

2관성 공진계를 갖는 유도 전동기의 부분적인 상태 보상을 이용한 H_∞ 제어

강석진, 김진수, 김영석
인하대학교 전기공학과

Partial state feedback H_∞ control of the two-mass resonant system having IM

Seok-Jin Kang, Jin-Soo Kim, Young-Seok Kim
Dept. of Electrical Engineering Inha University

Abstract

In the industrial motor drive systems, a torsional vibration is often generated because of the elastic elements in torque transmission. One of general methods for this system is H_∞ controller to suppress the torsional vibration and reject the torque disturbance. Moreover, the two-degrees-of-freedom controller, which includes the H_∞ controller, is designed in order to improve the command following property. In this paper, we propose a new H_∞ controller with partial state feedback. This method having simple structure satisfies with the fast command following property and the attenuation of disturbances and vibrations simultaneously, just like the complicated TDOF H_∞ controller.

1. 서론

전동기 가변속제어에서 전동기와 부하가 강성이 작은 축으로 연결되는 경우 전동기의 관성과 부하의 관성에 의해 축에 비틀림진동이 발생한다. 이와 같이 구성된 기계계를 2관성 공진계라고 한다.

산업용 로봇, 전기자동차의 구동부, 철강플랜트의 압연기 구동계, 엘리베이터 등과 같은 전동기와 부하가 강성이 작은 축으로 연결되어 있는

2관성 공진계의 경우에 있어서는 시스템의 기계적 공진 주파수가 낮기 때문에 종래의 PI속도 제어로 제어하려고 하면 속도제어의 응답에서 축비틀림 진동이 발생되어 제어하기가 어렵고 심한 경우 축이 손상되는 등의 문제가 발생된다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 최근에는 외란 관측기를 이용하는 방법, 공진비제어에 의한 방법, 관측기나 필터를 사용하여 상태변수를 추정하고 상태제환하여 제어하는 방법, H_∞ 제어나 μ 제어 등의 Robust제어방법 등이 연구되어지고 있다[1~3].

이와 같은 연구 중에서 외란·진동억제성능을 나타내는 H_∞ 제어를 중심으로 한 Robust제어의 연구가 활발하다. 그러나, H_∞ 제어의 경우 목표치추종성능이 과도응답으로 인해 나빠진다. 이러한 목표치추종성능을 개선하기 위해 기존에 2자유도제어기가 추가된 형태가 있지만 제어기 구조가 복잡하게 되는 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 복잡함을 개선한 부분적인 상태보상을 갖는 H_∞ 제어를 제안한다. 그리고 제안된 H_∞ 제어가 간단하면서도 목표치추종성능과 외란·진동억제에서 2자유도제어를 갖는 H_∞ 제어와 동등하게 좋은 성능을 가짐을 시뮬레이션을 통해 확인한다.

2. 2관성 공진계

강성이 작은 축에 의해 전동기와 부하가 연결

된 2관성 공진계(이하 2관성계)는 그림 1과 같다.

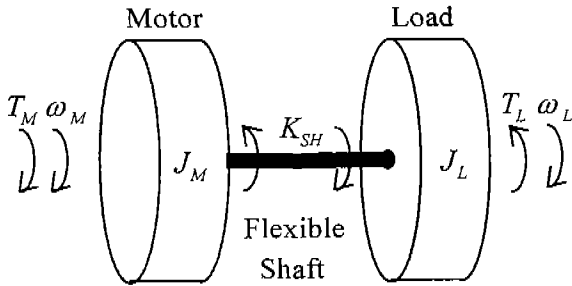


그림 1 2관성계 플랜트 모델

2관성계의 상태방정식은 다음 식과 같다.

$$\dot{x} = A_p x + B_p T_M + B_d T_L, \quad \dot{y} = C_p x \quad (1)$$

여기에서

$$x = \begin{pmatrix} \omega_M \\ T_{SH} \\ \omega_L \end{pmatrix}, \quad A_p = \begin{pmatrix} -\frac{B_M}{J_M} & -\frac{1}{J_M} & 0 \\ K_{SH} & 0 & -K_{SH} \\ 0 & \frac{1}{J_L} & -\frac{B_L}{J_L} \end{pmatrix}$$

$$B_p = \begin{pmatrix} \frac{1}{J_M} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad B_d = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{J_L} \end{pmatrix}, \quad C_p = (1 \ 0 \ 0)$$

- 단, J_M, J_L : 전동기, 부하관성모멘트
 B_M, B_L : 전동기, 부하감쇠계수
 K_{SH} : 축비틀림상수
 ω_M, ω_L : 전동기, 부하속도
 T_M, T_{SH}, T_L : 전동기발생토크, 축비틀림토크, 부하외란토크

이와같은 2관성계의 제어량은 부하속도 ω_L 이지만 관측 불가능하므로 관측 가능한 전동기속도 ω_M 을 제어하여 축비틀림진동을 억제한다.

3. H_∞ 제어 일반화 플랜트

2관성계에 대하여 H_∞ 제어이론을 적용하기 위하여 그림 2와 같이 일반화플랜트를 설정한다.

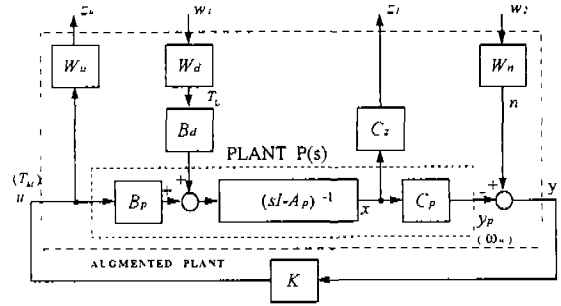


그림 2 H_∞ 제어 일반화플랜트

그림 2에 있어서 w_1, w_2 는 각각 외란과 지령치에 대한 입력이고, z_1, z_2 는 출력이다. 이 때 z_1 은 다음과 같다.

$$z_1 = \begin{pmatrix} z_{11} \\ z_{12} \\ z_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_M \\ \omega_M - \omega_L \\ \omega_L \end{pmatrix}, \quad C_z = \begin{pmatrix} C_p \\ C_l \\ C_l \end{pmatrix} \quad (2)$$

T_L 은 외란토크, n 은 속도지령치, W_d 와 W_n 은 이를 위한 가중함수이다. 가중함수를 $W_d = \begin{pmatrix} A_{wd} & B_{wd} \\ C_{wd} & D_{wd} \end{pmatrix}$, $W_n = \begin{pmatrix} A_{wn} & B_{wn} \\ C_{wn} & D_{wn} \end{pmatrix}$, $W_u = D_{wu}$ (3)

로 정의하면, 그림 2의 일반화플랜트의 상태공간 표현과 입력과 출력의 관계 G 는 다음 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & 0 & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \\ u \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$G := \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & 0 & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_p & 0 & B_d C_{wd} & 0 & B_d D_{wd} & B_p \\ 0 & A_{wn} & 0 & B_{wn} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{wd} & 0 & B_{wd} & 0 \\ C_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{wu} \\ -C_p & C_{wn} & 0 & D_{wn} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

이와같은 식 G 는 가중함수 W_d, W_n, W_u 를 적절히 선택한 후 Matlab을 이용하여 제어기 K 를 구한다.

그림 4는 2자유도 속도제어계를 나타낸다. 그림 4에서와 같이 2자유도제어기는 H_∞ 제어기 $K(s)$ 를 포함하는 구조로 H_∞ 제어기에서 발생하는 목표치응답특성에서의 과도한 오버슈트를 저감시킨다. 2자유도제어기 $C(s)$ 는 다음 식과 같이 2 입력, 1 출력계로 된다.

$$T_M = C(s) \begin{bmatrix} \omega^* \\ \omega_M \end{bmatrix} = [(KC_A + C_B) - K] \begin{bmatrix} \omega^* \\ \omega_M \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서

$$C_A(s) = G_m(s), C_B(s) = P(s)^{-1}G_m(s) \quad (9)$$

$$P(s) = g_z(s)/g_p(s) : T_M \text{부터 } \omega_M \text{까지의 전달함수}$$

로 놓으면 속도지령에서 전동기속도까지의 전달함수는 규범모델 $G_m(s)$ 와 일치한다. $G_m(s)$ 는 (1) $P(s)^{-1}G_m(s)$ 가 안정이고 proper로 되고, (2) $G_m(0) = 1$ 을 만족하도록 선택한다. $G_m(s)$ 를 2관성계 $P(s)$ 의 허축에 가까운 극을 실축상으로 극배치한 (10)식으로 놓으면 속도지령으로부터 부하속도까지의 전달함수 $G_{Lr}(s)$ 는 (11)식으로 된다.

$$G_m(s) = \frac{\omega_m^4 g_z(s)}{(s^2 + 2\zeta_m \omega_m s + \omega_m^2)^2} \quad (10)$$

$$G_{Lr}(s) = \frac{\omega_m^4}{(s^2 + 2\zeta_m \omega_m s + \omega_m^2)^2} \quad (11)$$

따라서, 부하속도의 응답특성은 ω_m 과 ζ_m 으로 결정되고 제어기 K 와 기계계정수에 의존하지 않

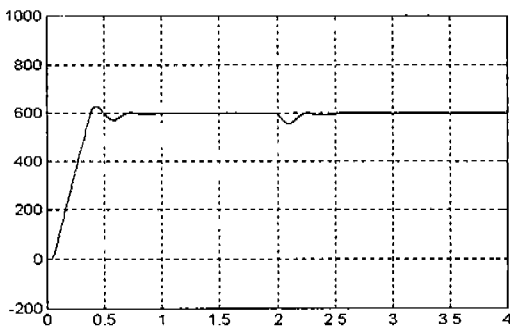


그림 5 2자유도제어 응답특성
($\omega_m=16.5$, $\zeta_m=0.9$, 2초에서 100%부하의 외란인가)

는다.

그림 5에 2자유도제어기 $C(s)$ 로 제어하는 경우 속도지령의 스텝변화에 대한 부하속도의 축비틀림진동과 오버슈트가 없는 양호한 목표치응답특성을 나타낸다.

6. 부분적인 상태보상을 갖는 H_∞ 제어기

앞에서 H_∞ 제어기 $K(s)$ 에 의한 응답특성 중에서 목표치응답특성에서 과도한 오버슈트가 발생하는 것을 저감시키기 위하여 2자유도 개념을 기술했다. 그러나 이와 같은 2자유도 제어기설계의 어려움과 제어기자체가 복잡해지는 단점이 있어 실제로 구현시 많은 연산량이 요구되어진다.

그러므로 이러한 단점을 해결하기 위해 측정될 수 있는 상태변수를 피드백하여 보상함으로써 목표치응답특성 뿐만 아니라 외란에도 보다 강하게 할 수 있는 제어기를 제안한다.

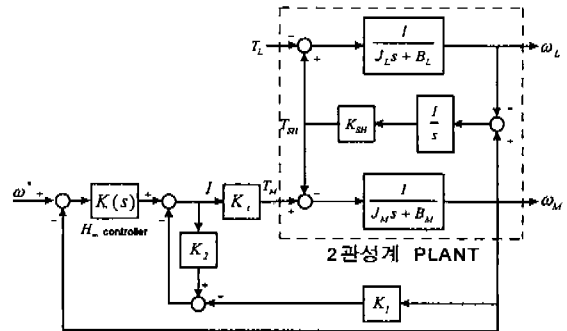


그림 6 부분적인 상태보상을 갖는 H_∞ 제어기

그림 6은 기존의 H_∞ 제어에 측정되어지는 상태변수인 전류 I 와 전동기속도 ω_M 을 피드백하여 minor 루우프를 구성한 형태이다. 이러한 페 루우프를 형성함으로써 전체의 특성방정식에 영향을 미치므로 2자유도제어기보다는 설계시 자유도가 제한되는 단점이 있다.

그러나 K_1 , K_2 는 상수 계인이므로 2자유도 제어기보다 연산량이 대략 절반으로 줄어드는 효과를 얻을 수 있다.

그림 7은 부분적인 상태보상을 갖는 H_∞ 제어기로 제어하는 경우 2자유도제어기 $C(s)$ 와 마찬가지로 속도지령의 스텝변화에 대한 부하속도의 축비틀림진동과 오버슈트가 없는 양호한 목

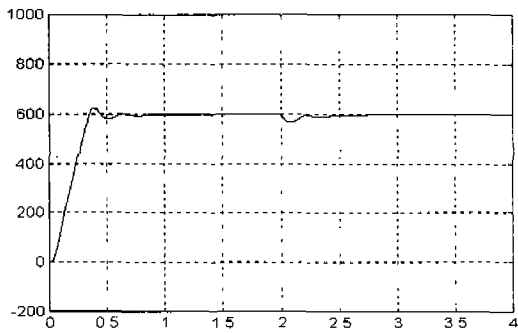


그림 7 부분적인 상태보상을 갖는 H_∞ 제어 응답특성 ($K_1=0.7$, $K_2=0.1$, 2초에서 100%부하의 외란인가)

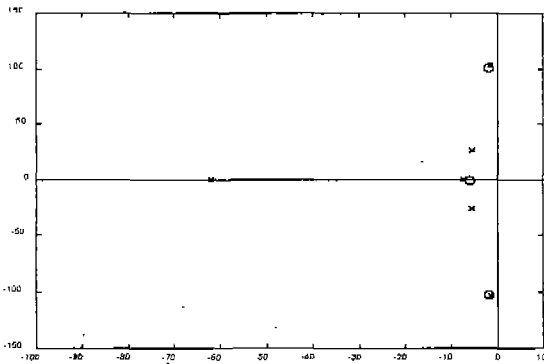


그림 8 ω^* 에서 ω_L 의 전달함수의 Pole-Zero map(H_∞ 제어기)

표치응답특성을 나타낸다.

그림 8은 그림 6에서 부분적인 상태보상이 없는 즉, 블록선도에서 K_1 과 K_2 가 없는 경우 속도지령치 ω^* 에서 실제부하속도 ω_L 까지의 전달함수의 Pole과 Zero를 나타낸 것이다. 2관성계 시스템의 공진주파수 근처에 Zero를 위치시킴으로써 견실성을 증대하나 Dominant Pole이 허축에 가까이 존재하여 불안정해질 수 있고 오버슈트가 나타날 수 있음을 알 수 있다. 따라서 목표치응답속도가 느려진다.

반면, 그림 9는 그림 6에서 부분적인 상태보상이 있는 속도지령치 ω^* 에서 실제부하속도 ω_L 까지의 전달함수의 Pole과 Zero를 나타낸 것이다. 그림 8과 비교시 현저하게 변화된 것은 허축상의 Dominant Pole이 왼쪽으로 이동함으로써 Damping ratio가 크게 개선되어 오버슈트가 없어지고 따라서 응답속도도 향상됨을 추정할 수 있다.

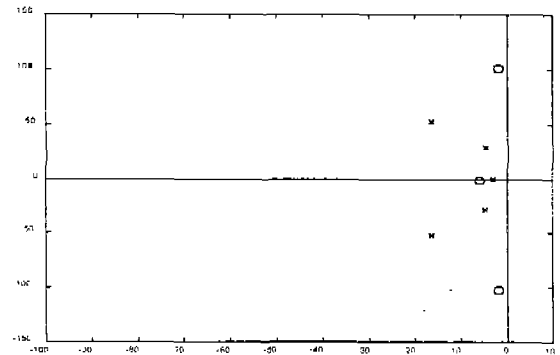


그림 9 ω^* 에서 ω_L 의 전달함수의 Pole-Zero map (부분적인 상태보상+ H_∞ 제어기)

7. 결론

본 논문에서는 2관성 공진계를 갖는 유도전동기의 부분적인 상태보상을 갖는 H_∞ 제어기를 제안하였다. 2관성계에서 측정가능한 상태량인 전류 I 와 진동기속도 ω_M 을 보상함으로써 제안된 제어기는 간단하면서도 목표치추종성능과 외란·진동억제에서 2자유도제어를 갖는 H_∞ 제어와 동등하게 좋은 성능을 가짐을 시뮬레이션으로 확인했고 그 타당성을 Pole-Zero map으로 검토했다.

이 연구는 1995년도 한국과학재단 연구비지원에 의한 결과임(과제번호:951-0912-098-2)

8. 참고문헌

- [1] 結城和明 外 2人, “共振比制御による2慣性共振系の振動抑制制御”, 日本電氣學會論文誌, Vol.113-D, No. 13, pp. 1162~1169, 1993
- [2] 杉林 道彦 外 2人, “2慣性共振系の状態フィードバックによる振動抑制制御とパラメータ變動を考慮した制御特性”, 日本電氣學會 産業應用部門全國大會, pp. 843~848, 1993
- [3] Jun-Keun Ji et. al., “LQG Based Speed Controller for Torsional Vibration Suppression in 2-Mass Motor Drive System”, IEEE IECON, Vol. 2, pp. 1157~1162, 1994