

강인한 다변수 모델 추종형 서보시스템의 구성에 관한 연구

황창선 최영규 이양우 최일섭*

부산대학교 공과대학 전기공학과

A design on robust multivariable model following servo system

C.S.Hwang Y.K.Choi Y.W.Lee I.S.Choi*

Dept. of Electrical Eng. Pusan National Univ.

Abstract

This paper considers the linear multivariable model following servo system synthesis method in which linear optimal regulator problem is used to design controllers that make the response of the plant should be kept close to a specified ideal response of the model. The characteristics of this system is that the constructed system is robust in the presence of the constant disturbances or the parameter perturbations of the plant. Especially, the steady state offset is excluded for the ramp response of the model by direct feedforward compensator from the reference input.

1. 서론

최근 정상상태에 있어서 제어량을 목표치에 일치시키는 출력제어의 조건을 만족하는 안정한 제어계를 설계하는 방법이 많이 제안되고 있고[1-4], 실제의 제어계 설계에 사용될 수 있는 유용한 결과가 많이 나타나게 되었다. 그러나 실제의 제어계 설계에 있어서는 제어계의 시간응답이 희망하는 특성이 되도록 설계할 필요가 있는 경우가 많이 있고 이러한 경우에 대하여 희망특성사항을 모델로서 선정하여두고 모델의 출력을 추종하도록 제어계를 설계하는 방법이 많이 제안되고 있다. [8].

한편 목표치발생기(command generator)를 사용하여 선형서보문제를 레귤레이터문제로 변환함으로써 제어계의 응답을 주어진 모델의 응답과 가능한한 가깝도록 제어계를 설계하는 방법이 제안되었으나 이 방법은 정상상태에서 편차가 생기게 된다[5]. 이것을 해결하기 위하여 모델의 계단응답에 정상편차없이 추종하는 선형제어계를 구성하는 방법이 제안되었다 [6]. 그러나 이 경우에 있어서도 외란과 제어대상의 파라메타변동 등에 대해서는 정상편차가 생기는 강인(robust)하지 못한 제어계의 구성이었다. 여기에 대하여 모델의 계단응답에 대한 강인한 제어계를 구성하는 방법이 제안 되었다[7].

본 논문에서는 기준입력이 일차형식으로 주어질 경우 플랜트의 응답이 모델의 응답에 최적으로 추종하도록 하는 제어계를 구성하였다. 일반적으로 시간에 따라 변하는 입력에 대하여 출력이 추종하기 위해서는 브레이크문제로서 풀어야하지만 본 방법에서는 선형레귤레이터 문제로 가져감으로써 문제를 단순화시켰다. 이 제어계의 특징은 플랜트에 인가되는 미지의 일정한 외란과 플랜트의 파라메타변동에 대해 강인할 뿐만 아니라 설계에 그다지 고려되지 않았던 영점도 포함시켜 종래의 것과 비교하여 과도특성을 많이 개선할 수 있었다.

2 모델추종형 서보시스템의 구성

주어지는 제어대상은 다음의 선형 다변수 시불변계로 한다.

$$\begin{cases} \dot{x}_p = A_p x_p + B_p u_p + E_p w \\ y_p = C_p x_p \end{cases} \quad (2-1)$$

여기서, $x_p \in R^n$, $u_p \in R^m$, $y_p \in R^r$, $w \in R^q$ 는 각각 제어대상의 상태벡터, 제어입력, 출력, 미지의 일정한 외란이다. 제어대상이 추종해야 할 모델의 상태방정식은 다음의 선형 다변수 시불변계로 기술되는 것으로 한다.

$$\begin{cases} \dot{x}_m = A_m x_m + B_m r(t) \\ y_m = C_m x_m \end{cases} \quad (2-2)$$

여기서, $x_m \in R^n$, $r \in R^r$, $y_m \in R^r$ 은 각각 모델의 상태벡터, 목표치로서 일차형식의 입력, 모델의 출력이고 모델은 가제어, 가관측으로 점근안정하다고 한다.

w 는 $t \geq 0$ 에서 상수이므로 미분하면 영이되고 $r(t)$ 는 일차형식의 입력이므로 미분하면 상수가 된다. 이때 플랜트의 출력과 모델의 출력의 차를 오차 e 로서 정의 한다.

$$e = y_m - y_p = C_m x_m - C_p x_p \quad (2-3)$$

플랜트와 모델에 대한 상태방정식을 미분하여 확대계를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{x}_m \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_p & 0 & 0 \\ 0 & A_m & 0 \\ -C_p & 0 & C_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_m \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{u}_p + \begin{bmatrix} 0 \\ B_m \\ 0 \end{bmatrix} \sigma \quad (2-4)$$

여기서, σ 는 상수이며 계단입력을 나타낸다.

여기서 (\cdot) 는 미분을 나타내고 A_m 의 고유치(σ_1)는 $\text{Re}(\sigma_1) < 0$ 을 만족한다. 다음으로 식(2-3)을 기초로한 평가함수를 다음과 같이 정의하고 이것을 최소화하는 최적 제어를 구한다.

$$J = \int_0^{\infty} (e^T Q e + \dot{u}_p^T R \dot{u}_p) dt \quad (2-5)$$

한편 평가함수 식(2-5)를 최소화시키는 u_p 에 의해 $t \rightarrow \infty$ 에서 출력 y_p 는 y_m 에 일치하게 되고 따라서 $t \rightarrow \infty$ 에서 \dot{y}_p 는 \dot{y}_m 에 일치하게 된다. 이것을 위해서는 일반적으로 플랜트에 정상조작량을 가해두는 것이 필요하다. 이 정상분을 \dot{u}_p 로 나타내며 이때에는 통상 채용되는 (2-5)의 평가함수보다는 다음의 평가함수가 더 자연스러울 것이다.

$$J = \int_0^{\infty} (e^T Q e + (\dot{u}_p - \ddot{u}_p)^T R (\dot{u}_p - \ddot{u}_p)) dt \quad (2-6)$$

여기서 \ddot{u}_p 의 값은 식(2-4)에서 플랜트 및 모델의 정상 상태방정식 및 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{y}_m(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{y}_p(t)$ 의 식, 즉

$$\begin{aligned} A_p \dot{\hat{x}}_p + B_p \dot{\hat{u}}_p &= 0 & (2-7a) \\ A_m \dot{\hat{x}}_m + B_m \sigma &= 0 & (2-7b) \\ C_m \dot{\hat{x}}_m - C_p \dot{\hat{x}}_p &= 0 & (2-7c) \end{aligned}$$

을 만족하는 것이 필요하다. 여기서 \hat{x}_p , \hat{x}_m 는 입력이 0 일 경우 x_p , x_m 의 정상상태의 값을 나타내고 이것들은 최적해를 구하기 위해 중요한 파라메타가 된다. 단 σ 는 상수이다. 다음의 식(2-8)로부터 \hat{x}_p , \hat{x}_m , \hat{u}_p 를 구한다.

$$\begin{bmatrix} A_p & 0 & B_p \\ 0 & A_m & 0 \\ -C_p & 0 & C_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_p \\ \hat{x}_m \\ \hat{u}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -B_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

여기서, \hat{x}_p , \hat{x}_m , \hat{u}_p 는 입력이 단위계단일 경우의 정상상태의 값이다. 즉,

$$\hat{x}_p = \sigma \hat{x}_p, \quad \hat{x}_m = \sigma \hat{x}_m, \quad \hat{u}_p = \sigma \hat{u}_p \quad (2-9)$$

이다. 식(2-4)에 정상상태의 값을 고려하면 다음의 식(2-10)으로 된다.

$$X = \bar{A}X + \bar{B}v \quad (2-10)$$

$$\text{여기서, } \bar{A} = \begin{bmatrix} A_p & 0 & 0 \\ 0 & A_m & 0 \\ -C_p & 0 & C_m \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} \hat{x}_p - \hat{x}_p \\ \hat{x}_m - \hat{x}_m \\ e \end{bmatrix}, \quad v = \hat{u}_p - \hat{u}_p$$

식(2-10)에 대한 평가함수를 다음과 같이 정의 함으로써 레귤레이터문제로서 가져갈 수 있게 된다.

$$J = \int (X^T Q X + v^T R v) dt \quad (2-11)$$

$$\text{여기서, } \bar{Q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q \end{bmatrix}, \quad R = 1$$

이다. 레귤레이터문제에 의해서 평가함수식(2-11)을 최소화하는 최적제어는

$$v^* = -R^{-1} \bar{B}^T P X \quad (2-12)$$

로서 주어진다. 여기서 P는 다음과 같은 식(2-13)의 정상상태 Matrix Riccati 방정식의 해이다.

$$P \bar{A} + \bar{A}^T P - P \bar{B} R^{-1} \bar{B}^T P + \bar{Q} = 0 \quad (2-13)$$

$$\text{여기서, } \bar{A} = \begin{bmatrix} A_p & 0 & 0 \\ 0 & A_m & 0 \\ -C_p & 0 & C_m \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{12}^T & P_{22} & P_{23} \\ P_{13}^T & P_{23}^T & P_{33} \end{bmatrix}$$

식(2-10)와 식(2-12) 및 식(2-13)에 의해

$$v^* = \hat{u}_p - \hat{u}_p = -R^{-1} \{ B_p^T P_{11} (\hat{x}_p - \hat{x}_p) + B_p^T P_{12} (\hat{x}_m - \hat{x}_m) + B_p^T P_{13} e \} \quad (2-14)$$

$$\hat{u}_p^* = (\hat{u}_p + R^{-1} B_p^T P_{11} \hat{x}_p + R^{-1} B_p^T P_{12} \hat{x}_m) - R^{-1} B_p^T P_{11} \hat{x}_p - R^{-1} B_p^T P_{12} \hat{x}_m - R^{-1} B_p^T P_{13} e \quad (2-15)$$

$$= (\hat{u}_p + R^{-1} B_p^T P_{11} \hat{x}_p + R^{-1} B_p^T P_{12} \hat{x}_m) \sigma - R^{-1} B_p^T P_{11} \hat{x}_p - R^{-1} B_p^T P_{12} \hat{x}_m - R^{-1} B_p^T P_{13} e \quad (2-16)$$

으로 된다.

$$\text{여기서 } K_1 = \hat{u}_p + R^{-1} B_p^T P_{11} \hat{x}_p + R^{-1} B_p^T P_{12} \hat{x}_m$$

$$K_2 = -R^{-1} B_p^T P_{11} \quad (2-17)$$

$$K_3 = -R^{-1} B_p^T P_{12}$$

$$K_4 = -R^{-1} B_p^T P_{13}$$

로 등으로써

$$\hat{u}_p^* = K_1 \sigma + K_2 \hat{x}_p + K_3 \hat{x}_m + K_4 e \quad (2-18)$$

로 되고, 식(2-18)을 적분함으로써 평가함수 식(2-11)을 최소화하는 최적제어는 다음과 같다.

$$u_p^* = K_1 \sigma / (dt + C_0) + K_2 x_p + K_3 x_m + K_4 / (ed t + C_1) \quad (2-19)$$

이상에서 얻어진 결과를 이용해서 플랜트가 주어질 때 적분기의 초기치 C_0 , C_1 을 영으로한 경우의 제어계의 구성을 그림 1에 나타내었다.

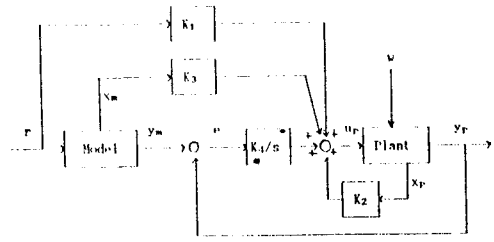


그림 1. 모델 추종형 서보시스템의 구성

설계절차는 다음과 같다.

- 단계 1 : 요구하는 특성에 맞추도록 모델을 선정한다.
- 단계 2 : 플랜트와 모델에 대한 확대계를 구한다.
- 단계 3 : 식(2-8)을 풀어서 \hat{x}_p , \hat{x}_m , \hat{u}_p 를 구한다.
- 단계 4 : 적당한 Q와 R을 선택한다.
- 단계 5 : 식(2-13)의 정상상태 Riccati 방정식을 푼다.
- 단계 6 : 이상에서 구한 수치를 식(2-19)에 대입 해서 최적조작량 u_p^* 를 결정한다.
- 단계 7 : 구성된 제어계를 시뮬레이션하고 필요하면 Q, R 혹은 모델을 다시 선정하여 단계 5 이하를 반복한다.

일반적으로 말해서 Q/R의 비율 크게하면 $y_p(t)$ 는 $y_m(t)$ 에 보다 접근하지만 과도상태에서의 조작량의 절대치는 증가한다. 따라서 단계 7에서 시뮬레이션의 결과 과대조작량이 요구될 경우는 Q/R의 비율 감소시킨다. 또 Q/R의 비율 적당히 작게 선택해도 $y_p(t)$ 와 $y_m(t)$ 간에 만족할수 있는 정도의 일치가 일어나지 않는 경우는 모델이 플랜트에 부적당하므로 희망특성사항을 고쳐서 모델을 재선정할 필요가 있다. 여하한 Q/R 혹은 모델의 선정은 취급하는 개개의 문제에 대응해서 논의되어야 할 성질의 것이고 시행착오적 수법은 피하지 못할 것이다.

3. 모델추종형 서보시스템의 특징

본 절에서는 2절에서 구성한 시스템이 플랜트의 파라메타변동 및 미지의 일정한 외란이 존재할 경우에 있어서 $t \rightarrow \infty$ 에서 플랜트의 출력 $y_p(t)$ 가 모델의 출력 $y_m(t)$ 에 정상편차없이 추종하는 강인한 시스템임을 증명하고자 한다.

식(2-12)와 식(2-13) 및 식(2-19)에서 만들어지는 제어규칙을 기초로한 페루프제는

$$z = K_4 / e \quad dt$$

로 등으로써,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_p + B_p K_2 & B_p \\ -K_4 C_p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_p K_3 \\ K_4 C_m \end{bmatrix} x_m + \begin{bmatrix} B_p K_1 \\ 0 \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} E_p \\ 0 \end{bmatrix} w \quad (3-1)$$

로 나타내게 된다. 이때 식(3-1)에서 주어지는 페루프계에서는 일차형식의 입력에 대하여 플랜트의 파라메타 변동 및 일정한 외란 w가 존재할 때에도 정상상태에서 모델의 출력과 플랜트의 출력이 일치함을 보인다.

1) 계단응답 $Y_p(s)$ 는 행렬의 기본연산으로 부터

$$Y_p(s) = \{ (sI + C_p (sI - A_p - B_p K_2, N)^{-1} B_p K_4, N)^{-1} C_p (sI - A_p - B_p K_2, N)^{-1} B_p K_4, N C_m (sI - A_m)^{-1} B_m + (sI + C_p (sI - A_p - B_p K_2, N)^{-1} B_p K_4, N)^{-1} C_p (sI - A_p - B_p K_2, N)^{-1} s (B_p K_3, N (sI - A_m)^{-1} B_m + B_p K_1, N) (r_0/s) + (sI + C_p (sI - A_p - B_p K_2, N)^{-1} B_p K_4, N)^{-1} C_p (sI - A_p - B_p K_2, N)^{-1} E_p w \} \quad (3-2)$$

가 된다.

여기서, s는 라플라스 연산자를 나타내고, w_0 , r_0 는 각각 외란, 목표입력의 초기치를 나타낸다. 식(3-2)에 최종지정리를 사용하면

$$y_p(\infty) = (C_p(-A_p - B_p K_2, N)^{-1} B_p K_4, N)^{-1} C_p (-A_p - B_p K_2, N)^{-1} B_p K_4, N C_m (-A_m)^{-1} B_m r_0 \quad (3-3)$$

$$= C_m (-A_m)^{-1} B_m r_0 \quad (3-4)$$

로 된다. 이것은 식(2-2)를 라플라스변환하여 최종치정리를 사용하였을 경우와 일치한다. 여기서, N는 공칭치에 기초하여 설계된 값을 나타낸다. 따라서 2절에서 구성한 계에서는 플랜트의 파라미터변동 및 일정한 외란이 있을 경우에도 플랜트의 출력이 모델의 계단응답에 정상편차없이 추종함을 알 수 있다. 다음으로 모델의 램프응답에 대한 결과를 살펴본다.

2) 램프응답 $Y_p(s)$ 는

$$Y_p(s) = [\{ (sI + C_p(sI - A_p - B_p K_2, N)^{-1} B_p K_4, N)^{-1} C_p (sI - A_p - B_p K_2, N)^{-1} B_p K_4, N C_m (sI - A_m)^{-1} B_m + (sI + C_p(sI - A_p - B_p K_2, N)^{-1} B_p K_4, N)^{-1} C_p (sI - A_p - B_p K_2, N)^{-1} s (B_p K_3, N (sI - A_m)^{-1} B_m + B_p K_1, N) \} r_0 + s^2 (sI + C_p(sI - A_p - B_p K_2, N)^{-1} B_p K_4, N)^{-1} C_p (sI - A_p - B_p K_2, N)^{-1} E_p w_0 \} / (1/s^2)] \quad (3-5)$$

이고, 모델의 램프응답 $Y_m(s)$ 는

$$Y_m(s) = C_m (sI - A_m)^{-1} B_m r_0 / (1/s^2) = M(s) / (1/s^2) \quad (3-6)$$

이다. 식(3-5)에서는 최종치정리를 바로 적용할 수 없으므로 다음과 같은 방법을 사용하여 최종치정리를 적용한다. 식(2-3)으로부터 $e(t) = y_m(t) - y_p(t)$ 이므로 라플라스변환하면

$$E(s) = Y_m(s) - Y_p(s) \quad (3-7)$$

로 된다. 여기서 $M(s) - N(s)$ 를 $F(s)$ 라 두면

$$E(s) = F(s) / (1/s^2) \quad (3-8)$$

이 된다. $t \rightarrow \infty$ 일때

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) \quad (3-9)$$

이 되고 식(3-8)에 식(3-7)을 대입하면

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = F(s) / s |_{s=0} \quad (3-10)$$

이 된다. $F(0) = 0$ 이므로

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = dF(s)/ds |_{s=0} = 0 \quad (3-11)$$

으로 되며 따라서 정상상태에서 y_p 가 y_m 에 일치한다. 여기서 중요한 사항은 모델의 램프응답에 대해 정상편차가 생기지 않기 위해서는 입력으로부터의 미이드프워드 보상이 필요하다라는 사실이다. 식(3-10)으로부터 2절에서 구성한 계에서는 플랜트의 파라미터변동 및 일정한 외란이 있을 경우에도 확실히 편차는 생기지 않고 모델의 램프응답에 일치함을 알 수 있다.

5. 컴퓨터 시뮬레이션

참고논문[6]의 예제를 통하여 본 방법의 타당성을 보인다. 참고논문[6]의 방법에서는 일정한 외란하에서 정상편차가 생기지만 그 영향을 제거하는 것을 보이기 위하여 일정한 외란을 세로이 인가한 시스템에 대하여 생각한다.

플랜트는

$$\dot{x}_p = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1 & 2 & 1.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -10 & -10 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -10 & 0 \end{bmatrix} x_p + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 10 \\ 0 \end{bmatrix} u_p + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 10 \end{bmatrix} w \quad (4-1)$$

$$y_p = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] x_p$$

로서 주어지고 전달함수를 구해보면 다음과 같다.

$$G_p(s) = \frac{75(s+4)}{s(s+0.1)(s^2+10s+30)(s+10)} \quad (4-2)$$

모델은 램프계에 대해 정상편차가 없는 ITAE표준함수를 채택하였으며 다음의 상태방정식으로 주어진다.

$$\dot{x}_m = \begin{bmatrix} -1.75 & -3.25 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x_m + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} r \quad (4-3)$$

$$y_m = [0 \ 3.25 \ 1] x_m$$

식(4-3)에 대한 전달함수는 다음과 같다.

$$G_m(s) = \frac{3.25w_n^2 s + w_n^3}{s^3 + 1.75w_n s^2 + 3.25w_n^2 s + w_n^3}, w_n=1 \quad (4-4)$$

평가함수는

$$J = \int (e^T Q e + v^T R v) dt \quad (4-5)$$

이며 여기서 $v = \dot{u}_p - \ddot{u}_p$, $R = 1$ 이다.

최적제어규칙은

$$u_p^* = K_1 r(t) + K_2 x_p(t) + K_3 x_m(t) + K_4 \int e dt \quad (4-6)$$

로서 주어지고, $Q=10, 100, 1000$ 에 대한 계산 및 시뮬레이션 결과를 Table 1에 각 Q 에 대한 K_1, K_2, K_3, K_4 의 값을 나타내었다.

Q	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄
10	3.2791	-4.5993 -0.3154 -0.2839	-1.5181 -0.3243	3.7224 7.5829 1.6207
100	4.9502	-11.1504 -0.5190 -0.4210	-3.0113 -0.5096	9.3270 23.2114 8.2002
1000	6.8173	-25.8615 -0.8679 -0.6202	-5.1630 -0.8125	21.6920 71.4526 19.0442

표 1. 각 하중에 대한 제어입력의 이득값

그림 2와 그림 3은 각각 $Q=10, 100, 1000$ 에 대해 일정한 외란 $w=-1$ 이 존재할 경우 램프 및 계단입력에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 그림으로부터 Q 의 값이 증가함에 따라 플랜트의 출력이 모델의 응답에 더욱 가까워짐을 알 수 있다. 그러나 그림 4와 그림 5로부터 Q 의 값이 증가함에 따라 큰 제어량이 요구됨을 알 수 있다.

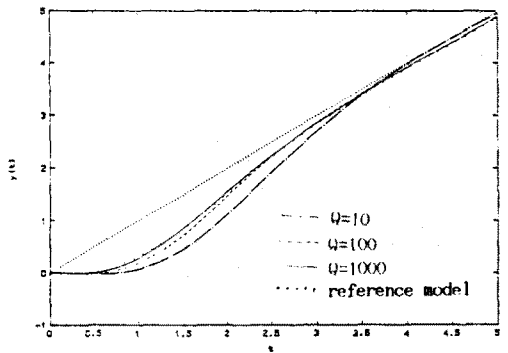


그림 2. 외란의 영향하에서 램프입력에 대한 출력

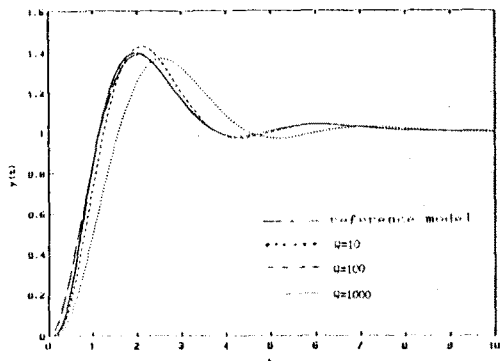


그림 3. 외란의 영향하에서 스텝입력에 대한 출력

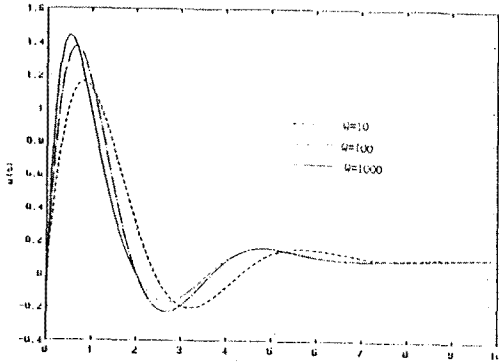


그림 4. 램프응답에 대한 제어입력

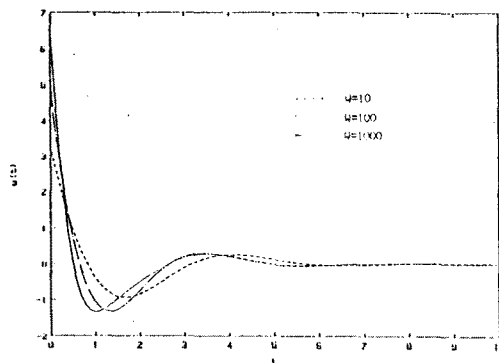


그림 5. 계단응답에 대한 제어입력

그림 6은 램프와 계단으로 구성된 입력에 대하여 Q가 10, 100, 1000일 경우의 출력 결과를 비교한 그림이다.

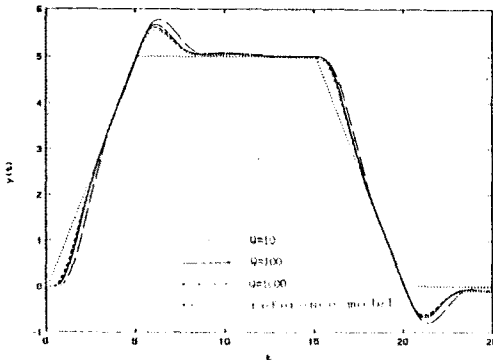


그림 6. 각 하중에 따른 주어진 입력에 대한 출력

5. 결론

본 논문에서는 정상상태에서 모델의 출력과 플랜트의 출력이 일치해야 한다는 제약을 부가하여 레귤레이터문제로 변환함으로써 모델의 응답에 최적으로 추종하는 제어계를 구성하였다. 또한 트래킹문제를 레귤레이터문제로 변환함으로써 비교적 간단히 시스템을 구성할 수 있었다. 본 방법에서는 입력으로부터의 피드포워드보상에 의해 램프응답에 대해 정상편차가 생겨나지 않음을 알 수 있었다. 또한 플랜트의 파라미터변동과 지속외란에 대해서도 정상편차가 생기지 않는 강인한 제어계를 구성하였다.

참고논문

- [1]. C.D. Johnson, Optimal of the Linear Regulator with Constant Disturbances, IEEE Trans, AC-13-6, 416/421 (1968).
- [2]. E.J. Davison, et. al, Pole Assignment in Linear Time-Invariant Multivariable Systems with Constant Disturbances, Automatica, 7-5, 489/498 (1971).
- [3]. E.J. Davison, The Robust Control of a Servomechanism Problem for Linear Time-Invariant Multivariable Systems, IEEE, AC-21-1, 25/34 (1976).
- [4]. B.A. Francis. et al, The Internal Model Principle for Linear Multivariable Regulators, App. Math. & Opt. 1. 1. 64/86 (1974).
- [5]. E. Kreindler, On the Linear Optimal Servo Problem, Int. J. of Control, 8-4, 465/472 (1969).
- [6]. Ichiro Suga, Linear Control System Optimally Following Model Step Response, Trans. of Society of Insyrumnt and Control Engineers, 6-2, 175/181 (1970).
- [7]. Katsuhisa Furuta and Katsumi Komiya, Synthesis of Model Following Servo Controller for Multivariable Linear System, Trans. of Society of Insyrumnt and Control Engineers, Vol.18, No.12, pp.8-14 (1981).
- [8]. J.S. Tyler, Jr., The Characteristics of Model Following Systems as Synthesized by Optimal Control, IEEE Trans, Vol. AC 9, 485/498, (1964).
- [9]. E.J. Davison, The Output Control of Linear Time-Invariant Multivariable Systems with unmesurable Arbitrary disturbances, IEEE Trans, Vol. AC-17, pp.621/630, Oct. (1972).
- [10]. E.J. Davison, The Design of Controllers for the Multivariable Robust Servomechanism Problem Using Parameter Optimization methods IEEE Trans, Vol. AC-26. No. 1, pp.93 /110. Feb. (1981).