

# 전동기 센서리스제어를 위한 적응 고이득 관측기 설계

## Design of an Adaptive High-Gain Observer for Speed-Sensorless Control of Motor

김상훈\*, 윤광호\*, 남문현\*\*, 김낙교\*\*\*

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

\* 건국대학교 전기공학과 (전화:(02)456-2585, E-mail : shkim30@konkuk.ac.kr)

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

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

**Abstract :** In this paper describes a design of Adaptive high gain observer. 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 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 simulation to compare the case with a speed sensor to the case with Adaptive high gain observer in the speed control of DC servo motor.

**Keywords :**

**I. 서론**

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.[1][2].

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 적응규칙이 필요하게 된다[3][4][5].

둘째, 고이득 관측기는 triangular형으로 표현 가능한 시스템에 적용가능하며, 시스템의 동특성 및 내부파라미터에 대한 정보를 필요로 하지 않는다. 그러나 고나측기의 이득이 관측상태의 개수에 비례해서 제공될로 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. 이러한 여러 관측기들의 문제점을 극복하기 위하여 현재 지능형 제어기법이 다양하게 도입되고 있으며, 그 중 대표적인 방식이 퍼지제어 기법이다[6][7].

따라서 본 논문에서는 적응 제어 기법 중 퍼지제어 기법을 이용하여 관측기의 이득을 최적값으로 선정하며, 기존의 방식에 비해 과도특성이 우수하고 구현이 용이한 적응 고이득 관측기(AHGO : Adaptive High Gain Observer)를 설계하였다.

본 논문에서는 설계한 적응 고이득 관측기의 속도추

정 성능을 검증하기 위해 먼저 고이득 관측기의 최적 이득을 선정하고 퍼지 제어방식을 통하여 적절한 고이득 관측기의 최적 이득을 직류서보전동기의 속도제어에 적용하여 관측기 이득이 고정된 고이득 관측기와 비교시물레이션을 통해 관측기의 추정성능의 검증하여 본 논문에서 설계한 적응 고이득 관측기의 추정성능의 타당성을 입증하였다.

**II. 적응 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.

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

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.

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

여기서,  $K$ 는 관측이득상수

따라서, 직류서보전동기의 전류와 전류 도함수를 추정하기 위해 고이득 관측기를 이용하며 추정한 전류와 전류 도함수를 이용하여 속도를 관측한다.

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

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

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

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

## 2.2 적응 고이득관측기

본 논문에서는 퍼지 제어기법을 통하여 직류 서보전 동기의 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수를 사용하여 관측기 이득  $\epsilon$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ 를 선정하였으며 적응 고이득 관측기를 이용한 속도관측기의 구조는 그림 1와 같다.

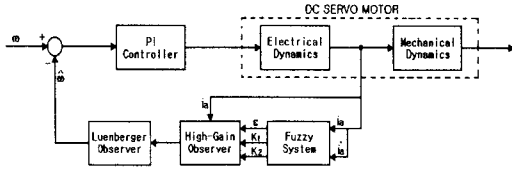


그림 1 적응 고이득 관측기를 이용한 속도 관측기 구조  
Fig. 1 Structure of Speed Observer using Adaptive High gain Observer

### 2.2.1 관측기 이득에 따른 시스템 성능

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

$\epsilon$	$K_1$	$K_2$	속도추정		전류추정	
			Maximum Overshoot	Ts [s]	Maximum Overshoot	Ts [s]
0.4	40	10	3000.7	0.125	3.2704	0.142
	6	0.6	.	도달못함	.	.
	40	0.1	.	0.172	.	0.2
	1	10	3003	0.2	.	0.2
0.1	40	10	3011.3	0.109	8.7633	0.111
	6	0.6	.	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	.	0.117	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	.	0.111	error	error

고이득 관측기의 이득 중  $\epsilon$ 은 0에 근접할수록  $\hat{x}_1 = x_1$ 이 되는 특성을 가지므로  $\epsilon$ 을 최대한 적게 선정하는 것이 일반적이나  $\epsilon$ 을 0.4 이상의 값이나 0.04 이하의 값에서는 출력특성이 현격히 저하되는 특성을 나타내어 적절한  $\epsilon$ 의 범위를 0.04 ~ 0.4의 범위로 선정하였다. 그러나 고이득 관측기의 이득인  $\epsilon$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  사이의 상호 연관성에 따라 시스템의 출력특성이 다르게 나타난다.

### 2.2.2 퍼지시스템

#### (1) 퍼지화부

본 논문은 고이득 관측기의 관측기 이득을 조정하기 위하여 퍼지 시스템을 도입하였으며 퍼지시스템의 입력 값으로는 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수를 사용하였다. 따라서 입력 값을 정성화된 퍼지값으로 변환하기 위해서는 그림 2의 비선형 소속함수와 양자화 방법을 가지고 퍼지화 과정을 수행하였다.

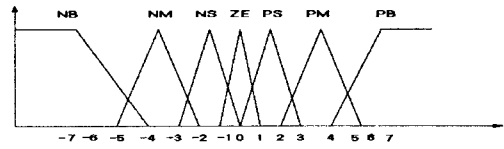


그림 2 비선형 삼각형 소속함수  
Fig 2 Nonlinear triangle membership function

전기자 전류와 전기자 전류의 도함수의 값이 0을 기준으로 절대값이 증가함에 따라 각각의 퍼지변수에 해당하는 소속함수의 폭도 커지도록 설계한 것이다.

#### (2) 퍼지규칙 및 추론

본 논문에서 제안한 적응 고이득 관측기의 설계에 사용된 퍼지 규칙의 형태는 조건부 및 결론부를 혼합 명제로 하였으며 표2, 표3 및 표4와 같다. 또한 본 논문에서 적용한 퍼지시스템의 추론은 Mamdani의 Min-Max 연산을 이용하여 수행하였다.

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

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

표 3  $K_1$ 에 관한 퍼지규칙  
Table 3 Fuzzy Rule for  $K_1$

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

표 4  $K_2$ 에 관한 퍼지규칙  
Table 4 Fuzzy Rule for  $K_2$

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

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

### III. 시뮬레이션

본 논문에서 설계한 적응 고이득 관측기의 속도추정 성능을 확인하기 위하여 직류 서보전동기의 속도센서리스 속도제어에 적용하였으며 시뮬레이션 구성도는 그림 3과 같다. 또한 관측기의 이득이 고정된 고이득 관측기와 비교 시뮬레이션을 수행하여 추정성능을 비교하였다.

시뮬레이션의 방법과 절차는 다음과 같다.

[1] 적응 고이득 관측기의 속도추정 성능을 입증하기 위하여 직류 서보전동기를 정격속도인 3000[rpm]으로 정속 운전을 수행하여 관측기 이득이 고정된 고이득 관측기와 비교 시뮬레이션을 한다.

[2] 적응 고이득 관측기가 직류서보전동기 운전 시 운전점이 변하는 경우에도 우수한 속도 추정 성능을 나타낸다는 것을 확인하기 위하여 구형과 입력(최대값:3000[rpm])에 대해서도 속도추정을 관측기 이득이 고정된 고이득 관측기와 비교 시뮬레이션 한다.

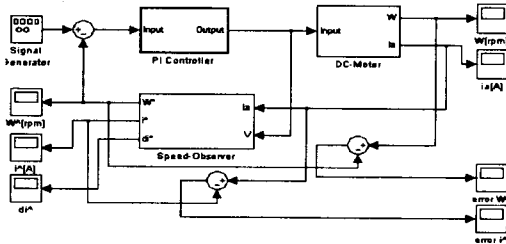


그림 3 시뮬레이션 구성도  
Fig. 3 Configuration of simulation

#### 3.1 정속운전시 속도추정

직류서보전동기의 정격속도인 3000[rpm]의 목표값에 대해 본 논문에서 제안한 적응고이득 관측기의 속도 추정 성능을 고이득 관측기와 비교 시뮬레이션을 수행하여 그림 4~5에 나타내었으며 그 결과는 표5와 같다.

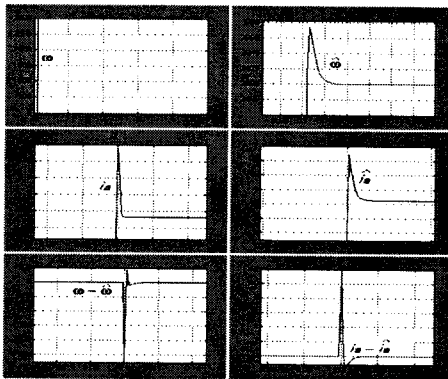


그림 4 정속운전시 고이득관측기 응답  
Fig 7 Response of High gain Observer

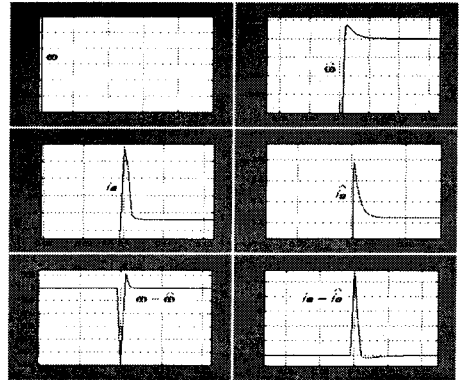


그림 5 정속운전시 적응 고이득관측기 응답  
Fig. 5 Response of Adaptive High gain Observer

표 5 무부하 정속운전 시뮬레이션 결과 (3000 rpm)  
Table 5 The result of constant speed without load (3000 rpm)

기준입력	기준속도(3000 [rpm])	전류(3.24 [A])		
		Max-over shoot[rpm]	%OS	Ts [sec]
고이득 관측기	속도	3074	2.47	0.122
	전류	6.43	98.4	0.128
적응고이득 관측기	속도	3015	0.5	0.315
	전류	3.77	16.4	0.148

#### 3.3 가변속 운전시 속도추정

직류서보전동기를 가변속도(최대속도 3000[rpm])의 목표값에 대해 본 논문에서 제안한 적응고이득 관측기의 속도 추정 성능을 고이득 관측기와 비교 시뮬레이션을 수행하여 그림 6~7에 나타내었으며 그 결과는 표6과 같다.

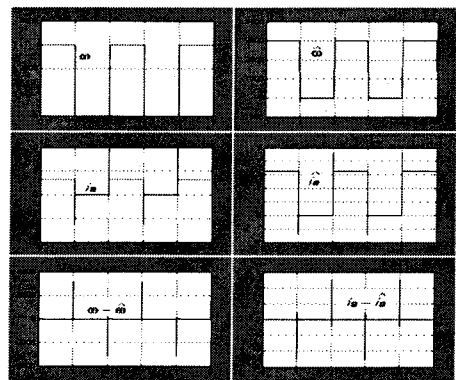


그림 6 가변속운전시 고이득관측기 응답  
Fig 6 Response of High gain Observer

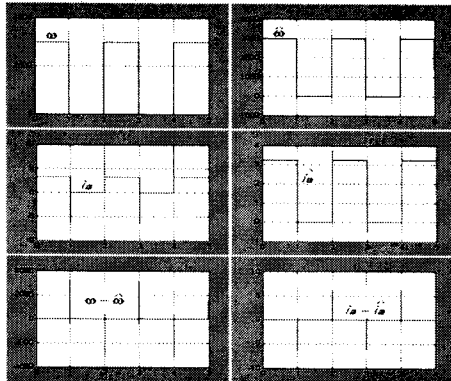


그림 7 가변속운전시 적응 고이득관측기 응답  
Fig 7 Response of Adaptive High gain Observer

표 6 무부하 가변속 운전 시뮬레이션 결과 (최대속도 3000 rpm)  
Table 6 The result of variable speed without load (Max 3000 rpm)

기준입력	최대속도 (3000 [rpm])	전류 (3.25[A])	
		Max overshoot[rpm]	%OS
고이득 관측기	속도	3197	6.57
	전류	4.62	42.2
적용 고이득 관측기	속도	3159.3	5.31
	전류	3.75	15.4

#### IV. 결론

본 논문에서 제안된 적응 고이득관측기의 관측성능을 확인하기 위하여 직류 서보전동기의 속도제어에 적용하여 관측기 이득이 고정된 고이득 관측기와 비교 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 직류서보전동기를 정속 운전과 가변속 운전으로 나누어 시뮬레이션을 수행하였으며 시뮬레이션 결과를 토대로 고찰하면 다음과 같다.

##### (1) 정속운전

3000[rpm]으로 운전 시 먼저 관측기의 이득이 고정된 고이득 관측기는 기준입력속도에 비해 약 2.45~2.47(%)정도의 오버슈트가 발생하였으며 지령전류에 비해 약 98(%)정도의 오버슈트를 발생하였고 정착시간은 약 0.121~0.122[sec]로 나타났다.

그러나 적용 고이득 관측기는 기준입력속도에 비해 약 0.5(%)정도의 오버슈트가 발생하였으며 지령전류에 비해 약 16.2~16.4(%)정도의 오버슈트를 발생하였고 정착시간은 약 0.133~0.315[sec]로 나타났다.

결과에서 나타나듯 기준입력(속도 및 지령전류)에 대해 적용 고이득 관측기가 고이득 관측기에 비해 오버슈트가 속도에서는 약 2(%)정도 감소되었으며 전류에서는 약 75(%)정도 감소되었다.

그 이유는 관측기의 이득값이 고정되어 있는 고이득 관측기의 경우보다 퍼지동조기법을 이용하여 관측기의 이득값을 시스템의 특성에 맞게 설정하는 적응고이득 관측기가 시스템의 변화에 따른 관측성능이 우수하여 오버슈트가 감소되었다고 할 수 있다.

그러나 정착시간에 있어서는 적용 고이득 관측기가 고이득 관측기에 비해 약 0.01[sec]정도 낮은 것으로 나타났다.

그 이유는 퍼지동조기법을 이용하여 관측기의 이득값을 시스템의 특성에 맞게 설정하는 적응 고이득 관측기는 연산속도를 개선하기 위하여 퍼지시스템을

Look-Up Table을 이용하였지만 이득이 결정된 시스템에 비해 연산시간이 늘어짐으로서 정착시간이 늦게 나타난 것이라 할 수 있다. 그러나 정착시간을 본래 제어시스템에서 규정한 응답이 목표값의  $\pm 3\sim 5(\%)$ 에 도달하는 시간으로 간주하면 적응고이득 관측기의 정착시간은 고이득 관측기와 거의 동일하다고 할 수 있다.

##### (2) 가변속 운전

가변속 운전시 최대 속도는 3000[rpm]으로하여 무부하 상태에서 가변속 운전을 수행하였다.

관측기의 이득이 고정된 고이득 관측기는 기준 속도 입력에 비해 약 6.5%의 오버슈트가 발생하였으며, 기준 전류에 비해 약 42~45%정도의 오버슈트를 발생하였다. 그러나, 적용 고이득관측기는 기준속도 입력에 비해 약 5%정도의 오버슈트를 발생하였으며 기준전류에 비해 약 15.8%정도 발생하였다.

이상 위 결과에서 나타나듯 운전점이 변하는 가변속 운전시에는 적용 고이득관측기가 오버슈트에서는 고이득관측기에 비해 속도에서는 약 1.5%정도 감소되었으며 전류에서는 약 26(%)정도 감소되었다.

그 이유는 관측기의 이득값이 고정되어 있는 고이득 관측기의 경우보다 퍼지동조기법을 이용하여 관측기의 이득값을 시스템의 특성에 맞게 설정하는 적응고이득 관측기가 운전점이 변화되는 경우와 같이 시스템의 특성이 변화하는 경우에도 그에 따른 관측성능이 우수하여 오버슈트가 감소되었다고 할 수 있다.

##### 참고문헌

- [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.
- [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] Joachim Holtz, "Speed Estimation and Sensorless Control of AC Drives", IEEE IECON, pp.649-654, 1993.
- [7] Kubota, "DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.29, No.2, pp344-348, Mar 1993.
- [16] M. Abrate, G. Griva, F. Profumo, A. Tenconi, "High Speed Sensorless Fuzzy-Like Luenberger Observer", IEEE PESC., Vol. 1, pp. 477-481, July 1999.
- [17] G. Griva, F. Profumo, L. Rosell, R. Bojoi, "Optimization of Fuzzy-Like Luenberger Observer for High Speed Sensorless Induction Motor Drives Using Genetic Algorithms", IEEE Industry Applications Conference., Rec, Vol. 2, pp. 1268-1274, Oct 2000.