

반송용 리니어 DC 모터의 듀얼모드 위치제어에 관한 연구

임달호*, 윤상백*, 이우균* °
한양대학교 전기공학과*

A study on the Dual mode Control of Linear DC motor for Carrier

Dal-Ho Im*, Sang-Baek Yoon*, Woo-Gyun Lee**
Han Yang Univ, Electrical Eng.*

Abstract - This paper describes the dual mode control of the LDM(Linear DC motor) for carrier. The dual mode control consists of seek and analogue control. In seek mode, LDM is moved in the shortest time by switching line, and in analogue mode keeps at origion with high accuracy. We proposed different switching line method according to driving direction.

1. 서론

LDM은 그 특성곡선상에서 추력대 입력전류 및 추력대 속도의 직선성을 갖고 있으며 시정수가 작아서 보특성이 우수하여 최근 고속 동작을 필요로 하는 로봇트, X-Y 구동장치, 정밀조립기계, PCB조립공정 등의 정밀 자동장치등에 사용되고 있다[1]. 이에 따른 고속이며 고정밀의 위치제어에 대한 요구가 높아지고 있는데 이러한 제어방법에 있어서 듀얼모드 위치제어 방식이 제안되어 있다[2]. 듀얼모드는 먼저 LDM을 최단시간에 고속으로 이동시키기 위한 시크제어모드와 그 후 LDM을 목표위치에 정확히 위치하게 하기 위한 아날로그제어모드로 구성된다. 제1모드인 시크 제어모드에서는 고속응답특성을 얻기 위해 슬라이딩 모드구간을 최소화하는 Switching line 제어법을 사용하고 제2모드인 아날로그제어모드에서는 선형 피드백 제어법을 사용한다.

그러나 참고문헌[2]의 경우는 부하변동이 없는 경우에만 나타내어 부하가 변화하는 상황에서는 부하변동에 따라 슬라이딩모드영역이 줄어들고 수정회수가 증가하여 제어특성이 저하되므로 새로운 제어방식이 필요하다.

본 논문에서는 기존의 단일 Switching line 제어방식에 따른 응답특성을 부하변동분에 따라 비교 분석하였으며, 반송용 LDM의 정·역운전에 있어서 각각의 Switching line의 기울기를 산정하는 제어방법을 제시하였다.

2. LDM의 시스템 방정식과 듀얼모드 구동시스템

제어대상으로는 본 연구실에서 보유하고 있는 무철심형 브러시리스 MM형 LDM으로써 그 사양은 표 1과 같다.

표 1 MM형 LDM의 사양

전기자저항	20 [Ω]
입력전압	7.5 [V]
역기전압상수	5.12 [V·s/m]
가동자질량	0.85 [kg]
힘상수	5.8 [N/A]

전기-기계 결합계로서 LDM의 동특성은 다음과 같은 회로방정식과 운동방정식으로 표현된다.

$$\text{회로방정식 } e(t) = R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + K_E v(t) \quad (1)$$

$$\text{운동방정식 } f(t) = K_f i(t) = M \frac{dv(t)}{dt} + Dv(t) \quad (2)$$

R : 전기자 저항 e : 입력 전압 L : 전기자 권선 인덕턴스
 i : 전류 f : 추력 M : 가동자 및 부하 질량
 v : 속도 D : 점성 마찰 계수 K_f : 추력 상수
 K_E : 역기전압 상수

본 논문에서는 무철심형을 채용하였으므로 전기자 권선 인덕턴스는 매우 작아 무시할 수 있으며 리니어 베어링의 마찰력을 무시하면 LDM의 동특성은 식 (1),(2)로부터 그림 1과 같이 2차계로 간략화된다.

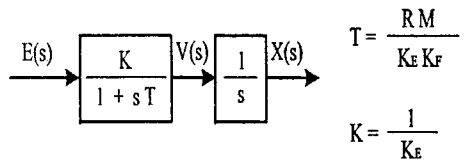


그림 1 간략화한 LDM 블럭도

여기서 T 는 LDM의 기계적 시정수이다.

2.1 시크모드

가동자의 질량을 M_c , 가동자위에 놓인 부하의 질량을 M_{Load} 라고 하고 상태변수를 다음과 같이 x_1 을 실제위치와 위치명령치와의 위치편차로 하고, x_2 를 LDM의 속도로 한다. 그림 1로부터 상태방정식은 식(3),(4)와 같다[2][3].

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

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

여기서, u 는 입력전압을 나타내며, T_s 를 부하가 없을 경우의 시정수, T_l 를 부하가 있을 경우의 시정수, x_{10} 를 초기위치편차로 놓고, 부하가 없는 경우를 검토한다. 상태방정식 식(3),(4)와 상태조건 (초기조건: $x_1 = -x_{10}$, $x_2 = 0$ 최종조건: $x_1 = 0$, $x_2 = 0$) 으로부터 그림 2와 같은 상태궤적을 얻을 수 있으며, 이 위상평면상에 설정된 Switching line 상에서 입력전압을 절환하게 되고, 이때의 Switching line은 식(5)로서 주어진다.

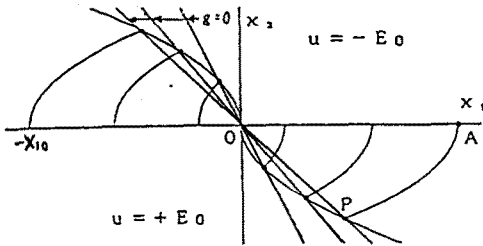


그림2 위상면상의 Switching Line

$$g(x_1, x_2) = x_1 + C_s x_2 = 0 \quad (5)$$

따라서 위 식을 Switching line으로 하여

$$g(x_1, x_2) = x_1 + C_s x_2 > 0 \quad \text{일때} \quad u = -E_0 \quad (6)$$

$$g(x_1, x_2) = x_1 + C_s x_2 \leq 0 \quad \text{일때} \quad u = +E_0 \quad (7)$$

로 되며 기술기에 해당하는 C_s 값은 시크모드의 속도 피드백 계수에 해당되고, 초기위치편차의 절대값에 따라 미리 계산되며 식(8)과 같이 계산된다[2].

$$C_s = T_s \left| 1 - \frac{\ln \left(1 + \left(1 - \exp \left(-\frac{|x_{10}|}{KE_0 T_s} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \right)}{\left(1 - \exp \left(-\frac{|x_{10}|}{KE_0 T_s} \right) \right)^{\frac{1}{2}}} \right| \quad (8)$$

위 식을 이용하여 부하가 없을 경우의 응답특성은 그림 3에 나타내었다

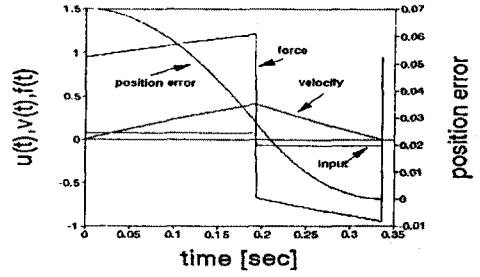


그림 3 부하가 없을 경우의 응답특성

마찬가지로 부하가 있는 경우의 응답특성과 위상면상의 궤적은 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

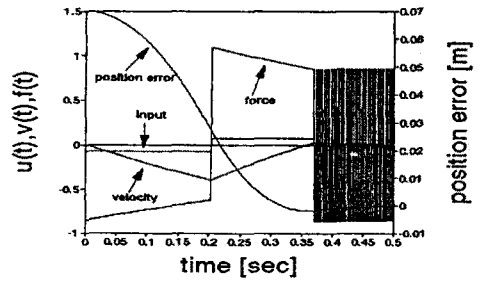


그림 4 부하가 있는 경우의 응답특성

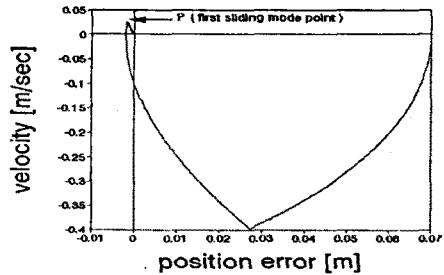


그림 5 부하가 있는 경우의 위상면상의 궤적

그림 3, 4, 5에서 알 수 있는 바와 같이 부하가 있는 경우는 부하가 없는 경우의 C_s 값에 의해 입력전압이 절환되므로 한 번에 원점에 도달하지 못하고 슬라이딩 모드가 발생되어 정정시간이 길어지고 채터링을 발생함을 알 수 있다[4]. 따라서 부하가 있는 경우는 새로운 Switching line의 기술기 C_s 를 구하여야 하며, 그림 5의 P점의 x_1 의 값을 x_{sp} 라고 하면 다음과 같은 방법으로 식(9)와 식(10)과 같이 반복수정할 수 있다.

$x_{10} > 0$ 인 경우는,

$$C_{i,i+1} = C_{i,i} - m x_{spi} \quad (9)$$

$x_{10} < 0$ 인 경우는,

$$C_{i,i+1} = C_{i,i} + m x_{spi} \quad (10)$$

여기서 m 은 가속계수이며 $m > 0$ 이다. 이 수정에 의하여 $x_{\varphi} = 0$ 이 될때 시크제어모드에서의 1회 절환에 의한 그림 6과 같은 응답특성을 얻을 수 있다.

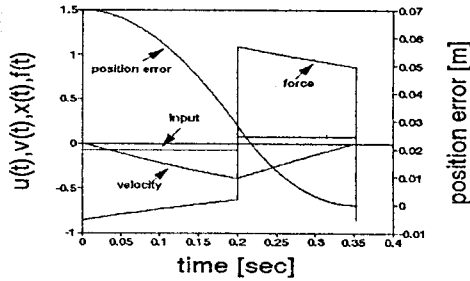


그림 6 부하가 있는 경우의 반복수정에 의한 응답특성

2.2 아날로그 모드

가동자가 목표위치에 접근하면 아날로그모드로 절환되며, 이 모드에서는 거리편차에 비례하는 입력전압으로 아날로그위치제어를 하게되며 본 연구에서의 아날로그모드영역은 초기위치편차의 1% 이내로 하였다.

3. 부하 변동에 의한 응답특성 해석

단일 Switching line의 고정된 기울기 C_s 값만으로 부하가 변동시의 최단시간제어가 이루어지는 경우의 한계성을 고찰하기 위하여 다음과 같이 부하가 있는 경우의 시정수 T_t 와 부하가 없는 경우의 시정수 T_s 의 비로 정규화하여 이에 따른 슬라이딩모드영역과 Switching line의 기울기를 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 여기서 $n = \frac{T_t}{T_s}$ 이고 그림 7의 슬라이딩 영역은 식(11)과 같다.

$$S < \frac{T_t (K_t E_0 C_s)^2}{2 (T_t - C_s)^2} \quad (11)$$

그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 부하가 증가함에 따라 슬라이딩모드의 영역이 기하급수적으로 작아지고 이에 따른 엔코더의 분해능의 한계에 의하여 어느 값 이상에서는 제어가 불가능함을 알 수 있다. 그림 8.에서 나타낸 바와 같이 수정회수가 증가하여 제어특성이 저하됨을 알 수 있다.

따라서 부하변동시에는 일정부하만을 대상으로 한 제어방식으로는 한계가 있으므로 부하 유무에 따른 새로운 제어방식이 필요함을 알 수 있다. 그러므로 본 논문에서 제시한 부품삽입공정과 같은 반송용 시스템에서는 정·역운전에 있어서 각각의 질량분에 해당하는 Switching line의 기울기를 산정하는 제어방법을 채택하여야 함을 알 수 있다.

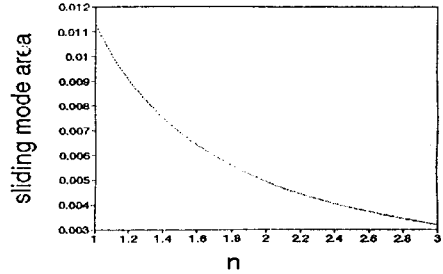


그림 7 정규화된 n 값에 따른 슬라이딩모드 존재영역

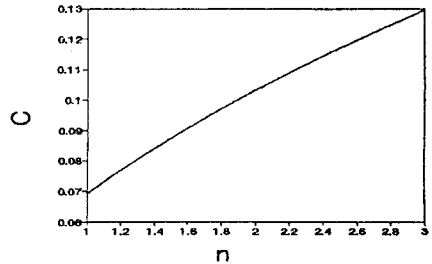


그림 8 정규화된 n 값에 따른 스위칭 직선기울기

4. 결론

본 논문에서는 반송용 LDM을 듀얼모드로 구동하였을 시의 부하유무에 따른 단일 Switching line 제어방식의 한계성을 규명하여 정·역운전에 따른 Switching line의 기울기를 산정하는 제어방식으로 최적의 운전상태를 얻기위한 방안을 제시하였다. 본 방식을 다공정용 반송시스템에 적용한다면 매우 유용할 것으로 사료된다.

参考文献

- [1] 白木 學, 官尾 修美, "圖解 リニアサーボモータとシステム設計", 総合電子出版社, 1985
- [2] 鮫島, 竹田, 笹木, 三浦 "リニア直流モータのデュアルモード高速位置決め制御について", 計測自動制御學會論文集 Vol.25, No.11, 1202/1209, 1989
- [3] "リニア直流モータの解析法", 日本電氣學會技術報告(2部)第 440, 1992
- [4] V.I.Utkin, "Variable structure systems with sliding modes", IEEE Trans. Automatic Control, AC-22-2, 212/222 (1985)