

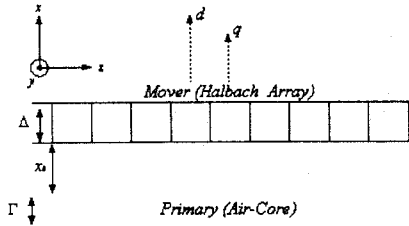
필름코일을 이용한 HA-PMLSM의 모델링 및 벡터제어

장석명, 장건우, 이성호, 정상섭, 진상구, 윤인기
충남대학교 전기공학과

Modeling and Vector Control of HA-PMLSM using film-coil

S. M. Jang, K. W. Chang, S. H. Lee, S. S. Jeong, S. G. Jin, I. K. Yoon
Chungnam National University Electrical Engineering

Abstract - This paper deals with a simulation and a position control for linear synchronous motor with Halbach array (HA) permanent magnet mover. We derived decouple the forces (thrust, normal force) by magnetic field modeling of the electromagnetic field analysis. The results of control simulation for HA-PM having air-core primary are calculated using M Simulink.



1. 서 론

영구자석형 선형동기전동기(Permanent Magn Linear Synchronous Motor : 이하 PMLSM)는 짧은 위의 스트로크를 갖는 로봇, 공작기계, Stirling 엔진의 구동 액추에이터, 웨이퍼 이송장치, SMD Mounter 등 적용되어져 왔다.

슬롯형에 대해 디턴트력을 제거하기 위해 1차축을 공심형으로 하고, 공심형에 의한 에너지 효율의 저하를 보완하기 위해 2차축 영구자석을 일반배열이 아닌 Halbach 배열을 사용하였다. 이 PMLSM의 공심형인 1차축과 Halbach 영구자석배열인 2차축에 대한 전자장 수치해석을 적용하여 자계를 해석하였다. Halbach 영구자석 배열에 대해서는 배열의 형태를 d축과 q축으로 분리하여 각각에 대한 자계를 분리하여 푸리에 급수로 나타내고, 2차축에서는 권선분포에 따른 자계의 형성을 푸리에 급수로 전개하여 나타내었다. 모델링된 자계를 통해 공극자속밀도, 추력 및 수직력에 관해 산출하였다. 해석적 방법으로 유도된 매개변수와 추력, 수직력의 관계식을 통해 d축과 q축으로 분리하여 힘의 관계식을 유도하였다.

본 논문에서는 자계해석을 통해 얻어진 파라미터를 이용하여 dq축 분리에 의한 힘의 관계를 이끌어 내고, 이 운동방정식을 이용하여 동특성 시뮬레이션에 적용하였다. 이를 통해 제어기를 구성하여 벡터제어 시뮬레이션의 결과를 제시하고자 한다.

2. HA-PMLSM의 해석

Halbach 배열은 일반적인 영구자석배열에 비해 $\sqrt{2}$ 배 큰 자계를 형성하고, Halbach 배열은 일반영구자석배열보다 더 정현적인 자계를 생성해 낸다는 것은 알려진 사실이다.

특성해석을 위한 모델의 기하학적인 구조는 그림 1과 같다. 1차축 권선은 두께는 Γ 이고, y방향으로 전류밀도 J 를 갖으며, J 는 무한 푸리에 급수로 표현가능하다.

그림 1. HA-PMLSM의 모델

J_{yn} 은 한 상에 대하여 그림 2와 같이 1차축 전류밀도 가 공간적으로 분포해 있다고 하면, 식 (1)을 통해 푸리에 급수를 구할 수 있다.

$$J_{yn} = \frac{1}{l} \int_0^l J_0 e^{-jk_x z} dz$$

$$= \sum_{n=-\infty, odd}^{\infty} \frac{J_0}{j\pi n} (1 - e^{jn\pi/3}) \quad (1)$$

여기서, J_0 는 1차축 상전류 I_S 와 단위 단면적당 턴수인 η_0 의 곱으로 표현할 수 있다.

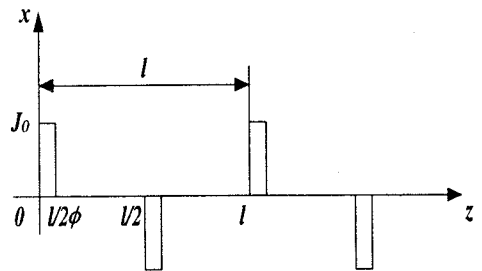


그림 2. 한 상 권선에 대한 1차축 전류밀도의 공간적 분포

J_a 와 J_b 는 고정자 권선의 기본 전류밀도의 실수부와 허수부로 정의하였다. J_q 와 J_d 는 이 전류밀도의 수직과 수평 성분이 된다.

$$J = J_a + jJ_b \quad (2)$$

Habach 배열을 갖는 2차축의 두께는 Δ 이고, 고정자의 좌표계에 대해 벡터 $(x_0 + \Gamma) i_x + z_0 i_z$ 만큼 변위되는 좌표계를 갖는다. 여기서 x_0 는 공극의 길이이고, z_0 는 1차축에 대하여 2차축 Halbach 배열을 갖는 영구자석의 상대적인 변위를 나타낸다. 또한 2차축은 Halbach 배열을 가지므로, 수평성분 z방향 M_{zn} , 수직성분 x방향 M_{xn} 으로 하는 자화성분들을 무한 푸리에 급수로 전개하여 각각 표현가능하다.

$$M_{zn} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{M_0}{2n\pi} (e^{-\beta n\pi/2} - e^{-jn\pi} - e^{-jn\pi/2} + 1) \quad (3)$$

$$M_{xn} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} j \frac{M_0}{2n\pi} (-e^{-\beta n\pi} + e^{-\beta n\pi/2} + e^{-jn\pi} - 4) e^{jn\pi/2}$$

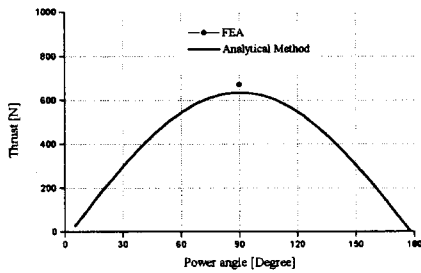


그림 3. 정추력 특성

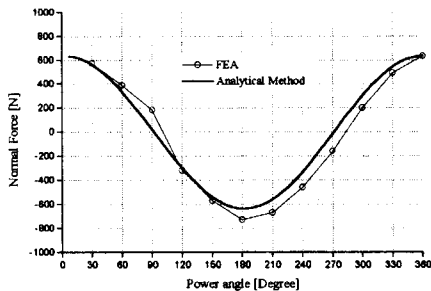


그림 4. 수직력 특성

3. 힘의 방정식

상용의 회전 기기에서 dq 분리는 토크를 생성하는 고정자 전류를 고립하기 위해 도입된다. dq 분리의 원리적 목적은 보통 기준틀에서 고정자와 회전자의 전기적인 동력을 표현하기 위한 것이다. 직접축(d axis)과 수직축(q axis)은 회전자 틀에 고정되어있고 회전자와 회전한다 dq 틀에서 묘사된 힘의 방정식과 정류자는 고정자에 대해 의존하는 위치를 포함하지 않는다.

위에서 유도된 전류밀도 J 에 대하여, 식 (2)와 같은 관계를 가지며 $[J_a J_b]^T$ 에서 $[J_q J_d]^T$ 로 변환한다.

$$\begin{bmatrix} J_q \\ J_d \end{bmatrix} = e^{\gamma_1 z_0} \begin{bmatrix} J_a \\ J_b \end{bmatrix} \quad (5)$$

$\gamma_1 = 2\pi/\Delta$, $e^{\gamma_1 z_0}$ 는 다음에 의해 변환행렬이 된다.

$$e^{\gamma_1 z_0} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_1 z_0 & \sin \gamma_1 z_0 \\ -\sin \gamma_1 z_0 & \cos \gamma_1 z_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

그리고

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

위 식에서 y_0 은 xyz틀에 대해 $x'y'z'$ 틀의 수평 위치이다.

동적 평형상태에서 분리된 힘의 방정식을 유도한다. f_z , $=N_{mf}(z,x)$ 와 $i_{a,b} = 2\eta_0 J_{a,b}$ 관계를 이용하여 순시전류와 i_b 그리고 힘 f_z 와 f_x 사이 관계를 다시 쓴다.

HA-PMLSM에 대해 다음의 힘과 전류의 관계를 가진다.

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \mu_0 M_0 \eta_0 e^{-\gamma_1 x_0} \begin{bmatrix} \cos \gamma_1 z_0 & \sin \gamma_1 z_0 \\ -\sin \gamma_1 z_0 & \cos \gamma_1 z_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (8)$$

수직, 수평의 전류 i_q 와 i_d 에서 측면과 수직의 힘성분을 분리할 수 있다.

$$f_z = \frac{1}{2} \mu_0 M_0 \eta_0 N_m G e^{-\gamma_1 x_0} i_d \quad (9)$$

$$f_x = \frac{1}{2} \mu_0 M_0 \eta_0 N_m G e^{-\gamma_1 x_0} i_q \quad (10)$$

모터 공극 x_0 는 고정되어있고 측면과 수직의 힘은 영구자석자속밀도 $\mu_0 M_0$ 와 고정자 전류 i_q 나 i_d 의 곱으로 결정된다. 이리하여 i_d 는 f_x 를 i_q 는 f_z 를 생성한다.

dq이론의 문단에서 삼상전류밀도 J_A, J_B, J_C 에 대한 정류자를 유도한다. 고정자 전류밀도는 고정자 틀에서 측면위치 y_0 의 함수가 된다.

$$J_x(y) = 2J_a \cos \gamma_1 y + 2J_b \sin \gamma_1 y \quad (11)$$

Blondel-Park 역변환은 균형된 삼상동작에서 $[J_a J_b]^T$ $[J_A J_B J_C]^T$ 사이를 묶는다.

$$\begin{bmatrix} J_A \\ J_B \\ J_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 2\cos \frac{\pi}{3} & 2\sin \frac{\pi}{3} \\ 2\cos \frac{2\pi}{3} & 2\sin \frac{2\pi}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_a \\ J_b \end{bmatrix} \quad (12)$$

위의 변환행렬은 Blondal-Park 역변환으로부터 다성분을 가지고 있다. 위상전류로부터 차이는 발생하고 위의 표현은 이전의 일에서 구성된다.

결국 삼상전류 $[i_a i_b i_c]^T$ 와 고려된 힘 $[f_x f_y]^T$ 에 대한 정류자 법칙은 다음이 된다.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{2e^{\gamma_1 z_0}}{\mu_0 M_0 \eta_0 G N_m} \begin{bmatrix} 1 \\ 1/2 \sqrt{3}/2 \\ 1/2 \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} e^{-\gamma_1 y_0} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} \quad (13)$$

이제 고려된 힘과 전류위상의 관계를 가지게 되었다.

4. 제어 시뮬레이션

위에서 구한 힘의 관계를 통해 제어 시뮬레이션에 적용한다. 모델링된 HA-PMLSM의 입력단에 그림5처럼 전류를 생성하기 위해 식(13)의 추력과 수직력에 관한 식을 적용하여 나타내었다. feedback 변위를 통해 힘의 관계에서 좌표변환이 이루어지며, 제어기는 PI 제어기를 사용하였다.

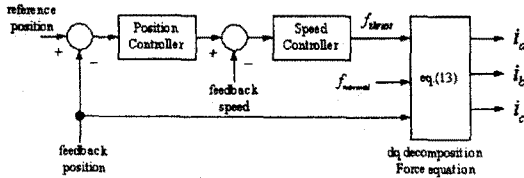


그림 5. 힘의 방정식에 의한 제어부

식 (13)을 적용하기 위한 HA-PMLSM의 파라미터들은 다음의 값을 따른다. $\mu_0 M_0 = 1.1T$, 권선밀도 $\eta_0 = 5.58 \times 10^6 \text{ turns}/m^2$ 이다. 실제 자석 피치의 수 $N_m = 2.25$ 이다. 피치는 $l = 40mm$ 이다. 기본파수의 절대값은 $\gamma_1 = 2\pi/l = 157m^{-1}$ 이다. 자기배열폭은 $w = 20mm$ 이다. 수직 모터 공극은 $z_0 = 1mm$ 이다. 자기배열의 두께는 $10mm$ 이고 권선 두께는 $2mm$ 이다. 상수 G 는 모터의 기하학적 상수를 포함하고 $2.06 \times 10^6 m^3$ 이다.

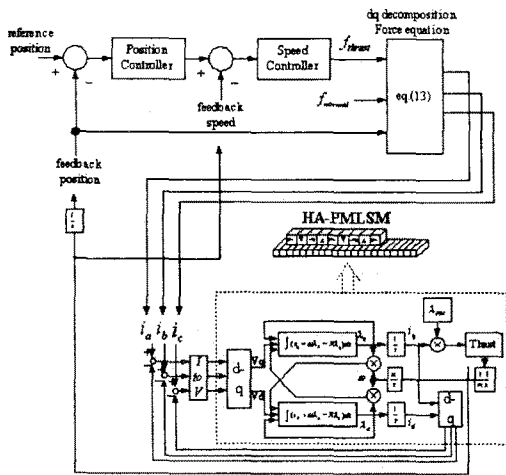


그림 6. 시뮬레이션 전체 블록다이어그램

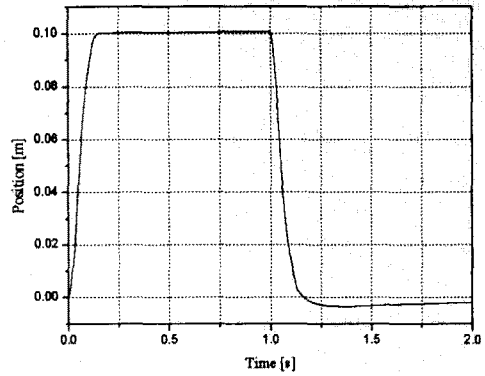


그림 7. 위치지령결과

3. 결론

본 논문에서는 제어성을 고려하여 디턴트력이 존재하지 않도록 1차축을 공심형으로 하고 2차축 영구자석을 Halbach 배열로 한 PMLSM의 자계를 해석하였다. 모델링된 자계를 통해 dq 분리에 의한 힘의 방정식을 나타내었다. 이 관계를 이용하여 제어기를 구성하였고, 특정 위치로 추종하는 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

[참고 문헌]

- [1] Ion Boldea, S. A. Nasar, "Field, Forces, and Perf Equations of Air-Core Linear Self-Synchronous M with Rectangular Current Control", IEEE Transact Magnetics, vol.24, no. 5, Sept. 1988
- [2] David L. Trumper, Won-jong Kim, Mark E. Wi "Design and Analysis Framework for Li Permant-Magnet Machines", IEEE Transaction Industry Application, 32(2) : 371-379, March/Apr
- [3] Z. Deng, I. Boldea, S. A. Nasar, "Forces and Par of Permant Magnet Linear Synchronous mach IEEE Transactions on Magnetics, vol. 23, no. 1, J 1987
- [4] Halbach, K., "Design of Permanent Multipole M with Oriented Rare Earth Covalt Material", N Instruments and Method, 169, pp 109-117, 1980
- [5] Jacek F. Gieras, "Linear Synchronous Motors" Press., 2000
- [6] 장석명, 윤인기, 이성호, 이종호, "영구자석형 선형 동기전 동기의 디턴트력 저감방식에 관한 특성해석 및 상호 비교", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp 757-759, 2000. 7
- [7] Ion Boldea, S.A. Nasar, "Electric Drives", Ch 10.
- [8] 윤인기, "PMLSM의 정특성 해석 및 디턴트력 저감방안에 관한 연구", 석사학위논문, 2001년 2월