

시간지연 제어기법을 이용한 회전체 진동제어

현동길*(전남대 대학원 기계공학과), 최우균(전남대 대학원 기계공학과),
신윤덕(전남대 대학원 기계공학과), 김영배(전남대 기계공학과)

Vibration Control of Rotor Using Time Delay Control

D. J. Xuan*(Mecha. Eng. Dept. CNU), W. K. Choi(Mecha. Eng. Dept. CNU),
Y. D. Shen(Mecha. Eng. Dept. CNU), Y. B. Kim(Mecha. Eng. Dept. CNU)

ABSTRACT

Time Delay Control (TDC) method was proposed as a promising technique in the robust control area, where the plants have unknown dynamics with parameter variations and substantial disturbances are present. In this paper we concerns vibration control of rotor system using TDC. Based on the rotor system model, the TDC is designed, and the PD-controller is also designed for comparison. The simulation results show that the TDC is much robust than the PD-controller to the unknown dynamics with parameter variations and disturbances.

Key Words : Time Delay Control(시간지연 제어), Rotor Vibration(회전체 진동), Robust Control(강인 제어)

1. 서론

고속으로 회전하는 회전체기계들은 질량의 불평형(unbalance), 부품들 사이의 제작 오차, 내부마찰, 회전접촉 등 동역학적 요인으로 인해 회전체를 불안정하게 하는 원주방향의 진동이 발생하는데 이러한 진동을 저감하기 위해 마그네틱 댐퍼 시스템을 이용한 진동제어에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.^(1,2) 그러나 볼 베어링을 가진 회전체 시스템에서 마그네틱 댐퍼의 동작점의 지속적인 변화로 인한 불확실성과 조립오차와 회전체 특유의 편심에 의해 외란이 발생할 수 있으므로 회전체기계의 진동저감을 위해서는 강인하고 효과적인 제어기법에 대한 연구가 필요하다.

회전체 제어 시스템에 적용될 수 있는 제어 기법은 시스템의 비선형성, 파라미터의 변화 및 외란 등에 대해 강인하고 효과적인 제어 성능을 나타낼 수 있어야 한다. 이러한 조건에 적합한 제어 기법 중의 하나로 시간지연 제어(Time Delay Control)⁽³⁾ 기법이 있다. 시간지연 제어 기법은 플랜트에 미지의 동역학과 외란이 존재하는 상황에서도 과거의 몇 샘플링 주기 동안의 시스템의 입출력 정보를 이용하여 미지의 동역학과 외란의 항들을 제거하고 기

준 모델에 의해 주어진 원하는 동역학으로 치환함으로써 플랜트 상태변수가 원하는 궤적, 즉 기준 모델을 정확하게 추정하도록 하는 제어 기법이다. 장평훈⁽⁴⁾ 등은 시간지연 제어기를 DC 서보모터 시스템에 적용하여 상태변수 관측기 및 제어기의 안정화에 관한 연구를 진행하였으며, 송재복⁽⁵⁾ 등은 시간지연 제어기를 예진 토크 및 엔진/자동변속기 속도 제어 시스템에 적용하였다.

본 연구에서는 수학적 모델링을 기초로 시간지연 제어기를 설계하고, 실험을 위해 제작된 마그네틱 댐퍼를 포함한 볼 베어링계 회전체 진동 제어 모델에 적용하여 그 결과를 PD 제어방식의 연구결과와 비교하여 전반적인 제어 성능을 평가하는 것이다.

2. 회전체 시스템의 모델링

2.1 마그네틱 댐퍼의 구조 및 기능

마그네틱 댐퍼를 이용한 회전체 진동 제어는 기준 위치로부터의 축의 오차를 측정하고 그것을 레환제어에 의해 회전축에 배치된 전자석의 여자 코일에 흐르는 전류들을 제어하여 자기력을 변화시켜 회전축을 수직방향으로 제어한다. 즉,

회전축이 위쪽으로 이동하면 변위 센서가 변위를 검출하고 제어기에서의 신호처리를 통해 나온 전압형태의 제어신호를 전력 증폭기에서 전류로 증폭하는데 아래쪽 전자석의 여자 전류는 증가시켜 자기력을 크게 하고 위쪽 전자석의 여자 전류는 아래쪽 전자석의 전류가 증가한 양만큼 감소시켜 자기력을 감소하여 회전축을 복원시킨다.

마그네틱 댐퍼는 모두 8 개의 pole 로 구성되어 있고 2 개의 pole 이 한 쌍을 이루어 하나의 자기 회로를 형성한다. 한 개의 자기 회로는 한 개의 전자석에 대응한다. 자기베어링은 상, 하, 좌, 우에 각각 한 개씩 총 4 개의 전자석으로 구성되었고, 하나의 전자석은 두 개의 pole 이 한 짝을 이룬다. Fig. 1 는 마그네틱 댐퍼의 형상을 나타내고 있다.

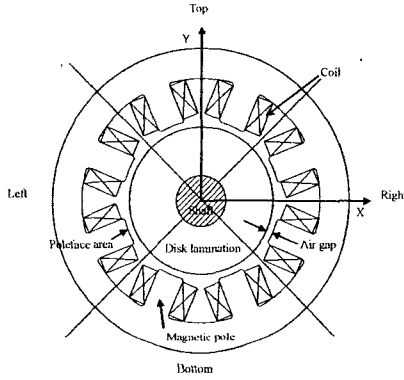


Fig. 1 Schematic of the magnetic bearing

2.2 회전체 시스템의 모델링

본 연구의 마그네틱 댐퍼는 회전체의 수평, 수직 방향에 대한 제어를 하므로 2 자유도 문제이다. 이를 각각 분리된 1 자유도 모델로 축약시켜 각각의 자유도에 대해 독립적으로 제어를 설계하였다. 선형화 된 전자기력과 2 자유도 문제를 독립적으로 분리된 1 자유도로 분리하면 다음과 같은 2 개의 2 차 선형 미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$M\ddot{q} = K_q q + K_{iq} \dot{q} \quad (2.1)$$

$$q = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}; \quad M = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}; \quad \dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix};$$

$$K_q = \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_g \mu_g}{2h_g^3} (AN_3^2 i_{x3s} + AN_4^2 i_{x4s}) \\ \frac{\alpha_g \mu_g}{2h_g^3} (AN_1^2 i_{x1s} + AN_2^2 i_{x2s}) \end{bmatrix}$$

$$K_{iq} = \begin{bmatrix} K_{ix} \\ K_{iy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_g \mu_g}{2h_g^2} (AN_3^2 i_{x3s} + AN_4^2 i_{x4s}) \\ \frac{\alpha_g \mu_g}{2h_g^2} (AN_1^2 i_{x1s} + AN_2^2 i_{x2s}) \end{bmatrix}$$

여기서, K_q 는 위치강성 계수, K_{iq} 는 전류강성 계수, x, y 는 수평, 수직 방향에서 변위, m 는 디스크의 질량, A 는 공극의 단면적, μ_g 는 공기의 투자도, h_g 는 평형상태에서 전자석과 디스크 사이 거리, i_{x1}, i_{y1} 는 수평, 수직 방향의 전자석에 흐르는 평형상태로부터의 전류의 변화량, α_g 는 힘에 관한 형상계수, $N_i (i=1 \sim 4)$ 는 각각의 코일 감은 수, i_{x3s}, i_{x4s} 는 평형상태에서 수평 방향의 전자석에 흐르는 전류, i_{y1s}, i_{y2s} 는 평형상태에서 수직 방향의 전자석에 흐르는 전류를 나타낸다.

x 와 y 방향에서 제어기 설계가 독립적으로 이루어 지고 제어기 설계원리가 같으므로 y 방향의 제어기 설계만 언급한다.

상태변수를 $x_1(t) = y(t)$ 및 $x_2(t) = \dot{y}(t)$ 와 같이 회전체 수직 방향에서의 변위와 속도로 정의하고 입력 $u = i_y$ 로 하면 회전체 시스템의 상태공간에서의 모델링은 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ k_y & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ m \end{bmatrix} u \quad (2.2)$$

3. TDC 를 이용한 회전체 제어 시스템

3.1 TDC 법칙의 개요

다음의 비선형 시변 플랜트를 고려하여 보자.⁽⁶⁾

$$\dot{x}(t) = f(x(t), t) + h(x(t), t) + B(x(t), t)u(t) + d(t) \quad (3.1)$$

여기서, $x(t), u(t), f(x, t), h(x, t), d(t)$ 는 각각 상태벡터, 제어벡터, 기지의 동역학벡터, 미지의 동역학벡터 및 미지의 외란벡터를 나타낸다.

TDC 제어기의 목적은 플랜트가 식(3.1)의 불확실성 영향하에서 원하는 제어성능을 얻도록 제어를 설계하는 것인데 원하는 제어성능은 다음 선형 시불변 기준모델(reference model)의 궤적으로 정의한다.

$$\dot{x}_m = A_m x_m(t) + B_m r(t) \quad (3.2)$$

여기서, $x_m(t)$ 와 $r(t)$ 는 각각 기준모델의 상태

벡터와 기준입력 벡터를 나타낸다.

오차 벡터를 $e(t) = x_m(t) - x(t)$ 라 정의하면, 원하는 오차동역학은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{e}(t) = A_e e(t) \quad (3.3)$$

여기서, A_e 는 오차 시스템 행렬이다. 모든 고유치가 s - 평면상의 좌평면에 위치하면 시간이 흐름에 따라 오차가 영으로 수렴하게 된다. 식(3.3)과 식(3.1)을 이용하면

$$B(x,t)u(t) = -f(x(t),t) - h(x(t),t) - d(t) + \dot{x}_m(t) - A_e e(t) \quad (3.4)$$

$B(x,t)$ 의 역행렬이 항상 존재하는 것이 아니기에 B 의 의사 역행렬 $B^+ = (B^T B)^{-1} B^T$ 을 사용하면 식(3.4)에 대한 근사해가 다음과 같이 얻어진다.

$$u(t) = B^+(x,t) \{-f(x(t),t) - h(x(t),t) - d(t) + \dot{x}_m(t) - A_e e(t)\} \quad (3.5)$$

여기서, $h(x(t),t) + d(t)$ 는 미지의 함수이므로 추정값 $\hat{h}(x(t),t) + \hat{d}(t)$ 을 사용하여야 한다. 시간지연 (time delay) L 가 충분히 작고 $h + d$ 가 연속함수이면, 이 함수의 추정값은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{h}(x(t),t) + \hat{d}(t) &\approx h(x(t-L),t-L) + d(t-L) \\ &= \dot{x}(t-L) - f(x(t-L),t-L) \\ &\quad - B(x(t-L),t-L)u(t-L) \end{aligned} \quad (3.6)$$

많은 경우에 행렬 $B(x(t),t)$ 가 미지이거나 불확실하므로 이 경우에 추정값 $\hat{B}(t)$ 를 사용하면 TDC 법칙은 식(3.5)와 식(3.6)으로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} u(t) &= \hat{B}^+(t) \{-f(x(t),t) - \dot{x}(t-L) \\ &\quad + f(x(t-L),t-L) + \hat{B}(t-L)u(t-L) \\ &\quad + \dot{x}_m(t) - A_e e(t)\} \end{aligned} \quad (3.7)$$

제어 법칙 식(3.7)은 시간 지연 L 을 샘플링 주기 T_s 와 동일하거나 정수배로 취함으로써 이산 제어 시스템으로 쉽게 구현할 수 있다.

3.2 TDC 제어기 설계

제어기 기준모델은 2 차 시스템으로서 식(3.2)의 기준모델 동역학의 시스템 행렬은 다음과 같이 선정하였다.

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix}; \quad B_m = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_n^2 \end{bmatrix}; \quad (3.8)$$

여기서, ω_n 과 ζ 는 각각 기준 모델의 고유진동수와 감쇠비를 나타낸다. 오차 행렬도 기준모델과 같은 형태로 다음과 같이 선정할 수 있다.

$$A_e = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

또한, 제어행렬의 추정값은 $\hat{B}(t) = [0 \ \hat{b}]^T$ 로 주어지고 $\hat{B}^+ = [0 \ 1/\hat{b}]$ 이고 이때의 \hat{b} 는 식(2.2) 으로부터 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\hat{b} = \frac{k_{fy}}{m} \quad (3.10)$$

하여 식(3.7)의 제어법칙은 다음과 같이 단순화할 수 있다.

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{1}{\hat{b}} \{-\dot{x}_2(t-L) + \hat{b}u(t-L) \\ &\quad + \dot{x}_{m2}(t) + \omega_n^2(x_{m1}(t) - x_1(t)) \\ &\quad + 2\zeta\omega_n(x_{m2}(t) - x_2(t))\} \end{aligned} \quad (3.11)$$

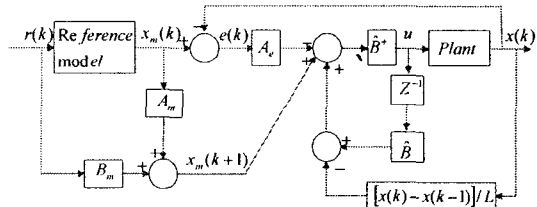


Fig. 2 Block diagram of rotor control system using the time delay control

4. 시뮬레이션

회전체 제어 시스템에 앞서 설명한 TDC 를 적용하여 실제로 구현될 이산 시간 영역에서 SIMULINK 를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 2 는 시뮬레이션의 블록선도를 나타내고 있다.

기준모델의 오버슈트는 10% 로, 세틀링시간은 0.06s, 샘플링 주기는 1msec 로 선정하였다. 식(3.11)에서 \hat{b} 는 TDC 제어기의 중요한 설계변수로, 식(3.10)에 기초하여 근사적으로 구하였다. PD 제어기와 수치미분을 사용한 TDC 제어기를 회전체 시스템에 적용하여 시뮬레이션 하였다.

Fig. 3 는 미지의 외란이 연속적으로 작용할 때 각각의 제어기의 응답이다. 그림에서 나타내는 것처럼 PD 제어기는 정상상태에서 잔류진동이 있음을 볼 수 있으나 TDC 제어기는 예측하지 못한 연속적인 외란에서도 정상상태에서 잔류 진동이 없는 원하는 응답을 나타냄을 볼 수 있다.

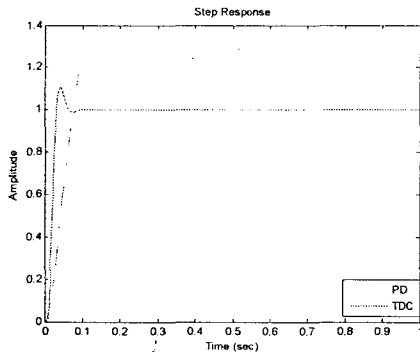


Fig. 3 Unknown disturbance for PD and TDC control system

Fig. 4 는 위치강성이 변화가 있을 때(평형상태의 0.6 배) 각각의 제어기의 응답이다. 그림에서 보듯이 PD 제어기는 비교적 큰 정상상태 오차가 있음을 볼 수 있으나 TDC 제어기는 정상상태에서 오차 없이 원하는 응답을 나타냄을 볼 수 있다.

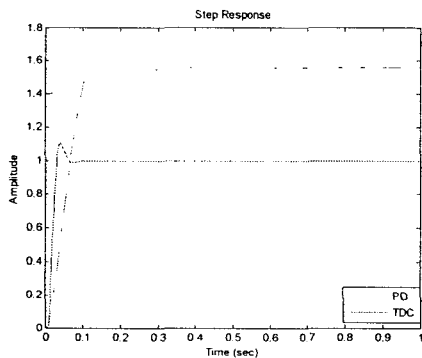


Fig. 4 Position stiffness variations for PD and TDC control system

Fig. 5 는 전류강성이 변화가 있을 때(평형상태의 1.8 배) 각각의 제어기의 응답이다. 그림에서 보듯이 PD 제어기는 응답속도가 느려지고 비교적 큰 정상상태 오차가 있음을 볼 수 있으나 TDC 제어기는 신속하게 정상상태 오차가 없이 원하는 응답을 나타냄을 볼 수 있다.

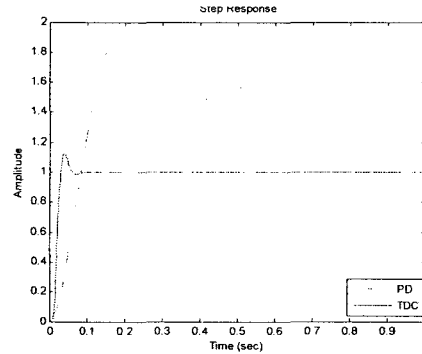


Fig. 5 Current stiffness variations for PD and TDC control system

5. 결론

본 논문에서는 TDC 기법을 회전체 진동 제어 시스템에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. TDC 제어기는 예측하지 못한 외란과 매개변수 변동에 매우 강한 힘을 알 수 있었고 회전체 진동을 저감함에 있어서 제안된 제어기를 적용한 결과 비례-비분 제어기 보다 향상된 제어성능을 보였다.

참고문헌

1. Kwon, K. S., Jeong, H. S. and Lee, C. W., "Displacement Sensorless Active Magnetic Bearing Control by Current Measurement," KSNVE, Vol. 5, No.1, pp. 49-57, 1995.
2. Yi, H.B. and Kim, Y. B., "A Study of Rotor Vibration Reduction using Fuzzy Magnetic Damper System," KSME A, Vol.25, No.4, pp. 748-755, 2001.
3. Youcef-Toumi, K. and Fuhlbrigge, T., "Application of Decentralized Time Delay Controller to Robot Manipulator," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1786-1791, 1989.
4. Lee, J. W., Chang, P. H. and Kim, S. H., "A Study on Robust Control of DC Servo Motor Using Time Delay Control and Observer/Controller Stabilization," KSMEA, Vol.17, No.5, pp. 1029-1040, 1993.
5. Song, J. B. and Lee, S. M., "Engine Torque and Engine/Automatic Transmission Speed Control Systems Using Time Delay Control," Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol.2, No.2, 1996.
6. Hara, T. C. and Gao, L. S., "Robot Manipulator Control using Decentralized Time Invariant Time-Delayed Controller," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2070-2075, 1990.