

서보 시스템 적용을 위한 직선형 영구자석 동기 전동기의 설계 및 동특성

장 석명, 유 대준, 장 원범, 박 지훈  
충남대학교

Design and Dynamic Analysis of Permanent Magnet Linear Synchronous Machine for Servo Application

Seok-Myeong Jang, Dae-Joon You, and Won-Bum Jang  
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

**Abstract** - In servo system demanding precision dynamic characteristics, application of the Permanent Magnet Linear Synchronous Machines (PMLSM) has advantage of analysis convenience by simple geometry and thrust ripple reduction from the sinusoidal back electromotive force and excited stator. Therefore, this paper presents design of surface-mounted PMLSM with slotless iron-cored stator according to coil turns to satisfy the rate thrust. Also, from dynamic analysis for servo application of manufactured motor with heavy mass, we offer accurate range of the DC link voltage and acceleration in rate speed. This is applied to speed reference profile considering system characteristics in total length of moving position.

1. 서 론

질량을 갖는 물체와 가동자를 움직이기 위한 서보 시스템을 비롯한 직선형 운동을 필요로 하는 산업현장에 있어서, 직선형 영구자석 동기 전동기는 설계 파라미터와 동특성 해석에 의하여 요구된 추력과 속도를 충족시키기 위하여 사용되어져 왔다. 따라서 본 논문은 안정된 속도를 위하여 detent force가 없으며, 추력 효율을 최대한 높이기 위하여 양측식 영구자석 가동자와 슬롯리스 철심형 고정자를 갖는 직선형 영구자석 동기 전동기의 설계에 대해 제시한다[1].

설계를 위한 첫 번째 절차로서, 영구자석의 자화량과 코일의 전류 밀도에 의한 자기적 field에 대해 2차원 공간 고조파법에 의한 자계의 해석을 제공한다. 여기서, 자계 해석에 의한 magnetic vector potential은 역기전력과 인덕턴스와 같은 설계 파라미터의 추정을 위한 목적함수로 이용되어진다[2]. 두 번째 절차로서, 50[N]의 요구 추력을 만족하기 위하여 고정된 극 간격과 공극에 있어서 영구자석의 높이와 길이에 따른 자속 밀도의 선정과 코일 높이에 따른 최적화에 대해 본 논문은 다룬다. 요구 추력을 만족하기 위한 노력에 있어서 영구자석과 코일 높이의 선정은 역기전력의 모델링에 있어서 중요한 특성을 갖으며, 이는 추력의 추정에 대해 역기전력은 전기적 반작용으로서 정의 된다. 마지막으로, 제작된 직선형 동기 전동기에 대해 정격 속도 1(m/sec)의 구동을 위한 속도 프로파일과 속도 특성에 대해 본 논문은 실험 결과를 제공한다.

그러므로, 본 논문은 요구 추력과 속도를 만족하기 위한 설계 파라미터의 추정과 동특성 해석으로부터, 서보 시스템 적용을 위한 직선형 영구자석 동기 전동기의 설계 및 속도 특성에 대해 제시한다.

2. 직선형 영구자석 동기 전동기의 설계

2.1 설계 모델의 선정

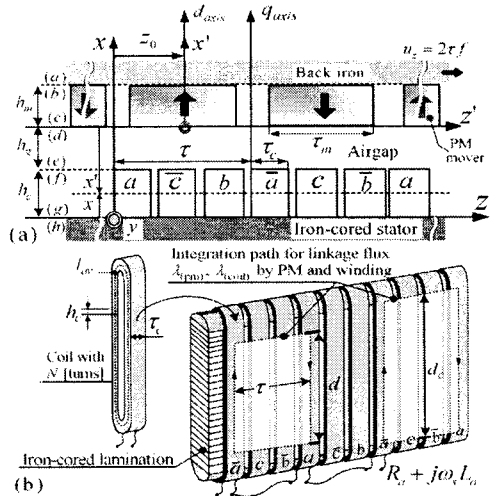


Fig. 1. (a) Analysis framework on single side of slotless iron cored PMLSM with double-side mover and (b) stator geometry for double sided mover.

특성 해석을 위한 모델의 기하학적인 구조는 그림 1과 같다. 가동자의 경우 추력 특성을 높이기 위한 양측식 영구자석 수직 자화 배열을 선정하였으며, 고정자의 경우 detent force를 제거하기 위하여 슬롯리스의 형태의 적층구조를 갖는 iron 코어를 사용하였다. 또한 영구자석에 의한 누설 자속을 줄이기 위해 고정자의 깊이를 영구자석의 길이 보다 충분히 넓게 설계 되어 졌다.

제시된 모델의 일정한 y방향의 길이에 대해 2차원 해석에 있어서, 일정한 극 간격  $\tau$ 에 대해 영구자석 및 코일의 길이는 각각  $\tau_m, \tau_c$ 로 주어졌으며, 높이는  $h_m, h_c$ 로 제시되어 있다. 또한 그림. 1의 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. 여기서,  $h_g$ 는 공극의 높이이며,  $z_0$ 는 부하각이다. 해석을 위한 가정에 있어서 영구자석 및 코일의 투자율은 공기와 같으며 철심의 투자율은  $\infty$ 로 가정하고 공극과 단부의 누설 자속은 무시한다[2].

2.2 설계를 위한 목적함수

그림 1의 설계를 위한 자체해석에 있어서 우선, 본 논문은 영구자석 및 코일의 모델링을 거쳐 전자기적 현상에 대해 자기적 전달관계와 경계 조건에 의한 벡터 퍼텐

설을 계산하였다. 여기서, 그림 1에 대한 영구 자석과 코일의 지배방정식은 식(1)과 같이 유도된다[2].

$$\frac{\partial A_{yn}}{\partial x^2} + \frac{\partial A_{zn}}{\partial z^2} = -j\mu_0 (J_{yn} + \frac{\partial}{\partial z} M_{zn}) \quad (1)$$

여기서, 수직 자화 배열을 갖는 영구 자석 및 3상 코일은 무한 주기를 갖는 지수함수 푸리에 급수로 모델링되어,  $M_{zn}$ 은 자화의 세기  $M_0$ 를 갖는 수직 방향 자화 푸리에 계수로서, 자화의 세기  $M_0$ 는 영구자석의 비투자율  $\mu_r=1$ 로 가정하면  $M_0=B/\mu_0$ 로 주어진다. 여기서, 영구자석의 잔류 자속밀도는 1.23 [T]를 사용하였다. 또한 코일의 경우 y방향의 전류 밀도량에 대해 z 축 방향에 대한분포를 갖는다. 그러한 자화 분포에 대해, 식 (1)의 Poisson 방정식은 영구 자석, 공극, 코일에 있어서 각각의 높이가 고려된 자속 밀도와 벡터 포텐셜의 관계로 이루어진 내부의 전달 관계를 갖는다.

또한, 철심의 투자율이  $\infty$ 로 가정되어 철심 경계면에서의 수평 성분의 자속밀도는 0를 갖는 경계조건에 과 자체의 연속성에 의해 식(1)의 지배방정식은 식(2)와 같은 영구 자석 및 전류 코일에 의한 공극으로의 일반화된 벡터 퍼텐셜을 얻는다.

그러한 전달관계와 경계 조건은 Reference [1]과 [2]에 있어 이미 제시한바 본 논문에 있어서는 전달관계와 경계 조건에 의한 벡터퍼텐셜의 결과만 제시한다.

$$A_{zn} = \frac{M_{zn}(e^{2k_n h_m} + e^{-2k_n h_m} - 2)(e^{-k_n(h_g+h_c)} e^{k_n x} + e^{k_n(h_g+h_c)} e^{-k_n x})}{2k_n \{(e^{2k_n h_m} - 1)e^{k_n(h_g+h_c)} + (e^{-2k_n h_m} - 1)e^{-k_n(h_g+h_c)}\}} \quad (0 < x < h_g + h_c) \quad (2.1)$$

$$A_{yn} = \frac{H_{yn}}{2k_n} (2 - e^{2k_n t} (e^{k_n x} + e^{-k_n x})) \quad (0 < x < h_c) \quad (2.2)$$

여기서,  $h_m$ 은 영구자석의 높이,  $h_g$ 는 공극,  $h_c$ 는 코일의 높이를 의미하며,  $k_n = \pi n / \tau$ 로 주어지는  $n$ 차 공간고조파이다. 식 (2)의 일반화된 벡터 퍼텐셜은  $B = \nabla \times A$ 에 의해 자속밀도를 유도한다.

### 2.3 설계 파라미터의 추정

영구자석 동기 모터의 전기적 모델링을 위한 노력에 있어서, 본 논문은 저항과 자기적 인덕턴스로 이루어진 인덕턴스 부분과 가동자의 영구 자석으로부터 얻어진 역기전력 부분에 의해 식 (3)과 같이 모델링 된다[1].

$$V_s = P_s \frac{J_0}{\sigma} l_{av} + \frac{d\lambda_{(coil)}}{dt} + \frac{d\lambda_{(pm)}}{dt} \frac{dz_0}{dt} = R_s I_s + pL_{self} I_s + V_{emf} \quad (3)$$

식(3)의 전기적 회로 등가 모델에 있어서 전자기적 모터 정수는 고정자 코일로 채교하는 영구 자석에 의한 자속과 전류에 의한 자속에 의해 얻어질 수 있다. 폐곡면 S를 채교하는 자속은 공극으로의 일반화된 벡터 퍼텐셜에 의해 선 적분으로 식 (4)와 같이 얻어진다.

$$\lambda_{pm} = \mu_m d w \eta_0 \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\omega_c} 2e^{-ik_n z} dz \int_{h_g}^{h_g+h_c} A_{zn(x)} dx \quad (4.1)$$

$$\lambda_{coil} = \mu_s d c w \eta_0 \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\omega_c} 2e^{-jk_n z} dz \int_0^{h_c} A_{yn(x)} dx \quad (4.2)$$

여기서,  $\eta_0$ 는 단위 면적당 턴 수이며,  $\mu_m, \mu_s$ 는 영구자석과 코일의 극 쌍 수이며,  $d, d_c$ 는 각각 가동자와 고-

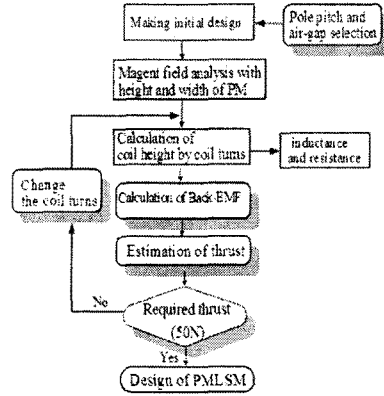


Fig.2. Flow chart for required thrust with PM size and coil turns.

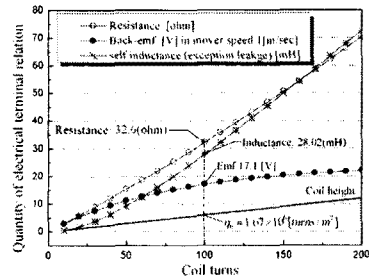


Fig.3. Quantity of electrical terminal relation in one phase according to coil turns.

-정자의 깊이이다. 여기서 수식 (4)에 의한 영구 자석과 전류 밀도에 의한 한상 코일의 상당 채교 자속은 역기전력과 인덕턴스를 산출하는 요소로 식 (5)와 같이 계산되어지며, 여기서의 물리량은 양측식 가동자에 의해 2배의 값을 갖는다.

$$V_{emf} = \frac{dz_0}{dt} \frac{d\lambda_{pm}}{dz_0} = \max\left(\frac{d\lambda_{pm}}{dz_0}\right) u_z = k_e u_z \quad (5.1)$$

$$L_{self} = \lambda_{coil} / i_s \quad (5.2)$$

여기서,  $k_e$ 는 가동자의 속도 1(m/sec)에 있어서, 상당 역기전력 상수를 의미하며,  $i_s$ 는 코일의 상당 전류를 나타낸다.

### 2.4 요구 추력을 위한 PMLSM의 설계

그림. 2는 요구된 추력을 만족하기 위한 설계 차트를 보여주고 있다. 여기서, 최적 설계를 위한 첫 번째 절차로서 추력 효율을 높이기 위한 영구자석의 높이와 길이에 따른 자속밀도 특성을 고정된 극 간격과 공극의 높이에 있어서 계산한다. 또한, 결정된 영구자석의 크기에 있어서 코일 턴수에 따른 전기적 회로 등가 모델의 설계 파라미터를 추정하고, 요구된 추력을 만족시킨다.

본 논문에서 설계된 PMLSM의 기하학적 설계변수는 극간격 33[mm], 공극 2[mm]에 있어서, 영구자석 높이 10 [mm], 영구자석 길이 25 [mm], 영구자석 깊이 40 [mm]로 선정하였으며, 그림. 3에서와 같이, 코일 턴수 100턴, 길이 10 [mm]에 있어서 코일 높이 6[mm]일 때 50[N]을 만족하기 위한 설계 최적점으로 계산하였다. 여기서, 상당 역기전력 17.1[V]의 전기적

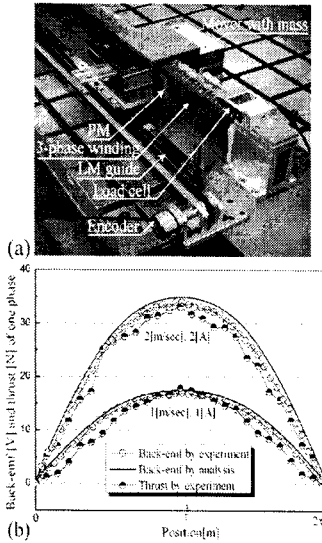


Fig.3. (a) Manufacture model of slotless iron cored PMLSM with double side mover and (b) verification of Back emf and d thrust in design point.

표. 2 해석과 실험 결과에 대한 모터 파라미터 비교

설계 변수	실험 결과	해석결과
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

반작용으로서 3상 코일의 1[A]에 대한 추력 상수는 25.5[N/A]이며, 코일의 정격 전류 2[A]에 대해 50[N]을 만족한다.

그림. 3(a)는 설계에 의한 직선형 영구자석 동기 전동기의 제작된 모델을 보여 주고 있으며, 가동자의 양쪽에 질량을 올리수 있도록 설계 되어지고, 속도제어를 위하여 엔코더를 부착하였다. 제작된 모델에 대한 역기전력과 추력 특성에 대해 그림. 3(b)는 보여주고 있다. 여기서, 상당 1[A]의 추력은 1[m/sec]에 있어서 역기전력과 같음을 보여준다. 또한, 표. 1의 파라미터에 대한 해석과 실험 값 비교에 의해 해석의 타당성을 알 수 있다. 여기서 상 인덕턴스의 15%차이는 해석에 있어서, 코일의 end turn의 누설을 고려하지 않은 인덕턴스이기 때문에 해석상의 오차는 2%미만으로 간주한다.

### 3. 속도 프로파일에 따른 속도 특성

표면 부착형 영구자석 동기 전동기의 경우 3상 코일이 갖는 전기적 회로 방정식에 대해 2상 d-q 변환은 일정한 속도 제어와 전류 제어를 가능하게 되며, 동특성 해석을 위한 모델링을 식 (6)과 같이 가능하게 한다[1].

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p(L_{self} + L_m) & -\omega_s(L_{self} + L_m) \\ \omega_s(L_{self} + L_m) & R_s + p(L_{self} + L_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_e u_s \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서,  $L_m$ 은 3상 코일이 갖는 상호 인덕턴스로 3상 코일의 120도 간격 차에 의해 자기 인덕턴스에 -1/2값을 갖는다.

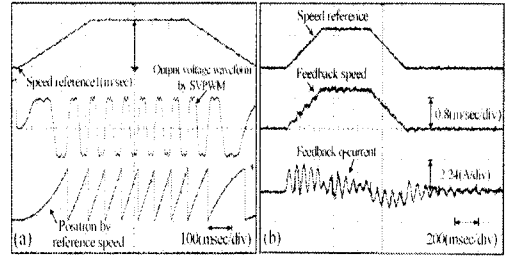


Fig.4. (a) Output voltage waveform in open system and (b) operating characteristics of feedback system by speed reference profile.

식(6)에 있어서,  $d$ 축 전류를 0으로 제한으로써 일정한  $q$ 축 전류에 의한 추력 제어를 위해서는  $d$ 축 전압이 필요함을 알 수 있으며, 인가전압에 대한  $d$ 축,  $q$ 축 성분에 의하여 DC link 전압이 계산되어짐을 알 수 있다. 즉  $d$ 축 전류 제어시, 인가전압에 대한 직선형 모터의 회로 정수에 의한 전압 강하는 식 (7)와 같이 표현 된다.

$$V_1^2 = \left( \frac{\pi L_s F_c}{\tau k_T} u_s \right)^2 + \left( R_s \frac{F_c}{k_T} + k_e u_s \right)^2 \quad (7)$$

여기서,  $F_c$ 는  $q$ 축 전류에 의한 전기적 힘이며,  $L_s$ 는 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스의 합에 의한 동기 인덕턴스이다. 또한 필요한 상전압  $V_1$ 에 대해 DC link 전압은 공간 벡터 PWM에 있어서, 최대 Modulation Index  $1/\sqrt{3}$ 을 갖는다. 따라서, 정격 추력 50[N]과 정격 속도 1[m/sec]로의 가동자의 동작을 위해서는 DC link 전압 145[V]를 필요로 한다.

서보 시스템 적용을 위해 본 논문에서 사용된 가동자와 질량을 갖는 물체의 총 무게는 13.9[Kg]를 사용하였으며, damping 계수  $B_m = 3.5(N \cdot sec)$ 에 있어서 기계적 방정식에 의해 식(8)과 같이 표현된다.

$$a_m = (K_T \times i_q - B_m \times u_s) / M_m \quad (8)$$

여기서, 기계적 가속은  $3.34[m/sec^2]$ 이 얻어진다.

그림 4는 동특성 해석에 따른 속도 프로파일에 따른 개루프 상태의 속도, 전압, 위치 곡형을 (a)에서 보여 주며, 그림 (b)은 개루프 상태의 속도 프로파일에 따른 폐루프의 속도, 전류 특성을 보여준다. 여기서, 속도 프로파일은 잘 추종하나 무게의 증가에 의한 전류는 맥동을 갖는 것을 보여준다.

### 4. 결 론

본 논문은 공간 고조파의 해석적 방법을 통하여 벡터 퍼텐셜을 계산하였고 구해진 벡터 퍼텐셜을 바탕으로 영구자석과 코일 턴수에 따른 자기 특성 및 역기전력과 인덕턴스의 변화 특성을 얻었다. 또한 얻어진 설계 변수에 있어서 동특성 해석을 통한 속도 프로파일의 계산과 실험을 제시하였다.

#### [참고 문헌]

- [1] 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
- [2] Seok Myeong Jang, Dae Joon You "Practical Parameter estimation through space harmonic method and experiment magnet linear synchronous motor for high accuracy field orient control" JAP. Vol.97, pp. 10N517, 2005