

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

우무선, 윤용호, 이태원, 원충연, 최유영*
성균관대학교, (주)키네모션*

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

M.S. Woo, Y.H. Yoon, T.W. LEE, C.Y. Won, Y.Y. Choe*
Sungkyunkwan University, Kinemotion Ltd*

ABSTRACT

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

1. 서론

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

이 중에서 역기전력 파형이 사다리꼴로 나타나며 구형파의 상전류를 순차적으로 인가해주면 일정토크를 발생시킬 수 있는 슬롯리스 브러시리스 직류 전동기 (Slotless PM Brushless DC Motor ; 이하 Slotless PM BLDC 전동기)의 정밀속도 제어에 대하여 연구하고자 한다.

이러한 Slotless PM BLDC 전동기는 직류전동기의 제자와 전기자를 제거한 형태로서 무 브러시로 인한

견고성, 저소음, 무보수성, 긴 수명 및 회전자 손실이 없고 제어가 간단하고 운전영역이 매우 넓다는 장점을 가지고 있다.^[1]

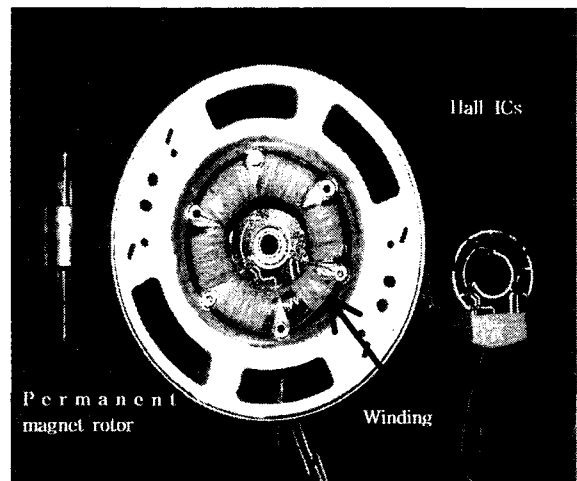


그림 1 슬롯없는 PM BLDC 모터
Fig. 1 Slotless PM BLDC Motor

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 속도 제어를 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(ω_{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.

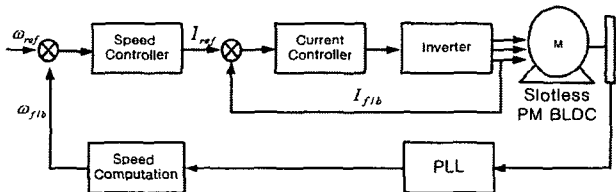


그림 2 Slotless PM BLDC 전동기의 폐루프 제어 블록도
Fig. 2 Closed-Loop Control for Slotless PM BLDC Motor

2.2 제안된 Hall-IC 신호 추정 알고리즘 구현

그림 3은 두 상의 Hall-ICs 신호를 가지고 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. 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.

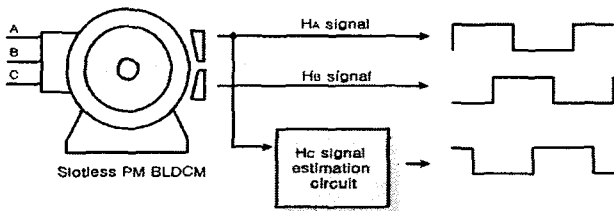


그림 3 제안된 Hall-IC (H_c) 추정 블록도
Fig. 3 The proposed Estimation Signal of the Hall-IC (H_c)

그림 4는 입력으로 사용된 Hall-IC(H_A)신호와 bipolar 시킨 H_A' 그리고 실용 적분 회로를 통해 출력 되어

진 삼각파와 영점(ground)을 비교하여 영점 이상의 값에서 펄스가 발생되도록 구성하여 추정된 H_c 신호를 나타내고 있다.

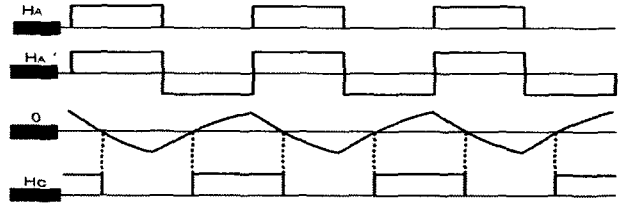


그림 4 제안된 Hall-IC (H_c) 회로 각부 파형
Fig. 4 The proposed estimation circuit signal of the Hall-IC(H_c)

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 하기 위해 회전자 속도에 비례하는 펄스를 만드는 PLL(Phase Locked Loop)을 사용하였다.

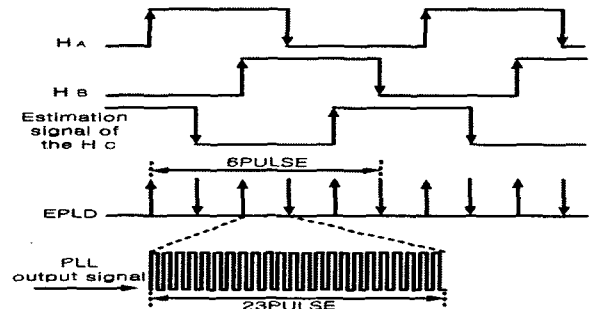


그림 5 Hall-ICs 신호와 PLL 신호
Fig. 5 Hall-ICs Signals and PLL output signal during one hall sensor transition period

그림5는 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 1회전당 138개($23 \times 6 = 138$)의 펄스를 얻어 엔코더에서 발생하는 A상과 B상의 펄스와 같은 역할을 할 수 있도록 구성하였다.

그림6은 본 논문에서 정밀한 속도제어를 하기 위해 PLL을 이용한 제안된 회전자 위치 신호 발생도를

보여주고 있다.

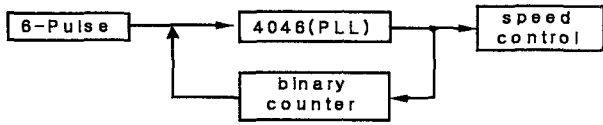


그림 6 PLL을 이용한 제안된 회전자 위치 신호
Fig. 6 The block diagram of the proposed rotor position signal synthesizer

그림 6의 6펄스 신호는 회전자 위치를 알 수 있는 Hall-ICs(HA, Hb)의 신호와 Hc 신호 추정회로의 출력을 가지고서 회전자가 1회전을 하게 한다. 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. 이와함께 기존의 엔코더나 레졸버와같은 속도센서를 대체하여 경제적인 부분 등을 해결 할 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과

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

그림7은 PM BLDC 전동기 구동 시스템의 전체 시뮬레이션 블록도를 나타내고 있다.

전체 구성은 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 8은 Hall-ICs 중 HA 신호를 이용하여 Hc신호를 추정하는 알고리즘에 의한 Hc신호를 나타내고 있다. HA의 Hall-IC 신호를 가지고 bipolar시킨 신호를 적분기의 입력으로 사용한다.

출력된 신호와 영점(ground)을 비교기 입력으로 사용하여 영점(ground)과 교차되는 지점에서 신호를 발생시키면 Hc에 해당되는 Hall-IC 신호를 추정할 수 있다. 위와 같은 방법에 의해 추정된 Hall-IC(Hc)신호는 그림 9를 통해 기존의 Hall-IC(Hc) 신호와 비교하여 차이가 없음을 알 수 있다.

그림 10는 속도 제어를 위해 2개의 Hall-IC신호 HA로부터 Hc신호를 추정한다.

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

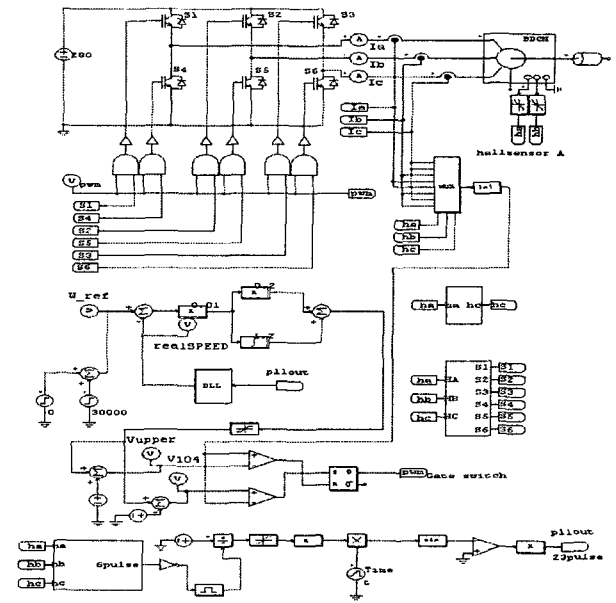


그림 7 slotless PM BLDC Motor의 전체 시뮬레이션 블록도
Fig. 7 The overall simulation block diagram for Slotless PM BLDC Motor

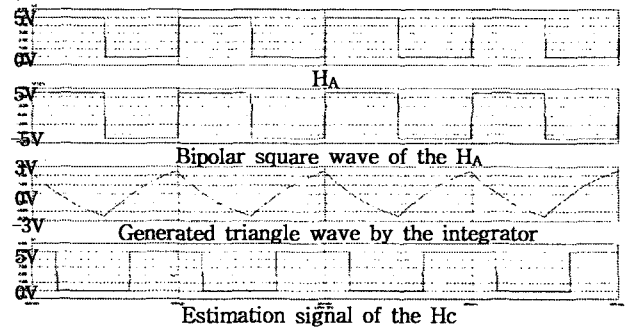


그림 8 Hall-IC(Hc) 신호 추정 (1ms/div)
Fig. 8 Estimation of the Hall-IC signal(Hc)

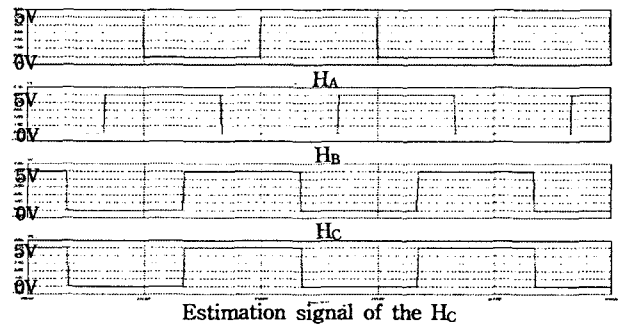


그림 9 Hall-IC 신호와 추정된 Hc 신호(1V/div, 1ms/div, 3000rpm)
Fig. 9 Hall-IC and estimated signal of the Hc, 3000rpm

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

그림 11, 12는 5000rpm, 7000rpm 일때의 6펄스 신호를 PLL회로에 입력하여 출력된 신호를 나타낸다.

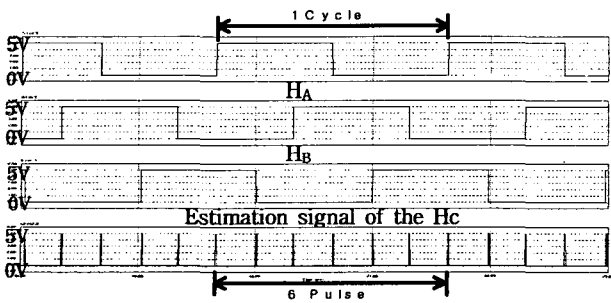


그림 10 6 pulse 와 Hall-IC 신호(1V/div, 1ms/div, 30000rpm)
Fig. 10 6 pulse and Hall-IC, 30000rpm

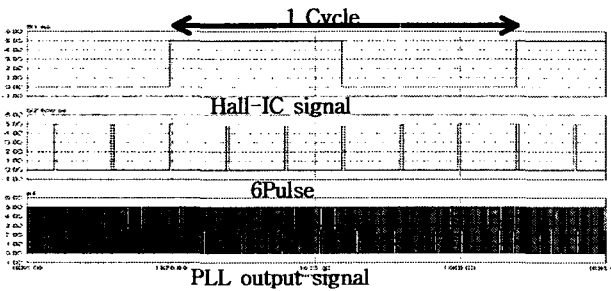


그림 11 6펄스 신호와 PLL신호(5000rpm)
Fig. 11 6Pulse Signals and PLL Singals(5000rpm)

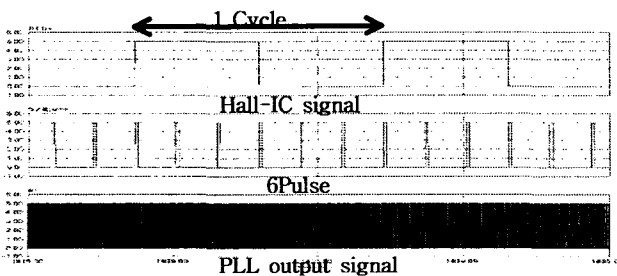


그림 12 6펄스신호와 PLL신호(7000rpm)
Fig. 12 6Pulse Signals and PLL Singals(7000rpm)

4. 실험 결과

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

그림 13은 회전자 위치정보를 알기위해 기존의 Hall-ICs 3개 대신 2개의 Hall-ICs로 구성하였다. 또한 Hall-IC의 단점인 분해능을 해결하기위해 PLL 회로를 삽입한 전체 블록을 보여준다.

본 시스템은 Slotless PM BLDC 전동기, 인버터, 게이트 회로, EPLD, PLL회로 그리고 PI 제어기로 구성되어 있다.

EPLD에는 인버터 스위칭 부분과 60마다 펄스가 발생되도록 되어있는 6펄스부분, Hc신호 추정 알고리즘 부분이 로직화 되어있다.

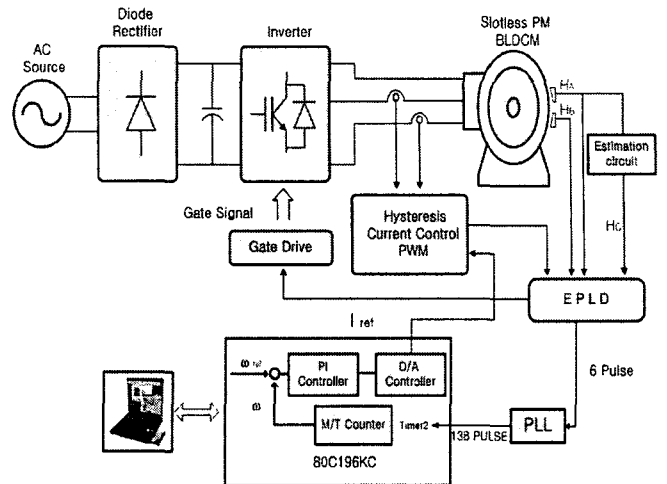


그림 13 Slotless PM BLDC 전동기의 구동 시스템
Fig. 13 Slotless PM BLDC Motor driving system

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

또한 PLL회로는 4046B, BCD(binary code decimal) 스위치, programmable counter IC인 4522B로 구성하였다. 실험에 사용된 Slotless PM BLDC 전동기는 2극, Y결선으로 사양은 표1과 같다.

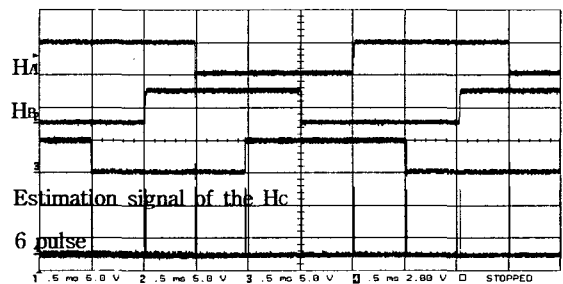


그림 14 Hall IC 신호와 6 pulse, 2개의 Hall-ICs이용
(5V/div, 0.5ms/div, 20000rpm)
Fig. 14 Hall-IC and 6 pulse(using the two Hall-IC)

그림 14는 제안된 2개의 Hall-ICs의 HA로부터 Hc 신호를 추정하였고 각 상에 대한 Hall-IC 신호와 추정된 신호에 대한 상승부분과 하강부분을 검출하여 60도 마다 펄스를 발생시키는 파형이다.

그림 15, 16은 본 논문에서 PLL을 이용하여 제안된 회전자 위치신호의 파형을 보여주고 있다.

각각 5000rpm, 7000rpm일 경우 회전자가 1회전하였

을 때 EPLD에서 발생되는 6펄스의 주파수를 기준으로 하여 속도가 변화함에 따라 6펄스의 주파수에 비례하면서 증가된 PLL의 출력파형을 얻었다.

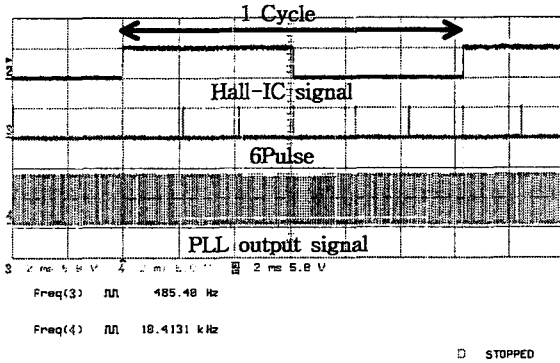


그림 15 6펄스신호와 PLL신호
Fig. 15 6 Pulse Signals and PLL Singals (5V/div, 2ms/div, 5000rpm)

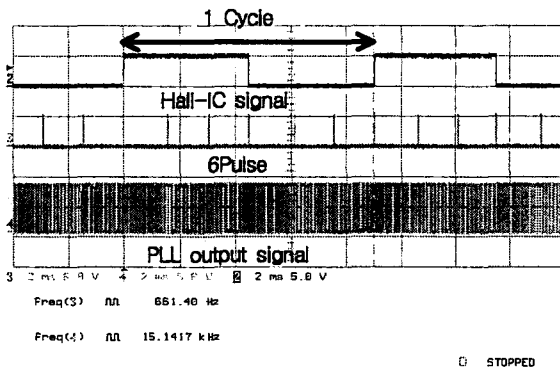


그림 16 6펄스신호와 PLL신호
Fig. 16 6Pulse Signals and PLL Singals (5V/div, 2ms/div, 7000rpm)

그림15는 5000rpm일 경우 6펄스의 주파수가 약 500Hz로써 PLL의 출력신호가 6펄스 주파수에 23배 증가된 약11.5kHz의 파형이고, 그림16는 7000rpm일 때 16kHz의 출력파형이다.

그림 17은 전체 실험 보드를 나타내고 있다.

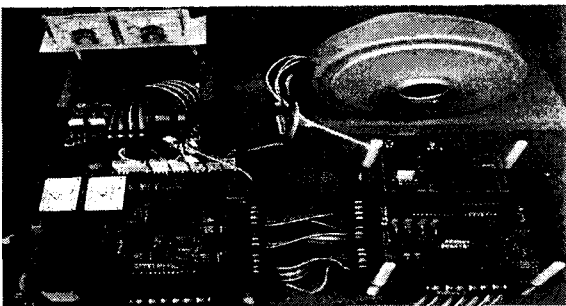


그림 17 전체 실험 세트
Fig. 17 The Experimental Set-up

5. 결론

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

1)2개의 Hall-ICs로 미지의 나머지 한상의 Hall-IC 신호를 추정하는 알고리즘을 제안하였다.

2)Hall-ICs의 속도 오차량의 단점을 개선하기 위해 저가의 PLL회로를 적용하였다.

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 에너지관리공단(2002-0371-0000)의 에너지 절약기술개발 사업 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [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-Horng 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.