

설계 파라미터와 DC link 전압에 의한 직선형 영구자석 모터 시스템 설계

장 석명, 유 대준, 장 원범, 최 장영, 서 정출
충남대학교

Design of Permanent Magnet Linear synchronous Motor System by parameter estimation and DC link voltage.

Seok- Myeong Jang, Dae-Joon You, and Won-Bum Jang, Jang-Young Choi, Jung-Chul Seo
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - This paper presents the system design of permanent magnet linear synchronous machine with double-side PM mover and slotless iron-cored stator in the required speed and thrust. In this paper, the design of manufacturing motor is optimized by characteristics of motor parameters with the variation of PM size and coil turns. And, the permissible operating range of manufactured motor by determination of base speed and base thrust according to switching scheme of DC link voltage are offered. Finally, the results of analytical solutions are verified by finite element analysis and experiment.

1. 서 론

직선형 영구자석 동기 모터 시스템은 회전형 모터에 의한 불필요한 기계적 변환 없이 부하에 직선운동을 공급하는 장치로서 우수한 속도, 토크 제어 특성을 갖는 장치이다[1]. 그러한 직선형 영구자석 동기 모터의 설계는 요구된 속도, 추력에 있어서 모터의 기하학적 특성에 의한 설계 파라미터 뿐만 아니라 DC link 전압의 선택은 정확한 요구 사양과 시스템 효율을 정하는 중요한 요소가 된다. 본 논문에서 제작된 직선형 동기 모터는 에너지 효율을 높이기 위한 수직 자화 배열을 갖는 양축식 가동자와 detent force를 제거하기 위한 슬롯리스 iron 코어를 갖는 3 상 코일로 구성되어져 있으며, 해석적 방법과 DC link 전압의 결정에 따른 속도, 추력의 요구 사양을 만족하도록 설계 되어졌다. 그러므로 본 논문은 공간 고조파법에 의한 해석 기법을 통하여 베타 페텐셜의 단일한 방법으로 설계 파라미터인 역기전력, 인덕턴스 등을 해석적 방법으로 제공하고 인버터의 DC link 전압을 고려한 직선형 동기 모터의 전제적인 시스템 속도, 추력 특성식을 제시하여, 고정자 코일의 턴수에 의한 직선형 영구자석 동기 모터 시스템 설계를 제시한다.

2. 영구 자석 및 코일의 자계 분포 해석

2.1 해석 모델

특성 해석을 위한 모델의 기하학적인 구조는 그림 1과 같다. 가동자로 구성된 가동자의 경우 추력 특성을 높이기 위한 양축식 영구자석 수직 자화 배열을 선정하였으며, 고정자의 경우 detent 힘을 제거하기 위하여 슬롯리스의 형태의 적층구조를 갖는 iron 코어를 사용하였다. 또한 영구자석에 의한 누설 자속을 줄이기 위해 고정자 코어를 길이를 영구자석의 깊이 보다 20%크게 선정하였다.

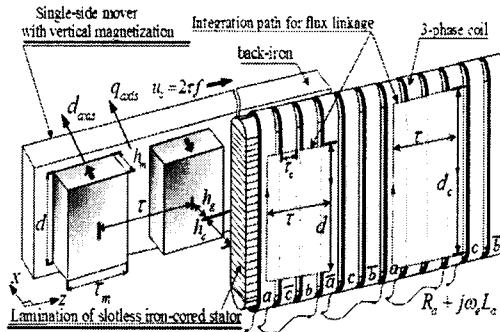


그림 1. double-side 가동자와 slotless laminated-core를 갖는 직선형 영구자석 동기 전동기의 모델

표 1. 직선형 영구자석 동기 모터의 설계 요구사항

Required design parameters and conditions	Value of parameters
Rated thrust [N]	50
Rated Speed [m/sec]	2
Rated Current [A]	2
Pole pitch [mm]	33
Total length [mm]	1000
Air gap [mm]	2

제시된 모델의 일정한 y방향의 깊이에 대해 2차원 해석에 있어서, 일정한 극 간격 τ 에 대해 영구자석 및 코일의 길이는 각각 r_m, r_c 로 주어졌으며, 높이는 h_m, h_c 로 제시되어 있다. 또한 제시된 모델에 있어서 고정자의 고정 좌표계 (x, y, z)에 대해 영구자석 가동자는 수직 방향으로 $h_g + h_c$ 의 높이를 갖으며, 수평방향으로 z_0 로 변위되는 가동 좌표계 (x', y', z')를 갖는다[2]. 여기서, h_g 는 공극의 높이이며, z_0 는 부하각이다. 해석을 위한 가정에 있어서 영구 자석 및 코일의 투자율은 공기와 같으며 철심의 투자율은 ∞ 로 가정하고 공극과 단부의 누설 자속은 무시한다.

2.1 영구 자석의 자계 분포 해석

그림 1의 설계를 위한 해석에 있어서 우선, 본 논문은 영구자석 및 코일의 전자기적 현상에 대해 자기적 전달 관계와 경계 조건에 의한 베타 페텐셜을 이용하여 해석적 방법으로 모터 파라미터의 특성을 추정하였다. 여기서, 수직 자화 배열을 갖는 영구 자석 및 코일은 무한 주기 2π 를 갖는 지수함수 푸리에 급수에 의한 자화량과 전류 밀도 분포에 대해 식(1)과 같이 표현된다[1].

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

여기서, M_{xn} 은 자화의 세기 M_0 를 갖는 수직 방향 자화 푸리에 계수이며, $k_n = \pi n / \tau$ 로 주어지는 n 차 공간고조파이다. 자화의 세기 M_0 는 영구자석의 비투자를 $\mu_r = 1$ 로 가정하면 $M_0 = B_s / \mu_0$ 로 주어진다. 여기서 영구자석의 잔류 자속밀도는 1.23 [T]를 사용하였다. 또한 코일의 경우 y 방향의 전류 밀도량에 대해 z 축 방향에 대한 분포를 갖는다. 그러한 자화 분포에 대해, 영구자석 내부의 자속 밀도 특성식은 식(2)의 Poisson 방정식에 의해 영구자석 높이 h_m 와 수직 자화 M_{xn} 이 포함된 벡터 페텐셜과의 전달관계로 표현되며, 코일은 높이 h_c 에 대한 전류 밀도 J_{yn} 이 포함된 전달관계로 표현된다[2].

$$\frac{\partial A_{yn}}{\partial x^2} + \frac{\partial A_{yn}}{\partial z^2} = -j\mu_0 (J_{yn} + \frac{\partial}{\partial z} M_{xn}) \quad (2)$$

여기서, 코일 내부를 포함한 공극 내부의 전달관계는 식(2)에 있어서 공극의 높이 $h_g + h_c$ 와 자화 소스를 포함하지 않는 전달관계를 얻는다. 이러한, 영구 자석과 공극의 전달관계에 의한 방정식에 있어서, 각 경계면의 벡터 페텐셜을 얻기 위한 경계 조건은 철심을 고려하여 식(3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}B_{zn}^{(b)} &= 0 \\ B_{zn}^{(g)} &= 0 \\ A_{yn}^{(a)} &= A_{yn}^{(b)} \\ A_{yn}^{(c)} &= A_{yn}^{(d)} \\ -B_{zn}^{(a)} + B_{zn}^{(b)} &= 0 \\ -B_{zn}^{(c)} + B_{zn}^{(d)} &= 0\end{aligned}\quad (3)$$

여기서, 철심의 투자율이 ∞ 로 가정되어 철심 경계면의 수평 성분의 자속밀도는 0이 되며, 각 경계면의 벡터 페텐셜과 자속밀도의 연속성에 의해서 구해질 수 있다. 그러므로 식(2)와 식(3)의 전달관계와 경계조건에 의해 영구 자석과 코일에 의한 공극으로의 일반화된 벡터페텐셜은 식(4)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}A_{yn}^{pm} &= \frac{M_m (e^{2k_n h_m} + e^{-2k_n h_m} - 2)(e^{-k_n(h_g+h_c)} e^{k_n x'} + e^{k_n(h_g+h_c)} e^{-k_n x'})}{2jk_n \{(e^{2k_n h_m} - 1)e^{k_n(h_g+h_c)} + (e^{-2k_n h_m} - 1)e^{-k_n(h_g+h_c)}\}} \\ A_{yn} &= \frac{1}{2k_n^2} 2 - e^{-\pi c} (e^{\pi c} + e^{-\pi c}) \quad (0 < x < h_c)\end{aligned}\quad (4.2)$$

식(4)의 일반화된 벡터 페텐셜은 $B = \nabla \times A$ 에 의해 자속밀도를 유도한다[1].

2.2 영구자석 체적 및 코일 턴수에 따른 모터 설계

식(4)에 대한 벡터 페텐셜은 자속밀도의 검증에 의한 정확한 쇄교자속과 회로정수의 계산에 이용되어 진다. 표 1에 대한 초기 설계 조건에 대해 수식 4.1에 의해 그림2와 그림 3은 영구 자석의 자석밀도를 최적화하기 위한 영구 자석의 높이에 따른 자속밀도와 길이에 따른 자속밀도 특성을 보여주고 있다.

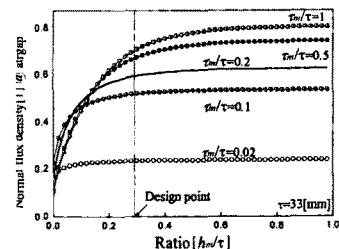


그림 2. 영구자석 높이에 따른 공극의 수직 자속밀도 변화

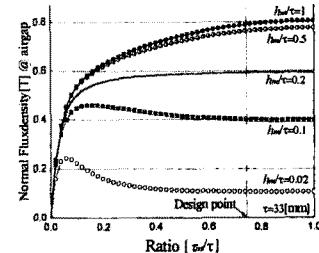


그림 3. 영구자석 길이에 따른 공극의 수직 자속밀도 변화

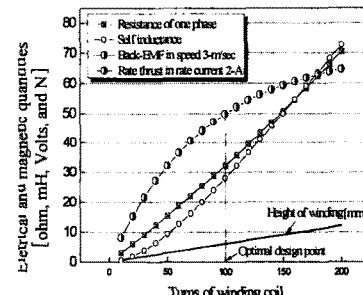


그림 4. 코일 턴수에 따른 전기자기적 물리량 산정

해석 모델의 전기적 회로 등과 모델에 있어서 전자기적 모터 정수는 고정자 코일로 쇄교하는 영구 자석에 의한 자속과 전류에 의한 자속에 의해 얻어질 수 있다. 폐곡면 S 를 쇄교하는 자속은 공극으로의 일반화된 벡터 페텐셜에 의해 선 적분으로 식(5)와 같이 얻어진다.

$$\lambda_{pm} = p_m d u n_0 \sum_{n=1}^{\infty} \int_{-h_z}^{h_z} 2 e^{-jk_n z} dz \int_{h_z}^{h_g+h_c} A_{yn(x)} dx \quad (5.1)$$

$$\lambda_{coil} = p_s d_c u n_0 \sum_{n=1}^{\infty} \int_{-h_z}^{h_z} 2 e^{-jk_n z} dz \int_0^{h_c} A_{yn(x)} dx \quad (5.2)$$

여기서, n_0 은 단위 면적당 턴 수이며, p_m, p_s 는 영구자석과 코일의 극 쌍 수이며, d, d_c 는 각각 가동자와 고정자의 깊이이다. 여기서 수식 (5)에 의한 영구 자석과 전류 밀도에 의한 한상 코일의 상당 쇄교 자속은 역기 전력과 인덕턴스를 산출하는 요소로 식(6)과 같이 계산되어진다.

$$V_{emf} = \frac{d\lambda_{pm}}{dt} = \frac{dz_0}{dt} \frac{d\lambda_{pm}}{dz_0} = u_z \frac{d\lambda_{pm}}{dz_0} \quad (6.1)$$

$$L_{self} = \lambda_{coil} / i_s \quad (6.2)$$

여기서, 영구 자석에 의한 코일의 쇄교 자속은 고정자 코일의 상대 좌표로서 부하각 z_0 로 분포되어 식 (6.1)과 같으며, 코일의 전류에 의한 상당 자기 인덕턴스는 전류 밀도에 의해 코일에 쇄교하는 자속량으로 식 (6.2)와 같이 얻어진다. 이러한 전자기적 변화량에 대해 그림 4는 코일 턴수의 변화에 따른 모터 파라미터들의 변화량을 보여주고 있으며, 본 논문은 요구 추력을 만족하기 위한 최적점에 있어서 모터 설계를 이루었다.

그러므로 본 논문에서 설계된 PMLSM의 기하학적 설계변수는 영구자석 높이 10 [mm], 영구자석 길이 25 [mm], 영구자석 깊이 40 [mm]로 선정하였으며, 코일 턴수 100턴, 길이 10 [mm]에 있어서 코일 높이 6[mm] 일 때 정격 전류 2 [A]시 50 [M]을 만족한다.

3. 시스템 정격 설정

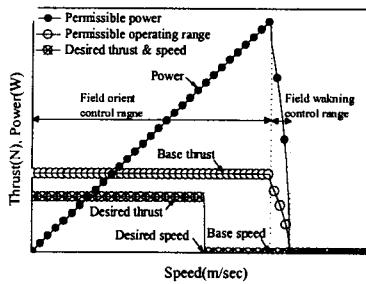


그림 5. DC link 전압에 의한 PMLSM의 시스템 정격 설정

PMLSM 시스템의 요구 추력에 대한 정격 속도는 DC 전압의 이용률에 의해 결정이 되며, 본 논문에서 사용된 정격 또는 요구 추력, 속도 profile를 위해 base에 의한 시스템의 최대 추력, 속도 profile를 적용하였다. 여기서, 코일선의 정격 전류 밀도를 $6 [A/m^2]$ 로 선정하였을 때, 지름 0.65 [ϕ] 코일선에 흐를 수 있는 정격은 $2 [A]$ 가 되며, 최대 순간 흐를 수 있는 전류는 $2.8 [A]$ 로 선정하였다. 그러므로 시스템이 가질 수 있는 최대 동작 범위는 base 전류 $2.8 [A]$ 에 선정 되며, 공간 벡터 PWM에 의한 DC link 전압의 이용률에 의한 base 추력, 속도는 $i_d=0$ 일 때 식 (7)과 같이 얻어진다.

$$\begin{cases} F_{base} = K_T i_{q_max} \\ U_{base} = \sqrt{(V_{dc} / \sqrt{3} - R_s i_{q_max})^2 / (k_s^2 + (L_s \pi i_{q_max} / \tau)^2)} \end{cases} \quad (7)$$

여기서, q 축의 전류 성분은 surface-mounted 영구자석 표면 부착형 모터에 대한 동특성 전압방정식의 $d-q$ 변화에 의한 추력 성분 식 만을 나타낸 것으로 각각의 계수는 앞에서 계산된 모터 파라미터의 계산 값에 의해서 얻어진다. 또한 파라미터의 상호 관계에 의해서 추력상수 K_T 는 역기전력 상수 $3/2K_e$ 에 의해 얻어 지며, 역기전력 상수 K_e 는 가동자의 속도 1 [m/sec]에 의한 역기전력 과형의 최대값에 의해 얻어진다. 또한 동기 인덕턴스는 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스의 합에 의해 $3/2L_{self}$ 에 의해 얻어진다. 그러므로 인가 소스의 주파수가 최대 역기전력 속도와 같아지는 지점을 경계로 식 (8)과 같이 시스템 최대 추력, 속도 곡선은 얻어진다.

$$\begin{cases} F_{base} \quad (u_s \leq U_{base}) \\ F_{base} = \frac{\sqrt{(V_{dc} / \sqrt{3} - R_s i_{q_max})^2 - (k_s u_s)^2}}{(L_s \pi u_s / \tau)} \quad (u_s \geq U_{base}) \end{cases} \quad (8)$$

식(8)에 의한 base 추력, 속도 file은 그림 5와 같이 제시된다.

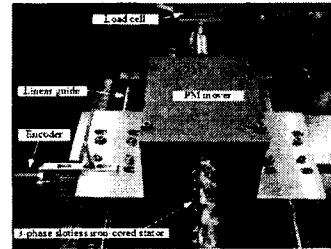


그림 6. 제작된 직선형 영구자석 동기 전동기

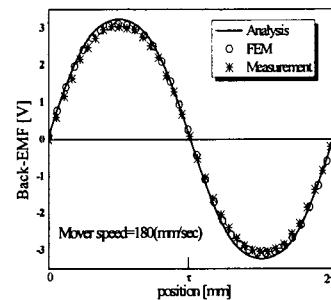


그림 7. 해석에 대한 역기전력 과형의 실험 및 FEM 비교: 가동자의 속도 180-(mm/sec).

표 2 해석과 실험 결과에 대한 모터 파라미터 비교

	실험 결과	해석 결과
저항 [Ω]	33.386	32.285
상 인덕턴스 [mH]	32.85	28.1
상호 인덕턴스 [mH]	16.425	14.05
동기 인덕턴스 [mH]	49.275	42.15
역기전력 상수 [Vsec/m]	16.7	17.2
추력 상수 [N/A]	24.75	25.8
DC link 전압 [V]	.	270
Base thrust [N]	.	70.5
Base speed [m/sec]	.	2.9

그림 6과 그림 7은 설계에 의한 제작된 double-side PMLSM을 보여주고 있으면, 역기전력에 대한 해석적 결과와 실험 결과가 일치함을 알 수 있었다. 또한 표 2의 파라미터에 대한 해석과 실험 값 비교에 의해 해석의 타당성을 알 수 있다. 여기서 상 인덕턴스의 15%차이는 누설을 고려하지 않은 인덕턴스이기 때문에 해석상의 오차는 2%미만으로 간주한다.

4. 결 론

본 논문은 공간 고조파의 해석적 방법을 통하여 벡터 페텐셜을 계산하였고 구해진 벡터 페텐셜을 바탕으로 영구자석과 코일 턴수에 따른 자기 특성 및 역기전력과 인덕턴스의 변화 특성을 얻었다. 또한 동특성 방정식에 의한 시스템의 최대 추력, 속도를 요구된 속도, 추력 특성을 만족하기 위한 시스템적 설계를 제시하였다. 그러므로 본 논문은 직선형 영구자석 동기 전동기의 파라미터와 DC link 전압 이용률에 의한 최적 설계시 사용되어 진다.

[참 고 문 헌]

- [1] Seok-Myeong Jang, Sung-Ho Lee "Comparison of Two Types of PM Linear Synchronous Servo and Miniature Motor With Air-Cored Film Coil" IEEE Trans. Magn. Vol.38, No.5, pp. 3264-3266, Sept. 2002
- [2] David L. Trumper, Won-jong kim, "Design and Analysis Framework for Linear Permanent-Magnet Machines." IEEE Trans. Magn. Vol.32, No.2, pp.371-379, March/April 1996