

전동기의 소음 저감을 위한 카오스 2중 텐트 사상 PWM기법

(Chaotic Double Tent Mapping PWM Scheme for Acoustic Noise Reduction of a Motor Drive)

김준형* · 정영국** · 임영철

(Jun-Hyeoung Kim · Young-Gook Jung · Young-Cheol Lim)

요 약

본 연구에서는 전동기 소음 저감을 위한 카오스 2중 텐트 사상(double tent mapping) PWM 기법에 대하여 고찰하였다. 카오스 수 발생은 2중 텐트 사상의 카오스 발생 영역인 $\lambda=0.99$ 에서의 분기 트리(bifurcation tree)를 사용하였다. 카오스 수 발생은 80C196 마이크로 콘트롤러가 담당하고 있으며, 80C196으로부터 발생된 카오스 수와 MAX038 주파수 변조기를 이용하여 카오스 특성을 갖는 삼각파 캐리어가 발생한다. 2.5[A] 부하조건에 대한 1.5[kw]급 유도 전동기 구동 시스템에 제안된 방법과 종전의 고정 주파수 방법을 적용하였으며 각각의 방법에 대하여 캐리어 및 전동기 전압 그리고 3차원 스위칭 소음의 고조파 스펙트럼을 비교 검토하였다. 그 결과 제안된 방법의 고조파 스펙트럼은 특정 주파수에 집중되지 않는 카오스 분포를 하였으며, 이로 인하여 전동기에서 발생하는 날카로운 스위칭 소음이 저감됨을 알 수 있었다.

Abstract

This paper proposes a chaotic double tent mapping PWM scheme for mitigation the acoustic noise of a motor drive. The chaos area $\lambda=0.99$ in bifurcation tree of the double tent mapping is used for generating the chaotic numbers. A 80C196 micro-controller is employed for generation of chaotic numbers, and the triangular carrier with chaotic frequency is obtained by using a 80C196 micro-controller and a MAX038 frequency modulator. The experiments are executed with a 1.5[kw] induction motor drive under the 2.5[A] load condition. As results, the experimental results show that the carrier, voltage and 3-D switching noise spectra of the proposed scheme is spread over the chaotic frequency range with no specific frequency concentration. Thereby, the shrill acoustic noise radiated from a motor drive is reduced by the proposed scheme.

Key Words : Chaotic phenomenon, Double tent mapping PWM scheme, Bifurcation tree, Harmonics spectra, Acoustic noise reduction

* 주저자 : (주)한국3M 기술연구소 연구원
 ** 교신저자 : 대불대학교 융합기술학부 부교수
 Tel : 061-469-1263, Fax : 061-469-1299
 E-mail : jyg@mail.daebul.ac.kr
 접수일자 : 2008년 8월 4일
 1차심사 : 2008년 8월 7일
 심사완료 : 2008년 8월 22일

1. 서 론

현재 전력변환 시스템을 위한 인버터는 스위칭 주파수가 고정된 PWM(pulse width modulation)방식을 사용하고 있다. 이러한 방식은 스위칭 주파수의 정수배의 주파수에 잡음 전력을 집중시켜 EMI[1-2]나 전동기의 소음을 유발하기 때문에 초음파 스위칭 PWM[3], Optimum PWM[4], Random PWM[5-8]에 의하여 고조파 스펙트럼을 광대역으로 분산하고 있다. 이 중에서 최근까지 연구되고 분야는 Random PWM이며 이 방법은 PWM펄스의 위치[7]나 삼각파 캐리어의 주파수[8]를 소프트웨어적으로 랜덤하게 변경시켜주면 되기 때문에 기존의 시스템에 쉽게 적용 가능한 방법이다.

Random PWM에서 사용되는 랜덤 수 발생 방법 [7]은 초기치들 사이에 서로의 제약 조건이 존재하며, 만약 초기치를 부적절하게 선택하는 경우에는 주기성을 갖는 랜덤 수가 발생하기 때문에 초기치 선정에 신중해야 한다는 점이 있다. 따라서 종전의 Random PWM에 적용하기 위한 또 다른 랜덤 수 획득 방법이 요구되며, 카오스 현상(chaotic phenomenon) [9-18]을 이용한 방법이 이에 적합하다 할 수 있다. 카오스란 용어는 1975년 제임스 요크가 그의 논문 “주기 3은 카오스를 의미한다.”에서 처음으로 카오스를 사용한 이래로 현재까지 여러 학문 분야에 사용되고 있다.

본 연구에서는 일반적인 카오스 텐트 사상[17-18]으로부터 2중 텐트 사상을 갖는 카오스 현상을 제시하고 이로부터 카오스 수(chaotic numbers)를 발생한 후, 이를 이용하여 카오스 특성을 갖는 PWM기법을 구현하였으며 그 결과를 고정 주파수 PWM기법과 비교하였다. 2중 텐트 사상에 의한 카오스 수 발생은 조절변수 $\lambda=0.99$ 에서의 카오스 발생 영역인 2중 텐트 사상의 분기 트리(bifurcation tree)[11, 15-16]를 사용하였다. 이 방법은 우선 수식이 간단하고 발산이 없으며 매우 안정적이다. 또한 0과 1범위의 카오스 수를 자동으로 발생시키며, 안정된 1개의 초기치와 제어변수를 이용하여 다양한 카오스 특성을 갖는 카오스 수를 발생할 수 있다.

카오스 수 발생을 위하여 80C196 마이크로 콘트

롤러가 사용되었다. 발생한 카오스 수를 이용하여 MAX038주파수 변조기는 카오스 주파수를 갖는 삼각파 캐리어를 실시간적으로 발생한다. 1.5[kw]급 농형 유도전동기 구동시스템을 제작하여 변조지수 $M=0.95$, 삼각파 캐리어 주파수 $f_{sw}=3$ [kHz] ± 1 [kHz], 정격 주파수 $f=60$ [Hz], 2.5[A]부하 조건하에서 삼각파 캐리어, 전동기의 전압과 3차원 소음 스펙트럼을 파악하였다. 그 결과 종전의 고정 주파수 PWM방식에서 발생하는 스위칭 주파수의 정수배에 분포하는 고조파 스펙트럼을 광대역으로 분산시킬 수 있었으며 이로부터 전동기에 발생하는 가청 소음을 저감시킬 수 있었다.

2. 제안된 카오스 2중 텐트 사상

카오스의 보편적인 진화의 양상 중의 하나인 주기 배가(period doubling)효과[11,15-16]는 분기트리 내에서 (1), (2)의 일반적인 텐트 사상 구조[17-18]로 설명된다. 텐트 사상은 0과 1사이의 값을 갖는 초기치 x_0 ($0 \leq x_0 \leq 1$)와 비선형성 조절변수 λ ($0 \leq \lambda \leq 1$)에 의하여 x_{n+1} 이 발생하며 이때 x_{n+1} 과 x_n 은 (1)과 같은 비선형적인 관계로 나타내진다[17-18].

$$x_{n+1} = \lambda \left(1 - 2 \left| x_n - \frac{1}{2} \right| \right) \quad (1)$$

여기서 (1)은 $x_n=0.5$ 에서 $x_{n+1}=1$ 인 한 개의 텐트를 가지며 이는 (2), (3)과 같이 표현가능하다.

$$x_{n+1} = 2\lambda x_n \quad \text{if } 0 < x_n < 0.5 \quad (2)$$

$$x_{n+1} = 2\lambda(1 - x_n) \quad \text{if } 0.5 \leq x_n < 1 \quad (3)$$

(2), (3)의 일반적인 텐트사상은 $\lambda=0.5$ 의 초기상태로부터 $\lambda=\lambda_c=0.71$ 까지 주기배가 현상이 나타나며, 주기배가 현상을 넘어선 카오스 현상은 $\lambda=\lambda_c=0.71$ 의 임계상태부터 $\lambda=0.99$ 구간사이에서 발생하는 진화과정을 보인다. λ 가 0.71부터 0.99로 접근함에 따라서 x_n 의 값은 점점 0과 1사이의 범위로 확대되어지며 마침내 λ 가 0.99가 되면 x_n 은 0과 1사이의 전 구간에서 카오스 분포를 나타낸다. 그러나 이 사상

은 λ 가 자신의 전 구간에 대하여 71%가 되어야 그때부터 x_n 은 카오스 영역으로 접어드는 완만한 카오스 전이과정을 보이는 문제점이 있다.

이상과 같은 (1)의 일반적인 텐트사상이 갖는 완만한 카오스 진화양상은 (4), (5)의 카오스 2중 텐트 사상에 의하여 매우 빠른 진화양상으로 개선 가능하다.

$$X_{n+1} = \lambda(1 - 4 | X_n - \frac{1}{4} |) \quad (0 < x_n < 0.5) \quad (4)$$

$$X_{n+1} = \lambda(1 - 4 | X_n - \frac{3}{4} |) \quad (0.5 \leq x_n < 1) \quad (5)$$

(4), (5)를 살펴보면 $x_n=0.25$ 와 $x_n=0.75$ 에서 x_{n+1} 이 각각 1의 값을 갖는 2개의 텐트를 가지며 이는 (6)-(9)과 같이 구간별로 표현된다.

$$X_{n+1} = 4\lambda X_n \quad \text{if } 0 < x_n < 0.25 \quad (6)$$

$$X_{n+1} = 4\lambda(0.5 - X_n) \quad \text{if } 0.25 \leq x_n < 0.5 \quad (7)$$

$$X_{n+1} = 4\lambda(X_n - 0.5) \quad \text{if } 0.5 \leq x_n < 0.75 \quad (8)$$

$$X_{n+1} = 4\lambda(1 - X_n) \quad \text{if } 0.75 \leq x_n < 1 \quad (9)$$

그림 1은 제안된 2중 텐트 사상의 분기트리를 나타내고 있다. 초기상태 $\lambda=0.25$ 로부터, 카오스가 발생

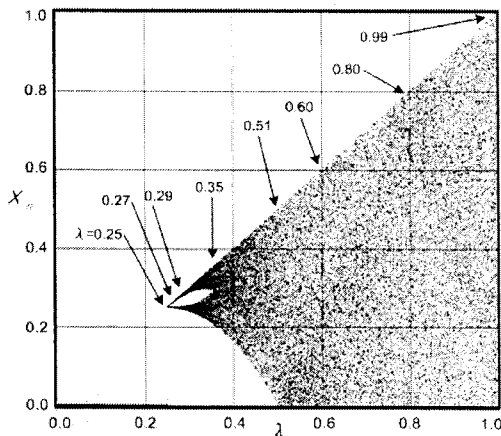


그림 1. λ 에 따른 2중 텐트 사상의 분기 트리
Fig. 1. Bifurcation tree of the double tent mapping with different λ

하기 시작하는 임계상태 $\lambda=\lambda_c=0.35$, 그리고 x_n 이 0과 1사이에서 모두 카오스가 나타나는 $\lambda=0.99$ 까지의 진화과정을 잘 나타내고 있다. 그림 1을 살펴보면 2중 텐트 사상은 매우 빠른 카오스 전이 과정을 보임을 알 수 있다.

그림 2는 (4), (5)에 의한 카오스 2중 텐트 사상의 x_{n+1} 과 x_n 의 관계를 나타내고 있다. $\lambda=0.25$ 인 한 점의 상태는 $\lambda=0.27$ 인 두 점의 상태로 전환되고 있으며 이는 또한 4개의 띠로 나타내어지는 $\lambda=0.29$ 인 상태로, 그리고 하나의 커다란 일차원 사상의 모습을 보이기 시작하는 $\lambda=0.35$ 인 상태로 바뀔을 알 수 있다. $\lambda=0.5$ 이 되면 $x_n=0.5$ 를 중심으로 좌측 텐트①이 완벽하게 생성되며, $\lambda=0.5$ 이상으로 진전하면서 우측

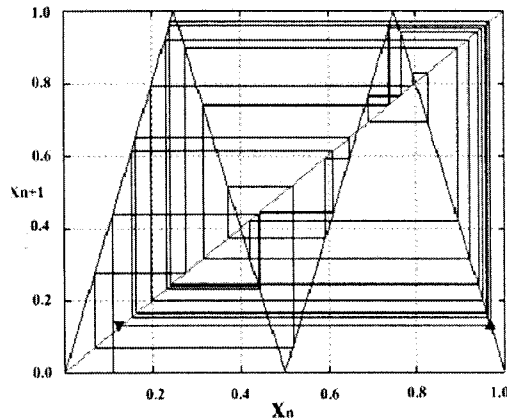
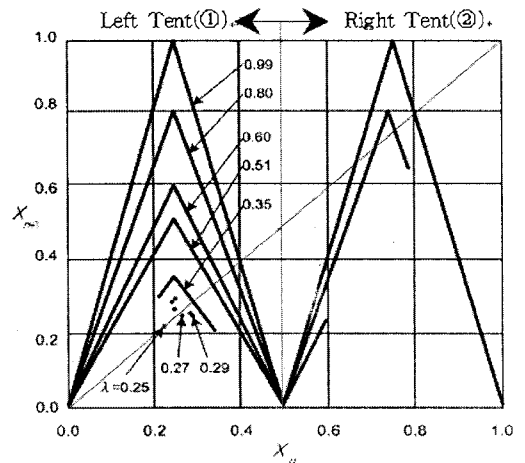


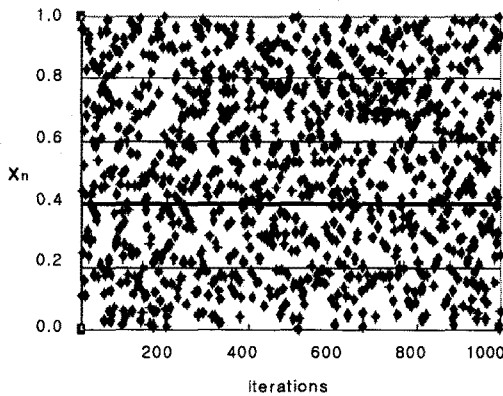
그림 2. x_{n+1} 과 x_n 에 따른 이중 텐트 사상
Fig. 2. Double Tent mapping with different x_{n+1} and x_n

전동기의 소음 저감을 위한 카오스 2중 텐트 사상 PWM기법

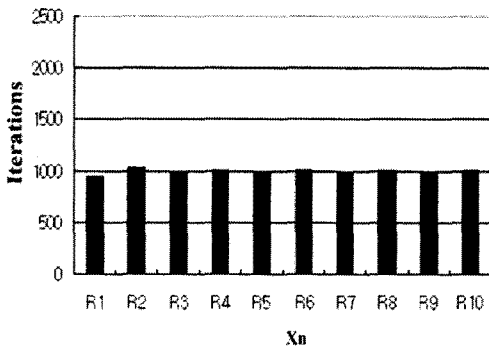
텐트②가 생성되기 시작하여 $\lambda=0.99$ 가 되면 완벽한 2중 텐트가 생성된다.

2중 텐트 사상은 λ 의 변화에 따라서 처음에는 안정한 고정점이 나타나다가, λ 가 커지면 카오스 상태로 진화한다. 그림 2에서 보는 바와 같이 초기 상태에서 0과 1 범위 내에서 카오스가 발생되는 양상이 텐트가 2개 있는 모습과 동일하기 때문에 2중 텐트 사상이라 한다.

그림 3은 제안된 2중 텐트의 $\lambda=0.99$ 에서의 분기 트리를 이용하여 카오스 수를 발생시킨 결과이다. 그림 3 (a)는 반복 횟수(iteration)에 대해 발생된 카오스 수를 시간에 따라 나타낸 것이다. 그림 3 (b)는 그림 3 (a)를 발생된 카오스 수 별로 구분하고 막대 그래프로 그 분포를 나타낸 것이다. 여기서 R_n 은 발



(a) Generated chaotic numbers



(b) Chaotic number distribution

그림 3. 발생된 카오스 수($\lambda=0.99$ 의 조건)
Fig. 3. Generated chaotic numbers (under the $\lambda=0.99$ condition)

생된 0.0~0.1사이의 카오스 수이며, R_{10} 은 0.9~1.0 사이에서 발생된 카오스 수를 의미한다. 모두 반복 횟수에 대하여 카오스 수가 고루 발생되고 있으며 또한 0과 1사이에 고루 분포함을 알 수 있다.

3. 실험 시스템

그림 4는 제안된 방식의 전동기 구동 시스템을 보여주고 있다. 3상 전동기 구동 시스템은 1.5[kw]급 3상 능형 유도전동기, 전압형 인버터와 제어기, 그리고 ECB(eddy current brake) 부하로 구성되어 있다. 가청 스위칭 소음을 측정하기 위해서는 정격 부하가 연결된 상태에서 정격속도로 운전하여 시행하여야 한다. 그러나 이것은 전동기, 인버터의 전자기적 소음 뿐 아니라, 구동장치 및 부하의 기계적인 소음 등이 발생하는 문제를 발생한다. 이 때문에 본 실험에서는 기계적인 소음이 발생하지 않는 ECB를 전동기에 장

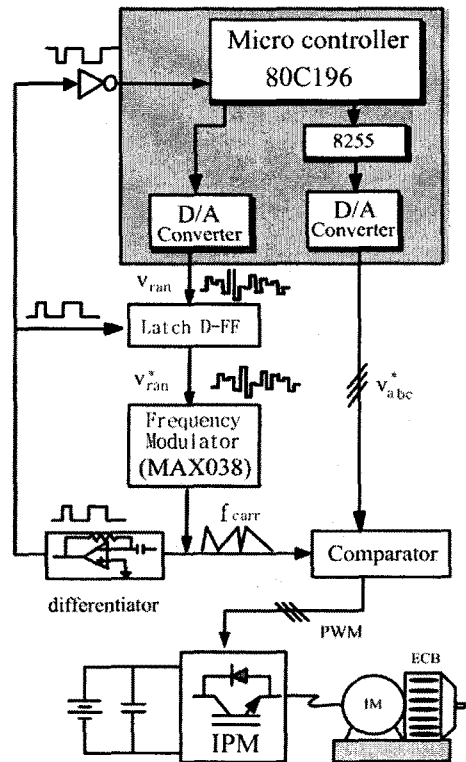


그림 4. 실험 시스템
Fig. 4. Experimental setup

착하여 부하 실험을 실행하였다. ECB는 와전류를 이용하여 전자기적으로 모터에 부하를 발생시키는 장치로 부하의 기계적인 소음을 최소화 할 수 있다.

그림 4의 대략적인 설명은 다음과 같다. 80C196 마이크로 컨트롤러는 3상 유도전동기의 속도 지령치 및 매 스위칭마다 삼각파의 주파수 f_{carr} 를 결정하기 위해 (6)-(9)에 의해 카오스 수를 그림 3과 같이 발생시킨다. 80C196은 소수점 연산이 불가능하므로 카오스 수는 큰 수로 계산하여 복원하는 방법으로 unsigned long형(0~232)이 사용되었다. 결국 D/A 변환기로 출력되는 카오스 수 값은 0~27(0~127)의 범위 내에 존재한다.

D/A변환기에서 발생된 카오스 수 v_{ran} 는 샘플 홀더로 작용하는 D래치, MAX038 주파수 변조기 및 비교기에 의하여 카오스 특성을 갖는 캐리어의 경사도가 실시간적으로 구해진다. 이상에서 발생된 카오스 특성을 갖는 삼각파 캐리어 f_{carr} 는 3상 정현파 전압 지령치 신호 v_{abc} 와 비교되어 제안된 방법의 스위칭 패턴을 생성한다.

본 실험에서는 운전조건으로 기본 주파수 $f = 60[\text{Hz}]$, 스위칭 주파수 $f_{carr} = f_{sw} = 3[\text{kHz}] \pm 1[\text{kHz}]$, 소음 측정실험을 위하여 0.1에서 1.0까지 변조비수 M 을 변경하였으며, 종전의 고정 주파수의 PWM방식과 카오스 2중 텐트 사상을 적용한 PWM을 구현하여 부하 실험을 행한다. 표 1은 실험 조건들을 정리한 것이다.

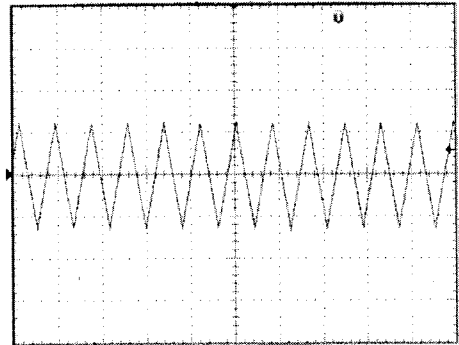
표 1. 실험 파라미터
Table 1. Experimental parameters

| | |
|------------------------|---|
| λ | 0.99 |
| $f([\text{Hz}])$ | 60 |
| M | 0.1-1.0 |
| $f_{sw}([\text{kHz}])$ | $3[\text{kHz}] \pm 1[\text{kHz}]$ |
| Motor | 3-phase squirrel cage induction motor, 220v/60[Hz], 1.5[kw] |
| Inverter | IGBT voltage source |
| Load | 2.5[A] load using ECB |

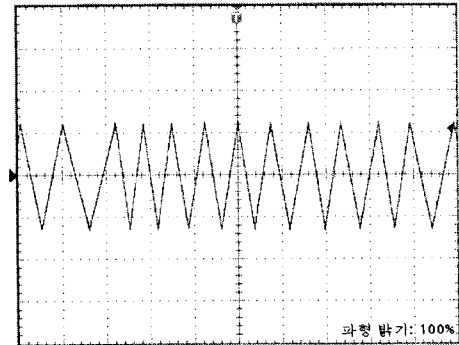
4. 실험결과 및 고찰

그림 5와 그림 6은 3[kHz] 고정 주파수 PWM방법

과 제안된 방법에 의해 발생된 삼각파 캐리어 파형과 그 스펙트럼들을 비교한 것이다. 우선 그림 5를 보면 고정 주파수 PWM방법의 캐리어는 일정한 주기를 갖는 삼각파형이며 제안된 방법은 카오스 주기를 갖는 삼각파 캐리어임을 알 수 있다.



(a) Fixed frequency PWM scheme(3[kHz])



(b) Proposed scheme (3[kHz]±1[kHz])

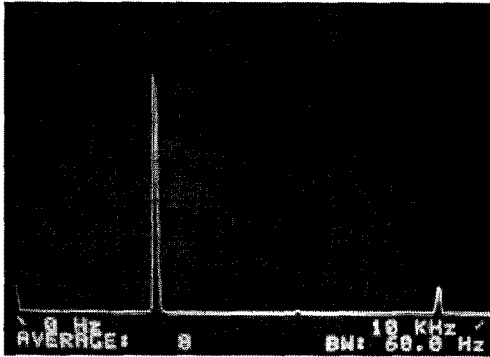
그림 5. 측정된 삼각파 캐리어 파형
Fig. 5. Measured triangular carrier waveforms

그림 6은 캐리어 스펙트럼을 나타내고 있다. 고정 주파수 방법은 3[kHz]에 집중된 고조파 스펙트럼을 보이고 있으며, 제안된 방법은 3[kHz]의 중심 주파수에 대해 $\pm 1[\text{kHz}]$ 의 카오스 대역 분포를 나타내고 있다. 어느 한 주파수에 집중된 캐리어는 관련 시스템에 EMI를 발생시키며 소음의 원인으로 작용된다.

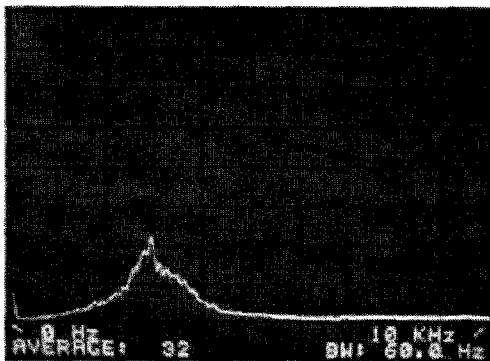
그림 7은 전동기 전압과 전류파형으로서, 제안된 방법의 전류파형은 고정 주파수 PWM방법과 거의 유사함을 정량적인 방법을 적용하지 않더라도 관측으로 알 수 있다.

전동기의 소음 저감을 위한 카오스 2중 텐트 사상 PWM기법

그림 8은 전동기 선간 전압의 고조파 스펙트럼이다. 고정 주파수 방법은 3[kHz] 스위칭 주파수와 고정수배(6[kHz], 9[kHz])주파수에 고조파 스펙트럼이 분포하고 있다. 그러나 제안된 방법의 선간전압 스펙트럼은 어느 특정 주파수에 집중됨이 없이 카오스 광대역 분포를 하고 있다. 이러한 스펙트럼 분포는 전동기의 소음을 완화시킨다.



(a) Fixed frequency PWM scheme(3(kHz))



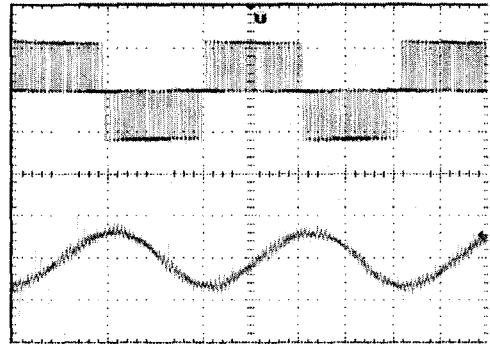
(b) Proposed scheme (3(kHz)±1(kHz))

그림 6. 측정된 삼각파 캐리어 스펙트럼(x-axis: 1(kHz)/(div.), y-axis: 200(mv)/(div.))
 Fig. 6. Measured triangular carrier spectra (x-axis: 1(kHz)/(div.), y-axis: 200(mv)/(div.))

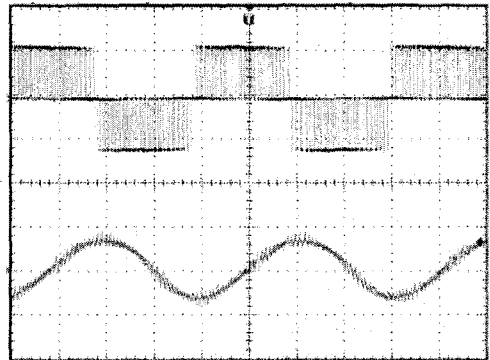
그림 9는 25[A]부하로서의 역할을 하는 ECB와 연결된 유도 전동기에서 발생하는 소음의 스펙트럼을 변조지수 M의 변화에 대하여 3차원 측정을 한 것이다. 전동기로부터 발생하는 가청 소음의 스펙트럼은 전동기 소음 측정을 위해 육면이 흡음재로 밀폐

된 무향실(anechoic room)에서 측정되었다.

실험 결과의 분석에 사용된 데이터는 유도 전동기의 축 방향과 직각으로 15[cm] 이격한 곳에 압전형 마이크로폰을 사용하여 소음을 측정하였으며, 측정 장비로는 RION사의 SA-01을 사용하였다. x축은 주파수([kHz]), y축은 데시벨(dB) 그리고 z축은 변조지수(M)을 나타내고 있다.



(a) Fixed frequency PWM scheme(3(kHz))

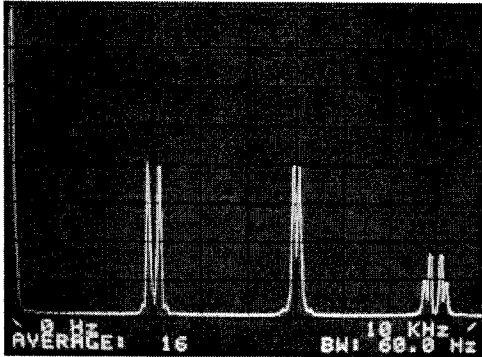


(b) Proposed scheme(3(kHz)±1(kHz))

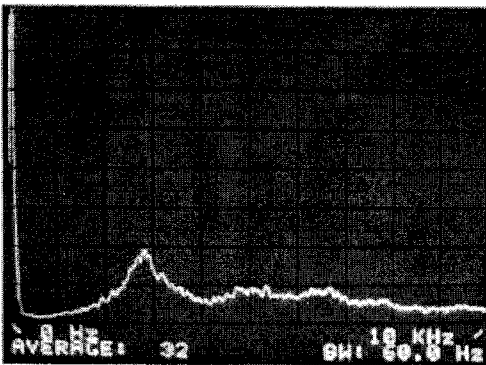
그림 7. 측정된 전압과 전류파형 (voltage: 250v/(div.), current: 3(A)/(div.))
 Fig. 7. Measured voltage and current (voltage: 250v/(div.), current: 3(A)/(div.))

그림 9 (a)는 3[kHz] 고정 주파수 PWM방법이 적용된 전동기의 변조지수 M에 따른 3차원 소음 스펙트럼이다. 그림 9 (a)는 그림 8 (a)의 전압 스펙트럼과 비슷한 형태를 보이며 전 구간의 M에 대하여 3[kHz] 고정 주파수의 정수배 고조파가 분포되고 있다.

그림 9 (b)는 제안된 방법을 적용하였을 때의 3차



(a) Fixed frequency PWM scheme(3(kHz))



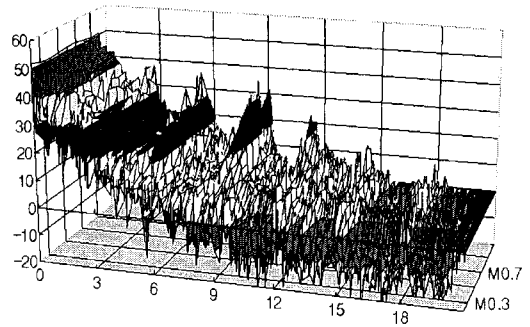
(b) Proposed scheme(3(kHz)±1(kHz))

그림 8. 측정된 전동기 전압 스펙트럼(x-axis: 1(kHz)/(div.), y-axis: 100(mv)/(div.)
 Fig. 8. Measured Motor voltage spectra(x-axis: 1(kHz)/(div.), y-axis: 100(mv)/(div.))

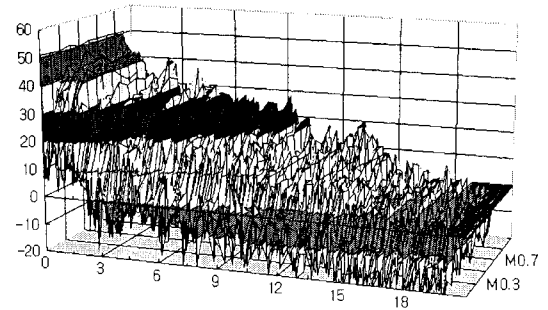
원 소음 스펙트럼으로서 M이 변화하더라도 어느 특정 주파수에 집중됨이 없이 카오스 분포를 하고 있다. 이러한 소음 스펙트럼의 광대역 분산은 종전의 고정 주파수 방식에서 발생하는 날카로운 스위칭 소음을 완화시키며 저 스위칭 대용량 전동기 관련 현장 작업자에게 쾌적한 작업환경을 제공하는 역할을 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 카오스 2중 텐트 사상 특성을 갖는 PWM방식을 제안하였으며 고정 주파수 PWM방식과 소음 스펙트럼을 비교하였다. 카오스 수 발생은 제안된 2중 텐트 사상을 이용하였으며, 0과 1범위에



(a) Fixed frequency PWM scheme(3(kHz))



(b) Proposed scheme(3(kHz)±1(kHz))

그림 9. 측정된 전동기 3차원 소음 스펙트럼(x-axis: 3(kHz)/(div.), y-axis: 10(dB)/(div.), z-axis: M=0.2/(div.)
 Fig. 9. Measured motor 3D noise spectra(x-axis: 3(kHz)/(div.), y-axis: 10(dB)/(div.), z-axis: M=0.2/(div.))

서 완전한 카오스 상태가 존재하는 $\lambda=0.99$ 조건인 분기 트리를 이용하였다. 제안된 방법은 안정적인 1개의 초기치와 간단한 수식, 발생 카오스 수가 자동으로 0과 1 범위로 분포하는 장점을 갖고 있다. 카오스 수는 80C196 마이크로 콘트롤러가 담당하고 있으며, 80C196으로부터 발생한 카오스 수에 의하여 MAX038로부터 카오스 주파수의 삼각파 캐리어를 발생하였다.

본 연구의 타당성을 입증하기 위해 3상 유도전동기 구동 장치를 제작하였다. 제안된 방법은 삼각파 캐리어, 전동기 전압 및 3차원 소음 스펙트럼 모두 특정 주파수에 집중되지 않는 카오스 분포를 하였다. 그 결과 고정 주파수 PWM방식이 적용된 전동기에

전동기의 소음 저감을 위한 카오스 2중 텐트 사상 PWM기법

서 발생하는 날카로운 소음을 모든 변조지수 영역에서 완화시킬 수 있었다. 본 연구의 적용 가능 분야로는 전철과 같은 저 스위칭 대용량의 견인시스템 등이라 생각된다.

다음 과제로는 제안된 2중 텐트 사상의 카오스적 특성의 본격적인 고찰과 종전의 텐트 사상에 의한 방법, 로지스틱 사상, 제안된 방법 그리고 랜덤 수 발생 방법의 고조파 스펙트럼을 비교 검토하는 연구가 기대된다.

References

- [1] S. Kaboli, J. Mahdavi, and A. Agah, "Application of random PWM technique for reducing the conducted electromagnetic emissions in active filters", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.54, no.4, pp.2333-2343, 2007.
- [2] F. Gao, P.C. Loh, D.M. Vilathgamuwa, and F. Blaabjerg, "Performance analysis of random pulse-width modulated Z-source inverter with reduced common mode switching", in *Conf. Rec. IEEE PESC'06*, pp.1536-1542, in CD-ROM version, 2006.
- [3] 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.
- [4] I.Takahashi and H. Mochikawa, "Optimum PWM waveforms of an Inverter for decreasing acoustic noise of an induction motor", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.22, no.5, pp.828-834, 1986.
- [5] K. Borisov, T.E. Calvert, J.A. Kleppe, E. Martin, and A.M. Trzynadlowski, "Experimental investigation of a naval propulsion drive model with the PWM-based attenuation of the acoustic and electromagnetic noise", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.53, no.2, pp.450-457, 2006.
- [6] A. Trzynadlowski, K. Borisov, Y. Li, and L. Qin, "A novel random PWM technique with low computational overhead and constant sampling frequency for high-volume, low-cost applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.20, no.1, pp.116-122, 2005.
- [7] 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, pp.195-202, 2002.
- [8] K.S. Kim, Y.C. Jung, and Y. C. Lim, "Shaping the spectra of the acoustic noise emitted by three-phase inverter drivers based on the new hybrid random PWM Technique", in *Conf. Rec. IEEE PESC'06*, PS 1-89, in CD-ROM version, 2006.
- [9] S. Ye, and K.T. Chau, "Chaoization of dc motors for industrial mixing", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, pp.2024-2032, 2007.
- [10] G. Carpinelli, F. Iacovone, A. Russo, and P. Varilone, "Chaos-based modeling of dc arc furnaces for power quality issues", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, no.4, pp.1869-1876, 2004.
- [11] Y. Gao, K.T. Chau, "Hopf bifurcation and chaos in synchronous reluctance motor drives", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol.19, no. 2, pp.296-302, 2004.
- [12] A. Kandangath, S. Krishnamoorthy, Y.C. Lai, and J.A. Caudet, "Inducing chaos in electronic circuits by resonant perturbations", *IEEE Trans. Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 54, no. 5, pp.1109-1119, 2007.
- [13] H. Li, Z. Li, W.A. Halang, B. Zhang, and G. Chen, "Analyzing chaotic spectra of dc-dc converters using the prony method", *IEEE Trans. Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 54, no. 1, pp. 61-65, 2007.
- [14] R. Haipeng, L. Ding, "Nonlinear feedback control of chaos in permanent magnet synchronous motor", *IEEE Trans. Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 53, no. 1, pp.45-50, 2006.
- [15] D. Hamill, J.H.B. dean and D.J. Jefferies, "Modeling of chaotic dc-dc converters by iterated nonlinear mapping", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.7, no.1, pp.25-36, 1992.
- [16] K.K. Tse, R.W.M. Ng, H.S.H. Chung and S.Y.R. Hui, "An evaluation of the spectral characteristics of switching converters with chaotic carrier frequency modulation", *IEEE Trans. Ind. Electron.* vol.50, no.1, pp.171-182, 2003.
- [17] 김민준, 문희태, "카오스 끌개의 텐트 사상 진화의 구조적 안정성", *한국물리학회지 (새물리)*, vol.35, no.6, pp.728-732, 1995.
- [18] 문희태, "카오스 끌개의 기본형과 그 의미에 대하여", *한국물리학회지(새물리)*, vol.34, no.4, pp.363-369, 1994.

◆ 저자소개 ◆

김준영 (金俊亨)

1973년 5월 19일생. 1998년 전남대학교 전기공학과 졸업. 2005년 전남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주)한국3M 기술연구소 연구원.
Tel : (031)8058-8361
E-mail : junn_h@mmm.com

정영국 (鄭榮國)

1963년 11월 10일생. 1986년 전남대학교 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 대불대학교 융합기술학부 부교수.
Tel : (061)469-1263
Fax : (061)469-1299
E-mail : jyng@mail.daebul.ac.kr

임영철 (任永徹)

1953년 4월 23일생. 1975년 전남대학교 전기공학과 졸업. 1977년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년 호주 모나시대학교 Visiting Scholar. 1998~2007년 산업자원부 지정 전남대학교 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터 소장. 현재 전남대학교 전기공학과 교수.
Tel : (062)530-1743
E-mail : yclim@chonnam.ac.kr