

외란에 강인한 I-PD제어에 의한 LDM의 동특성 개선

김상원\*, 백수현\*, 윤신용\*, 명노용\*, 장홍순\*\*  
 \*동국대학교 전기공학과, \*\*중소기업청

Improvement of Dynamic Characteristic of LDM by Using I-PD Algorithm

S.W.Kim\*, S.H.Baek\*, S.Y.Yoon\*, N.Y.Myung\*, H.S.Chang\*\*  
 \*Dongguk University, \*\*S.M.B.A

**Abstract** - In this paper, the I-PD control algorithm using the coefficient diagram method(CDM) controller design of the Linear DC Motor(LDM) is presented.

Recently LDM has been used to obtain the fine results of the dynamic characteristic for straightly moving condition. The I-PD control algorithm has a robust response to force disturbance.

The effectiveness of I-PD is shown by simulations and comparison with PID.

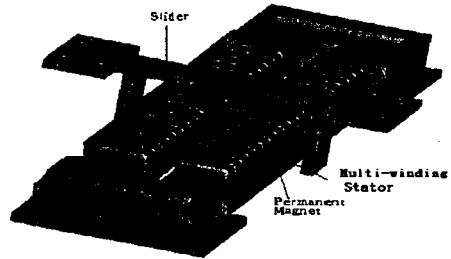


그림 1. 다권선 이중여자 LDM

1. 서 론

최근 산업기술의 급속한 발전으로 종래의 단순 반복을 위주로 한 노동집약적 생산방식에서 자동화기법을 이용한 생산방식의 도입이 확대되고 있는 실정이다. 이와 같이 균일한 제품을 다량으로 생산할 수 있게 됨에 따라 기술 집약적인 생산기술의 중요성이 점차 증대되고 있다.

이에 따라 현대 사회의 다양한 분야에서 이용되고 있는 기기들도 점차 고도의 정밀성을 유지하면서 우수한 응답특성을 갖기 위해 여러 종류의 제어기법이 사용되고 있으며, 이 중에서도 핵심요소로 사용되고 있는 서보모터 또한 여러 방법으로 그 성능개선을 위해 활발히 연구되고 있다.[1][2]

특히, 서보모터가 우수한 성능을 갖기 위해서는 정밀성, 고속화 및 소형화 등을 고루 갖추어야 한다. 그러나, 지금까지 선형운동을 필요로 하는 곳에서 회전형 서보모터를 사용하여 회전축의 회전 운동을 직선운동으로 변환하는 운동방향 변환기구를 부착함으로써 정밀성, 고속화, 소형경량화 진동억제 등의 한계점을 가지고 있다.[3]

이와 같은 회전형 서보모터에 운동 변화기구를 부착하여 직선운동을 얻는 기구의 한계점을 극복할 수 있는 방법으로 전원에서 직접 직선운동을 발생시킬 수 있는 리니어 모터(Linear Motor)의 이용이 촉구되고 있다.

이 중 가동자석형 LDM의 구조가 간단하면서도 추력대 질량비가 커, 고속운전이 가능한 장점을 이용하여 정추력을 유지하면서 응답속도가 빠른 가동자석형 LDM의 속성성의 개선에 대해 연구하고자 한다.[4]

본 논문에서는 기존의 PID 제어방식과 I-PD 제어방식을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 비교·분석하고, 기존의 방식에 비해 개선된 제어 특성을 보이고자 한다.[5][6]

2. 본 론

2.1 배경이론

리니어 모터의 일종인 LDM은 가동부의 종류에 따라 가동코일형(Moving Coil Type, MC)과 가동자석형(Moving Magnet Type, MM)으로 분류할 수 있다.

그림 1은 본 논문에서 제어 대상으로 사용된 다권선 양측여자형 LDM의 개략적인 형상을 나타낸 그림이며, 나머지 가동자의 사양은 표 1에 나타내었다.

이중 가동자석형 LDM은 가동부를 영구자석으로 대체하여 사용함으로써 전력 공급시 발생되는 동손에 의한 발열현상이 없으며, 특히 가동부의 자석을 강자성체로 사용할 경우 공극이 큰 구조에서도 높은 자속밀도를 얻을 수 있으므로 슬롯리스(slotless) 전기자를 사용할 수 있는 장점이 있다.

표 1. 가동자 사양

$B_{sat}$	$B_m$	$B_r$	$t_c$	$w_m$	$l_{gm}$	$V_s$	$V_{so}$
1.59	1.32	1.219	24	27.6	20.8	22787	16163
[T]	[T]	[T]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm <sup>3</sup> ]	[mm <sup>3</sup> ]

개선된 다권선형은 고정자 철심 각각에 독립된 14개의 권선으로 구성하였고, 각 권선에 여자전류를 독립적으로 인가함으로써 가동자가 움직이게 된다.

LDM의 고속 응답성을 해석하기 위해서는 전기-기계 결합식으로부터 전압방정식과 기계적 방정식의 과도상태에서의 동특성을 고려하여야 한다. 동특성 해석을 위한 전압방정식과 기계방정식은 다음과 같다.

$$V = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + k_e v(t) \tag{2.1}$$

$$F = k_f i(t) = M \frac{dv(t)}{dt} + Dv(t) \tag{2.2}$$

여기서,  $R$  : 고정자 저항 [ $\Omega$ ]  
 $k_e$  : 역기전력 정수 [ $V/(m/s)$ ]  
 $v$  : 가동자 이동속도 [ $m/s$ ]  
 $F$  : 추력 [ $N \cdot m$ ]  
 $M$  : 가동자의 질량 [ $kg$ ]

$D$  : 점성 마찰계수  
 $k_f$  : 추력정수 (=  $NIB$ ) [ $N/A$ ]

점성 마찰계수  $D$ 는 고정자 저항  $R[\Omega]$ 에 비해 매우 작으므로 무시하면, 식(2.1)과 식(2.2)로부터 식(2.3)을 구할 수 있다.

$$T_e T_m \frac{d^2 v(t)}{dt^2} + T_m \frac{dv(t)}{dt} + v(t) = \frac{V}{k_e} \quad (2.3)$$

여기서, 기계적시정수  $T_m = \frac{MR}{k_f k_e}$  (2.4)

전기적시정수  $T_e = \frac{L}{R}$  (2.5)

$k_e$  : 역기전력정수,  $k_f$  : 추력정수

식(2.4)로부터 LDM의 기계적 시정수는 가동자의 질량  $M$ , 전기적 시정수는 식(2.5)로부터 고정자 코일의 인덕턴스  $L$ 과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

초기속도  $v(t=0)$ 를 0으로 하여 식(2.3)의 미분방정식을 풀면, 식(2.6)과 식(2.7)과 같이 시간에 따른 가동자의 속도  $v(t)$ 와 전류  $i(t)$ 를 구할 수 있다.

$$v(t) = \frac{V}{k_e} (1 - e^{-\frac{t}{T_m}}) \quad (2.6)$$

$$i(t) = \frac{V}{R} (1 - e^{-\frac{t}{T_e}}) \quad (2.7)$$

속도  $v(t)$  및 전류  $i(t)$ 가 최종치의 63.2%에 도달할 때까지를 의미한다.

## 2.2 응답특성 해석

여자코일의 턴수를  $N$ 이라 하면,  $N$ 은 식(2.8)로 구할 수 있다.

$$N = \frac{\zeta A_c}{\pi (\frac{d}{2})^2} \quad (2.8)$$

여기서,  $\zeta$  : 코일 점적률

$A_c$  : 코일의 단면적 [ $m^2$ ]

또한, 코일 단면적  $A_c$ 는

$A_c = \pi (\frac{d}{2})^2$ 이므로, 코일의 저항  $R_c$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_c &= \rho \frac{l_c}{A_c} \\ &= \rho N \frac{l_c}{\pi (\frac{d}{2})^2} \end{aligned} \quad (2.9)$$

식(2.9)에 식(2.8)의 코일 턴수  $N$ 과 코일의 분할 권선수  $z_c$ 를 대입하면 다음과 같다.

$$R_c = \frac{\rho \zeta l_c A_c}{\pi^2 (\frac{d}{2})^4} z_c \quad (2.10)$$

여기서,  $\rho$  : 저항률

$l_c$  : 코일 1층의 평균길이 [ $m$ ]

$z_c$  : 분할 권선수

따라서, 기계적 시정수와 전기적 시정수에 식(2.8)과 식(2.10)을 대입하면, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_m &= \frac{MR}{(NIB)^2} \\ &= \frac{M \rho l_c}{\zeta A_c l^2 B^2} z_c \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{L}{R} \\ &= \frac{L}{\pi^2 (\frac{d}{2})^4} z_c \end{aligned} \quad (2.12)$$

## 2.3 CDM을 이용한 제어기 설계

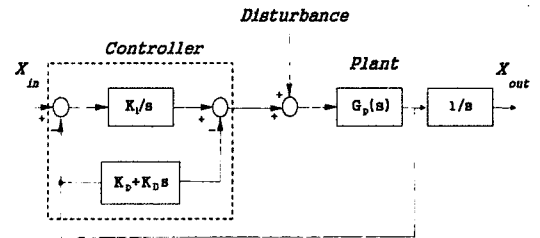


그림 2. I-PD 제어기의 블록도

CDM을 사용하여 제어 파라미터를 구하는 기본공식은 다음과 같다.

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{(a_{i-1} a_{i+1})} \quad (2.13)$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (2.14)$$

플랜트가 되는 LDM의 특성방정식과 전체 시스템의 전달함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P(s) = \sum_{i=0}^n a_i s^i \quad (2.15)$$

$$\frac{X_{out}}{X_{in}} = \frac{G_p(s) K_i}{(T_d + K_D G_p(s)) s^2 + (1 + K_P G_p(s)) s + K_I G_p(s)} \quad (2.16)$$

여기서, 특성방정식과  $\gamma_i$ 와  $\tau$ 의 값,  $\gamma_1 = 2.5$ ,  $\gamma_2 = \gamma_3 = 2$ ,  $\tau = 2.3$ 을 이용하여 제어기의  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_D$ 값을 구할 수 있다.

## 2.4 Simulations

표 2는 본 논문에서 수행한 시뮬레이션을 위한 동특성 파라미터 사양을 나타낸다.

표 2. 동특성 해석을 위한 파라미터

파라미터(Parameters)	값(Values)
$V$	60 [V]
$R$	1.7 [ $\Omega$ ]
$L$	0.27 [H]
$k_e$	4.20 [V/(m/s)]
$M$	373 [g]
$k_f$	4.20 [N/A]

그림 3의 특성곡선은 I-PD를 적용했을 경우와 적용하지 않았을 경우의 속도응답 특성곡선을 나타낸다. 오버슈트가 50%정도 감소된 것을 볼 수 있다.

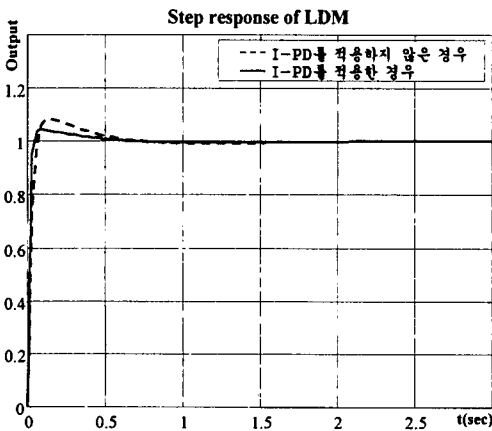


그림 3. I-PD제어의 스텝응답 특성곡선

또한 그림 4는 PID, I-PD를 각각 적용했을 경우의 스텝응답 특성곡선이다. PID의 제어 특성과 비교하면 역시 I-PD 제어를 적용했을 경우 개선된 응답특성을 보임을 알 수 있다.

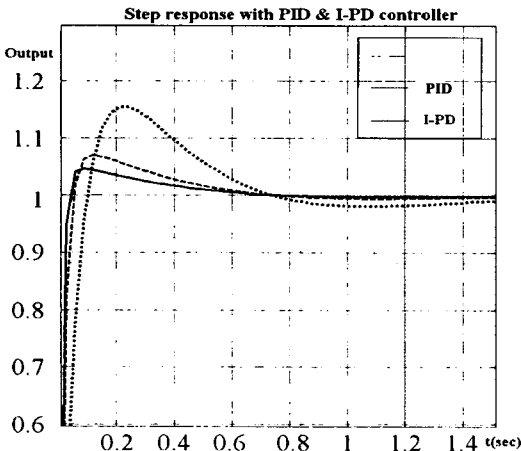


그림 4. PID와 I-PD 스텝응답 특성곡선의 비교

### 3. 결 론

현재 직선운동을 필요로 하는 시스템에서 그 구조적인 장점으로 높은 추력대 질량비를 지닌 LDM이 널리 사용되고 있다. 회전운동을 직선운동으로 전환시키는 별도의 시스템이 필요로 되지 않아 간단한 구조를 갖고 그에 따른 제작비도 절감될 수 있다. 단순한 정속도·정추력의 별다른 제어가 필요하지 않았던 이전의 조건과 달리 현 시점의 요구는 정확하고 신속한 위치 및 속도 제어가 필수적인 요건이 되었다.

본 연구의 결과에서 CDM은 오버슈트(overshoot)를 감소시키고, 신속한 응답 특성을 갖도록 제어기를 설계할 때 유용하게 쓰일 수 있었으며, I-PD 제어 기법은 특히 외란에 대해 강한 특성을 나타내었다. 페루프 제어시에 I-PD의 파라미터는 CDM으로 용이하게 산출할 수 있었으며, 비교된 바와 같이 PID 제어에 비해 약 20%정도 개선된 응답특성을 보여준다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Parviz Famouri, "Control of a Linear Permanent Magnet Brushless DC Motor via Exact Linearization Methods", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 7, No. 3 pp. 544~551, 1992.
- [2] Domenico Casadei, etc., "Design and Control of a Slotless PM DC Linear Actuator for Servo System", Proceeding of the ICEM'92, Manchester, pp. 132~136, 1992
- [3] T. Mizuno, etc.m "High Speed Hydraulic Servo Valve Using Linear DC Motor", T. IEE Japan, Vol. 113-D, No. 8, pp. 1002~1008, 1993
- [4] H. Wakiwaka, etc., "Consideration of High-speed Positioning of Linear DC Motor", IEEE Trans. on Mag., Vol. 33, No. 5, pp. 3880~3882, 1997.
- [5] Tewodros Tesfaye, Yasuzumi Ochiai, "Two-degree-of-freedom I-PD Position Controller Design for a Linear Pulse Motor Driver by Coefficient Diagram Method. (CDM)", ICARCV '98, The Fifth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, pp. 434~438, 1998.
- [6] Jong-Moon Kim, Choon-Kyung kim, Kook-Hun Kim, "CDM-BASED CONTROL ALGORITHM FOR MAGNETIC LEVITATION SYSTEM", ICEE '99, A1-07, pp. 81~84, 1999.