

SMD Mounter용 선형 영구자석 동기기의 고정밀 위치제어

김장환*, 설승기*, 전정렬**, 최연규**
 서울대학교 전기컴퓨터 공학부*, 미래산업주식회사**

High Resolution Position Control of Linear Permanent Magnet Synchronous Motor for SMD Placement System

Jang-Hwan Kim*, Seung-Ki Sul*, Jeong-Yul Jeon**, Yun-Kyu Choi
 School of Electrical Engineering, Seoul National Univ.*, Mirae Corporation**

Abstract - This paper present the position control method for the application of permanent magnet linear synchronous motor. Controller is designed as a conventional P-PI controller, but the extra information is used such as velocity and acceleration from motion profiles. The profiles comes from S-Curve which is an optimized point-to-point motion profiles to achieve fast motions with minimum vibration[2]

In this application, the targets of the position control are maximum 10um position error within 10msec after respective ending point of position profiles. The implementation of the controller has been done in full digital way. All the controller is designed on the DSP TMS320VC33 control board. To prove performance of the controller, the experiment was performed with a servo linear motor .

1. 서 론

최근 생산기계시스템 등 선형운동을 필요로 하는 많은 산업체에서 선형 영구 자석 동기기의 사용이 많아지고 있다. 이는 선형 영구 자석 동기기가 회전기에 비해 다른 별도의 기계적 장치가 없는 간단한 기계구조를 갖는다는 장점과 유지보수와 효율성이 높은 장점을 갖기 때문이다[1]. SMD Mounter의 성능이 고속화, 고정밀화됨에 따라 X-Y축 구동에 있어 사용되던 Ball-Screw 기구 구조가 점차 선형 전동기 구동 방법으로 바뀌고 있다. SMD Mounter에 이용되는 선형기의 경우, 그 응용분야의 특성상 빠른 위치 응답성은 전체 공정라인의 효율적 사용과 직결되며, 공정의 속도뿐만 아니라, 비용의 문제와도 직결된다. 따라서 빠른 위치응답성은 전체 시스템의 성능을 결정할 수 있다. 이를 위해서는 기본적으로 안정적이고 높은 내부제어기(inner controller)대역폭을 확보하여야 한다.

일반적으로 모션제어에 있어서 최소의 기계적인 진동과 빠른 이동을 위해서 위치의 지령은 S-curve의 형태로 주어진다[2].

2. 본 론

2.1 선형동기기의 모델링

2.1.1 선형 영구자석 동기기의 모델링

선형 영구자석 동기기는 그림.1과 같이 d-q 동기좌표계상에서 등가화할 수 있다. 또한 전압방정식은 실제 무버(mover)의 속도에 관한 식(1)~(2)로 나타낼 수 있다. 식(3)~(4)는 각각 동기좌표계 d-q축에 유기되는 자속을 나타내고 있다.

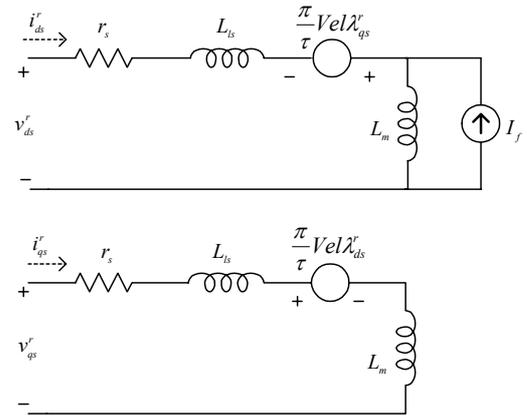


그림.1 영구자석 동기기의 동기좌표계상에서의 등가회로

$$v_{ds}^e = r_s i_{ds}^e + L_{ls} p i_{ds}^e + L_m p (i_{ds}^e + I_f) - \frac{\pi}{\tau} Vel \lambda_{qs}^e \quad (1)$$

$$v_{qs}^e = r_s i_{qs}^e + L_s p i_{qs}^e + \frac{\pi}{\tau} Vel \lambda_{ds}^e \quad (2)$$

$$\lambda_{ds}^e = L_m (i_{ds}^e + I_f) + L_{ls} i_{ds}^e \quad (3)$$

$$\lambda_{qs}^e = L_s i_{qs}^e \quad (4)$$

Vel: mover(1차축)의 속도, τ : 폴 피치(pole pitch), r_s : 1차축 저항, L_s : 1차축 인덕턴스, I_f : 영구자석의 등가 전류원

일반적으로 영구자석동기기의 경우 약계제어를 수행하는 경우를 제외하면, 자속분 전류가 필요 없으므로 벡터제어를 수행할 때 d축의 전류를 0으로 제어한다

($i_{ds}^e = 0$). 따라서 전압방정식(1)과 (2)는 식(5)와 (6)으로 표현된다. d축의 자속은 식(7)이 되며, 여기서 추력은 식(8)과 같이 나타난다.

$$v_{ds}^e = -\frac{\pi}{\tau} Vel \lambda_{qs}^e \quad (5)$$

$$v_{qs}^e = r_s i_{qs}^e + L_s p i_{qs}^e + \frac{\pi}{\tau} Vel \lambda_{pm} \quad (6)$$

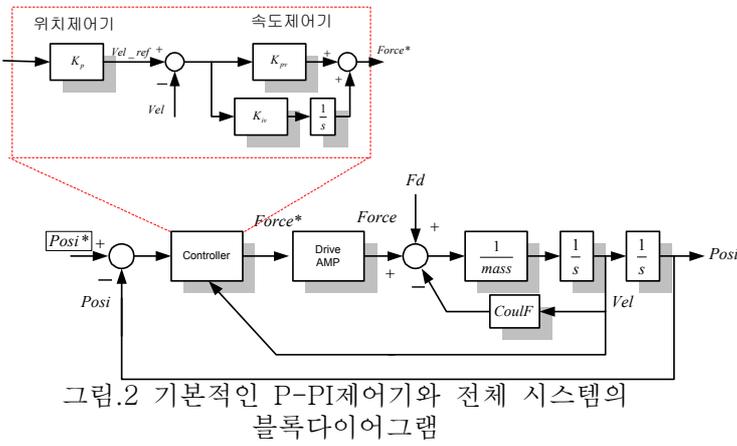
$$\lambda_{ds}^e = L_m I_f = \lambda_{pm} \quad (7)$$

$$F = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \lambda_{pm} \times i_{qs}^e \quad (8)$$

2.2 제어기의 설계

그림.2는 전체 시스템을 블록다이어그램으로 나타낸 것이다.

2.2.1 전류제어기



전체 제어기 시스템에서 전류제어기는 위치제어기보다 내부(inner)제어기이다. 시스템에서 전류제어기의 응답성은 위치제어기의 출력인 추력의 응답성이 되며, 위치의 빠른 추종을 위해서는 높은 전류제어 대역폭을 확보하여야 한다. 높은 전류제어대역폭(12000rad/sec)을 디지털제어기에서 구현하기 위해서 전류예측기법을 사용하였다. 이 방법은 전압방정식 (1)과(2)를 이용하여, 다음 샘플링 시간(66usec)의 전류를 예측하는 것이다. 이를 수식으로 나타내면 식(9)~(10)로 나타낼 수 있다.

$$i_{ds}^e(n+1) = (v_{ds}^e - r_s i_{ds}^e(n) + \frac{\pi}{\tau} Vel \lambda_{qs}^e) \times \Delta T + i_{ds}^e(n) \quad (9)$$

$$i_{qs}^e(n+1) = (v_{qs}^e - r_s i_{qs}^e(n) - \frac{\pi}{\tau} Vel \lambda_{ds}^e) \times \Delta T + i_{qs}^e(n) \quad (10)$$

그림.3은 전류제어기의 응답특성을 확인한 것이다.

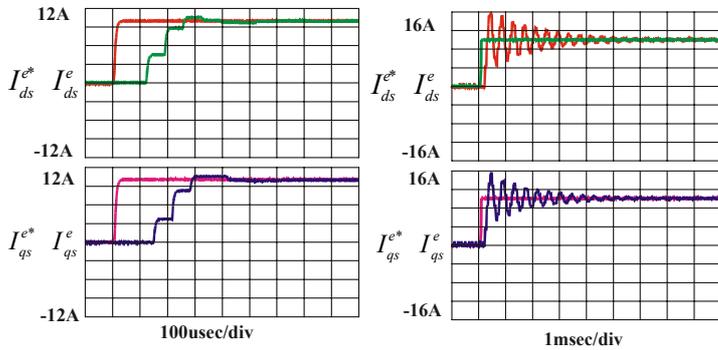


그림.3 전류제어기 특성
(좌: 예측전류로 제어, 우: 실제전류로 제어)

2.2.2 속도-위치제어기

전류제어가 이상적으로 이루어지고 있다는 가정과 속도제어기는 극점과 영점 소거방법으로 1차 필터의 형태로 나타낼 수 있다는 가정에서 전체 제어기와 시스템은 그림.4와 같이 나타낼 수 있으며, 이는 위치제어기와 속도제어기가 직렬(Cascade)로 연결되어 있는 형태이다. 이를 위치에 대한 폐루프 시스템으로 풀어보면 식(11)과 같은 전달함수를 나타낼 수 있다. 그림.4에서 ω_{sc} 는 속도제어기의 대역폭이다.

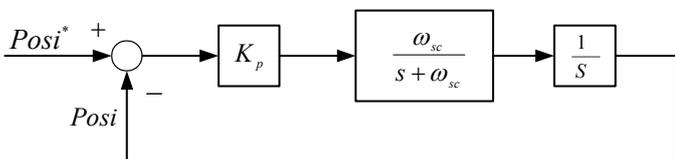


그림.4 제어기와 시스템의 모델링

$$\frac{Posi}{Posi^*} = \frac{K_p \frac{\omega_{sc}}{s + \omega_{sc}} \frac{1}{s}}{1 + K_p \frac{\omega_{sc}}{s + \omega_{sc}} \frac{1}{s}} = \frac{K_p \omega_{sc}}{s^2 + \omega_{sc} s + K_p \omega_{sc}} \quad (11)$$

$2\zeta\omega_n = \omega_{sc}$, $K_p\omega_{sc} = \omega_n^2$ 이라고 하면, 속도제어기의 대역폭과 ζ (damping)에 따른 위치제어기의 대역폭이 결정된다. S-Curve로 위치 프로파일을 만드는 경우와 같은 속도 및 가속도 정보를 알 수 있는 시스템에서는 속도 및 가속도 정보를 전향 보상하는 방법을 제어에 사용할 수 있다. K1과K2 weighting factors(단, $0 \leq K1 \leq 1$, $0 \leq K2 \leq 1$)를 이용하여 전향보상으로 P-PI제어기를 그림.5과 같이 구성할 수 있다. 이는 그림.6과 같은 PID 제어기로 재구성하여 나타낼 수 있다. 그림.7은 속도 전향보상의 경우의 보드선도와 계단응답특성이다.

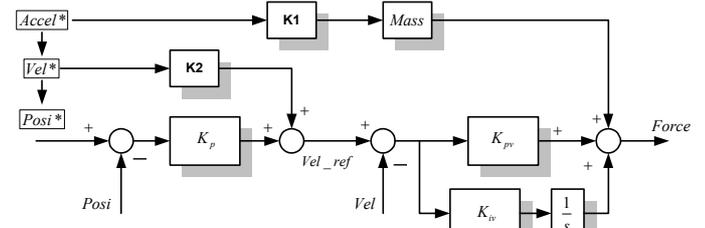


그림.5 전향보상을 통해 구성된 P-PI 제어기

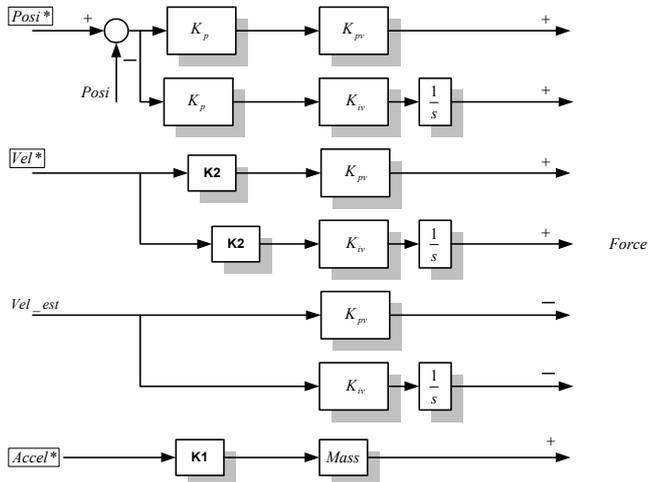


그림.6 전향보상을 통해 구성된 PID 제어기

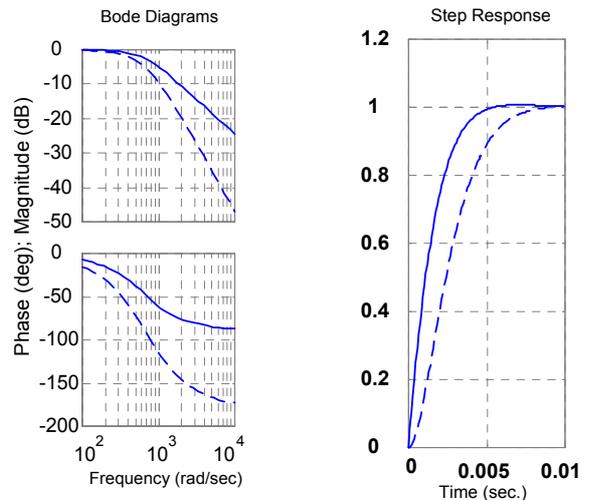


그림.7 전향보상이 없는 경우(점선)
속도 전향보상의 경우(실선)

2.2.3 속도 추정기

일반적인 속도 측정 방법인 M/T 방법의 경우, 속도측정의 지연현상이 발생한다. 속도 지연에 따른 오차는 4.5G(=44ms²)까지 순간 가속하는 시스템에서 제어의 어려

음을 증가시킨다. 따라서 순시 속도를 시지연 없이 얻기 위하여 전차원 속도 추정기를 사용하였다[3~4].

2.3 실험

2.3.1 실험 장치

실험에 사용한 모터는 (주)미래산업에서 제공한 영구자석 선형 동기기이다. Mover의 양쪽에 영구자석이 부착되어있는 형태(Double sided flat PM)의 선형동기기로 하나의 전기자를 가지는 모터이다(one internal armature system). 기계적인 안정도 때문에 최대 가속도는 4.5G로 제한되며, 최고 속도는 2m/sec로 제한된다. 스위칭 주파수는 7.5kHz이며, 샘플링주파수는 15kHz이다.

그림.8은 전체 실험장치에 대한 블록 다이어그램이다. 또한 그림.9는 실제 실험 장치의 사진을 보여주고 있다.

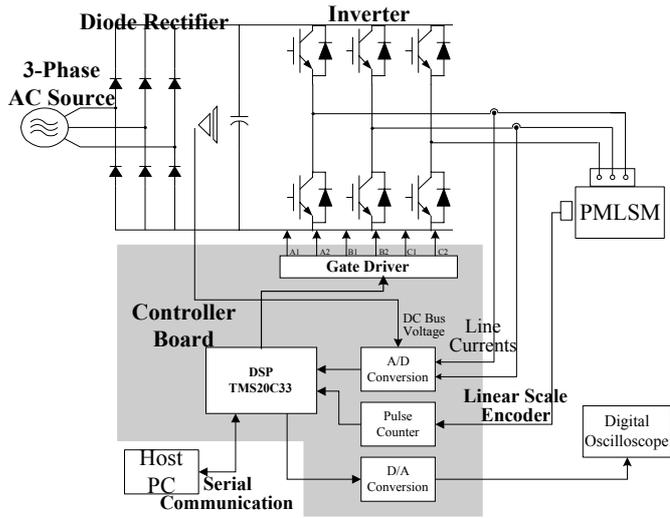


그림.8 실험장치

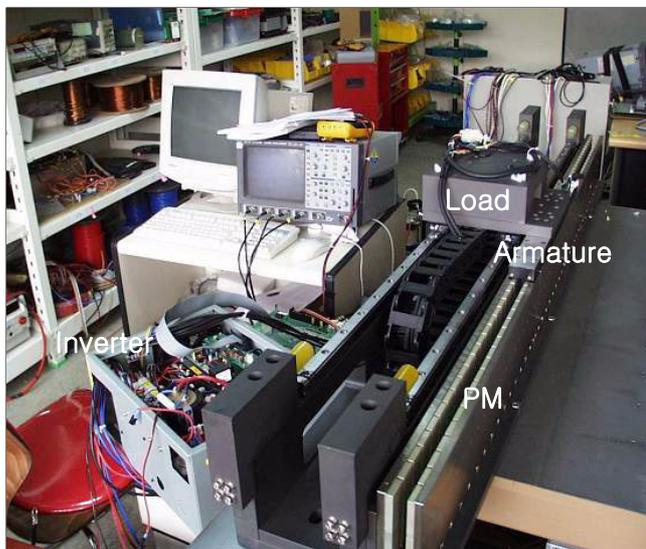


그림.9 PMLSM과 실험장비

2.3.2 실험 결과

그림.10의 ㄱ)은 4.5G의 가속도로 0.185m를 이동하는 motion profile을 보여주고 있다. ㄴ)은 ㄱ)과 같은 profile로 위치제어를 수행한 경우의 위치오차와 제어변수들의 변화를 나타내고 있다. S-Curve가 끝남과 동시에 10um오차 이내로 제어가 되고 있음을 확인할 수 있다. 그림.11의 ㄱ)은 그림.10의 ㄱ)과 같은 motion profile로 이동할 때, 위치와 속도의 지령치 추종을 나타내고 있으며, ㄴ)은 벡터제어를 수행할 때, 전류제어의 특성을 나타내고 있다. d축전류는 0으로 유지되며,

q축 전류는 프로파일의 가속도와 같은 형태로 제어되고 있음을 확인할 수 있다.

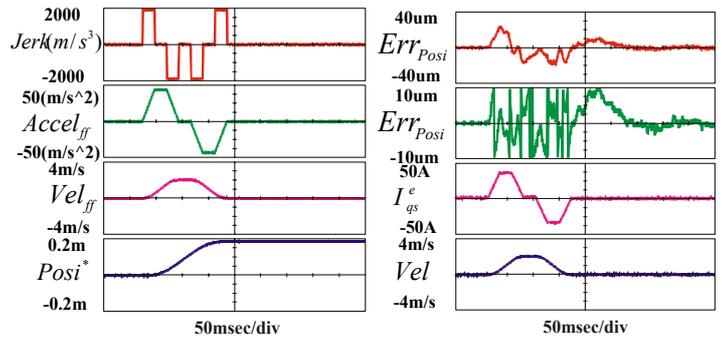


그림.10 S-Curve에 따른 위치오차와 속도 및 전류

ㄱ) motion profile ㄴ) 제어값

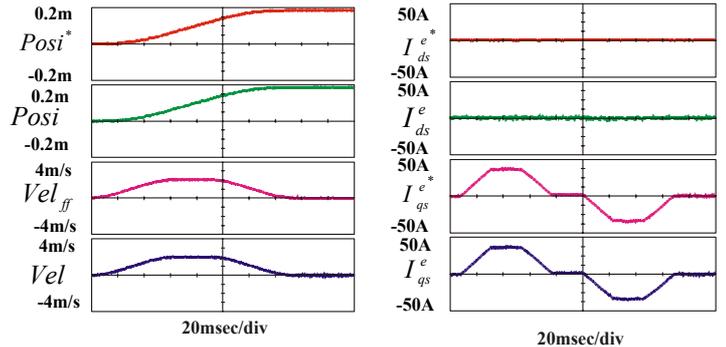


그림.11 지령값과 실제값

ㄱ) 물리값: 위치와 속도, ㄴ) 전기값: d-q축 전류

3. 결 론

본 논문에서는 영구자석 선형동기기의 위치제어를 위한 제어기 설계에 대해서 연구하였으며, 이를 실험을 통해 검증하였다. 제어 목표인 10msec 이내에 10um이내의 제어 정밀도를 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Jacek F. Gieras and Zbigniew J. Piech, "Linear Synchronous Motors", CRC press, 2000.
- [2] Peter H. Meckl, "Optimized S-Curve Motion Profiles for minimum Residual Vibration", Proceedings of ACC, 2627~2631, June 1998.
- [3] Kenji Kubo, Masahiko Watanabe and Fussaki Kozawa, "Disturbance Torque Compensated Speed Observer for Digital Servo Drives," Proc. of IECON'90, vol.2, pp1182~1187, 1990.
- [4] Y.Hori, "An Instantaneous Speed Observer for high performance control of dc servomotor using DSP and low precision shaft encoder," Proc. of 4th European Conf. On Power Electronics, vol.3, pp. 647~652, 1991.

[부록] 모터 사양

	단위	값
Cont. Force (@125°C)	Nt	877.25
Cont. Curr. (@125°C)	A	12.32
Cont. Power Loss(@125°C)	W	185.96
Force Const.	Nt/Arms	71.23
Pole Pitch	mm	3
No. of Pole		4극
Mass	kg	40
Phase inductance	mH	2.1
Phase resistance	Ω	1.2