

Halbach 배열을 갖는 공심형 영구자석 리니어 모터의 위치제어

장석명, 장건우, 이성호, 윤인기, 이준호
 충남대학교 전기공학과, 충북과학대학

Position Control of the Air-Core Permanent Magnet Linear Motor with Halbach Array

S.S. Jang, K.W. Chang, S.H. Lee, I.K. Yoon, J.H. Lee
 Chungnam National Univ. Ctech

Abstract - This paper deals with a simulation and a position control for linear synchronous motor with Halbach array (HA) permanent magnet mover.

The results of control simulation for HA-PMLSM having air-core primary are calculated using Matlab Simulink. The prototype of HA-PMLSM is tested DSP (TMS320F240 EVM).

1. 서 론

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

슬롯이 있는 PMLSM에서, 영구자석과 전기자의 치 사이에 상호작용으로 디턴트력이 나타난다. 이러한 디턴트력은 전동기의 추력맥동의 원인이 되어, 기기의 소음 및 진동을 유발할 뿐만 아니라 기기의 제어성능을 악화시킨다. 1차축을 공심형으로 하면 디턴트력을 제거할 수 있다. 그런데 공심형 PMLSM은 슬롯형보다 에너지 효율이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 2차축 영구자석을 일반배열이 아닌 Halbach 배열을 사용하였다.

본 논문에서는 제어성을 고려하여 디턴트력이 존재하지 않도록 1차축을 공심형으로 하고 2차축 영구자석을 Halbach 배열로 한 PMLSM을 제작하였다. 그리고 시뮬레이션과 DSP로 구성된 구동프로그램으로 그 결과를 비교하고자 한다.

2. 공심형 HA-PMLSM의 구조 및 위치제어

2.1 공심형 HA-PMLSM의 모델

디턴트력을 제거하기 위해 공심형타입을 선택한 PMLSM에 대해 슬롯형보다 자계에너지가 작으므로 이것을 보완하기 위해 가동자에 Halbach 배열을 사용하였다. Halbach 배열은 일반적인 영구자석배열에 비해 $\sqrt{2}$ 배 큰 자계를 형성한다. Halbach 배열은 일반영구자석배열보다 더 정현적인 자계를 생성해 내고, 그 결과로 간단한 제어구조를 가지게 된다.

그림 1은 Halbach 배열의 가동자의 구조를 나타내는 것이며 그림 2는 가동자의 공극 1mm에서 측정된 자속밀도분포를 나타낸 것으로 극수는 2cm이다.

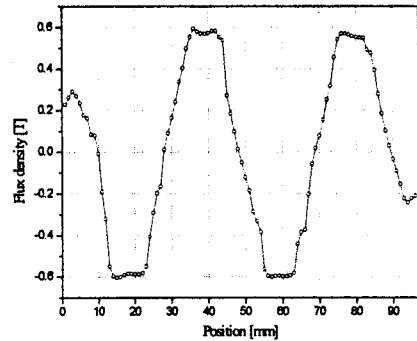


그림 2. Halbach 배열 가동자의 자속밀도분포

2.2 정상상태 특성

HA-PMLSM의 dq 모델링을 통한 전압방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$V_d = i_d R + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega \lambda_q \quad (1)$$

$$V_q = i_q R + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega \lambda_d \quad (2)$$

그리고 다음을 가진다.

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{PM} \quad (3)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (4)$$

여기에서 i_d 와 i_q 는 dq축 고정자의 전류이고, λ_d 와 λ_q 는 dq축 고정자 쇄교자속이다. λ_{PM} 은 영구자석의 쇄교자속이며, R 과 ω 는 저항과 인버터의 주파수이다. 에너지 관계식을 통해 추력을 얻을 수 있다.

$$F_x = \frac{\pi}{\tau} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (5)$$

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

1차축이 공심형이기 때문에 $L_d = L_q$ 이므로 식 (5)은 다음이 된다.

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

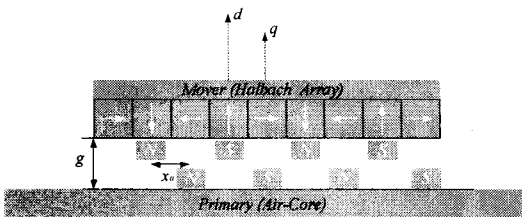


그림 1. 가동자의 Halbach 배열 구조

P는 극쌍수이다.

2.3 동특성 해석

시뮬레이션은 위해 회로정수를 산출하였고 이를 실험을 통해 검증하였다. 회로정수로부터 HA-PMLSM의 동특성 모델을 구성하였고, 모델링된 HA-PMLSM의 위치제어를 위해 그림 3과 같은 제어기를 구성하였다.

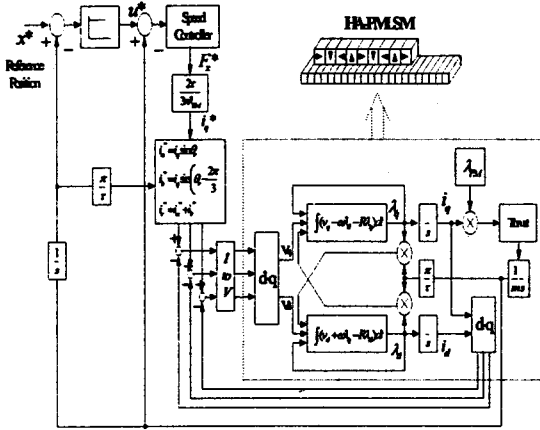
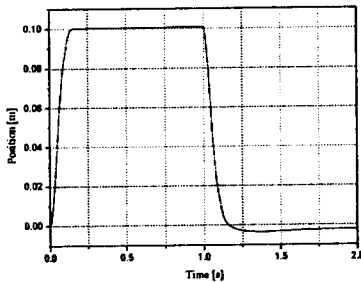


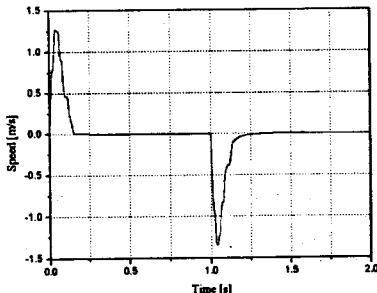
그림 3. 위치제어 시뮬레이션의 블록도

지령위치 x 와 feedback 되는 위치에 대해 위치제어기를 거쳐 속도로 변환되고, feedback 속도와의 오차가 다시 속도제어기를 거쳐서 추력으로 변환된다. 추력은 q축의 전류로 변환되고, q축의 지령전류는 a, b, c상의 전류로 변환되어 점선부분의 HA-PMLSM으로 입력된다.

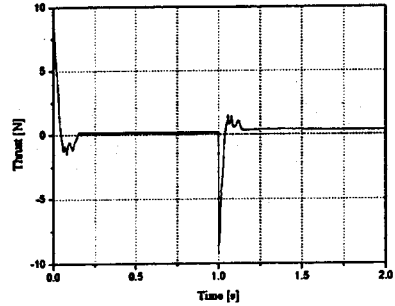
위치지령 10cm로 사각파의 입력에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 4에 나타내었다.



(a) 위치지령의 제어결과



(b) 속도



(c) 추력

그림 4. 위치제어 시뮬레이션 결과

2.4 위치제어 시스템 구성 및 시험

Halbach 배열을 가진 가동자로 구성된 PMLSM의 구조는 그림 5와 같다. 2차축은 아홉편의 영구자석을 Halbach 배열하여 4극을 만들었으며, 1차축은 공심형으로 권선하였다. 2차축의 상부에 베어링을 부착하여 이동하는 방식을 선택하였고, 베어링이 설치된 가이드는 공극의 변화를 줄 수 있도록 설계되었다. 또한 변위를 센싱하기 위해 2차축에 밸트를 설치하고 Encoder에 연결하였다.

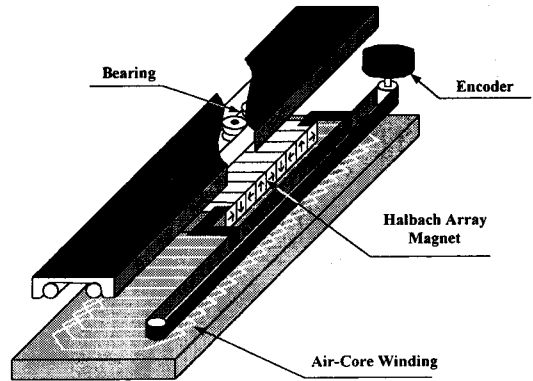


그림 5. 시작기의 구조

출력부 구동회로에 있어서는 1차축의 구조가 30[V]의 저전압에서 구동하므로, 허용전류가 20A인 MOSFET IRFP250을 이용하여 PWM구동회로를 제작하였다. 그리고 MOSFET의 gate switching 신호 전단입력에 대해 IR2130 chip을 이용하여 하드웨어적으로 dead-time을 설정할 수 있게 구성하였다. 마이크로프로세서는 Texas Instrument 사의 TMS320F240 DSP를 이용하였다. DSP의 하드웨어 clock은 10Mhz로 구성되어 있으며, 프로그램 상의 인터럽트 루틴의 지연시간은 60us로 설정하였다.

DSP로 입력되는 신호에 대한 하드웨어 구조는 1024개의 펄스를 발생시키는 Encoder로부터 나오는 펄스신호를 QEP 타이머를 통해 입력받아 위치 및 속도의 신호로 변환하였고, 전류신호를 feedback 받기 위해 12비트 A/D converter를 이용하였다. 전류신호는 HA-PMLSM로 입력되는 3상의 출력에 대해 LEM사에서 제작한 전류센서 CT를 이용하였고 차동증폭회로를 통해 입력을 받았다.

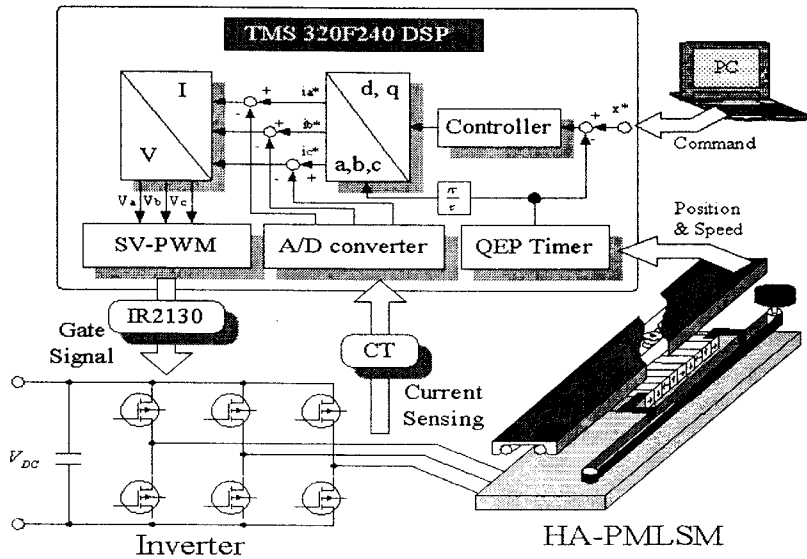


그림 6 위치제어를 위한 시스템 블록도

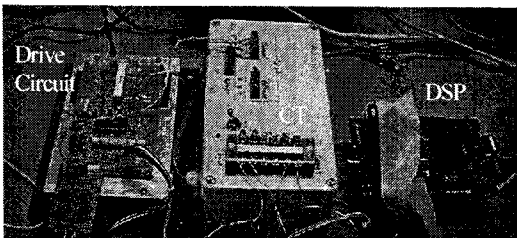
프로그램에서 지령변위를 입력받아 컨트롤 연산을 통해 전류 신호를 만들어내고 전류 feedback 신호를 통해 보정된 에러값은 SV-PWM 신호 생성을 위한 스위칭 시간으로 계산된다. 이 시간치에 의해 Software PWM을 이용하여 출력을 내보내고, 이것은 포토커플러를 거쳐서 IR2130 chip으로 입력되어 MOSFET의 gate 신호로 입력된다.

3. 결 론

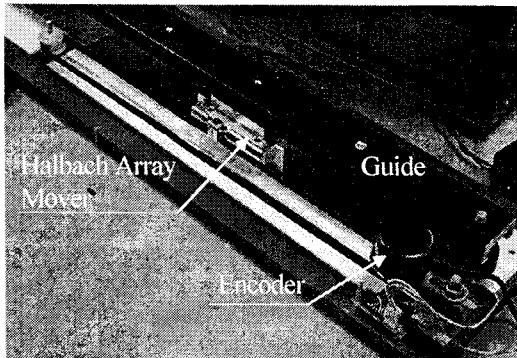
본 논문에서는 2차축 영구자석 가동자를 Halbach 배열로 하고 1차축이 공심형인 PMLSM의 위치제어를 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 또한 시작기를 제작하였으며, 위치제어 시스템을 구성하였다.

(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] 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
- [4] Halbach, K., "Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Covalt Material", Nuclear Instruments and Method, 169, pp 109-117, 1980
- [5] Jacek F. Gieras, "Linear Synchronous Motors", CRC Press., 2000
- [6] 장석명, 윤인기, 이성호, 이종호, "영구자석형 선형 동기 전동기의 디턴트릭 저감방식에 관한 특성해석 및 상호 비교", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp 757-759, 2000. 7.
- [7] Ion Boldea, S.A. Nasar, "Electric Drives", Ch 10, 1999
- [8] Erwan Simon, "Implementation of a Speed Field Oriented Control of 3-phase PMSM Motor using TMS320F240", Texas Instruments application report, SPRA588, 1999



(a) 구동 드라이브 회로 및 DSP



(b) HA-PMLSM의 시작기

그림 7. 위치제어 시스템의 사진