

가동 자석형 선형 직류 전동기의 설계

정헌준*, 김 응*, 백수현*, 윤신웅*, 김필수**, 권순도**
 *동국대학교 전기공학과, **대림대학

Design of a Moving Magnet Type Linear DC Motor

H. J. Jung*, Y. Kim*, S. H. Baek*, S. Y. Yoon*, P. S. Kim**, S. D. Kwon**
 *Department of Electrical Engineering, Dongguk University, **Daerim College

Abstract - Linear motors are increasingly employed as direct actuators replacing the more conventional systems composed by a rotating motor and a mechanical device. Linear DC motor is useful in a high speed and high accuracy positioning system with a feedback controller. Because of these advantages, linear DC motors have already been used as motors of pen recorders and magnetic disk storage devices, these are moving coil type linear DC motors as these movers are light. Moving magnet type linear DC motor has advantages at long stroke motors because its mover's feeding wires for driving is not necessary. This paper is concerned with the analysis of linear DC motor that is moving magnet type with unipolar. In order to analyze the dynamic behaviour a mathematical model based on a simplified field analysis developed. A two dimensional finite element field solution is employed in order to illustrate the effect of yoke saturation and motor performance. It is deduced the relation between the limit value of the thrust of the linear DC motor and the dimension of the yokes.

1. 서 론

선형 전동기는 회전형 전동기에 비하여 회전 운동을 직선 운동으로 변환하기 위한 기계적 변환 기구를 필요로 하지 않으므로 직선력이 요구되는 분야에서 그 응용이 점차 확대되고 있다.[1]

선형 전동기는 구동 전원의 종류에 따라서 선형 직류 전동기 및 선형 교류 전동기로 구분되며, 선형 직류 전동기의 경우 가동 코일형과 가동 자석형으로 분류된다. 가동 코일형의 경우 가동부에 권선을 갖는데, 이러한 형태는 가동부 권선에 전력을 공급하기 위한 전기적 연결을 필요로 하는 단점을 지닌다.[2] 가동 자석형은 가동부 권선을 영구 자석으로 대체함으로써 전력 공급을 위한 전기적 연결과 동손에 의한 발열이 없는 장점을 지니며,[3] 강자성체의 자석을 사용하면 큰 공극을 갖는 구조에서도 높은 자속 밀도 값을 얻을 수 있으므로 슬롯없는 전기자를 사용할 수 있다. 이러한 슬롯없는 전기자형 전동기는 간단한 구조로 제작과 제어가 용이한 장점을 지닌다.[4]-[6]

요크와 영구 자석의 비선형적인 특성을 고려한 정확한 전동기의 특성을 얻기 위하여 유한 요소법이 사용된다. 전류와 영구 자석에 의한 자계 분포를 해석하기 위하여 특정한 가정을 함으로써 1차원 모델을 이용한 자계 분포의 해석이 가능하게 된다.

일반적으로 스트로크가 영구자석의 길이에 비하여 긴 경우에는 요크의 단면적이 넓지 않으면 요크 내의 mmf

강하를 무시할 수 없다. 이 mmf 강하로 변위에 대한 추력은 스트로크의 양끝에서 중심으로 향할수록 감소하게 된다. 전동기가 적절한 치수를 지닐 때 요크 내의 mmf 강하를 무시할 수 있으며, 또한 전동기의 추력은 일정하게 된다.

본 논문에서는 선형 직류 전동기의 설계를 위하여 다음과 같이 3가지의 경우로 분류하여 자계 분포를 해석하였으며, 이를 이용하여 선형 직류 전동기의 수학적 모델을 도출하였다. 수학적 모델로부터 선형 직류 전동기의 추력 계산과 요크의 치수를 결정하였으며, 이의 타당성을 유한 요소 해석을 통하여 입증하였다.

- (1) 권선에 전류가 흐르고 영구 자석이 존재하지 않는 경우 자계 분포.
- (2) 권선에 전류가 흐르지 않고 영구 자석이 존재하는 경우 자계 분포.
- (3) 권선에 전류가 흐르고 영구 자석이 존재하는 경우 자계 분포.

2. 본 론

2.1 전동기의 간략화 된 모형

본 논문에서 설계한 가동 자석형 선형 직류 전동기는 그림 1과 같은 구조를 갖는다. 고정부는 권선과 요크로 구성되고 권선은 요크에 균일하게 분포하도록 감겨있다. 가동부는 두 개의 자석으로 구성된다. 내부 요크와 외부 요크 사이의 거리는 자석의 폭, 권선의 두께와 자석의 이동을 원활히 하기 위한 여유 공간으로 결정된다.

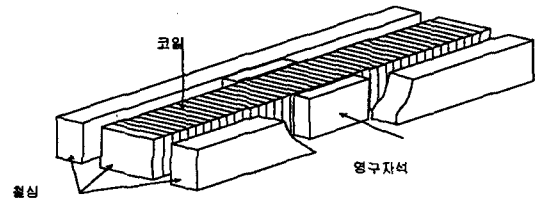


그림 1 가동 자석형 선형 직류 전동기의 구조
 Fig. 1 Structure of the MM type LDM

2.1.1 전류에 의한 자계의 해석

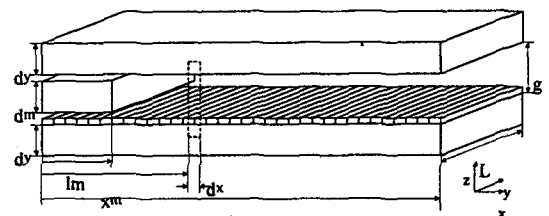


그림 2 가동 자석형 선형 직류 전동기의 모형
 Fig. 2 Model of the MM type LDM

그림 2를 참고하여 공극의 자계 분포를 해석하고 추력을 계산하였다.

좌표축은 그림 2와 같이 선택하였고, 좌표축의 원점은 스트로크의 시작 부분으로 하였다. 전류 밀도 J_1 은 균일하게 분포되어 y 방향으로 흐른다. 1차원 모델에서 자계 H 는 x 방향의 성분은 존재하지 않고 z 방향만의 성분을 갖는다. 요크 내부의 mmf 강하를 무시할 수 있을 정도로 요크의 투자율은 크다고 가정한다.

y 방향의 단부 효과는 고려하지 않는다는 가정 하에서 암페어의 법칙을 dx 의 폭을 갖는 점선으로 표시된 영역에 적용하면 공극의 자계는 다음과 같다.

$$H_C(x) = -\frac{J_1}{g}(x - \frac{l}{2}) \quad 0 \leq x \leq l \text{ 일 경우 (1)}$$

여기서 J_1 은 여자 전류 밀도[A/m]이다.

공극에서의 자속 밀도는 다음과 같다.

$$B_C(x) = \mu_0 H_C(x) = -\mu_0 \frac{J_1}{g} x(x - \frac{l}{2}) \quad 0 \leq x \leq l \text{ 일 경우 (2)}$$

2.1.2 영구 자석에 의한 자계의 해석

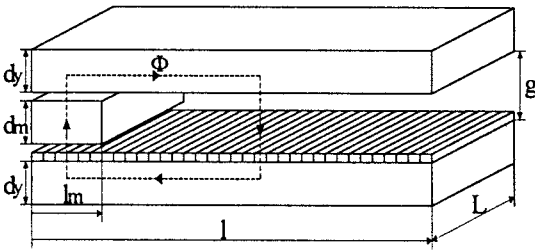


그림 3 자속의 흐름
Fig. 3 Flow of magnetic flux

그림 3에서 자속의 누설이 없고 요크 내에 자계가 존재하지 않는다고 가정하면 암페어의 법칙으로부터

$$\oint \vec{H}_i \cdot d\vec{l}_i = H_m d_m + H_g(g - d_m) + H_g g = 0 \quad (3)$$

자속 연속의 법칙으로부터

$$B_m(l_m L) = B_g(l_m L) = B_g[(l - l_m)L] \quad (4)$$

영구 자석은 동작 범위에서 거의 선형인 감자 곡선을 갖는다. 이것은 영구 자석의 자계 방정식을 식(5)와 같이 나타낼 수 있다는 것을 의미한다.

$$B_m = B_r + \mu_r \mu_0 H_m \quad (5)$$

여기서 B_r 은 잔류 자속 밀도[T], μ_r 은 요크의 비투자율, μ_0 는 진공의 투자율[H/m]이다.

식 (3), (4), (5)로부터

$$B_m = \frac{1}{1 + \mu_r [\frac{(g - d_m)}{d_m} + \frac{g}{d_m} \frac{l_m}{(l - l_m)}]} (-\mu_0 H_m) \quad (6)$$

$$= \frac{[\frac{(g - d_m)}{d_m} + \frac{g}{d_m} \frac{l_m}{(l - l_m)}]}{1 + \mu_r [\frac{(g - d_m)}{d_m} + \frac{g}{d_m} \frac{l_m}{(l - l_m)}]} B_r \quad (7)$$

퍼미언스 계수는 다음과 같다.

$$PC = \frac{B_m}{-\mu_0 H_m} = \frac{(g - d_m)}{d_m} + \frac{g}{d_m} \frac{l_m}{(l - l_m)} \quad (8)$$

2.1.3 전류에 의한 자계 내에 영구자석이 존재할 경우의 자계

전류에 의한 자계 내에 영구 자석이 존재하면 자석내의 자계는 다음과 같이 변화한다.

$$H_{\Delta m}(x) d_m + \frac{B_{\Delta m}(x)}{\mu_0}(g - d_m) = H_C(x)g \quad (9)$$

식 (9)로부터

$$B_{\Delta m}(x) = k g H_C(x) = -k J_1(x - \frac{l}{2}) \quad (10)$$

여기서 $k = [\frac{d_m}{\mu_0 \mu_r} + \frac{(g - d_m)}{\mu_0}]^{-1}$ 이다.

식 (6)과 식 (10)을 더하면

$$B_M(x) = B_{\Delta m}(x) + B_m = -k J_1(x - \frac{l}{2}) + \frac{1}{1 + \mu_r [\frac{(g - d_m)}{d_m} + \frac{g}{d_m} \frac{l_m}{(l - l_m)}]} \quad (11)$$

식 (11)로부터 그림 4와 같이 영구 자석의 위치에 따라서 동작점이 이동하는 것을 알 수 있다.

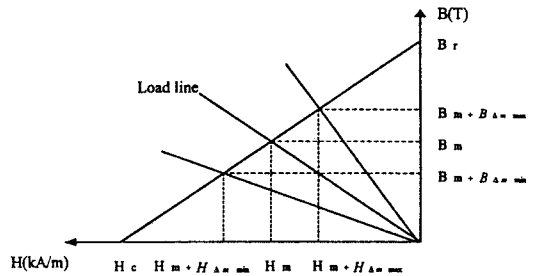


그림 4 영구 자석의 동작점
Fig. 4 Working point of permanent magnet

2.1.4 추력의 계산

본 논문에서 설계한 가동 자석형 선형 직류 전동기는 그림 5와 같이 스트로크의 시점에서 종점 방향으로의 추력은 종점으로 갈수록 감소하고 스트로크의 종점에서 시점 방향으로의 추력은 시점으로 갈수록 감소한다. 따라서 이와 같은 구조의 전동기는 위치에 따르는 추력의 변동 때문에 스트로크와 추력에 제한이 따르게 된다. 이러한 추력의 변동과 요크 내의 mmf 강하를 무시하면 추력식은 다음과 같다.

$$F = 2 J_1 l_m L B_m = \frac{2 J_1 l_m L}{1 + \mu_r [\frac{(g - d_m)}{d_m} + \frac{g}{d_m} \frac{l_m}{(l - l_m)}]} \quad (12)$$

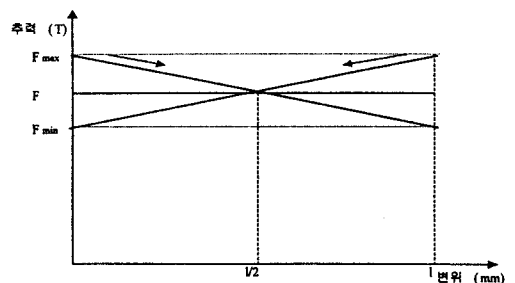


그림 5 자석의 변위에 대한 추력
Fig. 5 Thrust versus magnet position

2.1.5 전동기 방정식

전기자 전압 방정식은 다음과 같은 형식을 취한다.

$$v = Ri + \frac{d\phi(i, x_m)}{dt} \quad (13)$$

여기서 ϕ 는 전류값이 i 이고 자석의 위치가 x_m 일 경우 전기자 권선의 자속 쇄교수를 나타낸다.

식 (13)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v = Ri + \frac{\partial \phi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \phi}{\partial x_m} \frac{dx_m}{dt} \quad (14)$$

식 (14)의 emf 계수는 다음과 같이 에너지 변화의 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial i} = \frac{1}{i} \frac{\partial W_f}{\partial i} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x_m} = \frac{1}{i} \frac{\partial W_f}{\partial x_m} + \frac{F}{i} \quad (16)$$

식 (15)와 식 (16)은 emf 계수가 전기자 전류와 자석 위치의 변화에 따르는 에너지 변화에 의하여 결정될 수 있다는 것을 나타낸다.

2.2 전동기의 설계

전동기의 치수를 결정하기 위하여 목표로 하는 스트로크와 추력을 결정한다. 본 논문에서는 스트로크 300 [mm], 추력 2.8[N]의 양축식 가동 자석형 선형 직류 전동기를 설계하였다. 영구 자석은 페라이트 자석을 선택하였으며 영구 자석의 치수는 25×40×10[mm]의 상용품을 사용하였다. 영구 자석이 감자되는 것을 막기 위하여 전류에 의한 자계의 세기는 영구 자석의 보자력보다 커서는 안된다. 요크의 두께는 전류에 의하여 요크 내의 각 부분에서 발생하는 자속 밀도와 전류에 의하여 발생되는 자계 내에 존재하는 영구 자석에 의하여 요크 내의 각 부분에서 발생하는 자속 밀도를 더한 값의 최대값을 고려하여 결정되었다. 자속 밀도의 최대값은 요크의 최대 자속 밀도보다 작아야 하며 자속 밀도에 따라서 변화하는 요크의 비투자율도 고려되어야 한다.

2.2.1 영구 자석의 선정

표 1 페라이트 자석의 특성

Table 1 Characteristics of the ferrite magnet

KS, JIS 규 격	US MMPA 규 격	화 학 성 분	방 향성	잔류자속 밀도(B _r)	보 자 력 (H _c)	최대 에너지 적(BH _{max})
				KG	KOe	MGOe
MPB 330	CERAMIC 5	B ₂ O ₆ Fe ₂ O ₃	이 방성	3.6~4.0	2.3~2.6	3.0~3.6

온 도 계 수		유 리 온 도 T	리 로 밀 부 자 율(μ _{rel})	밀 도 D
dB _r /B _r	ΔH _c /H _c			
%/℃	%/℃	℃	G/Oe	g/cm ³
-0.175	0.31	450	1.1	5.0

2.2.2 요크의 선정

표 2 요크의 화학 성분

Table 2 Chemical components of the yoke

재 질	기 호	열처리 T _a (℃)	화 학 성 분				
			C	Si	Mn	P	S
탄소강	S25C	無	0.22	0.15	0.30	0.030	0.035
		有	~0.28	~0.35	~0.60	以下	以下

S25C의 최대 자속 밀도는 1.66(T)이다. 동작 자속 밀도를 1.0(T)라고 하면 이를 얻기 위한 자계의 세기는 0.72(kA/m)이다. 이 때의 비투자율은 1100이다. 탄소강은 동작 자속 밀도가 0.7(T) 부근에서 최대의 비투자율을 갖는다.

2.2.3 전기자 코일의 선정

전기자 코일은 피막을 포함한 직경이 0.060[cm]인 에나멜선을 선택하였다. 구리는 1[cm]당 약 450[A]의 전류가 흐를 수 있으므로 선정할 코일에는 약 1[A]의 전류가 흐를 수 있다.

2.2.4 설계된 전동기의 사양

표 3 설계된 전동기의 사양

Table 3 Specifications of the designed LDM

항 목	기 호	수 치 [단 위]
요크 사이의 공극	g	14.0 [mm]
영구 자석의 두께	d_m	10.0 [mm]
전기자 코일의 두께	d_c	2.2 [mm]
요크의 두께	d_y	10.0 [mm]
스트로크	l	300.0 [mm]
자석의 길이	l_m	40.0 [mm]
전동기의 높이	L	25.0 [mm]
전기자 코일의 권수	N	2000 [회]

2.3 유한 요소 해석

설계한 전동기에 1[A]의 전류를 인가할 경우 전류에 의하여 공극에 발생하는 자속 밀도는 식(2)를 이용하여 구하면 그림 6과 같다. 전류에 의하여 요크 내에 발생하는 자속 밀도는 식(2)를 x 에 관하여 적분하여 전류에 의하여 요크를 통과하는 자속수를 얻고 이를 요크의 두께 d_y 로 나누면 그림 7과 같이 얻을 수 있다. 설계한 전동기에 1[A]의 전류를 인가할 경우 전류에 의한 자계 내에 존재하는 영구 자석에 의하여 공극에 발생하는 자속 밀도는 식(11)을 이용하여 영구 자석의 위치 x_m 이 각각 10[mm], 60[mm], 130[mm]인 경우에 대하여 구하면 그림 8과 같다. 이것을 x 에 관하여 적분하여 자석에 의하여 요크를 통과하는 자속수를 구한 다음 이를 요크의 두께 d_y 로 나누면 그림 9와 같이 자석에 의하여 발생하는 요크 내의 자속 밀도를 얻을 수 있다. 따라서 전류에 의한 자속 밀도와 영구 자석에 의한 자속 밀도를 더한 요크의 자속 밀도는 그림 10과 같다. 전동기의 설계시에는 그림 10에서 얻은 요크 내부 자속 밀도의 최대값이 요크 재료의 최대 자속 밀도보다 높지 않도록 요크의 두께를 결정한다.

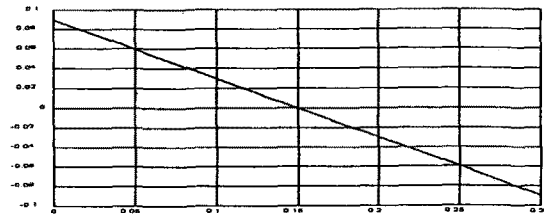


그림 6 전류에 의한 공극의 자속 밀도(1[A])
Fig. 6 Flux density in air gap produced by the current(1[A])

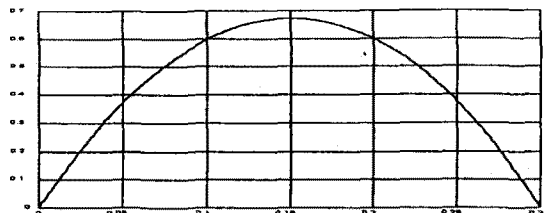


그림 7 전류에 의한 요크의 자속 밀도(1[A])
Fig. 7 Flux density in yoke produced by the current(1[A])

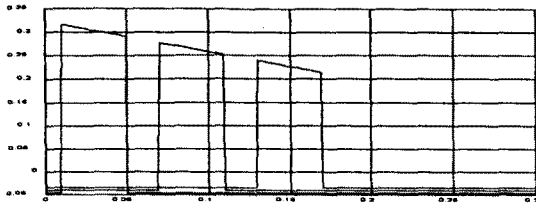


그림 8 자석에 의한 공극의 자속 밀도(1(A))
Fig. 8 Flux density in air gap produced by the permanent magnet(1(A))

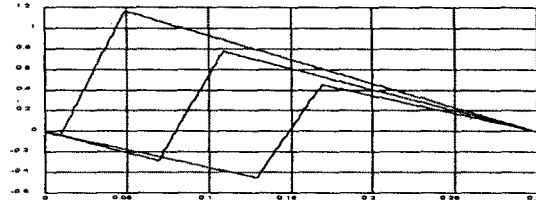


그림 9 자석에 의한 요크의 자속 밀도 (1(A))
Fig. 9 Flux density in yoke produced by the permanent magnet(1(A))

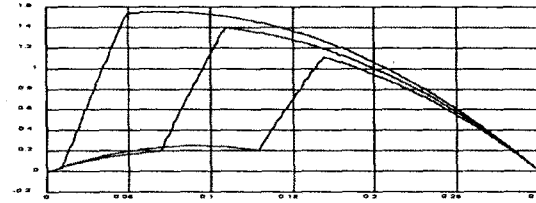


그림 10 요크의 자속 밀도(1(A))
Fig. 10 Flux density in yoke(1(A))

수학적 모델을 이용하여 얻은 결과를 유한 요소법을 이용하여 검증한다. 그림 11은 그림 10에서 얻은 결과를 유한 요소법을 이용하여 해석한 것이다. 두 결과가 서로 일치하는 것을 알 수 있다. 그림 12는 x_m 이 130 [mm]인 경우 요크 내부 각 부분의 자속 밀도이다. 각 부분의 값을 그림 10의 x_m 이 130[mm]인 경우의 값과 비교하면 서로 일치하는 것을 알 수 있다. 그림 13은 x_m 이 130[mm]인 경우 영구 자석 내부의 자속 밀도이다. 이것은 그림 8의 x_m 이 130[mm]인 경우와 비교하면 일치하는 것을 알 수 있다.

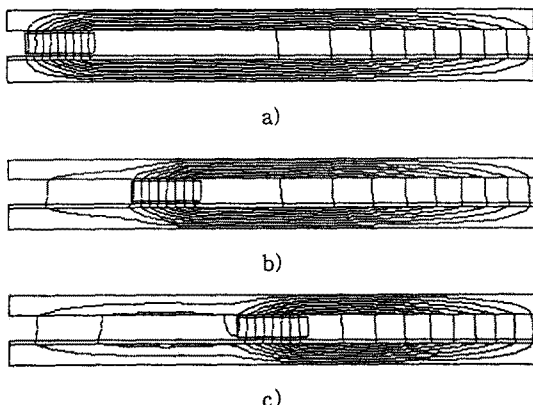


그림 11 영구 자석의 위치에 따르는 자계 분포(1(A))
a) 10[mm] b) 60[mm] c) 130[mm]
Fig. 11 Flux density distribution for a permanent magnet position of a) 10[mm] b) 60[mm] c) 130[mm](1(A))

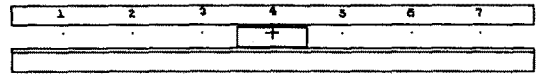


그림 12 영구 자석의 위치가 130[mm]인 경우 요크 각 부분에서의 자속 밀도(1(A))
Fig. 12 Flux density in yoke for permanent magnet position of 130[mm](1(A))

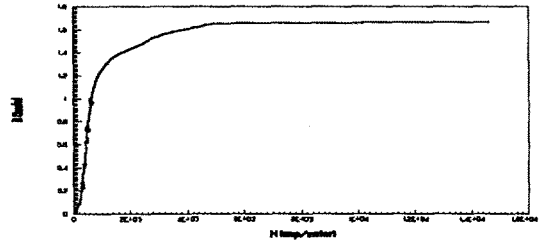


그림 13 영구 자석의 위치가 130[mm]인 경우 영구 자석 내부의 자속 밀도(1(A))
Fig. 13 Flux density in PM for PM position of 130[mm](1(A))

3. 결 론

본 연구에서 도출한 가동 자석형 선형 직류 전동기의 수학적 모델을 이용하여 전동기를 설계하고 설계한 전동기의 공극 및 요크 내부에서의 자계를 해석하였다. 이 결과를 유한 요소법을 이용하여 검증하였다. 따라서 수학적 모델을 이용하여 전동기를 가설계 하고 유한 요소법을 이용하여 전동기의 치수를 정확히 결정함으로써 효율적으로 전동기를 설계할 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] The magnetic actuator technical committee of IEEJ, "Linear motor and their applications", IEE of Japan, pp. 6-14, 1987.
- [2] Z. G. Ding, "A high performance DC linear motor for instrumentation", Proc. of ICEM '84, Lausanne-Switzerland, pp. 485-488, 1984.
- [3] L. Honds and K. H. Meyer, "A linear DC motor with permanent magnets", Philips tech. vol. 40, no. 11/12, pp. 329-337, 1974.
- [4] B. Brunelli, D. Casadei, and G. Serra, "Analysis of a slotless permanent magnet brushless DC linear motor", Proc. of ICEM '90, Boston, pp. 173-178, 1990.
- [5] D. Casadei, G. Grandi, and G. Serra, "Design and control of a slotless PM DC linear actuator for servo system", Proc. of ICEM '92, Manchester, pp. 132-136, 1992.
- [6] D. Casadei, "Comparative analysis of slotless PM DC linear actuators with different magnetic cores", Proc. of UPEC '93, Stanford, vol. 1, pp. 142-145, 1993.