

시간지연 관측기를 이용한 전기식 구동시스템의 위치제어

이영철*, 이흥호**
국방과학연구소*, 충남대학교 전기공학과**

A position control of an electro-mechanical actuation system using Time Delay Observer(TDO)

Young-Cheol Lee*, Heung-Ho Lee**
Agency for Defense Development*, Dept. of Electrical Eng. Choongnam National Univ.**

Abstract - 본 논문에서는 시간지연 관측기를 위치제어 시스템 적용하여 설계한 내용을 기술하였다. 시간지연 제어기의 상태추정 기법을 이용한 시간지연 관측기는 플랜트 모델이 필요하지 않아 설계가 용이하고, 파라미터 변동 및 외란에 강건하다. 또한 계산이 간단하여 디지털 제어 시스템에 충분히 적용이 가능하다. 본 논문에서는 시간지연제어기가 위치제어기로 적용된 전기식 구동시스템에서 속도센서를 사용하지 않고 시간지연 관측기를 적용하여 제어기를 설계하였다. 시간지연 관측기를 적용한 구동시스템에 대해 비선형 시뮬레이션을 수행하였으며, 속도센서를 사용한 경우와 상태관측기를 적용한 경우 및 PID 제어기를 적용한 경우에 대해 비교하였다.

1. 서 론

최근 자성재료, 전력전자공학, 마이크로프로세서, 모터설계 등 요소기술의 발전과 자동화, 고정정화 및 고속화 등의 산업적 요구로 인해 전기모터의 적용이 확대되고 있으며 유도무기의 구동장치로도 전기식 구동시스템이 널리 이용되고 있다. 유도무기용 구동장치는 공간이 협소하면서도 고효율을 요구하기 때문에 포화요소와 같은 비선형성 및 발열 등의 문제로 인한 파라미터 변동 요인이 존재한다. 따라서 이와 같은 문제에 잘 대처하기 위해서는 강건 성능이 높은 현대 제어이론을 적용하는 것이 바람직하다. 근래에 여러 가지 강건 제어 알고리즘들이 제안되었으나 본 논문에서는 시간지연 제어기(Time Delay Controller, TDC)[1-2]를 전기식 구동시스템의 위치제어기로 적용하였다. 지금까지는 위치신호 및 속도신호와 속도 신호를 미분한 가속도 정보를 시간지연 제어기에 적용하였다. 이러한 방법은 물리적으로 정확한 속도 정보를 얻을 수 있어 안정성을 가지며 정확한 위치제어를 수행할 수 있지만 속도센서의 추가로 인한 경제성 측면, 센서장착 공간확보 및 고장 가능성 등의 측면에서 불리하다. 이러한 단점들을 해결하기 위해 소프트웨어적으로 구동기의 속도를 추정할 수 있는 관측기의 적용이 요구되었다. 위치신호로부터 속도를 추정하기 위해 여러 가지의 관측기 사용이 가능하지만 구동장치의 비선형성 및 파라미터 변동 등의 요인으로 일반적인 관측기를 적용하는 것은 쉽지 않다. 따라서 적용이 용이하면서 강건 성능이 뛰어난 시간지연 관측기(Time Delay Observer, TDO)[3]를 사용하였다. 시간지연 관측기는 설계 시 모델이 필요하지 않아 시스템 동력학이 불확실해도 설계가 가능하며 또한 모델을 포함하지 않으므로 파라미터 변동 및 외란과 같은 모델 불확실성에 둔감하며 계산이 간단하여 실제 시스템에 적용이 용이하다. 본 논문에서는 시간지연 관측기를 적용한 전기식 구동시스템에 대해 위치제어기 설계하고 비선형 시뮬레이션을 수행하였으며 속도센서를 적용한 TDC의 경우, 상태관측기를 적용한 경우 및 PID제어기를 적용한 경우와도 비교하였다.

2. 시간지연 관측기

비선형 단일 입출력(Single Input Single Output, SISO) 시스템의 미분 방정식이 다음과 같다고 가정하자.

$$\dot{x}^{(n)} = f(x) + g(x)u + d$$

$$y = x$$
(1)

여기서 $x = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T$ 는 상태벡터, u 는 입력, y 는 출력이고, $f(x)$ 는 모르는 시스템 비선형 동력학이며, $g(x)$ 는 범위를 알고 있는 비선형 제어 영향값, d 는 외란이다.

식(1)을 위상변수 형태로 유도하여 보면 다음과 같다.

$$\dot{x} = E_n x + \hat{F}(x, u) + \hat{G}u$$

$$y = Cx$$
(2)

여기서,

$$E_n = \begin{bmatrix} 0_{(n-1) \times 1} & I_{(n-1)} \\ 0_{1 \times n} & \end{bmatrix}$$

$$\hat{F}(x, u) = \begin{bmatrix} 0_{(n-1) \times 1} \\ \hat{f}(x, u) \end{bmatrix}$$

$$\hat{G} = \begin{bmatrix} 0_{(n-1) \times 1} \\ \hat{g} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 : 0_{1 \times (n-1)}]$$
(3)

$0_{i \times j}$ 는 모든 원소를 0으로 갖는 $i \times j$ 행렬, I_k 는 $k \times k$ 단위행렬, \hat{g} 는 $g(x)$ 의 추정치이다. 외란을 포함하는 시스템 비선형 동력학 $\hat{f}(x, u)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{f}(x, u) = f(x) + (g(x) - \hat{g})u + d$$
(4)

2.1 시간지연관측기 유도

시스템 (2)를 위해 다음과 같은 관측기를 적용하는 것이 가능하다고 가정한다.

$$\dot{z} = E_n z + \hat{F}(x, u) + \hat{G}u - K(z_1 - y)$$
(5)

여기서, $z \in R^n$ 는 재구성된 상태 벡터이고, $K \in R^{n \times 1}$ 는 관측기 이득 행렬이다.

이때 관측오차 $e \triangleq z - x$ 는 다음 식과 같이 지수함수적으로 수렴하며 K 값의 적절한 조정에 의해 수렴속도가 결정된다.

$$\dot{e} = (E_n - KC)e$$
(6)

관측기를 구현하기 위하여 $\hat{f}(x, u)$ 를 추정할 수 있어야만 한다. 이를 위해 시간지연 제어법칙(1)으로부터 추정 방법을 인용하여 아래와 같이 적용한다. 첫째로 $\hat{f}(x, u)$ 를 연속적인 함수이고 시간지연량 L 이 충분히 작다고 가정하면 $\hat{f}(x, u)$ 를 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\hat{f}(\mathbf{x}, u) \approx \hat{f}(\mathbf{x}_{-L}, u_{-L}) \quad (7)$$

여기서, $(\cdot)_{-L} \stackrel{\text{def}}{=} (\cdot)(t-L)$

둘째, 위 식(7)을 식(2)에 적용하면 $\hat{f}(\mathbf{x}, u)$ 는 다음 식과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\hat{f}(\mathbf{x}, u) = \dot{x}_n - \hat{g}u \approx \dot{x}_{n-L} - \hat{g}u_{-L} \quad (8)$$

오차 동력학의 수렴속도가 $\hat{f}(\mathbf{x}, u)$ 의 동력학보다 매우 빠르다고 가정하면 $\hat{f}(\mathbf{x}, u)$ 는 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\hat{f}(\mathbf{x}, u) \approx \dot{z}_{n-L} - \hat{g}u_{-L} \quad (9)$$

식(9)에서 식(5)를 빼고 상수 α 를 도입하면 시간지연 관측기는 다음과 같다.

$$\dot{z} = \mathbf{E}_n z + \alpha \begin{bmatrix} 0_{1 \times (n-1)} \\ \dot{z}_{n-L} - \hat{g}u_{-L} \end{bmatrix}^T + \hat{\mathbf{G}}u - \mathbf{K}(z_1 - y) \quad (10)$$

여기서, α 는 저역통과 필터의 역할을 한다.

2.2 추정오차 동력학

식(10)의 시간지연 관측기가 식(2)의 비선형 시스템에 적용된다면 추정 오차 동력학은 다음과 같다.

$$\dot{e}_{oi} = \mathbf{A}_{oi} e_{oi} - \mathbf{B}\gamma(\mathbf{x}, u, L) \quad (11)$$

여기서, $e_i = z_i - x_i$ 이고,

$$\mathbf{e}_{oi} = [e_1, e_2, \dots, e_{n+1}]^T, e_{n+1} = \dot{e}_n$$

$$\mathbf{A}_{oi} = \begin{bmatrix} -K_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -K_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -\frac{K_n}{\alpha L} & 0 & \dots & 0 & -\frac{(1-\alpha)}{\alpha L} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0_{n \times 1} \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\gamma(\mathbf{x}, u, L) = \left(\frac{(1-\alpha)}{\alpha L} \hat{f}(\mathbf{x}, u) + \phi_1(L) - \frac{\alpha}{\alpha L} \phi_2(\mathbf{x}, u, L) \right) \quad (13)$$

여기서, $\phi_1(L) = (\dot{e}_n - \dot{e}_{n-L} - \dot{e}_n)$

$$\phi_2(\mathbf{x}, u, L) = \hat{f}(\mathbf{x}, u) - \hat{f}(\mathbf{x}_{-L}, u_{-L})$$

2.3 파라미터 선정

식(11)에서 오차 동력학의 고유치를 결정하기 위하여 α , L , \mathbf{K} 를 선정할 수 있다. 그 선정과정은 아래와 같이 요약할 수 있다.

① 식(11)로부터 오차 동력학의 특성방정식을 구하고

$$s^{n+1} + \left[\frac{1-\alpha}{\alpha L} + K_1 \right] s^n + \left[\frac{1-\alpha}{\alpha L} K_1 + K_2 \right] s^{n-1} + \dots + \left[\frac{1-\alpha}{\alpha L} K_{n-2} + K_{n-1} \right] s^2 + \left[\frac{1-\alpha}{\alpha L} K_{n-1} \right] s + \frac{K_n}{\alpha L} = 0 \quad (14)$$

원하는 고유치를 가진 특성방정식을 설정한다.

$$s^{n+1} + A_1 s^n + A_2 s^{n-1} + \dots + A_n s + A_{n+1} = 0 \quad (15)$$

② 식(14)와 (15)의 계수를 각 항별로 비교하여 $(1-\alpha)/\alpha L$, K_2, \dots, K_{n-1} 를 소거하여 p 에 대한 n 차의 방정식을 얻는다(여기서 $p = K_1 - A_1$).

$$A_n + A_{n-1}p + A_{n-2}p^2 + \dots + A_1 p^{n-1} + p^n = 0 \quad (16)$$

③ p 에 대해 식(16)를 풀어 K_1 을 구한다.

④ CPU의 성능을 고려하여 충분히 작은 L 를 선정한다.

⑤ 식(14)와 (15)의 계수들을 비교하여 풀면

$$\alpha = \frac{1}{(A_1 - K_1)L + 1}$$

$$K_2 = A_2 - \frac{1-\alpha}{\alpha L} K_1$$

$$K_3 = A_3 - \frac{1-\alpha}{\alpha L} K_2$$

...

$$K_{n-1} = \frac{\alpha L}{1-\alpha} A_n$$

$$K_n = \alpha L A_{n+1}$$

(17)

⑥ 요구조건에 만족할 때까지 ①~⑤의 작업을 반복하여 고유치를 조정한다.

3. 전기식 구동시스템의 시간지연 관측기 설계

3.1 시간지연 관측기 설계

전기식 구동시스템의 수학 모델은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ \dot{\omega}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1/\tau_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_m \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

위 식에서 τ_m 과 b_m 은 각각 구동장치의 기계적 시상수와 입력이득이며 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_m = \frac{R_m J_e}{R_m B + K_T K_B}$$

$$b_m = \frac{K_T}{R_m J_e N}$$

위의 (18)식을 외란이 포함된 위상변수 형태로 정리하면 아래의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ \dot{\omega}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/\tau_m \cdot \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_m \end{bmatrix} u(t) + d$$

$$y(t) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \quad (19)$$

위 식으로부터,

$$\mathbf{E}_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \hat{f}(\mathbf{x}, u) = -1/\tau_m \cdot \omega(t)$$

$$\hat{g} = b_m, \hat{\mathbf{C}} = [1 \quad 0]$$

을 구할 수 있으며, 전기식 구동시스템에 적용될 시간지연 관측기 모델은 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \alpha \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 - b_m u_{-L} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_m \end{bmatrix} u(t) - \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} [z_1 - y]$$

3.2 파라미터 선정

① 시간지연

이산 제어시스템에서 시간지연의 양은 샘플링 간격의 정수배로 정할 수 있으며 그 값을 최소로 하기 위하여 샘플링 간격과 같게 정했다.

$$L = 2\text{msec}$$

② 비선형 제어 영향값의 추정치

비선형 제어 영향값의 추정치는 시스템의 제어 영향값을 알고 있는 값으로 사용할 수 있다.

$$\hat{g} = b_m$$

③ 오차 동력학

전기식 구동시스템의 모델이 2차이므로 원하는 오차 동력학은 다음의 고유치를 가진 3차 모델로 선정한다.

$$(s + \lambda_1)(s + \lambda_2)(s + \lambda_3) = 0 \quad (21)$$

④ 파라미터 선정

위의 식(21)에서,

$$A_1 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$$

$$A_2 = \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_3 + \lambda_2 \lambda_3$$

$$A_3 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$$

식(16)은 p 에 대한 2차 방정식으로 다음과 같다.

$$A_2 + A_1 p + p^2 = 0 \Rightarrow K_1^2 - A_1 K_1 + A_2 = 0 \quad (22)$$

식(22)를 풀면,

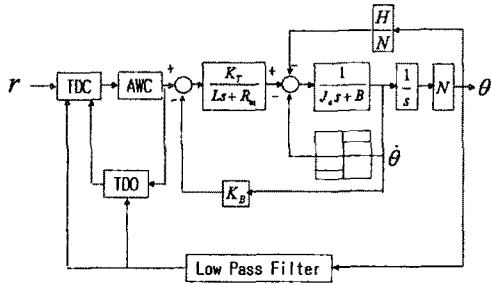
$$K_1 = \frac{A_1 \pm \sqrt{A_1^2 - 4A_2}}{2}$$

이고, 2.3절의 파라미터 선정 절차에 따라 아래의 파라미터들을 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{(A_1 - K_1)L + 1}, \quad K_2 = \alpha LA_3$$

4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 MATLAB™/SIMULINK를 사용하여 수행하였다. 전기식 구동시스템에서 시간지연 관측기를 적용한 시간지연제어기(TDC/TDO)의 강건 성능을 평가하기 위하여 파라미터 변동에 대한 비선형 시뮬레이션을 수행하였으며 속도센서를 적용한 TDC의 경우, 상태 관측기를 적용한 경우(TDC/SO) 및 PID제어기를 적용한 경우와도 비교하였다. 시간지연 관측기를 이용한 전기식 구동시스템의 블록선도는 그림1과 같다.



*AWC : Anti Windup Compensator

그림 1. 전기식 구동시스템의 시뮬레이션 블록

그림2 ~ 그림4는 관성, 모터저항, 부하 변동에 따른 5° 계단응답 특성결과이다. 공칭상태에서는 모두 양호한 응답 특성을 나타내고 있다. 그림2 및 그림3에서와 같이 TDC와 TDC/TDO의 경우 관성 및 모터저항 변동에 대해 TDC/SO 및 PID 보다 훨씬 안정된 응답을 보여 주고 있다. 또한, 그림4의 부하 변동에 대해서도 TDC와 TDC/TDO는 다른 제어기에 비해 주어진 명령을 잘 추종함을 알 수 있다.

5. 결 론

시간지연 제어기를 적용한 전기식 구동장치의 속도추정을 위해 시간지연 추정기법을 이용한 관측기를 설계하였다. 시간지연 관측기는 설계 시 모델이 필요하지 않아 시스템 동역학이 불확실해도 설계가 용이함을 볼 수 있었다. 또한 시뮬레이션을 통해 모델 불확실성에 둔감함을 입증하였으며 속도센서를 적용한 경우와 유사한 응답 특성과 안정성을 보임을 확인하였다

[참 고 문 헌]

- [1] Youcef-Toumi, K. and Ito, O., "A Time Delay Controller for Systems with Unknown Dynamics", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol. 112, pp. 133-142, Mar. 1990.
- [2] Youcef-Toumi, K. and Bobbett, J., "Stability of Uncertain Linear Systems with Time Delay", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol. 113, pp. 558-567, Dec. 1991.
- [3] Jang, P. H., and Lee, J. W., "Time Delay Observer: A robust observer for nonlinear plants," ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, vol. 119, pp.521-527, 1997.

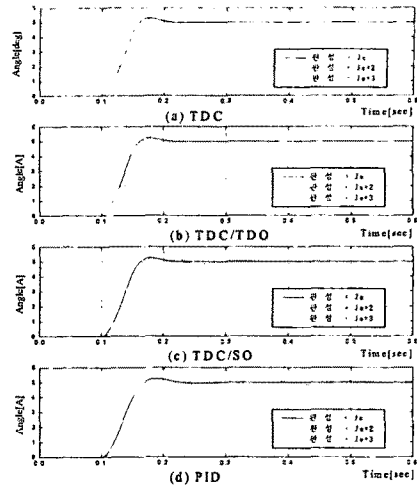


그림 2. 관성변동에 따른 계단응답

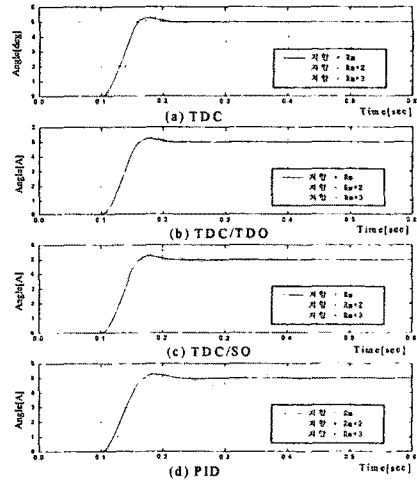


그림 3. 모터저항 변동에 따른 계단응답

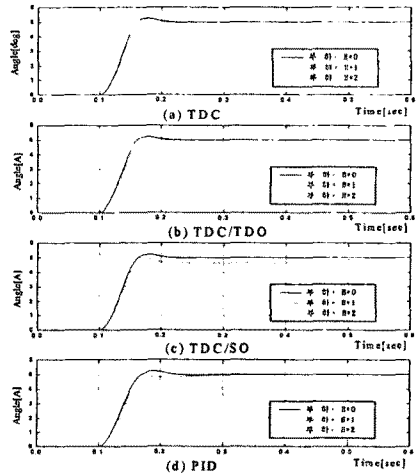


그림 4. 부하변동에 따른 계단응답