

퍼지동조 고이득 관측기를 이용한 속도센서없는 직류 서보전동기의 속도제어

Speed Control Of Sensorless DC Servo Motor Using Fuzzy-Tuning High-Gain Observer

강성호*, 윤광호*, 김상훈*, 김낙교**, 남문현***

(Sung - Ho Kang*, Kwang - ho Yoon*, Sang - Hun Kim*, Lark - Kyo Kim**, Moon - Hyun Nam***)

*건국대학교 전기공학과 (전화:(02)456-2585, 팩스:(02)444-8868, E-mail : kangsh7581@konkuk.ac.kr)

** 건국대학교 전기공학과 (전화:(02)450-3485, E-mail : lkim@konkuk.ac.kr)

*** 건국대학교 전기공학과 (전화:(02)450-3482, 팩스:(02)452-7090, E-mail : monroe@konkuk.ac.kr)

Abstract : This paper deals with speed control of Sensorless DC servo motor using a FTHGO(Fuzzy-Tuning High Gain observer). In this paper, we improved the problem from row speed section, the problem of sensor for detecting speed of motor, using FTHGO(Fuzzy-Tuning High-Gain Observer) with fuzzy control technique which is a class of adaptive control technique. In order to verify the performance of the FTHGO(Fuzzy-Tuning High Gain Observer) which is proposed in this paper, it is proved from the experiment to compare the case with a speed sensor to the case with FTHGO(Fuzzy-Tuning High Gain observer) in the speed control of DC servo motor.

Keywords : Fuzzy Tuning, DC Servo Motor, Observer, Sensorless

1. 서론

현재 산업에 많이 사용되고 있는 직류 서보전동기는 회전자 관성이 매우 적고 응답특성이 우수하다는 장점이 있으며 전기자 전류를 독립적으로 제어할 수 있어 전동기의 토오크 제어와 속도 제어에 있어 매우 용이하다. 그러나, 직류 서보전동기는 진압과 전류의 검출은 비교적 용이하지만 회전자의 속도 정보를 얻기 위해서는 레졸버나 엔코더와 같은 센서가 필요하게 된다.

이러한 속도 정보를 얻기 위한 센서들은 회전하는 회전자의 속도를 연속적으로 검출할 수 있는 장점이 있으나 저속구간에서는 센서의 분해능에 따라 정밀한 속도 정보를 얻는데는 한계를 가질 수 있으므로 구동 시스템의 성능 향상에 문제 요소로 작용하게 된다. 이 문제점의 해결 방안으로, 분해능이 높은 센서를 이용할 경우에는 전동기의 저속구간에서는 정밀한 속도측정이 가능하나 분해능이 높을수록 센서가 고가이며 별도의 복잡한 하드웨어가 제어기에 구성되어야 하는 단점이 있으며, 진동 및 습도 등의 주위 환경에 대한 영향을 많이 받기 때문에 사용 환경에 제한을 받는다 [1][2].

따라서, 이러한 센서가 가지는 문제들을 해소하기 위해 센서를 이용하여 속도를 검출하지 않고 전동기의 속도를 검출하는 방법에 대해 많은 연구가 진행되고 있으며, 그 중에서도 속도관측기를 설계하여 속도를 추정하는 방식의 연구가 활발히 진행되고 있다.

센서리스 운전을 위한 대표적인 관측기로는 루엔버거 관측기와 슬라이딩 관측기 및 고이득 관측기가 있다. 첫째, 루엔버거 관측기는 1964년 D.G. Luenberger에 의해 제안된 이후에 많은 연구가 진행되고 있으며 상태를 관측하기 위해 시스템의 동특성이나 내부파라미터를 알아야 한다는 문제점을 가지고 있다. 둘째, 고이득 관측기는 triangular형으로 표현 가능한 시스템에 적용가능하며, 시스템의 동특성 및 내부 파라미터에 대한 정보를 필요로 하지 않는다. 그러나 고이득 관측

기의 이득이 관측상태의 개수에 비례해서 제곱 꼴로 커지게 된다. 이는 관측 초기의 과도상태 및 관측하려는 상태의 급격한 변화에 대하여 관측오차가 심하게 진동하는 원인이 될 수 있다[3][4].

이러한 여러 관측기들의 문제점을 극복하기 위하여 현재 지능형 제어기법이 다양하게 도입되고 있으며, 그 중 대표적인 방식이 퍼지제어 및 신경회로망 기법이다[5][6].

본 논문에서는 전동기 속도제어 시 속도검출을 위한 센서들의 문제점인 전동기의 저속구간에서의 문제점을 적용 제어 기법 중 퍼지제어 기법을 이용한 퍼지 동조 고이득 관측기를 이용하여 개선하였다.

본 논문에서의 타당성을 검증하기 위하여 실제 200[W] 직류서보전동기에 적용하여 저속운전시의 출력특성을 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 퍼지동조 고이득 관측기를 이용하여 속도를 추정한 경우를 비교 실험하였다.

II. 퍼지동조 고이득 관측기

고이득 관측기를 이용하여 직류서보전동기의 전기자 전류의 도함수를 추정하는 것은 가능하지만 고이득 관측기의 관측기 이득 ϵ , k_1 , k_2 를 최적 값으로 선정하지 않으면 관측기의 성능 저하로 인해 정확한 속도 추정이 어렵게 된다.

따라서 본 논문에서는 관측기 이득 중 k_1 , k_2 를 최적 값으로 설정하기 위하여 관측기 이득에 따라 시스템 성능을 확인하여 이에 따른 퍼지 동조기법을 제안하였다.

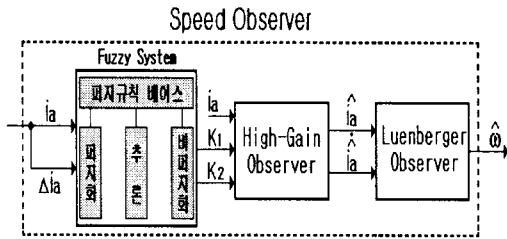


그림 1 퍼지 동조 고이득 관측기를 이용한 속도관측기
Fig. 1 Speed Observer Fuzzy-Tuning High Gain Observer.

III. 실험

본 논문에서는 직류서보전동기의 속도센서리스 속도제어를 하기 위하여 퍼지동조 고이득 관측기(Fuzzy-Tuning High Gain Observer)를 적용하였다. 이를 위하여 제작된 디지털 서보 시스템을 이용하여 속도센서를 장착한 경우와 속도센서 없이 퍼지동조 고이득 관측기를 적용하여 속도를 추정하는 경우를 동일한 조건으로 무부하에서 비교실험을 하였으며 또한 부하 실험은 무부하 실험과 동일한 경우로 진행되었으며, 부하는 전동기의 축에 발전기를 커플링을 통하여 연결하고, 그 발전기에 다시 100[W]의 백열전구를 연결하는 형태로 토크부하 및 관성부하를 인가하였다. 속도제어기로는 PI제어기를 사용하였다.

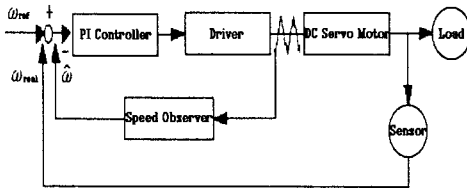


그림 2 실험장치 구성도
Fig. 2 Experimental system configuration

표 1 직류 서보 전동기의 사양
Table 1 Specification of the DC servo motor.

정격출력	Pr	200 W
정격토크	Tr	6.50 Kg \cdot cm
정격회전수	Nr	3000 rpm
정격전류	Ir	3.5 A
정격전압	Er	75 V
유기전압정수	K ω	22.50 \times 10 ⁻³ V/rpm
토크정수	Kt	2.10 Kg \cdot cm/A
전기자관성	J ω	1.33 \times 10 ⁻³ Kg \cdot cm \cdot sec ²
전기자저항	R ω	2.12 Ω
전기자인덕턴스	L ω	1.02 mH

3.1 실험방법 및 절차

본 논문에서는 직류서보전동기의 속도제어에 있어서 속도센서를 사용하는 경우의 문제점인 저속영역에서의 출력특성 개선을 위해 퍼지동조 고이득 관측기를 이용하여 속도를 제어하였다. 그 실험 및 절차는 다음과 같다.

[1] 속도센서의 문제점인 저속 구간에서의 속도추정 오차의 문제점을 퍼지동조 고이득 관측기를 이용하여

개선이 가능하다는 것을 직류서보전동기를 저속 500[rpm]으로 정속 운전 시 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 퍼지동조 고이득 관측기를 적용한 경우를 무부하 상태에서 비교 실험하였다.

[2] 시스템의 운전 특성이 변하는 경우에 관측성능을 확인하기 위하여 직류서보전동기를 저속영역에서 최대속도 500[rpm]으로 가변속(정역운전)시 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 퍼지동조 고이득 관측기를 적용한 경우를 무부하 상태로 비교 실험한다.

[3] 부하가 있는 경우 저속구간에서의 관측기 성능 입증 을 위하여 직류서보전동기의 축에 발전기를 연결하여 백열전구를 설치하여 저속인 500[rpm]으로 정속 운전하여 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 퍼지동조 고이득 관측기를 적용한 경우를 비교 실험한다.

3.2 무부하 실험

3.2.1 정속 운전 실험: 500[rpm]

목표 값이 500[rpm]일 때, 각각 센서를 이용한 경우와 퍼지동조 고이득 관측기를 적용한 경우의 시스템 응답을 비교하여 그림 3에 나타내었으며 결과를 표 2에 정리하였다.

표 2 무부하 정속운전 실험결과표

Table 2 The results table of constant speed control without load

	Sensor	FTHGO
최대초과량 [rpm]	572	540
최대 백분율 초과량 [%]	14.4	8
상승시간 [sec]	0.0102	0.0073
정착시간 [sec]	1.1214	1.1106

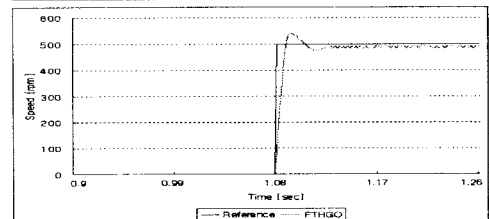
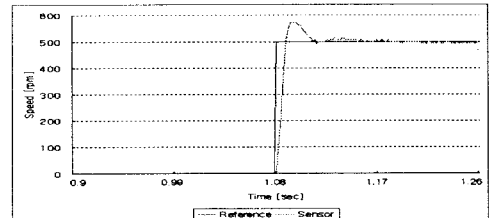


그림 3 무부하 정속운전 실험
Fig 3 The results of constant speed control without load

3.2.2 가변속 운전 실험: 최대 값 500[rpm]

최대 값이 500[rpm]일 때, 각각 센서를 이용한 경우와 퍼지동조 고이득 관측기를 적용한 경우의 시스템 응답을 비교하여 그림 4에 나타내었으며 결과를 표 3에 정리하였다.

표 3 무부하 가변속운전 실험결과표
Table 3 The results table of variable speed control without load

	Sensor	FTHGO
최대초과량 [rpm]	669	580
최대 백분율 초과량 [%]	33.8	16
평균오차 [rpm]	157	72
백분율 평균오차 [%]	31.4	14.4

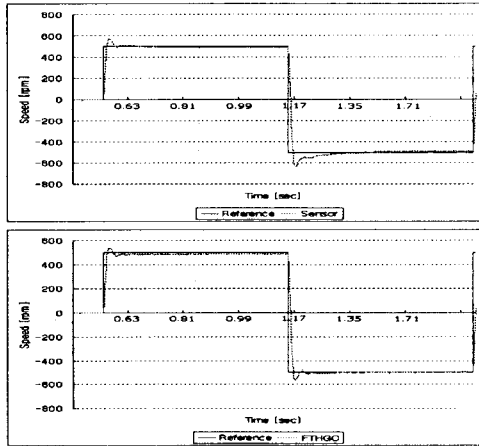


그림 4 무부하 가변속운전 실험
Fig 4 The results of variable speed control without load

3. 3 부하 실험

3.3.1 부하인가 시 정속 운전 실험: 500[rpm]

부하를 인가하고 목표 값을 500[rpm]으로 하는 경우, 각각 센서를 이용한 경우와 퍼지동조 고이득 관측기를 적용한 경우의 시스템 응답을 비교하여 그림 5에 나타내었으며 결과를 표 4에 정리하였다.

표 4 부하 정속운전 실험결과표
Table 4 The results table of constant speed control with load

	Sensor	FTHGO
최대값 [rpm]	476	492
최대 백분율 초과량 [%]	0	0
상승시간 [sec]	0.135	0.1134
평균오차 [rpm]	24	8
백분율 평균오차 [%]	4.8	1.6

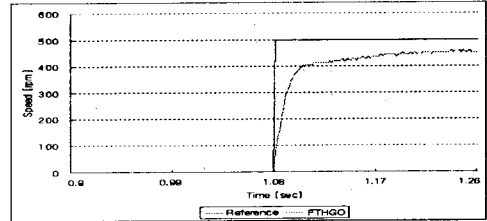
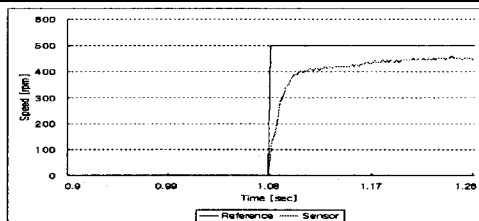


그림 5 부하 정속운전 실험결과표
Fig. 5 The results of constant speed control with load

3.4 실험결과 고찰

본 논문에서는 퍼지동조 고이득 관측기의 속도추정 성능을 확인하기 위해서 직류 서보전동기의 센서리스 속도제어에 적용하여 속도추정 성능 및 시스템의 응답 특성을 확인하는 실험을 실행하였으며 저속운전 시 및 가변속운전 시로 나누어 실행하였다.

(1) 무부하 저속운전 시

직류 서보전동기를 무부하시 저속인 500[rpm]을 목표 값으로 하여 정속운전을 하였을 때의 응답특성은 먼저 500[rpm]을 목표 값으로 한 경우 센서를 이용한 출력이 최대 백분율 오버슈트에서 14.4(%)로 퍼지동조 고이득 관측기에 비해서 6.4(%) 크게 나타났다. 상승시간은 센서를 이용한 출력이 퍼지동조 고이득 관측기에 비해서 2.9[msec] 늦고, 정착시간에서는 센서를 이용한 출력이 적용 고이득 관측기에 비해서 10.8[msec] 늦게 나타났다.

이것은 전동기를 저속영역에서 운전하는 경우에는 속도관측기를 사용하는 경우가 센서를 이용한 응답에 비해 우수하며 속도관측기를 사용하는 경우에는 퍼지 제어기법을 이용한 퍼지동조 고이득 관측기가 과도상태 및 정상상태에서 우수한 성능을 나타냈음을 알 수 있으며 센서를 이용한 응답의 경우에는 센서의 분해능이 높지 않은 경우 저속에서의 속도 측정 오차가 발생한다고 할 수 있다.

(2) 무부하 가변속운전 시

직류 서보전동기를 무부하시 500[rpm]을 최대 값으로 하여 가변속운전을 하였을 때의 응답특성은 센서를 이용한 출력이 최대 백분율 오버슈트에서 33.8(%)로 퍼지동조 고이득 관측기에 비해서 17.8(%) 크고, 백분율 평균오차에서도 센서를 이용한 출력이 퍼지동조 고이득 관측기에 비해 17(%) 크고, 이상의 결과로 보면 직류 서보전동기를 최대값 500[rpm]으로 가변속 운전을 수행하는 경우에 저속 영역에서는 특히 센서가 속도 측정 오차를 더 크게 발생하였다.

(3) 부하 정속운전 시

직류 서보전동기를 부하인가 시 500[rpm]을 목표 값으로 하여 저속운전을 하였을 때의 응답특성은 먼저 500[rpm]을 목표 값으로 한 경우 모든 경우에 최대 백분율 오버슈트는 발생하지 않아서 출력이 어느 정도에 오차를 가지고 목표 값에 도달하지 못하였으며 이 때 센서를 이용한 출력이 백분율 평균오차에서 4.8 (%)로 퍼지동조 고이득 관측기에 비해서 3.2(%) 크고, 상승 시간에서는 센서를 이용한 출력이 퍼지동조 고이득 관측기에 비해 21.6[msec] 느리게 나타났다. 이상의 결과로 보면 직류 서보전동기에 부하를 인가하고 저속영역인 500[rpm]을 목표 값으로 하여 정속운전을 수행하면

퍼지동조 고이득 관측기가 센서를 이용한 응답에 비해 과도상태 및 정상상태에서 모두 우수하게 나타났다. 이것은 전동에 부하를 인가하고 저속영역에서 정속운전하는 경우에는 속도관측기를 사용하는 경우가 센서를 이용한 응답에 비해 우수하며 속도관측기를 사용하는 경우에는 퍼지 제어기법을 이용한 퍼지동조 고이득 관측기가 과도상태 및 정상상태에서 우수한 성능을 나타냈음을 알 수 있으며 이 경우에 목표 값에 도달하지 못하는 근본적인 이유는 속도제어기인 PI제어기의 매개변수가 고정되어 있기 때문이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 퍼지동조 고이득 관측기의 속도추정 성능을 평가하기 위하여 속도센서 없는 직류 서보전동기에 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 직류 서보전동기를 무부하시 저속영역에서인 정속운전을 하였을 때의 응답특성은 센서를 이용한 출력이 최대 백분율 오버슈트에서 14.4(%)로 퍼지동조 고이득 관측기에 비해서 6.4(%)크게 나타났다. 상승시간은 센서를 이용한 출력이 퍼지동조 고이득 관측기에 비해서 2.9[msec]느리게 나타났다. 정착시간에서는 센서를 이용한 출력이 퍼지동조 고이득 관측기에 비해서 10.8[msec]느리게 나타났다.

따라서 직류 서보전동기를 저속운전 영역에서 정속운전을 수행하면 퍼지동조 고이득 관측기가 센서를 이용한 응답에 비해 과도상태 및 정상상태에서 모두 우수한 성능을 나타내었다.

(2) 직류 서보전동기를 부하인가 시 저속운전을 하였을 때의 응답특성은 모든 경우에 최대 백분율 오버슈트는 발생하지 않아서 출력이 어느 정도에 오차를 가지고 목표 값에 도달하지 못하였으며 이 때 센서를 이용한 출력이 백분율 평균오차에서 4.8 (%)로 퍼지동조 고이득 관측기에 비해서 3.2(%)크게 나타났다. 상승 시간에서는 센서를 이용한 출력이 퍼지동조 고이득 관측기에 비해 21.6[msec]느리게 나타났다.

따라서 직류 서보전동기에 부하를 인가하고 저속영역에서 정속운전을 수행하면 퍼지동조 고이득 관측기가 센서를 이용한 응답에 비해 과도상태 및 정상상태에서 모두 우수하게 나타났다.

본 논문에서는 퍼지동조 고이득 관측기를 속도센서 없는 직류 서보전동기에 적용하여 속도센서의 문제점을 보완하였고 기존의 속도관측기에 비해 속도추정성능이 우수하다는 것을 입증하였다.

추후에 연구 할 과제로는 직류 서보전동기의 속도제어를 하는 경우 스위칭을 통하여 운전점이 급격히 변화하는 경우 및 저속영역에서는 속도관측기를 이용하여 제어를 수행하는 하이브리드 형태의 속도제어에 관한 연구를 수행해야 할 것이다.

V. 참고 문헌

[1] Masahiro Takigawa, et. al. "A Wide Speed Control System for Brushless DC Motor Regarding to the Transient Response Characteristics," T. IEEE Japan, vol.113-D, No.2 pp.151-158,1993.
 [2] K, Nandam. 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] G. Besancon, "Farther Results on High Gain Observers for Nonlinear Systems", Proceedings of the 38th IEEE Conference on a decision and Control, Vol. 3, pp. 2904-2909, December 1999.

[4] E. S. shin and K. W. Lee, "Robust Output Feedback Control of Robot Manipulators Using High-Gain Observer", Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications, Vol. 1, pp. 881-886, 1999.

[5] Junhong Nie, "A Neural Approach to Fuzzy Modeling", Proceeding of the American Control Conference, pp. 2139-2142, 1994.

[6] H. Yoichi and N. Masato, "Automated Extraction of Fuzzy IF-THEN Rules Using Neural Networks" T. IEEE Japan, Vol. 110-c, No. 3, pp. 198-206, 1990.