

선형홀센서와 고성능 미분기를 이용한 BLDC모터의 속도신호 구현

Realization of Velocity of BLDC Motor Using Linear Type Hall-effect Sensor and Enhanced Differentiator

구정회* · 최장영†
(Jeong-Hoi Gu · Jang-Young Choi)

Abstract - BLDC motor is widely used as a servo motor due to high efficiency, high power density, low inertia, and low maintenance. However, BLDC motor generally needs position and velocity sensors to control actuation system. Usually, analog tachometers and encoders have been used for velocity feedback sensors. However, using these types of sensors have problems such as the cost, space, and malfunction. So, This paper is to propose a new velocity measurement method using linear hall-effect and enhanced differentiator for BLDC motor. In order to verify the feasibility of the proposed method, several simulations and experiments are performed. It is shown that the proposed velocity measurement method can satisfy the requirements without using of velocity sensor.

Key Words : BLDC motor, Velocity sensor, Linear type Hall-effect sensor, Enhanced Differentiator(ED)

1. 서 론

BLDC(Brushless DC) 모터는 기존 DC모터와 비교하여 구조가 간단하고 브러쉬에 의한 마찰손실 없으며 소음이 적다. 특히 고효율 및 높은 내구성 등의 장점으로 인해 각종 자동차, 로봇 등의 다양한 분야에 사용되고 있다. 이러한 BLDC 모터를 이용한 각종 구동시스템에서 속도 및 위치 제어를 수행하기 위해서 모터의 회전속도 정보를 필요로 하며 이를 위해 일반적으로 타코미터, 엔코더 등과 같은 센서류를 사용하게 된다. 하지만 이와 같은 센서 사용으로 인해 비용이 상승하게 되며 센서를 장착하기 위한 별도의 장착 공간이 필요하며 센서 고장으로 인한 시스템 신뢰성을 저하시키는 문제점이 발생하게 된다.

이러한 센서류의 문제점을 해결하기 하기 위해 소프트웨어적으로 구동기의 속도를 측정할 수 있는 관측기의 적용[1-3] 및 BLDC 모터의 홀센서 클럭을 통한 속도 추정방법[4-5] 등이 제안되었다. 하지만, 기존의 관측기를 통한 속도 추정 방법은 외란 및 파라미터 변동에 다소 민감하여 시스템의 성능과 안정도를 함께 만족시킬 수가 없으며, 홀센서의 클럭을 이용한 M방식, T방식, M/T방식 등의 펄스 카운팅 방식은 어느 정도 이상의 고속에서는 속도 추정이 가능하지만 저속 구간에서는 홀센서의 펄스 수가 적어 위상 지연 및 잘못된 속도 정보로 인해 로봇과 같은 실시간 제어시스템에 적용하기가 곤란하다.

이러한 기존의 문제점들을 극복하기 위해서 본 논문에서는 기존에 사용하는 속도센서를 제거하고 BLDC 모터의 회전자 위치 정보를 위해 사용되는 홀센서를 래치형 홀센서(Latched Hall-effect Sensor)에서 선형 홀센서(Linear Hall-effect Sensor)로 대체하여 회전자의 위치 신호를 얻고, 얻어진 회전자 위치신호를 저속 성능 및 외란에 강건한 고성능 미분기(ED : Enhanced Differentiator)[6]를 적용하여 최종적으로 BLDC 모터의 속도 신호를 구현하였다. 본 논문에서 제안된 속도신호 구현 방법의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션 및 실험을 수행하였으며 구현된 속도 신호의 특성을 확인하기 위하여 기존의 속도센서인 타코미터와 비교 시험을 수행하였다.

2. 홀센서를 이용한 BLDC모터의 속도신호 구현 방법

2.1 래치 홀센서를 이용한 속도신호 구현

회전자의 자극 위치를 제공하기 위해 사용되는 래치 홀센서는 정밀도가 낮은 엔코더라고 할 수 있으며 정밀도를 최대한 높이기 위해 그림 1과 같이 래치 홀센서 A, B, C상의 상승과 하강 펄스가 발생하는 순간마다 시스템 클럭을 계산함과 동시에 시스템 클럭 카운터를 초기화하여 모터의 회전 속도를 얻을 수가 있다. 식 (1)과 같이 홀센서의 펄스 한 주기(T) 동안에 발생하는 시스템 클럭 수를 계산하여 모터의 회전 속도를 얻을 수가 있으며 이와 같은 방식을 T방식이라고 한다. 하지만 그림 2와 같이 래치 홀센서의 펄스를 이용한 T방식은 일정 속도 이상에서는 타코미터(Tachometer)와 비교하여 동등 이상의 양호한 속도신호가 얻어

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
Chungnam National University, Korea.
E-mail:choi_jy@cnu.ac.kr

* Agency for Defense Development, Korea.

Received : April 11, 2018; Accepted : June 21, 2018

지지만, 일정 속도 미만에서는 모터 속도에 비례하여 홀센서의 펄스 주파수도 느려져 타코미터에 비해 지연현상이 발생하는 것을 확인할 수가 있다.

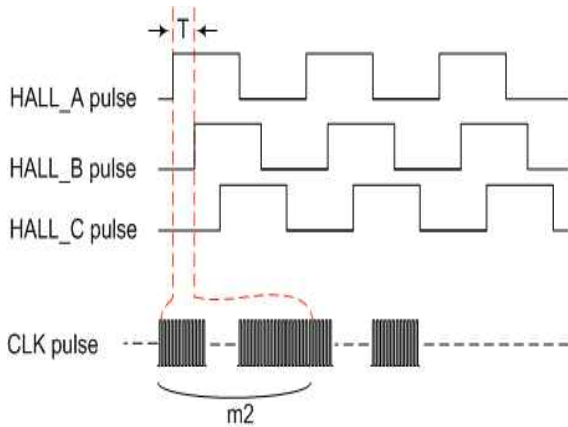


그림 1 속도구현 방법 - T방식

Fig. 1 Velocity measurement using T-method

$$f = \frac{f_c}{ppr \times m2} [\text{revolution/sec}] \quad (1)$$

f_c 는 클럭 주파수, ppr (pulse per revolution)은 1회전당 펄스 수, $m2$ 는 주파수 f_c 의 클럭 펄스의 갯수이고 f 는 1초 동안의 회전수이다.

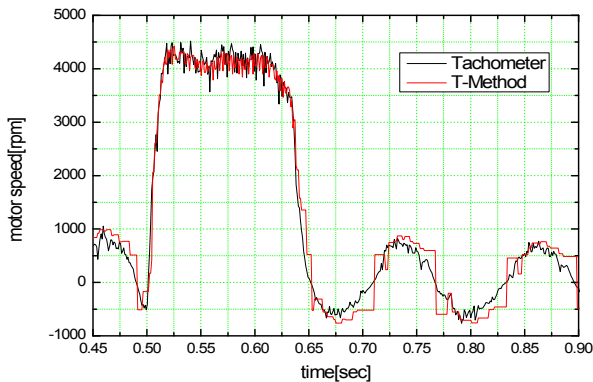
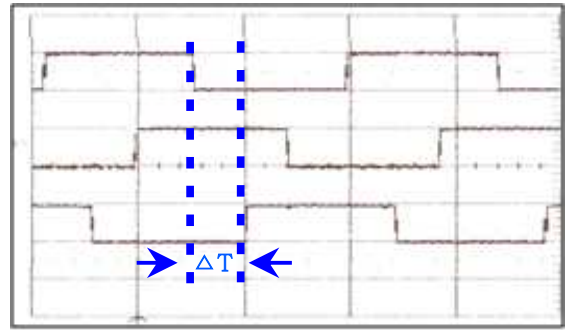


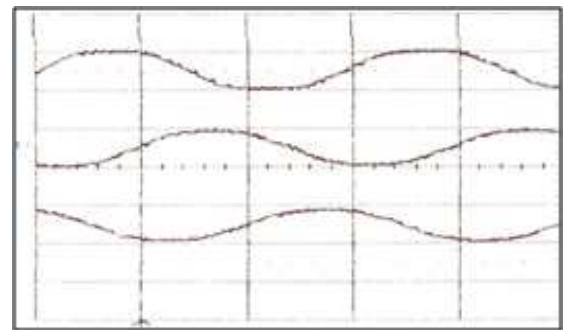
그림 2 실험결과 - T방식

Fig. 2 Experimental results using T-method

그림 3(a)와 같이 기존의 래치 홀센서는 ΔT 구간 동안 모터의 회전자 위치 변화를 알 수 없는 데드존(Dead Zone)이 존재하여 저속에서 위상 지연을 유발하게 된다. 이러한 데드존 문제를 극복하기 위해 그림 3(b)와 같이 모터의 회전에 따른 홀센서의 출력값이 정현파 형태로 출력되는 선형 홀센서를 적용함으로써 회전자 위치 변화를 선형적으로 얻을 수가 있어 고속 구간뿐만



(a) 래치형 홀센서



(b) 선형 홀센서

그림 3 홀센서 출력 파형

Fig. 3 Output waveforms of Hall-effect Sensor

아니라 저속 구간에서도 모터의 회전 속도를 정확히 추정할 수 있도록 하였으며 이에 대한 자세한 내용은 2.2절에서 언급하였다.

2.2 선형 홀센서를 이용한 속도신호 구현

2.2.1 하드웨어 구성

그림 4는 기존 BLDC 모터에서 래치형 홀센서를 선형 홀센서로 대체하여 제작된 BLDC모터를 나타낸다. 이와 같이 선형 홀센서를 적용할 경우에는 BLDC모터 정류를 위해 기존의 래치 홀센서에 의한 모터 구동 신호를 필요하게 된다. 이를 위해 그림 5에 나타난 바와 같이 히스테리시스 특성을 갖는 비교기를 통해 BLDC모터 구동신호를 간단히 생성할 수가 있으며 동시에 선형홀센서의 아날로그 출력값을 이용하여 모터의 회전속도를 추정할 수 있도록 하였다. 이처럼 기존의 하드웨어 변경을 최소화하면서 선형홀센서를 통해 BLDC모터 구동을 위한 정류 신호와 모터의 속도신호를 동시에 구현하고자 하였다.

2.2.2 회전자 위치신호 추정 알고리즘

그림 3과 같이 모터의 회전에 따른 선형 홀센서의 출력 전압값은 전기적으로 120도의 위상차를 갖는 정현파 형태로 출력되므로 직교좌표계에서 A상을 Y축 상의 좌표로 설정하면 B와 C상은 그림 6과 같이 나타내어지며 B와 C상이 X축과 이루는 각도

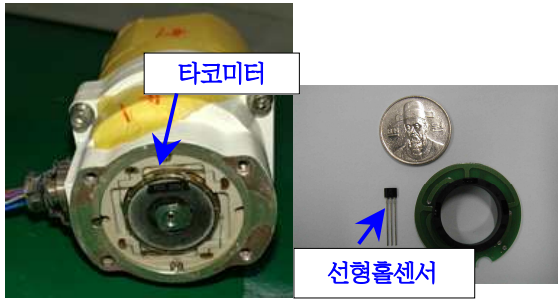


그림 4 BLDC 모터 및 선형홀센서
 Fig. 4 BLDC motor and linear Hall-effect Sensor

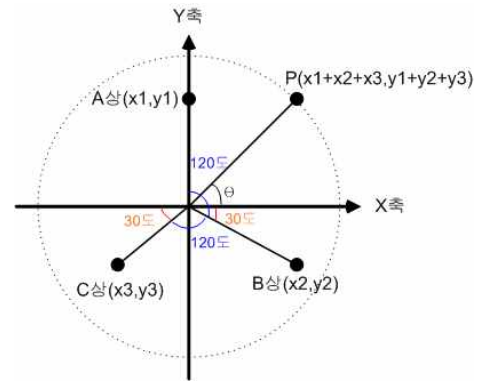


그림 6 홀센서 좌표계
 Fig. 6 Coordinate system of linear type Hall-effect sensor

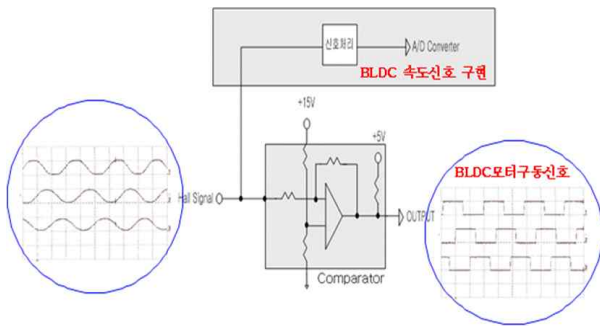


그림 5 선형 홀센서 관련 회로부
 Fig. 5 Circuit of linear type Hall-effect sensor

는 30도이므로 A, B, C상의 홀센서 좌표값은 식 (2)와 같이 나타낼 수가 있다.

$$\begin{aligned} x_1 &= 0, y_1 = h_A & (2) \\ x_2 &= h_B \times \cos(30^\circ), y_2 = -h_B \times \sin(30^\circ) \\ x_3 &= -h_C \times \cos(30^\circ), y_3 = -h_C \times \sin(30^\circ) \end{aligned}$$

식 (2)를 통해 얻어진 A, B, C상의 홀센서 좌표값을 이용하여 합 좌표값 $P(x_1+x_2+x_3, y_1+y_2+y_3)$ 를 계산하고 이 합좌표값 P가 X축과 이루는 각도값 θ 를 식 (3)을 통해 얻을 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1}(y_1+y_2+y_3)/(x_1+x_2+x_3) & (3) \\ \theta &= |\theta| \end{aligned}$$

여기서, $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$

식 (3)에서 얻어진 θ 는 1사분면 내의 각도이므로 사분면 판단을 통해 실제의 θ 를 식 (4)와 같이 구하게 된다.

$$\begin{aligned} x_1+x_2+x_3 > 0 \quad y_1+y_2+y_3 > 0 \quad & \text{then } \theta = \theta \\ x_1+x_2+x_3 < 0 \quad y_1+y_2+y_3 > 0 \quad & \text{then } \theta = 180 - \theta \\ x_1+x_2+x_3 < 0 \quad y_1+y_2+y_3 < 0 \quad & \text{then } \theta = 180 + \theta \\ x_1+x_2+x_3 > 0 \quad y_1+y_2+y_3 < 0 \quad & \text{then } \theta = 360 - \theta \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 통해 구한 θ 값에서 추가적으로 고려해줘야 할 사항

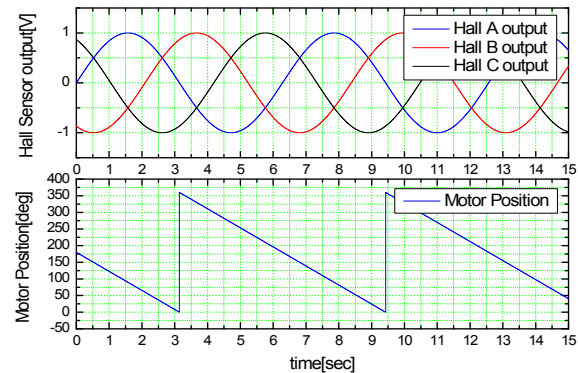


그림 7 위치신호 추정 알고리즘 시뮬레이션 결과
 Fig. 7 Simulation result for position estimation algorithm

은 1사분면과 4사분면 사이의 경계 구간에서의 변화량이다. 식 (4)를 통해 계산된 θ 값은 실제 변화량보다 큰 값으로 얻어지게 되므로 식 (5)를 통해 이와 같은 문제점을 보완하게 된다.

$$\begin{aligned} \text{if } abs(\theta(k-1) - \theta(k)) > 180 \text{ then} & & (5) \\ \theta(k-1) - \theta(k) = abs(\theta(k-1) - \theta(k)) - 360 & \\ \times (\theta(k-1) - \theta(k)) / abs(\theta(k-1) - \theta(k)) & \end{aligned}$$

위에서 언급한 선형홀센서를 이용한 회전자 위치신호 추정 알고리즘을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행한 결과는 그림 7과 같다.

2.2.3 회전자 속도신호 추정 알고리즘

2.2.1절을 통해 얻어진 회전자의 위치 정보값을 단순 미분방정식 (GD : General Differentiator)을 통해 속도 신호를 얻을 수도 있지만 3절의 시험 결과에도 나타나 있듯이 속도 신호의 진폭이 크게 나타나며 노이즈에 취약한 특성이 있으므로 이를 극복하기 위해 고성능 미분기(Enhanced Differentiator)를 적용하여 보다 양호한 속도 신호를 구현하고자 하였다. 적용된 고성능 미

분기의 수식은 (6)과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \hat{p}(k+1) &= \hat{p}(k) + T\hat{v}(k) \\ \hat{v}(k+1) &= \hat{v}(k) + \\ &TR^2[-\alpha_0\epsilon(k) - \alpha_1(\epsilon(k))^{\frac{n}{m}} - \alpha_2(\frac{\hat{v}(k)}{R})^{\frac{n}{m}}] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, \hat{p} 은 추정 위치, \hat{v} 은 추정 속도, T 는 샘플링 시간, $\epsilon(k) = \hat{p}(k) - p(k)$ 를 나타낸다.

그림 8~9는 본 논문에 적용된 고성능 미분기의 동작을 확인하기 위해 Matlab Simulink를 이용하여 모델링 및 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타낸다.

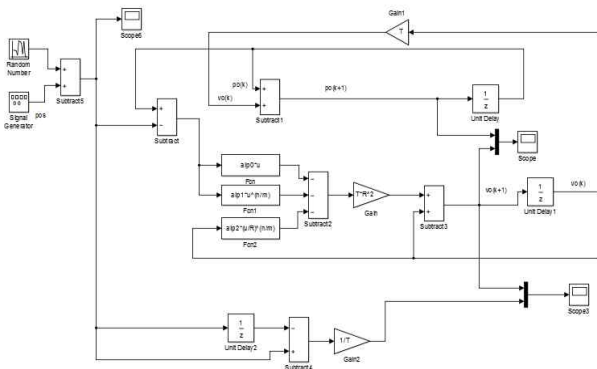


그림 8 고성능 미분기 시뮬레이션 모델
Fig. 8 Simulation model for Enhanced Differentiator

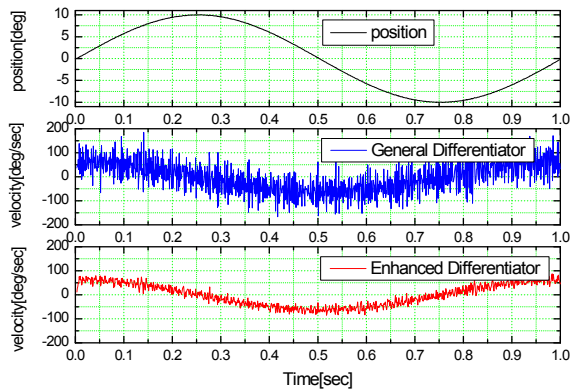


그림 9 속도신호 추정 알고리즘 시뮬레이션 결과
Fig. 9 Simulation result for Enhanced Differentiator

그림 9는 정현파 입력 신호에 대해 화이트 노이즈를 인가하였을 때 일반 미분기(GD : General Differentiator)와 고성능 미분기(ED : Enhanced Differentiator)를 적용한 경우의 출력 파형을 나타내며 그림 9와 같이 본 논문에 적용된 고성능 미분기가 일반 미분기를 사용한 경우보다 신호 특성이 보다 양호한 것을 확인할 수가 있다.

3. 실험 결과

3.1 시험 구성

그림 10은 선형홀센서 BLDC모터에 대한 제안된 속도 신호의 특성을 확인하기 위한 실험 구성도이며 크게 점검장비, 디지털서보제어기, 모터 속도 조절장치 등으로 구성된다. 모터 속도 조절장치는 DC모터에 전압을 인가하면 커플링 되어진 선형홀센서 BLDC모터가 같은 속도로 회전을 하게 되고 회전 속도를 RPM Meter기로 표시하도록 하였다. 시험용 선형홀센서 BLDC모터 내부에는 기존의 속도센서인 타코미터가 장착되어 있어 본 논문에서 제안된 속도 신호와 비교할 수 있도록 하였다.

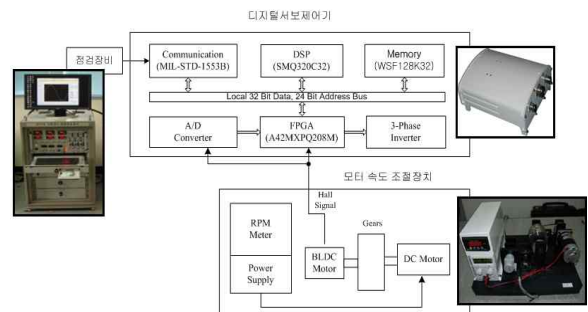


그림 10 실험 구성도
Fig. 10 Block diagram of experimental system

3.2 시험 결과

본 논문에 적용된 선형홀센서와 고성능 미분기를 이용한 속도 신호의 우수성을 검증하기 위해 기존 속도센서인 타코미터와 비교하여 시험을 수행하였으며 또한, 본 논문에서 적용한 고성능 미분기의 성능을 검증하기 위해 일반 미분기를 사용한 경우와 비교 시험을 수행하였다.

그림 11~12는 모터가 일정 속도로 회전할 때의 시험 결과를 나타낸다. 그림 11은 래치형 홀센서를 이용한 T방식의 속도 신호에서 지연 현상으로 인한 문제가 발생하는 저속 구간에서의 속도 신호 특성을 알아보기 위하여 500[RPM] 정도로 운전할 때의 시험 결과이다. 일반 미분기의 경우에는 신호 리플이 크게 나타나지만 고성능 미분기에 의한 속도 신호는 기존의 타코미터와 유사한 수준의 속도 신호가 얻어짐을 확인할 수가 있었다.

그림 12는 모터가 3000[RPM] 정도의 고속으로 회전할 때의 시험 결과를 나타낸다. 저속에서의 시험 결과와 동일하게 고속 운전에 대해서도 제안된 방식에 의한 속도 신호가 기존의 타코미터 신호에 비해 동등 이상의 양호한 속도 신호가 얻어짐을 확인할 수가 있었다.

그림 13은 모터 속도조절장치에서 DC모터의 인가 전압을 가변하여 모터의 속도를 가변 한 경우의 속도 파형을 나타낸다. 모터 회전 속도를 가감속하는 경우에도 제안된 방식의 속도 신호는 일반 미분기에 비해 신호 리플 특성이 우수하며 타코미터 신호와 동적 특성과 신호 리플 특성이 유사함을 확인하였다.

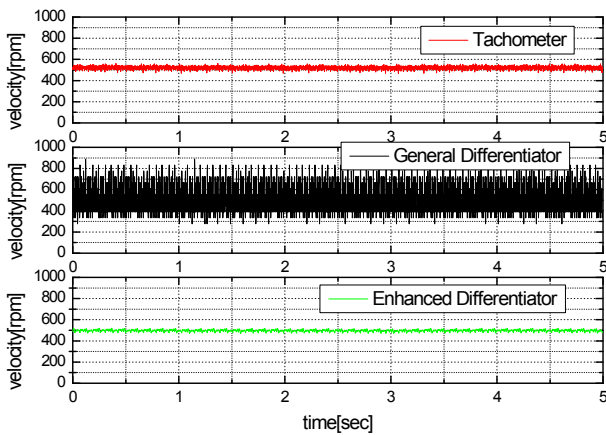


그림 11 모터 시험 결과 - 저속 운전시
 Fig. 11 Test result of motor - low speed

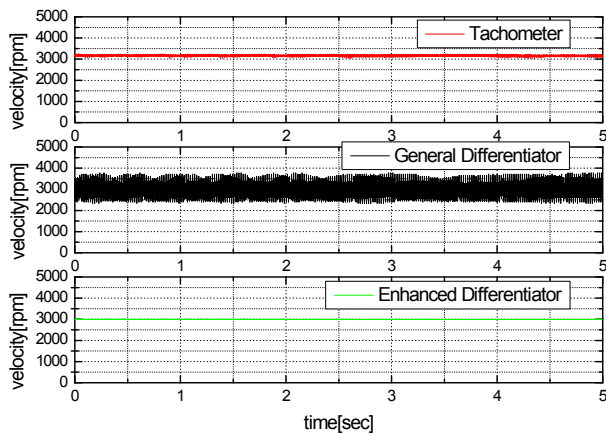


그림 12 모터 시험 결과 - 고속 운전시
 Fig. 12 Test result of motor - high speed

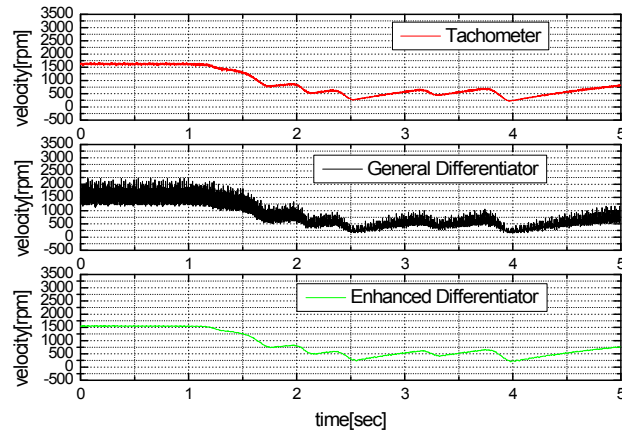


그림 13 모터 시험 결과 - 속도 가변시
 Fig. 13 Test result of motor - varying speed

이상과 같이 저속, 고속, 가감속 구간에 대해 시험을 수행한 결과 기존의 속도 센서인 타코미터를 대체할 수 있는 만족할 만한 속도 신호를 얻을 수가 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 BLDC모터의 회전자 위치 센서로 사용되는 홀센서를 선형홀센서로 대체하여 회전자의 위치 정보를 선형적으로 획득하고 획득된 위치 정보를 고성능 미분기에 적용함으로써 추가적인 속도 센서 없이 BLDC모터의 속도 신호를 구현하였다.

제안된 방식의 타당성을 입증하기 위해 시뮬레이션과 실험을 수행하였으며 기존의 타코미터를 사용한 경우와 유사한 시험 결과를 얻을 수가 있었다. 이를 통해 BLDC 모터가 사용되는 각종 구동시스템에서 속도센서리스를 구현함으로써 기존 속도 센서가 갖는 장착 공간문제, 추가적인 비용 발생, 센서 고장으로 인한 시스템 신뢰성 저하 등의 문제점을 극복할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Zhiqian Chen, Mutuwo Tomita, Shinji Doki and Shigeru Okuma "New Adaptive Sliding Observers for Position- and Velocity-Sensorless Controls of Brushless DC Motors", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 3, pp. 582-591. 2000.
- [2] Gene F. Franklin, J. David Powell and Abbas Emami-naeini, "Feedback Control of Dynamic Systems", *Addison Wesley*, 1995.
- [3] Jorge Solsona, Maria I. Valla and Chrlos Muravchik "A Nonlinear Reduced Order Observer for Permanent Magnet Synchronous Motors", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 4, pp. 492-497. 1996.
- [4] Lin Qiaobin, Lu Xiaofen, Guo Xinhua, Yan Bingjun and Guo Baojia "The Simulation of Sensorless Control of BLDC Based on the Counting of PWM Pulses", *Transportation Electrification Asia-Pacific*, 2014 IEEE Conference and Expo.
- [5] R. H. Brown, S. C. Schneider, and M. G. Mulligan, "Analysis of algorithms for velocity estimation from discrete position versus time data", *IEEE Trans. Ind. Electron.* vol. 39, pp. 11-19, Feb. 1992
- [6] Y. X. Su, C. H. Zheng, P. C. Mueller, and B. Y. Duan "A Simple Improved Velocity Estimation for Low-Speed Regions Based on Position Measurements Only", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 14, no. 5, pp. 937-941. 2006.

저 자 소 개



구 정 회 (Jeong-Hoi Gu)

1974년 6월 19일생. 2000년 동아대 전기공학과 학사졸업. 2002년 부산대 전기공학과 석사졸업. 2002년~현재 국방과학연구소 근무

Tel : 042-821-2443

Fax : 042-821-2224

E-mail : 9334931@hanmail.net



최 장 영 (Jang-Young Choi)

1976년 10월 20일생. 2003년 충남대학교 전기공학과 학사졸업. 2005년 동대학원 전기공학과 석사졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 박사 졸업. 2009년 1월~2009년 8월 (주)한라공조 기술연구소. 2009년9월~현재 충남대학교 전기공학과 부교수.

Tel : 042-821-7610

E-mail : choi_jy@cnu.ac.kr