

영구자석형 동기전동기에서 자기식 위치 센서를 사용한 초기 회전자 위치 검출 성능의 개선

박문수, 윤덕용*
공주대학교 대학원 전기전자제어공학과

Improvement of Initial Rotor Position Detection for Permanent-Magnet Synchronous Motor Using Magnetic Position Sensor

Mun-Su Park, Duck-Yong Yoon*

Division of Electrical, Electronic and Control Engineering, Kongju National University Graduate School

요약 본 논문에서는 영구자석형 동기전동기의 벡터제어를 수행하는데 필요한 회전자의 위치, 특히 기동시의 초기 회전자 위치를 정확하게 검출하기 위하여 자기식 위치 센서를 사용하는 방법을 제안한다. 기존에는 홀센서의 출력 신호를 사용하여 초기 회전자의 위치를 판단하거나 이러한 센서를 사용하지 않는 센서리스 방식으로 제어를 수행하였으나 이 방법들은 위치 오차가 발생하고 정확도가 떨어지기 때문에 실용성 측면에서 만족스럽지 못하였다. 이와 같은 문제점을 해결하고자 본 논문에서는 자기식 위치 센서(magnetic position sensor)를 사용하여 초기 회전자의 위치를 검출하고자 한다. 이 방식을 사용하여 동기전동기의 초기 회전자 위치 검출이 부정확하여 벡터제어 시스템에서 전동기의 기동특성이 나빠지는 문제점을 해결하며, 소용량의 벡터제어 인버터를 저가격화하는 목적으로 자기식 위치 센서를 속도 및 위치 검출에 사용함으로써 자극 검출용의 홀센서와 회전속도 측정용의 로터리 엔코더를 하나로 통합하여 가격을 절반 이하로 낮추는 방안을 제안한다.

Abstract This paper proposes a method of using a magnetic position sensor to detect accurately the rotor position required to perform vector control of a permanent-magnet synchronous motor, particularly the initial rotor position at startup. In the existing vector control systems, the initial rotor position was determined using the output signals of the Hall sensors, or the control was performed in a sensorless method without using such a sensor. On the other hand, the accuracy is degraded due to the occurrence of a position detection error, and the practicality was not satisfactory. This paper attempts to detect the initial rotor position using a magnetic position sensor to solve this problem. This method is used to solve the deteriorating starting characteristics of the motor in the vector control system. In addition, to lower the price of a low-power vector control inverter, this paper proposes a method of integrating the existing sensors and reducing the price to less than half using a magnetic position sensor for speed and position detection.

Keywords : PMSM, Initial Rotor Position, Magnetic Position Sensor, Hall Sensor, Vector Control

*Corresponding Author : Duck-Yong Yoon(Kongju National University)

email: yoon3m@kongju.ac.kr

Received February 22, 2021

Accepted June 4, 2021

Revised March 24, 2021

Published June 30, 2021

1. 서론

현대의 기계 시스템에서 대표적인 동력원이나 제어 기구로 사용되는 전동기는 전기·전자기술의 발전과 함께 더욱 고성능화되고 있으며 사용량도 계속 증가하고 있다. 초기에는 대부분 제어 특성이 우수한 직류전동기가 사용되었으나 1990년대 이후에는 상대적으로 제어가 어려운 교류전동기도 널리 사용되고 있으며, 그중에서 특히 영구자석형 동기전동기(PMSM: Permanent-Magnet Synchronous Motor)는 고성능의 서보제어 분야에서 주로 사용되고 있다[1].

PMSM을 벡터제어하기 위해서는 전동기의 상전류를 3상 고정좌표계에서 2축 동기 회전좌표계로 변환하거나 반대로 역변환을 수행하는데, 이러한 연산에는 회전자의 위치 정보가 필요하다[2]. PMSM이 회전하는 동안에는 전동기에 내장되어 있는 홀센서(Hall sensor)의 U, V, W상 출력 신호를 기준으로 하여 회전자의 위치를 측정할 수 있지만, 전동기를 기동하기 전의 초기 상태에서는 회전자가 임의의 위치에 놓여 있게 되고 홀센서의 출력을 사용하더라도 회전자의 위치를 정확히 측정하는 것이 어렵다.

이 때문에 기존의 시스템에서는 120° 간격으로 설치된 3개의 홀센서 신호를 이용하여 초기 회전자 위치를 60° 구간으로 판단하거나 회전자의 위치를 수학적 연산으로 추정하는 센서리스 방식[3]이 제안되었고, 이를 개선하기 위한 많은 연구가 진행되었으나 정확도나 실용성 측면에서 만족스럽지 못하였다.

이러한 문제점을 해결하고자 본 논문에서는 자기식 위치 센서(magnetic position sensor)를 사용하여 초기 회전자의 위치를 정확하게 검출하고자 한다. 이 방식을 사용하여 PMSM의 초기 회전자 위치 검출 성능을 높이면 벡터제어 시스템에서 전동기의 기동특성이 나빠지는 문제점을 해결할 수 있다. 또한 자기식 위치 센서는 전동기의 회전속도를 측정하는 기능도 가지고 있어서 전동기 외부에 장착하여 사용하는 로터리 엔코더와 같은 속도 측정 센서를 대체할 수 있으므로 소용량의 벡터제어 인버터를 저가격화하는 데 매우 유용하다.

2. 회전자의 초기 위치 검출 성능 개선

PMSM의 벡터제어를 수행하려면 전동기의 상전류를 측정하고 이를 3상 고정좌표계에서 동기 회전좌표계로

변환하거나 그 반대의 역변환을 수행해야 하는데 이때 회전자의 위치 정보인 θ_r 이 필수적으로 요구된다.

PMSM이 회전하는 동안에는 로터리 엔코더의 U, V, W상 출력 신호를 기준으로 로터리 엔코더의 펄스를 계수하여 회전자의 위치를 검출할 수 있지만, 전동기가 기동하는 초기 상태에서는 회전자가 임의의 위치에 놓여있게 되고 아직 회전하기 전이므로 이 위치를 알아내는 것이 매우 어렵다.

2.1 기존의 초기 위치 검출 방식

PMSM에는 120° 간격으로 3개의 홀센서를 내장하고 있는데 이들 홀센서로부터 U, V, W상 신호를 출력받아 초기 회전자의 위치를 추정하는 방식을 널리 사용하였다 [4]. 이 홀센서의 U, V, W상 신호를 측정하면 현재의 회전자 위치를 60° 구간으로 판별할 수 있으므로 여기에 추가적으로 해당 구간 내에서 정확한 회전자 위치를 알아내는 방법이 필요하다.

예를 들어 Fig. 1에서 초기 회전자 (1)의 구간에 위치하여 U, V, W로 신호가 출력되면 회전자는 Z상 신호로부터 0° ~ 60°의 범위에 위치하는 것을 알 수 있다. 그러나 이를 벡터제어에서 회전자의 위치 정보로 사용하는 것은 정·역회전시에 서로 달라서 정방향으로 기동하는 경우에는 이 구간이 180° ~ 240°가 되고, 역방향으로 기동하는 경우에는 0° ~ 60°가 된다. 1주기인 360°를 6개로 나눈 각 60° 구간에 대하여 이러한 관계를 정리하면 Table 1과 같다.

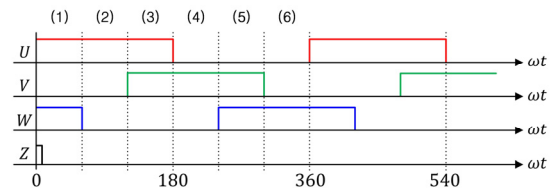


Fig. 1. Detection of initial rotor position at starting using Hall sensor signals(electrical angle)

Table 1. Detection of initial rotor position at forward/reverse starting using Hall sensor signals

Section	Forward Starting		Reverse Starting	
	Range	$\hat{\theta}_r$	Range	$\hat{\theta}_r$
(1)	180° ~ 240°	210°	0° ~ 60°	30°
(2)	240° ~ 300°	270°	60° ~ 120°	90°
(3)	300° ~ 360°	330°	120° ~ 180°	150°
(4)	360° ~ 420°	390°	180° ~ 240°	210°
(5)	420° ~ 480°	450°	240° ~ 300°	270°
(6)	480° ~ 540°	510°	300° ~ 360°	330°

이처럼 홀센서의 U, V, W상 신호로부터 초기 회전자 위치는 60°의 구간으로만 알 수 있는데, 벡터제어를 위해서는 더 정확한 회전각을 알아야 하므로 각 구간에서 확률적으로 오차가 가장 작은 중간값을 초기 회전자 위치각 $\hat{\theta}_r$ 로 추정하여 사용한다.

그러나, 이와 같이 홀센서를 이용하여 회전자의 위치를 60° 구간의 중간값으로 추정하는 방식은 실제 회전자 위치와 추정된 위치 사이에 최대 ±30°까지의 오차가 발생할 수 있으므로 정확도가 떨어지고, 이 때문에 PMSM의 벡터제어 시스템에서 전동기의 기동특성이 나빠지는 문제점이 있다.

홀센서가 없는 PMSM에서는 센서리스 방식으로 회전각을 추정하여 벡터제어를 수행하는데, 여기서는 하드웨어가 간단해지는 장점이 있지만 회전각이 전동기의 각종 상수에 대한 의존성이 크고, 저속에서 위치 검출 성능의 정확도가 떨어지며, 이를 위한 회전각 추정 알고리즘이 복잡해지는 단점이 있다.

2.2 자기식 위치 센서를 사용한 검출 방식

앞에서 설명한 바와 같이 PMSM에서 기존에 사용하던 초기 회전자 위치 검출 방법은 모두 만족스럽지 못하기 때문에 이를 개선하기 위해 본 논문에서는 자기식 위치 센서를 사용하여 초기 회전자 위치는 물론이고 로터리 엔코더를 대체하여 전동기의 회전속도를 측정하는 방안을 제안한다.

본 논문에서 제안하는 자기식 위치 센서는 ams사의 AS5047U를 사용하였다[5]. 이 소자는 Fig. 2와 같이 내부에 배열된 4개의 홀센서가 90°의 위상차를 갖는 사인파(sine-wave)와 코사인파(cosine-wave)를 발생하고, 이를 사용하여 레졸버처럼 회전각을 계산하는 원리로 동작하며, 부수적으로 회전속도 측정을 위한 로터리 엔코더 펄스도 출력한다.

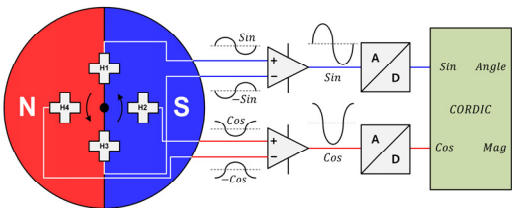


Fig. 2. Operation of internal Hall sensors in AS5047U

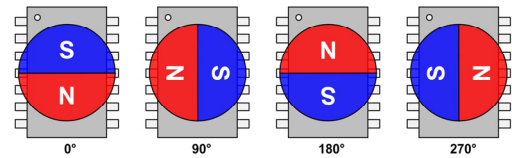


Fig. 3. Rotor angle detection according to the position of cylindrical permanent magnet

이 센서의 위쪽에는 180° 간격으로 N극과 S극을 갖는 원통형 영구자석이 Fig. 3과 같이 On-axis 방식으로 위치하여 회전각을 검출하게 된다. 원통형 자석의 회전 중심과 센서의 중심을 일치하게 배치하는 이 방식은 자극이 회전함에 따라 자계의 세기 및 극성이 변화하는 것을 실시간으로 감지하기 때문에 항상 현재의 회전각을 알 수 있다는 특징을 가진다.

본 논문에서 사용한 자기식 위치 센서인 ams사의 AS5047U의 주요 특징을 PMSM에 내장된 홀센서 및 로터리 엔코더와 비교하면 Table 2와 같다.

Table 2. Comparison of AS5047U and PMSM built-in sensor

	AS5047U	PMSM Sensor
Output Signal	UVW, ABZ, PWM	UVW, ABZ
Resolution	25 ~ 4.096[ppr]	2.500[ppr]
Maximum Speed	28,000[rpm]	6,000[rpm]
Position Detection	O	X
Function Setting	SPI Interface	X
Supply Voltage	3.3[V] or 5[V]	5[V]
Temperature Range	-40 ~ +150[°C]	-10 ~ +85[°C]
Unit Price	₩15,000	₩50,000

AS5047U 소자를 사용하는 방식은 PMSM에 내장된 홀센서 및 광학식 로터리 엔코더보다 훨씬 저렴한 가격으로 구현할 수 있으며, 사용자가 원하는 크기와 모양으로 자신의 응용 시스템에 적합하도록 직접 설계·제작하여 사용할 수 있다는 장점도 가진다.

전동기의 초기 회전자 위치를 SPI 직렬통신으로 읽을 경우 회전각을 14비트의 디지털 데이터로 표현하게 되는데, 이는 전동기의 1회전을 16384 단계로 표시하므로 회전자 위치를 ±0.09°의 분해능으로 측정할 수 있고 PMSM의 벡터제어 시스템에서 좌표변환시에 매우 높은 정밀도를 가지게 된다.

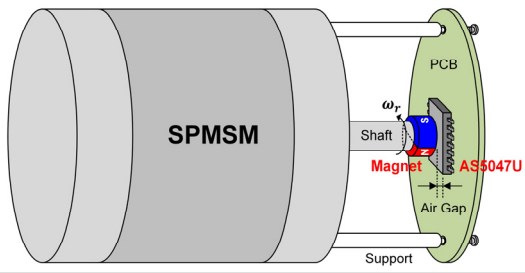


Fig. 4. Structure of magnetic encoder using AS5047U

본 논문에서는 Fig. 4와 같이 PMSM의 회전축에 수직으로 원통형 자석을 부착하고 이 축의 중심에 자기식 위치 센서를 위치시켜서 회전자 위치를 검출할 수 있도록 자기식 위치 검출 장치를 구성하였다.

3. 실험 및 결과

3.1 자기식 위치 센서의 특성 실험

제안한 자기식 위치 센서의 특성 실험은 제2장에서 설명한 기존의 위치 검출 방식과 위치 검출 성능을 비교하는 실험 및 원통형 영구자석과 자기식 위치 센서의 거리에 따른 동작 특성을 확인하기 위한 실험의 2가지로 나누어 진행하였다.

3.1.1 회전자의 초기 위치 검출 성능

영구자석형 동기전동기가 기동할 때 회전자의 초기 위치를 검출하는 성능 실험은 본 논문에서 제안한 자기식 위치 센서를 사용하여 검출하는 방식과 기존의 60° 구간에서 중간값으로 추정하는 방식을 비교하는 실험을 진행하였는데, 회전자의 실제 초기 위치가 추정한 중간값보다 뒤져있는 상태에서 기동하는 Fig. 5의 경우와 실제 초기 위치가 추정값보다 앞서있는 상태에서 기동하는 Fig. 6의 2가지로 나누어 진행하였다. 이들 실험 파형에서 모두 위쪽 그래프는 본 논문에서 제안한 자기식 위치 센서를 사용하여 정확하게 검출하였을 때의 회전자 위치 θ_r 을 나타내고, 아래쪽 그래프는 전동기에 내장된 홀센서를 사용하여 60° 구간의 중간값으로 추정하였을 때의 회전자 위치인 $\hat{\theta}_r$ 을 나타낸다.

Fig. 5에서는 60° 구간의 중간값으로 추정하여 시작한 초기 $\hat{\theta}_r$ 이 30°보다 더 많이 회전해야만 그다음에 있는 60° 구간과의 경계선을 만나서 회전자 위치를 보정하게 되므로 측정된 회전각은 이처럼 보정되는 순간 수직

으로 감소하는 파형을 보인다. 반면에, Fig. 6에서는 초기 $\hat{\theta}_r$ 이 30°만큼 회전하기 전에 그다음에 있는 60° 구간과의 경계선을 만나서 회전자 위치를 보정하게 되므로 측정된 회전각은 이처럼 보정되는 순간 수직으로 증가하는 파형을 보인다.

이와 같이 PMSM에 내장된 3개의 홀센서를 사용하여 60° 구간의 중간값으로 추정하는 방식은 초기의 60° 구간에서 상당히 큰 회전각의 검출 오차를 갖는데 비하여 본 논문에서 제안한 자기식 위치 센서를 사용하는 방식은 처음 기동할 때부터 회전자의 위치를 정확하게 측정하는 것을 확인할 수 있다.

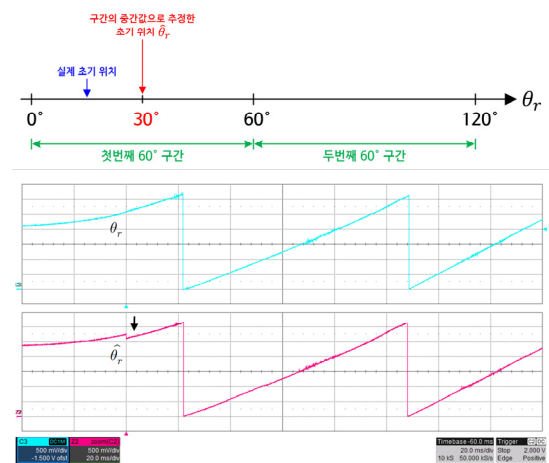


Fig. 5. Experimental results when the actual initial position of the rotor is behind the estimated position

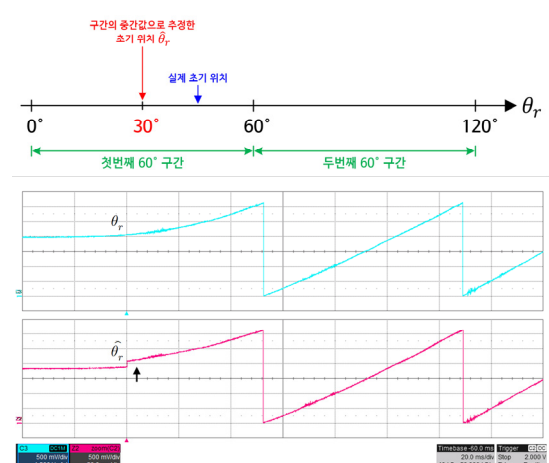


Fig. 6. Experimental results when the actual initial position of the rotor is ahead of the estimated position

3.1.2 자석의 거리에 다른 위치 검출 성능

이번에는 전자회로 기판에 조립된 자기식 위치 센서와 전동기의 회전축에 부착된 원통형 영구자석의 위치에 따른 검출 성능을 확인하는 실험을 수행하였다. 이를 통해 사용자가 직접 자기식 위치 센서를 사용하여 초기 회전자 위치 및 회전속도를 측정할 때 설치 위치의 정밀도에 따른 성능을 확인할 수 있다. 이 실험은 Fig. 7과 같이 영구자석이 센서의 중심축으로부터 벗어나는 경우와, 이들 사이의 거리가 멀어지는 경우의 2가지로 진행하였다.

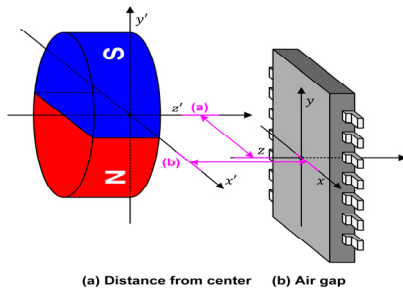


Fig. 7. Horizontal and vertical distances between magnet and sensor

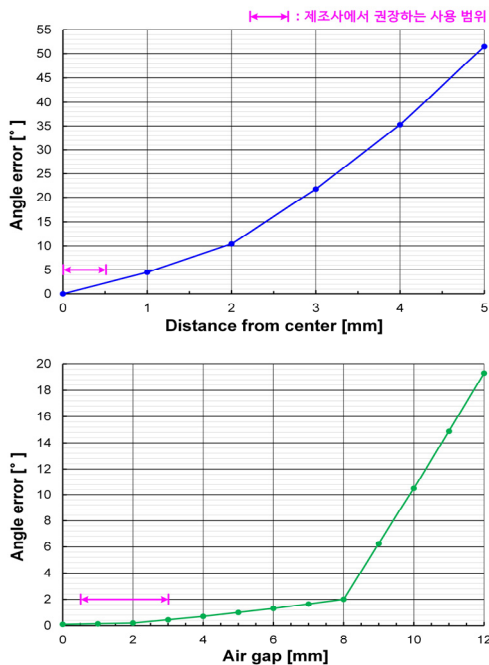


Fig. 8. Angle error according to distance between magnet and sensor

Fig. 8의 위쪽 그래프는 영구자석의 중심과 센서의 중

심 사이에 수평적 거리(a)에 대한 실험 결과로서 원점에서 거리가 1mm씩 멀어질 때 회전자의 위치값을 측정하여 그 오차를 그래프로 보였다. 아래쪽 그래프는 영구자석과 센서의 수직적 거리(b)에 대한 실험 결과로서 거리가 1mm씩 멀어질 때 검출되는 회전자 위치값의 오차를 나타내었다.

여기서 위쪽의 그래프를 보면 영구자석이 센서의 중심으로부터 벗어날수록 오차가 점차 증가하는데, 반도체 센서의 폭이 4mm 정도로 매우 작은 것을 고려하면 그것의 1/4인 1mm 정도까지 위치가 어긋나더라도 오차가 5° 이하로서 실용적으로 우수한 검출 성능을 나타냈다.

또한 아래쪽의 그래프를 보면 영구자석과 센서의 거리가 8mm 정도까지 떨어져도 오차가 2° 이하로 매우 작아서 우수한 검출 성능을 보였다.

이상으로부터 영구자석과 센서의 위치가 제조사에서 권장하는 사용 범위의 약 2배 정도까지 벗어나더라도 자기식 위치 센서는 실용적으로 우수한 위치 검출 성능을 나타내는 것을 알 수 있다.

3.2 벡터제어의 속도응답 특성 실험

속도응답 특성 실험은 기존의 PMSM 내장 센서를 사용하는 위치 검출 방식과 본 논문에서 제안한 자기식 위치 센서를 사용하는 방식의 2가지 경우에 각각 벡터제어 실험장치에서 전동기를 운전하면서 전동기의 속도응답 특성을 측정하도록 수행하였다.

Fig. 9는 PMSM 내장 센서를 사용한 경우의 속도응답 파형이며, Fig. 10은 자기식 위치 센서를 사용한 경우의 실험 파형이다. 각 실험에서 부하는 1/2부하로 일정하며, 전동기를 +1800rpm으로 스텝 기동하고, 400ms 후에 이를 -1800rpm으로 역회전시키며, 다시 400ms 후에 정지시켰다.

이들 실험 파형에서 전동기의 실제속도 ω_r 이 기준속도 ω_r^* 에 빠르게 추종하여 우수한 속도제어 특성을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 전동기는 가속 구간에서 기준속도에 도달하기 위해 양의 방향으로 큰 q축 전류 i_{qs} 가 흘러서 큰 정방향 토크를 발생하고, 회전 방향을 역전하는 구간에서 음의 방향으로 큰 q축 전류가 흘러서 큰 역방향 토크를 발생하게 된다.

이러한 속도응답 특성 실험에서 PMSM 내장 홀센서 및 로터리 엔코더를 사용한 경우나 자기식 위치 센서를 사용한 경우에 거의 유사한 제어 성능을 나타내며, 기존 PMSM의 엔코더를 사용하는 것만큼 자기식 위치 센서가

회전각을 정확하게 검출하므로 벡터제어가 원활하게 수행되는 것을 알 수 있다.

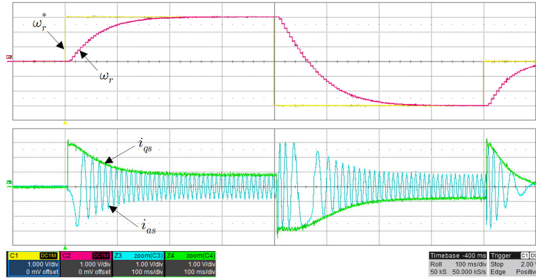


Fig. 9. Speed response characteristics in case of using the PMSM built-in sensor

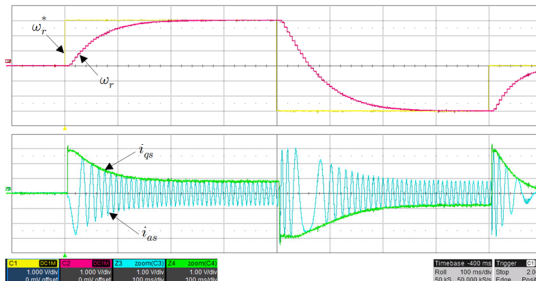


Fig. 10. Speed response characteristics in case of using magnetic position sensor

4. 결론

본 논문에서는 PMSM을 벡터제어하는데 필요한 회전자의 초기 위치를 정확하게 검출하기 위하여 자기식 위치 센서인 ams사의 AS5047U 소자를 사용하는 방법을 제안하였고, 제안된 방식이 기존의 초기 회전자 위치를 검출하는 방식들의 단점을 보완하여 더 우수한 성능을 보이는 것을 실험으로 확인하였다.

이 실험은 3가지로 나누어 수행하였는데, 첫째로 기존의 PMSM 내장 센서를 사용하는 방식과 제안된 방식의 초기 회전자 위치 검출 성능을 측정하여 비교하였고, 둘째로 제안된 방식에서 원통형 영구자석과 마그네틱 센서의 위치에 따른 검출 오차를 측정하여 그래프로 보였으며, 마지막으로 벡터제어 속도응답 특성 실험을 통해 제안된 방식이 PMSM의 벡터제어에 만족스럽게 적용되는 것을 확인하였다.

이처럼 본 논문에서 제안하는 자기식 위치 센서를 사용한 회전자의 위치 및 속도 검출 방식은 기존의 PMSM

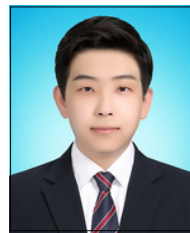
내장 센서를 사용하는 경우에 비해 높은 성능을 보이며, 사용자가 자신의 응용 시스템에 적합하도록 이를 직접 설계-제작하여 사용할 수 있고, 가격도 기존의 방식에 비하여 훨씬 저렴하다는 장점이 있다.

References

- [1] A. Boglietti, A. Cavagnino, L. Ferraris, M. Lazzari, "Energy-efficient motors", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 2, no. 4, pp. 32-37, Dec. 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MIE.2008.930360>
- [2] T. Lifang, "Study of the SVPWM Converter Based on TMS320F24X", *IEEE ISDEA*, pp. 1316-1319, Jan. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISDEA.2012.311>
- [3] S. Nakashima, Y. Inagaki and I. Miki, "Sensorless initial rotor position estimation of surface permanent-magnet synchronous motor", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 6, pp. 1598-1603, Nov./Dec. 2000. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IEMDC.1999.769165>
- [4] H. Mehta, U. Thakar, V. Joshi, K. Rathod and P. Kurulkar, "Hall sensor fault detection and fault tolerant control of PMSM drive system", *IEEE ICIC*, pp. 624-629, May. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IIC.2015.7150817>
- [5] ams AG, AS5047U Datasheet, Oct. 2018.

박 문 수(Mun-Su Park)

[준회원]



- 2019년 2월 : 강릉원주대학교 기계자동차공학부 정밀기계공학전공 졸업 (공학사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 대학원 전기전자제어공학과 (석사 과정)
- 2021년 3월 ~ 현재 : ㈜디에스시 기술연구소 근무

<관심분야>

유도전동기 및 동기전동기 서보제어, 마이크로프로세서

윤 덕 용(Duck-Yong Yoon)

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 전기공학과 졸업 (공학사)
- 1983년 2월 : 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사)
- 1995년 2월 : 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사)
- 1985년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 전기전자제어공학부 교수

〈관심분야〉

유도전동기 및 동기전동기 서보제어 시스템 설계