적응 퍼지-슬라이딩 관측기를 이용한 교류 서보 전동기 속도제어

Speed Control of AC Servo Motor Using Adaptive Fuzzy-Sliding Observer

김상훈, 윤광호, 고봉운, 김원태, 김기남, 남문현, 김낙교
Kim Sang-Hoon*, Yoon Kwang-Ho Ko Bong-Woon, Kim Won-Tae, Kim Gi-Nam, Nam Moon-Hyon
Kim Lark-Kyo

Abstract - In this paper, the gain of the observer is properly set up using the fuzzy control and Fuzzy-Sliding observer(FSO) that have a superior transient characteristic and is easy to implement compared to the existing method is designed. It estimate the differentiation of the armature current directly using the armature current measured in the AC 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 speed observer(Luenberger observer) was set up using the fuzzy control and adapted speed control of AC servo motor. To verify the performance of designed Fuzzy-Sliding observer, simulation compared with fixed speed observer gain of G.B Wang and S.S Peng 's sliding observer is performed. Also, it was proved the excellence and feasibility of the proposed observer from the comparison test with a speed sensor and without a speed sensor which used a highly efficient drive and 400W AC servo motor starting system.

Key Words : AC Servo, FSO, Observer

1. 서 론

전동기 센서리스 운전에 대한 초기의 연구에서는 전동기의 전압과 전류를 측정하여 전동기 모델로부터 속도를 연산하는 방식을 취해왔으나, 근래에는 현대제어 이론 중 관측기 이론을 적용하여 속도 추정 및 센서리스 운전을 위한 다양한 연구가 시도되고 있다.

센서리스 운전을 위해 센서를 대체할 관측기는 제어대상의 수학적 모델을 대상으로 하여 설계되므로 실제 제어시스템에 존재하는 다양한 비선형성과 불확실성이 고려되지 않거나 제어대상에 대한 모델링 오차가 존재할 경우에 정확하게 시스템의 상태를 추정할 수 없게 되고 본래 시스템 상태 값과의 오차가 필연적으로 발생한다.

센서리스 운전을 위한 대표적인 관측기로는 Luenberger 관측기와 슬라이딩 관측기가 있다. 첫째, 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[1-5].

둘째, 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.

이러한 여러 관측기들의 문제점을 극복하기 위하여 현재 지능형 제어기법이 다양하게 도입되고 있으며, 그 중 대표적인 방식이 퍼지제어 기법이다.

따라서 본 논문에서는 적응 제어 기법 중 퍼지 제어 기법을 이용하여 관측기의 이득 값을 적절히 선정하였으며, 기존의 방식에 비해 과도특성이 우수하고 구현이 용이한 퍼지 슬라이딩 관측기를 설계하였다. 또한, 본 논문에서 설계한 퍼지 슬라이딩 관측기를 이용하여 직류 서보 전동기에서 측정한 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 최적값으로 선정하고 이것을 이용하여 직류 서보 전동기의 속도제어의 시뮬레이션에 적용하여 본 논문에서 설계한 퍼지-슬라이딩 관측기의 타당성을 입증하였다.

2. 퍼지 슬라이딩 관측기 설계

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

하여 속도를 관측하며 그림 1과 같다.

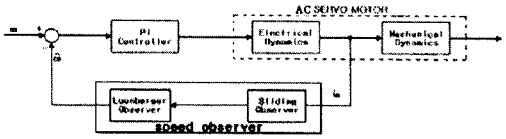

그림 1 슬라이딩 관측기를 이용한 속도관측기
Fig. 1 speed observer using sliding observer

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

직류 서보 전동기의 전기적 동특성은 식(2.24)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + k_b \omega \qquad (2)$$

속도를 추정하기 위해서 식(2)을 식(3)로 나타낼 수 있다.

$$\hat{\omega} = \frac{1}{k_b}[e_a(t) - R_a i_a(t) - L_a \frac{di_a(t)}{dt}] \qquad (3)$$

그러나, 식(3)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 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\hat{i}_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a}[e_a(t) - R_a i_a(t) - k_b\omega] + L(i_a - \hat{i}_a) \qquad (4)$$

여기서, L은 Luenberger 관측기 이득상수

식(3)와 식(4)에서 속도를 관측하기 위해서는 전류 도함수를 알아야 하고 전류 도함수를 관측하기 위해서는 속도를 알아야 하며 직류 서보 전동기의 전류와 전류 도함수를 추정하기 위해 슬라이딩 관측기를 이용하며 추정한 전류와 전류 도함수를 이용하여 속도를 관측한다.

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

$$\begin{cases} \hat{i}_1 = \hat{i}_2 + k_1(i - \hat{i}_1) + \alpha_1 S_g(i - \hat{i}_1) \\ \hat{i}_2 = \hat{i}_3 + k_2(\hat{i}_1 - \hat{i}_2) + \alpha_2 S_g(\hat{i}_1 - \hat{i}_2) \end{cases} \qquad (5)$$

여기서, i_1는 전기자전류, $\hat{i}_1$는 전기자전류 추정값

K_i , a_i : 슬라이딩 관측기 이득 상수

2.4.2 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 서보 전동기의 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수를 사용하여 Luenberger 관측기 이득 L 을 선정하였으며 퍼지-슬라이딩 관측기의 구조는 그림2와 같다.

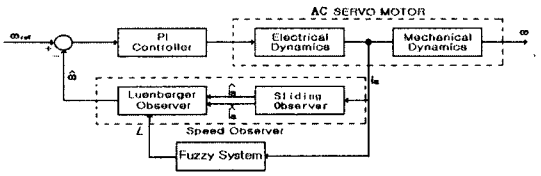

그림2 퍼지 슬라이딩 관측기 구조
Fig. 2 Structure of Fuzzy Sliding Observer

(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 3의 비선형 소속 함수와 양자화 방법을 가지고 퍼지화 과정을 수행하였다.

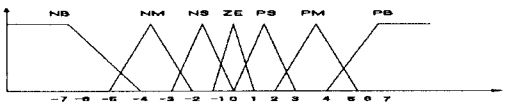

그림 3 비선형 삼각형 소속 함수
Fig. 3 Nonlinear triangle membership function

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

(2) 퍼지규칙 및 추론

본 논문에서 제안한 퍼지-슬라이딩 관측기의 설계에 사용된 퍼지 규칙의 형태는 조건부 및 결론 부를 혼합 명제로 하였으며 표1과 같다.

또한 본 논문에서 적용한 퍼지 시스템의 추론은 Mamdani의 Min-Max 연산을 이용하여 수행하였다.

표 1 관측기 이득 L 에 관한 퍼지규칙
Table 1 Fuzzy Rule for observer gain L

ΔIa / Ia	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB						
NM	NB	NB	NM	NM	NM	ZO	ZO
NS	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PM	PM	PM
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB							

(3) 비퍼지화

본 논문의 비퍼지화 방법은 일반적으로 가장 우수한 성능을 보이는 무게 중심법을 사용하였다. 이 방법은 합성된 출력부 퍼지 집합에서 무게중심을 구하는 방법으로 식 (6)과 같다.

$$u_0 = \frac{\sum_{j=1}^{k} \mu(u_j) \cdot u_j}{\mu(u_j)} \qquad (6)$$

3. 시뮬레이션

다음은 Matlab 을 이용하여 구현하였으며, 이 때 나타난 과도응답 특성들은 다음과 같은 기준으로 계산하였다.
최대초과량(Maximum Overshoot)는 시스템 응답이 목표 값을 초과하는 값 중에 최대 응답 값으로 계산하였다.
또한, 최대 백분율 초과량 (Maximum % Overshoot)은 최대 초과량을 목표 값의 백분율로 계산하였다.
정착시간(Settling Time)은 시스템의 응답이 목표 값의 2~5(%)에 도달하는 시간을 측정하였다.

표 2 무부하 정속운전 시뮬레이션 결과 (3000 rpm)
Table 2 The result of constant speed without load (3000 rpm)

기준입력	기준속도(3000 [rpm])		전류(3.24 [A])	
		Maximum overshoot[rpm]	%OS	Ts [sec]
Sliding Observer	속도	3074	2.47	0.122
	전류	6.43	98.4	0.128
Fuzzy-Sliding Observer	속도	3015	0.5	0.315
	전류	3.77	16.4	0.148

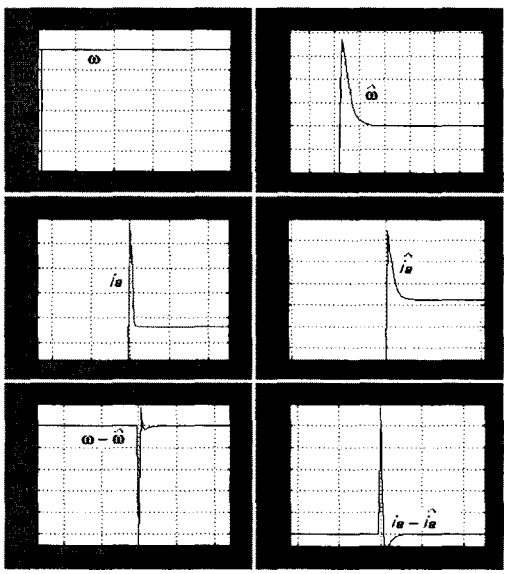

그림 4 정속운전 시 슬라이딩 관측기 응답
Fig. 4 Response of Sliding Observer
(constant speed magnification)

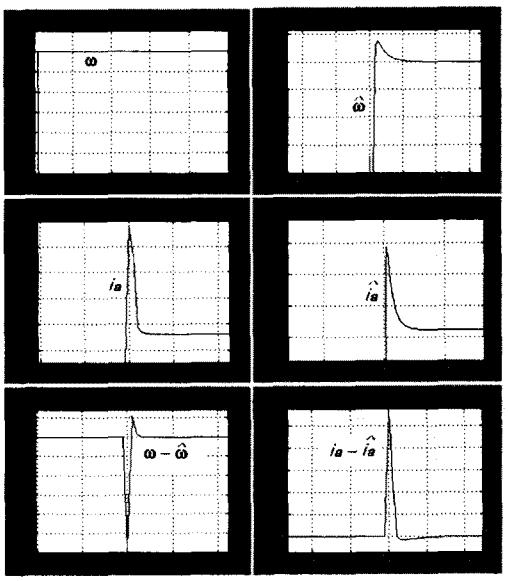

그림 5 정속운전 시 퍼지-슬라이딩 관측기 응답
Fig 5 Response of Fuzzy - Sliding Observer
(constant speed magnification)

3. 결론

본 논문에서는 교류 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 교류 서보 전동기의 시뮬레이션을 통하여 슬라이딩관측기와 퍼지-슬라이딩 관측기를 이용한 경우를 비교 시뮬레이션 한 결과 본 논문에서 제안한 퍼지-슬라이딩 관측기를 교류 서보 전동기에 적용하여 정속운전 시 과도상태와 정상상태에서 안정성 및 추정성능이 우수하다는 것을 입증하였다.

[참 고 문 헌]

[1] T.H. Liu and C.P. Cheng, " Adaptive Control for a Sensorless Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive" IEEE-IECON Conf. Rec., pp. 413-418, 1992

[2] T. Furuhashi, S. Sangwanish, S. Okuma,"A Position and Velocity Sensorless Control of Brushless DC Motors Using an Adaptive Sliding Observer"T. IEEE Japan, pp.1188-1192, 1990

[3] T. Ahmed-Ali and F. Lamnabhi-Lagarrige, "Sliding Observer- Controller Design for Uncertain Triangular Nonlinear Systems," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 44, No. 6, pp. 1244-1249, 1999.

[4] G. B. Wang, S. S. Peng, and H. P. Huang, "A Sliling Observer for Nonlinear Process Control," Chemical Engineering Science, Vol. 52, pp. 787-805, 1997.

[5] H.K.khalil, "Numerical Differentiation Using high-Gain Observer", Proceedings of the 36th IEEE Conference on a decision and Control, Vol. 2, pp. 4790-4795, December 1997.