

FOC를 이용한 PMLSM의 디텐트력 저감에 관한 연구

진상민*, 주옥오*, 조유희*
 동아대 전기공학과*

A Study on Detent Force Reduction of PMLSM Using FOC

Sang-min Jin*, Yu-Wu Zhu*, Yun-Hyun Cho*
 Dept. of Electric Engineering, Dong-A University*

Abstract - 영구자석 선형 동기 전동기(PMLSM)의 detent force는 입력전류가 가해지지 않은 상태에서의 영구자석과 철심간의 상호 작용에 의하여 발생된다. 이는 고정자에 관한 이동자의 위치 함수로서 표현 가능하다. 본 논문에서는 이동자의 위치에 따른 detent force를 측정하고, 이를 바탕으로 PMLSM 추력 리플의 원인이 되는 detent force를 저감하기 위한 보상법이 추가된 Field Oriented Control(FOC)을 제안하였다. 또한, 동일한 상황에서 시뮬레이션 및 실험을 통해 제안된 제어법의 유효성을 입증하였다.

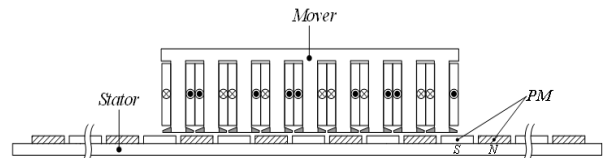


그림 1. PMLSM의 구조

1. 서론

PMLSM는 제어 성능의 우수성, 큰 공극, 빠른 동특성, 낮은 온도 손실, 비교적 간단한 구조를 가지는 특징과 별도의 변환장치 없이 직접 직선 추력을 발생시키며, 구동부에 접촉이 없어 소음 및 기계적 마모가 없다는 장점으로 인해 고추력, 고정밀, 고속의 속도 및 위치 제어가 요구되는 공작 기계의 2축 테이블, 반도체 제조 장비와 같은 직선 왕복 운동을 필요로 하는 시스템에서의 적용이 확산되고 있는 추세이다.

하지만 PMLSM에서는 고정자 쇄교 자속 분포의 왜곡과 reluctance force, detent force 및 시간 고조파에 따른 추력 리플이 발생하게 된다. 이러한 PMLSM의 추력 리플 성분은 정밀 시스템 적용 시 위치 오차와 기계적 진동 및 소음을 야기한다[1].

이에 본 논문에서는 분수 슬롯 피치의 구조를 가지는 표면 부착형 PMLSM을 20[KHz]의 스위칭 주파수로 FOC를 이용해 제어함으로써 추력 리플을 야기하는 시간 고조파와 reluctance force, 고정자 쇄교 자속 분포의 왜곡 성분을 배제하고, 추력 리플은 전적으로 detent force에 의해 발생된다는 가정 하에 이를 줄이기 위한 제어법에 관해 연구하고자 한다[2].

2. 본론

2.1 PMLSM 모델 해석

본 논문에서 제안하는 PMLSM의 모델은 고정자에 교차되는 N극과 S극의 영구자석이 부착되어 있으며, 이동자에 전기자 권선이 포함된 단 1차형(short primary type)의 PMLSM이다. 이동자는 8극 9슬롯, 분수 슬롯 피치의 집중권으로, 철심이 적층된 구조로 이루어져 있다. 제안된 8극 9슬롯의 분수 슬롯 피치 구조는 detent force뿐만 아니라 역기전력의 고조파 또한 감소시킨다[3]. 표1에 PMLSM의 제원, 그림1에 PMLSM의 구조를 나타내었다.

〈표 1〉 Specification of PMLSM

Parameter	Value	Parameter	Value
Phase number	3	Rated thrust	600N
Winding number/slot	80 turns	Pole pairs	4
Slot/Pole/Phase	3/8	Pole pitch	29.25 mm
Height of mover core	77 mm	Slot pitch	26 mm
Height of mover yoke	23 mm	Slot width	15 mm
Height of stator yoke	9 mm	PM length	95 mm
Air-gap length	3 mm	PM width	21 mm
Material of PM	Nd-Fe-B	PM height	4 mm

PMLSM의 출력 추력은 electromagnetic force와 detent force의 합으로 표현 가능하며 detent force에 의해 왜곡된다. 그림2에 이동자의 위치에 따른 static force의 분포를 나타내었다. 제안된 PMLSM에서의 detent force의 최대치는 43.4[N]이며, 이는 electromagnetic force의 7.2%에 달하는 수치로서 PMLSM의 성능을 저해하는 주요소로 작용한다.

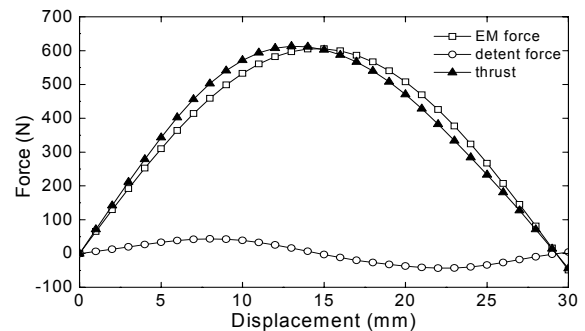


그림 2. 이동자의 위치에 따른 Static force의 파형

2.2 제어 알고리즘

앞선 PMLSM의 모델 해석에서 나타난 추력 특성을 토대로 안정적인 출력 추력을 얻기 위한 FOC를 적용할 수 있다. 이상적인 PMLSM을 고려할 때 전압 방정식과 쇄교 자속식은 다음과 같다[3].

$$v_d = R_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \frac{\pi v \lambda_q}{\tau}$$

$$v_q = R_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \frac{\pi v \lambda_d}{\tau}$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{PM}$$

$$\lambda_q = L_q i_q$$

여기서 v_d, v_q 는 d축과 q축의 고정자 전압, i_d, i_q 는 d축과 q축의 고정자 전류, R_s 는 고정자 저항, v 는 이동자의 전기적 속도, λ_d, λ_q 는 d축과 q축의 고정자 쇄교 자속, λ_{PM} 은 이동자에 쇄교하는 영구자석의 자속, L_d, L_q 는 d축과 q축의 인덕턴스, τ 는 pole pitch를 나타낸다.

본 논문에서 제안하는 FOC 방식의 제어에서는 d축 전류 i_d 는 0이고, d축과 q축의 릴럭턴스는 동일하므로, 전기적 추력은 다음과 같이 주어진다.

$$F_e = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} n_p \lambda_{PM} i_q = k_f \cdot i_q$$

여기서 F_e 는 전기적 추력, n_p 는 pole pairs, k_f 는 $3\pi n_p \lambda_{PM} / 2\tau$ 로 추력 계수를 나타낸다.
또한, PMLSM의 운동방정식은 다음과 같다.

$$F_e(x) - F_d(x) = M \frac{dv_m(t)}{dt} + Bv_m(t) + F_l(t)$$

여기서, M 은 이동자의 총무게, B 는 댐핑 계수, v_m 은 이동자의 기계적 속도, F_d 는 detent force, F_l 은 외부 부하의 추력을 나타낸다.
그림3은 PMLSM의 제어 블록도를 나타낸다.

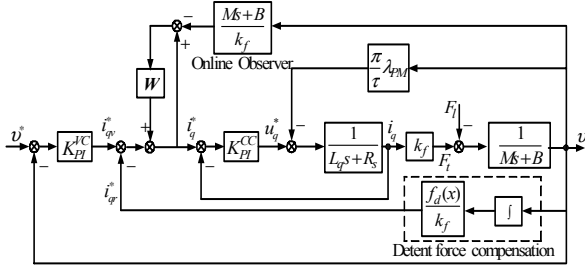


그림 3. PMLSM의 제어 블록도

detent force 보상부는 PMLSM 이동자의 위치에 따라 변화하는 detent force를 보상 전류로 변환하는 역할을 한다. 보상 전류 i_{qr} 은 다음식과 같이 계산되어진다.

$$i_{qr}(x) = \frac{F_d(x)}{k_f}$$

여기서, i_{qr} 은 보상 전류, F_d 는 detent force, k_f 는 추력 계수를 나타낸다. 이러한 FOC 알고리즘은 q축 전류 성분만을 제어함으로써 실시간 제어를 가능하게 한다.

2.3 시뮬레이션 및 실험결과

고정밀 PMLSM 시스템의 구현에 있어 detent force는 성능의 장애요소가 되어진다. 특히 무부하 저속시에 그 영향은 더욱 커진다. 따라서 본 논문에서는 무부하, 속도 0.1[m/s] 상태의 PMLSM을 시뮬레이션하고, 동일한 상황 하에서의 실험을 통해 얻어진 추력 특성을 비교, 분석함으로써 제안한 detent force 보상법의 유효성을 입증하고자 하였다.

시뮬레이션은 MATLAB을 사용하여 실시하였고, 실험은 제작되어진 PMLSM에 DSP를 이용한 드라이브 시스템을 구성하여 실시하였다. 그림4에 MATLAB을 이용한 PMLSM 시스템의 블록도를, 그림5에 제작되어진 PMLSM의 외형을 나타내었다.

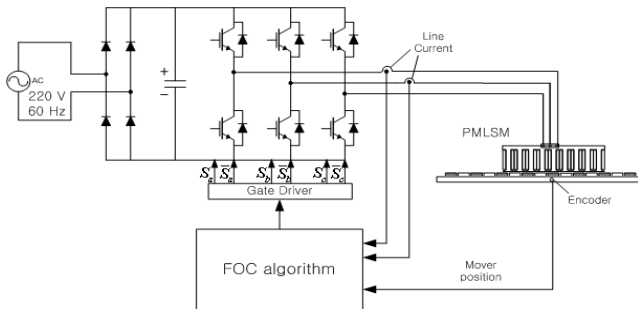


그림 4. MATLAB을 이용한 PMLSM 시스템의 블록도

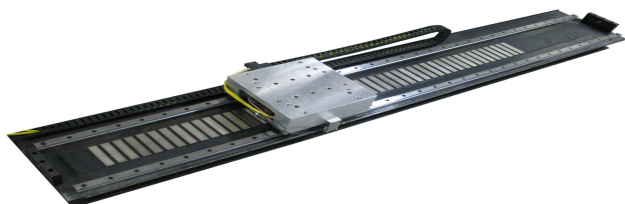


그림 5. PMLSM의 외형

시뮬레이션과 실험은 각각 detent force의 보상유무로 구분하여 실시하였으며, 그림6(a),(b)에 보상유무에 따른 시뮬레이션의 결과와 실험의 결과를 나타내었다.

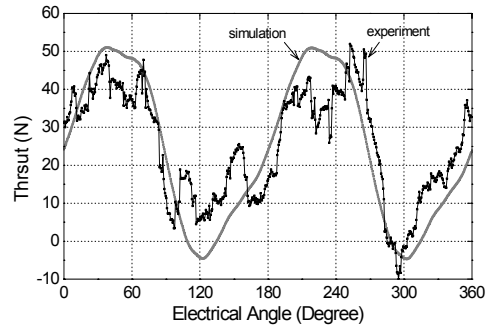


그림6.(a) 보상을 하지 않았을 경우의 PMLSM 추력 파형

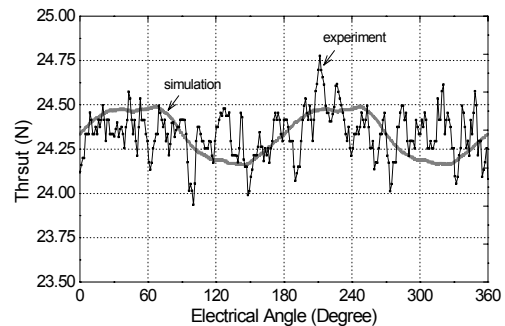


그림6.(b) 보상을 했을 경우의 PMLSM 추력 파형

그림6(a)에서 나타나듯 detent force 보상을 하지 않았을 경우에는 detent force에 의한 추력 리플이 -10[N]에서 52[N]까지 발생함을 알 수 있다. 반면 그림6(b)에서 보여지는 PMLSM의 추력은 평균치 24.33[N]을 기준으로 크게 변동이 없음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 PMLSM의 추력 리플의 발생 원인인 detent force의 저감을 위한 제어법을 제안하고, 8극 9슬롯, 분수 슬롯 피치의 구조를 가지는 PMLSM의 시뮬레이션과 실험을 동일한 상황 하에서 실시함으로써 제안된 제어법이 detent force의 저감에 효과가 있음을 증명하였다.

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

[참 고 문 헌]

- [1] 정근석, "영구자석 선형동기전동기의 추력리플저감을 위한 설계 및 제어에 관한 연구", 동아대학교 박사학위 논문.
- [2] S.M Hwang, J.B. Eom, Y.H Jung, D.W. Lee, and B.S. kang, "Various design techniques to reduce cogging torque by controlling energy variation in permanent motors", IEEE Trans. Magn., vol. 37, pp. 2806-2809, Jul. 2002.
- [3] Yu-wu Zhu and Yun-hyun Cho, "Thrust Ripples Suppression of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", IEEE TRANSACTION ON MAGNET, vol.43, no.6, pp2735-2739, June 2007.