

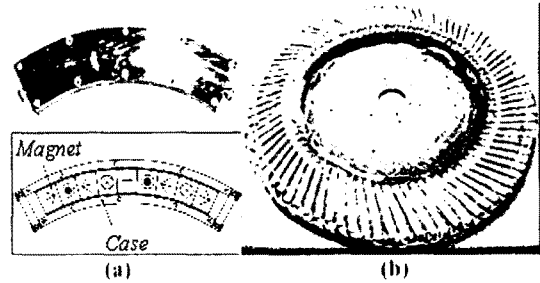
제어 변수 도출에 의한 직선형 동기 전동기의 최적 설계

장석명*, 유대준*, 조한욱*, 고경진*
*충남대학교

Optimal design of PMLSM with moving coil mover through control parameter estimation

Seok-Myeong Jang*, Dae-Joon You*, Han-Wook Cho*, Kyeong-Jin Ko*
*Chungnam National University

Abstract -This paper presents a design and analysis solutions for the general class and control parameter estimation of slotted iron-cored Permanent Magnet Linear Synchronous Motor with Halbach magnetization stator and 3-phase winding mover. In our design and analysis, stator consisting of permanent magnets and slotted iron-cored coil mover are treated in a uniform way via magnetic vector potential. For one such motor structure, we give analytical formulas for its magnetic field, back electromotive force and thrust force. Moreover, the detent force are calculated by the relative permeance function. In good agreement with the estimated values from the analyses, the experimental results and Finite Element Method (FEM) confirm the validity of the design and analysis framework.



〈그림 1〉 Disk-type PM Linear Synchronous Machine: (a) 영구자석형 고정자 및 (b) 권선형 가동자

1. 서 론

직선형 영구자석 동기 전동기(PMLSM)는 직선형 유도 전동기에 비해 영구자석을 사용하기 때문에 상대적으로 효율이 높고 추력 대 중량비가 높고 추력화 및 고속화가 가능하며 역률이 높다[1]. 또한 직접적으로 직선 운동에 의한 에너지 전달에 의해 자기 부상 및 컨베이션 장치 등에 널리 이용되고 있다. 본 논문은 일반적인 자화 배열과 공심형으로 구성된 직선형 동기 전동기에 비해 고 추력, 고 효율을 얻기 위한 Halbach 배열과 철심으로 구성된 실험 모델에 대해 특성 해석을 제시한다. 특성 해석을 위한 모델로는 3상 이층권으로 구성된 가동자에 철심을 구성하고, Halbach 배열로 구성된 고정자를 갖는 모델을 제시한다. 또한 직선의 설계 제약에 의해 설계 모델은 disk-type으로 무한 계도를 구성하였다. 해석적 분석에 있어서, 영구 자석으로 구성된 고정자 부분과 3상 권선으로 구성된 가동자 부분은 2개의 직각 좌표계에 의한 벡터 퍼텐셜의 단일한 방법으로 자체 해석이 이루어진다[1]. 따라서 본 논문은 Halbach 배열을 갖는 실험 모델에 대해 공극의 자속 밀도 일반화, 역 기전력, 추력에 대한 해석적 방법을 제시하고 유한 요소법(FEM)과 실험을 통해 해석적 방법의 타당성을 제시한다. 본 논문으로부터 얻어지는 실험 결과는 직선형 동기 전동기의 제어 변수 도출에 의한 최적 설계의 알고리즘에 이용될 수 있다.

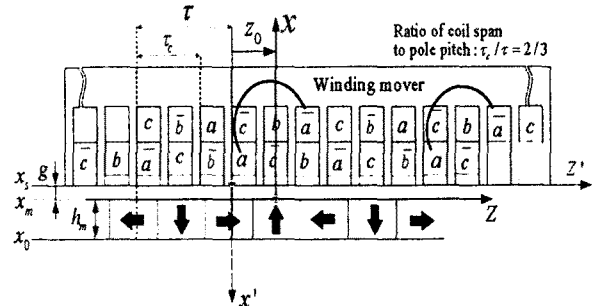
2. 제어변수 도출을 위한 전자기 특성 해석

2.1 영구자석과 권선에 의한 자속 밀도 특성식

특성 해석을 위한 모델의 기하학적인 구조는 그림 1과 같으며, 그림 1의 설계 모델에 있어서 그림 2는 2차원 직각 좌표계에 의한 해석 모델을 제시한다. 고정자는 2개의 자화 배열이 한 극 τ 와 높이 h_m 를 갖는 Halbach 자화 배열로 구성된 영구자석으로 구성되며, Halbach 배열의 자속 패스에 대해 자기 차폐에 의한 철심을 구성하지 않는다. 가동자의 경우 3상 2층 권선과 철심을 갖는 슬롯 구조를 구성하며, 전류 밀도는 $x=x_0$ 의 면전류로 분포한다. 고정자의 좌표계 (x, y, z) 에 대해 권선으로 구성된 가동자는 수직 방향으로 g 의 높이를 갖고, 수평방향으로 z_0 번위되는 좌표계 (x', y', z') 를 갖는다. 또한 제시된 해석모델은 y 방향으로 깊이 d 를 갖고, 3개의 슬롯이 한극을 형성한다. 해석을 위한 가정은 다음과 같다 [1].

- * 영구자석에 의한 해석은 영구자석 내부의 전달관계를 이용하며 권선 전류에 의한 해석은 면전류 분포에 의해 이루어진다.
- * 영구자석 및 코일의 비투자율은 1이며, 철심의 경우 무한이다.
- * 해석을 단순화 하기 위하여 와전류 및 단부효과는 무시한다.
- * 영구자석 및 권선은 무한 계도에 의한 무한 주기를 갖는다.

본 논문은 설계 변수 및 제어 변수 도출을 위한 노력에 있어서, Maxwell 방정식으로부터 설계 모델의 기하학적 모양을 고려한



〈그림 2〉 2차원 직각 좌표에 의한 해석 모델

-간 고조파를 갖는 벡터 포텐셜 A 를 식 (1)과 같이 적용한다.

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{A} &= -\mu_0 [\vec{J}] \\ \nabla^2 \vec{A} &= -\mu_0 [\nabla \times \vec{M}] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 A 은 자속밀도 $B = \nabla \times A$ 으로 정의되는 자기벡터 자위를 나타내며, 그림 2의 기하학적인 구조로 인해 z -방향만 존재한다. 그림 2의 Halbach 배열을 갖는 영구자석 고정자와 전류 분포를 갖는 가동자는 지수함수 푸리에 급수에 의해 식(2)와 같이 표현된다[2].

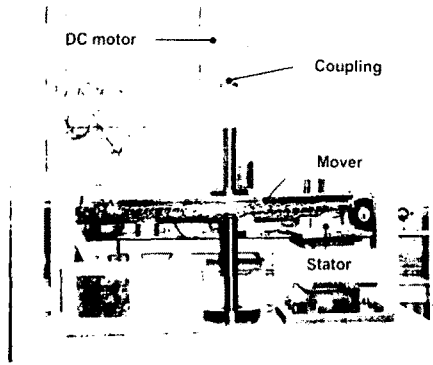
$$\begin{aligned} M &= \sum_{n=1}^{\infty} (M_{xn} e^{-jk_n z} i_x + M_{zn} e^{-jk_n z} i_z) \\ J &= \sum_{n=1}^{\infty} J_{yn} e^{-jk_n z} i_y \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, M_{xn} 과 M_{zn} 은 각각 수직 방향 및 수평 방향 자화이며, $k_n = \pi n/\tau$ 로 주어지는 n 차 공간고조파이고, τ 는 극 길이를 의미한다. 영구 자석내부의 투자율은 공기와 같은 비투자율 1을 갖는다. 식(2)의 영구자석 및 전류 분포에 대해, $x=x_0, x_m, x_0$ 의 벡터 포텐셜의 연속 조건과 수평 영구자석 및 면 전류 밀도에 의한 불연속 조건을 이용한 경계 조건으로부터 영구 자석 및 코일에 의한 벡터 포텐셜은 식 (3)과 식 (4)와 같이 얻어진다.

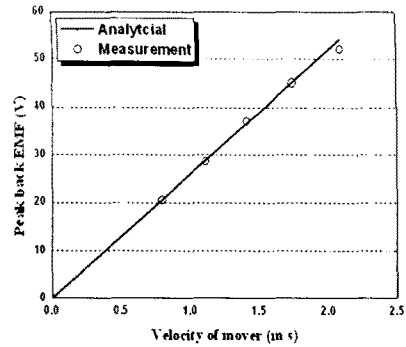
$$A_{yn}^{(x)} = \left(\frac{-j\mu_0 M_{xn}}{2k_n} - \frac{\mu_0 M_{zn}}{2k_n} \right) [1 - (e^{-k_n h_m})] [e^{-2k_n x} e^{k_n x} + e^{-k_n x}] \quad (0 \leq x \leq g) \quad (3)$$

$$A_{yn}^{(x')} = \frac{\mu_0}{k_n} J_{yn} e^{-k_n x'} e^{-jk_n z'} \quad (0 \leq x' < g + h_m) \quad (4)$$

여기서, 수직 자속밀도 특성식은 $B_{zn} = jk_n A_{yn}$ 과 같이 얻어진다.



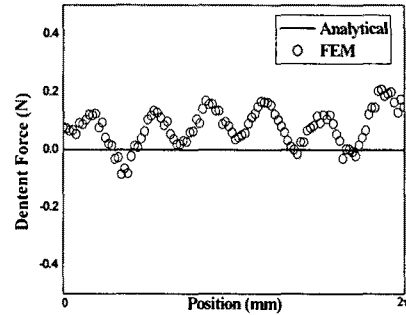
〈그림 3〉 제작된 disk-type 직선형 동기 전동기



〈그림 4〉 속도와 역기전력 관계

〈표 1〉 제작된 disk-type 직선형 동기 전동기의 설계 사양

설계 파라미터	치수 (단위)
극간격 (τ)	250×24×3.14/360 (mm)
영구자석 한 편 길이 (τ_m)	$\tau/2$
공극 (g)	10 (mm)
영구자석 높이 (h_m)	30 (mm)
슬롯간격(τ_s)	$\tau/3$ (mm)
치폭(t_w)	6 (mm)
슬롯 개구간(a_0)	$\tau - t_w$
잔류자속밀도	1.1 (T)
고정자 극수(p_m)	4.5



〈그림 5〉 One slot skew에 의한 Detent force

2.2. 제어변수의 추정

식 (3)과 (4)에 의한 제어 파라미터를 구하기 위하여 본 논문은 슬롯에 의한 영구자석 자계의 불균형에 의한 detent force의 특성을 제거하기 위하여 skew를 고려한 상대 퍼미언스 함수를 식 (5)와 같이 도입하였다[2].

$$\begin{aligned} \bar{n}_s(z, x) &= \frac{1}{\xi} \int_{z-\frac{\xi}{2}}^{z+\frac{\xi}{2}} \left[\eta_{dc} + \sum_{k=1,2,3,\dots} \eta_{ac} \cdot \cos\left(\frac{k\pi}{\tau_s} s_L\right) \right] ds_L \\ &= \eta_{dc} + \sum_{k=1,2,3,\dots} \eta_{ac} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\xi k \pi}{2\tau_s}\right)}{\frac{\xi k \pi}{2\tau_s}} \cdot \cos\left(\frac{k\pi}{\tau_s} z\right) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, τ_s 는 슬롯 간격을 의미하며, η 는 skew를 고려하지 않았을 때의 상대 퍼미언스 함수를 의미한다. 따라서 영구자석에 의한 자속 밀도 특성식은 식 (6)과 같이 표현되어진다[2].

$$B_{slot} = B_{slotless} \bar{n} \quad (6)$$

식 (6)에 있어서 영구자석에 의한 역기전력 특성식은 슬롯이 없는 경우의 자속밀도 $B_{slotless}$ 에 의해 코일의 선 밀도 분포에 대한 쇄교 자속으로부터 식 (7)과 같이 얻어진다.

$$V_{emf} = \frac{d\lambda^{pm}}{dt} = \frac{dz}{dt} \frac{d\lambda^{pm}}{dz} = u \frac{d\lambda^{pm}}{dz} \quad (7)$$

또한, detent force의 경우 슬롯에 의한 자계의 불균형으로 일어나는 현상으로 skew와 슬롯 현상을 고려한 상대 퍼미언스 함수가 도입된 B_{slot} 함수로부터 식 (8)과 같이 에너지 적에 의해 얻어진다.

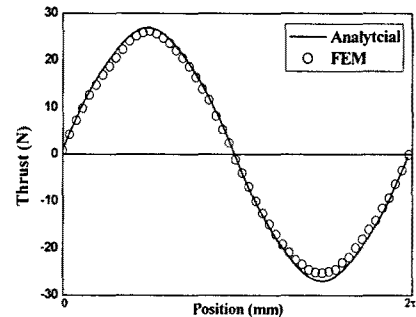
$$F_d(z) = -\frac{1}{2\mu_0} \partial \left(\int_{\gamma} [B_{slot}]^2 dV \right) / \partial z \quad (8)$$

영구자석형 동기 전동기의 추력 특성식은 권선의 전류와 영구자석의 자속 밀도 특성식에 의해 얻어 지므로 슬롯을 고려하지 않은 자속밀도 특성식 $B_{slotless}$ 에 의해 식 (9)와 같이 계산된다.

$$dF_z = \frac{d \cdot p_m}{2} (J \times B_{slotless}) dz \quad (9)$$

그러므로, 슬롯을 갖는 직선형 동기 전동기의 전체적인 추력은 식 (10)과 같이 detent force와 추력 특성 식에 의해 표현되어 질 수 있다.

$$F_{total}(z) = F_d(z) + F_z(z) \quad (10)$$



〈그림 6〉 상 전류 1[A]에 의한 추력 특성

3. 해석 검증을 위한 FEM 및 실험 결과

그림 3은 해석 결과의 검증을 위한 제작된 disk-type 직선형 동기 전동기를 보여주고 있으며, 표 1은 제작된 설계 파라미터를 제시하고 있다. 설계 및 제어 변수로서 역기전력 상수[V/(m/sec)]와 추력 상수[N/A]는 최적 설계 및 정확한 제어를 위한 파라미터로서 제작된 직선형 동기 전동기는 그림 4와 그림 6에 있어서, 한 상의 역기전력 상수 및 추력 상수는 약 26을 가짐을 알 수 있다. 해석적 결과와 실험 및 FEM 결과가 일치함을 각각의 그림은 제시하고 있다.

4. 결 론

본 논문은 직선형 동기 전동기의 설계 및 제어 변수를 이끌어 내기 위한 전자기적 해석법에 대해 다루고 있다. 슬롯을 갖는 직선형 동기 전동기는 슬롯에 의한 detent force를 유발하여 제어 특성을 악화 시키며, 정확한 제어 변수를 이끌어 내기 힘들다. 따라서 전자기적 특성에 의한 해석적 방법을 통하여 최적 설계 및 제어 변수 도출을 위해서는 슬롯을 고려한 정확한 자속밀도 특성식으로 부터 역기전력 및 추력을 추정해야만 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] David L. Trumper, Won-jong kim, "Design and Analysis Framework for Linear Permanent-Magnet Machines." IEEE Trans. Magn, Vol.32, No.2, March/April 1996
- [2] Z.Q. Zhu, D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors, part III: effect of stator slotting," IEEE Trans., Magn., vol. 29, no. 1, Jan. 1993