

추력리플 보상을 통한 영구자석형 선형 동기전동기의 제어특성 향상

정인성, 현동석
한양대학교 전기공학과

Improvement of Control Characteristics of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor by Compensation of Thrust Ripple

In-Soung Jung and Dong-Seok Hyun
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract - In this paper, a control method based on finite element analysis is presented to reduce the thrust ripple of the permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM). In the control method, additional compensation current is added to the conventional control current according to the position of mover. The exact value of the compensation current is calculated from finite element analysis. To conform the validity of the presented method, a test set is built and experiments are performed.

1. 서 론

영구자석형 선형 동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, PMLSM)는 추력/전류비가 높고 제어가 용이하며 직접 직선추력을 발생하므로 최근들어 고속지상 운송 수단으로서 뿐만 아니라 고층빌딩용 고속 엘리베이터, 반송 시스템 및 서보 시스템의 구동원으로 많이 연구되고 있다.

PMLSM의 구동시 원하는 구동특성을 얻기 위해서는 적절한 제어가 요구된다. 그러나 공극자속의 고조파성분과 영구자석과 전기자의 치/슬롯 구조에 기인하는 detent force에 의한 추력리플은 제어특성을 악화시킨다[1], [4]. 전동기의 고속 운전시에는 이동자의 관성에 의해 추력리플의 영향이 적으나 저속 운전시에는 그 영향이 커지게 되며, 위치제어시에는 위치결정 특성에 큰 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 PMLSM의 전류제어시 위치 및 전류에 따른 추력특성을 유한요소법을 사용하여 해석하고 이를 기반으로 하여 추력리플을 저감하기 위한 제어기법을 적용하고자 한다. 또한 시험기를 제작, 실험을 수행하여 본 논문에서 적용한 제어기법에 의한 제어특성을 실험을 통해 살펴봄으로써 본 논문에서 적용한 기법의 타당성과 효용성을 검증하고자 한다.

2. 유한요소법을 이용한 PMLSM의 해석

2.1 PMLSM에서의 추력의 발생

그림 1은 가동자석형 PMLSM의 개략도를 나타낸다. 고정자측은 치/슬롯구조를 가지는 코어에 3상 권선이 감겨져 있으며, 이동자측은 계자자속원으로서의 영구자석과 자속의 경로를 만들어주기 위한 back iron으로 구성되어 있다.

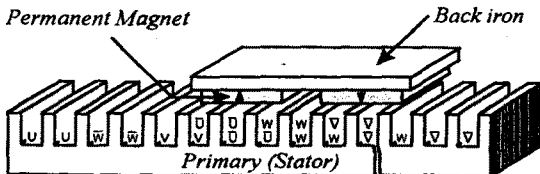


그림 1. 가동자석형 PMLSM의 개략도

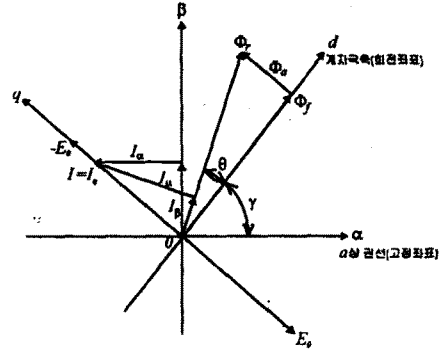


그림 2. PMLSM의 공간 벡터도

계자극축 즉, 영구자석의 중양을 회전좌표계상의 d축으로 잡고 고정자의 a상 권선 기자력축을 고정좌표계상의 α 축으로 잡으면 PMLSM의 공간 벡터도는 그림 2와 같이 된다[2]. 그림 2의 벡터도에서는 전기자 전류 I_a 가 계자극에서 발생하는 자속과 직각인 방향, 즉 q축 방향의 성분만을 가지며 주자속 방향인 d축방향 성분은 포함하지 않은 상태를 나타내고 있다.

전기자 전류 I_a 가 d축 성분을 가지고 있지 않으므로 ($I_d=0$) 전기자 전류 I_a 에 의해 생기는 반작용 자속 Φ_a 는 주자속 Φ_f 와 직각인 q축 방향만 발생하게 된다. 따라서 이와 같은 경우에 발생하는 추력 F 는

$$F = k\Phi_r I_a = k\Phi_r I_q \cos\theta = k\Phi_f I_q$$

$$= K_F I_q [N] \tag{1}$$

이 된다. 여기서 K_F 는 추력상수를 나타낸다.

위와 같이 제어하는 경우 각 상 전류는 다음과 같이 결정된다.

$$i_a = I_q \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right)$$

$$i_b = I_q \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$i_c = I_q \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{4}{3}\pi\right)$$

여기서 τ 는 극간격을, x 는 이동자의 위치를 나타낸다.

2.2 유한요소법을 이용한 추력특성 해석

이동자의 위치(변위)와 전류에 따른 PMLSM의 추력특성을 유한요소법을 사용하여 해석하였다[3]. 전류원 해석을 수행하였으며, 해석시 각 상 입력전류는 이동자의 이동에 따라 식(2)와 같은 전류가 이상적으로 인가되고 보았다.

그림 3은 이러한 경우의 추력특성 해석결과로서, 전기자 코어의 치/슬롯 구조와 영구자석과의 상호작용에 의해 최대치 3.6[N] 정도의 detent force가 발생하며, 전류가 증가함에 따라 detent force 성분과 함께 공극자속의 고조파성분에 의한 추력리플이 추가되어 추력리플의 위상이 약간씩 변화하였다. 이를 토대로 하여 식(1)의 이상적인 추력식을 수정하면 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$F = K_F I_q + F_h(x, I_q) + F_d(x) \quad [N] \quad (3)$$

여기서, F_h , F_d 는 각각 공극자속의 고조파성분에 의한 추력리플분과 detent force에 의한 추력리플분을 나타낸다. F_h 는 F_d 에 비해 상대적으로 작으며 전류의 크기에 따라서도 변하므로 간략화하여 F_d 성분만을 고려하면, 이동자의 위치에 따라 전류량을 가감함으로써 추력리플을 감소시킬 수 있다. 추력을 일정하게 유지하기 위한 보상된 전류를 I_{qc} 라고 하면, I_{qc} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{qc} = I_q + I_q' = I_q - \frac{F_{dm}}{K_F} \sin(2mq \frac{\pi}{\tau} x) \quad (4)$$

여기서, I_q' 는 detent force를 보상하기 위한 전류분, F_{dm} 은 detent force의 최대치, m 은 권선의 상수, q 는 매상 매극당 슬롯수를 나타낸다.

그림 4는 식(4)로 보정된 전류를 인가한 경우의 이동자의 위치와 전류에 따른 추력특성의 해석결과이다. 추력리플이 완전히 보상되지는 못했지만 상당히 감소되었음을 알 수 있다.

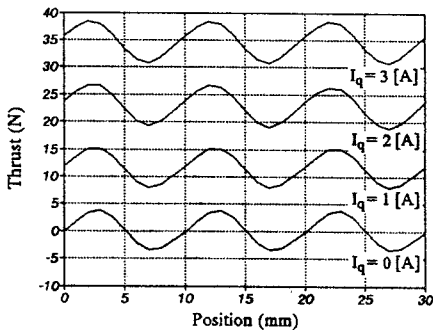


그림 3. 이동자의 위치 및 전류에 따른 추력특성 (정현파 전류 인가시)

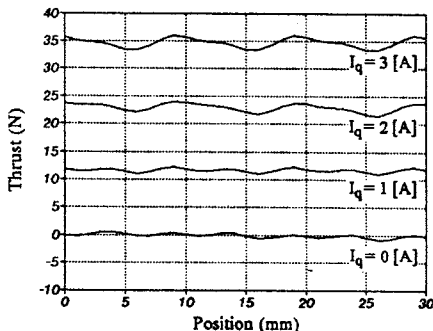


그림 4. 이동자의 위치 및 전류에 따른 추력특성 (보상된 전류 인가시)

3. 제어시스템의 구성 및 실험결과

3.1 제어 시스템

그림 5는 제어시스템의 구성을 나타내고 있다. 속도 명령과 실제 속도와의 차이에 따라 전동기에 인가할 전류량을 계산하는 속도제어기가 있으며 이 전류분에 PMLSM의 이동자의 위치에 따른 추력리플 보상분을 추가하기 위한 블록이 추가되어 있다. 최종적인 전류치 명령은 내부 전류제어기에 인가되어 PMLSM의 각 상에 인가될 전압치가 계산이 된다. 내부 전류 제어기는 공간 벡터(Space Vector) PWM으로 구성되어 있으며 [5] 이 모든 계산을 위하여 TMS320C31 DSP 칩을 이용하였다. 속도 제어를 위한 샘플링 주기는 2 [msec]로 하였으며 내부 전류제어를 위한 전류 샘플링 주기는 0.2 [msec]로 설정하였다.

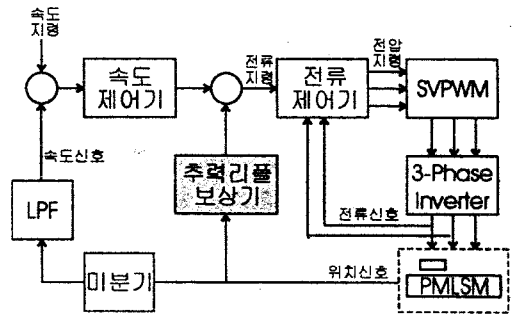


그림 5. PMLSM 제어 시스템의 구성

3.2 실험장치

그림 6은 DSP 보드와 전력회로를 포함한 PMLSM의 실험장치를 보여주고 있다. PMLSM의 1차측 고정자의 길이는 0.96 [m]이며 이동자의 극수는 2극, 극간격은 30 [mm]이다. 이동자의 위치를 검출하기 위해 회전형 엔코더를 사용하였으며, 위치정보를 미분하므로써 제어에 필요한 속도정보를 계산하였다.

실험파형은 DA 컨버터를 사용한 DATA Acquisition Card를 사용하여 측정하였으며, 이때 신호의 검출은 0.5 [msec]의 주기로 수행하였다.

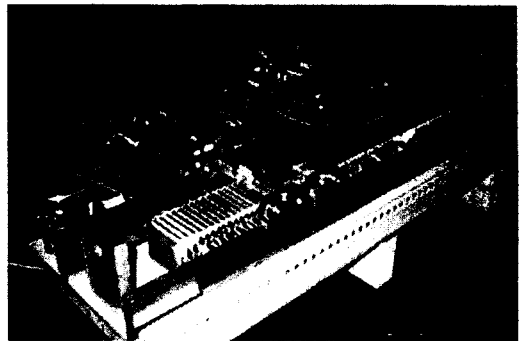
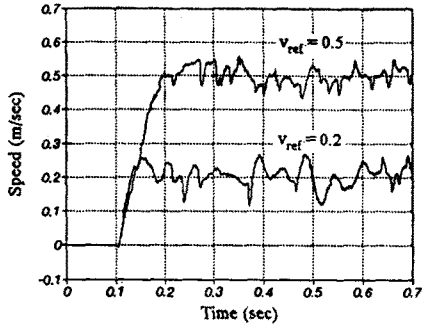


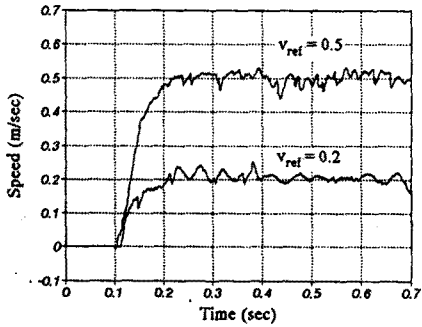
그림 6. 제어특성 실험을 위한 PMLSM 시험기

3.3 실험결과 및 분석

그림 7은 통상의 속도제어시와 추력리플 보상 알고리즘을 추가한 속도제어시의 실험파형을 나타내고 있으며, 본 알고리즘을 추가함으로써 속도 지령이 작을수록 속도 응답파형이 많이 개선되었음을 알 수 있다. 그림에는 나타내지 않았지만 속도지령이 1 [m/s] 이상에서는 보상 전, 후의 파형이 거의 같은 결과를 나타내었는데, 이는

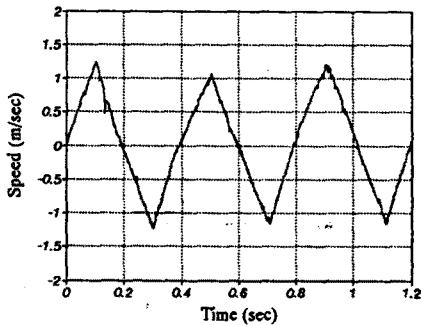


(a) 추력리플 보상 전의 속도제어 파형

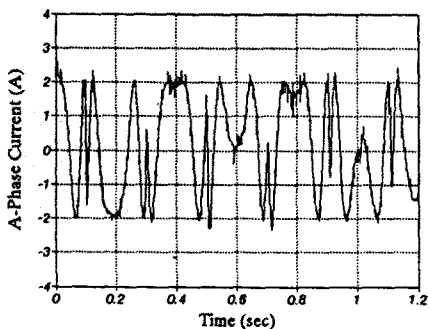


(b) 추력리플 보상 후의 속도제어 파형

그림 7. 추력리플 보상 전의 경우와 보상 후의 경우의 속도제어시의 속도 응답파형



(a) 속도 파형



(b) A상 전류 파형

그림 8. 왕복운전시의 속도 및 전류 ($I_{q, max} = 2[A]$)

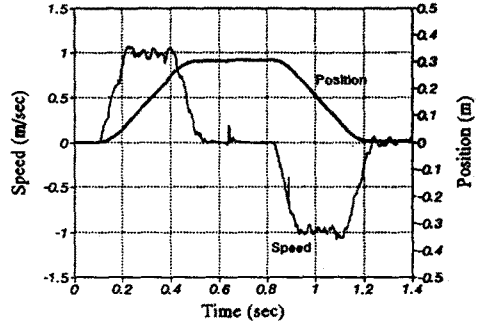


그림 9. 사다리꼴 형태의 속도 지령에 대한 속도 및 위치 파형 ($v_{max} = 1[m/sec]$)

이동자의 관성에 의해 추력리플의 영향이 많이 감소되고 전류제어시 실제 전류가 전류명령치에 완전하게 추종하지 못하는때에 기인하는 것으로 사료된다. 그림에서 속도파형이 규칙적인 응답특성을 보이지 못하고 있는데 이는 PMLSM 시험기의 가공정도가 떨어져 부분적으로 detent force의 크기가 다르기 때문에 발생한 결과로 사료된다.

그림 8은 0.4 [sec]의 주기로 왕복운전을 하였을 경우의 속도 및 전류에 대한 실험파형으로, 제어가 어느정도 충실히 수행되고 있음을 알 수 있다.

그림 9는 사다리꼴 형태의 속도지령(가속 시간 : 0.1초, 일정속도 운전시간 : 0.2초)을 주어 속도제어를 수행하였을 경우의 속도 및 이동자의 위치를 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 PMLSM의 전류제어시의 위치 및 전류에 따른 추력특성을 유한요소법을 사용하여 해석하고 이를 통하여 추력리플을 저감하기 위한 제어기법을 적용하였다. 적용한 제어기법은 이동자의 위치에 따라 추력리플을 보상하기 위한 전류분을 추가하는 방법으로서, 저속운전일수록 속도 응답파형이 많이 개선됨을 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

PMLSM의 위치제어를 수행하는 경우 detent force에 의한 추력리플은 위치결정 특성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되므로, 위치제어시에는 본 제어기법이 보다 효과적으로 적용될 수 있으리라 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] T. Mizuno, H. Yamada, "Magnetic Circuit Analysis of a Linear Synchronous Motor with Permanent Magnets", IEEE Trans. Mag., Vol. 28, No. 5, pp. 3027-3029, 1992.
- [2] 원중수, 원충연, 김 광현, AC서보모터와 마이컴 제어, 동일출판사, 1994.
- [3] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1992.
- [4] H. W. Kim, J. W. Kim, S. K. Sul, "Thrust Ripple Free Control of Cylindrical Linear Synchronous Motor Using Finite Element Method", IEEE IAS Annual Meeting, pp. 42-46, 1996.
- [5] 김남준, "유도전동기 저속 운전 특성 개선에 관한 연구", 한양대학교 박사학위논문, 1996.