

Linear Stepping Motor의 동특성 개선에 관한 연구

이 상호* · 노 채균 · 김 동희 · 오 홍석 · 이 경호 · 신 미영*
영남대학교 · 삼척 대학교*

A Study on the Dynamic Characteristics Improvement of Linear Stepping Motor

S.H Lee* · C.K Noh · D.H Kim · H.S Oh · K.H Lee · M.Y Shin*
Yeungnam University · Samchok Nat'l University*

Abstract

A Linear Stepping Motor (LSM) can operate in an open loop control mode similarly to a rotary stepping motor. However, the LSM has a large transient vibration, and it sometimes causes the miss-step.

In this paper, vibration suppression method using an energy stored in winding inductance and induced voltage of the LSM is proposed.

여기에 대응하기 위해서, 본 논문에서는 권선 인덕턴스에 저장된 에너지와 LSM의 유도전압을 이용한 진동억제 방법을 새로운 1-2상 여자방식에 적용하여, LSM의 동특성 개선을 시도하고자 한다

1. 서론

LSM은 디지털 입력 신호에 따라 일정 스텝량씩 직선적으로 이동하는 선형 전동기이다. 유사한 동작을 수행하는 다른 선형 전동기와 비교했을 때, LSM을 사용한 제어 시스템은 다음과 같은 몇가지의 중요한 잇점을 가지고 있다.

- (1) 일반적으로 위치제어나 속도제어에 있어서 피드백 (feedback)이 없다.
- (2) 0.1mm 만큼작은 스텝에 있어서, 회전운동을 선형운동으로 변환하는 장치없이 직접 선형운동을 행할 수 있다.
- (3) 구동시 오차가 누적되지 않는다.
- (4) LSM은 다른 선형 전동기에 비해 미세한 변위를 가지며, 또한 작은 입력에 대하여 큰 추력을 가진다.

따라서, LSM은 반송 시스템, FDD의 헤드 액츄에이트등 FA, OA응용에 다양하게 사용되고 있다.^{[1][2]} 그러나, LSM은 운전시 큰 과도진동 발생으로 인하여 종종 미스 스텝을 야기시킨다.

2. LSM의 기본구조

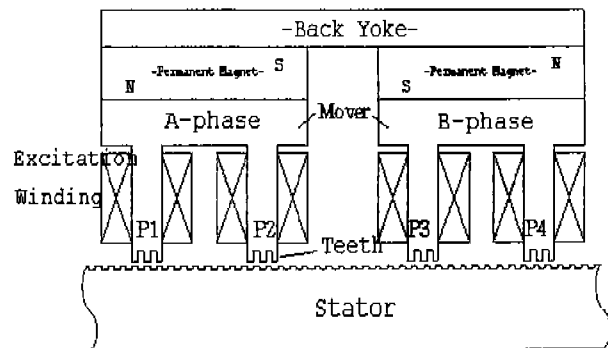
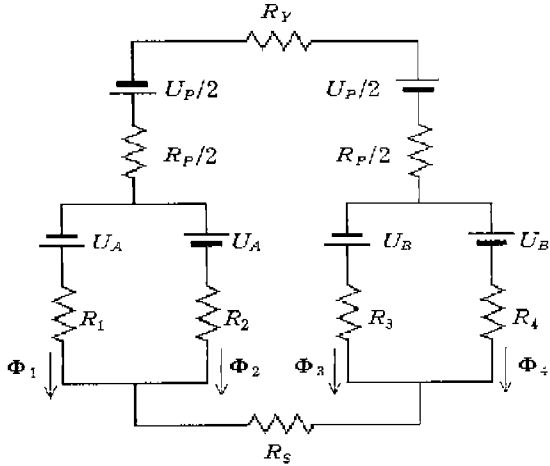


Fig. 1. Basic construction of LSM

그림1은 2상 4극형 LSM의 기본 구조를 나타낸다. LSM은 두 개의 부분인 가동자와 고정자로 되어있다. 가동자는 두 개의 전자석(A상, B상)과 영구자석 그리고 요크로 구성되어 있다. 각각의 전자석은 두 개의 극을 가지고, 각각의 극은 같은 수의 치를 가진다. 또한, 인접한 치 사이의 중심간 거리를 치 피치 (τ)라고 부른다. A상 가동자의 두 극사이 거리는 $1/2$ 치 피치이며, A상 가동자 극과 B상 가동자 극사이의 거리는 $1/4$ 치 피치이다. 그러므로, 그림1의 LSM은 구조상 풀 스텝 구동모드에서 $1/4$ 치피치 스텝 길이이다.

3. LSM의 추력해석



U_P : 영구자석에 의해 생성된 기자력 (mmf).

U_A, U_B : 각각 전류 I_A 및 I_B 에 의해 생성된 기자력 (mmf)

R_i : 공극에서의 자기저항. (i : 극수)

R_P : 영구자석에서의 자기저항.

R_Y : 요크에서의 자기저항.

R_S : 고정자에서의 자기저항.

Φ_i : 극에서의 자속.

Fig. 2. Magnetic equivalent circuit of LSM

여기서, 여자 전류와 자속사이에는 히스테리시스가 없는 선형 관계라고 가정한다. 극에서의 자속들은 근사적으로 다음과 같다.

$$\Phi_1 = \Phi_{1P} + \Phi_{1A} \quad [Wb] \quad (1)$$

$$\Phi_2 = \Phi_{2P} + \Phi_{2A} \quad [Wb] \quad (2)$$

$$\Phi_3 = \Phi_{3P} + \Phi_{3B} \quad [Wb] \quad (3)$$

$$\Phi_4 = \Phi_{4P} + \Phi_{4B} \quad [Wb] \quad (4)$$

여기서,

$$\Phi_{1P} = \Phi_P + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{P(n)} \cos \frac{2\pi}{\tau} nx \quad (5)$$

$$\Phi_{2P} = \Phi_P + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \Phi_{P(n)} \cos \frac{2\pi}{\tau} nx \quad (6)$$

$$\Phi_{3P} = -\Phi_P - \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{P(n)} \cos \frac{2\pi}{\tau} n(x - \frac{\tau}{4}) \quad (7)$$

$$\Phi_{4P} = -\Phi_P - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \Phi_{P(n)} \cos \frac{2\pi}{\tau} n(x - \frac{\tau}{4}) \quad (8)$$

Φ_P 와 $\Phi_{P(n)}$ 은 각각 영구자석에 의해 생성된 자

속의 평균값과 n 고조파 자속의 크기를 나타낸다.

$$\Phi_{1A} = \Phi_A + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{A(n)} \cos \frac{2\pi}{\tau} nx \quad (9)$$

$$\Phi_{2A} = -\Phi_A - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \Phi_{A(n)} \cos \frac{2\pi}{\tau} nx \quad (10)$$

$$\Phi_{3B} = \Phi_B + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{B(n)} \cos \frac{2\pi}{\tau} n(x - \frac{\tau}{4}) \quad (11)$$

$$\Phi_{4B} = -\Phi_B - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \Phi_{B(n)} \cos \frac{2\pi}{\tau} n(x - \frac{\tau}{4}) \quad (12)$$

Φ_A 와 Φ_B 는 각각 전류 I_A 와 I_B 에 의해 생성된 자속의 평균값이다. 또한 $\Phi_{A(n)}$ 와 $\Phi_{B(n)}$ 은 n 고조파 크기를 나타낸다.

A상이 여자될 때, 추력 F_A 는 변위 x 에 대한 자기 수반 에너지의 변화로서 주어진다. 자기 수반 에너지 W_{mcA} 는 근사적으로 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} W_{mcA} &= \int_0^{I_A} \Psi dI_A \\ &= N_A \int_0^{I_A} \Phi_1 dI_A - N_A \int_0^{I_A} \Phi_2 dI_A \\ &= \frac{1}{2} N_A I_A (\Phi_1 - \Phi_2) \quad \text{-----} \quad (13) \end{aligned}$$

$N_A I_A [AT]$: 극당 기자력.

그러므로, 추력 F_A 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_A &= \frac{dW_{mcA}}{dx} \\ &= -\frac{4\pi N_A I_A \Phi_{P(1)}}{\tau} I_A \sin \frac{2\pi}{\tau} x \\ &= -K_f I_A \sin \frac{2\pi}{\tau} x \quad \text{-----} \quad (14) \end{aligned}$$

여기서, K_f 는 추력상수 $[N/A]$ 이고, $\Phi_{P(1)}$ 은 영구자석에 의해 생성된 제 1고조파 자속의 크기이다.

동일하게, B상이 여자될 때 추력 F_B 는 다음과 같다.

$$F_B = -K_f I_B \cos \frac{2\pi}{\tau} x \quad \text{-----} \quad (15)$$

따라서, 전체 추력 F 는 다음과 같다.

$$F = F_A + F_B \quad \text{-----} \quad (16)$$

4. 새로운 1-2상 여자 시퀀스에 의한 진동억제

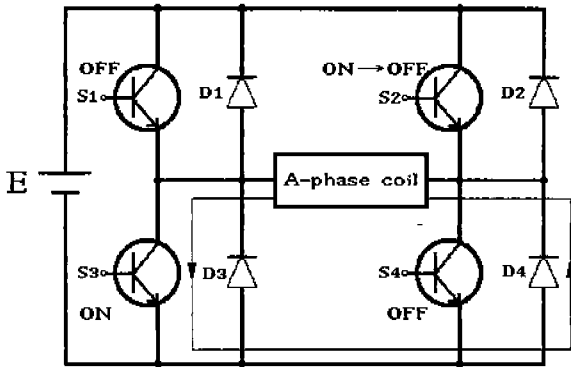


Fig. 3. Principle of vibration suppression

그림 3은 권선 인덕턴스에 저장된 에너지와 LSM의 유도전압을 이용한 진동억제의 원리를 나타낸다.^[4] S_3 의 턴 오프 시간이 S_4 보다 지연된다. 그러므로, 권선 인덕턴스에 저장된 에너지는 S_3 와 다이오드에 D_4 의하여 흐른다.

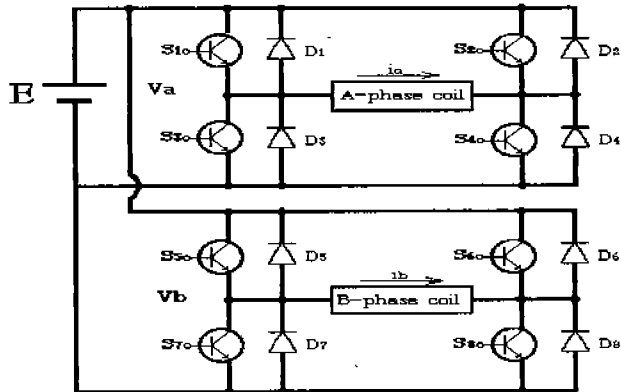


Fig. 4. H-bridge circuit of LSM

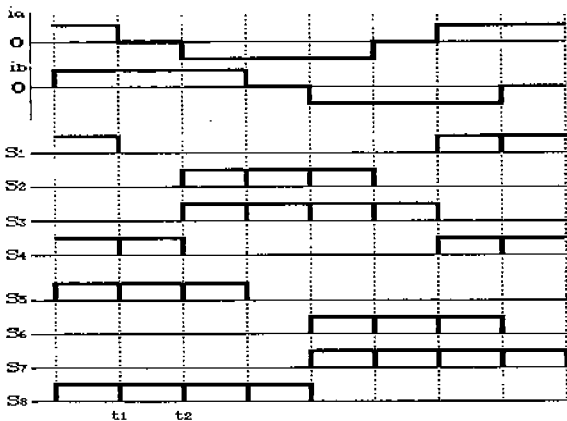


Fig. 5. New 1-2 phase excitation sequence for vibration suppression

그림 4는 LSM의 H-브릿지 회로를 나타내며, 그림5는 새로운 1-2상 여자 시퀀스를 나타낸다. 기존의 1-2상 여자 방식에 대하여 살펴보면, 스위치 S_1, S_4 와 S_5, S_8 는 시간 t_1 까지 온(on)함으로서, A상 전류 I_A 와 B상 전류 I_B 는 순방향으로 흐른다. 그리고 시간 t_1 에서 S_1 과 S_4 는 턴 오프함으로서, 전류 I_A 는 공급 전압이 free wheeling 다이오드 D_2 와 D_3 를 통하여 A상 권선에 역 바이어스로 공급되기 때문에 급속히 영으로 변화된다. 그러나, 새로운 1-2상 여자 방식에 있어서는, 단지 S_1 이 턴 오프되고 S_4 는 시간 t_2 까지 도통된다. 그때 A상 회로는 S_4, D_3 그리고 A상 권선에 의하여 폐회로를 구성한다. 따라서, 권선 인덕턴스에 저장된 에너지는 free-wheeling 되고 가동자 진동에 의한 유도전압은 짧아진다.

5. 실험결과

표 1은 실험에 사용한 LSM의 제원을 나타낸다.

Table. 1. Specification of LSM

Section	Specification
voltage [V]	24
current [A]	1
displacement [mm/pulse]	0.4
resistance [Ω/phase]	4.2
inductance [mH/phase]	10.7
holding force [kgf]	2

5-1. 진동특성

1시스템응답은 레이저 간섭계(laser-interferometer)를 사용하여 측정, 검토 하였다.^[5] 그림 6과 그림 7은 각각 기존의 1-2상 여자 방식과 새로운 1-2상 여자 방식에 있어서의 1시스템 응답을 보여준다.

그림 6과 그림 7에 나타난 것과 같이, 최대 오버슈트(maximum overshoot)는 기존의 1-2상 여자 방식에 대하여는 13[V] 이며 새로운 여자 방식에 있어서는 10[V] 이고, 언더슈트(undershoot)는 기존의 1-2상 여자 방식에 대하여는 12[V] 이며 새로운 여자 방식에 있어서는 9[V]이다. 또한, 정정시간(settling time) 은 기존의 1-2상 여자 방식에 대하여는 190[ms] 이며 새로운 여자 방식에 있어서는 160[ms] 이다.

결론적으로, 1스텝 응답에 있어서 새로운 1-2상 여자 구동시가 기존의 1-2상 여자 구동시보다 훨씬 더 우수하다.

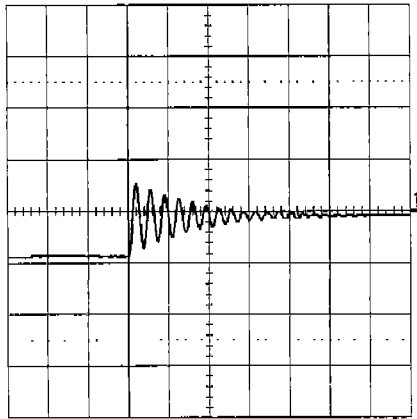


Fig. 6. Conventional 1-2 phase excitation mode

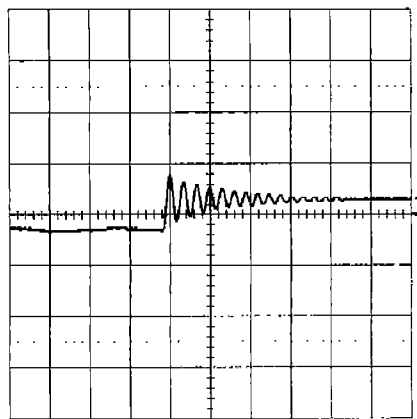


Fig. 7. New 1-2 phase excitation mode

5-2. 동추력 특성

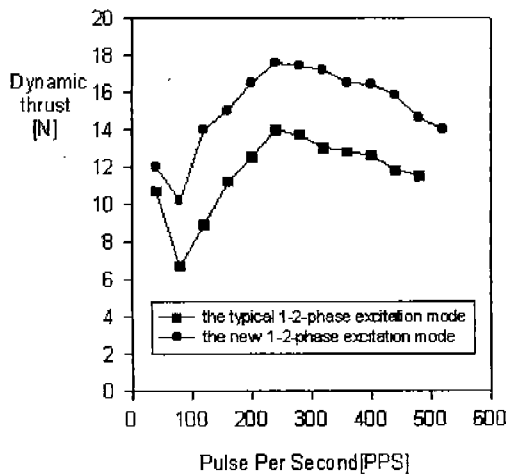


Fig. 8. Dynamic thrust characteristic

그림 8은 LSM의 동추력 특성을 보여주며, FORCE GAUGE를 사용하여 측정하였다. 그림 8에서 알 수 있듯이 새로운 1-2상 여자 구동시 동추력 특성이 기존의 1-2상 여자 구동시보다 우수하였다

6. 결 론

본 연구에서는 LSM의 권선 인덕턴스에 저장된 에너지와 유도 전압을 이용한 진동억제 방법을 새로운 1-2상 여자 방식에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 진동특성(1스텝 응답특성)은 새로운 1-2상 여자 구동시가 종래의 1-2상 여자 구동시보다 최대 오버슈트(maximum overshoot)는 23% 감소하였고, 언더슈트(undershoot)는 25% 감소하였으며, 특히 정정시간(settling time)은 16% 짧게 됨으로써 매우 우수하였다.

(2) 동추력 특성 역시 새로운 1-2상 여자 구동시가 종래의 1-2상 여자 구동시에 비해 우수하였다.

따라서, 상기의 결과는 차후 LSM의 동특성 개선을 위한 구동회로 구성에 중요한 자료가 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Ding Zhi-Gang, "A Novel Electromagnetic Spiral Linear Step Motor", IEEE Trans. on Industry Appl., Vol.1, 1994, pp. 329-336.
- [2] Jin-Ho Bae, Do-Young Chung, Sang-Ho Lee, "A DOUBLE 1-2 PHASE EXCITING OF LINEAR STEPPING MOTOR", SMIC '93, 1993.
- [3] Y. Yamamoto, H. Yamada, "Analysis of Magnetic Circuit and Starting Characteristics of Flat Type Linear Pulse Motor with Permanent Magnets", T. Iee Japan, Vol. 104-B, No.5, 1984, pp.265-272
- [4] T. Taniguchi, K. Ohtsuka, K. Takasugi, "Rotor Oscillation Damping of a Stepping Motor by the Method of a Simple Switching Sequence", T. Iee Japan, Voll. 111-D, No.6, 1991, pp.497-498.
- [5] HAO-YUNG LO, JAU-LING CHEN, "Microstep of digital control for step motor and its test using a laser interferometer measurement system", INT. J. ELECTRONICS, Vol. 62, No.5, 1987, pp.761-780.
- [6] S.H. Lee, D.Y. Jung, J.H. Bae, H.S. Oh, K.S. Won, J.W. Seo, "TWO-DOUBLE 1-2-PHASE DRIVE OF 4-PHASE STEPPING MOTOR", PEMC'96, Budapest -Hungary, 2-4 September, 1996.