

2Hall-IC, 1Hall-IC를 이용한 PM BLDCM의 회전자 위치검출

(Rotor Position Estimation of 3-Phase PM BLDC Motor by 2Hall-IC, 1Hall-IC)

김연충 · 윤용호 · 이병국* · 김학성 · 원충연 · 천장성

(Yuen-Chung Kim · Yong-Ho Yoon · Byoung-Kuk Lee · Hack-Seong Kim ·
Chung-Yuen Won · Jang-Sung Chun)

요 약

PM BLDC 전동기를 구동하려면 회전자 위치를 검출하는 센서가 필수적으로 요구된다. 그러나 주변 온도나 습도 등 작업 환경에 제한을 받는 곳에서는 센서의 고장 및 오동작으로 인한 전동기의 운전 정지 및 회전자 위치 검출오차에 의한 제어의 어려움이 발생할 수 있다. 따라서 3상 PM BLDC 전동기의 경우 3개의 센서를 이용하는 것이 일반적인 방법으로 사용되고 있지만 본 논문에서는 기존의 회전자 위치 검출 시 1개 또는 2개의 홀 센서만을 사용하여 기존의 방법과 동일한 성능을 가질 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 그 결과 기존의 방법과 동일한 성능을 가지며 저가격, 보호회로 역할의 효과를 기대할 수 있다.

Abstract

Generally, Permanent Magnet Brushless DC Motor(PM BLDC) is necessary the Hall-IC to detect the rotor position. But it will take place the operation standstill of motor or error of rotor position detection according to the circumference temperature, humidity, or limited surroundings. This paper propose the algorithm of rotor position detection only using one or two Hall-IC. Therefore we can estimate information of the others phase in sequence through a rotor instead of using three Hall-IC at 3 phase motor. This paper identify the same characteristics, performance, and function of protection circuit by the proposed algorithm with the 3 phase PM BLDC motor in comparison with general method.

Key Words : PM BLDC Motor, Estimation Hall-IC signal(H_b , H_c), Position detection of rotor

1. 서 론

PM BLDC(Permanent Magnet Brushless DC) 전동기는 영구자석 재료의 고 에너지 밀도화와 더불어 산업용 기기 및 가전제품 분야에서 널리 이용되고 있으며, 동일한 체적의 영구자석으로 출력을 증가하

* 주저자 : 성균관대학교 정보통신공학부 조교수

Tel : 031-299-4581, Fax : 031-299-4623

E-mail : bklee@skku.edu

접수일자 : 2005년 12월 27일

1차심사 : 2005년 12월 27일, 2차심사 : 2006년 2월 6일

심사완료 : 2006년 2월 15일

기 위한 자기회로 설계 등이 활발히 이루어지고 있다[1]. 그러나 PM BLDC 전동기는 스위칭소자를 이용한 인버터를 통해 정류하므로 정류시 회전자의 위치 정보가 필요하며, Hall-IC나 엔코더와 같은 회전자 위치 검출 센서가 필수적이다[1-2]. 이러한 위치 검출 센서는 전동기의 가격 및 크기를 증가시키고 전동기 구조를 복잡하게 할 뿐만 아니라, 주변온도나 습도 등 환경에 제한을 받는다. 또한 전동기 시스템의 가격 상승, 부피 증가, 신뢰성 저하, 사용 환경의 제약 등의 많은 문제를 유발한다. 3상 전동기를 구동할 경우 온도나 습도 등 작업환경에 제한을 받는 곳에서는 Hall-IC의 고장 및 오동작으로 인한 전동기의 운전 정지 및 회전자 위치 검출오차에 의한 제어의 어려움이 발생될 수 있다[3-4].

따라서 본 논문에서는 3상 PM BLDC 전동기를 기존의 3개의 Hall-IC가 아닌 2개 또는 1개의 Hall-IC를 이용하여 회전자 위치를 추정함으로써 기존과 동일한 성능을 낼 수 있는 알고리즘을 제안한다.

운전 중 Hall-IC의 고장이나 오동작이 발생할 경우 제안한 알고리즘에 의해 전동기 구동에 대한 보호 또는 정확한 회전자 위치추정에 의한 제어를 쉽게 할 수 있다.

2. 본 론

2.1 PM BLDC 전동기의 제어

PM BLDC 전동기는 직류전동기의 계자와 전기자를 제거한 형태로서 무 브러시로 인한 견고성, 저소음, 무부수성, 긴 수명 및 회전자 손실이 없고 제어가 간단하고 운전영역이 매우 넓다는 장점을 가지고 있다. PM BLDC 전동기는 역기전력이 사다리꼴 형태를 가지며 이때 각 상의 역기전력이 평탄한 구간에 전류를 흘려줌으로 일정한 토크를 얻을 수 있다. 따라서 역기전력이 평탄한 구간을 검출해야하며 이를 위하여 Hall-IC가 사용된다[5].

그림 1은 3상 PM BLDC 전동기의 1회전시 역기전력과 상전류파형 및 Hall-IC신호를 나타내며 각각의 Hall-IC신호는 120° 위상차가 나타남을 알 수 있다.

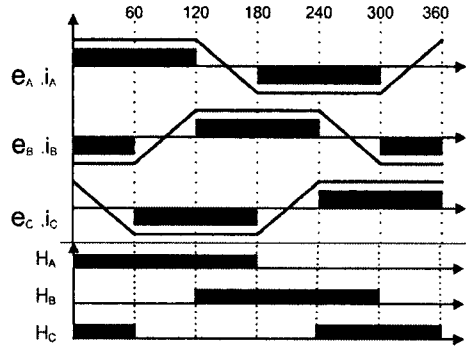


그림 1. 역기전력, 전류, 인버터 스위칭, Hall-IC신호
Fig. 1. Back EMF, current waveforms, Inverter switching, Hall-IC signals

그림 2는 PM BLDC 전동기의 전체 속도 제어 블록도로서 Hall-IC로부터 회전자 위치정보와 속도정보를 추정하여 속도 제어기의 실제속도(ω_{real})가 입력이 되고, 속도 제어기는 전류지령값(I_{ref})을 실제 측정된 전류(I_{real})와 비교하여 전류제어를 수행하게 된다. 속도 제어기는 PI 제어기, 전류 제어기는 히스테리시스 전류제어기를 적용하였다.

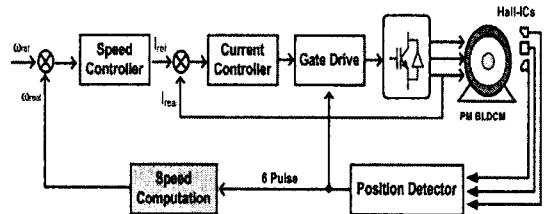


그림 2. PM BLDC 전동기에 대한 폐루프 제어
Fig. 2. Closed-loop control for PM BLDC Motor

2.2 제안한 Hall-ICs신호발생 알고리즘

일반적으로 PM BLDC 전동기의 경우 각 상의 위치판별을 위해 각 상에 대해 Hall-IC를 갖는 것이 필수적이다. 하지만 본 논문에서는 전동기 운전 중 예상치 못한 상황 발생시 2개의 Hall-IC 또는 1개의 Hall-IC만을 사용하여 나머지 상의 Hall-IC신호를 추정하는 알고리즘을 제안하였다.

Hall-IC신호 추정회로로 사용된 적분회로는 주파수측면에서 보면 주파수가 2배가 될 때마다 이득은

2Hall-IC, 1Hall-IC를 이용한 PM BLDCM의 외전자 위치검출

1/2되는 특성을 가지고 있으며, 위상측면에서는 입력력에 대하여 $-90[^\circ]$ 의 지연이 생긴다. 또한 이 회로는 톱니파 또는 삼각파를 만드는 경우와 타이머에 응용하는 경우 및 미분형 센서의 출력을 실제의 변위값으로 변환하는 회로 등에 많이 활용하고 있다.

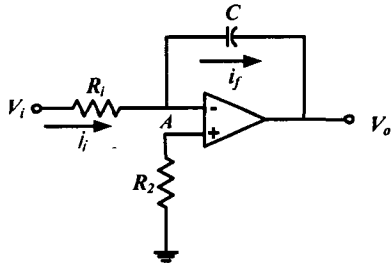


그림 3. 적분회로
Fig. 3. The practical integrator circuit

그림 3은 일반적인 적분회로로써 입력전류 i_i , 피드백전류 $i_f=i_i$ 이고 이를 이용하여 적분회로에 대한 입·출력 관계를 해석할 수 있다. 입력전압 V_i 에 의해 흐르는 입력전류 i_i 는 A점을 가상접지 ($V_A=0$)로 하면 식 (1)로 표현된다.

$$i_i = \frac{V_i - V_A}{R_i} = \frac{V_i}{R_i} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_A - V_o &= -V_o = -\frac{1}{C} \int_0^t i_f dt \\ &= -\frac{1}{C} \int_0^t i_i dt = -\frac{1}{CR_i} \int_0^t V_i dt \\ \therefore V_o &= -\frac{1}{CR_i} \int_0^t V_i dt \quad (2) \end{aligned}$$

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} [\Omega] \quad (3)$$

적분회로의 출력전압 V_o 는 식 (2)에서 보듯이 커패시터 C 에 반비례하며, 이 C 는 용량성 리액턴스를 정의한 식 (3)에서 알 수 있듯이 주파수의 영향을 받고 있다.

그림 4는 본 논문에서 제안한 실용 적분회로와 영점 검출회로를 이용한 Hall-IC신호 추정회로를 나타내고 있다. 실용 적분회로를 통해 출력된 삼각파는 최종적으로 영점(ground, 제어장치의 접지)과 비교

되어 Hall-IC신호를 추정할 수 있다. 또한 주파수 즉 속도 변화에 따른 실용 적분회로의 출력특성을 고려하여 사용된 전동기의 정격속도영역 내에서 식 (2)와 (3)을 이용하여 설계하였다[6].

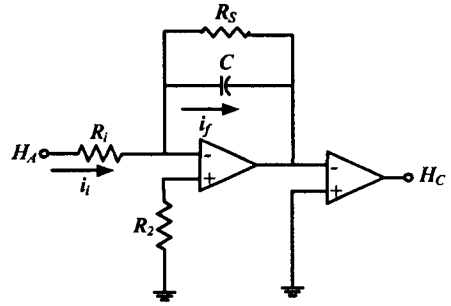


그림 4. 제안된 Hall-IC신호 추정회로
Fig. 4. The proposed estimation circuit of the Hall-IC signal

1) 한 상(Hall-IC신호 Hc) 신호추정

그림 5는 Hall-IC신호 H_A 와 H_B 를 가지고 나머지 C상 H_C 의 신호를 추정하는 알고리즘에 대한 블록을 나타내고 있다. A상의 H_A 신호는 Hall-IC신호 추정회로의 입력으로 사용되며 그 결과 본 논문에서 사용된 PM BLDC 전동기의 정격속도 영역 내에서 속도 변화에 따른 기존 Hall-IC신호와 비교하여 위상차 발생이 없는 C상인 H_C 신호를 추정할 수 있다.

그림 6은 그림 4에서 언급한 Hall-IC신호 추정회로를 사용하여 H_C 신호를 추정하기 위한 각 부분의 파형으로써 입력으로 사용된 Hall-IC(H_A)신호, bipolar시킨 H_A' 신호 그리고 삼각파와 영점에 의해 비교되어 최종적으로 추정된 H_C 신호를 각각 나타내고 있다.

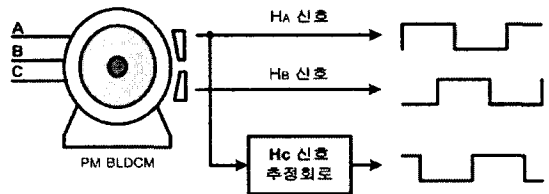


그림 5. 제안된 1 Hall-IC(H_C) 추정 블록도
Fig. 5. The proposed estimation signal of the one Hall-IC(H_C)

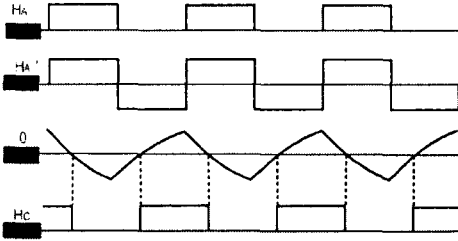


그림 6. 제안된 Hall-IC(Hc) 회로 각 부 파형
Fig. 6. The proposed estimation circuit signal of the Hall-IC(Hc)

2) 두 상(Hall-IC신호 H_B, H_C) 신호추정

3개의 Hall-IC신호 H_A, H_B, H_C중에서 특정 한 상의 Hall-IC신호만을 사용하여 나머지 두 상의 신호를 간접적으로 추정하기 위한 블록을 그림 7과 같이 나타내었다. 그림 5에서 추정된 H_C신호를 위에서 언급한 내용과 같이 Hall-IC신호 추정회로의 입력으로 다시 사용하여 그림 7과 같이 B상인 H_B신호를 추정할 수 있다.

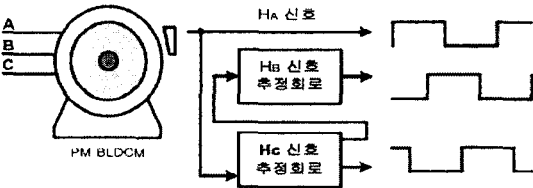


그림 7. 제안된 2 Hall-IC(H_c, H_B) 추정 블록도
Fig. 7. The proposed estimation signal of the two Hall-IC(H_c, H_B)

그림 8은 그림 6과 동일한 부분으로써 Hall-IC신호 추정회로를 사용하여 H_C신호와 H_B신호를 추정하기 위한 각 부분의 파형들을 나타내고 있다. 입력으로 사용된 Hall-IC(H_A)신호, bipolar시킨 H_A'신호 그리고 삼각파와 영점에 의해 비교되어 추정된 H_C신호, bipolar시킨 H_C'신호, 삼각파와 영점에 의해 비교되어 추정된 H_B신호들을 각각 순차적으로 나타내고 있다. 결과적으로 2개의 Hall-IC를 사용하여 한 상의 Hall-IC신호를 추정하는 방식과 1개의 Hall-IC를 사용하여 두 상의 신호를 추정하는 방식에 의해 간접적으로 얻어진 신호들은 그림 1에서 나타난 실제 Hall-IC신호처럼 120[°] 위상차와 60[°] 중첩을 가지고 있다. 또한 시뮬레이션과 실험에서 보인 결과에

의해 PM BLDC 전동기 정격속도영역 내에서 실제 Hall-IC신호와 비교하여 위상차가 거의 없는 파형의 모습을 나타내고 있다.

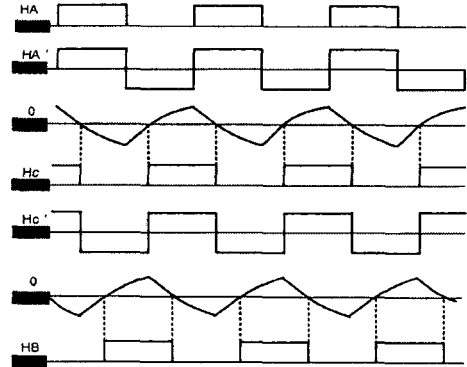


그림 8. 제안된 Hall-IC 검출회로의 각 부 파형
Fig. 8. The proposed estimation circuit signal of the Hall-IC

일반적으로 전동기의 속도를 측정하기 위해서는 엔코더나 레졸버와 같은 속도 센서를 사용하지만 본 논문에서는 그림 9와 같이 Hall-IC 각 신호의 상승부와 하강부를 검출하여 60[°]마다 펄스가 발생되도록 회로를 구성하였다. 따라서 실제 Hall-IC신호와 간접적으로 추정한 Hall-IC신호를 이용하여 발생된 저분해능의 6펄스는 엔코더에서 발생하는 A상과 B상의 펄스와 같은 역할을 할 수 있다.

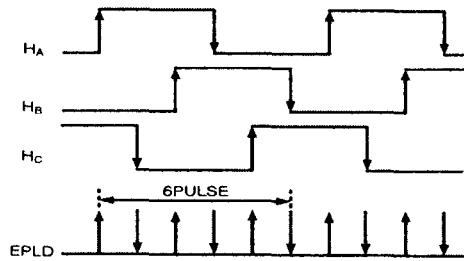


그림 9. Hall-IC신호와 6펄스
Fig. 9. Hall-IC signal and six pulse

3. 시뮬레이션

1) 한 상(Hall-IC신호 H_C) 신호추정

일반적으로 3상 PM BLDC 전동기를 구동하기 위

2Hall-IC, 1Hall-IC를 이용한 PM BLDCM의 외전자 위치검출

해서는 회전자 위치에 대한 정보를 각 상의 Hall-IC 신호를 이용하여 얻을 수 있다. 각 상의 Hall-IC 신호는 그림 10처럼 각각 120[°] 위상차와 60[°] 중첩을 가지고 있다.

그림 11과 12는 한 상의 Hall-IC 신호를 추정하기 위한 시뮬레이션 결과로써 그림 11은 Hall-IC 신호 중 H_A 신호를 이용하여 H_C 신호를 추정하기 위해 본 논문에서 제안한 Hall-IC 신호 추정회로의 각 부분의 결과 파형을 보여주고 있다. Hall-IC 신호 H_A를 제안한 Hall-IC 신호 추정회로의 입력으로 사용하였을 경우 회로의 출력된 신호 즉 삼각파는 다시 영점과 비교되어 최종적으로 H_C에 해당되는 Hall-IC 신호를 간접적으로 추정할 수 있다.

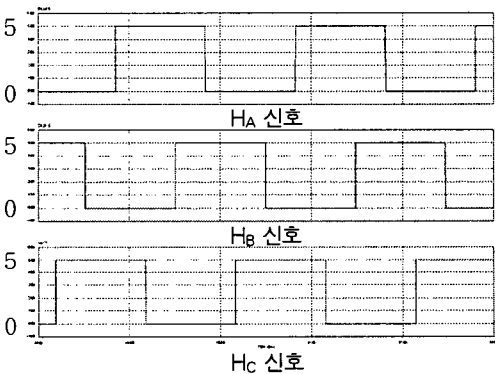


그림 10. 각 상의 Hall-IC 신호
Fig. 10. Each phase Hall-IC signal

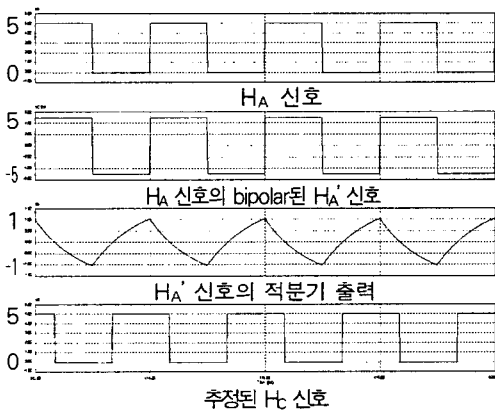


그림 11. Hall-IC(H_C)신호 추정
Fig. 11. Estimation of the Hall-IC signal(H_C)

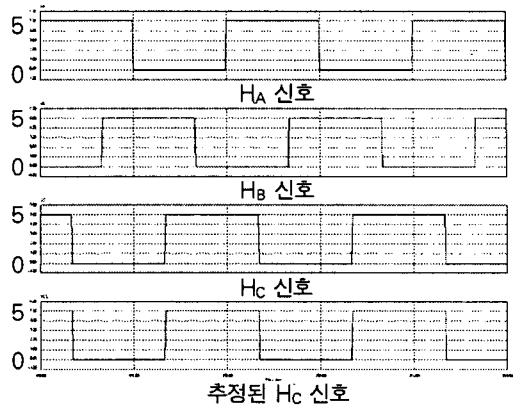


그림 12. Hall-IC 신호와 추정된 H_C 신호
Fig. 12. Hall-IC signal and estimated signal of the H_C

2) 두 상(Hall-IC 신호 H_B, H_C) 신호추정

그림 13과 14는 두 상 H_B, H_C 신호를 추정하기 위한

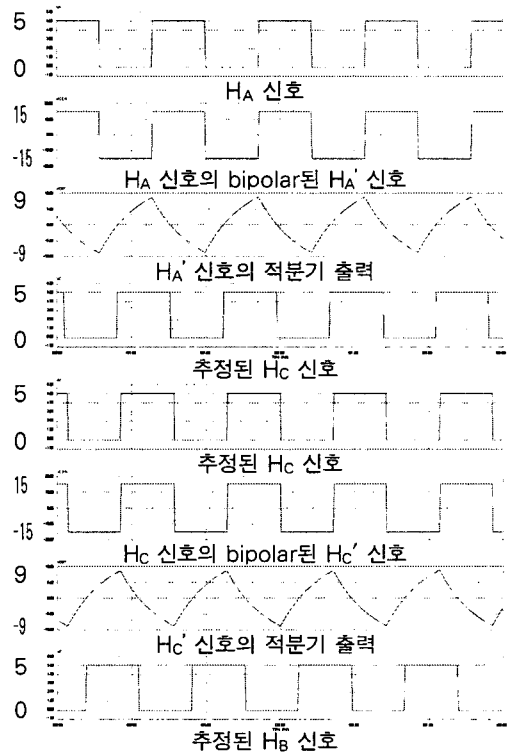


그림 13. Hall-IC(H_B, H_C) 신호 추정
Fig. 13. Estimation of the Hall-IC signal(H_B, H_C)

결과로써 그림 13은 Hall-IC신호 H_A 와 그림 11에서 추정된 신호 H_c 를 이용하여 동일한 방법에 의해 H_B 를 추정하기 위한 각 부분의 출력을 나타내고 있다.

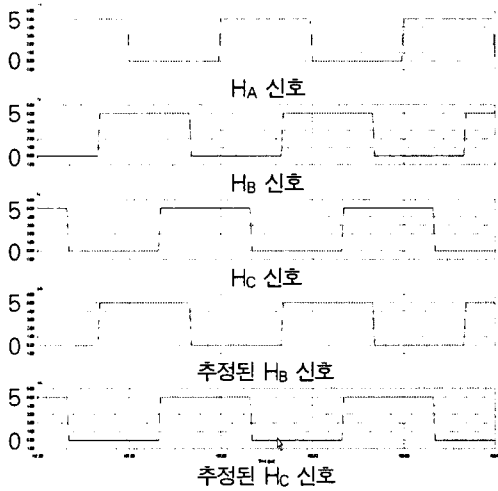


그림 14. Hall-IC신호와 추정된 H_B , H_C 신호
 Fig. 14. Hall-IC signal and estimated signal of the H_B , H_C

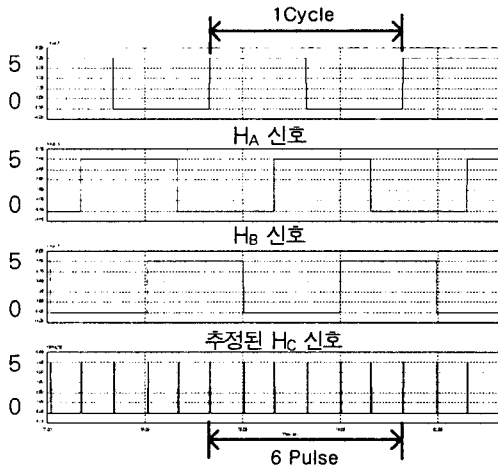


그림 15. Hall-IC신호와 6펄스
 Fig. 15. Hall-IC signal and 6 pulse

그림 14는 제안한 알고리즘을 이용하여 추정된 신호와 실제 Hall-IC신호들 간의 비교파형으로써 위상차가 발생하지 않는 거의 동일한 파형임을 알 수 있다. Hall-IC신호와 추정된 신호의 상승부분과 하강

부분을 검출하여 그림 15와 같이 60° 마다 펄스를 발생시킴으로써 2극 PM BLDC 전동기의 1회전 구동시 6펄스가 발생함을 알 수 있다.

그림 16은 본 논문에서 제안한 알고리즘과 속도 제어 블록을 이용하여 $30,000[\text{rpm}]$ 운전시 각 상전류 파형을 보여주고 있다.

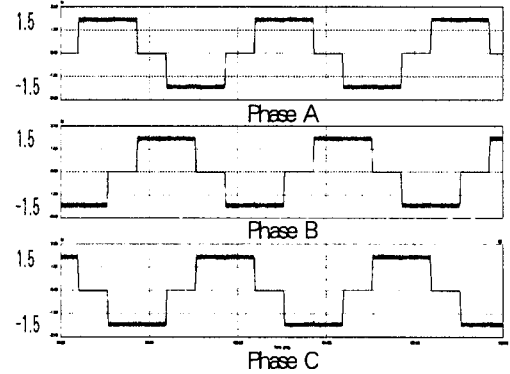


그림 16. 각 상의 전류 파형(1[ms]/[div], 30000[rpm])
 Fig. 16. Each phase current waveform

4. 실험 결과

본 논문에서 제안한 전체 알고리즘을 나타내는 그림 17은 PM BLDC 전동기, 인버터, 게이트 드라이버, EPLD 그리고 PI 제어기로 구성되어 있다. EPLD에는 스위칭 로직과 속도 측정을 위한 6펄스 발생 블록, 신호 추정 알고리즘을 디지털 로직으로 구현하였고 실험에 사용된 PM BLDC 전동기는 2극, Y-결선으로 사양은 표 1과 같다.

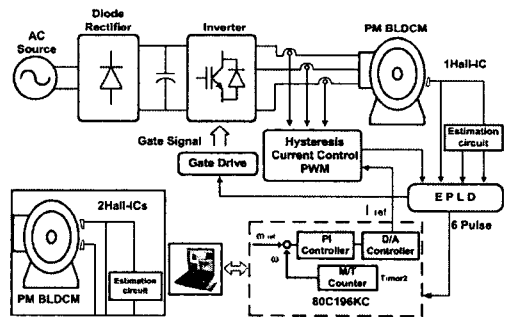


그림 17. PM BLDC 전동기 구동 시스템
 Fig. 17. PM BLDC motor driving system

표 1. PM BLDC 전동기 구동 시스템 사양
Table 1. Specification of PM BLDC Motor's driving system

입력 전압	90~340[Vdc]
정격 입력 전력	1[kW]
정격 출력 전력	0.9[kW]
정격 속도	33000[rpm]
정격 전류	3.6[A] at 280[Vdc]
극 수	2

1) 한 상(Hall-IC신호 Hc) 신호추정

그림 18과 19는 한 상의 Hall-IC신호를 추정하기 위한 실험결과로서 그림 18은 27000[rpm] 구동시 Hall-IC신호 중 HA신호를 이용하여 Hc신호를 추정하기 위해 본 논문에서 제안한 Hall-IC신호 추정회로로 각 부분의 결과를 보여주고 있다. 또한 20000[rpm] 운전시 실제의 Hall-IC신호와 추정된 신호의 상승부와 하강부에서 검출된 6펄스를 그림 19에서 볼 수 있다. 발생한 6펄스 신호는 전동기 속도 제어에서 엔코더의 A상과 B상의 역할을 하지만 저분해능이기 때문에 정밀속도제어는 응용되기가 힘들다. 따라서 6펄스를 이용한 체배 또는 PLL을 사용한 고분해능 펄스 발생기를 적용할 경우 정밀제어를 수행할 수 있다.

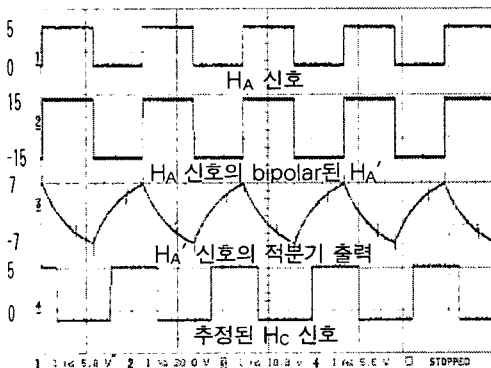


그림 18. Hall-IC(Hc)신호 추정(27000(rpm))
Fig. 18. Estimation of the Hall-IC signal(Hc)

그림 20은 27000[rpm]으로 전동기를 동작시켰을 때 상전류 파형으로서 각 상의 전류가 전환되는 시점에서 dip현상이 발생하는 전형적인 BLDC 전동기 전

류 파형의 모습을 보여주고 있다. 상전류 파형의 한 주기를 살펴보면 대략 2.2[ms]이므로 전동기에 공급되는 인버터의 출력 주파수는 450[Hz]가 된다. 이는 전동기의 정격 속도와 부합되는 결과임을 알 수 있다.

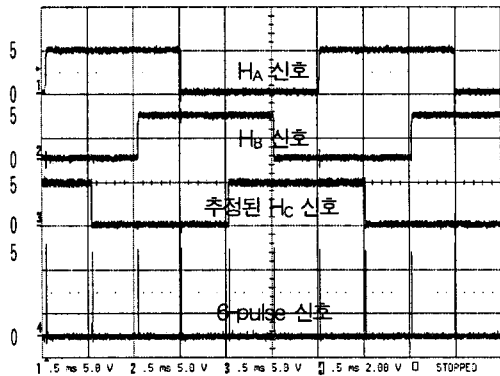


그림 19. Hall-IC신호와 6펄스(0.5(ms)/(div), 20000(rpm))
Fig. 19. Hall-IC signal and 6 pulse

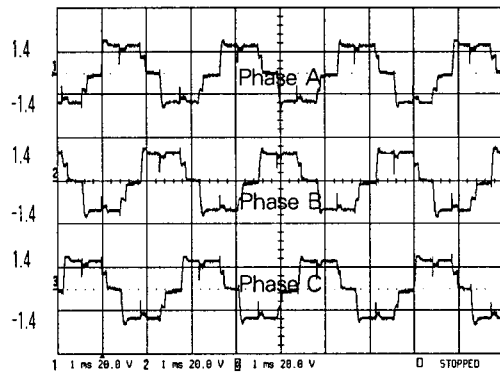


그림 20. 각 상전류 파형(0.5(ms)/(div), 27000(rpm))
Fig. 20. Each phase current

2) 두 상(Hall-IC신호 HB, Hc) 신호추정

그림 21과 22는 Hall-IC중 HA신호를 이용, Hc신호를 추정하고 최종적으로 나머지 한 상인 HB신호를 추정하기 위해 제안한 알고리즘의 실험결과를 나타내고 있다. Hall-IC신호 HA는 Hall-IC신호 추정회로의 입력으로 사용되고 출력된 삼각파 신호는 영점을 비교기 입력으로 사용하여 영점과 교차되는 지점에서 Hc에 해당하는 Hall-IC신호를 추정할 수 있다. 또한 추정된 Hc신호를 위에서 언급한 동일한 방법

에 의해 나머지 한 상인 H_B 신호를 추정할 수 있다.

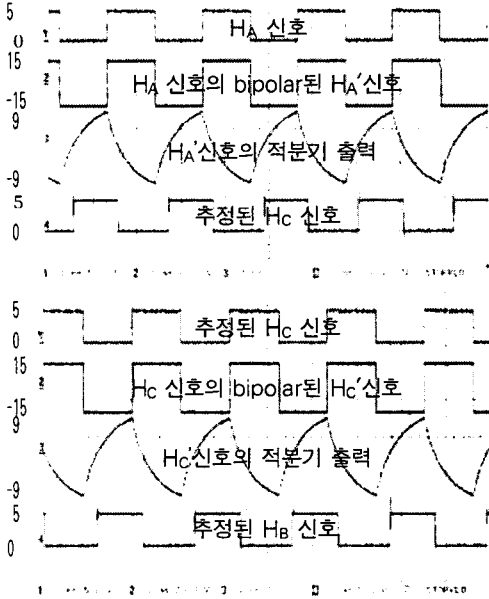


그림 21. Hall-IC(H_B , H_C) 신호 추정(27000(rpm))
Fig. 21. Estimation of the Hall-IC signal(H_B , H_C)

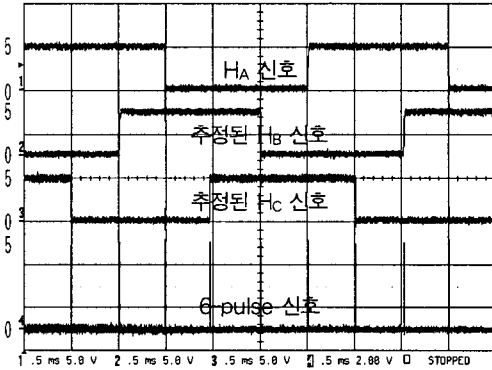


그림 22. Hall-IC신호와 6펄스(0.5(ms)/(div), 20000(rpm))
Fig. 22. Hall-IC signal and 6 pulse

그림 21에서는 27000[rpm]으로 운전시 입력으로 사용된 Hall-IC(H_A)신호, bipolar시킨 H_A' 신호 그리고 삼각파와 영점에 의해 비교되어 추정된 H_C 신호, bipolar시킨 H_C' 신호, 삼각파와 영점에 의해 비교되어 추정된 H_B 신호들을 각각 순서적으로 나타내고 있다. 따라서 3상 PM BLDC 전동기의 구동에 대한

보호측면이나 제한된 환경에서 본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용하여 운전을 할 수 있다.

또한 실제의 Hall-IC신호와 추정된 신호의 상승부와 하강부에서 검출된 6펄스를 그림 22에 나타내었다.

그림 23은 27000[rpm]으로 전동기를 동작시켰을 때 상전류 파형으로서 각 상의 전류가 전환되는 시점에서 dip현상이 발생하는 전형적인 BLDC 전동기 전류 파형의 모습을 보여주고 있다.

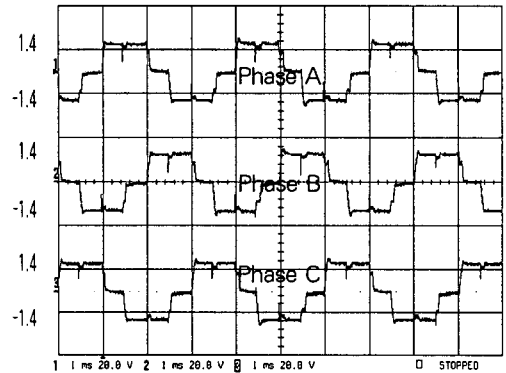


그림 23. 각 상전류 파형(0.5(ms)/(div), 27000(rpm))
Fig. 23. Each phase current

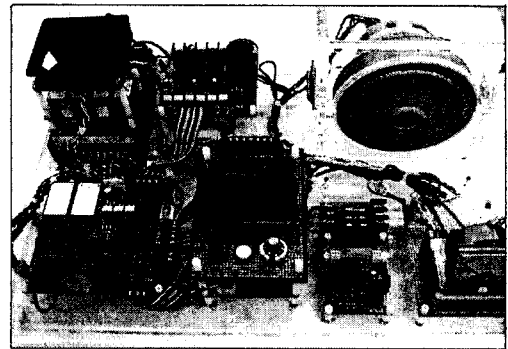


그림 24. 전체 실험세트
Fig. 24. Experimental test setup

본 논문에서 제안한 알고리즘을 수행한 전체 실험 세트는 그림 24와 같다.

5. 결 론

PM BLDC 전동기는 스위칭 소자를 이용한 인버터회로를 통해 정류를 하므로 정류시 회전자 위치

정보가 필요하여, Hall-IC나 엔코더와 같은 회전자 위치 검출 센서가 필수적이다. 그러나 온도나 습도 등 작업환경에 제한을 받는 곳에서는 Hall-IC의 고장 및 오동작으로 인한 전동기의 운전 정지 및 회전자 위치 검출오차에 의한 제어의 어려움이 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 알고리즘에 의해 제한된 환경에서 3개의 Hall-IC가 아닌 2개 또는 1개의 Hall-IC를 이용하여 회전자 위치를 추정함으로써 전동기 및 전체 시스템의 보호측면에서 응용될 수 있다. 시뮬레이션과 실험에 의해 신뢰성 및 그 타당성을 검증하였다.

이 논문은 에너지관리공단(2005-EL02-P-01-0-000-2005)의 에너지 자원기술개발사업 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] T. Kenjo and S. Nagamori, Permanent Magnet and Brushless DC Motors, Tokyo: Sogo Electronics, 1984.
- [2] J. R. Hendershot and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motor, Oxford: Oxford Science, 1994.
- [3] 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.
- [4] D.E. Hesmondhalgh, D. Tipping, M. Amrani, "Performance and design of an electromagnetic sensor for brushless DC motors", IEEE Trans. Ind. Application, pp. 174~183, 1990.
- [5] Fang Lin Luo, Hock Guan Yeo "Advanced PM Brushless DC Motor Control & System for Electric Vehicles", IEEE Trans. Ind. Application, Vol. 2, pp.1336~1343, 2000.
- [6] Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll "Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits", Prentice Hall, pp. 90~140, 2001.

◇ 저자소개 ◇

김연충 (金淵忠)

1970년 1월 9일생. 1995년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(박사). 현재 성균관대 신기술에너지 센터 연구원.

윤용호 (尹溶湖)

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

이병국 (李秉國)

1968년 12월 25일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 미국 Texas A&M University 전기공학과 졸업(박사). 2001년 12월~2003년 1월 미국 Texas A&M University Postdoctoral Research Associate. 2006년 3월~현재 성균관대 정보통신공학부 조교수.

김학성 (金學成)

1964년 11월 8일생. 1989년 성균관대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996~1997년 한국 전기연구원(Post Doc.). 1997년~현재 동양공업전문대학 자동화시스템과 부교수.

원충연 (元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시주립대학 전기공학과 방문교수. 2003년 1월~2004년 12월 전력전자학회 부회장. 1988년~현재 성균관대 정보통신공학부 교수.

천장성 (千長成)

1968년 12월 13일생. 1992년 서울대 전기공학과 졸업. 1994년 서울대 공대 대학원 전기공학과(석사). 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 1998년 4월~2002년 7월 미래산업(주) 근무. 2002년 8월~현재 세우산전(주) 이사. 2004년 8월~현재 (주)티에스에이 대표.