

# 直流 서보 電動機의 速度制御를 위한 전문가 自動同調 PID 制御器

正會員 朴 日 緒\*

## Expert Auto-turning PID Controller for the Speed Control of D.C. Servo Motor

Wal Seo PARK\* *Regular Member*

**要 約** 전문가 제어는 폐환제어 시스템에 규칙기반 전문가 시스템을 도입한 기법이다. 본 논문에서는 직류 서보전동기 속도 제어를 위한 입력 조절, 감독, 동조에 관한 경험적 규칙이 제시되었다. 경험적 규칙이 폐환제어 시스템의 한 요소로서 사용된 전문가 자동동조 PID 제어기는 수치 알고리즘과 경험적 논리로 구성된다. 견실하고 정밀한 제어기능은 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 확인하였다.

**ABSTRACT** The idea of expert control is to incorporate a rule based expert system in a feedback control system. In this paper, We present some heuristic rules about input regulation and supervision and turning for D.C. servo motor speed control. The expert auto-turning PID Controller which Heuristic rules are used as an element of the feedback control system is implemented with the numerical algorithms and Heuristic logics. The robust and accurate control function is confirmed by computer simulation.

### I. 서 론

산업의 자동화에 따라 직류 서보 전동기는 정밀한 제어가 요구 된다. 전동기의 속도 제어는 마찰의 변화, 온도에 의한 저항의 변화, 부하 변동 등이 고려되어야 한다. 특히 부하 변동은 속도 제어에 큰 영향을 주며, 부하 변화에 따라서 수시로 제어 파라미터를 조정해 주어야 한다. 근래에 정교한 현대 제어 이론들이 개발되었음에도 현장에는 대부분 PID 제어가 널리 쓰이고 있다.<sup>(1)(2)</sup> 시스템의 동특성의 변화에 따라 PID 제어기 파라미터는 기술자에 의한 시행착오 방식이나 Ziegler-Nichols 방법으로 결정하게 된다.<sup>(3)</sup> 1984년에 Astrom과 Hagglund는 릴레이 실험을 이용하여 위상여유와 이득여유를 보장

하는 동조법을 제안하였다.<sup>(4)</sup> 근래에 와서 Astrom 과 Arzen 등은 PID 제어기 수행에 경험적 논리를 도입하여 단일 페루우프 시스템으로서의 전문가 시스템을 개발하였다.<sup>(5)(6)(7)</sup>

본 논문에서는 시스템의 동특성 변화에 따라 그에 맞는 PID 제어 파라미터 결정을 위한 입력 조절 실험을 제시하려 한다. 입력 조절 실험은 Ziegler-Nichols 방법의 자동화시키기 어려운 단점을 보완하였고, 페루우프내의 릴레이에 의한 실험보다 쉽게 시뮬레이션 할 수 있도록 개선하였다. 직류 서보 전동기의 부하 토오크의 변화에 따른 감독과 동조 규칙의 정보는 이론과 반복된 경험에 의해서 도출된다.<sup>(8)</sup>

### II. 시스템의 구성

전반적인 전문가 제어기의 구성은 그림 1과

\*圓光大學校 大學院 電氣工學科  
Dept. of Electrical Engineering, Won Kwang University  
論文番號 : 91-81(接受1991. 5. 24)

같이 경험적 논리와 수치 알고리즘 부분으로 이루어 졌다.

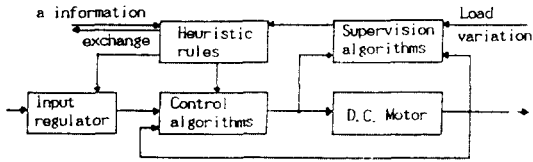


그림 1. 전문가 제어기  
Fig. 1. Expert Controller

논리적 부분은 입력 조절 규칙과 동조 규칙으로 되어있다. 입력 조절 규칙은 입력의 진폭과 Hysteresis 폭을 조정하는데 필요한 논리와 임계 이득, 임계주기를 구하는 수식으로 되어있다.

동조 규칙은 부하 변동에 따라 제어 파라미터를 동조시키는 규칙으로 되어있다. 수치 알고리즘 부분은 제어 알고리즘과 감독 알고리즘으로 구성된다. 제어 알고리즘은 PID 알고리즘으로 그의 전달 함수는 식(1)과 같다.

$$G_C(S) = K_P + K_I / S + S \times K_D \quad (1)$$

감독 알고리즘은 플랜트의 출력과 에러의 데이터가 모아지고, 설정값에 도달하는 동안의 평균 값과 발진 신호의 최대값, 최소값이 구해지고 또한 부하 토오크의 변화를 감지하는 논리로 되어 있다. 직류 서보 전동기의 전달 함수는 식(2)와 같이 쓸 수 있다.

$$G(S) = K_t / (J \cdot L_a \cdot S^2 + (J \cdot R_a + B \cdot L_a) \cdot S + (K_t \cdot K_b + B \cdot R_a)) \quad (2)$$

본 논문에 사용된 직류 서보 전동기의 파라미터는 다음과 같다.

$J = 1.0 \times 10^{-3} [N \cdot m]$  : 관성 모멘트

$L_a = 8.6 \times 10^{-2} [H]$  : 전기자 인덕턴스

$K_t = 17 \times 10^{-3} [N \cdot m / A]$  : 토오크 상수

$K_b = 60 \times 10^{-3} [N / rad \cdot sec^{-1}]$  : 역기전력 상수

$\beta = 0.0 [N / m \cdot sec^{-1}]$  : 마찰 계수

$R_a = 3.2 [ \Omega ]$  : 전기자 저항

이상의 값을 식(2)에 대입하면 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$G(S) = 17 / (8.6 \times 10^{-3} \times S^2 + 3.2 \times S + 1.02) \quad (3)$$

### III. 경험적 규칙

#### 3.1 입력 조절 규칙

입력 조절 실험의 기본 개념은 그림 2와 같이 입력 조절기를 도입하여 플랜트가 인위적 발진을 하도록 하는데 있다.

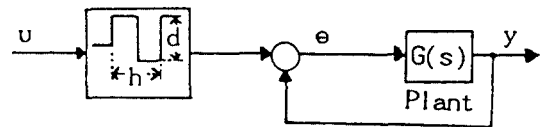


그림 2. 입력 조절기의 구성도  
Fig. 2. Block diagram under Input regulation

여기서 d는 입력 조절 진폭이며 h는 입력 Hysteresis 폭이다. 입력 조절 시험으로 얻어지는 공정에 관한 지식은 제어하고자 하는 플랜트의 개루우트 이득을 Nyquist 선상의 한점값으로부터 도출하는 것이다. 이 점은 Nyquist 선과 음상 선축의 교차점으로 일반적으로 임계점이라 칭하며 이때의 이득을 임계이득(critical gain :  $K_c$ ), 그리고 주기를 암계주기(critical period :  $t_c$ )라 한다. Fourier 급수 확장에 의한 입력 조절의 출력 진폭은 근사적으로  $A \cdot d / \pi$ 의 값을 얻는다. 만약 발진 출력의 진폭을 a라 하면 이득은 묘사 함수(describing function)  $K_c = 4 \cdot d / (\pi a)$ 로 표시 된다.

묘사 함수의 음의 역(negative reciprocal)은 선축과 평행한 직선으로 도시 된다.

직선과 개루우트 이득을 조정할 플랜트의 Nyquist 선도는 허수축 음의 영역 단위원 상에서

만나게 된다. 이는  $|G(j\omega)|=1/K_c=\pi a / (4d)$  로 표시 할 수 있다. 이와같이 이득을 증가시켜서 프랜트의 안정도 한계영역으로 가져오게 하는 임계이득과 임계주기는 다음과 같다. 이 값은 PID 동조계수를 구하는 데 사용된다.

임계이득 :  $K_c=4d / (a\pi)$

임계주기 :  $T_c=2\pi / W$

일반적으로 같은 입력 조절에 의한 발진 신호는 부하가 커지면 주기는 길어지고 진폭은 작아지게 된다. 또한 이의 역관계도 성립한다. 이에 따라서 부하가 변화할 때에는 부하에 맞는 임계이득과 주기를 구하는 것이 필요하다. 임계이득과 임계 주기를 구하기 위한 입력 조절 규칙은 다음과 같다.

(1) 기준입력 조절규칙

IF  $e(k) > e^*$  then  $u(k)=u(k)+RT+u(k)$

IF  $e(k) \leq e^*$  then (2)과정

단,  $e(k)=SP-y(k)$

$e^*=0.01 \times SP$

$RT=1-(y(k) / SP)$

$u(k)$  : 입력값

$y(k)$  : 출력값

SP : 설정값

(2) 입력조절 Hysteresis 폭(h) 결정규칙

$$h = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(t-i) - \frac{1}{N+M} \sum_{i=1}^{N+M} y(t-T-i) \quad (4)$$

단,  $0.99 \times SP \leq Y(t-N) < 1.0 \times SP$

T : 프랜트의 시정수

(3) 입력조절 진폭(d) 결정규칙

$P_1=u+(u/2)$

$P_2=u-(u/2)$

단,  $P_1$  : 진폭의 최대값

$P_2$  : 진폭의 최소값

(4) 입력조절 동작점 선정규칙

IF  $y(k) \geq 0.98 \times SP$  then 입력조절 가동

(5) 발진 안정유무 결정규칙

2주기 동안의 각  $K_c, T_c$ 를 비교하여 안정유무 판별

IF  $|K_{c1}-K_{c2}| < 0.02 \times K_{c2}$  then 이득안정

IF  $|T_{c1}-T_{c2}| < 0.02 \times T_{c2}$  then 주기안정

IF 이득안정 and 주기안정 then 입력조절시험 안정

(6)임계이득 결정규칙

IF 이득안정 then  $K_c=(A \times d) / (a \times \pi)$

단, d : 입력조절 진폭

a : 출력신호 진폭

(7) 임계주기 결정규칙

IF 주기안정 then  $T_c=(2 \times \pi) / W$

3.2 감속 규칙

본 논문에서는 부하 토오크와 관성 모멘트가 같은 비율로 변화한다고 가정했다. 부하 토오크 변화에 따른 동조 간격의 설정은 제어 정밀도에 따라 다르므로 시행착오에 의해서 결정된다. 감속 규칙은 다음과 같다.

(1) 부하 토오크의 자료 수집규칙

$$T_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T(k-i) \quad (5)$$

(2) 부하 토오크 변화에 따른 정보규칙

IF  $T_1 \leq W_1$  then TB0 동조

IF  $W_1 < T_1 < W_2$  then (3)과정

IF  $W_2 \leq T_1 \leq W_3$  then TB1 동조

단,  $W_1=((TB_0+TB_1) \times a) / 2$

$W_2=((TB_0+TB_1) \times b) / 2$

$W_3=((TB_1+TB_2) \times a) / 2$

TB0 : 무부하 토오크

TB1=TB0+TB0× 토오크 증가율

a, b : 경계값 설정변수

(3) 부하 토오크의 동향분석  
 IF  $T1 - T2 > 0$  then TB0 동조  
 IF  $T1 - T2 < 0$  then TB1 동조  
 IF  $T1 - T2 = 0$  then (4)과정

(4) 경계치 값(W1, W2)내의 토오크 크기 분석  
 IF  $T1 < ((W1 + W2) \times C) / 2$  then TB0 동조  
 IF  $T1 \geq ((W1 + W2) \times C) / 2$  then TB1 동조  
 단, C : 경계값내의 동조구간 구분계수

3.3 동조 규칙

동조 규칙군에서는 감독 규칙군의 정보에 의하여 PID 제어 파라미터를 자동동조 시킨다. 직 (3)의 프래트는 목표값의 5.6[%]가 정상 오차로 발생하기 때문에 이에 대한 보상을 해주어야 한다. 보상값은 적분요소로서 실험결과 7.06으로 정하였다. 동조 규칙은 다음과 같다.

(1) 부하 토오크 변화에 따른 동조규칙  
 IF TBA 동조 then  $K_{PA} = K_{CA} \times 0.987$ ,  
 $K_{IA} = t_{CA} \times 0.5 + 7.06$ ,  $K_{DA} = t_{CA} \times 0.125$   
 단, A=0, 1, 2,...

IV. 시뮬레이션 및 결과 고찰

직류 서보 전동기의 무부하, 부하 토오크 200[%] 증가와 400[%] 증가시에 본 논문에서는 제시된 입력 조절 실험을 각각 수행하였다. 입력 조절 실험의 개괄적 흐름도는 그림 3과 같고, 입력 조절과 출력의 발진 형태는 그림 4와 같다.

무부하에서 입력조절 발진곡선은 그림 4 (a)와 같으며  $t_{co} = 0.056$ ,  $K_{co} = 18.47$ 의 값이 구해진다. 부하 토오크 200[%] 증가시에는  $t_{c1} = 0.084$ ,  $K_{c1} = 46.497$ 이 구해졌고 그림 4 (b)와 같으며, 400[%] 증가시에는  $t_{c2} = 0.099$ ,  $K_{c2} = 80.310$ 의 값이 구해졌고 그림 4 (c)와 같다. 이 결과들을 Ziegler Nichols의 임계값과 동조계수와의 관계식

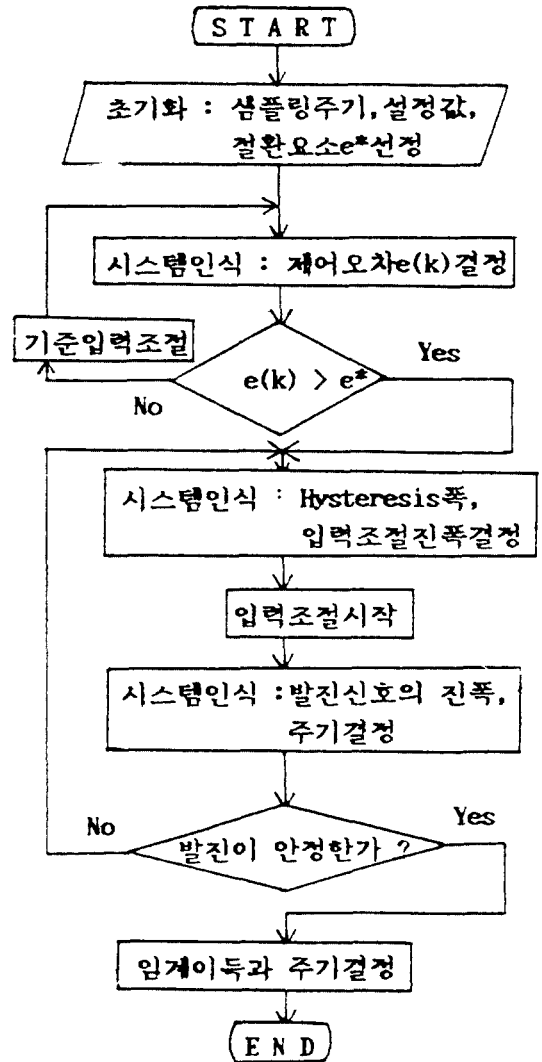
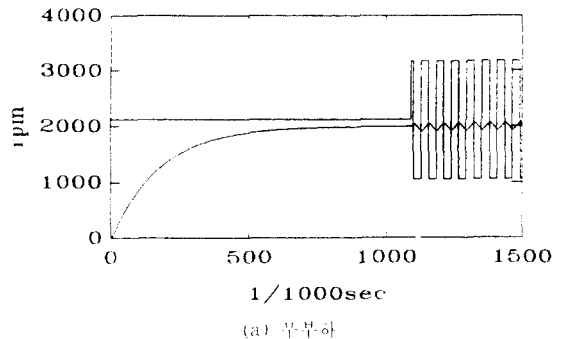


그림 3. 입력조절 실험의 흐름도  
 Fig. 3. Flow chart of Input regulation experiment



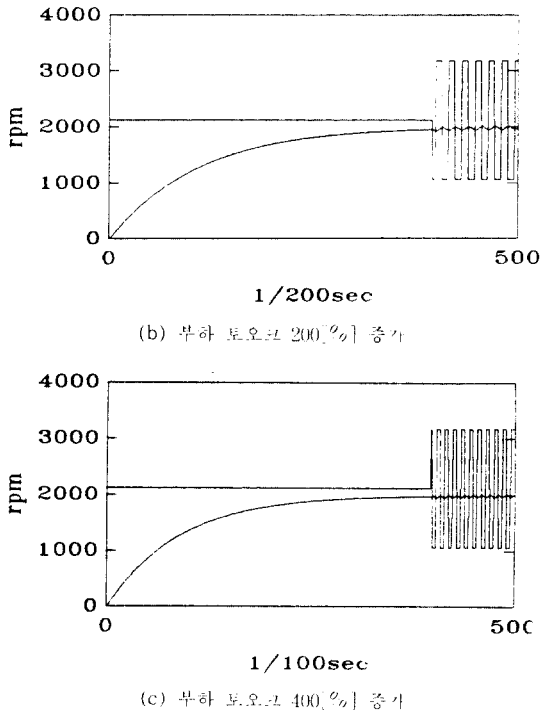


그림 4. 입력 조절시의 발진형태  
Fig. 4. Oscillation curve forms under Input regulation

( $K_p=0.6 \times K_c$ ,  $K_I=0.5 \times t_c$ ,  $K_D=0.125 \times t_c$ )을 사용한 것과 비교하여 보면 그림 5와 같다.

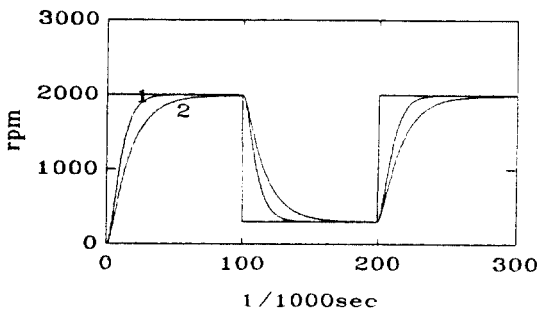


그림 5. 무부하에서 제시된 기법의 동조계수 사용(1)과 Ziegler-Nichols 동조 계수 사용(2)에 의한 응답곡선  
Fig. 5. Output signal by the turning use of presented method (1) and Ziegler-Nichols turning Parameter in no load

그림 6-(a)는 무부하 일때 무부하 파라미터 사용(1)과 200[%](2), 400[%] 부하 토크 증가 파라미터(3)를 각각 사용한 응답곡선이다. 그림 6-(b)(c)도 부하 토크가 200[%], 400[%] 증가일때 각각의 파라미터를 사용한 응답곡선이다.

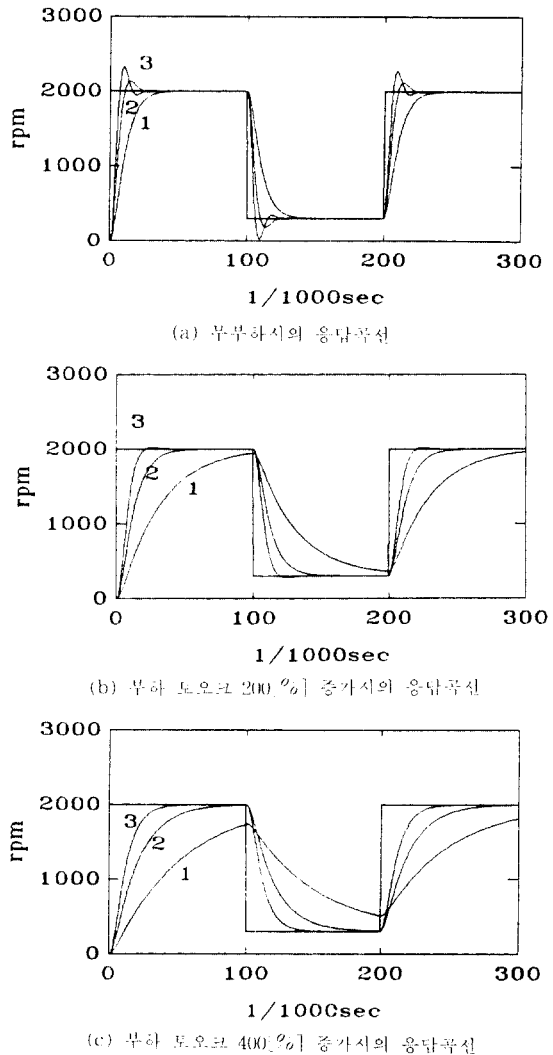


그림 6. 무부하(a), 200[%] 부하 토크(b), 400[%] 부하 토크(c)일 때 응답곡선(1,2,3은 각각 무부하, 200[%] 부하토크, 400[%] 부하토크의 파라미터가 사용되었음)

Fig. 6. Output Signal of no load(a), 200[%] load torque (b), 400[%] load torque (1,2,3 are used respective no load, 200[%] load torque, 400[%] load torque Parameter)

그림 5에서 보는 바와 같이 응답곡선 (1)은 (2)보다 빠른 응답을 보였고, (2)의 정상오차를 완전하게 제거 하였다.

그림 6-(a)에서는 증가된 부하 파라미터를 사용한 (2)와 (3)의 응답곡선은 과도 응답특성을 나타내고 있지만 (1)은 짧은 시간에 목표값에 부드럽게 도달하게 된다. 그림 6 (b)에서 (3)은 과도 응답특성, (1)은 응답시간이 너무 오래 걸리므로 (2)가 적합한 응답곡선이 된다.

그림 6-(c)에서 (1)과 (2)는 목표값에 도달하는 시간이 오래 소요되므로서 부하증가에 맞는 파라미터를 사용한 응답곡선(3)이 적합하게 된다. 그림에서 보듯이 부하가 증가하므로서 목표값에 도달하는 시간이 조금씩 길어지게 됨을 알 수 있다.

### V. 결 론

현대의 자동제어는 이론과 실제 응용에서 상당한 발전이 있었지만, 엔지니어의 경험적 지식은 제어 시스템에 미미한 영향을 미쳤다. 본 논문에서는 가변 부하일때 입력 조절 규칙의 실행에 의하여 PID 제어 파라미터를 구하고, 경험적 지식을 이용하여 부하에 맞는 동조계수를 자동동조시키는 전문가 자동동조 PID 제어기에 관하여 연구하였다. 이런 시도에 의하여 경험적 지식이 케루우즈 시스템의 일부분으로 대치되므로 제어 시스템이 새로운 능력을 보유하게 된다.

직류 서보전동기의 부하가 변화할때 부하에 맞는 제어 파라미터를 사용하여 정밀도와 건실성의 개선됨은 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 보였다.

### 參 考 文 獻

1. G. A. Dumount, C. Zervos and P.R. Belanger, "Automatic turning of Industrial Controllers", ACC, Boston, Vol.12, 1985.
2. Ceil L. Smith, Digital Computer Process Control, International Text book co, 1972.
3. Astrom, K.J., "Theory and Application of Adaptive Control a Survey", Automatica, Vol.19, No.5, PP. 4 71, 487, September, 1983.
4. Astrom, K.J. and T. Hagglund, "Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on phase and Amplitude margins", Automatica, Vol.20, pp. 6 45-651, 1985.
5. Astrom, K.J., Anton, J.J. and Arzen, K.E., "Expert control", Automatica, Vol.22, No.3, PP. 277-286, 19 86.
6. Arzen, K.E., "Expert Systems for process control", Proc. 1st Int. Conf. Appl of AI in Engng. Pract., Southampton, U.K., 1986.
7. 이강구의 2인, "경험적 규칙을 이용한 자동동조 PID 제어기", 전기학회 논문지, Vol.39, No.5, pp. 485 ~ 49 3, 1990.
8. K.Liu and J.Gertler, "A supervisory(expert) Adaptive Control scheme", IFAC 10th world conference on automatic control, 1987.



朴 曰 緒 (Wal Seo PARK) 正會員  
 1953年 5月 1日生  
 1982年 2月 : 圓光大學校 電氣工學科  
 卒業(工學士)  
 1985年 8月 : 朝鮮大學校 大學院 電子工  
 學科 卒業(工學碩士)  
 1988年 8月 ~ 現在 : 圓光大學校 大學院  
 電氣工學科 博士課程 再學中  
 ※ 關心分野 : 信號處理 度 人工智能