

2Hall-ICs를 이용한 저가형 PM Brushless DC Motor 속도 제어

尹溶湖[†], 禹武善^{*}, 金德圭^{*}, 元忠淵^{**}, 崔有永^{***}

Low Cost Speed Control System of PM Brushless DC Motor Using 2 Hall-ICs

Yong-Ho Yoon, Moo-Sun Woo, Duck-Kyu Kim, Chung-Yuen Won, and You-Young Choe

요 약

최근 각종 산업기기 및 자동화기기에는 회전자가 영구자석으로 구성된 브러시리스 전동기의 사용이 증가하고 있다. 그러나 회전자가 영구자석으로 이루어진 BLDC 전동기의 경우 회전자 위치 판별 센서는 필수 요소이다. 그러나 센서(엔코더, 레졸버등)를 사용할 경우 크기 증가, 비용 상승 등의 원인으로 작용한다. 따라서 본 논문에서는 PM BLDC 전동기의 속도제어를 수행함에 있어 기존의 엔코더와 Hall-IC 3개를 이용하지 않고, 두개를 이용하여 회전자의 위치를 판별함과 동시에 속도 센서를 대신하여 사용할 수 있는 방법을 제안하였다. 그 결과 성능은 동일하고, 구동회로의 크기와 제조 단가를 낮출 수 있는 효과를 얻었다.

ABSTRACT

Generally, PM BLDC drive system is necessary that the three Hall-ICs evenly be distributed around the stator circumference and encoder installed in case of the 3 phase motor. The Hall-ICs are set up in this motor to detect the main flux from the rotor. So the output signal from Hall-ICs is used to drive a power transistor to control the stator winding current. Instead of using three Hall-ICs and encoder, this paper uses only two Hall-ICs for the permanent magnet rotor position and for the speed feedback signals, and uses a micro controller of 16-bit type(80C196KC) with the 3 phase PM BLDC whose six stator and two rotor designed. Two Hall-IC H_c and H_B are placed on the endplate at 120 degree phase difference. With these elements, we estimate information of the other phase in sequence through a rotating rotor.

Key Words : PM BLDC, 2 Hall-ICs, Estimation Hall-IC signal, 6 pulse, 80C196KC

1. 서 론

최근 각종 산업기기 및 자동화기기에는 회전자가 영구자석으로 구성된 브러시리스 서보 전동기의 사용이 증가하고 있다. 이 중에서 역기전력 파형이 사다리꼴로 나타나며 구형과의 상전류를 순차적으로 인가해주면 일정토크를 발생시킬 수 있는 브러시리스 직류전동기 (PM Brushless DC Motor ; 이하 PM BLDC 전동기)에 대하여 연구하고자 한다.

이러한 PM BLDC 전동기는 직류전동기의 계자와

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

^{*}학생회원, 성균관대 정보통신공학부 석사과정

^{**}정회원, 성균관대 정보통신공학부 교수

^{***}정회원, (주)키네모션 대표이사

접수일자 : 2003. 12. 27 1차 심사 : 2004. 3. 8

2차 심사 : 2004. 4. 22 심사완료 : 2004. 4. 27

전기자를 제거한 형태로서 무 브러시로 인한 견고성, 저소음, 무보수성, 긴 수명 및 회전자 손실이 없고 제어기가 간단하고 운전영역이 매우 넓다는 장점을 가지고 있다.

PM BLDC 전동기의 속도를 제어하는 방법에는 속도 센서를 이용하는 방법과 이용하지 않는 센서리스 방법으로 나눌 수 있다.

첫째, 센서를 사용하는 경우는 회전자의 위치를 검출하기 위해 자기 센서 혹은 광센서를 사용하며, 속도를 검출하기 위해 엔코더와 레졸버 등의 속도 센서가 필요하다.

그러나 엔코더와 레졸버의 경우 고가이며 고속 회전시 측정이 어렵게 된다. 또한 전동기 구동 회로의 제조 단가 상승, 부피 증가 등의 원인으로 작용한다.^[1]

둘째, 센서리스의 경우의 센서를 사용하지 않기 때문에 센서를 이용할 수 없는 곳에서도 사용이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

그러나 센서리스 제어의 경우 제어 대상인 모터의 파라미터가 변화되면 동일한 알고리즘 적용이 어려움을 가지고 있으며, 복잡한 연산을 필요로 하기 때문에 고성능의 프로세서를 요구한다는 단점을 가지고 있다.^[2]

이러한 이유로 본 논문에서는 PM BLDC 전동기의 속도제어를 수행함에 있어 별도의 속도 센서 없이 위치 검출 센서인 Hall-ICs를 이용하여 회전자의 위치를 판별함과 동시에 속도 센서를 대신하여 사용할 수 있는 방법을 제안하였다.

또한 기존의 시스템의 경우 Hall-ICs를 3개 이용하지만 본 연구에서는 2개를 사용해서 PM BLDC 전동기 및 구동 회로의 제조 단가를 낮추고 크기를 줄일 수 있는 효과를 얻었다.

2. 본 론

2.1 PM BLDC 모터 제어

그림 1은 PM BLDC 전동기의 전체 속도 제어 블록도를 나타내고 있다 시스템 상수는 표 1과 같다.

Hall-ICs로부터 회전자 위치 정보와 속도 정보를 추정하여 속도 제어기의 실제 속도(ω) 입력이 되고, 속도 제어기는 전류 지령값(I_{ref})을 실제 측정된 전류(I)와 비교하여 전류제어를 수행하게 된다. 속도 제어기는 PI 제어, 전류 제어기는 히스테리시스 전류제어를 하였다.

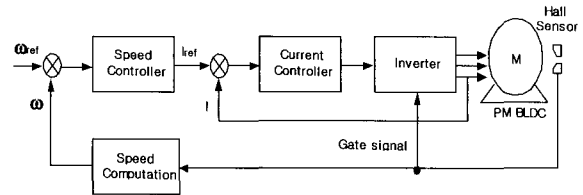


그림 1 PM BLDC 전동기의 폐루프 제어 블록도
Fig. 1 Closed-loop control for PM BLDC motor

그림 2는 실제 히스테리시스 전류 제어에 사용된 회로를 나타내고 있다.

전류 센서(CT)로부터 검출된 실제 전류(I)와 80C196KC에서 계산된 지령전류(I_{ref})사이의 오차가 OP Amp 반전단자의 입력으로 가해지며, OP Amp의 출력은 저항으로 분압 되어져 비반전 단자의 입력으로 들어가 히스테리시스 밴드를 형성하게 된다. 이렇게 실제 전류, 제어량 사이의 오차값과 밴드내의 기준값과의 비교를 통해 밴드 내에서 일정한 전류가 유지되도록 게이트 신호가 온-오프를 반복하도록 구성되어 있다.

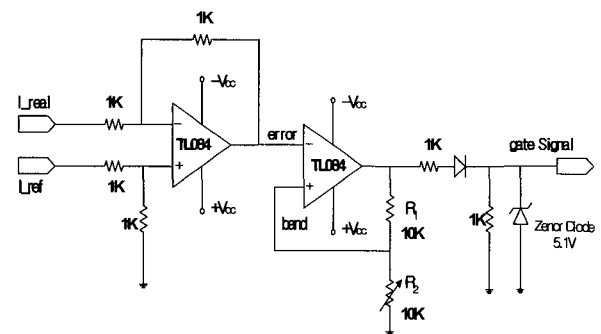


그림 2 히스테리시스 전류 제어
Fig. 2 Hysteresis current controller

$$V_{UT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (+V_{sat})$$

$$V_{LT} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (-V_{sat}) \tag{1}$$

히스테리시스 밴드 폭을 결정하는 Upper-Threshold, Lower-Threshold 전압식은 식 (1)과 같은 전압 방정식으로 구해진다.^[3]

여기서 히스테리시스 전압 V_H 는 식 (2)와 같다.

$$V_H = V_{UT} - V_{LT} \tag{2}$$

제어기의 구현을 위한 OP Amp는 저가이면서도 고속이며 특히 High Slew Rate를 가진 TL084를 사용하였다.

가변저항으로 구성된 R_2 의 값을 조정하여 히스테리시스 밴드를 기변할 수 있다. 밴드는 토크 리플과 관련이 있으므로 부하에 따라 적절하게 조정되어야 된다. 밴드가 아주 작게 되면 스위칭 주파수가 높아지고 그 만큼의 손실이 증가한다.

2.2 제안된 Hall-IC 신호 추정 알고리즘 구현

그림 3은 2 상의 Hall-ICs 신호를 가지고 나머지 한 상의 신호를 추정하는 알고리즘을 구현한 블록을 나타내고 있다. 일반적으로 PM BLDC 전동기의 경우 각 상의 위치 판별을 위해 각 상에 대해 Hall-IC를 갖는 것이 기본이다.

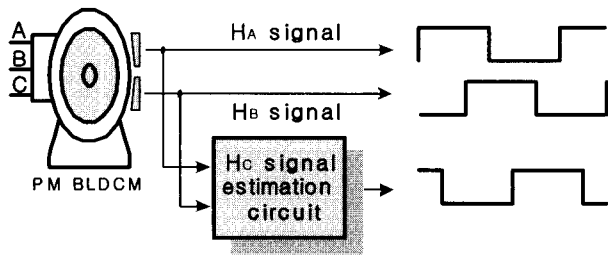


그림 3 제안된 Hall-IC(Hc) 추정 블록도
Fig. 3 The proposed estimation signal of the Hall-IC(Hc)

그러나 본 논문에서는 두 개의 Hall-IC를 이용하여 나머지 한 상의 신호를 추정할 수 있는 회로를 설계하는 방법을 제안하였다.

적분 회로는 주파수적인 면에서 보면 주파수가 2배가 될 때마다 이득은 1/2되는 특성을 가지고 있으며, 위상적인 면에서는 입력에 대하여 -90°의 지연이 생긴다. 또한 이 회로는 톱니파 또는 삼각파를 만드는 경우와 타이머에 응용할 경우 및 미분형 센서의 출력을 실제의 변위 값으로 변환하는 회로 등에 많이 활용되고 있다.

그림 4는 일반적인 적분회로를 나타내고 있다. 이 적분회로는 입력전류 i_1 와 피드백전류는 $i_1 = i_f$ 인데 이를 이용하여 적분회로를 해석한다.

그림 4의 입력전압 V_1 에 의해 흐르는 입력전류 i_1 은 A점이 이미지너리 어스(imaginary earth)인 개념을 이용하면 식 (3)로 표현된다.

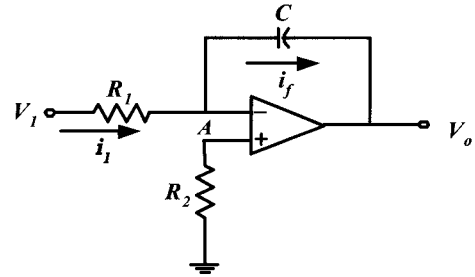


그림 4 적분 회로
Fig. 4 The practical integrator circuit(Hc)

$$i_1 = \frac{V_1 - V_A}{R_1} = \frac{V_1}{R_1} \tag{3}$$

적분회로의 출력전압 V_o 는 식 (4)에서 보듯이 콘덴서 C에 관계되며, 이 C는 용량성 리액턴스를 정의한 식 (5)에서 알 수 있듯이 주파수에 영향을 받음을 알 수 있다.^[3]

$$\begin{aligned} V_A - V_o &= -V_o = \frac{1}{C} \int_0^t i_f dt \\ &= \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt \\ &= \frac{1}{CR_1} \int_0^t V_1 dt \end{aligned}$$

$$\therefore V_o = -\frac{1}{CR_1} \int_0^t V_1 dt \tag{4}$$

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} [\Omega] \tag{5}$$

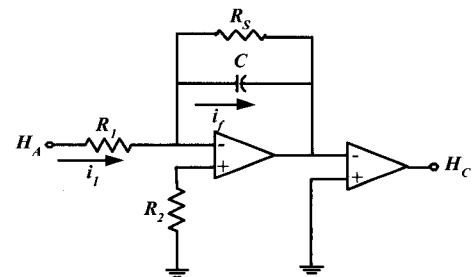


그림 5 제안된 Hall-IC (Hc) 추정 회로도
Fig. 5 The proposed estimation circuit of the Hall-IC(Hc)

그림 5는 실용적분회로와 영점 검출회로를 포함한 본 논문의 Hall-IC추정 회로를 나타내고 있다. 실용 적

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

그림 6은 입력으로 사용된 Hall-IC(H_A)신호와 bipolar시킨 H_{A'} 그리고, 추정된 H_C신호를 나타내고 있다.

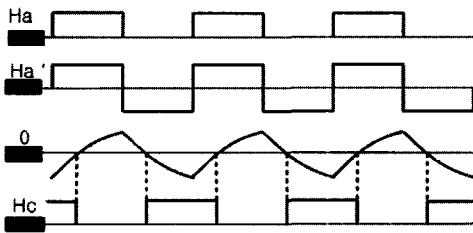


그림 6 제안된 Hall-IC (H_C) 회로 각부 파형
Fig. 6 The proposed estimation circuit signal of the Hall-IC(H_C)

2.3 제안된 속도 판별 알고리즘 구현

그림 7은 Hall-ICs의 신호를 가지고 속도를 판별할 수 있는 알고리즘을 구현하였다. 일반적으로 속도를 측정하기 위해서는 엔코더나 레졸버와 같은 속도 센서를 사용해야만 한다. 그러나 본 논문에서는 위치 판별용 센서인 Hall-IC의 신호를 가지고 속도센서를 대신할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

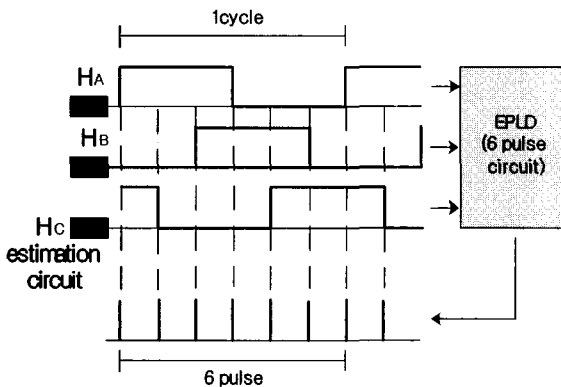


그림 7 홀 IC신호와 속도 펄스
Fig. 7 Hall-IC signals and speed pulse

Hall-IC는 120도의 위상차를 가지고 발생하며, 각상은 서로 60도씩 교차하게 되어있다. 이와 같은 방법으로 EPLD내에서 60도 마다 펄스가 발생 되도록 회로를 구현하여, 엔코더에서 발생하는 A상과 B상의 펄스와 같은 역할을 할 수 있도록 펄스를

발생시켜 저 분해능의 엔코더를 구성하였다.^[4]

그림 8은 EPLD내부의 6 pulse 블록에 구성되어진 디지털 로직을 나타내고 있다.

두개의 Hall-IC 신호와 그림 5의 회로를 통해 추정된 나머지 한 개의 Hall-IC(H_C)신호를 입력으로 이용하여 디지털 소자와 플립플롭 등을 이용하여 속도 판별의 기준이 되는 6 pulse를 구성하는 디지털 회로를 나타내고 있다.

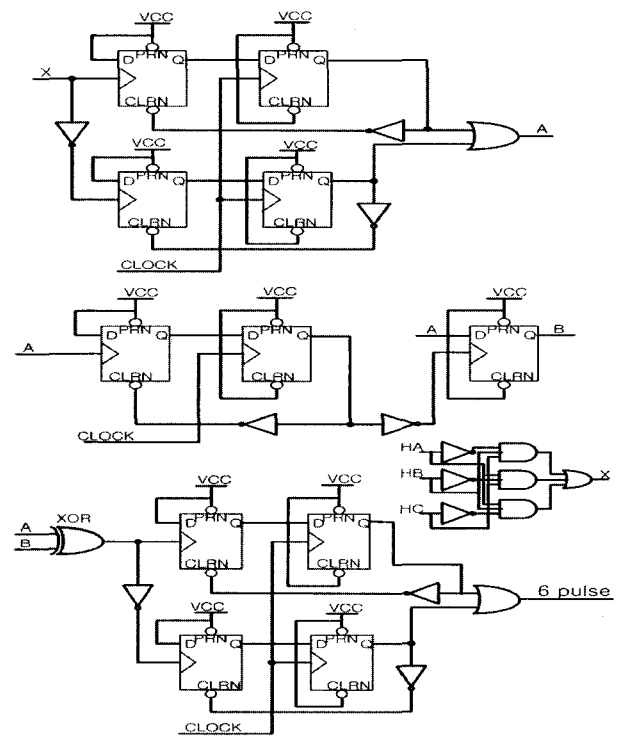


그림 8 6 pulse 회로
Fig. 8 The circuit of 6 pulse

3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안된 알고리즘을 PSIM 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션과정을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

그림 9는 PM BLDC 전동기 구동 시스템의 전체시뮬레이션 블록도를 나타내고 있다. 전체 구성은 PM BLDC 전동기, 인버터, 게이트 드라이버, 스위칭 로직, 6 pulse 로직, 속도 및 전류 제어 블록으로 구현하였고, 6 pulse 로직 부분은 PSIM내의 DLL을 이용하여 C로 작성하였다.

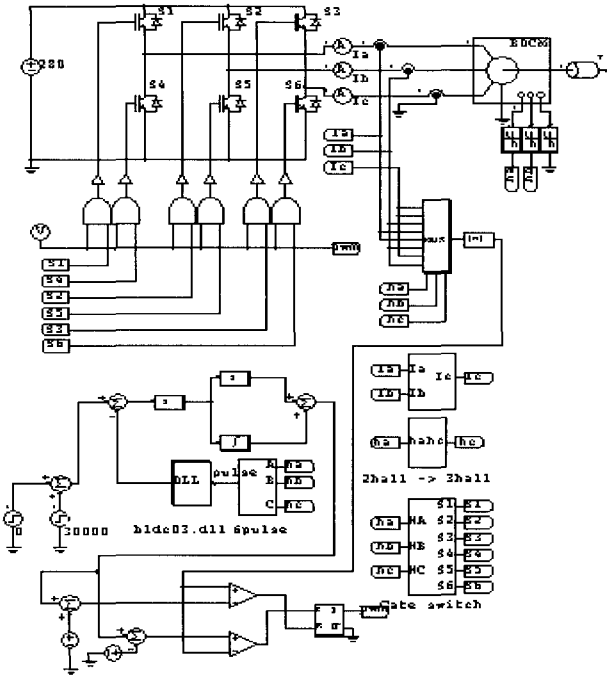


그림 9 PM BLDC motor의 전체 시뮬레이션 블록도
 Fig. 9 The overall block diagram of the developed model for PM BLDC motor drive system

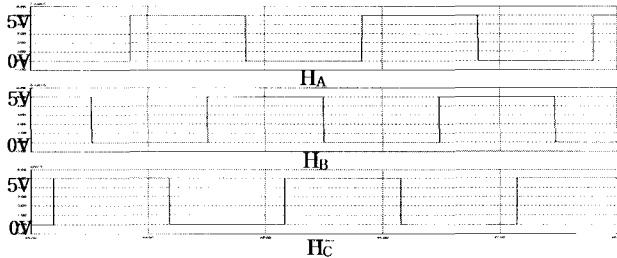


그림 10 각 상의 Hall-IC 신호 (1V/div, 1ms/div)
 Fig. 10 Each phase Hall-IC signal

그림 10은 일반적인 PM BLDC 전동기의 위치 판별 센서로 이용되는 3개의 Hall-IC 신호를 나타내고 있으며, 각각의 Hall-IC 신호는 120도의 위상차를 가지고 각 상에 대한 회전자의 위치를 나타내고 있다.

그림 11은 Hall-IC 중 HA 신호를 이용, Hc신호를 추정하는 알고리즘을 사용하여 만들어낸 Hc신호를 나타내고 있다. HA의 Hall-IC 신호를 가지고 적분기의 입력으로 사용하고 출력된 신호와 영점(ground)을 비교기 입력으로 사용하여 영점(ground)과 교차되는 지점에서 신호를 발생시키면 Hc에 해당되는 Hall-IC 신호를 추정할 수 있다.

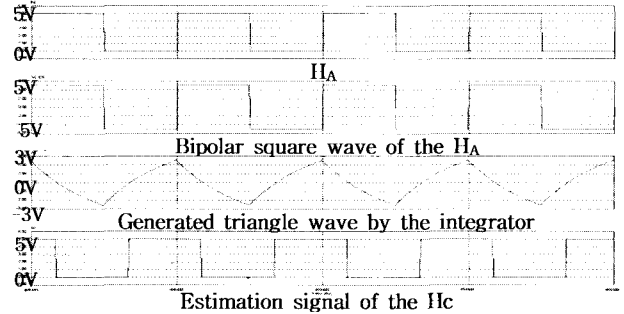


그림 11 Hall-IC(Hc) 신호 추정 (1ms/div)
 Fig. 11 Estimation of the Hall-IC signal(Hc)

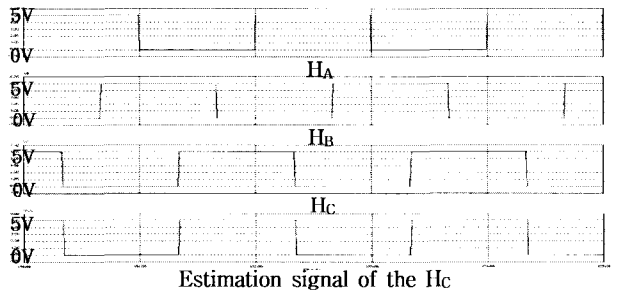


그림 12 Hall-IC 신호와 추정된 Hc 신호 (1V/div, 1ms/div, 30000rpm)
 Fig. 12 Hall-IC signals and estimated signal of the Hc, 30000rpm

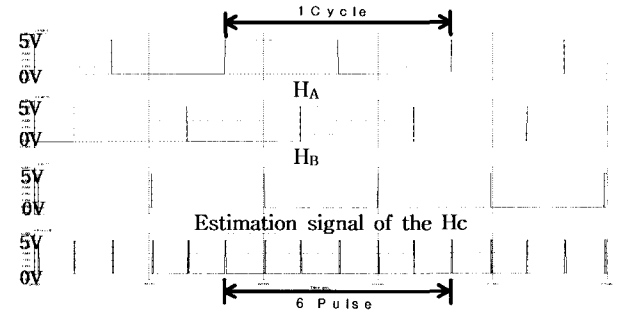


그림 13 6 pulse 와 Hall-IC 신호 (1/div, 1ms/div, 30000rpm)
 Fig. 13 6 pulse and Hall-IC signals, 30000rpm

위와 같은 방법에 의해 추정된 Hall-IC(Hc) 신호는 그림 12를 통해 기존의 Hall-IC(Hc) 신호와 비교하여 차이가 없음을 알 수 있다.

그림 13은 속도 제어를 위해 2개의 Hall-IC신호 HA로부터 Hc신호를 추정하였고 각 상에 대한 Hall-IC 신호와 추정된 신호에 대한 상승부분과 하강부분을 검

출하여 60도 마다 펄스를 발생시킨다. 이는 프로세서의 카운터를 이용하여 속도를 측정할 수 있는 기준값으로 사용되어 진다.

그림 14는 각 상전류 파형을 나타내고 있다.

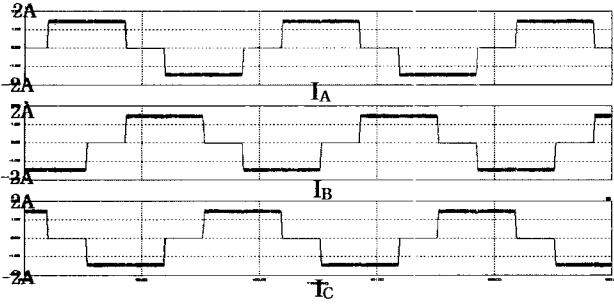


그림 14 각 상의 전류 파형(2A/div, 1ms/div, 30000rpm)
Fig. 14 Each phase current waveform, 30000rpm

4. 실험 결과

본 논문에서는 저 가격의 80C196KC 제어보드를 사용하였으며 인버터는 고 신뢰성을 갖는 IPM을 사용하여 제작하였다.

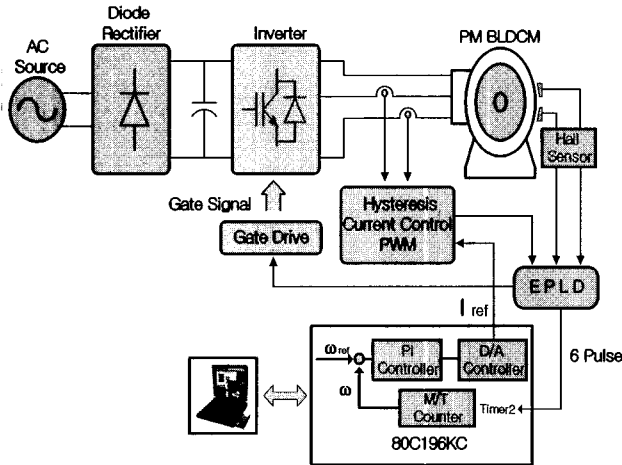


그림 15 PM BLDC 전동기의 구동 시스템
Fig. 15 PM BLDC Motor driving system

그림 15는 2 Hall-ICs를 이용한 PM BLDC 전동기 구동 시스템의 전체 블록을 나타내고 있다. 본 시스템은 PM BLDC 전동기, 인버터, 게이트 드라이버, EPLD(Erasable Programmable Logic Device) 그리고 PI 제어 보드로 구성되어 있다.

EPLD에는 스위칭 로직과 속도 측정을 위한 6 pulse 발생, Hc신호 추정 알고리즘이 로직화 되어 구현하였다.

실험에 사용된 PM BLDC 전동기는 2극, Y결선으로 구성되어 있으며 사양은 표1과 같다.

표 1 PM BLDC 전동기 구동 시스템 사양
Table 1 Specification of PM BLDC motor

고정자 저항	0.88
입력 전압	90Vdc ~ 340Vdc
정격 입력 전력	1KW
정격 출력 전력	0.9KW
정격 속도	33000rpm
정격 전류	3.6Amps at 280Vdc
극수	2
정격 Torque	0.245Nm(2.5KgfCm)
고정자 인덕턴스	1.5mH
Inertia	$15.067 \times 10^6 \text{Kg}m^2$
토크 상수	0.07433

그림 16은 실험에 사용한 EPLD내부 블록도로써 인버터의 각 스위치 신호와 속도제어에 필요한 6펄스를 발생하는 회로로 구성되어 있다.

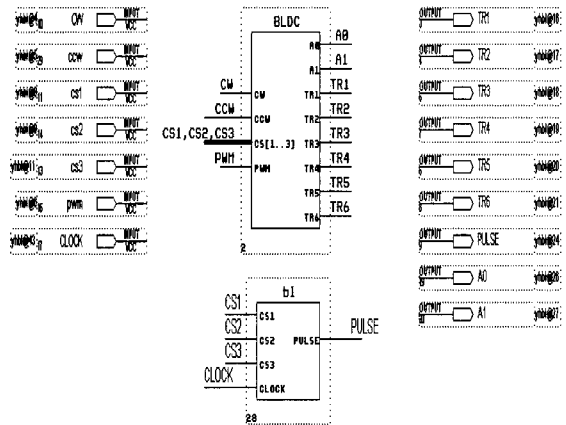


그림 16 EPLD 내부 블록도
Fig. 16 Block diagram of EPLD

그림 17은 EPLD 내에서 설계한 회로 6 pulse 블록을 시뮬레이션 한 결과로서 Hall-ICs의 신호들을 입력으로 하여 한주기당 6개의 pulse가 발생되는 것을 보여주고 있다.

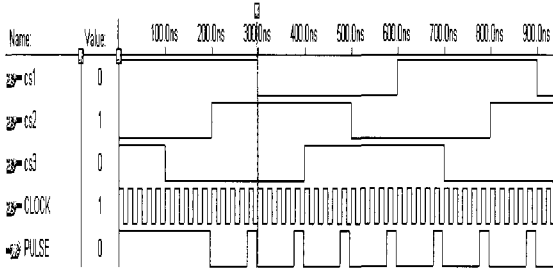


그림 17 6 pulse 블록 시뮬레이션 결과
Fig. 17 The simulation results of 6 pulse block

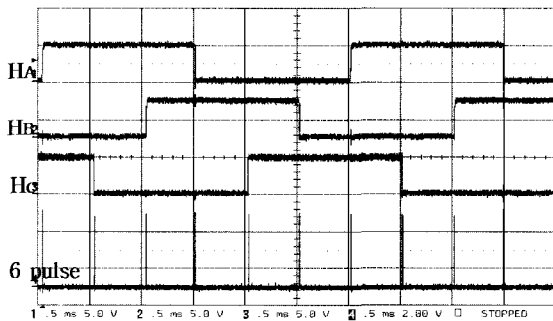


그림 18 Hall-IC 신호와 6 pulse, 3개의 Hall-IC이용
(5V/div, 0.5ms/div, 20000rpm)
Fig. 18 Hall-IC signals and 6 pulse
(using the three Hall-IC)

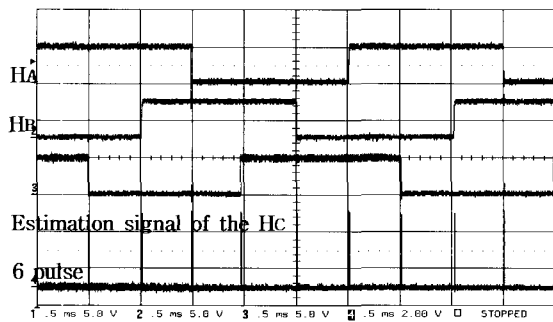


그림 19 Hall IC 신호와 6 pulse, 2개의 Hall-IC이용
(5V/div, 0.5ms/div, 20000rpm)
Fig.19 Hall-IC signals and 6 pulse
(using the two Hall-IC)

그림 18과 그림 19는 6 pulse와 각각의 Hall-IC 신호를 20000rpm에서 비교한 것이다.

그림 18의 경우는 일반적으로 사용되는 3개의 Hall-ICs를 이용한 방법이고, 그림 19는 제안된 2개의 Hall-ICs를 이용한 방법으로서 서로 동일한 결과를 얻은 것을 알 수 있다.

그림 20은 30000rpm으로 회전 시 각 상의 전류를 나타내고 있다.

그림 21은 전체 실험 보드를 나타내고 있다.

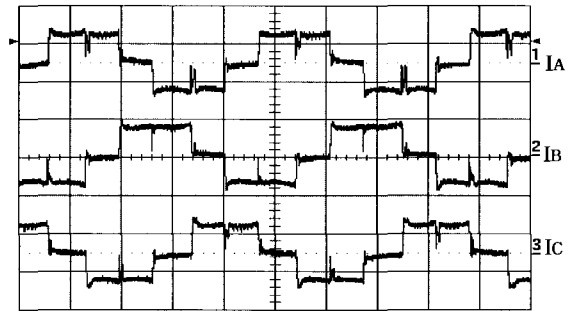


그림 20 각 상전류 파형
(2A/div, 0.5ms/div, 30000rpm)
Fig. 20 The waveform of each phase current

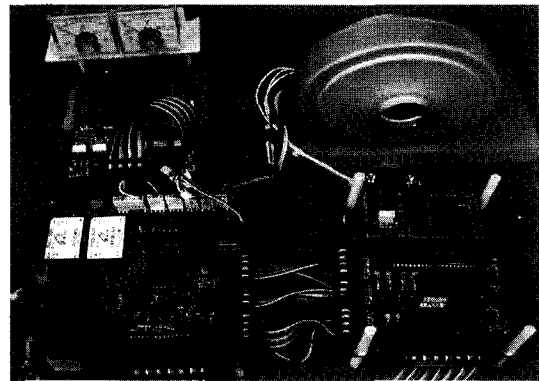


그림 21 전체 실험
Fig. 21 The experimental set-up

4. 결 론

제안된 알고리즘으로 알고자 하는 C상의 Hall-IC (HC) 신호를 추정하고, 각 상의 Hall-IC 신호(HA, HB, HC)를 이용하여 속도 제어를 하였다.

기존에 속도 제어를 가능하게 하기 위해 필요한 고가의 속도 센서인 엔코더와 레졸버 역할을 대신하여 전체적인 구동 회로의 가격을 최소한으로 감소시킬 수 있었다.

이는 실제 산업계에서도 정밀한 속도 제어를 요하지 않는 곳의 경우 기존에 PM BLDC 전동기 내부에 있는 위치센서를 가지고 속도 센서 역할을 대신할 수 있으므로 진공청소기 등에 응용이 가능하다.

이 논문은 에너지관리공단의 에너지절약기술개발 사업 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, 2000.
- [3] Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll "Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits", Prentice Hall, pp. 90~140, 2001,
- [4] Jong-Bae Lee, Tae-Bin Im, Ha-Kyong Sung, Young-Ouk Kim "A Low Cost Speed Control System of Brushless DC Motor Using Fuzzy Logic", IEEE Trans. Ind. Application, Vol. 2, pp. 433~436, 1999.
- [5] Fang Lin Luo, Hock Guan Yeo "Advanced PM Brushless DC Motor Control & System for Electric Vehicles", IEEE Trans. Ind. Application, Vol. 2, pp. 1336~1340, 2000.
- [6] Pragasen Pillay, Ramu Krishnan, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives, Part II: The Brushless Dc Motor Drive", IEEE Trans. Ind. Application, Vol. 25, pp. 274~279, 1989.
- [7] 여형기, 김태형, 이광운, 박정배, 유지윤, "BLDC 전동기용 센서리스 드라이브의 토크 리플 저감을 위한 轉換방법 에 관한 연구", 전력전자 학회지, pp. 199~205, 1998.
- [8] 김종선, 유지윤, 배종표, 서문석, 최육돈, "전기자동차용 브러시리스 직류 전동기의 센서리스 드라이브 개발에 관한 연구", 전력전자 학회지, Vol. 8, pp. 336~343, 2003.
- [9] 이광운, 홍희정, 박정배, 여형기, 이인호, 유지윤, "브러시리스 직류 전동기의 토크 맥동 저감을 위한 전류 제어 방식", 전력전자 학회지, Vol. 3, pp. 191~198, 1998.

저 자 소 개



윤용호(尹溶湖)

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



우무선(禹武善)

1976년 11월 9일생. 2003년 수원대 전기공학과 졸업. 2003년~현재 성균관대 정보통신공학부 석사과정.



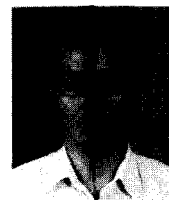
김덕균(金德圭)

1976년 1월 11일생. 2002년 대전대 전기공학과 졸업. 2002년~현재 성균관대 정보통신공학부 석사과정.



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/전자 전동연구실 책임연구원. 현재 (주)키네모손 대표이사.