

기준모델과 피드포워드 적응제어를 사용한 위치제어기

尹明河*, 崔男烈, 李治煥

Adaptive Feed-forward Control with Reference Model for Position Controller

Myung-Ha Yoon, Nam-Yerl Choi, and Chi-Hwan Lee

요 약

본 연구는 관성의 변화에 견실한 피드포워드 적응 위치제어기를 제안한다. 제안된 피드포워드 적응 위치제어기는 PI 위치제어기에 피드포워드와 기준모델 적응제어기를 추가한 구조를 가진다. 제어기의 특징은 과도상태에서 적응제어기가 위치오차와 기준모델의 속도 정보를 이용하여 피드포워드 이득을 조정한다. 이것은 과도응답 특성을 향상시키고, 정상상태의 수렴 시간을 개선시킨다. 위치 오차에 속도의 정보를 받아들여 기존의 PI 위치제어 및 기준모델 적응제어에 비하여 속응성이 우수하다. 그리고, 적응제어기에 규준화 함수를 사용하여 입력크기에 대해 출력신호가 일정한 응답특성을 가지도록 하였다. 시뮬레이션을 통하여 제안된 피드포워드 적응 위치제어기 동작의 타당성을 보였다.

ABSTRACT

This paper proposed a feed-forward adaptive position controller that is robust for variable inertia. The control system consists of PI Position controller, feed-forward and model reference adaptive control. A parameter $g(t)$ of the feed-forward adaptive position controller is adapted by using both the reference model speed and position error. So it improves the transient response and reduces the settling time. And normalization function is used to make linear adaptation time. The validity of the feed-forward adaptive controller is confirmed by simulation results.

Key Words: Feed-forward Control, Adaptive Control, Model Reference Adaptive Control

1. 서 론

오늘날 서보 모터는 다축 기계의 동기운전에 사용된다. 이러한 서보 시스템은 최악의 조건에서도 정확성

과 신뢰성을 요구하며, 부하의 변화는 서보 시스템의 성능을 저하시킨다. 예를 들어, 모터 축에 연결된 부하의 관성이 커지면 서보 시스템 주파수 대역이 좁아져 응답시간이 길어지고, 정확한 위치추적을 할 수 없게 되며, 진동을 유발시켜 시스템을 불안정하게 한다. 위치제어를 위해 제어기 구현이 비교적 용이한 PI 제어기가 사용되고 있다. 그러나 PI 제어기는 이득 조정이 어려울 뿐만 아니라 이득이 잘 조정되더라도 작업환경이 변할 때마다 재조정을 필요로 하기 때문에 견실 성능이 나빠진다^[1].

*위덕대학교 대학원 정보전자공학과 석사과정

E-mail : ymh222@hanmail.net

접수일자 : 2002. 7.23

1차심사 요청일 : 2002. 7.30

심사완료일 : 2002. 8.28

최근 견실성을 보장하는 새로운 제어기 설계에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 1990년대 중반 견실 성능과 적응성 향상을 위하여 신경 회로망을 이용한 제어기 설계 기법이 처음 제시되면서 많은 연구가 이루어지고 있으나 이러한 제어기는 구현하기가 어렵기 때문에 실제 산업현장에 적용되지 못하고 있다. 최근에는 기계장치에서 외란을 제어하기 위해 외란추정 및 외란관측과 같은 기술을 적용한 적응제어기를 많이 사용한다^[2]. 하지만 이러한 적응제어에서도 문제점은 발생한다. 예를 들어, 직-간접 기준 모델 적용 시스템은 장치와 제어기 파라미터 사이의 맵핑 문제로 인해 발생하는 안전성 문제를 관찰자 도입하여 시스템의 안정성과 정확성을 보장하는 방식을 채택하였다. 이 시스템 역시 구조가 복잡하고 연산과정이 증가하여 시스템 응답 지연이 발생하고, 과도응답의 특성이 입력신호에 뒤져 응답 지연이 발생한다^{[3][4]}.

본 논문에서 제시한 피드포워드 적응 위치제어기에서는 정상상태 오차를 영으로 하는 PI 제어를 중심으로, 기준모델은 안정화 시간 및 오버슈트와 같은 설계 기준을 충족시키며, 위치오차 및 속도를 이용하여 피드포워드 이득을 조정하고 과도응답의 특성을 향상시킨다. 제어기 구성이 간단하여 실제 산업현장에 적용이 용이하다. 제안된 위치제어기는 기준모델 적응제어기 및 PI 위치제어기와 함께 관성의 변화에 따른 과도응답을 비교하여 피드포워드 적응 위치제어기가 더욱 성능이 우수함을 시뮬레이션의 결과로 보인다.

2. 서보 DC 모터 구성 및 PI 제어기

2.1 서보 DC 모터 모델

전류원 구동 서보 DC 모터의 등가 회로는 그림 1에서 보여준다. 식 (1)은 전류원 구동 서보 DC 모터의 전달함수를 나타낸다^[5].

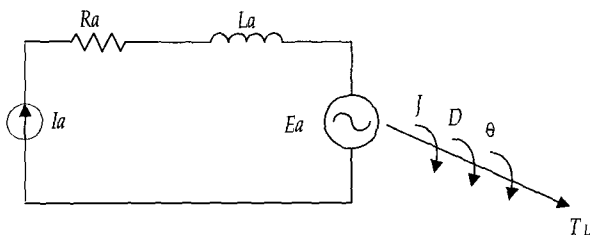


그림 1 전류원 구동 DC 모터 모델
Fig. 1 Current controlled DC Motor modeling

$$M(s) = \frac{\theta}{I} = \frac{k}{s(Js + D)} \quad (1)$$

여기에서, R_a : 회전자 저항, L_a : 회전자 인덕턴스,
 D : 점성마찰, J : 관성,
 k : 모터 토크 상수,
 k_a : 모터 역기전력 상수,
 T_L : 부하토크 이다.

전류원 구동 서보 DC 모터는 전압원 구동 방법에 비해 제어 대상인 서보 DC 모터의 응답성을 개선시킬 수 있으며, 일정한 토크로 인해 안정된 제어를 할 수 있다. 전류원 구동 모터 전달함수는 그림 2의 블록 다이어그램으로 도식화 할 수 있다. 발생하는 토크와 관성 및 마찰의 관계는 식 (2)의 미분 방정식으로 표현된다.

$$T - T_L = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

여기에서, T 는 모터의 발생 토크를 나타낸다. 식 (2)에 따르면, 속도응답은 관성의 영향을 받는다. 시스템에서 관성의 변화를 추적하면 내·외부 시변 파라미터의 영향을 시스템에서 최소화시켜 정확한 위치제어가 가능해 진다.

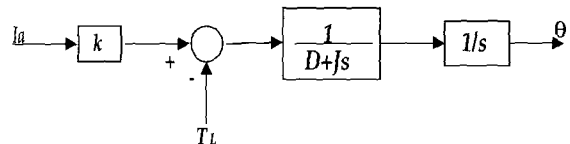


그림 2 모터 블록 다이어그램
- Fig. 2 Motor block diagram

2.2 PI 제어기

일반적인 PI 제어기는 오차에 대한 비례요소와 적분 요소를 추가하여 오차를 누적하여 정상상태 편차를 없애는 제어방법이다^[6].

그림 3은 PI 제어기를 사용한 위치제어 시스템의 블록 다이어그램이다. PI 제어기를 사용한 전체 시스템의 전달함수는 식 (4)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{PI}(s) = \frac{G(s)M(s)H(s)}{1 + G(s)M(s)H(s)} \quad (4)$$

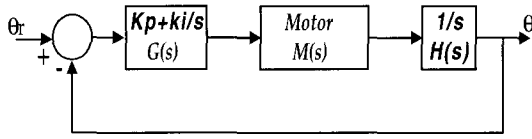


그림 3 PI 제어기
Fig. 3 PI controller

PI 제어기는 시간에 따라 변하는 관성에 대해 일정한 응답특성을 얻을 수 없다^[1]. 이러한 문제의 해결 방법으로 시변 요소에 셀프튜닝이 가능한 적응제어 방법을 제시한다. 적응제어기에는 기준모델 적응제어, 피드포워드 적응제어, 직접적응제어, 간접적응제어 등이 있다^{[4][7]}. 본 논문에서는 피드포워드 적응제어에 기준모델을 도입한 피드포워드 적응 위치제어기를 제안한다.

3. 피드포워드 적응제어 시스템

적응제어기의 주된 목적은 제어 대상의 정확한 파라미터를 알 수 없거나 시변 플랜트를 제어하는 것이 목적이다^[6]. 가장 일반적인 구조의 적응제어 방법인 기준모델 적응제어 시스템은 그림 4와 같다.

본 논문에서 제시한 피드포워드 적응 위치제어기 구성은 그림 5에서 자세히 나타내었다. 식 (5)는 시스템의 전체 전달함수이다.

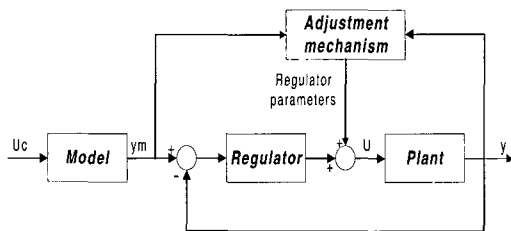


그림 4 기준모델 적응 제어시스템
Fig. 4 Model reference adaptive control system

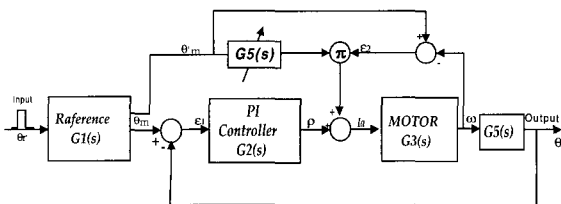


그림 5 피드 포워드 적응 제어 시스템
Fig. 5 Adaptive feed-forward control system

$$P(s) = \frac{(G_1 G_2 G_3) + (G_1 G_4 G_3)}{1 + G_2 G_3 G_5} \quad (5a)$$

$$G1(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (5b)$$

$$G2(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (5c)$$

$$G3(s) = \frac{k}{(Js + D)} \quad (5d)$$

$$G4(s) = \gamma \epsilon_1 \Psi(t) \quad (5e)$$

$$G5(s) = \frac{1}{s} \quad (5f)$$

여기에서, $G1$ 은 기준모델 전달함수, $G2$ 는 PI 제어기 전달함수, $G3$ 은 제어대상 장치의 전달함수, $G4$ 는 피드포워드 적응제어기의 전달함수, 그리고 $G5$ 는 적분기를 나타낸다. 식 (5)을 상태 공간 방정식 나타내면 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \dot{x} \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\tau k_a + k_p \tau + J}{\tau J} & -\frac{\tau k_i + k_a + k_p}{\tau J} & -\frac{k_i}{\tau J} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \dot{x} \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{g'}{\tau J} & \frac{k_p}{\tau J} & \frac{k_i}{\tau J} \end{bmatrix}^T u \quad (6a)$$

$$y(t) = [0 \ 0 \ 1]^T x(t) \quad (6b)$$

여기에서, x 는 θ , u 는 θ_r 이다. 그리고 k_p 와 k_i 는 PI 제어기의 비례, 적분이득이며, τ 는 기준모델에서 1차 지연요소의 시정수를 나타낸다. 전체 시스템을 제어하는 제어규칙은 아래와 같다.

$$I_a = (g(t) \cdot \epsilon_2) + (\epsilon_1 \cdot \rho) \quad (7a)$$

$$\Psi(t) = \frac{1}{|\dot{\theta}_m + \alpha|} \quad (7b)$$

$$g(t) = \gamma \epsilon_1 \Psi(t) \dot{\theta}_m \quad (7c)$$

$$\dot{\rho} = [K_p \ K_i] \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_1 \\ \epsilon_1 \end{bmatrix} \quad (7d)$$

$$\epsilon_1 = (\theta_m - \theta) \quad (7e)$$

$$\epsilon_2 = (\dot{\theta}_m - \dot{\theta}) \quad (7f)$$

제어규칙을 나타내는 식 (7a)는 서보 DC 모터 입력 전류에 관한 식이다. 식 (7b)는 적응이득의 표준화 함수에 관한 식이다. 식 (7c)는 피드포워드 이득의 적응 제어기를 나타내는 식이다. 식 (7d)는 PI 제어기를 나타내며 식 (7e)과 식 (7f)는 각각 위치와 속도의 오차를 나타낸다. 여기에서, ρ 는 PI 제어기의 출력을 나타내고, α 는 양의 상수를 나타내며, γ 는 양의 값을 갖는 피드포워드 적응파라미터 이득을 나타낸다. $g(t)$ 는 피드포워드 적응파라미터를 나타낸다.

그림 6은 피드포워드 적응 위치제어 파라미터 $g(t)$ 의 블록 다이어그램을 나타낸다. 적응 파라미터는 위치 오차값과 기준 모델의 속도 정보로부터 피드포워드 이득을 조정한다. 이것은 기존의 적응 제어기에 대해 간단한 구조를 가지며, 시스템의 응답속도가 빠르다. 표준화 함수는 θ_m 의 크기에 무관한 적응 성능을 갖도록 한다.

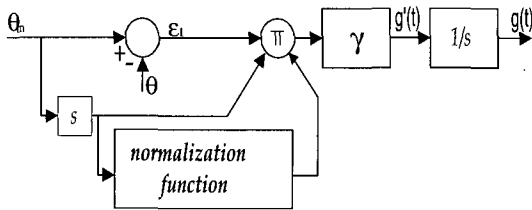


그림 6 피드포워드 적응 파라미터 $g(t)$ 의 블록 다이어그램
Fig. 6 Block Diagram of the adaptive feed-forward parameter $g(t)$

4. 시뮬레이션 및 고찰

표 1은 시뮬레이션에 적용된 서보 DC 모터의 파라미터를 나타낸다. 제안된 피드포워드 적응제어기와 비교하기 위해 PI제어기와 기준모델 적응제어기를 사용하였다. PI 제어에 사용된 계수 k_p, k_i 는 각각 0.2, 0.02이며, PI 이득 값은 J_0 를 기준으로 적절히 조절한 값이다. 기준모델 적응제어기의 적응파라미터의 이득은 스텝입력에 대한 출력이 최적의 값을 갖도록 조절된 값이다. 그림 7은 피드포워드 적응제어기 설계와 시뮬레이션을 하기위해 사용된 MATLAB simulink 도면이다. 관성이 $[J_0, 5J_0]$ 일 때, 출력 신호를 측정한다.

그림 8는 관성을 $[J_0, 5J_0]$ 로 운전하였을 경우의 제어기 응답특성을 나타낸다. 그림 8(b)는 관성을 증가시켰을 때, 응답시간이 길어지고 오버슈트가 증가하여 발산한다.

표 1 서보 DC 모터의 파라미터
Table 1 Parameters of servo DC motor

Paramter	Value
R_a	1.5Ω
L_a	14mH
k_a	0.19
Viscous friction(D)	0.00001
Inertia(J_0)	6.98 X 10 ⁻³ kg · m ²

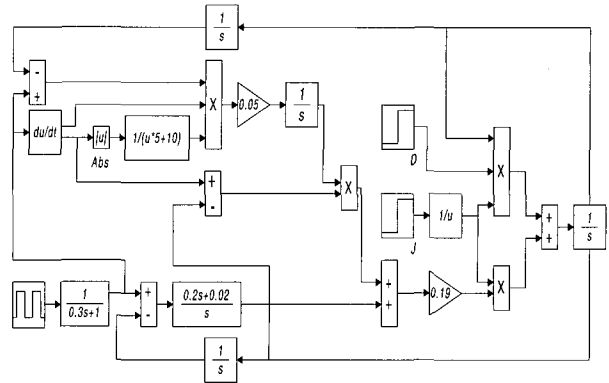
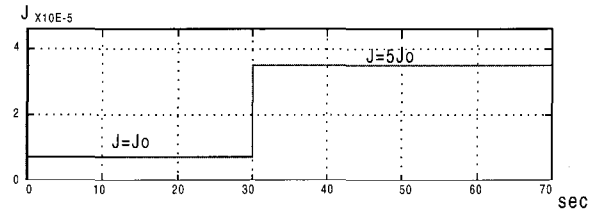


그림 7 MATLAB을 사용한 simulation
Fig. 7 Simulation with MATLAB

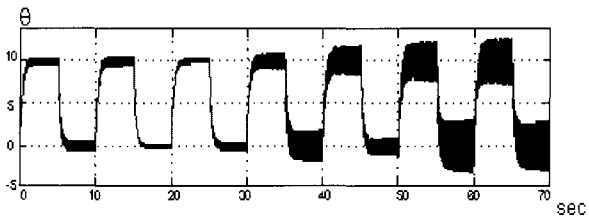
그림 8(c)는 관성을 증가하였을 때, 추종시간이 길어지고 오버슈트가 증가하여 느리게 정상상태에 수렴한다. 그림 8(d)는 관성증가에 따른 동작조건의 변화에 적응제어기가 위치오차와 속도정보를 받아들여 관성에 비례한 수정신호를 플랜트에 전달하므로 적응성이 우수하다.

그림 9는 그림 8과 같은 조건에서 입력 신호가 $\theta = 30$ 일 때의 제어기 응답특성이다. 그림 9(b) 및 (c)의 출력신호는 그림 8(b) 및 (c)와 동일한 출력신호를 나타낸다. 그림 9(e)적응파라미터 $g(t)$ 는 표준화 함수를 사용하여 위치의 오차에 속도의 정보를 받아들여므로 발생하는 비선형의 문제를 억제하고 입력의 크기에 상관없이 일정한 응답특성을 나타낸다.

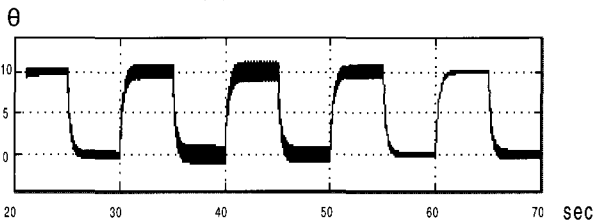
그림 10(a)는 PI 제어기의 입력전류를 나타낸다. 관성이 증가하는 t=30 일 때, 과도한 전류가 나타난다. 이것은 PI 제어기 출력신호의 응답시간이 길어지고 오버슈트가 증가하여 발산하는 것을 알 수 있다.



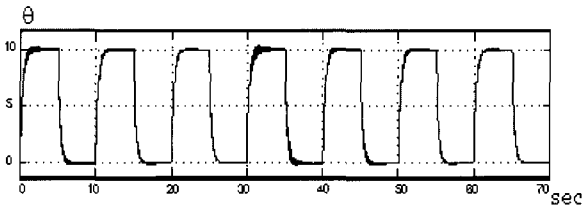
(a) $t = 30s$ 일 때, 관성변화



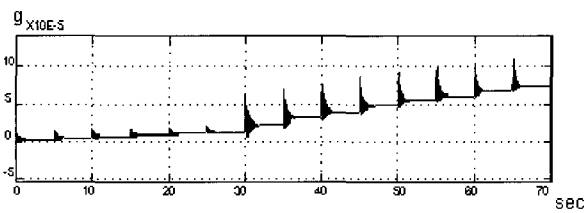
(b) PI 제어기 출력



(c) 적응제어기 출력



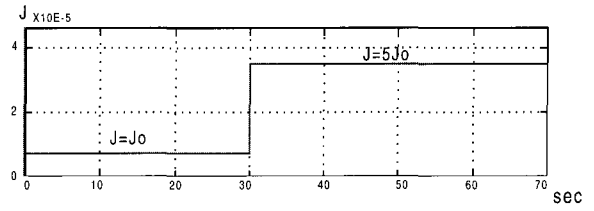
(d) 피드포워드 적응제어기 출력



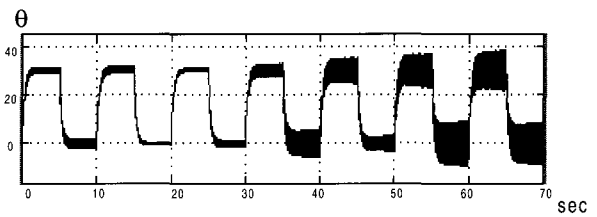
(e) 피드포워드 적응 파라미터 $g(t)$

그림 8 관성 변화에 따른 제어기의 응답특성 비교 ($\theta = 10$)
 Fig. 8 The comparison of the response characteristics with variable inertia ($\theta = 10$)

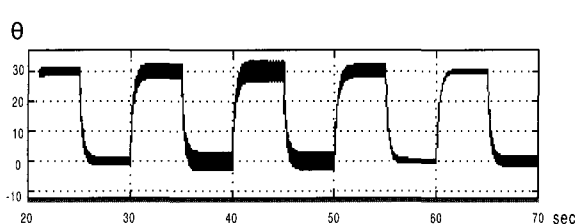
그림 10(b)는 적응제어기의 입력 전류를 나타낸다. 이것은 관성이 증가하는 $t=30$ 일 때, 추종시간이 길어지고 오버슈트가 증가하여 느리게 정상상태에 수렴함을 나타낸다.



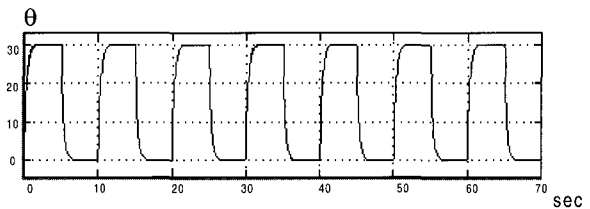
(a) $t = 30s$ 일 때, 관성변화



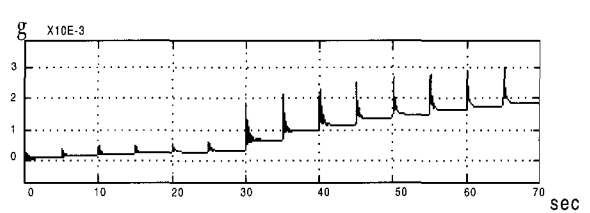
(b) PI 제어기 출력



(c) 적응제어기 출력



(d) 피드포워드 적응제어기 출력



(e) 피드포워드 적응파라미터 $g(t)$

그림 9 관성 변화에 따른 제어기 응답특성 비교 ($\theta = 30$)
 Fig. 9 The comparison of the response characteristics with variable inertia ($\theta = 30$)

그림 10의 (c)는 피드포워드 적응제어기의 입력전류를 나타낸다. 관성증가에 따른 동작조건의 변화에 적응제어기가 위치오차와 속도정보를 받아들여 관성에 비례한 수정신호를 플랜트에 전달하여 안정적인 전류의 상태를 나타낸다.

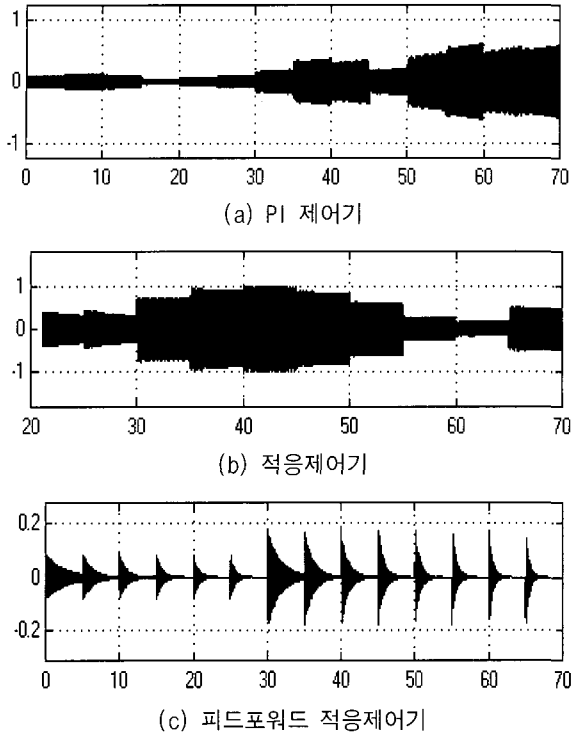


그림 10 제어기의 입력전류 파형
Fig. 10 Input current waveforms of controllers

5. 결 론

본 논문에서는 피드포워드와 기준모델과 적응제어를 도입하여 관성 변화에 일정한 시간응답 특성이 얻어지는 피드포워드 적응 PI제어기를 제안하였다. 관성의 변화에 따른 동작 조건의 변동에 피드포워드 적응제어기는 안정화 시간 및 오버슈트와 같은 설계기준을 만족시키는 기준모델을 사용하고, 적응 파라미터 $g(t)$ 는 위치의 오차 정보에 기준모델 속도정보를 받아들여 과도응답의 특성을 개선시켰다. 이 결과, PI 위치제어기 및 적응제어기보다 관성변화에 대해 응답특성이 매우 우수하게 나타났다.

참 고 문 헌

[1] 신은철, 공병구 김종선, 유지운, 박태식, 이준호, "관성 변동을 갖는 유도전동기 속도 제어기 설계", 전력전자학회 논문지, Vol. 6, No. 5, pp. 446~452, 2001.10.
[2] 이나영, 김경화, 윤명중, "외란 관측기를 이용한 영구자석 동기전동기의 비선형 속도 제어", 전력전자학회 논문지, Vol. 6, No. 2, pp. 149~157, 2001. 4.

[3] 고종선, 윤성구, "직접 구동용 BLDC 전동기의 정밀 Robust 위치제어 및 적응형 외란 관측기 연구", 전력전자학회논문지, Vol. 4, No. 2, pp. 138~143, 1999. 4.
[4] Rafael Kelly, "A linear-state feedback plus adaptive feed-forward control for dc servomotors", IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. IE-34, No. 2, pp. 153~157, May 1987.
[5] Hualin Tan, Jie Chang and Mark A. Chaffee, Rockwell Science Center, Rockwell Automation, "Practical motion control modeling and pi design", Proceedings of the American Control Conference, Chicago, Illinois. pp. 529~533, June 2000.
[6] Rafael Kelly and Javier Moreno, "Learning pid structures in an introductory course of automatic control", IEEE Transaction on education. Vol. 44, No. 4, pp. 373~376, November 2000.
[7] K.S. Narendra and L.S. Valavani, "Direct and indirect model reference adaptive control", Automatica, Vol. 15, pp. 653~664, 1979.

저 자 소 개



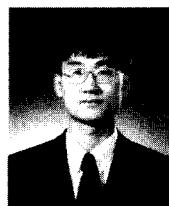
윤명하(尹明河)

1975년 2월 22일생. 2001년 위덕대 전자공학 학과 졸업. 2002년 동 대학원 정보전자공학 학과 석사과정.



최남열(崔男烈)

1971년 6월 24일생. 2002년 위덕대 전자공학 학과 졸업. 현재 동 대학원 정보전자공학과 석사과정.



이치환(李治煥)

1961년 8월 6일생. 1984년 영남대 전자공학 학과 졸업. 1994년 경북대 대학원 전자공학 학과 졸업(공박). 1991년~1998년 영남이공 대학 전기과 부교수. 1998년~현재 위덕대 정보전자공학부 부교수.