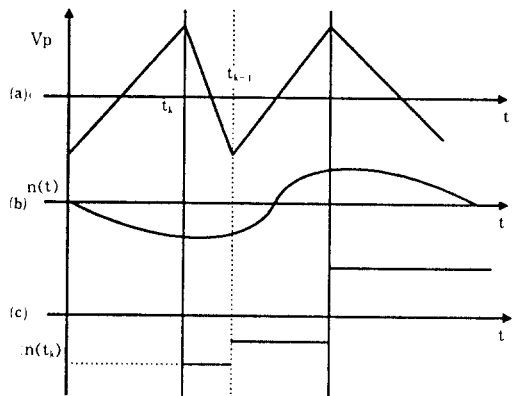


그림 2. RPWM의 신호 파형:(a)캐리어, (b)변조 함수, (c)샘플링 후의 변조 함수
Fig. 2. Waveforms with RPWM:(a)carrier signal, (b)modulation signal, (c)modulation signal after sample and hold

스위칭 랜덤 주파수의 최대값으로 하였으며, 8 [kHz]를 중심 스위칭 주파수로 하였다. 그리고 토크 맥동을 고려하여 최소 스위칭 주파수를 1[kHz]로 하였다. 이러한 랜덤 주파수 변조는 TMS320C31을 이용하여 VVVF에 의한 속도 제어와 동시에 실시간 적으로 수행하여 넓은 운전 범위(10~90[Hz])에서 RPWM이 가능하도록 하였다.

본 연구의 실험 및 소음 측정은 전동기로부터 발생하는 소음만을 측정하기 위해서 6면이 모두 흡음재로 밀폐되어 있는 무향실에서 행해졌다. 소음 측정의 방법 및 조건에 대한 규격은 여러 가지가 있다. 그러나 보편화된 규격에서는 소음원 즉, 전동기의 축 방향과 상측 반지름방향 등 두 지점에 마이크를 설치하여 평균하는 방식을 허용하고 있으므로 본 연구에서는 편의상 보편화된 규격으로 측정하였다.

3. 실험 장치의 구성

그림 3은 본 연구의 실험을 위한 속도 제어와 실시간 삼각파 주파수 변조가 가능한 RPWM 인버터 구동 장치에 대한 구성도이다. 실험 장치는 크게 「속도 제어 지령치 및 변조 함수 발생부」, 「삼각파 주파수 변조부」, 「PWM 발생부」, 「인버터 및 유도전동기」로 구성되어 있다.

1) 속도 제어 지령치 및 변조 함수 발생부

DSP TMS320C31을 이용하여 3상 유도전동기의 속도 제어를 위한 전압 지령치 및 매 스위칭마다 삼각파의 주파수를 결정하기 위한 랜덤 함수를 발생시킨다. 속도 제어는 실험 편의상 오픈 루프 VVVF 제어 방식을 사용하였으며, 속도 지령치 즉 동기 주파수에 대해 일정한 전압 지령치 신호가 발생되도록 하였다. DSP의 속도 제어 알고리즘으로부터 출력되는 전압 지령치 신호는 PWM 발생부의 3상 정현파 지령치 신호단으로 입력된다.

변조 함수는 C 언어의 라이브러리에 포함된 rand () 함수를 사용하였다. 0~65,535의 범위를 갖는 리턴값이 스위칭 주파수 제한 범위에 들도록 하기 위해 나머지 연산자를 적용하여 이 리턴값을 삼각파의

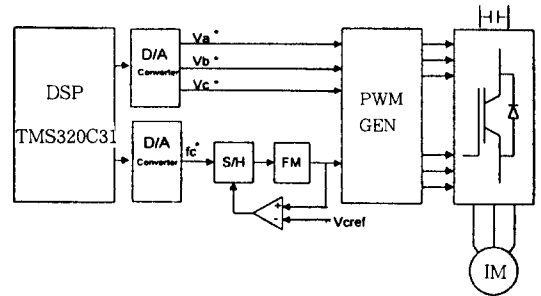


그림 3. 캐리어 주파수 변조 방식 RPWM 인버터 구성
Fig. 3. Configuration of carrier frequency modulated RPWM

중심주파수에 해당하는 값에 더한다. 이와 같이 구해진 값은 DSP에서 D/A 변환을 하여 삼각파 주파수 변조부로 전달된다.

2) 삼각파 주파수 변조부

DSP의 삼각파 랜덤 변조 알고리즘으로부터 출력되는 신호의 크기에 비례한 주파수를 갖는 삼각파 삼각파 신호를 발생하는 부분이다. 이 삼각파 신호는 PWM 발생부로 입력되어 전동기 3상 정현파 전압 지령치와 비교되어 인버터의 온/오프 스위칭 패턴을 결정한다. 고정주파수의 삼각파에 의한 PWM 인버터에서 온/오프 스위칭 신호는 OP앰프에 의한 삼각파 발생 회로로 만들 수 있다. 그러나, 삼각파 랜덤 변조의 RPWM에서는 매 스위칭마다 랜덤한 주파수로 스위칭을 하여야 하므로 출력되는 삼각파는 연속적이어야 하며 빠른 응답성을 갖고 있어야 한다. 본 연구에서는 이러한 요구 조건에 적합하다고 생각되는 MAX038 주파수 변조기를 사용하였다.

3) PWM 발생부

PWM 발생부에서는 전동기의 3상 정현파 전압 지령치 신호와 삼각파를 비교하여 인버터의 스위칭 패턴을 생성한다. PWM 발생부는 전압 지령치 신호와 삼각파 신호를 비교하는 전압비교기, 인버터의 단락을 방지하기 위한 데드타임 삽입 회로뿐만 아니라, 데드타임 조정 회로, 인버터의 게이트 차단 회

로, 삼각파 발생기, 삼각파 신호의 피크 이득 조정 회로와 삼각파 발생 동기화 회로 등이 내장되어 있는 PWM 발생 모듈 MWPWM-TV를 사용하였다.

4) 인버터 및 유도전동기

각 IGBT의 게이트 구동 회로 및 스위칭 소자와 구동 회로에 대한 보호 회로 등이 하나의 패키지로 모듈화 된 IPM을 인버터의 스위칭 소자로 사용하였다. IPM은 게이트 구동 회로와 IGBT의 결합이 최적화 되어 있어 고속 스위칭에도 신뢰성과 안정성 있게 동작되며, 내장된 보호 회로에 의해 사용자의 사소한 부주의로 인한 파괴 가능성이 적고 주변 회로 구성이 간단하여 근래에 많이 사용되고 있다. 스위칭 신호를 발생시키는 PWM 발생부와 전력 회로의 전기적 절연을 위해 최대 스위칭 주파수가 1 [MHz]정도인 포토커플러 TLP559를 사용하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

RPWM 인버터에 의해 1.5[kW]의 산업용 유도전동기를 정격 주파수 60[Hz], 무부하로 무항실에서 구동할 때, 전동기 입력 전압 및 전류의 파워 스펙트럼, 그리고 소음에 대한 파워 스펙트럼을 측정하여 분석하였다.

1) 전동기 입력 전압의 파워 스펙트럼

그림 4는 전동기 입력 전압에 대한 파워 스펙트럼이다. 5[kHz]고정주파수 PWM에 의한 그림 4(a)에서는 전압의 파워 스펙트럼이 특정 주파수에 집중된 형태이다. 그러나, 삼각파 주파수가 1~9[kHz]로 변화하고 있는 RPWM에 의한 그림 4(b)에서는 전압의 파워 스펙트럼이 넓은 주파수 영역에 걸쳐 분산된 형태임을 알 수 있다.

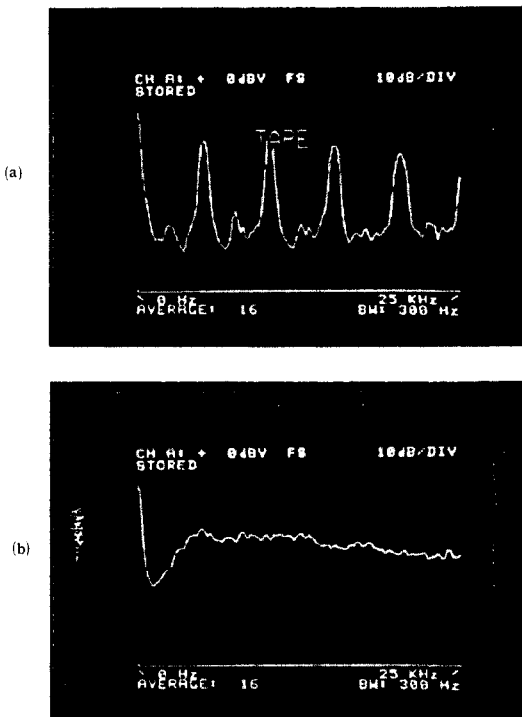


그림 4. 전동기 입력 전압의 파워 스펙트럼 : (a)5[kHz] 고정주파수 PWM, (b)1~9[kHz] RPWM

Fig. 4. Power spectrum of motor input voltage with : (a) 5[kHz] deterministic PWM, (b)1~9[kHz] RPWM

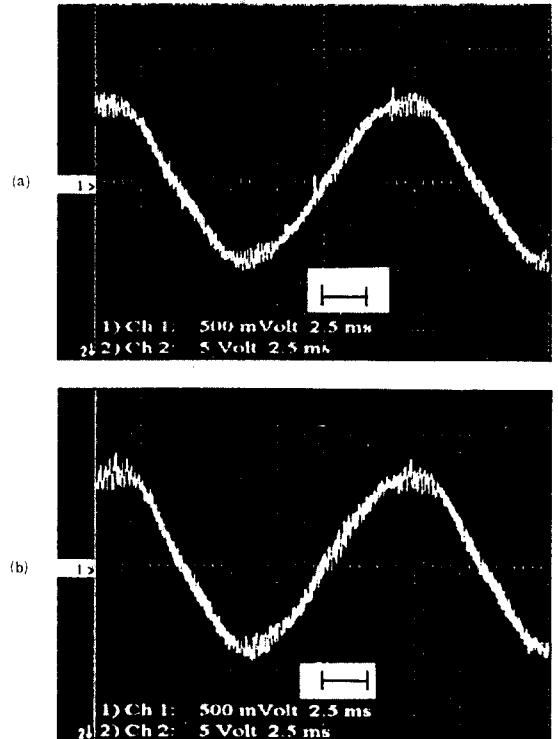


그림 5. 전동기 입력 전류의 파형 : (a)5[kHz] 고정주파수 PWM, (b)1~9[kHz] RPWM

Fig. 5. Waveforms of motor input current with : (a)5 [kHz] deterministic PWM, (b)1~9[kHz] RPWM

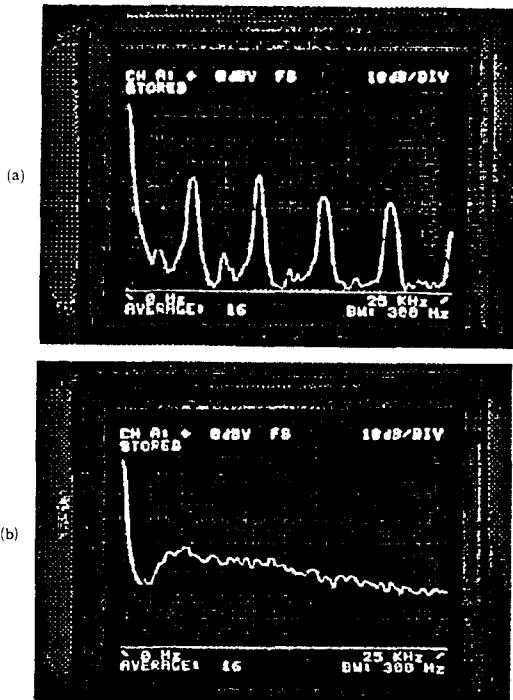


그림 6. 전동기 입력 전류의 파워 스펙트럼 : (a)5[kHz] 고정 주파수 PWM, (b)1~9[kHz] RPWM
 Fig. 6. Power spectrum of motor input current with : (a) 5[kHz] deterministic PWM, (b)1~9[kHz] RPWM

2) 전동기 입력 전류의 파워 스펙트럼

그림 5는 전동기에 흐르는 전류 파형을 측정하는 것으로, 고정 주파수 PWM에 의한 전류와 RPWM에 의한 것과는 외견상 큰 차이가 없으며, 모두 정현파 모양을 갖고 있다.

그림 6은 전동기 입력 전류에 대한 파워 스펙트럼이다. 속도 제어 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 것으로 예측된다.

3) 소음의 파워 스펙트럼

본 연구에서 소음의 파워 스펙트럼을 얻기 위한 실험은 가정용 세탁기에 부착되는 유도전동기의 소

음을 측정하기 위해 특별히 설계된 삼성전자 광주공장의 무향실에서 수행되었으며, 측정 장비로는 소음 및 진동신호에 대한 분석이 가능한 전용 측정기 「RION SA-74」를 사용하였다. 실험 결과의 분석

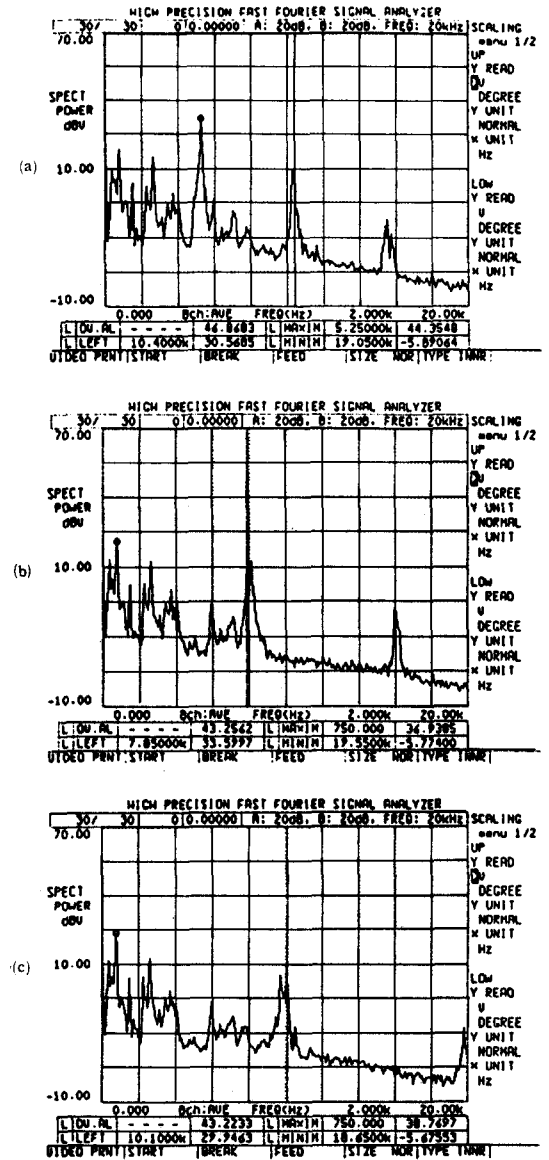


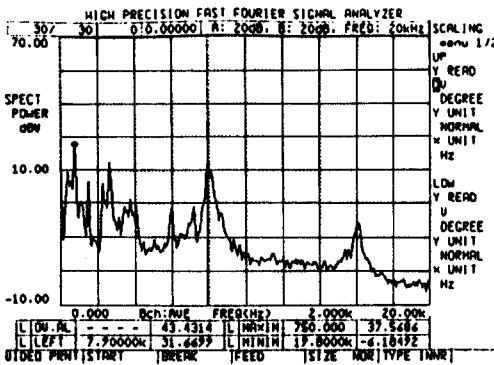
그림 7. 고정 주파수 PWM에서 스위칭 주파수 fs에 따른 소음의 파워 스펙트럼 : (a)fs=5[kHz], (b)fs=8[kHz], (c)fs=10[kHz]
 Fig. 7. Power spectrum of acoustic noise in deterministic PWM with switching frequency fs : (a)fs=5[kHz], (b)fs=8[kHz], (c)fs=10[kHz]

에 사용된 데이터는 유도전동기로부터 축 방향으로 1[m] 떨어진 곳과 상측 반지름방향으로 1[m] 떨어진 곳등 두 지점에 설치된 마이크로부터 측정된 값을 평균하여 얻은 값을 사용하였다.

그림 7은 각각 5, 8, 10[kHz]의 고정 주파수 삼각파 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, 그림 6(a)의 전류에 대한 파워 스펙트럼과 비교하여 보았을 때, 약 2 [kHz]이하의 소음에 대한 파워 스펙트럼은 스위칭

주파수에 영향을 거의 받지 않는 기계적인 소음에 의한 것임을 알 수 있다. 그림 7의 실험은 무부하로 운전한 경우이므로 전기적인 소음보다 기계적인 소음이 더 크게 나타나고 있으나, 전동기의 부하가 증가함에 따라 전동기에 흐르는 전류가 증가하고, 이에 따른 전자기적 소음도 증가할 것이다.

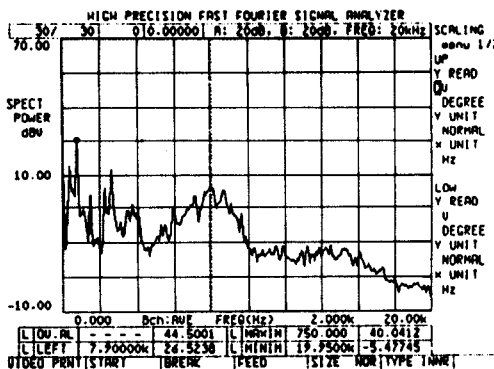
그림 8은 중심 스위칭 주파수를 약 8[kHz]로 하고, 삼각파 랜덤 주파수의 변화폭이 약 2[kHz], 4 [kHz], 8[kHz], 12[kHz]인 경우 각각의 소음에 대한 파워 스펙트럼이다. 그림 8에서 스위칭 중심 주파수 또는 주파수 변화폭 등 특정 주파수에서의 파워 스펙트럼의 최대 세기를 정리한 것은 표 1과



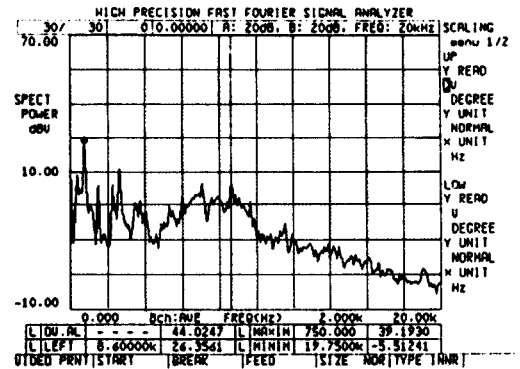
(a)



(b)



(c)



(d)

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

Fig. 8. Power spectra of acoustic noise in RPWM with varying switching frequency bandwidth f_{BW} : (a) $f_{BW} = 2$ [kHz], (b) $f_{BW} = 4$ [kHz], (c) $f_{BW} = 8$ [kHz], (d) $f_{BW} = 12$ [kHz]

표 1. 캐리어 주파수 변화폭에 따른 스위칭 주파수대에서의 소음의 파워 스펙트럼의 세기

Table 1. Sound pressure level at switching frequency with varying bandwidth of the carrier frequency

랜덤주파수 \ 중심주파수	중심스위칭 주파수 대역	중심스위칭 주파수 2배 대역
7- 9[kHz]	11[dB]	2.5[dB]
6-10[kHz]	10[dB]	0[dB]
4-12[kHz]	7.5[dB]	-2[dB]
2-14[kHz]	7.5[dB]	-3[dB]

같다. 그림 7과 비교하여 볼 때 RPWM에 의해서 전체적인 소음의 양은 거의 같은 수준으로 유지된다 할지라도 광대역 주파수의 소음으로 변화하여 사람에게 불쾌감을 유발하는 협대역의 소음은 감소함을 알 수 있다. 또한, 삼각파 랜덤 주파수의 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.

참고로 이러한 소음 저감 효과가 실제로 주위의 여러 사람에게 어떻게 느껴지는가를 조사해 보았다. 고정 주파수 스위칭의 경우에는 각 개인마다 민감하게 느껴지고 참기 어려워하는 소음의 주파수대가 각기 달랐다. 그리고, 이 때의 소음은 어느 정도 시간이 흘러도 매우 신경이 쓰이는 상태로 계속 남아 있는 것으로 조사되었다. 이에 반해 RPWM 기법을 사용한 경우에는 전동기로부터 발생하는 소음이 "쉬" 하는 소리로 변화하여 자극적인 음조가 없어져, 듣기에 고정 주파수 PWM 방식보다 훨씬 편안하다고 하였다. 또한, 이런 "쉬"하는 소리는 시간이 흐름에 따라 주변의 다른 소음에 묻히게 되어 소음이 발생되고 있음을 잊게 만들기도 하였다.

5. 결 론

1) 랜덤 함수의 발생에 의해 실시간 적으로 삼각파 주파수가 변조되는 RPWM 인버터 구동 장치를 구성하였다.

2) 무향실에서 중심 스위칭 주파수 대역을 8 [kHz]로 하고 측정한 결과, 중심 스위칭 주파수 대역에서의 소음의 크기는 고정 주파수 PWM인 경우에는 약 11[dB], 랜덤 주파수 폭이 12[kHz]인 RPWM의 경우에는 약 7.5[dB]이 얻어졌다. 그리고 전동기로부터 발생하는 전자기적 가청 소음은 고정 주파수 PWM 방식보다 RPWM 방식에 의한 경우에 파워 스펙트럼이 광대역 주파수 영역으로 고른 분포를 보이고, 주위 사람이 느끼는 불쾌감의 정도가 훨씬 적어졌다.

3) 삼각파 주파수 변조 RPWM의 스위칭 주파수의 변화폭이 커짐에 따라 특정 주파수에 집중된 소음의 파워 스펙트럼의 세기가 넓은 주파수 영역으로 분산되었다.

4) 고정 주파수 PWM 방식과 삼각파 주파수 변조 RPWM방식에 의한 파워 스펙트럼의 분석 결과, 저주파대 영역의 소음원은 주로 기계적인 소음이며, 그 이상의 주파수대 영역의 주된 소음원은 PWM 인버터의 스위칭 동작에 기인한 소음임을 확인하였다.

5) 소음에 대한 파워 스펙트럼의 분석 결과, RPWM을 수행한다하여도 절대적인 소음의 크기가 줄어드는 것은 아니고, 소음을 백색 잡음화 하여 사람이 느낄 수 있는 가청 소음 저감의 효과를 낼 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 수행되었음. (관리번호 : 97-067)

참 고 문 헌

- [1] J. M. D. Murphy, M. G. Egan, "A Comparison of PWM strategies for inverter-fed induction motors", IEEE Trans., IA, vol. 19, no. 3, pp.363~369, 1983.
- [2] S. J. Yang, Low-noise electrical motors, Clarendon Press, Oxford, 1981.
- [3] K. D. Kryter, The effects of noise on man, Academic Press, 1985.
- [4] I. Takahashi, H. Nochikawa, "Optimum waveforms of an inverter for decreasing acoustic noise of an induction motor", IEEE IAS Ann. Meeting Conf. Rec. pp. 641~646, 1985.
- [5] M. Kheraluwala, D. M. Divan, "Delta modulation strategies for resonant link inverters", IEEE PESC, pp.271

~278, 1987.

- [6] A. M. Trzynadlowski, S. Legowski, R. L. Kirlin, "Random pulse width modulation technique for voltage controlled power inverters", IEEE IA Conf. Rec, pp. 863, 1987.
- [7] T. G Habetler, D. M. Divan, "Acoustic noise reduction in sinusoidal PWM drives using a randomly modulated carrier", IEEE PESC, pp.665~671, 1989.
- [8] A. M. Trzynadlowski, F. Blaabjerg, J. K. Pedersen, R. L. Kirlin, S. Legowski, "Random pulse width modulation techniques for converter-fed drive systems-A Review", IEEE Trans. IA, vol. 30, no. 5, pp.1166~1174, 1994.

◇ 著 者 紹 介 ◇



나 석 환(羅碩煥)

1963년 4월 3일생. 1991년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 전남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 전남대대학원 전기공학과 박사 과정.



최 창 룰(崔昌律)

1965년 4월 25일생. 1991년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 현재 전남대 대학원 전기공학과 석사과정. 포항제철 광양제철소 기술교육팀 대리.



양 승 학(梁乘學)

1959년 1월 14일생. 1982년 전남대 공대 계측제어공학과 졸업. 1984년 전남대 동 대학원 졸업(석사). 1993년 일본 동경대학 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993~1994 동경대학 생산 기술연구소 연구원. 현재 호남대 전기전자 공학부 조교수.



김 광 헌(金坑憲)

1960년 12월 27일생. 1983년 전남대 계측제어공학과 졸업. 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전남대 공대 전기공학과 조교수.



임 영 철(任永徹)

1953년 4월 23일생. 1975년 전남대 전기공학과 졸업. 1977년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전남대 공대 전기공학과 교수. 조명전기설비학회 광주전남지회 부지회장.



박 종 건(朴鍾健)

1934년 8월 24일생. 1957년 전남대 전기공학과 졸업. 1962년 전남대학교 대학원 공학과 졸업(석사). 1985년 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전남대 공대 전기공학과 교수.