

## PID제어기의 자기동조를 이용한 직류 서보전동기의 위치제어

오 권 섭\*, 이 오 결\*\*, 김 상 효\*\*\*, 고 태 언\*  
 \* 동의대학교, \*\* 동의공업전문대학, \*\*\*동아대학교

### Control of DC Servo Motor using PID Controller Self-Tuning

Kim Gwon Sub\*, Lee oh Keol\*\*, Kim sang hyo\*\*\*, Ko Tai Eun\*  
 Dong Eui Univ.\*, Dong Eui Junior College\*\*, Dong A Univ.\*\*\*

Abstract - The servo system requires faster and more accurate dynamic responses. A new technique for the position control of DC servo motors is presented in this paper. The proposed technique employs a Self Tuning Regulator Proportional Integral Derivative(STR PID) position control systems in order to improve the dynamic performance of a DC servo motor. Recursive -least -squares (RLS) method is used in order to estimate the STR PID coefficients,  $K_P$ ,  $K_I$  and  $K_D$ . In order to consider dynamics such as voltage, angular velocity, and rotor angle, the above method was applied position control system.

#### 1. 서론

최근 산업현장에서 많이 사용되고 있는 로봇이나 수치제어 기기 등에 주로 직류 서보 전동기를 대부분 사용하고 있다. 직류 서보 전동기는 관성이 적으면서도 큰 토크를 낼 수 있으므로 특히 자동화 제어계에서 필요로 하는 전동기이다.

PID제어는 조절되는 파라미터들이 2개 또는 3개에 불과하므로 그 구조가 간단하고 광범위한 프로세스에 대해서도 동작이 안정되어 효율적으로 제어성능을 유지할 수 있는 것이 큰 장점이라고 할 수 있다. 그러나 제어 조건의 변화와 미선형 시변 동특성을 갖는 시스템에서 최적의 기능을 수행하기 위해서는 수시로 제어기의 계수를 재조정하여야 한다. 따라서 이러한 제어기는 계수를 온 라인(On line)으로 자동 조절하는 자기동조 제어 제어(Self Turning Regulator:STR) 기법이 필요로 하다.<sup>(1~4)</sup>

따라서, 본 연구에서는 비례-적분-미분제어기(PID Controller)를 조합하여 회전각도의 편차를 입력으로 하여 서보전동기의 단자전압, 각속도 및 회전각각동을 효과적으로 제어할 수 있는 자기동조 PID 제어기를 구성하고 반복 최소자승법(Recursive Least Square : RLS)<sup>(5)</sup>에 의해 온라인으로 제어기의 파라미터를 자동 추정하여 직류 서보 전동기의 위치제어에 적용함을 목적으로 하고자 한다.

#### 2. 자기동조 PID제어기

본 논문에서는 시스템 파라미터를 반복최소 자승법으로 추정하여 이를 참값이라고 가정하고, 서보모터의 파라미터를 추정하였으며 이를 구성하면 식(2-1)과 같다<sup>(6)</sup>.

$$Y(K) + a_1 Y(K-1) + a_2 Y(K-2) = b_1 U(K-1) + b_2 U(K-2) \quad (2-1)$$

$a_1, a_2, b_1, b_2$  는 자기동조 동정 방법을 사용해서 추정되는 계수이며, 반복 최소 자승 동정법으로 식(2-1)을 다시 쓰면 식(2-2), (2-3)과 같다<sup>(7~9)</sup>.

$$Y(K) = \phi^T(k) \hat{\theta}(K-1) \quad (2-2)$$

$$\phi(K) = [Y(K-1), Y(K-2), U(K-1), U(K-2)]^T \quad (2-3)$$

$$\hat{\theta}(K) = \theta(K-1) + H(K-1)[Y(K) - \phi^T(K) \hat{\theta}(K-1)] \quad (2-4)$$

일반적인 연속 PID 제어기는 다음과 같이 정의된다.

$$U(S) = G(S)[U_m(S) - Y(S)] \quad (2-5)$$

$$G(S) = (K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{s+1}) \quad (2-6)$$

이다. 이산시간 PID 제어기를 얻기 위해 식(2-6)을 PI항과 D항을 분리하여 이산형태로 나타내면 다음과 같다.

$$U(K) = \left[ \frac{D(Z^{-1})}{1(Z^{-1})} + \frac{F(Z^{-1})}{E(Z^{-1})} \right] (U_m(K) - Y(K)) \quad (2-7)$$

$$= \frac{D(Z^{-1})E(Z^{-1}) + F(Z^{-1})}{1(Z^{-1})E(Z^{-1})} (U_m(K) - Y(K))$$

다음의 블록 다이어그램은 시스템의 출력에 대해 비례제어기 및 미분제어기로 동작하고, 시스템 출력과 기준 입력 사이의 오차에 대하여 적분제어기로서 동작한다

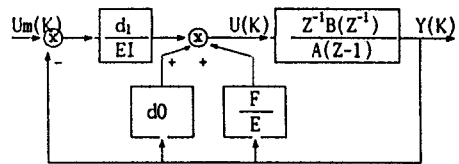


Fig.1. A close loop system include in integral item with reference input

일반적인 페루프 시스템의 이산형태의 제어량  $U(k)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{Y(K)}{U_m(K)} = \frac{Z^{-1}T(Z^{-1})B(Z^{-1})}{A(Z^{-1})R(Z^{-1}) + Z^{-1}B(Z^{-1})S(Z^{-1})} \quad (2-8)$$

식(2-8)에서 적당한 페루프 극 배치를 갖는 최고차항의 계수가 1이고 단위 원안에 근을 갖는 안정한 다항식  $Cr(Z^{-1})$ 를 도입하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C_r(Z^{-1}) = 1 + C_1 Z^{-1} + C_2 Z^{-2} \quad (2-9)$$

윗식의 우변의 분모항은 페루프 시스템의 극이 됨으로  $R(Z^{-1}), S(Z^{-1})$ 를 사용하여 원하는 극으로 재배치할 수 있다. 이때 원하는 특성 방정식을  $Cr(Z^{-1})$ 라

놓으면  $R(Z^{-1})$ ,  $S(Z^{-1})$  다항식은 다음의 극배치를 만족시켜야한다.

$$C_r(Z^{-1}) = A(Z^{-1})R(Z^{-1}) + Z^{-1}B(Z^{-1})S(Z^{-1}) \quad (2-10)$$

$$R(Z^{-1}) = (1+rZ^{-1})(1-Z^{-1}) \quad (2-11)$$

$$S(Z^{-1}) = S_0 + S_1Z^{-1} + S_2Z^{-2} \quad (2-12)$$

$$T(Z^{-1}) = S_0 + S_1 + S_2 = d_1 \quad (2-13)$$

식(2-10)~식(2-13)에서 같은차수끼리 서로 비교하면 선형 제어기의 제어신호  $U(K)$ 는 식(2-14)와 같고 PID제어기의 이득값을 이용하면 식(2-15)와 같다.

$$U(K) = \frac{S_0 + S_1 + S_2}{(1+rZ^{-1})} U_n(K) - \frac{S_0 + S_1Z^{-1} + S_2Z^{-2}}{(1+rZ^{-1})(1-Z^{-1})} Y(K) \quad (2-14)$$

$$U(K) = \frac{-T_0 K_I}{(1+rZ^{-1})(1-Z^{-1})} (U_n(K) - Y(K)) + K_P Y(K) + \frac{K_D(1-Z^{-1})}{(1+rZ^{-1})} Y(K) \quad (2-15)$$

식(2-14)와 식(2-15)에서 자기동조 PID 제어기의 이득은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_P = \frac{(S_1 + 2S_2)}{(1+r)} \quad (2-16)$$

$$K_I = -\frac{(S_0 + S_1 + S_2)}{T_0} \quad (2-17)$$

$$K_D = \frac{[rS_1 - (1-r)S_2]}{(1+r)} \quad (2-18)$$

### 3. 직류 서보 전동기의 모델

직류 서보 전동기의 모델은 그림 3-1과 같다

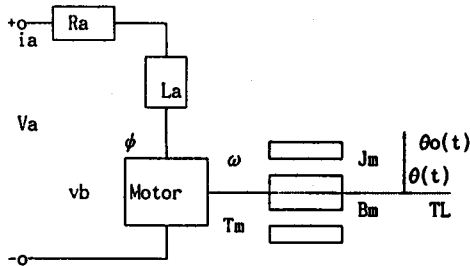


Fig. 3-1. Model of DC servo system

### 4. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과 고찰

#### 4-1 시뮬레이션

자기 동조 조정 루틴에서 반복 최소 자승법에 의해  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ 의 값이 최적한 값이 될때까지 반복하여 구한 후 시스템의 동특성의 해를 Runge-Kutta해법에 의해 회전각  $\theta$ 를 구하고,  $\theta^*$ 와  $\theta$ 의 값으로부터 오차를 구한다.

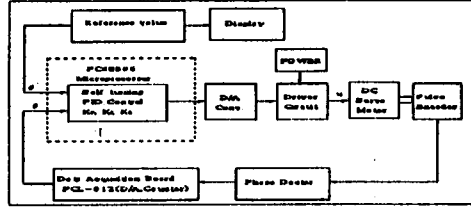
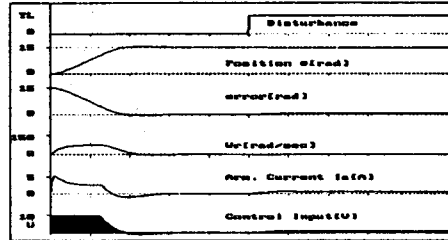


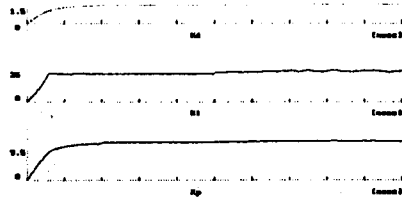
Fig. 4-1 Block diagram of DC servo system using PID self turning control.

그림 4-1은 제어기에서 자기동조 PID제어기는 소프트웨어인 제어규칙과 출력을 변환하는 요소와 하드웨어인 계산장치(Computing Device)로 구성되어 있는데, 제어기 내부에서 자동적으로 PID계수를 추종할 수 있다는 것이다. 이상 서술된 자기동조 PID 기법을 적용하므로써, 시스템의 상태에 따라 자동적으로 파라메타의 계수를 자동 조정 할 수 있다. 제어 목표점은 15[rad]이며, 부하는 1.175[Kg·cm]을 추가하였다.



Full load applied at 500[ms], (100[ms/div])  
Fig. 4-2 Dynamic responses of self turning PID control

이상에서 그림 4-3은 STR PID제어시 구동 후 정상상태가된 500[ms]부터 부하를 추가한 경우 자기동조제어에 의한 PID 이득 계수의 추정 결과는 다음과 같다. 여기서, 비례계수  $K_p$ 는 9.5,  $K_i$ 는 35,  $K_D$ 는 1.5의 최종값으로 나타났으며, 부하를 투입하였을 때 약간의 진동이 나타나는 것을 볼 수 있다.



Full load applied at 500[ms], (100[ms/div])  
Fig. 4-3 Dynamic responses of self turning PID coefficients

### 5. 제어기 구성 및 실험결과

자기동조 PID제어기를 가진 직류 서보 시스템의 구조는 그림 5-1과 같다.

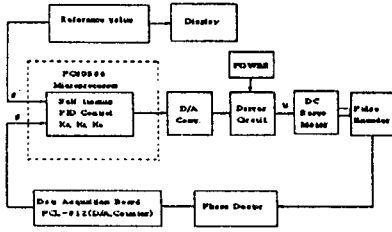
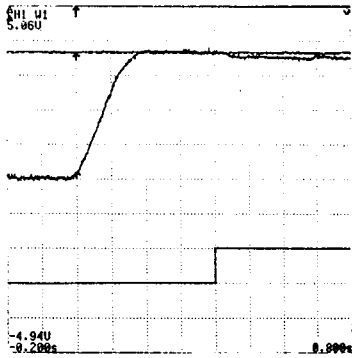


Fig. 5-1 Block diagram of DC servo system with STR PID controller.

PID 제어의 결과를 그림 5-2에 나타내었다.

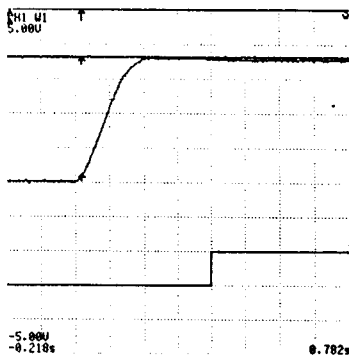


(4[rad/div], 100[ms/div]).

Fig. 5-2 Experimental results of PID control.

그림 5-2는 PID 제어인 경우 시동 후 정상상태가 된 400[ms] 이후부터 부하를 추가했을 때 PID 제어의 위치 응답이다. 여기서, 부하의 외란이 추가된 이후의 최대 위치오차는 약 4.23[%]로 정상상태의 오차에 비해 상당히 크게 나타났으며, 부하를 추가한 경우에는 응답특성이 아주 약화되었으며, 외란에 대한 건실성이 약함을 알 수 있다.

이를 해결하기 위해서는 적응제어나 최적제어 이론 등의 도입이 필수적이다. 따라서, 이를 보상할 수 있는 기법으로 자기동조PID 제어의 적용 결과를 그림 5-3에 나타내었다.



(4[rad/div], 100[ms/div]).

Fig. 5-3 Experimental results of self turning PID control.

그림 5-3는 자기동조PID 제어시 도달시간은 200[ms]로 PID제어보다 20[ms] 단축되었고, 최대 위치오차는 2.97[%] 감소되었다.

비례 제어나 비례적분미분 제어에서는 무부하인 경우와 부하를 추가한 경우에 대한 응답 특성에 많은 차이가 나지만, 자기동조PID 제어에서는 부하를 추가하였을 때도 무부하때와 거의 비슷한 응답이 나타났다.

자기동조PID 제어에서 무부하 때와 부하를 추가하였을 때도 거의 비슷한 응답이 나타나 강인성 및 안정성이 입증되었다.

## 6. 결론

본 논문에서는 오버슈트 및 도달시간등의 과도 응답 특성 및 정상상태 오차를 동시에 감소시킬 수 있도록 각 최적한 이득계수를 자동 조정 가능한 기법으로 반복 최소자승법을 이용한 자기동조PID 제어 알고리즘을 제시하였고, 이를 직류 서보 시스템의 위치제어시 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

비례적분미분 제어의 경우에는 2.55[%]의 오버슈트가 나타났으며, 외란을 추가한 경우에는 계수값이 적절하지 못하여 위치편차가 크게 나타났다. 그러나, 무부하시의 정상상태의 위치편차는 1[%] 이내로 아주 미소하게 나타났다.

(3) 자기동조 PID제어에 있어서는 비례 제어나 비례적분미분 제어에 비해 도달시간은 약 30[ms] 이상 단축되었으며, 오버슈트도 약 2[%] 이하로 아주 미소하게 되었다. 그리고, 외란을 추가한 경우에도 위치변동이 아주 미소하게 나타났으며, 실험에서도 시뮬레이션에서와 거의 같은 특성이 나타났다.

### 참고 문헌

- 1) John E. Gibson, "Nonlinear Automatic Control", McGraw Hill Book Company, 1963.
- 2) V. M. Alekseev, V. M. Tiknomirov, S. V. Fomin, "Optimal Control", Consultants Bureau, 1987.
- 3) Andrew P. Sage, Chelsea C. White, IV, "Optimum Systems Control", Prentice Hall, 1977.
- 4) Dr. S. Meshkat, "Advanced Motion Control", Intertec Communication, 1986.
- 5) S. Tjokro and S.F. Shah, "Adaptive PID control", Proc. American Control Conference, pp.1528 ~ 1534, 1985.
- 6) D.W. Clarke and P.J. Gawthrop, "Self turning controller", Proc. IEEE, Vol.122, No.9, pp.929 ~ 934, 1975.
- 7) PETER J. GAWTHROP, "Self turning PID controller: Algorithms and implementation", IEEE, Transactions on automatic control, Vol.AC-31, No.3, March.1986.
- 8) K. J. Astrom & B. Wittenmark, 1973, " On Self-tuning Regulators." Automatica
- 9) F.Cameron and D.E. Seborg, "A self turning controller with a PID structure", INT.J. Control, Vol.38, No.2, pp.401 ~ 417, 1983.