

브러시리스 직류 전동기에 랜덤 PWM을 적용한 저가형 센서리스 드라이브에 관한 연구

(A Study on Low-Cost Sensorless Drive of Brushless DC Motor for Compressor
Using Random PWM)

이승건 · 김대경* · 양승학 · 임영철

(Seung-Gun Lee · Dae-Kyong Kim · Seung-Hak Yang · Young-Cheol Lim)

요 약

최근 가전제품에 브러시리스 직류 (Brushless DC) 전동기의 센서리스 드라이브를 적용시키는 사례가 증가하고 있다. 특히 사람들의 삶의 질이 향상 됨에 따라 가정에서 가장 밀접하게 연관되어 있는 냉장고, 에어컨과 같은 가전 제품에 가청소음을 줄여 보다 편안하고 안락한 생활을 추구하고 있다.

본 논문에서는 브러시리스 직류전동기에 랜덤 PWM을 적용한 냉장고용 압축기의 저가형 센서리스 드라이브를 이용하여 기존 드라이브 보다 가격과 소음을 줄일 수 있음을 실험하였다. 이러한 실험으로 전자적 소음을 줄임으로써 소음에 질을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

Abstract

Recently, it is increased to apply sensorless drive for BLDC (Brushless DC) motor to household electrical appliances, especially in the refrigerators and air conditioners, to reduce the cost and the acoustic noise by the operation and to make their functions more comfortable for human beings. In this paper, low-cost sensorless drive for BLDC motor is implemented by random PWM (Pulse Width Modulation). The experimental results show that the electromagnetic noise was reduced and the sound quality was improved by BLDC motor sensorless random PWM Control.

Key Words : Low-cost sensorless drive, BLDC(Brushless DC) motor, Random PWM(Pulse Width Modulation)

1. 서 론

브러시리스 직류 전동기는 가 변속 제어가 용이하고, 운전 영역 변화에 따른 효율 변화가 적은 특징을 가지고 있다. 이로 인해 고효율을 필요로 하는 냉장고나 에어컨 같은 가전제품에 널리 적용되고 있으며, 향후에도 수요는 지속적으로 증가할 것

* 주저자 : 전자부품연구원 DCC사업센터 센터장
Tel : 062-975-7040, Fax : 062-975-7049
E-mail : dkkim@keti.re.kr
접수일자 : 2008년 8월 25일
1차심사 : 2008년 8월 29일
심사완료 : 2008년 9월 11일

으로 예상된다[1]. 가전제품에 브러시리스 직류전동기가 적용되고 있는 대표적 사례로서 압축기를 꼽을 수 있다. 압축기 내부는 고온, 고압의 환경이기 때문에 압축기에 사용되는 브러시리스 직류전동기는 위치 센서를 사용하지 않는 센서리스 제어 방식으로 구동된다. 최근에 주거환경이 향상됨에 따라 소음과 진동에 관한 관심이 증가하면서 자연스럽게 소음과 진동을 줄일 수 있는 방법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

냉장고용 압축기의 소음은 전동기의 회전에 의해 움직이는 기구들에 의해서 발생한다. 전동기가 회전하면서 냉매를 흡입/압축하여 발생하는 소음이나 기구의 진동과 마찰이 발생하는 소음이 있다. 발생한 소음들은 각각의 경로를 통해 압축기의 쉘의 바깥까지 전달이 되어 비로소 우리가 듣는 소음이 된다. 이러한 소음은 주파수 대역에서 보면 주로 2~5[kHz] 대역에 존재한다. 하지만 기계적 소음은 압축기에 의한 소음이 지배적이다[2-3]. 압축기의 소음은 기계적 요소에 의한 기계적 소음과 전동기의 소음에 의한 전자적 소음으로 나눌 수 있다.

게다가 랜덤 PWM 변조 주파수 범위를 결정하는 것은 매우 중요하다[4-8]. 고조파 전류와 전압은 랜덤 주파수 범위에 따라 보다 넓게 펼쳐지게 된다. 그러나 최대 주파수 범위는 압축기의 자연 공진 특성과 전동기 제어를 위한 하드웨어와 소프트웨어의 시간 제한과 같은 동작 특성에 의해서 제한되어 진다. 제한된 주파수 범위와 비용을 고려하여, 압축기의 저가형 전동기 드라이브에는 저가형 마이크로 컨트롤러와 5[kHz] 스위칭 주파수 파워 모듈을 사용하였다. 게다가 센서리스 브러시리스 직류전동기 드라이브에 전자적 소음을 줄이기 위해 고정 스위칭 PWM 대신 랜덤 스위칭 PWM을 사용하였다.

본 논문에서는 브러시리스 직류전동기에 랜덤 PWM을 적용한 저가형 센서리스 드라이브를 이용하였다. 5[kHz] 이하에서 스위칭하는 저가형 센서리스 드라이브에 랜덤 PWM을 이용하여 전자적 소음을 줄여 소음에 질을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

2. 브러시리스 직류 전동기의 센서리스 운전

브러시리스 직류전동기는 상전류를 전자적으로 전환시켜야 하므로 회전자 위치센서를 필수적으로 구비해야 한다. 그러나 압축기에 위치 센서의 장착은 시스템의 가격뿐만 아니라 부피의 증가, 신뢰성 저하, 전자파 장애 등의 많은 문제를 발생시킬 수 있다. 특히 센서 장착으로 인한 가격의 상승은 브러시리스 직류전동기의 생활가전기기에 적용에 가장 큰 장애 요소로 작용하고 있다. 이에 따라 근래에는 위치 센서가 없는 저가의 압축기용 브러시리스 직류전동기를 구동하는 센서리스 드라이브의 개발이 크게 주목 받고 있으며, 기존의 유도기나 직류기를 사용하여 가 변속 운전을 하는 가전제품에 대체 적용하고 있는 실정이다.

브러시리스 직류 전동기의 고정자 권선에 의해 나오는 역기전력은 사다리꼴 모양이고 이러한 역기전력의 ZCP(Zero-Cross-Point)는 여자 되지 않는 상에 전압파형을 통하여 얻을 수 있으며 전류는 토크 맥동 없이 지속적인 상 토크를 발생 시킨다. 전류, 역기전력, 토크에 관한 파형은 그림 1에서 나타내고 있다. 브러시리스 직류 전동기 센서리스 드라이브에서

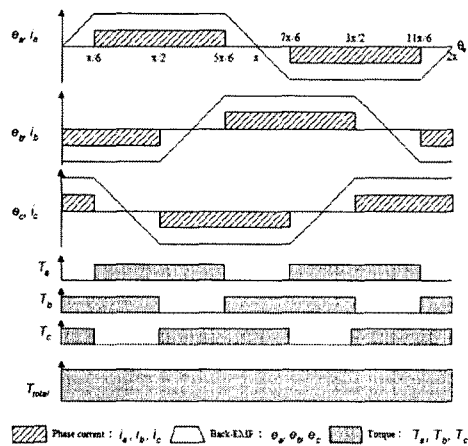


그림 1. 브러시리스 직류 전동기의 역기전력, 전류 및 토크파형

Fig. 1. Back-EMF, current and torque waveform of 3-phase brushless DC motor

는 인버터의 전환시점은 역기전력의 ZCP를 검출함으로써 얻을 수 있고 시간지연의 시간에 따라 속도는 결정된다[3-4].

3상 구형과 구동 전동기는 항상 두 상이 동시에 여자되며, 여자되지 않은 개방된 상이 항상 존재하게 된다. 여자되지 않는 구간은 역기전력이 일정하지 않고 변화하는 구간으로써, 역기전력은 항상 최대값

에서 최소값, 또는 최소값에서 최대값까지 변화한다. 따라서 이 구간 내에서 회전자 위치는 항상 역기전력이 영이 되는 위치를 지나게 된다. 그러므로 개방된 구간에서 역기전력을 검출하여 영이 되는 시점을 찾아내면 그 때의 회전자 위치를 알 수 있다.

개방된 구간에서는 이상적으로는 전류가 흐르지 않기 때문에 증성점과 각상의 단자 간의 전위차를 측정하면 역기전력을 직접 검출할 수 있다.

브러시리스 직류 전동기의 상전환 시점은 아래 수식과 같이 나타낼 수 있다.

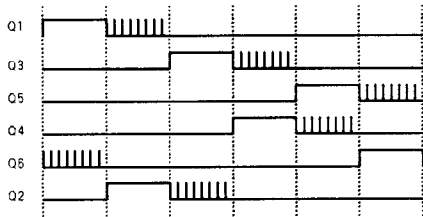
$$T_{cmt}(k) = T_{zcp}(k) + \frac{1}{2} \Delta T_{ZCP}(k) \quad (1)$$

$$\Delta T_{ZCP}(k) = T_{ZCP}(k) - T_{ZCP}(k-1) \quad (2)$$

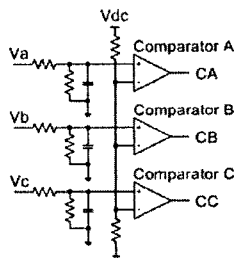
위의 수식에서, $T_{cmt}(k)$ 는 전환 시점을 그리고 $T_{zcp}(k)$ 은 ZCP가 검출된 시각을 나타낸다. 그림 2 (a)는 후단부 유니폴라 PWM의 스위칭 패턴, 그림 2 (b)는 단자전압 검출 회로를 그리고 그림 2 (c)는 후단부 유니폴라 PWM의 단자전압 파형을 나타내고 있다. 단자전압 검출회로는 각상에 단자전압과 $V_d/2$ 와 비교한다. 그림 2 (b)에서 커패시터 C는 단자전압에 포함된 스위칭 노이즈를 줄이는 데 사용된다. 단자전압 검출방법을 이용하는 센서리스 제어방식은 저속운전에서는 이용할 수 없다. 그 이유는 역기전력 검출이 가능한 특정주파수 까지 브러시리스 직류 전동기를 강제정렬 및 동기 가속 후 센서리스 운전이 가능하기 때문이다.

3. 랜덤 PWM 알고리즘

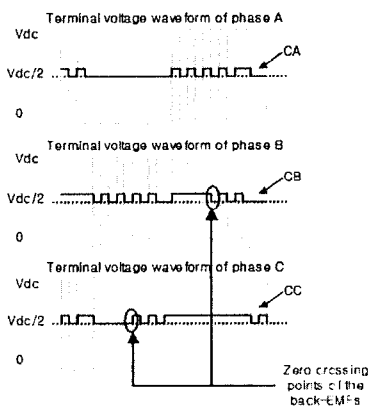
전동기 구동에 있어서 전자적 소음은 저속운전에서 지배적이다. 1,600[rpm]에서 구동중인 브러시리스 직류전동기는 기계적 소음을 효율적으로 줄일 수 있다. 그러나 PWM에 의해서 발생하는 전자적 소음은 전체 소음에 상당한 영향을 미친다. 냉각고용 압축기는 소비전력 때문에 1,600[rpm] 정도의 저속에서 운전하고 초기구동과 큰 냉각 용량을 요구하는 구간이나 과전류가 흐르는 경우를 제외하고 저속으



(a)



(b)



(c)

그림 2. (a) 스위칭 패턴, (b) 단자 전압 검출회로 (c) 단자 전압 파형

Fig. 2. (a) Switching pattern, (b) Terminal voltage sensing circuit, (c) Terminal voltage waveforms

로 운전한다. 그러므로 냉장고용 압축기의 저속운전 하는 동안 압축기의 전자적 소음과 기계적 소음을 줄이는 것은 냉장고에서 가장 중요한 요소이다[2].

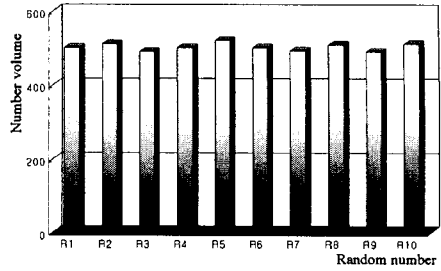
랜덤 PWM 기술은[5] 연구되어 왔고 특히 높은 스위칭 주파수 운전 기술이나 스위칭 노이즈를 줄이는 방안에 관한 기술들은 폭넓게 연구되어 지고 있다. 랜덤 PWM은 크게 2가지로 구분되는데 하나는 랜덤 스위칭 주파수 PWM과 다른 하나는 랜덤 펄스 포지션 PWM 방법이다. 랜덤 펄스 포지션 PWM은 [5-8] 고정 주파수에서 작동 하지만 스위칭 주파수가 변화하여 랜덤 스위칭 주파수 PWM과 유사한 효과를 가지고 있다. 그래서 마이크로컨트롤러에 의해서 쉽게 시행할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 랜덤 발생기는 여러 종류의 프로세서나 마이크로컨트롤러에서 사용될 수 있다. 그러나 선택된 계수 i_a , i_c , L_i 들을 사용하여 연산하는 도중에 오버플로우가 발생하지 않도록 주의하여야 한다.

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

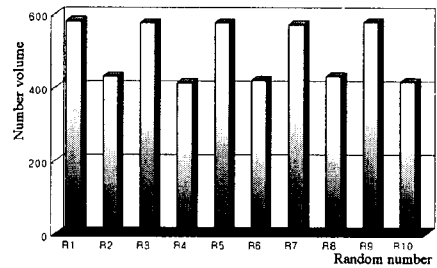
특히 i_c 는 소수(prime number)이어야 하며, i_a , i_m 은 아래와 같은 관계를 가지고 있다. 표 1은 균일할 분포를 갖기 위한 랜덤 수를 위한 상수를 나타내고 있다. 본 논문에서는 선형 일치 발생기 LCG (Linear Congruential Generator) 랜덤 수 2^{20} , 6075, 106, 1283를 사용하였다.

표 1. 균일한 분포를 갖기 위한 상수
Table 1. Constants for portable random number

Overflow at	i_m	i_a	i_c
2^{20}	6075	106	1283
2^{21}	7875	211	1663
2^{22}	7875	421	1663
2^{23}	11979	430	2531
	6655	936	1399
	6075	1366	1283
2^{24}	53125	171	11213
	11979	859	2531
	14406	967	3041



(a) 적절한 상수에 의한 랜덤 분포
(a) Properly chosen coefficients



(b) 부적절한 상수에 의한 랜덤 분포
(b) Improperly chosen coefficients

그림 3. 선택된 상수에 따른 랜덤 분포
Fig. 3. Random distributions along with chosen coefficients

그림 3 (a)와 그림 3 (b)는 선택된 계수에 따른 랜덤 분배를 보여주고 있다. 그림 3 (a)는 적절한 랜덤 수를 선택했을 때의 랜덤 수를 나타내고 있고 랜덤 수는 승산계수 6075, 증분계수 106, 나머지계수 1283이다. 적절한 상수에 의해 각 랜덤 수가 발생한 횟수는 약 500번의 고른 분포를 보인다. 그림 3 (b)는 부적절한 랜덤 수를 선택했을 때의 랜덤 수를 나타낸다. 나머지 계수를 1283이 아닌 1260을 사용하였다.

본 논문에서 사용한 선형 일치 발생기 LCG (Linear Congruential Generator)의 공식은 (4)의 수식으로 표현할 수 있다.

$$f_{ran+1} = (f_{ran} \times i_a + i_c) \% i_m \quad (4)$$

위의 공식에서 i_a 는 승산계수, i_c 는 증분계수, i_m 는 나머지 계수이다. 만일 f_{upper} 에서 f_{lower} 사이의 정수를 원한다면,

$$f = f_{lower} + \frac{((f_{upper} - f_{lower} + 1) \times f_{ran})}{i_m} \quad (5)$$

에 의하여 원하는 랜덤 수를 구할 수 있다. 여기서 f_{upper} 와 f_{lower} 는 발생할 랜덤 수의 최소값 및 최대값이다.

본 논문에서 랜덤 PWM의 최대와 최소 주파수는 각각의 PWM 주파수의 기계적 공진, EMI와 누설전류의 신뢰성 뿐만 아니라 하드웨어와 알고리즘 처리 시간을 고려하여 3[kHz]에서 5[kHz]로 결정했다.

4. 시뮬레이션 및 실험

그림 4는 랜덤 PWM을 이용한 브러시리스 직류 전동기의 센서리스 드라이브에 속도제어 블록 다이어그램을 나타낸다. 통전을 위한 완전한 회전자 위치는 여자되지 않는 상의 역기전력의 전압파형을 통하여 얻을 수 있었고 브러시리스 직류전동기는 미리 결정된 위치로 최초로 정렬하여 임의의 속도까지 힘을 가속해서 역기전력을 검출하여 회전자의 위치를 찾을 수 있었다. 저가형 fixed-point DSP(Digital Signal Processor), TMS320LF2406A와 5[kHz] 스위칭 주파수 Fairchild-semiconductor SPM(Smart Power Module)을 이용하여 전동기 속도제어 알고리즘을 실행하였다.

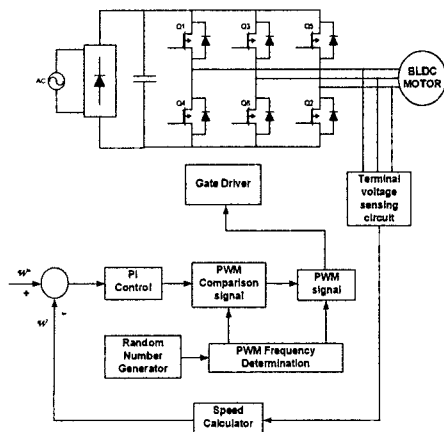


그림 4. 전동기 드라이브 시스템 블록 다이어그램
Fig. 4. Motor drive system configuration

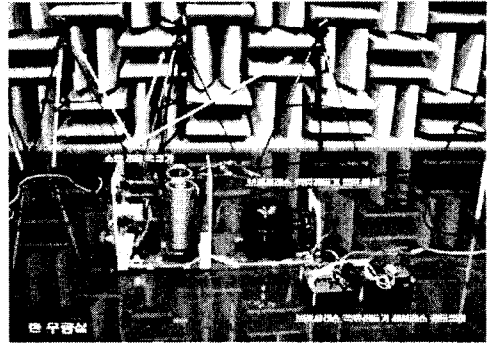


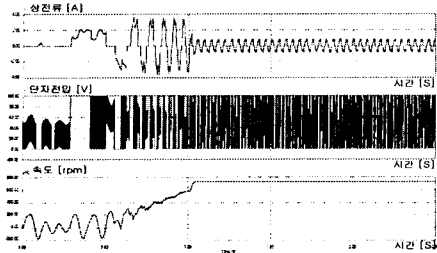
그림 5. 소음 측정 실험 구성
Fig. 5. Configuration of noise measurement experiment

표 2. 브러시리스 직류 전동기의 파라미터
Table 2. Parameters of brushless DC motor

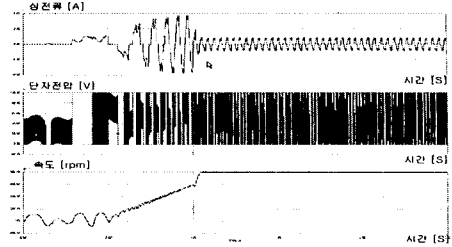
Rated power	200[W]
Number of pole	4
Line to line resistance	7.5[Ω]
Line to line inductance	0.021[H]
Back-EMF constant	57.78[V _s /krpm]

랜덤 수를 발생 시키고 랜덤 수에 따른 스위칭 주파수를 결정하였고, 그리고 적절한 시비율에 따른 인버터의 스위칭 시점을 결정하였다. 랜덤 수는 선형 일치 발생기 LCG 랜덤 수 2²⁰, 6075, 106, 1283를 사용하여 발생시켰다. 표 2는 제안된 방법으로 실험한 브러시리스 직류전동기의 전동기 파라미터를 보여준다.

그림 5는 압축기의 소음 측정 실험 구성을 보여 준다. 압축기의 부위별로 소음의 정도를 측정하기 위해서 압축기를 마이크로폰으로 부터 1[m] 이격시키고 반 무향실에서 프랑스 OROS사의 FFT 분석기 OR36 장비를 이용하여 소음을 측정하였다. 그림 6은 모터 운전 시 고정 스위칭 PWM을 했을 때와 랜덤 스위칭 PWM을 했을 때의 상전류와 단자전압 그리고 속도 시뮬레이션 파형이다. 브러시리스 직류전동기의 센서리스 드라이브에 랜덤 PWM 적용했을 경우 기존방식과 비교하여 상전류와 단자전압 그리고 속도에도 거의 차이가 없어 기존의 고정 PWM 스위칭 대신 랜덤 PWM 스위칭을 적용하여 센서리스 드라이브를 적용 하였을 때 모터의 성능에는 영

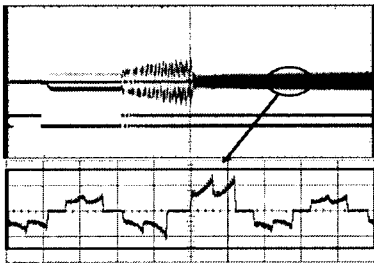


(a) 고정 스위칭 PWM
(a) Fixed switching PWM

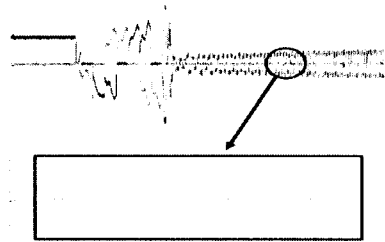


(b) 랜덤 스위칭 PWM
(b) Random switching PWM

그림 6. 센서리스 드라이브에 상전류, 단자전압 및 속도 시뮬레이션
Fig. 6. Phase current, terminal voltage and speed simulation

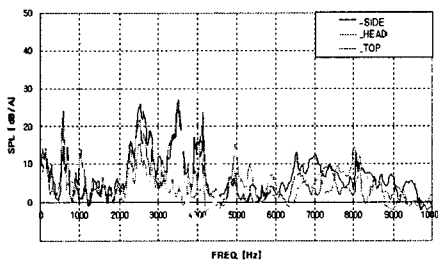


(a) 고정 스위칭 PWM
(a) Fixed switching PWM

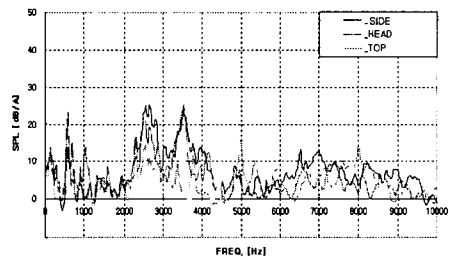


(b) 랜덤 스위칭 PWM
(b) Random switching PWM

그림 7. 상전류 실험 파형(Phase currents at 1600[rpm], 2[A/div.], 5[msec/div.])
Fig. 7. Experiment waveform of phase current



(a) 고정 스위칭 PWM(4[kHz])
(a) Fixed switching PWM(4[kHz])



(b) 랜덤 스위칭 PWM(3~5[kHz])
(b) Random switching PWM(3~5[kHz])

그림 8. 1,600(rpm) 소음 파형
Fig. 8. Noise spectrums at 1,600(rpm)

향을 미치지 않는 것을 할 수 있다. 그림 7은 모터속도 1,600[rpm]일때 고정 스위칭 PWM을 했을 때와 랜덤 PWM 스위칭을 했을 때의 상전류 파형을 나타낸다. 그림에서 보이는 바와 같이 랜덤 PWM 스위칭을 적용했을 때 기준방식과 비교하여 전류파형의

왜곡이나 리플이 거의 발생하지 않음을 알 수 있었다. 그림 8은 1,600[rpm]의 속도에서 고정 4[kHz] 주파수와 랜덤 3~5[kHz] 주파수에서의 3가지 포인트에 소음측정 파형을 나타낸다. 고정 스위칭 PWM 4[kHz]에 비하여 랜덤 스위칭 PWM 3~5[kHz]에서

압축기의 소음의 크기는 고르게 분배되었다. 그러므로 랜덤 스위칭 PWM 기법은 효율적으로 소음을 분배시켜서 일상 생활에서 듣기 싫은 불필요한 소음을 효율적으로 줄여서 소음에 질을 향상시킬 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 브러시리스 직류전동기에 소음 저감에 관한 연구로서, 랜덤 스위칭 PWM을 적용한 저가형 센서리스 드라이브에 저가형 DSP와 5[kHz] 스위칭 주파수 파워 모듈을 이용하여 센서리스 드라이브를 구현하였다.

브러시리스 직류전동기에 의해 운전하는 냉장고용 저가형 왕복동식 압축기 인버터에 랜덤 PWM을 적용하여 전자적 소음을 줄임으로써 소음에 질을 향상시킬 수 있었다.

제안된 방법은 브러시리스 직류전동기를 이용하여 냉장고나 에어컨 같은 가전제품을 저가로 만들면서 소음을 줄일 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 지역산업기반구축사업(과제번호: 2004-나-22호, 과제명: 디지털컨버전스부품센터구축사업)의 지원으로 수행되었으며, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] Electric Power Research Institute, "Electric Motors: Markets, Trends, and Application," Tech. Rep. TR-100423, Jun. 1992.
- [2] K Y Cho, S B Yang, H W Kim and J C Kim, "Improving sound quality of reciprocating compressor using random PWM" IEE Power Electronics and Variable Speed Drives, pp. 431-436, Sep. 2000.
- [3] Dae-Kyong Kim, Kwang-Woon Lee, Byung-Hi Kwon, "Commutation torque ripple reduction in a position sensorless brushless DC Motor drive," IEEE Trans. On Power Electronics, vol. 21, NO. 6, pp. 1762-1768, Nov. 2006.
- [4] Dae-Kyong Kim, Kwang-Woon Lee, Byung-Taek Kim, Byung-Hi Kwon, "A Novel Starting Method of the SPM-type BLDC Motors without Position Sensor for Reciprocating compressor", Conf. of IEEE IAS, 2006.
- [5] M. M. Bech, J. K. Pedersen and F. Blaabjerg, "Random modulation techniques width fixed switching frequency for three-phase power converters", IEEE Trans. Power

Electron., vol.15, no.4, pp.753-761, 2000.

- [6] Y.G. Jung, S.H. Na, Y.C. Lim and H.G. Kim, "Implementation of a DSP controlled random switching frequency PWM inverter for industrial drives", in Proc. ICEE(Korea), 2002, pp.575-580.
- [7] M.M. Bech, J.K. Pedersen, and F. Blaabjerg, "Field-oriented control of an induction motor using random pulse width modulation", in Proc. IEEE APEC '00, 2000, pp. 924~931.
- [8] S.O. Wi, Y.G. Jung, and Y.C. Lim "Power spectrum of two-phase and three-phase RCD-PWM scheme for switching noise reduction of induction motors", KIEE Transaction, vol.9, no.2, pp.180-188, 2004.

◇ 저자소개 ◇

이승건 (李承鍵)

1981년 1월 25일생. 2006년 호남대 전기공학과 졸업, 2008년 전남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 전자부품연구원 DCC사업센터 연구원.

김대경 (金大慶)

1972년 9월 27일생. 2001년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전자전기제어계측공학과 졸업(박사). 2001~2005년 삼성전자 가전연구소 선임 연구원. 현재 전자부품연구원 DCC사업센터 센터장.

양승학 (梁承學)

1958년 12월 6일생. 1982년 전남대 계측공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 일본 동경대 대학원 전기전자공학과 졸업(박사). 현재 호남대 전기공학과 교수.

임영철 (任永徹)

1953년 4월 22일생. 1975년 전남대 전기공학과 졸업. 1977년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1997년 호주 모나시 대학 Visiting Scholar. 현재 전남대 전기공학과 교수.