

영구자석형 스텝핑 모터의 코깅 토크 저감을 통한 속도 추종 성능 개선

강동규*, 김원희*, 최인덕*, 신동훈*, 정정주**
 한양대학교 전기공학과*, 한양대학교 전기생체공학부**

Improvement of tracking performance of PMSM through reduction of cogging torque

Dong Gyu Gang*, Wonhee Kim*, Induk Choi*, Donghoon Shin*, Chung Choo Chung**
 Department of Electrical Engineering, Hanyang University*
 Division of Electrical and Biomedical Engineering, Hanyang University**

Abstract - 영구자석형 스텝핑 모터 (Permanent Magnet Stepping Motor, PMSM)에서는 그 구조적 특징으로 인하여 필연적으로 코깅 토크 (cogging torque)가 발생한다. PMSM의 성능을 저하시키는 코깅 토크를 제거하기 위하여 Internal Model Principle (IMP)를 제안하였다. IMP를 사용하기 위해 Field-Oriented Control (FOC) 기반의 SISO 시스템을 구성하고 IMP를 PI 제어기에 병렬로 추가하였다. 모의 실험 결과로 코깅 토크로 인한 속도 리플이 효과적으로 제거됨을 보였다.

인덕턴스, B 는 점성 마찰 계수, J 는 관성 모멘트, K_m 은 모터 토크 상수, T_{dm} 은 코깅 토크 상수, 그리고 N_r 은 모터 치차 수를 의미한다.

1. 서 론

영구자석형 스텝핑 모터 (Permanent Magnet Stepping Motor, PMSM)는 위치 정밀도, 토크 대 관성비 등에서 좋은 성능을 보여 여러 산업 장비에서 많이 사용되며 그 응용 분야가 점차 늘어나고 있는 모터이다. 하지만 PMSM 는 그 구조적 특징으로 인해 구동 시 속도 리플이 발생하게 된다.

2.2 Field Oriented Control(FOC)

식 (1)을 살펴보면 ω 는 i_q 의 영향만을 받는 것을 알 수 있다. 여기서 i_d 를 0으로 유지하고 i_q 만을 이용하여 ω 를 제어하는 FOC 기법을 사용할 수 있다. 식 (1)에서 전기적 부분의 동역학에 대해 FOC 가 적용된 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_d &= -N_r \omega i_q \\ v_q &= L \frac{di_q}{dt} + R i_q + K_m \omega \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)의 시스템에서 i_q 는 입력이고 ω 를 feedback 받는다면 v_d 와 v_q 가 계산 가능하며, D-Q 변환을 이용하면 v_d 와 v_q 를 구할 수 있다. 식 (1)의 기계적인 부분을 통해 i_q 와 ω 의 SISO 구조의 동적 모델 구성이 가능하다.

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= -\frac{B}{J}\omega - \frac{K_m}{J}i_q - \frac{T_{dm}}{J}\sin(4N_r\theta) \\ y &= \omega \end{aligned} \quad (3)$$

위 식에서 $\sin(4N_r\theta)$ 가 포함된 코깅 토크 부분을 외란으로 생각할 수 있고, 이 항을 제외한 나머지 부분의 전달 함수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\omega}{i_q} = G(s) = \frac{K_m/J}{s + B/J} \quad (4)$$

3. 제어기 설계

제어기 설계는 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 하나는 외란 성분인 코깅 토크를 제거하기 위한 IMP 설계, 다른 하나는 각속도 ω 를 추정하기 위한 관측기 설계이다.

3.1 IMP 설계

식 (4)의 전달 함수에서 출력이 입력을 추종하게 하기 위하여 간단한 비례-적분(PI) 제어기를 설계하였다.

$$\begin{aligned} u_{PI} &= \left(K_P + K_I \frac{1}{s} \right) (\omega^d - \omega) \\ &= D(s)e \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 K_P 는 비례 이득, K_I 는 적분 이득이고, ω^d 는 각속도 프로파일, ω 는 관측된 각속도이며 e 는 각속도 오차이다. 식 (3)에서 코깅 토크에 해당하는 성분은 SISO 구조에서 외란으로 취급한다. 이 코깅 토크는 주파수가 변하는 sin 성분으로 볼 수 있으며 그 주파수는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{d4N_r\theta(t)}{dt} = 4N_r\omega(t) \quad (6)$$

식 (6)의 주파수를 갖는 외란 성분을 제거하기 위해 다음의 IMP를 설계하였다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 4N_r\omega(t) \\ -4N_r\omega(t) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_I \end{bmatrix} e \\ u_{IMP} &= [0 \ 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 설계된 IMP를 PI 제어기에 병렬로 연결하여 코깅 토크를 제

2. 모 델

2.1 PMSM의 동적 모델

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= (v_d - R i_d + N_r L \omega i_q) / L \\ \frac{di_q}{dt} &= (v_q - R i_q - N_r L \omega i_d - K_m \omega) / L \\ \frac{d\omega}{dt} &= (K_m i_q - B \omega - T_{dm} \sin(4N_r\theta)) / J \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega \end{aligned} \quad (1)$$

본 논문에서 사용한 PMSM의 동적 모델은 (1)과 같다 [6]. (1)의 PMSM 모델에 2 D-Q 변환을 적용하면 (1)이 유도된다. 여기서 상태 변수 i 는 전류, ω 는 각속도, θ 는 각위치이며 입력 v 는 전압이다. 첨자 a, b 는 2상 PMSM의 A상, B상을 구분하고 d, q 는 각각 direct 성분, quadrature 성분을 나타낸다. 파라미터 R 은 상 권선 저항, L 은 상 권선

거할 수 있다.

3.2 관측기 설계

PMSM의 응용에 있어 각위치 θ 를 측정하는 엔코더만을 사용하는 것이 일반적이다. 본 논문에서 사용한 제어 기법에서는 ω 를 필요로 하기 때문에 관측기를 설계한다.

식 (3)에서 외란을 제외한 나머지 기계적 모델로부터 Luenberger 관측기를 설계하였다.

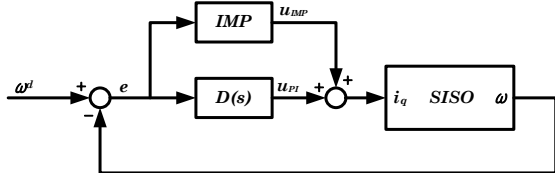
$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\theta}}{dt} &= \omega + l_1(\theta - \hat{\theta}) \\ \frac{d\hat{\omega}}{dt} &= -\frac{B}{J}\hat{\omega} + \frac{K_m}{J}i_q + l_2(\theta - \hat{\theta}) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 l_1, l_2 는 관측기 이득이다. 이 관측기에서 관측 오차의 모델은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{\theta}}{dt} &= -l_1\tilde{\theta} + \tilde{\omega} \\ \frac{d\tilde{\omega}}{dt} &= -l_2\tilde{\theta} - \frac{B}{J}\tilde{\omega} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (8)은 관측 가능한 모델이기 때문에 관측기 이득을 (9)를 안정하게 만드는 이득 l_1, l_2 가 항상 존재하며, 안정한 범위 내에서 이득을 선택하게 되면 관측 오차는 0으로 수렴하게 된다.

앞서 설계한 PI 및 IMP, 관측기가 포함된 전체 폐루프 시스템을 아래 그림 1에 나타내었다. 관측기는 SISO 블록 내에 포함되어 있다.



〈그림 1〉 전체 폐루프 시스템

4. 모의 실험

본 논문에 제시된 제어기의 성능을 평가하기 위하여 모의 실험을 수행하였다. 모의 실험에 사용된 PMSM의 각 파라미터의 값은 표 1에 정리하였다.

〈표 1〉 모의 실험에 사용된 파라미터 값

파라미터(단위)	값	파라미터(단위)	값
R (Ω)	1.8	K_m ($N \cdot m \cdot A$)	0.19
L (H)	2.5×10^{-3}	T_{dm} ($N \cdot m$)	0.09
B ($N \cdot m \cdot s / rad$)	8.0×10^{-4}	N_r	50
J ($Kg \cdot m^2$)	4.5×10^{-5}		

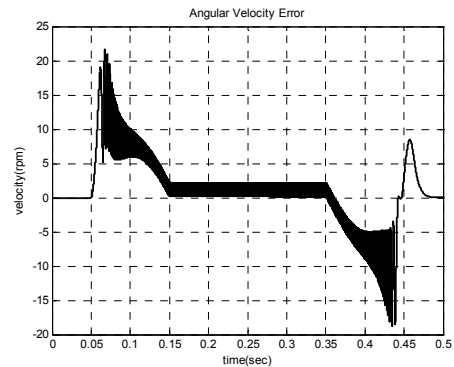
본 모의 실험에는 PMSM을 정지 상태에서 약 1340rpm의 등속 구간까지 가속하였다가 다시 감속하여 정지하는 속도 프로파일을 사용하였다. 그림 2는 PI 제어기만을 사용하였을 경우의 각속도 오차이다. 코깅 토크의 리플이 발생하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 3은 PI에 IMP가 추가된 제어기의 각속도 오차이다. IMP의 효과로 $4N_r\omega$ 주파수를 갖는 sin 성분의 오차가 사라졌음을 알 수 있다. 그림 4에서는 속도 프로파일을 추종하는 시스템의 성능을 보이고 있다.

5. 결 론

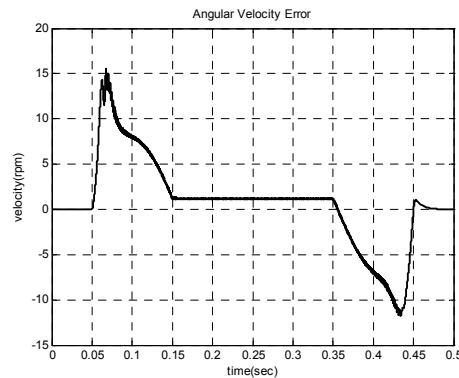
본 논문에서는 PMSM의 속도 추종 성능 향상을 위하여 IMP를 제안하였다. PMSM의 구조적 특징으로 인해 발생하는 속도 리플의 주 원인인 코깅 토크를 제거하기 위하여 IMP를 사용하였다. FOC를 기반으로 하여 i_q 와 ω 의 SISO 시스템을 만들었고, 코깅 토크 성분을 외란으로 간주하였다. IMP를 PI 제어기에 병렬로 적용하여 시간에 따라 변하는 주파수를 갖는 코깅 토크 성분을 제거하였다. 각속도를 추정하기 위하여 Luenberger 관측기를 설계하여 적용하였다. 모의 실험 결과 IMP가 코깅 토크를 제거하여 속도 리플을 감소시켰음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 통해 PMSM을 사용하는 시스템의 속도 추종 성능 향상을 기대할 수 있다.

〈참 고 문 헌〉

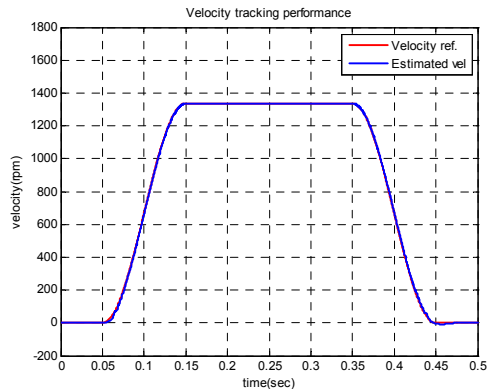
[1] C. Studer, A. Keyhani, T. Sebastian, and S. K. Murthy, "Study of cogging torque in permanent magnet machines," in Proc. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, New Orleans, LA, pp. 42 - 49, October 1997.
 [2] L. Touzhu and G. Slemon, "Reduction of cogging torque in permanent magnet motors," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 24, pp. 2901-2903, 1988.
 [3] D. Chen and B. Paden, "Nonlinear adaptive torque-ripple cancellation for step motors," *Proc. of the 29th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 3319-3324, Dec. 1990.
 [4] W. D. Chen, K. L. Yung, and K. W. Cheng, "Profile tracking performance of a low ripple hybrid stepping motor servo drive," *IEE Proc. on Control Theory and Applications*, vol. 150, pp. 69-76, 2003.
 [5] Weizhe Qian, Sanjib K. Panda, and Jian-Xin Xu, "Torque ripple minimization in PM synchronous motors using iterative learning control," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol.19, no.2, pp. 272-279, March 2004.
 [6] T. Kenjo, *Stepping Motors and Their Microprocessor Control*, oxford:Clarendon, 1994.



〈그림 2〉 PI만을 사용한 경우의 각속도 오차



〈그림 3〉 PI와 IMP를 사용한 경우의 각속도 오차



〈그림 4〉 PI와 IMP를 사용한 경우의 각속도 추종 성능