

공진비제어를 갖는 2관성계의 H_{∞} 제어

김 진 수^o, 김 승 범^o, 김 현 중^{*}, 김 영 석^{*}
인하대학교 전기공학과, 유한전문대학 제어계측과^{*}

H_∞ Control of Two-Mass System with Resonance Ratio Control

Jin-Soo Kim^o, Seoung-Beom Kim, Hyun-Jung Kim^{*}, Young-Seok Kim
Inha University, Yuhan Junior College^{*}

Abstract

In the industrial motor drive systems, a shaft torsional vibration is often generated when a motor and a load are connected with a flexible shaft. This paper treats the vibration suppression control of this system. The resonance ratio control is proposed for suppressing the torsional vibration. In this paper, first, the optimal resonance ratio is selected and the controller to the resonance ratio controlled outward plant is designed based on H_∞ control theory. Secondly, the two-degree-of-freedom controller, which includes the above H_∞ controller, is designed in order to improve the tracking characteristics for the commanded speed. The control performances are examined by the computer simulations and it is clarified that the proposed speed control system is useful for two-mass system.

1. 서론

전동기 가변속제어에 있어서 전동기와 부하가 강성이 작은 축으로 연결되는 경우 전동기의 관성과 부하의 관성에 의해 축에 비틀림진동이 발생한다. 이와 같이 구성된 기계계를 2관성계라고 부른다. 2관성계의 비틀림진동을 억제하는 제어법으로서 공진비제어가 제안되고 있지만, 전동기와 부하의 관성비에 따라서 외란의 암특성이 충분하지 않은 경우가 있다^[1]. 이 제어법은 축비틀림토오크의 피드백에 의하여 2관성계의 외관상의 플랜트의 관성비를 조정하는 것이다. 본 논문에서는 공진비제어를 갖는 외관상의 플랜트에 대하여 H_∞ 제어이론을 사용하여 제어기를 설계한다. H_∞ 제어이론을 적용하는 경우 일반화플랜트의 설정과 가중함수의 선택이 중요하지만 가중함수의 결정은 시행착오적으로 행하는 경우가 많다^[2]. 본 논문에서는 축비틀림진동이 발생하지 않는 1관성계의 전달함수의 개인특성에 따라 가중함수를 설정하고 있다.

H_∞ 제어기를 사용한 1자유도제어기에서는 외란의 암 및 목표치응답특성을 동시에 만족시키는 것이 곤란하다^[3]. 그래서 본 논문에서는 공진비제어를 갖는 H_∞ 제어기에 목표치필터와 목표치에서의 피드포워드항을 추가한 2자유도 H_∞ 제어기를 제안한다. 2자유도 개념을 사용함으로서 목표치추종특성은 외란의 암특성과 독립하여 자유롭게 설정할 수 있다^[4]. 시뮬레이션에 의하여 제안한 제어기의 특성을 검토하고 그의 유효성을 확인하였다.

2. 2관성계

강성이 작은 축에 의해 전동기와 부하가 연결된 2관성계 시스템은 그림 1과 같이 되고 그 블럭선도는 그림 2와 같이 구성된다.

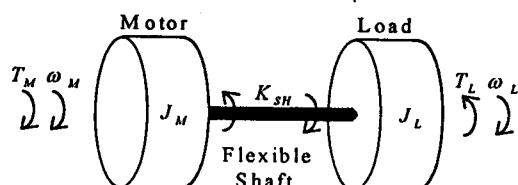


그림 1 2관성계 플랜트 모델

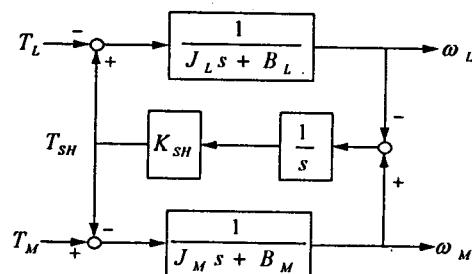


그림 2 2관성계 블럭선도

2관성계의 상태방정식은 다음 식과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_M \\ \dot{\omega}_L \\ \dot{T}_{SH} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B_M}{J_M} & 0 & -\frac{1}{J_M} \\ 0 & -\frac{B_L}{J_L} & \frac{1}{J_L} \\ K_{SH} & -K_{SH} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_M \\ \omega_L \\ T_{SH} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_M} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_M \\ T_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

단, J_M, J_L : 전동기 관성 0.05 [s], 부하 관성 0.01 [s]

B_M, B_L : 전동기, 부하 감쇠계수 0.005

K_{SH} : 저탄성 축비틀림정수 33 [s^{-1}]

ω_M, ω_L : 전동기, 부하 각속도

T_M, T_{SH}, T_L : 전동기 발생 토크, 부하 외란 토크

축비틀림 토크, 부하 외란 토크

제어대상인 2관성계의 제어량은 부하속도 ω_L 이지만 관측 가능한 상태량은 전동기속도 ω_M 뿐이다.

- (1) 축비를림진동을 억제한다.
- (2) 부하토오크의 변동에 대하여 전동기속도 및 부하속도의 변동을 작게하며 스텝상의 부하토오크 변동에 대하여 정상편차를 0으로 한다.
- (3) 속도지령의 변화에 대하여 부하속도를 오버슈트 없이 빠르게 추종하도록 한다.

3. 공진비제어

축비를림토오크를 피드백하는 것에 의하여 공진비제어라고 불리는 새로운 개념을 도입한다. 공진비제어를 갖는 2관성계의 불력선도는 그림 3과 같다.

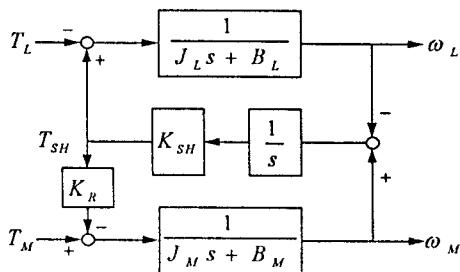


그림 3 공진비제어를 갖는 2관성계의 불력선도

공진비제어는 축비를림토오크 T_{SH} 를 K_R 에 비례하여 피드백시킴으로써 전동기의 관성을 가상적으로 변동시키는 제어방법이다. 축비를림토오크가 외란을 포함하기 때문에 제어대상에 의하여 축비를림을 억제하는 작용을 할 수 있다. 공진비제어는 축비를림량에 대한 전동기속의 감도라 할 수 있다.

공진비제어를 갖지 않는 즉 $K_R = 1$ 인 경우의 2관성계의 공진주파수 ω_n 과 반공진주파수 ω_H , 공진비 R 은

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_{SH}}{J_M} + \frac{K_{SH}}{J_L}} \quad (2)$$

$$\omega_H = \sqrt{\frac{K_{SH}}{J_L}} \quad (3)$$

$$R = \frac{\omega_n}{\omega_H} \quad (4)$$

로 되고, 공진비제어를 갖는 경우의 2관성계의 공진주파수 ω_n' 은

$$\omega_n' = \sqrt{\frac{K_{SH}}{J_M} K_R + \frac{K_{SH}}{J_L}} \quad (5)$$

로 된다. 반공진주파수 ω_H 는 실제의 플랜트와 동일하여 변화하지 않지만 공진주파수 ω_n' 과 공진비 R 은 파라미터 K_R 에 의해 변화한다. 그림 4는 K_R 에 의한 공진주파수의 변화를 나타낸다. K_R 의 변화에 따라 공진주파수가 변동됨을 알 수 있다. PI제어기에서 최적의 응답특성을 갖는 K_R 을 선택한다. 여기에서는 $K_R = 5$ 이다.

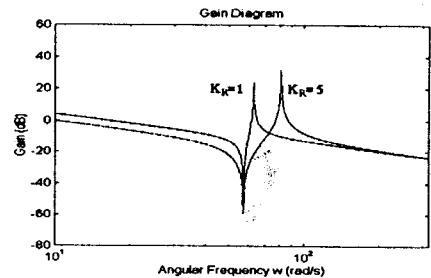


그림 4 2관성계에서의 K_R 변동의 영향

4. H_∞ 제어

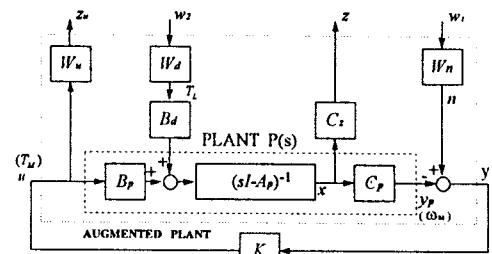


그림 5 H_∞ 제어계

공진비제어를 갖는 2관성계를 위한 H_∞ 제어계는 그림 5와 같다. 외란입력 w_d 에 가중함수 W_d 를 곱한것이 실제의 부하에 인가된 외란토오크 T_L 이 되고, n 은 관측노이즈 또는 속도지령값에 해당한다. 제어량 z_u 는 H_∞ 제어문제를 위한 값으로 본 논문에서는 $W_u = 10^{-6}$ 으로 설정하기 때문에 제어계의 설계에는 영향을 주지 않는다.

가중함수 W_d 는 부하외란토오크 T_L 로부터 전동기속도 ω_M , 부하속도 ω_L 및 그것들의 차속도($\omega_M - \omega_L$)까지의 폐루우프전달함수의 가중함수이다. 이 폐루우프전달함수를 축비를림이 없는 1관성계의 개인특성의 형태로 주파수정형 할 수 있다면 축비를림진동은 억제가능하다. 따라서

$|W_d|^{-1}$ 가 1관성계의 개인특성의 형태로 되도록 가중함수 W_d 를 설계한다. 또한 w_d 로부터의 전달함수에 작안한다면 W_n 은 상보감도함수의 가중함수로 되어 있는 것을 알 수 있다. 따라서 고주파영역에 있어서 관측노이즈나 플랜트의 모델화오차등의 영향을 제거하기 위하여 W_n 에 하이패스특성을 가지도록 한다. 이상에 따라 2개의 가중함수를 다음 식과 같이 설계한다. 그림 6은 식 (6),(7)의 가중함수를 나타낸다.

$$W_d = 2.2 \frac{(s+50)^2}{(s+10^{-2})(s+10^3)} \quad (6)$$

$$W_n = 25 \frac{(s+10)}{(s+10^4)} \quad (7)$$

가중함수를 나타내는 식 (6),(7)과 공진비제어를 갖는 2관성계의 상태방정식을 이용하여 MATLAB을 사용하면 H_∞ 제어기 $K(s)$ 가 구하여진다. 이와 같이하여 제어기를

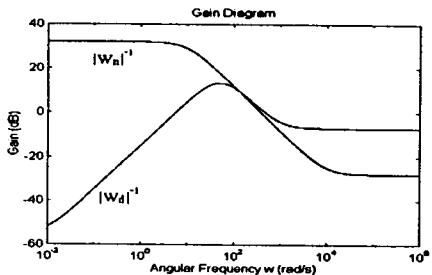


그림 6 가중함수

구하고 저차화하면 식 (8)과 같다. 그림 7은 H_{∞} 제어기 $K(s)$ 만을 갖는 경우의 응답특성을 나타낸다.

$$K(s) = \frac{917s + 14301}{s^2 + 225s} \quad (8)$$

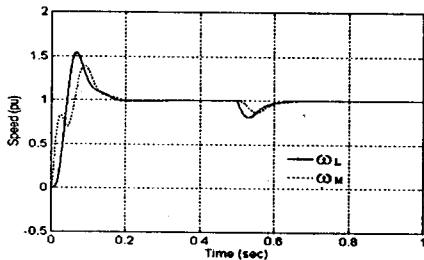


그림 7 H_{∞} 제어기 $K(s)$ 에 의한 응답특성
(ω^* ; 0 → 1.0 pu, T_L ; 0 → 0.1 pu)

5. 2자유도 속도제어

H_{∞} 제어기 $K(s)$ 에 의한 응답특성 중에서 목표치응답특성에서 과도한 오버슈트가 발생함을 알 수 있다. 이러한 오버슈트를 저감시키기 위하여 2자유도 개념을 도입한다. 그림 8은 2자유도 속도제어계를 나타낸다.

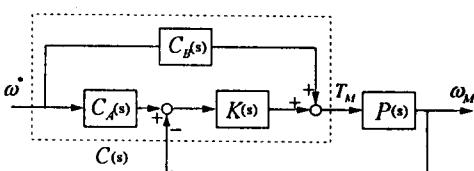


그림 8 2자유도 속도제어계

그림 8에서와 같이 2자유도제어기 $C(s)$ 는 H_{∞} 제어기 $K(s)$ 를 포함하는 구조로 H_{∞} 제어기에서 발생하는 목표치 응답특성에서의 과도한 오버슈트를 저감시킨다. 2자유도제어기 $C(s)$ 는 다음 식과 같이 2 입력, 1 출력계로 된다.

$$T_M = C(s) \begin{bmatrix} \omega \\ \omega_M \end{bmatrix} = [(KC_A + C_B) - K] \begin{bmatrix} \omega \\ \omega_M \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서

$$C_A(s) = G_m(s), C_B(s) = P(s)^{-1}G_m(s) \quad (10)$$

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 $P(s) = g_s(s)/g_p(s)$ 의 허축에

가까운 극을 실축상으로 극배치한 모델로 놓으면 $C_A(s)$, $C_B(s)$ 는 다음 식이 된다.

$$C_A(s) = G_m(s) = \frac{\omega_m^n g_s(s)}{(s + \omega_m)} \quad (11)$$

$$C_B(s) = \frac{\omega_m^n g_p(s)}{(s + \omega_m)} \quad (12)$$

이 경우 속도지령으로부터 부하속도까지의 전달함수는

$$G_L(s) = \frac{\omega_m^n}{(s + \omega_m)^n} \quad (13)$$

이 되어, 부하속도에는 축비틀림진동이 발생하지 않고 그의 응답속도는 ω_m 으로 자유롭게 지정할 수 있다.

그림 9에 2자유도제어기 $C(s)$ 로 제어하는 경우의 속도지령의 스텝변화에 대한 부하속도의 응답특성을 나타내었다. 제어기 $K(s)$ 만의 1자유도제어는 그림 7에서와 같이 진동은 억제되고 있지만 오버슈트가 크다. 이에 대하여 2자유도제어기의 경우에는 축비틀림진동과 오버슈트가 없는 양호한 목표치응답특성을 얻을 수 있다.

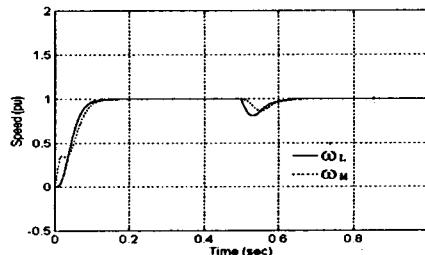


그림 9 2자유도제어기 $C(s)$ 에 의한 응답특성
(ω^* ; 0 → 1.0 pu, T_L ; 0 → 0.1 pu)

6. 결론

본 논문에서는 2관성계의 비틀림진동을 억제하는 제어법을 제안하였다. 2관성계의 의관상의 플랜트의 관성비를 조정하는 공진비제어에서 최적의 개인을 선정하고, 공진비제어를 갖는 의관상의 플랜트에 대하여 H_{∞} 제어를 행하였다. 가중함수의 설정은 축비틀림진동이 발생하지 않는 1관성계의 전달함수의 개인특성에 따라 하였다.

H_{∞} 제어기를 사용한 1자유도제어기는 목표치응답특성에서 과도한 오버슈트를 발생하므로 본 논문에서는 공진비제어를 갖는 H_{∞} 제어기에 목표치필터와 목표치에서의 피드포워드항을 추가한 2자유도 H_{∞} 제어기를 제안하였다. 시뮬레이션에 의하여 제안한 제어기의 특성을 검토하고 그의 유효성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Yuki, Murakami and Onishi, "Vibration Control of a 2 Mass Resonant System by the Resonance Ratio Control", T.IEE Japan, Vol. 113-D, No 10, 1993
- [2] Ouchi, Mita and Yano, "Active Vibration Control of Motor System by Using H_{∞} Control Theory", T.IEE Japan, Vol. 113-D, No 3, 1993
- [3] Morimoto, Takeda and Hirasa, "Speed Control of Two-Mass Mechanical System Based on H_{∞} Control Theory", JIAS'93, pp.849~854
- [4] 前田, 杉江, "システム制御理論", 朝倉書店, pp.849~854, 1992