

## 2 Hall-ICs를 이용한 Slotless PM Brushless DC Motor의 정밀속도제어를 위한 PLL 제어방식

尹溶湖<sup>\*</sup>, 李昇峻<sup>\*\*</sup>, 金英蘭<sup>\*\*\*</sup>, 元忠淵<sup>†</sup>, 崔有泳<sup>\*\*\*\*</sup>

### PLL Control Method for Precise Speed Control of Slotless PM Brushless DC Motor Using 2 Hall-ICs

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

#### 요 약

최근 각종 산업기기 및 자동화기기에는 회전자가 영구자석으로 구성된 브러시리스 전동기의 사용이 증가하고 있다. 그러나 회전자가 영구자석으로 이루어진 BLDC전동기의 경우 회전자 위치 판별 센서는 필수 요소이다. PM BLDC 전동기의 속도제어를 수행함에 있어 기존의 엔코더와 Hall-IC 3개를 이용하지 않고, 2개의 Hall-IC로 3상 motor의 나머지 한상의 Hall-IC 신호를 추정하였다. 또한 사용된 PM BLDC motor는 고속속도를 가지는 특성을 가지고 있지만 Hall-IC를 이용하여 속도제어를 하기 때문에 속도의 오차 량이 상당히 크다는 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 단점을 개선하기 위해 저가의 PLL회로를 적용하였다. 또한 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

#### ABSTRACT

The high performance drives of the slotless Permanent Magnet Brushless DC(PM BLDC) motor can be achieved by the current control, where the currents flow according to the rotor position and the current phase is suitably controlled according to the operational condition. Rotor position information can be provided by Hall-IC or sensorless algorithm. So, the Hall-ICs are set up in this motor to detect the main flux from the rotor. Instead of using three Hall-ICs and encoder, this paper uses only two Hall-ICs for the permanent magnet rotor position and the speed feedback signals, and uses a micro-controller of 16-bit type (80C196KC). Also because of low resolution obtained by using Hall-IC even low-cost and simple structure, to improve the wide range of speed response characteristic more exactly, we propose the rotor position signal synthesizer using PLL circuit based on two Hall-ICs.

**Key Words** : Slotless PM BLDC, 2 Hall-ICs, PLL(Phase locked loop)

#### 1. 서 론

최근 각종 산업기기 및 자동화기기에는 회전자가 영구자석으로 구성된 브러시리스 서보 전동기의 사용이 증가하고 있다.

이 중에서 역기전력 파형이 사다리꼴로 나타나며 구형파의 상전류를 순차적으로 인가해주면 일정토크를 발생시킬 수 있는 슬롯리스 브러시리스 직류전동기(Slotless PM Brushless DC Motor ; 이하 Slotless

<sup>†</sup>교신저자 : 정희원, 성균관대 정보통신공학부 교수

E-mail : won@yurim.skku.ac.kr

<sup>\*</sup>정희원, 성균관대 메카트로닉스공학과 박사과정

<sup>\*\*</sup>학생회원, <sup>\*\*\*</sup>학생회원, 성균관대 정보통신공학부 석사과정

<sup>\*\*\*\*</sup>정희원, (주)키네모션 대표이사

접수일자 : 2004. 8. 11 1차 심사 : 2004. 9. 22

심사완료 : 2004. 10. 11

PM BLDC 전동기의 정밀속도 제어에 대하여 연구하고자 한다. 이러한 Slotless PM BLDC 전동기는 직류전동기의 계자와 전기자를 제거한 형태로서 무 브러시로 인한 견고성, 저소음, 무보수성, 긴 수명 및 회전자 손실이 없고 제어가 간단하고 운전영역이 매우 넓다는 장점을 가지고 있다<sup>[1]</sup>.

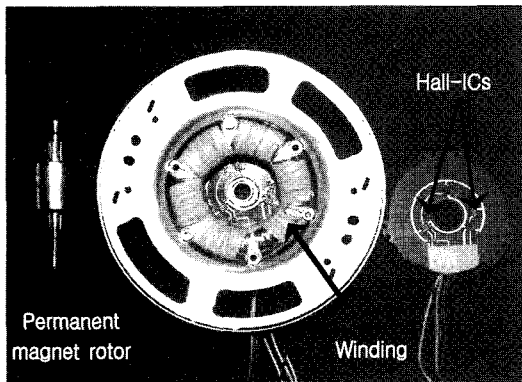


그림 1 슬롯없는 PM BLDC 모터  
Fig. 1 Slotless PM BLDC Motor

그림 1은 3상 2극, 120도 간격을 유지한 고정자에 3개의 홀센서(HA, HB, HC)가 부착된 Slotless PM BLDC 전동기를 보여준다.

본 논문에서는 Slotless PM BLDC 전동기의 속도제어를 하는 경우 별도의 속도 센서 없이 위치 검출 센서인 Hall-ICs를 이용하여 회전자의 위치를 판별함과 동시에 속도 센서를 대신하여 사용할 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 PLL(Phase Locked Loop)을 적용함으로써 저속도에서도 높은 분해능을 얻을 수 있다.

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

## 2. 본 론

### 2.1 Slotless PM BLDC 모터 제어

그림 2은 Slotless PM BLDC 전동기의 전체 속도 제어 블록도를 나타내고 있다.

Hall-ICs로부터 회전자 위치 정보와 속도 정보를 추정하여 속도 제어기의 실제 속도( $\omega_{fb}$ ) 입력이 되고, 속도 제어기는 전류 지령값( $I_{ref}$ )을 실제 측정된 전류( $I_{fb}$ )와 비교하여 전류제어를 수행하게 된다.

속도 제어기는 PI 제어, 전류 제어기는 히스테리시스 전류제어를 하였다.

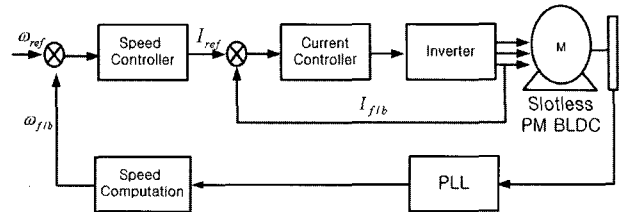


그림 2 Slotless PM BLDC 전동기의 폐루프 제어 블록도  
Fig. 2 Closed-Loop Control for Slotless PM BLDC Motor

### 2.2 제안된 Hall-IC 신호 추정 알고리즘 구현

그림 3은 두 상의 Hall-ICs 신호를 가지고 나머지의 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. 그러나 본 논문에서는 두 개의 Hall-IC를 이용하여 나머지 한상의 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  $-90^\circ$ 의 지연이 생긴다.

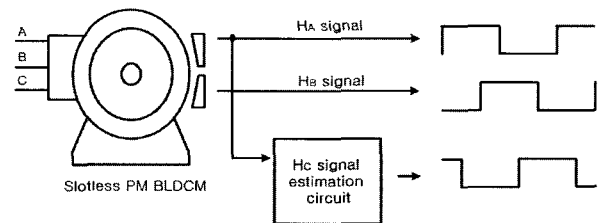


그림 3 제안된 Hall-IC (Hc) 추정 블록도  
Fig. 3 The proposed Estimation Signal of the Hall-IC (Hc)

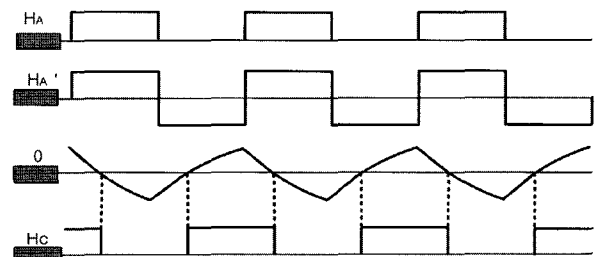


그림 4 제안된 Hall-IC (Hc) 회로 각부 파형  
Fig. 4 The proposed estimation circuit signal of the Hall-IC(Hc)

그림 4는 입력으로 사용된 Hall-IC(H<sub>A</sub>) 신호와 bipolar 시킨 H<sub>A</sub>' 그리고 실용 적분 회로를 통해 출력 되어진 삼각파와 영점(ground)을 비교하여 영점 이상의 값에서 펄스가 발생되도록 구성하여 추정된 H<sub>C</sub>신호를 나타내고 있다.

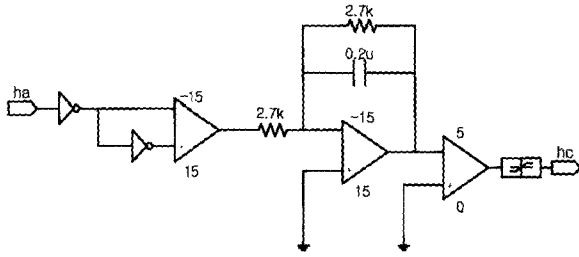


그림 5 홀 센서 추정회로 (H<sub>b</sub>, H<sub>c</sub>)  
Fig. 5 Estimation Hall-ICs Circuit (H<sub>b</sub>, H<sub>c</sub>)

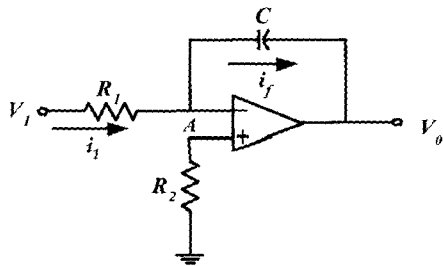


그림 6 실용적분 회로  
Fig. 6 The practical integrator circuit

그림 5는 홀 센서신호 H<sub>A</sub>를 이용하여 신호 H<sub>C</sub>를 추정하는 회로도이다.

이렇게 추정하여 얻어진 홀센서 신호는 기존의 슬롯리스 PM BLDC전동기의 홀센서 신호와 동일하게 120도의 위상차를 가지고 발생하며, 각 상은 서로 60도씩 교차할 수 있도록 정격속도 범위 내에서 R 값과 C 값을 정하였다.

그림 6은 본 논문에서 사용된 실용 적분회로를 나타내는 것으로 위상적인 면에서 입력에 대하여 -90°의 지연이 생기며 출력전압 V<sub>o</sub>는 콘덴서 C에 관계되며 C는 용량성 리액턴스를 정의한 식 (1)에서 알 수 있듯이 주파수에 영향을 받는다<sup>[4]</sup>.

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

실용적분회로에서 주파수가 낮은 영역에서의 페루프

이득을 제한하기 위해서 R<sub>s</sub>를 삽입하며 만일 낮은 주파수일 때의 이득을 제한하지 않으면 직류 오프셋 전압이 작아져도 OP Amp가 포화 상태가 된다.

입력전압 V<sub>i</sub>의 주파수 f가 f<sub>c</sub>(=1/2πR<sub>s</sub>C)보다 작으면 이 회로의 동작은 단순한 반전 증폭회로가 되며 V<sub>o</sub>/V<sub>i</sub>=-R<sub>s</sub>/R가 된다.

여기서 적분동작 한계주파수는 식 (2)로 정의된다.

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

따라서 Hall- IC H<sub>A</sub>신호를 입력으로 하여 식 (2)를 이용하면 f<sub>c</sub>와 CR<sub>s</sub>의 값을 구할 수 있다.

속도 변화에 따른 f<sub>c</sub>와 CR<sub>s</sub>의 값도 변하기 때문에 정격속도에 맞는 시정수로 정하였으며 정밀한 속도 제어를 요하지 않는 곳의 경우 어느 정도 오차를 가지고서 속도제어를 할 수 있다.

### 2.3 속도제어를 위한 PLL제어

일반적으로 속도를 측정하기 위해서는 엔코더나 레졸버와 같은 속도 센서를 사용해야만 한다.

그러나 본 논문에서는 위치 판별용 센서인 2개의 Hall-ICs를 사용하므로 분해능(resolution)이 낮아지게 된다. 그러므로 보다 정밀한 속도제어를 하기위해 회전자속도에 비례하는 펄스를 만드는 PLL(Phase Locked Loop)을 사용하였다.

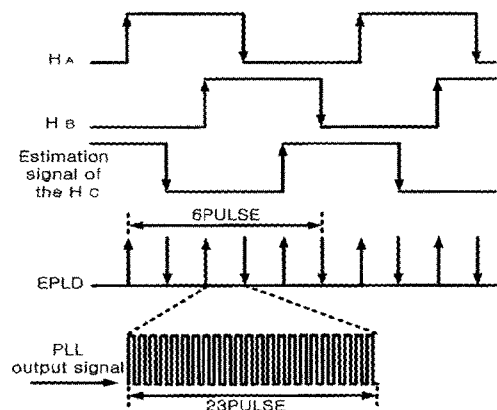


그림 7 Hall-ICs 신호와 PLL 신호  
Fig. 7 Hall-ICs Signals and PLL output signal during one hall sensor transition period

그림 7은 Hall-IC신호를 이용하여 1회전당 6Pulse의

신호와 그에 따른 PLL에서 발생하는 펄스의 구성도를 보여주고 있다. Hall-IC의 신호는 120도의 위상차를 가지고 발생하며, 각상은 서로 60도씩 교차하게 되어있다.

이와 같은 방법으로 EPLD내에서 60도 마다 펄스가 발생 되도록 회로를 구현하여 PLL회로에 적용 1회전 당 1~999배의 출력 주파수를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 임의로 138개(23×6=138)의 펄스를 얻을 수 있도록 하여 엔코더에서 발생하는 A상과 B상의 펄스와 같은 역할을 할 수 있도록 구성하였다.

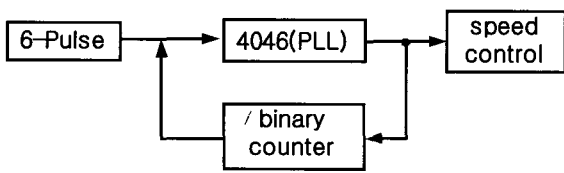


그림 8 PLL을 이용한 제안된 회전자 위치 신호  
Fig. 8 The block diagram of the proposed rotor position signal synthesizer

그림 8은 본 논문에서 정밀한 속도제어를 하기위해 PLL을 이용한 제안된 회전자 위치 신호 발생도를 보여주고 있다.

회전자 위치 신호는 6펄스를 발생할 수 있도록 하는 EPLD부분과 회전자 주파수의 변화에 비례하면서 출력 신호의 주파수를 증가시키는 PLL부분으로 구성되어 있다. 따라서 기존의 Hall-ICs를 사용했을 경우의 낮은 분해능의 문제점등을 해결하여 정밀속도를 요구하는 분야에 사용된다.

이와 함께 기존의 엔코더나 레졸버와같은 속도센서를 대체하여 경제적인 부분 등을 해결 할 수 있다.

### 3. 시뮬레이션 결과

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

그림 9는 Slotless PM BLDC 전동기 구동 시스템의 전체 시뮬레이션 블록도를 나타내고 있다.

전체 구성은 Slotless PM BLDC 전동기, 인버터, 게이트 드라이버, 스위칭 로직, PLL, 6Pulse 로직, HA 신호로 Hc신호를 추정하는 블록, 속도 및 전류 제어 블록으로 되어있다. 6Pulse 로직 부분은 PSIM내의 DLL을 이용하여 C로 작성하였다.

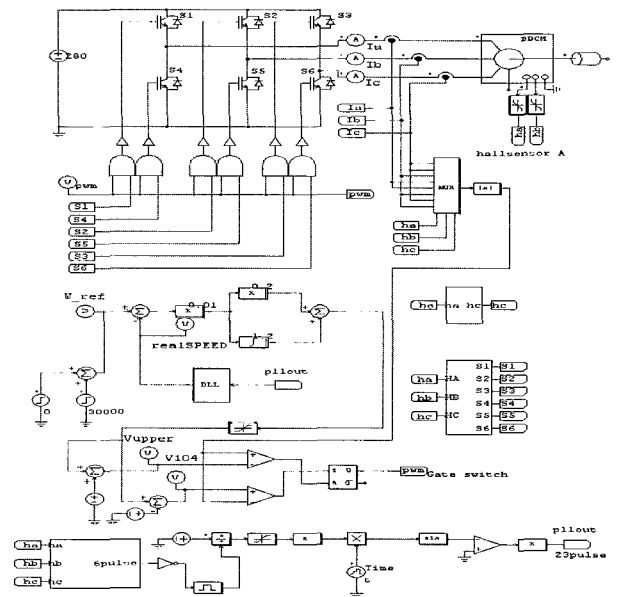


그림 9 slotless PM BLDC Motor의 전체 시뮬레이션 블록도  
Fig. 9 The overall simulation block diagram for Slotless PM BLDC Motor

그림 10은 Hall-ICs 중 HA 신호를 이용하여 Hc신호를 추정하는 알고리즘에 의한 Hc신호를 나타내고 있다. HA의 Hall-IC 신호를 가지고 bipolar시킨 신호를 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.

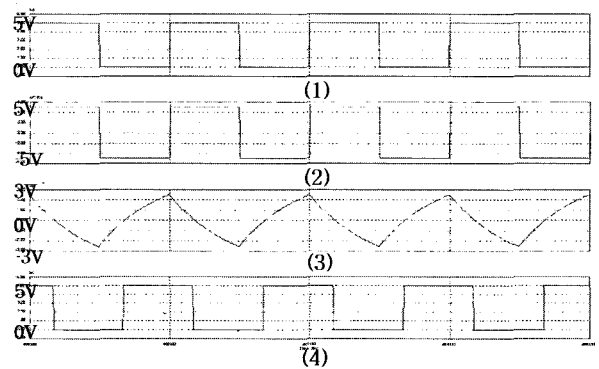


그림 10 Hall-IC(HC) 신호 추정 (1ms/div)  
Fig. 10 Estimation of the Hall-IC signal(HC)

그림 10에서 파형 (1)은 HA, (2)는 HA 신호의 바이폴라시킨 파형(HA'), (3)은 HA'신호 적분, (4)는 추정

된 신호 Hc를 각각 나타낸다.

위와 같은 방법에 의해 추정된 Hall-IC(Hc)신호는 그림 11을 통해 기존의 Hall-IC(Hc) 신호와 비교하여 차이가 없음을 알 수 있다.

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

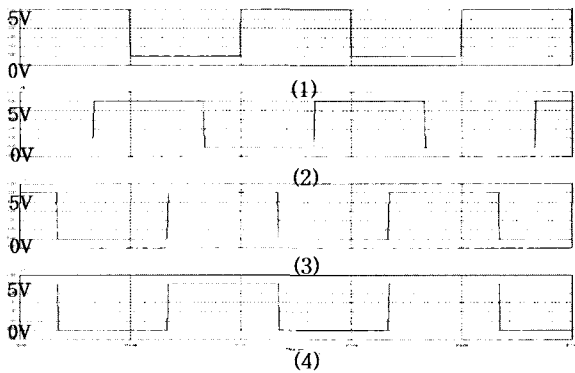


그림 11 Hall-IC 신호와 추정된 Hc 신호 (1V/div, 1ms/div, 30000rpm)  
Fig. 11 Hall-IC and estimated signal of the Hc, 30000rpm

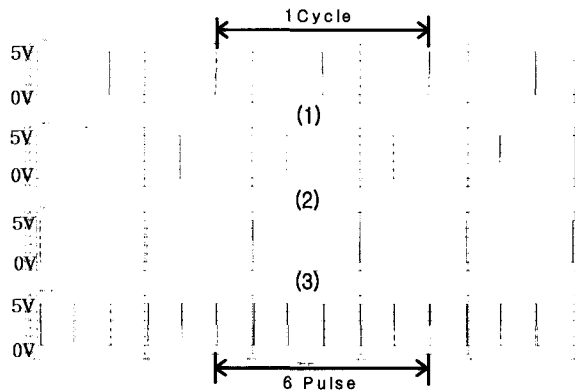


그림 12 6pulse 와 Hall-IC 신호(1V/div, 1ms/div, 30000rpm)  
Fig. 12 6 pulse and Hall-IC, 30000rpm

그림 12는 6펄스와 2개의 홀센서(HA(1), HB(2))를 이용하여 추정된 신호 Hc(3)를 나타낸다.

또한 각 상에 대한 Hall-IC 신호와 추정된 신호에 대한 상승부분과 하강부분을 검출하여 60도 마다 펄스를 발생 시킨다.

이는 PLL에 회로에 입력되어 프로세서의 카운터에 의해 속도를 측정할 수 있는 기준값으로 사용된다.

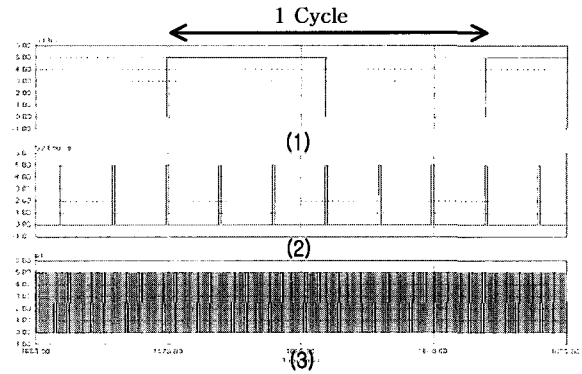


그림 13 6펄스 신호와 PLL신호(5000rpm)  
Fig. 13 6Pulse signal and PLL singal(5000rpm)

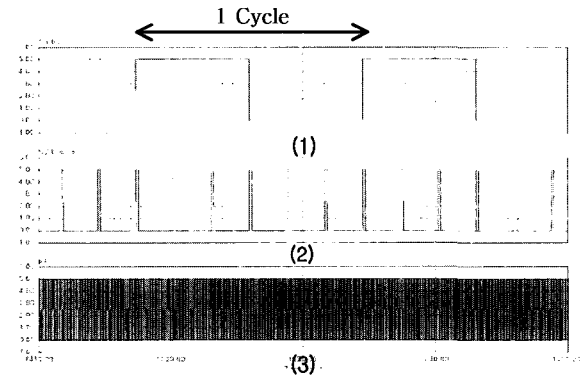


그림 14 6펄스신호와 PLL신호(7000rpm)  
Fig. 14 6Pulse signal and PLL singal(7000rpm)

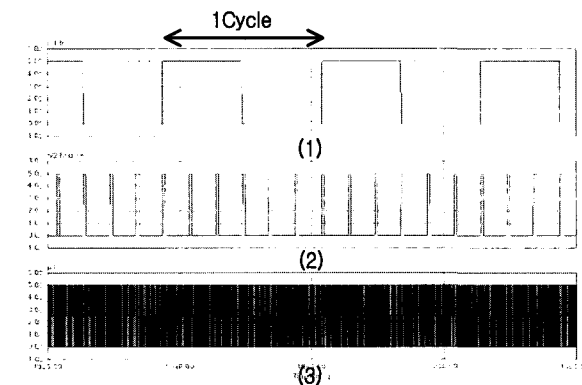


그림 15 6펄스신호와 PLL신호(10000rpm)  
Fig. 15 6Pulse signal and PLL singal(10000rpm)

그림 13, 14, 15는 5000rpm, 7000rpm 10000rpm일 때의 6펄스 신호를 PLL회로에 입력하여 출력된 신호를 보여주고 있다. (1)번은 한 상의 홀센서 신호 HA, (2)번은 6펄스, (3)번은 PLL 출력신호를 나타낸다.

### 4. 실험 결과

그림 16은 회전자의 위치정보를 알기위해 기존의 Hall-ICs 3개 대신 2개의 Hall-IC로 구성하였고 Hall-IC의 단점인 분해능을 해결하기위해 PLL회로를 이용한 전체 블록을 보여준다.

본 시스템은 Slotless PM BLDC 전동기, 인버터, 게이트 회로, EPLD, PLL회로 그리고 PI 제어기로 구성 되어 있다. EPLD에는 인버터 스위칭 부분과 60마다 펄스가 발생되도록 되어있는 6펄스부분, Hc신호 추정 알고리즘 부분이 로직화 되어있다.

또한 PLL회로는 4046B, BCD(binary code decimal) 스위치, programmable counter IC인 4522B로 구성하였다.

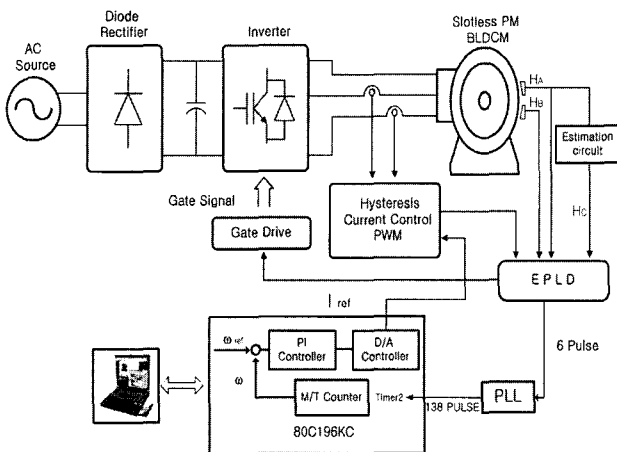


그림 16 Slotless PM BLDC 전동기의 구동 시스템  
Fig. 16 Slotless PM BLDC Motor driving system

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

실험에 사용된 Slotless PM BLDC 전동기는 2극, Y 결선으로 사양은 표 1과 같다.

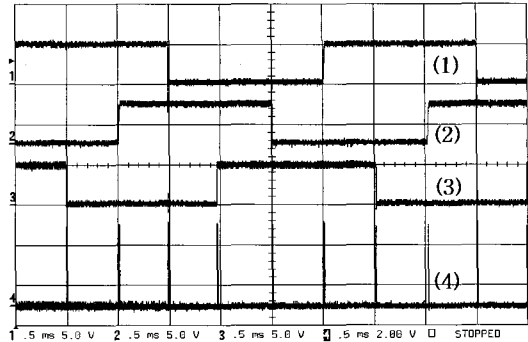


그림 17 Hall IC 신호와 6 pulse, 2개의 Hall-ICs  
(5V/div, 0.5ms/div, 20000rpm)  
Fig. 17 Hall-IC and 6 pulse(using the two Hall-ICs)

그림 17은 제안된 2개의 Hall-ICs의 H<sub>A</sub>로부터 H<sub>C</sub>신호를 추정하였고 각 상에 대한 Hall-IC 신호와 추정된 신호에 대한 상승부분과 하강부분을 검출하여 60도마다 펄스를 발생시키는 파형이다. (1), (2)번은 홀센서 신호(H<sub>A</sub>, H<sub>B</sub>) (3)번은 추정된 신호 H<sub>C</sub>, (4)번은 6펄스를 나타낸다.

그림 18, 19, 20은 본 논문에서 PLL을 이용하여 제안된 회전자 위치신호의 파형을 보여주고 있다. 회전자가 1회전하였을 때 EPLD에서 발생되는 6펄스의 주파수를 기준으로 하여 속도가 변화함에 따라 6펄스의 주파수에 비례하면서 증가된 PLL의 출력파형을 얻었다.

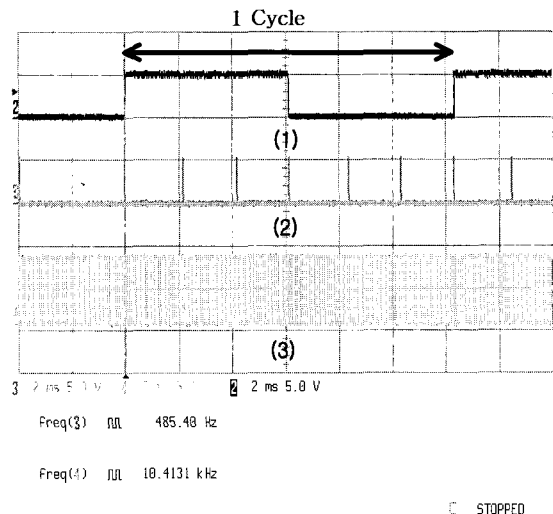


그림 18 6펄스신호와 PLL신호  
Fig. 18 6 Pulse signal and PLL signal  
(5V/div, 2ms/div, 5000rpm)

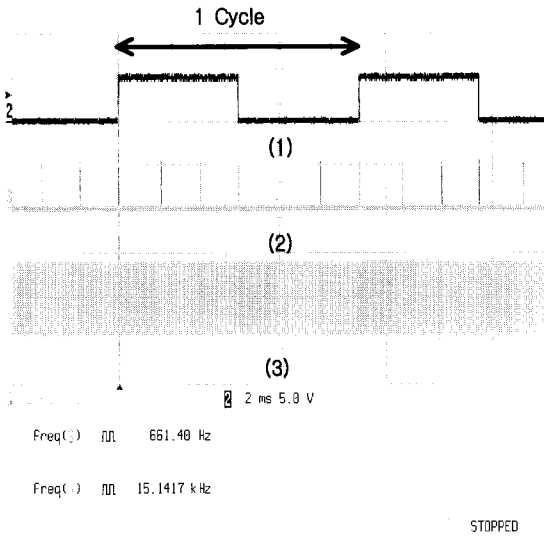


그림 19 6펄스신호와 PLL신호  
 Fig. 19 6Pulse signal and PLL signal  
 (5V/div, 2ms/div, 7000rpm)

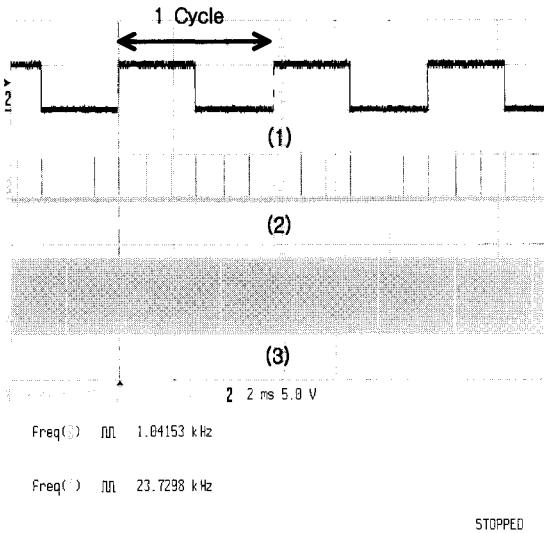


그림 20 6펄스신호와 PLL신호  
 Fig. 20 6Pulse signal and PLL signal  
 (5V/div, 2ms/div, 10000rpm)

그림 18은 5000rpm일 경우 6펄스의 주파수가 약 500Hz로써 PLL의 출력신호가 6펄스 주파수에 23배 증가된 약11.5kHz, 그림 19는 7000rpm일 때 16kHz, 그림 20은 10000rpm일 때 23kHz의 출력파형을 각각 보여주고 있다. (1)번은 한 상의 홀센서 신호 HA, (2) 번은 6펄스, (3)번은 PLL 신호를 나타낸다.

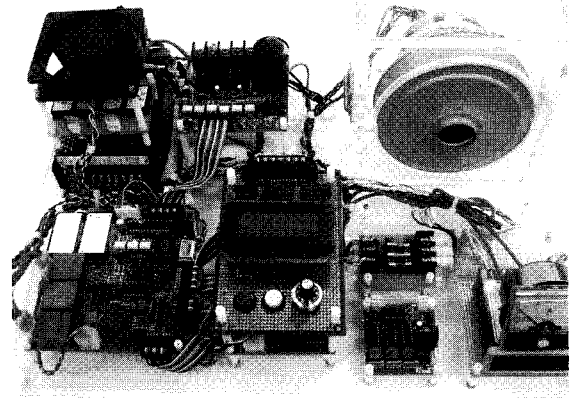


그림 21 전체 실험 세트  
 Fig. 21 The Experimental Set-up

그림 21은 본 논문에서 제안한 전체 실험 세트를 나타내고 있다.

#### 4. 결 론

Slotless PM BLDC motor의 회전자 위치 정보를 알기 위해 필요한 엔코더나 레졸버를 사용하는 대신에 저가의 Hall-IC를 사용하여 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 2개의 Hall-ICs로 나머지 한상의 Hall-IC 신호를 추정하는 알고리즘을 제안하였다.
- 2) Hall-ICs의 속도 오차량의 단점을 개선하기 위해 저가의 PLL회로를 적용하여 정밀속도제어를 필요로 하는 곳에 적용할 수 있다.

그 결과로서 기존에 속도 제어를 가능하게 하기 위해 필요한 고가의 속도 센서인 엔코더와 레졸버 역할을 대신하여 전체적인 구동 회로의 가격을 최소한으로 감소시킬 수 있다. 이는 실제 산업계에서도 정밀한 속도 제어를 요하는 곳의 경우 기존에 Slotless PM BLDC 전동기 내부에 있는 위치센서와 PLL회로를 가지고 속도 센서 역할을 대신할 수 있다.

이 논문은 중소기업청, 경기도청(2004-0227-500)의 산·학·연 공동기술개발 컨소시엄사업 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, 2001, pp. 799-804.
- [2] 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, 1989, pp. 274-279.
- [3] 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, 2002, pp. 840-843.
- [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, 1999, pp. 433-436.
- [5] Fang Lin Luo, Hock Guan Yeo "Advanced PM Brushless DC Motor Control & System for Electric Vehicles," IEEE Trans. Ind. Application, Vol. 2, 2000, pp. 1336-1340.
- [6] Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll "Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits," Prentice Hall, 2001, pp. 90-140.
- [7] 윤용호, 우무선, 김덕규, 원충연, 최유영, "2Hall-ICs를 이용한 저가형 PM Brushless DC Motor 속도 제어," 전력전자 학회지, Vol. 9, pp. 313-318, 2004.
- [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 제어방식," 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 LG 전자 DDM사업부 입사. 2003년~현재 성균관대 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정.



**이승준(李昇峻)**

1976년 7월 25일생. 2002년 안양대 전기전자공학과 졸업. 2002년~2004년 (주)코러스 부설연구소 근무, 2004년~현재 성균관대 대학원 전자전기공학과 석사과정.



**김영란(金英蘭)**

1973년 8월 1일생. 1996년 한성대 산업공학과 졸업. 1996년~1999년 (주)파워테크 근무. 1999년~2004년 (주)PAC TECH 근무. 2003년~현재 성균관대 대학원 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 테네시주립대학 전기공학과 방문교수. 1988년~현재 성균관대 정보통신공학부 교수.



**최유영(崔有永)**

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