

소형 BLDC 전동기 센서리스 드라이브의 단상 역기전력과 중성점을 이용한 제어기법 연구

(A Study on a Control Method for Small BLDC Motor Sensorless Drive with the Single Phase BEMF and the Neutral Point)

조준우* · 황돈하 · 황영기 · 정태욱**

(June-Woo Jo · Don-Ha Hwang · Young-Gi Hwang · Tae-Uk Jung)

Abstract

Brushless Direct Current(BLDC) Motor is essential to measure a rotor position because of that this motor type needs to synchronize the rotor's position and changeover phase current instead of a brush and commutator used on the existing dc motor. Recently, many researches have studied on sensorless control drive for BLDC motor. The conventional control methods are a compensation value dq, Kalman filter, Fuzzy logic, Neurons neural network, and the like. These methods has difficulties of detecting BEMF accurately at low speed because of low BEMF voltage and switching noise. And also, the operation is long and complex. So, it is required a high-performance microprocessor. Therefore, it is not suitable for a small BLDC motor sensorless drive. This paper presents control methods suitable for economic small BLDC motor sensorless drive which are an improved design of the BEMF detection circuit, simplifying a complex algorithm and computation time reduction. The improved motor sensorless drive is verified stability and validity through being designed, manufactured and analyzed.

Key Words : BLDC, Sensorless, Motor Drive, Single Phase BEMF, Neutral Point

1. 서 론

1.1 연구의 배경

BLDC 전동기는 기존의 DC 전동기에 사용되는 브러시, 정류자 대신에 회전자의 위치에 동기하여 전동기의 상전류를 전환시켜야 하기 때문에 회전자의 정확한 위치 정보가 필수적이다[1-2]. 회전자의 위치정보를 검출하기 위해 보통 리졸버(resolver), 광학 인코더, 홀 센서 등의 위치 센서를 부착한다. 그러나 위치 센서는 모

* 주저자 : 경남대학교 전기공학과 석사과정
** 교신저자 : 경남대학교 전기공학과 부교수
* Main author : Electrical Engineering at
Kyungnam Univ. M.S. Student
** Corresponding author : Electrical Engineering at
Kyungnam Univ. Professor
Tel : 055-249-2628, Fax : 0505-999-2161
E-mail : tujung@kyungnam.ac.kr
접수일자 : 2014년 3월 28일
1차심사 : 2014년 4월 1일
심사완료 : 2014년 6월 12일

터의 가격 및 크기를 증가시키고, 구조를 복잡하게 할 뿐만 아니라, 주변의 여러 동작 환경에 제한을 받는다 [7]. 이러한 문제를 극복하기 위해 근래에는 위치 센서 없이 BLDC 전동기를 구동하는 센서리스 BLDC 전동기 제어에 대한 관심이 고조되었고, 수학적 모델을 통해 계산된 전류와 검출된 전류의 오차로 회전자의 위치를 추정하는 방법, 고주파 전압신호를 주입하는 방법, 추정이론을 이용한 상태관측기를 적용한 방법, 확장형 칼만 필터를 이용한 방법 등의 여러 가지 제어 방법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[3-4].

1.2 연구의 목적 및 방법

본 논문은 기존의 제어방법의 단점인 긴 연산시간, 복잡한 구조, 고성능의 프로세서를 사용하는 제어방법을 피하고 단상 전압의 역기전력과 중성점 전압만을 이용한 소형 BLDC 전동기 제어방법을 제안한다.

Power-SIM을 이용하여 제안된 소형 BLDC 전동기 센서리스 드라이브를 설계하고, 프로토타입의 BLDC 전동기 센서리스 드라이브를 실제 제작하여 실험을 통한 제안된 제어 기법의 안정성과 타당성을 입증하고자 한다.

2. BLDC 전동기의 동작 원리

BLDC 전동기를 구동하기 위해서 회전자 위치에 맞게 전류를 흘려주어야한다. 그러기 위해 주로 홀 센서 같은 자속 검출 센서를 이용하여 회전자의 위치 정보를 검출하고, 검출된 회전자 위치에 맞게 전류를 흘려주어 BLDC 전동기를 구동시킨다. 그림 1은 BLDC 전동기를 반시계방향으로 회전시킬 때 회전자 위치에 따른 6가지 모드를 나타낸다. MOSFET이 턴-온되는 경우의 수는 총 9가지가 있지만 같은 상이 켜지는 경우는 단락이 발생하므로 이 3가지를 제외하고 6가지 경우가 있다. 효율적으로 구동시키기 위해 항상 2개의 MOSFET만 턴-온시켜 전류를 흘려준다.

그림 2는 검출된 회전자 위치신호를 기반으로 60° 간격을 가지는 6 모드를 나타냈으며 이 신호에 따라 전동기가 Counter Clockwise(CCW)으로 구동하기 위한 각 상의 전류 파형과 상 역기전력 파형을 나타낸다.

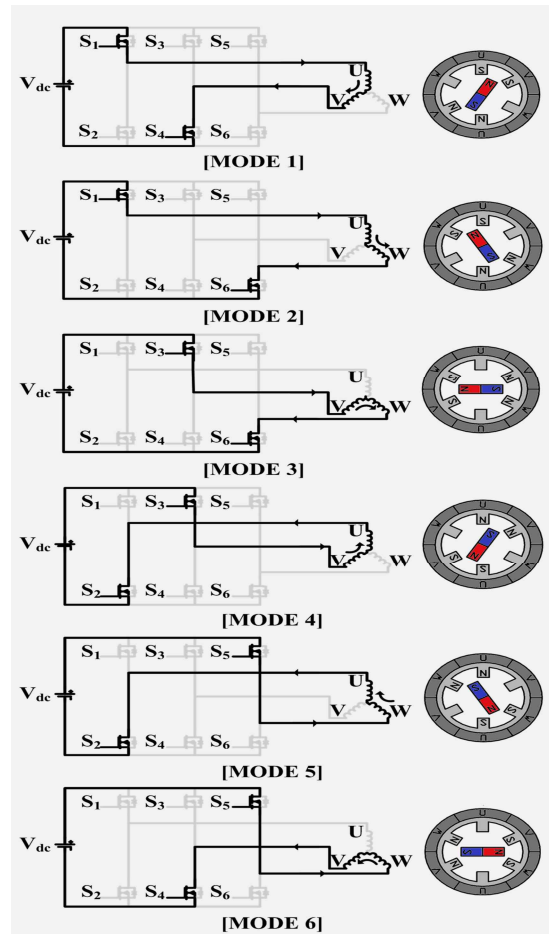


그림 1. BLDC 전동기의 운전 모드
Fig. 1. Operating mode of BLDC motor

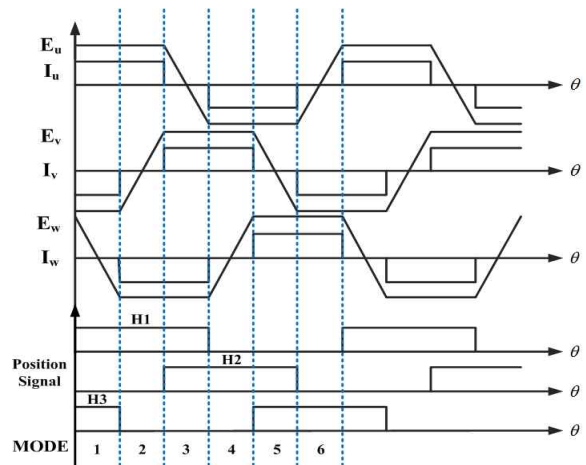


그림 2. BLDC 전동기의 전류, 전압, 위치신호 파형
Fig. 2. Current, Voltage, Position waveform of BLDC Motor

3. 기존의 센서리스 제어 방법

칼만 필터는 파라미터 변동과 측정노이즈 환경에 놓인 시스템의 상태 변수와 파라미터를 정확히 추정할 수 있고, 또한 비선형 시스템에도 적용할 수 있는 최적의 상태 추정기이다. 따라서 우수한 추정 성능 때문에 확장형 칼만 필터가 매입형 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어의 적용에 대해 많은 연구가 진행되고 있다.

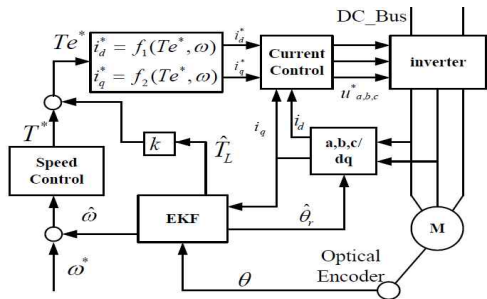


그림 3. 칼만필터 시스템의 플로우 차트
Fig. 3. The flow-chart of the Kalman Filter system

하지만 복잡한 알고리즘과 칼만 필터의 연산 자체가 많은 연산량을 요구하기 때문에 저가 구현에 있어 큰 부담으로 작용할 수 있으며 실제의 시스템 잡음을 공정하게 평가할 수 있는 방법이 없기 때문에 추정 이득을 선택하기 매우 어렵다[5-6]. 그림 3는 칼만 필터 시스템의 플로우 차트를 나타낸다.

4. 제안된 센서리스 제어 방법

제안된 방법은 경제적이며 소형 BLDC 전동기 센서리스 드라이브를 제어하기 위해 회전자 위치정보를 가지고 있는 단자 역기전력과 중성점 전압을 이용하여 기존 제어방법의 복잡한 알고리즘을 간소화하고 긴 연산 시간을 단축하였다. 그림 4는 제안된 센서리스 드라이브의 전체 토폴로지이다.

제안된 센서리스 제어 방법은 중성점을 검출하기 위한 단자가 필요하나 펌프 모터, 팬 모터 등 가전기기용 소형 BLDC 전동기의 대부분은 중성점이 외부로 노출되어 있지 않다. 때문에 각 상에 저항을 Y결선으로 병렬 연결하여 가상 중성점을 만들어 준다.

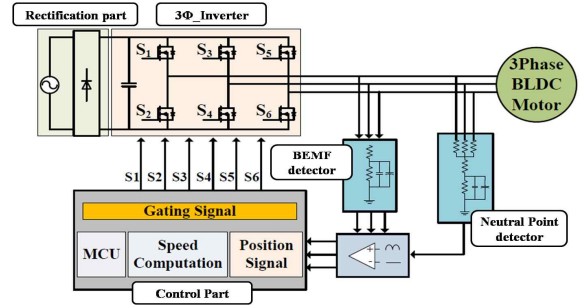


그림 4. 제안된 BLDC 전동기 센서리스 드라이브의 토폴로지
Fig. 4. Proposed BLDC motor sensorless drive topology

검출된 역기전력과 중성점 전압은 높은 전압과 스위칭 노이즈로 인하여 정확한 검출 신호를 발생시키는데 어려움이 있다. 특히 저속 구동 시 낮은 역기전력 신호 때문에 역기전력 신호 검출이 더 어렵다. 때문에 본 논문에서는 비교기 입력전압을 제한하고 고주파 노이즈를 제거하기 위하여 저항을 통한 전압 분배회로와 RC저역통과 필터회로를 설계하였다. 따라서 안정적인 역기전력 검출이 가능할 뿐만 아니라 넓고 안정적인 속도 영역을 가진다.

그림 5는 RC 저역통과 필터를 단순화한 등가회로이고, 전달함수는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

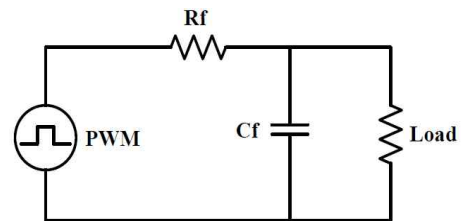


그림 5. RC 저역통과 필터의 등가회로
Fig. 5. Equivalent circuit of RC lowpass filter

$$H(s) = \frac{\frac{1}{sC}}{R + \frac{1}{sC}}$$

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{|1 + j\omega RC|} \tag{1}$$

$$= \left| \frac{1}{1 + j2\pi f RC} \right| = 1$$

$$2\pi f_c RC = 1, f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\text{단 } f_{BEMF} < f_c < f_{sw}$$

저역통과 필터가 원활한 필터링을 하기 위해서는 차단주파수(f_c)가 스위칭 주파수(f_{sw})와 역기전력 주파수(f_{BEMF}) 사이에 존재 하여야 한다.

차단주파수는 스위칭주파수에 비하여 낮을수록 필터링 특성은 좋아지나 필터의 용량이 상승하므로 본 논문에서는 스위칭주파수의 1/50이 되도록 선정하고 설계 및 분석하였다.

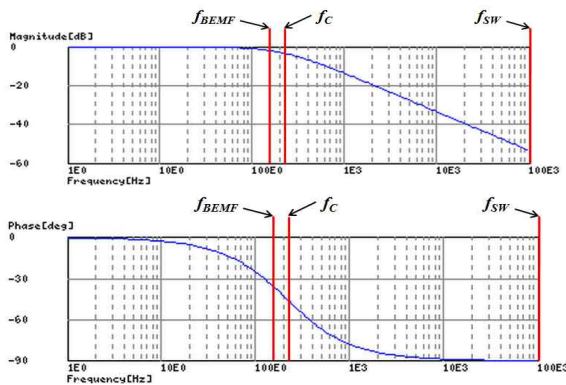


그림 6. 설계된 저역통과 필터의 보드선도
Fig. 6. Bode plot of proposed low pass filter

그림 6과 같이 설계된 저역통과 필터의 차단주파수(f_c)는 214Hz이다. 사용된 전동기의 극수는 6극이며, 인버터 PWM 스위칭 주파수(f_{sw})는 10kHz이다. 전동기의 속도가 3600rpm이라고 가정했을 때, 위상 지연은 약 30°를 가지며 역기전력 주파수(f_{BEMF})는 식 (2), (3)과 같이 계산된다.

$$f_{BEMF} = \frac{\omega \cdot P}{120} [Hz] \quad (2)$$

여기서 f = 전압 및 전류의 주파수, ω = 회전자의 속도, P = 극수 이다. $\omega = 3600\text{rpm}$, $P = 6$ 이므로 이 상수 값을 식 (2)에 대입하면,

$$f_{BEMF} = \frac{3600 \cdot 6}{120} = 180 [Hz] \quad (3)$$

식 (3)에 의해 f_{BEMF} 는 180Hz이며, f_c 214Hz 범위에 만족한다. a상과 b상이 도통 되고 c상이 비 여자상이 될 때 c상의 ZCP시점은 c상 단자 전압의 $V_{dc}/2$ 을 지나는 시점이 된다. 비 여자상의 단자전압(V_{open})은 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$V_{open} = V_{cn} + V_n \quad (4)$$

여기서 $V_{cn} = V_{BEMF-c}$, $V_n = V_{dc}/2$ 이므로 c상의 역기전력은 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$V_{BEMF-c} = V_{open} - V_{dc}/2 \quad (5)$$

식 (5)에서 V_{open} 이 $V_{dc}/2$ 가 되는 지점은 C상의 역기전력(V_{BEMF-c})이 0이 되는 ZCP지점이 된다. 하지만 역기전력의 ZCP지점과 실제 도통지점과는 전기각으로 약 30°의 차이가 존재한다. 따라서 회전자 위치에 맞는 정확한 스위칭을 하기 위해서 이 구간을 보상해 주어야 한다. 본 논문에서 설계된 필터는 이 구간을 보상하기 위해 검출된 신호와 ZCP사이에 약 30°의 위상차를 가지도록 설계되었고 그림 7과 같이 확인할 수 있다.

여기서 검출된 각 상의 신호는 회전자의 위치 신호와 같으며 각상과 120° 위상차를 가진다. 이 신호를 가지고 설계된 제어 알고리즘에 따라 BLDC 전동기를 구동시킨다. BLDC 전동기 드라이브의 속도제어는 Speed_ref값을 추종하게 되며 위치 정보를 이용하여 계산된 Speed 값과 Speed_ref값을 비교하여 PI제어를 통해 PWM 듀티비를 조절한다. 그 알고리즘은 그림 8과 같다.

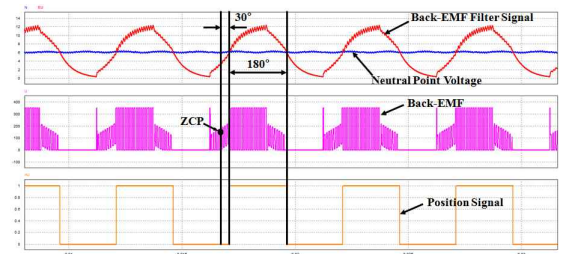


그림 7. 역기전력 필터를 이용한 위상 보상 검출 파형
Fig. 7. Phase compensation waveform using Back-EMF filter

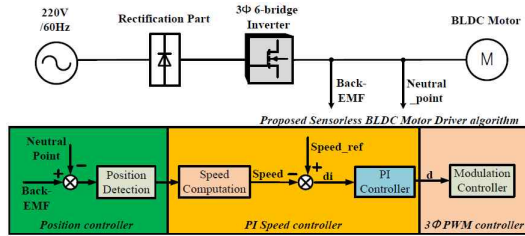


그림 8. 제안된 BLDC 전동기 센서리스 드라이브의 알고리즘
 Fig. 8. Proposed BLDC Motor Sensorless drive Algorithm

5. 시뮬레이션

제안한 BLDC 전동기의 센서리스 제어 방법을 확인하기 위해 시뮬레이션 프로그램인 Power-SIM사의 PSIM을 사용하였다. 전동기의 역기전력 형태는 이상적이라고 가정 하고, 실험에서 사용된 BLDC 전동기의 파라미터로 시뮬레이션을 실행 하였다. 그림 9와 같이 BLDC 전동기의 시뮬레이션 모델은 정류부, 게이트 드라이브부, 제어부와 역기전력 검출부로 크게 4부분으로 이루어져 있다. 또한 Dynamic Link Library(DLL)를 이용하여 MCU을 이용한 제어가 가능하게 모델링하였다.

그림 10은 역기전력 검출 필터 개선 전/후 파형, 그림 11은 한상의 구동 중 전류 파형과 지령 속도에 추종하는 속도 파형이다.

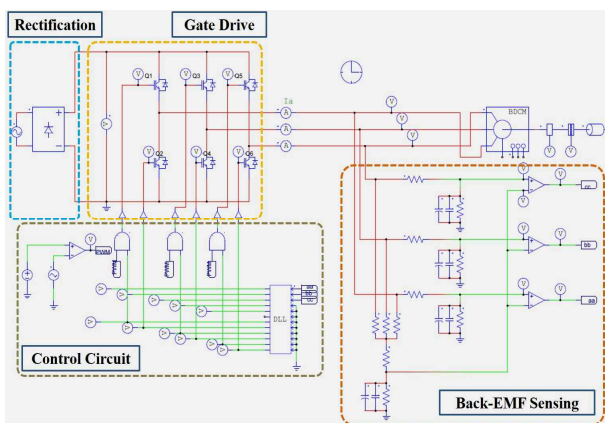
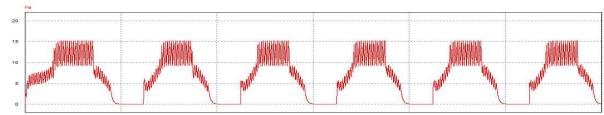
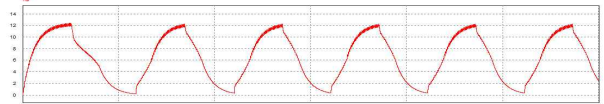


그림 9. BLDC 전동기 센서리스 드라이브의 시뮬레이션 모델
 Fig. 9. Simulation model of BLDC motor sensorless drive



(a) 기존 역기전력 검출필터 파형



(b) 개선된 역기전력 검출필터 파형

그림 10. 역기전력 검출필터 개선 전/후 파형
 Fig. 10. Waveform of improved BEMF detection filter before and after

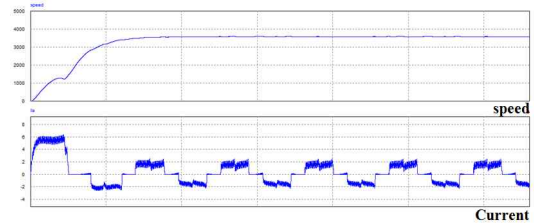


그림 11. 한상 전류 파형 BLDC 전동기 속도 파형
 Fig. 11. Waveform a phase current and motor speed

6. 실험 결과

제안한 하드웨어의 구성 중 Intelligent Power Module(IPM)은 Infineon사의 600V/15A급의 IGCM15F60GA을 사용하였고, MCU는 Atmel사의 ATmega128을 사용하여 프로토타입의 드라이브를 구현하였다. 실험에 사용된 BLDC 전동기의 파라미터는 표 1에 나타낸다. 그림 12은 실제 제작된 프로토타입의 BLDC 전동기 센서리스 드라이브이다.

표 1. BLDC 전동기의 변수
 Table 1. BLDC motor parameter

Parameter	Rating	unit
DC_link	320	V
Phase resistance	13.26	Ω
Number of pole	6	
Number of slot	9	
Rated speed	3600	rpm

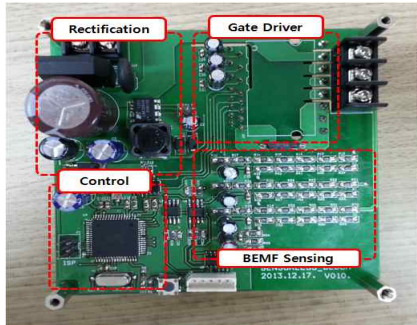
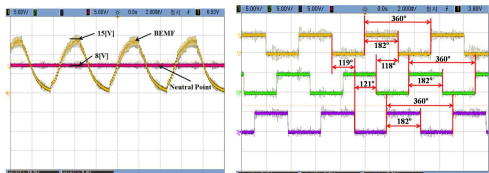


그림 12. 프로토타입의 BLDC 전동기 센서리스 드라이브
Fig. 12. BLDC motor sensorless drive of prototype

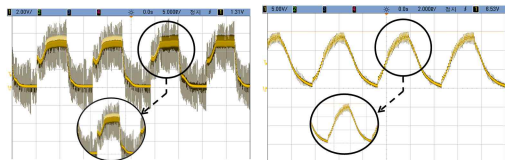
그림 13 (a)는 한상의 역기전력과 중성점 전압을 비교한 파형이고 그림 13 (b)는 이 두 신호를 비교하여 회전자의 위치신호를 검출한 파형이다. 여기서 역기전력 검출 최대치는 약 15V이며, 중성점 전압은 단상 역기전력파형의 $V_{dc}/2$ 지점을 지나는 것을 확인하였다. 검출된 위치 신호파형은 각 상과 120° 위상차를 가지며 홀 센서와 같은 신호를 발생함을 그림 13과 같이 확인하였다. 그림 14는 개선된 역기전력 검출 필터를 적용하여 기존의 역기전력 검출 필터 보다 역기전력의 스위칭 노이즈가 줄어들었음을 확인할 수 있다.



(a) BEMF & 중성점 비교파형 (b) 각 상 위치검출 비교 파형

그림 13. BEMF & 중성점 비교 파형과 각 상 위치검출 파형

Fig. 13. Waveform of compare BEMF & neutral point and detect of phase

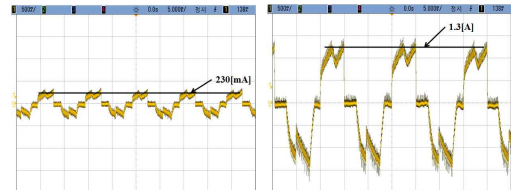


(a) 기존역기전력 검출필터 (b) 개선된 역기전력 검출 필터

그림 14. 역기전력 필터 개선 전/후 파형
Fig. 14. Improved BEMF filter before/after waveform

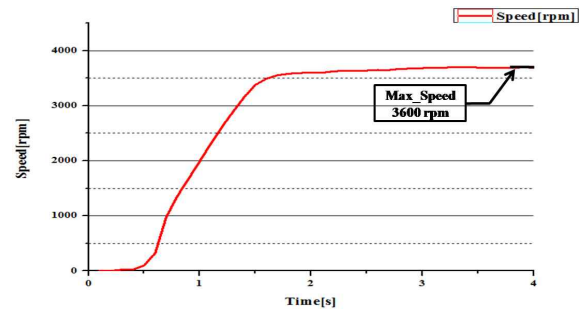
그림 15 (a)는 센서리스 BLDC 전동기 드라이브 구동 중 무부하 전류 파형이고, 그림 15 (b)는 최대 부하시의 전류 파형이다.

그림 16 (a)는 지령속도 3600rpm에 추종하는 파형이며, 16 (b)는 모터 출력특성 그래프이고 최대 60W의 출력을 가진다.

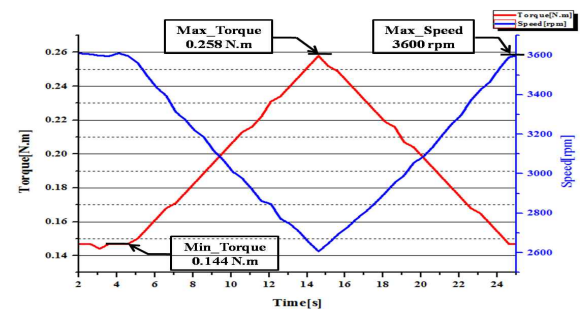


(a) 무부하시 전류파형 (b) 최대 부하시 전류파형

그림 15. BLDC 전동기의 구동 중 전류 파형
Fig. 15. Waveform of current on operating BLDC motor



(a) 속도 추종 그래프



(b) S-T 곡선

그림 16. BLDC 전동기의 속도추종 그래프와 S-T곡선
Fig. 16. Speed tracking graph and S-T curve of BLDC motor

7. 결론

본 논문은 기존의 제어방법의 단점인 긴 연산시간,

복잡한 구조, 고성능의 프로세서를 사용하는 제어방법을 피하고 단자 전압의 역기전력과 중성점 전압만을 이용한 소형 BLDC 전동기 제어방법을 제안한다.

Power-SIM사의 PSIM을 이용하여 시뮬레이션 하였고, 제안된 BLDC 전동기 센서리스 드라이브의 프로토타입을 제작/실험 하여 각 상의 단자 역기전력과 중성점 전압 비교를 통해 회전자의 위치정보를 실시간으로 검출함을 확인하였고, BLDC 전동기가 검출된 위치 신호를 받아 제안된 구동방법에 따라 구동됨을 확인하여 본 논문의 타당성을 입증하였다.

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.
(NRF-2013H1B8A2028789)

References

[1] K. Iizuka, H. Uzuhashi, M. Kano, T. Endo, and K. Mohri, "Microcomputer control for sensorless brushless motor", IEEE Trans. Ind. App., vol. IA-21, no. 3, pp. 595-1601, May 1985.

[2] N. Matsui and M. Shigyo, "brushless DC Motor Control without Position and Speed Sensors", IEEE Trans. on Ind. Application. vol28, pp.120-127, Jan/Feb. 1992.

[3] Alian M, Cassat, and Pully,Switzerl and, "Position Detection for a Brushless DC Motor." US patent5001405, March,199.

[4] C. Frech and P. Acarnley, "Direct Torque Control of Permanent Magnet Drives," IEEE Trans. on Industry Applicatssions, Vol. 32 No. 5, pp. 1080-1088, 1996.

[5] K.HPark, t.s. Kim, S.C. Ahn and D.S Hyun, :Speed Control of High-Performance Brushless DC Motor Drives by Load Torque Estimation," IEEE PESC Conf. vol.4 pp. 1677-1681, 2003.

[6] K. Ohishi, M. Nakao, K. Onishi and K. Miyachi, "Microprocessor-Controlled DC Motor for Load-Insensitive Position Servo System," IEEE Trans. Ind. Electron., vol.34, no.1, pp. 44-49, 1987.

[7] N. Matsui, "Sensorless PM Brushless DC Motor Drive", IEEE Trans, Industrial Electronics, Vol. IE-43, No.2,pp 300~308, April 1996.

[8] Y. G Kim, Y. H Yoon, B. K Lee, H. S Kim, C. Y Won and J. S Chun, "Rotor Position Estimation of 3-Phase PM BLDC Motor by 2Hall-IC, 1Hall-IC", Journal of the Korea Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.20 No.4, pp.56-64, May 2006.

[9] S. G Lee, D. K Kim, S. H Yang and Y. C Lim, "A Study on Low-Cost Sensorless Drive of Brushless DC Motor for Compressor Using Random PWM", Journal of the Korea Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.22 No.10, pp.97-103, October 2008.

◇ 저자소개 ◇



조준우(趙埈吁)

1987년 11월 15일생. 2013년 2월 경남대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 대학원 석사과정.



황돈하(黃敦夏)

1969년 2월 10일생. 1991년 영남대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한구전기연구원 HVDC본부 전력기기연구센터 책임연구원.



황영기(黃榮基)

1974년 2월 부산대학교 졸업. 1979년 8월 고려대학교 대학원 졸업(석사). 1986년 2월 동 대학원 졸업(박사). 1988년 8월 ~1989년 8월 영국 Univ. of Exeter, Post-Doc.. 1996년 7월~1997년 8월 미국 Univ. of Washington, 교환교수. 2009년 2월~2011년 2월 경남대학교 부총장. 2012년 1월~2013년 12월 한국공업화학학회 부회장. 2004년 5월~현재 한국산업기술평가관리원 기술혁신평가위원. 2004년 5월~현재 한국환경관리공단 설계자문위원.



정태욱(鄭泰旭)

1970년 5월 16일생. 1993년 부산대공대 전기공학과 졸업. 1955년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996~2005년 LG전자(주) 책임연구원. 2006~2007년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2007년 ~현재 경남대 전기공학과 부교수.