

가변 구조 제어를 이용한 상전도 흡인식 자기 부상 시스템의 성능 향상에 관한 연구

이정욱, 이상빈, 이인호, 유지윤
고려대학교 대학원 전기공학과

Performance Improvement for an Electromagnetic Suspension System Using Variable Structure Control

Jeong-Uk Lee, Sang-Bin Lee, In-Ho Lee, Ji-Yoon Yoo
Dept. of Electrical Eng., Korea University

Abstract - The purpose of this paper is to improve tracking performance for an EMS system using variable structure control. To improve current control characteristics and to reduce chattering, a reaching law is applied. A disturbance observer using sliding observer is designed to compensate the influence of disturbances. This observer compensates modelling uncertainty and steady state error as well as external disturbance.

The effectiveness of the proposed control scheme is demonstrated by experiments

시제작한 1.5kg의 전자석을 이용한 실험을 통하여 제안한 제어기법의 우수성과 타당성을 입증한다.

2. 자기 부상 시스템의 모델

그림 1은 시제작한 상전도 흡인식 자기 부상 시스템을 나타낸 것으로, 코일에 흐르는 전류에 의해 식(1)과 같은 부상력이 발생하게 된다.

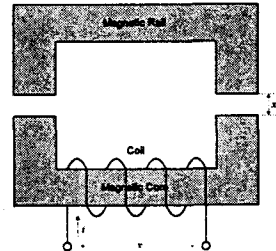


그림 1 상전도 흡인식 자기 부상 시스템.

$$f(x, i) = \frac{\mu_0 A_e N^2}{4} \left(\frac{i}{x} \right)^2 \quad (1)$$

자기 부상 시스템의 기계적 방정식은

$$m\ddot{x} = mg - f(x, i) + f_d \quad (2)$$

이고, 여기서 g 는 중력가속도, m 은 전자석을 포함한 부상체의 전체 무게, f_d 는 외란(레일의 진동이나 외부에서 인가되는 힘 등을 포함)을 나타낸다.

식(3)은 자기 부상 시스템의 전기적 방정식이다.

$$\begin{aligned} v &= Ri + \frac{\mu_0 A_e N^2}{2} \left(\frac{1}{x} \frac{di}{dt} - \frac{i}{x^2} \frac{dx}{dt} \right) \\ &= Ri + L(x) \frac{di}{dt} - E(x, i) \frac{dx}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

3. 가변 구조 제어기 설계

자기 부상 시스템은 비선형 시스템으로 누설 자속 및 자속의 포화로 인한 부상력의 감소가 일어나기 때문에 이에 대한 영향을 고려하여야 한다.

자기 부상 시스템의 비선형 모델을 직접 이용하여 가변구조 제어기를 설계하고, 채터링을 감소시키기 위해 경계층을 도입한다. Reaching law에 의

1. 서 론

상전도 흡인식 자기부상 시스템의 부상제어를 위해서 비선형 모델을 동작점에 대해 선형 근사화하거나 비선형 궤환선형화를 이용해 기존의 제어이론을 적용하는 연구가 진행되어왔다[3]. 그러나 자기 부상 시스템은 자속의 포화나 누설자속 등으로 인해 모델의 불확실성이 존재하게 되고, 부상체의 무게가 변화하기 때문에 강인성을 보장받기 어렵다.

본 논문에서는 정밀한 공극제어를 위해 파라미터 변동, 모델의 불확실성이나 외란에 의한 영향을 고려하여 비선형 모델을 이용한 가변구조 공극제어기를 설계하고[1], 가변구조 제어의 과도한 불연속 제어입력으로 인한 채터링을 저감시키기 위해 스위칭평면 주위에 경계층을 도입한다[1]. 또한, 가변구조 전류제어기 설계시 reaching law[2]를 이용하여 리칭 모드시 안정된 동특성을 부여하고 채터링을 감소시켜 계통의 안정성과 견실성을 향상시키고자 한다. 레일의 진동이나 외부에서 인가되는 힘 등과 같은 외란에 의한 영향을 보상하고자 슬라이딩 관측기[4]를 이용한 외란관측기를 설계하여 보다 정밀하고 강인한 제어기를 설계하고자 한다.

제안한 제어기법의 효과적인 구현을 위해 DSP (TMS320C31)를 사용하여 제어기를 설계하고,

한 가변구조 전류제어기를 설계하고, 외란에 의한 영향을 보상하고자 외란 관측기를 설계한다.

3.1 공극 제어기

자기 부상 시스템의 비선형 상태 방정식은 식(2)로부터 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{x} = g - b(x)u_x + \frac{f_d}{m} \quad (4)$$

$$b(x) = \frac{k_o}{4mx^2}, \quad \frac{b_{nom}}{b} = \beta \quad (5)$$

여기서 u_x 는 제어입력으로 전류의 제곱(i^2)을 의미한다. $b(x)$ 는 일정한 부호를 가지며 정확하게 알 수는 없지만, b_{nom} 로 예측되어지는 연속 함수이다.

상태 변수에 대한 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \hat{x} &:= x - x_d \\ \hat{\dot{x}} &:= \dot{x} - \dot{x}_d \end{aligned} \quad (6)$$

공극 제어를 위한 스위칭 함수는 식(7)과 같고,

$$s := \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) \hat{x} = \dot{\hat{x}} + \lambda \hat{x} \quad (7)$$

슬라이딩 조건을 식(8)과 같이 결정한다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s| \quad (8)$$

상태 변수 x 가 슬라이딩 모드에 존재할 경우 요구되는 연속 등가 제어입력 u_{eq} 는 식(9)와 같다.

$$u_{eq} = \frac{1}{b_{nom}} [g - \ddot{x}_d + \lambda \dot{\hat{x}}] \quad (9)$$

$b(x)$ 의 불확실성에 대해 항상 슬라이딩 조건을 만족하기 위한 제어입력을 경계층을 적용하여 식(10)과 같이 결정한다.

$$u_x = u_{eq} + \frac{1}{b_{nom}} (k_1 \hat{x} + k_2 \dot{\hat{x}} + k_3 \text{sat}(\frac{\phi}{s})) \quad (10)$$

따라서 슬라이딩 조건을 만족하도록 하는 제어입력의 이득은 식(11)과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} k_1 &= \begin{cases} k_1^+ > 0 & \text{if } s \dot{\hat{x}} > 0 \\ k_1^- < 0 & \text{if } s \dot{\hat{x}} < 0 \end{cases} \\ k_2 &= \begin{cases} k_2^+ > \lambda(\beta-1) & \text{if } s \dot{\hat{x}} > 0 \\ k_2^- < \lambda(\beta-1) & \text{if } s \dot{\hat{x}} < 0 \end{cases} \\ k_3 &= \begin{cases} k_3^+ > \beta\eta + g(\beta-1) & \text{if } s > 0 \\ k_3^- < \beta\eta - g(\beta-1) & \text{if } s < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

공극제어기에 의한 제어입력은 전류의 제곱으로, 전류제어기의 전류 기준치는 식(12)를 사용한다.

$$i_d = \sqrt{u_x} \quad (12)$$

3.2 전류 제어기

전류에 대한 상태 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$z := i_d - i \quad (13)$$

식(3)을 상태오차에 대해 전개하면 다음과 같다.

$$\dot{z} = -\frac{R}{L}z - \frac{1}{L}u + \frac{R}{L}i_d + d \quad (14)$$

여기서 u 는 제어입력, $d = \frac{di_d}{dt} - \frac{1}{L}e$ 이다.

Reaching law는 식(15)와 같이 불연속항과 연속항으로 표현되고, 우변 두번째항($-ks$)으로부터 리칭공간내에서 스위칭함수 s 의 궤적은 그 크기에 비례하는 운동속도를 가지므로 s 가 작아지는 스위칭평면부근에서는 채터링의 크기가 감소하게 된다.

$$\dot{s} := -q \text{sgn}(s) - ks \quad (15)$$

적분항을 포함하는 스위칭함수는 식(16)과 같다.

$$s := c_1 z + c_2 \int z dt \quad (16)$$

슬라이딩 조건을 만족하도록 하는 제어입력 u 는

$$u = L(q \text{sgn}(s) + ks + c_2 z + d) + Ri \quad (17)$$

이고, d 는 i_d 에 대한 미분을 포함하고 있으므로 슬라이딩조건을 만족하도록 하는 경계값 d_c 로 대체한다.

$$u = L(q \text{sgn}(s) + ks + c_2 z + d_c) + Ri \quad (18)$$

d 는 식(19)와 같이 경계되어진다고 가정한다.

$$d_{\min} \leq d \leq d_{\max} \quad (19)$$

이 때 슬라이딩 조건을 만족하도록 하기 위해 d_c 는 다음과 같은 관계에 의해 결정된다.

$$\begin{cases} d_c = d_{\max} & \text{for } d < d_c \text{ when } s > 0 \\ d_c = d_{\min} & \text{for } d > d_c \text{ when } s < 0 \end{cases} \quad (20)$$

식(20)을 만족하는 d_c 를 다음과 같이 정의한다.

$$d_c = d_1 + d_2 \text{sgn}(s) \quad (21)$$

여기서, $d_1 = (d_{\max} + d_{\min})/2$, $d_2 = (d_{\max} - d_{\min})/2$

3.3 외란 관측기

자기부상 시스템에 외력이 작용하게 되면 일정한 공극을 유지하기 위해 부상력을 증가시켜야 한다. 외란의 변화가 저주파 특성을 나타내는 경우 관측기의 동특성을 빠르게 선정하면, 외란의 변화를 0으로 가정할 수 있다.

$$f_L = \frac{d}{dt} \left(\frac{f_d}{m} \right) = 0 \quad (22)$$

식(4), (22)로부터 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= x_2 \\ \dot{\hat{x}}_2 &= g - b(x)u_x + f_L \\ \dot{\hat{f}}_L &= 0 \end{aligned} \quad (23)$$

여기서 f_L 은 무게변화를 포함한 외란(= f_d/m)이다.

자기부상 시스템의 상태변수에 대한 슬라이딩 관측기는 식(24)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \hat{\bar{x}}_1 &= -\alpha_1 \bar{x}_1 + \hat{x}_2 - k_1 \text{sgn}(\bar{x}_1) \\ \hat{\bar{x}}_2 &= -\alpha_2 \bar{x}_1 + g - b_{nom}u_x + f_L - k_2 \text{sgn}(\bar{x}_1) \\ \hat{\bar{f}}_L &= -\alpha_3 \bar{x}_1 - k_3 \text{sgn}(\bar{x}_1) \end{aligned} \quad (24)$$

여기서 $\bar{x}_1 = \hat{x}_1 - x_1$ 이며, α_i 는 관측기 이득이다.

그림 2는 전체 제어알고리즘의 블록도이다.

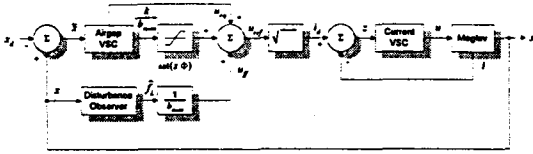


그림 2 전체 제어 알고리즘의 블록도.

관측된 외란은 전향제어입력 u_{ff} 에 의해 보상한다.

$$u_{ff} = \hat{f}_L / b_{nom} \quad (25)$$

따라서 공극제어기의 제어입력 u_{ref} 는 가변구조 공극제어기에 의해 계산된 제어입력 u_x 와 외란관측기에 의한 전향제어입력 u_{ff} 의 합으로 구성된다.

$$u_{ref} = u_x + u_{ff} \quad (26)$$

가변구조 전류제어기의 기준전류치는 다음과 같다.

$$i_d = \sqrt{u_{ref}} \quad (27)$$

4. 실험 결과 및 고찰

본 논문에서는 제안한 제어기법을 이용하여 시뮬레이션을 행한 결과를 바탕으로 실험을 하였다. 기준공극치는 5mm이며, 초기공극치는 8.4mm이다. 그림 3은 제안한 가변구조 제어기의 과도 응답이다. 그림 4는 기준공극(5mm-6-4)을 변화시킨 경우이며, 그림 5는 무게변화(1.5kg-2.0-2.31-2.58-2.31-2.0-1.5)에 대한 응답을 나타낸 것으로, 외란관측기에 의해 특성을 확인할 수 있다.

5. 결 론

파라미터 변동과 외란이 존재하는 자기 부상 시스템에 대해 비선형 모델을 이용한 가변 구조 제어기와 외란 관측기를 설계하여 전체 제어 시스템의 안정성과 강인성을 확보하고, 정밀한 공극 제어와 과도 상태 특성을 효과적으로 향상시켰다.

(참고 문헌)

- [1] J.J.E.Slotine and J.A.Coetsee, "Adaptive Sliding Controller Synthesis for Non-linear Systems", Int. J. Control, Vol.43, No.6, pp.1631-1651, 1986.
- [2] W.Gao and J.C.Hung, "Variable Structure Control of Nonlinear Systems: A New Approach", IEEE Trans. Ind. Elect., Vol.40, No.1, pp.45-55, Feb. 1993.
- [3] J.Y.Hung, "Nonlinear Control of a Magnetic Levitation System", Conf. Rec. of IEEE IECON, pp.268-273, 1991.
- [4] J.J.E.Slotine, J.K.Hedrick, and E.A.Misawa, "Nonlinear State Estimation Using Sliding Observers", Proc. of Conf. on Decision and Control, pp.332-339, Dec. 1986.

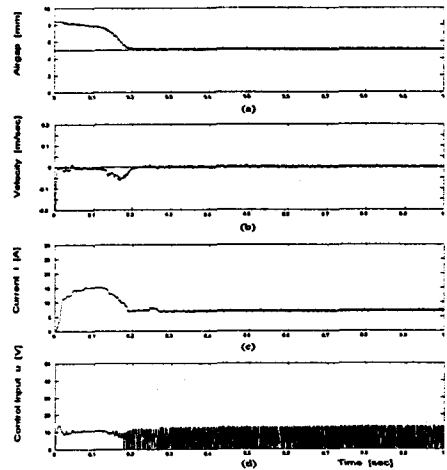


그림 3 제안한 가변 구조 제어기 응답.

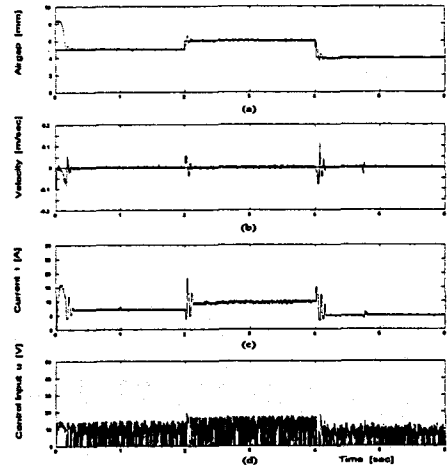


그림 4 제안한 VSC의 기준공극변화에 대한 응답.

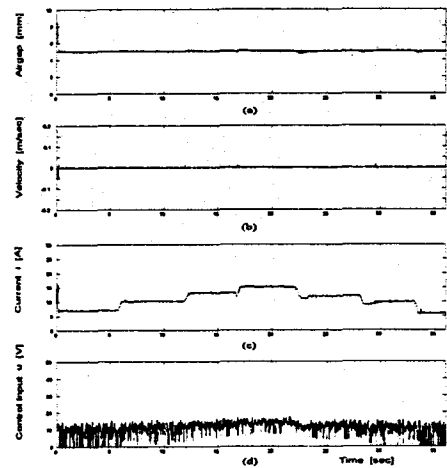


그림 5 제안한 VSC의 무게 변화에 대한 응답.