

DC 서보모터의 센서리스 속도 제어 Sensorless Speed Control of DC servo motor

°김창세*, 오정석*, 하윤수*, 하 주석**

*한국해양대학교 제어계측공학과(Tel :051-410-4347;E-mail :roboking@kmucc.kmaritime.ac.kr)

** 한국해양대학교 기관공학부(Tel: 051-410-4254)

Abstracts 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 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.

Optimal control theory is applied to design of the controller in construction of real system.

This paper also report on the results of experiments to prove the validity of the proposed method..

Keywords Sensorless, Speed control, DC servo motor, Armature voltage, Estimated speed

1. 서론

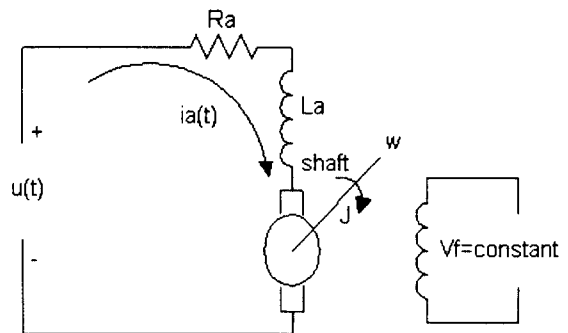
속도 또는 위치제어용 서보 모터는 로봇의 액츄에이터, 자율이동체의 구동모터를 비롯한 많은 분야에서 사용되고 있다. 따라서 서보모터의 제어에 관한 다양한 연구가 진행되고 있는데, 그중에서는 새로운 제어기법을 이용함으로써 제어 성능을 향상시키기 위한 것 뿐만 아니라 제어시스템을 구성하는데 있어서 특정부분을 생략 또는 간략화함으로써 제어성능은 다소떨어지나 경제적인 측면이나 hardware의 부피등을 우선적으로 고려한 연구 내용들도 보고되고 있다. 이와 같은 맥락에서 각종 모터의 센서리스 속도 및 위치 제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

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 변화로 인한 정도 하락의 문제점등이 해결해야할 과제로 지적되고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 속도 검출센서를 사용하지 않고 모터의 속도를 제어 할 수 있는 방법이 요구 되어진다.

본 논문에서는 DC 서보모터의 속도제어법으로 전압제어법을 택하고 외부에 부가장착된 속도검출 센서대신 모터의 전기자 전압과 전류로부터 모터의 회전각속도를 추정하여 피드백하므로써 DC서보모터의 속도를 제어하는 방법을 제시하고 실험결과에 대하여 보고한다.

2. DC 서보모터의 수학적 모델링

전기자 전압제어 직류 모터의 등가회로를 [그림1]에 표시한다. [그림1]에서 $u(t)$ 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 직류전동기의 관계식을 수립하면 식 (2.1)~(2.4)와 같다.



[그림1] DC 서보모터의 등가회로
Fig.1 Equivalent circuit of DC servo motor

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

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

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

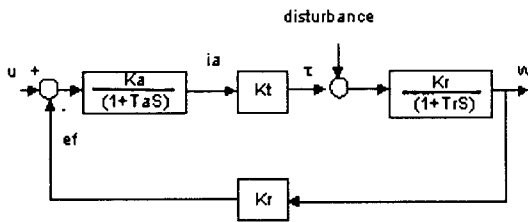
$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.4)$$

단, e_f : 역기전력, k_v : 역기전력 상수, τ : 모터의 토크,

ω : 회전자의 각속도, k_t : 토크 상수, J : 마찰계수

J : 모터의 회전자 및 부하의 관성능률, θ : 회전각

식(2.1)~(2.4)에서 알수 있듯이 모터의 회전속도 ω 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 ω 를 제어하는 전기자 전압 제어법을 대상으로 하고 있으므로, R_a 와 k_v 는 일정하다고 가정하고 위 식들을 Laplace 변환하여 u 를 입력, ω 를 출력으로 하는 블록선도를 작성하면 [그림2]와 같다.



[그림 2] DC 서보모터의 전기자 전압제어법의 블록선도
Fig2. Block diagram of a armature voltage controlled DC servo motor

$$\text{단, } T_a = \frac{L_a}{R_a}, \quad k_a = \frac{1}{R_a}, \quad T_r = \frac{J}{f}, \quad k_r = \frac{1}{f}$$

3. DC 모터의 센서리스 속도제어계

일반적으로 DC서보모터의 등가회로([그림1.])에서 L_a 는 매우 작은 값이므로 이를 무시할수 있다. 즉 $T_a=0$ 가 된다, 따라서 전동기 각속도 ω 의 목표치를 ω_r 라 하면 다음과 같은 식 (3.1),(3.2)을 얻을 수 있다.

$$i_a = k_a (u - k_v \omega) \quad (3.1)$$

$$i_r = k_a (u - k_v \omega_r) \quad (3.2)$$

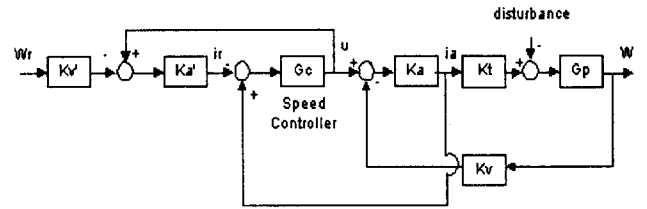
단, i_r 은 ω 가 ω_r 일 때의 i_a 를 말한다.

식(3.1), (3.2)로부터 다음 식(3.3)을 얻을 수 있다.

$$i_a - i_r = k_a k_v (\omega_r - \omega) \quad (3.3)$$

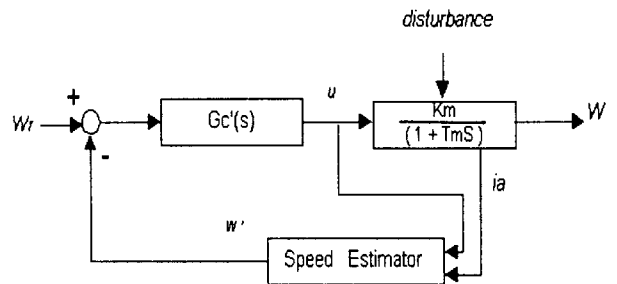
따라서 만일 k_a 와 k_v 의 값을 정확하게 파악할수 있다면 각 속도를 검출하지 않아도 전류(i_a)를 검출하여 i_a 가 i_r 이 되도록 u 를 제어하면 ω 는 ω_r 에 접근하게 된다.

k_a, k_v 의 측정치를 각각 k_a', k_v' 라 하고 직류모터의 센서리스 속도제어계를 구성해보면 [그림 3]와 같이 된다.



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

[그림 3] DC 서보모터의 센서리스 속도제어계
Fig.3 Sensorless speed control system of DC servo motor



[그림4.] DC 서보모터의 센서리스 속도제어계의 등가회로
Fig. 4 Block diagram of the proposed sensorless speed control for DC Servo Motor

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

$$T_m = \frac{T_r}{1 + k_a k_t k_r}, \quad \omega' = \hat{\omega}$$

i_a 와 u 의 측정치로부터 추정된 ω 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.

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

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

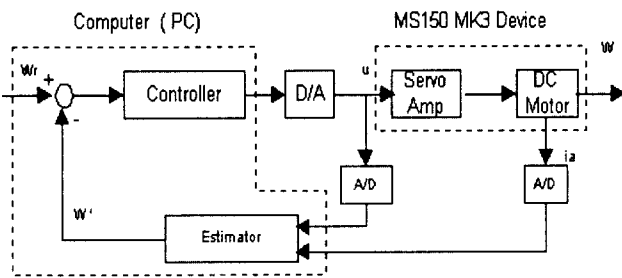
따라서 i_a 가 i_r 가 되도록 제어하는 것은 $\hat{\omega}$ 가 w_r 이 되도록 제어하는 것과 같게 된다.

이상과 같은 식을 이용하여 전기자전압제어 직류모터의 센서리스 속도제어계를 등가변환하면 [그림 4]과 같이 나타낼 수 있다.

4. 실험 및 검토

4.1 제어 대상 모터 선정 및 파라미터의 결정

이상과 같은 DC 서보모터의 센서리스 속도제어계에 대한 성능 평가 실험을 위하여 Feedback 사의 DC 서보모터장치 MS150 Mk3을 대상으로 선정하였다. [그림 5]에 나타낸 MS150 Mk3의 DC 서보모터는 영구자석식이어서 계자 전류는 일정하다고 간주할 수 있다. [그림 5]는 실험을 위한 제어계의 블록선도를 나타낸 것이다.



[그림 5] DC 서보모터의 센서리스 속도제어계의 구성
Fig.5 Construction of sensorless speed control system for DC servo motor

여기서 DC 서보모터는 별도의 서보 앰프를 거쳐서 구동되므로 [그림 4]의 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 ω 의 실측을 반복하여 식(3.4)을 이용하여 최소 자승법으로 결정했다. 이때의 k_v' , k_a' 는 각각 0.0101 [volt·sec/rad], 7.457 [mho] 로 주어졌다.

4.2 제어기 설계

이상과 같이 얻어진 파라미터를 이용하여 [그림 5]의 제어기를 설계함에 있어 최적 제어기법을 이용하였다. 최적제어기는 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 하중행렬으로서 $Q = Q \geq 0, R > 0$

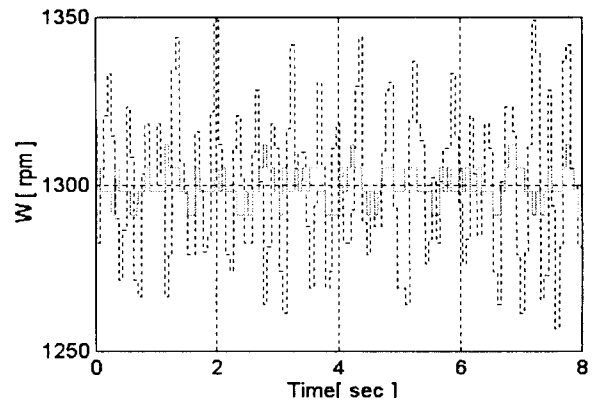
를 최소로하도록 설계되었다. 이때 u 는

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

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

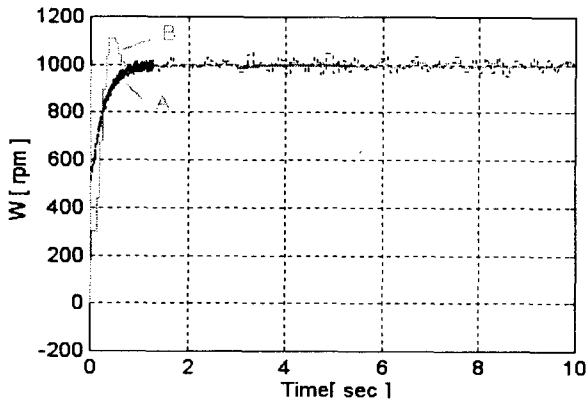
[그림 6]은 제안된 방법으로 추정된 속도와 실험장치에 부착된 속도검출용 타코제너레이터에 의해 계측된 값을 비교하기 위하여 모터에 일정 입력전압을 인가하고 그때의 값들을 기록한 것이다. 점선은 제안의 방법으로 추정한 속도를 나타내고 실선은 타코제너레이터로 실측한 값을 나타낸다. 이 결과로부터 추정된 속도는 실측치와 최대 3.5% 정도의 오차가 있음을 알 수 있다.



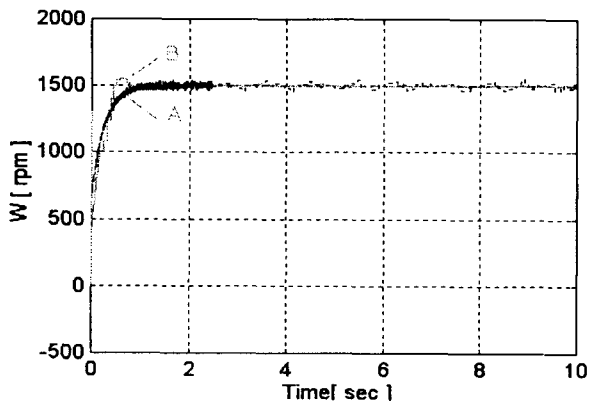
[그림 6] 모터 속도에 대한 추정치와 실측치
Fig.6 Estimated and measured value of motor's speed

[그림 7, 8]는 이상과 같이 구성한 제어시스템에 대한 계단 응답 실험결과를 나타낸다. [그림 7]은 목표속도를 1000 [rpm]으로 했을때의 결과로서 A(점선)는 본 연구에서 제안한 방법으로 추정된 속도를 이용했을 때의 응답이고, B(실선)는 A의 경우와 동일한 피드백계수일 때 속도 검출센서로 실측된 속도를 이용

했을 때의 응답결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 제안의 방법으로 추정된 속도를 이용했을 때의 응답 특성과 실측치를 이용했을 때의 응답특성은 처음에는 다소 오차가 있지만 정상상태에 이르는 거의오차가 없음을 보이고 있다.



[그림 7] 계단응답 실험 결과 ($\omega_r = 1000$ rpm)
Fig. 7 Results of step response experiment($\omega_r = 1000$ rpm)



[그림 8] 계단응답 실험 결과 ($\omega_r = 1500$ rpm)
Fig. 8 Results of step response experiment($\omega_r = 1500$ rpm)

[그림 8]은 [그림 7]에서와 같은 방법으로 목표속도를 1500 [rpm]으로 했을 때의 실험결과를 나타낸 것이다. 이 경우에 있어 도 [그림 7]에서와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 DC 서보모터의 속도를 제어함에 있어 전기자 전압제어법을 택하는 것으로 가정하고, 실제의 속도 검출센서를

이용한 실측 대신에 모터의 전기자 전압과 전류로부터 모터의 회전자수를 추정하여 피드백 하므로써 속도검출센서 없는 제어 시스템 구성에 대해 보고하였다. 또한 본 논문에서는 제안의 방법에 대한 유용성을 입증하기 위하여 속도에 대한 실측치와 추정치를 실험적으로 분석하였으며, 최적제어기를 갖는 속도제어시스템을 구성하고 추정된 속도를 이용했을때와 실측치를 이용했을때의 응답특성을 비교검토 했다. 그 결과 본 논문에서 제안하는 방법은 로봇 제어등 많은 분야에 응용될 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [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 적응 속도 제어에 관한 연구, 韓國船舶機關學會誌, 第 19卷, 第 3號(1995)