

유도모터의 저 스위칭 소음 구동을 위한 카오스 2중 텐트사상 RPWM기법

김준형*^o 정영국** 임영철*

*^o전남대학교 전기공학과 **^o대불대학교 컴퓨터정보공학부

A Chaotic Double Tent Mapping RPWM Technique for Induction Motor Drives with Low Switching Noise

^oJ.H. Kim **Y.G. Jung and *Y.C. Lim

*Chonnam National University **Daebul University

ABSTRACT

본 연구에서는 일반적으로 사용되고 있는 랜덤 수 발생 알고리즘인 LCG(Linear Congruential Generator)대신에 카오스 2중 텐트사상(Tent Mapping)에 의한 저 스위칭 소음 유도모터 구동 시스템을 제안하였다. 2중 텐트사상에 의한 랜덤 수 발생을 위해 카오스 발생 영역인 $\lambda=0.99$ 에서의 2중 텐트사상의 분기도(Bifurcation Diagram)를 사용하였다. 카오스 랜덤 수와 3상 기준 정현파는 80C196 마이크로 콘트롤러가 전달하고 있으며, 80C196으로부터 발생된 카오스 랜덤 수에 의하여 MAX038로부터 랜덤 주파수의 삼각파 캐리어가 발생된다. 기계적인 소음이 없는 ECB(Eddy Current Brake)를 부하로 사용한 3상 유도모터 구동 장치를 제작하여 본 연구의 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

일반적으로 고정 주파수의 PWM기법은 스위칭 주파수의 원치 않는 정수배 고조파를 발생시키고, 또한 EMI문제와 인버터 구동장치의 근본적인 스위칭 소음을 유발하고 있다. 이와 같은 고정 주파수의 PWM기법은 근래에 와서 주목 받기 시작한 RPWM(Random PWM)^[1-3]에 의하여 비교적 쉽게 해결 가능하다. RPWM방법은 근본적으로는 일반 PWM과는 동일하나 PWM펄스의 위치나 삼각파 캐리어의 주파수를 소프트웨어적으로 랜덤하게 변경시켜주면 되기 때문에 기존의 시스템의 큰 변화가 없어도 쉽게 적용 가능하다. RPWM기법은 모터전류 파형에 약간의 맥동이 존재하는 점을 제외하고는 모터전압 및 전류 그리고 소음 및 진동 스펙트럼의 광대역화를 실현할 수 있어서 전력전자 응용 모터 구동분야에 주목을 받고 있다.

RPWM기법에서 랜덤 수 발생을 위하여 LCG(Linear Congruential Generator)^[1,2,4]가 보편적으로 많이 사용되고 있다. 이 방법은 랜덤 수를 빠르게 발생할 수 있으나 초기치들 사이에 서로의 제약 조건이 존재하

며, 만약 초기치를 부적절하게 선택하는 경우에는 주기성을 갖는 랜덤 수가 발생하기 때문에 초기치 선정에 신중해야 한다^[1-2].

본 연구에서는 종전의 LCG 대신에 카오스^[5-13] 특성을 갖는 2중 텐트 사상에 의한 랜덤 수 발생 기법을 제시하였다. 2중 텐트사상에 의한 랜덤 수 발생은 카오스 발생 영역인 $\lambda=0.99$ 에서의 2중 텐트 사상의 분기도(Bifurcation Diagram)를 사용하였다. 이 방법은 LCG에 비해 수식이 간단해지며, 발생된 랜덤 수를 0과 1사이의 수로 변환하기 위한 단계가 생략되고, 안정된 1개의 초기치와 제어변수로 다양한 카오스 랜덤 수를 발생할 수 있다^[10-11]. 카오스 랜덤 수의 발생을 위하여 80C196 마이크로 콘트롤러가 사용되었다. 카오스 랜덤 수는 80C196 외부에 있는 MAX038에 의하여 랜덤 주파수의 삼각파 캐리어를 실시간적으로 발생한다. 3상 1.5kW급 농형 유도모터 구동시스템을 제작하여 모터로부터 발생하는 스위칭 소음과 모터 전압 / 전류의 스펙트럼을 관찰하였다. 모터의 부하로는 자체적으로 기계적인 소음이 없는 ECB(Eddy Current Brake)를 사용하였다. 모터 전압 및 전류의 파형 그리고 소음 스펙트럼의 광대역 분산 정도는 종전의 방법과 제안된 방법이 모두 일치함을 알 수 있었다.

2. 카오스 텐트사상과 랜덤 수 발생

2.1 일반적인 카오스 텐트 사상^[12-13]

n 차원 공간에서의 운동 방정식은 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dx}{dt} = f(x), (x = (x_1, x_2, \dots, x_n)) \quad (1)$$

위의 식으로 표현되는 운동을 쉽게 분석하기 위하여, 위상 공간에서의 연속적인 흐름을 일정한 규칙에 의하여 변수를 선정하면, 다음과 같은 사상 형태로 표시된다.

$$x_{n+1} = g(x_n) \quad (2)$$

(1)의 복잡한 방정식을 다루는 것 보다는 간단한 (2)의 사상을 이용하여 물리계를 분석하는 방법이 카오스 연구에서 제시된 새로운 형태의 접근 방법이다. 사상을 이용한 보편적인 진화의 양상 중의 하나인 주기배가 (Period Doubling) 효과를 설명하는 로지스틱 사상 (Logistic Mapping)^{[10][11]}이 있다. 최근에 들어 보편성을 갖는 또 다른 구조로 (3) 또는 (4)와 같은 텐트 사상 구조가 있다. 텐트 사상은 0과 1 사이에 존재하는 초기치 X_0 와 λ 에 의하여 x_{n+1} 을 발생하며 이때 x_{n+1} 과 x_n 는 다음과 같은 비선형적인 텐트 관계가 있다.

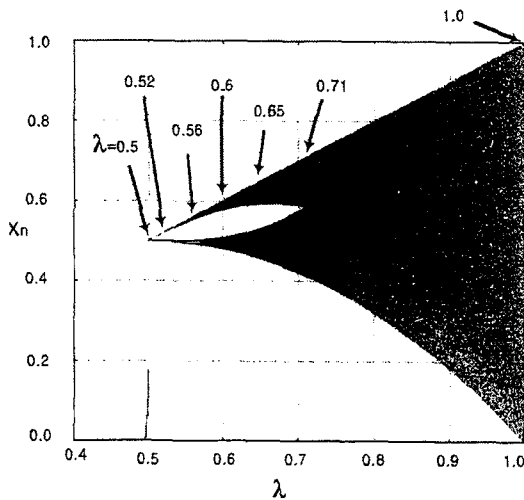


Fig.1 Bifurcation of tent mapping with different λ

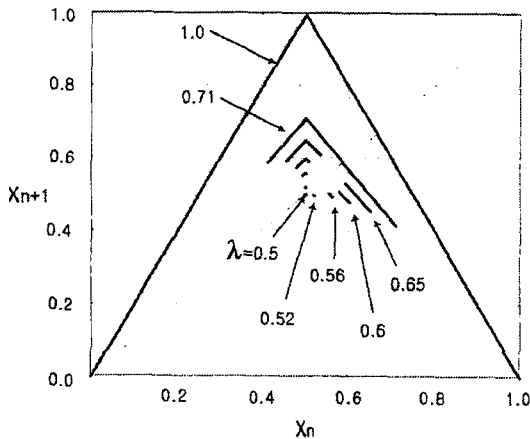


Fig.2 Tent mapping with different λ

$$X_{n+1} = \lambda \left(1 - 2 \left| X_n - \frac{1}{2} \right| \right) \quad (3)$$

(3)을 다른 방법으로 표현하면

$$X_{n+1} = 2X_n \quad \text{if } 0 < X_n < \frac{1}{2} \quad (4)$$

$$X_{n+1} = 2(1 - X_n) \quad \text{if } \frac{1}{2} \leq X_n < 1$$

여기서 x_0 는 $0 \leq x_0 \leq 1$ 이며, λ 는 텐트의 비선형성 조절

변수이며 $0 \leq \lambda \leq 1$ 사이에서 변한다. 그림 1은 일반적인 텐트 사상의 분기도를 나타내고 있다. $\lambda=0.5$ 인 초기 상태에서 카오스가 발생하기 시작하는 임계상태 $\lambda = \lambda_c = 0.71$ 그리고 0과 1사이에서 모두 카오스가 나타나는 $\lambda=0.99$ 까지의 진화과정을 보여주고 있다.

그림 2는 (3) 또는 (4)로부터 발생되는 x_{n+1} 과 x_n 의 관계를 나타내는 텐트사상이다. $\lambda=0.5$ 인 한점의 상태는 곧바로 $\lambda=0.52$ 인 두 점의 상태로 진전하고 있으며 이는 또한 4개의 띠로 나타내어지는 $\lambda=0.56$ 인 상태로, 그리고 하나의 커다란 일차원 사상의 모습을 보이기 시작하는 $\lambda=0.71$ 로 진전함을 볼 수 있다. $x_n=0.5$ 에 놓여진 고정점은 $\lambda=0.5$ 를 지나면서 불안정한 상태로 변화하기 시작한다. 그리고 텐트 사상은 λ 의 변화에 따라서 처음에는 안정한 고정점이 나타나다가, λ 가 커지면 혼돈한 상태로 진화한다. 진화 양상을 그림 2에서 보는 바와 같이 고정점 상태에서부터 완벽하게 텐트 사상의 모습을 나타내는 상태까지 진화하는 것을 알 수 있다.

2.2 카오스 2중 텐트 사상

일반적인 텐트사상을 나타내는 (3) 또는 (4)의 식은 (5) 혹은 (6)과 같은 변형구조로 나타낼 수 있으며, 이는 일반적인 텐트사상과 동일한 진화양상 및 비선형성을 갖고 있다.

$$X_{n+1} = \lambda \left(1 - 4 \left| X_n - \frac{1}{4} \right| \right) \quad \left(0 < X_n < \frac{1}{2} \right) \quad (5)$$

$$X_{n+1} = \lambda \left(1 - 4 \left| X_n - \frac{3}{4} \right| \right) \quad \left(\frac{1}{2} \leq X_n < 1 \right)$$

(5)는 (6)과 같이 구간 별로 표현가능하다.

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

$$X_{n+1} = 4\lambda (0.5 - X_n) \quad \text{if } \frac{1}{4} \leq X_n < \frac{1}{2}$$

$$X_{n+1} = 4\lambda (X_n - 0.5) \quad \text{if } \frac{1}{2} \leq X_n < \frac{3}{4}$$

$$X_{n+1} = 4\lambda (1 - X_n) \quad \text{if } \frac{3}{4} \leq X_n < 1$$

그림 3은 2중 텐트 사상의 분기도를 나타내고 있다. 초기상태 $\lambda=0.25$ 로부터 카오스가 발생하기 시작하는 임계상태 $\lambda=\lambda_c=0.35$ 와 0과 1사이에서 모두 카오스가 나타나는 $\lambda=0.99$ 의 진화과정을 나타내고 있다. 이는 초기상태 $\lambda=0.5$ 로부터 최초의 카오스가 발생하는 지점이 $\lambda=0.71$ 인 일반적인 텐트사상에 대하여, 2중 텐트사상은 매우 빠르게 카오스 전이과정이 이루어진다는 것을 의미한다.

그림 4은 (5) 또는 (6)에 의하여 x_{n+1} 과 x_n 의 관계를 나타내고 있는 그림이다. $\lambda=0.25$ 인 한점의 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 λ

=0.35인 상태로 바뀔 수 있다. $\lambda=0.5$ 이 되면 $x_n=0.5$ 를 중심으로 좌측 텐트(①)가 완벽하게 생성되며, $\lambda=0.5$ 이상으로 진전하면서 우측텐트(②)가 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 4에서 보는 바와 같이 초기 상태로부터 0과 1범위 내에서 카오스가 발생하는 양상이 텐트가 2개 있는 모습과 동일하기 때문에 2중 텐트 사상이라 한다.

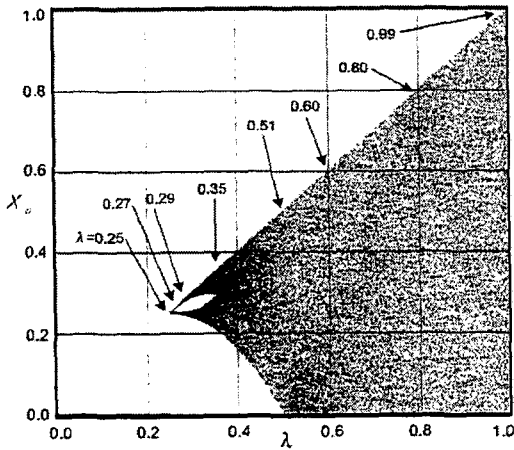


Fig.3 Bifurcation of double tent mapping with different λ

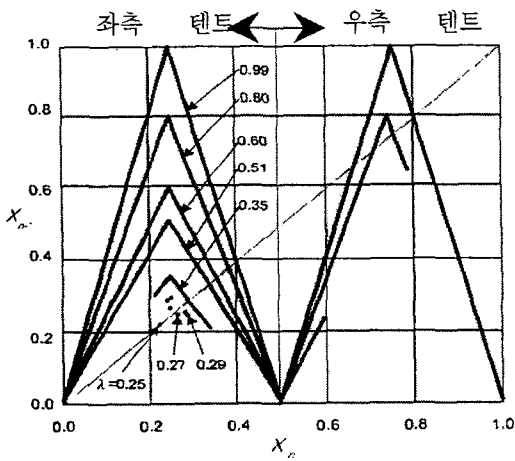


Fig.4 Double Tent mapping with different λ

제안된 2중 텐트 사상의 $\lambda=0.99$ 에서의 분기도를 이용하여 랜덤 수를 발생시킨 결과를 그림 5에 나타내었다. 0과 1사이의 랜덤 수가 고루 발생함을 알 수 있다. 그림 6은 LCG와 제안된 방법을 이용한 0과 1사이의 랜덤 수 분포를 발생 횟수에 대하여 나타내었다. 두 방식 모두 0과 1사이에서 랜덤 수가 고르게 발생하고 있다. 이 결과로부터 제안된 방법은 랜덤 수 발생기로서의 균일한 분포, 비 주기성, 랜덤 수의 발생 범위등의 3가지 조건을 모두 만족하고 있음을 알 수 있다.

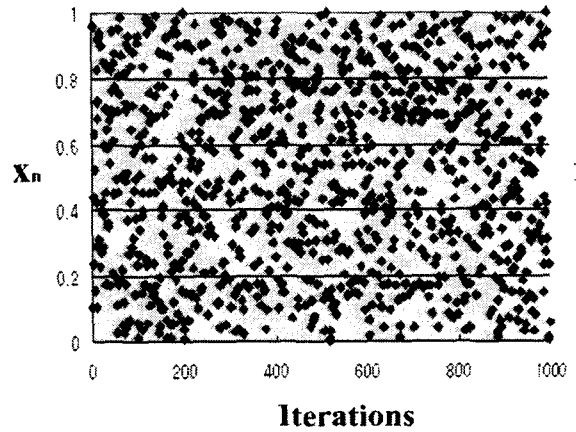
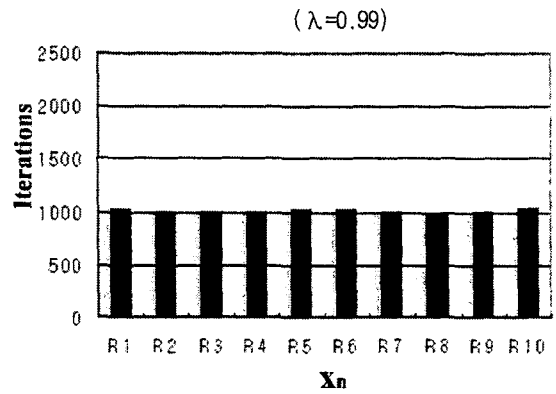
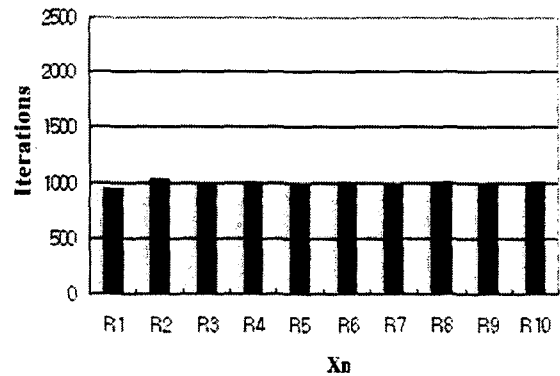


Fig.5 Random number generation by double Tent mapping



(a) LCG ($i_a=106, i_c=1283, i_m=6075$)



(b) Double tent mapping ($\lambda=0.99$)

Fig.6 Random number distribution

3. 실험 시스템

그림 7은 카오스 2중 텐트 사상의 분기도를 RPWM에 적용한 모터 구동 시스템을 보여주고 있다. 3상 모터 구동 시스템은 1.5kW 3상 농형 유도모터, 전압형 인버터 그리고 기계적 소음이 없는 ECB 부하로 구성되어 있다. 80C196 마이크로 컨트롤러는 3상 유도모터의 속도 지령치 및 매 스위칭마다 삼각파의 주파수를 결정하기 위해

(6)에 의해 카오틱 랜덤 수를 발생시킨다. 80C196은 소수점 연산이 불가능하므로 랜덤 값은 큰 수로 계산하여 복원하는 방법으로 unsigned long형($0 \sim 2^{32}$)이 사용되었다. 결국 D/A변환기로 출력되는 랜덤 값은 $0 \sim 2^7(0 \sim 127)$ 의 범위내에 존재한다. D/A변환기에서 발생한 랜덤 수는 샘플 홀더로 작용하는 D래치, MAX038 주파수 변조기 및 비교기에 의하여 랜덤 캐리어의 경사도가 실시간적으로 구해진다. 이상에서 발생한 랜덤 삼각파 캐리어는 3상 정현파 전압 지령치 신호와 비교되어 인버터의 PWM 스위칭 패턴을 생성한다.

3상 정현파 전압 지령치는 다음에 의하여 구현된다. 먼저 80C196의 타이머 오버 플로어 인터럽트를 이용하여 정확한 시간을 계산하고, 메모리된 테이블 값을 순차적으로 호출한다. 테이블 값은 8비트 I/O 포트를 이용하므로 $0x00 \sim 0xff$ 의 범위로 정하고 1주기당 150개 구간으로 나누어 테이블 값을 I/O 포트로 출력한다. 80C196의 출력 I/O포트를 8255를 이용해 3개로 확장하고, 각각 120도의 위상차를 두어 3상 정현파 값을 결정한다. 끝으로 3상 정현파 값을 각 상별로 D/A로 입력하면 3상 정현파가 구현된다.

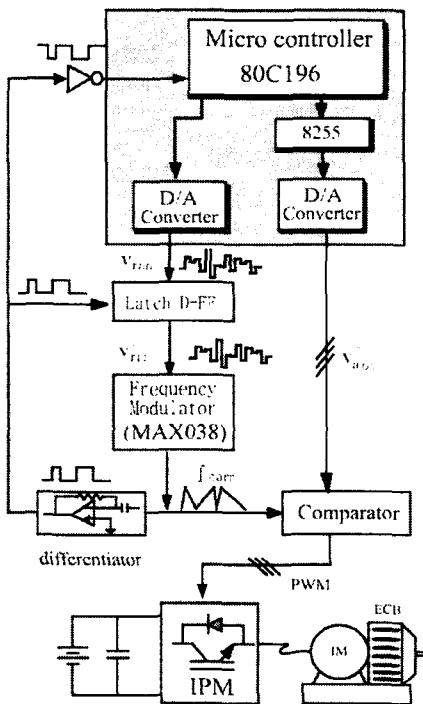
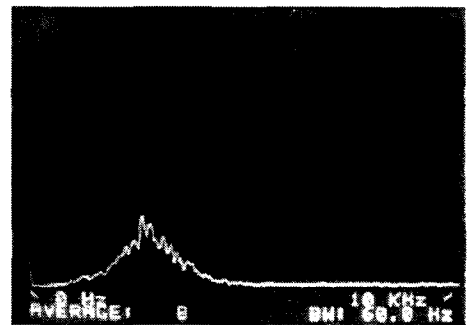


Fig.7 Proposed system

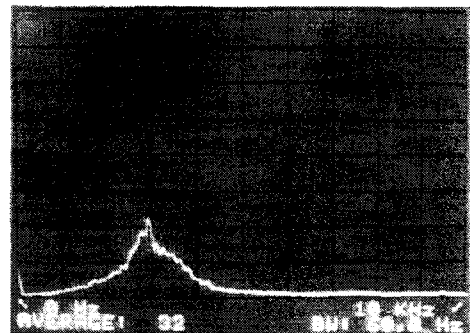
4. 실험 및 고찰

그림 8은 변조지수 $M=0.95$, 스위칭 주파수 $3\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$, 정격 주파수 60Hz 로 구동할 때, LCG와 제안된 방법에 의한 랜덤 주파수 삼각파 캐리어의 스펙트럼을 나타내고 있다. 종전의 방법과 제안된 방법은 그림 6의 분포도에서 이미 예측한 바와 같이 서로 동일한 스펙트럼

분포를 보이고 있으며, 3kHz 의 중심 주파수에 대해 $\pm 1\text{kHz}$ 의 대역폭으로 분포되고 있다. 그림 9는 각 방식에 의한 모터 전압과 전류파형을 나타내고 있다. 그림 9에서 보는 바와 같이 LCG와 2중 텐트 사상 모두 모터 전류 파형이 동일함을 알 수 있다. 그림 10과 그림 11은 그림 9의 전압과 전류파형에 대한 고조파 스펙트럼을 나타내고 있다. 전압과 전류의 고조파 스펙트럼은 어느 특정 주파수에 집중됨이 없이 광대역으로 분포하고 있으며 캐리어의 스펙트럼과 거의 유사하다. 이는 캐리어 신호와 비교된 기준파 신호로부터 결정된 PWM펄스에 의해 모터가 구동되기 때문이다.

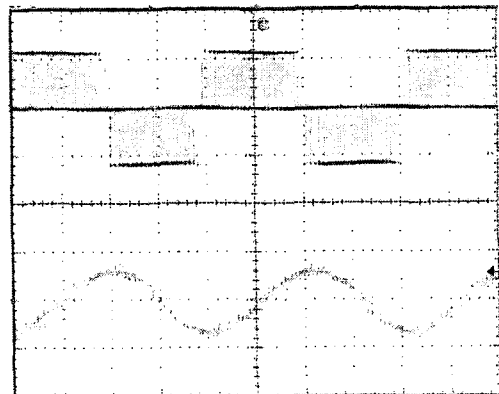


(a) LCG

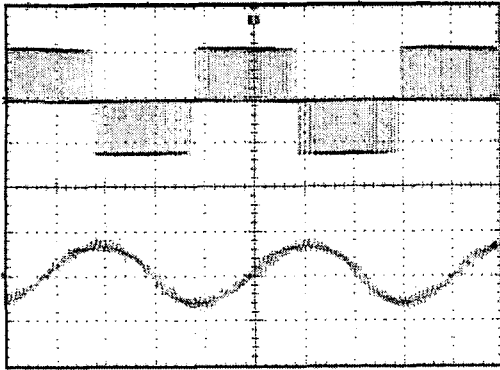


(b) Double tent mapping

Fig.8 Measured spectra of random Frequency carrier ($3\text{kHz} \pm \text{kHz}$)
(x-axis: $1\text{kHz}/\text{div}$., y-axis: $200\text{mV}/\text{div}$.)



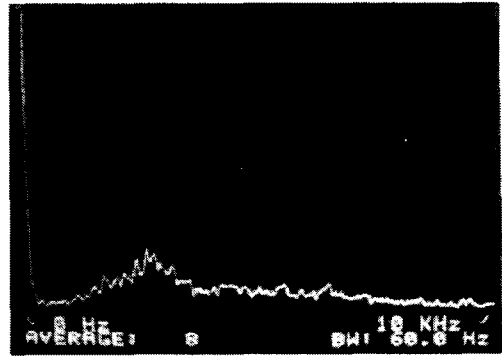
(a) LCG



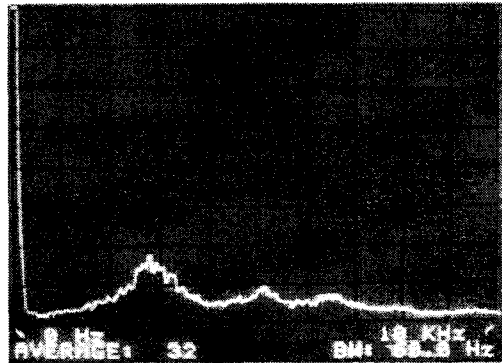
(b) Double tent mapping

Fig.9 Measured voltage and current waveforms (3kHz \pm kHz)(voltage:200v/div.,current:3A/div.)

그림 12는 2.5A 부하로 작용하는 ECB와 연결된 유도 모터로부터 발생하는 스위칭 소음의 스펙트럼을 측정 한 결과이다. 부하 조절은 ECB에 의하기 때문에 모터와의 연결에 따른 추가적인 기계적인 소음이 없으며, ECB를 사용하면 부하조절이 매우 용이하다. 소음은 무향실에서 측정되었으며, 소음 측정 장비로는 RION SA-01를 사용하였다. 실험 결과의 분석에 사용된 데이터는 유도 모터로부터 측면방향으로 0.15m 떨어진 곳에서 얻은 값을 사용하였다.

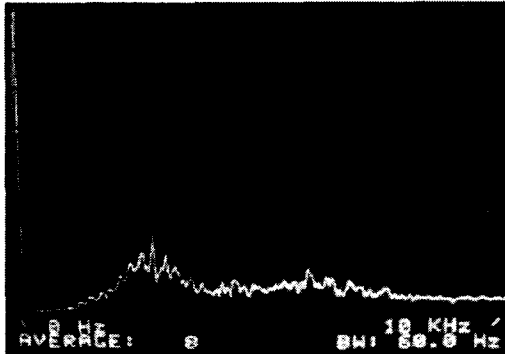


(a) LCG

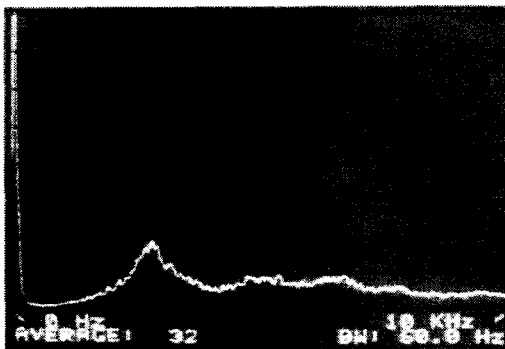


(b) Double tent mapping

Fig.11 Measured Motor current spectra (3kHz \pm kHz)(x-axis:1kHz/div.,y-axis:10mv/div.)

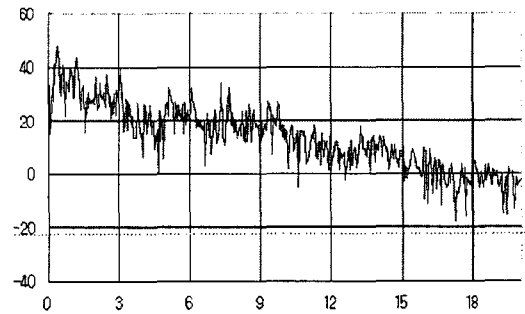


(a) LCG

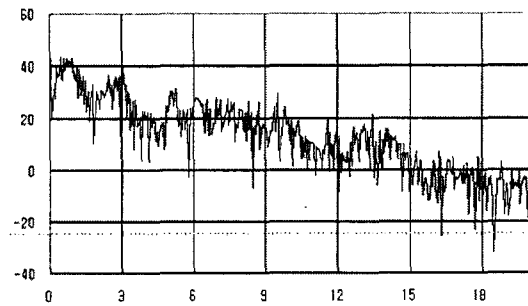


(b) Double tent mapping

Fig.10 Measured Motor voltage spectra (3kHz \pm kHz)(x-axis:1kHz/div.,y-axis:100mv/div.)



(a) LCG



(b) Double tent mapping

Fig.12 Measured Motor noise spectra for 2.5A load (x-axis:3kHz/div.,y-axis:20dB/div.)

그림 12(a)는 LCG에 의한 RPWM의 경우로, 어느 특정 주파수에 집중됨이 없이 대부분의 영역에서 광대역 분포를 하고 있다. 그림 12(b)는 카오스 2중 텐트사상 RPWM을 적용하였을 때의 소음 스펙트럼이다. 소음 스펙트럼의 광대역화 특성은 LCG의 경우와 거의 유사하나, 전체적인 선형화 특성은 오히려 카오스 RPWM의 경우가 약간 우수함을 알 수 있다. 결과적으로 간단한 수식을 사용하는 카오스 RPWM은 전압 / 전류 및 소음 스펙트럼의 광대역화에서는 LCG와 거의 동일하다. 그러나 서론에서 이미 언급한 바와 같이 카오스에 의한 기법은 LCG에 비해 수식이 매우 간단하고 안정적인 1개의 초기치를 갖고 있기 때문에 발산의 우려가 없다는 장점이 있다. 또한 상한이나 하한을 따로 정하지 않더라도 0 - 1 사이 값의 랜덤 수 획득이 가능하다.

5. 결 론

본 연구에서는 종전의 LCG에 의한 RPWM보다 랜덤 수 발생을 위한 수식이 간단한 카오스 2중 텐트 사상 RPWM기법을 제안하였다. 랜덤 수 발생을 위하여 2중 텐트 사상의 0과 1범위에서 완전한 카오스가 존재하는 $\lambda = 0.99$ 조건의 분기도를 이용하였다. 카오스 랜덤 수는 80C196 마이크로 콘트롤러가 전담하고 있으며, 80C196 으로부터 발생된 카오스 랜덤 수에 의하여 MAX038로부터 랜덤 주파수의 삼각파 캐리어가 발생된다. 본 연구의 타당성을 입증하기 위해 기계적인 소음이 없는 ECB를 부하로 사용한 3상 유도모터 구동 장치를 제작하였다. 그 결과, 삼각파 캐리어, 모터 전압 및 전류 그리고 소음 스펙트럼의 결과는 모두 특정 주파수에 집중되지 않고 광대역으로 분포하였으며 제안된 방법과 종전의 방법 모두 그 성능이 동일하였다. 동일한 성능이 얻어지는 경우라면, 안정적인 1개의 초기치와 간단한 수식, 발생 랜덤 수의 상한과 하한을 0과 1로 변환하는 과정이 필요치 않은 제안된 방법이 유리함을 알 수 있었다.

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] 정영국, 나석환, 임영철, 정성기, "유도전동기의 소음저감을 위한 DSP기반 PWM인버터의 랜덤 캐리어 주파수 변조기법의 구현", 대한전기학회 논문지, vol.52B, no.12, pp.608-615, 2003.

[3] K. Borisov, A.M. Trzynadlowski, "Experimental investigation of a naval propulsion drive model with PWM-based attenuation of the acoustic and electromagnetic noise", in Proc. IEEE IECON, 2003, pp.12-17.
 [4] K.A. Almarri, J.C. Balda and K. Carr, "An improved RPWM method based a novel multi-level linear congruential random number generator", in Conf. Rec. IEEE PESC, 2000, pp.218-223.
 [5] 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.
 [6] S.Y.R. Hui, S. Sathiakumar and Y. Shrivastava, "Progressive change of chaotic PWM patterns in dc-ac random PWM schemes using weighted switching decision", in Conf. Rec. IEEE PESC, 1997, pp.1454-1461.
 [7] J.R. Wood, "Chaos : A real phenomenon in power electronics", in Conf. Rec. IEEE APEC, 1989, pp.115-123.
 [8] I. Nagy, "Improved current controller for PWM inverter drives with the background of chaotic dynamics", in Conf. Rec. IEEE IECON, 1994, pp.561-566.
 [9] 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.
 [10] 김준형, 정영국, 오승열, 임영철, "카오스 랜덤 PWM기법을 이용한 3상 유도모터의 스위칭 소음 저감"; 대한전기학회 B부문 추계학술대회 논문집, 2004, pp.134-138
 [11] 안상규, "카오틱 시스템을 이용한 랜덤수 생성", 제11회 한양대학교 물리학과 학술제 발표주제, 2002.
 [12] 김민준, 문희태, "혼돈끝개의 텐트 사상 진화의 구조적 안정성", 한국물리학회지(새물리), vol.35, no.6, pp.728-732, 1995.
 [13] 문희태, "혼돈끝개의 기본형과 그 의미에 대하여", 한국물리학회지(새물리), vol.34, no.4, pp.363-369, 1994.