

## 2관성계의 규범모델에 의한 진동억제제어

°김진수, 강석진, 김현중, 김영석  
 인하대학교 전기공학과, 유한대학 제어계측과

### The Vibration Suppression Control of a Two-Mass System using a Reference Model

Jin-Soo Kim, Seog-Jin Kang, Hyun-Jung Kim, Young-Seok Kim  
 Inha University, Yuhan college

**Abstract** - In the industrial motor drive system, 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 such a system. Recently, there are new methods which estimate unknown state variables by using a reduced order observer and feedback these state variables by using a pole placement design method. But there is a trade-off between the fast command following property and the attenuation of disturbances and vibrations in these design methods.

In this paper, the vibration suppression control of a two-mass system using a reference model is proposed. Because of using a reference model, the proposed control satisfy the fast command following property and the attenuation of disturbances and vibrations. Control parameter can be changed to maintain high system performance in control using a reference model. Experimental results show the validity of the proposed state feedback control using a reference model, and this controller is compared with the state feedback controller.

#### 1. 서 론

산업용 로봇, 전기자동차의 구동부, 철강플랜트의 압연기 구동계, 엘리베이터 등에 대한 전동기 가변속제어에 있어서 전동기와 부하가 강성이 작은 축으로 연결되는 경우 전동기의 관성과 부하의 관성에 의해 축에 비틀림진동이 발생한다. 이와 같이 구성된 기계계를 2관성 공진계라고 한다.

2관성 공진계의 축비틀림 진동을 억제하기 위하여 최근 외란관측기를 이용하는 방법, 공진비제어에 의한 방법, 관측할 수 없는 상태변수를 추정하여 상태제어를 하는 방법, LQG제어를 이용하는 방법,  $H_\infty$ 제어를 활용하는 방법 등이 연구되어지고 있다. [1~7] 일반적으로, 2관성 공진계 제어의 최종목적이 되는 부하속도, 축비틀림토크 및 부하의란토크와 같은 양들은 실제 시스템에서 측정할 수 없는 경우가 많다. 따라서 최소차원관측기를 사용하여 측정 불가능한 상태변수들을 추정하고 이를 이용하여 극점배치방법에 의하여 상태제어제어를 하는 방법들이 있다. [6,7] 그러나 이 방법에서는 목표치 추종성능과 외란·진동억제성능 간에 서로 상충관계

(trade-off)가 있어 두가지 성능을 동시에 만족시키기는 어렵다.

본 논문에서는 이와같은 상태제어제어에 규범모델이 부가된 새로운 2관성계의 진동억제제어를 제안한다. 규범모델을 부가함으로써 외란에 대한 플랜트의 동특성 변동에 대하여 제어를 온라인으로 자동조정함으로서 외란억압특성을 향상시킬수 있다. 제안한 제어기의 유효성을 시뮬레이션을 통하여 확인하고 또한 종래의 상태제어제어만을 갖는 경우 [7]와 비교·검토한다.

#### 2. 2관성계

강성이 작은 축에 의해 전동기와 부하가 연결된 2관성계는 그림 1과 같고 그 블럭선도는 그림 2와 같이 구성된다.

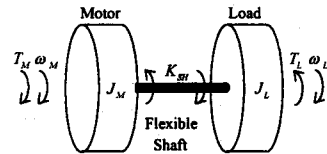


그림 1 2관성계 플랜트 모델

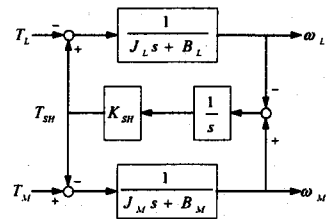


그림 2 2관성계 블럭선도

2관성계의 상태방정식은 다음 식과 같다.

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

여기서

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

$$B_p = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_M} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{J_L} \end{bmatrix}, C_p = [1 \ 0 \ 0]$$

- 단,  $J_M, J_L$  : 전동기, 부하관성모멘트  
 $B_M, B_L$  : 전동기, 부하감쇠계수  
 $K_{SH}$  : 축비틀림상수  
 $\omega_M, \omega_L$  : 전동기, 부하속도  
 $T_M, T_{SH}, T_L$  : 전동기발생토크, 축비틀림토크, 부하의란토크

이와같은 2관성계의 제어량은 부하속도  $\omega_L$ 이지만 제측 불가능하므로 제측 가능한 전동기속도  $\omega_M$ 을 제어하여 다음과 같은 제어목적을 실현한다.

- (1) 축비틀림진동을 억제한다.
- (2) 속도지령의 변화에 대하여 부하속도를 오버슈트 없이 빠르게 추종하도록 한다.
- (3) 부하토크의 변동에 대하여 전동기속도 및 부하속도의 변동을 작게하고 스텝상의 부하토크 변동에 대하여 정상상태오차를 0으로 한다.

### 3. 상태궤환제어계

본 논문에서는 기본적인 제어계로 상태궤환제어계를 사용한다. 2관성계에 대한 상태궤환제어계는 그림 3과 같다. 제어계에서 전동기발생토크  $T_M$ 은 토크분 전류에 의하여 계산이 가능하고 전동기속도  $\omega_M$ 도 측정 가능하지만,  $\omega_L, T_{SH}, T_L$ 은 직접적인 측정이 불가능한 것으로 한다.

다음으로 상태궤환제어에 따른 진동억제제어계를 구성하면 그림 3과 같이 전동기발생토크  $T_M$ 은

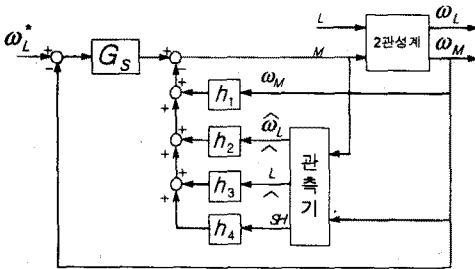


그림 3 상태궤환제어계

$$T_M = G_s(\omega_L^* - \omega_M) - HX \quad (2)$$

단,  $\omega_L^*$  : 부하속도목표값

$G_s$  : 속도제어기

$H = [h_1, h_2, h_3, h_4]$  : 상태궤환계인

$X = [\omega_M, \omega_L, T_L, T_{SH}]^T$  : 상태변수

와 같다. 그리고 식 (2)의 제어계를 구성할 때 상태궤환계인의 결정은 극배치기법에 의한다. 또한 제측불가능한  $\omega_L, T_{SH}, T_L$ 은 최소차원 상태관측기에 의해 관측한다.

### 4. 규범모형을 갖는 진동억제제어

본 논문에서는 2관성계의 진동을 억제하기 위하여 상태궤환제어에 적용제어를 도입한다. 적용제어는 외란이 인가되는 경우와 같이 예기치 못하는 상황에서, 플랜트의 동특성의 변동에 대하여 제어기를 온라인으로 자동 조정하여 항상 최적의 성능을 유지한다. [9] 즉 적용제어에서는 설계자가 바라는 요구성능과 실제의 성능을 항상 측정하여 비교하여 제어기의 파라미터를 수정함으로써 요구성능을 만족하도록 플랜트의 동특성을 수정한다. 이러한 일련의 동작을 온라인으로 실행함으로써 플랜트는 환경조건이나 동작조건에 무관하게 항상 일정한 성능을 유지하는 장점을 갖고 있다. 이와 같은 적용제어에서 플랜트의 파라미터를 알고 있는 경우는 모델규범형 적용제어를 사용한다. [10] 모델규범형 적용제어는 적용제어의 대표적인 설계법으로 본 논문에서는 기존의 상태궤환제어계에 규범모형을 부가한 제어법을 제안한다. 제안된 규범모형을 갖는 진동억제제어계의 블럭도는 그림 4와 같다.

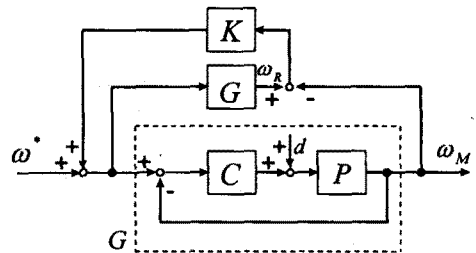


그림 4 규범모형을 갖는 진동억제제어계

그림 4에서 C는 상태궤환제어기, P는 플랜트이고 상태궤환제어기와 플랜트가 결합된 시스템이 G이다. 규범모형  $\hat{G}$ 는 결합시스템 G와 같으며, 플랜트의 원하는 동특성 즉 감쇠도와 속도응답 등의 요구성능을 만족하도록 설정된다. 결합시스템 G의 출력  $\omega_M$ 과 규범모형의 출력  $\omega_R$ 과의 오차를 K배하여 속도지령치에 더함으로써 외란인가시에 속도지령치가 오차의 K배만큼 증가함으로써 실제전동기속도의 하강이 적고 회복시간도 짧게 되므로 외란에 대하여 강인한 특성을 갖게 된다. 그러므로 기존의 상태궤환제어에서는 목표치응답특성과 외란억압

특성에서 목표치응답특성을 개선하면 외란억압특성이 저하되고 외란억압특성을 개선하면 목표치응답특성이 저하되는 특성이 있으나, 본 제안된 제어법에서는 목표치응답특성의 개선을 목적으로 하여 극배치를 하고 규범모형을 적용함으로써 목표치응답특성과 외란억압특성 모두를 향상시킬 수 있다.

## 5. 시뮬레이션 및 고찰

본 논문에서 제안한 규범모형을 갖는 진동억제제어의 유용성을 확인하기 위하여 기존의 상태궤환제어(7)만을 갖는 경우와 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 비교하였다. 시뮬레이션에 사용된 전동기와 부하의 관성은 각각  $0.008(\text{kgm}^2)$ 과  $0.08(\text{kgm}^2)$ , 축의 비틀림상수는  $50.527(\text{Nm/rad})$ 이고, 기계적 공진주파수는  $\omega_0 = 83.35$  [rad/s]이다. 목표값 추종시험은 전동기를 무부하의 정지상태에서 600[rpm]의 속도지령을 스텝 인가하였고, 부하외란 억압시험은 600[rpm]의 무부하 일정속도하에서 순간적으로 정격토크의 100%에 해당하는  $12.1[\text{Nm}]$ 의 부하토크를 인가하였다.

그림 5는 기존의 상태궤환제어만을 갖는 경우의 결과이다. 속도지령 인가시에 약 37 [Nm]의 축토크가 걸리는데 이는 2관성계이므로 전동기의 회전에 의하여 과도적인 상태에서 축에 진동이 발생하기 때문이다. 전동기속도는 축의 진동에 따라 진동하면서 1초 후에 지령치에 이른다. 반면 부하의 속도는 진동이 없이 600 [rpm]에 이른다. 이는 2관성계에서 부하의 속도를 출력으로 이용하므로 전동기의 속도가 진동하더라도 부하의 속도는 항상 진동이 없어야 한다. 속도지령치까지의 응답시간이 더 짧게 되도록 계인을 설정하면 축비틀림토크는 더 크게 된다. 부하가 인가되면 축비틀림토크는 계속적으로 12.1 [Nm]의 값을 유지한다. 전동기의 속도 및 부하의 속도는 570 [rpm]까지 지령치의 5% 하강하고 0.5초 후에 회복된다. 상태궤환제어에서는 극배치기법을 이용하여 제어하였으며 부하속도의 오버슈트 없이 가장 빠르게 속도지령치에 도달하는 계인을 설정하였다. 만약 관성비가 더 크면 부하인가 후의 회복시간은 더 느려지게 된다.

그림 6은 제안한 규범모형을 갖는 진동억제제어의 결과이다. 목표값 추종특성은 기존의 상태궤환제어와 같은 제어기를 사용하므로 그림 5와 같다. 즉 속도지령 인가시에 약 37 [Nm]의 축토크가 걸리며, 전동기속도는 축의 진동에 따라 진동하면서 1초후에 지령치에 이른다. 또한 부하의 속도는 진동이 없이 600 [rpm]에 이른다. 부하를 인가하면 실제의 전동기속도와 외란이 없는 경우인 규범모형의 출력과의 사이에 오차가 생기며 이를 줄여주도록 제어를 한다. 이렇게 하므로써 속도의 하강이 줄어들며 회복시간도 빨라지게 된다. 제안한 제어기에서는 부하인가시 전동기의 속도 및 부하의 속도는 570 [rpm]까지 상태궤환제어에서와 같이 지령치의 5% 하강하나 회복시간은 0.25초로 상태궤환제어에 비하여 반으로 줄어들었다. 그러므로 규범모형을 적용함으로써 부하외란에 대하여 기존의 상태궤환제어만을 갖는 경우보다 더 우수한 부하외란 억압특성을 갖고 있다.

## 6. 결론

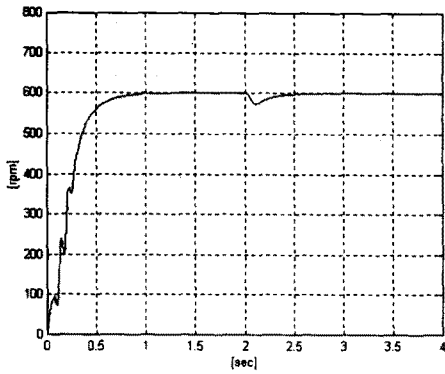
본 논문에서는 전동기와 부하가 강성이 작은 축에 의해 결합되어 낮은 공진주파수로 진동하는 2관성계에 대한 속도제어를 다루었고 규범모형을 갖는 2관성계의 진동억제제어를 제안하였다. 기존의 상태궤환제어가 목표치추종특성과 외란·진동억제특성을 동시에 만족하지 못하는 반면 규범모형을 부가함으로써 외란이 인가되는 경우와 같이 예기치 못하는 상황에서, 플랜트의 동특성의 변동에 대하여 제어기를 온라인으로 자동조정함으로써 외란에 강한 특성을 갖는다. 본 제안된 제어법에서는 먼저 목표치응답특성의 개선을 목적으로 하여 극배치를 하고 규범모형을 적용함으로써 목표치응답특성과 외란억압특성 모두를 향상시킬수 있는 특징이 있다.

제안하는 제어기의 우수성을 확인하기 위하여 기존의 상태궤환제어만을 갖는 경우와 비교하여 시뮬레이션한 결과, 제안된 규범모형을 갖는 진동억제제어기가 부하외란 인가시 기존의 제어기에 비하여 같은 부하속도의 하강에 대하여 응답시간이 빨라지는 우수한 외란억압특성을 갖고 있음을 확인하였다.

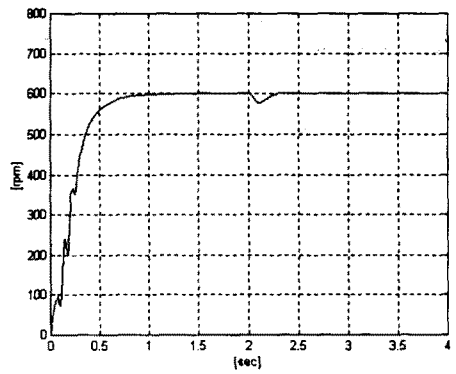
이 연구는 1995년도 한국과학재단  
연구비 지원에 의한 결과임.  
( 과제번호 : 951-0912-098-2 )

## 참고 문헌

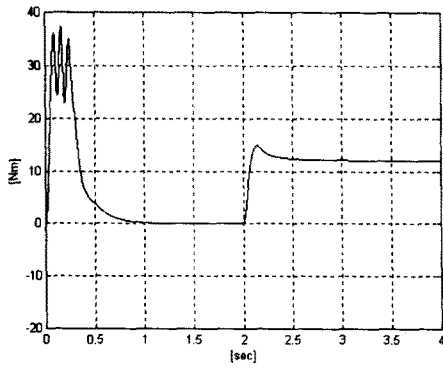
- [1] 結城和明 外 2人, "共振比制御による2慣性共振系の振動抑制制御", 日本電氣學會論文集, Vol.113-D, No. 13, 1993, pp. 1162~1169
- [2] 杉林 道彦 外 2人, "2慣性共振系の状態フィードバックによる振動抑制制御とパラメータ變動を考慮した制御特性", 日本電氣學會 産業應用部門全國大會, 1993, pp. 843~848
- [3] Jun-Keun Ji et. al., "LQG Based Speed Controller for Torsional Vibration Suppression in 2-Mass Motor Drive System", IEEE IECON, Vol. 2, pp. 1157~1162
- [4] 大内茂人 外 2人, "H $\infty$ 制御理論に基づく電動機の制振制御", 日本電氣學會論文集, Vol.113-D, No. 3, 1993, pp. 325~332
- [5] Akihiko Tanisaka et al., "Application of H $\infty$  Control to Motor Speed Control System", IEEE IECON, 1991, pp. 839~842
- [6] 海田英俊 外 1人, "最小次元外亂トルクオブザーバに基づく多慣性機械系の振動抑制制御", 日本電氣學會 研究會資料, SPC-93-38, 1993, pp. 81~90
- [7] 岩崎 誠 外 2人, "2慣性共振系の状態フィードバック制御と定數計測法", 日本電氣學會 産業應用部門全國大會, 1994, pp. 1180~1185
- [8] Kumpati S. Narendra et al., "Stable Adaptive System", 1989, Prentice Hall, pp. 140~179
- [9] 金井喜美雄, "ロボスト適應制御入門", オーム社, pp. 7~23, 1990
- [10] Butler, "Model Reference Adaptive Control", Prentice Hall, pp. 1~32, 1992



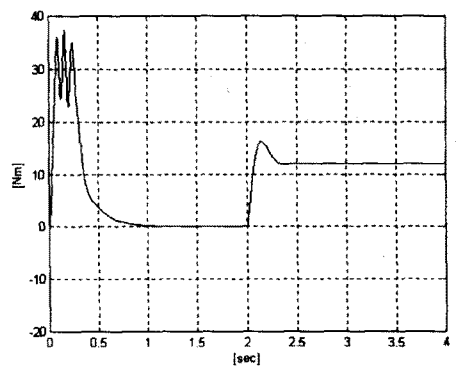
(a) 전동기속도  
100 [rpm]/div, 0.5 sec/div



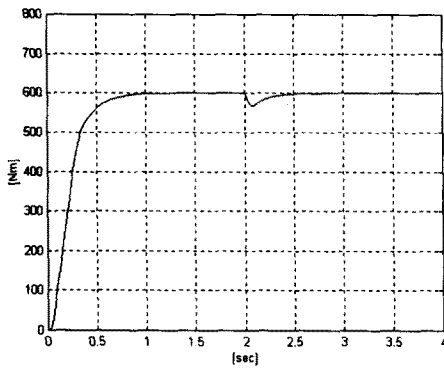
(a) 전동기속도  
100 [rpm]/div, 0.5 sec/div



(b) 관측된 축비틀림토크  
10 [Nm]/div, 0.5 sec/div

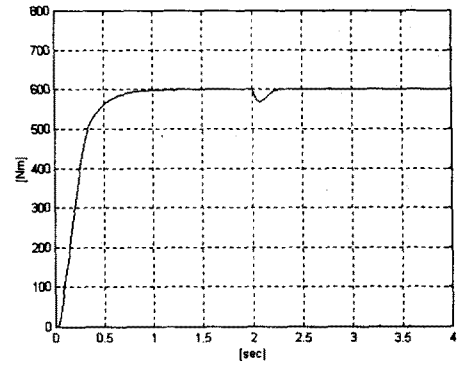


(b) 관측된 축비틀림토크  
10 [Nm]/div, 0.5 sec/div



(c) 관측된 부하속도  
100 [rpm]/div, 0.5 sec/div

그림 5 상태피환제어



(c) 관측된 부하속도  
100 [rpm]/div, 0.5 sec/div

그림 6 규범모델을 갖는 진동억제제어