

영구자석 선형동기전동기의 특성해석 및 위치 제어 시스템 구성

조성호*, 박창수*, 김규탁*, 노동훈**, 손영대**
*창원대학교 전기공학과, **동서대학교 전자공학과

Characteristic Analysis of PMLSM and Position Control System Implementation

Sung-Ho Cho*, Chang-Su Park*, Gyu-Tak Kim*, Dong-Hun No**, Young-Dae Son**
*Chang-won Univ., **Dongseo Univ.

Abstract - This paper describes detent force minimization techniques of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor(PMLSM) for the improvement of control and the driver system to control the position and velocity. PMLSM are simulated by operating open-loop system and PI control system, and in actuality the control system is implemented by DSP based controller and PWM inverter to investigate the characteristics of both open-loop system and PI control system.

1. 서 론

최근 에너지 밀도가 높은 자석 재료의 개발과 제조원가의 하락으로 인하여 직선 추진력을 필요로 하는 정밀 제어 시스템에 영구자석 선형전동기(PMLSM)가 많이 요구되고 있다. 그러나 전동기의 기계적인 파라메타나 전기적인 파라메타의 부정확성으로 인하여 만족할만한 성능을 내는데 많은 제약을 가지고 있다. 특히 영구자석과 슬롯의 상대적인 위치변화에 따른 디텐트력은 추력의 리플성분으로 발생하여 정지시 및 위치 제어시 많은 문제를 초래할 수 있다. 따라서 PMLSM이 가지고 있는 디텐트력(detent force)의 저감하는 것이 선결되어야 한다. 그리고 정밀제어 시스템에 이용하기 위해선 위치 제어 시스템의 구성이 필연적이다.

따라서 본 논문에서는 PMLSM에 디텐트력 저감기법을 적용해 디텐트력을 저감했다. 또한 전동기 제어용으로 제작된 DSP TM320F240을 사용한 PWM 인버터를 구성하여 PMLSM의 운전 및 위치 제어를 행하였다. 따라서 회전형 전동기 위주의 제어 시스템을 선형 전동기에 적용시켜 선형 전동기의 위치 및 속도제어를 시도하였다.

2.1 PMLSM의 수학적 모델

계자가 직류 전원에 의해 여자되는 전형적인 동기전동기와 영구자석으로부터 자속을 공급받는 회전형 영구자석 동기전동기(PMSM)는 여자 방식만 다르고 근본적인 원리는 같다고 할 수 있다[1]. 이러한 이유로 인하여 PMSM의 수학적 모델링은 기존의 동기전동기를 해석하는 방법으로 구할 수 있다. 또한, 선형동기기도 회전형 기기와 기본적인 제어 이론 및 모델링은 동일하며 등가 회로는 다음과 같다.

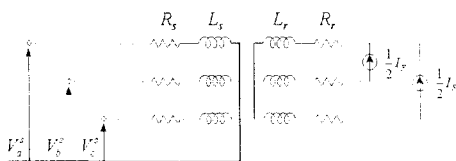


그림 1 PMLSM의 등가회로

일반적으로 3상에서의 전압 방정식은 식(1)과 같다(1).

$$V_{abs}(t) = R_s i_{abs}(t) + \frac{d}{dt} \lambda_{abs}(t) \tag{1}$$

3상 전압 방정식을 이용하면 방대한 미분방정식을 풀어야 하기 때문에 취급이 쉽지 않다. 따라서, 평형 3상 입력을 2상 고정 좌표계의 값으로 식(2)와 같이 표현 할 수 있다.

$$V_\alpha = (R_s + pL_s) \cdot i_\alpha - \omega_r \psi_f \sin \theta_r \tag{2}$$

$$V_\beta = (R_s + pL_s) \cdot i_\beta - \omega_r \psi_f \cos \theta_r$$

이 전압 방정식으로 전류 방정식을 식(3)과 같이 유도할 수 있다.

$$p i_\alpha = -\frac{R_s}{L_s} i_\alpha + \frac{\omega_r}{L_s} \psi_f + \frac{1}{L_s} V_\alpha \tag{3}$$

$$p i_\beta = -\frac{R_s}{L_s} i_\beta + \frac{\omega_r}{L_s} \psi_f + \frac{1}{L_s} V_\beta$$

그러나, 식(3)에 나타내었듯이 2상 고정 좌표계를 이용하여 PMLSM의 과도특성을 해석하기 어렵다. 따라서 2상 동기 좌표계로 좌표변환하여 전류 방정식을 식(4)와 같이 나타낸다.

$$p i_d = \omega_r i_q + \frac{R_s}{L_s} i_d + \frac{1}{L_s} V_d \tag{4}$$

$$p i_q = -\frac{R_s}{L_s} i_q + \omega_r i_d - \frac{\psi_f}{L_s} \omega_r + \frac{1}{L_s} V_q$$

여기서, $p = \frac{d}{dt}$, ω_r = 동기각속도, R_s = 고정자 저항

ψ_f = 영구자석에 의한 쇠교자속

토크 방정식은 전기적인 입출력 관계에 의해서 다음과 같이 표현된다[2].

$$P_{out} = \frac{3}{2} \omega_r \psi_f i_q \tag{5}$$

또한, $P_{out} = \omega_m T_e$ 의 관계가 있으므로 회전기의 토크 방정식은 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \psi_f i_q \tag{6}$$

여기서, P 는 극수이다.

따라서, 회전기의 토크 방정식을 직선기의 방정식으로 변환하면 다음과 같다.

$$F_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{\pi}{\tau} \psi_f i_q \tag{7}$$

여기서, τ 는 극간격이며 직선기의 동기속도는 입력 주파수 f 와 극간격에 의해서 $v_s = 2\tau f$ 로 쓸수있다.

2.2 특성 개선을 위한 디텐트력 저감

영구자석을 계자원으로 이용하는 기기는 외부에서 전원을 인가하지 않아도 철심과 슬롯에 인력이 발생하게 된다. 이 힘을 선형전동기에서는 디텐트력이라 하며 추력의 리플성분으로 나타내게 된다.

그림 2는 영구자석과 전기자 치와의 상호작용에 의한 디텐트력의 발생을 도식적으로 나타낸 것이다

초기 위치를 d_0 로 하여 d_1, d_2, d_3 로 1/4 슬롯간격씩 영구자석을 이동시켜가며 영구자석과 전기자 치 사이의 자속을 점선으로 도시한 것으로, d_0, d_2 위치에서는 자속이 평형을 이루어 디텐트력은 '0'이 되며, d_1, d_3 위치에서는 자속의 불평형으로 인하여 양, 또는 음의 디텐트력이 발생하게 된다. 이를 영구자석의 이동에 따라 연속적으로 도시하면 디텐트력은 1슬롯 간격을 주기로 하여 나타나며, 영구자석과 치의 형상 및 크기에 따라 그 크기 및 양상이 달라지게 된다.

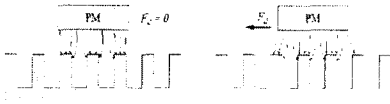
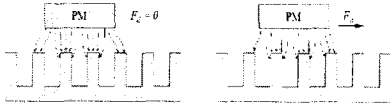


그림 2 디텐트력의 발생 원리

현재, 단 2차형 PMLSM의 디텐트력을 저감할 수 있는 방법은 다음과 같은 기법들이 제시되고 있다. [3]

- ① 영구자석 자극폭 조절법
- ② 영구자석 재배치법
- ③ 전기자나 혹은 영구자석에 스큐를 주는 방법
- ④ 전기자 슬롯의 형상을 변화시키는 방법

그림 3과 그림 4는 디텐트력 저감의 효과를 보이기 위한 실험치 및 실험치를 나타낸 것이다.

실험결과, 저감기법을 적용한 모델의 디텐트력이 현저하게 줄어들었고 주기성도 잘 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.

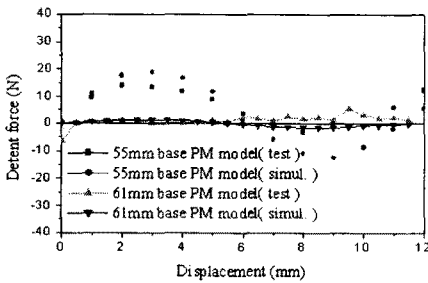


그림 3 영구자석 폭에 따른 디텐트력

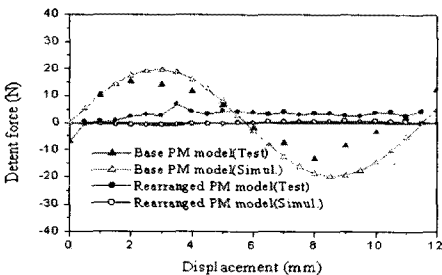


그림 4 영구자석 재배치에 따른 디텐트력

2.3 제어기법

연속치계의 제어계통 설계에 있어서 가장 널리 쓰이고 있는 제어방식은 PID제어 방식이다. 여기서 미분제어는 잘 활용하면 안정도에 기여하고, 예측기능이 있어 응답속도를 빠르게 할 수 있다는 장점이 있지만, 시스템에 잡음성분이 있을 때 미분 값이 커지게 되어 제어입력에 나쁜 영향을 미치는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 PI제어방식을 사용한다. 그림 5는 오차신호에 의해 동작하는 연속치계 PI제어의 블록도이다.

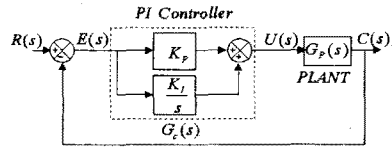


그림 5 PI 제어 시스템

2.4 시스템 구성

그림 6은 전체 제어 시스템을 구성이다. 제어 시스템은 크게 디지털 제어부와 전력 변환부로 구성된다. 디지털 제어부는 제어 알고리즘의 구현과 산출연산 및 아날로그/디지털 신호의 입출력을 위하여 TI사의 Digital Signal Processor(DSP)인 TMS320F240을 사용한 디지털 제어보드로 구성하였으며, 전력 변환부는 220(V)의 3상 전원을 입력받아 직류로 변환하는 정류부, IGBT의 게이트 드라이버와 디지털 제어부에 전원을 공급하는 전원 공급부, 그리고 IGBT 모듈로 구성된 인버터부로 구성된다.

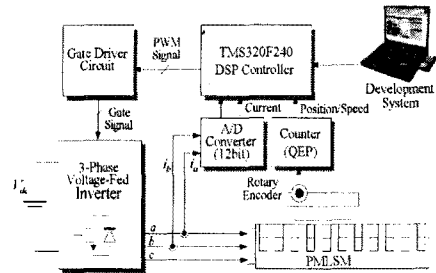


그림 6 제어 시스템의 구성도

그림 7은 개루프 구동 시스템의 구성도이다. 개루프 구동을 위한 입력 파라미터는 인버터의 출력전압 지령 및 주파수이며 이때의 가동자의 동기속도는 극간격 τ 와 입력 주파수 f 에 의하여 $v_s = 2\tau f$ 이다.

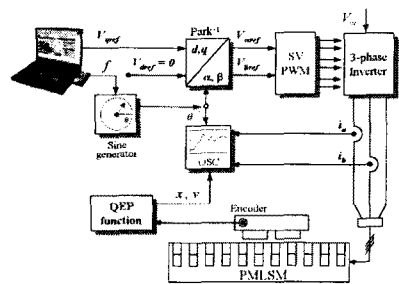


그림 7 개루프 구동 시스템의 구성도

그리고 그림 8은 폐루프 구동 시스템의 구성이다. [4] 가동자의 위치 검출을 위하여 회전식 펄스 엔코더를 사용하였으며, 초기 기동토크를 발생시키기 위하여 초기 전류위상을 변경하는 방법을 사용하였다.

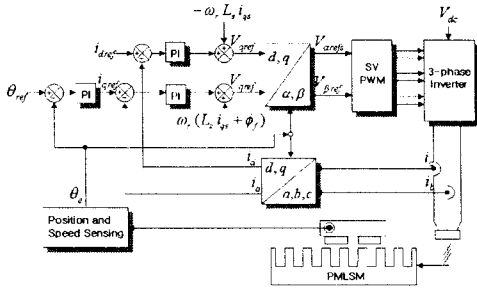
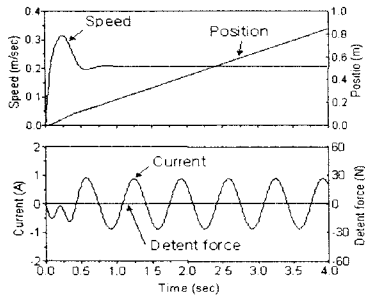


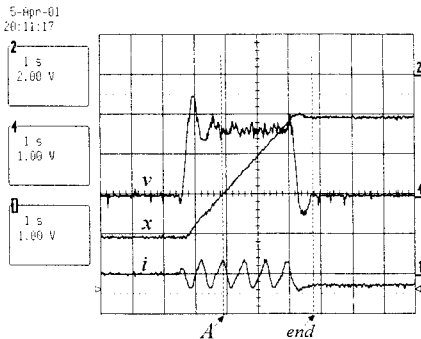
그림 8 PI 제어 시스템 구성도

2.5 시뮬레이션 및 실험결과

그림 9는 입력 전압 12(V), 입력 주파수 1.5(Hz)에서 PMLSM의 개루프 구동시 시뮬레이션과 실험 결과이다. 여기서, 실제 운전특성 값과 시뮬레이션 값은 많은 차이를 보이고 있는데 이는 시뮬레이션시 PMLSM의 동특성 모델이 실제 특성을 충분히 고려하지 못하였기 때문이다. 개루프 운전시 가동자의 속도는 0.207(m/sec)의 동기속도로 운전된다. 구동 초기에는 가동자의 관성에 의하여 이동속도에 큰 진동이 발생하고 전류 파형이 다소 왜곡되고 있으며 "A"지점에서 정상상태에 도달하여 운전을 지속한다. 정상상태 후 이동속도의 맥동은 여러 가지 요인에서 비롯 될 수 있는데 지속에서의 관성에 의한 영향, 유기전압의 고조파 성분에 의한 영향, 리니어 베어링과 가동자 사이의 기계적 구조에 의한 영향 등을 들 수 있다. 디텐트력을 상당히 감소시킨 모델이므로 시뮬레이션에서는 고려하지 않고 해석하였다.



(a) 시뮬레이션

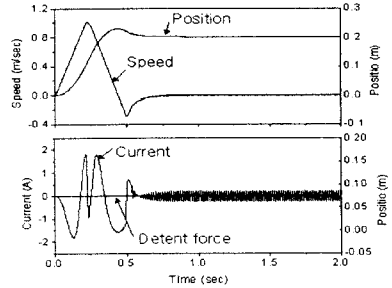


(b) 실험

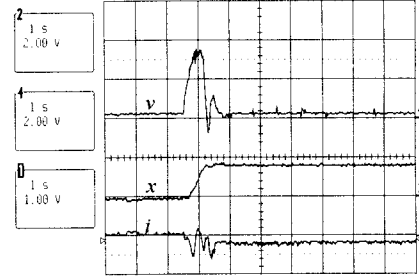
그림 9 PMLSM의 개루프 구동 특성

그림 10은 위치지령 0.2(m)를 주었을 때 PI제어를 사용한 폐루프 제어 시스템의 시뮬레이션 및 실험

결과이다. 본 실험에서는 시뮬레이션과는 달리 큰 맥동이 이 존재하는데 이는 최적화 되지 않은 PI이득과 가동자에 부착된 엔코더가 불규칙하게 뒤틀려져 위치계산시 많은 오차를 수반하였기 때문이라고 사료된다. 또 위치지령을 0.2(m)을 주었지만 실제 가동자의 이동위치를 측정된 결과 0.19~0.21(m) 정도의 이동거리가 측정되었다. 이도 엔코더의 이동시 생기는 오차라고 사료된다.



(a) 시뮬레이션



(b) 실험

그림 10 PMLSM의 위치제어 특성

3. 결론

본 논문에서는 구동시 추력의 맥동으로 작용하여 기기의 제어 성능을 저하시키는 디텐트력을 줄인 PMLSM을 시뮬레이션과 실제 PI제어를 이용한 위치제어 시스템을 구성하여 개루프 운전과 폐루프 운전을 실행하였다. 제안된 제어기를 이용하여 원하는 지령위치 및 속도에 비교적 안정되면서 빠른 시간 내에 도달하는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 그리고 본 연구에서 사용된 엔코더와 같은 위치 및 속도 센서를 사용하지 않는 센서리스방식의 연구가 지속적으로 요구된다. 그리고 위치제어의 신뢰성을 위해서 가동자의 초기위치 검출이 반드시 필요하며 이것들은 향후 과제로 남긴다.

(참고 문헌)

- [1] N. A. Demerdash, F. A. Fouad, and T. W. Nehl, "Determination of Winding Inductances in Ferrite Type Permanent Magnet Electric Machinery by Finite Elements", IEEE Trans. on Magnetics, Vol MAG-18, No. 6, pp.1052-1054, 1982
- [2] V. B. Honsinger, "Performance of Polyphase Permanent Magnet Machines", IEEE Trans. on PAS, Vol. 99, No. 4, pp.307-316, 1980
- [3] 천장성, "급가속용 선형동기전동기의 특성해석 및 최적설계", 서울대학교 박사학위논문, 1999.
- [4] Texas Instruments, Field Oriented Control of three phase AC - motor, BPRA073, 1999