

# 직류 서보 전동기 제어의 강인성을 위한 전문가 관리 제어

(Expert Supervisory Control for Robustness of D.C. Servo Motor Control)

吳 勳\* · 朴曰緒\*\*  
(Hun Oh · Wal-Seo Park)

## 요 약

산업의 자동화에 따라 직류 서보 전동기는 강인한 제어가 요구된다. 하지만 전동기가 가변 부하나 외란의 영향을 받게 되면 시스템의 강인 제어가 어렵게 된다. 이에 대한 보완적인 한 방법으로 본 논문에서는 전동기 제어 시스템을 위한 전문가 관리 제어 기법을 제시하였다. 전문가 관리 제어기는 오차와 오차 변화분에 의해 설계되며,  $n$ 번째 제어 입력은  $(n-1)$ 번째 제어 입력과 증감분 추론량의 합에 의해 결정된다. 전문가 관리 제어기의 제어 입력은 입력 측에 전달되며, 외란영향은 제어 입력에 의하여 현저히 감소한다. 전문가 관리 제어를 이용한 직류 서보 전동기의 강인성을 시뮬레이션에 의해 확인하였다.

## Abstract

It is needed to robust control for D.C. servo motor according to industrial automation. However, when a motor has an effect of disturbance and variable load, it is very difficult to guarantee the robustness of the system. As a compensation way of solving this problem, in this paper, a expert supervisory control method for motor control system is presented. Expert supervisory controller is designed by error and error change, and  $n$ th control input is decided by the addition of  $(n-1)$ th control input and inference amount of increase or decrease. Control input of expert supervisory control is transmitted to input, and the disturbance effect decrease remarkable by control input. The robustness of D.C. servo motor using expert supervisory control is demonstrated by the computer simulation.

## I. 서론

산업의 자동화에 따라 직류 서보 전동기는 강

인하고 정밀한 제어가 요구된다. 근래에 보다 정교한 현대 제어 이론들이 개발되었음에도 산업현장의 전동기 제어에서는 PID 제어기가 널리 쓰이고 있다. 이는 구조가 간단하고 과도 응답 특성이 좋으며 정상 상태 오차를 제거할 수 있기 때문이다. 그러나 현장에 설치되어 있는 PID 제

\*正會員: 원광대학교 공과대학 전기공학과 박사과정.

\*\*正會員: 원광대학교 공과대학 전기공학과 전임강사.

接受日字: 1995年 6月 8日

여기는 시스템이 시변 특성인 경우에 수시로 제어기의 매개변수를 조정해야만 한다.<sup>4)</sup> 특히 제어기의 매개변수가 시스템 특성에 맞게 동조되었다 할지라도 외란인가시에는 설정값에서 크게 이탈하게 된다. 외란 인가시의 영향을 최소화하는 방법으로 적분 제한, 전향 제어기 등이 연구되고 있으나 외란 및 시스템의 정보가 정확하게 알려져야 제어기 설계가 가능하다.<sup>2)3)</sup>

최근에는 전문가의 경험적 지식을 제어 시스템에 효율적으로 반영하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 제어 시스템을 다층 구조로 하여 감독 기능을 갖도록 하였고, 기존 제어 시스템을 관리하는 관리 제어기가 제외되었다.<sup>4),5)</sup> 또한 제어 대상의 모델이 난이하고, 비선형성이 높은 시스템에 효과적인 제어 기법으로 알려진 퍼지 제어는 오차와 오차 변화분의 두 가지 변수를 가지고 경험적 지식에 의하여 제어기를 설계한다.<sup>6),7),8)</sup>

본 논문에서는 기본 제어 루프에 PID 제어기를 갖는 직류 서보 전동기 제어 시스템의 강인 제어를 위해서 전문가 관리 제어 기법을 제안한다. 전문가 관리 제어기는 오차와 오차 변화분에 의해 설계되며, n번째 제어 입력은(n-1)번째 제어 입력과 증가 또는 감소분의 추론량의 합에 의해 결정된다. 전동기 제어 시스템에서 제안된 제어 기법이 외란에 대한 강인함을 시뮬레이션에 의해서 확인할 것이다.

## 2. 시스템의 구성

전문가 관리 제어를 위한 시스템의 구조는 그림 1과 같은 형태를 취한다.

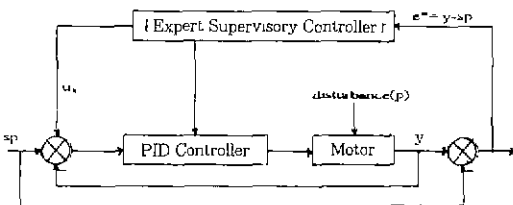


그림 1 전문가 관리 제어기를 갖는 시스템의 구성도  
Fig. 1 Block diagram of system with expert supervisory controller

그림 1에서 전동기와 PID 제어기( $K_p + K_i/s + K_d s$ )는 기본 제어 루프를 형성한다. PID 제어기의 매개변수는 단위 계단 응답법에 의해 결정하여 사용했으며, 전동기 특성의 변화에 따라 매개변수가 자동 동조되는 제어 구조를 선택했다. 자동 동조는 규칙 기반의 조건부에 의해 결론부의 매개변수가 동조하게 된다. 그러나 전동기의 특성이 변화하거나 외란 인가시에는 일정 시간 동안 과도응답 특성을 나타낸다. 그러므로 전동기 특성의 변화나 외란 인가시에는 동작자가 원하는 허용 오차값 이내로 유지하기는 어렵게 된다. 이러한 기본 제어 루프가 갖는 문제점을 보완하기 위해서 오차와 오차 변화량에 의해서 설계되는 전문가 관리 제어기를 제안하였다. 전문가 관리 제어기의 제어 입력은 입력 측에 전달되며, PID 제어기와 별개로 동작되지만 하나의 제어 세트에 사용하게 되면 PID 제어기의 단점을 충분히 보완할 수 있다. 전문가 관리 제어기는 감독 규칙과 제어 입력추론 규칙으로 구성되어진다.

직류 서보 전동기의 전달함수는 식(2.1)과 같이 쓸 수 있다.

$$G(s) = K_t / (J \cdot L_a \cdot s^2 + (J \cdot R_a + B \cdot L_a) \cdot s + (K_t \cdot K_b + B \cdot R_a)) \quad (2.1)$$

본 논문에서 사용된 직류 서보 전동기의 파라미터는 다음과 같다.

$J = 2.94 \times 10^{-3} [\text{kg} \cdot \text{m}]$  : 관성 모멘트

$L_a = 8.6 \times 10^{-3} [\text{H}]$  : 전기자 인덕턴스

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

$K_b = 60 \times 10^{-3} [\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}]$  : 역기전력 상수

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

$R_a = 3.2 [\Omega]$  : 전기자 저항

이상의 값을 식 (2.1)에 대입하면 식(2.2)와 같이 쓸 수 있다.

$$G(s) = 17 / (0.0253 s^2 + 9.4s + 1.02) \quad (2.2)$$

## 3. 전문가 관리 제어기의 설계

일반적으로 퍼지 제어 규칙은 조건부 변수로서 출력 오차  $e$ 와 1샘플링 기간 동안의  $e$ 의 변화분  $\Delta e$ , 그리고 결론부 변수로서 조작량  $u$ 의 변화분  $\Delta u$ 를 사용한다. 따라서 퍼지 제어기는 전문가의

많은 경험을 통해서  $e$ 와  $\Delta e$ 의 변화량을 이용하여  $\Delta u$ 를 결정하는 퍼지 제어 규칙을 만들게 된다.

본 논문에서는 오차의 크기 및 오차 변화분의 방향을 감독하는 감독 규칙과 수치 알고리즘을 규칙화한 제어 입력 추론 규칙에 의하여  $u_n$ 을 결정하고자 한다. 제안된 제어기법의 장점은 외란이나 시스템 정보가 알려져 있지 않더라도 제어기 설계가 가능하며, 외란을 허용 오차 이내로 유지할 수 있음을 보여준다.

### 3.1 감독 규칙

오차가 허용 범위 내에서 진행되고 있는가, 이탈했는가 또는 이탈로 진행 중인가를 감독한다.

오차가 허용 범위 내에서 진행중일 때에는 감독을 계속하고, 이탈했을 때에는 추론규칙으로 넘어가 제어 입력을 추론하게 된다. 이와 같은 감독규칙은 다음과 같다.

IF  $|\eta * e_0| \geq |e^*|$  THEN 감독규칙(3.1)  
 IF  $y > sp$  and  $|\eta * e_0| < |e^*| < |e_0|$  and  $\Delta e^* > 0$   
 THEN 추론규칙 (3.2)

IF  $y > sp$  and  $|\eta * e_0| < |e^*| < |e_0|$  and  $\Delta e^* < 0$   
 THEN 감독규칙 (3.3)

IF  $y > sp$  and  $|\eta * e_0| < |e^*| < |e_0|$  and  $\Delta e^* > 0$   
 THEN 감독규칙 (3.4)

IF  $y > sp$  and  $|\eta * e_0| < |e^*| < |e_0|$  and  $\Delta e^* < 0$   
 THEN 추론규칙 (3.5)

IF  $|e_0| \leq |e^*|$  THEN 추론규칙 (3.6)  
 단,

- $y$  : 시스템 출력
- $sp$  : 기준 입력
- $\eta$  : 허용 오차 유지 상수
- $\beta$  : 추론 종료 상수
- $e^* = y - sp$
- $\Delta e^* = e_n^* - e_{n-1}^*$
- $e_0$  : 허용 오차
- $u_n$  : 제어 입력
- $u$  : 초기 제어 입력

### 3.2 제어 입력 추론 규칙

추론규칙은 오차와 오차 변화분을 이용하여 제

어 입력  $u_n$ 를 추론한다. 제어 입력  $u_n$ 은  $(n-1)$ 번째의 제어 입력과 오차의 변화량에 의해 추론되는 제어 입력 변화량을 합함으로써 결정된다.

이는 다음과 같다.

$$e_n^* = y_n - sp_n \quad (3.7)$$

$$e_n = u_{n-1} - e_n^* \quad (3.8)$$

$$e_{n-1} = u_{n-2} - e_{n-1}^* \quad (3.9)$$

$$e_{n-2} = u_{n-3} - e_{n-2}^* \quad (3.10)$$

$$\Delta e_n = e_n - e_{n-1} \quad (3.11)$$

$$\Delta e_{n-1} = e_{n-1} - e_{n-2} \quad (3.12)$$

$$\Delta u = -e^* \quad (3.13)$$

$$\rho = \frac{\Delta e_r}{|\Delta e_{n-1}|} \quad (\text{단, } \rho = -1/0 = -1, \rho = 1/0 = 1) \quad (3.14)$$

$$\Delta u^* = |\Delta e_n| \quad (3.15)$$

$$u_n = u_{n-1} + \Delta u + \rho * \Delta u^* \quad (3.16)$$

$$\text{IF } u_n > \beta * u \text{ THEN 추론규칙} \quad (3.17)$$

$$\text{IF } u_n \leq \beta * u \text{ THEN 감독규칙} \quad (3.18)$$

전문가 관리 제어의 순서도는 그림 2와 같다.

## 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

기본 제어 루프의 PID 제어기의 매개변수는

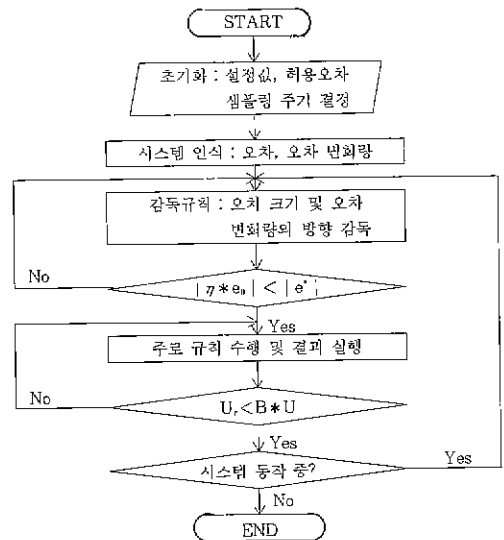
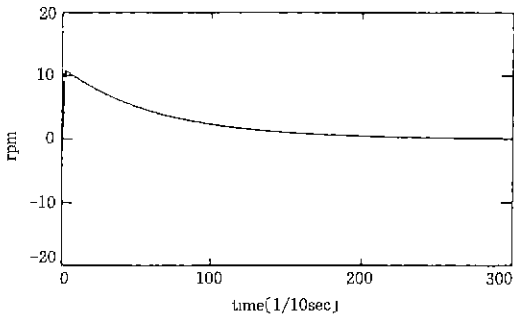
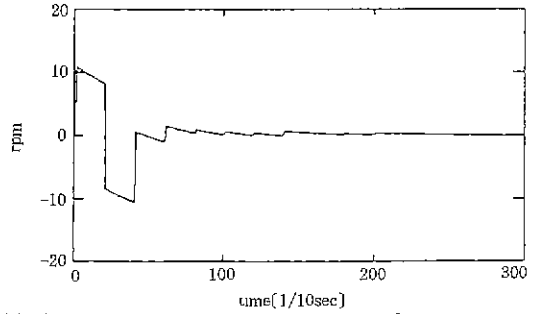


그림 2 전문가 관리 제어의 순서도

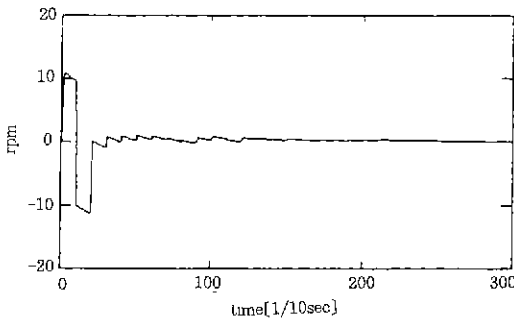
Fig. 2 Flow chart of expert supervisory control



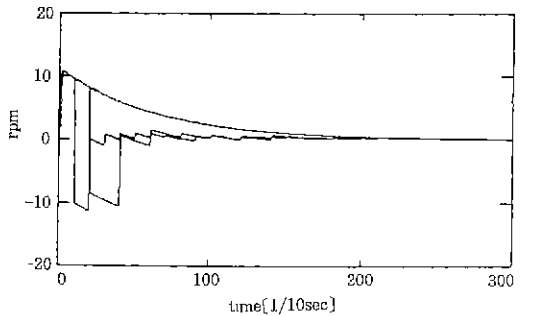
(a) PID 제어기를 갖는 궤환 제어



(b) 전문가 관리 제어기를 사용했을 경우(제어 입력 변환구간 2 초)



(c) 전문가 관리 제어를 사용했을 경우(제어입력 변환구간 1초)



(d) 각 방식에 따른 응답 곡선의 비교

그림 3 양의 500[rpm]계단식 외란에 대한 응답 곡선  
Fig. 3. Response curve to positive 500[rpm] step disturbance

입력 릴레이 실험에 의해 결정 ( $K_p=45$ ,  $K_i=7$ ,  $K_0=0.01$ )해서 사용했다. 또한 허용 오차 유지 상수  $\eta=0.7$ , 추론 종료 상수  $\beta$ 는 0.005를 선택하여 사용했다. 전문가 관리 제어기에 대한 외란의 영향을 고찰하기 위하여 500rpm의 계단 함수를 외란으로 인가하였다.

그림 3은 양(positive)의 외란에 대한 응답 곡선이고, 그림 4는 음(negative)의 외란에 대한 응답 곡선이다.

그림 3 (a)는 PID 제어기를 갖는 궤환 제어의 경우이다. 외란의 영향은 최대치로 보면 인가 외란의 2.2[%]로 감소했고, 20초의 시간이 경과한 후에 소멸된다.

그림 3 (b), (c)는 전문가 관리 제어기를 사용하여 제어 입력 변환 구간을 각각 2초, 1초로 했을 경우의 응답 곡선이다. 그림 3 (b)에서 알 수 있듯이 외란의 최대치로 보면 PID 제어기를 갖는 궤환 제어와 같으나, 약 4초 후에 소멸된

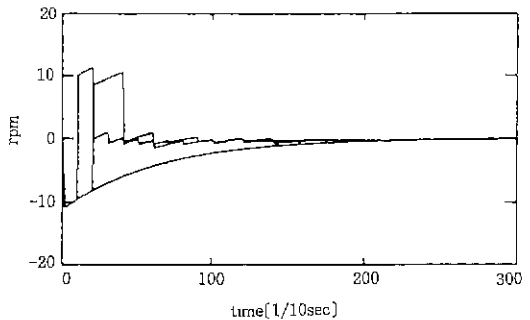


그림 4 음의 500[rpm]계단식 외란에 대한 응답 곡선  
Fig. 4 Response curve to negative 500[rpm] step disturbance

다. 즉, PID 궤환 제어시보다 외란 영향의 시간이 20[%]로 감소됨을 알 수 있다. 그림 3-(c)의 출력 응답 곡선은 외란의 최대치는 같으나 약 2초 후에 소멸된다고 볼 수 있다. 여기에서도 외란 영향의 시간 PID제어시보다 10[%]로 감소한다.

각 방식에 따른 비교 응답 곡선은 그림 3(d)와 같다. 그림 4는 음의 단위 계단 함수를 외란으로 사용한 경우의 응답 곡선이다. 실험 결과는 그림 3과 같게 된다.

그림 3, 4에 보이는 것처럼, 초기에 외란 영향의 급격한 변화 때문에 외란의 최대치를 줄일 수 없었으나 전문가 관리 제어를 도입함으로써 PID 제어기만을 사용했을 때보다 외란의 영향을 현저히 감소시킬 수 있다.

따라서 적당한 제어 입력 변환 구간을 선택하면 외란이 증가하더라도 서보 제어 목적을 달성할 수 있으리라 사료된다.

## 5. 결론

산업 현장에서 전동기 제어는 많은 자동화 설비에 사용되고 있는데, 외란 및 시스템이 시변 특성을 갖는 경우 강인 제어는 어렵게 된다.

본 논문에서는 직류 서보 전동기 제어 시스템의 강인 제어를 위하여 전문가 관리 제어 기법을 제안하였다. 전문가 관리 제어기는 오차와 오차 변화분에 의해 설계된다. 전문가 관리 제어기에 대한 외란의 영향을 고찰하기 위하여 임의의 양 및 음의 500[rpm]계단함수를 외란으로 인가하였다. PID 제어기를 갖는 기본 제어 루프에서의 외란은 20초 후에 소멸되었지만, 전문가 관리 제어를 도입함으로써 외란은 약 2초후에 소멸된다. 이와 같이 두 변수의 정보에 의해 시스템에

인가되는 외란의 영향을 현저히 감소시킬 수 있음을 알았다.

제안된 제어 기법은 외란이 문제가 되고 시스템의 특성이 시변인 직류 서보 전동기의 실시간 제어에 사용될 수 있으리라 사료된다.

## 참고 문헌

- 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) C. A. Smith and A. B. Corripio, "Principles and practice of Automatic process control", Wiley-Interscience, 1985.
- 3) R. Scattolini, "A multivariable self-tuning controller with integral action", Automatica, Vol 22, pp.619-627, 1986.
- 4) K. Lim and J. Gertler, "An intelligent adaptive scheme for biomedical control", IFAC 10th world conference on Automatic control, 1987
- 5) L. X. Wang, "A supervisory controller for fuzzy control system that guarantees stability", IEEE Transaction on automatic control, Vol.39, No.9, pp 1845~1847, september, 1994.
- 6) J. A. Bernard, "Use of a rule-based system for process control", IEEE control systems magazine, pp 3~13, October, 1988
- 7) C. C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic control-part I, II", IEEE Trans, Syst, Man Cybern, Vol SMC-20, No 2, pp 404~432, 1990.
- 8) Y. F. Li and C. C. Lau, "Development of fuzzy algorithms for servo system", IEEE control system magazine, pp 65~71, April, 1989

## ◆ 著 者 紹 介 ◆



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). 現在 同大學院 電氣工學科 博士課程.



박 왈 서(朴日緒)

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 電子工學科 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 專任講師.