

슬라이딩 모우드를 이용한 유도전동기 위치제어에서의  
chattering 저감에 관한 연구

박민호, 김경서, 김영철<sup>o</sup>  
서울대학교

A Study on reduction of chattering in position control  
of induction motor using sliding mode

Min-Ho Park, Kyung-Seo Kim, Young-Real kim  
Seoul National University

ABSTRACT

The sliding mode control is an effective method to establish robustness against parameter variations and disturbance. But, in sliding mode strategy, the control function is discontinuous on the hyperplane. Consequently, the control input chatters at high frequency. When we apply such a control to the induction motor drive system, that causes a torque ripple and current harmonics, which are harmful to the system.

In this paper, we introduce a low pass filter between sliding mode control output and driver input to overcome that problem. The band-width of this filter is varied according to the error function to improve transient responses.

1. 서론

위치제어 시스템에 있어서 파라미터 (parameter) 변동이나 외란에 둔감한 특성은 시스템이 가져야 할 중요한 성질의 하나이다. 그러나 로보트의 팔과 같이 파라미터가 넓은 쪽으로 변하는 경우 원하는 특성을 얻기란 매우 힘들다.

슬라이딩 모우드 제어로 알려진 가변구조 시스템 이론은 소련에서 연구되어 왔고 [1], 80년대에 들어 전동기 제어, 특히 위치 제어에 강인성(robustness)을 얻기 위하여 적용한 연구논문들이 발표되고 있다. [2], [3]

가변구조 시스템은 상태변수가 미리 정해진 불연속 면을 통과할 때마다 시스템의 구조를 전환 (switching) 하여

불연속 면을 따라 빠르게 미끄러지도록 (slide) 함으로써 새로운 특성을 갖는 시스템을 얻는 방법이다.

그러나, 전환에 의하여 발생하는 채터링 (chattering) 현상은 유도기 구동의 경우 토크 리플이나 고조파의 원인이 되므로 이를 적절히 보상할 필요가 있다.

본 연구에서는 슬라이딩 모우드를 이용한 유도전동기 위치제어 시스템에 대역폭을 가변할 수 있는 가변 필터를 채택, 시스템의 응답특성을 그대로 유지 시키면서 채터링을 저감시킬 수 있도록 하였다.

2. 슬라이딩 모우드에 의한 위치 제어기

유도전동기 제어에 벡터 기법을 도입하여 시스템을 구성하면 벡터제어기 - 유도전동기는 DC 전동기와 같은 특성을 나타내게 되며, 시스템의 전기적 시정수를 무시하면 다음과 같은 2계 시스템으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & -B/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ Kt/J \end{bmatrix} i_T + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/J \end{bmatrix} Tl \quad (1)$$

$$x_1 = \theta^* - \theta \quad : \text{위치오차} \quad (2)$$

$$x_2 = -\dot{x}_1 = -\dot{\theta} \quad : \text{속도} \quad (3)$$

윗 식에서  $i_T$ 는 토크 전류로 위치 제어기에 의해 결정된 제어 입력이다.

위치 제어에서 오차에 대한 overshoot 를 없애기 위하여 기존 모델을 1계로 잡으면 다음과 같이 표현된다.

$$S = X_2 + C \cdot X_1 = 0 \quad (4)$$

phase-plane 상에서 S의 부호에 따라 제어기의 구조를 전환 (switching) 시키면, 위치 오차의 궤적이 기준선을 따라 빠르게 진동하면서 미끄러져 슬라이딩 모우드로 들어가게 된다. (그림 1)

이렇게 얻어진 시스템의 특성은 식(4)와 같으며, 본래의 시스템의 파라미터 B, J 나 외란 TI와는 무관하게 됨으로써 강인성을 얻게된다.

제어 입력 I 는 다음과 같다.

$$i_T = P1 \cdot X1 + P2 \cdot X2 + d \cdot \text{sgn}(s)$$

$$P1 = \begin{cases} \alpha_i & s > 0 \\ -\beta_i & s < 0 \end{cases}$$

$$P2 = \begin{cases} \gamma_i & s > 0 \\ -\delta_i & s < 0 \end{cases}$$

s의 부호에 따라 P1, P2의 값이 전환 됨으로써 제어 입력 I가 바뀌어 위치 오차 및 위치 속도는 기준선을 추종 하게 된다.

이때 슬라이딩 모우드가 일어나기 위한 조건, 즉 슬라이딩 라인에서 벗어난 경우 다시 복귀할 조건은  $\text{sgn}(s\dot{s}) < 0$  이다.

이상적인 시스템의 경우, 스위칭 주파수를 무한대로 하면, 상태값은 슬라이딩 궤적을 부드럽게 미끄러져 가지만, 실제 시스템에서는 무한대 스위칭이 불가능 하고, 여러 지연요소가 존재하므로 그림1.과 같이 슬라이딩 라인을 중심으로 진동하게 된다.

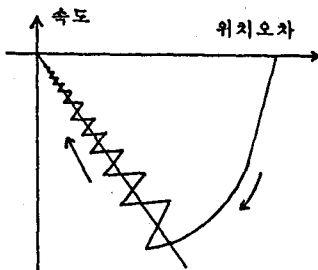


그림 1. 슬라이딩 모우드

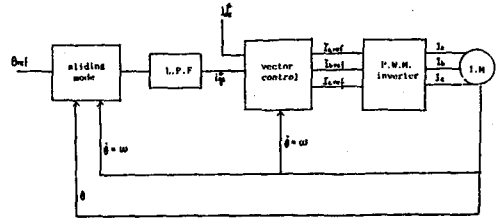


그림 2. 유도전동기 위치 제어기의 구성

### 3. 제어기 구성

그림2.는 슬라이딩 모우드를 이용한 유도 전동기의 위치제어 시스템의 전체 구성도 이다.

슬라이딩 모우드 제어기의 출력은 기준 토크 전류값 이므로 토크 제어물 위하여 유도기 구동부는 벡터 제어를 하였다. 벡터 제어기는 간접 제어 방식을 이용 하였고, 실재전류 Ia, Ib, Ic가 기준전류 Iaref, Ibref, Icref를 추종 하도록 P.W.M. inverter는 hysteresis 전류 제어 방식으로 하였다. feed back 되어진 위치와 속도 정보에 의하여 2msec의 sampling time마다 슬라이딩 모우드 제어기가 동작 하여 슬라이딩 라인을 따라 원점에 수렴하도록 한다.

이때 벡터 제어기 입력 I는 슬라이딩 모우드 제어기의 스위칭 동작에 의하여 sampling 시간마다 큰 폭으로 변하는 ripple의 형태 이다. 따라서 전류 Ia, Ib, Ic의 궤적이 심하게 흔들리게 되어, 고조파 성분을 갖게 되며, 이를 적절히 보상할 필요가 있다.

### 4. chattering 저감

제어기 입력의 진동을 없애기 위하여 그림2.와 같은 저대역 필터를 슬라이딩 모우드 제어기 출력과 벡터 제어기 사이에 도입하였다.

필터는 1개의 간단한 형태로 전달 함수는

$$G(s) = \frac{1}{1 + \tau_m s}$$

$$\tau_m = 1/\omega_c$$

이다.

여기서  $\tau_m$ 은 필터의 시정수이며  $\omega_c$ 는 필터의 cut-off frequency 이다.

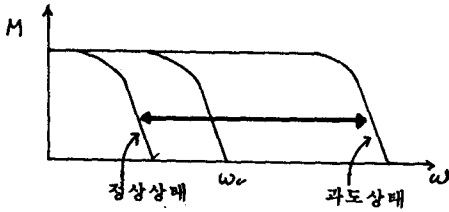


그림 3. 가변 필터

Digital 제어기 이므로 filter는 discrete 하게 동작 하며 discrete 형태로 필터 입,출력을 표시 하면,

$$I_{qs}(n) = \frac{\tau_m}{\Delta t + \tau_m} I_{qs}(n-1) + \frac{\Delta t}{\Delta t + \tau_m} I_{qs}^*(n)$$

이다.

chattering 감소를 위하여는 필터의 cut-off frequency 를 낮추어야 한다.

즉,  $\tau_m$  을 증가시켜 정상상태 에서의 ripple 이 줄도록 해야 한다.

그러나, 외란이 들어온 과도 상태의 경우, 토오크 응답이 빨라야 하며, 이때는 필터의 cut-off frequency 가 높아야 한다.

즉, 과도 상태와 정상 상태 시의 필터의 Band-Width 는 다른 값을 취해야 하며, 이를 위하여 필터 시정수 를 가변으로 하였다.

새로운 가변 필터는

$$\tau_m = K / |s|$$

$K = \text{constant}$

$$s = X_1 + C \cdot X_2 \text{ 이다.}$$

$|s|$  가 커질 경우, 즉 슬라이딩 라인으로 부터 크게 벗어나는 경우는 외란이 있는 경우로 필터 band 폭을 넓혀 빨리 슬라이딩 라인으로 복귀하도록 하며,  $|s|$  가 작을 경우는 band 폭을 좁혀서 ripple 을 줄이도록 한다.

### 5. 시뮬레이션

유도전동기의 위치 제어에 대하여 시뮬레이션을 행하였다. 유도전동기는 d-q 등가 모델을 사용하였고, 벡터 제어기와 가변 필터, 슬라이딩 모드 제어기의 샘플링 시간은 모두 2 msec 로 하였다. 시뮬레이션은 필터가 없는 경우, 고정필터, 가변필터에 대하여 하였고, 정상 상태에서의 맥동과 과도 응답을 비교하였다.

그림 4 는 정상 상태에서의 전류 파형으로 (a)에서 chattering 현상이 확실히 나타나며, (b)의 경우 필터에 의하여 정현파에 가까워짐을 알 수 있다.

그림 5 는 필터가 없는 경우 기존 전류와 실제 전류 벡터의 궤적으로 상당히 진동함을 알 수 있다.

가변 필터의 경우는 그림 6 과 같이 깨끗한 모양이 된다.

그림 7 은 3가지 경우에 대한 토오크, 속도, 위치 및 phase-plane 상에서의 슬라이딩 모우드를 보여주고 있다.

그림 (b) 와 (c) 는 고정필터와 가변필터 의 경우로 토오크 리플이 (a) 의 경우보다 적음을 볼 수 있다. 운전 구간에서 외란을 주어 응답특성을 보았다. 그림 (b)의 고정 필터의 경우 속도 변동이 (a)와 (c)의 경우보다 심함을 알 수 있다. 그림 (c)의 가변필터의 경우는 (a)와 비슷한 특성을 보여, 가변필터의 경우 리플 및 응답특성 모두가 양호함을 알 수 있다.

### 6. 결론

유도기 제어에 슬라이딩 모우드를 적용 할 경우, chattering 현상을 줄이기 위하여 가변 필터를 도입 하였다.

시뮬레이션을 통하여 가변 필터의 경우 정상 상태 에서 chattering 현상을 현저히 감소시키 면서도 과도 응답은 기존의 슬라이딩 모드 방식과 같이 빠름을 입증 하였다. 필터 이득의 선정 방법과, 필터 지연에 대한 시스템 안정도의 해석이 향후 연구 되어야 할 것이다.

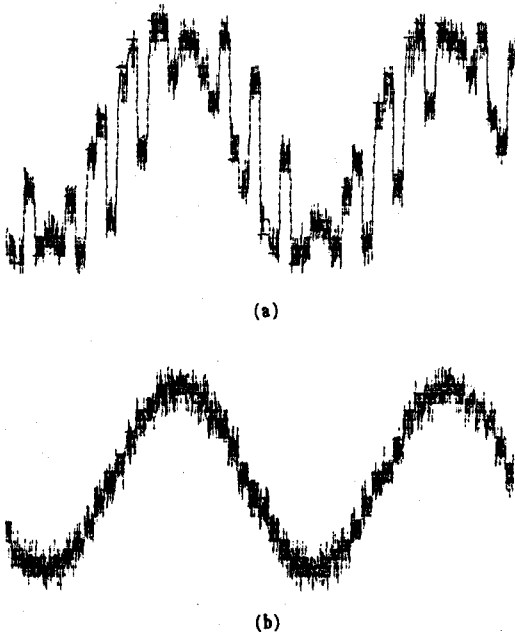


그림 4. 출력 전류 파형 (a) 필터가 없는 경우  
(b)가변 필터

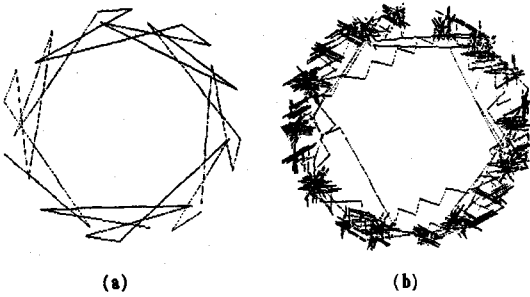


그림 5. 전류 벡터 궤적 (필터가 없는 경우)  
(a)기준 전류 (b)실제 전류

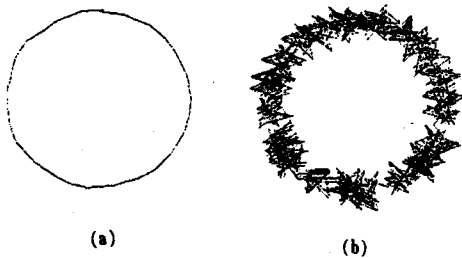


그림 6. 전류 벡터 궤적 (가변 필터)  
(a)기준 전류 (b) 실제 전류

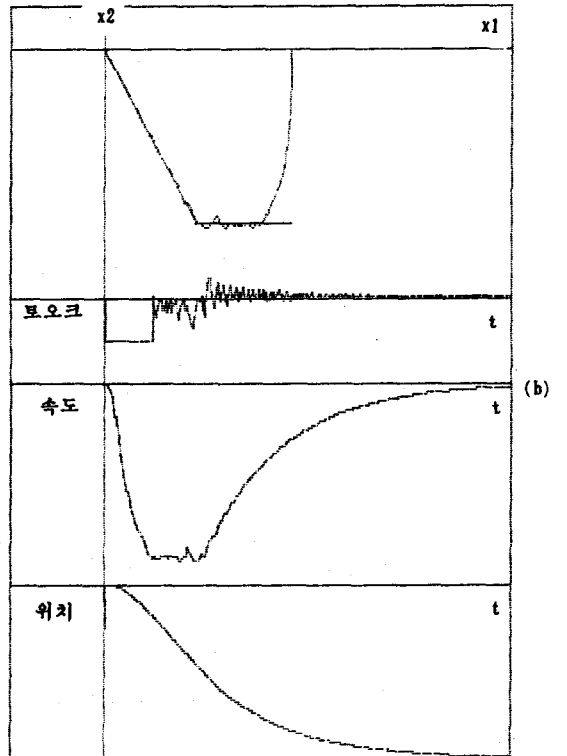
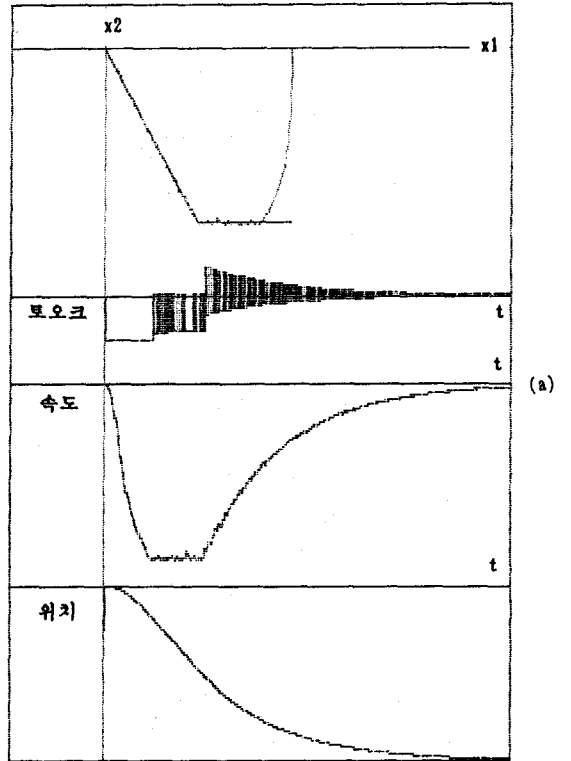
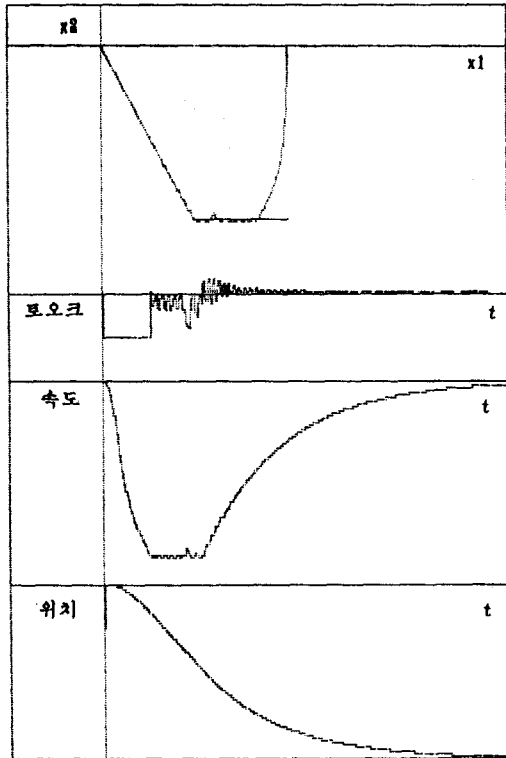


그림 7. 슬라이딩 모드 제어기 응답 특성  
(a)필터가 없는 경우 (b)고정 필터  
(c)가변 필터



(c)

참고 문헌

- (1) V.I. Utkin, "Variable Structure Systems with Sliding Modes", IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-22, No. 2, 1977
- (2) F. Harashima, H. Hashimoto, S. Kondo, "MOSFET Converter-Fed Position Servo System with Sliding Mode Control", IEEE Trans. Ind. Elec.,
- (3) F. Harashima, H. Hashimoto, K. Narayama, "A Microprocessor - based Robot Manipulator Control with Sliding Mode", IEEE. Tran. Ind. Elec, Vol. IE34, No. 1, 1987
- (4) C. Namuduri, P. C. Sen, "A Servo-Control System Using a Self-Controlled Synchronous Motor (SCSM) with Sliding Mode Controller" IEEE. Trans. Ind. Appl., Vol. IA-23, No. 2, 1987
- (5) D.M. Brod and D.W. Novotny, "Current Control of VSI-PWM Inverters", IEEE. Trans. Ind. Appl., Vol. IA-21, 1985
- (6) D.W. Novotny, D.W. Lorentz, "Introduction to Field Orientation and High Performance AC Drives, IEEE, IAS'85 Tutorial Book.