

고이득 관측기를 이용한 직류서보전동기의 속도 센서리스 속도제어

김상훈 김명준 윤광호 남윤현 김낙교  
건국대학교 전기공학과

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

Sang Hoon Kim Myung Joon Kim Kwang Ho Yun Moon Hyun Nam Lark Kyo Kim  
Department Electrical engineering, kon-kuk University

**Abstract** - In this thesis, it is a purpose to carry out speed control of DC servo motor without using encoder and the resolver which are speed sensor of DC servo motor and it should use estimate algorithm or observer and must assume a speed in order to control speed sensorless. Therefore, high gain observer was designed to estimate rotor speed of DC servo motor and it carries out speed control from the feedback of the speed that assumed done in the thesis.

Also, implementation used easy PI controller in speed-controller of DC motor though it was simple. It is compared estimate performance of Luenberger and high gain observer in a way of computer simulation in order to verify performance of the high gain observer which proposed in this thesis, and proved excellency of the high gain observer. And the thesis proved that smooth speed sensorless control of DC servo motor was implemented in invariable driving.

1. 서 론

현재 산업에 사용되고 있는 직류서보전동기는 회전자 관성이 매우적고 응답특성이 우수하다는 장점이 있으며 전기자 전류를 독립적으로 제어할 수 있어 전동기의 토오크 제어와 속도 제어에 있어 매우 용이하다. 그러나, 직류서보전동기의 전압과 전류의 검출은 비교적 용이하지만 회전자의 속도 정보를 얻기 위해서는 레졸버(Resolver)나 엔코더(Encoder)와 같은 속도 센서가 필요하게 된다.[1][2]

엔코더나 레졸버등의 속도센서를 이용해 속도를 검출하지 않고 전동기의 속도를 제어하는 방법에 대해 많은 연구가 진행되고 있으며, 그 중에서도 추정 알고리즘을 이용하여 속도를 추정,보상하는 관측기 설계법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이들 속도 센서리스 운전 에 대한 연구 관점을 크게 두 가지 방향으로 나누어 살펴보면, 과도상태에서의 응답특성 개선과 저속에서의 운전 특성 향상을 들 수 있다.

과도 상태에서 응답특성이 나빠지는 이유로는 전동기 매개변수 추정오차, 인버터에서의 실제 기준치와 동일한 출력 발생의 오차 및 추정 알고리즘에 대한 건실성 보장의 미흡 등을 원인으로 들 수 있고 이로 인하여 정확하고 속응성을 갖는 제어를 실현하지 못하기 때문이다. 또한, 전동기를 저속으로 구동하는 경우에 있어서는 제어기의 연산 정밀도와 전류,전압 센서의 분해능이 허용되는 범위 내에서 어느 정도의 제어 성능을 얻는 것은 가능하지만 운전 주파수가 영에 가까워질수록 제어기의 신호대 잡음비가 낮게되고 적분기가 포화될 수 있어 정확한 속도 정보를 얻기가 어렵게 되므로 만족할 만한 제어 성능을 얻을 수 있는 저속영역은 극히 제한을 받게 된다.[3][4]

센서리스 운전을 위한 대표적인 관측기로는 루엔버거 관측기와 슬라이딩 관측기를 꼽을 수 있다. 루엔버거 관

측기는 상태를 관측하기 위해 시스템의 동특성이나 내부 파라미터를 알아야 한다는 문제점을 가지고 있다.

슬라이딩 관측기는 내부파라미터를 알아야 할 필요는 없지만 시스템 동특성에 대한 정보를 필요로 하며, 외란 억제 성능은 우수하나 불연속적인 입력으로 인한 추정치의 떨림 현상이 발생한다는 문제점을 가지고 있다. 이와는 달리 고이득 관측기는 시스템의 동특성 및 내부 파라미터에 대한 정보를 필요하지 않는다.[5][6]

따라서, 본 논문에서는 속도 추정을 하기 위해 고이득 관측기를 제안하고자 하며, 직류서보전동기의 속도 제어를 하기 위해서는 일반적으로 이용하고 있는 간단하면서도 구현이 쉬운 PI제어기를 사용하여 속도를 제어한다.

또한, 본 논문에서는 직류서보 전동기의 전기적 동특성만을 이용하여 속도를 추정하는 고이득 관측기를 설계한다. 직류서보전동기의 전기적 동특성을 살펴보면 속도를 추정하기 위해서는 전류의 도함수값이 필요하며 전류의 도함수값을 추정하기 위해서는 속도값이 필요하게 되는 모순된 점이 발생한다.

이런 문제점들을 해결하기위해 시스템의 동특성 및 내부 파라미터에 대한 정보가 필요하지 않은 고이득 관측기를 설계하여 측정된 전류값으로 전류의 도함수 값을 직접 추정하고, 이 추정값을 이용하여 회전자 속도를 추정하였다.

본 논문에서는 제안한 고이득 관측기의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션을 통하여 루엔버거 관측기와 고이득 관측기를 적용하였을 경우의 추정성능을 비교하였으며, 정속도 운전시에 직류서보전동기의 원활한 속도 센서리스 제어가 구현됨을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 직류서보전동기의 수학적 모델

직류서보전동기의 특성방정식은 다음과 같다.

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \tag{2.1}$$

$$T_m(t) = J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + B_m \omega(t) + T_{L(t)} \tag{2.2}$$

$R_a$  : 전기자 저항  $L_a$  : 전기자 인덕턴스  $e_b$  : 역기전력  
 $i_a$  : 전기자 전류  $\omega$  : 각속도  $e_a$  : 전기자 전압  
 $J$  : 관성모멘트  $B$  : 마찰계수  $T_L$  : 부하토크  
 $k_t$  : 토크상수  $k_b$  : 역기전력 상수

직류서보전동기의 등가 블록선도는 그림 2.1와 같이 나타낼 수 있다.

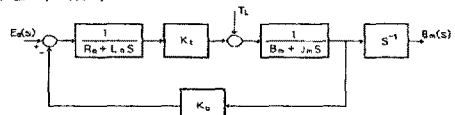


그림 2.1 직류서보전동기의 블록선도  
 Fig. 2.1 Block diagram of a DC servo motor

직류서보전동기의 속도제어를 위하여 PI제어기를 설계할 때 사용되는 출력 상태변수는 기준 속도 ( $\omega_{ref}$ )와 실제 속도 ( $\omega$ )의 편차량 ( $e_\omega$ )이 된다.

$$e_\omega = \omega_{ref} - \omega \quad (2.3)$$

따라서, 기존의 상태피드백 PI제어기 설계를 위한 직류서보전동기 속도제어계통의 상태방정식은 다음으로 주어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_a/L_a & -k_b/L_a \\ k_i/J_m & -B_m/J_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L_a \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/J_m \end{bmatrix} f \quad (2.4)$$

위 식에서  $x_1$ 은 전기자 전류 ( $i_a$ ),  $x_2$ 는 각속도 ( $\omega$ )이고,  $u$ 는 전기자 전압 ( $e_a$ ),  $f$ 는 부하토크 ( $T_L$ )이며, 직류서보전동기의 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\omega_m(s)}{E_a(s)} = \frac{k_t}{(R_a + L_a s)(B_m + J_m s) + k_b k_b} \quad (2.5)$$

본 논문에서 사용한 직류서보전동기(LG기전, FMD E205A)의 전동기 사양을 식(2.4)와 식(2.5)에 대입하면 다음과 같이 직류서보전동기의 상태방정식과 전달함수를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2078.431 & -210.686 \\ 1578.947 & -160.15 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 980.392 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (2.6)$$

$$\frac{\omega_m(s)}{E_a(s)} = \frac{15180598.6}{s^2 + 2238.6s + 3595172.2} \quad (2.7)$$

## 2.2 고이득 관측기 설계

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 심하게 진동하는 원인이 될 수 있기 때문에 이득  $\epsilon$ 을 적절하게 설정하여야 한다. 일반적인 고이득 관측기의 구조는 그림(2.2)와 같이 나타낼 수 있으며 고이득 관측기의 알고리즘은 다음과 같다.

$$\hat{x}_i = \hat{x}_{i+1} + k_i (y - \hat{y}) / \epsilon^i \quad (2.8)$$

여기서,  $y$ 는 시스템에서 측정 가능한 출력 신호이며  $k_i$ 와  $\epsilon$ 는 관측기의 상수이득이다.

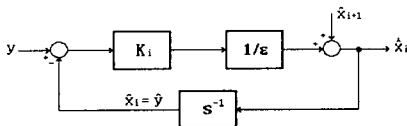
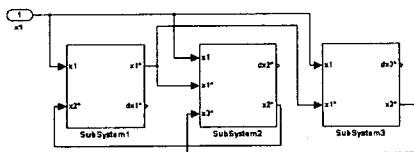


그림 2.2 고이득 관측기의 구조

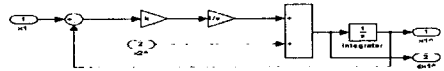
Fig. 3.2 Structure of a high Gain Observer

고이득 관측기 알고리즘은 식(2.9)과 같고 구성도는 그림 2.3과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_1 &= \hat{x}_2 + k_1(x_1 - \hat{x}_1)/\epsilon \\ \hat{x}_2 &= \hat{x}_3 + k_2(x_1 - \hat{x}_1)/\epsilon^2 \\ \hat{x}_3 &= \dots + k_3(x_1 - \hat{x}_1)/\epsilon^3 \end{aligned} \quad (2.9)$$



(a)



(b)

그림 2.3 (a) 고이득 관측기의 구성도

(b) subsystem의 구조

Fig. 2.3 (a) Structure of a high Gain Observer

(b) Structure of subsystem

시스템 출력  $x_1$ 이 일정하지 않은 경우에는  $\epsilon$ 을 가능한 작게 함으로써 상대적으로 오차의 크기를 줄일 수 있다. 그러나 시스템 출력의 시간에 따른 변화율이 커짐에 따라 관측오차가 커지는 단점이 있으며, 상태관측기 이득값의 크기에 비례해서 과도상태에서의 오차가 커지는 현상이 있다. 관측오차의 수렴성은 이득값의 크기에 반비례하지만, 과도상태에서의 오차크기는 이득값의 크기에 비례하므로 적당한 크기의 이득값을 선정하는 것이 고이득 관측기의 성능 향상의 관건이라 할 수 있다.

본 논문에서는 직류서보전동기의 속도센서리스 제어를 수행하기 위해서 직류서보전동기의 전압방정식을 이용하여 속도를 관측한다. 그러나, 직류서보전동기의 전압방정식만으로 속도를 관측한다는 것은 약간의 모순된 점이 있기 때문에 직접 속도를 추정하는 것은 어렵다. 직류서보전동기의 전압방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + k_b \omega \quad (2.10)$$

속도를 추정하기 위해서 식(2.10)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\omega} = \frac{1}{k_b} [e_a(t) - R_a i_a(t) - L_a \frac{di_a(t)}{dt}] \quad (2.11)$$

그러나, 식(2.11)에서 전류 도함수를 알 수 없기 때문에 속도를 직접 추정하기는 어렵다. 따라서, 속도를 추정하기 위해 전류 도함수를 추정해야 하며, 전류 도함수 추정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{di_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} [e_a(t) - R_a i_a(t) - k_b \omega] + K(i - \hat{i}) \quad (2.12)$$

여기서,  $K$ 는 관측이득상수

속도를 관측하기 위해서는 전류 도함수를 알아야 하고 전류 도함수를 관측하기 위해서는 속도를 알아야 하기 때문에 두 식은 모순된다. 따라서, 직류서보전동기의 전류와 전류 도함수를 추정하기 위해 고이득 관측기를 이용하여 추정한 전류와 전류 도함수를 이용하여 속도를 관측한다.

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

$$\begin{aligned} \hat{i}_1 &= \hat{i}_2 + k_1(i_1 - \hat{i}_1)/\epsilon \\ \hat{i}_2 &= \dots + k_2(i_1 - \hat{i}_1)/\epsilon^2 \end{aligned} \quad (2.13)$$

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

## 3. 시뮬레이션 및 고찰

본 논문에서 제안한 고이득 관측기에 대한 추종 성능과 직류서보전동기에 적용한 고이득 관측기의 회전자 속도추종 성능을 검증하기 위하여 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 3.1에서 그림 3.3까지는 고이득 관측기의 계단입력에 대한 응답이며, 그림 3.4에서 그림 3.6까지는 루엔버거 관측기의 계단입력에 대한 응답이다.

### 3.1 고이득 관측기 응답

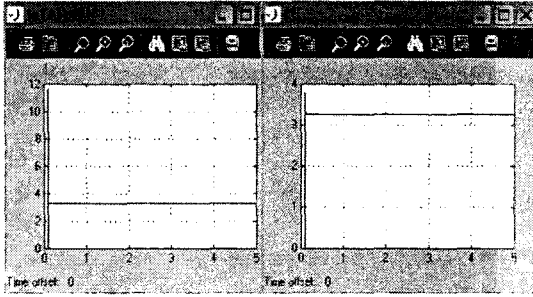


그림 3.1 실제전류와 관측된 전류  
Fig. 3.1 real and estimated current

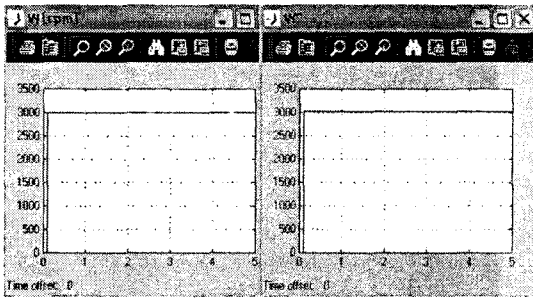


그림 3.2 실제속도와 관측된 속도  
Fig. 3.2 real and estimated speed

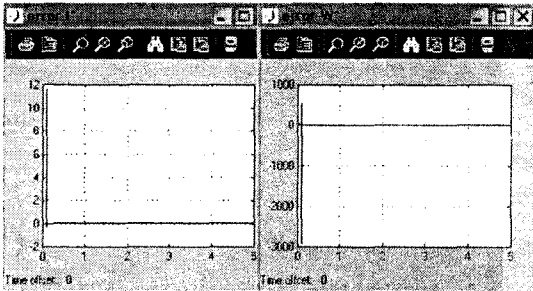


그림 3.3 전류오차와 속도오차  
Fig. 3.3 current error and speed error

### 3.2 무엔버거 관측기 응답

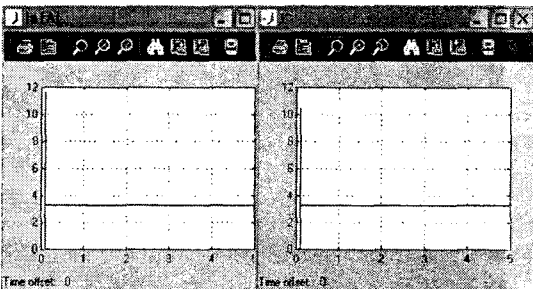


그림 3.4 실제전류와 관측된 전류  
Fig. 3.4 real and estimated current

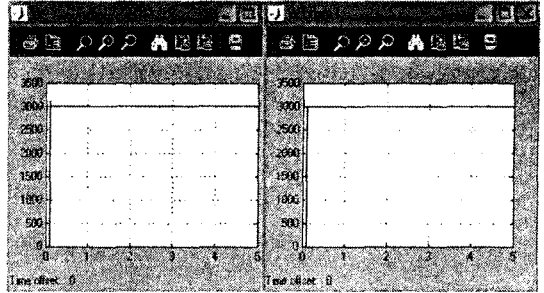


그림 3.5 실제속도와 관측된 속도  
Fig. 3.5 real and estimated speed

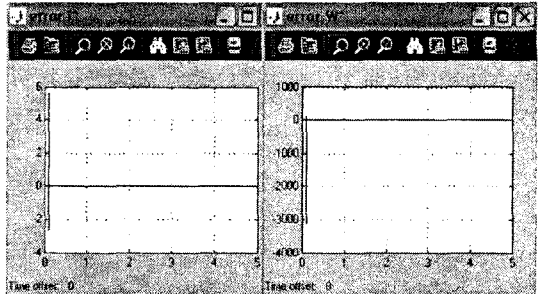


그림 3.6 전류오차와 속도오차  
Fig. 3.6 current error and speed error

### 3.3 결과고찰

본 논문에서 설계한 고이득 관측기가 루엔버거 관측기에 비하여 전류추종 속도가 약 0.03[sec] 향상되었으며, 속도추정시 실제 속도와의 오차도 고이득 관측기가 루엔버거 관측기에 비해 약 3.5%정도 감소됨을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 설계된 고이득 관측기가 기존의 루엔버거 관측기보다 추정 속도와 추정 오차에서 모두 우수한 성능을 나타내었음을 입증하였다.

#### [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] H. Nakano and I. Takahashi, "Speed Sensorless Field-Oriented Control of the Induction Motor Using an Instantaneous slip Frequency Estimation Method", IEEE PESC., pp. 847-854, 1988
- [4] Joachim Holtz, "Speed Estimation and Sensorless Control of AC Drives", IEEE IECON, pp.649-654, 1993
- [5] 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
- [6] 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