

3상 표면부착형 영구자석 동기전동기 센서리스 속도제어

손명수, 문재은, 홍연주, 정용재, 조영훈
 건국대학교 전력전자연구소

Sensorless Control for Three Phase Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System

Myeongso Son, Jaeun Moon, Yeonjoo Hong, Yongjae Jeong, Younghoon Cho
 Konkuk Univ. KOPEL

ABSTRACT

본 논문에서는 표면부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM)를 위한 센서리스 제어방법을 실험을 통해 검증하고자 한다. 동기전동기의 벡터제어를 위하여 엔코더나 레졸버를 이용하면 비용이 증가할 뿐만 아니라 유지 보수가 필요하기 때문에 동기전동기의 센서리스 모터제어 기법이 요구되고 있다. 또한, 동기전동기의 센서리스 모터 제어를 위해서는 정확한 회전자 위치와 속도가 필요하므로 본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 수학적 모델을 통하여 위치와 속도를 추정한다. 회전 중 발생하는 역기전력을 통해 추정 위치 오차를 얻으며, 추정 오차가 0이 되도록 추정기를 구성하여 이를 실험을 통해 검증하였다.

1. 서론

영구자석형 동기전동기(PMSM)는 높은 효율과 높은 속응성의 특성을 가지며 다양한 산업 전반에 사용되고 있다. PMSM의 정밀한 전류제어와 높은 효율을 위해서는 회전자 위치 정보가 필수적이며, 회전자 위치를 알 수 있는 엔코더 등의 위치 센서는 드라이브 시스템의 비용 증가 및 안전성 저하의 원인이 된다. 따라서 센서를 사용하지 않는 센서리스 모터제어에 관한 다양한 연구가 진행되었다.

이렇게 진행된 연구 중에는 전기적 모델링에서 역기전력 성분을 확장시킨 EEMF(Extended EMF)를 기반으로 한 센서리스 제어기법이 존재하는데, 이 제어기법은 회전자 위치의 역기전력 성분에서 포함된 회전자 오차각을 이용하여 PI 제어기를 통해 오차각이 0이 되도록 제어하여 회전자 위치를 추정한다. 본 논문에서는 추정 값을 통해 속도제어가 정상적으로 이루어지는지 확인하고자 한다.

2. 본론

2.1 동기전동기 센서리스의 모델링

SPMSM의 동기 회전자표계에서 d q축 전압방정식은 식 (1)과 같다 [1].

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega\psi_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

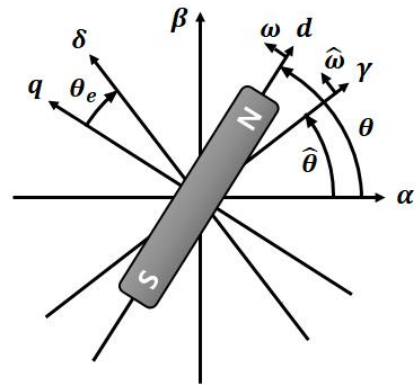


그림 1 PMSM의 회전자 및 공간벡터 다이어그램
 Figure 1 Rotor and Space-vector diagram of PMSM

이 때, EEMF(Extended EMF)를 고려하는 경우, EEMF는 아래와 같이 표현되며,

$$E_{ex} = \omega[(L_d - L_q)i_d + \psi_a] - (L_d - L_q)(\pi_q) \quad (2)$$

표면부착형 영구자석 동기전동기는 d축과 q축의 인덕턴스 값이 동일하므로 식 (2)의 우변에서 $\omega\psi_a$ 만 남게 된다. 이를 식 (1)에 대입하면 d q축 전압방정식은 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E_{ex} \end{bmatrix} \quad (3)$$

관측기에서 각을 추정하는 경우, 발생하는 오차각(θ_e)을 기준으로 한 γ δ 축 전압 방정식은 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} \quad (4)$$

이 때, 오차각에 의하여 식(4) 우변의 두 번째 항이 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} = E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin\theta_e \\ \cos\theta_e \end{bmatrix} + (\hat{\omega} - \omega)L_d \begin{bmatrix} -i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} \quad (5)$$

실제로 실제속도(ω)와 추정속도($\hat{\omega}$)의 오차는 거의 0에 가깝기 때문에 두 번째 항은 무시할 수 있으므로 아래와 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_\gamma \\ \hat{e}_\delta \end{bmatrix} = E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin\theta_e \\ \cos\theta_e \end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서 추정 오차각($\hat{\theta}_e$)는 아래와 같이 계산 할 수 있다.

$$\hat{\theta}_e = \tan^{-1}\left(-\frac{\hat{e}_\gamma}{\hat{e}_\delta}\right) \quad (7)$$

2.2 동기전동기 센서리스 제어 알고리즘

본 논문의 제어 시스템에서 역기전력을 추정하는 관측기는 그림 2와 같으며 이를 통해 추정 EEMF(\hat{e}_d, \hat{e}_q)를 계산한다. 관측기의 이득 값으로 g_r, g_δ 는 600으로 선정하였으며, 이는 1차 저역통과 필터의 대역폭이다 [2].

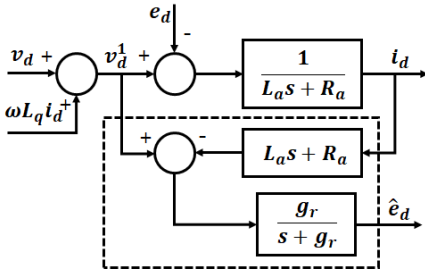


그림 2 관측기 블록 다이어그램
Figure 2 Observer block diagram

추정 오차각($\hat{\theta}_e$)은 식 (7)에 의하여 관측기에서 나온 역기전력 성분으로 구하며, 추정 오차각을 그림 3의 제어기의 오차 성분으로 입력하여 최종적으로 오차각(θ_e)을 0으로 하여 현재 각($\hat{\theta}$)과 각속도($\hat{\omega}_0$)를 추정한다.

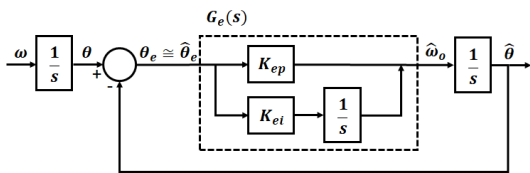


그림 3 오차각의 PI 제어기 구성
Figure 3 Angle error PI controller

그림 3의 전달함수는 식 (8)과 동일하며, $G_e(s)$ 는 PI제어기로서 이득이 $K_{ep} = 2\zeta_n \omega_n, K_{ei} = \omega_n^2$ 일 때 그림 3의 전달함수는 2차 저역 통과 필터의 형식을 지닌다. 본 논문에서는 400 RPM의 속도제어 시, $\omega_n = 50, \zeta_n = 0.5$ 으로 선정하였다.

$$\hat{\theta} = \frac{K_{ep}s + K_{ei}}{s^2 + K_{ep}s + K_{ei}} \theta \quad (8)$$

2.3 동기전동기 센서리스 제어 실험

표 1 SPMSM의 파라미터 값 및 극수

Table 1 Parameter values and pole number of SPMSM

R_s	5.5
L_d	20.5 m
L_q	20.5 m
λ_f	76.95 m
P	48

실험에 사용된 영구자석 동기전동기의 세부적인 사양은 위와 같다. 본 논문에서는 관측기 및 벡터제어의 작동 여부를 확인하기 위하여 엔코더를 통해 얻은 각도 및 각속도를 추정기로 전환하는 속도 제어를 시행하였다.

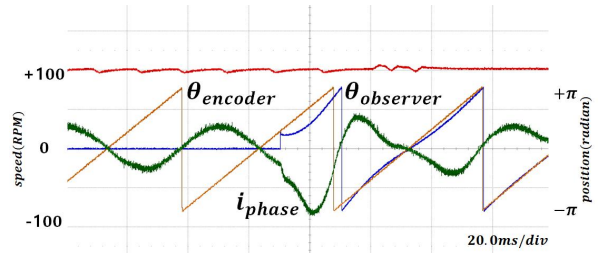


그림 4 센서리스 모드로 절환 시 모터의 실제 각과 추정각
Figure 4 The actual Angle and Estimated Angle

위 그림 4에서 속도 제어가 이루어지는 상황에서 엔코더에서 관측기로 전환 시 관측기의 각이 실제 모터의 각으로 빠르게 추정됨을 알 수 있다.

3. 결 론

EEMF(Extended EMF)를 이용한 추정기를 사용하여 모터 제어를 할 경우, 센서에 의한 각과 추정기에 의한 각이 동일하게 나옴을 알 수 있으며 이를 이용한 속도제어가 원활하게 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 모터의 초기 속도가 낮을 때 역기전력이 작아 추정이 제대로 되지 않으므로 동기모드로 모터를 드라이브를 해야 한다. 동기모드는 상대적으로 효율이 떨어지므로 기동 및 저속 구동 시에도 각속도를 추정 할 수 있는 부가적인 방법이 필요하다.

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 산업연계 교육활성화 선도대학(PRIME) 사업에서 지원을 받아 수행된 연구임

참 고 문 헌

- [1] Shigeo Morimoto, Keisuke Kawamoto, Yoji Takeda, "Sensorless Control Strategy for Salient Pole PMSM Based on Extended EMF in Rotating Reference Frame", IEEE transactions on industry applications, vol. 38, no. 4, July/August, 2002
- [2] S. H. Kim, 'DC, AC, BLDC Motor Control', Bogdoo Publishing Company, pp. 288 291, pp. 363 386, 2014
- [3] S. K. Sul, 'Electric Machinery Control', Hongleung Science Publishing company, pp. 209 216, pp. 470, 2012