

카오스 랜덤 PWM기법을 이용한 3상 유도모터의 스위칭 소음저감

김준형¹, 정영국², 오승열¹, 임영철¹
¹전남대 전기공학과, ²대불대 컴퓨터정보공학부

Switching Noise Reduction in Radiated from Three-Phase Induction Motor by Chaotic Random PWM Technique

J.H. Kim, Y.G. Jung, S.Y. Oh, Y.C. Lim
 Chonnam National University, Daebul University

Abstract - 본 연구에서는 카오스 랜덤 PWM(Chaotic Random PWM) 기법에 의한 3상 유도모터의 스위칭 소음 저감에 대하여 다루고 있다. 일반적으로 사용되고 있는 랜덤 발생기로서 선형일치발생기(Linear Congruential Generator : LCG)대신에 로지스트 사상(Logistic Map)의 분기도(Bifurcation Diagram)를 랜덤 발생기로 사용하였다. 카오스 랜덤수 발생기는 80C196 마이크로 콘트롤러가 전담하고 있으며, 80C196으로부터 발생된 카오스 랜덤 수와 MAX038에 의하여 삼각과 랜덤 캐리어가 발생되고 있다. 1.5kw급 3상 유도모터 구동 시스템에 카오스 RPWM기법을 적용하여 모터전압 및 전류 그리고 스위칭 소음의 스펙트럼을 고찰하였다. 카오스 RPWM과 LCG에 의한 RPWM의 결과를 각각 비교하였으며 본 연구의 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

현재 산업현장의 동력용 또는 제어용 기기에는 일반적으로 모터가 사용되고 있으며, 모터는 PWM인버터로 대표되는 전력전자 변환장치에 의하여 동작되고 있다. PWM기법은 스위칭 주파수의 위치 얹는 정수배 고조파를 발생시키고, 또한 EMI문제와 인버터 구동장치의 근본적인 스위칭 소음을 유발하고 있다. 스위칭 모드 전원장치(SMPS)와 같이 고속으로 스위칭하는 전력전자 변환장치는 스위칭 소음보다는 EMI가 심각한 문제로 등장하며 이는 곧바로 전력전자 변환기의 신뢰도에 영향을 주고 있다[1,2].

이와 같은 확정적 주파수의 PWM기법은 근래에 와서 주목 받기 시작한 RPWM (Random PWM)[1-7]에 의하여 비교적 쉽게 해결 가능하다. RPWM방법은 근본적으로는 일반 PWM과는 동일하나 PWM펄스의 위치나 삼각과 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[1-4] 및 진동 스펙트럼의 광대역화를 실현할 수 있어서 전력전자 응용 모터 구동분야에 주목을 받고 있다.

RPWM기법에서 사용되는 랜덤 수 발생기는 정보공학에서 소스 코딩과 정보 압축과 관련하여 중심적인 위치에 있으며 논리적인 방법과 수리적인 방법에 의해 구현 가능하다. 논리적인 방법으로는 시프트 레지스터와 XOR 게이트의 논리적인 조합[4-5]으로 구현되며 출력은 0과 1만을 랜덤하게 발생하는 RLL (Read-Lag PWM)방법의 일종이다. 이 방법은 구현이 매우 간단하나 발생되는 랜덤 수가 0과 1로만 한정되므로 스펙트럼의 광대역화에는 한계가 있다. 한편 수리적인 방법으로는 여러 가지가 있으나 그 중에서 선형일치발생기(Linear Congruential Generator : LCG)[3,4,6]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 범위등의 3가지 조건을 만족해야 좋은 랜덤 발생기라 할 수 있다.

본 연구에서는 LCG 대신에 카오스 특성을 갖는 로지스트 사상의 분기도를 랜덤 수 발생기[8]로 한 유도모터의 소음저감 시스템을 제안하였다. 로지스트 사상은 페어홀스트(verhulst)에 의하여 도입되었으며 개체 증가를 수학적으로 모델링한 식이다. LCG에 비해 로지스트 사상을 랜덤 수 발생기로 사용하면 우선 수식이 간단해지며, 발생된 랜덤 수를 0과 1사이의 수로 변환하기 위한 단계가 생략되고, 안정된 1개의 초기치와 제어변수로 다양한 카오스 랜덤 수를 발생할 수 있다.

본 연구에서는 발생된 카오스 랜덤 수를 삼각과 랜덤 캐리어 주파수 기법에 적용하였으며, 카오스 랜덤 수 발생은 80C196 마이크로 콘트롤러가 전담하고 있다. 카오스 랜덤 수는 80196 외부에 있는 MAX038에 의하여 삼각과 랜덤 캐리어를 실시간적으로 발생한다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 1.5kw급 3상 농형 유도모터 구동시스템을 제작하였다. 그 결과, 모터 전압 및 전류와 모터로부터 발생하는 스위칭 소음의 스펙트럼을 광대역 주파수 영역으로 확산 하였으며, 카오스 RPWM과 LCG에 의한 RPWM의 결과를 비교하여 입증하였다.

2. 랜덤 수 발생기법

2.1 LCG[3,4,6]

랜덤 수는 수리적인 방법과 논리적인 방법에 의하여 발생할 수 있다. 수리적인 방법은 랜덤 수 발생을 위하여 수식을 소프트웨어적으로 처리하는 것이며 선형 일치 발생기(LCG)가 대표적이라 할 수 있다. 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.

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

만일 0부터 1사이의 실수를 랜덤하게 발생하려면,

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

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 발생하

지 않도록 주의하여야 한다. 특히 i_c 는 소수 (prime number)이어야 하며, i_c 와 i_m 은

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

인 관계를 갖고 있다. LCG에 의한 0과 1사이의 랜덤 수 분포를 그림 1에 나타내었다. 발생된 랜덤 수는 전반적으로 0과 1사이에 고르게 분포하고 있다.

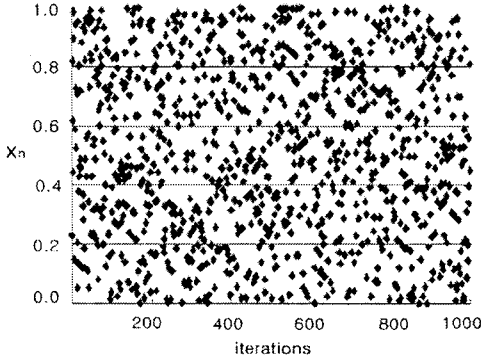


Fig.1 Random number distribution of the LCG ($i_a=106$, $i_c=1283$, $i_m=6075$)

2.2 카오스 랜덤 수 발생기[8]

카오스 이론[8-13]은 아주 단순한 수식으로부터 아주 복잡한 현상을 설명할 수 있는 이론이다. 실제 카오스 현상은 인구 증가를 나타내는 (4)와 같은 간단한 차분방정식에서도 나타난다.

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

일반적으로 이 식을 로지스트 사상이라 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 2가 얻어진다.

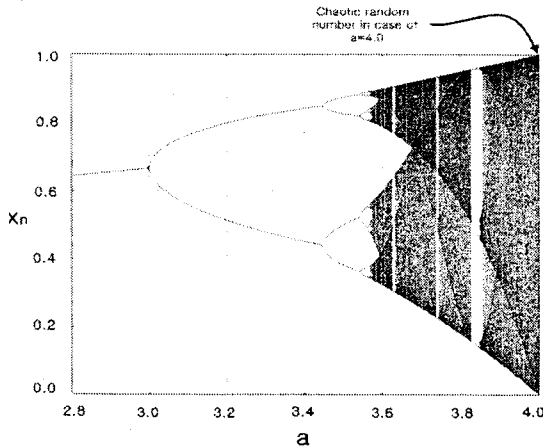


Fig.2 Bifurcation diagram of the logistic map ($2.8 < a < 4.0$)

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. 그리고 카오스 영역속의 질은 선들은 그 계가 발견될 수 있

는 확률이 높은 상태를 말하며 이것은 카오스 영역속의 또 하나의 규칙의 다른 형태이다.

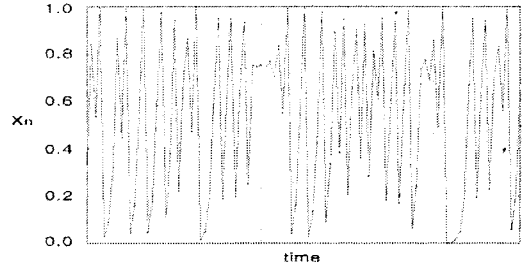


Fig.3 The logistic map in time domain($a=4.0$)

이 분기도에서 0과 1사이에서 모두 랜덤 수가 나타나는 경우는 제어변수 $a=4.0$ 가 되는 카오틱 영역이며, 이때의 로지스트 사상을 시간영역에서 나타낸 것이 그림 3이다. 그림 3을 보면 0과 1사이에서 x_n 은 비 주기적인 변화를 보임을 알 수 있다. 그림 4는 $a=4.0$ 에서 로지스트 사상에 의해 발생된 0과 1사이의 랜덤 수의 분포를 나타내고 있다. 그림 1에서 나타낸 LCG와 비교하여 보면 랜덤 수 분포는 0과 1부근에 좀 더 많이 분포하고 있음을 알 수 있다. 이는 로지스트 사상의 카오스 분기도에 의해 발생된 랜덤 수는 균일한 분포를 가지지는 못함을 의미한다. 그러나 카오스 RPWM은 랜덤 수 발생이 간단하고 안정적인 1개의 초기치를 갖기 때문에 발산의 우려가 없다는 장점이 있다. 또한 LCG에 비하여 1개의 초기치 및 제어변수 a 에 따른 다양한 형태를 갖는 카오스 랜덤 수 발생기로 사용될 수 있다. 특히 LCG는 (3)에 의하여 상한과 하한이 결정되지만 로지스트 사상의 분기도를 이용한 랜덤 수 발생기법은 상한이나 하한을 따로 정하지 않더라도 0 - 1 사이 값의 랜덤 수 획득이 가능하다.

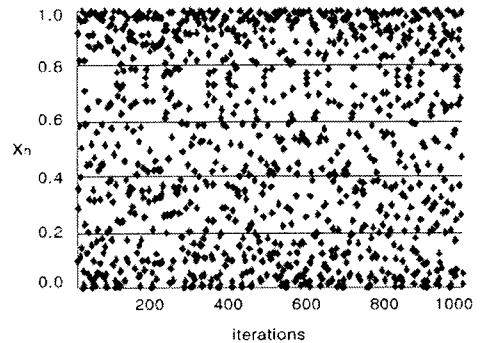


Fig.4 Random number distribution of the chaotic bifurcation ($x_n=0.1$, $a=4.0$)

3. 실험 시스템

그림 5는 로지스트 사상의 분기도를 RPWM에 적용한 제어된 시스템을 보여주고 있다. 80C196 마이크로 콘트롤러는 3상 유도모터의 속도 지령치 및 매 스위칭마다 삼각파의 주파수를 결정하기 위해 (5)에 의해 카오틱 랜덤 수를 발생시킨다. 80C196로부터 발생된 랜덤 수 출력은 샘플 홀더로 작용하는 D래치, 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. 80C196의 랜덤 변조 함수로부터 출력되는 신호의 크기에 비례하는 주파수의 랜덤 삼각파 캐리어는 3상 정현파 전압 지령치와 비교되어 인버터의 온/오프 스위칭 패턴을 결정한다. 랜덤 삼각파 캐

리어 변조기법에서는 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.

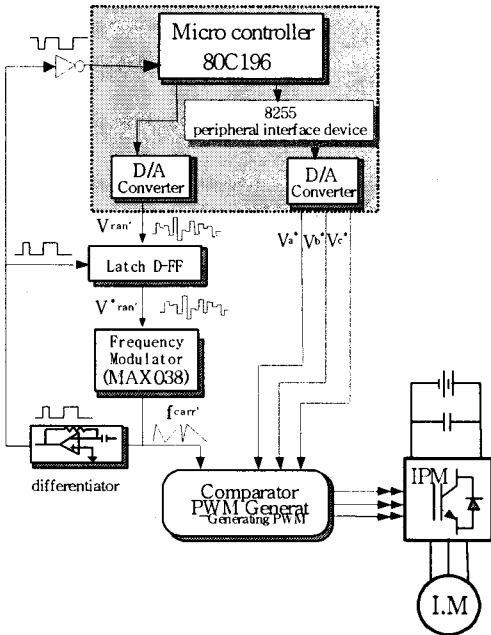


Fig.5 The chaotic RPWM based proposed system

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 0x00~0xff의 범위로 정하고 1주기당 150개 구간으로 나누어 테이블 값을 I/O 포트로 출력한다. 80C196의 출력 I/O 포트를 8255를 이용해 3개로 확장하고, 각각 120도의 위상차를 두어 3상 정현파 값을 결정한다. 끝으로 3상 정현파 값을 각 상별로 D/A로 입력하면 3상 정현파가 구현된다. 표 1은 본 연구의 실험에 사용된 시스템 파라미터를 나타내고 있다.

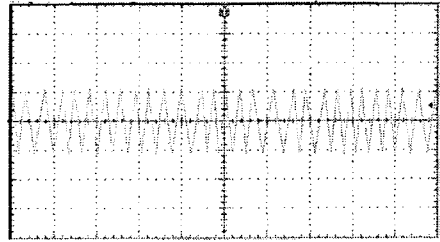
표 1 실험시스템 파라미터
Table 1 Parameters of experimental system

| | |
|-------------------------|---|
| Random Number Generator | 80C196 |
| IPM | PMC20U060 - 600V/20A |
| PWM | Carrier Modulated PWM / (1KHz~5KHz) |
| Fundamental frequency | 60Hz |
| Frequency Modulator | MAX038 |
| Motor | Three phase squirrel cage Induction Motor |
| Load | ECB |

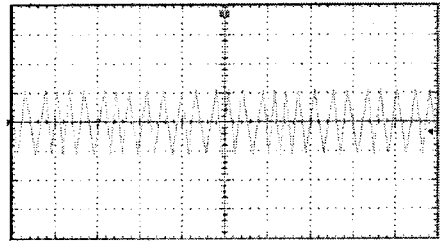
4. 실험 및 고찰

로지스트 사상의 카오스 분기도에 의한 랜덤 캐리어 주파수 변조기법을 1.5kW의 산업용 유도모터와 ECB (Eddy Current Brake) 부하장치로 구성된 시스템에 적

용하여 변조지수M=0.9, 정격 주파수 60Hz로 구동할 때, 모터 전압 및 전류 그리고 모터로부터 발생하는 스위칭 소음 스펙트럼에 대한 분석을 하였다.

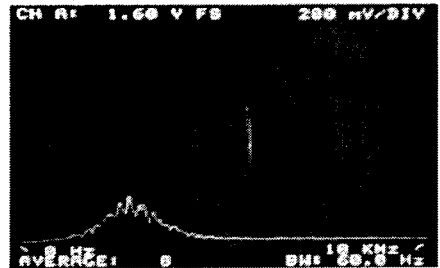


(a) LCG

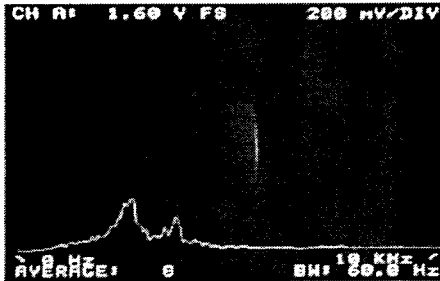


(b) Chaotic bifurcation

Fig.6 Random carrier (3kHz±1kHz)



(a) LCG

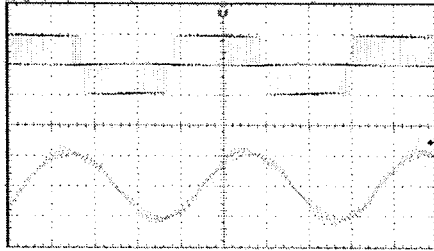


(b) Chaotic bifurcation

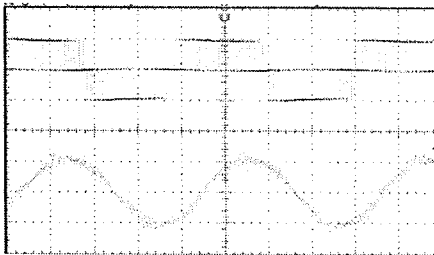
Fig.7 Random carrier spectra(3kHz±1kHz)
(x-axis:1kHz/div.,y-axis:200mv/div.)

먼저 그림 6과 그림 7은 각 방식에 의한 랜덤 캐리어를 비교한 것으로 중심 주파수 3kHz에 대해 ±1kHz의 대역폭으로 동작하고 있다. 그림 7은 각 방식에 대한 스펙트럼을 나타낸 것으로 LCG에 의한 방법은 3kHz를 중심으로 ±1kHz 대역폭의 스펙트럼의 분포를 보이고 있다. 그러나 카오스 분기도에 의한 방법은 3kHz와 4kHz의 주파수 성분이 존재하고 있다. 이는 로지스트 사상의 분기도에 의해 발생된 랜덤 수는 그림 4에서와 같이 랜덤한 분포를 보이지 않고 0과 1에 약간 더 집중하기 때문에 발생한 현상이다. 이와 같은 문제점은 다른 형태의 카오스 사상을 선택하면 해결되리라 생각된다.

그림 8은 각 방식에 의한 모터 전압과 전류파형을 나타내고 있다. 그림 8에서 보는 바와 같이 모터전류 파형은 LCG에 의한 방법과 거의 동일함을 알 수 있다. 그림 9와 그림 10은 그림 8로 나타낸 전압과 전류의 고조파 스펙트럼을 나타내고 있다. 전압과 전류의 고조파 스펙트럼은 캐리어의 스펙트럼과 거의 유사함을 알 수 있다. 이는 캐리어 신호와 비교된 기준과 신호로부터 결정된 PWM펄스에 의해 모터가 구동되기 때문이다.



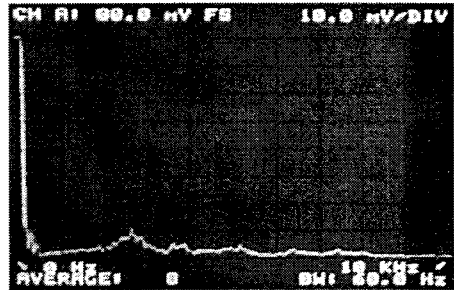
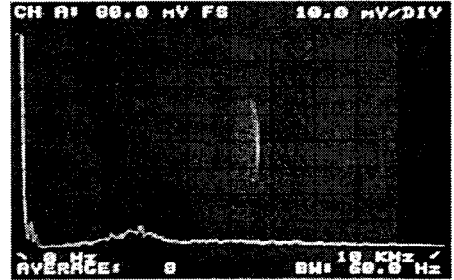
(a) LCG



(b) Chaotic bifurcation

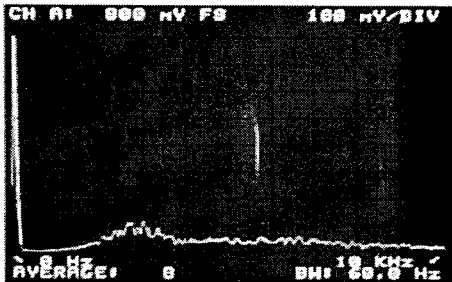
Fig.8 voltage and current waveforms (3kHz±1kHz) (voltage:200V/div.,current:0.5A/div.)

LCG에 의한 방법은 그림 7(a)로 나타낸 캐리어의 고조파 스펙트럼과 같이 3kHz를 중심으로 한 정규분포를 하고 있으며, 카오스 분기도에 의한 방법은 그림 7(b)와 같이 3kHz의 성분이 존재하고 있다. 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 사이의 랜덤 수 획득이 가능하다.

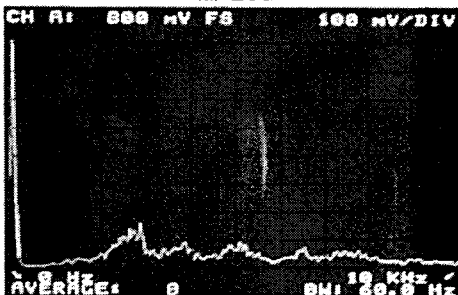


(b) Chaotic bifurcation

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



(a) LCG

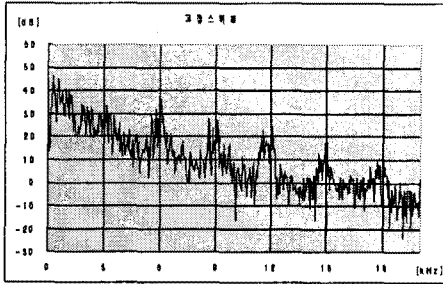


(b) Chaotic bifurcation

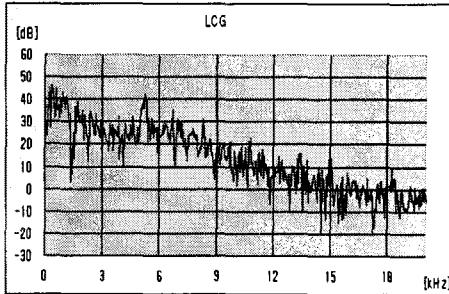
Fig.9 Motor voltage spectra(3kHz±1kHz) (x-axis:1kHz/div.,y-axis:100mv/div.)

그림 11은 2.5A부하로 작용하는 ECB와 연결된 유도모터로부터 발생하는 스위칭 소음의 스펙트럼을 측정된 결과이다. 부하조절은 ECB에 의하기 때문에 모터와의 연결에 따른 추가적인 기계적인 소음이 없으며, 부하조절이 매우 용이하다. 소음은 무향실에서 측정되었으며, 소음 측정 장비로는 「RION SA-01」를 사용하였다. 실험 결과의 분석에 사용된 데이터는 유도 모터로부터 측면방향으로 0.15m 떨어진 곳에서 얻은 값을 사용하였다.

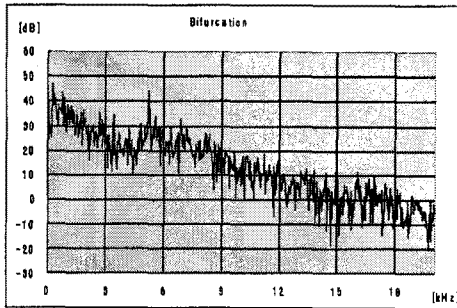
그림 11(a)는 3kHz 고정 캐리어 주파수에 대한 소음 스펙트럼을 나타내는 것으로, 캐리어 주파수 3kHz 정수배의 전형적인 고조파 스펙트럼 분포를 보이고 있다. 그림 11(b)는 LCG에 의한 RPWM의 경우로, 약 5kHz 부근의 스펙트럼 증가를 제외한 대부분의 영역에서 광대역화 특성을 나타내고 있다. 그림 11(c)는 카오스 RPWM을 적용하였을 때의 소음 스펙트럼이다. 소음 스펙트럼의 광대역화 특성은 LCG의 경우와 거의 유사하나, 전체적인 선형화 특성은 오히려 카오스 RPWM의 경우가 우수함을 알 수 있다. 결국 간단한 수식을 사용하는 카오스 RPWM은 전압 및 전류 스펙트럼의 광대역화에서 약간 불리한 것처럼 보였을 지라도, 모터 소음 스펙트럼의 광대역화에서는 LCG와 거의 동일한 특성을 나타내고 있다.



(a) 3kHz fixed carrier



(b) LCG(3kHz±1kHz)



(c) Chaotic bifurcation (3kHz±1kHz)
Fig.11 Motor noise spectra for 2.5A load
(x-axis:3kHz/div.,y-axis:10dB/div.)

5. 결 론

본 연구에서는 LCG에 의한 RPWM보다 랜덤 수 발생 수식이 간단한 카오스 RPWM기법에 의한 유도모터의 스위칭 소음 저감 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템의 랜덤 수 발생방법은 로지스트 사상의 제어변수 $a=4.0$ 인 카오스 영역의 분기도를 이용하였다. 카오스 분기도에 의한 랜덤 수 발생기는 LCG에 비하여 랜덤 캐리어의 중심 주파수에서의 고조파 스펙트럼이 더 강하게 존재하는 단점이 있다. 그러나 전압과 전류의 파형은 LCG와 카오스 분기도에 의한 방법 모두 거의 동일하며, 특히 카오스 분기도 방법은 안정적인 1개의 초기치와 1개의 수식만이 요구되며, 발생 랜덤 수의 상한과 하한을 0과 1로 변환하는 수식이 필요치 않아서 랜덤수 발생과정이 간단하다는 장점이 있다. 또한 간단한 수식을 사용하는 카오스 RPWM은 전압 및 전류 스펙트럼의 광대역화에서 약간 불리한 것처럼 보였을 지라도, 모터 소음 스펙트럼의 광대역화에서는 LCG와 거의 동일한 특성을 보였다. 차후에 LCG와 유사하게 균일한 랜덤 수 분포를 갖는 카오스 사상에 대한 연구가 필요하리라 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 '전남대 고품질 전기 전자 부품 및 시스템 연구센터'의 연구비 지원으로 연구되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [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] A. Cichowski, J. Nieznanski, M. Wolejko and A. Wojewodka, "Shaping the SPL spectra of the acoustic noise emitted by inverter-fed induction motors", in Proc. IEEE IECON, 2003, pp.2923-2928.
- [3] 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.
- [4] 정영국, 나석환, 임영철, 정성기, "유도전동기의 소음 저감을 위한 DSP기반 PWM인버터의 랜덤 캐리어 주파수 변조기법의 구현", 대한전기학회 논문지, vol.52B, no.12, pp.608-615, 2003.
- [5] S.Y.R. Hui, I. Oppermann and S. Sathikumar, "Microprocessor based random PWM Schemes for dc-ac power conversion", IEEE Trans. Power Electron., vol.12, no.2, pp.253-260, 1997.
- [6] 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.
- [7] K.K. Sung, S. Sathikumar, S.Y.R. Hui and Y. Shrivastava, "Randomness and random PWM", in Proc. EPE(Lausanne), 1999, in CD ROM Version.
- [8] 안상규, "카오스 시스템을 이용한 랜덤수 생성", 제11회 한양대학교 물리학과 학술제 발표주제, 2002.
- [9] 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.
- [10] S.Y.R. Hui, S. Sathikumar 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.
- [11] J.R. Wood, "Chaos : A real phenomenon in power electronics", in Conf. Rec. IEEE APEC, 1989, pp.115-123.
- [12] I. Nagy, "Improved current controller for PWM inverter drives with the background of chaotic dynamics", in Conf. Rec. IEEE IECON, 1994, pp.561-566.
- [13] 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.