저 분해능 홀센서를 이용한 영구자석 동기 전동기의 속도 및 위치 추정기법

안형진, 이동명
홍익대학교 전자전기공학부 전력전자연구실(HIPEL)

Speed and Position Estimation Method for PMSM with Low-Resolution Hall-Effect Sensors

H. J. Ahn , D. M. Lee
School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University

ABSTRACT

This paper proposes a new speed and position estimation method for PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) using low resolution hall effect sensors. In general, there are a variety of sensors to estimate rotor position for PMSM such as resolvers, and encoders. Position detection using hall effect sensors that detect the flux of the rotor for rotor position is excellent method in terms of cost and space, but has low resolution. To overcome this problem, this paper proposes a new speed and position estimation observer. The performance of the observer has been verified by simulations carried out using Matlab/Simulink.

1. 서 론

적절한 PMSM의 벡터제어를 위해서는, 정확한 회전자의 위치를 아는 것이 필수적이다. 이를 위해 엔코더, 레졸버 등과 같은 다양한 고 분해능의 위치 센서들이 존재하지만, 이러한 센서들은 값이 비싸고, 공간적 측면에서의 단점이 있다. 비용과 공간적 단점을 해결하기 위해, 저 분해능을 갖고 있지만 홀 센서를 사용하는 방식이 종종 사용된다.

본 논문에서는, 홀 센서의 낮은 분해능을 보상하기 위해 속도 및 위치 추정 옵저버를 제안한다. 이를 위해 폐루프 속도 옵저버를 기반으로 하였고, 옵저버의 입력 레퍼런스 신호로써 보간된 각도를 이용하여 옵저버 출력신호의 Bump특성을 줄이며, 오차 신호의 Sin함수 처리로 크기를 단위크기로 제한하여 사용한다.[1] Matlab/Simulink 모의 실험을 통해 알고리즘의 타당성을 보인다.

2. Speed and Position Estimation Observer

2.1 Two Hall-Effect Sensors Signal

본 연구에서는 홀 센서 2개를 사용한다. 전기적으로 한 회전당 홀 신호는 4번이며, 전기적으로 90° 간격이다. 그림 1은 3상 2극 전동기에 홀 센서를 적용한 예시이다. A상의 역기전력에 Hall A 신호의 위상을 일치시키고, 90° 뒤진 각도에 Hall B 신호가 나타나도록 위치시킨다. 이를 이용하여 영구자석 전동기의 회전자 위치를 감지한다.

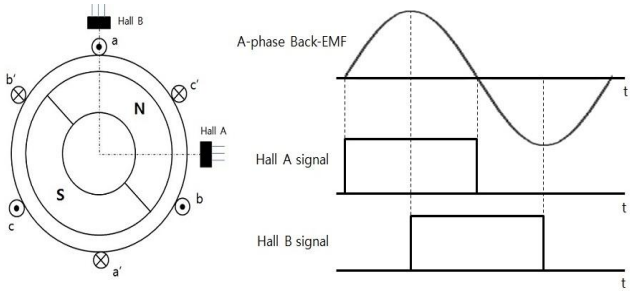

그림 1 홀 센서 신호 및 3상 2극 전동기에서의 적용예시.
Fig. 1 A signal of hall-effect sensors and the example appling for 3-phase 2-pole PMSM.

2.2 Closed Loop Speed Observer

저 분해능 위치 센서에 폐루프 옵저버를 구성하는 것은 속도 및 위치 추정에 좋은 방법이 될 수 있다.[1][2] PMSM의 기계적 동적 방정식은 다음과 같다.

$$T_e = J\frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L \tag{1}$$

여기서, T_e는 전자기 토크, J는 전동기의 관성, ω_m은 기계적 회전자 각 속도, B는 마찰계수, T_L은 부하토크이다. 식 (1)에서, 관성 J는 오프라인으로 추정되며, 마찰계수 B는 무시할 수 있으며, 다른 변수에 비하여 부하토크 T_L값은 매우 느리게 변하므로, 그 변화율을 무시 할 수 있다. 또한, 쌍극수 P를 이용하여 기계적 회전자 각속도 ω_m을 전기적 각속도 ω_e로 바꾸고, 위에 언급한 가정들을 적용한 전기적 변수로 나타낸 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix}\dot{\theta}\\ \dot{\omega}_e\\ \dot{T}_L\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & -\frac{P}{J}\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\theta\\ \omega_e\\ T_L\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ \frac{P}{J}\\ 0\end{bmatrix} T_e = AX + BU \tag{2}$$

출력값으로 측정 가능한 상태변수는 위치 변수이므로, 출력 행렬식은 다음과 같다.

$$Y = [1\ 0\ 0]\begin{bmatrix}\theta\\ \omega_e\\ T_L\end{bmatrix} = CX \tag{3}$$

식 (2)과 (3)의 상태 방정식으로 부터 폐루프 속도 옵저버를 구성하면 다음과 같다.

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + BU + K(Y - C\hat{X}) \tag{4}$$

여기서, K은 옵저버 게인이다. 옵저버 특성방정식의 근을 설

정함으로써, 게인 K값을 설정 할 수 있다. 옵저버의 특성방정식 및 옵저버 특성방정식의 근을 β 삼중근으로 했을 때 K값은 다음과 같다. 극의 위치 즉 β는 좌반 평면에 위치시키도록 한다.

$$s^3 + k_1 s^2 + k_2 s - \frac{P}{J} k_3 = 0 \tag{5}$$

$$k_1 = -3\beta, k_2 = 3\beta^2, k_3 = \frac{J}{P}\beta^3, \tag{6}$$

2.3 Proposed Speed and Position Observer

옵저버의 입력 신호인 홀 센서 신호는, 불연속적이기 때문에 옵저버의 출력 또한 Bump 특성을 나타낼 것이다. 홀센서 신호의 불연속성을 없애기 위해, Harmonics decoupling 및 Low pass 필터 사용 기법 등이 있지만, 본 논문에서는 추정 속도 값을 통하여 보간된 위치를 입력신호로 사용하는 방법[1]을 기본으로 하여 [1]에서의 복잡한 계산 방식을 개선 적용하였다.

$$\theta_{in} = \theta_{hall} + \hat{\omega_e} \Delta T \tag{7}$$

여기서, θ_{in}은 옵저버 입력 신호, θ_{hall}은 홀 센서 신호, $\hat{\omega_e}$는 추정된 속도, ΔT는 홀센서 신호가 트리거된 이후부터 시간차이를 나타낸다.

그림 2는 본 논문에서 제안하는 속도 및 위치추정 옵저버를 나타낸다. 옵저버의 입력과 피드백의 차이인 오차값을 Sin함수 처리함으로써, 크기를 단위크기로 제한하였다. 오차값이 충분히 작다면, 동작점에서 다음과 같이 선형화 될 것이다.

$$\theta_{in} - \hat{\theta} \approx sin(\theta_{in} - \hat{\theta}) \tag{8}$$

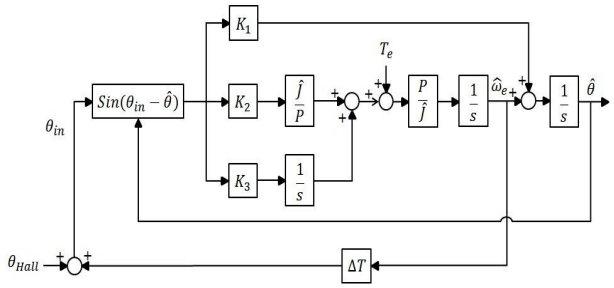

그림 2 제안하는 속도 및 위치 추정 옵저버.
Fig. 2 The proposed speed and position estimation observer.

3. 모의 실험결과 및 결론

본 시뮬레이션에 사용된 PMSM의 모델은 3상 48극 전동기이며, 옵저버 특성방정식의 삼중근 β는 30으로 설정하였고, 이러한 조건을 바탕으로 그림 3은 300 rpm에서 시뮬레이션 한 결과이다. 그림 4는 0에서 800 rpm까지의 시뮬레이션 결과이며, 넓은 속도 범위에서 추정이 가능함을 보여준다.

본 논문은 값 비싸며 공간적 단점을 갖고 있는 고 분해능 센서를 대체하고자, 저 분해능 홀 센서를 이용한 새로운 속도 및 위치 추정 옵저버 방식을 제안하였다. 제안된 옵저버는 보간된 위치값을 입력으로 사용하여 홀 신호의 Bump 특성을 없애기 위한 복잡한 수학계산 혹은 필터회로 사용을 피함으로써 기존의 형태보다 더 단순화 되었다. 또한 오차값을 Sin함수로 처리하면서 단위크기로 제한하였고, 이로 인해 좀 더 매끄러운 추정 파형을 볼 수 있었다. 제안된 옵저버의 장점은 옵저버의 게인값을 변경하지 않고도, 넓은 속도 범위에서 추정이 가능함을 알 수 있다.

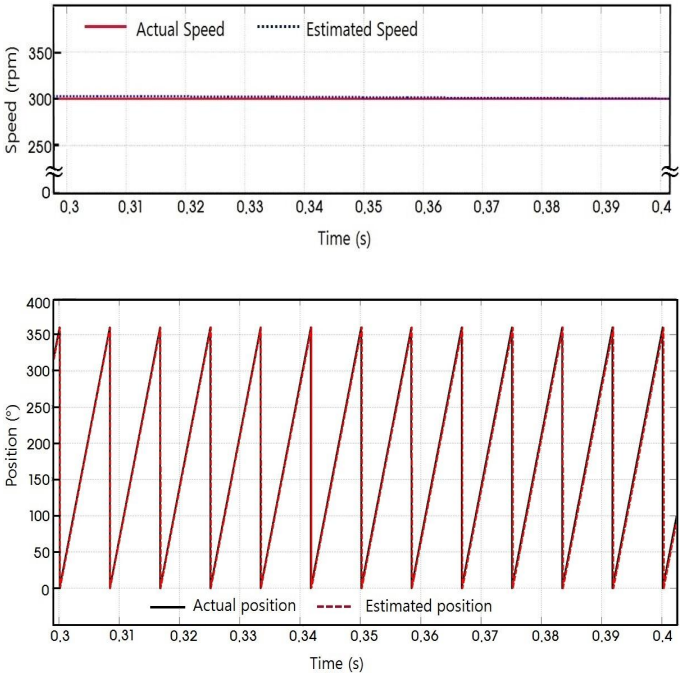

그림 3 300 rpm 에서의 속도 및 위치 추정 시뮬레이션 결과.
Fig. 3 Simulation result: speed and position estimation at 300 rpm.

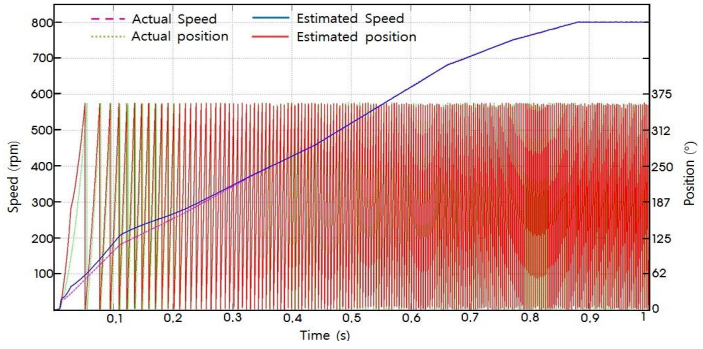

그림 4 0 ~ 800 rpm 까지의 속도 및 위치 추정 시뮬레이션 결과.
Fig. 4 Simulation result: speed and position estimation from 0 to 800 rpm.

참 고 문 헌

[1] Z.M. Dalala, Y.H. Cho, and J.S. Lai, "Enhanced vector tracking observer for rotor position estimation for PMSM drives with low resolution Hall Effect position sensors," *IEMDC*, pp. 484 491, 2013.

[2] A. Yoo, S.K. Sul, D.C. Lee, and C.S. Jun, "Novel speed and rotor position estimation strategy using a dual observer for low resolution position sensors," *IEEE Trans. on Power Elect.*, vol. 24, no. 12, pp. 2897 2906, Dec. 2009.