

교류 서보 전동기 속도센서리스 제어를 위한 퍼지 동조 고이득 관측기 설계

論 文
54D-12-3

Design of a Fuzzy-Tuning High Gain Observer for Speed-Sensorless Control of an AC Servo Motor

金相勳* · 金洛教*
(Sang Hoon Kim · Lark Kyo Kim)

Abstract - This paper deals with speed-sensorless control of an AC servo motor using Fuzzy-Tuning High Gain Observer(FTHGO). Resolver or encoder can be used to measure a rotor speed, but it has a limit to detect motor speed precisely. To solve this problem, it is studied to measure a speed of an AC servo motor without sensor. In this paper, the gain of an observer to estimate motor speed is properly set up and designed using the fuzzy control theory. It calculates the differentiation of the rotor current of the AC motor and estimates the rotor speed using it. Proposed speed sensorless control is performed using the estimated speed as the control variable. Designed FTHGO is applied to AC servo motor to verify the feasibility of the proposed observer. Feasibility of the FTHGO proposed in this paper is proven comparing the experimental results with/without the speed sensor.

Key Words : Speed-sensorless Control, Fuzzy Reasoning, Fuzzy-tuning, AC Servo Motor, High Gain Observer

1. 서 론

교류서보전동기는 직류전동기 및 유도 전동기에 비해 정격 속도 하에서는 선형적 속도제어가 가능하며, 간단한 구조와 높은 자속밀도 낮은 관성능률, 적은 잡음과 고출력 등의 장점을 가진다. 이러한 교류서보전동기는 회전자와 영구자석으로부터 정현파형태의 자속을 공급받기 때문에 전동기 회전자의 정확한 위치를 알아야 전동기에 대한 벡터제어를 할 수 있다. 회전자의 위치 및 속도를 측정하기 위하여는 홀 소자, 레졸버 및 엔코더와 같은 센서 등이 사용되고 있는데, 홀 소자는 연속적으로 회전자 위치를 측정할 수 없고 외부 자계의 영향을 받기 쉽다[1][2]. 레졸버의 경우 회전자의 위치 및 속도를 연속적으로 검출할 수 있다는 장점은 있으나, 고가로 인한 경제적인 문제점과 센서의 안정성을 확보하기 위한 전동기의 설계 및 가공 공정이 복잡해지는 단점이 있다. 엔코더를 사용하는 경우에는 축의 한 쪽을 엔코더용으로 할당해야 하기 때문에 방열 팬을 부착할 수 없으므로 장시간 사용할 때 냉각에 대한 문제점이 설계 시에 고려되어야 한다. 이러한 센서가 가지는 문제점을 해소하기 위하여 센서를 이용하여 속도를 검출하지 않고 전동기의 속도를 검출하는 방법에 대해 많은 연구가 진행되고 있으며, 그 중에서도 속도관측기를 설계

하여 속도를 추정하는 방식의 연구가 활발히 진행되고 있다 [3][4].

센서리스 운전을 위한 대표적인 관측기로는 루엔버거 관측기와 고이득 관측기가 있다. 첫째, 1964년 Luenberger에 의해 제안된 Luenberger 관측기[5]는 속도관측기로 사용하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있으며 상태를 관측하기 위해 시스템의 동특성이나 내부 파라미터를 알아야 한다는 문제점을 가지고 있으며 교류서보 전동기와 같은 삼각형 소속함수 구조를 갖는 시스템에의 적용은 한계를 가진다. 이러한 Luenberger 관측기의 문제점을 해결하기 위해서는 불확실한 시스템 동특성에 대해 강인한 구조를 갖는 관측기를 설계하거나, 별도의 파라미터 적용 규칙이 필요하게 되며 교류 서보 전동기의 속도관측을 위해서는 도함수를 직접 추정해야 하는 문제점을 가진다.

둘째, Khalil이 제안한 고이득 관측기[8]는 소속함수가 삼각형으로 표현 가능한 시스템에 적용가능하며, 시스템의 동특성 및 내부 파라미터에 대한 정보를 필요로 하지 않는다. 그러나 고이득 관측기의 이득이 관측상태의 개수에 비례해서 제곱 꼴로 커지게 된다. 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 및 신경회로망 기법이다[9][10].

본 논문에서는 전동기 속도제어 시 속도검출을 위한 센서들의 문제점을 개선하고 Luenberger 관측기에서의 도함수 추정의 문제를 해결하기 위해 고이득 관측기를 도입하는 경

* 교신저자 : 正會員, 建國大學校 電氣工學科 教授 · 工博
Email : lkim@konkuk.ac.kr

* 正會員 : (株)아이노메드 研究所長 · 工博
接受日字 : 2005年 8月 16日
最終完了 : 2005年 9月 9日

우의 문제인 관측기 이득 선정의 문제점을 개선하고자 한다. 이를 위하여 적응제어 기법 중 퍼지제어 기법을 이용하여 관측기의 이득 값을 최적값으로 선정하여 기존의 방식에 비해 과도특성 및 정상특성이 우수하고 구현이 용이한 새로운 형태의 속도관측기인 퍼지 동조 고이득 관측기 (FTHGO : Fuzzy Tuning High-Gain Observer)를 설계하였다.

또한, 제안한 FTHGO를 400[W] 교류 서보 전동기에 적용하여 속도센서가 있는 경우, 속도센서 없이 Luenberger형 관측기를 이용하여 속도를 추정한 경우, 고이득 관측기를 이용하여 속도를 추정한 3가지 경우를 각각 부하가 없는 경우와 부하가 있는 경우로 나누어서 비교 실험하여 본 논문에서 설계한 FTHGO의 속도 추정 성능을 입증하였다.

2. 퍼지 동조 고이득 관측기 설계

교류 서보 전동기의 동특성을 이용하여 속도관측기로서 Luenberger 관측기를 설계하면 식 (1)과 같다.

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

여기서 L은 Luenberger 관측기의 이득 상수이다. 본 논문에서는 -5.32로 선정하였다.

전기자 전류의 도함수를 알 수 없기 때문에 속도를 직접 추정하는 것은 불가능하며 Luenberger형의 관측기를 속도관측기로 사용하기 위해서는 직접 측정이 가능한 전기자 전류를 미분기를 이용하여 도함수를 직접 구해서 사용하게 된다. 그러나 이 경우 미분기의 특성에 따라 시스템의 특성이 좌우될 수 있다는 단점을 가지게 된다.

따라서 도함수 추정 시 간단한 알고리즘만으로 도함수를 직접 추정할 수 있는 고이득 관측기를 Luenberger형의 관측기의 전단에 사용하여 도함수를 구하게 된다.

일반적인 고이득 관측기의 알고리즘은 식(2)와 같다.

$$\hat{x}_i = \hat{x}_{i+1} + k_i(y - \hat{y})/e^i \quad (2)$$

본 논문에서는 교류 서보 전동기의 속도센서리스 제어 시 고이득 관측기를 이용하여 전기자 전류의 도함수를 추정하여 이것을 이용하여 속도관측기를 구성하는 경우의 가장 큰 문제점인 고이득 관측기 이득 선정의 문제를 개선하기 위하여 지능형 제어기법 중 구현이 간단하고 성능이 우수한 퍼지 제어기법을 도입하여 관측기의 이득 선정의 문제점을 개선하였으며 그 구조는 그림 1과 같다.

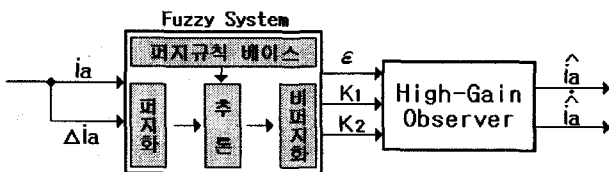


그림 1 FTHGO의 구조
Fig. 1 Structure of FTHGO

본 논문에서 설계한 FTHGO는 기본적으로 도함수 추정을 위한 고이득 관측기 부분과 고이득 관측기의 이득인 ϵ , k_1 , k_2 을 자동 조정하기 위한 퍼지 제어 부분으로 구성하였다. 따라서 FTHGO는 고이득 관측기의 이득 선정을 위한 제어 부분이 퍼지 제어 형태이므로 퍼지화 부분, 추론 및 퍼지 규칙 부분, 그리고 비퍼지화 부분으로 구성되어 있다.

먼저 퍼지화 부분은 교류 서보 전동기에서 직접 측정된 전기자 전류와 전기자 전류의 변화율을 입력으로 하고 비선형 삼각형 소속함수와 비선형 양자화 과정을 통하여 입력 값을 퍼지 변수로 변환하였다. 실제 전기자 전류나 전기자 전류의 변화율이 선형적으로 변화되는 경우에는 선형의 양자화 방법을 사용하게 되나 본 논문에서 적용한 교류 서보 전동기는 정격으로만 운전되는 것이 아니라 운전 점에 따라 비선형적인 값들이 사용되는 경우가 많기 때문에 비선형의 소속함수 및 양자화 방법을 사용하였다.

추론부와 퍼지규칙은 퍼지제어에서 가장 성능이 우수하다고 알려져 있는 Mamdani의 Min-Max 연산을 수행 하였고 퍼지 규칙은 시행 오차법을 통하여 관측기 이득에 따른 시스템의 성능 분석을 통하여 설정하였다. 마지막으로 비퍼지화 부분에서는 추론된 결과를 고이득 관측기의 이득으로 사용하기 위하여 무게중심법을 사용하였다. 본 논문에서 설계한 FTHGO를 이용하여 속도관측기를 구성하면 그림 2와 같고 이것은 퍼지 제어 부분에서 결정되어진 ϵ , k_1 , k_2 를 고이득 관측기의 이득으로 사용하고 전기자 전류의 도함수를 정확하게 추정하여 속도관측기의 성능을 개선하였다.

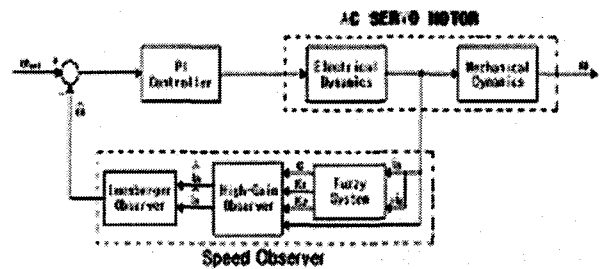


그림 2 FTHGO를 이용한 속도 관측기 구조
Fig. 2 Configuration of Speed Observer using FTHGO

2.1 퍼지 시스템 이용 설계

본 논문에서는 퍼지 동조기법을 통하여 교류 서보전동기의 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수를 사용하여 관측기이득 ϵ , k_1 , k_2 을 선정하였으며 퍼지 시스템은 그림 3과 같이 퍼지화부, 추론부, 비퍼지화부의 세 부분으로 구성되며 연산 속도의 개선을 위하여 입력 값인 전기자 전류와 전류의 변화율이 정해지면 나머지 모든 연산과정은 Look-Up Table을 사용하여 연산속도를 개선하였다.

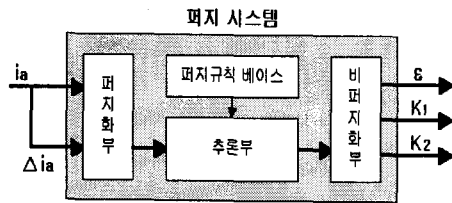


그림 3 퍼지시스템의 구조
Fig. 3 Structure of fuzzy system

2.1.1 퍼지화부

본 논문에서 설계한 FTHGO는 입력값을 퍼지값으로 변환하기 위하여 그림 4에 나타낸 것과 같은 비선형의 삼각형 소속함수를 사용하였다.

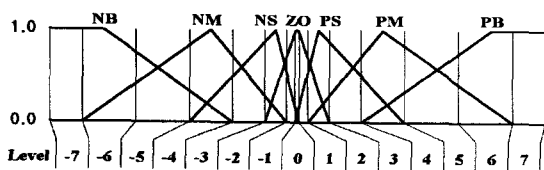


그림 4 비선형 삼각형 소속함수
Fig. 4 Nonlinear triangle membership function

고이득 관측기의 관측기 이득 ϵ , k_1 , k_2 를 선정하기 위한 퍼지 시스템의 입력을 퍼지값으로 변환하기 위해 사용된 비선형의 삼각형 소속 함수는 입력 값인 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수 값이 0을 기준으로 절대값이 증가함에 따라 각각의 퍼지변수에 해당하는 소속함수의 폭도 커지도록 설계한 것으로, 오차가 큰 구간에서는 개략제어 특성이 나타나고, 오차가 작은 구간에서는 미세제어 특성이 나타나도록 한 것이다. 또한, FTHGO에서 사용된 비선형 삼각형 소속함수는 NB 또는 PB에 해당하는 경우(전기자 전류 및 전기자 전류의 변화율의 절대 값이 매우 큰 경우)는 그 값이 포화되도록 하였고, ZO(전기자 전류와 전기자 전류의 변화율의 절대값이 극히 작은 경우)는 허용오차를 고려하여 삼각형 소속함수가 아닌 사다리꼴 소속함수를 사용하였다.

2.1.2 퍼지 규칙 설계

본 논문에서 설계한 FTHGO에 사용된 퍼지 규칙의 형태는 식(3)과 같이 조건부는 전기자 전류와 전기자 전류의 변화율로 되어 있는 혼합명제, 결론부는 FTHGO의 이득인 ϵ , k_1 , k_2 에 대한 각각의 단일명제로 설계 하였다.

$$\begin{aligned}
 \text{Rule}_i : & \text{ IF } i_a \text{ is } A_i \text{ and } \Delta i_a \text{ is } B_i; \quad \text{ THEN } \epsilon \text{ is } D_i; \\
 & \text{ IF } i_a \text{ is } A_i \text{ and } \Delta i_a \text{ is } B_i; \quad \text{ THEN } k_1 \text{ is } E_i; \\
 & \text{ IF } i_a \text{ is } A_i \text{ and } \Delta i_a \text{ is } B_i; \quad \text{ THEN } k_2 \text{ is } F_i;
 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 i_a 는 퍼지 시스템의 입력인 전기자 전류이며, Δi_a 는 또 다른 퍼지시스템의 입력인 전기자 전류의 변화율이며

ϵ , k_1 , k_2 는 각각의 출력인 FTHGO 관측기의 이득이다. 또한, A_i , B_i , C_i , D_i , E_i , F_i 는 i 번째 퍼지 규칙에 사용된 각 상태변수의 정성적 언어 값을 나타낸다.

표 2 ϵ 에 관한 퍼지규칙
Table 2 Fuzzy Rule for ϵ

ΔI_a							
I_a	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB						
NM				NM	NM	NS	ZO
NS			NM	NS	ZO		
ZO			NS	ZO	PS		
PS			ZO	PS	PM		
PM	ZO	PS	PM	PM			
PB	PB						

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

ΔI_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

ΔI_a							
I_a	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB							
NM							
NS							
ZO	NS	NM	NB	ZO	PB	PM	PS
PS							
PM							
PB							

2.1.3 추론

본 논문에서 설계한 FTHGO의 추론방법은 Mamdani의 Min-Max 연산을 이용하여 수행하였다. Mamdani의 Min-Max 연산은 퍼지 연관 함수로 Mamdani가 제안한 minimum 연산(R_c)을 이용하여 퍼지 합성 규칙을 이용한 방법이다.

본 논문에서와 같이 n개의 퍼지 제어 규칙으로 구성된 관측기의 경우를 보면

$$\begin{aligned}
 \text{Rule}_i : & \text{ IF } i_a \text{ is } A_i \text{ and } \Delta i_a \text{ is } B_i; \quad \text{ THEN } \epsilon \text{ is } D_i; \\
 & \text{ IF } i_a \text{ is } A_i \text{ and } \Delta i_a \text{ is } B_i; \quad \text{ THEN } k_1 \text{ is } E_i; \\
 & \text{ IF } i_a \text{ is } A_i \text{ and } \Delta i_a \text{ is } B_i; \quad \text{ THEN } k_2 \text{ is } F_i;
 \end{aligned}$$

여기서 $i \in U, \Delta i \in V, \varepsilon, k_1, k_2 \in W$ 이다.

그러면, 퍼지 관계 R_i 는 전체집합 $U \times V \times W$ 의 부분집합으로써 식(4)와 같다.

$$R_i = (A_{1i} \times A_{2i}) \times C_i \quad (4)$$

이 때 전체 제어규칙은 식(5)와 같다.

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_n \\ = \bigcup_{i=1}^n R_i \quad (5)$$

여기서 입력이 A_1^0, A_2^0 라고 하면 추론결과 C 는 식(6)과 같다.

$$C = R \cdot (A_1^0 \times A_2^0) \quad (6)$$

이것은 $C = (R \cdot A_1^0) \cdot A_2^0$ 로 쓸 수 있으며 식(2.6)의 우변은 식(7)과 같다.

$$\max_{\Delta i} [\max (\mu_{R_i}(i, \Delta i, \varepsilon), \mu_{A_1}(i) \wedge \mu_{A_2}(\Delta i))] \\ = \max_{\Delta i} [\max (\mu_{R_i}(i, \Delta i, \varepsilon) \wedge \mu_{A_1}(i) \wedge \mu_{A_2}(\Delta i))] \\ \max_{\Delta i} [\max (\mu_{R_i}(i, \Delta i, k_1), \mu_{A_1}(i) \wedge \mu_{A_2}(\Delta i))] \\ = \max_{\Delta i} [\max (\mu_{R_i}(i, \Delta i, k_1) \wedge \mu_{A_1}(i) \wedge \mu_{A_2}(\Delta i))] \\ \max_{\Delta i} [\max (\mu_{R_i}(i, \Delta i, k_2), \mu_{A_1}(i) \wedge \mu_{A_2}(\Delta i))] \\ = \max_{\Delta i} [\max (\mu_{R_i}(i, \Delta i, k_2) \wedge \mu_{A_1}(i) \wedge \mu_{A_2}(\Delta i))] \quad (7)$$

따라서 결론 C 는 식(8)과 같이 표현된다.

$$C = R \cdot (A_1^0 \times A_2^0) \\ = \max_{i, \Delta i} [(R(i, \Delta i, \varepsilon) \wedge A_1^0(i) \wedge A_2^0(\Delta i))] \\ C = R \cdot (A_1^0 \times A_2^0) \\ = \max_{i, \Delta i} [(R(i, \Delta i, k_1) \wedge A_1^0(i) \wedge A_2^0(\Delta i))] \\ C = R \cdot (A_1^0 \times A_2^0) \\ = \max_{i, \Delta i} [(R(i, \Delta i, k_2) \wedge A_1^0(i) \wedge A_2^0(\Delta i))] \quad (8)$$

이로서 퍼지 집합 $C(\varepsilon), C(k_1)$ 및 $C(k_2)$ 가 출력으로 구해진다.

2.1.4 비퍼지화

본 논문의 비퍼지화 방법은 일반적으로 가장 우수한 성능을 보이는 무게 중심(Center of Gravity)방법을 사용하였다. 이 방법은 합성된 출력부 퍼지 집합에서 무게중심을 구하는 방법으로 식 (9)와 같다.

$$u_0 = \frac{\sum_{j=1}^k \mu(u_j) \cdot u_j}{\mu(u_j)} \quad (9)$$

2.2 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 FTHGO의 속도추정 성능을 확인하기 위하여 교류 서보 전동기의 속도 센서리스 속도 제어에 적용하였으며 시뮬레이션 구성도는 그림 5와 같다. 또한

FTHGO의 속도추정 성능을 입증하기 위하여 교류 서보 전동기를 정격속도인 3,000[rpm]으로 정속운전을 수행하여 Luenberger 관측기와 Khalil의 고이득 관측기(HGO) 및 본 연구에서 제안한 FTHGO와 비교 시뮬레이션을 수행하여 기준 속도 및 기준전류에 대한 추정성능을 비교하였으며 모든 시뮬레이션은 MATLAB과 SIMULINK 프로그램을 사용하여 수행하였다.

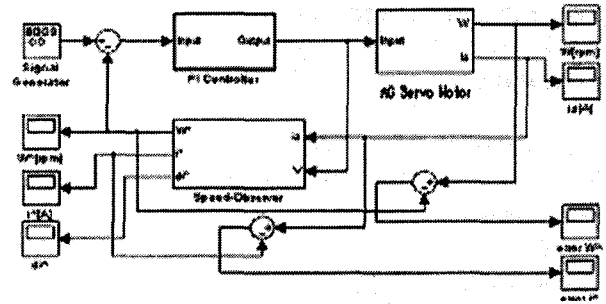


그림 5 시뮬레이션 구성도
Fig. 5 Configuration of simulation

2.2.1 정속운전 시뮬레이션 결과

교류 서보 전동기의 정격속도인 3,000[rpm]의 목표 값에 대해 본 논문에서 제안한 FTHGO의 속도 추정 성능을 시뮬레이션을 수행하여 그림 6에 나타내었으며 그 결과는 표 5와 같다.

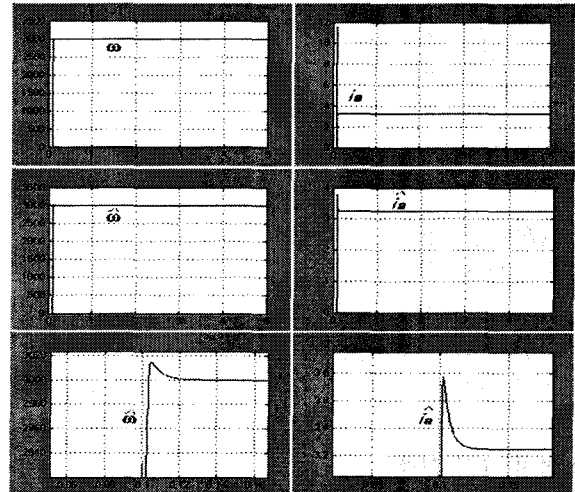


그림 6 정속운전시 FTHGO 응답
Fig. 6 Response of FTHGO

표 5 무부하 정속운전 시뮬레이션 결과 (3,000 rpm)
Table 5 The results of constant speed without load (3,000 rpm)

기준입력	기준속도(3,000 [rpm])		전류(3.24 [A])	
		Maximum overshoot [rpm]	%OS	Ts [sec]
FTHGO	속도 [rpm]	15	0.5	0.315
	전류[A]	3.77	16.4	0.148

2.2.2 저속운전 시뮬레이션 결과

교류 서보 전동기를 저속인 200[rpm]의 목표 값에 대해 본 논문에서 제안한 FTHGO의 속도 추정 성능을 시뮬레이션을 수행하여 그림 7에 나타내었으며 그 결과는 표6과 같다.

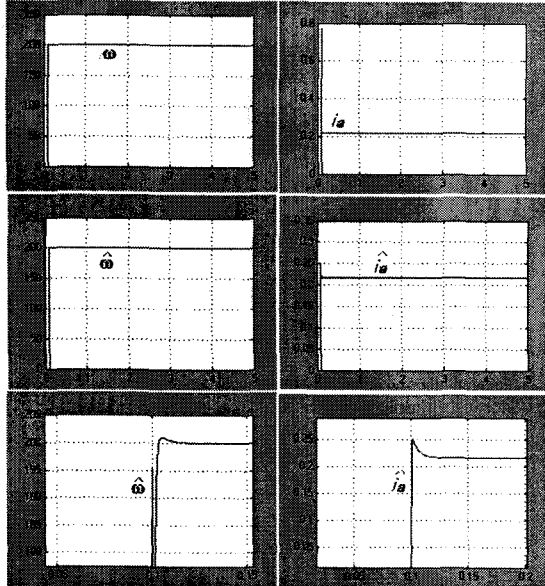


그림 7 정속운전시 FTHGO 응답
Fig. 7 Response of FTHGO

표 6 무부하 정속운전 시뮬레이션 결과 (200rpm)
Table 6 The results of constant speed without load (200 rpm)

기준입력	기준속도(200 [rpm])		전류(0.216 [A])	
		Maximum overshoot [rpm]	%OS	Ts [sec]
FTHGO	속도[rpm]	1	0.5	0.133
	전류[A]	0.25	15.7	0.144

2.2.3 시뮬레이션 고찰

본 논문에서는 제안된 FTHGO의 관측성능을 확인하기 위하여 교류 서보전동기의 속도제어에 적용하여 정속운전 상태에서 정격속도와 저속영역에서 비교 시뮬레이션을 수행하였으며 시뮬레이션 결과를 토대로 고찰하면 다음과 같다.

기준입력(속도 및 지령전류)에 대해 본 논문에서 제안한 FTHGO에서 오버슈트가 속도에서는 약 0.5(%)정도 나타났고 초기 기동전류에서는 약 16(%)정도로 나타났다. 그 이유는 일반적인 관측기의 경우 도함수 추정을 위하여 사용한 미분기에 의해서도 일정부분 오차가 발생하여 정확한 도함수 추정이 불가능하며 또한 정확한 도함수 추정을 위하여 도입한 고이득 관측기의 경우는 관측기의 이득 값 고정으로 인하여 변화되는 시스템에 적용하기가 어렵다. 따라서 퍼지 동조 기법을 이용하여 관측기의 이득 값을 시스템의 특성에 맞게 설정하는 FTHGO가 시스템의 변화에 따른 관측성능이 있으므로 오버슈트가 감소되었다고 할 수 있다. 또한, 정착시간에 있어서도 FTHGO가 약 0.31[sec] 로 나타났다. 그 이유

는 연산속도를 개선하기 위하여 관측기 이득을 자동으로 결정하는 퍼지 시스템의 연산속도 개선을 위하여 Look-Up Table을 이용하였지만 이득이 결정된 일반관측기에 비해 연산시간이 늦어짐으로서 정착시간이 늦게 나타난 것이라 볼 수 있다.

3. 실험

3.1 시스템 구성

본 논문에서는 속도 센서의 문제점을 개선하고 400[w] 교류 서보 전동기의 속도센서리스 제어를 위하여 FTHGO를 설계 및 적용하였다. 이를 위하여 제작된 디지털 서보 시스템을 이용하여 속도센서를 장착한 경우와 속도센서 없이 관측기 이득이 고정된 고이득 관측기 및 Luenberger 관측기를 속도 관측기로 사용한 경우를 본 논문에서 설계한 FTHGO를 속도 관측기로 적용한 경우와 동일한 조건에서 실험하였으며 교류 서보 전동기를 정속 운전 및 가변속 운전을 수행하여 비교실험을 하였다. 또한 속도제어기로는 구현이 쉽고 성능이 우수한 PI제어기를 사용하였다. 그림 8은 전체 시스템의 구성도를 나타낸 것이며 표 7은 교류 서보 전동기의 사양이다.

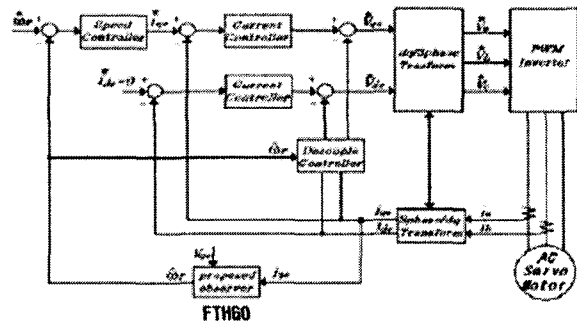


그림 8 시스템 구성도
Fig. 8 Configuration of System

표 7 교류 서보 전동기의 사양
Table 7 Specification of an 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	0.16×10^{-3} Kgf · cm · sec ²

3.2 실험 결과

3.2.1 정속운전

교류 서보 전동기를 목표값이 2,000[rpm]일 때, 각각 센

서를 이용한 경우, Luenberger관측기, 고이득 관측기 및 FTHGO를 적용한 경우의 시스템 응답을 비교하여 그림 9에 나타내었으며 결과를 표 8에 정리하였다.

표 8 정속운전 실험결과표

Table 8 The results table of constant speed control

응답특성	Sensor	Luenberger	HGO	FTHGO
최대초과량 [rpm]	49	57	202	145
최대 백분율 초과량 [%]	2.45	12.85	10.1	7.25
상승시간 [sec]	0.0198	0.0286	0.0259	0.0203
정착시간 [sec]	1.1268	2.17	1.35	1.2896

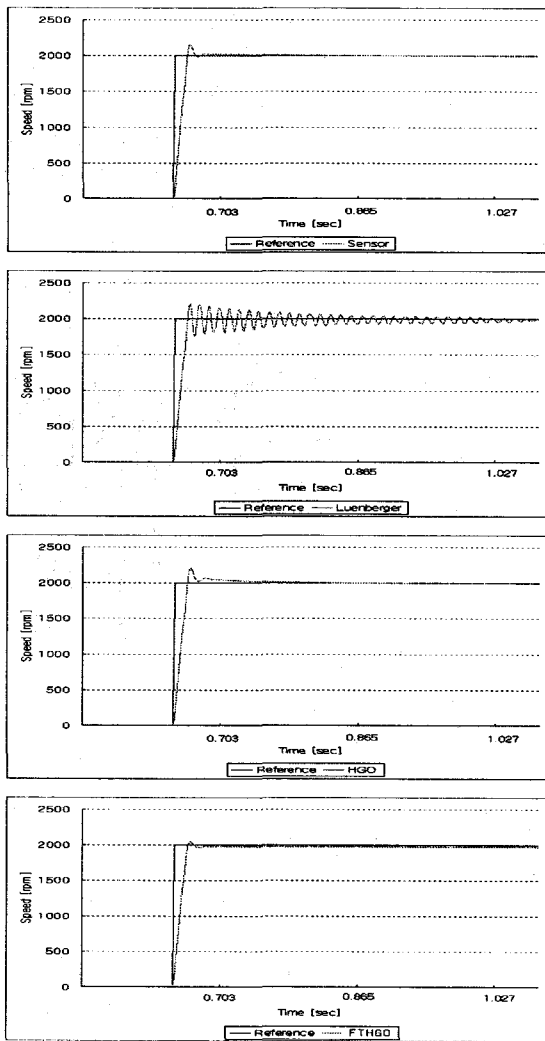


그림 9 정속운전 실험결과 (2,000[rpm])

Fig. 9 The results of constant speed control(2,000[rpm])

3.2.2 저속운전

교류 서보 전동기를 목표값이 400[rpm]일 때, 각각 센서를 이용한 경우, Luenberger 관측기, 고이득 관측기 및 FTHGO를 적용한 경우의 시스템 응답을 비교하여 그림 10에 나타내었으며 결과를 표 9에 정리하였다.

나타내었으며 결과를 표 9에 정리하였다.

표 9 저속운전 실험결과표 (400[rpm])

Table 9 The results table of low speed control

응답특성	Sensor	Luenberger	HGO	FTHGO
최대초과량 [rpm]	51	93	43	35
최대 백분율 초과량 [%]	12.75	48.25	10.75	8.75
상승시간 [sec]	0.0108	0.0109	0.0094	0.0072
정착시간 [sec]	1.116	1.402	1.1124	1.1106

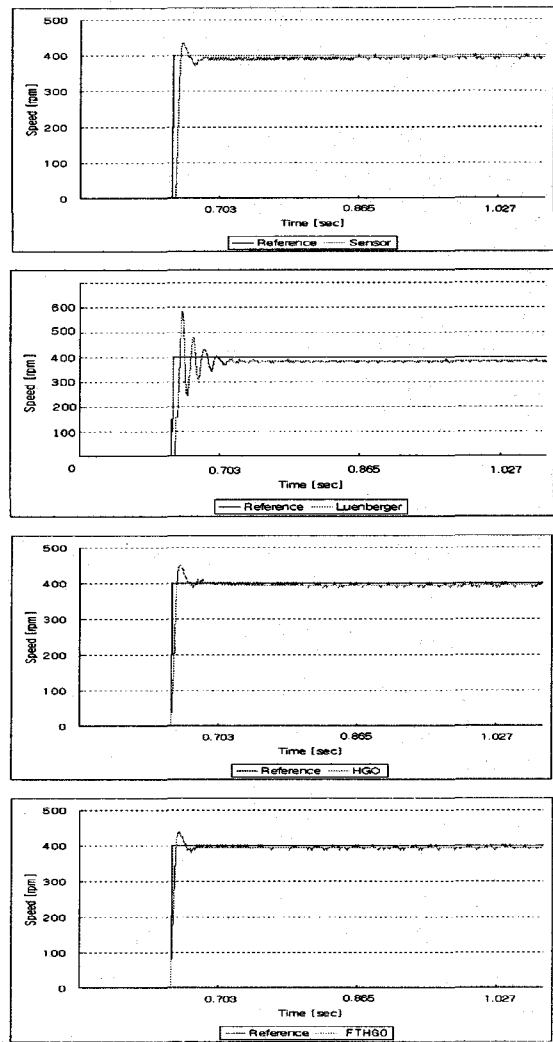


그림 10 저속운전 실험 (400[rpm])

Fig. 10 The results of low speed control (400[rpm])

3.2.3 정역운전

교류 서보 전동기를 최대값이 2,000[rpm]일 때, 각각 센서를 이용한 경우, Luenberger 관측기, 고이득 관측기 및 FTHGO를 적용한 경우의 시스템 응답을 비교하여 그림 11에 나타내었으며 결과를 표 10에 정리하였다.

표 10 정역운전 실험결과표 (최대값 2,000[rpm])
Table 10 The results table of variable speed control

응답특성	Sensor	Luenberger	HGO	FTHGO
최대초과량 [rpm]	202	271	153	57
최대 백분율 초과량 [%]	10.1	13.55	7.65	2.85

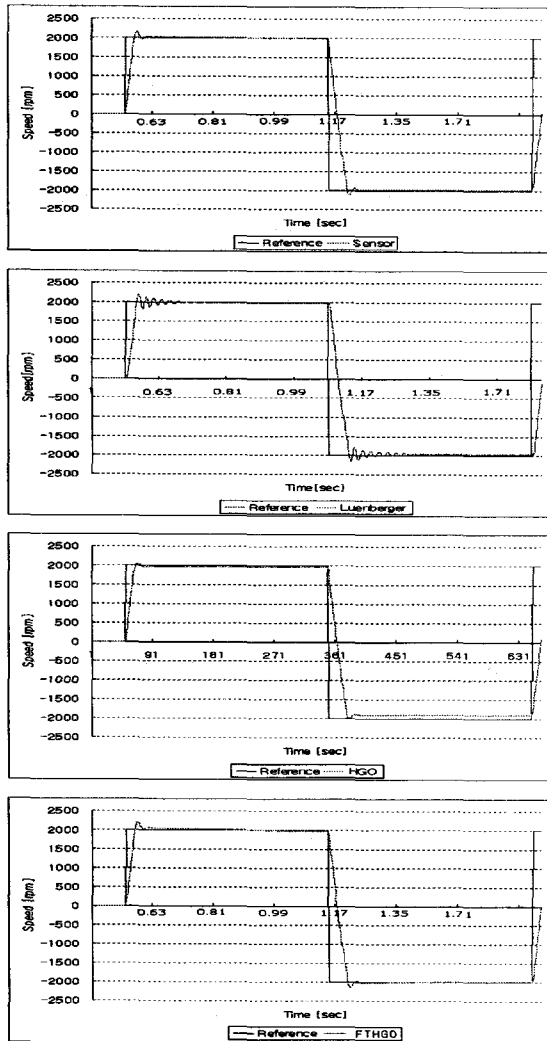


그림 15 정역운전 실험 (2,000[rpm])
Fig. 15 Results of variable speed control(2,000[rpm])

3.3 실험결과 고찰

3.3.1 정속운전

교류 서보전동기를 2,000[rpm]을 목표 값으로 하여 정속운전을 하였을 때의 응답특성은 센서의 출력응답이 과도상태 및 정상상태에서 모두 우수하며 이 경우에 본 논문에서 설계한 FTHGO가 관측기 이득이 고정된 고이득 관측기에 비해서 최대 백분율 오버슈트에서 약 1.3~3(%) 정도 감소되었고 상승시간에서는 4~5[msec]빠르게 나타났으며 정착시간도 70~200[msec]정도 빠른 특성을 나타내었다. 또한

Luenberger 관측기에 비해 최대 백분율 오버 슈트에서 약 3.37~5.6(%) 정도 감소되었고 상승시간 에서는 8.3~12[msec]빠르게 나타났으며 정착시간도 0.4~0.8[sec]정도 빠른 특성을 나타내었다. 이것은 정격속도 및 정격속도와 근접한 경우에는 센서를 이용한 응답이 속도 관측기를 사용한 경우에 비해 우수하며 속도관측기를 사용하는 경우에는 관측기 이득이 정격속도 추정에 맞게 퍼지 제어기법을 이용한 FTHGO가 관측기의 이득이 고정된 고이득 관측기나 Luenberger 관측기에 비해 과도상태 및 정상상태에서 우수한 성능을 나타냈음을 알 수 있으며 센서를 이용한 응답과 FTHGO의 응답이 거의 유사함을 확인하였다.

3.3.2 저속운전

교류 서보 전동기를 저속인 400[rpm]을 목표 값으로 하여 정속운전을 하였을 때의 응답특성은 FTHGO의 출력이 최대 백분율 오버슈트에서 센서를 이용한 응답에 비해서 4(%) 적고 고이득 관측기에 비해서는 2(%) 적게 나타났으며 Luenberger 관측기에 비해서는 약 40(%)적게 나타났다. 상승시간은 FTHGO가 센서를 이용한 출력에 비해서 2.9[msec] 빠르고 고이득 관측기에 비해서는 1[msec]빠르게 나타났으며 Luenberger 관측기에 비해 2.8[msec] 빠르게 나타났다. 정착시간에서는 FTHGO가 센서를 이용한 출력에 비해서 0.01[sec]빠르고 고이득 관측기에 비해서는 3.4[msec] 빠르게 나타났으며 Luenberger 관측기에 비해 0.26[sec]빠르게 나타났다. 이것은 전동기를 저속영역에서 운전하는 경우에는 속도관측기를 사용하는 경우가 센서를 이용한 응답에 비해 우수하였다. 또한 속도관측기를 사용하는 경우에는 관측기 이득이 정격속도 추정에 맞게 고정된 고이득 관측기 및 Luenberger 관측기보다 본 연구에서 제안한 FTHGO가 과도상태 및 정상상태에서 우수한 성능을 나타냈음을 알 수 있으며 퍼지 제어기법에서도 우수한 특성을 나타내는 방법인 Min-Max 추론 및 무게중심을 이용한 비퍼지화를 통해 조건표를 만들어 사용함으로써 퍼지 연산시간을 감소시켜 모든 응답에서 양호한 특성을 나타내었다. 또한 Luenberger 관측기의 경우와 같이 미분기를 직접 사용하는 경우는 도함수 추정이 정확하게 이루어지지 않기 때문에 특성이 저하되었으며 센서를 이용한 응답의 경우에는 센서의 분해능이 높지 않은 경우 저속에서의 속도 측정 오차가 발생하였다.

3.3.3 정역운전

교류 서보 전동기를 2,000[rpm] 을 최대 값으로 하여 정역운전을 하였을 때의 응답특성은 2,000[rpm]을 최대 값으로 한 경우 FTHGO가 최대 백분율 오버슈트에서 센서를 이용한 출력에 비해 7.25(%) 적고 고이득 관측기에 비해서는 2.45(%) 적게 나타났으며 Luenberger 관측기에 비해 10.7(%) 적게 나타났다. 이상의 결과로 보면 교류 서보전동기를 가변속 운전을 수행하여 운전점이 급격히 변화되는 경

우, 특히 +2,000[rpm] ~ -2,000[rpm]으로 운전하는 경우 센서를 이용한 출력이 속도관측기를 이용한 경우에 비해 저하되며 속도관측기 중에도 고이득 관측기에 비해 관측기 이득이 다시 조정되는 FTHGO가 우수한 속도 추정성능을 나타내었다.

4. 결 론

본 논문에서는 교류 서보 전동기의 속도제어를 위하여 속도센서를 사용하는 경우 속도센서가 가지는 문제점 및 속도센서를 대체할 속도관측기를 설계하는 경우의 문제점인 도함수 추정의 문제 및 관측기 이득에 따른 시스템의 성능 저하를 개선하기 위하여 전동기에서 측정된 전류와 전류의 변화율을 이용하여 속도관측기의 이득이 시스템의 특성에 맞게 자동 동조 되도록 설계하여 속도추정오차 개선 및 저속운전 영역에서의 성능을 개선할 수 있는 새로운 형태의 FTHGO를 설계하여 교류 서보전동기에 적용하여 본 결과 Luenberger 관측기나 이득이 고정된 고이득 관측기 보다 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다. 추후에는 교류 서보전동기의 속도제어를 하는 경우 스위칭을 통하여 정격과 유사한 영역에서는 속도센서를 이용하여 제어하고, 운전점이 급격히 변화하는 경우 및 저속영역에서는 속도관측기를 이용하여 제어를 수행하는 하이브리드 형태의 속도제어에 관한 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 건국대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 논문임.

참 고 문 헌

[1] Joachim Holtz, " Speed Estimation and Sensorless Control of AC Drives", IEEE IECON, pp.649-654, 1993.

[2] Kubota, "DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor", IEEE Trans, Ind. Appl., Vol.29, No.2, pp344-348, Mar 1993.

[3] Z. Iwai, A. Inoue, and S. Kswaji, "Observer", Corona Pub., 1994 (in Japanese)

[4] 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.

[5] S. K. chang, W. T. You, and D. L. Hsu, " Design of General Structured Observers for Linear System with Unknown Input". J. Franklin Inst., Vol.334B, No.2, pp. 213-232. 1997.

[6] 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.

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

[8] 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.

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

[10] 이광형, 오길록 공저, "퍼지이론 및 응용", 홍릉과학출판사, pp 5.3-5.6, 1992.

저 자 소 개



김 상 훈(金相勳)

1971년 6월 29일생.
2000년 2월 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 2월 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2000 - 2003 한라대학교 전기전자공학부 겸임교수.
2002-2004 (주)영풍전력설비 감사
2004-현재 세명대학교전자공학과 겸임교수
2005-현재 (주)아이노메드 연구소장
Tel : (02) 834-0224, Fax : (02) 834-9223
E-mail : conman28@empal.com



김 낙 교(金洛教)

1949년 2월 4일생. 1973년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1977년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사).
1986-87 Oregon State Univ. 교환교수.
1996-97 Ohio State Univ. 교환교수.
1978-80 한국원자력연구소 선임연구원.
1980-현재 건국대학교 전기공학과 교수
Tel : (02) 450-3485, Fax : (02) 447-9186
E-mail : lkkim@konkuk.ac.kr