

Single Sensor를 이용한 3상 슬롯리스 PM BLDC 전동기의 속도제어

尹溶湖[†], 金淵忠^{*}, 李相錫^{**}, 元忠淵^{***}, 崔有永^{****}

Speed Control of Three Phase Slotless PM BLDC Motor Using Single Sensor

Y. H. Yoon, Y. C. Kim, S. S. Lee, C. Y. Won, and Y. Y. Choe

요 약

슬롯리스 PM BLDC 전동기는 고속도, 고출력의 특징을 가지고 있어서 산업 및 공장자동화 기기분야에서 폭넓게 사용되고 있다. PM BLDC 전동기를 구동하려면 회전자 위치를 검출하는 센서가 필수적으로 요구된다. 홀 센서는 회전자의 위치를 판별하기 위한 것으로서 3상 PM BLDC 전동기의 경우 3개의 센서를 이용하는 것이 일반적인 방법으로 사용되어지고 있다. 그러나 본 논문에서는 기존의 회전자 위치 검출 시 1개의 홀 센서를 사용하여 기존의 방법과 동일한 성능을 가질 수 있음을 증명하였다. 그 결과 기존의 방법과 동일한 성능을 갖으며 저가격, 보호회로의 역할, 회로의 부피 감소의 효과를 얻을 수 있었으며 이를 시뮬레이션과 실험으로 증명하였다.

ABSTRACT

Slotless Permanent Magnet Brushless DC Motor(PM BLDC) with the characteristics of high speed and power density has been more widely used in industrial and factory machine. Generally, PM BLDC moter is necessary that the three Hall-ICs evenly be distributed around the stator circumference in case of the 3 phase motor. The Hall-ICs are set up in PM BLDC Motor to detect the main flux from the rotor. therefore the output signal from Hall-ICs is used to drive a power transistor to control the stator winding current. However, instead of using three Hall-ICs, if it used only one Hall-IC, we can estimate information of the others phase in sequence through a rotor. This paper identified the characteristics and performance by using one Hall-IC with the 3-phase, 2-pole, 6-slot PM BLDC motor.

Key Words : Slotless PM BLDC, Single Sensor, Estimation Hall-ICs signals(H_B , H_C)

1. 서 론

슬롯리스 영구자석 브러시리스 직류전동기(Slotless PM Brushless DC Motor ; 이하 슬롯리스 PM BLDC 전동기)는 회전자 위치 정보를 검출하기위해 홀센서(Hall-ICs)나 엔코더(Encoder)와 같은 기계적 위치 센서가 필요하다^[1].

슬롯리스 PM BLDC 전동기의 구동은 고정자에 부착된 홀센서의 신호를 검출하여 회전자의 위치정보를 추정하고 전동기에 인가되는 상전압을 분석하여 인버터를 제어함으로써 위상과 크기를 제어할 수 있다.

[†]교신저자 : 정회원, 성균관대 메카트로닉스공학과 박사과정
E-mail : dydgh@skku.edu

^{*}정회원, (주)팩테크 개발부 차장

^{**}정회원, (주)팩테크 대표이사

^{***}정회원, 성균관대 정보통신공학부 교수

^{****}정회원, (주)키네모션 대표이사

접수일자 : 2004. 7. 28

1차 심사 : 2004. 8. 25

심사완료 : 2004. 9. 9

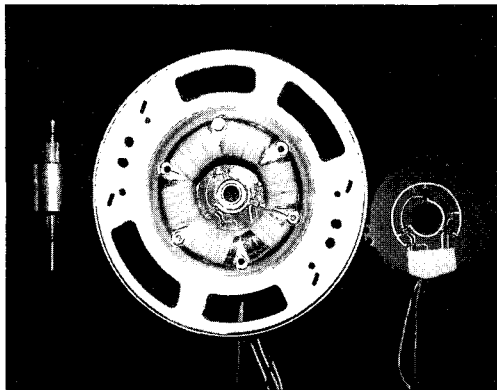


그림 1 슬롯리스 PM BLDC 전동기
Fig. 1 Slotless PM BLDC Motor

그림 1은 3상 2극 구조를 가진 전동기로서 1개의 홀센서(HA)가 부착된 슬롯리스 PM BLDC 전동기를 나타낸다. 3상의 경우 홀센서는 회전자의 위치 검출 및 속도판별의 기준이 되므로 3개의 홀센서가 전동기에 부착되어야 한다^[2].

본 논문은 3개의 홀센서를 사용하는 대신에 1개의 홀센서를 사용하여 회전자 위치를 검출하는 회로를 개발하여 기존에 3개를 사용하던 것과 동일한 특성을 갖도록 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

2. 본 론

2.1 슬롯리스 PM BLDC 전동기 제어

그림 2는 1개의 홀센서를 이용하여 슬롯리스 PM BLDC 전동기의 회전자 위치 및 속도를 검출할 수 있는 폐루프 제어 블록을 나타낸다.

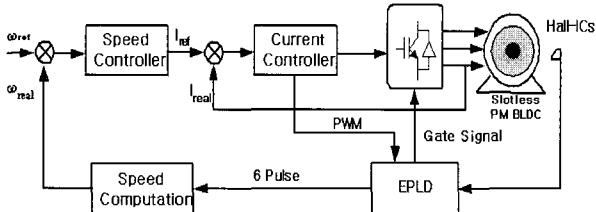


그림 2 슬롯리스 PM BLDC 전동기에 대한 폐루프 제어
Fig. 2 Closed-loop control for slotless PM BLDC Motor

PI제어기와 히스테리시스 전류제어를 사용하였으며 EPLD 로직을 이용하여 홀센서 신호를 입력으로 하여 한 주기내의 6펄스를 생성하며, 인버터 구동의 스위칭 순서를 결정하게 된다.

그림 3은 기준값(I_{ref})과 피드백에 의해 얻어진 실제 전류(I_{real})를 비교하는 히스테리시스 전류제어기를 나타낸다.

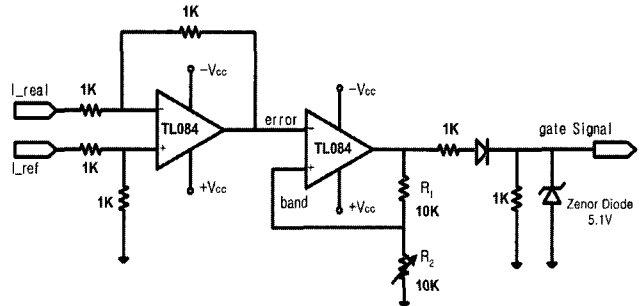


그림 3 히스테리시스 전류 제어기
Fig. 3 Hysteresis current controller

히스테리시스 전류 제어기의 동작원리는 전류센서로부터 얻어진 실제 전류(I_{real})와 80C196KC에서 계산된 기준값(I_{ref})사이의 오차가 OP-Amp 반전단자의 입력으로 가해지며, OP-Amp의 출력은 저항으로 분압되어 비반전 단자의 입력으로 들어가 히스테리시스 밴드를 형성하게 된다.

실제 전류(I_{real})와 기준값(I_{ref})과의 비교를 통해 히스테리시스 밴드 내에서 일정한 전류가 유지되도록 게이트 신호가 온-오프를 반복하도록 구성되어 있다.

2.2 제안한 홀센서 추정 방법

슬롯리스 PM BLDC 전동기는 회전자의 위치 검출을 위해 회전자 주위에 120°간격으로 일정하게 3개의 홀센서를 부착한다^[3].

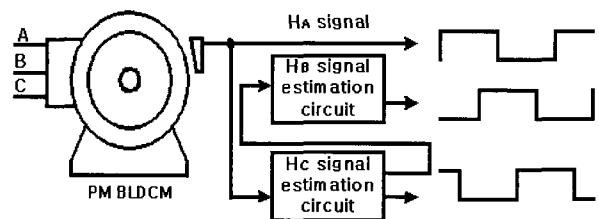


그림 4 제안한 슬롯리스 PM BLDC 전동기의 홀센서 추정 블록도 (1개의 홀센서 사용)
Fig. 4 Hall-ICs Estimation Block of The proposed slotless PM BLDC Motor (Using 1 Hall-IC)

그러나 본 논문은 1개의 홀센서를 이용하여 회전자의 위치 및 속도를 검출할 수 있는 방법을 제안하였다. 회전자 위치검출방법을 설명하기 위해 그림 4에서 1개의 홀센서를 가진 슬롯리스 PM BLDC 전동기의 홀센

서 검출방법을 간략하게 블록화 하였다.

그림 5는 입력으로 사용된 홀센서(H_A)신호와 bipolar 시킨 H_A' 그리고 실용 적분회로를 통해 출력되는 삼각파와 영점(ground)을 비교하여 영점이상 값에서 펄스가 발생되도록 구성하였다.

이러한 방법으로 발생된 H_C신호를 이용하여 같은 방법으로 H_B신호를 추정할 수 있다.

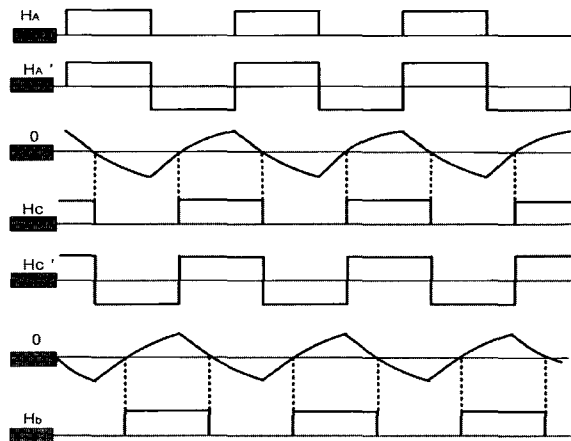


그림 5 홀 센서 추정방법 (H_B, H_C)
Fig. 5 Estimation Hall-ICs signals (H_B, H_C)

그림 6은 홀 센서신호 H_A를 이용하여 추정된 신호 H_B, H_C를 추정하는 회로도이다.

실용 적분 회로를 통해 출력 되어진 삼각파와 영점 (ground)을 비교하여 영점이상의 값에서 펄스가 발생되도록 구성하여 Hall-IC신호를 추정하였다.

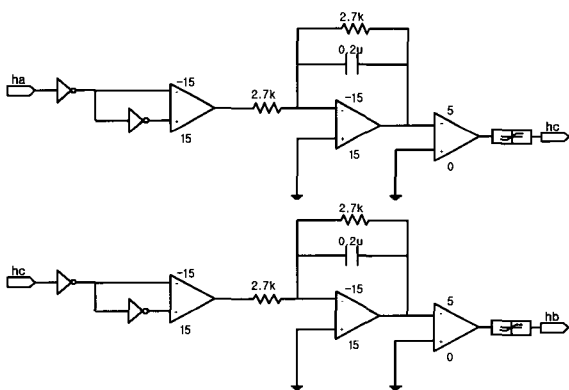


그림 6 홀 센서 추정회로 (H_B, H_C)
Fig. 6 Estimation Hall-ICs Circuit (H_B, H_C)

이렇게 추정하여 얻어진 홀센서신호는 기존의 슬롯리스 PM BLDC전동기의 홀센서 신호와 동일하게 120

도의 위상차를 가지고 발생하며, 각 상은 서로 60도씩 교차할수 있도록 정격속도 범위 내에서 R값과 C값을 정하였다.

또한 추정된 H_B, H_C를 이용하여 EPLD내에서 60도마다 6펄스가 발생되도록 회로를 구성하였다.

발생된 6펄스를 검출하여 엔코더에서 발생하는 A상과 B상의 펄스와 같은 역할을 할 수 있도록 저 분해능의 엔코더를 만들게 된다.

그림 7은 본 논문에서 사용된 실용 적분회로를 나타내는 것으로 위상적인 면에서 입력에 대하여 -90° 의 지연이 생기며 출력전압 V_o 는 콘덴서 C에 관계되며 C는 용량성 리액턴스를 정의한 식 (1)에서 알 수 있듯이 주파수에 영향을 받는다^[4].

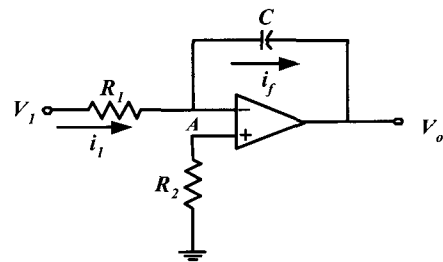


그림 7 실용적분 회로
Fig. 7 The practical integrator circuit

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1)$$

실용적분회로에서 주파수가 낮은 영역에서의 페루프 이득을 제한하기 위해서 R_s 를 삽입하며 만일 낮은 주파수일 때의 이득을 제한하지 않으면 직류 오프셋 전압이 작아져도 OP Amp가 포화 상태가 된다.

입력전압 V_i 의 주파수 f 가 $f_c (= 1/2\pi R_s C)$ 보다 작으면 이 회로의 동작은 단순한 반전 증폭회로가 되며 $V_o/V_i = -R_s/R$ 가 된다.

여기서 적분동작 한계주파수는 식 (2)로 정의된다.

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_s C} \quad (2)$$

따라서 Hall- IC H_A신호를 입력으로 하여 식 (2)를 이용하면 f_c 와 CR_s 의 값을 구할 수 있다.

속도 변화에 따른 f_c 와 CR_s 의 값도 변하기 때문에 정격속도에 맞는 시정수로 정하였으며 정밀한 속도 제어를

요하지 않는 곳의 경우 어느 정도 오차를 가지고서 속도 제어를 할 수 있다.

그림 8은 홀센서 신호에 의해 6 구간별로 인버터를 스위칭하여 각 상에 순차적으로 전류를 도통하는 것을 나타낸다.

제안한 방법으로 전동기를 운전할 경우 본 연구에서는 초기에 두상을 강제로 여자시켜 회전자를 원하는 위치에 오게 하는 강제정렬 방법을 사용하였다.

A상과 C상의 스위치(Q1, Q5)에 ON신호를 인가한다. 이 때, 전동기 정지시에는 작은 전압에도 높은 전류가 흐를 수 있어 영구자석 회전자를 감자시킬 수도 있기 때문에 많은 실험을 통하여 약 10V의 전압을 0.5초가량 가하여 회전자를 초기 위치에 정렬시킨다.

정렬된 후부터는 홀센서 HA신호와 추정된 신호(Hc, Hb)를 이용하여 전동기를 구동한다.

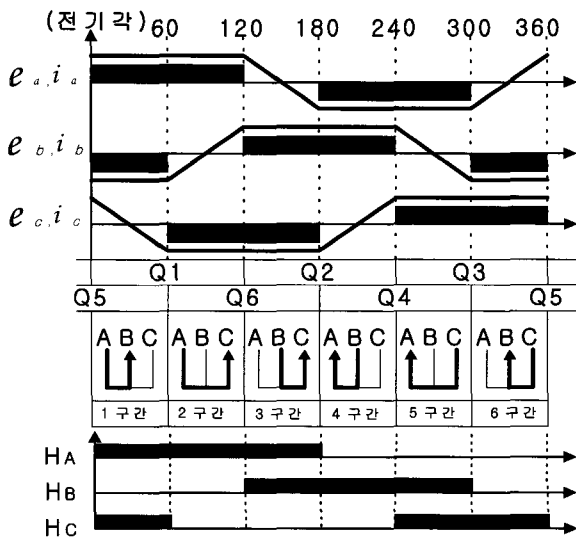


그림 8 역기전력, 전류, 인버터 스위칭, 홀센서 신호
Fig. 8 Back EMF, current waveforms, Inverter switching, Hall-IC signals((H_A, H_B, H_C))

3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 제안된 알고리즘을 PSIM6.0 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션 과정을 통해 그 타당성을 검증하였다.

그림 9는 슬롯리스 PM BLDC 전동기 구동 시스템의 전체적인 블록도를 나타낸다.

전체 구성은 슬롯리스 PM BLDC 전동기, 인버터, 게이트 드라이버, 스위칭 로직, 6펄스 로직, 홀센서 H_A 그리고 히스테리시스 전류제어 블록으로 구성되어 있다.

PI속도제어에는 DLL을 이용하여 6펄스를 입력으로 실제속도를 계산하는 회로를 이용하였다.

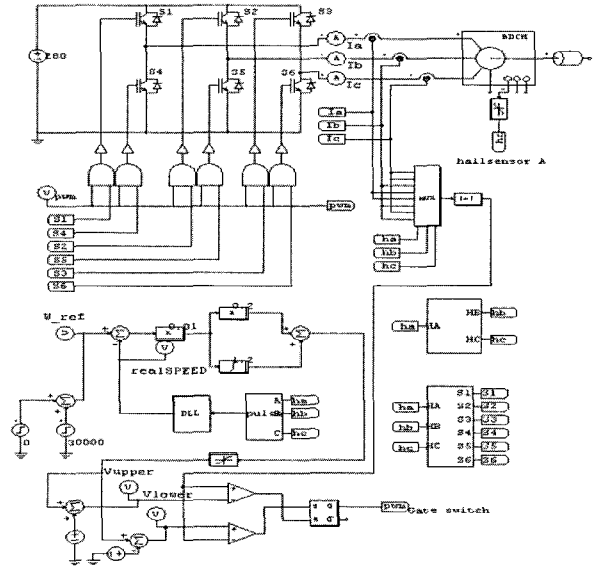


그림 9 시뮬레이션 전체 구성도
Fig. 9 Configuration of simulation

그림 10과 11은 홀센서 추정파형으로 홀센서 H_A 신호를 이용하여 bipolar 시킨 구형파로 변환할 수 있고, 변환된 신호로 OP-Amp의 적분된 출력인 삼각파를 영점과 비교하여 H_C를 추정할 수 있다.

이와 같은 방법으로 추정된 H_C를 이용하여 H_B신호를 추정할 수 있다.

그림 10에서 파형 (1)은 H_A, (2)는 H_A신호의 바이폴라 시킨 파형(H_A'), (3)은 H_A'신호 적분, (4)는 추정된 신호 H_C를 각각 나타낸다.

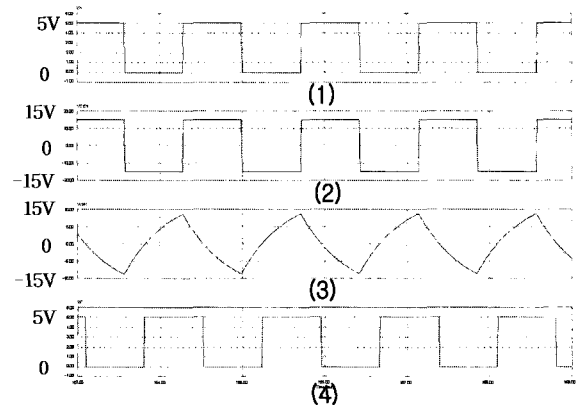


그림 10 추정된 홀센서 신호(H_C)파형
Fig. 10 Estimation Signal wave of the H_C

또한 그림 11에서 파형 (1)은 추정된 신호 Hc, (2)는 Hc신호의 바이폴라 시킨 파형(Hc'), (3)은 Hc'신호 적분, (4)는 추정된 신호 Hb를 각각 나타낸다.

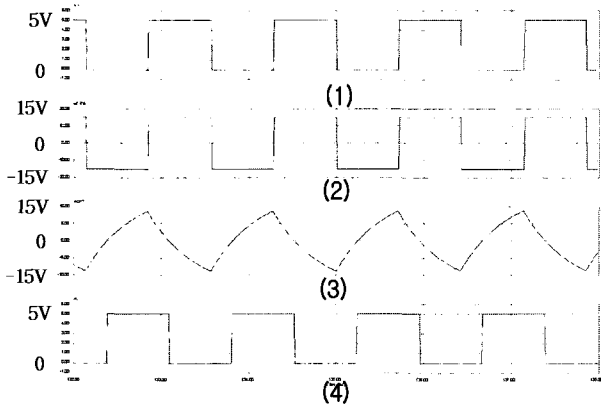


그림 11 추정된 홀센서 신호 (Hb)파형
Fig. 11 Estimation Signal wave of the Hb

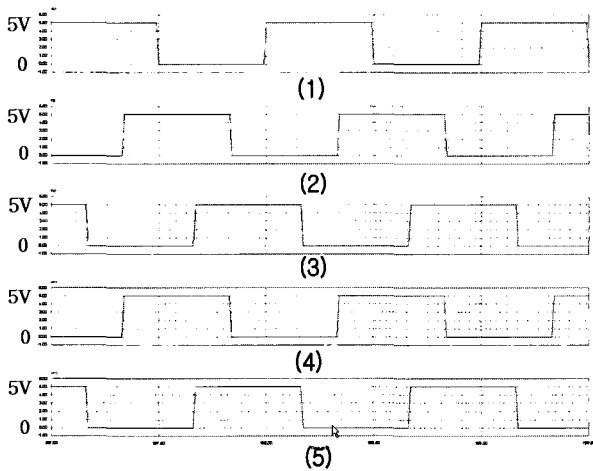


그림 12 홀 센서 신호와 추정된 신호(Hb, Hc)
Fig. 12 Hall-IC signals and estimation signals of the Hb and Hc (5V/div, 0.5ms/div)

그림 12는 각 상의 홀센서 신호와 추정된 신호(Hb, Hc)를 나타내는 것으로 홀센서 신호와 추정된 신호가 같음을 알 수 있다.

파형 (1), (2), (3)번은 Hall-IC를 사용하였을 경우 각각의 HA, HB, Hc 신호를 나타내고 있으며 (4), (5)번은 본 논문에서 제안된 회로를 사용하여 얻어진 추정된 신호 Hb, Hc를 나타내고 있다.

그림 13은 6펄스와 1개의 홀센서(HA)를 이용하여 추정된 신호들(Hb, Hc)을 나타내는 것으로 파형 (1)번은

추정된 신호 Hb, (2)번은 추정된 신호 Hc를 나타낸다.

그림 14는 27,000rpm의 속도로 회전할 때의 각 상전류 파형을 나타낸다.

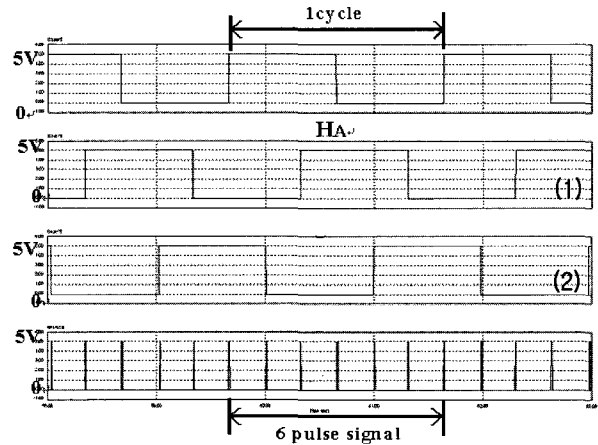


그림 13 6펄스와 홀센서 신호(1개의 홀센서 사용)
Fig. 13 6 pulse and Hall-IC signals.(Using 1Hall-IC) (5V/div, 1ms/div)

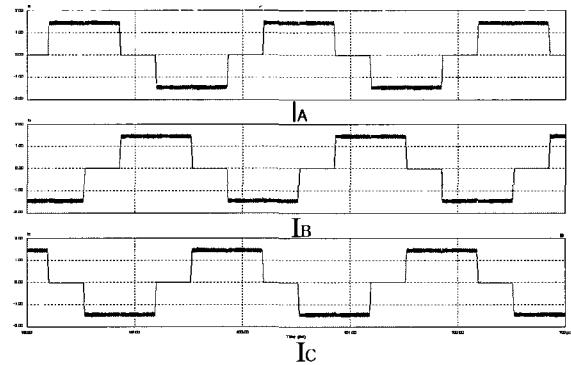


그림 14 각 상전류 파형(1A/div, 1ms/div)
Fig. 14 Each phase current waveform(1A/div, 1ms/div)

4. 실험 결과

그림 15는 슬롯리스 PM BLDC 전동기 구동을 위한 실험 세트 블록을 나타낸다.

실험세트는 슬롯리스 PM BLDC 전동기, 인버터, 게이트 드라이버, EPLD 그리고 PI 제어기로 구성되어 있다. EPLD에는 스위칭 로직과 속도 측정을 위한 6펄스 발생 블록, 신호 추정 알고리즘을 로직화하여 구현하였으며 마이크로프로세서는 INTEL사의 80C196KC를 사용하였다.

실험에 사용된 전동기는 슬롯리스 PM BLDC 전동

기로서 영구자석 회전자, 2극, Y결선으로 구성되어 있다.

슬롯리스 PM BLDC 전동기의 사양은 표1과 같다.

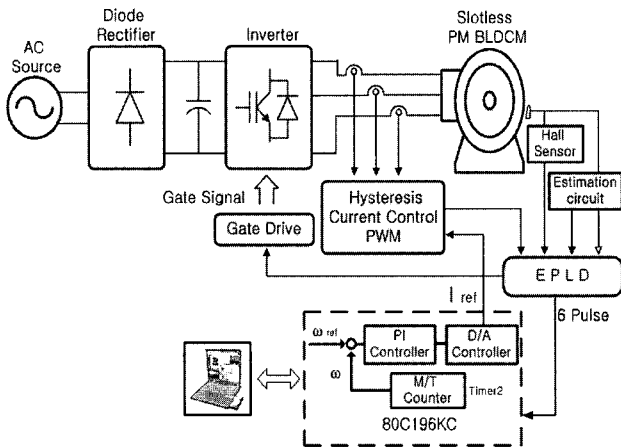


그림 15 슬롯리스 PM BLDC 전동기 구동 시스템
Fig. 15 Slotless PM BLDC motor driving system

표 1 슬롯리스 PM BLDC 전동기의 사양
Table. 1 Specification of Slotless PM BLDC motor

고정자 저항	0.88 Ω
정격 전압	90V~340Vdc
정격 입력	1 kW
정격 출력	0.9 kW
정격 속도	3,300rpm
정격 전류	3.6Amps at 280Vdc
극 수	2

그림 16과 17은 홀센서 H_A신호를 이용하여 bipolar 시킨 구형파로 변환하고, 변환된 신호로 OP-Amp의 적분된 출력인 삼각파를 영점과 비교하여 H_c 및 같은 방법으로 H_B를 추정한 실험결과이다.

그림 16에서 파형 (1)은 H_A, (2)는 H_A신호의 바이폴라 시킨 파형(H_{A'}), (3)은 H_{A'}신호 적분, (4)는 추정된 신호 H_c를 각각 나타낸다.

또한 그림 17에서 (1)은 추정된 신호 H_c, (2)는 H_c신호의 바이폴라 시킨 파형(H_{c'}), (3)은 H_{c'}신호 적분, (4)는 추정된 신호 H_B를 각각 나타낸다.

기존의 홀센서 3개를 사용하여 회전자의 위치를 판별하는 것과 같이 동일한 결과를 본 논문에서 제안한 회로를 사용하여 홀센서 H_A신호와 추정된 신호(H_B, H_c)를 얻을 수 있었다.

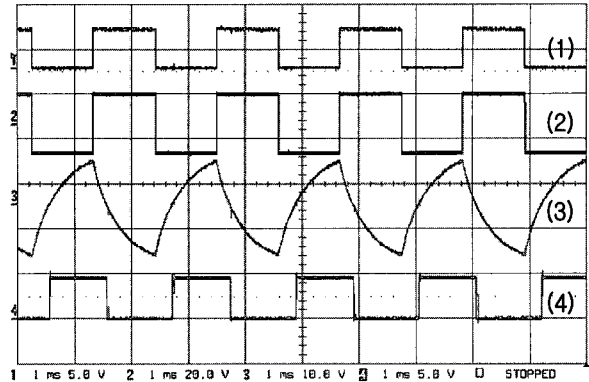


그림 16 HC 홀센서 추정
Fig. 16 Estimation of Hall-IC signal (HC)
(5V/div, 1ms/div, 27000rpm)

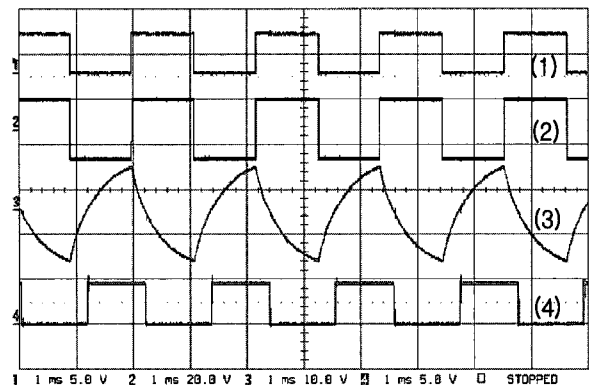


그림 17 HB 홀센서 추정
Fig. 17 Estimation of Hall-IC signal (HB)
(5V/div, 1ms/div, 27000rpm)

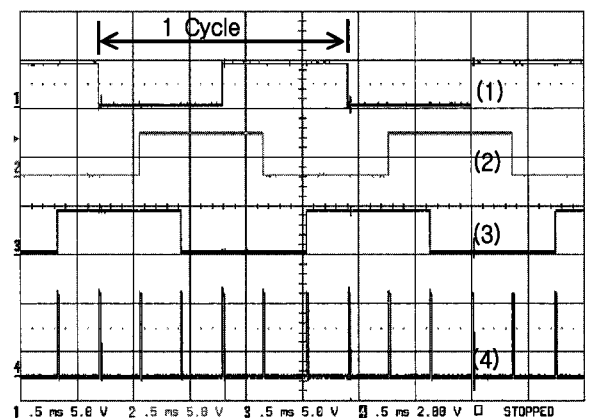


그림 18 홀 신호와 6펄스 (5V/div, 0.5ms/div, 27000rpm)
Fig. 18 Hall signals and 6 pulse (5V/div, 0.5ms/div, 27000rpm)

그림 18은 27000rpm으로 회전시 홀센서 H_A를 사용하여 추정된 신호 H_B, H_C와 6펄스를 나타내는 것으로 파형 (1)은 A상의 Hall-IC 신호 H_A, (2), (3)은 추정된 신호 H_B, H_C를 각각 나타낸다.

그림 19는 27000rpm으로 회전시 각각의 상전류를 나타내며 그림 20은 본 논문에서 사용된 전체실험 세트를 나타낸다.

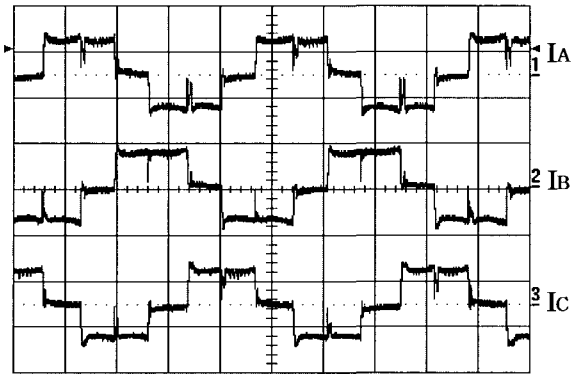


그림 19 각 상전류 파형 (2A/div, 0.5ms/div, 27000rpm)
 Fig. 19 Each phase current
 (2A/div, 0.5ms/div, 27000rpm)

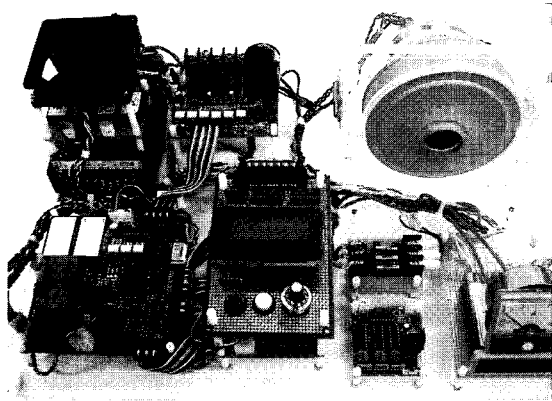


그림 20 실험 세트
 Fig. 20 Experimental test setup

5. 결 론

기존 3개의 홀센서를 이용해 회전자의 위치를 판별 하거나 고가의 엔코더, 레졸버보다는 단지 1개의 홀센서를 이용하여 회전자의 위치를 검출함으로써 구동 회로의 크기 및 가격을 낮출 수 있는 위치 검출 방법을 제안하였다.

또한 3개의 홀센서가 부착된 BLDC 전동기의 구동시 홀센서가 1개 혹은 2개가 고장 날 경우 제한한 알고리즘으로 전환하여 사용함으로써 보호회로의 역할을 할 수 있음을 증명하였다.

이는 저가의 산업기기 및 자동화기기에 적용될 수 있으며 정밀한 속도 제어를 요하지 않는 곳의 경우 홀센서를 가지고 속도 센서 역할을 대신 할 수 있으므로 진공청소기 등에 응용이 가능하다.

이 논문은 2004년도 산학연 공동기술개발사업 (2004-005) 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] F.Caricchi, F.Giulii Capponi, F. Crescimbin, L. Solero, "Sinusoidal Brushless Drive with Low Cost Hall Effect Position Sensors", IEEE Trans. Ind. Application, pp. 799~804, 2001.
- [2] Ting-Yu Chang, Ching-Tsai Pan, Jenn-Hong Liaw and Shinn-Ming Sue, "A Hall-Sensor-Based IPM Traction Motor Drive", IEEE Trans. Ind. Application, pp. 840~843, 2002.
- [3] Jong-Bae Lee, Tae-Bin Im, Ha-Kyong Sung, Young-Ouk Kim "A Low Cost Speed Control System of Brushless DC Motor Using FuzzyLogic", IEEE Trans. Ind. Application, Vol.2, pp.433~436, 1999.
- [4] 윤용호, 우무선, 김덕규, 원충연, 최유영, "2Hall-ICs를 이용한 저가형 PM Brushless DC Motor 속도 제어", 전력전자 학회지, Vol. 9, pp. 313~318, 2004.
- [5] Yong-Ho Yoon, Mu-Sun Woo, Tae-Won Lee, Chung-Yuen Won, You Young Choe, " PLL Control Algorithm for Precise Speed Control of the Slotless PM Brushless DC Motor Using 2Hall-ICs" PESC' 04, pp. 1315~1321, 2004.
- [6] P. Vedagarbha, D.M. Dawson, S. Nagarkatti, "Minimization of the Energy Consumed by the Brushless DC Motor during Position Tracking Applications", IEEE Trains. Ind. Application, pp. 3803~3804, 1997.
- [7] D.E. Hesmondhalgh, D. Tipping, M. Amrani, "Performance and design of an electromagnetic sensor for brushless DC motors", IEEE Trains. Ind. Application, pp. 174~183, 1990.
- [8] Fang Lin Luo, Hock Guan Yeo "Advanced PM Brushless DC Motor Control & System for Electric

- Vehicles", IEEE Trans. Ind. Application, Vol. 2, pp. 1336~1343, 2000.
- [9] H. Hashimoto, T. Nakayama, S. Kondo, F.Hara shima, "Variable structure approach for brushless servo motor control", IEEE Trans. Ind. Application, pp. 116~122, 1989.
- [10] Pragasen Pillay, Ramu Krishnan, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Drives", IEEE Trans. Ind. Application, Vol.25, No.2, pp. 274~279, 1989.
- [11] 김종선, 유지윤, 배종표, 서문석, 최옥돈, "전기자동차용 브러시리스 직류 전동기의 센서리스 드라이브 개발에 관한 연구", 전력전자 학회지, Vol. 8, pp. 336~343, 2003.
- [12] 이광운, 홍희정, 박정배, 여형기, 이인호, 유지윤, "브러시리스 직류 전동기의 토크 맥동 저감을 위한 전류 제어 방식", 전력전자 학회지, Vol. 3, pp.191~198, 1998.



원충연(元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문교수. 현재 성균관대 정보통신공학부 교수. 당 학회 부회장.



최유영(崔有永)

1961년 5월 21일생. 1983년 한양대 전기공학과 졸업. 1985년 경희대 공대 대학원 전자공학과(석사). 1989년 4월~2001년 8월 삼성전기 전자전동연구실 책임연구원. 현재 (주)키네모손 대표이사.

저 자 소 개



윤용호(尹溶湖)

1973년 5월 9일생. 2002년 성균관대 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 2002년 LG전자 DDM사업부 입사. 2003년~현재 성균관대 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정.



김연충(金淵忠)

1970년 2월 14일생. 1995년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박). 현재 (주)팩테크 개발부 차장.



이상석(李相錫)

1959년 5월 20일생. 1983년 중앙대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 성균관대 대학원 전기공학과 박사과정. (주)팩테크 대표이사.