

퍼지동조 속도관측기를 이용한 직류서보전동기의 저속운전 특성 개선

論 文

57P-3-6

Improvement of Low Speed Operation Characteristic of DC Servo Motor Using a Fuzzy Tuning Speed Observer

安昌煥[†]
(Chang-Hwan Ahn)

Abstract - This paper deals with speed control of DC servo motor using a Fuzzy tuning 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 observer. The fuzzy observer has 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 observer and adapted speed control of DC servo motor low speed operation. 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 Tuning Observer, Luenberger Observer, Sensorless Speed Control, DC Servo Motor

1. 서 론

직류 서보전동기의 속도제어 시 반드시 필요한 속도 검출 센서는 전동기의 저속구간 운전 시 많은 문제를 야기하며, 이를 해결하기 위해 속도센서 대신 관측기를 설계하는 방법이 연구되고 있다. 전동기 센서리스 운전을 위한 대표적인 관측기로는 루엔버거(Luenberger)관측기와 슬라이딩 관측기를 고려할 수 있다[1][2]. 루엔버거 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 루엔버거 관측기의 문제점을 해결하기 위해서는 불확실한 시스템 동특성에 대해 강인한 구조를 갖는 관측기를 설계하거나, 별도의 파라미터 적용규칙이 필요하게 된다[3][4]. 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 있으

며, 그 중 대표적인 방식이 퍼지 제어 기법이다[8][9].

본 논문에서는 적용 제어 기법 중 퍼지동조 제어 기법을 이용하여 속도 관측기의 이득 값을 적절히 선정하여 기존의 방식에 비해 과도특성이 우수하고 구현이 용이한 퍼지동조 관측기를 설계하였다. 또한, 본 논문에서 설계한 퍼지동조 관측기를 직류 서보 전동기 저속운전 영역에 적용하여 측정된 전기자 전류 값으로 전기자 전류의 도함수를 직접 추정하였으며, 이 추정 값으로 회전자속도를 추정하고 추정된 속도도를 이용하여 속도제어를 수행하는 새로운 방식의 속도 센서 리스 제어 방식을 제안하였다. 본 논문에서 설계한 퍼지동조 관측기의 속도추정 성능을 검증하기 위해 먼저 전기자 전류의 도함수를 추정할 수 있는 고이득 관측기를 설계하였으며, 속도 관측기인 루엔버거 관측기를 설계하였고 시스템의 상태에 맞게 퍼지동조 제어 기법을 이용하여 관측기 이득을 최적 값으로 선정하여 직류 서보 전동기의 저속 운전에 적용하였다. 또한, 설계한 퍼지동조 관측기를 200[W] 직류서보 전동기에 적용하여 고정된 이득을 갖는 루엔버거 관측기를 이용한 경우 및 퍼지동조 관측기를 이용하여 전동기 저속영역에서의 속도를 추정한 경우를 시뮬레이션과 비교 실험을 통해 본 논문에서 설계한 퍼지동조 관측기의 타당성을 입증하였다.

[†] 교신저자, 正會員 : 仁荷工業專門大學 디지털電子情報科
教授 · 工博

E-mail: aza@inhac.ac.kr

接受日字 : 2008年 5月 6日

最終完了 : 2008年 8月 5日

2. 퍼지동조 관측기의 설계

본 논문에서는 관측기 중 많이 사용되고 있는 루엔버거 관측기의 문제점인 관측기 이득 값 선정의 문제를 해결하기 위하여 관측기 이득을 적절히 조정할 수 있는 퍼

지동조 관측기를 설계하고 이것을 직류 서보 전동기의 저속운전 제어에 적용하려 한다. 따라서 퍼지동조 관측기의 기본 구조는 직류 서보 전동기의 속도 센서리스제어에 적용하기 위하여 전기자 전류의 도함수를 추정하는 고이득 관측기 부분과 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수를 이용하여 루엔버거 관측기의 관측기 이득 L을 설정하는 퍼지동조 제어 부분과 전동기 속도 추정을 위한 루엔버거 관측기의 세 가지 부분으로 구성된다.

2.1 속도 관측기 설계

본 논문에서는 직류 서보 전동기의 저속운전 제어를 수행하기 위해서 직류 서보 전동기의 동특성을 이용하여 속도를 관측하며 그림 1과 같다.

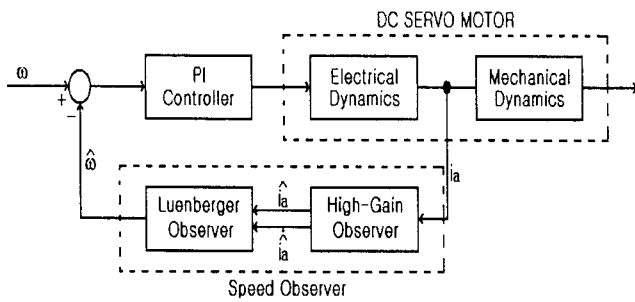


그림 1 속도 관측기의 구조
Fig. 1 Structure of Speed observer

직류 서보 전동기의 전기적 동특성만으로 속도를 관측한다는 것은 전기자 전류의 도함수를 추정해야 한다는 문제점이 있기 때문에 직접 속도를 추정하는 것은 어렵게 된다. 직류 서보 전동기의 전기적 동특성은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + k_b \omega \quad (1)$$

속도를 추정하기 위해서 식(1)을 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\hat{\omega} = \frac{1}{k_b} [e_a(t) - R_a i_a(t) - L_a \frac{di_a(t)}{dt}] \quad (2)$$

그러나 식(2)에서 나타나듯이 전기자 전류의 도함수 ($\frac{di_a(t)}{dt}$)를 알 수 없기 때문에 속도를 직접 추정하는 것은 어려우며, 속도를 추정하기 위해 전류 도함수를 추정해야 한다. 전류 도함수 추정 식은 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\hat{i}_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} [e_a(t) - R_a i_a(t) - k_b \omega] + L (i_a - \hat{i}_a) \quad (3)$$

식(2)와 식(3)에서 속도를 관측하기 위해서는 전류 도함수를 알아야 하고 전류 도함수를 관측하기 위해서는 속도를 알아야 하며 직류 서보 전동기의 전류와 전류 도함수를 추정하

기 위해 고이득 관측기를 이용하여 추정된 전류와 전류 도함수를 이용하여 속도를 관측하였다.

본 논문에서 제안한 직류 서보 전동기의 전류와 전류 도함수를 추정하기 위한 고이득 관측기 설계는 다음 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{i}_1 &= \hat{i}_2 + k_1 (i_1 - \hat{i}_1) / \epsilon \\ \hat{i}_2 &= \hat{i}_3 + k_2 (i_1 - \hat{i}_1) / \epsilon^2 \\ \hat{i}_3 &= \dots + k_3 (i_1 - \hat{i}_1) / \epsilon^3 \end{aligned} \quad (4)$$

위 식(4)를 Laplace transform을 이용해서 정리하면, 식(5)와 같다.

$$\hat{T}_1 = \frac{\epsilon^2 k_1 s^2 + \epsilon k_2 s + k_3}{\epsilon^3 s^3 + \epsilon^2 k_1 s^2 + \epsilon k_2 s + k_3} i_1 \quad (5)$$

전기자 전류 i_1 이 일정하고 분모다항식이 안정하다면, 그 도함수들이 모두 0으로 수렴하므로 시간이 지남에 따라 $\hat{T}_1 = i_1$ 이 될 것이다. 이는 $\epsilon = 0$ 인 이상적인 경우와 결과가 같음을 알 수 있다. 이 결과로부터 식(4)에서 $\hat{i}_2 = \hat{i}_1$ 이 됨을 알 수 있다. 이때 $\hat{T}_1 = i_1$ 이므로 시스템 출력 i_1 이 연속미분 가능한 신호라면

$$\hat{i}_1 = \dot{i}_1 \text{이 되므로 } \hat{T}_2 = \hat{i}_1 = \dot{i}_1 \text{이 만족된다.}$$

이 결과를 이용하면 $\hat{T}_3 = \hat{i}_2$ 가 되고 $\hat{T}_3 = \hat{i}_2 = \dot{i}_1$ 이 되어 전기자 전류의 미분 가능한 회수만큼의 도함수를 얻을 수 있다. 그러나 고이득 관측기는 전기자전류 i_1 이 일정하지 않은 경우에는 ϵ 을 가능한한 작게 함으로써 상대적으로 오차의 크기를 줄일 수 있다. 그러나 시스템 출력의 시간에 따른 변화율이 커짐에 따라 관측오차가 커지는 단점이 있으며, 상태관측기 이득 값의 크기에 비례해서 과도상태에서의 오차가 커지는 현상이 있다. 관측오차의 수렴성은 이득 값의 크기에 반비례하지만, 과도상태에서의 오차크기는 이득 값의 크기에 비례하므로 적당한 크기의 이득 값을 선정하는 것이 고이득 관측기의 성능 향상의 관건이라 할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 고이득 관측기 이득을 최적 값으로 하기 선정하기 위해서 MATLAB과 SIMULINK를 이용하여 관측기의 이득을 $\epsilon = 0.1, k_1 = 6, k_2 = 0.6$ 으로 선정하였으며 결과는 표 1과 같다. 고이득 관측기의 이득 중 ϵ 은 0에 근접할수록 $\hat{x}_1 = x_1$ 이 되는 특성을 가지므로 ϵ 을 최대한 적게 선정하는 것이 일반적이거나 ϵ 을 0.04 이하의 값에서는 출력특성이 현저히 저하되는 특성을 나타내어 적절한 ϵ 의 범위를 0.04 ~ 1.0의 범위로 선정하였다. 또한 시뮬레이션 결과에 따라 k_1, k_2 는 약 10 배 정도의 차이를 보일 때 가장 우수한 특성이 확인되어 k_1 을 먼저 선정하고 k_2 를 선정하였다.

표 1 관측기 이득에 따른 시스템의 응답
Table 1 System response to the change of observer gain

ε	k_1	k_2	속도추정		전류추정	
			OS [rpm]	T_s [s]	OS [A]	T_s [s]
1.0	40	10	3002.3	0.118	3.309	0.12
	6	0.6	3000.2	0.113	3.253	0.118
	40	0.1	3005.5	0.13	3.379	0.21
	1	10	3010.3	0.125	3.277	0.26
0.4	40	10	3000.7	0.125	3.2704	0.142
	6	0.6	error	error	error	error
	40	0.1	3000.5	0.172	3.2705	0.2
	1	10	3003	0.2	3.2785	0.2
0.1	40	10	3011.3	0.109	8.7633	0.111
	6	0.6	3000.4	0.157	11.618	0.183
	40	0.1	3071	0.122	6.2849	0.128
	1	10	3064.3	0.111	9.0153	0.114
0.04	40	10	error	error	error	error
	6	0.6	3060.7	0.118	7.2776	0.123
	40	0.1	3058.7	0.111	9.0355	0.113
	1	10	error	error	error	error

2.2 퍼지동조 관측기 설계

속도관측기 설계를 위하여 도함수 추정용으로 적용된 고이득 관측기를 이용하여 직류 서보 전동기의 전기자 전류의 도함수를 추정하는 것은 가능하지만 속도 관측기인 루엔버거 관측기의 관측기 이득 L 을 최적 값으로 선정하지 않으면 관측기의 성능 저하로 인해 정확한 속도 추정이 어렵게 된다. 따라서 본 논문에서는 퍼지동조 제어기법을 통하여 직류 서보 전동기의 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수를 사용하여 속도관측기인 루엔버거 관측기 이득 L 을 퍼지제어 기법을 이용하여 선정하였으며 퍼지동조 관측기의 구조는 그림 2와 같다.

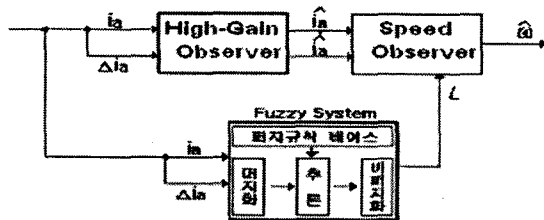


그림 2 퍼지동조 관측기 구조
Fig. 2 Structure of Fuzzy Tuning Observer

2.2.1 퍼지화부

본 논문은 속도 관측기로 사용된 루엔버거 관측기의 관측기 이득을 조정하기 위하여 퍼지동조 시스템을 도입하였

으며 퍼지동조 시스템의 입력 값으로는 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수를 사용하였다. 따라서 입력 값을 정상화된 퍼지동조 값으로 변환하기 위해서는 그림 3의 비선형 소속 함수와 양자화 방법을 가지고 퍼지화 과정을 수행하였다.

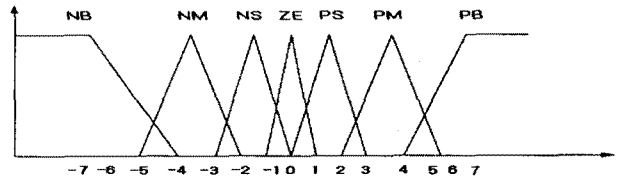


그림 3 비선형 삼각형 소속함수
Fig. 3 Nonlinear triangle membership function

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

2.2.2 퍼지동조 규칙 및 추론

본 논문에서 제안한 퍼지동조 관측기의 설계에 사용된 퍼지동조 규칙의 형태는 조건부 및 결론 부를 혼합 명제로 하였으며 표 2와 같다. 또한 본 논문에서 적용한 퍼지동조 시스템의 추론은 Mamdani의 Min-Max 연산을 이용하여 수행하였다.

Rule i : IF i_a is A_i and Δi_a is B_i ;
THEN L is C_i ;

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(6)과 같다.

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

3. 시뮬레이션 및 실험

3.1 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 퍼지관측기의 속도추정 성능을 확인하기 위하여 직류 서보 전동기의 속도 센서리스 저속 운전 제어에 적용하였으며 시뮬레이션 구성도는 그림 4와 같다. 또한 모든 시뮬레이션은 속도 관측기의 이득이 고정된 루엔버거 관측기를 설계한 퍼지관측기와 비교 시뮬레이션을 수행하여 기준속도 및 기준전류에 대한 추정성능을 비교하였으며 모든 시뮬레이션은 MATLAB 과 SIMULINK 프로그램을 사용하여 구현하였다.

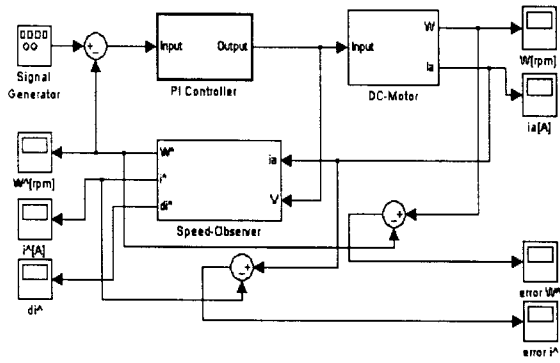


그림 4 시뮬레이션 구성도
Fig. 4 Configuration of simulation

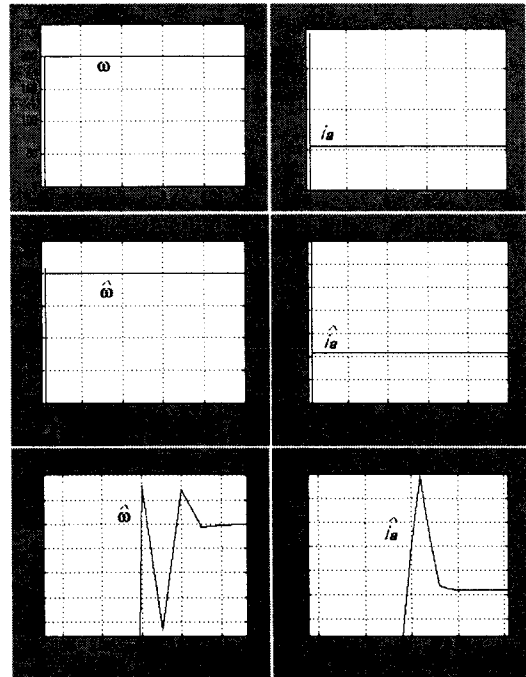
직류 서보 전동기의 운전속도 중 저속영역인 200[rpm]의 목표 값에 대해 본 논문에서 제안한 퍼지관측기의 속도 추정 성능을 이득이 고정된 루엔버거 관측기와 비교 시뮬레이션을 수행하여 그림 5에 나타내었으며 그 결과는 표3과 같다.

표 2 관측기 이득 L 에 관한 퍼지 규칙
Table 2 Fuzzy rule for observer gain L

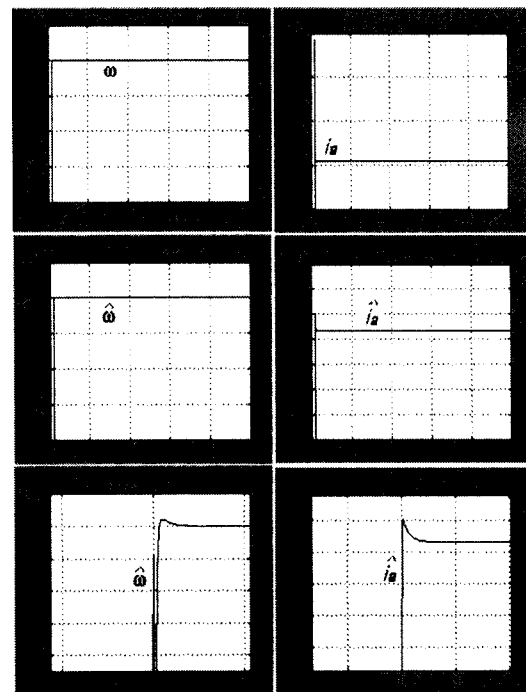
ΔI_a	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB						
NM	NB	NB	NM	NM	NM	ZE	ZE
NS	NB	NM	NM	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZE	PS	PM	PM	PM
PM	NE	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	PB						

표 3 저속운전 시뮬레이션 결과 (200 rpm)
Table 3 The results of constant low speed (200 rpm)

기준입력	기준속도(200 [rpm])	전류(0.216 [A])		
		Maximum overshoot[rpm]	%OS	Ts [sec]
루엔버거 관측기	속도[rpm]	207	4	0.104
	전류[A]	0.67	219.4	0.105
퍼지동조 관측기	속도[rpm]	201.4	0.5	0.133
	전류[A]	0.24	15.7	0.144



(a) 루엔버거 관측기(속도,전류,확대)



(b) 퍼지동조 관측기(속도,전류,확대)

그림 5 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Results of simulation

3.2 실험

본 논문에서는 직류 서보 전동기의 속도센서리스 저속운전 제어를 하기 위하여 퍼지동조 관측기를 설계하여 적용하였다. 이를 위하여 제작된 디지털 서보 시스템을 이용하여

관측기 이득이 고정되어 있는 루엔버거 관측기를 적용한 경우와 퍼지관측기를 적용하여 속도를 추정한 경우를 전동기 저속구간에서 무부하 및 부하상태에서 비교실험을 하였으며 속도제어기로는 PI제어기를 사용하였다. 그림 6은 실험장치 구성도를 나타낸 것이며 표 4는 본 실험에서 사용한 직류 서보 전동기의 사양이다.

표 4 직류 서보 전동기의 사양
Table 4 Specification of the DC servo motor

정격출력	Pr	200 W
정격토크	Tr	6.50 Kgf · cm
정격회전수	Nr	3,000 rpm
정격전류	Ir	3.5 A
정격전압	Er	75 V
유기전압정수	Km	22.50×10^{-3} V/rpm
기계적시정수	Km	6.25
전기적시정수	Ke	0.48

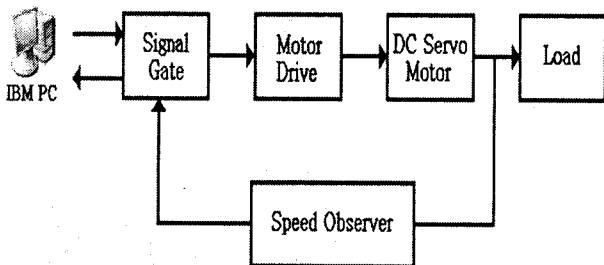


그림 6 실험장치 구성도
Fig. 6 Experimental system configuration

3.2.1 무부하 저속운전 실험 및 결과

목표 값이 500[rpm]일 때, 각각 이득이 고정된 루엔버거 관측기와 퍼지동조 관측기를 적용한 경우의 시스템 응답을 비교하여 그림 7에 나타내었으며 결과를 표 5에 정리하였다.

표 5 무부하 정속운전 실험결과표 (500[rpm])
Table 5 The results table of constant speed control without load

응답특성	루엔버거 관측기	퍼지동조 관측기
최대초과량 [rpm]	73	10
최대 백분율 초과량 [%]	14.4	2.0
상승시간 [sec]	0.0102	0.0092
정착시간 [sec]	1.1214	1.118

직류 서보 전동기를 무부하시 500[rpm]을 목표 값으로 하여 저속운전을 하였을 때의 응답특성은 퍼지관측기를 이용

한 출력이 이득이 고정된 루엔버거 관측기에 비해 최대 백분율 오버슈트에서 2[%]로 속도 센서 없이 슬라이딩 관측기에 비해서 12.4[%]감소 되었다. 상승시간은 퍼지관측기를 이용한 출력이 루엔버거 관측기에 비해서 약 1[msec]빠르게 나타났다.

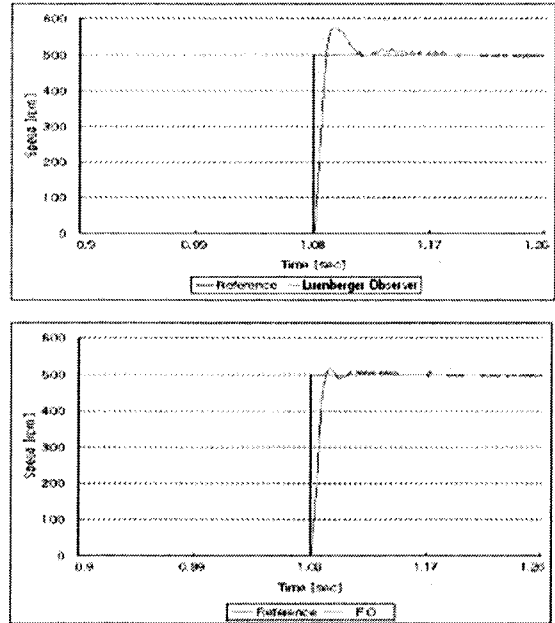


그림 7 무부하 정속운전 실험결과 (500[rpm])
Fig. 7 The results of constant speed control without load

3.2.2 부하 저속운전 실험 및 결과

직류서보전동기의 정격부하를 장착하고 목표 값이 500[rpm]일 때, 토크부하(백열전구 200[w])를 인가하여 각각 이득이 고정된 루엔버거 관측기와 퍼지동조 관측기를 적용한 경우의 시스템 응답을 비교하여 그림 8에 나타내었으며 결과를 표 6에 정리하였다.

표 6 부하 정속운전 실험결과 (500[rpm])
Table 6 The results table of constant speed control with load(500[rpm])

응답특성	루엔버거 관측기	퍼지동조 관측기
최대값 [rpm]	475	497
최대 백분율 초과량[%]	0	0
상승시간 [sec]	0.126	0.139

직류 서보 전동기를 부하인가 시 500[rpm] 목표 값으로 하여 저속운전을 하였을 때의 응답특성은 최대 오버슈트는 발생하지 않았으며 출력이 약간의 오차로 목표 값에 도달하지 못하였으며 이 때 관측기 이득이 고정된 루엔버거 관측기보다 퍼지관측기의 오차가 적게 나타났다. 또한, 상승시간의 경우는 연산이 루엔버거 관측기에 비해 많은 경우라 약간 늦게 나타났다.

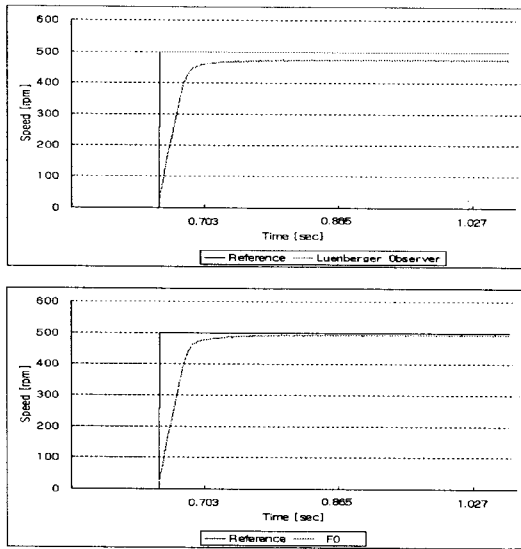


그림 8 부하 정속운전 실험결과 (500rpm)
 Fig. 8 The results of constant speed control with load

4. 결 론

본 논문에서는 직류 서보 전동기의 저속 영역 속도센서리스 제어를 수행하기 위하여 퍼지동조 관측기를 설계하였다. 또한 과도상태에서의 응답특성 개선과 저속에서의 운전 특성 향상을 입증하기 위하여 직류 서보 전동기의 무부하 및 부하 시 저속 실험을 통하여 이득이 고정된 루엔버거 관측기와 퍼지동조 관측기를 이용한 경우를 비교 실험한 결과 본 논문에서 제안한 퍼지동조 관측기를 직류 서보 전동기에 적용하여 저속 운전 시 과도상태와 정상상태에서 안정성 및 추정 성능이 우수하다는 것을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 인하공업전문대학의 교내연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[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-Orientation 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.

저 자 소 개



안 창 환 (安昌煥)

1959년 11월 4일생. 1983년 원광대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1991년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 8월 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 인하공업전문대학 디지털전자정보과 교수.
 Tel : 032-870-2214
 Fax : 032-870-2508
 E-mail : aza@inhatc.ac.kr