

# 위치제어계에서 신경망 알고리즘을 이용하여 가속도 제어기능을 갖는 PIDA 제어기 설계

최의혁\*, 박광현\*\*, 하홍곤\*\*

(주) 가진테크, 동의대학교 전자공학과\*\*

## In Position control system, the Design of PIDA Controller using Neural Network algorithm with Acceleration control function

Eui-Hyuk Choi\*, Kwang-Hyun Park\*\*, Hong-Gon Ha\*\*

Department of Electronic & Electronic Dong-eui University

E-mail: kwang0070@hanmail.net

### ABSTRACT

In industrial actual control system, PID controller has been used with its high delicate control system in position control system. PID controller has simple structure and superior ability in several characteristics. When the response of system is changed by delay time, variable load, disturbances and external environment, control gain of PID controller must be readjusted on the system dynamic characteristics. Therefore, a control ability of PID controller is degraded when the control gain is inappropriately determined. When the response characteristic of system is changed under a condition, control gain of PID controller must be changed adaptively to be a waited response of system.

In this paper an PIDA controller is constructed by Two-Layers Neural Network applying back-propagation(BP) algorithm. Form the result of computer simulation in the proposed controller, its usefulness is verified.

### 1. 서 론

산업현장에서 고정도·고정밀을 요구하는 위치 제어계에서는 목표치 추종과 외란 억제에 PID 제어기가 주로 사용된다. PID제어기는 구조가 간단하고 PID계수가 목표치 추종과 외란 억제를 위해 적절하게 설정하면 부하변동이나 외란에 의한 시스템 특성이 변하지 않는 한 매우 건실한 제어기 특성을 가지고 있기 때문에 현장에서도 많이 이용된다. 그러나 PID 제어기는 제어계의 지연시간이나 외란, 부하변동 등과 같은 시스템 동특성이 변화 할 때 PID제어기 계수를 재조정해야 하는 단점이 있다. 따라서 전문가의 경험이나 지식을 토대로 한 신경망 알고리즘(Neural Network Algorithm)을 적용하고, 가속도 성분을 추가한 PIDA 제어기를 설계하여 각각의 계수를 역전파 알고리즘에 의하여 수정되도록 하였다.<sup>(3)-(4)</sup>

본 논문에서는 2중 신경망(Double Layers Neural Network)을 이용하여 PIDA 제어기를 구성하고 역전파 알고리즘(Back-propagation Algorithm)을 적용시켜 PIDA 제어기의 제어계수들을 기준치와 계위치 응답에 강인하게 추종 할 수

있도록 확대 PIDA제어기를 구성하고, 위치제어계인 직류 서보전동기에서 그 성능을 시뮬레이션으로 검증하였다.<sup>(5)-(6)</sup>

### II. 위치제어계의 구성

서류 서보 전동기의 인가전압과 각 위치의 전달함수가 다음과 같다.

$$\frac{Y(Z^{-1})}{U(Z^{-1})} = \frac{a_3 Z^{-1} + a_4 Z^{-2}}{1 - (1 + a_1)Z^{-1} + a_1 Z^{-2}} \quad (1)$$

여기서  $Z^{-1}$ 은 지연 연산자이다. 그리고 계수  $a_1, a_2, a_3$  및  $a_4$  는 다음과 같다.

$$a_1 = \exp(-T_i / T_0) \quad (2-a)$$

$$a_2 = K(1 - a_1) \quad (2-b)$$

$$a_3 = K\{T_I - T_0(1 - a_1)\} \quad (2-c)$$

$$a_4 = K\{T_0(1 - a_1) - T_I a_1\} \quad (2-d)$$

$T_I$  을 샘플링 주기이다. 이 식을 이용하여 이산시간 영역의 구성도를 변환하면 그림 1과 같다.

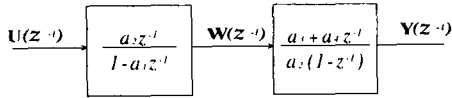


그림 1 이산시간 영역에서 직류 서보 전동기의 구성  
Fig. 1 Block diagram of DC servo motor in the discrete-time domain

### III. PIDA 제어기 및 신경망의 학습 알고리즘

#### 1. PIDA 제어기의 구성

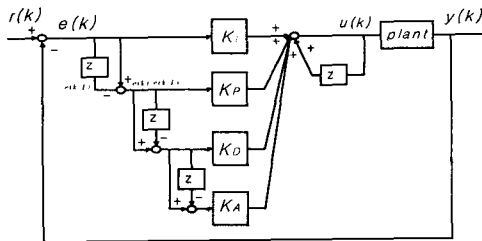


그림 2 PIDA 제어기의 구성  
Fig. 2 Generation of PIDA Controller

그림 2에서  $e(k)$ 는 PIDA 제어기의 입력이다. 비례·적분·미분·가속도 (PIDA ; Proportional·Integral·Derivative·Accelerator) 제어기의 출력  $U(t)$ 는 다음과 같다.

$$U(t) = K_p e(t) + K_I T_s \int_0^t e(t) dt + \frac{K_d}{T_s} \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_a}{T_s^2} \frac{d^2 e(t)}{dt^2} \quad (3)$$

식(3)을 이산형으로 변환시키면

$$U(k) = K_p e(k) + K_I T_s \sum_{i=1}^k e(i) + \frac{K_d}{T_s} (e(k) - e(k-1)) + \frac{K_a}{T_s^2} (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (4)$$

이로  $T_s$ 은 샘플링 시간이다.

식(4)를 속도형 PID 제어기로 변환하면 다음과 같다.

$$U(k) = U(k-1) + K_p (e(k) - e(k-1)) + K_I e(k) + K_D (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) + K_A (e(k) - 3e(k-1) + 3e(k-2) - e(k-3))$$

식(5)에서  $K_I$ 는 미분 제어기의 미분계수,  $K_D$ 는 적분제어기의 적분계수, 그리고  $K_A$ 는 가속도 제어기의 가속도 계수로 다음과 같다.

$$K_p = K_p, \quad K_I = K_i T_s, \quad K_D = \frac{K_d}{T_s},$$

$$K_A = \frac{K_a}{T_s^2}$$

#### 2. 신경망 학습 알고리즘

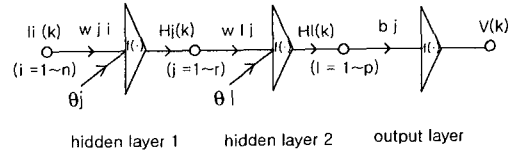


그림 3. 2개의 은닉층을 갖는 신경망  
Fig. 3. Neural Network with two hidden layers

그림 3의 구성도는 입력층의 출력에서 2개의 은닉층과 하나의 출력층 까지를 도시한 2개의 은닉층을 갖는 신경망이다.  $i$ 번째 입력층 Unit의 출력을  $I_i(k)$  ( $i=1 \sim n$ ),  $j$ 번째 은닉층 1 Unit의 출력을  $H_j(k)$  ( $j=1 \sim r$ ),  $l$ 번째 은닉층 2 Unit의 출력을  $H_l(k)$  ( $l=1 \sim p$ ), 출력층의 출력은  $V(k)$ 이다.

은닉층 1의 입력  $net_j$ 와 출력  $H_j(k)$ 는 다음과 같다.

$$net_j = \sum_{i=1}^n W_{ji} I_i + \theta_j \quad (7-a)$$

$$H_j(k) = f(net_j) \quad (7-b)$$

식(7-a)에서  $W_{ji}$ 는 입력층과 은닉층 1을 연결하는 연결강도이고  $\theta_j$ 는 은닉층  $j$ 의 문턱값이다. 그리고 입력층의 입력  $I_i(k)$  ( $i=1 \sim n$ )는 다음과 같다.

$$I_1 = e(k) \quad (8-a)$$

$$I_2 = e(k) - e(k-1) \quad (8-b)$$

$$I_3 = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \quad (8-c)$$

$$I_4 = e(k) - 3e(k-1) + 3e(k-2) - e(k-3) \quad (8-d)$$

$$I_5 = H_1(k-1) \quad (8-e)$$

그리고 은닉층 2의 입력  $net_j$ 과 출력  $H_j(k)$ 는 다음과 같다.

$$net_j = \sum_{i=1}^n W_{ij}H_i(k) + \theta_j \quad (8-a)$$

$$H_j = f(net_j) \quad (8-b)$$

식(8-a)에서  $W_{ij}$ 는 은닉층 1과 2를 연결하는 연결 강도이고,  $\theta_j$ 는 은닉층 2의 문턱값이다. 출력층의 입력  $net$ 와 출력  $V(k)$ 는 다음과 같다.

$$net = \sum_{j=1}^m b_j H_j(k) \quad (9-a)$$

$$V(k) = f(net) \quad (9-b)$$

식(9-a)에서  $b_j$ 는 은닉층 2와 출력층을 연결하는 연결 강도이며  $f(\cdot)$ 는 활성화 함수이다.

연결강도  $W_{ji}$ ,  $W_{ij}$ , 및  $b_j$ 을 수정하기 위해 서 다음의 역전파 알고리즘을 도입한다.

$$W_{ji}(k+1) = W_{ji}(k) - \eta_1 \frac{\partial E}{\partial W_{ji}} \quad (10-a)$$

$$W_{ij}(k+1) = W_{ij}(k) - \eta_2 \frac{\partial E}{\partial W_{ij}} \quad (10-b)$$

$$b_j(k+1) = b_j(k) - \eta_3 \frac{\partial E}{\partial b_j} \quad (10-c)$$

식(10)에서  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$ 는 상수이며  $E$ 는 기준치  $R(k)$ 와 계응답  $Y(k)$ 간의 오차  $e(k) = R(k) - Y(k)$ 의 함수로 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{2} \{e(k)\}^2 \quad (11)$$

$f(\cdot) = x$  그리고 제어대상을 선형이라 가정하여 식(10)에서 미분 연쇄법칙을 사용하여 계산하면 다음과 같다.

$$W_{ji}(k+1) = W_{ji}(k) + \alpha_1 e(k) W_{ij}(k) I_j(k) b_j(k) \quad (12-a)$$

$$W_{ij}(k+1) = W_{ij}(k) + \alpha_2 e(k) b_j(k) H_j(k) \quad (12-b)$$

$$b_j(k+1) = b_j(k) + \alpha_3 e(k) H_j(k) \quad (12-c)$$

(12)에서  $W_{ji}(k+1)$ 은  $W_{ji}(k)$ 의 수정량,  $W_{ij}(k+1)$ 는  $W_{ij}(k)$ 의 수정량, 그리고  $b_j(k+1)$ 는

$b_j(k)$ 의 수정량이고  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 는 상수다.  $e(k)$ 가 0이 되지 않을 때 식(12)는 계산되고  $e(k)$ 가 0이면 수정이 완료된다.

#### IV. 시뮬레이션 및 고찰

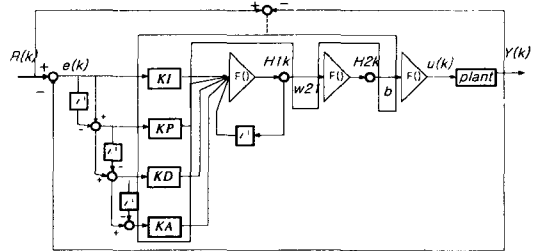


그림 4. 2중 신경망 PIDA 제어기의 구성

Fig 4. Configuration of PIDA control using two layers neural network

그림 4는 2중 신경망을 사용한 PIDA 제어기 구성도이다. 그림 4의 구성도를 시뮬레이션 하기 직류 서보 전동기의 각속도  $W(k)$ 와 각위치  $Y(k)$ 에 대한 차분 방정식은 다음과 같다.

$$W(k) = a_1 W(k-1) + a_2 U(k-1) \quad (13)$$

$$Y(k) = Y(k-1) + \left(\frac{-a_3}{a_2}\right) W(k) + \left(\frac{a_4}{a_2}\right) W(k-1) \quad (14)$$

표 1. 직류 서보 전동기의 제정수

Table 1. Parameters of DC servo motor

기호	실명	값	단위
$Rm$	전기자 저항	2.6	$\Omega$
$Lm$	전기자 인덕턴스	0.18	$mH$
$Jm$	전기자 회전관성	$3.87 \times 10^{-7}$	$kg \cdot m^2$
$Km$	역기전력 상수	0.00767	$N \cdot m / A$
$Kt$	토크 상수	0.00767	$N \cdot m / A$
$Kg$	기어비	14 : 1	

식(13)과 식(14)에서 계수  $a_1, a_2, a_3$  및  $a_4$ 는 표1의 직류 서보전동기의 제정수를 이용하여 식(2)에서 계산되고, 샘플링 시간  $T_s = 20[ms]$ 이다. 그리고 식(13)에서  $U(k)$ 는 제어대상의 입력이고. 오차신호  $e(k)$ , 신경망의 은닉층 1의 출력  $H_1(k)$ 와 은닉층 2의 출력  $H_2(k)$ , 출력  $Y(k)$ 를 사용해서 계의 응답 변동이 있을 때, PIDA 제어기의 계수들을 온라인으로 조정(update)하게 된다. 그림 3과 그림 4에서 각각의 PIDA 계수들의

연결강도는 다음 식과 같다.

$$W_{11} = KI, \quad W_{12} = KP, \quad W_{13} = KD, \quad W_{14} = KA \quad (15)$$

수정된 연결강도는 식 (12)에서 다음과 같이 수정된다.

$$W_{11}(k+1) = W_{11}(k) + \alpha_1 e(k) W_{21}(k) b(k) I_1(k) \quad (16-a)$$

$$W_{12}(k+1) = W_{12}(k) + \alpha_1 e(k) W_{21}(k) b(k) I_2(k) \quad (16-b)$$

$$W_{13}(k+1) = W_{13}(k) + \alpha_1 e(k) W_{21}(k) b(k) I_3(k) \quad (16-c)$$

$$W_{14}(k+1) = W_{14}(k) + \alpha_1 e(k) W_{21}(k) b(k) I_4(k) \quad (16-d)$$

$$W_{21}(k+1) = W_{21}(k) + \alpha_2 e(k) b(k) H_1(k) \quad (16-e)$$

$$b(k+1) = b(k) + \alpha_3 e(k) H_2(k) \quad (16-f)$$

신경망의 학습률  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 = 0.0023$ 으로 설정하고 가속도 성분을 추가하지 않은 일반적인 PID 제어기의 성능과 가속도 성분을 추가한 PID 제어기의 성능을 비교 분석하였다.

먼저 그림 5는 기존의 PID 제어기를 이용하여  $W_{11}(0) = 0.0087, W_{12}(0) = 0.78, W_{13}(0) = 2.9$ 의 값으로 설정하고 계 응답을 보였다. 상승시간은 작으나 과도상태응답이 크고 지연시간이 있음을 볼 수 있다.

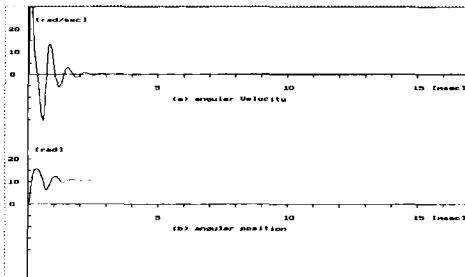


그림 5. 일반적인 PID 제어기의 계 응답  
(  $W_{11}(0) = 0.0087, W_{12}(0) = 0.78, W_{13}(0) = 2.9$  )  
Fig 5. Response of system of PID controller

그림 6은 PIDA 제어기 각각의 계수를  $W_{11}(0) = 0.0087, W_{12}(0) = 0.78, W_{13}(0) = 2.9, W_{14}(0) = 3.8, W_{21}(0) = 0.5, b(0) = 0.9$ 로 설정했을 때의 계 응답 상태를 나타내었다. 출력 그림에서 확인할 수 있듯이, 과도상태 응답과 지연시간이 제거되어 최적 적응 동조 모드가 설정되어 양호한 특성을 얻을 수 있다.

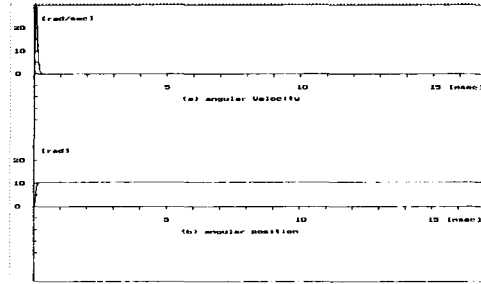


그림 6. 2중 신경망 PIDA 제어기의 계 응답  
(  $W_{11}(0) = 0.0087, W_{12}(0) = 0.78, W_{13}(0) = 2.9, W_{14}(0) = 3.8, W_{21}(0) = 0.5, b(0) = 0.9$  )  
Fig 6. Response of system PIDA controller using two-layers neural network

## V. 결론

본 논문에서는 위치제어계에서 신경망을 이용하여 시스템 기준치와 계 응답의 오차가 최소화 되도록 2중 신경망 PIDA 제어기를 제안하고 PIDA 제어기의 계수를 역전파 알고리즘으로 적용시켜 제어 대상인 직류 서보전동기를 컴퓨터 시뮬레이션한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

PIDA 계수들의 초기치를 적절히 설정 할 때 과도 상태 응답은 제거되어 양호한 계 응답 특성을 얻을 수 있었다. 따라서 신경망 PIDA 제어기에서 각각의 계수의 초기치를 적절히 설정함으로써 최적의 동 특성 계 응답에 아주 양호한 응답 특성을 검증할 수 있었으며, 2중 신경망 PIDA 알고리즘을 기타 제어분야에 많이 응용 가능 할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] H. Butler, Ger Homderd, and Job von Amerongen, "Model Reference Adaptive of a Direct-Drive DC Motor", IEEE Control System Magazine Jan. 1989.
- [2] 高泰彦, "直流電動機의 速度應答改善을 위한 制御器의 設計", 東義人學校産業技術研究所研究誌, 第4卷, 1990, 2, pp. 11-117.
- [3] P. B. Schmidt and R. D. Lorentz, "Design Principles and Implementation of DC Drives", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 28, No. 3, 1992, pp. 594-599.
- [4] K. H. Lee and Z. Bien, "Initial condition problem of learning control", IEEE PROCEEDINGS-D, Vol. 138, No. 6, November, 1991.
- [5] M. Saerens and A. Soquet, "A neural controller based on back propagation algorithm", Proc. of First IEE Int. Conf. on Artificial Neural Networks, London, pp. 211-215, 1989.