

# DC 서보모터의 센서리스 속도 제어

김창세\* · 하윤수\*\* · 하 주식\*\*\*

## Sensorless Speed Control of DC servo moter

*Chang - Se Kim\* · Yun - Su Ha\*\* · Joo - Shik Ha\*\*\**

< 목 차 >

Abstract	4. 실험 및 검토
1. 서 론	5. 검토
2. DC 서보모터의 수학적 모델링	참고문헌
3. DC서보모터의 속도 추정 알고리즘	

### Abstract

DC servo motors are widely used in many industrial fields as actuator of robot and driving power motors of electrical vehicle. Usually in the speed control systems of DC servo motors, speed sensors are required and this fact results in the increased price and operating cost and the limited application of the motors.

In this paper, a new speed control method for DC servo motor is proposed. In the scheme, the rotational speed is estimated by the measurement values of the armature voltage and current, instead of measurement by sensor. This paper also report on the results of experiments to prove the validity of the proposed method.

### 1. 서 론

일반적으로 회전 계통의 속도 제어에 있어서는 정도 높은 속도 검출센서가 요구되며 속도 검출센서로서는 타코제너레이터, 엔코더등이 많이 이용되고 있다. 그러나 속도 검출센서를 모터에 부착하는 것은 고가로 인한 경제적인면과 부피 증대로 인한 문제점, 그리고 온도, 습도, 진동등 주위 환경의

\* 한국해양대학교 제어계측공학과 대학원생  
\*\* 한국해양대학교 자동화·정보 공학부 전임강사  
\*\*\* 한국해양대학교 기관공학부 교수

변화로 인한 정도 하락의 문제점등을 동반하게 된다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 속도 검출센서를 사용하지 않고 모터의 속도를 제어 할 수 있는 방법이 요구 되어진다. 이와 관련한 몇몇 연구사례가 보고 된바 있다 [1]~[5]. 그러나 이들은 대부분 동기전동기를 대상으로 하고 있거나, DC 모터에 관한 것들이다. 로봇의 액츄에이터나 자율이동체의 구동모터로서 속도 또는 위치 제어에 많이 이용되는 DC 서보모터의 센서리스 제어 시스템에 관한 예는 그리 많지 않다.

본 논문에서는 DC 서보모터의 속도제어법으로 전압제어법을 택하고 외부에 부가장착된 속도검출 센서대신 모터의 전기자 전압과 전류로부터 모터의 회전수를 추정하는 알고리즘에 대해 논하고 실험을 통하여 추정치에 대한 오차를 분석, 검토하고 그 유용성을 제시한다. 또한 추정된 속도를 최적제어 기법에 의해 설계된 제어를 갖는 속도제어 시스템에 피드백하므로서 DC서보모터의 센서리스 속도제어 시스템을 구성하고 계단 응답 실험을 한 실험결과에 대하여 보고한다.

## 2. DC 서보모터의 수학적 모델링

전기자 전압제어 DC 서보모터의 등가회로를 Fig. 1에 표시한다. Fig. 1에서  $u(t)$ 는 전기자에 인가해주는 입력전압,  $i_a(t)$ 는 전기자 전류,  $R_a$  와  $L_a$  는 각각 전기자회로의 저항과 인덕턴스이다. 계자에 가해지는 전압  $V_f$ 는 일정하며 따라서 계자 전류 및 공급자속은 일정하다고 가정하고, 전기자 전압제어 DC 서보모터의 관계식을 수립하면 식 (2.1)~(2.4)와 같다.

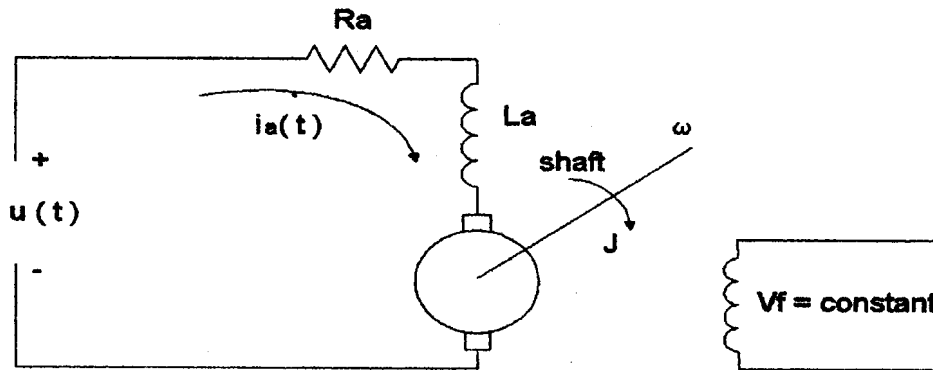


Fig. 1 Equivalent circuit of DC servo motor

$$u - e_f = R_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (2.1)$$

$$e_f = k_v \omega \quad (2.2)$$

$$\tau = k_t i_a = J \frac{d\omega}{dt} + f\omega \quad (2.3)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.4)$$

단,  $e_f$ : 역기전력  $k_v$ : 역기전력 상수  $\tau$ : 모터의 토크  $\omega$ : 회전자의 각속도  $k_t$ : 토크 상수  
 $f$ : 마찰계수  $J$ : 모터의 회전자 및 부하의 관성능률  $\theta$ : 회전각

식(2.1)~(2.4)에서 알수 있듯이 모터의 회전속도  $\omega$ 는 전기자 전압  $u$ , 전기자 저항  $R_a$ , 역기전력 계수  $k_v$ 의 값에 따라서 달라진다. 따라서 본 연구에서는 계자전류와  $R_a$ 를 일정하게 두고  $u$ 를 조정하여  $\omega$ 를 제어하는 전기자 전압 제어법을 대상으로 하고 있으므로,  $R_a$ 와  $k_v$ 는 일정하다고 가정하고 위 식들을 Laplace 변환하여  $u$ 를 입력,  $\omega$ 를 출력으로하는 블록선도를 작성하면 Fig. 2와 같다.

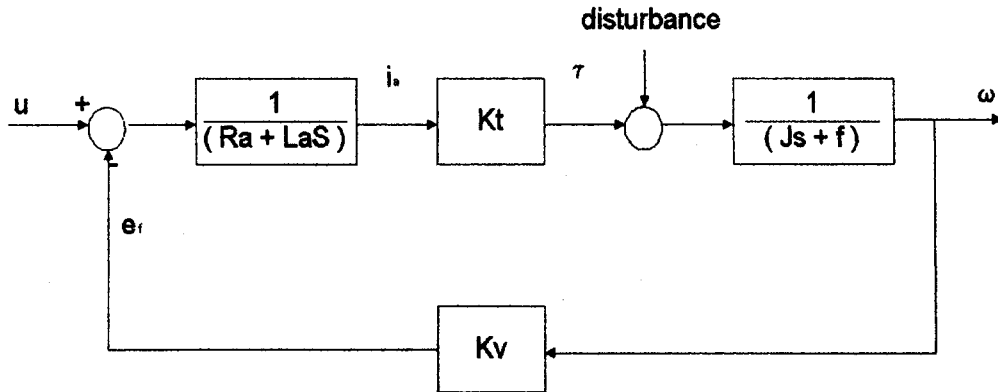


Fig. 2 Block diagram of an armature voltage controlled DC servo motor

$$\text{단, } T_a = \frac{L_a}{R_a}, k_a = \frac{1}{R_a}$$

### 3. DC 서보모터의 속도 추정 알고리즘

일반적으로 DC서보모터의 등가회로(Fig. 1)에서  $L_a$ 는 매우 작은 값이므로 이를 무시할수 있다. 즉  $T_a=0$ 가 된다, 따라서 모터의 회전 각속도  $\omega$ 의 목표치를  $\omega_r$ 라 하면 다음과 같은 식(3.1), (3.2)을 얻을 수 있다.

$$i_a = k_a(u - k_v \omega) \tag{3.1}$$

$$i_r = k_a(u - k_v \omega_r) \tag{3.2}$$

단,  $i_r$ 은  $\omega$ 가  $\omega_r$ 일 때의  $i_a$ 를 말한다.

식(3.1), (3.2)로부터 다음 식(3.3)을 얻을 수 있다.

$$i_a - i_r = k_a k_v (\omega_r - \omega) \tag{3.3}$$

따라서 만일  $k_a$ 와  $k_v$ 의 값을 정확하게 파악할 수 있다면 각속도를 검출하지 않아도 전류( $i_a$ )를 검출하여  $i_a$ 가  $i_r$ 이 되도록  $u$ 를 제어하면  $\omega$ 는  $\omega_r$ 에 접근하게 된다.

$k_a, k_v$ 의 측정치를 각각  $k_a', k_v'$ 라 하고 DC 서보모터의 센서리스 속도제어계를 구성해보면 Fig. 3와 같이 된다.

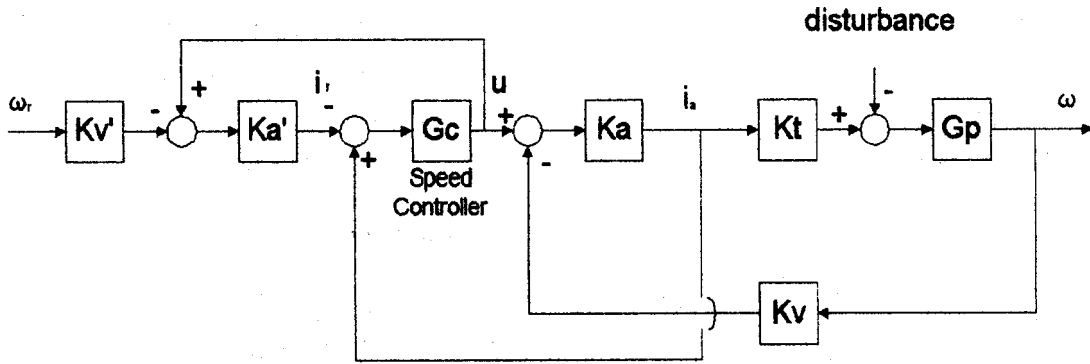


Fig. 3 Sensorless speed control system of DC servo motor

$$\text{단, } G_p = \frac{kr}{1+T_r s}$$

전류  $i_a$ 와 전압  $u$ 의 측정치로부터 추정된  $\omega$ 의 추정치를  $\hat{\omega}$ 라 하면,  $\hat{\omega}$ 는 식(3.1)에서 식(3.4)와 같이 되고 식(3.3)는 식(3.5)와 같이 된다.

$$\hat{\omega} = \frac{1}{k_v'} \left( u - \frac{i_a}{k_a} \right) \tag{3.4}$$

$$i_a - i_r = k_a' k_v' (\omega_r - \hat{\omega}) \tag{3.5}$$

여기서  $k_v'$ ,  $k_a'$ 는 실험을 통하여 혹은 모터의 정격치로부터 계산되어 질 수 있으므로, 모터의 속도를 전기자 전압  $u$ 와 전류  $i_a$ 를 측정하므로써 구해질수 있고,  $i_a$ 가  $i_r$ 가 되도록 제어하는 것은  $\hat{\omega}$ 가  $\omega_r$ 이 되도록 제어하는 것과 같게 된다.

이상과 같은 식을 이용하여 전기자전압제어 DC 서보모터의 센서리스 속도제어계를 등가변환하면 Fig. 4 과 같이 나타낼 수 있다.

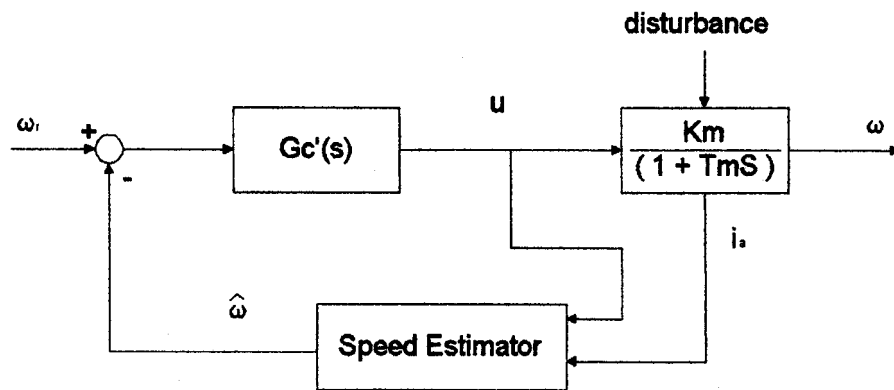


Fig. 4 Block diagram of the proposed sensorless speed control for DC Servo Motor

$$\text{단, } G_c'(s) = k_v' k_a' G_c(s) \quad k_m = \frac{k_a k_t k_r}{1 + k_a k_v' k_r k_t} \quad T_m = \frac{T_r}{1 + k_a k_v' k_r k_t}$$

## 4. 실험 및 검토

### 4.1 제어 대상 모터 선정 및 파라미터의 결정

이상과 같은 방법에 대한 타당성을 입증하기 위하여 먼저 제안된 방법으로 추정된 속도는 어느 정도 정확한 것인가? 그리고 실제 추정된 속도를 feedback 하여 제어시스템을 구성했을 때의 제어 응답특성에 대해 검토 할 필요가 있다.

Fig. 5는 이 실험을 위한 시스템의 구성도를 나타낸다. 하드웨어적으로는 크게 PC 부분, Interface 부분과 DC 서보모터 부분으로 나뉘어져 있으며, 제어대상의 DC 서보모터로는 FEEDBACK 사의 MS150 MK3를 선정 하였다.

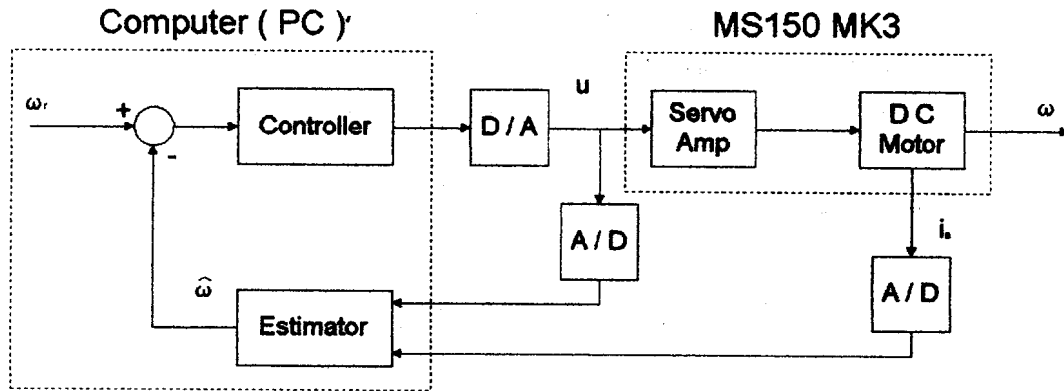


Fig. 5 Construction of sensorless speed control system for DC servo motor

상기의 실험을 하기 위해서는, 먼저 DC 서보모터의 파라미터들을 구하여야 하는데, 여기서 DC 서보모터는 별도의 서보 앰프를 거쳐서 구동되므로 Fig. 4의  $K_m, T_m, k_v', k_a'$  는 서보 앰프의 특성을 포함한 값이어야 한다.  $K_m, T_m$  은 서보앰프를 포함한 모터계에 대한 인디셜 응답 실험을 실시한 결과 각각 23.46, 0.275로 구해졌다. 또한  $k_v', k_a'$  는 임의의  $u$  를 서보앰프에 인가하고 그때의  $i_a$  와  $\omega$  의 실측을 반복하여 식(3.4)을 이용하여 최소 자승법으로 결정했다. 이때의  $k_v', k_a'$  는 0.0101[volt sec/rad], 7.457[mho]로 주어졌다.

### 4.2 제어기 설계

다음으로, 이상과 같이 얻어진 파라미터를 이용하여 추정된 속도를 피드백하여 센서리스 속도 제어 시스템을 구성했을 때의 응답을 관찰하기 위하여 제어기를 설계하였다. 속도 제어기는 최적 제어 기법을 이용하여 설계되었는데, 식(2.1)~(2.4)을 상태방정식으로 표현하고, 또한 목표속도와 추정속도의 차에 대한 적분치를 하나의 상태변수로 추가한 시스템에 평가함수  $J$

$$J = \int_0^{\infty} (\Delta x^T Q \Delta x + \Delta u^T R \Delta u) dt \quad (5.1)$$

단,  $Q, R$ 는 하중행렬로서  $Q=Q \geq 0, R>0$

를 최소로하도록 설계되었다. 이때  $u$ 는

$$u = \frac{\omega_r}{K_m} + g_1(\omega_r - \hat{\omega}) + g_2 \int (\omega_r - \hat{\omega}) dt \quad (5.2)$$

로 된다. 실험에 이용된 피드백계인  $g_1, g_2$ 는 각각 1.38, 1 이고 이때의 하중계수  $Q = \text{diag}[2, 1]$  이고  $R = 1$  였다.

### 4.3 실험 결과 및 검토

Fig. 6은 속도 추정 알고리즘에 대한 타당성을 입증하기 위해 제안된 식(3.4)에 의해 추정된 값과 실험장치에 부착된 속도 검출용 센서인 타코제너레이터에 의해 계측된 값을 기록한 것이다. 점선은 제안의 방법으로 추정된 속도를 나타내고 실선은 타코제너레이터로 실측한 값을 나타낸다. 이 결과로부터, 타코제너레이터로 실측한 값을 진치로 간주하면 추정된 속도는 실측치와 최대 3.5% 정도의 오차가 있을 알 수 있다. 여기에서 최대 3.5% 정도의 오차는 파라미터  $k_v', k_a'$  에서 유래하므로 좀더 많은 샘플 실험을 통해  $k_v', k_a'$  를 구하면, 오차의 정도는 충분히 줄어들 것으로 생각된다.

—— : measured value  
 - - - - : estimated value

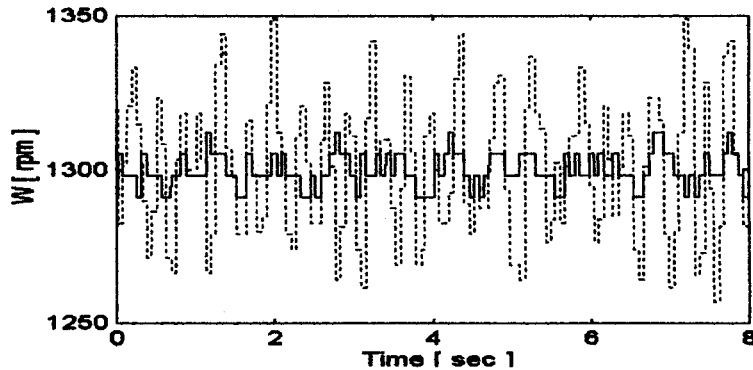


Fig. 6 Estimated and measured value of motor's speed

다음으로 Fig. 5의 시스템에서 제어기는 식(5.2)의 속도 제어를 갖는 것을 전제로 하고, 추정치를 피드백 했을 때와 타코제너레이터에 의한 실측치를 피드백 했을 때, 각각에 대한 계단 응답 특성 실험을 하였다. Fig. 7은 목표속도를 1500 [rpm]으로 했을 때의 결과로서 A(점선)는 본 논문에서 제안한 방법으로 추정된 속도를 이용했을 때의 응답이고, B(실선)는 속도 검출용 센서인 타코제너레이터에서 계측된 속도를 이용했을 때의 계단 응답 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 응답 곡선이 과도 상태에서 다소 차이를 보이고 있는 이유는 타코제너레이터의 이득을 고려하지 않았기 때문이라 생각된다. 그러나 정상 상태에서는 두 응답 곡선은 거의 오차가 없음을 볼 수 있다.

— : measured value  
 - - - : estimated value

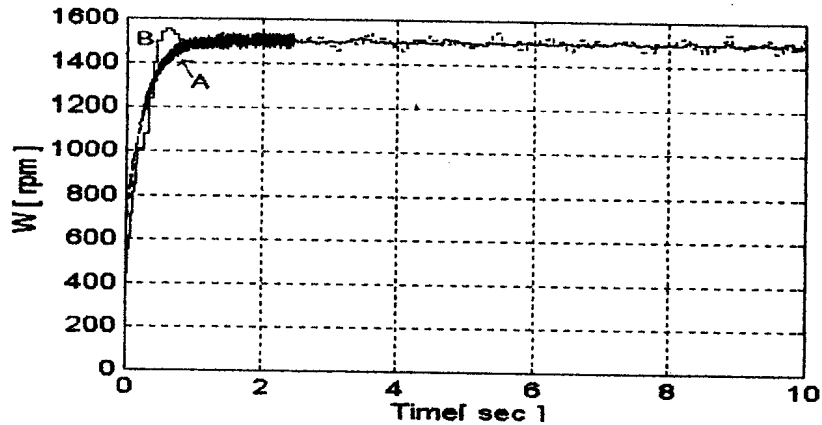


Fig. 7 Results of step response experiment( $\omega_r = 1500$  rpm)

## 5. 결 론

본 논문에서는 DC 서보모터의 속도를 제어함에 있어 전기자 전압 제어법을 택하는 것을 전제로 하고, 실제의 속도 검출센서를 이용한 실측 대신에 모터의 전기자 전압과 전류로부터 회전수를 추정하는 알고리즘을 제시하였다. 또한 실제의 속도 제어시스템을 구성 할 때, 제안된 알고리즘에 의해 추정된 값을 피드백함으로써 속도 검출센서 없는 제어 시스템에 대해서는 보고 하였다. 제안된 방법에 대한 타당성을 입증하기 위하여 속도 검출용 타코제너레이터에 의한 실측치와 제안된 알고리즘에 의해 추정된 추정치를 비교, 검토하는 실험을 하였다. 또한, 최적제어 기법에 의해 설계된 속도 제어기를 갖는 제어 시스템을 구성해 계단 입력을 인가하고 추정치를 피드백 했을때와 타코제너레이터에 의한 실측치를 피드백 했을때의 응답을 비교 하였다. 이상의 실험 결과에서 추정치는 실측치와 약 3.5% 정도의 오차를 보임을 알 수 있었다. 그러나 이 오차는 모터의 파라미터를 실험을 통하여 보다 정확히 구하므로써 줄일수 있는 것이므로 그다지 문제가 되지 않는 것으로 생각되어진다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법은 로봇의 액츄에이터의 제어를 비롯한 다양한 산업분야에서 응용될 가능성이 있는 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. Bausch, K. Kanelis, B. Lange, W. Zeng, "Torque control of synchronous and asynchronous drives without mechanical sensors.
- [2] I. Miyashita, H. Fujikawa, and Y. Ohmori, "Speed Sensor-Less Instantaneous Vector Control with Identification of Secondary Resistance", Conf.IEE Japan-IAS, 1991, pp.130 - 135
- [3] Y.Dote, "Servo motor and motion control using digital signal processor", Prentice Hall, 1990

[6] Rashid, "Power electronics", Prentice Hall, 1988

[4] 최재영, 김성환, 권영안: 마이크로프로세서를 이용한 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어, 韓國船舶機關學會誌, 第20卷, 第3號(1996)

[5] 하주식, 송문현: 규범모델 추종방식에 의한 회전계통의 적응속도 제어에 관한 연구, 韓國船舶機關學會誌, 第19卷, 第3號(1995)