

모델추종 가속도제어기법을 이용한 직류서보전동기 위치제어계

박 영 진^o · 이 기 상 · 홍 순 찬

단 국 대 학 교 전 기 공 학 과

DC Servo Motor Position Control System Based on Model Following Acceleration Control

Young-Jeen Park · Kee-Sang Lee · Soon-Chan Hong

Dept. of Electrical Engineering, Dankook University

Abstract - A scheme of observer-based MFAC(Model Following Acceleration Control) system is proposed for the DC servo position control system. The proposed system is composed of MFAC, feedback controller, and reduced-order state observer. As the servo motor is controlled by the acceleration command, the total servo system becomes the acceleration control system. Simulation results show that the proposed system have robust properties against parameter variations and external disturbances.

1. 서 론

최근 산업현장의 자동화 추세와 더불어 전동기를 포함한 서보계통은 산업용 프로세스 자동화의 핵심요소로서 우수한 과도특성 및 파라미터와 부하 등의 변화에 대한 강인성을 동시에 만족시킬 수 있는 고성능 서보제어기법을 개발하기 위한 연구가 지속적으로 이루어져 왔다[1-3]. 서보계통의 위치, 속도 등을 제어하기 위한 대표적 기법으로는 전류 제어기법 [1], 피드포워드 보상기법[2], 그리고 최근에 개발된 가속도 제어기법[3,4]과 함께 적응제어에 기초한 제어기법 등을 들 수 있다[5,6].

현재까지 폭 넓게 사용되고 있는 전류제어기법은 고성능을 보장하지 못하고 또한 안정도의 입장에서 바람직하지 않으며 [3], 피드포워드 보상기법은 외란관측기의 사용으로 인한 지연시간과 외란관측을 위한 추가적인 하드웨어를 요구한다[4].

또한 가속도는 전동기의 발생토크, 부하토크 그리고 마찰토크들을 포함한 전 구동력에 의해 영향을 받음과 동시에 위치에 직접적인 영향을 준다. 따라서 가속도를 직접 제어하는 것이 가능하다면 외란으로 인한 제어성능의 저하를 효과적으로 제거할 수 있다는 개념의 가속도제어기법이 제시되었다[3,4].

적용제어개념에 근거한 제어기법으로는 간단한 구조의 선형모델추종제어기(LMFC : Linear Model Following Control)가 제안되었으며[5], LMFC에 근거한 가속도제어기법인 모델추종 가속도제어기(Model Following Acceleration Control)도 제시되었다[6].

또한 MRAC(Model Reference Adaptive Control)는 관성의 변화와 같은 직류전동기 파라미터 변동에 대하여 유망한 방법

이긴 하지만 일반적으로 효과적인 보상을 위하여는 많은 계산시간을 요하며, 특히 속응성이 요구되는 서보시스템에서 MRAC 알고리즘의 수행은 다소 어려움이 따른다[5].

이들 모델추종제어기법들은 기준모델의 상태변수와 실제플랜트의 상태변수 사이의 편차를 최소화 시키는 개념의 제어기법으로 로보트메니플레이터와 같이 동작중 여러가지 비선형성 요인들에 의해 서보구동시스템의 특성변화가 존재하는 계통의 강인성제어를 위하여 사용되고 있다[6]. MFAC는 선형 모델추종제어(LMFC)부와 궤환제어부로 구성되어 있으며, 이중 LMFC는 파라미터변동과 외란에 대한 응답특성을 개선하고, 궤환제어부는 기준위치(θ_{cmd})와 실제위치(θ)사이의 전달특성을 결정하는 기능을 갖는다. 가속도궤환제어부는 가속도 지령치 ($\ddot{\omega}_{cmd}$)를 결정하기 위하여 가속도기준치 ($\ddot{\omega}_{ref}$)에 속도 및 위치편차에 대한 보상항이 추가되는 구조를 가지고 있으며, 여기에서 속도센서를 사용하지 않기 위해 측정된 위치값으로부터 미분을 통하여 속도정보를 얻고있다. 이때 미분기의 사용은 위치출력에 고주파 잡음이 포함될 경우 얻어지는 속도정보는 상당한 오류를 포함할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 로보트 매니플레이터와 같은 시스템의 제어에 적용되는 모델추종가속도제어기법을 해석하고, 상태궤환제어기에서 속도정보를 얻기위한 미분기의 사용을 배제하기 위하여 전동기계통의 입력정보와 출력정보만으로 상태변수의 값을 추정할 수 있는 감소차수 상태관측기를 궤환제어기에 도입한 모델추종가속도제어기를 제시하고, 시뮬레이션을 통하여 상태관측기를 갖는 모델추종가속도제어기법의 유용한 동작특성을 보이기로 한다.

2. 선형 모델추종제어시스템(LMFC)

서보전동기에는 마찰토크, 부하토크, 중력등이 외란으로서 작용한다. 더우기 관성모멘트와 점성마찰력이 변화하게 되면 서보전동기의 기계적 운전특성이 변화한다. 이러한 비선형특성을 제어하기위한 하나의 방법으로 그림 1과 같은 LMFC가 제안되었다[5]. 그림에서 P(s)는 서보전동기의 실제 전달특성이고, P_m(s)는 원하는 응답특성을 표현한 전동기 기준모델이다. D(s)는 외란항이며, F_i(s)는 저역통과필

터(LPF)로 고주파잡음의 영향을 제거하기 위한 용도이고, β 는 파라미터변동과 외란의 영향을 감소시키기 위한 이득이다.

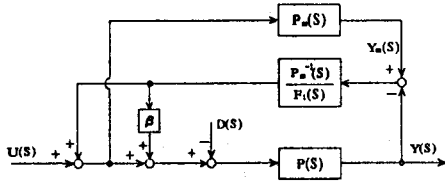


그림 1. 선형모델추종제어시스템(LMFC)의 블록선도

그림 1의 LMFC에서 외측루프는 비선형요소의 영향에 의해 발생한 상태편차를 보상하기 위한 피드포워드보상부분으로 외란관측기의 특성이 있으며, 내측루프는 파라미터변동과 외란의 영향에 대한 계통의 감도를 감소시키기 위한 부분이다. 이 시스템의 전달특성은 다음과 같다.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{P_m(s)}{1 + \frac{\delta(s)}{F_1(s) + \beta} \cdot (F_1(s) - 1)} \quad (1)$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{F_1(s) - 1}{1 + \frac{\delta(s)}{F_1(s) + \beta} \cdot (F_1(s) - 1)} \cdot \frac{F_1(s)}{F_1(s) + \beta} \cdot P_m(s) \quad (2)$$

여기에서 $\delta(s) = (P_m(s) - P(s))/P(s)$ 로 전동기 기준모델과 실제전동기 사이의 동작특성의 차를 나타낸다. 외식들로부터 LPF $F_1(s)$ 의 시정수(τ)를 작게 선정하고, β 를 크게 해 줄수록 식(3), (4)와 같이 동작특성의 편차 $\delta(s)$ 와 외란의 영향을 제거하는 특성이 얻어질 수 있음을 알 수 있다.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{P_m(s)}{1 + \frac{\delta(s)}{\beta}} \cong P_m(s) \quad (3)$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} \cong 0 \quad (4)$$

직류서보전동기에서 전기자전압(E_a)과 회전속도(ω)사이의 전달함수는 그림 2의 블록선도로부터 식(5)와 같이 2차 계로 얻어진다.

$$\frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K_t}{(L_a s + R_a)(T_s s + B) + K_t K_b} = P(s) \quad (5)$$

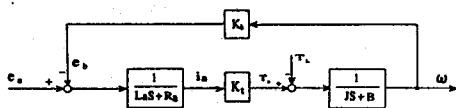


그림 2. 직류서보전동기의 등가 블록선도

식(5)에서 전동기에서 전기적 시정수 τ_e 는 기계적 시정수 τ_m 에 비하여 상당히 작으므로($\tau_e \ll \tau_m$) 전기자인덕턴스 L_a 의 효과는 무시할 수 있다. 따라서 전동기의 기준모델 $P_m(s)$ 은 다음과 같은 1차계로 설정할 수 있다.

$$P_m(s) = \frac{K_t^*}{B^* K_t^* + K_t^* K_b^*} = \frac{K_m^*}{T_m^* s + 1} \quad (6)$$

여기에서 외첨자(*)는 각 파라미터의 표준치를 나타낸다.

이상의 내용으로부터 LMFC에 의한 직류서보전동기 위치제어시스템을 재구성하면 그림 3으로 나타낼 수 있다.

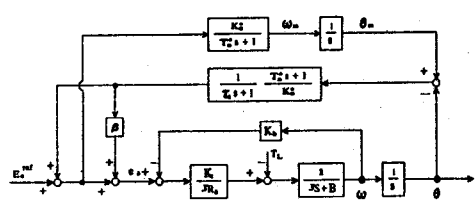


그림 3. 선형모델추종제어시스템의 등가블록선도

3. 모델추종 가속도제어기(MFAC)

기존의 모델추종가속도제어기(MFAC)구조는 궤환제어항에서 속도센서를 사용하지 않기 위해 위치추정치로부터 미분기와 LPF를 통해 속도를 추정하는 방식을 사용하였다. 이는 위치출력에 고주파잡음이 존재할 경우 미분기 특성에 의해 상당한 오류가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 속도정보를 얻기 위해 감소차수관측기를 구성하여 고주파잡음 등에 의한 영향을 배제하였다.

LMFC에 의한 서보시스템의 제어과정에서 전동기의 기계적 특성은 기준모델을 따르게 되고, 그 결과 파라미터변동과 외란의 영향을 받지 않게 된다. 즉 그림 4의 점선부분과 같은 전달특성을 갖도록 제어된다. 이와 같은 LMFC에 의한 위치제어계통의 특성에 가속도제어의 개념을 도입하기 위하여 그림 4와 같은 제어입력 결정과정을 구성하였을 때, 전기자전압지령치(E_a^{ref})가 식(7)의 $G(s)$ 에 의해 결정된다면, 서보전동기의 위치응답은 식(8)과 같이 가속도지령(ω_{cmd})에 따라 응답하게 된다.

$$G(s) = \frac{T_m^* s + 1}{K_m^* s} \quad (7)$$

$$\theta = \frac{\omega_{cmd}}{s^2} \quad (8)$$

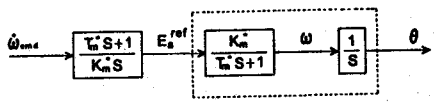


그림 4. 가속도제어 등가 블록선도

따라서 전체적인 위치제어 계통은 모델추종제어개념과 가속도제어개념이 조합된 모델추종가속도제어(MFAC)의 특성구조를 갖게 된다. 최종적인 가속도제어 위치제어계의 구성은 위의 MFAC구조에 기준위치(θ_{ref})에 대한 위치응답(θ)의 전달특성(응답속도)을 결정하기 위하여 별도의 궤환제어기를 구성하게 된다. 궤환제어기는 운전조건의 급변 등 모든 상황변화를 보상하는 가속도지령치 (ω_{cmd})를 형성하도록 가속도기준치 (ω_{ref})에 위치편차($\theta_{ref} - \theta$) 및 속

속도편차($\omega_{ref} - \omega$)에 대한 보상항이 추가되는 구조를 가지게 된다. 이 궤환제어기는 MFAC의 동작과는 독립적으로 위치응답속도만을 결정하게 되는데 전달특성은 그림 5와 같고 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{\theta}{\theta_{ref}} = \frac{\omega}{\omega_{ref}} = \frac{\dot{\omega}}{\dot{\omega}_{ref}} = \frac{s^2 + K_2 s + K_1}{s^2 + K_2 s + K_1} = 1 \quad (9)$$

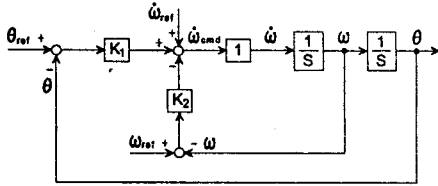


그림 5. 궤환제어기의 동작 블록선도

여기에서 궤환제어기 이득 K_1, K_2 는 식(9)의 전달함수에서 특성방정식의 극점배치(pole assignment)에 의해 결정된다.

다음으로 궤환제어기에서 필요한 속도정보를 얻기 위하여 3차의 위치제어계통에서 입력과 위치출력만으로 필요한 상태를 추정할 수 있는 감소차수상태관측기(reduced-order state observer)를 설계한다. 먼저 상태관측기 구성을 위한 계통은 다음과 같이 외란항을 상태로 포함하는 4차의 동태방정식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & -B/J & k/J & -1/J \\ 0 & -k_s/L_s & -R_s/L_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 1/L_s \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (10)$$

$$y = [1 \ 0 \ 0 \ 0] [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$$

여기에서 $x_1(=\theta)$ 은 위치, $x_2(=\omega)$ 는 각속도, $x_3(=i_a)$ 는 전기자전류, $x_4(=\tau)$ 는 외란(부하토크)이다. 식(10)을 다음과 같이 정리하여 감소차수관측기를 설계하면 식(11)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{12} \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{21} & \dots & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ \dots \\ B_2 \end{bmatrix} u$$

$$\dot{x}_2 = Ly + z \quad (11)$$

$$\dot{z} = Fz + Gy + Hu$$

여기에서 $F(=A_{22}-LA_{21})$ 는 (3×3) , $G(=FL+A_{21}-LA_{11})$, $H(=B_2-LB_1)$ 는 (3×1) 차원의 행렬이며 감소차수관측기의 이득 L 은 행렬 F 의 특성근이 s 평면의 좌반면에 존재하도록 극점배치를 하여 얻는다. 이상의 관계들로부터 전체적인 상태관측기를 갖는 모델추종 가속도제어 위치제어계의 동작블럭선도는 그림 6과 같다.

4. 시뮬레이션결과 및 검토

본 절에서는 제안된 위치제어계가 파라미터변화와 외란에 대해 강인성을 가짐을 확인하기 위하여 그림 6과 같은 직류서보전동기의 위치제어계를 구성하여 디지털 시뮬레이션을 수행하였으며 사용된 전동기의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 직류서보전동기 사양

정 격 : 300[W]	75[V]	5[A]	2700[rpm]	9.5[kg cm]
전기차 저항	1.9 [Ohm]	전기자인덕턴스	2.3 [mH]	
점성마찰계수	0.44 [g cm sec]	관성모멘트	3.24 [g cm sec ²]	
역기전력상수	24.6 [V/krpm]	토크 상수	2.4 [kg cm/A]	

MFAC의 기준모델 파라미터는 전동기의 각 표준상수로 부터 $K_m^* = 40.13$, $T_m^* = 0.103$ 으로 얻을 수 있으며, LPP의 시정수 $\tau_1 = 0.1$ [msec], 제어기 이득 $\beta = 30$ 으로 선정하였다. 궤환제어기의 이득 K_1, K_2 는 특성방정식의 극점을 $[-450 \ -950]$ 으로 선정하였을 때 $[427500, 1400]$ 으로 얻었다. 비측정변수 $x_2(=i_a)$, $x_3(=\omega)$ 및 외란의 추정을 위한 상태관측기의 극점은 $[-20 \ -75 \ -900]$ 으로 선정하였으며, 관측기 설계를 위한 동태방정식과 결과적인 관측기 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & -0.125 & 740.74 & -308.64 \\ 0 & -10.69 & -826.08 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ 434.78 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

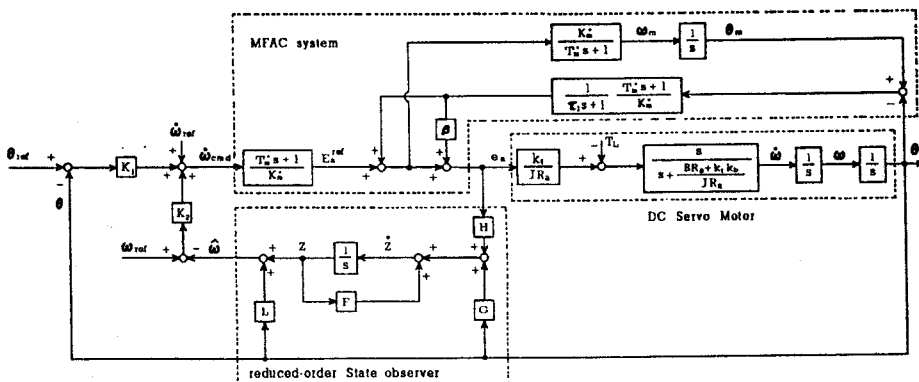


그림 6. 상태관측기를 갖는 모델추종가속도제어 위치제어계

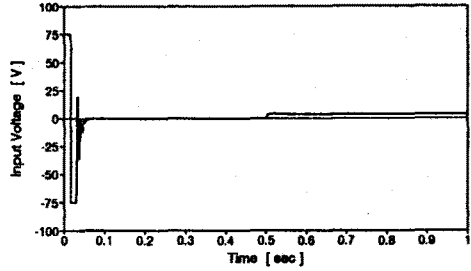
$$\begin{bmatrix} \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \hat{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 168.78 \\ -83.82 \\ -5.29 \end{bmatrix} y + \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -168.91 & 740.74 & -308.64 \\ 73.13 & -826.08 & 0 \\ 5.29 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -88970.7 \\ 81591.7 \\ 893.7 \end{bmatrix} y + \begin{bmatrix} 0 \\ 434.78 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

모든 시뮬레이션 결과에서 궤환제어기의 속도변화에 대한 보상은 비측정변수에 대한 추정치 \hat{x}_3 에 근거하여 결정된 것이다.

제안된 상태관측기를 갖는 모델추종가속도제어 위치제어계를 시뮬레이션한 결과는 그림 7과 같다. 시뮬레이션 샘플링시간은 0.5[ms]로 하였고, 기준위치입력(θ_{nd})는 π [rad]으로 주었으며, 외란은 전동기에 인가되는 부하로 하였다. 그림 7은 계통파라미터인 전동기의 관성모멘트를 $t=0$ [sec]에서 300%로 변화시키고 0.5 [sec]에 전동기정격의 50%에 해당하는 부하토크를 외란으로 투입하였을 경우 제안된 위치제어계의 응답특성을 보여준다. (a)의 위치응답으로부터 계통파라미터인 관성모멘트의 변화에도 불구하고 과도응답특성이 우수하며, 외란이 투입된 경우에도 외란에 의한 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다. (b)는 속도응답, (c)는 입력전압을 나타낸다.

이상의 시뮬레이션 결과로부터 제안된 위치제어계는 외란 및 계통파라미터의 변화가 주어질때 과도 및 정상상태에서 우수한 응답특성이 보장됨을 알 수 있다.



(c) 입력전압

그림 7. 제안된 위치제어계의 시뮬레이션 결과

5. 결 론

본 연구에서는 비측정변수를 가진 직류서보시스템의 강한 제어를 위하여 상태관측기를 갖는 모델추종가속도제어 위치제어계를 설계하고 그 성능을 검토하였다.

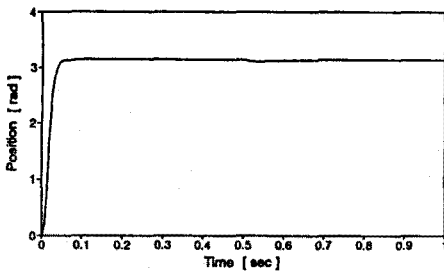
제안된 제어계는 모델추종가속도제어기, 궤환제어기 및 상태관측기로 구성되며, 전체적인 서보시스템은 가속도지령치 ($\dot{\omega}_{cmd}$)에 의해 구동되므로 강인성을 갖는 가속도제어기의 특성을 갖는다.

각제어부는 서로 독립적인 특성을 가지므로 제어이득을 설계할 때 비교적 간단한 설계과정을 얻을 수 있다. 시뮬레이션에 의해 제안된 위치제어계가 파라미터변동과 외란 투입에도 강인한 제어성능을 가짐을 확인하였다.

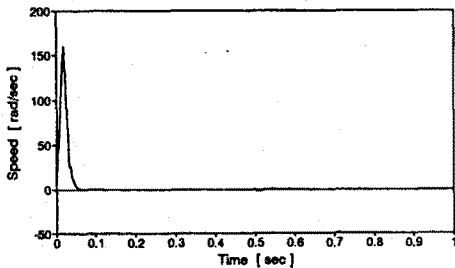
이 연구는 1992년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과임. (과제번호 : 92-2200-01-3)

참 고 문 헌

- [1] L. Malesani and P. Tenti, "A Novel Hysteresis Control Method for Current-Controlled VSI PWM Inverters with Constant Modulation Frequency", IEEE IAS Conf. Rec., pp. 851-855, 1987.
- [2] K. Ohnishi et. al., "Microprocessor Controlled DC Motor for Load-Insensitive Position Servo System", IEEE Trans. IE, Vol. 34, No. 1, pp. 44-49, 1987.
- [3] Y. Hori, "A Novel Servo System Design Method Based on the Acceleration Control", IEEE IECON Proc., pp. 447-452, 1988.
- [4] Y. Hori, "Disturbance Suppression on Acceleration Control Type DC Servo System", IEEE PESC Record, pp. 222-229, 1988.
- [5] K. Ohishi et. al., "Adaptive DC Servo Drive Control Taking Force Disturbance Suppression into Account", IEEE Trans. IA, Vol. 24, No. 1, pp. 171-176, 1988.
- [6] K. Ohishi et. al., "DSP-Based DC Servo Acceleration Control without Speed Sensor", IEEE IAS Conf. Rec., pp. 480-485, 1989.



(a) 위치응답



(b) 속도응답