

직류서보전동기의 속도제어를 위한 퍼지-관측기 설계

김명준\*, 윤광호, 김상훈, 남문현, 김낙교  
 건국대학교 전기공학과

Design of a Fuzzy-Observer for Speed Control applied to DC Servo Motor

Myung-Joon Kim\*, Kwang-Ho Yun, Sang-Hoon Kim, Moon-Hyon Nam, Lark-Kyo Kim  
 Department of Electrical Engineering, Konkuk University

**Abstract** - In this paper, Fuzzy-Observer is designed to control the speed of DC Servo Motor. Fuzzy-Observer estimates the speed of DC Servo Motor with the measurement of the amature current. The constant speed and variable speed experiments are excuted to evaluate the performance of Fuzzy- Observer.

1. 서 론

현재 직류 서보 전동기는 회전자 관성이 매우 적고 응답 특성이 우수하며 전기자 전류를 독립적으로 제어할 수 있어 전동기의 토오크 제어와 속도 제어가 매우 용이함으로 많은 분야에서 사용되고 있다[1]. 이러한 직류서보 전동기의 속도제어를 위해서는 엔코더(Encoder)나 레졸버(Resolver)와 같은 센서가 사용되고 있다. 그러나 이러한 센서는 고가일 뿐만 아니라 별도의 복잡한 하드웨어가 제어기에 구성되어야 하며 진동 및 습도 등의 주위 환경에 대한 영향으로 잡음발생 및 신뢰성의 문제가 발생되어 적용함에 있어 제한을 받게 된다. 따라서, 직류 전동기를 사용함에 있어서 속도 센서를 사용하지 않고 제어를 수행하는 것이 유리하며 이러한 경우에 속도 추정 알고리즘이 필요하기 때문에 일반적으로, 회전자 자속과 속도를 추정하기 위하여 관측기를 이용하는 경우가 많다.

관측기는 제어대상의 수학적 모델을 근거로 하여 설계되나 실제로 관측기 설계 시 제어대상이 가질 수 있는 여러 가지 비선형성들이 고려되지 않는 경우 모델링 오차가 발생 될 수 있다. 이러한 경우 관측기는 상태변수 추정에서 실상대상에 대해 오차를 수반하며 부정확한 상태 추정이 되기 쉽다. 따라서 관측기 설계 시 외란의 영향을 최소화하여 관측사양을 만족할 수 있는 기법이 필요하게 되며 폐루프 시스템의 과도응답특성을 좌우할 수 있으므로 신중히 설계되어야 한다[2].

관측기 설계 시에 고려해야 할 사항으로는 모델의 불확실성, 추정할 시스템과 구성된 관측기 사이의 초기 상태 불일치로 인한 동작 특성, 시스템에 인가되는 알 수 없는 외란으로 인한 추정 오차의 영향 감소, 견실한 안정도 및 성능의 요건 충족 등이 있다.

관측기의 대표적인 예로는 적응 관측기와 루엔버거(Luenberger) 관측기가 있다[2][3][4].

적응 관측기는 자속 추정을 위한 선형 관측기와 속도 추정을 위한 적응 추정기가 직렬로 연결되어 있다. 이러한 직렬구조는 자속추정 오차가 속도추정 오차를 증폭시키고, 속도추정 오차가 다시 자속추정 오차를 증폭시키는 상호오차 증폭문제가 있다[5]. 그러나, 루엔버거 관측기는 회전자 자속과 속도를 동시에 추정하므로, 상호오차 증폭문제를 갖고 있지 않다. 하지만, 루엔버거 관측기는 적응 관측기보다 차수가 높아 계산이 복잡하므로, 차원을 축소시켜 계산량을 줄일 필요가 있다[3][5].

따라서 본 논문에서는 이러한, 모델의 불확실성이나 전

실한 안정성 보장 및 계산을 간단하게 하기 위해 퍼지제어기법을 관측기에 이용하였다.

퍼지제어는 애매성을 포함한 인간의 경험과 지식을 IF-THEN 형식으로 표현하고, 퍼지추론을 통하여 시스템에 적용하는 방식이다. 이는 정확한 수학적 모델링을 필요로 하지 않고 외란, 부하변화 등의 비선형 특성에 강인하기 때문에 여러 분야에 걸쳐 널리 사용되고 있다 [6][7].

본 논문에서는 직류서보전동기의 속도제어에 있어서 속도센서를 사용하지 않고 직류서보전동기의 전기자전류를 측정하여 설계 된 퍼지관측기를 이용하여 속도를 추정하였다.

본 논문에서 설계된 퍼지관측기의 성능을 평가하기 위하여 정속도와 가변속도에 있어서의 특성을 속도센서가 있는 제어방식과 퍼지관측기를 이용한 제어방식의 출력을 비교실험하여 그 특성을 비교하였다.

2. 퍼지관측기 설계

2.1 직류서보전동기 모델링

본 논문에서 사용된 직류서보전동기의 모델은 그림 2.1과 같다.

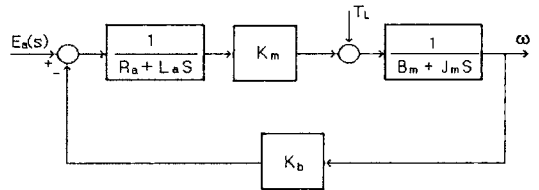


그림 2.1 직류서보전동기 시스템

그림 2. 1은 직류서보전동기의 시스템을 나타낸 것으로 회로방정식을 구하면 식(2.1)과 같이된다.

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \tag{2.1}$$

여기서,  $e_a$ ,  $i_a$ ,  $R_a$ ,  $L_a$ 는 각각 전기자 회로의 입력전압, 전기자전류, 저항, 인덕턴스이며,  $e_b$ 는 속도에 의한 역기전력으로서 식(2.2)와 같이 표현된다.

$$e_b(t) = k_b \omega_m(t) = k_b \frac{d\theta_m(t)}{dt} \tag{2.2}$$

$k_b$  : 연기전력 상수       $\omega_m$  : 전동기각속도  
 전동기에 의해 발생하는 토오크는 식(2.3)과 같이 나타낸다.

$$T_m(t) = k_m i_a(t) \tag{2.3}$$

발생 토오크는 관성, 마찰 그리고 부하 토오크에 의해 식(2.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_m(t) = J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B_m \frac{d\theta_m(t)}{dt} + T_L(t) \tag{2.4}$$

이 시스템에서 상태변수는  $i_a(t)$ ,  $\omega_m(t)$ 로 정의될 수 있

다. 따라서, 직류서보전동기의 상태방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a(t) \\ \dot{\omega}_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{k_b}{L_a} \\ \frac{k_m}{J_m} & -\frac{B_m}{J_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ \omega_m(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ -\frac{1}{J_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a(t) \\ T_L(t) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$y(t) = [0 \ 1] \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a(t) \\ \dot{\omega}_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2078.431 & -22.059 \\ 1578.947 & -160.15 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ \omega_m(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 980.392 \\ -751.88 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a(t) \\ T_L(t) \end{bmatrix}$$

## 2.2 상태관측기(State Observer)

본 논문에서는 상태관측기로 Luenberger 관측기를 사용한다. 일반적으로 상태관측기는 측정할 수 없는 경우에 측정신호로부터 상태변수를 관측해내야 하며, 출력신호와 입력신호로부터 상태  $x(t)$ 에 가까운 신호  $\hat{x}(t)$ 를 만들어내는 시스템으로서  $t \rightarrow \infty$ 일 때  $\hat{x}(t) \rightarrow x(t)$ 가 되는 성질을 갖는다.

본 논문에서 사용한 관측기의 상태방정식은 식(2.7)과 같다.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) \quad (2.7)$$

$\hat{x}(t)$ 가  $x(t)$ 와 서로 등가신호로 확인하려면 두 신호를 비교해 보면 되지만 실제  $x(t)$ 를 알 수 없으므로 두 신호 대신에 대상시스템의 측정 출력  $y(t)$ 와 관측출력  $\hat{y}(t)$ 를 비교하게 된다. 관측출력은 식(2.8)과 같다.

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \quad (2.8)$$

여기서, 식(2.8)이 측정출력  $y(t)$ 와 다르다면  $\hat{x}(t)$ 는  $x(t)$ 와 다를 것이고,  $\hat{y}(t)$ 와  $y(t)$ 가 같으면  $\hat{x}(t)$ 와  $x(t)$ 는 같아지므로 출력관측오차  $\hat{y}(t) - y(t)$ 에 관한 정보를 고려하여 식(2.7)의 상태관측기에서 상태관측오차를 줄이도록 상태관측기를 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) - L[\hat{y}(t) - y(t)] \\ &\rightarrow \dot{\hat{x}}(t) = (A - LC)\hat{x}(t) + LCx(t) + Bu(t) \end{aligned} \quad (2.9)$$

식(2.9)에서  $L$ 은 관측기의 상태관측오차를 보정하기 위해 도입한 관측기 이득행렬이다. 따라서, 식(2.7)과 식(2.9)에 의해서 상태관측오차는 다음 식(2.10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{\hat{x}}(t) - \dot{x}(t) \\ &= (A - LC)\hat{x}(t) + LCx(t) + Bu(t) - Ax(t) - Bu(t) \\ &= (A - LC)(\hat{x}(t) - x(t)) \\ &= (A - LC)e(t) \end{aligned} \quad (2.10)$$

여기서  $A - LC$ 가 안정하도록 관측기 이득행렬  $L$ 을 선택하면 초기관측오차  $e(0) = \hat{x}(0) - x(0)$ 가 있더라도  $t \rightarrow \infty$ 일 때,  $e(t) \rightarrow 0$  즉,  $\hat{x}(t) \rightarrow x(t)$ 의 성질을 만족하는 관측기가 된다.

## 2.4 퍼지관측기(Fuzzy Observer)

본 논문에서 사용된 퍼지관측기를 이용한 직류서보전동기 속도제어 시스템은 그림 2.2와 같이 구성되어 있다.

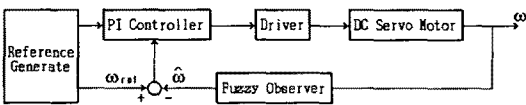


그림 2.2 직류서보전동기 속도제어 시스템

앞에서 제안한 상태관측기의  $A - LC$ 에서 행렬  $L$ 을 퍼지 논리를 이용하여 퍼지관측기를 구성한다. 그리고 이를 이용하여 우리가 원하는 상태를 추정한다.

실제 시스템을 상태방정식으로 표현하면 식(2.11)과 같다.

$$\dot{x}(t) = A_1x(t) + B_1u(t)$$

$$y(t) = C_1x(t) \quad (2.11)$$

위 식에서  $(A_1, C_1)$ 는 관측가능하고  $x(t)$ 는 상태벡터,  $u(t)$ 는 입력벡터,  $y(t)$ 는 출력벡터이다. 먼저 퍼지관측기가 부분적으로 관측가능하다고 하고 각각 규칙의 후건부의 시스템의 입출력 관계는 선형상태방정식으로 표현되며, 부분적 상태관측기의 설계는 식(2.12)와 같다.

$i$ 번째 관측자 규칙은

IF  $z_1(t)$  is  $F_{i1}$  and  $\dots$  and  $z_g(t)$  is  $F_{ig}$

THEN  $\hat{x}(t) = A_i\hat{x}(t) + B_iu(t) - G_i[\hat{y}(t) - y(t)]$

$$\dot{\hat{x}}(t) = C_i\hat{x}(t) \quad (2.12)$$

이고,  $F_{ij}$  ( $j=1, 2, \dots, g$ )는 퍼지집합,  $l$ 은 퍼지 규칙의 개수,  $z_l(t)$ 는 전건부 변수,  $G_i$  ( $i=1, 2, \dots, g$ ),  $y(t)$ 와  $\hat{y}(t)$ 는 각각 관측오차 행렬, 실제시스템, 퍼지관측기의 최종출력이다.

퍼지관측기의 최종 추정상태는

$$\hat{x}(t) = \sum_{i=1}^g w_i(A_i\hat{x}(t) + B_iu(t) + G_i[\hat{y}(t) - y(t)]) \quad (2.13)$$

이고, 퍼지관측기의 최종 출력은 식(2.14)와 같이 표현된다.

$$\hat{y}(t) = C_i\hat{x}(t) \quad (2.14)$$

여기서,  $w_i$ 는 퍼지관측기의  $i$ 번째 가중치로 다음과 같이 표현된다.

$$w_i[x(t)] = \mu_i[x(t)] / \sum_{j=1}^g \mu_j[x(t)]$$

$\mu_i$  -  $i$ 번째 규칙의 전건부의 적합도

퍼지관측기의 후건부를 Luenberger 타입으로 설계하면,  $i$ 번째 규칙은

IF  $z_1$  is  $F_{i1}$  and  $\dots$  and  $z_g$  is  $F_{ig}$

THEN,  $\hat{x}(t) = A_i\hat{x}(t) + B_iu(t) + L_i(y - C_i\hat{x})$  (2.15)

이며, 만일 관측기 이득행렬  $L_i$ 가 안정하다면, 다른 초기 조건에 대해서도  $\hat{x}$ 는  $x$ 를 따르게 된다.

추정상태오차 벡터는 식(2.16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} e &= x - \hat{x} \\ &= \sum_{i=1}^g w_i(A_i x - B_i u) - \sum_{i=1}^g (A_i \hat{x} - B_i u + L_i(y - C_i \hat{x})) \\ &= \sum_{i=1}^g w_i(A_i - L_i C_i)e \end{aligned} \quad (2.16)$$

## 3. 실험 및 결과고찰

### 3.1 실험결과

그림 3.1과 3.2는 직류서보전동기의 정속도 운전시 출력응답을 센서가 있는 경우와 센서없이 관측기를 이용한 출력응답이며 실험결과는 표 3.1과 같다.

#### (1) 정속도 운전

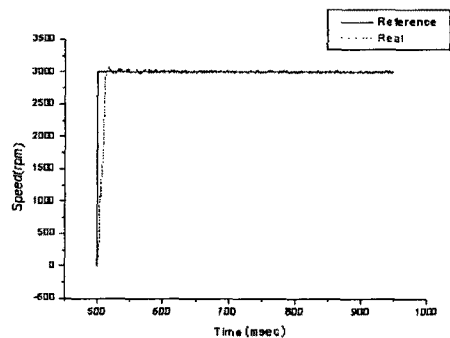


그림 3.1 센서를 이용한 출력응답

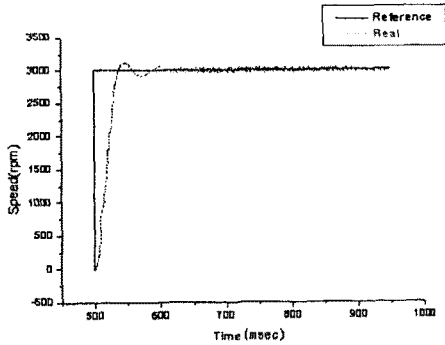


그림 3.2 퍼지관측기를 이용한 출력응답

표 3.1 정속도 운전에 관한 실험결과

	정착시간 (sec)	최대오버슈트 (%)	최대출력 (rpm)	오차 (%)
센서를 이용한 응답	0.07	2.5	3014	0.47
관측기를 이용한 응답	0.17	4.8	3020	0.67

그림 3.3과 3.4는 직류서보전동기의 가변속도 운전시 출력응답을 센서가 있는 경우와 센서없이 관측기를 이용한 출력응답이며 실험결과는 표 3.2과 같다.

(2) 가변속도 운전

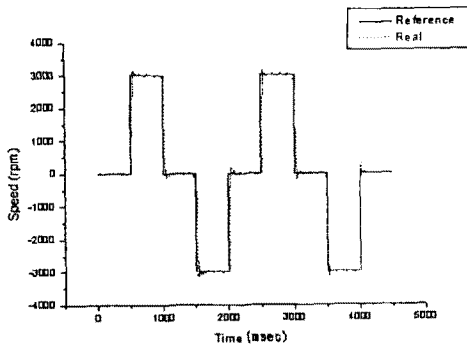


그림 3.3 센서를 이용한 출력응답

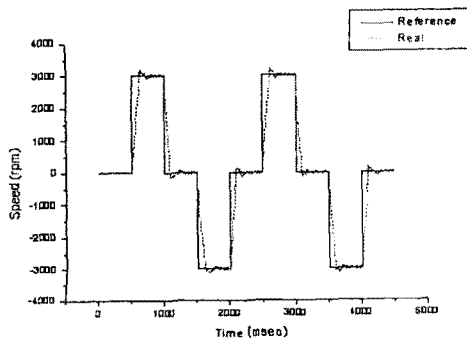


그림 3.4 퍼지관측기를 이용한 출력응답

표 3.2 가변속도 운전에 관한 실험결과

	정회전 (rpm)	역회전 (rpm)	기준입력과 실제출력간의 오차 (%)
센서를 이용한 응답	3021	3018	0.7 ~ 0.6
관측기를 이용한 응답	3065	3060	2.17 ~ 2

3.2 결론

본 논문에서는 직류서보전동기 모델링과 퍼지관측기에 대해서 설명하였고 관측기를 이용한 속도센서 없는 속도 제어를 구현 하였다. 또한, 정속 운전과 가변속 운전 실험을 통해서 센서를 이용한 출력응답과 관측기를 이용한 출력응답을 비교하였으며, 그 결과 정속운전에서는 퍼지 관측기를 이용한 출력응답의 오차와 센서를 이용한 출력응답의 오차가 0.2[%] 차이가 나타났으며 가변속운전에서는 퍼지관측기를 이용한 출력응답이 센서를 이용한 제어시스템에 비교해서 1.57 ~ 1.4 [%] 차이가 나타난다. 따라서 관측기를 이용한 출력응답이 센서를 채용한 제어시스템보다 오차가 다소 있으나 특성이 매우 근접하므로 직류서보전동기의 속도제어에 퍼지관측기를 활용할 수 있음을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Benjamin C. Kuo. "Automatic control system" prentice hall, 1999, pp.174-181
- [2] H.Kubota, K. Matsuse, T.Nakano. "New Adaptive Flux observer of Induction Motor for wide Speed Range Motor Drives". IEEE IECON '90, pp.921-926, 1990
- [3] T. Orłowska-Kowalska. "Application of extended Luenberger observer for flux and rotor time-constant estimation in induction motor drives." IEEE Proceedings, Vol. 136, Pt. D, No. 6, pp. 324-330, nov., 1989
- [4] T. Du, M.A.Brdys. "shaft Speed, Load Torque and Rotor Flux Estimation of Induction Motor Drive Using an Extended Luenberger observer." proceeding of 6th International Conference on Electrical Machines and Drives.
- [5] P.Vas. "Sensorless Vector and Direct Torque Control, Oxford, New York, 1998
- [6] M.Abrate, G. Griva, F. Profumo, A. Tenconi. "High Speed Sensorless Fuzzy-Like Luenberger Observer". IEEE Power Electronics Specialists Conference, PP. 477-481, 1999
- [7] R. Palm and D. Driankov. "Towards a systematic analysis at Fuzzy Observer". Fuzzy Intormation Processing Society PP. 179-183 1999