

## 2관성계 전동기 구동 시스템의 축 진동 억제에 관한 연구

지 준 근

순천향대학교 공과대학 제어계측공학과

### A Study on Torsional Vibration Suppression of 2-Mass Motor Drive System

Jun-Keun Ji

Dept. of Control, Elec. Eng., Soon Chun Hyang Univ.

#### Astract

This paper deals with the comparison study of speed controller for torsional vibration suppression of 2-mass motor drive system. Firstly conventional methods suggested were classified systematically and the features of each method were also compared. Especially the speed controller based on Kalman filter and LQ state feedback was proposed and the response characteristics of it were compared with those of some other methods. Through various computer simulations and the experiments of real 22[KW] field oriented controlled AC motor drive system having 2-mas mechanical system, it was confirmed that the characteristic of proposed speed controller using Kalman filter and LQ is the best among them.

#### 1. 서 론

일반적으로 전동기 구동 시스템의 속도제어에 요구되는 특성들은 속도명령에 대한 고속 응답성(fast speed response)과 부하 외란에 대한 안정성(rejection of disturbance on the loadside) 그리고 계수 변화에 대한 강인성(robustness to parameter variations)이다. 특히 압연기용 전동기 구동 시스템과 같은 경우에는 고성능 벡터제어 유도 전동기 구동 시스템의 도입으로 더 빠른 응답성과 더 높은 정확도를 가지는 속도제어를 요구하게 되었다.

그러나 본래 축이 길고 부하축 질량이 큰 압연기용 구동 시스템이나 유연성 커플링(flexible coupling)을 가진 로봇 팔(robot arm)등과 같이 두 개 혹은 그 이상의 질량(mass)이 저항성의 축으로 연결되어 있는 2관성계(2

mass system)의 경우에 있어서는 시스템 자체의 기계적 공진 주파수가 수[Hz]~ 수십[Hz]정도로 매우 낮기 때문에 PI 속도제어와 같은 기존의 제어방식으로는 속도제어의 응답성에서 축 비틀림이 발생하게 되어 제어하기가 어렵고 심한 경우 축이 손상되는 등의 문제점이 발생한다.

더구나 제어의 최종목적이 되는 부하속도나, 축토크 및 부하토크와 같은 양들은 통상적으로 실제 시스템에서 측정할 수 없다는 점과 기계적인 계수들의 부정확성등을 고려할 때, 축 비틀림 진동 억제를 위한 속도제어에는 많은 어려움이 따르지만 고성능의 속도제어기의 실현을 위해서는 반드시 해결되어야 할 과제이기에 이 분야에서 실제 적용을 위한 많은 연구들이 수행되고 있다. 본 연구에서는 축진동 억제를 위한 기존의 속도제어 방법들을 살펴보고 그 장단점 및 실제 적용 여부에 대하여 고찰하였다.

#### 2. 2관성계 전동기 구동 시스템의 모델링

##### 가. 시스템 구성 및 모델링

실제 전동기 구동 시스템의 기계적인 토크 전달 기구는 회전부의 형상 및 가감속 기어의 유무등에 따라 매우 복잡한 구조를 가지고 있는 고차 시스템이다. 그러나 대부분의 전동기 구동 시스템에서는 질량이 전동기축과 부하축, 두 곳에 집중되어 있고 그 사이에 축이 있어 토크를 전달하는 것으로 근사화시킬 수 있다. 이와 같은 2관성계 모델(2 mass system model)로부터 운동 방정식을 구하면 식 (1)~(3)과 같다.

$$\omega_M = \frac{1}{J_M s} (T_e - T_{sh}) \quad (1)$$

$$\omega_L = \frac{1}{J_L s} (T_{sh} - T_L) \quad (2)$$

$$T_{sh} = \frac{K_{sh}}{s} (\omega_M - \omega_L) + B_{sh} (\omega_M - \omega_L) \quad (3)$$

나. 상태공간 해석

상태공간에서의 해석을 위해, 상태벡터  $X = [\omega_M \ \omega_L \ T_{sh}]$ 로 하고, 전동기속도를 출력  $Y = \omega_M$ 으로 하면 시스템의 상태 방정식은 식 (4)와 같다.

$$\dot{X} = AX + BT_e + ET_L \quad Y = CX \quad (4) \quad \text{여기서,}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{J_M} \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_L} \\ K_{sh} & -K_{sh} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_M} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-1}{J_L} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C = [1 \ 0 \ 0]$$

단,  $\omega_M$ : 전동기속도,  $\omega_L$ : 부하속도,  $T_e$ : 전동기토크,

$T_{sh}$ : 축토크,  $T_L$ : 부하토크

$J_M$ : 전동기축 관성 모멘트,  $J_L$ : 부하축 관성 모멘트,

$K_{sh}$ : 축의 스프링 상수(강성).

시스템의 고유 공진 주파수는  $|sI - A| = 0$ 에서 다음과 같이 주어진다.

$$\omega_0 = \sqrt{K_{sh} \left( \frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L} \right)} \quad (5)$$

3. 적분제어 및 부하토크 보상 제어를 포함최적 상태궤환 제어<sup>3)</sup>

단일 변수 설계에서,  $Y_{ref}$ 와  $T_L$ 이 일정한 정상상태 값을 가진다면, 적분제어는 정상상태 오차가 없는(i.e.,  $Y \rightarrow Y_{ref}$  as  $t \rightarrow \infty$ ) 안정한 설계(i.e.,  $X \rightarrow 0$  as  $t \rightarrow \infty$ )로 구현될 수 있다.

이 설계 문제를 해결하기 위해서, 우선 새로운 상태변수를 다음과 같이 지정한다.

$$p = \int_0^t (Y - Y_{ref}) dt \quad (6)$$

식 (6)을 미분하고 식 (4)를 이용하면 다음과 같은 미분 방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU + ET_L \\ \dot{p} &= Y - Y_{ref} = CX - Y_{ref} \end{aligned} \quad (7)$$

다음과 같이 정상상태의 편차를 나타내는 새로운 변수를 정의하자.

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X - X_s \\ p - p_s \end{bmatrix}, \quad \dot{z} = \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{p} \end{bmatrix},$$

$$v = U - U_s \quad (8) \quad \text{이것으로, (8)식은}$$

$$\dot{z} = \hat{A} z + \hat{B} v, \quad \hat{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$$

이 결과의 중요성은, 정상상태의 편차를 상태변수, 제어변수로 정의함으로써 설계 문제가 표준 LQ 제어문제

(standard LQR problem)와 같은 형태로 재구성 될 수 있다는 사실이다. 가격 함수  $J$ 와 제어 입력  $v$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$J = \int_0^{\infty} (z^T Q z + R v^2) dt \quad (9)$$

$$v = -G z \quad (10)$$

$G$ 를 적당히 분할한 후, 식 (10)을 이용하면

$$G = [G_1 \ G_2], \quad v = -G_1 z_1 - G_2 z_2$$

$$U - U_s = -G_1 (X - X_s) - G_2 (p - p_s) \quad (11)$$

정상상태 항은 서로 평형(balance)되어 있다.  $p$ 를 적분 형태의 식 (6)으로 대치하면 제어 입력  $U$ 는 다음과 같다.

$$U = -G_1 X - G_2 p = -G_1 X - G_2 \int_0^t (Y - Y_{ref}) dt$$

(12) 여기서

$$G_1 = [f_1 \ f_2 \ f_3], \quad G_2 = K_i, \quad Y_{ref} = \omega^*$$

$$U = -[f_1 \ f_2 \ f_3] [\omega_M \ \omega_L \ T_{sh}]^T - K_i \int_0^t (\omega_M - \omega^*) dt \quad (13)$$

만일 2관성계 시스템의 제어 목적을 만족시키기 위해 가중치 행렬  $Q$ 와  $R$ 이 식 (14)로 주어진다

$$Q = \begin{bmatrix} \alpha & -\alpha & 0 & 0 \\ -\alpha & \alpha + \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \delta \end{bmatrix}, \quad R = \gamma \quad (14)$$

가격 함수  $J$ 는 식 (15)와 같이 된다.

$$J = \int_0^{\infty} (\alpha(\omega_M - \omega_L)^2 + \beta(\omega_L - \omega^*)^2 + \delta(p - p_s)^2 + \gamma(U - U_s)^2) dt \quad (15)$$

여기서,  $\alpha$ : 축진동 억제에 대한 가중치,  $\beta$ : 명령 추종에 대한 가중치,  $\delta$ : 정상상태 오차에 대한 가중치,  $\gamma$ : 제어 입력에 대한 가중치 가중치  $\alpha, \beta, \delta$ , 그리고  $\gamma$ 는 설계 특성에 맞게 오프라인(off-line)으로 MATLAB 시뮬레이션을 이용하여 시행착오적으로 결정할 수 있다.

4. 실험결과 및 검토

본 연구에서 제시된 속도제어기의 타당성을 확인하기 위하여 실제로 2관성계를 가지는 22[KW] 압연용 AC 전동기 구동시스템과 저항부하장치를 가지고 실험을 행하였다. 속도 스텝 응답특성은 800[rpm] 정상상태에서 1000[rpm]으로, notebook PC를 사용하여 DSP와 serial 통신으로 정격속도의 11[\*]에 해당하는 200[rpm]의 속도 스텝 명령을 인가하였을 때의 응답특성을 살펴보고, 부하 스텝 응답특성은 1000[rpm] 정상상태에서 DC 발전기에 연결된 저항부하장치를 스위치 온(switch on)하여 정격토크의 50[\*]에 해당하는 60[N-m]의 부하토크를 인가하였을

때의 응답특성을 살펴보았다.

그림 1과 2는 2관성계 시스템의 계수들의 부정확성과 변화들을 고려한 경우로서, 실제 전동기측과 부하측의 관성이 각각 45[x], 축의 강성이 10[x] 큰 경우에 실험한 결과이다. 부하속도의 추정치에서 계수들의 차이로 인한 오차들이 약간 생기고 있지만, 전체적인 제어특성은 양호하고 안정되어 있다. 이 경우는 실제로 전동기측과 부하측의 커플링(coupling)의 관성을 무시했을 때의 실험결과이다. 2관성계 시스템의 계수(parameter)들의 부정확성과 변화들을 고려한 경우에도 제시된 제어기가 역시 안정된 동작 특성을 갖는 것을 볼 수 있다.

### 5. 결 론

2관성계를 가지는 전동기 구동시스템의 축진동 억제를 위한 고성능 속도 제어를 위해서, 기존에 제안된 여러 방법들을 체계적으로 살펴보고 장단점 분석 및 응답특성을 비교하여 보았다. 특별히 제어에 필요한 부하속도, 축토크 및 부하토크를 칼만필터를 사용하여 추정하고 최적상태관 제어를 행하는 속도제어기에 대해 제안하고 그 응답특성을 기존의 방법들과 비교하여 우수함을 입증하였다. 실제의 확인과 다양한 검증을 위하여 2관성계를 가지는 22[KW] AC 전동기 구동시스템을 실제로 설계 제작하였고, 다양한 조건과 경우들에 대하여 다른 제어기들(PI 속도제어기, 최소차원 관측기 및 극점배치법을 사용하는 상태관 제어기)과 비교 검토하는 실험을 통하여 제시된 제어기의 우수성을 살펴보았다. 칼만필터와 최적제어기가 가지는 특성을 이용하여 기계적인 시스템의 계수의 부정확성 및 변동이 있는 경우( $J_M$ 과  $J_L$ 의 45[x] 변화,  $K_{sh}$ 의 10[x])에도 제시된 제어기가 안정된 동작을 하는 것을 확인했다.

### 참 고 문 헌

- [1] W. Leonhard, Control of Electrical Drives, Springer-Verlag, 1985.
- [2] M. Sugano, et. al., "Torsional Vibration Suppression Control by Speed Differentiation," in Proc. of IEE-Japan SPC-90-109, 1990.
- [3] T. Hasegawa, et. al., "A Microcomputer-Based Motor Drive System with Simulator Following Control," in Proc. of IEEE IECON'86, Vol. 1, pp. 41-47, 1986.
- [4] M. Koyama, et. al., "Two Degree of Freedom Speed Controller using Reference System Model for Motor Drives," in Conf. Record, EPE'91, Firenze, 1991.

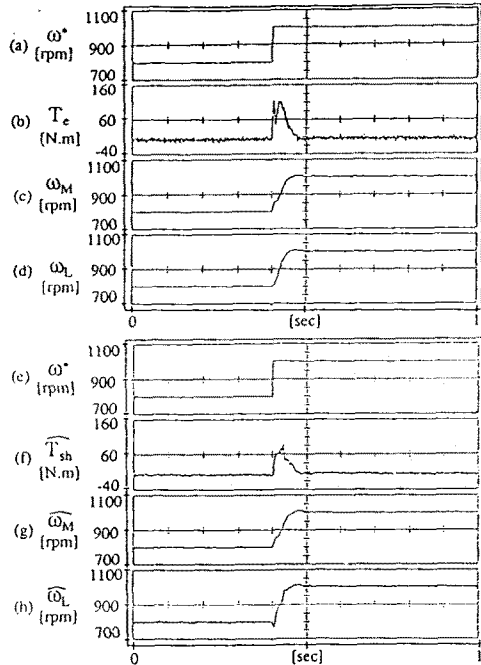


그림 1 적분제어 및 부하토크 보상 제어를 포함한 최적 상태관제어의 속도 스텝응답 ( $J_M=1.45J_M^*$ ,  $J_L=1.45J_L^*$ ,  $K_{sh}=1.1K_{sh}^*$ )

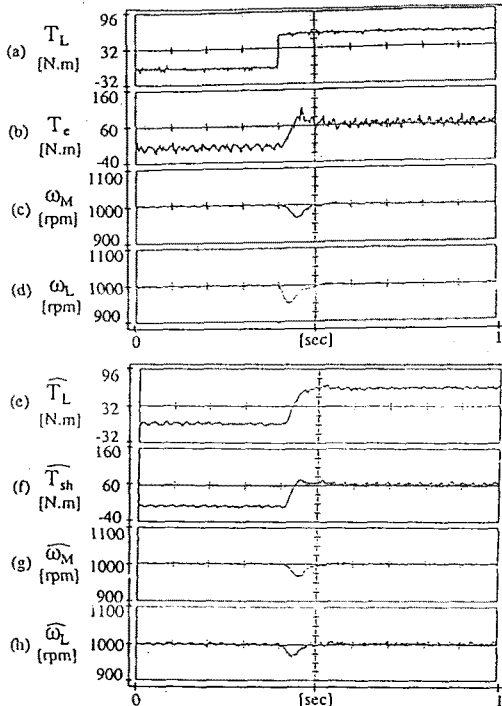


그림 2 적분제어 및 부하토크 보상 제어를 포함한 최적 상태관제어의 부하 스텝응답 ( $J_M=1.45J_M^*$ ,  $J_L=1.45J_L^*$ ,  $K_{sh}=1.1K_{sh}^*$ )