

Logistic Map의 분기트리를 이용한 카오스 랜덤 캐리어 PWM에 의한 3상 유도 전동기의 스위칭 소음 저감

*김종남 **김준형 +정영국 *임영철

*전남대 전기공학과 ** (주)3M기술연구소 +대불대 컴퓨터정보공학부

Mitigation of the Switching Noise in Three-Phase Induction Motor by the Chaotic Random Carrier PWM using a Bifurcation Tree of the Logistic Map

*J.N. Kim, **J.H. Kim +Y.G. Jung and *Y.C. Lim

*Chonnam National University, **3M Korea +Daebul University

ABSTRACT

본 연구에서는 카오스 랜덤 캐리어 PWM에 의한 3상 유도 전동기의 스위칭 소음 저감에 대하여 다루고 있다. 랜덤 수 발생기로서는 종전부터 사용해 온 선형일치발생기(LCG)대신에 Logistic map의 분기트리를 사용하였다. 카오스 랜덤 수 발생은 80C196 마이크로 콘트롤러가 담당하고 있으며, 80C196으로부터 발생된 카오스 랜덤 수와 MAX038에 의하여 삼각파 랜덤 캐리어가 발생되고 있다. 1.5kw급 3상 유도전동기 구동 시스템에 카오스 랜덤 PWM와 종전의 방법을 적용하여 전동기 전압 및 전류 그리고 스위칭 소음의 스펙트럼을 고찰하였다.

법에 적용하였으며, 카오스 랜덤 수 발생은 80C196 마이크로 콘트롤러가 담당하고 있다. 카오스 랜덤 수는 80196 외부에 있는 MAX038에 의하여 삼각파 랜덤 캐리어를 실시간적으로 발생한다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 1.5kw급 3상 농형 유도전동기 구동 시스템을 제작하였다. 그 결과, 전동기 전압 및 전류와 전동기로부터 발생하는 스위칭 소음의 스펙트럼을 광대역 주파수 영역으로 확산하였으며, 제안된 방법과 종전의 방법을 비교 검토하였다.

1. 서 론

현재 산업현장의 동력용 전동기에 적용되고 있는 인버터는 확정적 주파수의 PWM에 의하여 제어되고 있다. 확정적 주파수의 PWM기반의 전동기 구동장치에 발생하는 스위칭 소음은 비 확정적인 랜덤 PWM^[1,2,4]에 의하여 비교적 쉽게 해결 가능하다. 랜덤 PWM기법을 위한 랜덤 수 발생기는 정보공학에서 소스 코딩과 정보 압축과 관련하여 중심적인 위치에 있으며 수학적 방법에 의해 구현 가능하다. 수학적 방법으로는 여러 가지가 있으나 그 중에서도 선형일치발생기(Linear Congruential Generator : LCG)^[2]가 보편적으로 사용되고 있다. 이 방법은 랜덤 수를 빠르게 발생할 수 있으나 초기치들 사이에 서로의 제약 조건이 존재하며, 만약 초기치를 부적절하게 선택하는 경우에는 주기성을 갖는 랜덤 수가 발생하기 때문에 초기치 선정에 신중해야 한다. 일반적으로 랜덤 수 발생기는 균일한 분포, 비 주기성, 발생 랜덤 수의 범위의 3가지 조건을 만족해야 좋은 랜덤 발생기라 할 수 있다.

본 연구에서는 LCG 대신에 카오스 특성을 갖는 Logistic map의 분기트리를 랜덤 수 발생기^[3]로 한 유도 전동기의 스위칭 소음 저감 시스템을 제안하였다. Logistic map은 페어홀스트(verhulst)에 의하여 도입되었으며 개체 증가를 수학적으로 모델링한 식이다. 본 연구에서는 발생된 카오스 랜덤 수를 삼각파 랜덤 캐리어 기

2. 이 론

2.1 종전의 랜덤수 발생기^[2]

LCG에 의해 랜덤 수를 발생하는 순서는 다음과 같다. 먼저 i_a , i_c , i_m 이 선택된 상수로써 각각 승산계수(multiplier), 증분계수(increment), 나머지 계수(modulus)라 할 때, 0부터 i_m 사이의 정수는 다음 식에 의해 발생된다.

$$f_{ran+1} = (f_{ran} * i_a + i_c) \% i_m \quad (1)$$

(1)에 의해 발생된 랜덤 수를 0부터 1사이의 실수로 변환하기 위해서는 (2)의 과정이 필요하다.

$$ran = \frac{(float)f_{ran}}{(float)i_m} \quad (2)$$

만일 j_{low} 부터 j_{high} 사이의 정수를 원한다면,

$$f = f_{low} + \frac{((f_{high} - f_{low} + 1) * f_{ran})}{i_m} \quad (3)$$

에 의하여 원하는 랜덤 수를 구할 수 있다. 여기서 f_{low} , f_{high} 는 발생할 랜덤 수의 하한 및 상한이다. 이렇게 구현된 랜덤 발생기는 여러 종류의 프로세서나 마이크로 콘트롤러에서 사용될 수 있다. 그러나 선택된 계수 i_a , i_c , i_m 들을 사용하여 연산하는 도중에 오버 플로우가 발생하지 않도록 주의하여야 한다. 특히 i_c 는 소수(prime number)이어야 하며, i_c 와 i_m 은

$$i_c \approx (\frac{1}{2} - \frac{1}{6} \sqrt{3}) i_m \quad (4)$$

인 관계를 갖고 있다.

2.2 제안된 랜덤 수 발생기^[3]

카오스 이론^[4,5]은 아주 단순한 수식으로부터 아주 복잡한 현상을 설명할 수 있는 이론이다. 실제 카오스 현상은 인구 증가를 나타내는 (5)와 같은 간단한 차분방정식에서도 나타난다.

$$x_{n+1} = ax_n(1-x_n) \quad (5)$$

일반적으로 이 식을 Logistic map이라 하며, 페어홀스트에 의하여 도입되었으며, 개체 증가에 영향을 미치는 모든 다른 환경인자들의 효과를 간단하게 포함시켜 해석하는 비선형 방정식으로 알려져 있다. 초기치 x_0 에서 제어변수 a 를 증가시켜가며 시계열의 정상상태의 x_n 을 그리면 그림 1이 얻어진다. 제어변수 a 가 1과 3사이에서는 안정한 한점의 상태를 가지지만 3이상에서는 분기과정을 계속한다. 즉 a 가 증가함에 따라서 x_n 과 $1-x_n$ 의 항이 수축과 팽창의 과정을 계속하면서 안정한 주기상태에서 분기과정을 계속하여 무한대의 주기성을 갖는 카오스 상태로 변화한다. 이 분기트리에서 0과 1사이에서 모두 랜덤 수가 나타나는 경우는 제어변수 $a=4.0$ 인 카오스 영역이다.

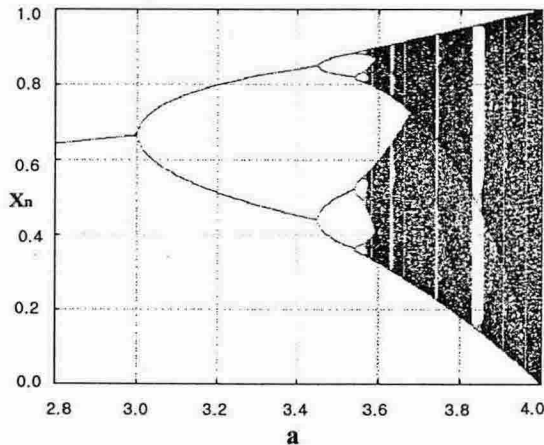


그림 1 Logistic map의 분기트리(2.8<a<4.0)
Fig.1 Bifurcation tree of the logistic map (2.8<a<4.0)

그림 2는 이때의 Logistic map을 카오스 분기에 따른 발생되는 랜덤 수의 분포를 주기별로 나타내고 있다. 그림 1의 제어변수 $a=4.0$ 인 카오스 영역은 그림 2 (b)에서 "chaotic state"로 표시된 부분을 말하며, 이 상태를 2차원 평면상으로 나타내면 그림 2(a)의 붉은 원으로 나타낸 공간내에 무수히 많은 카오스 랜덤 수가 분포함을 알 수 있다. 본 연구에서는 그림 2(a)의 $a=4.0$ 에서의 붉은 원 영역을 카오스 랜덤 수로 사용하였다.

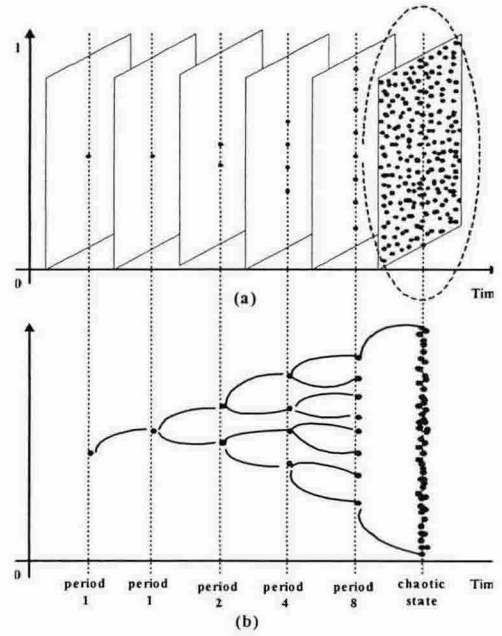


그림 2 주기별 발생 랜덤 수의 분포도
Fig.2 Distribution graph of the generated random number according to the periods
(a)Generated random number (b)Bifurcation process

3. 실험 및 결과 고찰

3.1 실험 시스템

그림 3은 제안된 방법을 입증하기 위한 1.5kW의 산업용 유도전동기와 ECB (Eddy Current Brake) 부하장치로 구성된 실험 시스템을 나타내고 있다.

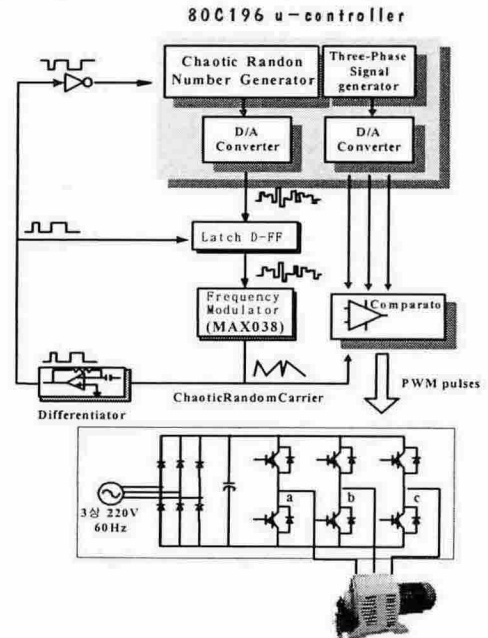
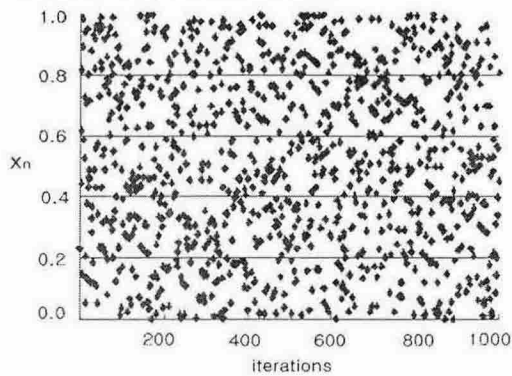


그림 3 실험 시스템
Fig.1 Experimental system

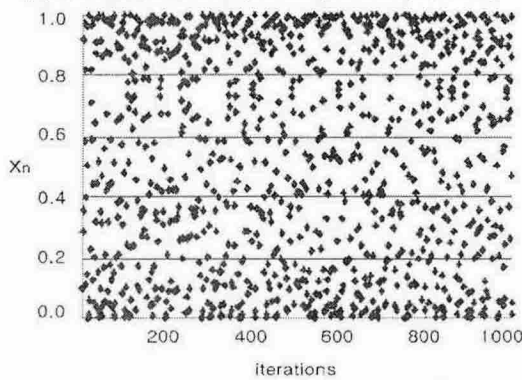
80C196 마이크로 콘트롤러는 3상 유도전동기의 속도 지령치 및 매 스위칭마다 삼각파의 주파수를 결정하기 위해 (5)에 의해 카오스 랜덤 수를 발생시킨다. 80C196에서 발생된 랜덤 수는 샘플 홀더로 작용하는 D래치, MAX038 주파수 변조기 및 비교기에 의하여 랜덤 캐리어의 경사도가 실시간적으로 구해진다. 이상에서 발생된 랜덤 삼각파 캐리어는 3상 정현파 전압 지령치 신호와 비교되어 인버터의 PWM 스위칭 패턴을 생성한다.

3.2 결과 및 고찰

변조지수 $M=0.99$, 2.5A부하, 스위칭 주파수 $3\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$, 정격 주파수 60Hz로 전동기를 구동할 때, 전동기 전압 및 전류 그리고 전동기로부터 발생하는 스위칭 소음 스펙트럼에 대한 분석을 하였다.



(a) Conventional LCG (ia=106, ic=1283, im=6075)



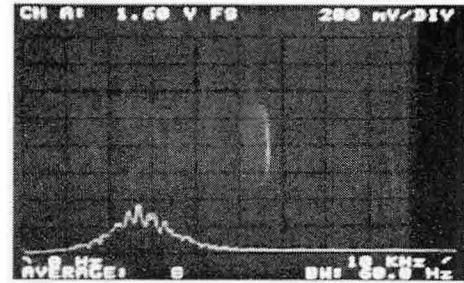
(b) Proposed method ($X_n=0.1, a=4.0$)

그림 4 각 방식별로 발생된 랜덤 수 분포

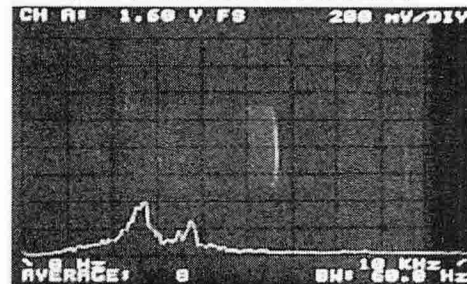
Fig.4 Random number distribution for each method

그림 4는 각 방식별로 발생된 랜덤 수의 분포를 나타내고 있다. 먼저 그림 4(a)는 종전의 LCG에 의한 0과 1 사이의 랜덤 수 분포를 나타내고 있다. LCG에 의해 발생된 랜덤 수는 0과 1 사이에 고르게 분포하고 있다. 그림 4(b)는 $a=4.0$ 에서 Logistic map에 의해 발생된 0과 1 사이의 랜덤 수 분포이다. 그림 4(a)의 LCG와 비교하여 보면 랜덤 수 분포는 0과 1부근에 좀 더 많이 분포하고 있다. 이는 Logistic map의 카오스 분기트리에 의해 발생된 랜덤 수는 균일한 분포를 가지지는 못함을 의미한다. 그러나 카오스 랜덤 PWM은 랜덤 수 발생이 매우

간단하고 안정적인 1개의 초기치를 갖기 때문에 발산의 우려가 없다는 장점이 있다. 또한 종전의 LCG에 비하여 1개의 초기치 및 제어변수 a 에 따른 다양한 형태를 갖는 카오스 랜덤 수 발생기로서 사용될 수 있다. 특히 LCG는 (2),(3)에 의하여 상한과 하한이 결정되지만 Logistic map의 분기트리를 이용한 방법은 상한이나 하한을 따로 정하지 않더라도 0 - 1 사이 값의 랜덤 수 획득이 가능하다는 장점이 있다.



(a) Conventional LCG ($3\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$)

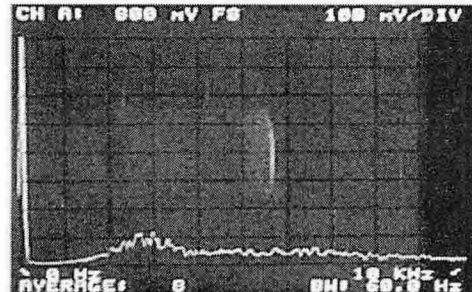


(b) Proposed method ($3\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$)

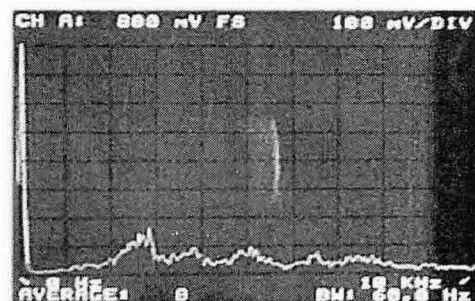
그림 5 랜덤 캐리어의 스펙트럼

Fig.5 Random carrier spectra

(x-axis:1kHz/div., y-axis:200mv/div.)



(a) Conventional LCG ($3\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$)



(b) Proposed method ($3\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$)

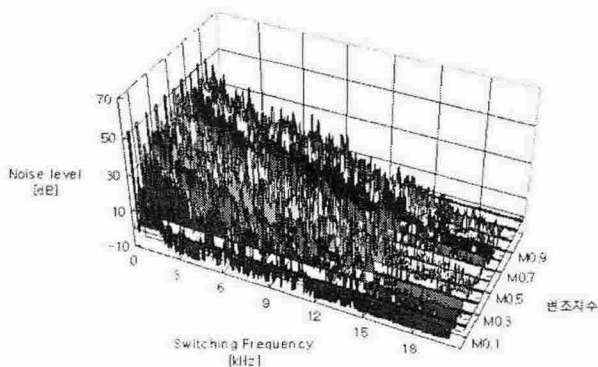
그림 6 전동기 전압의 스펙트럼

Fig.6 Measured spectra of the motor voltage

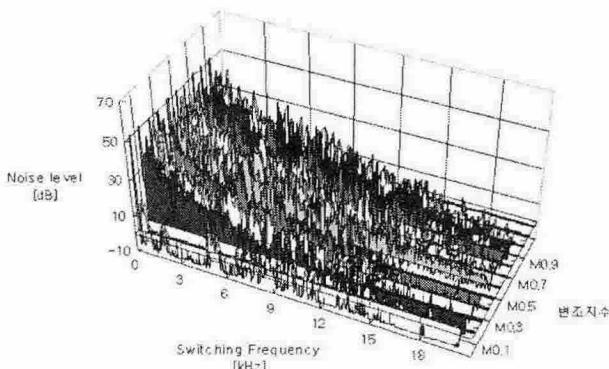
(x-axis:1kHz/div., y-axis:100mv/div.)

먼저 그림 5는 각 방식에 의한 랜덤 캐리어의 스펙트럼을 나타낸 것으로 LCG에 의한 방법은 3kHz를 중심으로 $\pm 1\text{kHz}$ 대역폭의 스펙트럼의 분포를 보이고 있다. 그러나 제안된 방법은 3kHz와 4kHz의 주파수 성분이 존재하고 있다. 이는 Logistic map의 분기도에 의해 발생된 랜덤 수는 그림 4(b)에서 보는 바와 같이 0과 1에 약간 더 집중된 분포를 하기 때문이다. 이와 같은 문제점은 다른 형태의 카오스 사상을 선택하면 해결되리라 생각된다.

그림 6은 각 방식에 의한 전동기 전압에 대한 고조파 스펙트럼을 나타내고 있다. 전압의 고조파 스펙트럼은 그림 5에서 나타낸 캐리어의 스펙트럼과 거의 유사함을 알 수 있다. 이는 캐리어 신호와 비교된 기준과 신호로부터 결정된 PWM펄스에 의해 전동기가 구동되기 때문이다.



(a) Conventional LCG (3kHz \pm kHz)



(b) Proposed method (3kHz \pm kHz)

그림 7 2.5A 부하의 경우, 측정된 전동기 소음의 3차원 스펙트럼

Fig.7 3-D motor noise spectra for 2.5A load

그림 7은 2.5A 부하로 작용하는 ECB와 연결된 유도전동기로부터 발생하는 스위칭 소음의 스펙트럼을 변조지수의 변화에 따라 측정한 3차원 소음 스펙트럼 결과이다. 부하조절은 ECB에 의하기 때문에 전동기와의 연결에 따른 추가적인 기계적인 소음이 없으며, 부하조절이 매우 용이하다. 그림 7(a)는 종전의 LCG에 의한 결과로서, 약 5kHz 부근의 스펙트럼 증가를 제외한 대부분의 영역에서 광대역화 특성을 나타내고 있다. 그림 7(b)는

제안된 방법을 적용하였을 때의 소음 스펙트럼이다. 소음 스펙트럼의 광대역화 특성은 LCG의 경우와 거의 유사함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 종전의 LCG에 의한 랜덤 수 발생과정보다 훨씬 간단한 카오스 랜덤 수 발생기법에 의한 3상 유도전동기의 스위칭 소음 저감 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템의 랜덤 수 발생방법은 Logistic map의 제어변수 $a=4.0$ 인 카오스 영역의 분기트리를 이용하였다. 카오스 분기트리에 의한 랜덤 수 발생기는 종전의 방법에 비하여 랜덤 캐리어의 중심 주파수에서의 고조파 스펙트럼이 약간 강하게 존재하는 단점이 있다. 그러나 랜덤 수 발생과정에서 안정적인 1개의 초기치와 1개의 수식만이 요구되며, 발생 랜덤 수의 상한과 하한을 0과 1로 변환하는 수식이 필요치 않아서 랜덤 수 발생과정이 간단하다는 장점이 있다. 또한 제안된 방법은 전압 및 전류 스펙트럼의 광대역화에서 약간 불리한 것처럼 보였을 지라도, 전동기 소음 스펙트럼의 광대역화에서는 LCG와 거의 동일한 특성을 보였다.

이 논문은 전남대학교 고품질전기전자부품 및 시스템연구센터의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] 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.
- [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 PWM", IEE Proc. Electr. Power Appl., vol.149, no.3, May, pp.195-202, 2002.
- [3] 안상규, "카오틱 시스템을 이용한 랜덤수 생성", 제11회 한양대학교 물리학과 학술제 발표주제, 2002.
- [4] 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.
- [5] J.R. Wood, "Chaos : A real phenomenon in power electronics", in Conf. Rec. IEEE APEC, 1989, pp.115-123.