

구형과 2-Hall Sensor를 사용한 영구자석형 동기전동기의 센서리스 제어시의 위치오차 보정

김경민*, 이정효*, 공태웅*, 황춘환*, 이원철*, 원충연*, 김영렬**
 성균관대학교*, 안양대학교**

Sensorless Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor with Compensation of the Position Error Using Rectangular 2 Hall Sensors

Kyung-Min Kim*, Jung-Hyo Lee*, Tae-Woong Kong*, Chun-Hwan Hwang*, Woncheol Lee*,
 Chung-Yuen Won*, Young Real Kim**
 Sungkyunkwan University*, Anyang University**

ABSTRACT

Generally, because of the cost and the restricted manufacture standard, the motor control for home appliance have been used the method using hall sensors or the sensorless method. In the conventional sensorless method using home appliance, the resistor and the back-EMF coefficient are varied by the motor speed and the load torque. Therefore, these variations cause the position error when the sensorless control is operated. This paper proposes the compensation method for sensorless position error using 2-hall sensor pulse signals.

1. 서론

에너지 비용증가에 따라 현재 가전기기는 에너지 절약을 통한 고효율을 목표로 발전하고 있다. 특히, 에어컨 및 세탁기용 전동기는 영구자석을 회전자로 사용하여 단위체적당 토크밀도가 높은 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)의 사용이 확대되고 있다. PMSM 제어에 있어서 회전자의 위치정보 추정은 매우 중요한 일이다. 이러한 위치정보를 추정할 센서는 사용할 수 있는 환경이 지극히 제한되어 있기 때문에 센서리스 제어방법을 통해 이를 극복하고자 하는 연구가 다각도로 진행되고 있다.

일반적으로 가전기에서 사용되고 있는 PMSM의 제어 기술은 홀센서를 이용하여 회전자의 위치를 추정하는 방법이 사용되고 있다. 하지만 저가의 홀센서를 이용한 구형과 제어 방법은 상전환시 발생하는 맥동토크로 인하여 출력 효율이 떨어지는 단점이 있다. 이를 보완하기 위한 센서리스 제어 방법은 속도와 부하의 변화에 따라 고정자 저항이나 역기전력 상수가 변함으로 인해 센서리스 제어시 위치 오차가 발생하는 단점이 있다.[1]

본 논문에서는 2개의 구형과 홀센서를 통해 알 수 있는 정확한 회전자의 위치정보를 이용하여 센서리스 제어시 발생하는 위치오차를 보완하는 방법을 제안하였다.

2. 본론

2.1. 전류 모델 기반의 센서리스 제어 방법 [2]

전류 모델 기반의 센서리스 제어는 실제 전동기에 인가되는 전류와 추정 모델 전류의 오차를 이용한 센서리스 방법이다. 그림 1은 회전자의 실제위치 $d-q$ 축과 가상의 회전자 추정위치 $\gamma-\delta$ 축을 나타낸다.

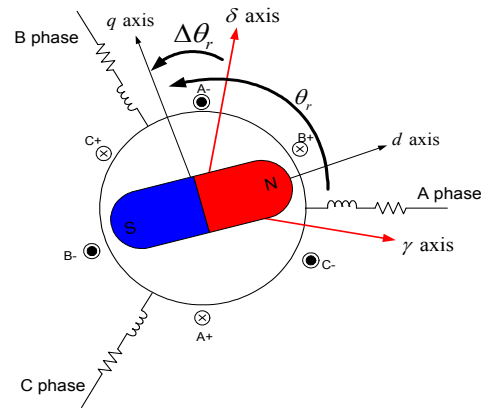


그림 1. $d-q$ 축과 $\gamma-\delta$ 축 사이의 관계
 Fig 1. Relations between d-q axis

PMSM의 회전자 실제 위치기 $d-q$ 축과 가상의 회전자 추정 위치 $\gamma-\delta$ 축의 전압 및 전류에 따른 모델식은 각각 식 (1)과 식 (2)로 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + L_d p & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_d & R + L_q p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + e \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + L_d p & -\omega_M L_q \\ \omega_M L_d & R + L_q p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + e \begin{bmatrix} -\sin \Delta \theta \\ \cos \Delta \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$e = \psi_a \omega_r \quad (3)$$

여기서, 실제모델과 가상모델의 위치오차를 $\Delta\theta$ 라 하고 가상모델의 전류와 실제모델의 전류차이를 각각 Δi_γ , Δi_δ 라 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta i_\gamma(n) \\ \Delta i_\delta(n) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} i_\gamma(n) \\ i_\delta(n) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{M\gamma}(n) \\ i_{M\delta}(n) \end{bmatrix} \\ &= \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q e \sin \Delta \theta \\ L_d (e_M - e \cos \theta) \end{bmatrix} = \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q e \Delta \theta \\ -L_d \Delta e \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

$$e_M = \psi_a \omega_M \quad (5)$$

식 (4)에서 δ 축의 전류오차를 이용하여 추정 역기전력을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_M(n) = e_M(n-1) - k_e \Delta i_\delta(n) \quad (6)$$

여기서, k_e 는 역기전력 추정 이득을 의미한다.

식 (4)에서 γ 축의 전류 오차를 이용하여 회전자의 위치를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta(n) = \theta(n-1) + \frac{T}{\psi_a} e_M(n) + k_\theta \Delta i_\gamma(n) \quad (7)$$

여기서, k_θ 는 회전자 위치 추정 이득을 의미한다.

식 (7)의 회전자 위치정보로부터 추정 속도정보를 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\omega}_r = \frac{e_M(n)}{\psi_a} + \frac{k_\theta \Delta i_\gamma(n)}{T} \quad (8)$$

여기서 추정된 속도와 위치는 역기전력 상수 k_e 와 위치추정 상수 k_θ 에 민감하다. 참고문헌[3]에서는 실험을 통해서 이러한 상수들의 최적값을 얻고 보상에 주게 된다. 그러나 이는 매우 번거로운 작업이며 특정 상태를 벗어날 경우 상수보정을 해줄 수 없는 단점이 있다.

2.2. 구형파 2-Hall Sensor를 사용한 영구자석형 동기전동기의 센서리스 제어시 위치오차 보정 방법

본 논문에서 제안하는 센서리스 제어 방법은 참고문헌[3]에서의 전동기 상태변화에 따른 속도 및 부하의 상수 변동을 측정하는데 번거롭다는 단점을 2개의 구형파와 홀센서를 사용하여 간단하게 보정하는 방법을 제안한다.

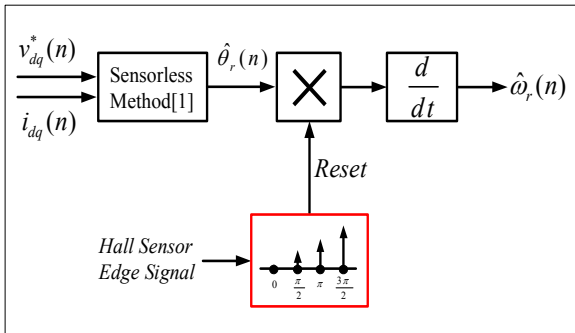


그림 2. 회전자의 위치보정을 위한 블록도
Fig 2. Block diagram for rotor position correction.

그림 2는 홀센서의 Edge신호마다 추정위치를 초기화시키는 제어 블록도이다. 센서리스 구동시 초기에 회전자의 정확한 위치 정보가 없기 때문에 발생하게 되는 회전자 추정위치 $\hat{\theta}_r$ 의 오차를 2개의 홀센서의 상승 또는 하강 Edge 신호가 포함하고 있는 실제 회전자 위치정보 θ_r

로 초기화 시켜, 전기각 $90[^\circ]$ 간격으로 이를 보정한다.

홀센서의 Edge신호는 정확한 회전자 위치 정보를 포함하고 있다. 따라서 홀센서의 Edge신호에 따라 회전자의 위치를 초기화시켜 번거로운 상수추정 없이 회전자의 정확한 위치 파악이 가능하다.

3. 실험

본 논문의 실험에서 사용된 PMSM의 제정수는 표 1과 같다. 제어에 사용된 DSP는 TMS320F2811이고 EPLD는 Altera사의 EPM8014를 이용하였다.

표 1. PMSM의 정격과 파라미터

Table 1. Ratings and Parameters of PMSM.

정격출력(P_{rate})	1.8[kW]	정격전압(V_{rate})	310[V]
극수(Pole)	24[P]	정격전류(I_{rate})	6[A]
q축인덕턴스(L_q)	31.947[mH]	d축인덕턴스(L_d)	31.947[mH]
관성 모멘트(J)	0.05[kg · m ²]	정격속도(ω_{rate})	400[rpm]
상저항(R_s)	3.72[Ω]	정격토크(T_{rate})	20[N · m]

그림 3은 센서리스 제어시에 추정 회전자 위치 $\hat{\theta}_r$ 과 실제 회전자 위치 θ_r 의 오차를 보여주는 실험 파형이다. 실제 회전자 위치를 나타내는 홀센서 A, B와 추정된 회전자의 위치 $\hat{\theta}_r$ 에 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

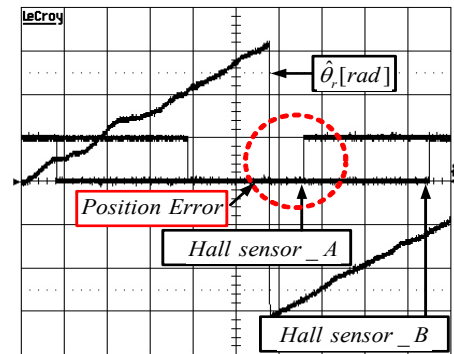


그림 3. 센서리스 구동시 회전자 위치 오차
Fig 3. Rotor position error at the sensorless control operating

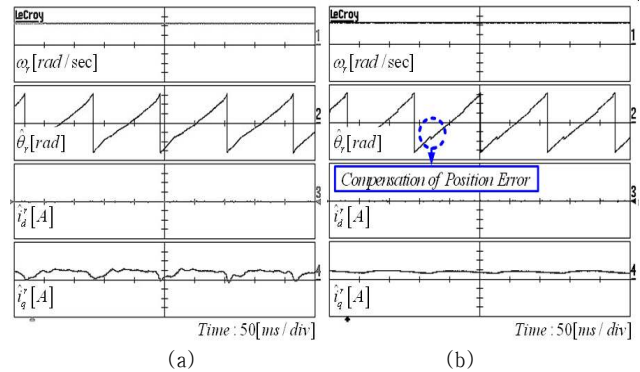


그림 4. 3[N · m] 부하 인가 실험. (a) 회전자 위치보정이 없을 때 실험 파형. (b) 회전자 위치보정이 있을 때 실험 파형.

Fig 4. Experimental results when the $3[N \cdot m]$ load is applied. (a) Sensorless control without compensation method. (b) Sensorless control with proposed compensation method.

그림 4의 (a)와 (b)는 $3[N \cdot m]$ 의 부하 인가시 센서리스 제어 실험 비교 파형을 나타낸다. 그림 4의 (a)는 부하 인가시 발생하는 상수변동을 고려하지 않아서 추정하는 q축 전류 \hat{i}_q^* 의 파형에서 큰 리플이 발생하는 것을 볼 수 있다. 그림 4의 (b)는 2개의 구형과 홀센서를 사용하여 전기각 $90[^\circ]$ 간격으로 회전자의 위치를 보정해 주었을 때의 실험 파형으로 추정하는 q축 전류 \hat{i}_q^* 의 파형에서 리플이 감소한 것을 볼 수 있다.

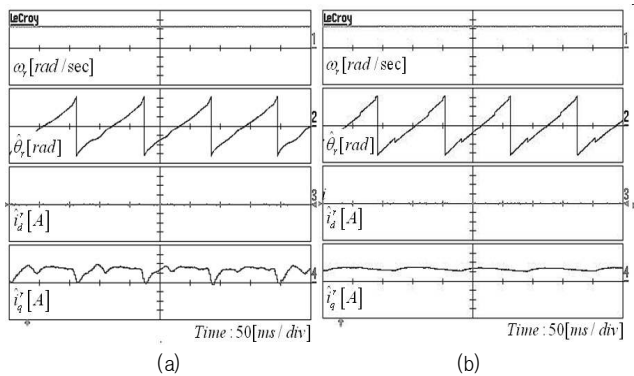


그림 5. $5[N \cdot m]$ 부하 인가 실험. (a) 회전자 위치보정이 없을 때 실험 파형. (b) 회전자 위치보정이 있을 때 실험 파형.

Fig 5. Experimental results when the $5[N \cdot m]$ load is applied. (a) Sensorless control without compensation method. (b) Sensorless control with proposed compensation method.

센서리스 구동시 고속운전 영역과 큰 부하 토크를 인가할 경우 추정하는 회전자의 위치와 실제 회전자의 위치오차는 증가한다. 그림 5의 (a)와 (b)는 $5[N \cdot m]$ 의 부하 인가시의 실험 파형으로 그림 4에 비해 추정하는 q축 전류 \hat{i}_q^* 의 파형에서 리플이 더 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 반면에 제안하는 방법을 사용해서 위치 보정을 하게 되면 그림 5의 (b)에서와 같이 추정하는 q축 전류 \hat{i}_q^* 의 전류가 안정적으로 제어되는 것을 확인할 수 있다.

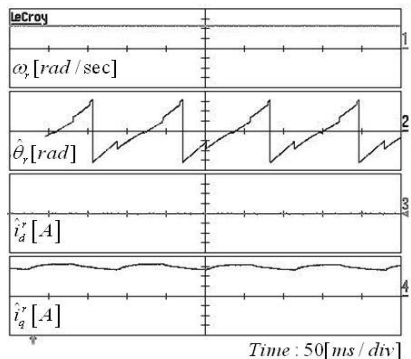


그림 6. $10[N \cdot m]$ 부하인가시 회전자 위치가 보정된 센서리스 구동 파형. Fig 6. Experimental result of proposed sensorless control at $10[N \cdot m]$ load is applied.

상수변동을 고려하지 않은 센서리스 구동시 최대 인가할

수 있는 부하의 크기는 $5[N \cdot m]$ 이지만, 제안한 방법을 사용하여 센서리스 제어시에는 그림 6에서 보는 바와 같이 $10[N \cdot m]$ 의 부하 인가시에도 센서리스 제어가 안정적인 것을 확인할 수 있다. 전동기 상태에 맞는 최적의 상수값이 적용되지 않았기 때문에 제안된 방법을 적용하여도 정격부하인 $20[N \cdot m]$ 까지 인가할 수 없다.

하지만, 실험을 통해 알 수 있듯 상수변동을 고려하지 않은 기존의 방법에 비해 부하토크에 더 강인하다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 2개의 구형과 홀센서의 Edge신호를 이용하여 센서리스 구동시 발생하는 회전자 추정위치 오차를 보정하는 방법을 제안하였다.

$90[^\circ]$ 로 배치된 두 개의 홀센서의 Edge신호는 회전자의 정확한 위치를 포함하고 있다. 따라서 센서리스 구동시 이러한 Edge신호에 따라 추정위치를 초기화 하면 상수오차에 의한 전류 맥동을 줄일 수 있다. 또한, 제안된 방법을 사용하면 속도와 부하에 따른 상수변동 없이 비교적 부하에 강인한 센서리스 제어가 가능하다.

본 논문은 실험용 전동기의 센서리스 제어시 위치오차 보정 방법을 통하여 정확한 상수추정 없이도 제어가능 영역을 확장 할 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

본 논문은 에너지관리공단 에너지지원기술개발사업의 연구비 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.

참고 문헌

- [1] 홍찬희, 조관열, 양순배, "영구자석형 동기모터의 센서리스 제어", 하계 전력전자학술대회 논문집, pp.393~396, 2001.
- [2] N. Matsui, "Sensorless PM Brushless DC Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Electronics., vol.43, no.2, pp. 300~308, April. 1996.
- [3] 양순배, 조관열, 홍찬희, "영구자석 동기전동기의 상수변동을 보상한 센서리스 제어", 전력전자학회 논문지 제 7권 제6호, pp.517~523, 2002.
- [4] Hyunbae Kim, Michael C. Harke, Robert D. Lorenz, "Sensorless Control of Interior Permanent-Magnet Machine Drives With Zero-Phase Lag Position Estimation", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.39, no.6, pp.1726~1733, November/December. 2003.
- [5] 공태웅, 이정효, 유재성, 이원철, 원충연, "2-Hall Sensor를 이용한 영구자석형 동기전동기 벡터 제어의 정역회전을 위한 회전자 위치 추정 알고리즘", 추계 전력전자학술대회 논문집, pp.154~156, 2007.