

# 직류 서보 전동기의 속도제어를 위한 규칙기반 자동동조 PI 제어기에 관한 연구

(A Study on the Rule-Based Auto-tuning PI Controller for Speed Control of D.C Servo Motor)

朴日緒\* · 吳 勳\*\*  
(Wal-Seo Park · Hun Oh)

## 요 약

산업의 자동화에 따라 PI 제어기에 의해 제어되는 직류 서보 전동기는 정밀한 제어가 요구된다. 하지만 시스템의 특성이 변화하면 정밀한 제어는 어렵게 된다. 이를 해결하기 위한 한 방법으로 본 논문에서는 전동기 속도제어 시스템을 위한 규칙기반 자동동조 PI 제어기를 제안하였다. 규칙은 Ziegler-Nichols의 계단응답과 전문가 지식을 기초로 하였다.

제어 매개변수는 오차, 기울기, 가장 큰 기울기의 점, 허용 오버슈트에 의해서 결정된다. 제어의 정밀성은 시뮬레이션에 의해 확인하였다.

## Abstract

As industry gets rapidly automatic, D.C servo motor which is controlled by a PI controller needs accurate control. However, when a system has various characters, it is very difficult to guarantee its accuracy. In this paper, rule-based auto-tuning PI controller for motor speed control system is presented as a way of solving this problem. Some rules are based on Ziegler-Nichols step response and expert knowledge. Control parameters are determined by error, slope, steepest slope point, and permission overshoot. The accuracy of control is demonstrated by a computer simulation.

### 1. 서 론

산업의 급속한 발전에 따라 시스템 제어 기술

의 요구사항이 점점 고도화 되고 있다. 근래에 보다 정교한 현대 제어 이론들이 개발 되었음에도 산업현장에서는 PI 제어기가 널리 쓰이고 있

\*正會員：圓光大學校 工科大學 電氣工學科 助教授      \*\*正會員：圓光大學校 大學院 電氣工學科 博士科程  
※ 이 논문은 1996년도 원광대학교 교비 지원에 의해서 연구됨. 接受日字：1997年 1月17日

다. 이는 구조가 간단하고 과도 응답 특성이 좋으며 정상 상태 오차를 제거할 수 있기 때문이다. 하지만 부하의 변동과 외란의 영향이 있을 때에는, 제어기의 매개변수가 시스템과 맞지 않게 되므로서 발생하는 상당히 큰 오차와 긴 과도 응답시간 때문에 수시로 제어기의 매개변수를 조정해야만 한다.<sup>1)</sup>

PI 제어기의 매개변수 결정방법으로는 시행착오 방식, 단위계단 응답법, 비례이득을 점차 크게 하여 일정한 진동을 얻는 Ziegler-Nichols 방법, 위상여유와 이득여유를 보장하는 Åström의 릴레이 실험을 이용하는 방법 등이 있다.<sup>2), 3)</sup> 그러나 시행착오 방식은 많은 노력과 시간이 필요하고, Ziegler-Nichols 방법은 자동화하기 어려운 단점이 있고, 릴레이실험방법은 점근적 안정의 선형 시스템으로 제한된다.<sup>4)</sup> 계단 응답법은 개루프에 계단입력을 인가하고 그 응답의 결과를 측정하여 Ziegler-Nichols step-response method에 의하여 PI 매개변수를 얻게 된다. 이러한 계단 응답법은 실험에 의하여 기울기나 데드타임을 얻기가 어렵고, 이와같이 결정된 값도 시스템에 적합한 매개변수가 아니므로 시행착오 방식에 의해 수정되어야 한다.<sup>5)</sup>

본 논문에서는 단위계단을 입력했을 때 기울기나 데드타임이 자동으로 측정되고, 제안된 규칙에 의하여 1차로 매개변수가 결정된다. 또한 1차로 결정된 매개변수는 원하는 응답과 비교되어 오차가 최소화 될 때까지 반복하여 매개변수를 조정하는 기법을 제시하였다.

## 2. 시스템의 구성

그림 1에서 플랜트와 PI 제어기 ( $u=K[e(t)+\frac{1}{T_i}\int_0^t e(s) ds]$ )는 기본제어 루프를 형성한다. 시스템에 적합한 PI 제어기외 매개변수가 사용될 때에 부하변동이나 외란의 존재시에 과도응답을 최소화 할 수 있을 뿐만 아니라 빠른 상승시간을 얻을 수 있고 추적제어에 적합하게 된다. 규칙기반 자동 동조기는 크게 두 가지 기능으로 나누어 볼 수 있다.

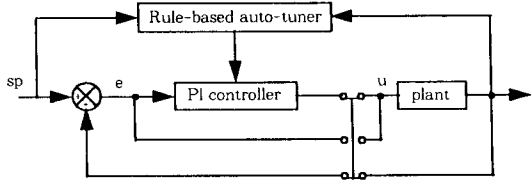


그림 1. 규칙기반 자동 동조기를 갖는 시스템의 구성도  
Fig. 1. Block diagram of system with rule-based auto-tuner

첫째, 계단응답에서 얻은 최대 기울기와 최대 기울기의 점 및 데드타임에 기초하여 규칙을 수행하므로써 1차적으로 매개변수를 결정하게 된다. 그러나 이와같이 결정된 제어 매개변수는 계단응답 특성에 의해 최적의 매개변수는 아니므로 수정이 요구된다. 이를 시행착오 방법에 의존한다면 상당한 노력과 시간이 필요로 하게 된다. 둘째, 매개변수 수정시에는 페루프에서의 응답특성이 원하는 것인가를 기준신호와 비교하여 오차가 최소화 되도록 결정하게 된다. 여기서 원하는 기준 신호가 필요로 하게 되는데, 본 연구에서는 허용오차를 벗어나지 않는 오버슈트를 원하는 응답의 기준 신호로 사용하였다.

플랜트에 대한 실험 대상은 직류 서보 전동기로 선택하였으며 전달함수는 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$G(s) = K_f / [(J \cdot L_a \cdot s^2 + (J \cdot R_a + B \cdot L_a) \cdot s + (K_t \cdot K_b + B \cdot R_a)] \quad (1)$$

급성 FMD-E40(정격출력 400(w))의 사양은 다음과 같다.

$K_t = 2.27[\text{kg f} \cdot \text{cm/A}]$  : 토오크 정수

$J = 3.4 \times 10^{-3}[\text{kg f} \cdot \text{cm/sec}^2]$  : 관성 모멘트

$L_a = 0.89[\text{mH}]$  : 전기자 인덕턴스

$R_a = 1.2[\Omega]$  : 전기자 저항

$B = 0.75[\text{kg f} \cdot \text{cm}]$  : 마찰 토오크

$K_b = 23.33[\text{V/Krpm}]$  : 유기전압정수

이상의 값을 식 (1)에 대입하면 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$G(s) = 220 / (0.03 \times 10^{-3}s^2 + 0.1058s + 136) \quad (2)$$

## 3. 자동동조 규칙

계단 응답법은 개루프 플랜트의 계단 응답 실험

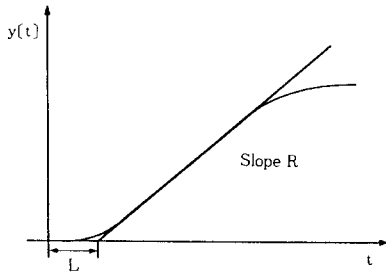


그림 2. 계단응답으로부터 L 그리고 a = RL의 결정  
Fig. 2. Determination of parameter L and a=RL from the step response

험에 기초한 방법이다. 이 방법은 비 최소위상 특성을 갖는 플랜트에는 적용될 수 없다. 응답의 실험 결과에 의하여 가장 큰 기울기(steepest slope)를 갖는 계단 응답에 대한 접선을 그린다. 그림 2에서 보는 바와 같이 축과 접선과의 교차가 나타내어지면, 이때 기울기 값(R)과 데드타임(dead time : L) 그리고 수직축과의 교차점(a)이 결정된다. 이 값들은 표 1에 적용하므로써 PI 제어기 매개변수를 구하게 된다.

표 1. Ziegler-Nichols 계단 응답으로부터 얻어지는 PI 매개변수

Table 1. PI parameter obtained from the Ziegler-Nichols step-response method

제어기의 형태	K	T <sub>i</sub>
P	1/a	
PI	0.9/a	3L

본 연구에서는 위와 같은 방법을 규칙에 의해서 자동적으로 처리되도록 하는 알고리즘을 개발하였다. 이는 다음과 같다.

(1) 정보의 획득

$$n=1,2,\dots,P \quad (3)$$

n : data sampling number

$$\Delta y_n = y_n - y_{n-1} \quad (4)$$

$$\Delta y_{n-1} = y_{n-1} - y_{n-2} \quad (5)$$

$$R_n = \Delta y_n / \Delta t \quad (6)$$

$$R_{n-1} = \Delta y_{n-1} / \Delta t \quad (7)$$

$$\text{IF } R_n > R_{n-1} \text{ then } y_p = y_n, R_p = R_n, B_n = B_n + 1 \quad (8)$$

$$\text{IF } R_n < R_{n-1} \text{ then } d_n = d_n + 1 \quad (9)$$

$$\text{IF } R_n = R_{n-1} \text{ then } C_n = C_n + 1 \quad (10)$$

$$\text{IF } y_n = SP \text{ then 2단계} \quad (11)$$

B<sub>n</sub> : up slope counter

D<sub>n</sub> : down slope counter

C<sub>n</sub> : equal slope counter

R<sub>n</sub> : slope

y<sub>n</sub> : out put

SP : 설정값

(2) steepest slope point의 결정

$$n_m = B_n + \frac{C_n}{2} \quad (12)$$

$$t = n_m \times \Delta t \quad (13)$$

$$y_m = y_p + R_p \times \frac{C_n}{2} \quad (14)$$

(3) R, L, a 의 결정

$$R = R_p \quad (15)$$

$$a = y_m - R \times t \quad (16)$$

$$L = a / R \quad (17)$$

(4) 제어 매개변수의 1차 결정

$$K = 0.9/a \quad (18)$$

$$T_i = 3 \times L \quad (19)$$

$$K_p = K \quad (20)$$

$$K_i = K / T_i \quad (21)$$

이와같이 설계된 PI 제어기는 대표극점(dominant poles)에서 꽤 낮은 감쇄(fairly low damping)를 갖게 된다. 또한 제어기의 설계가 잘 되어졌는지를 확인하는 과정이 필요하다. 일반적인 PI 제어기는 다음과 같은 특징을 갖고 있다.

첫째, 오버슈트는 적분이득을 조금 감소시켜 줄일 수 있다. 둘째, 상승시간은 비례이득을 키우면 줄일 수 있다. 여기에서 원하는 응답(desired response)이 주어져야 출력응답과 비교하여 반복 수정을 시킬 수 있다. 원하는 응답은 허용 오차를 벗어나지 않는 약간의 오버슈트가 있는 응답으로 사용하였다. 이들 규칙은 다음과 같다.

(5) 제어 매개변수의 2차 결정

$$\text{IF } OS > POH \text{ then } K_p = K_p - K_p \times R_i, K_i = K_i - K_i \times R_i \quad (22)$$

$$\text{IF } OS < POL \text{ then } K_p = K_p + K_p \times R_i, K_i = K_i + K_i \times R_i \quad (23)$$

$$\text{IF } POH \geq OS \geq POL \text{ then (6)으로} \quad (24)$$

OS : overshoot  
 POH : permission overshoot high  
 POL : permission overshoot low  
 $R_1$  : Ratio

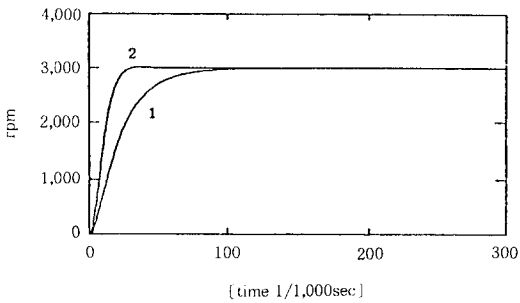
(6) PI제어기의 자동동조

(5)에서 수정된 제어기의 매개변수는 PI 제어기에 자동동조된다.

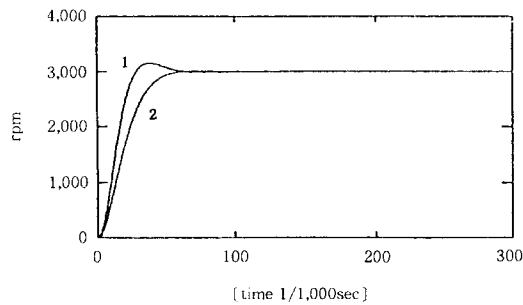
$$u = e(K_p + \frac{K_i}{s})$$

4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

정보획득을 위한 샘플링 주기는 0.001 초로 선택하였으며, 허용 오버슈트는 0.1~0.5[%]로 사용하였다. 그림 3은 제시된 규칙기반에 의한 출력 응답곡선이다.



(a) J x 10에서의 응답곡선



(b) J x 20에서의 응답곡선

그림 3. 출력 응답곡선  
 Fig. 3. Response curve to output

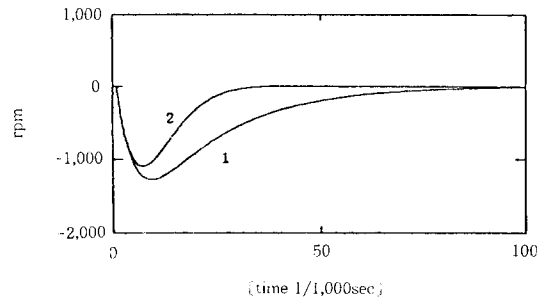
그림 3의 (a)는 관성모멘트가 10배 증가했을 때의 응답곡선으로서, 곡선1은 1차로 결정된 PI 매개변수( $K_p=0.008$ ,  $K_i=26.6$ )를 사용한 경우

이고, 곡선2는 수정된 매개변수( $K_p=0.019$ ,  $K_i=64$ )를 사용한 경우이다. 그림에서 알 수 있듯이 수정된 매개변수를 사용하게 되면 설정값에 도달하는 시간이 약 0.1초 정도 앞당겨 진다.

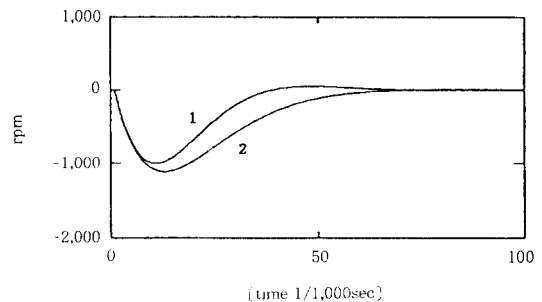
그림 3의 (b)는 관성모멘트가 20배 증가했을 때의 응답곡선으로서, 곡선1은 1차로 결정된 매개변수를 사용한 경우이고, 곡선2는 수정된 매개변수를 사용한 경우이다. 수정된 매개변수를 사용하면 6[%]의 오버슈트를 0.5[%]이내로 제한하게 된다. 이때 제어 매개변수는  $K_p=0.016$ ,  $K_i=53$ 에서  $K_p=0.009$ ,  $K_i=32$ 로 수정된다.

그림 4는 오차 특성곡선으로서, (a)와 (b)에서 곡선1은 1차 매개변수를 사용한 경우이고, 곡선2는 수정된 매개변수를 사용한 경우이다. J x 10인 (a)의 특성곡선에서 알 수 있듯이 수정된 매개변수를 사용하면 오차 최대치의 16[%]정도가 감소하며, 과도 응답 시간은 0.05초 정도 감소하게 된다.

J x 20인 (b)의 특성곡선은 1차 매개변수를 사



(a) J x 10에서의 오차특성곡선



(b) J x 20에서의 오차특성곡선

그림 4. 오차특성곡선  
 Fig. 4. Characteristic response to error

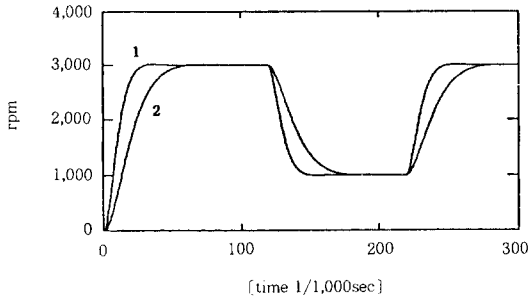


그림 5.  $J \times 10$ 과  $J \times 20$ 에 대한 추적 응답곡선  
Fig. 5. Tracking response curve to  $J \times 10$  and  $J \times 20$

용했을 때에는 오버슈트가 발생하고, 수정된 매개변수를 사용하면 과도 응답 시간이 다소 길어짐을 볼 수 있다.

그림 5는  $J \times 10$ (곡선1)와  $J \times 20$ (곡선2)에서 수정된 매개변수를 사용한 추적 응답곡선이다.

그림에서 보여주듯이 제어 매개변수가 오버슈트나 과 감쇠없이 적절하게 결정 되었음을 알 수 있고, 관성모멘트가 큰 곡선2는 관성모멘트가 작은 곡선1 보다 조금 늦게 추적됨을 보여준다.

제시된 제어기법은 출력 응답곡선, 오차 특성곡선, 추적 응답곡선에서 보여주는 바와 같이 적합한 제어 매개변수를 규칙기반에 의하여 결정하여 동조시키므로써, 서보 제어목적을 달성할 수 있으리라 사료된다.

### 5. 결 론

산업현장에서 PI 제어기는 많은 제어 설비에 사용되고 있다.

본 논문에서는 직류 서보 전동기의 속도 제어를 위한 PI제어기의 규칙기반 자동동조에 관한 제어 기법을 제안하였다.

제안된 기법은 계단 응답법에 기초한 제어 매개변수의 결정규칙과 원하는 응답과 비교하여 수정하는 기법을 도입하므로써 시스템에 적합한 매개변수를 쉽게 결정할 수 있고, 자동화 할 수 있는 장점을 갖고 있다.

제안된 제어 기법은 자동화 설비의 실시간 제어에 사용될 수 있으리라 사료된다.

### 참 고 문 헌

- 1) K.J.Astrom and T.Hagglund, "Automatic tuning of Simple regulators with specification on phase and amplitude margins", Automatica, vol.20, pp.645~651, 1985.
- 2) J.C.Zigler and N.B.Nichols, "Optimum setting for Automatic controller", trans, ASME, vol.65, pp.433~444, 1994.
- 3) K.J.Astrom and T.Hagglund, "Automatic tuning of PID controllers", Instrument society of america, pp.1~135, 1988.
- 4) L.Hsu, "Boundedness of oscillation in relay feedback system", INT.J.control, vol.52, No.5, pp.1273~1276, 1990.
- 5) J.M.Zurada, Artificial neural systems, west publishing company, pp.64~75, 1992.

### ◇ 著 者 紹 介 ◇



박 알 서(朴 晁 緒)

1953年 5月1日生. 1982年 圓光大工大 電氣工學科 卒. 1985年 朝鮮大學校 大學院 電氣工學科 卒(碩士). 1992年 圓光大學校 大學院 電氣工學科 卒(博士). 現在 圓光大學校 電氣工學科 助教授.



오 훈(吳 勳)

1967年 9月 8日生. 1991年 圓光大工大 電氣工學科 卒. 1993年 圓光大學校 大學院 電氣工學科 卒(碩士). 1994年 同 大學院 電氣工學科 博士課程.