

시간지연 제어를 이용한 전기식 구동장치의 위치제어

이영철*, 이흥호**
국방과학연구소*, 충남대학교 전기공학과**

A position control of an electro-mechanical actuation system using Time Delay Controller(TDC)

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

Abstract - 본 논문에서는 외란 및 파라미터 변동에 강건한 시간지연 제어 알고리즘을 전기식 구동장치의 위치 제어기에 적용하여 설계한 내용을 기술하였다. 시간지연 제어기는 일정하게 경과된 시간에서의 외란 및 동특성 변동의 양을 현재의 것으로 가정하여 전체 제어 시스템의 특성이 기준모델의 특성을 따르게 하는 제어기이다. 파라미터 변동 및 외란에 대해 시간지연 제어기의 강건성을 시뮬레이션을 통해 입증하였으며 PID 제어기와도 비교하였다. 또한 포화요소에 대한 와인드업 방지 보상기와 모델링되지 않는 동특성에 대한 대항필터링 보상을 설계하여 시스템의 안정성을 향상시켰다.

1. 서 론

최근 자성체 및 전력전자 기술의 발달에 따라 유도무기 분야에도 전기모터를 이용한 구동장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 유도무기용 구동장치는 비행 중 외부로부터의 환경변화 및 모터 발열 등에 의한 파라미터 변동과 공력 부하로 인한 외란에 강건한 위치제어기가 요구된다.

근래에 여러 가지 강건 제어 알고리즘들이 제안되었으나 본 논문에서는 시간지연 제어기(Time Delay Controller : TDC)[1-2]를 적용하여 전기식 구동장치의 위치제어 시스템을 설계하였다. 우선 전기식 구동장치의 선형모델에 대해 시간지연 제어기를 설계하고 비선형 모델에 대한 시뮬레이션을 하였다. 또한 본 구동장치가 포화요소와 모델링되지 않는 동특성(저역필터)을 포함하고 있으므로 이에 대해 와인드업 방지 보상기와 대항필터링 보상을 설계하였다.

2. 시스템 모델링

제어기의 설계를 위한 전기식 구동기의 플랜트 모델은 DC 모터, 감속기구 등을 선형화 시키고, 모터의 전기적 시상수(Electrical Time Constant)를 무시하여 2차 모델로 결정했다. 이 때 사용된 파라미터는 공칭값을 사용했으며 실제 구동기에서는 이 값에 변동이 있을 수 있다. 다음 식(1) 및 식(2)에 플랜트 모델의 방정식을 나타내었다.

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

$$y(t) = [1/n \ 0] \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$u(t)$: 입력전압(volt), $y(t)$: 출력각도(rad)
 $\theta(t)$: 모터 회전각(rad), $\omega(t)$: 모터속도(rad/sec)
 n : 감속비

식(1) 및 식(2)에서 τ_m 과 b_m 은 각각 기계적 시상수와 입력이득이며 다음과 같이 표현된다.

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

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

R_m : 모터저항, J_e : 관성, B : 비스코스 댐핑계수
 K_T : 토크상수, K_B : back emf 상수

식(1)과 식(2)로 나타내어진 시스템을 다음 식으로 표현하기로 한다.

$$\dot{x} = Ax + bu \quad (3)$$

$$y = cx \quad (4)$$

입력 $u(t)$ 에서 출력 $y(t)$ 로의 플랜트의 전달함수 $p(s)$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} \triangleq p(s) = \frac{b_m}{s(s+a)} \quad (5)$$

여기서, x 는 시스템의 상태벡터이고 a 는 $1/\tau_m$ 이다.

3. 제어기 설계

3.1 TDC 설계

다음 그림 1에서 시간지연 제어기를 이용한 전체 제어시스템의 동특성은 기준모델의 동특성을 따르게 설계된다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{Y(s)}{R(s)} \rightarrow p_m(s) \quad (6)$$

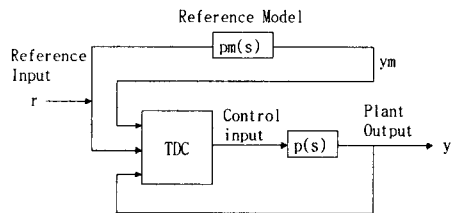


그림 1. TDC 구조

정준형(Canonical Form)으로 표현 가능한 상태방정식을 만족하는 플랜트에 대해 기준모델을 따르도록 시간지연 제어기를 설계할 수 있다. 플랜트의 차수가 2차이므로 2차 시스템에 대한 기준모델로 정한다.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2} \triangleq p_m(s) \quad (7)$$

y : 위치, r : 기준입력
 ζ : 댐핑계수, ω_n : 고유주파수

위에서 $\zeta = 0.7071$ 로 할 경우 이 기준모델의 응답특성은 ITAE(Integrated Time Averaged Error Minimizing)기준을 만족하며 이 때 시스템의 주파수 대역폭(Bandwidth)은 고유주파수 ω_n 과 같게 된다.

식(5)로 표현된 플랜트와 시간지연 제어기에 의한 폐회로 제어시스템이 식(7)로 표현된 기준모델을 따르기

위한 시간지연 제어법칙은 다음으로 주어진다.

$$u(t) = u(t-L) + (1/b_m)[- \dot{\omega}(t-L) - 2\xi\omega_n\omega(t) - \omega_n^2\theta(t) + \omega_n^2r(t)] \quad (8)$$

여기서 시간지연(L)은 이산 제어시스템에서 시간지연의 양은 샘플링 간격과 같게 하였으며 가속도 성분은 아래와 같이 미분근사치로 사용하였다.

$$\dot{\omega}(t-L) \approx \frac{\omega(t) - \omega(t-L)}{L} \quad (9)$$

이 과정에서 측정 노이즈가 제어기 출력 값에 영향을 미칠 수 있으나 속도 측정시 저역통과 필터를 사용하여 노이즈의 영향을 감소시킬 수 있다.

3.2 TDC의 강건성

식(1)로 표현된 시스템에서 파라미터 불확실성과 외란의 영향을 고려할 경우 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\theta}(t) = \omega(t) \quad (10)$$

$$\dot{\omega}(t) = h(x, t) + b_m u(t) + d(t) \quad (11)$$

$h(x, t)$: 파라미터 불확실성에 의한 동특성

$d(t)$: 외란

식 (8), 식(10) 및 식(11)으로부터

$$\dot{\theta}(t) = \omega(t) \quad (12)$$

$$\dot{\omega}(t) = h(x, t) + d(t) - (h(x, t-L) + d(t-L) - \omega_n^2\theta(t) - 2\xi\omega_n\omega(t) + \omega_n^2r(t)) \quad (13)$$

시간지연의 양이 적을 경우 각 샘플링 순간 사이에 파라미터 변동과 외란의 양이 일정하다고 가정한다. 즉,

$$h(x, t) + d(t) \approx h(x, t-L) + d(t-L) \quad (14)$$

이 때 식(12), (13)에서 다음을 얻는데 이것은 식(7)의 기준모델과 일치한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_n^2 \end{bmatrix} r(t) \quad (15)$$

즉, 파라미터 불확실성과 외란에 관계없이 폐회로 시스템의 동특성이 기준모델의 동특성을 따른다.

3.3 와인드업 방지 보상기

전압제한(Voltage Limit)은 적분요소를 포함하는 제어기와 함께 사용될 경우 와인드업(Windup) 현상을 유발시킬 수 있다. TDC 시스템의 경우도 이러한 적분기 와인드업 현상이 나타나며 이러한 현상을 방지하기 위한 방안으로 박영진[3]에 의해 제시된 적분오차 제거방식(Integrated Error Cancellation Type)의 와인드업 방지 보상기(Anti-Windup Compensator : AWC)를 그림 2와 같이 설계하였다.

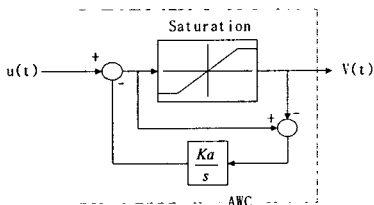


그림 2. 와인드업 방지 보상기의 구조

3.4 대향 필터링 보상기

이산형태의 제어기를 설계할 때 A/D변환시 적절한 전단필터의 사용이 필요하다. 그러나 TDC가 외란 및 파라미터 변동에 대해 강건한 제어 특성을 보이지만 모델링되지 않은 동특성에 대한 강건성은 보장할 수 없게 된다. 이 경우 시스템의 불안정화를 막기 위해 추가적인 보상기를 설계하였다. 다음 그림 3은 TDC 시스템 구성에 나쁜 영향을 주는 전단필터를 포함하는 Minor Loop 모델의 블록선도이다.

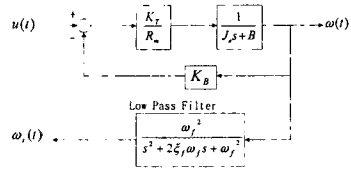


그림 3. Minor Loop 모델

이 보상기는 필터의 영향에 대응하는 역할을 하므로 대향 필터링 보상기(Anti-Filtering Compensator : AFC)라고 이름을 붙였다. 다음의 그림 3은 AFC의 구조로써 $G_1(s)$ 는 위의 Minor Loop 모델이 적용되는 플랜트, $G_2(s)$ 는 나머지 부분의 플랜트이다. AFC는 $x_{1measured}$ 로부터 필터의 동특성 $Q(s)$ 를 상쇄시켜 $x_1(t)$ 의 추정치 $\hat{x}_1(t)$ 를 산출한다.

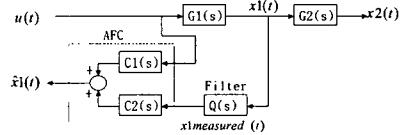


그림 4. AFC 구조

그림 4에서 고려되지 않은 동특성 $Q(s)$ 를 상쇄시키기 위해 AFC는 공칭조건하에서 다음을 만족시켜야 한다

$$\frac{X_1(s)}{U(s)} = \frac{\hat{X}_1(s)}{U(s)} \quad (16)$$

식(16)에 의한 조건을 만족시키도록 그림의 $C_1(s)$ 와 $C_2(s)$ 를 설계하기 위해 $u(t)$ 와 $x_{1measured}(t)$ 를 입력으로 사용하는 감소차수 관측기(Reduced Order Observer)를 이용하였다[4].

▷ Minor Loop 모델의 동특성

① 모터

$$\dot{\omega} = -\frac{1}{\tau_m}\omega + b_m u \quad (17)$$

② 전단필터 filter

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_s \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_f^2 & -2\xi\omega_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_s \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_f^2 \end{bmatrix} \omega \quad (18)$$

여기서 ω_s 는 필터를 통과해서 측정된 속도신호이고 ξ, ω_f 는 각각 필터의 댐핑계수와 고유주파수이다.

▷ 대향필터링 보상기 설계

① 부분경로 모델의 분리(Partition)

식(17), 식(18)을 하나로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_s \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\omega_f^2 & -2\xi\omega_f & \omega_f^2 \\ 0 & 0 & -1/\tau_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_s \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_m \end{bmatrix} u \quad (19)$$

여기서 시스템을 측정 가능한 부분(ω_s)과 측정 불가능한 부분($\dot{\omega}_s, \omega$)으로 구별해서 분리한다.

$$\text{시스템 행렬} \begin{bmatrix} F_{aa} & F_{ab} \\ F_{ba} & F_{bb} \end{bmatrix} \quad (20) \quad \text{입력행렬} \begin{bmatrix} G_a \\ G_b \end{bmatrix} \quad (21)$$

② 감소차수 관측기를 이용한 AFC

감소차수 관측기를 이용한 AFC는 다음과 같다.

$$\dot{x}_c = (F_{bb} - LF_{ab})\hat{x}_b + (F_{ba} - LF_{aa})y + (G_b - LG_a)u \quad (22)$$

$$\hat{x}_b = x_c + Ly \quad (23)$$

$$\text{여기서 } \hat{x}_b = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_s \\ \hat{\omega} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$y = \omega_s \quad (25)$$

$$L = [l_1 \ l_2]' \quad (26)$$

$$\det[sI - (F_{bb} - LF_{ab})] = \alpha_d(s) \quad (27)$$

식(27)에서 ξ_{es} 와 ω_{es} 를 갖는 AFC의 특성방정식은 다음과 같다.

$$a_d(s) = s^2 + 2\xi_{es}\omega_{es}s + \omega_{es}^2 \quad (28)$$

식(27)을 l_1 과 l_2 에 대해 풀어 다음을 얻는다.

$$l_1 = 2\xi_{es}\omega_{es} - 2\xi_f\omega_f - 1/\tau_m \quad (29)$$

$$l_2 = \frac{1}{\omega_f^2} \left[\omega_{es}^2 - \frac{2\xi_{es}\omega_{es} - 1/\tau_m}{\tau_m} \right] \quad (30)$$

4. 전산 시뮬레이션

앞에서 설계된 TDC 제어기의 성능을 평가하기 위해 MATLABTM/SIMULINK Tool Box를 사용하여 선형 및 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 비선형 시뮬레이션은 전압제한, A/D 변환시의 전단필터의 영향, 건마찰 등이 고려되었다. 그림 5는 비선형 시뮬레이션 블록이며 시뮬레이션 결과에 대해 PID 제어기와 비교하였다. PID 제어기의 이득은 시행착오 방법으로 정하였다.

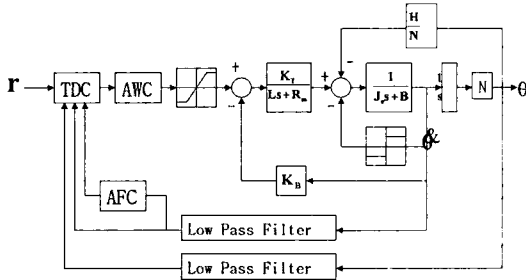


그림 5. 전기식 구동장치 비선형 시뮬레이션 블록

그림 6은 공칭 계단응답 결과로써 TDC 및 PID 모두 유사하게 양호한 응답을 보여준다. 그림 7과 그림 8은 파라미터 변동에 대한 계단응답 결과이다. PID 제어기보다 TDC 제어기가 구동기 관성 및 모터저항 변동에 대해 훨씬 안정된 응답을 보여준다. 그림 9에서와 같이 TDC 제어기는 공력부하에 대해서도 응답의 차이가 없이 강인함을 알 수 있다.

5. 결 론

시간지연 제어기를 이용하여 전기식 구동장치에 대한 강건 위치 제어 시스템을 설계하였다. 파라미터 변동 및 외란에 대해 시간지연 제어기의 강건성을 시뮬레이션을 통해 입증하였으며 PID 제어기와도 비교하였다. 또한 포화요소에 대한 와인드업 방지 보상기와 모델링되지 않는 동특성에 대한 보상기를 설계하여 시스템의 안정성을 향상시켰다.

[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] 장원욱, 박영진, "포화요소가 있는 계를 위한 와인드업 방지 보상방법", 대한 기계학회 논문집 16권 7호, pp. 1332-1340, 1992.
 [4] Chen, C. T., "Linear System Theory and Design", Holt-Saunders International Editions, pp. 365-371, 1984.

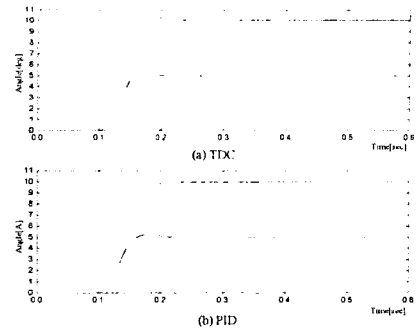


그림 6. 공칭 조건에서의 계단응답

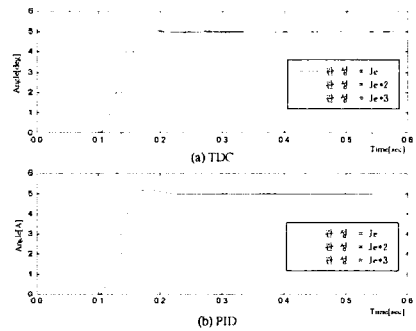


그림 7. 관성 변동에 따른 계단응답

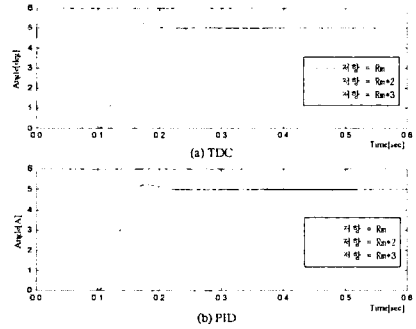


그림 8. 모터저항 변동에 따른 계단응답

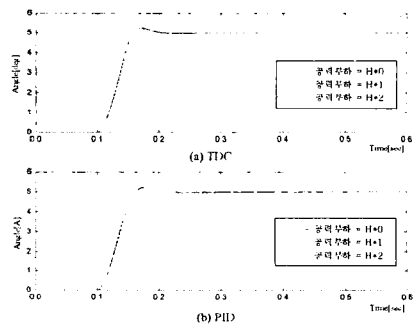


그림 9. 공력부하 변동에 따른 계단응답