

전문가 제어를 이용한 직류 전동기의 강인 제어

조현섭, 오 훈, 전정채, 유인호

*청운대학교 전자공학과, 원광대학교 전기공학과, 익산대학 전기과

Robust speed control of DC motor using Expert Hybrid controller

Hyeon-Seob Cho*, Hun Oh, Jeong-Chay Jeon, Ryu-In Ho
Chungwon University, Wonkwang University, Iksan National College

Abstract - Robust control for DC motor is needed according to the highest precision of industrial automation. However, when a motor control system with PID controller has an effect of load disturbance, it is very difficult to guarantee the robustness of control system.

In this paper, PID-Expert hybrid control method for motor control system as a compensation method solving this problem is presented. If PID control system is stable, the Expert controller is idle. if the error hits the boundary of the constraint, the Expert controller begins operation to force the error back to the constraint set. The disturbance effect decrease remarkably, robust speed control of DC motor using PID-Expert Hybrid controller is demonstrated by the simulation.

1. 서 론

산업자동화의 고정밀도에 따라 직류 서보 전동기는 강인하고 정밀한 제어가 요구된다. 이러한 요구에 부응하여 정교한 현대 제어이론들이 개발되었음에도 불구하고 산업현장에는 PID제어기가 널리 쓰이고 있다.[1,2] 이는 구조가 간단하고 과도 응답특성이 좋으며 정상상태 오차를 제거할 수 있기 때문이다.[3] 하지만 PID제어기를 사용한 폐환제어 시스템에서 부하외란이 인가되면 출력은 설정값에서 이탈하게 된다. 그러므로 부하 외란이 인가되더라도 정밀한 제어가 요구될 때에는 이탈정도를 최소화시킬 수 있는 제어 기법의 적용이 필요하다.[4,5] 이와 같은 기능의 제어기법으로 Smith(6)는 진 지상 필터 형태의 전향 제어기를 제안하였고, Johnson(7)은 적분 폐환 제어기를 사용하였다. 또 Sternad(8)는 적분 전향 제어기를 제안하였다. 근래에 부하 외란 효과의 최소화를 위해서 전문가 및 신경망 제어기법이 도입되었고(9,10), 퍼지 제어시스템을 위한 관리제어기를 Wang이 제안하였다.[11] 전문가 제어는 전문가의 경험적 지식을 제어 시스템에 효율적으로 반영하기 위한 연구로써 좁은 범위의 제어 문제를 해결하는데 우수한 것으로 알려져 있다.[2] 본 논문에서는 폐환 제어루프에 PID제어기를 갖는 직류전동기의 강인 제어를 위해서 PID-전문가 복합형 제어기를 제안하였다. 전문가 제어기의 출력 크기는 3항으로 구성된다. 첫 번째 항은 전향 제어입력이며, 둘째 항은 오차의 크기 그리고 마지막 항은 오차 변화 예상량의 추론 분이다. 시스템이 안정한 상태에 있으면 PID제어기만 동작하게 되며, 오차발생 시에 전문가 제어기가 동작하여 외란의 영향을 최소화시키는 역할을 하게 된다. PID-전문가 복합형 제어기의 외란에 대한 강인성은 시뮬레이션에 의하여 확인하였다.

2. 시스템의 구성

PID-전문가 복합형 제어기를 갖는 제어 시스템의 구성

도는 그림1과 같은 형태이다.

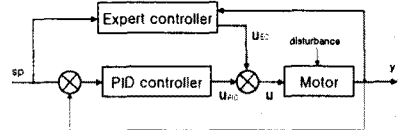


그림 1 PID-전문가 복합형 제어기를 갖는 시스템 구성도
fig. 1. Block diagram of system with PID-Expert Hybrid controller.

그림 1에서 전동기와 PID제어기 ($K_p + K_i/s + K_d s$)는 기본 제어 루프를 형성한다. 이러한 폐환 제어의 경우에서 시스템 특성에 맞는 제어 매개변수가 사용된다면, 설정값(sp)에 오버슈트 없이 빠른 시간 내에 도달하게 되고 외란에도 강인한 편이다. 그러나 외란의 강인성에도 불구하고, 외란 인가 시에 시스템 출력은 일정 시간동안 과도 응답 특성을 나타낸다. 따라서 외란 인가 시에 동작자가 원하는 허용오차 값 이내로 유지하기는 어렵게 된다. 이러한 폐환제어 루프의 문제점을 보완하기 위해서 PID-전문가 복합제어기를 제안하였다. 전문가 제어기는 PID제어기와 별개로 동작되지만, 하나의 복합제어기로 사용하게 되면 PID제어기의 단점을 충분히 보완할 수 있다. 전문가 제어기는 제어 입력 추론규칙으로 구성되어진다. 타여자·전기자 제어용 직류전동기의 전달함수는 식(2.1)과 같이 쓸 수 있다.

$$G(s) = K_t / [J \cdot L_a \cdot s^2 + (J \cdot R_a + B \cdot L_a) s + (K_t \cdot K_b + B \cdot R_a)] \tag{2.1}$$

본 논문에서 사용된 직류전동기의 매개변수는 다음과 같다.

- $J = 3.4 \times 10^{-4} [kgf \cdot cm \cdot sec^2]$: 관성모멘트
- $L_a = 0.89 [mH]$: 전기자 인덕턴스
- $K_t = 2.27 [kgf \cdot cm/A]$: 토크 상수
- $K_b = 23.33 [V/Krpm]$: 유기전압상수
- $B = 0.75 [kgf \cdot cm]$: 마찰토크
- $R_a = 1.2 [\Omega]$: 전기자저항

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

$$G(s) = \frac{222.48}{0.003s^2 + 4.145s + 137.63} \tag{2.2}$$

3. PID-전문가 복합제어기의 설계

PID-전문가 복합형 제어기의 제어입력(u)은 그림 1에서 알 수 있듯이 식(3.1)로 쓸 수 있다.

$$u = u_{PID} + u_{EC} \tag{3.1}$$

여기서 u_{PID} 는 PID제어기의 출력이고, u_{EC} 는 전문가 제어기의 출력이다. PID폐환 제어시스템이 오차가 없는

안정한 상태에 있으면 전문가 제어기는 사용되지 않는다. 만약 외란등의 원인에 의해서 오차가 발생하게 되면, 전문가 제어기는 외란의 영향을 최소화시킬 수 있도록 출력을 발생한다. 전문가 제어기의 출력 크기는 전항의 제어입력, 오차의 크기, 오차 변화의 예상량으로서 구성된다. PID(Proportion-Integral-Derivative)제어기의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$u_{nd} = k[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (3.2)$$

$$= e[K_P + K_I \frac{1}{S} + K_D S] \quad (3.3)$$

u_{nd} : PID 제어변수

e : 제어오차 ($e = sp - y$)

sp : 설정값

y : 출력값

T_i : 적분시간

T_D : 미분시간

K_P : 비례이득

K_I : 적분이득

K_D : 미분이득

비례제어작용은 오차에 비례이득이 곱해지는 작용을 함으로써 상승시간을 줄일 수 있으나 이득이 크면 오버슈트가 발생한다. 또한 비례이득만으로는 정상상태 오차를 없앨 수 없다. 적분제어 변수는 오차를 적분하고 적분이득을 곱한 것이 사용됨으로 정상상태 오차를 없앤다. 미분제어는 오차 곡선의 미분 값에 미분이득을 곱하여 사용하고, 계환 루프의 안정성을 개선하는데 사용된다. PID제어기의 성능은 시스템 특성에 맞는 비례, 적분, 미분 이득의 매개변수를 어떻게 결정하느냐에 달려 있다. 본 연구에서 사용된 PID제어기의 매개변수의 결정은 계단응답법(step response method)을 사용하였다. (3.12)

($K_p = 0.0084, K_I = 6.82, K_D = 0.000034$)

이와 같이 시스템 특성에 맞게 선정된 매개변수를 사용하면 외란이 없는 한 안정한 상태에서 동작한다. 하지만 외란이 인가된 제어시스템은 오차가 발생하게 되고 일정 시간동안 과도 특성이 나타나게 되는데, 이러한 현상은 PID제어기만으로는 해결할 수 없다. 본 연구에서는 이런 문제점을 해결하기 위하여 PID-전문가 복합제어기를 제안하게 되었다. 계환 제어시스템이 안정한 상태에 있다면 전문가 제어기는 사용되지 않고 오차 발생 시에만 동작하게 된다. 제안된 제어기는 오차를 감독하는 감독 규칙과 추론 규칙으로 구성된다. 감독 규칙은 동작 초기의 발생 오차와 정상 동작시의 오차를 인식하게 된다. 동작 초기의 발생오차는 전원 투입 후 정상 속도 도달 시까지의 오차를 의미한다. 정상 동작시의 오차는 정상 운전 중 외란의 영향에 의하여 발생하는 오차를 말한다. 추론 규칙은 정상 동작시에 오차가 발생하였을 때 전문가가 제어입력을 결정하기 위한 규칙들로 구성된다. 그림 2는 이러한 감독 및 추론 규칙등의 흐름도를 나타내며, 제어규칙은 다음과 같다.

① 초기 오차 감독 규칙

- IF $e > 0$ and $\dot{e} > 0$ then 감독 규칙
- IF $e > 0$ and $\dot{e} < 0$ then 감독 규칙
- IF $e < 0$ and $\dot{e} > 0$ then 감독 규칙
- IF $e < 0$ and $\dot{e} < 0$ then 감독 규칙
- IF $e = 0$ and $\dot{e} < 0$ then 감독 규칙

② 정상 운전 감독 규칙

- IF $e = 0$ and $\dot{e} = 0$ then 감독 규칙
- IF $e > 0$ and $\dot{e} > 0$ then 추론 규칙
- IF $e > 0$ and $\dot{e} < 0$ then 추론 규칙

IF $e < 0$ and $\dot{e} > 0$ then 추론 규칙
 IF $e < 0$ and $\dot{e} < 0$ then 추론 규칙

③ 제어 입력 추론 규칙

$$u_{ECn} = u_{EC(n-1)} + e + T_s \frac{de_n}{dt} \quad (3.4)$$

u_{ECn} : n번째 전문가가 제어 출력

$u_{EC(n-1)}$: n-1 번째 전문가 제어 출력

T_s : iteration 의 크기

즉, 정상운전시 오차가 발생하게 되면 식(3.4)에 의하여 전문가 제어기의 출력이 발생하게 된다. 첫 번째 항은 전항 제어 입력의 크기이고, 두 번째 항은 전항 제어 입력의 크기가 적절하지 못해서 발생한 오차로써 이를 보정하는 의미에서 사용된다. 세 번째 항은 오차곡선을 미분하여 다음에 발생할 오차의 크기를 추정하는 항이다. 제안된 제어 알고리즘은 간단하게 표기되지만 강력한 툴(tool)로써 사용됨을 보이고자 한다.

4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

제안된 제어시스템의 유용성을 살펴보기 위하여 직류전동기가 3000rpm으로 회전하고 있을 때 부하외란 (L_d)을 인가하여 보았다. 부하외란의 크기는 다음과 같다.

(a) $L_d = 1000$, (b) $L_d = -1000$

(c) $L_d = 500$, (d) $L_d = -500$

그림 3에서 부하외란의 크기에 따른 PID제어기와 PID-전문가 복합형 제어기의 출력을 비교하

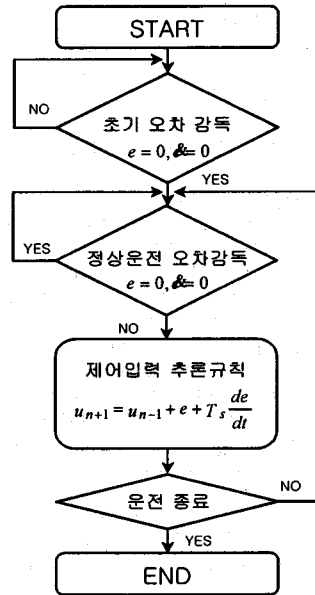
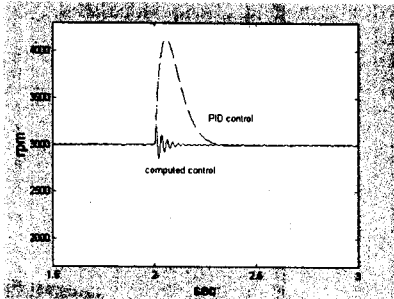


그림 2. 감독 및 추론 규칙 흐름도
 Fig. 2. the flow-chart of supervisory and inference rule

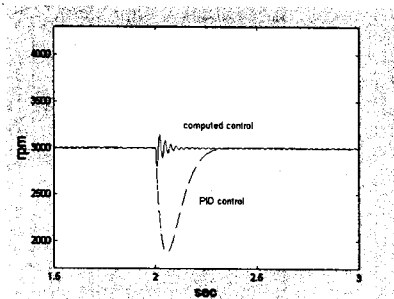
었다. 그림 (a)와 (b)는 $|L_d| = 1000$ 을 인가한 경우로써 PID제어기 출력의 최대 오차는 대략 1132rpm이며 제안된 제어기출력의 최대 오차는 199 rpm으로 약 82%가 감소하였다.

또한, 정상상태 도달 속도는 0.4초에서 0.2초로 50% 정도 줄어들었음을 알수 있다. 그림 (c)와 (d)는 $|L_d| = 500$ 을 인가하였을 때 각 제어기의 출력오차가 566 rpm에서 99.6 rpm으로 변화하여 위의 경우와 동일한

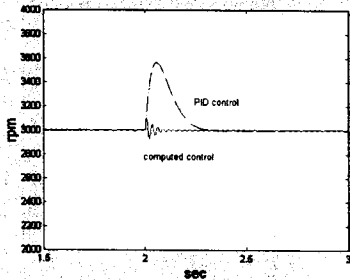
비율로 감소하였으며, 정상상태 도달 속도도 동일한 효과를 보인다. 따라서, 그림 3에서 보여준 바와 같이 PID제어기가 단독으로 사용된 것보다 PID와 전문가 제어기를 복합으로 사용함으로써 제어 성능을 상당히 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.



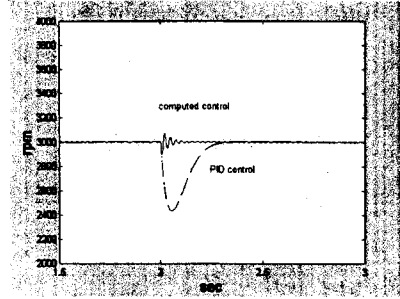
(a) $L_d = 1000$



(b) $L_d = -1000$



(c) $L_d = 500$



(d) $L_d = -500$

그림 3. 각 부하변화에 따른 출력곡선의 비교
fig. 3. the comparison of output curve according to the load variance

5. 결 론

본 논문에서는 정밀 제어가 요구되는 자동화 공정에서 비선형 특성으로 인한 제어의 문제를 개선하여 강인한 제어 성능을 보장할 수 있도록 PID-전문가 복합형 제어기를 제안하였다.

특정부분에 대한 전문가의 지식을 기반으로 하여 오차의 범위에 다른 적절한 제어값을 보상함으로써 정상상태 도달시간과 오차의 범위를 효과적으로 제한하였고, 그림 3에서 볼 수 있듯이 부하의 변화에 대한 특성에 있어서 매우 강인함을 보인다. 제안된 제어기의 성능은 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] L. X. Wang, A course in Fuzzy systems and control, Prentice-Hall, 1997.
- [2] L. R. Medsker, Hybrid Neural network and Expert system, Kluwer Academic Publisher, 1994.
- [3] K. J. Åström and T. Hägglund, "Automatic Tuning of PID Controllers", Instrument society of America, 1988.
- [4] J. K. Slotine and W. Li, Applied Nonlinear control, Prentice-Hall, 1991.
- [5] L. X. Wang, Adaptive Fuzzy Systems and control, Prentice-Hall, 1994.
- [6] C. A. Smith and A. B. Corripio, Principles and Practice of automatic process control, Wiley-Interscience, 1985.
- [7] C. D. Johnson, "Disturbance-accommodating control ; an overview", proc. ACC, pp. 526-536, 1986.
- [8] M. Stenad, Optimal and Adaptive feed-forward Regulators.
- [9] 박월서, 전정재, "PID-신경망 복합형 제어기를 이용한 적류 서보 전동기의 강인한 속도제어", Journal of KIEE, Vol. 12, NO. 1, pp.111~116, February 1998.
- [10] 박월서, 오훈, "적류 서보 전동기의 강인성을 위한 전문가 관리 제어", Journal of KIEE, Vol. 6, pp 78~82, December 1995.
- [11] L. X. Wang, "A Supervisory controller for Fuzzy control system that guarantee stability", IEEE Transaction on automatic control, Vol. 39, No.9, September 1994.
- [12] 박월서, 오훈, "적류 서보 전동기의 속도제어를 위한 규칙기반 자동동조 PI 제어기에 관한 연구", Journal of KIEE, Vol. 11, No.2, pp.89~93, 1997.