

직류 서보전동기 위치제어 시스템에서 비례이득의 적응제어

전태원 · 최명규

전기전자 및 자동화 공학부

<요 약>

직류전동기의 위치제어 시스템에서 위치제어 성능을 향상시키기 위하여 비례이득을 위치오차에 따라 제어하는 비례이득의 적응제어 기법을 제시하였다. 전동기가 기동시 급격한 속도의 증가를 방지하기 위하여 비례이득을 작게하고, 전동기위치가 증가함에 따라 이득을 증가시켜 수렴속도를 빠르게 제어한다. 16비트 마이크로제어기로 이 시스템을 구현하였으며, 본 논문에서 제시한 방법의 타당성을 확인하기 위하여 시험을 통하여 기존의 고정 비례이득 방법과 서로 비교하였다.

Adaptive Control of Proportional Gain in the Position Control System of DC Servo Motor

Tae-Won Chun, Meong-Kyu Choi

School of Electrical Engineering and Automation

<Abstract>

In order to improve the performance of position control, the adaptive control of proportional gain in a position control system of dc motor is suggested, which the proportional gain is controlled with a position error. When the dc motor starts, the proportional gain has small value to prevent the rapid speed variation, and then as the motor position approaches to reference value, the gain increases for good transient response. The experiments are implemented by 16-bit microcontroller. The experimental

results for adaptive control of proportional gain are compared with those for conventional fixed proportional gain method to verify the proposed method.

1. 서론

로봇 구동장치, CNC 추축 구동용 등과 같이 정밀하고 빠른 응답특성이 요구되는 서보 운전용 전동기로는 직류 또는 교류서보전동기를 사용되어 왔다. 직류전동기는 교류전동기보다 많은 장점이 있으나, 직류전동기는 구조상 정기적으로 브러쉬와 정류자의 유지보수 및 교체가 필요하다는 단점때문에 근래에는 교류 서보전동기로 계속 대치되고 있다. 그런데 직류전동기 중 직류 서보전동기는 회전자가 영구자석으로 되어 있으므로 관성이 작아 속응성이 뛰어나고 또한 속도 및 위치 제어가 교류전동기보다 더 쉽다는 장점 때문에 소용량의 구동장치 위치제어에 많이 사용되고 있다. 이 직류 서보전동기의 위치제어의 성능에 가장 중요한 요소가 신속하면서 정확하게 원하는 위치에 도달하는 것이다. 따라서 직류 서보전동기의 위치 제어 성능을 향상시키기 위하여 퍼지제어, H^∞ 제어, 적응제어 등을 사용하는 논문들이 발표되었다.[1-4] 그런데 이 제어기법들은 위치 제어 성능의 향상에는 효과가 있으나 구현하기에 너무 복잡하다는 문제점이 있다.

따라서 본 논문에서는 위치제어 동특성을 향상시키면서 간단하게 구현할 수 있는 기법 즉 위치 오차에 따라 위치제어기의 비례이득 값을 변화시키는 비례이득의 적응 제어 기법을 제시한다. 시뮬레이션 및 16비트 마이크로 제어기를 사용한 실험을 통하여 기존의 고정 비례이득 방식과 비교하고, 본 논문에서 제시한 제어기법의 타당성을 확인한다.

2. 직류 서보전동기의 위치 제어루우프

그림 1은 직류전동기의 위치제어를 위한 폐루우프를 그린 것이다.

위치 제어기, 속도 제어기 및 고정자 전류제어기 등 3개의 제어기가 직렬로 연결되어 위치제어기의 출력이 기준 속도가 되며, 속도제어기의 출력이 기준 고정자 전류가 되는 등, 앞의 제어기 출력이 다음 제어기의 기준 입력이 되는 Cascaded 제어기 구조를 가지고 있다. 전류제어기 출력 즉 제어입력인 k 는 초퍼 (Chopper)의 Duty Cycle이며, 이 Duty Cycle에 의해 초퍼의 출력 직류전압 즉 직류전동기의 고정자 전압을 제어하여 직류전동기 위치 및 속도를 제어한다.

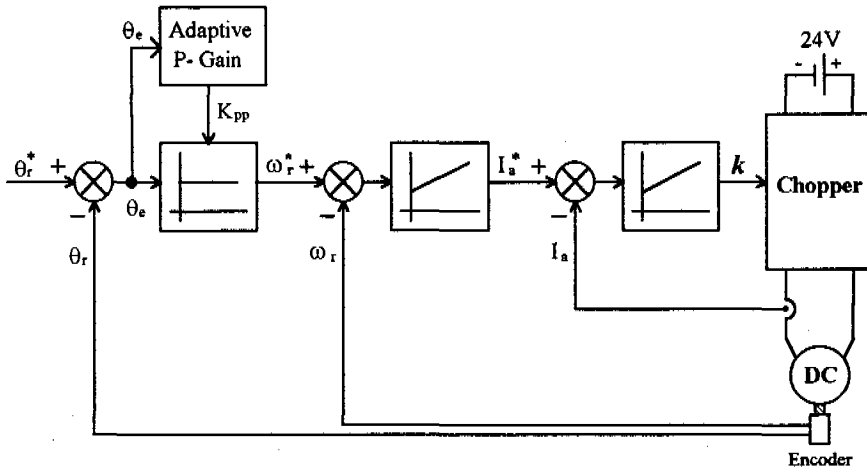


그림 1 직류 서보전동기의 위치 제어루우프
Fig. 1 Position control loop of dc servo motor

여기서 속도 제어기와 전류 제어기는 정상상태 오차가 없고 안정도가 좋은 비례적분 제어기 (PI Controller, Proportional Integral Controller)를 사용하며, 이 두 제어기의 식은 각각 다음과 같다.

$$I_a^* = K_{ps}(\omega_r^* - \omega_r) + K_{is} \int_0^t (\omega_r^* - \omega_r) dt \quad (1)$$

$$k = K_{pa}(I_a^* - I_a) + K_{ia} \int_0^t (I_a^* - I_a) dt \quad (2)$$

여기서 K_{ps} , K_{is} 는 속도제어기의 비례이득과 적분이득이고, K_{pa} 와 K_{ia} 는 고정자 전류제어기의 비례이득과 적분이득이다.

위치제어기는 PI 제어기 (비례적분 제어기)를 사용하는 속도 및 고정자 전류제어기와 달리, 다음 식과 같은 P 제어기 (비례제어기, Proportional Controller)를 사용한다.

$$\omega_r^* = K_{pp}(\theta_r^* - \theta_r) = K_{pp}\theta_e \quad (3)$$

여기서 K_{pp} 는 위치제어기의 비례이득, θ_r^* 는 기준위치, θ_r 은 실제위치, θ_e 는 위치오차이다.

위의 위치제어 루우프에서 가장 중요한 위치제어기의 비례이득을 적응제어하여 직류 서보전동기의 동특성을 향상시키고자 한다.

3. 위치제어기 비례이득의 적응제어 (Adaptive Control)

일반적으로 위치제어기에서 사용되는 P 제어기의 문제점은 PI 제어기와 달리 정상상태 오차가 존재한다는 것이다. P 제어기의 비례이득 값을 증가시킬 경우 정상상태 오차는 감소되나 안정도가 저하되고, 반대로 비례이득 값을 감소시킬 경우 정상상태 오차는 증가되고 안정도는 향상된다는 문제점이 있다.

위치제어 시스템에서는 식(3)과 같이 위치오차와 비례이득의 곱한 값이 기준 속도가 된다. 따라서 비례이득을 증가시키면 기준 위치에 빨리 도달하면서 정상상태 오차가 감소한다는 장점이 있으나 기준속도 및 전동기 속도가 급격히 증가되어 기계적인 충격과 함께 안정도에 문제가 생긴다. 이에 반하여 비례이득을 감소시키면 안정성이 좋아지나 기준위치까지 도달하는 시간이 증가된다는 문제점이 있으므로 최적의 위치제어기 비례이득 값을 구하는 것이 상당히 힘들다.

따라서 이 위치제어기의 비례이득에 의한 문제점을 해결하기 위하여 위치오차에 따라 비례이득을 변화시키는 비례이득 적응제어 방식을 사용하였다.

그림 2는 위치오차에 대한 비례이득의 변화를 그린 것이다.

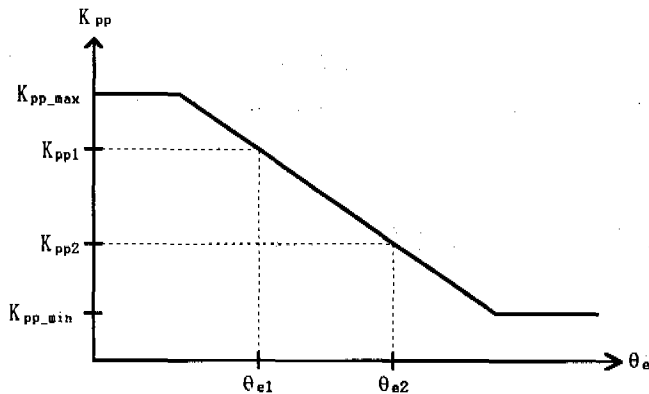


그림 2 위치오차에 대한 비례이득의 변화

Fig. 2 Position gain variations with position error

직류 서보전동기가 기동 시에는 기준위치와 실제위치의 위치오차가 크므로, 이 때 비례이득 값을 작게하여 기계적인 충격없이 전동기 속도를 서서히 증가시킨다. 전동기의 위치 값이 증가함에 따라 위치오차가 점차 감소될 때 비례이득을 계속 증가시켜 정상상태 오차를 제거하면서 기준 위치에 도달하는 시간을 단축시킨다.

여기서 비례이득의 최대값 K_{pp_max} 와 최소값 K_{pp_min} 을 결정하고, 그림 2에 있는 두 점 사이의 기울기를 이용하여 위치오차 θ_e 에 대한 비례이득 K_{pp} 식은 다음과 같다.

$$K_{pp} = -\frac{K_{pp1} - K_{pp2}}{\theta_{e2} - \theta_{e1}} \theta_e + \frac{K_{pp1}\theta_{e2} - K_{pp2}\theta_{e1}}{\theta_{e2} - \theta_{e1}} \quad (4)$$

3. 시뮬레이션 결과

직류 서보전동기의 위치제어 루우프에 대하여 디지털 시뮬레이션을 수행하여, 위치 제어기의 비레이드에 대한 위치 및 속도, 전류 과도 응답특성을 관찰하고, 위치제어기의 비레이드 적응제어에 대한 타당성을 확인한다.

이 시뮬레이션에서 샘플링시간 (Sampling Time)은 $200 \mu\text{sec}$ 로 하고, 사용된 직류 서보전동기의 정격은 표 1과 같다.

표 1 직류 서보전동기 정격
Table 1 Rating of dc servo motor

출 력	40 [Watt]
정격전압	24 [V]
정격속도	1800 [rpm]

속도제어기의 비레이드 $K_{ps}=0.5$, 적분이득 $K_{is}=1.0$, 고정자 전류제어기의 비레이드 $K_{pa}=1.0$, 적분이득 $K_{ia}=50.0$ 으로 고정시키고, 위치제어기의 비레이드에 대한 과도응답 특성을 관찰한다.

기준위치 θ_r^* 를 0에서 10π 로 계단 증가시켰을 때, 그림 3은 위치제어기의 비레이드 $K_{pp}=0.5$, 그림 4는 $K_{pp}=2.5$, 그림 5는 $K_{pp}=4.0$ 일 경우, 각각 기준 위치 및 실제 위치, 기준 속도와 전동기 속도, 기준 고정자 전류 및 실제 고정자 전류의 과도 응답특성을 그린 것이다.

그림 3에서 비레이드가 0.5일 경우에는 기준위치 값이 계단 증가하였을 때 비레이드 값이 작으므로 기준 속도 및 전동기 속도가 천천히 증가되고, 따라서 실제위치 역시 서서히 증가된다. 따라서 그림 3에서 그림 5까지 결과를 비교하면, 비레이드 값을 증가시키면 실제 위치 값이 기준 위치 값으로 빨리 도달하여 수렴하는 시간은 감소되나, 과도 상태에서 기준 속도 및 전동기 속도의 상승 속도가 급격히 증가된다.

이에 대하여 그림 6은 위치제어기 비레이드 적응제어 시 시뮬레이션 결과이다. 기동 시 기준 속도 및 전동기 속도가 급격히 상승하지 않으면서, 실제 위치가 기준 위치 값으로 빨리 수렴함을 알 수 있다.

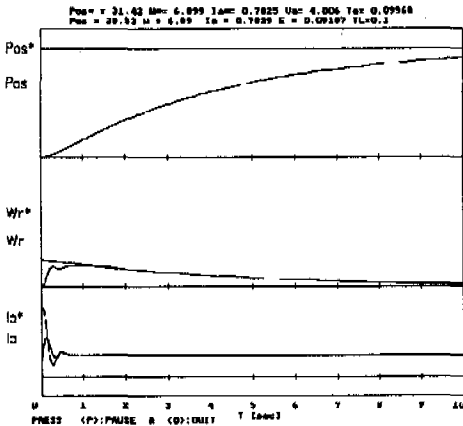


그림 3 $K_{pp} = 0.5$ 인 경우 과도 응답
Fig. 3 Transient response at $K_{pp}=0.5$

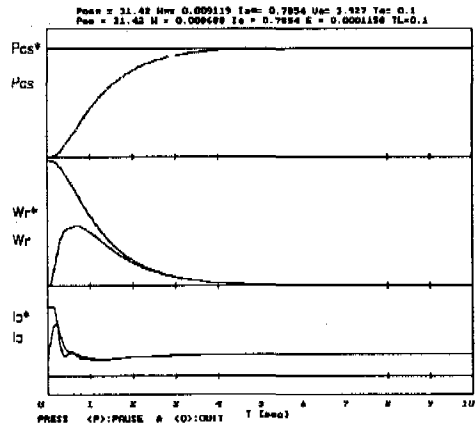


그림 4 $K_{pp} = 2.5$ 인 경우 과도 응답
Fig. 4 Transient response at $K_{pp}=2.5$

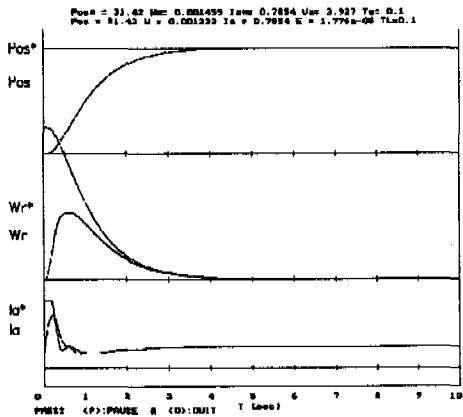


그림 5 $K_{pp} = 4.0$ 인 경우 과도 응답
Fig. 5 Transient response at $K_{pp}=4.0$

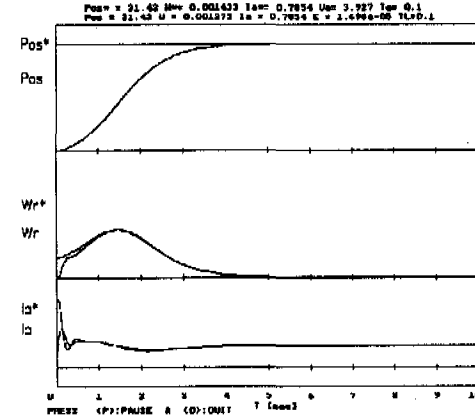


그림 6 비례이득 적용제어시 과도응답
Fig. 6 Transient response at adaptive control

4. 시스템 하드웨어 구성 및 실험 결과

4-1. 시스템 하드웨어 구성

그림 7은 직류 서보전동기의 위치 제어시스템의 하드웨어 구성도이다. 직류 서보전동기의 위치 및 속도 제어 루우프를 수행하기 위하여 16비트 마이크로 제어기 80C196KC를 사용하였다.[5] 전동기의 정 방향과 역 방향 제어 등 4상한 운전이 가능한 4상한 초퍼(Four-Quadrant Chopper)로 직류 서보전동기를 구동하였으며, 이 초퍼의 스위칭 소자로

Power FET인 IRF 740을 사용하였다.

직류전동기의 속도 및 위치를 측정하기 위하여 A, B, Z 3개 펄스에 1회전당 2048 펄스를 발생시키는 Incremental Encoder를 사용하였으며, M/T방식을 사용하여 속도 측정을 하였다. 고정자 전류 측정을 위하여 전류가 3A일 때 4V의 전압이 출력되는 PCB용 Hall-CT를 사용한다. 이 Hall-CT 출력을 저역필터를 거쳐 마이크로 제어기 내의 10비트 A/D 컨버터로 읽어 드린다. 초퍼 입력 측에 과전류 방지용 Hall-CT를 연결하고, 과 전류가 흐를 시 초퍼의 구동신호를 차단하여 초퍼의 전력회로를 보호하고, 상위컴퓨터로 과전류 신호를 보낸다.

한편 EPLD를 사용하여 dead time까지 포함된 초퍼의 4개 구동신호 발생회로를 간략하게 구성하였으며, 이 EPLD에 과전류 시 이 구동신호를 차단하는 기능도 있다.[6]

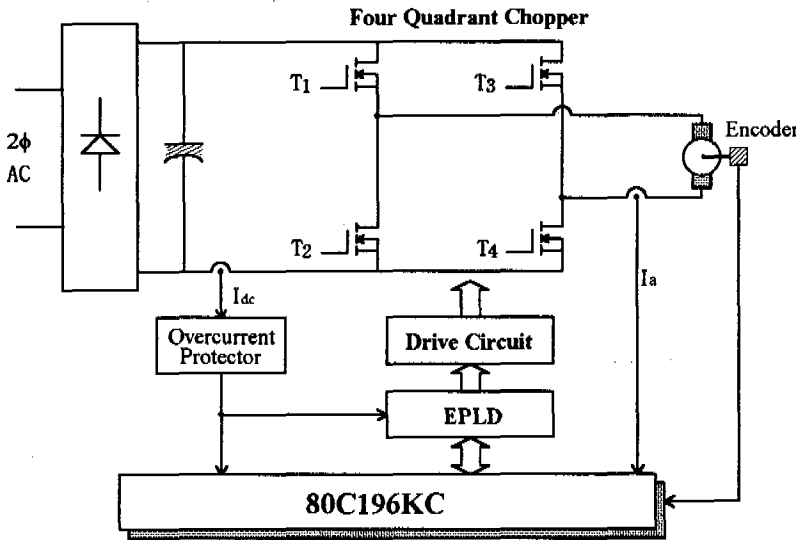


그림 6 위치제어 시스템의 하드웨어 구성도

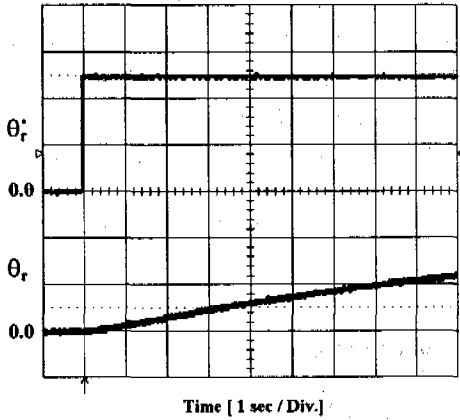
Fig. 6 Hardware configuration of position control system

4-2. 실험 결과

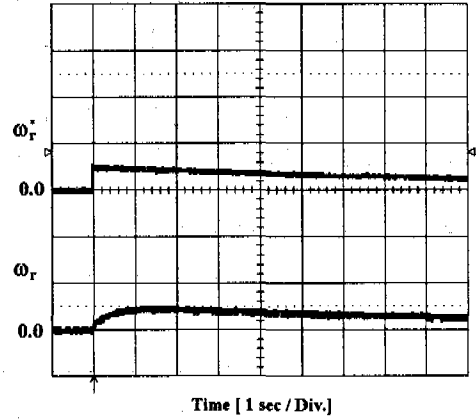
기준위치를 계단 증가시켰을 때 위치 제어루우프에서 가장 중요한 위치제어기의 비레이득 변화에 대한 과도응답 특성과 비레이득의 적응 제어시 과도응답 특성을 보인다.

그림 7은 비레이득 $K_{pp}=1.0$ 일 경우, 기준위치 값을 계단 증가시켰을 때 기준위치 및 실제위치와 기준 속도 및 전동기 속도의 과도응답 특성을 보였다. 그림 8은 $K_{pp}=5.0$ 으로 비레이득을 5배 증가시켰을 때, 같은 기준위치 및 실제위치와 기준 속도 및 전동기 속도의 과도응답 특성을 보인 것으로, 두 과도응답 특성을 비교하면 다음과 같다. 비레이득이 1.0일 경우에는 기준속도 및 실제 속도가 작으므로 위치가 서서히 증가된다. 그런데 비레이득을 5.0으로 증가시켰을 경우에는 실제 위치 값이 기준위치 값으로 빨리 수렴되나, 기준속도가 급격히 제한치(Limit) 까지 증가되고, 전동기 속도 역시 급격히 증가되다가 위치

차가 감소됨에 따라 서서히 감소됨을 알 수 있다.



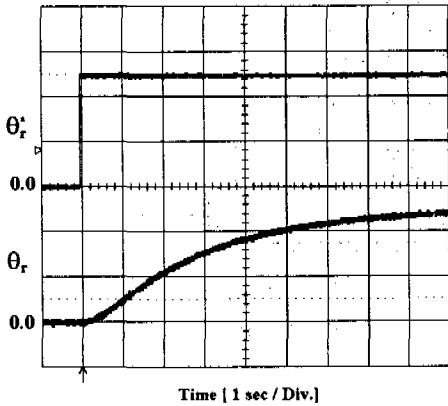
(a) 기준위치 및 실제위치



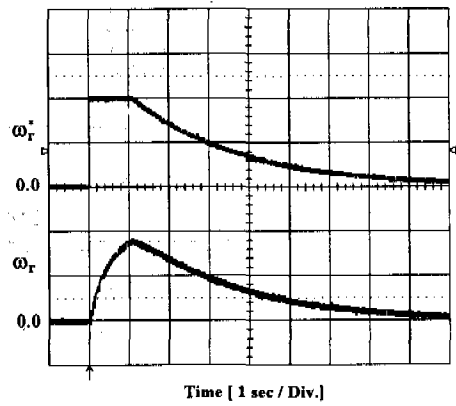
(b) 기준속도 및 전동기속도

그림 7 비례이득 $K_{pp}=1.0$ 일 경우 과도응답

Fig. 7 Transient response at $K_{pp}=1.0$



(a) 기준위치 및 실제위치



(b) 기준속도 및 전동기속도

그림 8 비례이득 $K_{pp}=5.0$ 일 경우 과도응답

Fig. 8 Transient response at $K_{pp}=5.0$

그림 9는 비례이득을 적응제어하였을 경우, 기준위치를 계단 증가할 때 기준위치 및 실제위치와 기준 속도 및 전동기 속도의 과도응답 특성과 위치오차에 대한 적응 비례이득의 변화를 보인 것이다. 그림 8에서 비례이득이 5.0일 경우와 비교하면, 실제 위치가 기준위치에 더 빨리 도달하면서, 기준속도 및 전동기 속도가 기준속도의 제한값까지 서서히 증가되는 우수한 과도 응답특성이 있음을 알 수 있다. 한편 그림 9의 (c)에서는 위치오차에 대한 적응 비례이득 값의 변화를 보인 것이다. 위치오차가 최대일 때는 적응 비례이득이 1.0으

로 작은 값을 가지며, 이 위치오차가 감소함에 따라 증가되어, 위치오차가 거의 0이 되면 비레이득은 약 20정도로 크게 증가됨을 알 수 있다.

그림 10은 기준위치를 반대방향으로 (음의 방향) 계단 증가시켰을 때, 비레이득 적응제어하였을 경우 과도응답 특성을 보인 것이다. 기준위치가 반대 방향이므로 전동기가 역방향으로 회전하게 된다. 따라서 기준위치 및 실제위치 값과 기준속도 및 전동기속도 모두 음의 값을 가지며, 과도응답 특성은 그림 9와 거의 유사함을 알 수 있다.

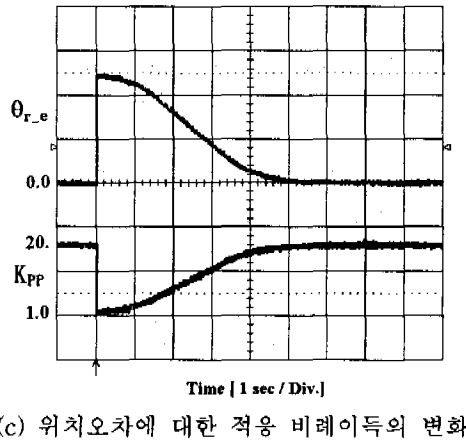
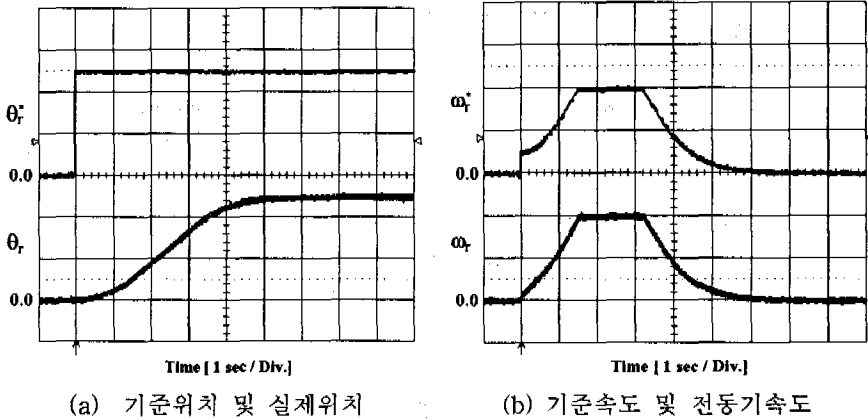


그림 9 비레이득 적응제어 시 과도응답

Fig. 9 Transient response at adaptive control of K_{PP}

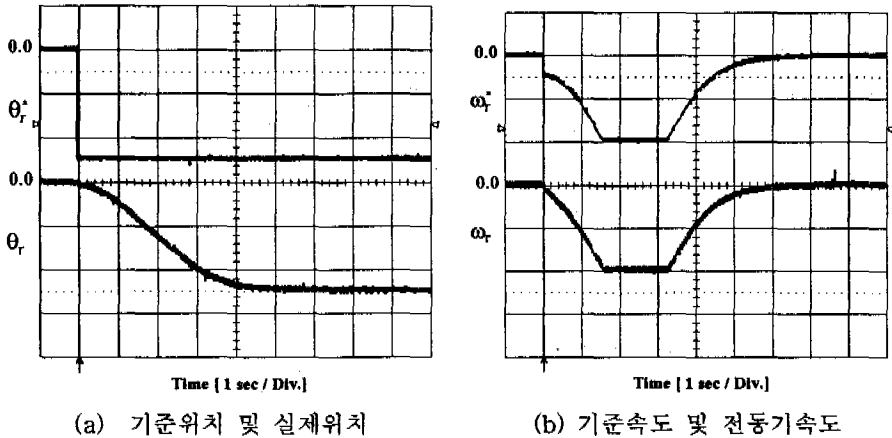


그림 10 비레이득 적응제어 시 과도응답 (기준위치가 음의 값인 경우)

Fig. 10 Transient response at adaptive control of K_{pp}
(in case that reference position is negative.)

5. 결 론

본 논문은 직류 서보전동기의 위치제어 성능을 향상시키기 위하여 위치제어기의 비레이득을 적응 제어하는 기법을 제시하였다. 전동기 기동 시에는 기준속도 및 실제속도가 급격히 상승하지 않고 부드럽게 기동하였으며, 전동기 위치가 기준위치에 빨리 수렴되는 동우수한 응답특성을 나타내었다. 이 비레이득의 적응제어는 교류전동기의 위치제어뿐만 아니라 속도제어 루우프에도 쉽게 적용할 수 있다.

참고문헌

- [1] S.Kobayashi, I.Awaya, and H.Kuromaru, "Dynamic Model Based Auto-tuning Digital Servo Driver", in Conf. Rec. of IECON, 1993, pp.913-917.
- [2] M.F.Tsai, and Y.Y. Tzou, "Design and Implementation of a Real-Time Identification System using Parallel Processing Technique for Adaptive Control of a DC Motor Drive", in Conf. Rec. of IECON, 1995, pp.818-823.
- [3] P.S.Sen, *Thyristor DC Drives*, John Wiley & Sons, 1981.
- [4] W.Leonhard, *Control of Electrical Drives*, Springer-Verlag, 1985.
- [5] Intel, *16-BIT EMBEDDED CONTROLLER HANDBOOK*, 1990.
- [6] Altera, *MAX+PLUS II Getting Started*, 1997