

BLDC 모터 구동시스템의 위치제어를 위한 시간지연 관측기 설계

이명철*, 이흥호**
국방과학연구소*, 충남대학교 전기공학과**

Design of Time Delay Observer for a position control of BLDC motor acuation system

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

Abstract - 시간지연 상태추정 기법을 이용한 시간지연 관측기가 최근 제안되었다. 시간지연 관측기는 설계 시 모델이 필요하지 않아 파라미터 변동 및 외란 등에 둔감하며 계산이 간단하여 실제 시스템으로의 적용이 용이하다. 본 논문에서는 시간지연 제어이론이 위치제어기로 적용된 유도무기용 BLDC 모터 구동시스템에서 속도 센서를 사용하지 않는 시간지연 관측기의 설계내용을 기술하였다. 시간지연 관측기를 위한 최적의 고유치를 갖는 오차동역학 특성방정식을 선정하고 BLDC 모터 구동 시스템에 대해 비선형 시뮬레이션을 수행하였으며 파라미터 변동에 대해 비교하였다

2. 본 론

2.1 BLDC 모터 모델링

일반적인 3상 BLDC 모터는 3개의 전류 동력학을 갖는다. 회전하는 회전자에 부착된 직교 좌표계의의 변환을 통하여 3상 BLDC 모터의 *d-q* 모델을 얻을 수 있다. 일정한 공극으로 정현적 권선을 하였으며, 자기포화가 없다는 가정을 하면, 회전자가 내심형이 아닌 BLDC 모터의 *d-q* 모델은 다음과 같이 나타난다.

$$V_q = R_m i_q + L_m \frac{di_q}{dt} + L_m i_d \omega_r + \lambda_m \omega_r \quad (1)$$

$$V_d = R_m i_d + L_m \frac{di_d}{dt} - L_m i_q \omega_r \quad (2)$$

$$T_m = K_T i_q \quad (3)$$

여기서 R_m 과 L_m 은 각각 모터의 저항값과 인덕턴스, λ_m 은 회전자의 영구자속에 의한 쇄교자속 (flux linkage)의 크기, K_T 는 토크 상수, ω_r 은 전기적 각속도를 나타낸다. BLDC 모터를 홀 센서(Hall sensor)를 이용한 구형과 구동을 할 경우, 모터에 인가되는 전압은 *q* 축에 동기되며, 이때 *d* 축 성분의 전류는 무시할 수 있으므로 식(1)과 식(2)는 다음과 같이 하나의 식으로 근사화 할 수 있다.

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_m}{L_m} i_q - \frac{\lambda_m}{L_m} \omega_r + \frac{1}{L_m} V_q \quad (4)$$

또한 모터의 기계 방정식과 각속도 관계식은 다음과 같다.

$$T_m = J_m \dot{\omega}_m + B_m \omega_m + T_L \quad (5)$$

$$\omega_r = \frac{p}{2} \omega_m \quad (6)$$

$$K_B = \frac{p}{2} \lambda_m \quad (7)$$

여기서 p 는 모터의 극수이다. 식(5)~(7)를 이용한 선형화된 BLDC 모터의 블록선도는 그림 1과 같다.

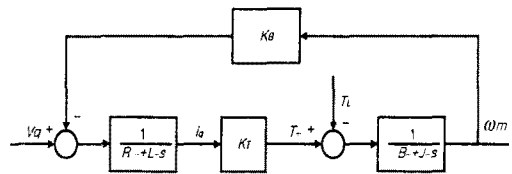


그림 1. BLDC 모터 블록선도

2.2 시간지연 관측기

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

1. 서 론

최근 전기모터를 이용하는 전기식 구동시스템은 자성 재료, 전력전자, 마이크로 프로세서, 모터 설계, 배터리 등의 기술발전과 자동화, 고정정화, 고속화 등의 산업적 요구로 인해 그 응용영역이 급속히 확대되고 있다. 전기식 구동시스템에 사용되는 DC 모터는 브러쉬에 의한 불꽃, 잡음, 브러쉬 마모에 따른 유지 및 보수 등의 단점을 갖고 있는 반면 BLDC 모터는 같은 출력 용량을 기준으로 할 때 DC 모터에 비하여 크기가 작고 가벼우며, 출력/중량 비가 크고, 회전자 관성 모멘트가 작으며 방열이 잘되는 등 많은 장점을 가진다.

유도무기용 BLDC 모터 구동시스템은 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 위치제어기로 사용하였다. 지금까지는 위치신호 및 속도신호를 시간지연 제어기에 적용하였으나 물리적으로 정확한 속도 정보를 얻을 수 있어 안정된 위치제어를 수행할 수 있지만 속도센서의 추가로 인한 경제성, 장착공간 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 구동시스템의 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 적용하였다. 시간지연 관측기는 설계 시 모델이 필요하지 않아 시스템 동역학이 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 BLDC 모터 구동시스템에 대해 위치제어기 설계하고 비선형 시뮬레이션을 수행하였으며 속도센서를 적용한 경우 및 상태관측기를 적용한 경우와도 비교하였다.

$$\begin{aligned} \dot{x}^{(n)} &= f(x) + g(x)u + d \\ y &= x \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $x = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T$ 는 상태벡터, u 는 입력, y 는 출력, $f(x)$ 는 모르는 시스템 비선형 동역학, $g(x)$ 는 범위를 알고 있는 비선형 제어 영향값, d 는 외란이다. 식(8)을 위상변수 형태로 유도하여 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= E_n x + \hat{F}(x, u) + \hat{G}u \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,

$$\begin{aligned} E_n &= \begin{bmatrix} 0 & (n-1) \times 1 & \vdots & I_{(n-1)} \\ & 0 & 1 \times n & \\ & & & \\ & & & \end{bmatrix} \\ \hat{F}(x, u) &= \begin{bmatrix} 0 & (n-1) \times 1 \\ \hat{f}(x, u) & \end{bmatrix} \\ \hat{G} &= \begin{bmatrix} 0 & (n-1) \times 1 \\ \hat{g} & \end{bmatrix} \\ C &= [1 : 0 \ 1 \times (n-1)] \end{aligned} \quad (10)$$

$0 \ i_{ij}$ 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 동역학 $\hat{F}(x, u)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{F}(x, u) = f(x) + (g(x) - \hat{g})u + d \quad (11)$$

2.2.1 시간지연관측기 유도

식 (9)를 위해 다음과 같은 관측기를 적용하는 것이 가능하다고 가정한다.

$$\dot{z} = E_n z + \hat{F}(x, u) + \hat{G}u - K(z_1 - y) \quad (12)$$

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

이때 관측오차 $e \stackrel{\text{def}}{=} z - x$ 는 다음 식과 같이 지수함수적으로 수렴하며 K 값의 적절한 조정에 의해 수렴속도가 결정된다.

$$\dot{e} = (E_n - KC)e \quad (13)$$

관측기를 구현하기 위하여 $\hat{F}(x, u)$ 를 추정할 수 있어야 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.

$$\hat{F}(x, u) \approx \hat{f}(x_{-L}, u_{-L}) \quad (14)$$

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

둘째, 위 식(14)을 식(9)에 적용하면 $\hat{F}(x, u)$ 는 다음 식과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\hat{F}(x, u) = \dot{x}_n - \hat{g}u \approx \dot{x}_{n-L} - \hat{g}u_{-L} \quad (15)$$

오차 동역학의 수렴속도가 $\hat{F}(x, u)$ 의 동역학보다 매우 빠르다고 가정하면 $\hat{F}(x, u)$ 는 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\hat{F}(x, u) \approx \dot{z}_{n-L} - \hat{g}u_{-L} \quad (16)$$

식(16)에서 식(12)를 빼고 상수 a 를 도입하면 시간지연 관측기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= E_n z + a[0 \ 1 \times (n-1), \dot{z}_{n-L} - \hat{g}u_{-L}]^T \\ &\quad + \hat{G}u - K(z_1 - y) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, a 는 저역통과 필터의 역할을 한다.

2.2.2 추정오차 동역학

식(17)의 시간지연 관측기가 식(9)의 비선형 시스템에 적용된다면 추정 오차 동역학은 다음과 같다.

$$\dot{e}_{ol} = A_{ol} e_{ol} - B\chi(x, u, L) \quad (18)$$

여기서, $e_i = z_i - x_i$ 이고,

$$\begin{aligned} e_{ol} &= [e_1, e_2, \dots, e_{n+1}]^T, e_{n+1} = \dot{e}_n \\ A_{ol} &= \begin{bmatrix} -K_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -K_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -\frac{K_n}{aL} & 0 & \dots & 0 & -\frac{(1-a)}{aL} \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \chi(x, u, L) &= \left(\frac{(1-a)}{aL} \hat{F}(x, u) + \psi_1(L) \right. \\ &\quad \left. - \frac{a}{aL} \psi_2(x, u, L) \right) \end{aligned} \quad (20)$$

여기서, $\psi_1(L) = (\dot{e}_n - \dot{e}_{n-L} - \ddot{e}_n)$

$$\psi_2(x, u, L) = \hat{F}(x, u) - \hat{F}(x_{-L}, u_{-L})$$

2.2.3 파라미터 선정

식(18)에서 오차 동역학의 고유치를 결정하기 위하여 a, L, K 를 선정할 수 있다. 그 선정과정은 아래와 같이 요약할 수 있다.

① 식(18)로부터 오차 동역학의 특성방정식을 구하고

$$\begin{aligned} s^{n+1} &+ \left[\frac{1-a}{aL} + K_1 \right] s^n + \left[\frac{1-a}{aL} K_1 + K_2 \right] s^{n-1} \\ &+ \dots + \left[\frac{1-a}{aL} K_{n-2} + K_{n-1} \right] s^2 \\ &+ \left[\frac{1-a}{aL} K_{n-1} \right] s + \frac{K_n}{aL} = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

원하는 고유치를 가진 특성방정식을 설정한다.

$$s^{n+1} + A_1 s^n + A_2 s^{n-1} + \dots + A_n s + A_{n+1} = 0 \quad (22)$$

② 식(21)과 (22)의 계수를 각 항별로 비교하여 $(1-a)/aL, K_2, \dots, K_{n-1}$ 을 소거하여 p 에 대한 n 차의 방정식을 얻는다(여기서 $p \equiv K_i - A_i$).

$$A_n + A_{n-1}p + A_{n-2}p^2 + \dots + A_1 p^{n-1} + p^n = 0 \quad (23)$$

③ p 에 대해 식(23)을 풀어 K_i 를 구한다.

④ CPU의 성능을 고려하여 충분히 작은 L 을 선정한다.

⑤ 식(21)과 (22)의 계수들을 비교하여 풀면

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{(A_1 - K_1)L + 1} \\ K_2 &= A_2 - \frac{1-a}{aL} K_1 \\ K_3 &= A_3 - \frac{1-a}{aL} K_2 \\ &\dots \\ K_{n-1} &= \frac{aL}{1-a} A_n \\ K_n &= aL A_{n+1} \end{aligned} \quad (24)$$

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

2.3. BLDC 모터 구동시스템의 시간지연 관측기

2.3.1 시간지연 관측기 설계

BLDC 모터 구동시스템을 외란이 포함된 위상변수 형태로 근사화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ \dot{\omega}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/\tau_m \cdot \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_m \end{bmatrix} u(t) + d \\ y(t) &= [1 \ 0] \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (25)$$

위 식에서 d 는 외란이며 τ_m 과 b_m 은 각각 구동시스템의 기계적 시상수와 입력이득으로 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_m = \frac{R_m J_e}{R_m B + K_T K_B}, \quad b_m = \frac{K_T}{R_m J_e N}$$

위 식으로부터

$$E_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathcal{F}(x, u) = -1/r_m \cdot \omega(t) \quad (26)$$

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

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + a \begin{bmatrix} 0 \\ z_{2c} - b_m u_{-L} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_m \end{bmatrix} u(t) - \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} [z_1 - y] \quad (27)$$

2.3.2 파라미터 선정

① 시간지연(L)

샘플링 간격의 정수배로 정할 수 있으며 최소로 하기 위하여 샘플링 간격과 같게 정한다.

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

② 비선형 제어 영향값의 추정치

시스템의 제어 영향값을 알고 있는 값으로 사용한다.

$$\hat{g} = b_m$$

③ 오차 동력학

모델이 2차이므로 오차 동력학은 3차로 선정한다.

$$(s + \lambda_1)(s + \lambda_2)(s + \lambda_3) = 0 \quad (28)$$

④ 파라미터 선정

위의 식(28)에서,

$$A_1 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3, \quad A_2 = \lambda_1\lambda_2 + \lambda_1\lambda_3 + \lambda_2\lambda_3$$

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

식(23)은 p 에 대한 2차 방정식으로 풀면 다음과 같다.

$$A_2 + A_1 p + p^2 = 0 \Rightarrow K_1^2 - A_1 K_1 + A_2 = 0 \quad (29)$$

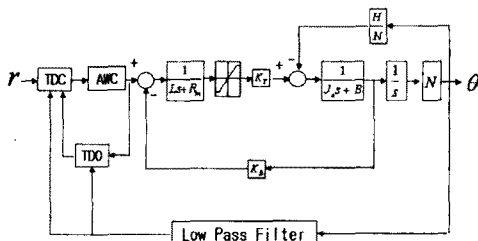
$$K_1 = \frac{A_1 \pm \sqrt{A_1^2 - 4A_2}}{2}$$

파라미터 선정절차에 따라 최적의 값들을 구할 수 있다.

$$a = \frac{1}{(A_1 - K_1)L + 1}, \quad K_2 = aLA_3$$

2.4 시뮬레이션

시뮬레이션은 MATLAB™/SIMULINK를 사용하여 수행하였다. BLDC 모터 구동시스템에서 시간지연 관측기를 적용한 시간지연제어기(TDC/TDO)의 강건 성능을 평가하기 위하여 파라미터 변동에 대한 비선형 시뮬레이션을 수행하였으며 속도센서를 적용한 TDC의 경우, 상태관측기를 적용한 경우(TDC/SO)와도 비교하였다. 시간지연 관측기를 이용한 BLDC 모터 구동시스템의 블록선도는 그림2와 같다.



*AWC :와인드업 방지 보상기

그림 2. BLDC 모터 구동시스템 블록선도

그림3 ~그림5는 관성, 모터저항, 부하 변동에 따른 5° 계단응답 특성결과이다. 공칭상태에서는 모두 양호한 응답 특성을 나타내고 있다. 그림3 및 그림4에서와 같이 TDC와 TDC/TDO의 경우 관성 및 모터저항 변동에 대해 TDC/SO보다 훨씬 안정된 응답을 보여 주고 있다. 또한, 그림5의 부하 변동에 대해서도 TDC와 TDC/TDO는 주어진 명령을 잘 추종함을 알 수 있다.

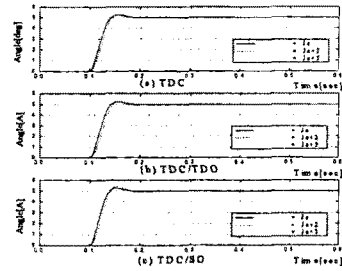


그림 3. 관성변동에 따른 계단응답

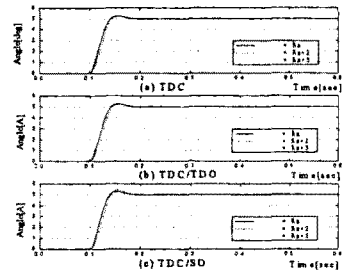


그림 4. 모터 저항변동에 따른 계단응답

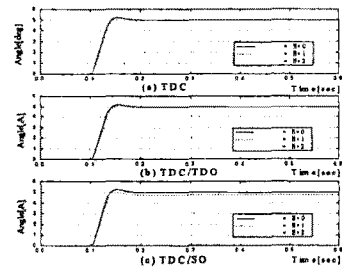


그림 5. 부하변동에 따른 계단응답

3. 결론

시간지연 제어기를 적용한 BLDC 모터 구동시스템의 위치제어기에서 속도추정을 위해 시간지연 관측기를 설계하였다. 시간지연 관측기는 설계 시 모델이 필요하지 않아 시스템 동력학이 불확실해도 설계가 용이함을 볼 수 있었다. 또한 시뮬레이션을 통해 파라미터 변동에 둔감함을 입증하였으며 속도센서를 적용한 경우와 유사한 응답특성과 안정성을 보임을 확인하였다

[참고 문헌]

[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.