

브러시리스 직류전동기의 안전성을 고려한 Hall Sensor 신호 추정 알고리즘 설계

The Estimation Algorithm Design of Hall Sensor Signal Considering Safety of BLDC Motor

윤 용 호*
(Yong-Ho Yoon)

Abstract - In this paper, because the position sensor represents the important factor in BLDC (Brushless DC) motor drives, BLDC motor is necessary that the three Hall-sensors evenly be distributed around the stator circumference in case of the 3 phase motor. The Hall-sensor is set up in this motor to detect the main flux from the rotor. So the output signal from Hall-sensor is used to drive IGBT to control the stator winding current. However, in case of breakdown Hall sensor, we research that the estimation algorithm of Hall sensor signal to detect rotor position and for the speed feedback signals with BLDC motor whose six stator and two rotor designed. In addition, this paper presents a sensorless speed control of BLDC Motor using terminal voltage of the one phase. Rotor position information is extracted by indirectly sensing the back EMF from only one of the three terminal voltages for a three-phase BLDC motor.

Key Words : BLDC Motor, Estimation algorithm of Hall sensor signal, Hall sensor, Sensorless, Safety

1. 서 론

BLDC(Brushless DC) 전동기는 스위칭 소자를 이용한 인버터 회로를 통해 정류를 하므로 정류시 회전자 위치정보가 필요하며, Hall sensor나 엔코더와 같은 회전자 위치 검출 센서가 필수적이다. 그러나 주변 온도나 습도 등 작업 환경에 제한을 받는 곳에서는 센서의 고장 및 오동작으로 인한 전동기의 운전 정지 및 회전자 위치 검출 오차에 의한 제어의 어려움이 발생할 수 있다.

일반적으로 속도를 검출하는 방법으로는 엔코더(encoder)나 레졸버(resolver)와 같은 고가의 속도 센서들이 사용된다. 그러나 측정하는데 있어서 시스템 잡음이나 경제적인 문제, 센서의 분해능의 한계로 인하여 정확한 정보를 얻을 수 없는 경우가 존재한다. 특히 저속 구동 시 디지털 센서의 출력 주파수가 제어기의 샘플링 주파수 보다 낮으면 정확한 속도를 얻을 수 없다. 샘플링 문제를 보완하기 위하여 샘플링 주파수를 길게 하면 전체적인 시스템의 신뢰도가 떨어지게 된다[1, 2].

따라서 본 논문에서는 이러한 가격과 크기를 줄이기 위하여 엔코더나 레졸버와 같은 고가의 속도 센서를 사용하지 않고 주변 온도나 습도 등 작업 환경에 제한을 받는 곳에서 Hall sensor의 고장 및 오동작에 발생할 수 있는 문제점을 고려하였다. 일반적

으로 Hall sensor는 다음과 같은 경우 주요 고장 및 오동작의 문제점을 발생시킬 수 있다[3].

- 1) 입력전원 극성이 바뀌었을 때
- 2) 정격전류에 2배 이상의 전류가 흘러 철심코어 포화 및 입력전류에 대한 출력전압의 직선성이 상실된다.
- 3) 정전기, 과전압은 홀소자의 불평등 전압이 증가되기 때문에 offset 전압의 변화를 일으킨다.
- 4) 고주파 전류 사용 시 철심코어의 손실 때문에 코어 온도가 상승하는 원인이 된다.
- 5) 센서를 강한 자계에 치부할 경우 파형 왜곡이 발생된다.
- 6) 피검출 전류의 도체 관통부에 일직선으로 고정시키지 않을 경우 파형의 왜곡이 발생할 수 있다.

이러한 문제점을 기반으로 BLDC 전동기의 안전성을 고려하여 Hall sensor 신호를 추정할 수 있는 알고리즘을 구성하여 회전자의 위치를 판별함과 동시에 속도센서를 대신하여 전동기를 구동할 수 있는 방법을 연구하고자 한다.

첫 번째로 참고문헌 [4, 5]번의 내용에서 언급한 바와 같이 3개의 Hall sensor를 이용하여 3상 BLDC 전동기를 구동중 1개의 Hall sensor 또는 2개의 Hall sensor가 오동작 및 고장으로 인해 회전자의 정확한 위치추정과 속도제어가 불가능해질 경우 Hall sensor 신호를 추정할 수 알고리즘으로 적용할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 회전자 위치 미검출시 Hall sensor 신호 추정 알고리즘을 이용하여 회전자의 위치를 판별함과 동시에 속도 센서를 대신하여 사용할 수 있도록 구성하였다[4, 5].

* Corresponding Author : Mechatronics team, Hanwha Thales Co., Ltd. Korea.
E-mail: dydghis@gmail.com

Received : August 6, 2016; Accepted : October 2, 2016

두 번째로 3개의 Hall sensor의 오동작 및 고장 또는 Hall sensor의 일부 오동작과 회전자 위치의 다 극수로 인해 전동기 구동이 불가능할 때가 있다. 이러한 경우를 고려하여 한 상의 단자전압 성분만으로 회전자 위치를 판별할 수 있는 sensorless 방법으로 회전자 위치를 판별함과 동시에 속도제어를 구성하였다[6]. 본 논문에서 구현한 sensorless는 한 상의 단자 전압을 병렬로 연결된 저항을 통해 분압된 크기로 변환하여 회전자 위치 정보를 검출한다. 그리고 검출된 단자전압 정보는 필터 및 적분회로를 통해 영점검출회로와 비교함으로써 최종적으로 오동작 및 고장 난 Hall sensor 신호를 추정할 수 있다[7].

2. 회전자 위치 미검출시 Hall Sensor 신호 추정 알고리즘

2.1 고장난 Hall sensor 신호 추정 [4, 5]

그림 1은 실용적분회로와 영점 검출회로를 포함한 본 논문에서 적용한 고장난 Hall sensor 신호 추정회로를 나타내고 있다. 실용적분 회로를 통해 출력 되어진 삼각파와 영점(ground)을 비교하여 영점이상의 값에서 펄스가 발생되도록 구성하여 고장 난 Hall sensor 신호를 추정하도록 하였다. BLDC 전동기의 안전성을 고려하여 고장 및 오동작으로 회전자 위치 미검출시 Hall sensor 신호를 추정하기 위한 회로는 op-amp와 몇 가지의 수동 소자로 구성할 수 있으며 적분기 입력 신호에 의해 비례하는 출력신호를 얻는 회로는 비반전 단자의 피드백 저항과 커패시터로 구성된 실용적분회로를 이용하여 얻을 수 있다.

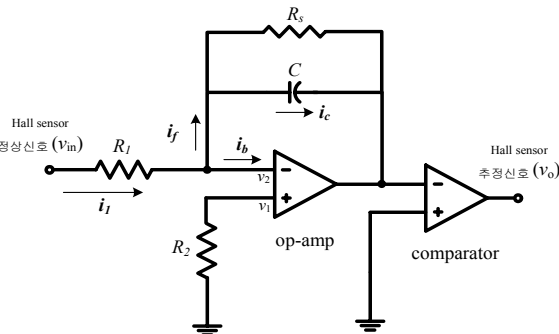


그림 1 Hall sensor 신호 추정회로
Fig. 1 Estimation circuit of Hall sensor signal

전동기에 부착되어 정상신호가 출력되고 있는 특정 상(相)(예: A상)의 Hall sensor 신호를 이용하여 고장 및 오동작으로 인해 정상출력이 되지 않고 있는 다른 상(相)(예: C상)의 신호를 추정하는 알고리즘을 그림 2를 통해 최종적으로 그림 3과 같이 Hall sensor 추정신호를 얻을 수 있다. 정상출력 되고 있는 0~5[V]인 Hall sensor 출력신호를 -5~5[V]로 변화시키고 이 신호를 적분기의 입력으로 하여 출력신호인 삼각파 신호를 얻을 수 있다. 또한 이 신호를 이용하여 영점 검출회로에 의해 얻어진 구형파 신

호는 실제 고장 난 Hall sensor에서 출력되는 신호와 동일한 주기를 가지는 신호를 추정할 수 있다.

일반적으로 3상 BLDC 전동기를 구동하기 위해 각 상에 부착된 Hall sensor 신호는 그림 4와 같이 각각 120도의 위상차와 60도의 중첩을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서 적용한 Hall sensor신호 추정회로는 C상의 신호가 고장일 경우 정상 출력되고 있는 A상의 Hall sensor를 이용하여 얻을 수 있다. 추가적으로 2개의 Hall sensor가 고장일 경우 위에서 언급한 내용과 동일하게 추정된 Hall sensor C상의 신호를 그림 1의 입력신호로 하여 B상의 추정된 Hall sensor 출력신호를 얻을 수 있다.

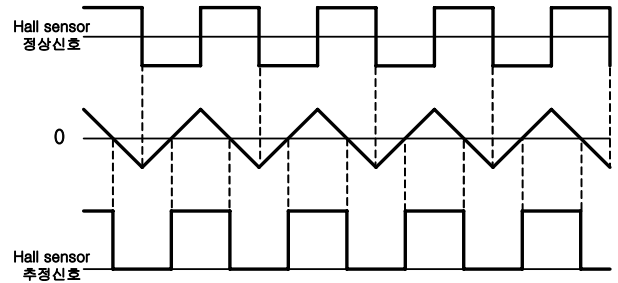


그림 2 Hall sensor 신호 추정회로의 각부 파형
Fig. 2 Each waveform of estimation circuit of Hall sensor signal

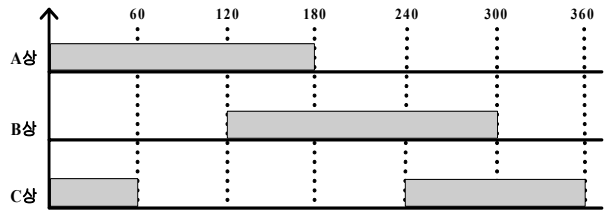


그림 3 Hall sensor 신호
Fig. 3 Hall sensor signal

2.2 Sensorless에 의한 Hall sensor 신호 추정

2.1절에서 언급한 것과 같이 BLDC 전동기의 안전성을 고려하여 특정 상(相)의 Hall sensor가 고장 및 오동작시 그림 1에 나타난 회로를 이용하여 추정된 신호를 얻을 수 있고 추가적으로 전동기에 부착된 모든 Hall sensor가 고장시 적용할 수 있는 sensorless 방법을 연구 및 적용하였다.

3상 2여자 방식으로 구동되는 BLDC 전동기는 항상 두 상이 동시에 여자되며, 여자되지 않은 개방된 상(相)이 항상 존재하게 된다. 개방된 상(相)의 역기전력은 개방 구간 내에서 항상 최대값에서 최소값으로 감소하거나 최소값에서 최대값까지 증가한다. 따라서 이 구간 내에서 회전자 위치는 항상 역기전력이 영(零)이 되는 위치(ZCP, Zero Crossing Point)를 지나게 된다. 따라서 본 논문에서는 개방된 구간에서 역기전력을 검출 및 ZCP를 찾아내어 그 때의 회전자 위치를 알 수 있는 Hall sensor 신호를 추정

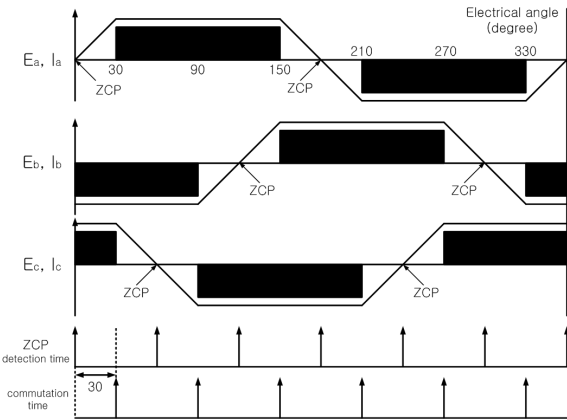


그림 4 역기전력, ZCP 및 전환 시점
Fig. 4 Back EMF, ZCP, commutation point

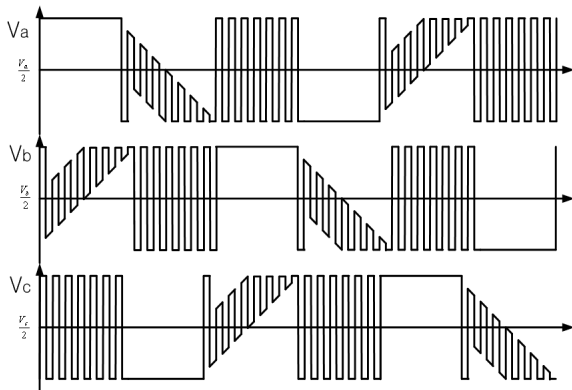


그림 5 인버터 A, B, C상 단자전압
Fig. 5 A, B, C phase terminal voltage of inverter

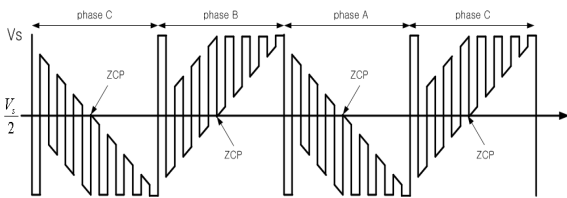


그림 6 ZCP 시점 및 전환 시점
Fig. 6 ZCP and commutation point

하도록 하였다.

그림 4는 BLDC 전동기의 역기전력 파형과 ZCP 및 전환 (commutation)시점을 나타내고 있으며 상전류의 전환시점은 ZCP가 검출된 시점으로부터 전기각 30도 지연된 시점인 것을 확인할 수 있다. 따라서 ZCP를 검출하기 위해서는 개방된 상의 단자전압을 검출하고 그 특성을 이용하여야 한다.

그림 5는 인버터 A, B, C상의 단자전압 파형으로 각 상의 단자전압은 전기각 120도의 위상차를 가지며, 60도마다 발생하는 비여자 상의 파형을 연속적으로 나타내면 그림 6과 같이 나타낼

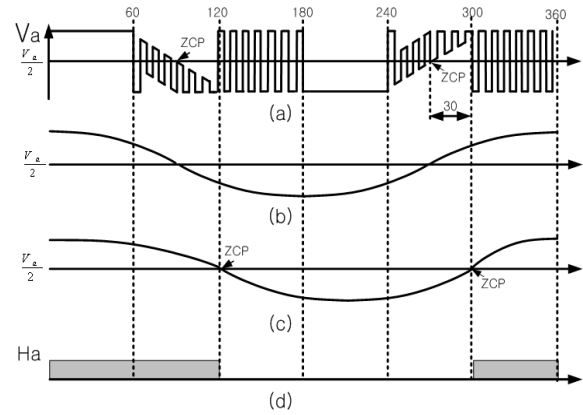


그림 7 Va의 단자전압과 Hall sensor 파형
Fig. 7 Terminal voltage of Va and Hall sensor

수 있다. 따라서 ZCP에서 전기적으로 30도 지연된 시점이 전환 시점으로 이때 상전류를 전환시키고 다음 비여자상의 단자전압으로부터 ZCP를 검출하여 전동기를 연속적으로 sensorless에 의해 운전할 수 있다.

그림 7은 인버터 A상의 단자전압을 이용하여 최종적으로 Hall sensor 신호를 추정하기 위한 각 단계의 파형으로 (a) A상 단자전압(Va)에는 PWM 스위칭에 의한 고주파 성분이 포함되어 있으며, 고주파 성분을 제거하기 위하여 저역통과 필터(low pass filter)를 사용한다. (b)에 보인 바와 같이 저역통과 필터링을 통하여 얻어진 파형은 PWM 스위칭에 의한 고주파 성분이 제거된 형태의 파형을 나타내는데 이는 그림 6에서 보인 바와 같이 개방된 상의 역기전력이 $V_s/2$ 와 같아지는 지점이므로, 이로부터 전기각 30도 지연된 시점이 상전류의 전환시점이 된다. 따라서 이 전환 시점을 알아내기 위하여 전기각 30도를 지연시키는 상지연 필터를 사용하여 얻어진 (c)의 ZCP는 그림 6의 ZCP의 전환시점과 일치함을 알 수 있다. 이를 통해 회전자의 위치 및 Hall sensor 신호를 간접 검출해 낼 수 있으며, 이를 이용하여 전동기를 sensorless에 의해 구동할 수 있다.

3. 시뮬레이션

본 논문에서 연구 및 적용한 브러시리스 직류전동기의 회전자 위치 미검출시 Hall sensor 신호 추정 알고리즘에 대한 타당성을 검증하기 위하여 PSIM 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션을 구성하였다. 전체 시뮬레이션 구성은 BLDC 전동기, 인버터, 게이트 드라이버, 스위칭 로직, Hall sensor 추정 알고리즘 회로, 비여자상의 단자전압 검출부를 이용한 sensorless 제어회로, 6펄스 로직, 속도 및 전류 제어 블록으로 이루어져있으며, 6펄스 로직 부분은 PSIM내의 DLL을 이용하여 C언어로 구현이 되어 있다. 시뮬레이션에 사용된 BLDC 전동기는 2극, Y결선으로 구성되어 있으며 사양은 표 1과 같다.

그림 8과 9는 3상 BLDC 전동기 구동중 1개의 Hall sensor 또는 2개의 Hall sensor가 오동작 및 고장으로 인해 회전자의 정

표 1 BLDC 전동기 사양

Table 1 Specifications of BLDC

파라미터	정격
고정자 저항	0.88Ω
입력 전압	90Vdc ~ 340Vdc
고정자 자기인덕턴스	1.5mH
고정자 상호인덕턴스	3.98mH
정격 속도	33,000rpm
정격 전류	3.6Amps at 280Vdc
극수	2

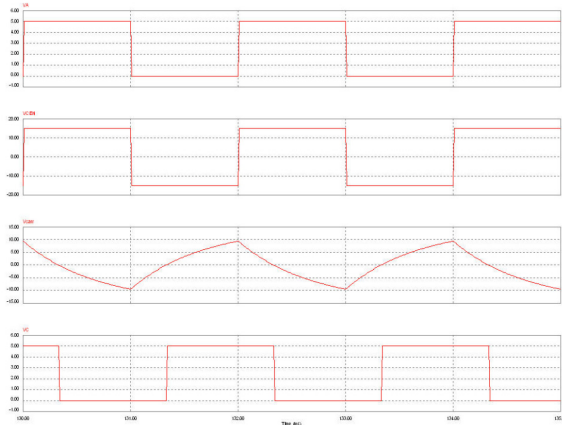


그림 8 고장난 C상의 Hall sensor 신호 추정을 위한 각부 파형
Fig. 8 Each waveform for estimation of C phase Hall sensor signal

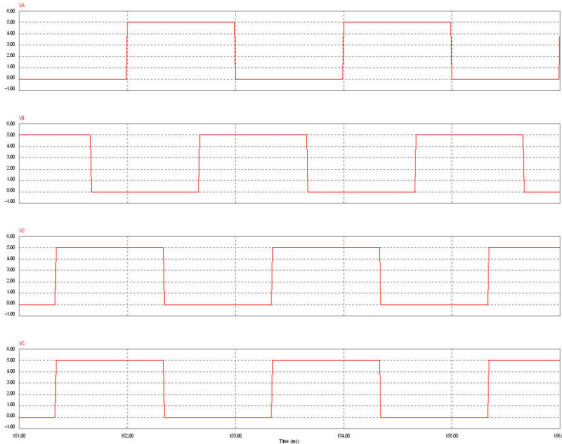


그림 9 A, B, C상 및 추정된 C상 Hall sensor신호
Fig. 9 A, B, C Phase and estimated C phase Hall sensor signal

확한 위치추정과 속도제어가 불가능해질 경우 Hall sensor 신호를 추정하기 위해 2.1에서 소개한 알고리즘을 적용했을 때의 결과파형이다. Hall sensor 신호중 정상동작중인 A상 신호를 이용하여 오동작 및 고장 난 C상 신호를 추정하기 위해 각 부분의

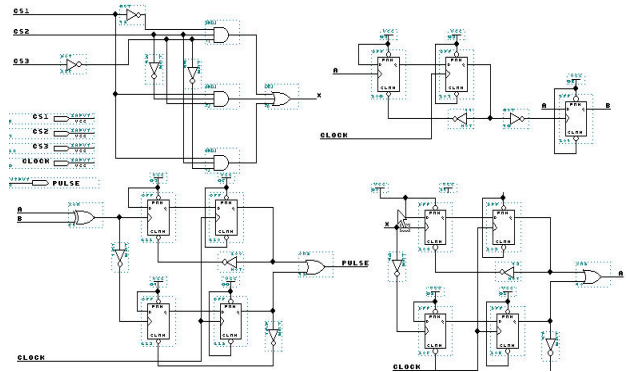


그림 10 6펄스 발생을 위한 EPLD 내부 회로

Fig. 10 EPLD circuit for 6 pulse generation

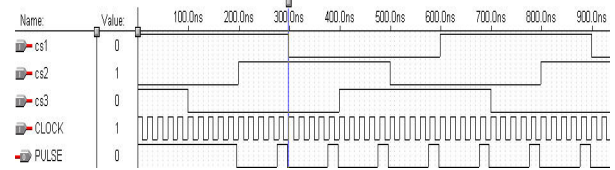


그림 11 6펄스 발생회로 시뮬레이션 결과

Fig. 11 Simulation result of 6 pulse generation circuit

결과 파형을 그림 8에서 확인할 수 있다.

정상동작중인 A상의 Hall sensor 신호는 ±5V로 증폭되어 추정회로의 입력으로 사용되어 회로의 출력된 신호는 삼각파로 영점과 비교되어 최종적으로 오동작 및 고장으로 정상 동작이 되지 않는 C상의 Hall sensor 신호에 해당하는 신호를 간접적으로 추정할 수 있고 그림 8에서 순차적으로 각부 결과 파형을 보여주고 있다.

또한 그림 9에서는 추정된 C상의 Hall sensor신호의 검증을 위해 실제 동작중인 Hall sensor와 비교를 한 결과파형으로 위에서부터 정상동작중인 A, B, C 상의 Hall sensor 신호와 추정된 C상의 Hall sensor신호를 보여주고 있다. 따라서 2.1절의 내용과 같이 Hall sensor신호 추정회로를 이용하여 C상의 신호가 고장일 경우 정상 출력되고 있는 A상의 Hall sensor를 이용하여 얻을 수 있다. 또한 2개의 Hall sensor가 고장일 경우 동일하게 추정된 Hall sensor C상의 신호를 입력신호로 하여 B상의 추정된 Hall sensor 출력신호를 얻으므로 BLDC 전동기를 정상적으로 구동할 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 10은 6펄스 발생을 위한 EPLD (Erasable programmable logic device) 내부회로로 회로구성은 D플립플롭과 기본적인 디지털 소자를 사용하여 설계할 수 있으며 BLDC 전동기 A, B, C 상의 Hall sensor 신호를 입력받고 CLOCK는 외부 오실레이터에 의해 입력이 되도록 설계 되었다. 그림 11은 EPLD를 이용하여 설계한 디지털 회로를 시뮬레이션 한 결과로 BLDC 전동기 각 상으로부터 입력받은 Hall sensor신호의 rising edge와 falling edge부분을 기준으로 1회전 구동시 정확히 6개의 펄스가 발생됨을 확인할 수 있다.

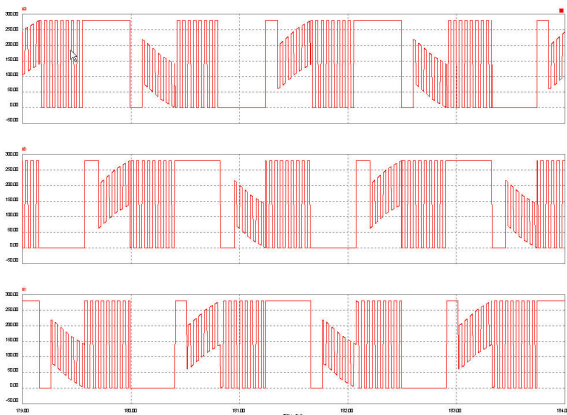


그림 12 A, B, C상의 단자전압
 Fig. 12 Terminal voltage of A, B, C phase

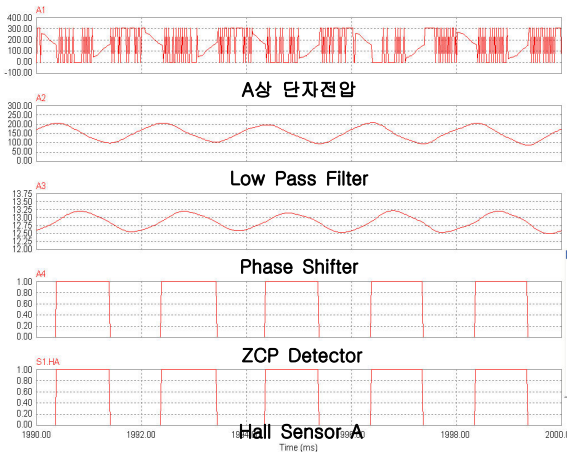


그림 13 한 상의 단자전압을 이용한 A상의 Hall-sensor 신호 검출
 Fig. 13 Hall sensor signal detection by terminal voltage of A phase

일반적으로 속도를 측정하기 위해서는 엔코더나 레졸버와 같은 속도 센서를 사용해야 하지만 위치 판별용 센서인 Hall sensor의 신호를 가지고 속도센서를 대신할 수 있다. Hall sensor는 120도의 위상차를 가지고 발생하며, 각상은 서로 60도씩 교차하게 되어있어 EPLD내에서 60도 마다 펄스가 발생 되도록 회로를 구현하여, 엔코더에서 발생되는 A상과 B상의 펄스와 같은 역할을 할 수 있도록 펄스를 발생시켜 저 분해능의 엔코더를 구성할 수 있다.

그림 12는 2.2절에서 제안한 BLDC 전동기의 Hall sensor 신호를 추정 및 회전자 위치판별을 하기 위하여 제안한 sensorless에 의한 Hall sensor신호 추정으로 A, B, C 각상의 단자전압을 나타내며 각 파형은 120도의 위상차를 가지고 있다.

그림 13, 14, 15는 한 상의 단자전압을 이용하여 한 상의 Hall-sensor 신호를 추정한 결과 파형이다. A(B, C)상의 단자 전압, Low pass 필터, Phase shifter 그리고 영점검출회로를 통과한 A(B, C)상의 Hall-sensor 신호를 추정한 파형을 각각 보여주

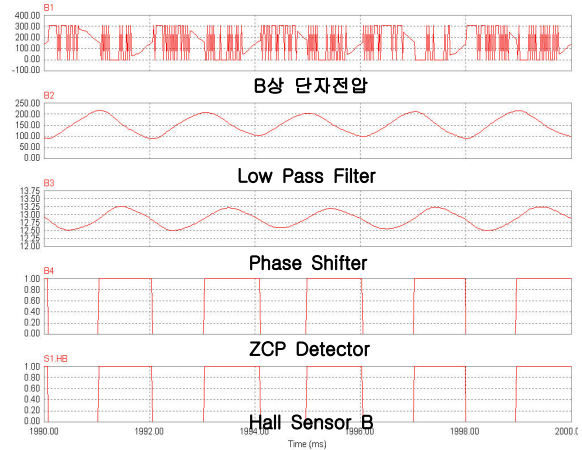


그림 14 한 상의 단자전압을 이용한 B상의 Hall sensor 신호 검출
 Fig. 14 Hall sensor signal detection by terminal voltage of B phase

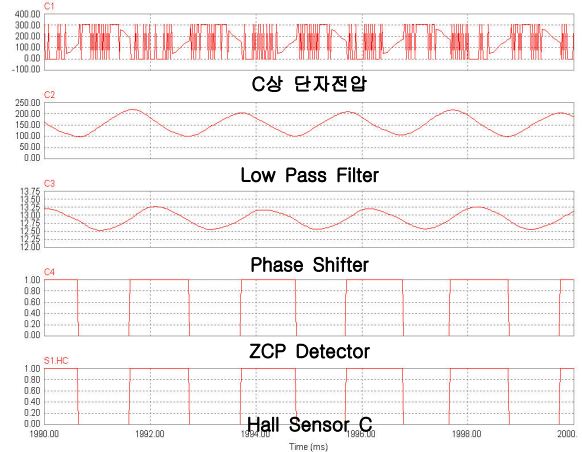


그림 15 한 상의 단자전압을 이용한 C상의 Hall-sensor 신호 검출
 Fig. 15 Hall sensor signal detection by terminal voltage of C phase

고 있다. 각각의 그림들은 순차적으로 A, B C상의 단자전압 파형과, PWM 스위칭에 의한 고주파 성분을 제거하기 위하여 저역통과 필터(low pass filter)를 거쳐 얻은 파형, 상지연필터(phase shifter)를 이용하여 30°도를 지연시켜 ZCP에서 검출된 신호들을 보여주고 있다. 최종적으로 ZCP에서 검출한 신호가 기존의 Hall sensor 신호와 비교하여 차이가 없음을 알 수 있다.

4. 결 론

BLDC 전동기 구동시 온도나 습도 등 작업환경에 제한을 받는 곳에서는 Hall sensor의 고장 및 오동작으로 인한 전동기의 운전 정지 및 회전자 위치 검출오차에 의한 제어의 어려움이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 문제점 등을 고려하여 본 논문에서는 BLDC 전동기의 회전자 위치 미 검출시 Hall Sensor 신호 추정 알고리

증을 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 연구 및 적용한 알고리즘에 의해 고장 및 오동작 발생 시 1개 또는 2개의 Hall sensor 신호를 추정 및 회전자의 위치를 판별할 수 있고 동시에 속도제어를 구성할 수 있다.

2) 위치 판별을 위해 사용된 전체 Hall sensor의 고장 및 오동작시 본 논문에서 연구 및 적용한 sensorless 제어 방법에 의해 기존 Hall sensor에 의해 구현된 성능과 동일한 성능을 얻을 수 있다.

따라서 본 논문에서 구현한 Hall sensor 추정 알고리즘은 제한된 환경, 오동작 및 고장에 대비하여 회전자 위치를 추정함으로써 전동기 및 전체 시스템의 보호측면에서 응용될 수 있다.

References

- [1] J. R. Hendershot and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motor, Oxford: Oxford Science, 1994.
- [2] D. C. Hanselman, Brushless Permanent-Magnet Motor Design, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [3] Shen-Li Chen and Hsiang-Pei Ou, "Implementation of a Driver Chip for the Three-Phase DC Brushless-Motor with Hall Sensors," Proceedings of the Sensors & Transducers, vol. 25, pp. 140-146, 2013.
- [4] Y. H Yoon, M. S. Woo, S. J. Lee, C. Y. Won, and Y. Y. Choe, "Speed Control System of slotless PM Brushless DC Motor Using 2Hall-ICs," Proceedings of the IEEE Industrial Electronics Society, vol. 2, pp. 1374-1379, 2004.
- [5] S. J. Lee, Y. H Yoon, M. S. Woo, C. Y. Won, and Y. Y. Choe, "Comparison of Characteristics Using two Hall-ICs and one Hall-IC for 3 phase Slotless PM Brushless DC Motor," Proceedings of the ICPE, pp. 680-684, 2004.
- [6] P. Damodharan, Krishna Vasudevan, "Sensorless Brushless DC Motor Drive Based on the Zero-Crossing Detection of Back Electromotive Force (EMF) From the Line Voltage Difference," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 25, pp. 661-668, March, 2010.
- [7] Gui-Jia Su, John W. McKeever, "Low-Cost Sensorless Control of Brushless DC Motors With Improved Speed Range," IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, pp. 296-302, 2004.
- [8] Li Zeng and Zicheng Li, "Control System of Sensorless Brushless DC Motor Based on TMS320F240," I. J. Information Technology and Computer Science, pp. 51-58, May 2011.
- [9] Jose Carlos Gamazo Real and Jaime Gomez Gil, "Sensorless Detection of Position and Speed in Brushless DC Motors using the Derivative of Terminal Phase Voltages Technique with a Simple and Versatile Motor Driver Implementation," J Electr Eng Technol. pp. 30-40, 10, 2015.
- [10] Tae-Won Chun, Quang-Vinh Tran, Hong-Hee Lee, Heung-Geun Kim, "Sensorless Control of BLDC Motor Drive for an Automotive Fuel Pump Using a Hysteresis Comparator," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 29, no. 3, pp. 1382-1391, 2013.

저 자 소 개



윤 용 호 (Yong-Ho Yoon)

2002년 성균관대 메카트로닉스공학과 졸업 (석사). 2007년 동 대학원 졸업(공학박). 2007년~2011년 삼성탈레스 종합연구소 메카트로닉스그룹 전력전자팀 전문연구원. 2011년~2015년 한국산업기술시험원 신재생사업센터 책임연구원. 2015년~현재 한화탈레스 종합연구소 메카트로닉스팀 전문연구원.

Tel : 031-8020-7577

Fax : 031-8020-7777

E-mail : dydghis@gmail.com