

시변 직류 모터 시스템을 위한 온라인 최소자승 추정법 기반 적응형 상태궤환 제어기

조현철¹, 김광수², 이영진³, 이권순⁴

^{1 2 4} 부산시 사하구 하단2동 840 동아대학교 전기공학과

³ 한국 폴리텍 항공대학 항공전기과

¹ hyunccho@gmail.com, ² kks7132@nate.com, ³ airlee@hotmail.com ⁴ kslee@dau.ac.kr

Adaptive State Feedback Control using Online Least Square Estimation for Time-varying DC Motor Systems

Hyun Cheol Cho, Kwang Soo Kim, Young Jin Lee, Kwon Soon Lee

^{1 2 4} Dept of Electrical Eng., Dong-A Univ., 840 Hadan 2-dong, Saha-gu, Pusan

³ Dept of Avionics Electrical Eng., Korea Aviation Polytechnic, 438 Egeum-dong, Sacheon

Abstract - 본 논문은 시변 파라미터를 갖는 직류 모터의 적응 제어를 위한 온라인 상태궤환 제어시스템을 구성한다. 모터의 전기자 저항은 공칭값에 대하여 가우시안 랜덤변수로 가정하고 온라인 최소자승 추정법을 이용하여 실시간으로 추정한다. 모터의 부하 토크 또한 시변 특성을 가지며 이런 시스템 환경의 변화에 대해서도 설정치를 잘 추종하는 특성을 갖도록 한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제어기법의 타당성을 검증하며 기존의 상태궤환 제어기법과 비교분석하여 성능의 우수성을 입증한다.

1. 서 론

영구 자석형 DC 모터 시스템은 구조가 간단하고 제어가 용이하므로 현재까지도 산업현장에 널리 사용되고 있다. 최근 대용량의 DC 모터가 개발되고 기존의 AC 모터의 단점을 보완하기 위한 시스템에 더욱 각광을 받고 있다. 하지만 대용량 DC 모터 시스템은 시스템 파라미터의 값이 기존 모터에 비해 그 변화가 심하며 노이즈나 외부 환경의 변화에 대해 성능의 차이가 현저히 떨어지는 단점이 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해 적응제어나 능동제어와 같은 고급 제어이론을 접목하는 연구가 활발히 진행되고 있다[1-2].

하지만, 대부분의 DC 모터 제어에 대한 연구는 오프라인 제어 설계에서 제어기를 설계하는 방식을 두고 있다. 오프라인 설계단계에서 실시간에서 발생하는 시스템 환경의 변화에 대해 충분히 고려하였다 할지라도 예상치 못한 시스템의 불확실성을 모두 만족스럽게 해결하진 못한다. 따라서 이런 문제점은 온라인상에서 시스템의 변화에 잘 적응하여 바람직한 제어성능을 유지하도록 하는 것이 보다 더 효율적인 것으로 보고가 되고 있다[3].

본 논문은 모터 시스템의 환경적 변화에 대해서도 원하는 제어성능을 효율적으로 추종할 수 있는 온라인 적응제어시스템을 제안한다. 우선 모터 시스템의 수학적 모델을 이용하여 상태궤환 제어기를 설계하며 이 때 원하는 특성방정식의 근이 주어진다. 시스템 환경의 변화는 온라인 최소자승법을 이용하여 시스템 파라미터를 실시간으로 추종한 후, 새로운 제어기 파라미터 값을 수정한다.

본 논문의 구성은 2절에서 영구 자석형 DC 모터 시스템의 수학적 모델을 기술하며, 3절에서 적분기를 포함하는 상태궤환 제어기를 구성하며, 4절에서 온라인 최소자승 파라미터 추정법을 제안한다. 5절에서 컴퓨터 시뮬레이션의 결과 및 검토를, 마지막으로 6절에서 결론을 각각 서술한다.

2. 시변 DC 모터 시스템 방정식

일반 영구 자석형 DC 모터 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$J\dot{\omega}(t) = -B\omega(t) + K_t i_a(t) - T_L \quad (1)$$

$$L\dot{i}_a(t) = -K_b \omega(t) - R i_a(t) + e_a(t)$$

여기서 각각의 파라미터 및 변수는 다음과 같이 정의된다.

$i_a(t)$: 전기자 전류, A
$e_a(t)$: 전기자 인가 전압, V
$\omega(t)$: 모터 속도, rad/sec
B	: 무부하시의 마찰 계수
J	: 모멘트 상수
K_t	: 토크 상수, $N \cdot m/A$
K_b	: 역기전력 상수, $V/rad/sec$
T_L	: 부하 토크, $N \cdot m$
L	: 전기자 인덕턴스, H
R	: 전기자 저항, Ω

일반적으로 부하토크는 정량적인 값을 설계단계에서 알 수는 없지만 그 경계치는 정해지며 주로 시변으로 표현된다. 즉,

$$T_L(t) \in [T_{Lmin}, T_{Lmax}] \quad (2)$$

또한 전기자 저항 R 은 공칭값(nominal value)에 대해 랜덤하게 변화한다. 따라서 실제 전기자 저항은 다음과 같이 표현된다.

$$R = R_0 + r \quad (3)$$

$$L = L_0 + l \quad (4)$$

여기서 R_0 와 L_0 는 공칭 저항 및 인덕턴스를 나타내며, 랜덤변수 $l, r \sim N(0, \mu)$ 은 평균값이 0이고 분산이 μ 인 가우시안으로 가정한다.

3. 적분기를 포함한 상태궤환 제어기

일반적인 상태궤환(State feedback) 제어는 설정치를 0으로 정의되는 시스템에 적용되지만, 주로 (1)의 모터시스템은 설정치가 0이 아닌 경우가 대부분이다. 이런 시스템은 적분기(Integrator)를 갖는 상태궤환 제어시스템을 적용하여 시스템 상태가 설정치의 궤적을 추종할 수 있도록 구현한다. 우선, (1)을 다음과 같이 상태 공간 방정식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + En(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서

$$x(t) = \begin{bmatrix} \omega(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix}, u(t) = e_a(t), n(t) = T_L$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & \frac{K_t}{J} \\ -\frac{K_b}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} -\frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0]$$

기준 입력 $\gamma(t)$ 에 대한 시스템 오차의 동특성은

$$\dot{\gamma}(t) = r(t) - y(t) \quad (6)$$

이며 상태궤환 제어규칙을 적용하면 (4)의 제어입력은

$$u(t) = -K\bar{x}(t) \quad (7)$$

여기서 새로운 상태벡터 $\bar{x}(t)$ 와 제어 파라미터 행렬 K 는 각각 다음과 같다.

$\bar{x}(t) = [x(t) \quad \gamma(t)]^T$, $K = [k_1 \quad k_2 \quad k_3]$
 따라서 (7)의 제어입력을 적용하면 새로운 상태방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\bar{x}}(t) = (\bar{A} - \bar{B}\bar{K})\bar{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t) + \bar{E}n(t) \quad (8)$$

$$y(t) = \bar{C}\bar{x}(t)$$

여기서

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \bar{E} = \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix}, \bar{C} = [C \quad 0]$$

(8)의 폐루프(closed-loop) 시스템의 특성 방정식은

$$|sI - \bar{A} + \bar{B}\bar{K}| = s^3 + \frac{BL + J(R - k_2)}{JL} s^2 + \frac{B(R - k_2) + k_i(k_b - k_1)}{JL} s - \frac{k_i k_3}{JL} = 0 \quad (9)$$

선형 시스템 이론을 통해 원하는 특성방정식의 근을 바탕으로 제어기 파라미터 k_i , $i=1,2,3$ 을 구할 수 있다.

4. 온라인 LS 파라미터 추정법

앞서 서술한 바와 같이 모터시스템의 전기회로 부분에서 저항 및 인덕턴스 R 과 L 은 랜덤변수이며, 실시간에서 바람직한 제어 성능을 위하여 이에 대한 적응형 추정값을 이용해야 한다. 본 논문은 LS(Least square) 기법을 이용한 추정알고리즘을 도출한다. 우선, 이산화된 전기회로 방정식은 다음과 같다.

$$V(k) = Ri(k) + L \frac{i(k) - i(k-1)}{2T_s} + E \quad (10)$$

여기서 T_s 는 샘플링 주기이며, LS 기법을 적용하면 다음과 같은 파라미터 추정식을 갖는다.

$$\hat{\theta} = (I_M^T I_M)^{-1} I_M^T V_M \quad (11)$$

여기서

$$\hat{\theta} = [\hat{R} \quad \hat{L}]^T \quad (12)$$

$$I_M = \begin{bmatrix} i(1) & i(1) - i(0) \\ i(2) & i(2) - i(1) \\ \vdots & \vdots \\ i(k) & i(k) - i(k-1) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$V_M = \begin{bmatrix} v(1) - E \\ v(2) - E \\ \vdots \\ v(k) - E \end{bmatrix} \quad (14)$$

(11)의 추정법은 초기시간에서 현재시간까지의 모든 데이터를 사용하는 것으로 이것은 실시간 구현에 있어 바람직하지 못하다. 따라서 온라인 추정알고리즘에 있어 최근의 데이터를 사용하는 적응형 추정법이 요구된다. 본 논문은 윈도우 기법을 이용하여 추정데이터를 적응형으로 사용하고자 한다. 윈도우 크기 $N_W > 0$ 를 적용한 온라인 LS 알고리즘은 (13)과 (14)의 행렬을 수정하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_M = \begin{bmatrix} i(k - N_W + 1) & i(k - N_W + 1) - i(k - N_W) \\ i(k - N_W + 2) & i(k - N_W + 2) - i(k - N_W + 1) \\ \vdots & \vdots \\ i(k) & i(k) - i(k-1) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$V_M = \begin{bmatrix} v(k - N_W + 1) - E \\ v(k - N_W + 2) - E \\ \vdots \\ v(k) - E \end{bmatrix} \quad (16)$$

5. 시뮬레이션 결과 및 검토

제한한 제어기법의 성능평가를 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였으며 오프라인 제어의 경우와 성능을 비교 검토하였다. (1)의 시스템 파라미터 값은 표 1과 같다. 또한 전기자 저항 R 과 인덕턴스 L 은 공칭 값은 1Ω 과 $0.005H$ 이며 $\pm 25\%$ 의 랜덤변화율을 가정한다. 설정치 $r = 1 \text{ rad/sec}$ 로 하였으며, 공칭 상태회환 제어기의 이득값은 $k_1 = -0.85$, $k_2 = 0.5$, $k_3 = 0.03$ 으로

설정하였다. 제한한 온라인 상태회환 제어기의 초기 이득값은 이 공칭값으로 하였으며 실시간에서 LS 온라인 추정법을 이용하여 제어기 이득값이 적응형으로 변화한다. 그림 1은 오프라인 공칭 제어기와 제한한 온라인 적응제어기에 대한 모터 속도를 나타낸다. 시뮬레이션 결과를 보면 알 수 있듯 제한한 제어기법의 성능이 월등히 개선되었음을 알 수 있다. 주어진 제어시간동안 기존의 제어기법은 시스템 응답이 수렴하지 못하지만 제한한 제어기의 경우 약 0.2초 부근에서 정상상태로 수렴함을 알 수 있다. 실시간 제어 시 온라인 제어기가 매우 효율적으로 동작함을 시뮬레이션 결과로부터 알 수 있다.

표 1. 모터 시스템 파라미터 값.

B	J	K_i	K_b	T_L
0.5	0.02	1	1	1

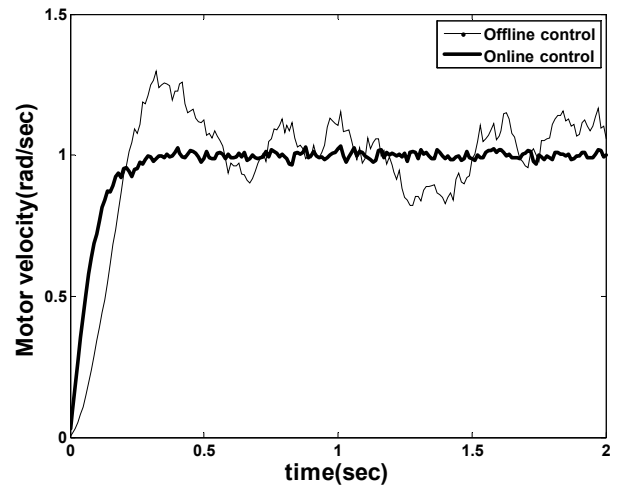


그림 1. 모터 속도응답.

6. 결론

본 논문에서 시변 모터 시스템의 온라인 적응형 상태회환 제어기법을 제안하였다. 모터의 전기자 저항과 인덕턴스 값은 랜덤하게 변화하며 이 시변특성을 보완하기 위하여 LS 추정법을 이용하여 실시간 추정을 하였으며 상태회환 제어기의 이득값을 갱신하는데 이용되었다. 성능평가를 위하여 기존의 상태회환 제어기법과 비교 분석하였으며 성능의 우수성을 시뮬레이션을 통해 입증하였다. 향후 연구과제로는 실시간 모터 시스템을 구성하여 제한한 제어기법의 실시간 실험을 통하여 성능의 우수성을 입증하고자 한다.

후 기

본 논문은 한국전력공사에서 지원한 전력변환 시스템 신기술 연구센터 (과제번호2006-0273)의 사업으로 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] Y. Tipsuwan and S. Aiemchareon, "A neuro-fuzzy network-based controller for DC motor speed control," *Proc. of Industrial Electronics Conference*, pp. 2433-2438, 2005.
- [2] H.-P. Wang, and Y.-T. Liu, "Integrated design of speed-sensorless and adaptive speed controller for a brushless dc motor," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 21, no. 2, pp. 518-523, 2006.
- [3] K. Nouri, R. Dhaouadi, and N. B. Braiek, "Nonlinear speed control of a dc motor drive system with online trained recurrent neural network," *IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 704-708, 2006.