The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)
Vol. 21, No. 2, pp.143-149, Apr. 30, 2021. pISSN 2289-0238, eISSN 2289-0246

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.2.143
JIIBC 2021-2-21

Hall Effect Sensor를 이용한 위치센서 검출회로개발

Development of Position Sensor Detection Circuit using Hall Effect Sensor

정성인*

Sungin Jeong*

요 약 BLDC 전동기는, 영구자석의 고성능화를 비롯한 소재 기술 향상, 고집적•고기능화를 갖는 구동 IC 기술의 진보, 고점적율화 등의 조립 기술 개선 등으로 인하여 성능이 점점 좋아지고 있다. 이러한 구형파 구동 BLDC 전동기의 장점이 있으면서 보다 사용자의 요구에 대응하기 위해 구형파 구동 BLDC 영구자석 전동기 설계 및 개발, 위치검출방식 회로와 드라이버 개발에 관심이 증가하고 있다. 그러나 스위칭 손실에 의한 효율 저하 및 진동, 소음 등으로 인하여 가격적•기능적인 장점에도 불구하고 그 응용에 있어서는 다소 제한적인 실정이다. 따라서 본 논문에서는 정현파가 발생하는 Hall Effect Sensor를 사용하여 BLDC 전동기 회전자의 자속에 비례하여 정현파 신호를 만드는 위치검출 회로를 연구하여 전동기의 효율 증대, 리플 저감, 속도 및 토크 특성이 우수한 정현파 전류 구동을 구현하고자 한다.

Abstract BLDC motors are getting better performance due to the improvement of material technology including high performance of permanent magnets, advancement of driving IC technology with high integration and high functionality, and improvement of assembly technology such as high point ratio. While having the advantage of such a square wave driven BLDC motor, interest in the design and development of a square wave driven BLDC permanent magnet motor and development of a position detection circuit and driver is increasing in order to more meet the needs of users. However, in spite of the cost and functional advantages due to reduced efficiency, switching loss and vibration, noise, etc., the application is somewhat limited. Therefore, in this paper, we study a position detection circuit that generates a sinusoidal signal in proportion to the magnetic flux of a BLDC motor rotor using a Hall Effect Sensor that generates a sinusoidal wave to increase the efficiency of the motor, reduce ripple, and drive a sinusoidal current with excellent speed and torque characteristics.

Key Words : BLDC, Hall Effect Sensor, Square Wave Driv, Sinusoidal Wave Drive, Efficiency, Torque Ripple

*정회원, 광주대학교 미래자동차공학과
접수일자 2021년 2월 16일, 수정완료 2021년 3월 16일
게재확정일자 2021년 4월 9일

Received: 16 February, 2021 / Revised: 16 March, 2021 / Accepted: 9 April, 2021
*Corresponding Author: si.jeong@gwangju.ac.kr
Dept. of Automotive Engineering, Gwangju University, Gwangju, Korea

Ⅰ. 서 론

브러시(Brush)를 가진 직류전동기의 동작 원리를 가지고 브러시와 정류자로 인한 수명 및 신뢰성의 한계를 전자적인 스위칭으로 해결한 BLDC (Brushless DC) 전동기는, 영구자석의 고성능화를 비롯한 소재 기술 향상, 고집적•고기능화를 갖는 구동 IC 기술의 진보, 고정적율화 등의 조립 기술 개선 등으로 인하여 성능이 점점 좋아지고 있다. 따라서 현재는 자기에너지가 높은 희토류 등의 광범위한 사용에 따라, DC 전동기와 비교해 효율 및 유지 보수 성능이 탁월한 Brushless 전동기에도 적용되고 있다[1].

정상적인 부하 조건에서 안정적으로 사용되는 경우, DC 전동기처럼 정기적인 유지•보수가 필요하지도 않고, 속도 제어성이 탁월하므로 AC 전동기로 구현하기 어려운 응용 분야에 BLDC 전동기만의 독자적인 응용 분야가 많아지고 있다. 또한 위치제어에 대한 요구 없이 과도하게 선정되어 사용될 수밖에 없었던 AC 서보전동기 틈새 시장도 지속해서 개척되고 있다. 이러한 구형파 구동 BLDC 전동기(그림 1)의 장점이 있으면서 보다 사용자의 요구에 대응하기 위해 구형파 구동 BLDC 영구자석 전동기 설계 및 개발, 위치검출방식 회로와 드라이버 개발에 관심이 증가하고 있다. 그러나 스위칭 손실에 의한 효율 저하 및 진동, 소음 등으로 인하여 가격적•기능적인 장점에도 불구하고 그 응용에 있어서는 다소 제한적인 실정이다[2].

따라서 본 논문에서는 정현파가 발생하는 Hall Effect Sensor를 사용하여 BLDC 전동기 회전자의 자속에 비례하여 정현파 신호를 만드는 위치검출 회로를 연구하여 전동기의 효율 증대, 리플 저감, 속도 및 토크 특성이 우수한 그림 2와 같이 정현파 전류 구동을 구현하고자 한다.

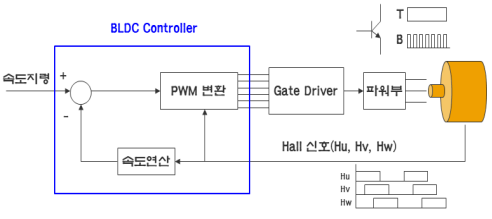


그림 1. 속도제어 알고리즘 (BLDC 구형파 구동)
Fig. 1. Speed control algorithm (BLDC square wave drive)

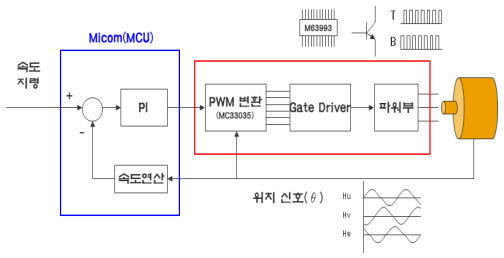


그림 2. 속도제어 알고리즘 (BLDC 정현파구동)
Fig. 2. Speed control algorithm (BLDC sine wave drive)

Ⅱ. 정현파 구동 BLDC의 효과 및 동향

1. 정현파 구동을 통한 기술적 효과

BLDC 전동기는 직류전동기의 정류자와 브러쉬 제거를 통해 견고성, 저소음, 무보수성, 긴 수명 등의 장점이 있다. 반면에 회전자 위치 판별용 센서가 필수적이며, 속도제어 시 엔코더, 레졸버 등이 필요하고 구형파 구동으로 인한 스위칭 손실의 효율 저하 등의 문제점을 가지고 있다. 따라서 기존 구형파 구동 방식에서 정현파 구동의 BLDC 전동기 제어 방법이 연구되고 있고 그림 3과 같이 효율 증대, 리플 저감, 회생 제동 등의 효과를 기대할 수 있다[3].

구형파 구동 BLDC 전동기 전류제어에서 구동 전류를 정현파로 인가함으로써 효율 증대를 통해 전동기의 효율을 5% 이상 향상시켜 (동일 크기, 동일 속도의 전동기 비교) 에너지절약 효과를 가지며 속도 리플, 토크 리플 등을 줄임으로써 전동기 응용 기기의 성능향상에 기여할 수 있다. 따라서 이와같은 특성 때문에 미국 및 유럽 등에서는 응용 분야를 매우 넓게 확장해 나가고 있으며, 제어 방법 및 권선의 배치 등에 대한 지적 재산권 출원이 증가하고 있다.

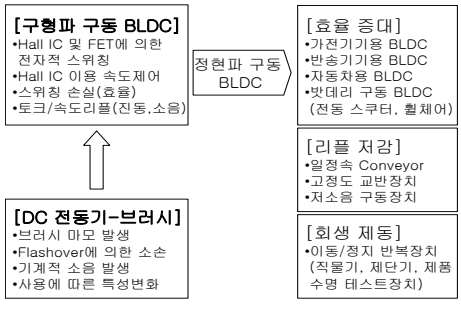


그림 3. 정현파 구동 BLDC 전동기의 효과
Fig. 3. Effect of sinusoidal driven BLDC motor

2. 정현파 구동을 통한 경제적 효과

기존의 구형파 구동 BLDC 전동기 시스템의 기본을 유지하므로 개발 및 양산 가능성이 크고, 새로운 개념의 회전기, 선형기 시스템이 완성되므로 기존의 시장 위에 특화된 틈새시장을 공략할 수 있는 효과가 있다. 또한 정부의 지속적인 에너지절감 대책에 부응하기 위하여 BLDC 전동기의 정현파 구동으로 고효율화가 필요하고, 고효율, 낮은 리플, 고성능 속도제어가 가능하여짐에 따라 시장 변화 및 수요가 늘어날 수 있다. 따라서 기술적인 측면뿐 아니라, 세계적인 기술경쟁력, 시장성 등의 측면에서도 경제적 효과를 기대할 수 있다.

3. 관련 기술의 국내·외 현황

BLDC 전동기의 정현파 구동 드라이버에 대하여는 아직 국내에서 연구하고 있지 않은 것으로 분석된다. 이는 기술적인 개발의 어려움뿐만 아니라, 이미 개발된 AC 서보전동기 사용에 대한 관성 및 개발 요구에 대한 차단 등의 요인이 크다. 그러나 실제로 이러한 정현파 구동 방식의 드라이버에 대한 개발은 효율증가로 인한 에너지절감 및 기술경쟁력, 가격경쟁력 등에서 확실한 우위를 점할 수 있어 필요하다.

일본 및 미국의 여러 개 회사가 경쟁하는 실정으로 수년 전부터 일본의 BLDC 회전형 전동기 관련 대형 제조사에서는 진동, 소음의 저감을 통한 성능 개선 및 에너지 효율 증대로 인한 경제성 제고라는 목적을 달성할 수 있는 정현파 구동 드라이버 개발에 박차를 가하는 것으로 알려져 있다.

III. 정현파 구동을 위한 위치검출 회로[4]

위치 센서로부터 발생한 신호가 정확히 드라이버로 피드백되어야만 정현파 구동 BLDC 시스템이 안정적으로 동작할 수 있게 된다. 따라서 본 논문에서는 BLDC 전동기 회전자 영구자석의 자속을 감지하여 이의 변화에 따라 정현파 신호를 발생하는 Hall Effect Sensor를 사용하여 위치검출 회로를 연구하는 데 있다.

이때, 발생하는 신호의 형태는 그림 4와 같이 Hall Effect sensor에 의해 정현파 신호를 발생하며 이 신호를 A/D 변환하여 드라이버 구동에 적합한 전기각 신호를 발생하여야 한다. A/D의 분해능에 의해 전기각의 분해능이 결정되므로 적절한 분해능을 결정해야 하고, Hall Effect Sensor는 자속밀도에 의해 신호의 형태가 좌우되므로 다소간의 자속밀도 편차와 관계없이 안정적인 신호를 드라이버에 피드백하는 회로가 구성되어야 한다. 또한 발생한 신호가 외부의 영향을 최대한 받지 않도록 하는 노이즈 관련 회로도 연구되어야 한다.

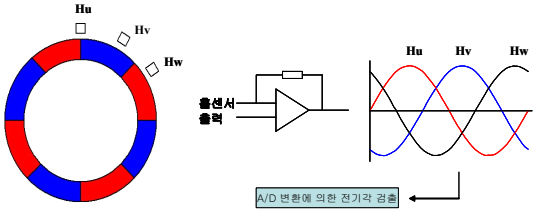


그림 4. Hall Effect sensor에 의한 위치 신호 발생
Fig. 4. Position signal generation by Hall Effect sensor

Hall Effect Sensor에서 나오는 신호는 위에서 언급한 것과 같이 자속밀도 편차나 착자기술에 따라서 변한다. 즉 그 값을 보상해주기 위한 기본 개념도를 그림 5에서 보여주고 있으며 6-bit 전류 모드 DAC, 비교기, 알고리즘을 수행할 수 있는 디지털 블록 등으로 구성할 수 있다. 전기적인 전단과 후단의 인터페이스는 3개의 채널을 사용해서 구성하고 각 채널은 차동 증폭기 (DDA)에 의해 얻어진 차동 입력값과 출력값을 사용한다.

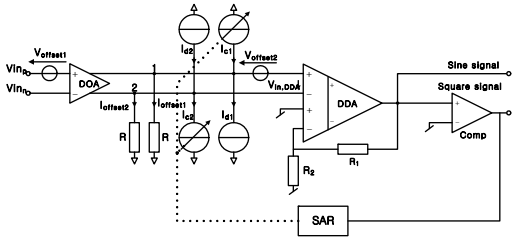


그림 5. 신호 보상을 위한 블록도
Fig. 5. Block diagram for signal compensation

위와 같은 신호 보상을 블록도에서 전기적인 입력단과 출력단이 센서에 의한 DC offset을 없애기 위한 알고리즘이 추가로 사용된다. 마지막으로 보상된 정현파 신호를 이용하여 최종적으로 전동기 구동 드라이버 단의 구형파를 제공해주고 DC offset을 없애기 위한 알고리즘을 구동할 수 있게 하는 추가 비교기가 필요로 한다.

그림 6은 3개의 Hall Effect Sensor와 아날로그 보상회로를 이용하여 발생하는 자속의 크기를 측정하는 검출회로를 보여주고 있다. Hall Effect Sensor의 출력신호는 Vector 합이 계산되는 아날로그 보상회로에 전달되

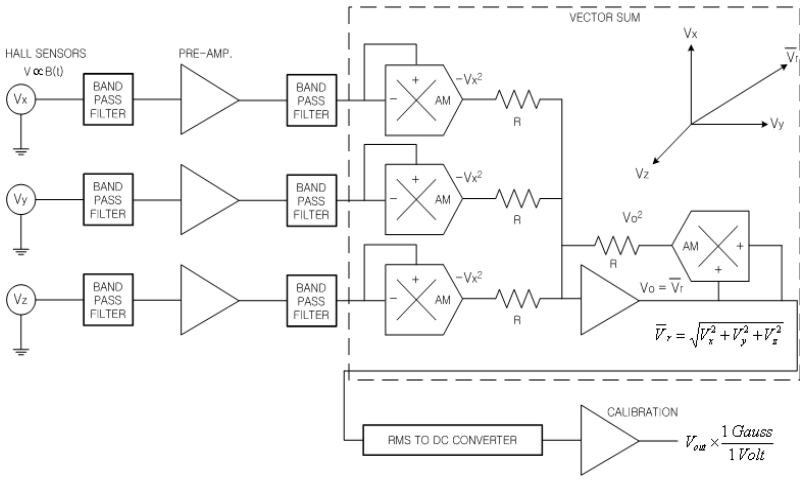


그림 6. 자속검출 회로
Fig. 6. Magnetic flux detection circuit

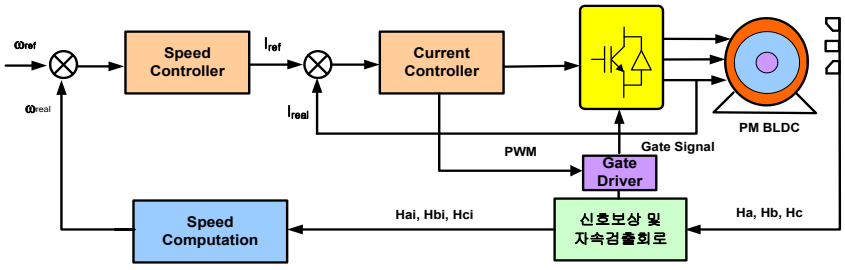


그림 7. 정현파 구동 BLDC 전동기의 구동 시스템 블록도
Fig. 7. Block diagram of driving system of sine wave driven BLDC motor

기 전에 연속적인 신호이다. 따라서 Hall Effect Sensor의 출력은 DC 성분과 지구의 자계로 인한 성분들이 포함되어 있으므로 이러한 저주파수의 성분들은 필터를 통해서 제거된다. 위에서 언급한 성분들이 제거된 각각의 신호들은 증폭이 되고 또다시 Bandpass Filter를 거치게 된다. 따라서 Bandpass Filter를 거친 신호들은 Vector Sum을 거쳐 최종적인 자속을 검출하게 된다. 검출되는 결과는 4개의 analog multiplier와 Op-Amp를 통해서 계산되는데 출력값에 관한 결과는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{V}_r = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \qquad (1)$$

식 (1)은 측정된 자속의 크기로 제곱근의 구조로 이루어져 있으므로 Op-Amp의 출력신호는 정류된 전파신호를 나타낸다.

IV. 정현파 구동 BLDC 전동기 시스템[5,6]

Hall Effect Sensor를 사용하여 BLDC 전동기 회전자의 자속에 비례하여 정현파 신호를 만드는 위치검출 회로 연구를 위해 그림 7과 같이 정현파 구동 BLDC 전동기의 구동 시스템 블록도를 구성하였다.

그림 8은 기존 구형파 구동 BLDC 전동기 전류제어기법에 따른 실험 결과로 Hall Effect Sensor를 통해 얻은 구형파 신호를 이용하여 전류제어 시 입력전류의 리플 성분으로 인하여 전체 시스템의 토크 리플 및 효율 저하를 예측할 수 있는 결과를 보여주고 있다.

동일한 결과로 그림 9~10에서도 구형파 구동 전류에 의한 토크리플, EMF 고조파에 의한 토크리플 성분을 각각 보여주고 있다. 따라서 기존 구형파 전류제어기법으로 구동하는 BLDC 전동기 전체 시스템에서는 전류 및 토크리플 발생으로 인한 효율감소와 소음, 진동 발생의 직접적인 원인을 가지고 있음을 알 수 있다.

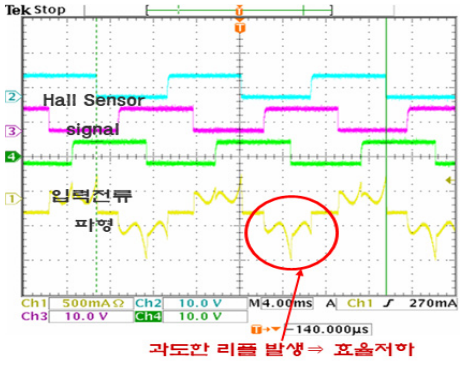


그림 8. 구형파 구동 BLDC 전동기 전류제어
Fig. 8. Square wave drive BLDC motor current control

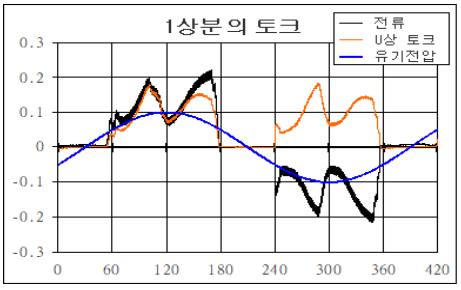


그림 9. 구형파 구동 전류에 의한 토크리플
Fig. 9. Torque ripple by square wave drive current

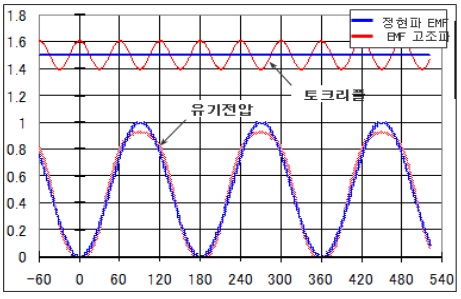


그림 10. EMF 고조파에 의한 토크리플
Fig. 10. Torque ripple due to EMF harmonics

$$H_a = B_{\max A} Sin\theta \qquad H_{aI} = B_{\max I} Sin\theta$$

$$H_b = B_{\max B} Sin(\theta - 120) \quad \Rightarrow \quad H_{bI} = B_{\max I} Sin(\theta - 120)$$

$$H_c = B_{\max C} Sin(\theta - 240) \qquad H_{cI} = B_{\max I} Sin(\theta - 240)$$

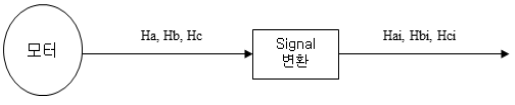
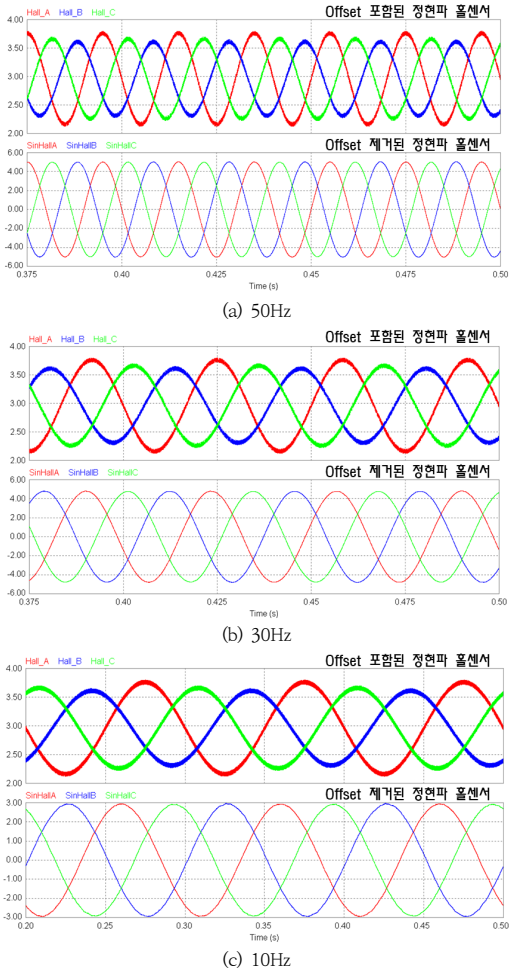


그림 11. Signal 변환
Fig. 11. Signal conversion

그림 8~10에서 언급한 기존 BLDC 전동기의 구형파 전류제어 구동 때 문제점을 해결하기 위하여 그림 7의 블록도를 이용하여 정현파 구동 전류제어기법에 관하여 연구를 하였다. Hall Effect Sensor를 이용하여 자속밀도에 비례하는 출력신호 검출시 DC 성분과 지구의 자계로 인한 노이즈 성분들이 포함되는 문제로 인하여 신호간의 편차가 생기므로 이것을 보상(signal 변환)해주기 위하여 그림 11과 같이 signal 변환을 해줘야 한다. BLDC 모터에서는 필드 마그넷 착자가 극마다 균일하게 되기 어렵고, 또 교번하고 있으므로 로터 회전에 대해서 토크 리플을 갖고 있다. 이것은 모터진동의 원인이 되고 특히 저속회전으로 사용하는 모터 등에서는 회전이 고르지 않게 되므로 착자는 반드시 균일하게 해야 한다.



(a) 50Hz

(b) 30Hz

(c) 10Hz

그림 12. Offset이 포함된 정현파 홀센서 신호처리
Fig. 12. Sine wave Hall sensor signal processing with offset

그림 12는 앞서 설명한 DC 성분과 지구의 자계로 인한 노이즈 성분, 착자로 인한 비균일성으로 발생하는 Hall Effect Sensor를 통해 검출된 정현파 신호의 offset신호를 제거하기 위해 제안된 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 전동기 회전속도에 따른 주파수를 고려하여 임의의 50, 30, 10Hz의 주파수에 따라 offset이 포함된 정현파 출력신호가 적용된 알고리즘을 통하여 크기가 동일한 3상 정현파를 출력으로 얻을 수 있다.

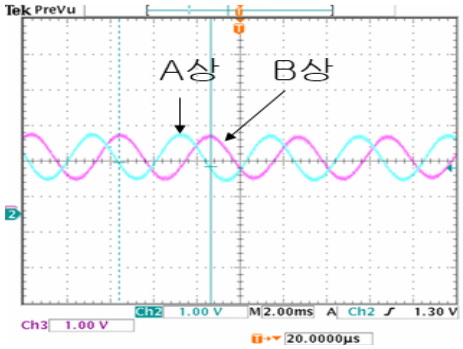


그림 13. Signal 변환 후 검출된 A, B상 회전자 전기각 신호
Fig. 13. A, B phase rotor electric angle signal detected after signal conversion

그림 13은 Hall Effect Sensor와 제안한 알고리즘을 BLDC 전동기에 적용 후 언급한 Signal 변환과정 후 다음과 같은 방법을 통해 A, B상 회전자 전기각 신호의 실험 결과를 보여주고 있다.

센서용 다극 자석의 표면 가우스

- 90° 위상차의 Hall Element 신호를 사용
- 200pulse/rev = (A/D변환) → 2,000pulse/rev
- 회전자 전기각 A상 검출
- sin(a)×cos(b)-cos(a)×sin(b)=sin(a-b)
- Sin(a-b)는 "0"이 되는 값을 찾는다.

따라서 Hall Effect Sensor를 통해 검출되는 DC 성분과 지구의 자계로 인한 노이즈 성분, 착자로 인한 비균일성으로 발생하는 문제점 등을 제거하여 크기가 동일한 정현파 신호를 시뮬레이션 결과와 동일하게 실험을 통해 얻은 결과를 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 정현파 구동방식을 이용하여 예상되는 연구 결과는 다음과 같다.

- BLDC 전동기의 정현파 구동에 의한 스위칭 손실 감소로 전동기 효율 증대
- 토크 리플, 속도 리플의 감소에 의한 진동, 소음 저감
- Hall Effect Sensor를 이용한 위치검출방식 개발
- BLDC 성능 개선에 의한 제품의 기술경쟁력 향상
- 국내 AC 서보 시장 및 BLDC 전동기 시장에의 기술 파급효과 증대
- 영구자석 전동기 시스템 관련 기반 기술 구축
- 정현파 구동 BLDC 회전/선형전동기 기본 구조 및 생산 프로세스 관련 산업재산권 획득 가능
- 구동 손실 저감으로 에너지 효율 개선

References

[1] T. Kenjo and S. Nagamori, Permanent Magnet and Brushless DC Motors, Tokyo: Sogo Electronics, 1984.

[2] D. C. Hanselman, Brushless Permanent-Magnet Motor Design, New York : McGraw-Hill, 1994.

[3] S.J. Mun, Y.H. Kim, D.D Lee, J.H. Lee, "A Study on the Brushless DC Motor Using a Sine Wave Driving System and a Position Sensor," Conf. KIEE. pp. 790-791, 2008.

[4] Maher Kayal, Frederic Burger, and Radivoje S. popovic, "Magnetic Angular Encoder Using an offset compensation Technique", IEEE Sensors journal, Vol.4. No.6, pp. 759-763, 2004.
DOI: https://doi.org/10.1109/JSEN.2004.836864

[5] Franvcis A. Phan, "A Hall-Effect Magnetic Field Detectior", IEEE Bio engineering conference, pp. 255-256, 1991.
DOI: https://doi.org/10.1109/NEBC.1991.154671

[6] Continuous-Time Ratonetric Linear Hall Effect Sensors (1301 and A1302), Allegro Microsystem, Inc.

저 자 소 개

정 성 인(정회원)

- 2015 : Technical University Braunschweig 전기정보물리공학과 (공학박사)
- 2018년 3월~현재: 광주대학교 미래자동차공학과 조교수
- 주관심분야 : 전기구동 퍼스널 이-모빌리티부품 및 시스템

※ 이 연구는 2021년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.