

슬라이딩 모우드를 이용한 유도전동기의 위치제어에 관한 연구

A Study on Position Control of Induction Motor Using the Sliding Mode

朴 旻 鎬* · 金 庚 緒** · 李 弘 熙***
(Min-Ho Park · Kyung-Seo Kim · Hong-Hee Lee)

요 약

본 논문은 슬라이딩 모우드를 이용한 유도전동기의 위치제어에 관한 연구이다. 슬라이딩 모우드 제어에 있어 제어함수는 슬라이딩 라인에서 불연속이며, 이로 인하여 유도전동기 구동 시 전류 고조파나 소음과 같은 문제가 발생한다. 이러한 효과를 감소시키기 위하여 저주파 필터를 슬라이딩 모우드 제어기 출력과 전동기 제어기 입력 사이에 도입하였다. 그러나 저주파 필터에 의하여 채터링 현상은 감소되지만, 대신에 전동기의 토오크 응답이 느려져 과도시에 시스템의 특성이 나빠지게 된다. 이 문제를 해결하기 위하여 필터의 대역을 오차함수에 따라 가변도록 하였다. 마이크로 제어기를 이용하여 슬라이딩 모우드 제어기를 구성하였으며 실험을 통하여 가변필터에 의한 보상방법의 타당성을 확인하였다.

Abstract- An induction motor position control system based on the sliding mode control is presented. In the sliding mode control, control function is discontinuous on the hyperplane, which causes harmful effects such as current harmonics and acoustic noise in the motor drive application. In this study, a low pass filter is introduced between the sliding mode controller output and the motor controller input to reduce these effects. The filter, however, makes the torque response sluggish and the system performance may become poor in cost of chattering reduction. To overcome these problems, the bandwidth of the filter is varied according to the error function. It is shown that the proposed sliding mode control with variable-bandwidth filter shows good performance, which is confirmed through experiments.

*正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 教授 · 工博
**正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 博士課程
***正 會 員 :蔚山大 工大 電氣工學科 助教授
接 受 日 字 : 1989年 7月 18日
1 次 修 正 : 1989年 11月 1日

1. 서 론

전동기의 위치제어에 있어서 파라미터변화나 외란에 대한 강인성은 제어 시스템이 갖추어야 할

중요한 특성의 하나이다. 가변구조시스템 (variable structure system) [1~3]은 이러한 조건을 만족시킬 수 있는 제어방법으로, 전동기의 위치제어에 적용시키기 위한 연구논문이 최근들어 다수 발표되었다. [4~6]

가변구조시스템에서 시스템의 구조는 시스템 상태가 미리 정해진 기준면을 교차하는 순간 절환된다. 이러한 동작에 의하여 시스템의 상태변수는 기준선을 미끄러져(slide)가게 된다. 결과로 나타난 새로운 시스템의 특성은 원래 시스템과는 무관하게 되며, 파라미터 변화나 외란에 둔감한 특성을 갖는다. 이상적인 시스템일 경우 절환 빈도수가 무한대로 될 수 있지만, 실제 시스템 예를 들어 디지털 제어 시스템과 같은 경우는 스위칭 빈도수가 제한된다. 따라서 시스템의 상태변수가 슬라이딩라인 주위를 진동하는 채터링(chattering) 현상이 일어나게 되며, 정상상태에 도달했을 경우에도 이 현상은 계속된다.

전동기 구동에 있어서 이러한 현상은 토크 맥동, 전류 고조파, 소음 등과 같은 좋지 못한 결과를 낳게 된다. 이러한 현상은 완화시키기 위한 연구가 다수 수행되었으나, [7~9] 이들 연구의 대부분은 직류기나 동기기에 대한 것들이다. 본 연구에서는 슬라이딩모우드 제어 방법을 유도전동기 위치제어 시스템에 적용하였으며, 마이크로 콘트롤러를 이용하여 디지털 방식으로 구현하였다. 또한, 채터링 현상을 저감시키면서, 동시에 시스템 특성은 보상전과 같이 유지시킬 수 있는 새로운 보상방법을 제시하였다.

토크 기준치에 포함된 맥동 성분을 제거하기 위하여 저주파 필터를 슬라이딩모우드 제어기 출력과 전동기 제어기 입력 사이에 도입하였다. 저주파 필터에 의하여 전동기 전류의 맥동이나 정상상태에서의 진동 등은 없앨 수 있지만 필터의 시간 지연에 의하여 과도상태에서의 응답 특성은 느려지게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 가변 필터를 사용하였다. 가변필터란 임의의 오차함수에 따라 필터의 대역폭이 가변되는 필터로, 정상 상태에서는 맥동성분을 줄이기 위하여 필터의 대역폭이 좁아지며 과도상태에서는 응답을 빠르게 하기 위하여 필터의 대역폭이 넓어지게 된다.

2. 슬라이딩 모우드 제어

그림 1은 슬라이딩 모우드 제어에서 위상평면 상에서의 궤적을 보여주고 있다. 슬라이딩 궤적은 정속 구간과 감속 구간의 두 부분으로 나뉘어져

있다. 처음 위치에서 전동기는 슬라이딩 궤적에 도달할 때까지 최대로 가속된다. 슬라이딩 궤적에 도달하면 이때부터 슬라이딩 모우드가 시작되며 상태변수는 기준선을 따라 미끄러져 가게 된다.

정속 구간에서 슬라이딩 궤적의 식은

$$\sigma_1 = x_2 - x_{20} \tag{1}$$

이며, 기준 토크 식은

$$T_{ref} = \psi_2 x_2 \tag{2}$$

로 된다. 여기서, 제환 제어기의 이득 ψ_2 는 $\sigma_1 x_2$ 의 부호에 따라 다음과 같이 절환된다.

$$\psi_2 = \begin{cases} \gamma_{21} & ; \sigma_1 x_2 > 0 \\ \delta_{21} & ; \sigma_1 x_2 < 0 \end{cases} \tag{3}$$

다음 구간은 감속구간으로 슬라이딩 궤적의 식은

$$\sigma_2 = c x_1 + x_2 \tag{4}$$

이며, 기준 토크 식은

$$T_{ref} = \psi_1 x_1 + \psi_2 x_2 + K \operatorname{sgn}(\sigma_2) \tag{5}$$

로 된다. 제환제어기 이득 ψ_1 , ψ_2 는 정속구간에서와 마찬가지로 다음과 같이 절환된다.

$$\psi_1 = \begin{cases} \alpha_{11} & ; \sigma_2 x_1 > 0 \\ \beta_{11} & ; \sigma_2 x_1 < 0 \end{cases} \tag{6}$$

$$\psi_2 = \begin{cases} \gamma_{11} & ; \sigma_2 x_2 > 0 \\ \delta_{11} & ; \sigma_2 x_2 < 0 \end{cases} \tag{7}$$

시스템 상태가 기준궤적을 벗어날 경우, 식 (3) 혹은 식 (6), (7)과 같은 절환동작에 의하여 바로

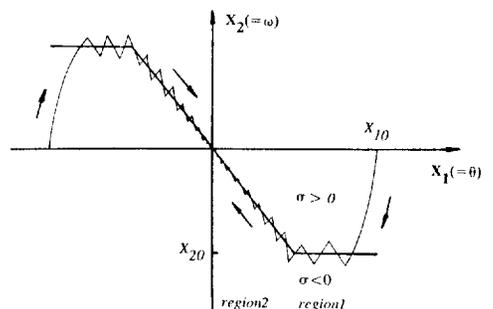


그림 1 위상평면 상의 궤적
Fig. 1 Phase-plane trajectory.

기준 제적으로 복귀할 수 있게 된다. 이를 위하여 다음식과 같은 슬라이딩 모우드의 존재조건[3]이 만족되어야 한다.

$$\lim_{\sigma \rightarrow 0} \sigma \dot{\sigma} < 0 \tag{8}$$

제어기 파라미터 $\alpha_{11}, \beta_{11}, \gamma_{11}, \delta_{11}, \gamma_{21}, \delta_{21}$ 등은 식 (8)의 조건을 만족시키도록 설계된다.

3. 가변필터

그림 2는 유도전동기의 위치제어 시스템으로 Tref는 슬라이딩 모우드 제어기 출력이며, Tref*는 유도기의 벡터제어기 기준 토크이다. 그림 2에서 가변필터는 필터의 대역폭이 가변되는 저대역 필터로 전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{1}{1 + s\tau_f} \tag{9}$$

$$\tau_f = 1/\omega_c \tag{10}$$

여기서 τ_f 는 필터 시정수이다.

정상운전 시 ω_c 는 토크맥동을 줄이기 위하여 낮아지게 되며, 반면에 과도상태에서는 빠른 토크 응답을 얻기위하여 증가하게 된다. 즉, 필터의 대역이 운전상태에 따라 변하게 된다. 필터의 차단 주파수는 다음식과 같다.

$$\omega_c(\sigma) = K|\sigma| \tag{11}$$

여기서 $\sigma(x_1 + x_2)$ 는 오차함수이다.

$\sigma=0$ 일 경우 기준 제적과 실제 제적 사이에는 오차가 없게 되며, σ 는 충분히 작은 값을 갖게 되어 ω_c 는 작은 값으로 유지된다. 전동기의 토크가 갑자기 변하면 상태값은 기준 제적에서 벗어나게 되어 σ 는 큰 값으로 된다. 이 경우 ω_c 는

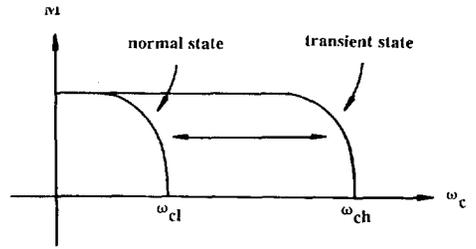


그림 3 가변필터

Fig. 3 Variable band-width filter.

증가하고, 따라서 토크 응답은 작은 시간지연만을 가지게 된다. 결과적으로 과도응답은 필터가 없는 경우와 마찬가지로 빠른 특성을 나타낼 수 있다.

그림 3은 가변필터의 특성을 보여주고 있다. 디지털 제어를 위하여 필터의 관계식은 다음과 같이 이산형태로 변형된다.

$$\begin{aligned} Tref^*(n) &= \frac{\Delta T}{\Delta T + \tau_f(s)} Tref(n) \\ &+ \frac{\tau_f(s)}{\Delta T + \tau_f(s)} Tref^*(n-1) \end{aligned} \tag{12}$$

여기서 ΔT 는 샘플링 시간이다.

4. 유도기의 벡터제어

유도기의 토오크를 정확하고 빠르게 제어하기 위해서는 자속성분 전류와 토크성분 전류를 분리하여 독립적으로 제어해야 한다. 이를 위하여 유도기 고정자 전류를 자속벡터에 투영(orientation)시켜 제어하는 방법이 벡터제어(vector control) 방법이며, 자속각의 정보를 얻는 방법에 따라 간접

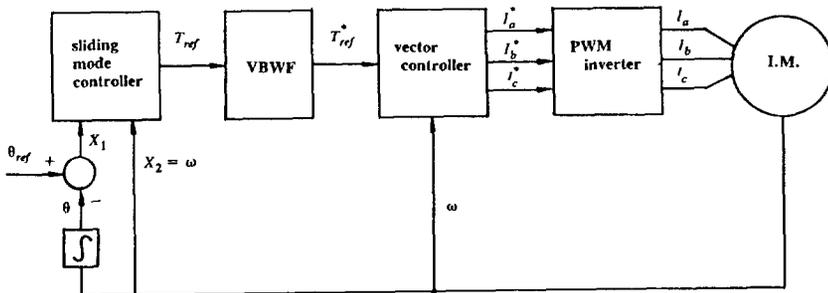


그림 2 유도전동기 위치제어 시스템

Fig. 2 Induction motor position control system.

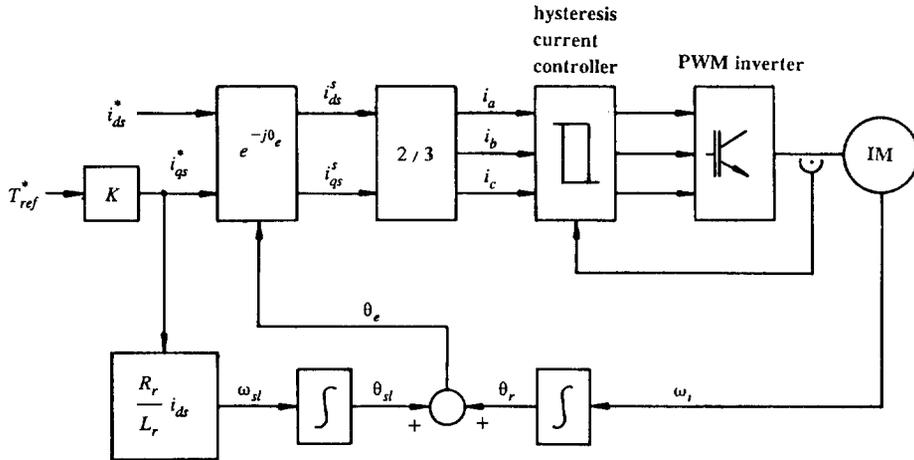


그림 4 간접벡터제어기의 구성
 Fig. 4 Configuration of indirect vector controller.

벡터제어와 직접벡터제어로 분류된다.

본 연구에서는 고속, 저속 영역에서 특성이 안정되고 구현이 간단한 슬립 계산 방식의 간접벡터제어기를 유도기의 구동부로 사용하였다. 이에 대한 블록도는 그림 4와 같다. 그림 4에서 i_{ds}^* 와 i_{qs}^* 는 동기회전좌표계 상에서의 자속성분 전류와 토크성분 전류이며, 이로 부터 정지좌표계의 값 i_{ds}^s 와 i_{qs}^s 를 얻기 위해서는 단위벡터 $e^{-j\theta_e}$ 가 필요하다. 여기서 θ_e 는 자속각으로 다음식과 같이 구해진다.

$$\theta_e = \theta_{sl} + \theta_r \quad (13)$$

θ_r 은 회전자 각으로 직접 측정이 되며, 슬립각 θ_{sl} 은 자속성분전류 i_{ds}^* 와 토크성분전류 i_{qs}^* 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\theta_{sl} = \int_0^t \omega_{sl} dt = \int_0^t \left(\frac{L_r}{R_r} \frac{i_{qs}^*}{i_{ds}^*} \right) dt \quad (14)$$

여기서 ω_{sl} 은 슬립각속도이다.

5. 실험장치 구성

그림 5는 실험장치의 구성도이다. 주 제어기로 Intel사의 MCS8096 마이크로 제어기를 사용하였다. 주 제어기의 외부에 24K word의 RAM블록을 설치하였다. RAM블록은 2부분으로 나뉘며, 첫번째 블록(4K)은 제어용 프로그램 저장을 위하여, 두번째 RAM블록은 운전중의 정보 저장을 위하여 사용된다. 상위 컴퓨터로는 IBM-PC/XT를 사용하였으며, 주 제어기와 시리얼 포트(serial port)

로 연결되어 있다.

상위 컴퓨터는 제어용 프로그램을 어셈블하여 주제어기로 내려보내고 주 제어기는 내려온 수행 프로그램을 RAM블록에 저장한다. 운전중에 운전 명령이나 제어기 이득등이 상위 컴퓨터로부터 주 제어기로 보내지며, 시스템 상태를 포함하는 운전 정보가 주 제어기로 부터 상위 컴퓨터로 보내져 운전자가 운전상태를 관측할 수 있도록 한다. 동시에, 1msec마다 위치, 속도 및 토크에 관한 정보가 두번째 RAM블록에 저장된다. 운전이 끝나면 RAM블록에 저장된 정보들이 상위 컴퓨터로 보내지게 되며, 상위 컴퓨터에서는 이 정보들을 처리하여 그래프 상태로 보여준다. 다음 절의 실험 결과는 이러한 과정을 통하여 얻어진 것이다.

전동기 구동부는 간접 자속기준 제어기와 전류 제어형 PWM인버터로 구성되어 있다. 빠른 전류 응답을 얻기 위하여 인버터의 스위칭 소자로 BI-MOS트랜지스터를 사용하였다. 유도 전동기는 3상, 220V, 2마력이며 부하로 직류 발전기와 저항기를 사용하였다.

전동기의 위치는 주제어기 외부에 설치된 16비트 업/다운 카운터를 이용하여 펄스발생기로부터 전달되는 펄스 수를 헤아림으로써 검출한다. 속도 측정엔 M/T방법을 사용하였으며, MCS8096내부에 장착된 HSI와 TIMER2를 이용하였다. 속도 측정 주기는 고속영역에서는 2msec까지 감소하며, 저속에서는 100msec까지 증가한다. 제어용 소프트웨어는 그림 6과 같이 여러개의 부 프로그램으로 나뉜다. 주 제어 루우프의 수행시간은 1msec이며,

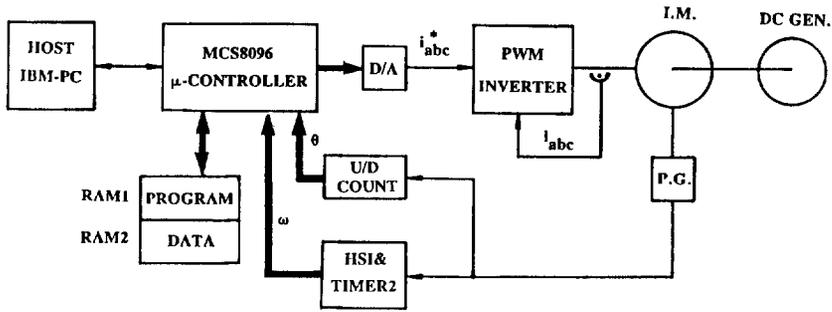


그림 5 실험 장치 구성
Fig. 5 Experimental System configuration.

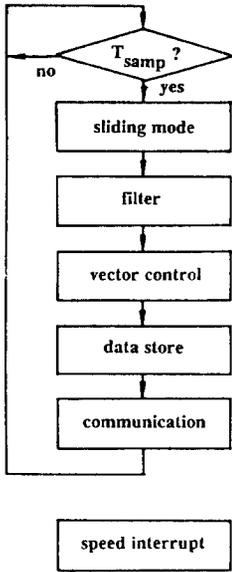


그림 6 제어 흐름도
Fig. 6 Control flowchart

속도 제한 프로그램은 전번 프로그램의 수행 후 2 msec가 경과한 다음 도달되는 첫번째 펄스에서 인터럽트에 의해 수행이 시작된다.

6. 실험결과 및 검토

실험은 필터가 없는 경우, 대역폭이 넓은 고정 필터의 경우, 대역폭이 좁은 고정필터의 경우, 가변필터의 경우의 네가지 경우에 대하여 행하였으며, 전류 맥동과 소음 감소에 대한 필터의 효과와 필터지연에 따른 과도응답 특성의 변화에 대하여 고찰하였다.

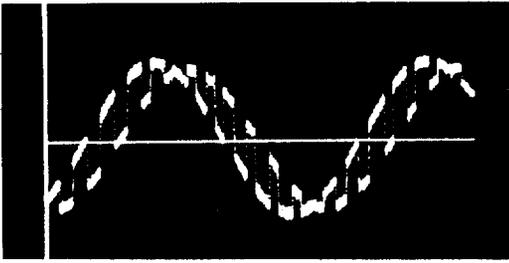
실험에 사용된 유도전동기의 상수값과 필터 파

라메터값 등은 부록과 같다.

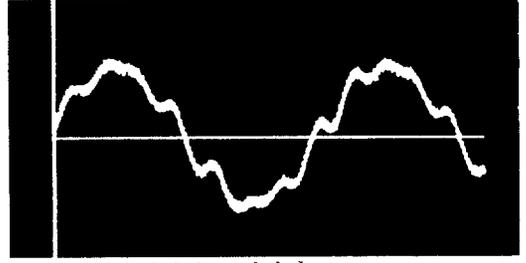
그림 7은 정상상태(정속 구간)에서의 전류 파형이다. 그림 (a)는 필터가 없는 경우로 전류 맥동이 크고 소음도 심하다. 그림 (b)와 그림 (c)로부터 필터의 대역폭이 좁아질수록 전류 파형이 매끄러워지는 것을 볼 수 있다. 그림(d)의 가변필터의 경우는 대역폭이 좁은 고정필터의 경우와 비슷하게 전류 고조와 성분이 적다. 위의 결과로부터 정상상태에서는 가변필터의 동작이 대역폭이 좁은 고정필터와 같음을 알 수 있다.

그림 8, 그림 9, 그림10은 과도상태에서의 특성시험 결과로 위상평면 상에서의 궤적과 토크, 속도의 변화를 보여주고 있다. 그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이 대역폭이 좁은 고정필터의 경우 전류 파형은 평활하게 되지만 필터의 지연효과에 의하여 과도상태 특성이 나빠지게 된다. "*"로 표시된 지점에서 부하 토오크가 갑자기 변했을 때 그림 (c)에서 볼 수 있는 바와 같이 기준궤적에서 크게 이탈되며, 기준궤적으로의 회복도 느리다. 그림 (d)의 가변필터의 경우는 그림 (a)나 그림 (b)의 경우와 마찬가지로 기준 궤적을 잘 추종하고 있다. 이것은 가변필터의 경우 토크 응답이 과도상태에서 빠름을 보여준다. 그림 9는 속도변화로 과도상태에서 속도변동이 가변필터의 경우는 작지만 좁은 대역폭을 갖는 고정필터의 경우는 커짐을 볼 수 있다. 그림 10은 기준 토크 T_{ref}^* 의 변화를 보여주고 있다. 필터가 없는 경우 토크 맥동 폭이 크며 고주파이다. 그러나 필터가 있는 경우는 맥동이 완만해지는 것을 볼 수 있다.

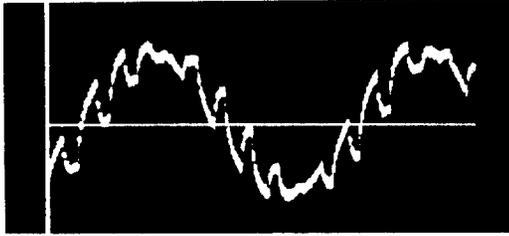
그림 10(c)의 경우 부하가 갑자기 변하는 순간의 토크 응답이 그림 10(a), (b), (c)보다 느리다. 저속으로 갈수록 토크 변화가 느려지는 것은 저속에서 속도 샘플링 간격, 즉 속도 제한 시간이 느려지기 때문이다.



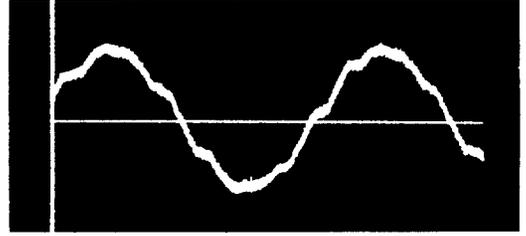
(a) 필터가 없는 경우
(a) without filter



(c) 저대역의 고정필터
(c) fixed filter with low cutoff freq.

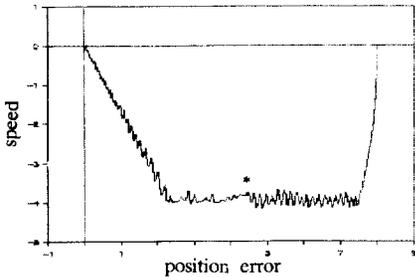


(b) 고대역의 고정필터
(b) fixed filter with high cutoff freq.

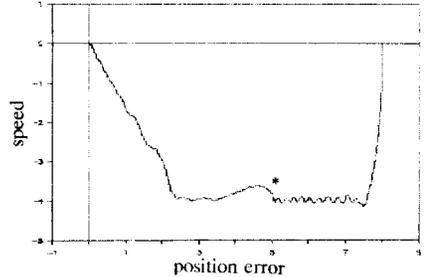


(d) 가변필터
(d) variable band-width filter

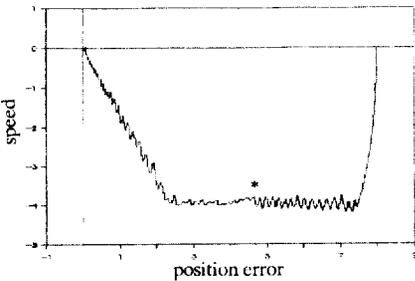
그림 7 정상상태에서의 전류파형
Fig. 7 Current waveforms in normal state



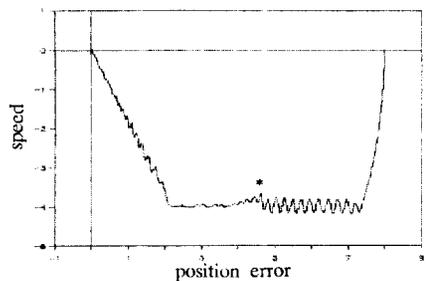
(a) 필터가 없는 경우
(a) without filter



(c) 저대역의 고정필터
(c) fixed filter with low cutoff freq.

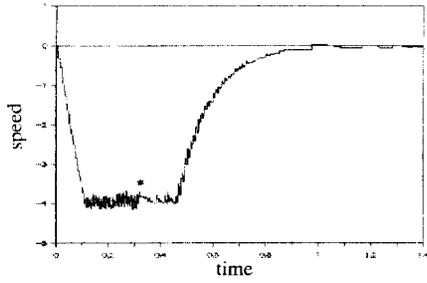


(b) 고대역의 고정필터
(b) fixed filter with high cutoff freq.

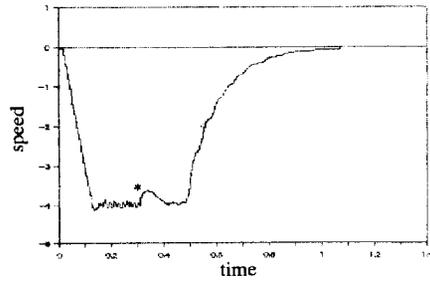


(d) 가변필터
(d) variable band with filter

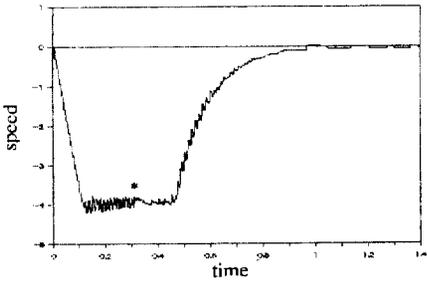
그림 8 과도상태에서의 위상평면 상의 궤적
Fig. 8 Trajectory on the phase-plane in transient state



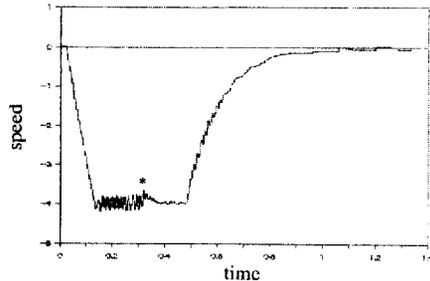
(a) 필터가 없는 경우
(a) without filter.



(c) 저대역의 고정필터
(c) fixed filter with low cutoff freq.

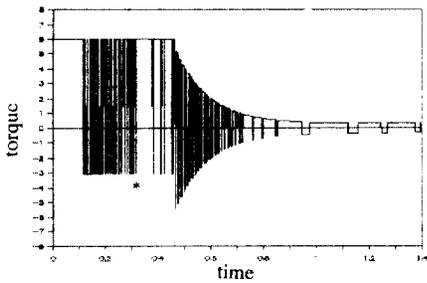


(b) 고대역의 고정필터
(b) fixed filter with high cutoff freq.

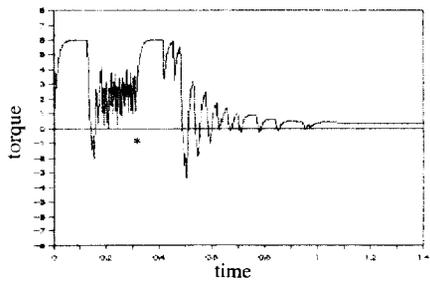


(d) 가변필터
(d) variable band with filter.

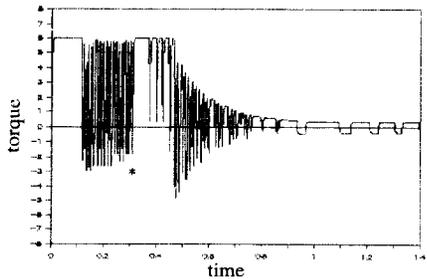
그림 9 과도상태에서의 속도 응답
Fig. 9 Speed Response in transient state



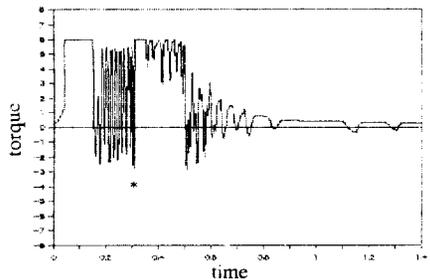
(a) 필터가 없는 경우
(a) without filter



(c) 저대역의 고정필터
(c) fixed filter with low cutoff freq.



(b) 고대역의 고정필터
(b) fixed filter with high cutoff freq.



(d) 가변필터
(d) variable band with filter.

그림 10 과도상태에서의 토크 응답
Fig. 10 Torque response in transient state.

7. 결 론

본 연구에서는 유도기 위치제어에 슬라이딩 모드 제어방법을 적용하였다. 슬라이딩 모드 제어에 의하여 발생하는 전류고조파나 토크 맥동, 소음 등을 줄이기 위하여 대역을 가변시킬 수 있는 저주파 필터를 도입하였다. 가변필터에 의하여 전류의 고조파 성분을 줄이면서도 시스템의 과도 응답 특성은 필터가 없는 경우와 마찬가지로 빠른 실험을 통하여 확인하였다.

속도제환을 위하여 사용한 M/T방법은 저속영역에서 샘플링 시간이 길어져 토크 응답이 느려지는 문제가 발생하므로 정밀한 제어를 위해 저속에서도 빠른 속도 측정방법이 요구된다.

가변필터가 도입된 슬라이딩 모드 제어기는 마이크로 프로세서에 의해 쉽게 구현될 수 있다. 본 연구에서는 마이크로 제어를 이용하여 전체 제어를 구현하였으며, 제안된 방법에 의하여 효과적으로 채터링 현상을 감소시킬 수 있었다.

부 록

1) 유도기 상수

정격 : 3ϕ , 220V, 2Hp

R_s : 1.1[Ω]

R_r : 1.2[Ω]

L_s : 102[mH]

L_r : 102[mH]

L_o : 98[mH]

J : 0.02[kg · m²]

B : 0.004[N · m · s/rad]

2) 필터 파라미터

넓은 대역폭의 고정필터 : $\omega_c = 1.25$ [KHz]

좁은 대역폭의 고정필터 : $\omega_c = 90$ [Hz]

3) 실험 조건

기준궤적 ; $C = 1.08$ [rad/rpm]

초기위치 ; $x_{10} = 4\pi$ [rad]

최대속도 ; $x_{20} = 400$ [rpm]

참 고 문 헌

[1] V.I. Utkin, "Variable Structure Systems with

Sliding Modes," IEEE Trans. Auto. Cont. vol. AC-22, no. 2, 1977.

- [2] K.K.D. Young, "Controller Design for a Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems," IEEE Trans. Sys. Man and Cybern., vol. SMC-8, no. 2, 1978.
- [3] A.S.I. Zinober, O.M.E. El-Ghezawi and S.A. Billings, "Multivariable Variable Structure Adaptive Model Following Control System," IEEE Proc. vol. 129, pt. D, vol. 1, 1982.
- [4] F. Harashima, H. Hashimoto and S. Kondo, "MOSFET Converter-Fed Position Servo System with Sliding Mode Control," IEEE Trans. Ind. Elec., vol. IE-32, no. 3, 1985.
- [5] C. Namuduri and 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.
- [6] D. Borojevic and L. Graces, "Soft Variable Structure Control for DC Motor Speed Regulation," IEEE Ind. Appl. Soc. Conf. Record, 1984.
- [7] L.B. Wee, K.W. Lim, T.S. Lew and M.F. Rahman "A Variable Structure Strategy for Motion Control," IEEE Proceedings of IECON' 87.
- [8] H. Hashimoto, K. Maruyama and F. Harashima "A Microprocessor Based Robot Manipulator Control with Sliding Mode," IEEE Trans. Ind. Elec. vol. IE-34, 1987.
- [9] G. Ambrosino, G. Celentano and F. Garafalo "Variable Structure Model Reference Adaptive Control Systems," Int. J. Control, vol. 39, no. 6, 1984.
- [10] T. Ohmae, T. Matsuda, K. Kamigawa and M. Tachikawa, "A Microprocessor Controlled High Accuracy Wide-Range Speed Regulator for Motor Drives," IEEE Trans. Ind. Elec., vol. IE-29, no. 3, 1982.