

확장형 회전자 자속 모델 칼만 필터를 이용한 매입형 영구자석 동기 전동기의 센서리스 제어

김재훈¹, 박병건², 김래영¹, 현동석¹

한양대¹, 한국전기연구원²

Abstract

본 논문은 확장형 회전자 자속 모델 기반의 칼만 필터를 이용한 매입형 영구자석 동기 전동기 센서리스 제어에 관한 연구이다. 또한 센서리스 구동의 성능을 향상시키기 위하여 간단한 제정수 추정 방법을 제안하였다. 매입형 영구자석 동기전동기 구동 시스템은 비선형성과 제정수 변동이라는 문제점을 가지고 있다. 이러한 주요 문제점을 극복하기 위하여, 우선 칼만 필터를 이용한 확장형 회전자 자속 추정을 통해 다양한 노이즈를 포함한 비선형 시스템에서의 높은 성능적 안정성을 가질 수 있다. 제정수 추정 기법 또한 제정수의 변동을 감소시키기 위하여 제안하였다. 본 논문에서 제안한 센서리스 제어 방법과 제정수 추정 방법의 타당성을 확인하기 위하여 모의실험과 실제실험 세트를 구성하여 실제값과 실험값을 비교하였다.

1. 서론

최근 전력전자의 발전과 전동기 신뢰성 문제에 대한 관심이 고조되면서 영구자석 동기전동기에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히, 매입형 영구자석 동기 전동기는 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크를 동시에 이용할 수 있기에 고 토크화가 가능하여 차세대 전동기로서 조명 받고 있다. 매입형 영구자석 동기 전동기는 벡터 제어를 위해 광학식 엔코더 및 레졸버와 같은 센서를 회전자 측에 연결해야 한다. 이러한 센서들을 통해 회전자의 각속도 및 회전자의 위치를 검출해 낼 수 있다. 하지만 이러한 센서들은 전동기의 부피 및 가격 상승의 원인이 되며 주위 온도나 습도와 같은 환경적인 영향을 받는 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 해결하기 위하여 센서 없이 속도와 위치를 제어하는 기법에 대한 연구가 진행되어 왔다. 그 중 폐루프의 관측기를 사용한 센서리스 제어 방법이 많이 연구되어 왔다. 본 논문에서는 제정수 변동과 다양한 노이즈 환경에 놓인 시스템의 상태변수와 제정수를 정확히 추정 할 수 있는 전 차원 확장형 칼만 필터를 이용하여 매입형 영구자석 동기 전동기의 센서리스 제어 방법을 제안하였다. 일반적으로, 정확한 회전자 위치 추정을 위해서는 전동기의 제정수가 필연적으로 요구되며, 정확해야 하기 때문에 서보 시스템이나 정밀한 제어가 요구되는 산업현장에서는 전동기의 제정수에 대한 정보가 필수적이다. 실제로 이러한 제정수들은 부하 변동, 온도 변화, 자기 포화에 의해서 그 값이 변동하게 된다. 이렇게 실제값과 차이가 나게 되면 센서리스 제어 시스템에서 회전자 위치 추정에 대한 오차를 발생시킨다. 따라서 고성능의 센서리스

제어를 위해서 제정수 추정은 반드시 필요하다. 본 논문에서는 간단히 제정수 추정 방법을 제안하였다. 아울러 실험을 통하여 제안한 방법에 대한 타당성을 확인하려고 하였다.

2. 제안한 센서리스 제어 방법

2.1 IPMSM의 확장형 회전자 자속 모델

확장형 회전자 자속 모델은 IPMSM의 기본적인 수학적 모델식에서부터 유도된다. IPMSM의 수학적 모델식을 표현하면

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega_{re}L_q \\ \omega_{re}L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{re}K_E \end{bmatrix} \quad (1)$$

확장형 회전자 자속 모델의 개념은 모든 돌극성을 가진 AC 모터를 가상의 비 돌극성의 AC 모터로 전환한다는 의미이다.

확장형 회전자 자속 모델링을 하기 위해 우선 (1)식을 변형 시킨다. (q축 인덕턴스에 대해서 정리)

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_q & -\omega_{re}L_q \\ \omega_{re}L_q & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} (L_d - L_q)i_d \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{re}\{K_E + (L_d - L_q)i_d\} \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2)식을 정지 좌표계의 식으로 표현하면

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_q & 0 \\ 0 & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \lambda_\alpha \\ \lambda_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, $\begin{bmatrix} \lambda_\alpha \\ \lambda_\beta \end{bmatrix} = \{K_E + (L_d - L_q)i_d\} \begin{bmatrix} \cos \theta_{re} \\ \sin \theta_{re} \end{bmatrix}$

결과적으로 확장형 회전자 자속 모델식을 유도할 수 있다.

2.2 확장형 칼만 필터 알고리즘

칼만필터는 반복적인 최적 추정기로서 수리적인 모델은 상태공간 개념에 근거를 두고 있다. 칼만필터는 크게 두가지 과정으로 구분된다. 첫번째 단계는 예측단계로서 1사이클 이전에 저장된 데이터에 의해 계산되는 신호의 초기 추정치와 오차의 공분산을 계산하는 단계이며, 두번째 단계는 추정단계로서 예측한 초기 추정치와 오차의 공분산을 통하여 칼만 이득값을 계산하고, 측정치와 더불어 새로운 추정치와 오차의 공분산을 계산하는 단계이다. 그리고 이 단계가 끝나면 현재의 프로세스를 반복 수행하여 필터 이전의 추정된 값들을 새롭게 조절해 간다.

1. 예측단계

$$\tilde{X}(k+1) = A_d \hat{X}(k) + B_d U(k) \quad (4)$$

$$\tilde{P}(k+1) = F(k+1)\tilde{P}(k)F^T(k+1) + Q$$

$$F(k+1) = \frac{\partial}{\partial X} [A_d X + B_d U] \Big|_{x(k)=\hat{x}(k+1)}$$

2. 추정단계

$$K(k+1) = \tilde{P}(k+1)H^T(k+1) \times [H(k+1)\tilde{P}(k+1)H^T(k+1) + R]^{-1}$$

$$\hat{X}(k+1) = \tilde{X}(k+1) + K(k+1) \times [Y(k+1) - H(k+1)\tilde{X}(k+1)] \quad (5)$$

$$\hat{P}(k+1) = [I - K(k+1)H(k+1)]\tilde{P}(k+1)$$

2.3 위치 및 속도 추정

EKF에 의해 추정된 $\hat{\lambda}_\alpha, \hat{\lambda}_\beta$ 를 이용하여 회전자 위치 및 속도를 추정할 수 있다.

$$\hat{\theta}_{re} = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{\lambda}_\beta}{\hat{\lambda}_\alpha} \right) \begin{cases} \text{if } (\omega_{re} > 0), & \hat{\theta}_{re} = \hat{\theta}_{re} \\ \text{else} & \hat{\theta}_{re} = \hat{\theta}_{re} + \pi \end{cases} \quad (6)$$

$$\hat{\omega}_{re} = \frac{d\hat{\theta}_{re}}{dt}, \quad \hat{\omega}_{re} = \frac{\hat{\lambda}_{\alpha k-1}\hat{\lambda}_{\beta k} - \hat{\lambda}_{\beta k-1}\hat{\lambda}_{\alpha k}}{T_s(\hat{\lambda}_{\alpha k}^2 + \hat{\lambda}_{\beta k}^2)}$$

2.4 간단한 제정수 추정

제안한 방법은 별개로 저감차수 EKF를 사용하여 제정수를 추정하였다. 이 방법 또한 상태공간 개념을 근거에 두고 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_q i_q \\ R_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -i_q \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_q i_q \\ R_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot (V_q - \omega_{re} K_E)$$

$$i) y_1(t) = L_q i_q, A = \begin{bmatrix} 0 & -i_q \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, C_1 = [1 \ 0] \quad (7)$$

$$ii) y_2(t) = R_s, A = \begin{bmatrix} 0 & -i_q \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C_2 = [0 \ 1]$$

$$\hat{L}_{q(k)} = \frac{\hat{L}_{q(k-1)}\hat{i}_{q(k-1)}}{\hat{i}_{q(k)}}, \quad \hat{R}_{s(k)} = \hat{R}_{s(k-1)}$$

저감차수 EKF를 병렬로 구동시켜 두 개의 EKF가 각각 샘플링 시간 마다 번갈아 가며 각각 할당된 제정수를 추정한다.

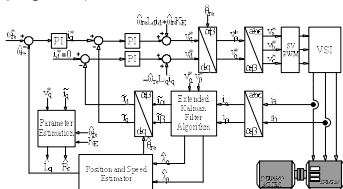


그림.1 IPMSM 센서리스 제어 시스템

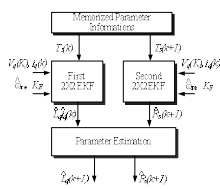


그림.2 제정수 추정법

3. 시스템 구성 및 실험결과

본 논문에서는 그림 3과 같은 실험세트를 구성하였고 표 1과 같은 제정수를 가지는 매입형 영구자석 동기 전동기로 실험을 하였다. 그림 4와 5를 통해 제안한 방법의 타당성을 확인하였다. 속도지령에 대해 속도와 위치가 빠르게 수렴하는 것을 확인할 수 있고, 실제 제정수에 대해 추정한 제정수가 잘 추정하는 것을 확인할 수 있다.

표.1 매입형 영구자석 동기 전동기(2.2kW)의 제정수

Parameters	Values
Number of pole airs	6 pole
Armature resistance	0.43 Ω
d-axis inductance	0.0021 H
q-axis inductance	0.0055 H
Flux linkage	0.0721 Wb
Rotor inertia	0.0017 kg·m ²
Friction constant	0.0001 N·m/rad/s

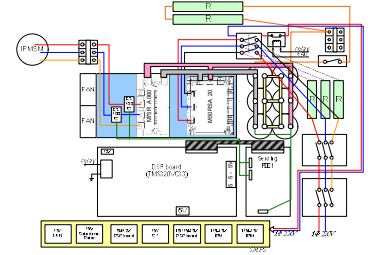
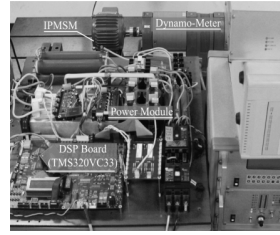


그림.3 매입형 영구자석 동기 전동기의 구동시스템

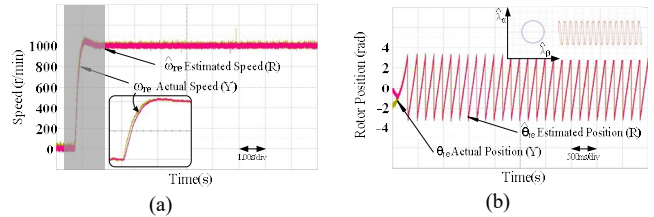


그림.4 IPMSM의 센서리스 제어 방법 실험 결과
(a) 실제 속도와 추정 속도 비교
(b) 실제 회전자 위치와 추정 회전자 위치 비교

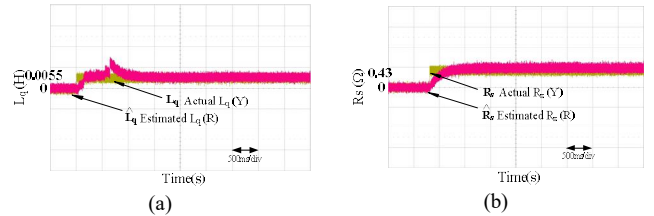


그림.5 IPMSM의 제정수 추정 방법 실험 결과
(a) q축 인덕턴스 실제값과 추정값 비교
(b) 고정자 저항의 실제값과 추정값 비교

표.2 제정수의 실제값과 추정값

Parameters	Real value	Estimated value
L _q	0.0055 H	0.0058 H
R _s	0.43 Ω	0.4459 Ω

4. 결론

본 논문에서는 확장형 회전자 자속 모델 기반의 칼만 필터를 이용한 매입형 영구자석 동기 전동기 센서리스 제어 방법과 센서리스 구동의 성능을 향상 시키기 위한 간단한 제정수 추정 방법을 제안하였다. 제안한 센서리스 제어 기법은 속도지령에 대해 회전자 속도 및 위치를 안정적으로 추정 할 수 있었다. 또한 제안한 제정수 추정 방법은 추정한 값이 실제 값을 잘 추정하는 것을 확인 할 수 있으며, 산업현장에서 본 제안 방법을 적용한다면 유용할 것이라 본다.

Reference

[1] M Hasegawa, K Matsui, "Position sensorless control for interior permanent magnet synchronous motor using adaptive flux observer with inductance identification", IET Electr Power Appl, Vol 3, Iss 3, pp 209~217, 2009

[2] Shi Y, Sun K, Huang L, Li Y, "On-line Identification of Permanent Magnet Flux based on Extended Kalman Filter for IPMSM Drive with Position Sensorless Control", IEEE Trans Ind Electron, Iss 99, pp 1, 2011

[3] Moussa M F, Gaber Y, "Sensorless Control Drive of Permanent Magnet Motor Based on a Simple On-Line Parameter Identification Scheme," Proc of Power Elect Appl (EPE-2011), pp 1-10, Aug Sep 2011

[4] Kan Liu, Qiao Zhang, Jintao Chen, ZQ Zhu, Jing Zhang, "Online Multiparameter Estimation of Nonsalient-Pole PM Synchronous Machines With Temperature Variation Tracking", IEEE Trans. Ind. Electron., Iss. 5, pp.1776-1788, 2011.