

고이득 관측기를 이용한 센서없는 직류서보전동기의 속도 제어

論文

52D-10-3

Speed-Sensorless Control of DC Servo Motor Using a High Gain Observer

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

Abstract - This paper deals with speed control of DC servo motor using a high gain observer. It was designed to estimate rotor speed of DC servo motor and it carries out speed control from the feedback of the estimated speed signal. Also, PI controller was used in speed controller. In order to verify the performance of the high gain observer which is proposed in this paper, it is compared estimate performance of Luenberger Observer and 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 high gain observer in the speed control of DC servo motor.

Key Words : high gain observer, DC servo motor, PI controller

1. 서론

현재 산업에 많이 사용되고 있는 직류서보전동기는 회전자 관성이 매우적이고 응답특성이 우수하다는 장점이 있으며 전기자 전류를 독립적으로 제어할 수 있어 전동기의 토오크 제어와 속도 제어에 있어 매우 용이하다. 그러나, 직류 서보전동기는 전압과 전류의 검출은 비교적 용이하지만 회전자의 속도 정보를 얻기 위해서는 레졸버나 엔코더와 같은 속도 센서가 필요하게 된다[1][2].

이러한 속도 센서들은 회전하는 회전자의 속도를 연속적으로 검출할 수 있는 장점이 있으나 정밀한 속도 정보를 얻는 데는 운전속도에 따라서 한계를 가질 수 있으므로 구동시스템의 성능 향상에 문제 요소로 작용하게 된다. 이 문제점의 해결 방안으로, 고 분해능의 센서를 이용할 경우에는 저속에서는 정밀한 속도추정이 가능하나 분해능이 높을수록 센서가 고가이며, 프로세서에서 처리할 수 있는 최대 주파수가 한정되어 있으므로 고속에서는 정확한 속도 정보를 얻기 어렵다. 뿐만 아니라, 구동장치의 가격을 상승시키고 별도의 복잡한 하드웨어가 제어기에 구성되어야 하는 단점이 있으며, 진동 및 습도 등의 주위 환경에 대한 영향을 많이 받기 때문에 사용 환경에 제한을 받는다[3][4].

따라서, 이러한 문제들을 해소하기 위해 엔코더나 레졸버 등의 속도센서를 이용하여 속도를 검출하지 않고 전동기의 속도를 검출하는 방법에 대해 많은 연구가 진행되고 있으며, 그 중에서도 관측기를 설계하여 속도를 추정하는 방식의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이들 속도 센서리스 운전에 대한 연구 관점은 크게 두 가지로, 과도상태에서의 응답특성

개선과 저속에서의 운전 특성 향상을 들 수 있다[5]-[7].

전동기 센서리스 운전에 대한 초기의 연구에서는 전동기의 전압과 전류를 측정하여 전동기 모델로부터 속도를 연산하는 방식을 취해왔으나, 근래에는 현대제어 이론 중 관측기 이론을 적용하여 속도 추정 및 센서리스 운전을 위한 다양한 연구가 시도되고 있다.

센서리스 운전을 위한 대표적인 관측기로는 루엔버거 관측기와 슬라이딩 관측기를 꼽을 수 있다. 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 [8][9]. 또한, 슬라이딩 관측기는 내부파라미터를 알아야 할 필요는 없지만 시스템 동특성에 대한 정보를 필요로 하며, 외란억제 성능은 우수하나 불연속적인 입력으로 인한 추종치의 떨림 현상이 발생한다는 문제점을 가지고 있다[10].

따라서, 본 논문에서는 시스템의 동특성 및 내부파라미터에 대한 정보가 필요하지 않는 고이득 관측기를 이용하여 직류서보전동기의 속도센서리스 제어에 적용하였다. 그러나, 고이득 관측기의 특성상 관측기의 이득이 관측상태의 개수에 비례해서 제공 꼴로 커지게 되므로 관측 초기의 과도상태에 대하여 관측오차가 진동하는 원인이 될 수 있다[11].

본 논문에서 설계한 관측기는 관측기의 이득 값을 적절히 설정하여 기존 방식에 비해 과도 특성이 우수하고 구현이 용이한 속도 센서리스 운전을 실현하였으며, 설계한 고이득 관측기를 이용하여 측정한 전류값으로 전류의 도함수를 직접 추정하고, 이 추정값을 이용하여 회전자 속도를 추정하고 추정된 속도를 피드백시켜 속도제어를 수행하는 새로운 센서리스 제어 방식을 제안하였으며 설계한 고이득 관측기의 추정 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션을 이용한 직류서보

** 正會員 : 建國大 電氣工學科 博士課程

*** 正會員 : 建國大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2003年 7月 18日

最終完了 : 2003年 9月 17日

전동기의 속도 제어에 적용하여 일반적으로 많이 사용하고 있는 루엔버거 관측기와 고이득 관측기와의 추정 성능을 비교하였으며, 일정속 및 가변속 운전에서도 본 논문에서 설계한 고이득 관측기가 루엔버거 관측기에 비하여 우수한 속도 센서리스 속도제어가 구현됨을 입증하였다.

또한, 본 논문에서 설계한 고이득 관측기를 200W 직류서보전동기에 적용하여 속도센서가 있는 경우와 속도센서 대신 고이득 관측기를 이용한 경우를 비교 실험하여 과도상태와 정상상태에서 안정성과 추정성능이 우수함을 입증하며, 본 논문에서 설계한 고이득 관측기가 속도센서의 응답특성에 근접하다는 것을 입증하였다.

2. 관측기 설계

기준 명령에 대한 정확한 응답과 외란에 대한 강인성을 필요로 하는 서보 시스템에서는, 제어 입력의 보상을 위해서 상태 변수와 외란을 측정하게 된다. 그러나, 만약 물리적으로 측정할 수 없거나, 측정하기 어려운 상태 변수가 존재하면 상태관측기를 구성하여 상태 변수나 외란을 추정할 수 있다.

2.1 상태 관측기

상태관측기는 상태변수를 측정할 수 없는 경우에 측정 신호로부터 상태변수를 관측해내야 하며, 출력신호와 입력 신호로부터 상태 $x(t)$ 에 가까운 신호 $\hat{x}(t)$ 를 만들어내는 시스템으로서 $t \rightarrow \infty$ 일 때 $\hat{x}(t) \rightarrow x(t)$ 가 되는 성질을 갖는다. 이러한 상태관측기로부터 발생하는 관측신호 $\hat{x}(t)$ 는 실제상태 $x(t)$ 와 같지는 않지만 빠른 시간 안에 실제상태에 수렴하도록 구성한다.

다음과 같은 시스템

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \tag{1}$$

$$y(t) = Cx(t) \tag{2}$$

에 대한 상태관측기 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A \hat{x}(t) + Bu(t) \tag{3}$$

만일 초기 상태를 알고 있다면 상태관측기에서 얻은 $\hat{x}(t)$ 는 $t \geq 0$ 인 전구간에서 실제상태와 같은 값을 갖게 된다. 그러므로 식(3)을 상태관측기로 사용할 수 있지만, 실제로는 초기상태를 알 수 없기 때문에 이것을 상태관측기로 사용할 수 없다.

$\hat{x}(t)$ 가 $x(t)$ 와 서로 같은가를 판단하려면 두 신호를 비교해보면 되지만 $x(t)$ 를 알 수 없으므로 두 신호 대신에 대상시스템의 측정출력 $y(t)$ 와 관측출력 $\hat{y}(t)$ 를 비교해 보면 된다. 관측출력 $\hat{y}(t)$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{y}(t) = C \hat{x}(t) \tag{4}$$

식(4)가 측정출력 $y(t)$ 와 다르면 $\hat{x}(t)$ 가 $x(t)$ 와 분명히 다른 것이고, 관측출력 $\hat{y}(t)$ 와 측정출력 $y(t)$ 와 같으면 $\hat{x}(t)$ 과 $x(t)$ 이 같아지므로 출력 관측오차 $\hat{y}(t) - y(t)$ 에 관한 정보를

고려하여 식(3)의 상태관측기에서 상태관측 오차를 줄이도록 상태관측기를 구성하면 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A \hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - \hat{y}(t)] \\ &= (A - LC) \hat{x}(t) + LCx(t) + Bu(t) \end{aligned} \tag{5}$$

여기에서, $\hat{x}(t)$ 는 $x(t)$ 의 추정치를 나타내고, L 은 관측기의 상태관측오차를 보정하기 위해 도입한 이득행렬이다. 따라서, 식(3)과 식(5)에 의해서 상태관측오차는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \\ &= Ax(t) + Bu(t) - (A - LC) \hat{x}(t) - LCx(t) - Bu(t) \\ &= (A - LC)(x(t) - \hat{x}(t)) \\ &= (A - LC)e(t) \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 $A - LC$ 가 안정하도록 이득행렬 L 을 선택하면 초기관측오차 $e(0) = x(0) - \hat{x}(0)$ 가 있더라도 $t \rightarrow \infty$ 일 때 $e(t) \rightarrow 0$ 즉, $\hat{x}(t) \rightarrow x(t)$ 의 성질을 만족하는 관측기가 된다.

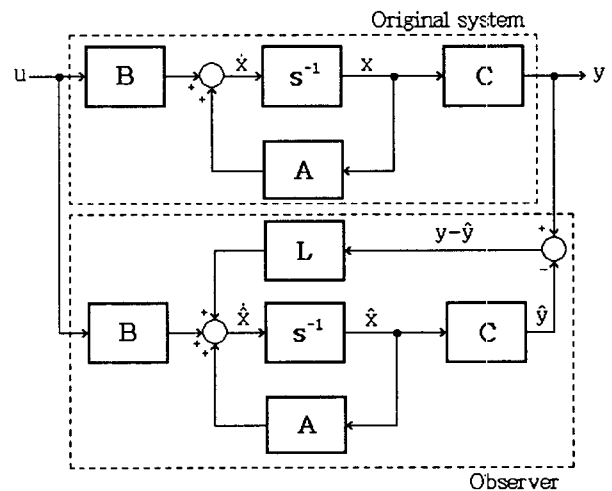


그림 1 상태관측기의 구성도
Fig. 1 Structure of a state observer

식(1), 식(2)와 같은 시스템이 가관측 시스템이라면, 식(6)의 극점을 원하는 응답을 주는 곳에 배치할 수 있다. 그림 1은 상태관측기의 구성도를 나타낸 것이다.

2.2 고이득 관측기

고이득 관측기는 시스템의 동특성 및 내부파라미터에 대한 정보를 필요하지 않는다. 그러나, 고이득 관측기는 관측기의 이득이 관측상태의 개수에 비례해서 제곱꼴로 커지게 되므로 관측 초기의 과도상태 및 관측하려는 상태의 급격한 변화에 대하여 관측 오차가 진동하는 원인이 될 수 있기 때문에 관측기 이득 ϵ 을 적절하게 설정하여야 한다. 일반적인 고이득 관측기의 구조는 그림 2.2와 같이 나타낼 수 있으며 고이득 관측기의 알고리즘은 다음과 같다.

$$\hat{x}_i = \hat{x}_{i+1} + k_i(y - \hat{y})/\epsilon^i \quad (7)$$

여기서, y 는 시스템에서 측정 가능한 출력 신호이며, k_i 와 ϵ 는 관측기의 상수이득이다.

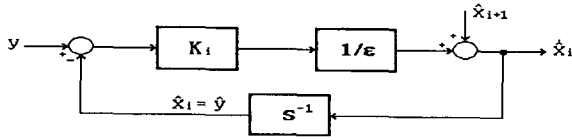


그림 2 고이득 관측기의 구조
Fig. 2 Structure of a high Gain Observer

식(8),(9),(10)은 3개의 상태를 관측하기 위한 고이득 관측기 알고리즘이다.

$$\hat{x}_1 = \hat{x}_2 + k_1(x_1 - \hat{x}_1)/\epsilon \quad (8)$$

$$\hat{x}_2 = \hat{x}_3 + k_2(x_1 - \hat{x}_1)/\epsilon^2 \quad (9)$$

$$\hat{x}_3 = \quad + k_3(x_1 - \hat{x}_1)/\epsilon^3 \quad (10)$$

위 식을 Laplace transform을 이용해서 정리하면, 식(11)과 같다.

$$\hat{x}_1 = \frac{\epsilon^2 k_1 s^2 + \epsilon k_2 s + k_3}{\epsilon^3 s^3 + \epsilon^2 k_1 s^2 + \epsilon k_2 s + k_3} x_1 \quad (11)$$

시스템 출력 x_1 이 일정하고 분모다항식이 안정하다면, 그 도함수들이 모두 0으로 수렴하므로 시간이 지남에 따라 $\hat{x}_1 = x_1$ 이 될 것이다. 이는 $\epsilon=0$ 인 이상적인 경우와 결과가 같음을 알 수 있다. 이 결과로부터 식(8), (9), (10)에서 $\hat{x}_2 = \hat{x}_1$ 이 됨을 알 수 있다. 이 때 $\hat{x}_1 = x_1$ 이므로 시스템 출력 x_1 이 연속미분 가능한 신호라면 $\hat{x}_1 = \dot{x}_1$ 이 되므로 $\hat{x}_2 = \hat{x}_1 = \dot{x}_1$ 이 만족된다. 이 결과를 이용하면 $\hat{x}_3 = \dot{\hat{x}_2}$ 가 되고 $\hat{x}_3 = \dot{\hat{x}_2} = \ddot{x}_1$ 이 되어 시스템 출력의 미분 가능한 회수만큼의 도함수를 얻을 수 있다. 그림 3은 고이득 관측기의 구성도이다.

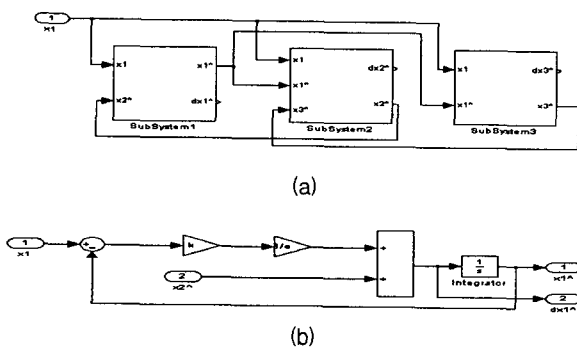


그림 3 (a) 고이득 관측기의 구성도 (b) subsystem의 구조
Fig. 3 (a) Structure of High Gain Observer (b) Structure of subsystem

시스템 출력 x_1 이 일정하지 않은 경우에는 ϵ 을 가능한 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 성능향상의 관건이라 할 수 있다.

2.3 고이득 관측기 설계

본 논문에서는 직류서보전동기의 속도센서리스 제어를 수행하기 위해서 직류서보전동기의 전기적 동특성을 이용하여 속도를 관측한다. 그러나, 직류서보전동기의 전기적 동특성만으로 속도를 관측한다는 것은 문제점이 있기 때문에 직접 속도를 추정하는 것은 어렵게 된다. 직류서보전동기의 전기적 동특성은 식(12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + k_b \omega \quad (12)$$

속도를 추정하기 위해서 식(12)을 식(13)로 나타낼 수 있다.

$$I \hat{\omega} = \frac{1}{k_b} [e_a(t) - R_a i_a(t) - L_a \frac{di_a(t)}{dt}] \quad (13)$$

그러나, 식(3)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.

$$\frac{d\hat{i}_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} [e_a(t) - R_a i_a(t) - k_b \omega] + K(i - \hat{i}) \quad (14)$$

여기서, K 는 관측이득상수

식(2)와 식(14)에서 속도를 관측하기 위해서는 전류 도함수를 알아야 하고 전류 도함수를 관측하기 위해서는 속도를 알아야 하기 때문에 두 식은 서로 모순된다. 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.

$$\dot{\hat{i}}_1 = \dot{i}_2 + k_1(i_1 - \hat{i}_1)/\epsilon \quad (15)$$

$$\dot{\hat{i}}_2 = \quad + k_2(i_1 - \hat{i}_1)/\epsilon^2 \quad (16)$$

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

3. 시뮬레이션

본 논문에서 설계한 고이득 관측기의 속도추정 성능을 입증하기 위하여 직류서보전동기를 정격속도인 3000[rpm]과

저속인 100[rpm]운전시 시물레이션하여 루엔버거 관측기와 추정 성능을 비교한다. 직류서보전동기의 속도를 관측하기 위한 시물레이션 구성도는 그림 4와 같다.

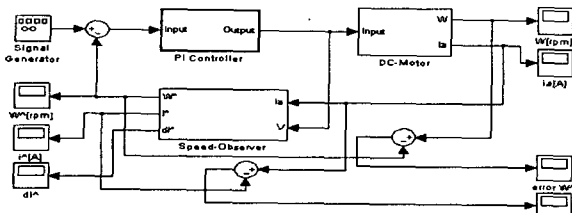


그림 4 직류서보전동기 시물레이션 구성도
Fig. 4 Simulation structure of DC servo motor

3.1 정속 운전

본 논문에서 설계한 고이득 관측기의 속도추정 성능을 입증하기 위하여 직류서보전동기를 정격속도로 정속운전시 루엔버거 관측기와 고이득 관측기의 속도추종 성능을 비교 시물레이션 한다.

그림 5, 6은 직류서보전동기 정속(3000[rpm]) 운전시 루엔버거 관측기의 특성을 나타내고 있으며, 그림 7, 8은 고이득 관측기의 특성을 나타내고 있다. 시물레이션 결과는 표1과 같다.

표 1 정속 운전시 시물레이션 결과

Table 1 Simulation results

		최대초과량	정착시간	정상상태오차
기준입력[rpm]		3000	100	
기준전류[A]		3.24		
루엔버거 관측기	전류[A]	23.792	117	0.31 ~ 0.93
	속도[rpm]	3030.4	112	0.11 ~ 0.27
고이득 관측기	전류[A]	3.825	111	0.22 ~ 0.31
	속도[rpm]	3000.8	111	0.003 ~ 0.027

시물레이션 결과로부터, 본 논문에서 설계한 고이득 관측기가 루엔버거 관측기에 비해 최대초과량에서 오차가 약 1% 정도 감소됨을 나타냈으며 정착시간에서도 약 1msec 정도 빠른 특성을 나타내었다. 따라서, 본 논문에서 설계한 고이득 관측기가 루엔버거 관측기에 비해 과도상태시 전류와 속도 리플이 줄어든 것을 볼 수 있으며, 우수한 안정성 및 추정성능을 확인할 수 있다.

그림 5, 6은 직류서보전동기 정속 운전시 루엔버거 관측기의 특성을 나타내며, 그림 7, 8은 고이득 관측기의 특성을 나타낸다. 또한 그림 9는 루엔버거 관측기와 고이득관측기의 특성을 비교한 것이다.

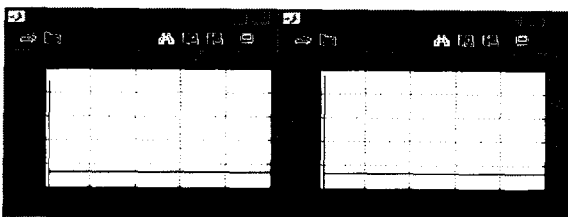


그림 5 실제전류와 관측된 전류
Fig. 5 Real and estimated current

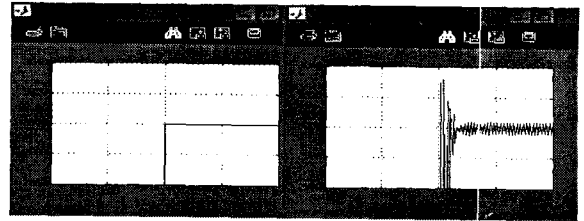


그림 6 기준속도와 관측된 속도
Fig. 6 Reference and estimated speed

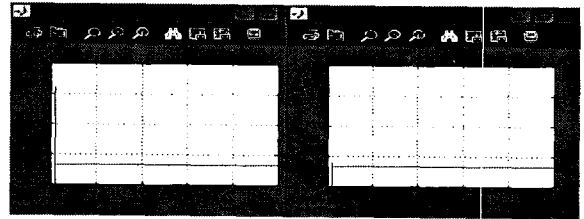


그림 7 실제전류와 관측된 전류
Fig. 7 Real and estimated current

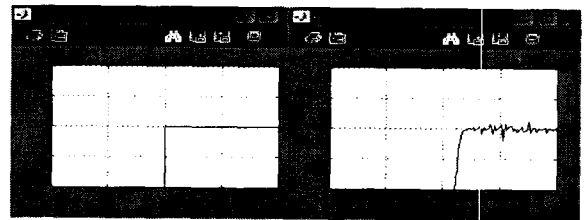


그림 8 기준속도와 관측된 속도
Fig. 8 Reference and estimated speed

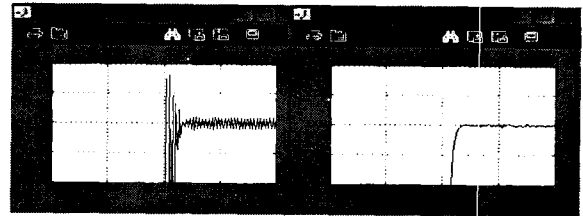


그림 9 루엔버거 관측기에서 관측한 속도와 고이득 관측기에서 관측한 속도
Fig. 9 Estimated speed with Luenberger and High Gain Observer

3.2 저속 운전

본 논문에서 설계된 고이득 관측기가 저속에서도 기존의 관측기보다 추정성능이 우수하다는 것을 입증하기 위하여 직류서보전동기를 100[rpm]으로 저속운전시 루엔버거 관측기와 고이득 관측기의 속도추종 성능을 비교한다.

그림 10, 11은 직류서보전동기 저속 운전시 루엔버거 관측기의 특성을 나타내고 있으며, 그림 12, 13은 고이득 관측기의 특성을 나타내고 있다. 시물레이션 결과는 표 2와 같다.

표 2 저속 운전시 시뮬레이션 결과

Table 2 Simulation results

		최대초과량	최대백분율초과량[%]	정착시간[msec]	정상상태오차[%]
기준입력[rpm]		100		100	
루엔버거 관측기	전류[A]	0.79	631.5	117	0.28 ~ 0.93
	속도[rpm]	102.4	2.4	112	0.1 ~ 0.19
고이득 관측기	전류[A]	0.127	17.3	111	0.028 ~ 0.18
	속도[rpm]	100.06	0.06	111	0.01 ~ 0.04

시뮬레이션 결과로부터, 본 논문에서 설계한 고이득 관측기가 루엔버거 관측기에 비해 최대초과량에서 오차가 약 2.34 % 정도 감소됨을 나타냈으며 정착시간에서도 약 1msec 정도 빠른 특성을 나타내었다. 따라서, 본 논문에서 설계한 고이득 관측기가 저속 운전 시에도 루엔버거 관측기에 비해 과도상태 시 전류와 속도 리플이 줄어든 것을 볼 수 있으며, 우수한 안정성 및 추정 성능을 확인할 수 있다. 그림 10, 11은 직류 서보전동기 저속(100[rpm]) 운전시 루엔버거 관측기의 특성을 나타내며, 그림 12, 13은 고이득 관측기의 특성을 나타낸다. 또한 그림 14는 루엔버거 관측기와 고이득관측기의 특성을 비교한 것이다.

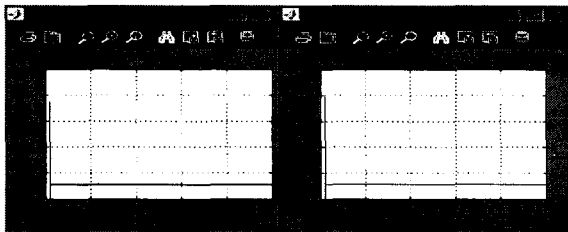


그림 10 실제전류와 관측된 전류
Fig. 10 Real and estimated current

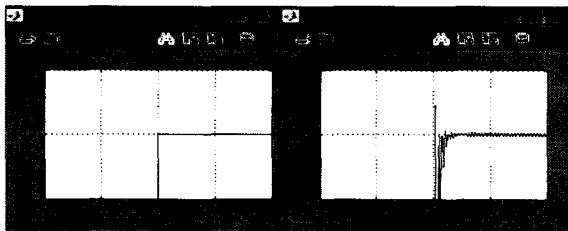


그림 11 기준속도와 관측된 속도
Fig. 11 Reference and estimated speed

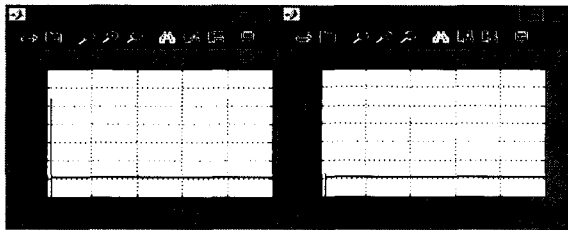


그림 12 실제전류와 관측된 전류
Fig. 12 Real and estimated current

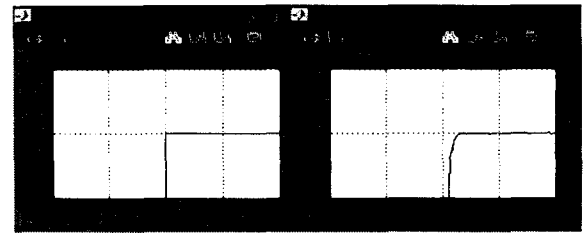


그림 13 기준속도와 관측된 속도
Fig. 13 Reference and estimated speed

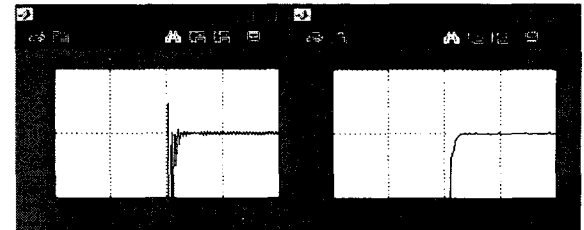


그림 14 루엔버거 관측기에서 관측한 속도와 고이득 관측기에서 관측한 속도
Fig. 14 Estimated speed with Luenberger and High Gain Observer

4. 실험 및 결과 고찰

본 논문에서는 직류서보전동기의 속도센서리스 속도제어를 하기 위하여 고이득 관측기를 적용하였다. 이를 위하여 제작된 디지털 서보 시스템을 이용하여 속도센서를 장착한 경우와 속도센서 없이 고이득 관측기를 적용한 경우를 동일한 조건으로 부하 및 무부하에서 비교실험을 하였으며, 속도제어기로는 PI제어기를 사용하였다. 그림 4.1는 실험장치 구성도를 나타낸 것이다.

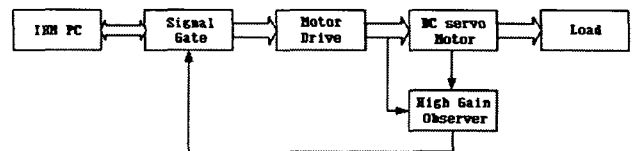


그림 15 실험장치 구성도
Fig. 15 Experimental system configuration

본 실험에서 사용한 전동기는 최대출력 200W(LG기전, FMD-E205A)이며 속도측정을 위한 센서로 1000[펄스/회]의 분해능을 갖는 엔코더를 사용하였다.

4.1 실험방법 및 절차

본 논문에서는 직류서보전동기의 속도제어에 있어서 속도센서를 사용하지 않고 관측기를 이용하여 속도를 제어하는데 있다. 따라서 본 논문에서는 고이득 관측기를 이용하여 속도센서 없는 직류서보전동기의 속도제어에 적용시켜 고이득 관측기의 성능을 입증하기 위해 속도 센서 가 있는 경우와 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 경우를 비교 실험 하였다.

그 방법은 직류서보전동기를 정속 3000[rpm]과 저속 100[rpm]으로 운전시 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 고이득 관측기를 적용한 경우를 부하 및 무부하 상태로 비교 실험하여 고이득 관측기의 성능을 입증한다.

4.2 정속운전 실험

4.2.1 무부하 실험

그림 16, 17은 직류 서보 전동기의 무부하 상태에서 계단 입력시(정속 3000[rpm]) 출력특성을 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 경우를 비교 실험한 것이며, 실험결과는 표 4와 같다.

표 4 스텝입력 실험결과

Table 4 Experimental result

	최대초과량 [rpm]	최대초과량 백분율 [%]	정착시간 [sec]	정상상태 오차 [%]
기준 속도	3000		1.08	
속도센서를 이용한 경우	3025	0.83	1.17	0.27~0.47
고이득 관측기를 이용한 경우	3065	2.17	1.2	0.13~1

표 4의 결과와 같이 스텝입력 실험에서의 출력응답은 최대초과량 백분율에서 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비하여 약 1.34[%]정도 증가했으며, 정착시간에 있어서도 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비해 약 0.03초 정도 느리게 나타났다. 또한, 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 경우의 정상상태오차는 약 0.13~1[%]로 속도센서가 있는 경우에 비해 약 0.53[%]정도 증가하였다. 따라서, 고이득 관측기가 과도상태와 정상상태에서 추정성능이 우수하며, 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우의 응답 특성에 근접하다는 것을 입증하였다.

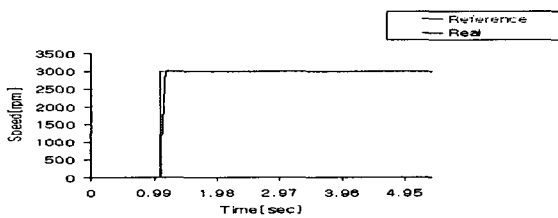


그림 16 속도센서를 이용한 스텝응답
Fig. 16 Step response using speed sensor

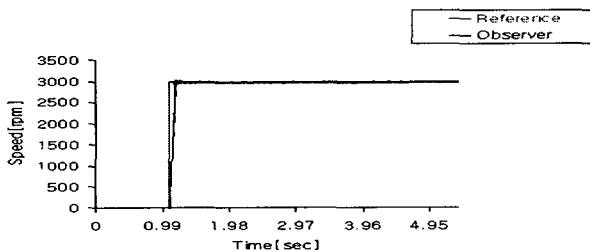


그림 17 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 스텝응답
Fig. 17 Step response using speed-Sensorless HGO

4.2.2 부하 실험

그림 18, 19는 직류 서보 전동기의 부하 상태에서 계단 입력시(정속 3000[rpm]) 출력특성을 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 경우를 비교 실험한 것이며, 실험결과는 표 5과 같다.

표 5 스텝입력 실험결과

Table 5 Experimental result

	최대초과량 [rpm]	최대초과량 백분율 [%]	부하 인가시 [rpm]	부하 인가시 오차 [%]
기준 속도	3000		3000	
속도센서를 이용한 경우	3025	0.83	2791	6.97
고이득 관측기를 이용한 경우	3065	2.17	2853	4.9

표 5의 결과와 같이 부하 인가시 스텝입력 실험에서의 출력응답은 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 경우가 2853[rpm]이고, 속도센서가 있는 경우는 2791[rpm]으로 나타났다. 부하 인가시 오차는 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비해 약 2.07[%] 정도 감소하였다. 따라서, 고이득 관측기가 부하인가시 속도센서에 비해 오차가 약 2.07[%]정도 감소하므로 속도센서에 비해 강한 특성을 보였다.

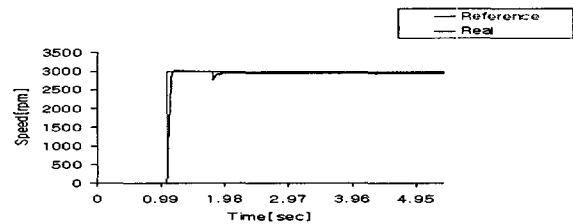


그림 18 속도센서를 이용한 스텝응답
Fig. 18 Step response using speed sensor

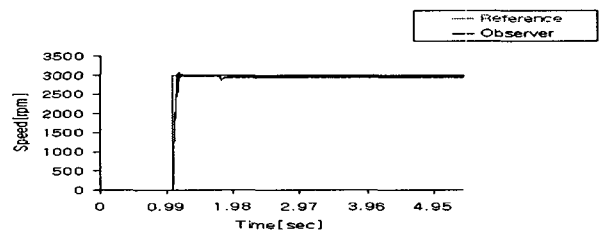


그림 19 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 스텝응답
Fig. 19 Step response using speed-Sensorless HGO

4.3 저속운전 실험

4.3.1 무부하 실험

그림 20, 21은 직류 서보 전동기의 무부하 상태에서 스텝 입력시(저속 100[rpm]) 출력특성을 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 경우를 비교 실험한 것이며, 실험결과는 표 6과 같다.

표 6 스텝입력 실험결과

Table 6 Experimental result

	최대 초과량 [rpm]	최대 초과량백분율 [%]	정착 시간 [sec]	정상상태 오차[%]
기준 속도	100		1.08	
속도센서를 이용한 경우	104	4	1.12	4~12
고이득 관측기를 이용한 경우	108	8	1.13	1~12

표 6의 결과와 같이 저속운전(100[rpm]) 실험에서의 출력 응답은 최대초과량 백분율에서 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비하여 약 4[%]정도 증가했으며, 정착시간에 있어서도 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비해 약 0.01초 정도 느리게 나타났다. 또한, 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 경우의 정상상태오차는 약 1~12[%]로 속도센서가 있는 경우에 비해 약 3[%]정도 감소하였다. 따라서, 저속운전에서 고이득 관측기가 속도센서에 비해 과도상태에서는 특성이 떨어지지만 정상상태에서는 안정하다는 것을 입증하였다.

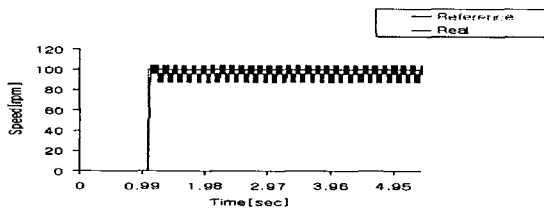


그림 20 속도센서를 이용한 스텝응답

Fig. 20 Step response using speed sensor

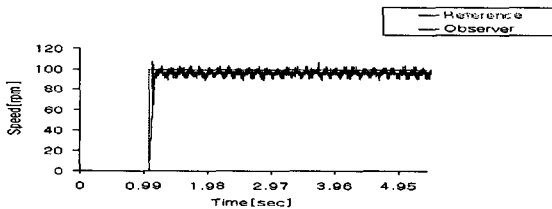


그림 21 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 스텝응답

Fig. 21 Step response using speed-Sensorless HGO

4.3.2 부하 실험

그림 22, 23은 직류 서보 전동기의 부하 상태에서 스텝 입력시(저속 100[rpm]) 출력특성을 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 경우를 비교 실험한 것이며, 실험결과는 표 7과 같다.

표 7 스텝입력 실험결과

Table 7 Experimental result

	최대 초과량 [rpm]	최대초과량 백분율 [%]	부하 인가시 [rpm]	부하 인가시오차 [%]
기준 속도	100		100	
속도센서를 이용한 경우	104	0.83	80	20
고이득 관측기를 이용한 경우	108	2.17	87	13

표 7의 결과와 같이 부하 인가시 저속운전(100[rpm]) 실험에서의 부하 인가시 오차는 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비해 약 7[%]정도 감소하였다.

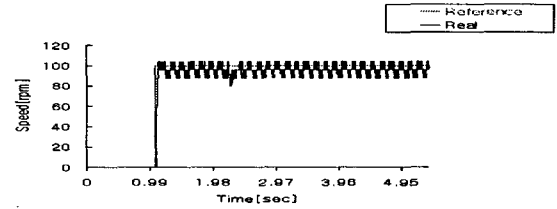


그림 22 속도센서를 이용한 스텝응답

Fig. 22 Step response using speed sensor

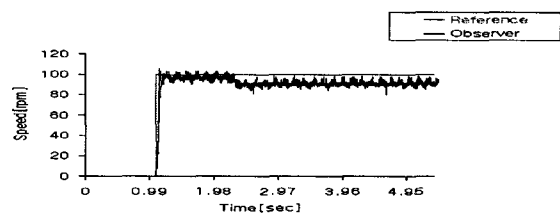


그림 23 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 스텝응답

Fig. 23 Step response using speed-Sensorless High Gain Observer

5. 결 론

본 논문에서는 직류서보전동기의 속도센서리스 속도 제어를 수행하기 위하여 관측기에 대한 연구로서 전동기의 동특성 및 내부파라미터에 대한 정보를 필요하지 않는 강인한 특성을 갖는 고이득 관측기를 제안했다. 또한 과도상태에서 응답특성 개선과 저속에서의 운전 특성 향상을 입증하기 위하여 직류서보전동기의 무부하시 정속과 저속 시뮬레이션을 수행하여 루엔버거 관측기를 이용한 경우와 고이득 관측기를 이용한 경우를 비교하였으며, 직류서보전동기의 무부하 및 부하시 정속과 저속 실험을 통하여 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 고이득 관측기를 이용한 경우를 비교 실험한 결과 본 논문에서 제안한 고이득 관측기를 직류서보전동기에 적용하여 정속운전시 과도상태와 정상상태에서 안정성 및 추정정능이 우수하다는 것을 입증하였으며, 속도센서가 있는 제어시스템의 응답에 근접한 특성을 나타내었다. 또한 부하의란에 대하여 강인한 성능을 가짐을 입증하였다.

참 고 문 헌

[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] 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
- [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] 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, Mar., pp344-348, 1993
- [8] E. A. Misawa and J. K. Hedrick, "Nonlinear Observers ; A State-of-the Art Survey", Trans. ASME, J. Dynamic Syst., Measurement and Contr., Vol. 111, pp. 344-352 1989
- [9] 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
- [10] G. Besancon, "Farther Results on High Gain Observers for Nonlinear Systems" Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control, Vol. 3, December 1999, pp. 2904-2909
- [11] 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

저 자 소 개



김 상 훈 (金 相 勳)

1971년 6월 29일생. 1998년 2월 호서대학교 공대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 한라대학교 전기전자제어공학부 겸임교수

Tel : (02) 456-2585, Fax : (02) 444-8868

E-mail : shkim30@konku.ac.kr



김 낙 교 (金 洛 敎)

1949년 2월 4일생. 1973년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1977년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 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