

슬라이딩 모드제어에 의한 교류 서보 전동기의 위치제어에 관한 연구

Position Control for AC Servo Motor Using a Sliding Mode Control

홍 정 표*, 홍 순 일**

Jeng-pyo Hong*, Soon-ill Hong**

요 약

교류 서보전동기 동적 모델은 비선형이고 2차 저항이 변동영향이 많다. 이러한 복잡한 제어는 건설제어가 요구된다. 이러한 시스템의 동특성은 슬라이딩 모드제어를 사용함으로써 파라미터나 외란 변동에 대하여 건설성을 달성할 수 있다. 본 논문은 교류 서보전동기에 의한 위치제어에 슬라이딩 모드 제어의 적용을 나타내었다. 제어방법이 유도되고 제어 시스템이 설계되었다. 교류 서보전동기의 건설제어를 위해 외부 부하 파라미터에 기초한 설계방법이 제안되었다. 제안된 제어방법은 가변구조 제어기와 슬립주파수형 벡터제어에 기초하여 주어졌다. 시뮬레이션 결과는 관성모우먼트, 점성마찰 및 부하외란 변동에 결실함을 나타내었고 슬라이딩 모드를 적용한 제안된 설계방법이 유용한 것을 구명한다.

Abstract

The dynamic model of ac servo motor is influenced very much due to rotor resistance change and nonlinear characteristic. By using the sliding mode control the dynamic behavior of system can be made insensitive to plant parameter change and external disturbance.

This paper describes the application of the sliding mode control for position control of ac servo motor. The control scheme is derived and designed. A design method based on external load parameters has been developed for the robust control of ac induction servo drive.

The proposed control scheme are given based on the variable structure controller and slip frequency vector control. Simulated results are given to verify the proposed design method by adoption of sliding mode and show robust control for a change of shaft initial J, viscous friction B and torque disturbance.

Key words : the sliding mode, a slip frequency vector control.

I. 서 론

현대제어는 교류 서보전동기의 토크, 속도, 위치 등의

정밀 제어를 달성하기 위해서 제어이론, 전력전자, 마이크로 컴퓨터제어 등을 응용한 종합 기술이다. 위치제어는 여러 산업 설비에서 보편적인 문제이고 PID 피드백 제어는 널리 사용되는 가장 일반적인 제어 기법이다. 반도체 스위칭 소자의 발전은 복잡한 제어 동작을 수행할 수 있게 되고 아울러 마이크로컴퓨터를 이용한 디지털제어가 널리 사용되게 되었다. 마이크로 컴퓨터제어에서 소프트웨어의 유연성은 제어 시스템의 설계와 실험

*부경대학교 기계공학부 **부경대학교 전기제어 계측공학부

접수 일자 : 2004. 7. 07 수정 완료 : 2004. 7. 23

논문 번호 : 2004-1-20

※이 논문은 2002학년도 부경대학교 발전기금재단의 지원에 의하여 연구되었음

에서 보다 많은 수단을 제공하였다 [1, 2].

마이크로컴퓨터의 발전은 서보 시스템에서 교류 서보전동기의 벡터제어 이론에 의해 구동될 수 있는 위치 제어에 관한 새로운 방법들이 소개되고 있다 [3]. 교류 서보전동기 모델은 매우 복잡하고 기계적, 전기적 지연 특성 때문에 일반적인 PID 피드백 제어는 고 성능 서보 시스템의 실현이 어렵다.

반면에 가변구조 제어는 제어대상의 상태가 스위칭 평면에 도달하여 슬라이딩 운동을 하도록 고속 스위칭 입력을 인가하는 제어방식으로 슬라이딩 모드에서 파라미터 변화와 외란에 둔감하고 응답의 속응성 면에서도 다른 제어기법에 비하여 우수하기 때문에 각종 서보제어계에서 널리 사용되고 있다 [4].

슬라이딩 모드제어는 시스템이 슬라이딩 모드 존재조건을 만족하는 경우, 응답은 제어대상의 파라미터에 의해서 정해지기 때문에 피드백 계수의 결정에 제어대상의 정확한 파라미터는 필요하지 않아서 제어대상의 파라미터 변동이나 외란에 대해 둔감한 제어가 행해진다[5, 6].

본 논문은 교류 서보 전동기의 위치제어를 위한 가변구조 제어 이론의 적용을 나타내었다. 기계적 파라미터에 기초한 기본 제어법칙에서 가변구조 제어계수가 결정되고 이 제어법칙에 외란억제 계수를 피드백 보상하여 정확, 견실 위치제어 방법을 제안하였다.

교류 서보전동기의 위치제어에 가변구조 제어의 적용으로 빠른 응답을 달성하기 위한 소프트웨어 전류제어에 의한 슬립주파수 제어형 벡터제어 기술이 개발되었다. 주어진 견실제어 사양을 가지고 교류 서보 전동기 제어특성을 개선하기 위해서 서보시스템의 설계 순서가 교류 서보 전동기 모델과 외부 부하 파라미터에 기초하여 나타내었다.

가변구조 제어기와 슬립 주파수형 벡터제어를 이용하여 위치제어 시스템이 구성되었고 시뮬레이션 결과 제안한 제어 방법이 유용함을 증명하였다.

II. 위치제어계 설계

2.1 가변구조 제어계의 설계

슬라이딩 모드를 적용하여 교류 서보 전동기에 의한 위치제어 시스템을 설계한다. 시스템의 상태방정식은 식(1)과 같다.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ u = \psi x \end{cases} \quad (1)$$

$x \in R^n, u \in R^m$

가변구조 제어는 피드백 이득 ψ 의 각 성분이 상태변수 x 에 따라 스위칭 하는 것이고 ψ 는 스위칭 함수 $s(x)$ 에 대하여 두 개 이상의 값을 갖는다.

기계부분의 운동방정식은 식 (2)과 같다.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(T^* - B\omega) \quad (2)$$

여기서 T^* 는 토크 지령, J 는 관성 모우먼트 그리고 B 점성마찰 계수 이다.

식(1)에서 제어입력 u 는 토크지령 T^* 이고 제어법칙은 식 (3)과 같다.

$$T^* = \psi_1 x + \psi_2 \dot{x} \quad (3)$$

여기서 상태변수 $x = \theta^* - \theta$, $\dot{x} = \omega$ 이고 θ^* 는 위치지령 이다. 피드백 이득 ψ_1, ψ_2 는 식(4)과 같이 정의한다.

$$\psi_1 = \begin{cases} a & xs > 0 \\ -a & xs < 0 \end{cases} \quad \psi_2 = \begin{cases} \beta & \dot{x}s > 0 \\ -\beta & \dot{x}s < 0 \end{cases} \quad (4)$$

스위칭 함수는 식(5)과 같이 정의하고 $\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \dot{s} < 0$

만족하면 제어대상의 상태 x 가 $s=0$ 의 스위칭 면에서 작은 진동을 반복해 원점으로 향하는 슬라이딩 모드가 생긴다.

$$s(x) = cx + \dot{x} \quad (5)$$

식 (5)에서 식(6)이 된다.

$$s \cdot \dot{s} = (c - a - b \psi_2) s \dot{x} - b \psi_1 s x \quad (6)$$

여기서 $a = B/J$ $b = -1/J$ 이다.

식 (6)에서 슬라이딩 모드의 존재조건 $\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \dot{s} < 0$

을 만족해야하므로 피드백 계수 a, β 는 식 (7)의 조건이 된다.

$$\begin{cases} a > 0 \\ \beta > (B - c) \end{cases} \quad (7)$$

슬라이딩 모드 운동방정식 $s=0$ 의 해 $x = x_0 e^{-ct}$ 에서 입상시간을 1 [sec]이 정하면 $c \approx 3$ 이고 식 (7)의 조건에서 $a = 0.06$ $\beta = 0.006$ 로 된다.

부하외란, 전동기의 관성모우먼트, 점성마찰계수 및 토크의 증감이 각각 $T' = T^* + T_L$ $B' = B + B_1$ $J' = J + J_1$ 으로 변환 경우 슬라이딩 모드 존재조건 $\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \dot{s} < 0$ 을 만족하지 않기 때문에 제어규칙은 제어 입력에 외란 T_L 을 피드백으로 보상하기 위하여 식 (8)을 제안한다.

$$T^* = \psi_1 x + \psi_2 \dot{x} - \psi_i \ddot{x} \quad (8)$$

여기서 $\gamma = \max |T_L|$ 는 토크 외란 억제계수 이고 ψ_i 는 부호함수 이다. 그리고 ψ_1, ψ_2, ψ_i 는 식 (9)과 같이 결정된다.

$$\psi_1 = \begin{cases} a & \text{if } xs > 0 \\ -a & \text{if } xs < 0 \end{cases} \quad \psi_2 = \begin{cases} \beta & \text{if } \dot{xs} > 0 \\ -\beta & \text{if } \dot{xs} < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\psi_i = \begin{cases} 1 & \text{if } s > 0 \\ -1 & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (9)$$

정격속도를 초과하지 않도록 속도 제한을 위해 슬라이딩 라인 $s = |\dot{x}_{\max}^-| - \dot{x}$ 을 도입하면 ψ_1, ψ_2 는 식 (10)과 같은 조건을 갖는다.

$$\psi_1 = -a, \quad \psi_2 = \beta \quad \text{if } |\dot{x}| = |\dot{x}_{\max}^-| \quad (10)$$

그리고 지령토크는 식 (11)의 한계조건을 갖는다.

$$|T^*| = |T_{\max}| \quad \text{if } |T^*| > |T_{\max}| \quad (11)$$

결국, 슬라이딩 모드제어는 위치편차 및 속도로부터 지령 토크 T^* 계산하는 것이고 설비에 필요한 정보는 부하 외란 토크의 최대 크기만 알면 된다.

2.2 벡터 제어 알고리즘

교류 서보 전동기는 전류 추종형 슬립 주파수 벡터제어 이고 위치제어는 2차자속 일정 슬립주파수형 벡터제어를 채용한다. 정확한 순시토크 제어를 하기 위해서 샘플링 시간을 짧게 해야 하기 때문에 연산시간이 짧은 극좌표형식의 벡터제어 알고리즘을 적용한다.

VSS제어의 출력을 지령 토크 T^* 라고 하면, 전류 진폭은 식 (12)이 된다.

$$i_{id}^* = K_0 \quad i_{iq}^* = \frac{L_2}{M^2 K_0} T^* \quad (12)$$

여기서 K_0 는 구동시스템의 자속-속도특성에서 결정된다. 슬립주파수는 i_{id}^* 의 함수가 되고 식 (13)이 성립한다.

$$\omega_s^* = \frac{r_2}{L_2 K_0} i_{id}^* \quad (13)$$

실제로 인버터에 전달되는 전류 지령치는 식 (14)이다.

$$\begin{cases} i_{1u}^* = \sqrt{\frac{2}{3}} |I_1| \cos(\theta_0 + \theta_T) \\ i_{1v}^* = \sqrt{\frac{2}{3}} |I_1| \cos(\theta_0 + \theta_T - \frac{2}{3}\pi) \\ i_{1w}^* = \sqrt{\frac{2}{3}} |I_1| \cos(\theta_0 + \theta_T + \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad (14)$$

여기서, $|I_1| = \sqrt{i_{1d}^2 + i_{1q}^2}$, $\theta_T = \tan^{-1} \frac{i_{1q}}{i_{1d}}$, $\theta_0 = \int_i (\omega_T + \omega_0) dt$ 이다. 그리고 발생 토크는 식(15)이다.

$$T = -\frac{M}{\sqrt{3}} \{i_{us}(i_{vr} - i_{wr}) + i_{vs}(i_{wr} - i_{ur}) + i_{ws}(i_{ur} - i_{vr})\} \quad (15)$$

III. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 방법

Fig.1은 제안한 제어법칙을 이용하여 교류 서보 전동기 슬립주파수 벡터제어에 의한 위치제어 시스템의 블록 다이어그램이다. 이것의 구동은 펄스 인코더에 검출된 속도와 위치가 피드백 되고 구동은 순시전류 추종방식의 Power MOS-FET 전류형 인버터에 의해 행한다.

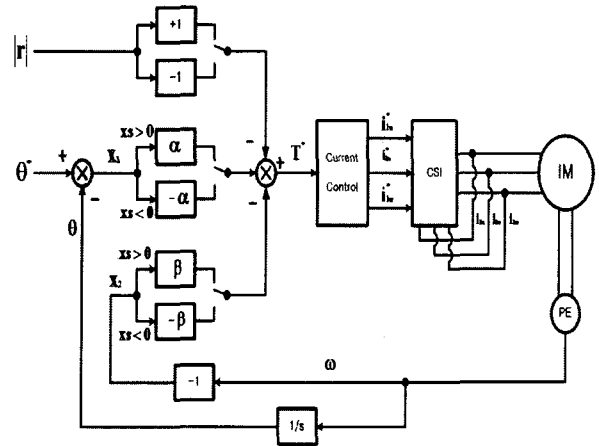


그림 1 제안한 교류 서보전동기 위치제어 시스템.
Fig. 1 Proposed position control system for ac servo motor.

Fig. 2는 연산을 행하기 위해서 나타낸 위치제어 프로그램 알고리즘이다. 유도전동기 및 인버터 특성을 고려한 위치제어 프로그램은 비교기부, 전동기부 기계부로 구성된 아날로그 블록과 VSS부, 벡터제어부로 구성되는 디지털 블록이 있다. 아날로그 부의 샘플링 간격은 0.00001[sec] 이고 디지털 부 샘플링 주기는 0.001[sec]

이다. 여기서 $i_{1d} = 1.5$ 이다.

Table 1은 사용한 제어대상 전동기정수 및 파라미터이고 위치지령 $\Theta^* = \pm 628(\text{rad})$ 이다.

표1 시스템 파라미터.

Table 1 The system parameter.

회전자 관성 (J)	$3.234 \times 10^{-4} [\text{Nms}]$	R_1	5.86 Ω
점성마찰계수 (B)	$3.745 \times 10^{-4} [\text{Nms/s}]$	R_2	5.3 Ω
정격회전수	50[rps]	L_1	164 mH
인버터 전류 제한	10[A]	L_2	164 mH
위치 시스템의 사용 범위	$\pm 100[\text{round}]$	M	143 mH

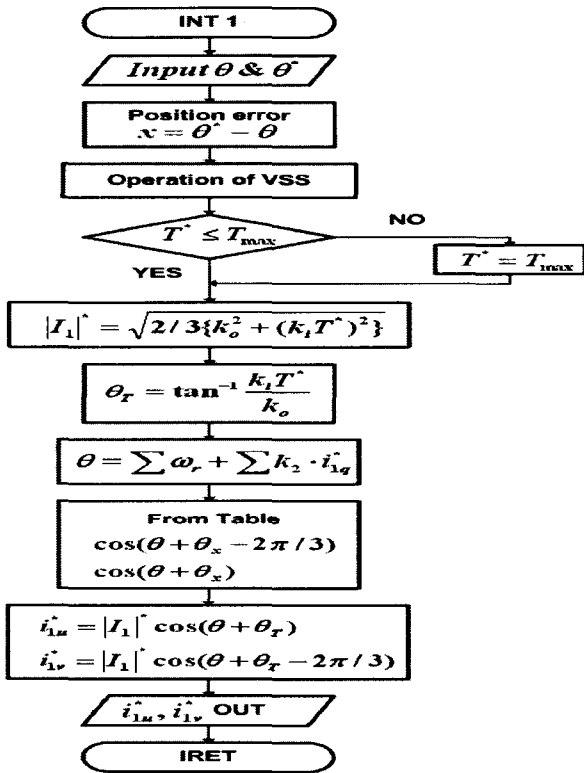


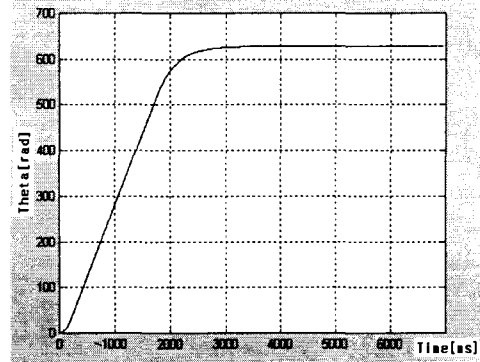
그림 2 교류 서보전동기 위치제어 알고리즘.

Fig. 2 The algorithm of the position control for ac motor.

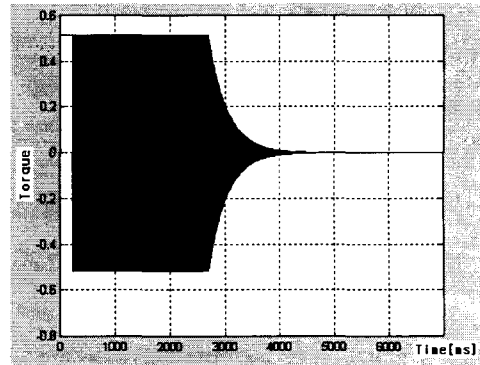
3.2 시뮬레이션 결과 및 검토

Fig.3은 설계한 제어규칙에 기초하여 부하, 외란이 없는 상태에서 계단 입력에 대한 위치응답과 토크응답의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 여기서 (a)는 위치응답, (b)은 토크 응답을 나타낸다. 이 경우 외란토크억제 계수 $\gamma = 0$, 위치 지령 $\Theta^* = 628[\text{rad}]$ 이다. 위치응답은 설정한 기준치에 안정하게 도달하였으며 오버슈트도 거의 나타나지 않았다.

또한 토크 응답은 토크 제한치 내에서 정확하게 나타나고 정상 상태에 영으로 수렴하고 있다. 이 결과에서 시스템은 설계 한데로 희망하는 응답이 얻어짐을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 3 위치와 토크 응답

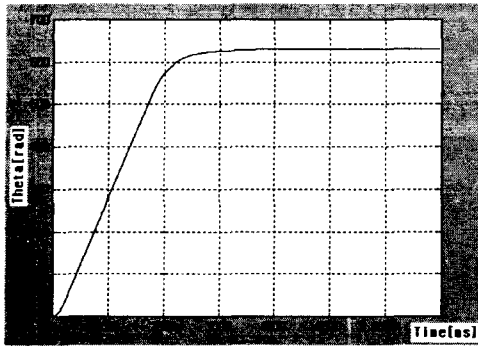
($T_L = 0, \gamma = 0, \Theta^* = 628[\text{rad}]$).

Fig. 3 The position and torque response

($T_L = 0, \gamma = 0, \Theta^* = 628[\text{rad}]$).

Fig. 4 ~ 6은 응답이 거의 정상상태에 도달한 3.5초의 시점에서 $T_L = 0.1[\text{Nm}]$ 의 외란토크를 걸고 외란토크억제 계수 $\gamma = 0, \gamma = 0.3, \gamma = 0.1$ 으로 한 경우 Fig. (a)위치응답 과 Fig. (b) 토크 응답을 나타낸 것이다.

Fig. 4의 $\gamma = 0$ 일 때 위치응답은 $t = 3.5[\text{sec}]$ 시점에서부터 목표치에 크게 벗어나는 오버슈트가 발생하고 토크 외란 억제 효과가 되지 않음을 알 수 있다. 토크 응답은 $t = 3.5[\text{sec}]$ 시점에서부터 최종치 영에서 크게 벗어나는 편차가 있다. 이것에서 외란 토크를 가한 시점 이후에는 슬라이딩 모드가 존재하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이것은 제어규칙 자체는 슬라이딩 모드 존재조건을 만족하고 있지만 인버터에 의한 유도전동기의 동작이 이상적이 아니기 때문이라 생각된다.



(a)



(b)

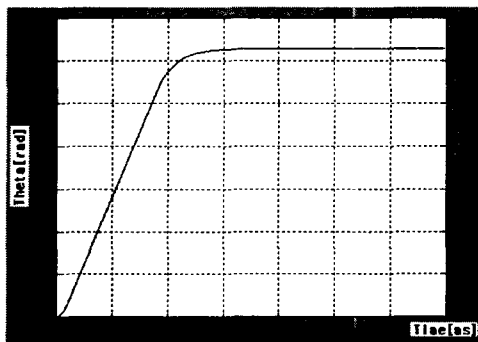
그림 4 위치와 토크 응답 ($\gamma=0, T_L=0.1[Nm]$).

Fig. 4 The position and torque response ($\gamma=0, T_L=0.1[Nm]$).

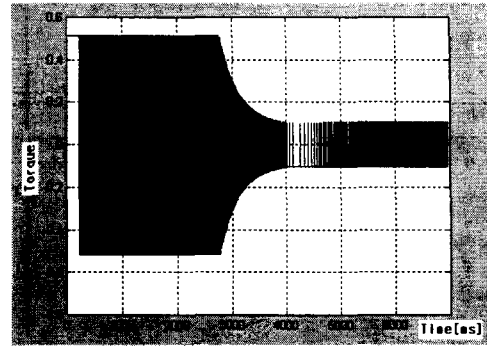
Fig. 5의 $\gamma=0.1$ 인 경우, 위치 응답은 오버슈트와 정상편차가 발생하지 않고 안정적이다. 토크 응답은 채터링이 발생하지만 정상상태에서 $\gamma=0.2$ 이상으로 한 경우보다 채터링이 줄어들 수 있었다.

채터링 발생을 해결하기 위해서는 맥동을 상쇄하는 요소를 지령값에 보상하거나 맥동을 무시할 수 있을 정도까지 γ 를 크게 하는 방법이 생각되어지지만 전자는 강인성을 저하하는 것이 되고 또 후자는 역으로 γ 의 스위칭 지연에 의한 채터링을 증가시키는 것으로 된다.

시뮬레이션을 통해서 토크 외란억제의 설계가 효과가 있는 것을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

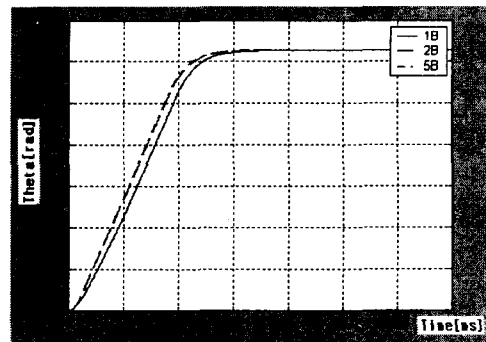
그림 5 위치와 토크 응답 ($\gamma=0.1, T_L=0.1[Nm]$).

Fig. 5 The position and torque response ($\gamma=0.1, T_L=0.1[Nm]$).

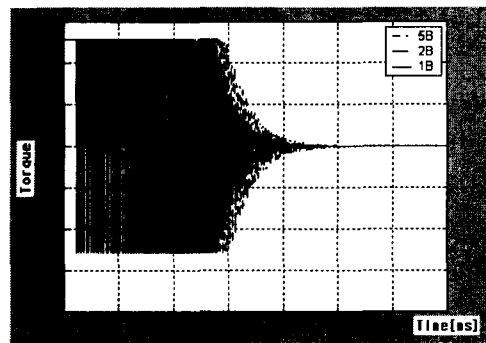
Fig. 6, 7은 3.5초의 시점에서 $0.1[Nm]$ 의 외란토크를 걸고 관성모우먼트 및 점성마찰계수를 변동한 경우의 (a) 위치응답, (b)토크 응답을 나타낸다. 단 여기서 시뮬레이션의 결과를 보기 편하게 하기 위해서 샘플링 시간을 $0.01[sec]$ 으로 하였다.

관성모우먼트를 $J, 2J, 5J$ 변화한 위치와 토크 응답특성은 슬라이딩 라인에 도달하여 이후의 응답에는 변화가 없는 것으로 보아 관성모우먼트의 변동에 대해 강인한 특성이 있음을 알 수 있다.

점성마찰계수를 $B, 2B, 5B$ 으로 변화한 응답특성은 3가지 경우 거의 변화가 없다 이것에서 점성마찰 계수의 변동에 대해 강인한 특성이 있음을 확인할 수 있다.

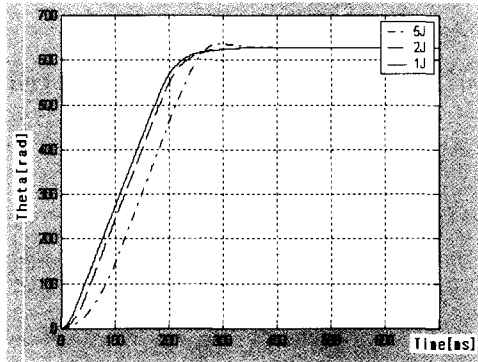


(a)

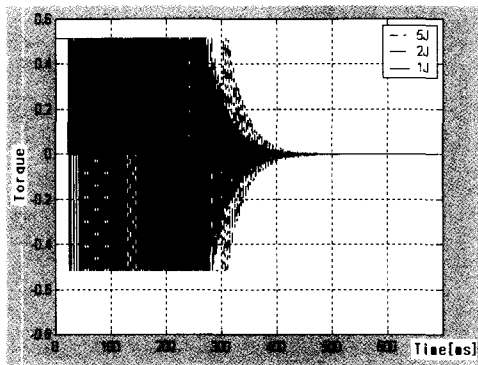


(b)

그림 6 위치와 토크 응답 ($B, 2B, 5B$).
 Fig. 6 The position and torque response with parameter ($B, 2B, 5B$).



(a)



(b)

그림 7 위치와 토크 응답 ($J, 2J, 5J$).
 Fig. 7 The position and torque response with parameter ($J, 2J, 5J$)

IV. 결론

가변구조 제어를 이용한 2차자속 일정 슬립주파수형 벡터제어에 의한 교류 서보전동기의 위치제어 시뮬레이션에 의한 검토에서 다음을 알 수 있다.

- 1) 교류 서보전동기를 이용한 위치제어에서 가변구조 제어기를 설계하였고 가변구조 제어기를 이용한 2차자속 일정 슬립주파수형 벡터제어는 서보시스템의 위치제어에 유효함이 확인되었다.
- 2) 관성모멘트와 점성마찰계수의 변동에도 시스템의 응답은 강인성을 나타내고 있음을 확인하였다.
- 3) 제어법칙에 외란역제 보상 항을 추가함으로써 외란에 대한 강인성을 나타내고 제어성능이 향상됨을 나타내었다.

본 연구의 결과는 구동은 고성능 위치제어 방법과 그것의 응용을 실험하고 조사하기를 원하는 설계 기술자와 연구자에게 유용할 것이다. 그리고 이 설계 방법은 앞으

로 가변구조 제어의 응용에 도움이 될 것이다.

참고문헌

- [1] N.N. Bengiamin, B. Kauffmann, "Variable Structure Position Control" IEEE Control Systems Magazine, pp.3-8, august 2000.
- [2] Hyeung-sik Choi, Young-heon Park, Yongsun Cho, and Minho Lee, "Improved Design for a Brushless DC Motor" IEEE Control Systems Magazine, pp.27-35, June 2001.
- [3] Ying Yu, " DSP- Based Robust Control of an AC Induction Servo Drive for Motion Control". IEEE Transaction Control System. Vol. 4, No. 6, pp. 614~626, 1996.
- [4] Danny Grant and Vincent Hayward, "Variable Structure Control of Shape Memory Alloy Actuators" IEEE Control Systems, pp.80-88, June 1997.
- [5] K. David Young, Umit Ozguner, "Control Engineer Guide to Sliding Mode Control", IEEE Transaction Control System. Vol. 7, No. 3, pp. 328~341, 1999.
- [6] M. W. Dunnigan, "Position Control of a Vector Controlled Induction Machine using Slotine's Sliding Mode Control approach", IEE Proc-Electro. Power Appl., Vol. 145, No. 3, pp. 231~238, 1998.



홍 정 표 (Jeng-pyo Hong)
 1998년 부경대학교 전기공학과 졸
 2001 부산대학교 대학원 공학석사
 2004년 부경대학교 기계공학부 박사과정
 관심분야 : 퍼지 시스템설계, 전동기 벡터 제어, 리터턴스 전동기 제어 설계.



홍순일 (Soon-ill Hong)
 2003 부경대학교 전기제어 계측공학부 교수
 1981 부산대학 공학석사(전력전자)
 1986 한국해양대학 공학박사 (제어공학)
 1999 일본전기 통신대학 연구교수
 2000 대한전기학회 부산지부 회장
 현 대한 전기학회 이사, 신호처리 시스템학회 감사. 부산지방 국토 건설심의 위원
 관심분야 : 퍼지 시스템설계, 서보시스템 설계, 전동기 벡터제어.