

# 영구자석형 동기전동기의 회전자 위치 추정 Estimation of Rotor Positions in a Permanent-Magnet Synchronous Motor

노명규<sup>†</sup> · 김대연<sup>‡</sup> · 김명곤\* · 박영우\*  
M. Noh, D. Kim, M. Kim and Y.-W. Park

**Key Words :** Position sensing(위치측정), Permanent-magnet synchronous motor(영구자석형 동기전동기)

## ABSTRACT

Permanent-magnet (PM) synchronous motors consist of PM rotors and ferromagnetic stators. When the rotor displaces from the center position, the air-gap magnetic field distorts, which result in unbalanced magnetic pull (UMP). In order to control the UMP and thereby reduce the vibration of a PM motor, it is necessary to measure the radial position of the rotor. In this paper, we propose a sensing method that utilizes linear Hall devices which replace the discrete Hall switches used for commutation. The results show the feasibility of the proposed sensing method.

## 기 호 설 명

- $\mu_0$  : 공기의 투자율 (permeability)
- $M_1$  : 자석의 세기 (magnetization)
- $(r, \theta)$  : 극좌표
- $R_m$  : 회전자 영구자석의 안쪽 반지름
- $R_r$  : 회전자 반지름
- $R_s$  : 고정자 반지름
- $\varepsilon$  : 편심의 크기
- $\phi$  : 편심의 위상각
- $\omega$  : 전동기의 회전속도

salient) 전동기라 하더라도 회전자와 고정자 공극이 회전 방향으로 일정하지 않게 되며, 영구자석과 고정자 간에 불평형 자기력(unbalanced magnetic pull)이 발생한다. 이러한 불평형 자기력을 줄이거나 혹은 제어를 통해 제거하기 위해 회전자의 반경방향 위치 측정이 필요하다.

회전자의 진동 측정을 위해 많이 사용되는 와전류형 변위 센서는 자기장에 민감하게 반응하므로 영구자석 회전자의 위치를 측정하는데 부적절하다. 와전류형 변위 센서를 사용하려면 영구자석의 자기장이 영향을 미치지 않는 부분에 설치하여야 하며 이는 회전자의 길이를 길게 하는 요인이 된다.

## 1. 서 론

영구자석형 동기전동기 혹은 브러쉬리스 전동기의 회전자는 영구자석을 포함하고 있으며, 고정자는 대부분 강자성체로 이루어져 있다. 회전자의 회전 중심이 고정자의 중심과 일치하지 않는 편심이 발생하거나, 회전자의 진동이 있는 경우, 비돌극형(non-

영구자석형 동기전동기에는 회전자의 각도 측정을 통해 고정자 코일을 제어하기 위해 센서가 장착되어 있다. 이러한 목적으로 흔히 사용되는 홀센서는 자기장의 방향에 따라 on/off 신호를 발생하는 센서이다. 만일 자기장의 세기에 따라 연속적 신호를 발생하는 선형 홀센서를 이용하면 commutation 신호와 함께 회전자의 반경방향 위치 측정 센서로 사용할 수 있다.

선형 홀센서를 이용하여 회전자의 위치를 측정하기 위해 회전자의 움직임에 따른 공극 자기장의 변화를 파악하여야 한다. 본 연구에서는 회전자의 반

<sup>†</sup> 교신저자; 충남대학교 메카트로닉스공학과  
E-mail : mnoh@cnu.ac.kr  
Tel : 042-821-6877, Fax : 042-823-4919  
<sup>‡</sup> 발표자; 충남대학교 메카트로닉스공학과  
\* 충남대학교 메카트로닉스공학과

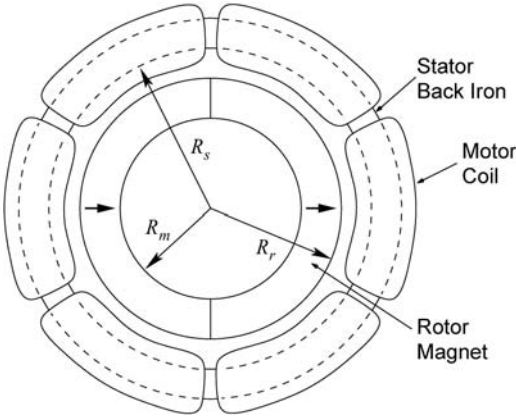


Fig. 1 Non-salient permanent-magnet synchronous motor

경방향 변위에 따른 공극 자기장의 변화를 모델링하고 이를 선형홀센서로 감지하고자 한다.

## 2. 공극 자기장 모델링

Fig. 1 은 본 논문에서 고려한 비돌극형 영구자석 동기전동기이며, 회전자의 변위가 없는 경우, 즉, 회전자의 회전 중심이 고정자의 기하 중심과 일치할 때, 공극의 자기장 분포는 포텐셜 이론에 의해 다음과 같이 해석적으로 구할 수 있다.<sup>(1)</sup>

$$B_r^{(0)}(r, \theta) = \beta_0 \left( 1 + \frac{R_s^2}{r^2} \right) \cos \theta \quad (1)$$

여기서  $\beta_0$  는 다음과 같이 정의된다.

$$\beta_0 = \frac{\mu_0 M_1}{2(R_s^2 - R_r^2)} \left[ \frac{R_m^2 - R_r^2}{2} + R_r^2 \ln \left( \frac{R_m}{R_r} \right) \right] \quad (2)$$

회전자의 횡방향 변위가 있는 경우, perturbation 방법을 사용하면 편심 자기장을 구할 수 있다.<sup>(2)</sup> Fig. 1 과 같은 2극 전동기에 대한 편심 자기장은

$$B_r = B_r^{(0)} + \varepsilon B_r^{(1)}(\theta, \omega t, \phi) \quad (3)$$

의 형태로 표현되는데, 편심에 따른 자기장의 변화  $B_r^{(1)}$  은 전동기의 회전속도와 편심의 위상각에 따라 결정되며, 편심량  $\varepsilon$  에 비례한다.

편심을 달리 표현하면 회전자의 변위이므로 4 개의 선형 홀센서를 90도 간격으로 고정자의 안쪽 면에 배치하면, 홀센서가 감지하는 자속밀도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} B_1 &= B_r^{(0)}(R_s, 0) + \varepsilon B_r^{(1)}(0, \omega t, \phi) \\ B_2 &= B_r^{(0)}\left(R_s, \frac{\pi}{2}\right) + \varepsilon B_r^{(1)}\left(\frac{\pi}{2}, \omega t, \phi\right) \\ B_3 &= B_r^{(0)}(R_s, \pi) + \varepsilon B_r^{(1)}(\pi, \omega t, \phi) \\ B_4 &= B_r^{(0)}\left(R_s, \frac{3\pi}{2}\right) + \varepsilon B_r^{(1)}\left(\frac{3\pi}{2}, \omega t, \phi\right) \end{aligned} \quad (4)$$

## 3. 편심 자기장 감지 회로

식 (4)와 같이 주어지는 자속밀도를 감지하기 위해 선형 홀센서(OECO FH301-020)를 이용하여 회로를 제작하였다. Fig. 2 는 측정회로의 개략도로서 홀센서를 구동하기 위한 전류원(current source), 홀센서의 출력을 증폭하기 위한 정밀증폭기로 구성되어 있다. 증폭기는 센서 출력의 기준 전압을 조정하고, 감도를 조절할 수 있는 기능이 포함되어 있다. Fig. 3 은 측정회로의 회로도이며, Fig. 4 는 제작된

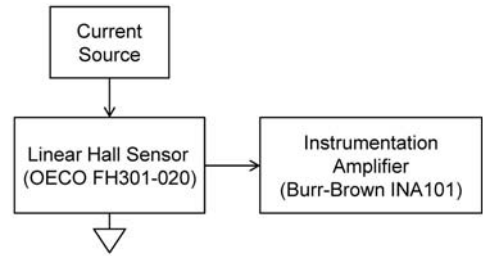


Fig. 2 Block diagram of sensing circuit

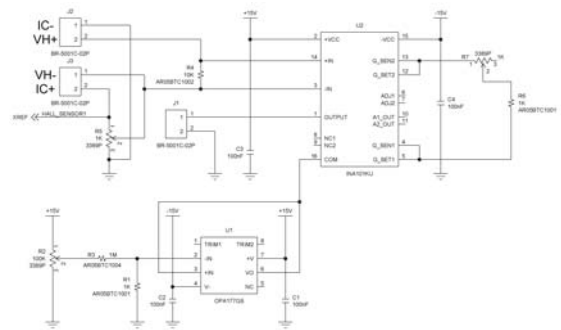


Fig. 3 Sensing circuit diagram

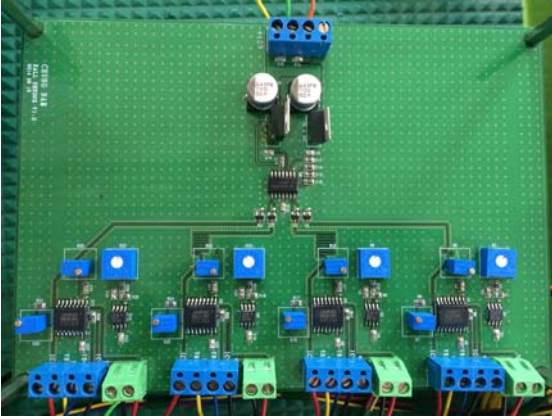


Fig. 4 Picture of the sensing circuit

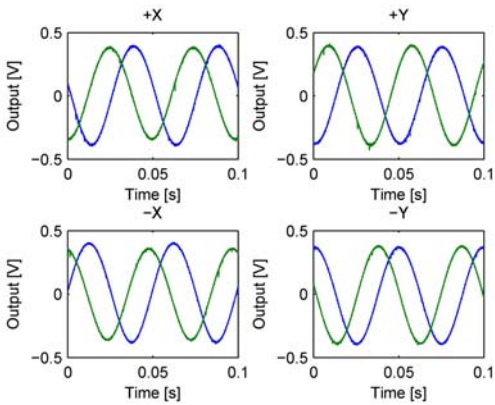


Fig. 5 Test results

측정회로의 사진을 보여준다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 5에는 센서 회로로부터 얻은 신호가 나와 있다. 회전자의 반경 평면을 정의하는 좌표축이  $X$ - $Y$ 일 때, 회전자의 회전 중심이 고정자의 기하 중심과 일치 하는 경우,  $+X$ ,  $+Y$ ,  $-X$ ,  $-Y$  방향의 센서 출력을 측정하고, 회전자를  $+X$  방향으로 5 mm 이동한 후, 센서 출력을 측정하였다. 자기장 모델에서 예측하는 바와 같이  $+Y$ ,  $-Y$  방향의 센서 출력은 회전자 이동에 크게 영향을 받지 않는다 (Fig 5의 오른쪽 위 아래 그래프). 그에 비해  $-X$  방향의 출력은 예상대로 크기가 줄어들었다. 그러나,  $+X$  방향의 출력은 큰 변화가 없음을 관찰할 수 있다. 이는 센서의 작동이 포화 영역에서 이루어지고 있음을 유추할 수 있다. 따라서, 센서 민감도의 조정이 필요하다.

### 3. 결 론

본 연구를 통해 선형 홀센서를 이용한 영구자석형 동기전동기의 회전자 위치 추정 가능성을 확인하였다. 보다 정밀한 측정을 위해 센서의 민감도를 증가시켜야 하며, 차동 측정, 위상 추적 등의 방법 적용이 필요하다.

### 후 기

본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업 (NRF-2013R1A1A2010084)에 의해 지원되었음.

### 참 고 문 헌

- (1) Lee, H., Yoo, S. and Noh, M., 2009, Stiffness Modeling of Toroidally-Wound BLDC Machines, J. Korean Soc. Prec. Eng., Vol. 26, pp. 40-46.
- (2) Kim, U. and Lieu, D. K., 1998, Magnetic Field Calculation in Permanent Magnet Motors with Rotor Eccentricity: Without Slotting Effect, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 4, pp. 2243-2252.