

# 궤환 제어시스템의 강인성 증진을 위한 미분 관리제어기

論文

52B-8-1

## A Differential Supervisory Controller for Robustness Increase of Feedback Control System

朴 曰 緒\*  
(Wal-Seo Park)

**Abstract** - Robust control for feedback control system is needed according to the highest precision of industrial automation. However, when a feedback control system has an effect of disturbance, it is very difficult to guarantee the robustness of control system. As a compensation method solving this problem, in this paper, Hybrid control method of feedback and Differential Supervisory controller is presented.

A Feedback Controller is operated as a main controller, A Differential Supervisory Controller is a controller which operates only when some undesirable phenomena occur, e. g., when the error hits the boundary of constraint set.

The robust control function of Differential Supervisory Controller, as a assistant controller is operated when state is unstable by disturbance, it demonstrated by speed control of motor.

**Key Words** : Servo Control, Robust Control, Differential Supervisory Controller

### 1. 서 론

산업 자동화의 고정밀도에 따라서 궤환 제어시스템은 강인하고 정밀한 제어가 요구되고 있다. 궤환 제어시스템의 특징 개선을 위한 방법으로는 주 제어기에 의한 궤환 제어시스템의 특성개선에 대한 연구와 보조제어기에 의한 부가적 특성개선에 관한 연구가 되어지고 있다.

궤환 제어기로는 퍼지, 신경망 등 근래에 새로운 이론들이 많이 개발되었고 또한 연구가 진행되고 있다[1][2][3]. 하지만 문헌이나 논문 등에서 살펴보면 아직도 PID제어기가 산업현장에서 많이 사용되어지고 있음을 알 수 있다[4].

PID제어기는 구조가 간단하고 과도 응답특성이 좋으며, 정상상태 오차를 제거할 수 있기 때문이다.

외란이 인가될 때에는 퍼지, 신경망, PID제어기 등 어떤 제어기를 사용하여도 일정시간동안 과도현상이 나타나게 된다. 따라서 외란의 영향을 최소화시키는 보조적인 방법이 필요로 하다[5][6].

외란 인가 시에 영향을 최소화하는 방법으로 진·지상필터, 적분궤환, 전향제어기 등이 연구되었으나 외란 및 공정의 정보가 알려져 있어야 제어기 설계가 가능하다. 또한 퍼지, 신경망 등을 이용한 보조적 제어기가 연구되었다.

본 논문에서는 궤환 제어시스템의 강인성을 증진시키기 위한 보조적인 제어기로서 미분 관리제어기를 제안하였다.

궤환시스템의 주 제어기는 산업현장에서 가장 많이 사용하는 PID제어기를 사용하였고, 외란에 의한 불안정한 상태에서 미분 관리제어기가 보조적인 동작을 하도록 하였다.

미분 관리제어기의 강인성은 직류 및 유도 전동기의 속도 제어에 의해서 확인하였다.

### 2. 미분관리제어기의 설계

시스템은 다음과 같은 미분방정식에 의해 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}^{(n)} = f(X) + gu \quad (1)$$

여기서,  $x^{(n)}$ 은  $x$ 의  $n$ 차 미분을 나타내고,  $f(X)$ 는 함수를 나타내며,  $x$ 는 시스템 출력이다.  $g$ 는 이득,  $u$ 는 제어 입력,  $X = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T$ 는 상태벡터를 나타낸다. 궤환 제어시스템의 전체적인 안정성은 주 제어기  $u_p$ 에 의해서 유지되고 있다. 외란 인가 시에 주 제어기에 의해서 외란의 영향을 억제하고 있지만 일정시간동안 과도현상이 나타난다. 관리제어기는 이러한 외란의 영향을 감소시켜서 오차를 최소화 하는데 목적이 있다.  $X_d$ 가 원하는 궤적이라면 오차벡터는  $X_e = X - X_d$ 로 나타낸다.

우리는 미분 관리제어기의 설계에 목적이 있으므로, 궤환 제어시스템에 사용되는 주제어기에 의한 제어입력  $u_p$ 는 설계되었다고 가정한다. 미분 관리제어기는 추적오차  $|x_e|$ 가 오차 경계영역 ( $M_x$ )에 도달되면 동작하게 되며, 제어법칙은 다음과 같다.

\* 正 會 員 : 圓光大學校 工科學部 電氣電子 및 情報工學部  
副教授·工學博士

接受日字 : 2003年 2月 7日

最終完了 : 2003年 7月 3日

$$u = u_p(x) + \Gamma^* u_s(x) \quad (2)$$

여기서  $|x_e| \geq M_x$  일 때  $\Gamma^* = 1$  이 되며, 만약  $|x_e| \leq M_x$  일 때에는  $\Gamma^* = 0$  이 된다.

우리는 미분 관리제어기를 설계하기 전에 벡터 형태로서 페루프 시스템을 표현하는 것이 필요하기 때문에  $u^*$  을 다음과 같이 정의한다.

$$u' = \frac{1}{g} [-f(X) + x_d^{(n)} - k^T X_e] \quad (3)$$

여기서 이득  $k = [k_1, k_2, \dots, k_n]^T$  는 홀비쯔(Hurwitz)다항식  $h(s) = S^{(n)} + k_n S^{(n-1)} + \dots + k_1$  에 의해 선택한다. 식(2)을 식(1)에 대입하면 다음식과 같다.

$$\dot{x}^{(n)} = f(X) + g(u_p + \Gamma^* u_s) \quad (4)$$

식(4)의 양변을  $gu^*$  로 감하면 식(5)와 같은 오차방정식을 얻는다.

$$\dot{x}_e^{(n)} = -k^T X_e + g(u_p + u_s - u^*) \quad (5)$$

식(5)을 벡터형태로 쓰면 식(6)과 같다.

$$\dot{x}_e = \Lambda X_e + b(u_p + \Gamma^* u_s - u^*) \quad (6)$$

여기서  $\Lambda$  와  $b$  는 다음과 같다.

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -k_1 & -k_2 & -k_3 & \dots & -k_n \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (7)$$

이제 추적오차가 오차 경계영역에 도달하면서 미분 관리제어기가 동작하여 시스템이 안정을 유지하면서 오차가 축소되도록 설계해야 되므로 다음과 같은 Lyapunov함수를 정의한다.

$$V = \frac{1}{2} X_e^T P X_e \quad (8)$$

여기서  $P$  는 대칭정치행렬로서 다음과 같은 Lyapunov 방정식을 만족한다.

$$\Lambda^T P + P \Lambda = -Q \quad (9)$$

$Q$  는 제어기 설계자에 의해 선택되는 정치행렬이다. Lyapunov함수를 미분하면 다음식과 같다.

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} X_e^T Q X_e + X_e^T P b (u_p + \Gamma^* u_s - u^*) \quad (10)$$

여기서 제어기  $u_p = u^*$  라고 가정하면,  $u_s$  을 다음과 같이 선택함으로써 식(10)의 우변은 항상 음(-)이 된다.

$$u_s = -I \operatorname{sgn}(X_e^T P b) \left\{ \left| u_n = u_{n-1} + \frac{T_D}{\Delta t} (e_n - e_{n-1}) \right| \right\} \quad (11)$$

여기서

$$e_n = u_{n-1} + x_{e(n)}$$

$$e_{n-1} = u_{n-2} + x_{e(n-1)}$$

$T_D$  : 미분계수

식(11)은 본 논문에서 제안한 미분 관리제어기로서, 정상 상태에 도달한 다음 오차가 발생하여 허용오차 경계영역을 이탈하게 되면 동작을 시작하게 된다. 시정수가 작은 경우에는 작은 효과를 나타내지만, 시정수가 큰 경우에는 매우 큰 효과를 나타낸다.

본 논문에서 미분 관리제어기의 강인성은 직류 및 유도전동기를 사용하여 확인하였다.

### 3. 미분 관리제어기의 실험 및 고찰

우리는 이 절에서 미분 관리제어기를 갖는 PID 궤환 제어시스템을 사용하여 전동기의 속도제어에 적용하고자 한다. PID제어기는 외란에 대하여 강인성이 있는 것으로 알려져 있지만, 일정시간 동안 외란이 지속된다. 이와 같은 외란을 최소화시키기 위해서 본 논문에서 미분 관리제어기를 제안하였다.

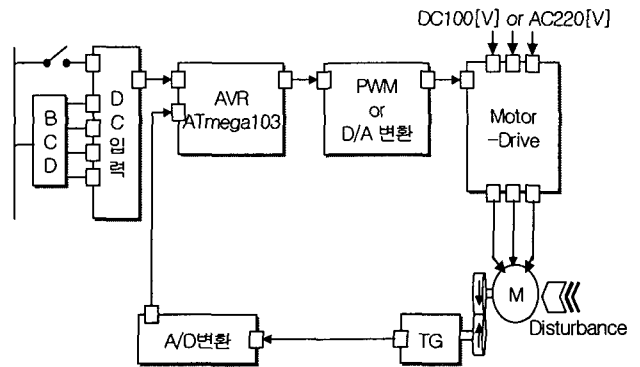


그림 1 제어시스템의 블록선도  
Fig. 1 A Block diagram of control system.

제어기의 대상체로는 직류 전동기(LG; FMO-E10EA)와 3상 유도전동기(LG; KMI 400k1)를 사용하였다. 마이크로프로세서는 AVR(ATMEL; ATmega 103)을 사용하였으며, 데이터 샘플링시간은 10[ms] 로 설정하였고, 직류 및 유도전동기의 설정속도는 900[rpm] 이며, 외란은 설정값의 20[%]와 30[%] 을 이탈하는 계단형의 외란을 사용하였다. PID제어기는 이미 설계되어졌고, 미분 관리제어기의 설계를

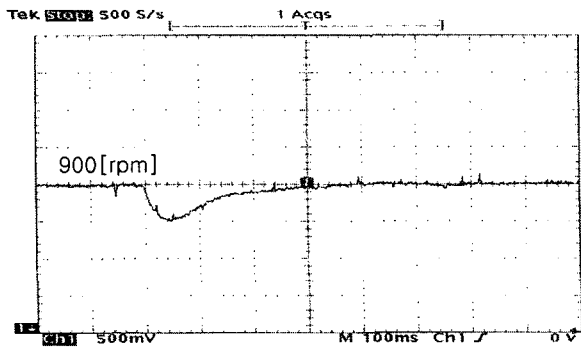
위 해서  $g=1$ ,  $T_D=Δt$ ,  $k_1=1$ ,  $k_2=2$ ,  $Q=diag[10,10]$   
 $M_x=1.5[\%]$ 을 선택하였고, 결과적으로  $P$ 는 다음과 같다.

$$P = \begin{bmatrix} 15 & 5 \\ 5 & 5 \end{bmatrix} \quad (12)$$

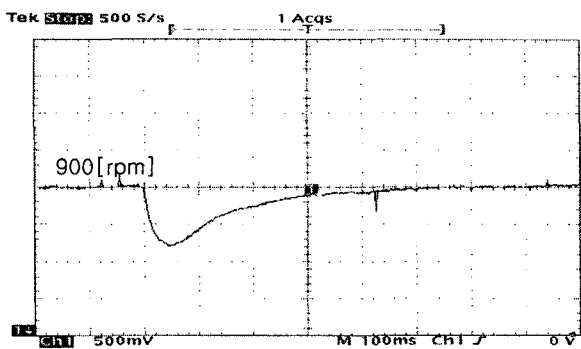
이와 같이 설계된 미분 관리제어기의 성능을 실험하기 위한 실험장치 구성도는 그림 1과 같다.

### 3. 1 직류 전동기에 대한 적용

그림 2의 (a)와 (b)는 PID제어기만 사용했을 때의 응답곡선이다. 그림 2의 (a)에서 최대이탈은 설정값의 20[%] 정도였으며 이탈지속시간은 300[ms] 정도이고, 그림 2의 (b)에서는 30[%] 정도의 이탈과 400[ms] 정도의 지속시간을 가진다.



(a) 20[%]의 외란

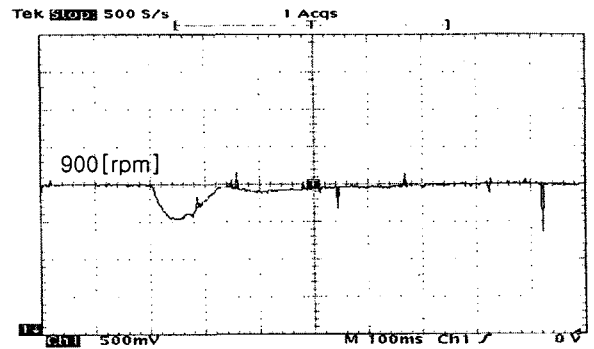


(b) 30[%]의 외란

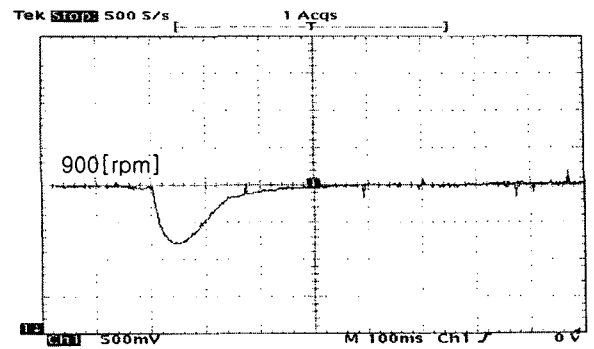
그림 2 PID제어기에 의한 직류 전동기의 응답곡선

Fig. 2 Response curve of DC motor by means of PID controller

그림 3의 (a)와 (b)는 PID제어기와 미분 관리제어기가 함께 사용된 곡선이다. 그림 2의 (a)와 그림 3의 (a)를 비교하여 보면 이탈의 최대값은 줄지 않았지만, 이탈 지속시간은 120[ms]로서 60[%]가 감소되었다. 또한 그림 2의 (b)와 그림 3의 (b)를 비교하여 보면 이탈정도는 같고 이탈 지속시간은 200[ms]로서 약 50[%] 정도가 감소되었다.



(a) 20[%]의 외란



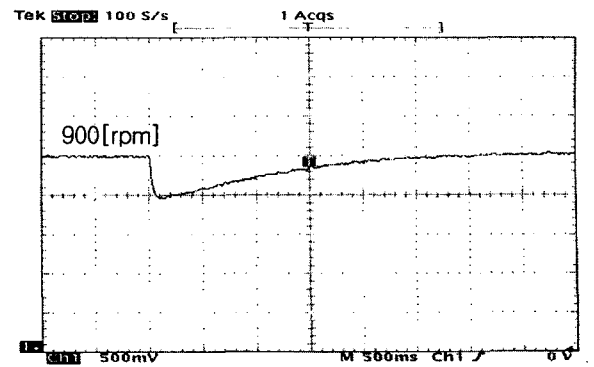
(b) 30[%]의 외란

그림 3 PID-미분 관리 제어기에 의한 직류 전동기의 응답곡선

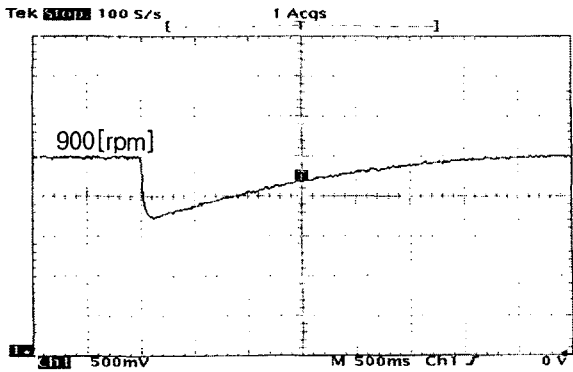
Fig. 3 Response curve of DC motor by means of PID-Differential Supervisory controller

### 3. 2 유도 전동기에 대한 적용

그림 4의 (a)와 (b)는 PID제어기만 사용했을 때의 응답곡선이다. 그림 4의 (a)에서 최대이탈은 설정값의 20[%] 정도였으며 이탈지속시간은 2[sec] 정도이고, 그림 2의 (b)에서는 30[%] 정도의 이탈과 2.5[sec] 정도의 이탈 지속시간을 가진다.

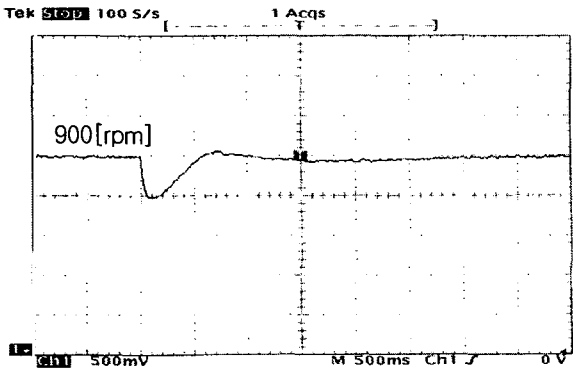


(a) 20[%]의 외란

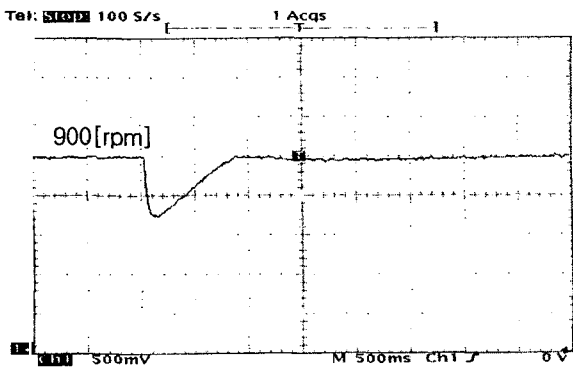


(b) 30[%]의 외란

그림 4 PID제어기에 의한 유도 전동기의 응답곡선  
Fig 4 Response curve of Induction motor by means of PID controller



(a) 20[%]의 외란



(b) 30[%]의 외란

그림 5 PID-미분 관리 제어기에 의한 유도 전동기의 응답곡선  
Fig. 5 Response curve of Induction motor by means of PID-Differential Supervisory controller

그림 5의(a)와 (b)는 PID제어기와 미분 관리제어기가 함께 사용된 곡선이다. 그림 4의 (a)와 그림 5의 (a)를 비교하여 보면 이탈의 최대값은 줄지 않았지만, 이탈 지속시간은 0.6[sec] 로서 75[%] 가 감소되었다. 또한 그림 4의 (b)와 그림 5의 (b)를 비교하여 보면 이탈정도는 같고 이탈 지속시간은 0.8[sec] 로서 약 70[%] 정도가 감소되었다.

### 3. 결 론

산업현장에서 서보 제어시스템은 강인한 제어가 요구되고 있다. 하지만 외란의 영향을 받게 되면 제어시스템의 강인 제어가 어렵게 된다. 제어시스템의 강인성을 위하여 본 논문에서는 PID제어기와 미분관리제어기의 혼합형 제어기법을 제시하였다. 제안된 제어기법은 직류 및 유도 전동기에 외란을 인가하여 응답특성이 개선됨을 보여주었다.

즉 직류 및 유도 전동기의 이탈지속 시간이 각각 50~60[%], 70~75[%] 감소한 반면에, 이탈 최대값은 줄지 않았다. 이와 같이 이탈 지속시간은 줄어든 반면 외란 인가 시 오차의 최대 이탈 값이 줄어들지 않은 것은 외란 인가 시에 외란의 급속한 변화에 의한 이탈현상의 급속한 변화, 관성 및 제어입력의 크기의 제약 때문이다.

이와 같은 결과에서 알 수 있듯이 미분관리제어기는 외란에 대한 이탈 지속시간 단축에 확실한 효과가 있음을 보여주었고, 또한 이탈 최대값 축소는 가능성이 있음을 보여주었다. 특히 단조증가함수 및 시정수가 큰 시스템인 경우에 효과가 더 클 수 있음을 알 수 있다. 따라서 제안된 제어기법은 강인제어가 필요한 자동화설비에 유용하게 사용될 수 있다.

### 감사의 글

본 논문은 2002년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 연구됨

### 참 고 문 헌

- [1] J. Chen and P.C. Tang, "A Sliding mode Current Control Scheme for PWM Brushless DC motor Drive", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 14, No.3 PP. 541-551, May 1999.
- [2] K. P. Venugopal and S.H. Smith, "Improving the Dynamic response of Neural Network Controllers using Velocity Reference Feedback", IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 4, NO. 2, PP. 355-357, March 1993.
- [3] J. Chang and Y. H. Kuo, "Decoupled Fuzzy Sliding-Mode control", IEEE Trans. on Fuzzy System, Vol.6, No. 3, PP. 426-435, August 1998.
- [4] 오성권 저, 퍼지 모델 및 제어시스템, 내하출판사, 2002.

- [5] L. X. Wang, "A Supervisory controller for Fuzzy control System that Guarantees Stability", IEEE Trans. on automatic control, Vol. 39, No. 9, PP. 1845-1847, September 1994.
- [6] N. Muskinja and B. Tovornik, "How to Design a Discrete Supervisory Controller for Real-Time Fuzzy control System", IEEE Trans. on Fuzzy System, Vol. 5, No. 2, PP. 161-165, May 1997.

---

저 자 소 개



**박왈서 (朴 曰 緒)**

1951년 5월 1일생. 1982년 원광대학 전기공학과 졸업, 1985년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 원광대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 원광대학교 전기전자 및 정보공학부 부교수

Tel : 063-850-6890, Fax : 063-850-6890

E-mail : wspark@wonkwang.ac.kr