

Halbach 배열을 갖는 공심형 PMLSM의 동특성 해석

장석명, 장건우, 이성호
충남대학교

Dynamic Analysis and Control Simulation of the Air-Core PMLSM with Halbach Arrays

Seok-Myeong Jang, Kun Woo Chang, Lee Sung Ho
Chungnam National Univ.

Abstract - This paper deals with a dynamic analysis and a position control for air-core type linear synchronous motor with Halbach array (HA) permanent magnet mover. The primary coils are designed to be air-cored, so the HA-PMLSM don't exist the detent force. The secondary HA array of PMs does not require any ferro-magnetic yoke and excites stronger magnetic flux density and closer to the sinusoids than a conventional PM array.

1. 서 론

영구자석 선형동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor : 이하 PMLSM)는 짧은 범위의 스트로크를 갖는 로봇, 공작기계, Stirling 엔진의 구동 액추에이터, 웨이퍼 이송장치 등에 적용되어져 왔다 [1][2].

슬롯이 있는 PMLSM은 영구자석과 전기자의 치 사이에 상호작용으로 디턴트력이 존재한다. 이러한 디턴트력은 전동기의 추력맥동의 원인이 되어, 기기의 진동을 유발할 뿐만 아니라 기기의 제어성능을 악화시킨다. 이에 반해 1차축을 공심형으로 하면 디턴트력이 존재하지 않지만, 코어를 갖는 슬롯형에 비해 에너지 효율이 떨어지는 단점이 있다.

이러한 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 2차축 영구자석을 일반배열이 아닌 Halbach 배열을 적용하였다. Halbach 배열은 일반배열에 대해 다음의 이점을 갖는다. : 일반적인 영구자석배열에 비해 공극 자속밀도가 $\sqrt{2}$ 배 크다. 또한 정현적인 자계가 발생되므로, 간단한 제어구조를 가지게 된다[3][4][5].

본 논문에서는 제어성을 고려하여 디턴트력이 존재하지 않도록 1차축을 공심형으로 하고 2차축 영구자석을 Halbach 배열로 한 PMLSM의 동특성 해석 결과 및 제어 시뮬레이션 결과를 제시하고자 한다.

2. 공심형 HA-PMLSM의 구조 및 회로정수 산출

2.1 HA-PMLSM의 구조

HA-PMLSM은 그림 1과 같은 구조를 갖는다. Halbach 배열의 영구자석 2차축은 4극으로 구성되었고, 1차축은 공심형으로 구성되어 있다.

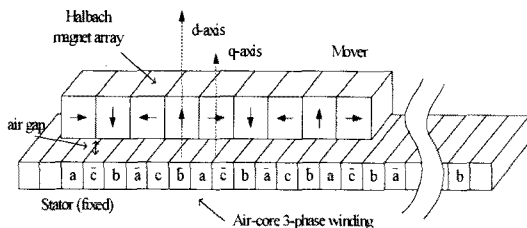


그림 1. 공심형 HA-PMLSM의 구조

그림 2와 표 1은 1차축 코일의 형상과 치수를 각각 나타낸 것이다.

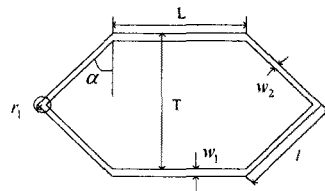


그림 2. HA-PMLSM 코일의 형상

표 1. HA-PMLSM의 치수

Parameter of the HA-PMLSM			
L	22.7 mm	r1	0.25mm
T	20 mm	w1	1 mm
α	50°	w2	0.5 mm
		l	13.06 mm

2.2 HA-PMLSM의 회로정수 산출

한 상에 대한 유기전압은 식 (1)를 통해 산출 될 수 있다.

$$E_a = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\pi}{\tau} u W_1 k_{w1} \tau L \frac{2}{\pi} B_{yav1} \quad (1)$$

여기서 W_1 은 상당턴수이고, k_{w1} 은 권선계수이다. 그리고 B_{yav1} 은 2차축 영구자석에 의한 평균 공극자속밀도의 크기, u 는 2차축 이동속도, τ 는 극간격이다. 또한 선간 유기전압은 $E = \sqrt{6} E_a$ 이 된다. 그림 3은 속도 0.088 m/s로 2차축을 직선운동 시켰을 경우에 1차축을 개방하여 측정된 유기전압 파형이다.

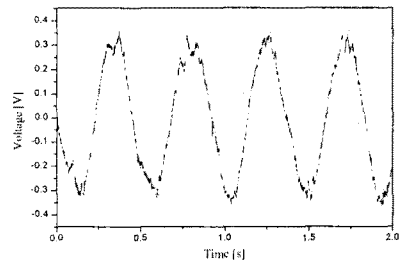


그림 3. 측정된 유기전압파형
1차측의 권선저항 R_s 는 식 (2)로 계산된다.

$$R_s = \rho_{co} \frac{l_{coil} W_1}{A_{co}} \quad (2)$$

여기서, l_{coil} 은 코일의 길이이고, A_{co} 권선의 단면적이다. 상 인덕턴스 L_s 는 끝단의 누설인덕턴스 L_{oe} 와 자화인덕턴스의 합으로 산출된다. 그림 1의 권선분포를 갖는 1차측에서의 자화인덕턴스 M 은 식 (3)을 통해 계산되어진다.

$$M_{3-} = \frac{6\mu_0 (W_1 K_{d1})^2}{\pi^2} \frac{\tau L}{pg} \quad (3)$$

여기서 g 는 공극의 길이이다.

코일 끝단에서의 누설 인덕턴스는 식 (4)와 같다.

$$L_{oe} = \frac{3 W_1^2 \tau}{4p^2 10^7 \pi} k^2_{d1} \times \left[(\tan \alpha) \left(\frac{\beta\pi - \sin \beta\pi}{\pi} \right) + 4.06 k^2_{p1} \left(\ln \frac{8p\tau}{r_1} - 1.75 \right) \right] \quad (4)$$

여기서 $r_1 = h_s/2$ 이고, k_{d1} 은 분포권계수, k_{p1} 단절계수이다. β 는 극 피치당 코일 간격의 비이다.

$$\sin \alpha = (W_s + c)/\tau_s \quad (c : \text{coil clearance}) \quad (5)$$

그러므로 식 (3)과 식 (4)로부터 1차측 상인덕턴스 L_s 는 식 (6)으로 계산된다.

$$L_s = L_{oe} + M_{3-} \quad (6)$$

3. d, q 모델링

HA-PMLSM의 d-q축 전압방정식은 식 (7)과 식 (8)로 표현된다.

$$V_d = i_d R + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega \lambda_q \quad (7)$$

$$V_q = i_q R + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega \lambda_d \quad (8)$$

여기서, d-q축 쇄교자속은 식 (9)와 식 (10)으로 표현된다.

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{PM} \quad (9)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (10)$$

여기서 i_d 와 i_q 는 d-q축 전류를 각각 나타내고, λ_d 와 λ_q 는 d-q축 쇄교자속이다. λ_{PM} 은 2차측 영구자석에 의한 쇄교자속이며, R 과 ω 는 1차측 상저항 및 각주파수이다. 식 (7)에 i_d 를 곱하고 식 (8)에 i_q 를 곱하여 계산하면 식 (11)를 얻을 수 있다.

$$V_d i_d + V_q i_q = i_d^2 R + i_q^2 R + i_d \frac{d\lambda_d}{dt} + i_q \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (11)$$

식 (11)에서 마지막 항이 기계적인 에너지를 표현하므로, 동기속도로 나누어 식 (12)로 표현되는 추력식을 유도할 수 있다.

$$F_x = \frac{\omega}{2\tau f} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) = \frac{\pi}{\tau} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (12)$$

또한 식 (9)와 식 (10)을 식 (12)에 대입하여, 식 (13)으로 표현되는 추력식이 유도된다.

$$F_x = \frac{\pi}{\tau} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) = \frac{\pi}{\tau} \left[\sqrt{\frac{3}{2}} \lambda_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] \quad (13)$$

1차측이 공심형으로 평활하기 때문에, $L_d = L_q$ 의 관계를 갖으며, 식 (13)은 식 (14)로 다시 표현된다.

$$F_x = P \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\pi}{\tau} \lambda_{PM} i_q \quad (14)$$

여기서, P 는 극수이다.

4. 제어 시뮬레이션

그림 4는 d축과 q축으로 분리된 전압방정식을 통해 추력이 도출되는 과정이다. 식 (14)에서처럼 추력은 영구자석의 쇄교자속 λ_{PM} 과 전류 i_q 의 곱으로 나타난다.

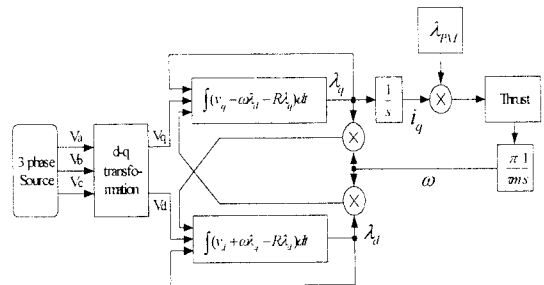


그림 4. 동특성 해석 모델링

모델링된 HA-PMLSM의 위치제어를 위해 그림 5와 같은 제어기를 구성하였다. 지령위치 x^* 와 feedback 되는 위치에 대해 위치제어기를 거쳐 속도로 변환되고, feedback 속도와의 오차가 다시 속도제어기를 거쳐서 추력으로 변환된다. 추력은 식 (15)에서처럼 q축의 전류로 구성된다.

$$F_x = k_f I_q \quad (15)$$

여기서, K_f 는 추력상수이다.

q축의 전류를 이용하여 지령 상전류를 식 (16)과 같이 생성하여 전류제어기에 입력한다.

$$\begin{aligned} i_a^* &= I_q^* \sin \theta_r^* \\ i_b^* &= I_q^* \sin\left(\theta_r^* - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_c^* &= I_a^* + I_b^* \end{aligned} \quad (16)$$

$$\theta_r^* = \frac{\pi}{\tau} \int u_r^* dt \quad (17)$$

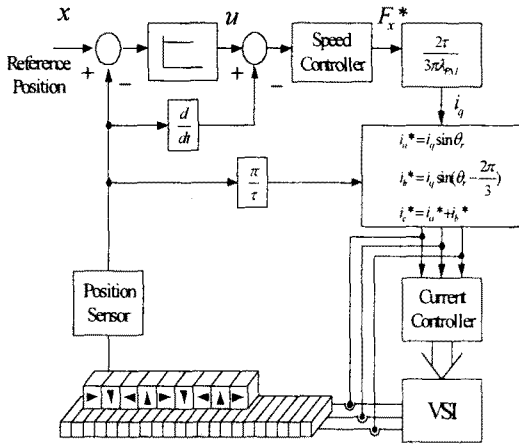


그림 5. 제어 시뮬레이션 블록도

그림 4에서의 동특성 모델링의 해석결과는 그림 6과 같다. 동특성 해석에서의 추력은 입력전압 20 V 와 주파수 10Hz에서 계산된 것이다.

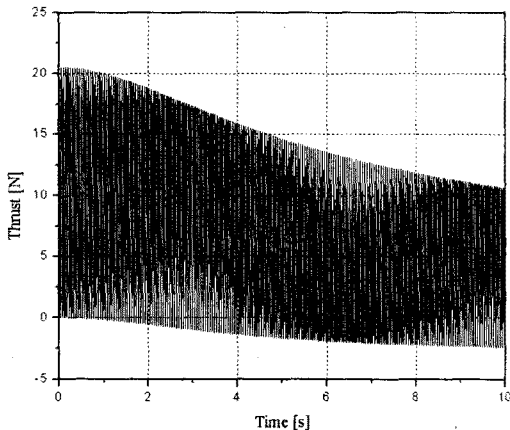


그림 6. 추력특성곡선

위치를 제어한 시뮬레이션의 결과는 그림 7과 같다. 시작기의 길이가 1m 미만으로 설계되어 목표위치는 10 Cm로 하여 시뮬레이션한 결과이다.

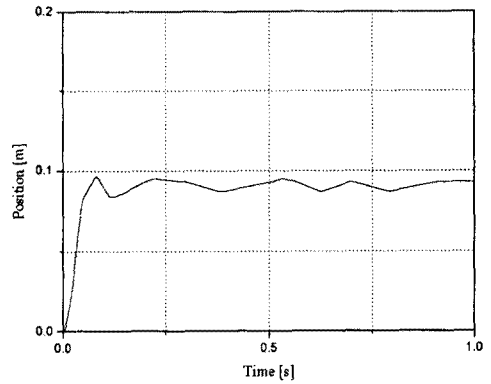


그림 7. 위치응답

6. 결 론

본 논문에서는 제어성을 고려하여 디턴트력이 존재하지 않도록 1차축을 공심형으로 하고, 2차축 영구자석은 일반 배열에 비해 높은 공극자속밀도 및 정현적인 자계분포를 갖도록 Halbach 배열을 사용하였다.

HA-PMLSM의 동특성 해석을 위해 회로정수를 산출하였고, 이로부터 d,q 모델링을 통한 동특성 해석결과를 제시하였다. 또한 위치제어기를 구성하여 위치지령을 추종하는 위치응답결과를 제시하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Ion Boldea, S. A. Nasar, "Field, Forces, and Performance Equations of Air-Core Linear Self-Synchronous Motor with Rectangular Current Control", IEEE Transactions on Magnetics, vol.24, no. 5, Sept. 1988
- [2] David L. Trumper, Won-jong Kim, Mark E. Williams, "Design and Analysis Framework for Linear Permanent-Magnet Machines", IEEE Transaction on Industry Application, 32(2) : 371-379, March/April 1996
- [3] Halbach, K., "Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Covalt Material", Nuclear Instruments and Method, 169, pp 109-117, 1980
- [4] Jacek F. Gieras, "Linear Synchronous Motors", CRC Press., 2000
- [5] 장석명, 윤인기, 이성호, 이종호, "영구자석형 선형 동기전 동기의 디턴트력 저감방식에 관한 특성해석 및 상호 비교", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp 757-759, 2000. 7.
- [6] Z. Deng, I. Boldea, S. A. Nasar, "Forces and Parameters of Permanent Magnet Linear Synchronous machines". IEEE Transactions on Magnetics, vol. 23, no. 1, January 1987