매입형 영구자석 동기전동기의 센서리스 구동 시 위치 추정 성능 향상을 위한 새로운 인덕턴스 추정 방법

강부경, 강신원, 김상일, 김래영†
한양대학교

Improved Rotor Position Estimator with a New Inductance Estimation Method for IPMSM Sensorless Drive

Bu-Kyong Kang, Shin-Won Kang, Sang-Il Kim, Rae-Young Kim†
Hanyang University

ABSTRACT

본 논문에는 매입형 영구자석 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)의 회전행렬을 이용한 고주파 신호주입 센서리스 구동 시 회전자 위치 오차 추정 성능 향상을 위한 새로운 인덕턴스 추정방법을 제안하였다. 회전행렬을 이용한 회전자 위치 오차 추정 방법은 위치 오차의 넓은 추정 범위 및 선형성을 만족하는 장점이 있으나 모델 기반 인덕턴스를 사용하기 때문에 실제 인덕턴스 값과 차이가 있을 시 추정된 위치 오차가 부정확 할 수 있다. 따라서 정확한 위치 오차를 구하기 위해 본 논문은 오프라인 상황에서 인덕턴스를 추정하는 새로운 방법을 제시하였으며 모의 실험으로 제안한 방법을 검증하였다.

1. 서론

IPMSM은 높은 효율과 단위 체적당 높은 출력밀도를 가지고 있고 높은 제어성능을 보이기 때문에 다양한 고성능 전동기 응용분야에 사용되고 있다[1]. IPMSM을 구동하기 위해서는 회전자 위치 정보가 필수적이기 때문에 센서들이 사용되는데 이는 시스템의 크기와 가격을 증가시키며 신뢰성을 낮추고 잡음에 대해 취약해 지는 단점을 보인다. 따라서 위치 센서를 사용하지 않고 모터를 구동하는 센서리스 제어기법들이 제안되었으며 모터 구동 속도에 따라 역기전력을 이용하는 방법과 고주파 신호를 주입하는 방법으로 분류할 수 있다. 정지상태 및 저속영역에서는 고주파 신호 주입 방법이 주로 이용되는데 회전행렬을 이용한 고주파 신호 주입 방법은 넓은 위치오차 추정 범위와 선형성을 만족하는 장점을 보인다[2]. 하지만 상기 방법은 모델 기반 인덕턴스를 사용하기 때문에 정확한 모터 인덕턴스 값을 알지 못하면 부정확한 회전자 위치오차를 추정하게 되는 단점이 있다.

본 논문에서는 회전행렬을 사용하는 센서리스 제어기법의 위치오차 추정 성능을 높이기 위해 인덕턴스를 추정하는 기법을 제안한다. 제안한 기법은 회전행렬을 사용한 위치오차 추정 시 사용되는 전압값을 이용하기 때문에 인버터 전압 이용률이 감소하지 않으며 현대 제어기법이 사용되지 않아 간단하게 인덕턴스가 추정되는 장점이 있다. 또한 오프라인 구동 시 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스를 독립적으로 추정하며 매 스위칭 주파수로 오차값이 생성되기 때문에 빠른 동특성을 보인다. 제안된 기법은 모의실험을 통해 타당성을 검증하였다.

2. 회전행렬을 이용한 회전자 위치오차 추정방법

2.1 IPMSM 모델

이산 시간 영역의 동기 좌표계에서 IPMSM의 고주파 영역에서의 모델은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{dh}^r \\ v_{qh}^r \end{bmatrix} = \frac{1}{T_{samp}} \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{dh}^r \\ \Delta i_{qh}^r \end{bmatrix} \tag{1}$$

여기서 T_{samp} , L_d , L_q 는 각각 샘플링 시간, d축 인덕턴스, q축 인덕턴스를 의미하며 Δi_{dh}^r , Δi_{qh}^r 는 샘플링 구간 동안의 d축과 q축에서의 전류 차를 나타낸다. 추정 동기 좌표계에서의 주입전압은 (2)와 같이 나타 낼 수 있으며 회전행렬 (3)을 이용하여 추정 동기 좌표계에서의 전류 차에 대한 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{dh}^{\hat{r}} \\ v_{qh}^{\hat{r}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pm V_{inj} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$T(\theta_r) = \begin{bmatrix} \cos\Delta\theta_r & \sin\Delta\theta_r \\ -\sin\Delta\theta_r & \cos\Delta\theta_r \end{bmatrix} \qquad \left(\Delta\theta_r = \theta_r - \hat{\theta}_r\right) \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{dh}^{\hat{r}} \\ \Delta i_{qh}^{\hat{r}} \end{bmatrix} = \frac{T_{samp}\hat{L}_{sum}}{\hat{L}_d\hat{L}_q} \begin{bmatrix} v_{dh}^{\hat{r}} \\ v_{qh}^{\hat{r}} \end{bmatrix} + \frac{T_{samp}L_{diff}}{L_dL_q} \begin{bmatrix} \cos 2\Delta\theta_r & \sin 2\Delta\theta_r \\ \sin 2\Delta\theta_r & -\cos 2\Delta\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{dh}^{\hat{r}} \\ v_{qh}^{\hat{r}} \end{bmatrix} \tag{4}$$

여기서 $\Delta\theta_r$ 실제 위치와 추정 위치의 차에 대한 값이며, L_{sum} 은 $\left(\hat{L}_q + \hat{L}_d\right)/2$ 의 값이고 L_{diff} 는 $\left(\hat{L}_q - \hat{L}_d\right)/2$ 에 대한 값을 나타낸다.

2.2 회전자 위치오차 추정 과정

수식 (4)에서 회전자 위치오차 성분이 포함된 항과 포함하지 않은 항으로 이항을 하면 다음과 같이 전압 값 v_γ , v_δ 로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos 2\Delta\theta_r & \sin 2\Delta\theta_r \\ -\sin 2\Delta\theta_r & \cos 2\Delta\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \pm V_{inj} \\ 0 \end{bmatrix} = T\left(2\Delta\theta_r\right) \begin{bmatrix} \pm V_{inj} \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{\hat{L}_d\hat{L}_q}{T_{samp}L_{diff}} \begin{bmatrix} \Delta i_{dh}^{\hat{r}} \\ -\Delta i_{qh}^{\hat{r}} \end{bmatrix} - \frac{L_{sum}}{L_{diff}} \begin{bmatrix} \pm V_{inj} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{5}$$

수식 (5)에서 회전자 위치오차 성분이 포함된 항에 음의 회전행렬을 곱하면 다음과 같이 두 가지 경우의 위치오차를 구할 수 있으며 전압 값 v_γ , v_δ 에 회전자 위치오차성분이 포함되지 않은 항이 대입된다. 추정된 회전자 위치오차는 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 의 넓은 추정범위와 아크탄젠트의 분모가 0이 되지 않는 범위에서 선형성을 만족한다.

$$\Delta\theta_{r1} = \tan^{-1}\left(\frac{v_\gamma \mp V_{inj}}{v_\delta}\right) \tag{6}$$

$$\Delta\theta_{r2} = \tan^{-1}\left(\frac{-v_\delta}{v_\gamma \pm V_{inj}}\right) \tag{7}$$

3. 인덕턴스 추정 방법

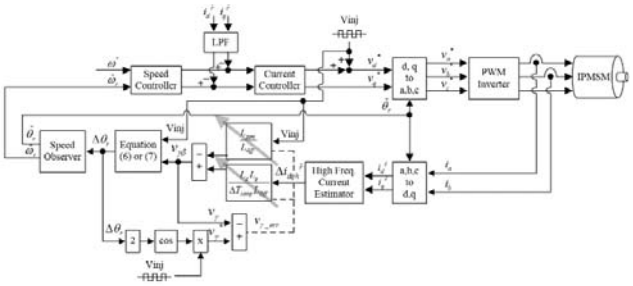

그림 1 제안한 인덕턴스 추정 블럭도

회전자 위치오차 추정에 이용되는 전압값 v_γ , v_δ 에 대한 식 (5)를 모델기반 인덕턴스가 포함된 식과 회전자 위치오차가 포함된 기준 식으로 나누면 (8)과 (9)로 나눌 수 있으며 자속 포화, 부하변동 등의 이유로 모터 인덕턴스 값이 변화하면 두 값은 다르게 되기 때문에 전압 값들의 오차를 줄이는 방향으로 모델기반 인덕턴스를 변화하면 정확한 인덕턴스를 추정할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \frac{\hat{L}_d \hat{L}_q}{T_{samp} L_{diff}} \begin{bmatrix} \Delta i_{dh}^{\hat{r}} \\ -\Delta i_{qh}^{\hat{r}} \end{bmatrix} - \frac{L_{sum}}{L_{diff}} \begin{bmatrix} \pm V_{inj} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\begin{bmatrix} v_\gamma^* \\ v_\delta^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2\Delta\theta_r & \sin 2\Delta\theta_r \\ -\sin 2\Delta\theta_r & \cos 2\Delta\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \pm V_{inj} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

또한 인덕턴스 차이로 생긴 전압값의 오차에 대해 주입전압을 곱하면 오차에 대한 크기와 부호를 알 수 있다.

추정된 위치오차의 수식 (6)과 (7)에서 인덕턴스가 포함된 항의 전압값을 대입하면 (10), (11)로 간단하게 표현할 수 있으며 $\Delta\theta_{r1}$ 은 오직 d축 인덕턴스 오차에만 영향을 받으며 $\Delta\theta_{r2}$ 는 오직 q축 인덕턴스 오차에만 영향을 받는 것을 알 수 있고 이를 통해 d축과 q축의 인덕턴스가 독립적인 추정이 가능하다는 것을 알 수 있다. 제안한 인덕턴스 추정 블럭도는 그림1에 나타나 있다.

$$\Delta\theta_{r1} = \tan^{-1}\left(\frac{V_{inj} \times T_{samp} - \hat{L}_d \times \Delta i_{dh}^{\hat{r}}}{\hat{L}_d \times \Delta i_{qh}^{\hat{r}}} \right) \tag{10}$$

$$\Delta\theta_{r2} = \tan^{-1}\left(\frac{\hat{L}_q \times \Delta i_{qh}^{\hat{r}}}{\hat{L}_q \times \Delta i_{dh}^{\hat{r}} - V_{inj} \times T_{samp}} \right) \tag{11}$$

4. 모의 실험

표 1 매입형 영구자석 동기 전동기의 제정수

R_s	$1.134\,[\Omega]$	f_{sw}	$5\,[kHz]$
L_d	$9.13[mH]$	f_{cc}	$10\,[kHz]$
L_q	$11.32\,[mH]$	f_{sc}	$1[kHz]$
Pole number	$6\,[pole]$	V_{inj}	$\pm 20[V], 5[kHz]$

제안한 인덕턴스 추정 방법을 확인하기 위해 실시한 모의실험에 대한 제정수는 표1과 같다. 모의 실험에 사용된 전동기는 600[W] 정격용량의 매입형 영구자석 동기전동기이다. 주입전압은 스위칭 주파수와 동일한 구형파이며 추정 동기좌표계의 d축에 주입하였다.

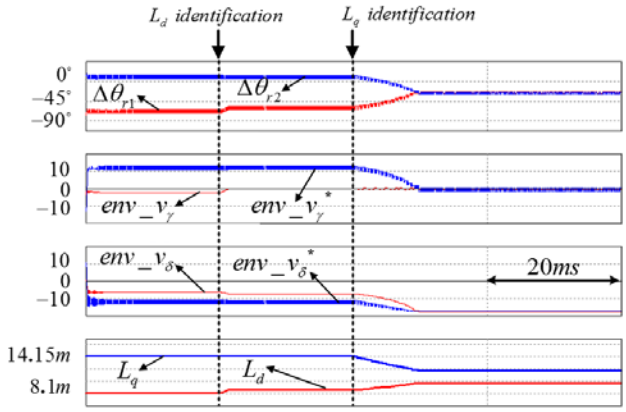

그림 2 오프라인 인덕턴스 추정 모의실험 결과

그림 2는 $\hat{L}_d$, $\hat{L}_q$ 의 초기값이 각각 8.1[mH], 14.15 [mH]로 실제 모터 인덕턴스 값인 9.13[mH], 11.32 [mH]와 차이가 있을 경우의 오프라인 인덕턴스 추정 모의실험 결과를 나타낸 파형이다. 모델기반 인덕턴스와 실제 모터 인덕턴스와의 차이로 인하여 회전자 위치오차 성분이 포함된 전압값 v_γ^* , v_δ^* 와 모델기반 인덕턴스가 포함된 전압값 v_γ , v_δ 이 서로 다른 값을 나타내기 때문에 추정 위치오차 $\Delta\theta_{r1}$, $\Delta\theta_{r2}$ 는 실제 위치오차(-45°)와 다른 값들을 나타낸다. 이들의 오차 값은 매 스위칭 주파수로부터 생기며 $\hat{L}_d$ 변화는 $\Delta\theta_{r1}$ 에 영향을 끼치고 $\hat{L}_q$ 변화는 $\Delta\theta_{r2}$ 에 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 모터 인덕턴스 추정 과정이 끝난 후 정확한 인덕턴스 값이 도출되는 것을 알 수 있으며 그 결과로 정확한 위치오차가 추정되는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기의 회전행렬을 이용한 고주파 신호주입 센서리스 구동 시 회전자 위치 오차 추정 성능 향상을 위한 새로운 인덕턴스 추정방법을 제안하였다. 제안된 인덕턴스 추정으로 인해 정확한 위치오차를 추정할 수 있는 것을 검증하였다.

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2014R1A1A1007258)

참 고 문 헌

[1] N. Bianchi and T.M. Jahns, “Design analysis and control of interior PM synchronous machines,” in Tutorial Course Notes, IEEE IAS Annu. Meeting, Seatle, WA, pp.1.1-1.10, 2004

[2] K. Sang-Il, K. Rae-Young “A novel Rotor Position Error Calculation Method using a Rotation Matrix for a Switching Frequency Signal Injected Sensorless Control in IPMSM,” The Transaction of the Korean Institute of Power Electronics, vol. 20, No. 5, October. 2015