

## 가동자석형 LDM의 고속 위치제어에 관한 연구

백수현\*, 김용\*\*, 함중걸\*\*\*, 이준철\*

\* 동국대학교 \*\* 대림전문대학 \*\*\* 생산기술연구원

### High Speed Position Control of MM Type LDM

S. H. Baek\*, Y. Kim\*\*, J. G. Ham\*\*\*, J. C. Lee\*

\*Dongguk Univ. \*\* Dae Rim Junior College \*\*\* KAITECH

#### Abstract

In this paper, to realize high speed position control of LDM (Linear DC Motor), the minimum time control method is applied. But, In this control method, calculation of non-linear function is required. Therefore, in order to avoid this complex calculation, optimum switching of the Bang-Bang control is done on parabola type switching function established in the plane of phase.

But, the sliding mode is occurred due to the modeling error of LDM and the variation of parameters. Thereby, the optimum control is not realized. In order to realize optimum control, the algorithm to modify switching function is proposed.

#### 1. 서론

오늘날 로봇트를 포함한 FA 기기, OA 기기, 정보기기도 직선력을 필요로 하는 분야에 있어서 선형전동기(Linear Motor)의 이용이 점차 증가 하는 추세에 있다.

선형전동기의 종류로는 선형유도전동기(Li-near Induction Motor, LIM)와 선형동기전동기(Linear Synchronous Motor, LSM), 선형직류전동기(Linear DC Motor, LDM), 선형펄스전동기(Linear Pulse Motor, LPM)등이 있으며, 이중 선형직류전동기는 가동전자석형(Moving Armature Type, MA)과 가동자석형(Moving Magnet Type, MM), 그리고 가동코일형(Moving Coil Type, MC)등으로 구분된다.

본 논문에서는 가동자석형 LDM을 대상으로 고속의 위치제어방식에 대하여 고찰하고자 한다. LDM을 고속으로 이동시키기 위한 제어방식으로 최단시간 제어이론을 적용하고자 하며, 이의 실현에는 일반적으로 비선형에 대한 계산이 수반되므로 이에 대한 계산을 피하기 위해 위상면상에 포물선형 스위칭 함수를 설정함으로써 보다 간단한 구성으로 최단시간 제어를 실현하고자 한다.

그러나 실제 시스템에서는 모델링 과정에서의 오차와 파라미터 변동등으로 슬라이딩 모드가 발생하게 되므로 이 구간을 줄이기 위해 위상면상의 스위칭 함수를 반복적으로 수정하여 최단시간 제어를 실현하여야 하며, 본 연구에서는 이와같은 방식의 제어계를 구성하여 실험을 통해 타당성을 확인하고자 한다.

#### 2. LDM의 위치 결정 제어기 설계

식(1)과 식(2)는 LDM에 대한 전기-기계 결합계의 동특성을 나타

낸다.

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + K_E v \quad (1)$$

$$f = K_F i = M \frac{dv}{dt} + Dv \quad (2)$$

여기서,  $v = \frac{dx}{dt}$ ,  $x$ 는 변위,

$u$ : 입력전압  $R$ : 고정자 코일의 저항

$i$ : 전류  $L$ : 고정자 코일의 인덕턴스

$K_E$ : 역기전력 상수  $v$ : 속도

$f$ : 발생추력  $K_F$ : 추력상수

$M$ : 가동자의 질량  $D$ : 점성마찰계수

여기서 전기적 시정수( $\frac{L}{R}$ )를 무시하고 점성마찰계수  $D=0$ 이라

가정한다.

#### 2.1 최단시간 제어

$x_1$ 를 거리변차,  $x_2$ 를 속도라 하고 LDM을 2차계라 가정하면, LDM의 동특성은 식(3)과 식(4)와 같은 상태방정식으로 표현될 수 있다.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{T} x_2 + \frac{K}{T} u \quad (4)$$

여기서,  $T = \frac{RM}{K_E K_F}$ ,  $K = \frac{1}{K_E}$  이다.

제어대상이 초기상태( $x_1 = x_{10}$ ,  $x_2 = 0$ )에서 최종상태( $x_1 = x_2 = 0$ )까지 최단시간내에 도달하도록 제어입력을 구하기 위해 최대원리를 적용하면, 최단시간 제어  $u^*$ 는 그림2.1과 같이 뱀병제어로 나타나게 되므로 최적전환시점( $t = t_1$ )이 결정되어야 한다. 이 경우

$|u^*| \leq E_0$  을 만족해야 된다.

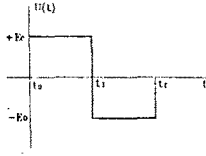


그림 2.1 병행제어

따라서 제어대상에 대한 위상면상의 궤도방정식이 요구되며, 궤도 방정식은 다음과 같이 초기거리편차  $x_{10}$  에 따라 구해진다.

제 1구간( $0 \leq t \leq t_1$ )의 경우 위상면상의 궤도방정식을 구하면 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_1 = x_{10} - KE_0 T \ln(1 - \frac{x_2}{KE_0}) - Tx_2 \quad (5)$$

한편, 제 2구간( $t_1 \leq t < t_2$ )의 경우 위상면상의 궤도방정식은 식(6)과 같이 구해진다.

$$x_1 = g_1(x_2) \\ = KE_0 T \ln(1 + \frac{x_2}{KE_0}) - Tx_2 \quad (6)$$

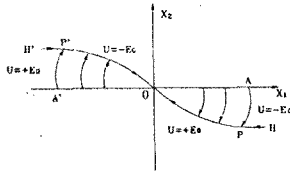


그림 2.2 위상면상의 궤적

그림2.2는 서로 다른 조건의 초기상태로부터 출발된 경우의 위상면상의 궤도를 나타낸다.

## 2.2 포물선형 스위칭 함수에 의한 최단시간 제어

비선형함수에 대한 계산은 매우 복잡하므로 이를 지양하고 보다 간편하게 최단시간 제어를 실현하기 위해 본 절에서는 포물선형 스위칭 함수에 의한 최단시간 제어법을 제안한다.

이를 위해 위상면상의 원점 O 및 점 P'를 통과하는 포물선형 스위칭 함수를 식(7)과 같이 설정하며 식(8)과 식(9)를 조좌량으로 한다.

$$g(x_1, x_2) = Cx_1(x_1 + \epsilon) + x_2 = 0 \quad (7)$$

$$g = Cx_1(x_1 + \epsilon) + x_2 > 0 : u = -E_0 \quad (8)$$

$$g = Cx_1(x_1 + \epsilon) + x_2 \leq 0 : u = +E_0 \quad (9)$$

여기서  $\epsilon > |x_{10}|$  으로 설정한다. 위상면상에 설정한 스위칭 함수의 C값을 결정하기 위해서 전환점의 좌표  $P'(x_{1p}, x_{2p})$ 을 구하면 식(10)과 식(11)로 나타낼 수 있다.

$$x_{1p} = KE_0 T \left[ \ln(1 + (1 - e^{-\frac{x_{10}}{KE_0 T}})^{\frac{1}{2}}) - (1 - e^{-\frac{x_{10}}{KE_0 T}})^{\frac{1}{2}} \right] \quad (10)$$

$$x_{2p} = \pm KE_0 (1 - e^{-\frac{x_{10}}{KE_0 T}})^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

따라서 포물선형 스위칭 함수의 C는 위의 전환점으로 부터 구해지며 초기거리편차  $x_{10}$  의 함수로서 식(12)와 같이 표현될 수 있다.

$$C = -\frac{x_{2p}}{x_{1p}(x_{1p} + \epsilon)} \quad (12)$$

## 3. 슬라이딩 모드의 발생과 포물선형

### 스위칭 함수의 선정

#### 3.1 슬라이딩 모드의 발생

제어대상의 모델링과정에서 발생하는 오차와 파라미터 변동등이 존재하게 되므로 실제 시스템에서는 슬라이딩 모드구간에서 체터링 현상이 나타나며 그 결과 시스템의 불안과 제어의 부정확성등과 같은 문제점이 발생하게 된다. 그림3.1은 슬라이딩 모드구간에서 체터링 현상이 발생하는 제어대상의 궤적을 나타낸다.

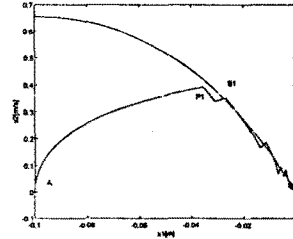


그림 3.1 슬라이딩 모드의 발생

#### 3.2 포물선형 스위칭 함수의 수정

슬라이딩 모드구간을 제거 하기 위하여 스위칭 함수를 반복해서 수정하여야 한다. 이를 위한 수정 알고리즘은 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{i+1} = C_i - m \cdot x_{qi} \quad (13)$$

여기서,

$i$  : 실험횟수 ( $i = 1, 2, 3 \dots$ )

$m$  : C의 수정계수 ( $m > 0$ )

$x_{qi}$  :  $B_1$ 에서의  $x_1$  값

## 4. 실험장치의 구성

그림4.1은 실험을 위해서 구성된 전 시스템의 블록도를 나타낸 것으로 구동부, 인코더 신호처리부, 그리고 제어부등 크게 3부분으로 분류된다.

이중 제어부는 인터페이스회로를 통해서 입력되는 LDM의 정보를 처리하는 역할을 하며 IBM PC-486이 이용되었다. 그리고 인코더 신호처리부는 LDM에 부착되어 있는 인코더에서 검출된 신호를 위치와 속도로 변환시켜, 이를 인터페이스회로를 통해서 주 컴퓨터에 전송한다. 또한 구동부는 주 컴퓨터에서 처리된 제어입력으로 구동 회로를 통해서 LDM을 구동시키게 된다.

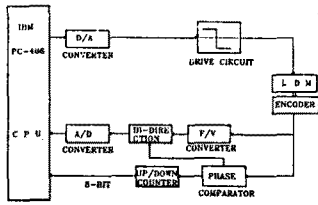


그림 4.1 전체적인 시스템의 블록도

## 5. 시뮬레이션 및 실험결과

본 연구에서 제안된 제어법을 적용하여 LDM에 대한 시뮬레이션을 행하였으며, 또한 시뮬레이션에 이용된 LDM의 파라미터값은 제어입력 8V, 가동자의 질량  $M = 0.2\text{kg}$ , 코일의 저항  $R = 40.18\Omega$ , 그리고 초기거리편차  $x_{10} = 100\text{[mm]}$ 이다.

그림5.1과 그림5.2는 시뮬레이션 결과로서 그림5.1은 LDM 가동자를 100[mm] 이동시킨 경우의 상태궤적을 나타내며 그림5.2는 제어입력, 이동 위치, 이동 속도등을 나타낸 것이다.

그림5.3과 그림5.4는 실험결과로서 그림5.3은 모델링 오차등으로 인한 슬라이딩 모드구간에서의 채터링 현상이 나타나서 최단시간 제어가 실현되지 않음을 알 수 있다.

그림5.4는 수정된 스위칭 함수에 의한 제어입력과 이동 위치, 그리고 속도를 시간함수로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 제어입력은 1회 전환되며, 위치와 속도의 경우에도 곡선의 왜곡이 제거되었다.

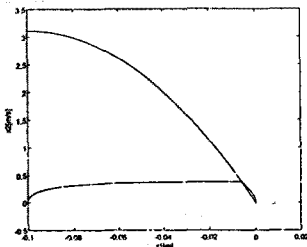


그림 5.1 스위칭 함수에 의한 상태궤적

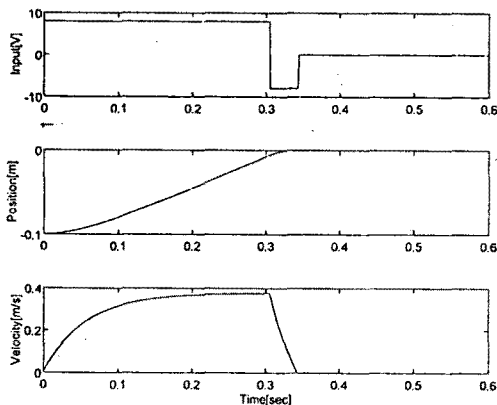


그림 5.2 스위칭 함수에 의한 제어입력, 위치, 속도

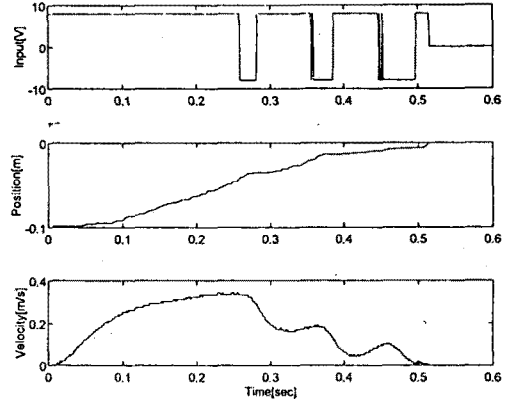


그림 5.3 수정전의 스위칭 함수에 의한 제어입력, 위치, 속도

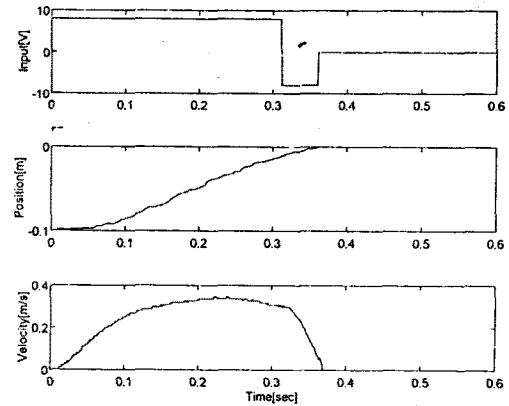


그림 5.4 수정된 스위칭 함수에 의한 제어입력, 위치, 속도

## 6. 결론

본 논문에서는 가동자성형 LDM을 제어대상으로 한 고속 위치제어 방식에 대해 고찰하였다. 고속의 위치제어를 실현하기 위해서 위상면상에 설정한 스위칭 함수상에서 병행제어의 최적궤환을 행하였다. 그러나 시스템의 모델링 오차와 파라미터의 변동등으로 인하여 슬라이딩 모드가 발생되며, 이 구간에서는 경우에 따라 채터링 현상이 발생하게 된다. 따라서 최단시간 제어를 실현하기 위해서는 이와 같은 현상을 저감시켜야 하며, 이를 위해 위상면상의 스위칭 함수를 적용적으로 변화시킨다.

본 논문에서 제안한 스위칭 함수의 수정에 의한 고속 위치제어방식은 실험을 통해 타당성이 확인되었으며, 일반적인 고속 위치제어에 적용하는 경우 매우 유효할 것으로 생각된다.

## 참고 문헌

- [1]白木 學, 官尾 修美, Linear Servo Motor와 시스템 설계, 綜合電子 出版社, 1986.
- [2]Andrew P. Sage, Chelsea C. White, Optimum Systems Control, Prentice-Hall, pp.327-351, 1977.
- [3]Min Ho Park, Chung Yeun Won, "Time Optimal Control for Induction Motor Servo System", IEEE Trans Power Electronics, Vol.6, No.3, pp.514-524, July 1991.