데이터 기반 표현 기법을 적용한 영구자석 동기 전동기 제어기 설계

박근훈, 조연식, 이영우*
한양대학교 ERICA,

or311@hanyang.ac.kr, chodash00@hanyang.ac.kr, *stork@hanyang.ac.kr

Data-Driven Representation Approach to Controller Design for Permanent Magnet Synchronous Motors

Park Keunhoon, Cho Yeon Sik, Lee Youngwoo*
Hanyang University ERICA

요 약

본 논문은 모델 정보에 의존하지 않고 입출력 데이터를 직접 활용하여 영구자석 동기 전동기(PMSM)를 안정화하는 데이터 기반 제어기 설계 방법을 제안한다. 기존의 모델 기반 제어 방식은 파라미터 불확실성 및 모델 미스매치로 인해 성능 저하가 발생할 수 있는 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 PMSM 시스템을 준선형 형태로 재구성하고, 수집된 상태 및 입력 궤적 데이터를 통해 폐루프 시스템을 표현하였다. Lyapunov 안정도 이론을 바탕으로 제어기의 안정성 조건을 도출하였으며, 시뮬레이션을 통해 제안된 제어기가 평형점에서 시스템을 성공적으로 안정화하는 것을 입증하였다.

Ⅰ. 서 론

영구자석 동기전동기(PMSM)는 고출력 밀도와 고효율 및 넓은 운전 영역을 제공하여 전기자동차, 로봇 공학 등 현대 산업의 핵심 구동원으로 광범위하게 활용되고 있다. 이러한 PMSM 의 정밀 제어를 위해 모델 예측 제어[1], 확장 상태 관측기[2], 슬라이딩 모드 제어[3]와 같은 모델 기반 제어 전략이 연구되어 왔다.

그러나 모델 기반 방식은 실제 시스템 적용 시 파라미터 불확실성, 모델 미스매치 등으로 인해 성능이 저하되는 한계가 존재한다. 특히 운전 중 발생하는 온도 변화나 노후화는 저항 및 인덕턴스 수치를 변동시켜 제어 정밀도를 해치는 주요 원인이 된다. 이러한 모델 의존성 문제를 해결하기 위해 최근에는 시스템의 물리적 파라미터 정보 대신 실제 수집된 입출력 데이터 궤적만을 활용하는 데이터 기반 제어 기법이 주목받고 있다.

본 논문에서는 PMSM 의 비선형 시스템을 준선형 형태로 재구성하고, 수집된 상태 및 입력 데이터를 활용하여 폐루프 시스템을 표현하는 데이터 기반 제어기 설계 기법을 제안한다. 제안된 기법은 모델 정보 없이도 Lyapunov 안정도 이론을 바탕으로 시스템의 평형점 안정화를 수학적으로 보장하며, 시뮬레이션을 통해 모델 불확실성 환경에서도 강인한 안정화 성능을 보인다.

Ⅱ. 본론

가. PMSM 시스템의 준선형 동역학 모델

제어 대상으로 삼는 PMSM 의 데이터 기반의 제어기 합성을 위해, 먼저 시스템의 비선형 동역학을 분석한다. 시스템의 상태 변수는 기계적 각(x_1), 기계적 각속도(x_2), d 축 전류 (x_3), 그리고 q 축 전류 (x_4) 로 정의된다. PMSM 의 물리적 특성을 반영한 비선형 미분 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다:

$$\begin{aligned}
\frac{dx_1}{dt} &= x_2 \\
\frac{dx_2}{dt} &= \frac{K_m}{J}x_4 - \frac{B}{J}x_2 \\
\frac{dx_3}{dt} &= \frac{1}{L}\left(-Rx_3 + PLx_2x_4 + v_d\right) \\
\frac{dx_4}{dt} &= \frac{1}{L}\left(-Rx_4 - K_Ex_2 - PLx_2x_3 + v_q\right)
\end{aligned} \tag{1}$$

여기서 J는 모터의 관성, B는 점성 마찰 계수, R은 위상 저항, L은 위상 인덕턴스를 나타내며, v_d와 v_q는 각각 d 축 및 q 축의 입력 전압이다.

이러한 비선형 시스템을 데이터 기반 제어기 설계에 적합한 형태로 변환하기 위해, 본 연구에서는 시스템을 준선형 모델로 재구성한다. 이를 위해 다음과 같은 확장 상태 벡터 Z(x)를 정의한다:

$$Z(x) \triangleq \begin{bmatrix} x_2 & x_3 & x_4 & x_2x_3 & x_2x_4 \end{bmatrix}^T \tag{2}$$

정의된 $Z(x)$를 활용하면, PMSM 시스템은 $\dot{x} = Az(x) + Bu$ 형태의 준선형 구조로 다음과 같이 표현된다:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{B}{J} & 0 & \frac{K_m}{J} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & 0 & P \\ -\frac{K_E}{L} & 0 & -\frac{R}{L} & -P & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_2x_3 \\ x_2x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \tag{3}$$

나. 데이터 기반 제어기 설계

본 제어기 설계 과정의 핵심은 전동기의 저항 (R), 인덕턴스 (L), 관성 (J) 등 구체적인 시스템 파라미터에 대한 정보 없이 수집된 입출력 데이터 궤적만을 활용하여 시스템을 표현하는 것이다. 이를 위해 일정 샘플링 시간 (τ) 간격으로 총 T 개로 수집을 실시한다 수집된 데이터는 입력$(U_{0,1,T})$, 상태$(X_{0,T})$, 확장 상태$(Z_{0,T})$,

그리고 상태 미분 $(X_{1,T})$, 궤적 데이터로 다음과 같이 정의한다:

$$
\begin{aligned}
U_{0,1,T} &\triangleq \left[u(t_0) \quad u(t_0+\tau) \quad \cdots \quad u(t_0+(T-1)\tau) \right] \\
X_{0,T} &\triangleq \left[x(t_0) \quad x(t_0+\tau) \quad \cdots \quad x(t_0+(T-1)\tau) \right] \\
Z_{0,T} &\triangleq \left[z(t_0) \quad z(t_0+\tau) \quad \cdots \quad z(t_0+(T-1)\tau) \right] \\
X_{1,T} &\triangleq \left[\dot{x}(t_0) \quad \dot{x}(t_0+\tau) \quad \cdots \quad \dot{x}(t_0+(T-1)\tau) \right]
\end{aligned} \tag{4}
$$

수집된 데이터 궤적을 활용하면, PMSM 시스템의 폐루프 동역학은 물리적 모델 대신 데이터 행렬의 조합인 $\dot{x} = X_{1,T}G(x)Z(x)$ 형태로 표현이 가능해진다[4]. 이러한 데이터 기반 표현을 바탕으로, 시스템의 평형점 안정화를 보장하기 위한 데이터 기반 제어 입력 u를 다음과 같이 정의한다:

$$u = U_{0,1,T}\, Y(x)\, P^{-1}\, Z(x) \tag{5}$$

여기서 행렬 다항식 $Y(x)$는 제어 시스템의 폐루프 안정성을 보장하기 위해 다음의 Lyapunov 안정성 조건을 충족해야 한다:

$$
\begin{aligned}
&P = Z_{0,T}Y(x), \ P \succ 0 \\
&P^{-1}\frac{\partial z}{\partial x}X_{1,T}Y(x) + \left(P^{-1}\frac{\partial z}{\partial x}X_{1,T}Y(x) \right)^{T} \prec 0
\end{aligned} \tag{6}
$$

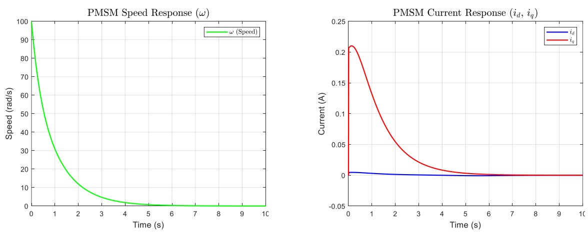
다. 시뮬레이션 결과

데이터 기반 제어기를 설계하기 위해 사전 단계에서 시스템에 가우시안 분포의 입력을 인가하여 시스템 출력 데이터를 수집하였으며, 데이터 수집조건은 표 1와 같다.

표 1. 데이터 수집 조건

데이터 취득 파라미터	
입력 데이터	가우시안 (평균: 0, 분산: 0.001)
샘플링 속도	2 Hz
시뮬레이션 시간	3 s

그림 1 의 시뮬레이션 결과, 제안된 제어기 적용 시 기계적 각속도 (x_2)와 d-q 축 전류 (x_3, x_4) 모두 초기 오차를 극복하고 목표 평형점으로 신속하게 수렴함을 확인하였다. 이는 모델 파라미터 정보가 없는 불확실한 환경에서도 수집된 궤적 데이터만을 활용하여 PMSM 시스템의 점근적 안정성을 효과적으로 확보할 수 있음을 입증한다.



(a) (b)

그림 1. 데이터 기반 제어기 시뮬레이션 결과
(a) 기계적 각속도 (b) d-q 축 전류

Ⅲ. 결론

본 연구에서는 영구자석 동기전동기(PMSM)의 수집된 데이터를 직접 활용하여 시스템을 안정화하는 데이터 기반 제어 기법을 제안하였다. 비선형 동역학을 준선형 형태로 표현하였으며, Lyapunov 안정도 이론을 적용하여 모델 정보 없이도 점근적 안정성을 보장하는 데이터 기반 제어 조건을 도출하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 제어기가 각속도와 전류를 목표 평형점으로 수렴시키는 것을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025 년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(No.RS-2025-02214408, 산업혁신인재성장지원사업)과 2025 년도한국 정부 [산업통상자원부] (직류그리드에너지혁신연구센터)의 재원으로 한국에너지기술평가 (KETEP)의 지원 (20224000000160, DC 그리드 에너지 혁신연구센터)을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] M. Habibullah, D. D.-C. Lu, D. Xiao, and M. F. Rahman, "A simplified finite-state predictive direct torque control for induction motor drive," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 6, pp. 3964-3975, June 2016.

[2] H. Liu and S. Li, "Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 2, pp. 1171-1183, Feb. 2012.

[3] X. Zhang, L. Sun, K. Zhao, and L. Xu, "Nonlinear speed control for PMSM system using sliding-mode control and disturbance compensation techniques," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 3, pp. 1358-1365, Mar. 2013.

[4] M. Guo, C. De Persis, and P. Tesi, "Learning control for polynomial systems using sum of squares relaxations," in *Proc. 59th IEEE Conf. Decis. Control (CDC)*, 2020, pp. 4403-4408.