

스위칭 주파수 신호 주입 센서리스 제어를 위한 회전 변환 행렬을 이용한 새로운 위치 오차 추정 기법

김상일, 김래영
한양대학교 전기공학과

A New Sensorless Position Error Calculation Method using a Rotation Matrix for IPMSM Based on Switching Frequency Signal Injection

Sang-Il Kim, Rae-Young Kim
Dept. of Electrical Eng. Hanyang Univ.

ABSTRACT

본 논문에서는 스위칭 주파수 신호 주입 센서리스 제어를 위한 정밀한 위치 오차 추정 기법을 제안한다. 제안한 방법에서는 위치 오차를 얻을 때에 작은 각도 근사법(Small-Angle Approximation)을 이용하지 않고 Rotation matrix를 이용하여 근사 없이 실제 위치 오차를 계산하였고, 90도까지 회전자 오차 측정 범위를 확대하였다. 이를 통하여 오차가 크게 발생하는 부하 변동이나 가감속 시에 과도상태특성을 개선할 수 있다. 제안한 방법은 실험을 통하여 그 유효성을 검증하였다.

1. 서 론

센서 고장이나 잡음으로부터 높은 신뢰성을 확보하기 위해 센서를 사용하지 않고 위치 또는 속도 제어를 행하는 센서리스 전동기 제어가 널리 적용되고 있다. 이러한 센서리스 기법은 중-고속 영역에서 우수한 특성을 보이는 역기전력 추정을 통한 방법과 영속이나 저속에서도 우수한 특성을 가지는 고주파 신호를 주입하는 방법으로 나뉜다.

고주파 신호 주입 기반의 센서리스 제어 중 주로 사용되고 있는 맥동하는 전압 주입 기법은 신호의 모양에 따라 정현파 주입 기법과 구형파 주입 기법으로 나눌 수 있다. 정현파 신호 주입 기법은 낮은 대역폭으로 인하여 최근에는 제어 대역폭을 크게 넓힐 수 있는 스위칭 주파수의 구형파를 주입하는 방법이 연구되고 있다^[1].

한편 구형파 고주파 전압 주입 기법에 적용되는 위치 추정 기법은 정현파 함수의 1차 선형화를 통한 작은 각도 근사법(Small-angle approximation)을 이용한 방법이 널리 사용되고 있다. 이는 구현이 간단하고 필터 사용에 따른 시지연이 발생하지 않는 장점을 가지나, 실제 위치와 추정 위치 사이의 오차가 커지는 경우에는 실제 오차와 추정 오차간의 선형성이 저하되어 위치 추정의 정확성이 감소되는 단점을 지닌다^{[1]-[2]}.

이러한 문제점을 극복하기 위하여 본 논문에서는 스위칭 주파수 신호 주입 센서리스 제어를 위한 새로운 위치 오차 추정 기법을 제안한다. 제안한 위치 오차 추정기법은 작은 각도 근사법에 따른 선형화 없이 회전 행렬을 이용하여 직접적으로 위치 오차를 추정한다. 이에 따라 위치 오차 측정 범위를 $\pm 90^\circ$ 까지 넓힐 수 있으며 동시에 실제 위치 오차와 추정 오차간의 선형성의 확보가 가능하다는 장점을 지닌다.

2. 스위칭 주파수 주입을 이용한 센서리스 제어의 위치 추정 기법^[1]

일반적인 IPMSM의 고주파 임피던스 모델로부터 동기 회전 좌표계상의 고주파 전압은 식 (1)과 같이 간략하게 표현될 수 있다. 여기에서 $[v_{dsh}^r \ v_{qsh}^r]^T$ 는 실제 회전자 좌표계상의 d-q축 고주파 전압, $[\Delta i_{dsh}^r \ \Delta i_{qsh}^r]^T$ 는 실제 회전자 좌표계상의 d-q축 고주파 전류, ΔT_s 는 샘플링 주기, L_{ds} 는 d축 인덕턴스, L_{qs} 는 q축 인덕턴스이다.

$$\begin{bmatrix} v_{dsh}^r \\ v_{qsh}^r \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta T_s} \begin{bmatrix} L_{ds} & 0 \\ 0 & L_{qs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{dsh}^r \\ \Delta i_{qsh}^r \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)로부터 회전변환 행렬 $T(\Delta\theta_r)$ 을 이용하여 추정된 회전 좌표계상의 고주파 전류 $[\Delta \hat{i}_{dsh}^r \ \Delta \hat{i}_{qsh}^r]^T$ 를 추정된 회전 좌표계상의 고주파 전압 $[v_{dsh}^{\hat{r}} \ v_{qsh}^{\hat{r}}]^T$ 으로 전개하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{i}_{dsh}^r \\ \Delta \hat{i}_{qsh}^r \end{bmatrix} = \Delta T_s T(-\Delta\theta_r) \begin{bmatrix} 1/L_{ds} & 0 \\ 0 & 1/L_{qs} \end{bmatrix} T(\Delta\theta_r) \begin{bmatrix} v_{dsh}^{\hat{r}} \\ v_{qsh}^{\hat{r}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)의 고주파 전압 $[v_{dsh}^{\hat{r}} \ v_{qsh}^{\hat{r}}]^T$ 은 스위칭 주파수 신호 주입 방식의 센서리스 제어의 경우에 $[\pm V_{inj} \ 0]^T$ 로 근사화할 수 있으므로, 고주파 전류는 식 (3)과 같이 정리할 수 있다. 식 (3)의 추정된 회전 좌표계상의 q축 고주파 전류 $\Delta \hat{i}_{qsh}^r$ 에서 실제 위치 오차 $\Delta\theta_r$ 가 매우 작은 경우, 식 (4)와 같이 정현파 함수를 1차 근사화 할 수 있다. 식 (3)에 식 (4)를 대입하여 위치 오차를 구하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{i}_{dsh}^r \\ \Delta \hat{i}_{qsh}^r \end{bmatrix} = \frac{\pm \Delta T_s V_{inj}}{L_{ds} L_{qs}} \begin{bmatrix} L_{qs} \cos^2 \Delta\theta_r + L_{ds} \sin^2 \Delta\theta_r \\ 0.5(L_{qs} - L_{ds}) \sin 2\Delta\theta_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\sin 2\Delta\theta_r \approx 2\Delta\theta_r \quad (4)$$

$$\Delta\theta_r = \frac{L_{ds} L_{qs}}{2 V_{inj} \Delta T_s (L_{qs} - L_{ds})} \Delta \hat{i}_{qsh}^r \quad (5)$$

그러나 실제 위치 오차 $\Delta\theta_r$ 가 큰 경우, 작은 각도 근사법에 따른 근사화 오차가 커지게 되어 정확한 위치 오차가 계산될 수 없고 이로 인해 관측기의 회전자 위치 정보 추정 성능이 저하되는 문제점을 가진다. 뿐만 아니라 급격한 부하 변동이나 변속 등에 의하여 $\Delta\theta_r$ 가 45° 이상으로 커지는 경우 식 (5)로부터 구한 위치 오차는 반대로 작아지게 되어 제어에 실패할 수 있다. 그러므로 실제 위치 오차가 큰 경우에도 강인하고 정밀한 위치 추정 기법이 요구된다.

3. 제안한 위치 오차 추정 기법

식 (2)로부터 $\Delta\theta_r$ 에 포함되어 있는 항과 포함되어 있지 않은 항으로 정리하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, $L_{sum} = (L_{qs} + L_{ds})/2$ 이고, $L_{dif} = (L_{qs} - L_{ds})/2$ 이다.

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{dsh}^r \\ \Delta i_{qsh}^r \end{bmatrix} = \frac{\Delta T_s L_{sum}}{L_{ds} L_{qs}} \begin{bmatrix} v_{dsh}^r \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{\Delta T_s L_{dif}}{L_{ds} L_{qs}} \begin{bmatrix} \cos 2\Delta\theta_r & \sin 2\Delta\theta_r \\ \sin 2\Delta\theta_r & -\cos 2\Delta\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{dsh}^r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)의 우변의 첫째항을 좌변으로 이항하고 $(\Delta T_s L_{dif})/(L_{ds} L_{qs})$ 로 양변을 나누면 최종적으로 식 (7)을 얻을 수 있다. 이 때 $[v_\gamma v_\delta]^T$ 는 식 (8)과 같이 정의될 수 있다. 식 (7)과 식 (8)로부터 실제 위치 오차의 정보는 추정된 회전자 표제상에서 주입된 전압의 크기 $|v_{dsh}^r| = V_{inj}$ 와 고주파 전류 $\Delta i_{dsh}^r, \Delta i_{qsh}^r$ 를 통해 얻어질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2\Delta\theta_r & \sin 2\Delta\theta_r \\ -\sin 2\Delta\theta_r & \cos 2\Delta\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{dsh}^r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} \equiv \frac{L_{ds} L_{qs}}{\Delta T_s \times L_{dif}} \begin{bmatrix} \Delta i_{dsh}^r \\ -\Delta i_{qsh}^r \end{bmatrix} - \frac{L_{sum}}{L_{dif}} \begin{bmatrix} v_{dsh}^r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

그러나 상기 관계로부터 추정되는 오차 정보는 $\Delta\theta_r$ 가 아닌 $2\Delta\theta_r$ 이므로 작은 각도 근사법에 의한 문제점을 해결할 수 없고, 따라서 $\Delta\theta_r$ 가 직접 추정될 수 있도록 식 (7) 양변에 회전 행렬 $T(-\Delta\theta_r)$ 을 곱해준다. 회전 행렬의 성질로부터 식 (9)는 식 (10)과 같이 표현되고, 식 (7)과 다르게 $\Delta\theta_r$ 의 정보만으로 표현되어 $\Delta\theta_r$ 가 직접 추정이 가능하다. 최종적으로 식 (10)의 두 번째 행으로부터 \cos 항과 \sin 항을 나누어 정리하면 식 (11)과 같은 실제 위치 오차를 계산할 수 있다.

$$T(-\Delta\theta_r) \begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = T(-\Delta\theta_r) T(2\Delta\theta_r) \begin{bmatrix} v_{dsh}^r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \cos\Delta\theta_r & -\sin\Delta\theta_r \\ \sin\Delta\theta_r & \cos\Delta\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\theta_r & \sin\Delta\theta_r \\ -\sin\Delta\theta_r & \cos\Delta\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{dsh}^r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\Delta\theta_r = \tan^{-1} \left[-v_\delta / (v_\gamma - v_{dsh}^r) \right] \quad (11)$$

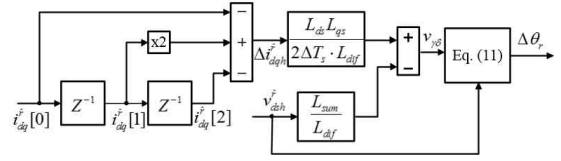


그림 1 제안한 위치 오차 추정 기법
Fig. 1 The proposed demodulation process

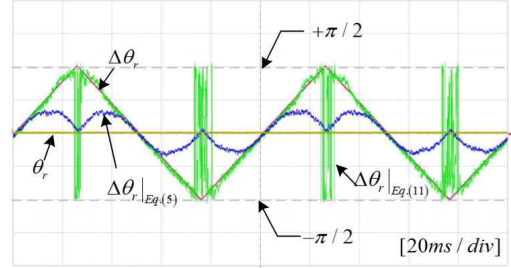


그림 2 회전자 위치 오차 추정 성능
Fig. 2 Rotor position error estimation performance

그림 1은 제안한 위치 오차 추정 기법을 나타낸다. 식 (8)로부터 v_γ 와 v_δ 를 구한 후 이를 식 (11)에 대입하여 실제 위치 오차 $\Delta\theta_r$ 를 계산한다.

4. 실험 결과

제안된 위치 오차 추정 기법을 검증하기 위하여 전동기를 구속하고 영 전류제어만을 수행하면서 임의로 추정 위치를 -90° 에서 $+90^\circ$ 까지 10Hz로 연속적으로 변경하였다. 그림 2에 식 (5)으로부터 구한 근사화 된 위치 오차와 식 (11)로부터 구한 위치 오차를 실제 위치 오차와 함께 나타내었다. 제안한 위치 오차 추정 기법으로 구한 위치 오차는 실제 위치 오차를 -90° 에서 $+90^\circ$ 까지 잘 추정함을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 스위칭 주파수 신호 주입 센서리스 제어의 정밀한 제어를 위한 새로운 위치 오차 추정 기법을 제안하였다. 제안한 기법은 작은 각도 근사법에 따른 근사화 없이 회전 행렬을 이용하여 실제 위치 오차를 정확하게 추정할 수 있어 보다 정밀한 센서리스 제어가 가능하게 한다. 제안한 기법을 실제 구동 시스템에 적용하여 그 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] S. M.Kim, J. I. Ha, and S. K. Sul, "PWM switching frequency signal injection sensorless method in IPMSM," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 48, pp. 1576-1587, SEP/OCT., 2012.
- [2] Y. D. Yoon, S. K. Sul, S.Morimoto, and Kozo Ide, "High-Bandwidth Sensorless Algorithm for AC Machines Based on Square-Wave-Type Voltage Injection," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 47, no. 3, pp. 1361- 1370, May/Jun. 2011.