

# 적응 퍼지 고이득 관측기를 이용한 교류 서보 전동기 제어

## Control of AC Servo Motor Using Adaptive Fuzzy High Gain Observer

金相勳\*\*\*, 尹光湖\*\*, 高奉云\*\*, 金洛教\*\*\*\*  
(Sang-Hoon Kim\*\*\*, Kwang-Ho Yun\*\*, Bong-Woon Ko\*\*, Lark-Kyo Kim\*\*\*\*)

**Abstract** - This paper deals with speed control of AC servo motor using a Adaptive fuzzy high gain obserber. In this parer, the gain of the observer is properly set up using the fuzzy control and adaptive high gain observer that have a superior transient characteristic and is easy to implement compared the existing method is designed.

In order to verify the performance of the Adaptive fuzzy high gain observer which is proposed in this paper, it is compared estimate performance of High-gain Observer and Adaptive High Gain Observer with the computer simulation.

Effectiveness of the proposed high gain observer is proved from the experiment to compare the case with a speed sensor to the case with Adaptive fuzzy high gain observer in the speed control of AC servo motor.

**Key Words** :Adaptive fuzzy high-gain observer, Fuzzy system, AC servo motor, PI controller

### 1. 서 론

최근 사용범위가 확대되고 있는 교류 서보 전동기는 브리쉬와 정류자가 없는 구조로 효율과 신뢰성이 높으며 무단 변속과 열악한 작업환경에서도 구동이 가능하여 운전소음의 감소 및 정비비용이 저감을 가져올 수 있어 현재 직류 서보전동기를 대체하여 광범위한 분야에서 사용이 증가되고 있다 [1][2]. 근래에 들어 센서를 사용하지 않고 시스템을 제어하는 방식이 많이 연구되어왔다. 그 이유는 센서를 사용하지 않는 것이 경제적인 이유도 있고, 유도전동기 같은 경우에는 속도센서를 부착하기 어려운 환경하에서 구동되는 경우도 생기게 되었다. 이러한 경우에 센서를 붙이지 않고, 제어하는 방법의 필요성이 대두되고 있다. 이를 위해 무수히 많은 상태관측기들이 소개되었으며 이용되고 있다[3][4][5].

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. 이러한 루엔버거 관측기의 문제점을 해결하기 위해서는 불확실한 시스템 동특성에 대해 강인한 구조를 갖는 관측기를 설계하거나, 별도의 파라미터 적용규칙이 필요하게 된다.

둘째, 고이득 관측기는 triangular형으로 표현 가능한 시스

템에 적용가능하며, 시스템의 동특성 및 내부 파라미터에 대한 정보를 필요로 하지 않는다. 그러나 고나축기의 이득이 관측상태의 개수에 비례해서 제곱꼴로 커지게 된다. 이는 관측 초기의 과도상태 및 관측하려는 상태의 급격한 변화에 대하여 관측오차가 심하게 진동하는 원인이 될 수 있다. 이러한 경우 제어기의 출력이 심하게 진동함으로써 시스템을 불안정하게 할 수도 있다[6][7]. 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 이득을 최적 값으로 선정하며, 기존의 방식에 비해 과도특성이 우수하고 구현이 용이한 적응 퍼지 고이득 관측기(AFHGO : Adaptive Fuzzy High Gain Observer)를 설계하였다.

본 논문에서는 설계한 적응 퍼지 고이득 관측기의 속도추정 성능을 검증하기 위해 먼저 고이득 관측기의 최적 이득을 선정하고 퍼지 제어방식을 통하여 적절한 고이득 관측기의 최적 이득을 교류 서보 전동기의 속도제어에 적용하여 관측기 이득이 고정된 고이득 관측기와 비교시뮬레이션 및 속도센서가 있는 경우와 비교실험을 통해 관측기의 추정성능의 검증하였다.

### 2. 적응 퍼지 고이득 관측기 설계

#### 2.1 고이득관측기

직류서보전동기의 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.

#### 저자 소개

\*\* 正會員 : 建國大學 電氣工學科 博士課程

\*\*\* 正會員 : (주)네트워크테크놀로지 情報技術員 研究所長, 工博

\*\*\*\* 正會員 : 建國大學 電氣工學科 教授, 工博

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

그러나, 식(2)에서 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 추정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서,  $K$ 는 관측이득상수

따라서, 교류 서보전동기의 전류와 전류 도함수를 추정하기 위해 고이득 관측기를 이용하여 추정한 전류와 전류 도함수를 이용하여 속도를 관측한다.

본 논문에서 제안한 교류 서보전동기의 전류와 전류 도함수를 추정하기 위한 고이득 관측기 설계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{i}_1 = \hat{i}_2 + k_1(i_1 - \hat{i}_1)/\varepsilon \quad (4)$$

$$\hat{i}_2 = +k_2(i_1 - \hat{i}_1)/\varepsilon^2 \quad (5)$$

여기서,  $i_1$ 는 전기자전류,  $\hat{i}_1$ 는 전기자전류 추정값

## 2.2 적응 퍼지 고이득관측기

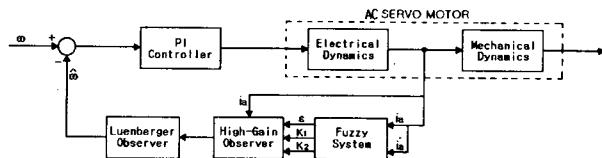


그림 1 적응 퍼지 고이득 관측기를 이용한 속도 관측기 구조

Fig. 1 Structure of Speed Observer using AFHGO

본 논문에서는 퍼지 제어기법을 통하여 교류 서보전동기의 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수를 사용하여 관측기 이득  $\varepsilon$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ 를 선정하였으며 적응 고이득 관측기를 이용한 속도 관측기의 구조는 그림 1와 같다.

고이득 관측기의 이득 중  $\varepsilon$ 은 0에 근접할수록  $\hat{x}_1 = x_1$

이 되는 특성을 가지므로  $\varepsilon$ 을 최대한 적게 선정하는 것이 일반적이나  $\varepsilon$ 을 0.4 이상의 값이나 0.04 이하의 값에서는 출력특성이 현격히 저하되는 특성을 나타내어 적절한  $\varepsilon$ 의 범위를 0.04 ~ 0.4의 범위로 선정하였다. 그러나 고이득 관측기의 이득인  $\varepsilon$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  사이의 상호 연관성에 따라 시스템의 출력특성이 다르게 나타나며 이에 따른 퍼지제어 시스템의 설계규칙은 다음과 같다.

표 2  $\varepsilon$ 에 관한 퍼지규칙  
Table 2 Fuzzy Rule for  $\varepsilon$

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

표 3 K1에 관한 퍼지규칙  
Table 3 Fuzzy Rule for K1

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

표 4 K2에 관한 퍼지규칙  
Table 4 Fuzzy Rule for K2

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

## 3. 시스템 구성

본 논문에서 구성한 시스템은 그림 2와 같고 실험에 사용한 교류 서보 전동기의 사양은 표 5와 같다.

속도제어 실험에 사용된 모터는 정격 출력 400 W (LG기전 : FMA-CN04-AB00)이다. 제어기의 샘플링 주기는 1[msec]였다.

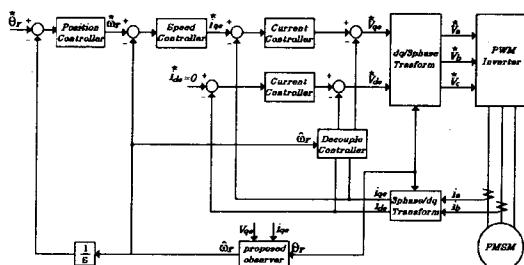


그림 2 제안된 시스템의 블록선도

Fig. 2 Block diagram of the Proposed system

## 표 5 교류 서보 전동기의 사양

Table 5 Specification of the AC servo motor

정격출력	Pr	400 W
정격토크	Tr	13.0 Kgf · cm
정격회전수	Nr	3000 rpm
정격전류	Ir	2.8 A
정격전압	Er	3상 220 V
전기자관성	Jm	$0.16 \times 10^{-3}$ Kgf · cm · sec <sup>2</sup>
정격전력	Pw	101.6 Kw/sec
전기자인덕턴스	La	1.02 mH
최대허용회전수	Nmax	5000 rpm
순시최대토크	Tp	39.0 Kgf · cm
중량	W	1.73 Kgf
Feedback Unit		Incremental Encoder (2000 slit)

## 4. 시뮬레이션 및 실험

### 4.1 시뮬레이션

본 논문에서 설계한 적응 퍼지 고이득 관측기의 속도추정 성능을 확인하기 위하여 교류 서보전동기의 속도센서리스 속도제어에 적용하였다. 또한 관측기의 이득이 고정된 고이득 관측기와 비교 시뮬레이션을 수행하여 속도 추정성능을 비교하였다.

교류서보전동기의 정격속도인 3000[rpm]의 목표값에 대해 본 논문에서 제안한 적응 퍼지 고이득 관측기의 속도 추정 성능을 고이득 관측기와 비교 시뮬레이션을 수행하여 나타내었으며 그 결과는 그림 3 및 표6과 같다.

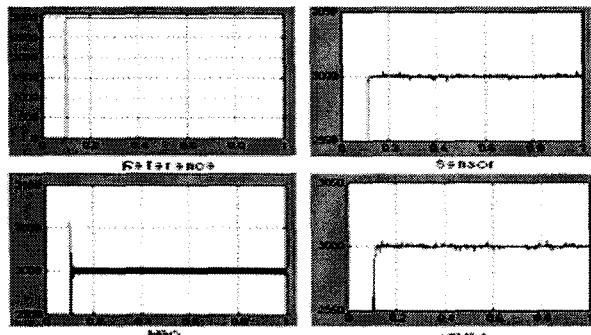


그림 3 시뮬레이션 결과

Fig 3 Results of Simulation

표 6 무부하 스텝운전 시뮬레이션 결과 (3000 rpm)

Table 6 The results of constant speed without load

기준입력	기준속도(3000 [rpm]) 전류(2.85 [A])		
	Maximum overshoot[rpm]	%OS	Tr [ms]
Sensor	3007	0.23	10.5
HGO	3062	2.07	11.2
AFGHO	3015	0.5	11.5

### 4.2 정속운전 실험

그림 4 및 5는 교류 서보 전동기의 무부하 상태에서 정속운전(3000[rpm]) 출력특성을 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 적응 퍼지 고이득 관측기를 이용한 경우를 비교实验한 것이며, 실험결과는 표 9와 같다.

표 7 정속운전 실험결과

Table 7 Experimental result

	최대초과량 [rpm]	최대초과량 백분율 [%]	정착시간 [sec]
기준 속도	3000		1.108
속도센서를 이용한 경우	3049	1.63	1.137
적응 퍼지 고이득 관측기자를 이용한 경우	3113	3.76	1.346

표 7의 결과와 같이 정속운전 실험에서의 출력응답은 최초과량 백분율에서 속도센서 없이 적응 퍼지 고이득 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비하여 약 2.13[%]정도 증가했으며, 정착시간에 있어서도 속도센서 없이 적응 고이득 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비해 약 0.21초 정도 느리게 나타났다. 따라서, 적응 퍼지 고이득 관측기가 과도상태와 정상상태에서 추정성능이 우수

하며, 속도센서 없이 적응 퍼지 고이득 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우의 응답 특성에 근접하다는 것을 입증하였다.

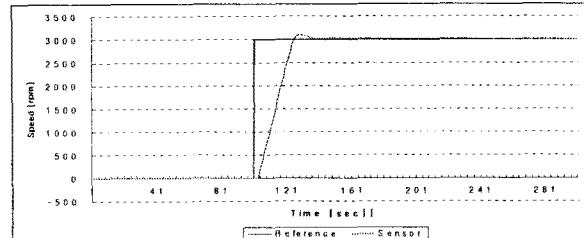


그림 4 속도센서를 이용한 스텝응답

Fig 4 Step response using speed sensor

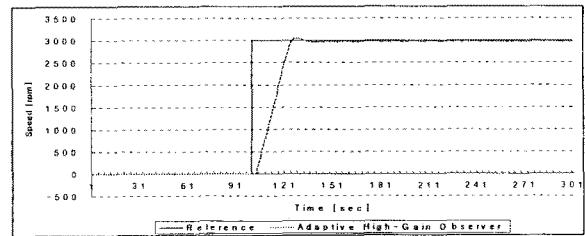


그림 5 속도센서 없이 적응 고이득 관측기자를 이용한 스텝응답

Fig. 5 Step response using speed-sensorless AFHGO

## 5. 결 론

본 논문에서는 교류 서보 전동기의 속도제어시의 속도 센서가 가지는 문제점 및 Luenberger 관측기가 가지는 도함수 추정의 문제를 개선하기 위해 적응 퍼지 고이득 관측기를 이용하여 속도관측기를 설계 하였다. 또한 과도상태에서의 응답 특성 개선과 저속에서의 운전 특성 향상을 입증하기 위하여 교류 서보 전동기를 정속운전 하였을 때의 응답특성을 속도센서가 있는 경우와 고이득 관측기를 이용한 경우를 비교 시뮬레이션 및 실험을 수행하여 정속 운전 시 과도상태와 정상상태에서 안정성 및 추정성능이 우수하다는 것을 입증하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] Joachim Holtz, "Speed Estimation and Sensorless Control of AC Drives", IEEE IECON, pp.649-654, 1993.
- [2] T.H. Liu and C.P. Cheng, "Controller Design for a Sensorless Permanent-Magnet Synchronous Drive System", IEEE Proceedings-B, Vol.140, No. 6, pp. 369-378, 1993.
- [3] M. Naidu and B. K. Bose, "Rotor Position Estimation Speed of a Permanent Magnet Synchronous Machine for High Performance Variable Speed Drive", IEEE-IAS Conf. REC., pp.48-53, 1992.
- [4] Joachim Holtz, "Speed Estimation and Sensorless Control of AC Drives", IEEE IECON, pp.649-654, 1993
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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.