DC 모터의 전류 제어를 위한 역기전력 관측기 설계

최대식*, 김인혁*, 손영익*
*명지대학교 전기공학과

Design of a Back-EMF Observer for Current Control of DC Motor

Dae-Sik Choi*, In-Hyuk Kim*, Young-Ik Son*
*Department of Electric Engineering, Myongji University

ABSTRACT

DC 모터의 전류 제어는 회전에 의해 발생하는 역기전력을 외란으로 취급하여 역기전력을 보상하는 방법이 많이 사용된다. 본 논문에서는 속도 센서를 사용할 수 없는 모터 응용 분야에서 상태 관측기를 사용하여 전류 제어기를 구성하는 문제를 다룬다. 제안된 관측기는 간단한 1차 모델에 대한 PI 관측기로 설계되며 역기전력을 추정하는 형태로 구성된다. 실험을 통해 제안한 관측기가 1차 모델만을 고려하여 설계되었음에도 DC 모터의 불확실성에 강인한 성능을 보임을 확인한다.

1. 서 론

DC 모터의 토크 제어는 전류와 토크의 비례관계를 이용한 전류 제어 방법이 널리 사용되며, 전류 제어를 위해 회전 속도에 따라 변하는 역기전력을 외란으로 취급하여 PI 제어기와 속도를 측정하여 역기전력을 보상하는 항을 함께 사용한 제어 방법이 많이 사용되고 있다.[1-2] 하지만 속도 측정을 위한 센서를 사용하기 어려운 경우에는 역기전력을 전향 보상 할 수 없으므로 원하는 토크 응답을 얻기 힘들다.

본 논문에서는 시스템의 불확실성으로 인한 속도 추정의 오차가 발생하는 경우에 대비하여 시스템의 불확실성 및 미지입력에 강인한 PI 관측기를 이용한 외란 관측기를 제안한다.[3] 제안하는 관측기는 속도를 상태 변수로 포함하지 않는 1차 모델에 대한 PI 관측기로 설계되며 역기전력을 추정하는 형태로 구성된다. 2.2절에서는 제안하는 관측기의 설계에 대해 알아보고 3장에의 모의실험을 통해 제안된 관측기의 성능을 확인한다.

2. 본 론

2.1 전류 제어기 설계

DC 모터의 수학적 모델은 식 (1)-(2)와 같이 쓸 수 있다.

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_b w_m \tag{1}$$

$$\tau = K_t i_a = J_m \frac{dw_m}{dt} + B_m w_m + T_L \tag{2}$$

위 식에서 v_a는 입력전압, R_a는 전기자 저항, L_a는 인덕턴스, w_m 은 회전속도를 나타낸다. 토크 τ는 전기자 전류 i_a는 비례하여 발생하며 K_b, K_t, J_m, B_m은 모터의 역기전력 상수, 토크 상수, 관성 질량, 마찰 계수를 나타내며 T_L은 부하 토크이다.

본 논문에서는 식 (2)의 전류와 토크의 관계를 이용하여 i_a를 제어함으로써 τ를 제어하는 방식을 사용한다(그림 1 참고). 전류 제어기는 PI 제어기를 기반으로 역기전력을 제거하는 항을 추가적으로 사용하여 다음과 같이 설계된다.

$$v_a(s) = \frac{K_p s + K_i}{s}(i_a^* - i_a) + K_b w_m \tag{3}$$

식 (3)에서 제어기 이득을 $K_p = w_c L_a$, $K_i = w_c R_a$로 설정하면 폐루프 시스템의 전달함수는 식 (4)와 같고 시스템이 원하는 응답을 같도록 w_c를 설계한다.

$$\frac{i_a(s)}{i_a^*(s)} = \frac{w_c}{s + w_c} \tag{4}$$

위와 같이 폐루프 시스템이 1차 시스템이 되도록 제어기를 설계하면 τ의 응답을 간단하게 설계할 수 있고 2차 시스템에서 나타나는 오버슈트 등에 의한 토크 리플을 고려하지 않아도 되는 장점이 있다.

한편, DC 모터의 속도의 측정이 어려운 분야에서는 역기전력의 전향 보상을 할 수 없으므로 원하는 토크 응답을 얻기 힘들다. 따라서 본 논문에서는 DC 모터 전류제어를 위한 역기전력 관측기를 제안한다.

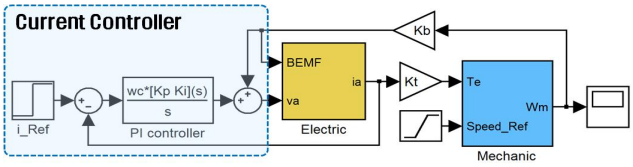

그림 1 DC 모터 전류 제어기 구조

2.2 역기전력 관측기 설계

상태를 추정하기 위한 상태 관측기의 사용은 센서의 사용이 불가능한 경우, 비용 절감이나 센서의 고장 등에 대비하여 필연적이다. 따라서 본 논문에서는 불확실성 및 미지입력이 존재하는 시스템에 대해 상태 추정 성능이 우수한 PI 관측기를 사용한다. 대상 시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Nf \\ \dot{f} &= 0 \\ y &= Cx \end{aligned} \tag{5}$$

위 식에서 A, B, C는 각각 시스템 행렬, 입력 행렬, 출력 행렬을 나타내며, N은 불확실성을 나타내는 행렬이다. x는 시

스템의 상태변수이고, f는 시스템의 불확실성을 나타낸다. 식 (5)에 대해 설계한 관측기는 아래와 같다.

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + N\hat{f} + G_1(y-\hat{y}) \\ \dot{\hat{f}} &= G_2(y-\hat{y})\end{aligned} \tag{6}$$

오차변수를 $[e_x\, e_f]^T = [x-\hat{x}\; f-\hat{f}]^T$로 정의하면 식 (7)의 오차 시스템을 얻을 수 있고 식 (6)의 관측기 이득 G_1, G_2는 오차 시스템이 안정하도록 설계하면 된다.

$$\begin{pmatrix}\dot{e}_x \\ \dot{e}_f\end{pmatrix} = \begin{bmatrix}A-G_1C & -N \\ -G_2C & 0\end{bmatrix}\begin{pmatrix}e_x \\ e_f\end{pmatrix} \tag{7}$$

본 논문에서 역기전력을 외란으로 보고 1차 식 (1)을 사용하여 관측기를 설계한다. 다음 장의 모의실험에서 제안된 관측기의 성능을 시험한다.

3. 모 의 실 험

모의실험을 통해 제안된 방법과 식 (2)를 추가적으로 사용하여 설계된 Luenberger 관측기 및 2차 PI 관측기의 성능을 비교한다. 모의실험에서 사용한 DC 모터 파라미터는 표 1과 같고 주어진 파라미터는 Maxon사의 RE65 모델을 참고하였다.

표 1 DC 모터 공칭 파라미터
Table 1 DC motor nominal parameter

R_a	$0.0821[\Omega]$	L_a	$0.0308[mH]$
J_m	$0.129[gm^2]$	B_m	$0.11[mNm/(rad/s)]$
K_b	0.0554	K_t	0.0554

본 모의실험에서 T_L은 $0.15[\text{sec}]$에서 $0.3[Nm]$로 인가하였으며 목표 전류 i_a^*가 $5[A]$인 경우를 고려하였다. 파라미터의 불확실성은 L_a는 5배, R_a는 2배, K_b는 0.5배 하였다. 식 (4)의 PI 제어기항은 $w_c = 500$으로 설계하였으며 아래와 같다.

$$C(s) = \frac{0.0154s + 41.05}{s} \tag{8}$$

그림 2, 3, 4에서 각 관측기와 제어 성능을 비교하였다. 비교에 사용된 관측기는 식 (1)-(2)를 모두 사용한 모델이며 각각 Luenberger, 2차 PI 관측기이며 모든 관측기의 극점은 -2500으로 설계하였다. 그림에서 제안한 관측기가 불확실성에 대하여 성능이 우수함을 확인할 수 있다. 특히, 본 논문에서 제안한 관측기의 경우 1차 모델만을 사용했으므로 설계상의 간단함을 장점으로 얻을 수 있다.

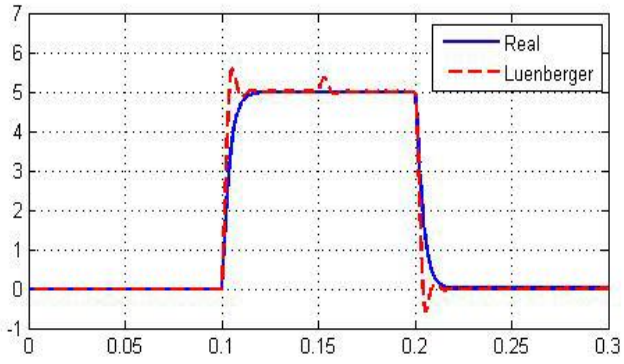

그림 2 전류 제어 성능 비교 (Luenberger 관측기)

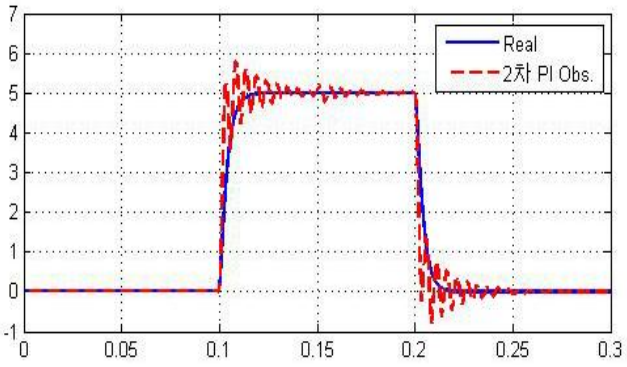

그림 3 전류 제어 성능 비교 (2차 PI 관측기)

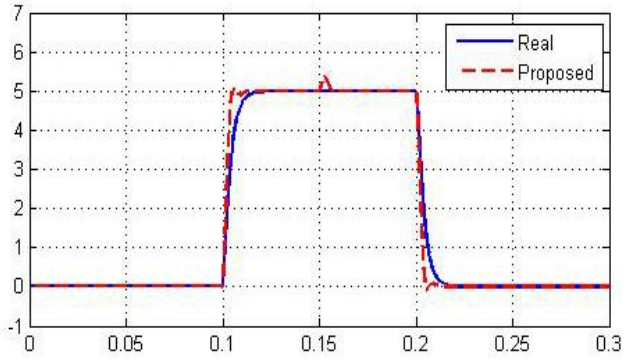

그림 4 전류 제어 성능 비교 (제안된 관측기)

4. 결 론

본 논문에서는 DC 모터 속도 측정이 어려운 경우 전류 제어를 위해 사용할 수 있는 역기전력 관측기 설계 문제를 다루었다. 제안된 관측기는 역기전력과 파라미터의 불확실성을 외란으로 보고 함께 추정한다. 제안하는 관측기는 1차 모델을 사용하여 설계가 간단함에도 성능 면에서 2차 모델을 사용한 관측기에 비해 개선될 수 있음을 모의실험으로 확인하였다.

감사의 글

본 결과물은 지식경제부의 에너지자원인력양성사업의 지원으로 명지대학교 분산전원복합운용연구센터를 통해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, *Modern Control Systems 10th Edition,* Pearson Education, 2004.

[2] M.Kurishige, T. Kifuku, "Static Steering Control of VSI-PWM inverters", *Mitsubishi Electric Advance,* pp. 18-20, 2001.

[3] S. Beale, B. Shafai, "Robust control systems design with a proportional integral observer", *Int. J. Control,* vol. 50, no. 1, pp. 97-111, 1989.