

Microstep방식을 이용한 영구자석 여자 횡축형 선형 전동기의 위치제어에 관한 연구

채대직* · 안호균* · 박승규* · 김종무** · 강도현** · 임태윤**
 창원대학교* · 한국전기연구원**

A study on the PM Excited Transverse Flux Linear Motor position control
 by using the microstep method

Chea Dae Jik* · Ahn Ho Gyun* · Park Seung Kyu* · Kim Jong Moo** · Kang Do Hyun** · Lim Tae Yun**
 Changwon University* · KERI**

Abstract - In this paper, an PM Excited TFLM controller using Microprocessor was implement and the microstep method to control the PM Excited TFLM. In microstep method, current waveform is sinusoidal not square.

This method is characterized by less vibrating, less noisy, and more precise position control.

Also, we simulate the static characteristics for each waveform. The current tracks reference sinusoidal waveform well and stability was improved as we expected.

Therefore, the possibility of the microstep method position control was propose.

영구자석 여자 횡축형 선형 전동기는 기본적으로 릴럭턴스형 전동기로서 그림 1과 같은 구조를 가지며, 이동자의 이동방향을 기준으로 하면 코일에 인가되어지는 기자력, 즉 전류의 방향과는 같고 자속의 방향과는 횡방향이다. 이러한 구조의 장점은 전기 회로와 자기회로가 분리되므로 단위 체적당 높은 출력과 효율을 발생시킬 수 있어 소형 및 경량화가 가능하다는 것이다.⁽⁶⁾

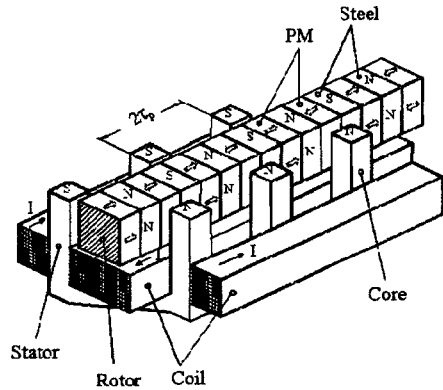


그림 1 영구자석 여자 횡축형 선형 전동기 기본 모델

1. 서 론

최근 여러 산업 분야에서 전기기계를 이용한 직선운동 구동 시스템의 필요성이 증가되고 있다. 1970년 중반 이후 로봇 및 X-Y 테이블 등의 분야에서 고정밀 위치제어의 필요성이 증대되고 왔다. 이를 충족시키기 위해서는 모터 자체의 치 피치를 구조적으로 세분화하는 방법이 있지만 가공상의 제한이나 가공오차가 존재한다.⁽¹⁾ TFLM이 직선 운동하는 자동화 서보 시스템의 용도로 쓰일 때 위치제어가 필수적이다. 정밀한 위치 제어를 위해서는 실제 값에 근사한 정확한 위치 정보와 저속 영역에서도 좋은 성능을 갖는 위치 제어가 필요하다.⁽²⁾⁽³⁾

그러나 본 모터의 치 피치가 40mm로 피치의 길이가 다른 선형 모터보다 길어서 기계적인 가공방법에 의하지 않고 구동용 드라이버에서 고분해능화를 구현하는 방법으로 위치정밀도를 향상시키고 저속영역에서 발생하는 진동 및 소음을 줄일 수 있는 microstep을 검토하였다. 일반적인 전동기의 제어 방법으로 위치, 속도, 전류제어 루프가 직렬로 구성된 제어 구조가 일반적이다. 이 방식은 제어가 간단하고 응답성이 빠르다는 장점을 가지고 있다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾

TFLM은 펄스형태의 입력 전류를 주게된다. 그러나 매 펄스의 초기 입력전류가 들어갈 때 리플이 생기게 된다. 본 논문은 PID방식과 microstep을 혼합한 제어방식을 도입하였다. microstep의 장점은 추력 생성에 기여도가 적은 범위에서 0 전류 또는 작은 전류를 흐르게 함으로서 에너지 효율을 증가시킬 수 있고 급격한 전류변화를 줄임으로서 급격한 속도 또는 추력 리플을 저감시킨다.

이동자에 포함된 영구자석에서 발생된 자계는 공극에서의 자계를 집중시키므로 높은 공극 자속 밀도를 얻을 수 있어 출력 밀도를 더욱 증가시킨다. 2상 TFLM의 경우, 한 상의 고정자의 철심과 이동자의 영구자석의 극배치는 자속을 일정한 방향으로 발생시키도록 그림 2와 같은 구조로 설치되고 일정한 방향의 힘을 연속적으로 발생하기 위해 각 상의 고정자는 $\tau_p/2$ 만큼 엇갈리게 배치한다

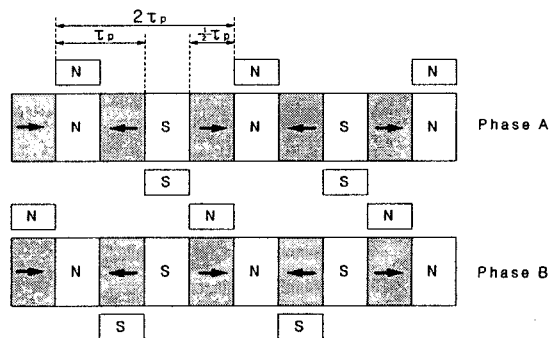


그림 2 2상 영구자석형 TFLM의 상배치도

2. 영구자석 여자 횡축형 선형 전동기

그림 3은 이동자의 위치에 따른 기자력과 발생 추력과 합성 추력을 나타낸다. 즉 이동자가 일정한 방향으로 움직이기 위해서는 그림 2와 같이 2상 이상의 구조이어야 하며 각 상의 $0 \leq x \leq \tau_p$ 구간에서는 반대방향의 전류를 인가하여야 한다.

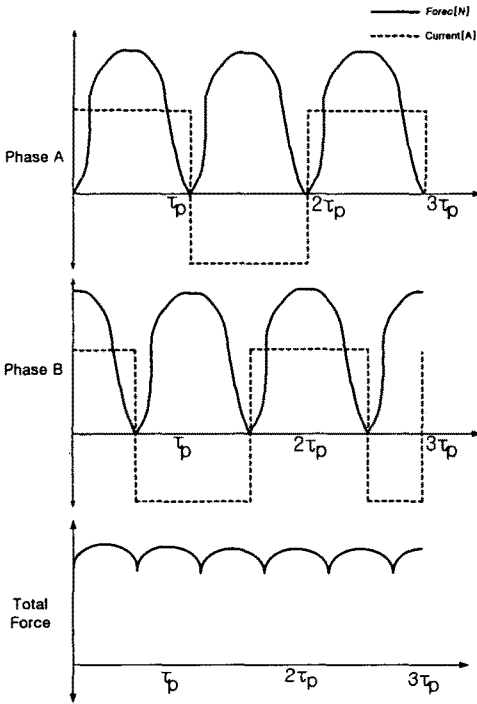


그림 3 2상 여자시 인가 전류와 발생추력

그림 4는 TFLM에서 발생하는 추진력 F_x 과 추력 밀도 F_{xd} 를 계산하기 위한 한 상의 간이동자모델로서 누설자속이 무시되었다. 이것은 고정자 철심 중간 부분을 절단하여 펼친 형태로 권선에 전류가 인가되었을 때의 기자력 θ_a 가 공극 자기저항과 영구자석의 자기저항에 집중된다고 가정된다. 여기서 B_{01} , B_{02} 는 전기자 전류가 흐르지 않는 무부하일 때 공극에서의 자속밀도를, B_{m01} , B_{m02} 은 영구자석에서의 자속밀도를 나타낸다. 그림 4의 모델로부터 계산되어진 발생 추력과 추력밀도는 식 (1)과 (2)와 같이 유도되어진다.

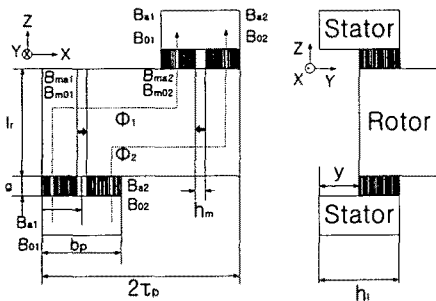


그림 4 TFLM의 간이 해석 모델

$$F_x [N] = -\frac{\partial W_m}{\partial x} = \frac{-4z B_a B_0}{\mu_0} (h_i - y) \quad (1)$$

$$F_{xd} [N/m^2] = B_0 \frac{\theta_a}{2 \tau_p} \frac{(h_i - y)}{h_i} \quad (2)$$

단, 여기에서 W_m 은 자기 에너지를, B_a 는 전류에 의한 자속 밀도, B_0 는 무부하에서 영구자석에 의한 공극에서의 자속밀도를 나타낸다.

2.2 수학적 해석

TFLM의 동특성 해석에서는 기계적인 요소와 전기적인 요소가 결합된 특성방정식을 이용한다. TFLM의 기계적인 특성식은 다음 식 (3)과 같다.

$$F(t) = M \frac{dv}{dt} + Cv(t) + F_L(t) \quad (3)$$

M : 질량 [Kg] v : 속도 [m/s]
 C : 점성마찰계수 [Kg · m/s]

그리고 전동기의 전류의 상태 방정식은 식 (4)와 같다. 식 (5)의 모델링에서 TFLM은 릴럭턴스 형태의 전동기로서 전류와 위치에 따라 자속이 변하는 비선형성을 가진다.

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{N \frac{\partial \Phi}{\partial i}} (V - R \cdot i - N \frac{\partial \Phi}{\partial x} v) \quad (4)$$

i : 전류 [A] V : 전압 [v] R : 권선의 저항 [Ω]
 Φ : 쇄교자속 [wb] N : 턴수

$$\begin{aligned} V_n(t) &= RI_n(t) + \frac{d\lambda(t), x_n(t)}{dt} \\ &= RI_n(t) + \frac{\partial \lambda(I_n(t), x_n(t))}{\partial I_n(t)} \frac{dI_n(t)}{dt} \\ &\quad - \frac{\partial \lambda(I_n(t), x_n(t))}{\partial x_n(t)} \frac{dx_n(t)}{dt} \\ &= RI_n(t) + L(I_n(t), x_n(t)) \frac{dI_n(t)}{dt} \\ &\quad + I_n(t) \frac{dL(I_n(t), x_n(t))}{dx_n(t)} v(t) \end{aligned} \quad (5)$$

2.3 microstep 구동방식

microstep 구동방식은 그림 4와 같이 모터의 인접 상간의 여자 전류를 정현파적으로 변화시켜 기본 스텝각의 중간영역에서도 위치설정이 가능한 구동방식이다.

TFLM에서 microstep 구동으로 미소변위를 얻는 동시에 각 여자파의 합성 추력이 1상 여자시의 추력과 동등해지도록 하려면 여자전류가 정현파상이어야 한다. 이때 얻어진 TFLM의 정지추력 특성은 항상 추력리플이 없이 일정하여 TFLM을 다상화한 것과 같은 효과가 있다. 따라서 (1) 고정밀 위치제어 (2) 저속영역에서의 공진에 의한 탈조 방지 (3) 속도 맥동의 감소 (4) 응답특성 개선 등과 같은 성능 향상이 기대된다.⁽⁷⁾

그림 5는 기준전류와 추력과의 기본원리를 나타내는 추력 벡터 도에서 알 수 있듯이 microstep 구동은 미소 변위를 얻는 동시에 각 여자때의 합성추력이 1상 여자시의 추력과 동등해지도록 여자전류를 제어한다.

그림 6는 구형파 구동방식과 Microstep 구동방식의 전류 및 변위에 대한 비교파형의 예를 보인 것이다. 여기서 (a)는 1 Step은 $\frac{T}{4}$ 이고, (b)의 분해수는 20이다.

그림 6에서 나타낸 것과 같이 1주기를 T라 할 때 주기 T 동안의 구동방식에 따른 위치 결정수는 각 파형의 분해수에 비례한다.

microstep 구동은 일정 주파수를 가지는 정현파를 인가하는 방법으로 상 전류는 다음 식 (6) 같다.

$$i_a = -I_m \sin(\omega, t) \quad (6)$$

$$i_b = I_m \cos(\omega, t)$$

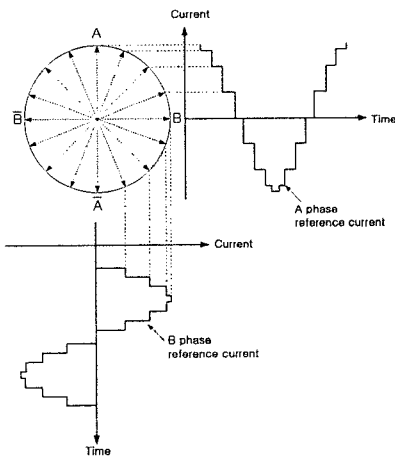
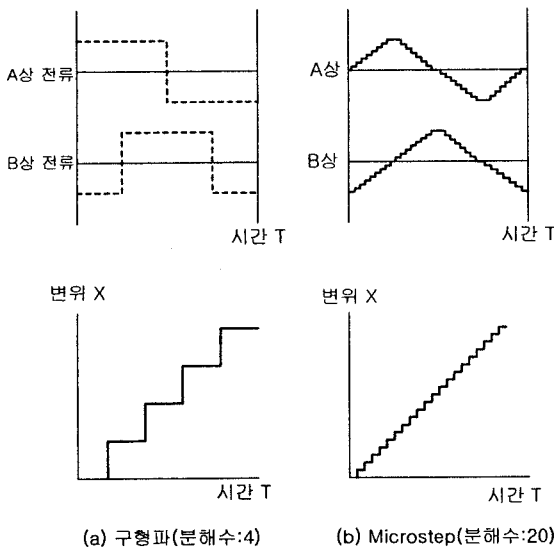


그림 5 기준전류와 토크벡터의 관계



(a) 구형파(분해수:4) (b) Microstep(분해수:20)

그림 6 2상 여자 시 구형파와 Microstep의 비교 파형

2.4 시뮬레이션 및 실험 결과

TFLM 위치제어 시스템의 모델링 된 제어 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 수행하여 해석을 수행하였다.

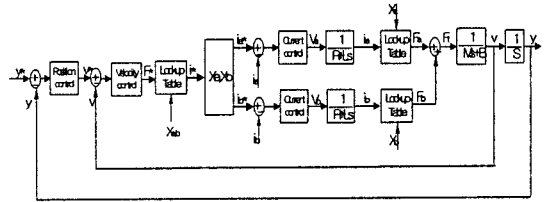


그림 7 PM Excited TFLM 제어 시스템 블럭도

이동자가 이동할 때 위치에 따라 각 a,b상의 자속 값이 불규칙적으로 변하므로 비선형적인 관계를 가진다. 그래서 이동자의 위치에 따른 자속 값을 알아내어 Look-up Table을 작성하였다. 이 Look-up Table의 자속 값으로 이동자의 위치를 추정하도록 하였다. 이동자치와 고정자치가 일치할 때 자속이 최대가 나타났다.

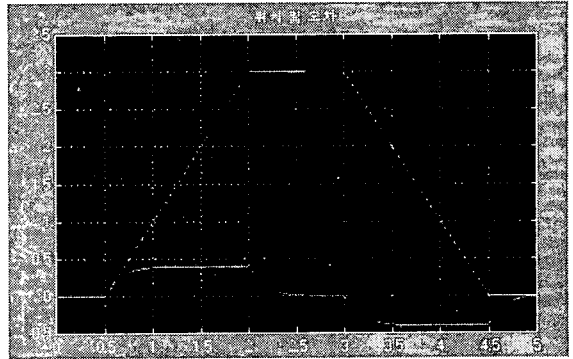


그림 8 PID 제어만 적용 시 위치 오차 응답 특성 곡선

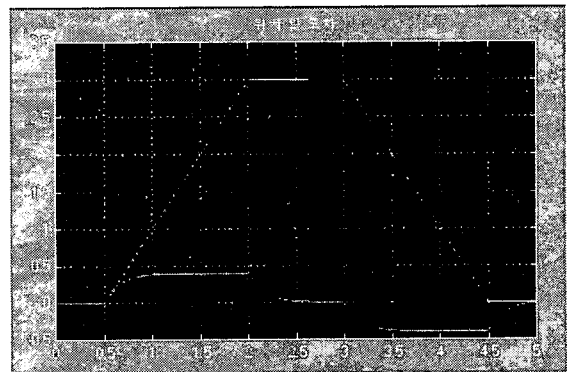


그림 9 PID 제어와 Microstep 제어를 혼합한 위치 오차 응답 특성 곡선

그림 10,11의 전류응답 특성곡선을 비교해 보면 PID제어만 했을 경우에는 전류가 펄스모양으로 Δt 에 대해 전류의 증가, 감소의 변화 폭이 크다. 그러나 PID제어와 Microstep제어를 함께 사용했을 경우의 전류 파형은 정현파에 가까운 파형으로 Δt 에 대해 전류의 변화가 적어

급격한 전류를 줄임으로서 급격한 속도 또는 추력 리플을 저감한다.

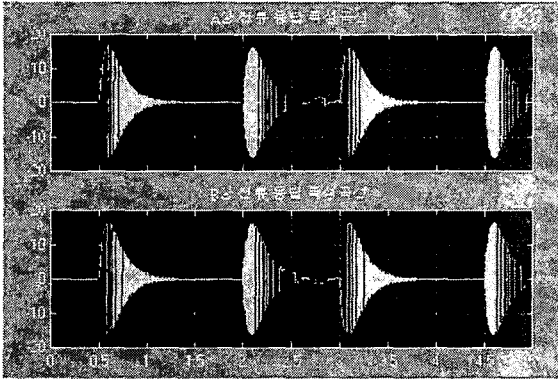


그림 10 PID 제어만 적용 시 전류 응답 특성 곡선

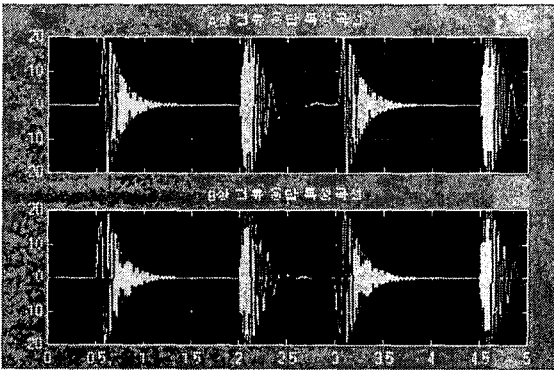


그림 11 PID 제어와 Microstep 제어를 혼합한 전류 응답 특성 곡선

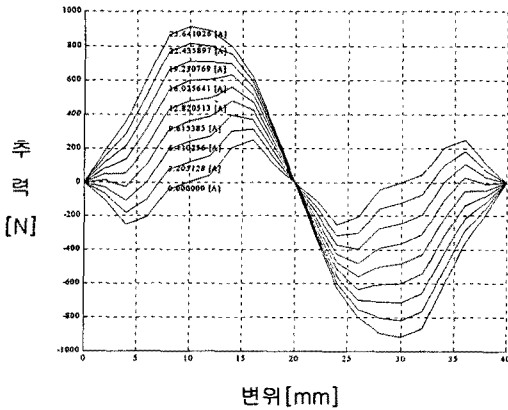


그림 12 전류와 변위에 따른 발생 추력

그림 12는 영구자석을 추가하여 전동기의 특성상 완전 정형파가 아닌 찌그러진 정형파가 된다. 전류가 0A일 때 추력이 0이 아닌 이유는 전동기의 치가 일정하지 않아 영구자석의 힘의 영향을 받기 때문이다.

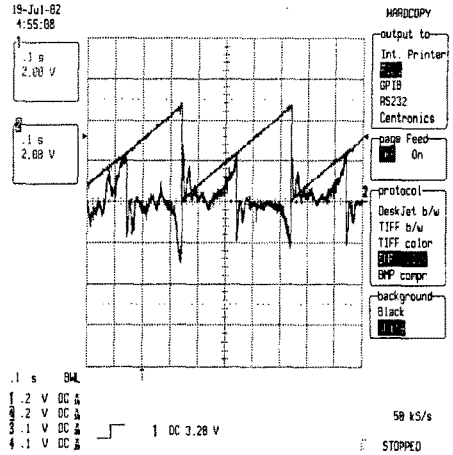


그림 13 PID 제어 시 이동 변위에 따른 전류 특성 곡선 [8A/div]

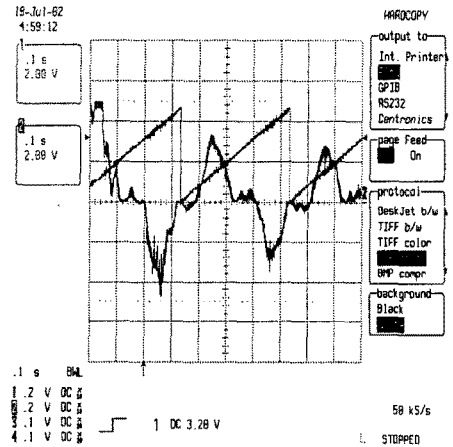


그림 14 PID 제어와 Microstep제어를 혼합 시 이동 변위에 따른 전류 특성 곡선[8A/div]

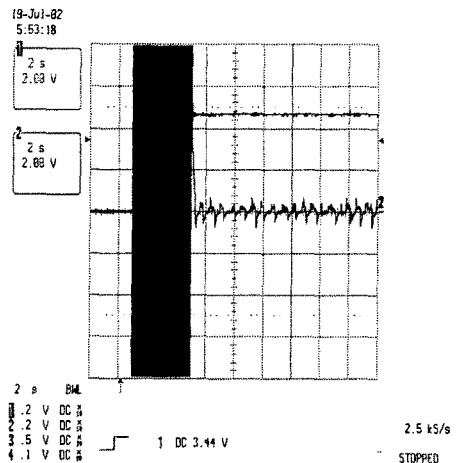


그림 15 PID제어 시 위치 추정에 따른 오차 [위치:160mm/div 오차:0.4mm/div]

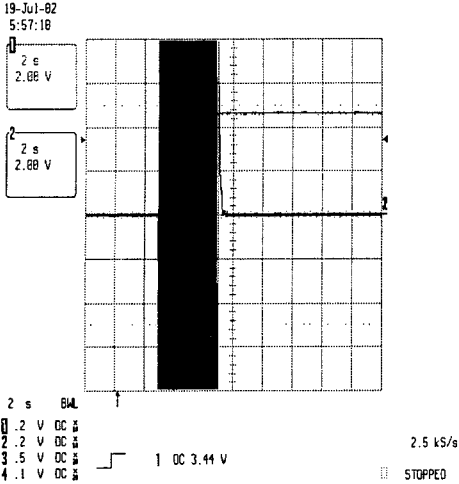


그림 16 PID제어와 Microstep제어의 혼합 시
 위치 추정에 따른 오차
 [위치:160mm/div 오차:0.4mm/div]

그림 15, 16을 비교해 볼 때 PID제어와 Microstep제어를 혼합한 파형이 위치 추정 오차가 적어 지령값을 잘 추종함을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 Microstep 제어 방식을 이용하여 영구 자석 여자 횡축형 전동기(TFLM)를 구동하는 경우에 구형과 구동방식보다 위치제어 특성이 시뮬레이션과 실험 파형을 통해 우수하다는 것을 보였다. 현재 본 연구는 위치제어 측정장비인 Linear Scale을 장착하지 않은 센서리스 위치제어 특성을 검토중이다.

본 연구는 한국 과학 재단 목적기초연구
 (1999-2-30200-008-3)지원으로 수행되었음.

(참 고 문 헌)

[1] 심규범, 이정우, 오준호, "스텝모터의 진동 저감을 위한 마이크로 스텝 구동에 관한 연구", 대한 기계공학회 춘계학술대회 논문집, pp448-455, 1996.
 [2] Daiki Ebihara Syuji Moriya, Morimasa Kajioka Kazusi Yamaguchi. "The Drive of the Linear Pulse Motor by the Microstep Driver", LD-90-24, 1990
 [3] Daiki Ebihara Syuji Moriya, Hideo Dohmeki, "The Characteristics of Two-Phase Eight-Pole Linear Pulse Motor by using Micro-Step Drive", Trans. on IEEE, Vol. MAG-23, No.5, 1987.9.
 [4] S.Yamamoto, T.Ara, M.Suiura, J.Sawaki, and K.Matsuse, "A Design Method of Two degree of freedom position controller for Linear Servo Motor Drives", Trans. of IEEJ, Vol.166.No.8, pp868-873,1996
 [5] T.Umeno and Y.Hori, "Design the Two Degree of Freedom Robust Servo system and its Application to Motion Control of Robot Servo system its Application to Motion Control of Robot Manipulators", Tran. of IEEJ, Vol.100-D, No.11,pp1163-1170,1990.
 [6] 임태운, 강도현, 김종무, 김동희, "영구자석 여자 횡축형 선형 전동기(TFLM)를 이용한 가진기 제어" 전력전자학회논문집, 2002.6.
 [7] 김성현, 이은용, 김일중, 이동주, "2상 8극 HB형 리니어 펄스 모터의 정밀위치 제어를 위한 미세스텝 구동", 대한전기학회 논문지, pp66-73, 1999.12