

# 직류 서보전동기 저속운전 성능개선을 위한 퍼지-슬라이딩 관측기설계 Design of a Fuzzy-Sliding Observer for improvement of low speed operation of DC Servo Motor

고 봉 운, 김 상 훈, 김 낙 교  
Bong Woon Ko\*, Sang Hoon Kim\*, Lark Kyo Kim\*

\* 건국대학교 전기공학과 (Tel : 02-456-2585, Fax : 02-444-8868, E-mail : conman28@hanmail.net)

**Abstract** - This paper deals with speed control of DC servo motor using a Fuzzy-Sliding observer. Speed sensor detect a speed of rotor continuously. But it have a limit as a driving speed to detect speed precisely. So it is problem to improve the performance of the driving system.

To solve the problem, it is studied to detect a speed of DC motor without sensor. In particular, study on the method to estimate the speed using the observer is performed a lot.

In this parer, the gain of the observer is properly set up using the fuzzy control and sliding observer that have a superior transient characteristic and is easy to implement compared the existing method is designed. It estimate the derivative of the armature current directly using the armature current measured in the DC motor. It estimate the speed of the rotor using the differentiation. It is proposed speed sensorless control method using the estimated speed.

Optimal gain of Luenberger observer is set up using the fuzzy control and adapted speed control of DC servo motor. It is proved excellence and feasibility of the presented observer from the comparison tested a case with a speed sensor and a case without a speed sensor which used a highly efficient drive and 200W DC servo motor starting system.

Key Words : fuzzy-sliding observer, Luenberger observer, Sensorless speed control, DC Servo motor

## 1. 서 론

전동기 제어 시 반드시 필요한 속도센서는 전동기의 저속구간 운전 시 많은 문제점을 야기하며 이를 해결하기 위해 속도센서 대신 관측기를 설계하는 방법이 연구되고 있다. 전동기 센서리스 운전을 위한 대표적인 관측기로는 Luenberger 관측기와 슬라이딩 관측기를 고려할 수 있다[1][2][3][4].

Luenberger 관측기는 1964년 D. G. Luenberger에 의해 제안된 이후에 많은 연구가 진행되고 있으며 상태를 관측하기 위해 시스템의 동특성이나 내부파라미터를 알아야 한다는 문제 및 관측기 이득에 따라 시스템의 특성이 달라지는 문제점을 가지고 있다. 이러한 Luenberger 관측기의 문제점을 해결하기 위해서는 불확실한 시스템 동특성에 대해 강인한 구조를 갖는 관측기를 설계하거나, 별도의 파라미터 적응규칙이 필요하게 된다.

슬라이딩 제어이론을 이용한 슬라이딩 관측기는 제어이론 특성상 시스템의 매개변수 변동 및 측정 잡음 등에 강인하고, 구현이 용이하기 때문에 쉽게 적용할 수 있는 장점을 가진다. 그러나 시스템 동특성에 대한 정보를 필요로 하는 단점이 있다[5][6][7].

이러한 여러 관측기들의 문제점을 극복하기 위하여 현재 지능형 제어기법이 다양하게 도입되고 있으며, 그 중 대표적인 방식이 퍼지제어 기법이다[8][9]. 따라서 본 논문에서는 적응 제어 기법 중 퍼지 제어 기법을 이용하여 관측기의 이득 값을 적절히 선정하였으며, 기존의 방식

에 비해 과도특성이 우수하고 구현이 용이한 퍼지 슬라이딩 관측기를 설계하였다. 또한, 본 논문에서 설계한 퍼지 슬라이딩 관측기를 이용하여 직류 서보 전동기에서 측정된 전기자 전류 값으로 전기자 전류의 도함수를 직접 추정한다. 또 이 추정 값으로 회전자의 속도를 추정하고 추정된 속도를 이용하여 속도제어를 수행하는 새로운 방식의 속도 센서 리스 제어 방식을 제안하였다.

본 논문에서 설계한 퍼지 슬라이딩 관측기의 속도추정 성능을 검증하기 위해 먼저 슬라이딩 관측기를 이용하여 전기자 전류의 도함수를 추정하고 속도관측기인 Luenberger 관측기의 이득을 퍼지 제어 기법을 이용하여 관측기 이득을 최적 값으로 선정하고 이것을 이용하여 직류 서보 전동기의 속도제어에 적용하였다. 또한, 설계한 퍼지 슬라이딩 관측기를 200[W] 직류서보전동기에 적용하여 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 Luenberger 관측기를 이용한 경우 및 퍼지 슬라이딩 관측기를 이용하여 속도를 추정하는 경우를 부하가 없는 경우와 부하가 있는 경우로 나누어서 비교 실험하여 본 논문에서 설계한 퍼지-슬라이딩 관측기의 타당성을 입증하였다.

## 2. 퍼지 슬라이딩 관측기의 설계

본 논문에서는 Luenberger 관측기의 문제점인 관측기 이득 값을 적절히 선정하기 위하여 관측기 이득을 적절히 조정할 수 있는 퍼지-슬

라이딩 관측기를 설계하고 이것을 직류 서보 전동기의 속도 센서리스 제어에 적용하려 한다. 따라서 퍼지-슬라이딩 관측기의 기본 구조는 직류 서보 전동기의 속도 센서리스제어에 적용하기 위하여 전기자 전류의 도함수를 추정하는 슬라이딩 관측기 부분과 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수를 이용하여 Luenberger 관측기의 관측기 이득  $L$ 을 설정하는 퍼지 제어 부분과 전동기 속도 추정을 위한 Luenberger 관측기의 세 가지 부분으로 구성된다.

2.1 슬라이딩 관측기 설계

본 논문에서는 직류 서보 전동기의 속도 센서리스 제어를 수행하기 위해서 직류 서보 전동기의 전기적 동특성을 이용하여 속도를 관측하며 그림 2.1과 같다.

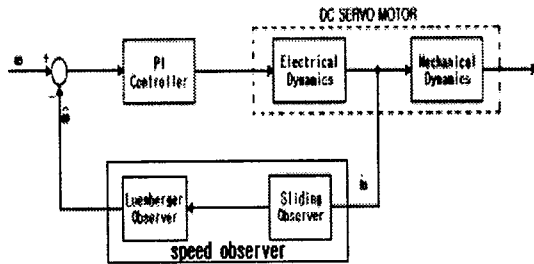


그림 2.1 슬라이딩 관측기를 이용한 속도관측기  
Fig. 2.1 speed observer using sliding observer

그러나 직류 서보 전동기의 전기적 동특성만으로 속도를 관측한다는 것은 문제점이 있기 때문에 직접 속도를 추정하는 것은 어렵게 된다.

직류 서보 전동기의 전기적 동특성은 식(2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + k_b \omega \quad (2.1)$$

속도를 추정하기 위해서 식(2.1)을 식(2.2)로 나타낼 수 있다.

$$\hat{\omega} = \frac{1}{k_b} [e_a(t) - R_a i_a(t) - L_a \frac{di_a(t)}{dt}] \quad (2.2)$$

그러나 식(2.2)에서 전류 도함수( $\frac{di_a(t)}{dt}$ )을 알 수 없기 때문에 속도를 직접 추정하는 것은 어려우며, 속도를 추정하기 위해 전류 도함수를 추정해야 한다. 전류 도함수 추정 식은 다음 식(2.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\hat{i}_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} [e_a(t) - R_a i_a(t) - k_b \omega] + L (i_a - \hat{i}_a) \quad (2.3)$$

식(2.2)와 식(2.3)에서 속도를 관측하기 위해서는 전류 도함수를 알아야 하고 전류 도함수를 관측하기 위해서는 속도를 알아야 하며 직류 서

보 전동기의 전류와 전류 도함수를 추정하기 위해 슬라이딩 관측기를 이용하며 추정한 전류와 전류 도함수를 이용하여 속도를 관측한다.

본 논문에서 제안한 직류 서보 전동기의 전류와 전류 도함수를 추정하기 위한 슬라이딩 관측기 설계 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{\hat{i}}_1 = \hat{i}_2 + k_1(i - \hat{i}_1) + \alpha_1 S_g(i - \hat{i}_1) \\ \dot{\hat{i}}_2 = \hat{i}_3 + k_2(\hat{i}_1 - \hat{i}_2) + \alpha_2 S_g(\hat{i}_1 - \hat{i}_2) \end{cases} \quad (2.4)$$

여기서,  $\hat{i}_1$ 와  $\hat{i}_2$ 는 전기자전류와 추정 값이며  $K_1$ 와  $\alpha_1$ 는 슬라이딩 관측기 이득 상수들을 나타낸다.

2.2 퍼지 동조기법을 이용한 관측기 설계

슬라이딩 관측기를 이용하여 직류 서보 전동기의 전기자 전류의 도함수를 추정하는 것은 가능하지만 속도 관측기인 Luenberger 관측기의 관측기 이득  $L$ 을 최적 값으로 선정하지 않으면 관측기의 성능 저하로 인해 정확한 속도 추정이 어렵게 된다. 따라서 본 논문에서는 퍼지 제어기법을 통하여 직류 서보전동기의 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수를 사용하여 Luenberger 관측기 이득  $L$ 을 선정하였으며 퍼지-슬라이딩 관측기의 구조는 그림 2.2와 같다.

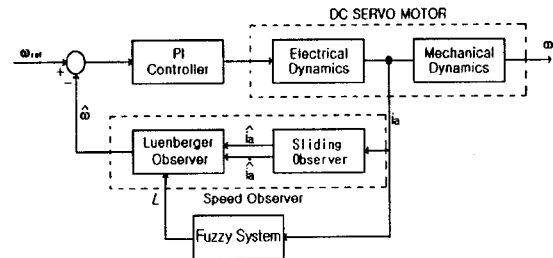


그림 2.2 퍼지 슬라이딩 관측기 구조  
Fig. 2.2 Structure of fuzzy sliding observer

2.2.1 퍼지화부

본 논문은 속도관측기로 사용된 Luenberger 관측기의 관측기 이득을 조정하기 위하여 퍼지 시스템을 도입하였으며 퍼지 시스템의 입력 값으로는 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수를 사용하였다. 따라서 입력 값을 정성화된 퍼지 값으로 변환하기 위해서는 그림 2.3의 비선형 소속 함수와 양자화 방법을 가지고 퍼지화 과정을 수행하였다.

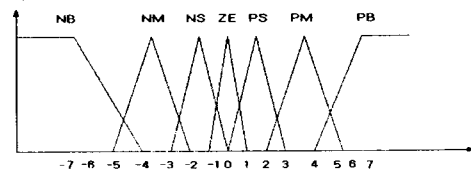


그림 2.3 비선형 삼각형 소속 함수  
Fig. 2.3 Nonlinear triangle membership function

전기자 전류와 전기자 전류의 도함수의 값이 0을 기준으로 절대 값이 증가함에 따라 각각의 퍼지 변수에 해당하는 소속 함수의 폭도 커지도록 설계한 것으로, 오차가 큰 구간에서는 개략 제어(coarse control) 특성이 나타나고, 오차가 작은 구간에서는 미세제어(fine control) 특성이 나타나도록 한 것이다.

2.2.2 퍼지 규칙 및 추론

본 논문에서 제안한 퍼지-슬라이딩 관측기의 설계에 사용된 퍼지 규칙의 형태는 조건부 및 결론 부를 혼합 명제로 하였으며 표 1과 같다. 또한 본 논문에서 적용한 퍼지 시스템의 추론은 Mamdani의 Min-Max 연산을 이용하여 수행하였다.

표 1 관측기 이득 L 에 관한 퍼지 규칙  
Table 1 Fuzzy rule for observer gain L

$\Delta I_a$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
Ia	NB						
NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NM	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NS	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NS	NS	ZO	PS	PM	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	PB						

2.2.3 비퍼지화

본 논문의 비퍼지화 방법은 일반적으로 가장 우수한 성능을 보이는 무게 중심법을 사용하였다. 이 방법은 합성된 출력부 퍼지 집합에서 무게중심을 구하는 방법으로 식(2.5)와 같다.

$$u_0 = \frac{\sum_{i=1}^k \mu(u_i) \cdot u_i}{\mu(u)} \quad (2.5)$$

3. 실험 및 결과

본 논문에서는 직류 서보 전동기의 속도센서리스 속도제어를 하기 위하여 퍼지-슬라이딩 관측기를 적용하였다. 이를 위하여 제작된 디지털 서보 시스템을 이용하여 속도센서를 장착한 경우와 속도센서 없이 퍼지-슬라이딩 관측기를 적용하여 속도를 추정한 경우를 전동기 저속구간에서 무부하 및 부하상태에서 비교실험을 하였으며, 속도제어기로는 PI제어기를 사용하였다. 그림 3.1은 실험장치 구성도를 나타낸 것이다.

본 실험에서 사용한 전동기는 최대출력 200W (LG기전, FMD-E205A)이며 속도측정을 위한 센서로 1000[펄스/회]의 분해능을 갖는 엔코더를 사용하였다.

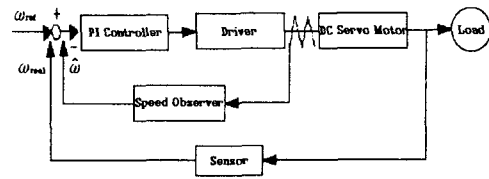


그림 3.1 실험장치 구성도  
Fig. 3.1 Configuration of experimental system

3.1 무부하 저속운전 실험 및 결과

목표값이 500[rpm]일 때, 각각 센서를 이용한 경우와 Luenberger 관측기와 퍼지-슬라이딩 관측기를 적용한 경우의 시스템 응답을 비교하여 그림 3.2에 나타내었으며 결과를 표 2에 정리하였다.

표 2 무부하 저속운전 실험결과표  
Table 2 The results table of constant speed control without load (500[rpm])

응답특성	제어기	Sensor	Luenberger	Fuzzy-Sliding
최대초과량 [rpm]		572	683	564
최대 백분율 초과량 [%]		14.4	36.6	10.1
상승시간 [sec]		0.0102	0.0101	0.0092
정착시간 [sec]		1.1214	1.395	1.118

표 2의 결과와 같이 저속운전(500[rpm]) 실험에서의 출력응답은 최대초과량 백분율에서 속도센서 없이 퍼지-슬라이딩 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비하여 약 3.3[%]정도 감소했으며, 정착시간에 있어서도 속도센서 없이 퍼지-슬라이딩 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비해 약 0.01초 정도 빠르게 나타났다. 저속영역에서의 운전 시 퍼지-슬라이딩 관측기가 과도상태와 정상상태에서 추정능이 우수하며, 속도센서가 있는 경우의 응답 특성보다 우수하다는 것을 입증하였다.

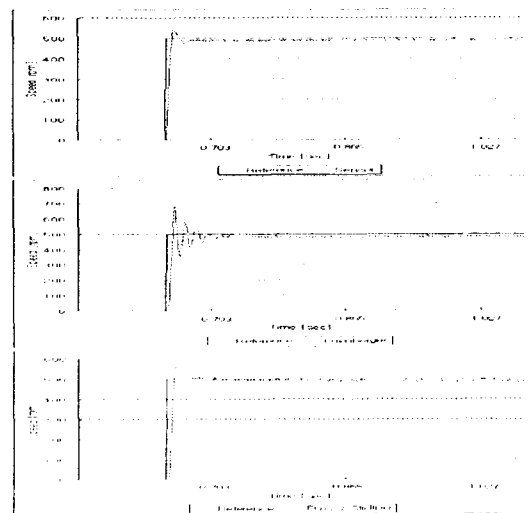


그림 3.2 무부하 저속운전 실험결과  
Fig. 3.2 The results of low speed control without load

### 3.2 부하 저속운전 실험

부하를 인가하고 목표값을 500[rpm]으로 저속운전하는 경우, 각각 센서를 이용한 경우와 Luenberger 관측기와 퍼지-슬라이딩 관측기를 적용한 경우의 시스템 응답을 비교하여 그림 3.3에 나타내었으며 결과를 표 6에 정리하였다.

표 3 부하 저속운전 실험결과표  
Table 3 The results table of constant speed control with load

응답특성	Sensor	Luenberger	Fuzzy-Sliding
최대값 [rpm]	476	421	484
최대 백분율 초과량 [%]	0	0	0
상승시간 [sec]	0.135	0.184	0.126

표 3의 결과와 같이 부하 인가 시 저속운전(500[rpm]) 실험에서의 부하 인가 시 오차는 속도센서 없이 퍼지-슬라이딩 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비해 약 1.6[%] 정도 감소하였다.

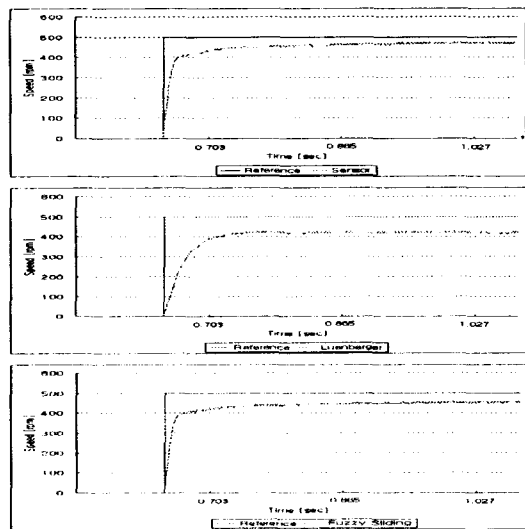


그림 3.3 부하 저속운전 실험결과  
Fig. 3.3 The results of low speed control with load

### 4. 결론

본 논문에서는 직류 서보 전동기의 속도센서리스 속도제어를 수행하기 위하여 관측기에 대한 연구로서 전동기의 동특성 및 내부파라미터에 대한 정보를 필요로 하지 않는 강인한 특성을 갖는 퍼지-슬라이딩 관측기를 제안했다. 또한 과도상태에서의 응답특성 개선과 저속에서의 운전 특성 향상을 입증하기 위하여 직류 서보 전동기의 무부하 및 부하 시 저속 실험을 통하여 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 퍼지-슬라이딩 관측기를 이용한 경우를 비교 실험한 결과 본 논문에서 제안한 퍼지-슬라이딩 관측기

를 직류 서보 전동기에 적용하여 저속 운전 시 과도상태와 정상상태에서 안정성 및 추정성능이 우수하다는 것을 입증하였으며, 속도센서가 있는 제어시스템의 응답에 근접한 특성을 나타내었다. 또한 부하외란에 대하여 강인한 성능을 가짐을 확인할 수 있었다.

### [참고문헌]

- [1] M. Takigawa, et. al. "A Wide Speed Control System for Brushless DC Motor Regarding to the Transient Response Characteristics," Trans. IEEE Japan, Vol. 113-D, No. 2 pp. 151-158, 1993.
- [2] K. N. Pradeep, "Analog and Digital Speed Control of DC Drives Using Proportional - Integral and Integral-Proportional control techniques," IEEE Trans. Ind. Elect., Vol. IE-34, No. 2, pp. 227-233, 1987.
- [3] T. Furuhashi, S. Sangwanish, and S. Okuma, "A Position and Velocity Sensorless Control of Brushless DC Motors Using an Adaptive Sliding Observer," Trans. IEEE Japan, pp. 1188-1192, 1990.
- [4] Z. Iwai, A. Inoue, and S. Kswaji, "Observer," Corona Pub., 1994. (in Japanese)
- [5] H. Nakano and I. Takahashi, "Speed Sensorless Field-Oriented Control of the Induction Motor Using an Instantaneous Slip Frequency Estimation Method", IEEE PESC., pp. 847-854, 1988.
- [6] J. Holtz, "Speed Estimation and Sensorless Control of AC Drives," IEEE IECON, pp. 649-654, 1993.
- [7] H. Kubota, "DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor," IEEE Trans, Ind. Appl., Vol. 29, No. 2, pp. 344-348, 1993.
- [8] E. H. Mamdani, " Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis," IEEE Trans. on Computer, Vol. c-26, No. 12, pp. 1182-1199, 1997.
- [9] W. J. M. Kickert and E. H. Mamdani, "Analysis of Fuzzy Logic Controller," Fuzzy Set and System, Vol. 1, pp. 29-44, 1978.