

영구자석형 선형 동기기의 부하 외란에 따른 동특성에 관한 고찰

이승훈, 장기봉, 김규탁
 창원대학교 전기공학과

The Study of Dynamic Characteristic Analysis of PMLSM according to Disturbance Load

Lee Seung-Hoon*, Jang Ki-Bong Kim Gyu-Tak

Department of Electrical Engineering, Changwon National Univ.

Abstract - In this paper, the dynamic characteristic according to disturbance load of Permanent magnet Linear Synchronous Motor(PMLSM) is dealt with carefully. In order to analyze dynamic characteristics, the simulink of Matlab is used. And F.E.M. is used for calculation of the parameter of PMLSM. The measuring system of the dynamic characteristics is manufactured and experiment results are compared with simulation results.

1. 서 론

최근, 생산 산업의 고도화와 자동화에 의하여 직선시스템의 고기능화는 물론 정밀위치제어 성능이 동시에 요구되고 있다. 기존의 직선시스템은 회전형 전동기를 구동원으로 채택하고 있으나, 회전운동을 직선운동으로 변환시키는 기계적 메커니즘에서 발생하는 여러 문제점들(진동, 소음, 마찰, 지연성 등)로 인해 고속 성능과 정밀 위치제어성을 만족시키지 못하고 있어 회전-직선 변환 메커니즘 없이 직접 직선 추력을 발생시키는 리니어 모터(Linear motor)에 관심이 고조 되고 있다.

이송용 주축 시스템에 이용되는 X - Y Gantry 로봇 등의 직선 운동 메커니즘은 산업사회의 고도화에 따라 고속, 고 정밀 속도 및 위치제어 기능을 요구하고 있다. 그러나 이들 시스템에 대한 연구는 리니어 모터의 구조적인 변화에 따른 디텐트력 감소, 효율 증가와 같은 정적 특성에 대한 연구가 많이 이루어지고 있으나 이동 및 기동시의 부하 가변에 따른 동적 특성에 대한 연구는 매우 미비한 실정이다. 공작기계와 같은 시스템에 리니어 모터를 산업 시스템에서 구동할 때 이송 및 기동시에 부하 가변이 급격하게 이루어지는 경우가 매우 많으므로 이러한 부하 외란에 따른 동특성 규명이 매우 시급하다. 이를 위하여 기동모터인 리니어 모터의 저항, 인덕턴스, 추력상수 등과 같은 파라미터의 정밀 계산이 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 전기기기의 정밀한 특성 해석 기법으로 정립된 유한요소해석을 통하여 저항, 인덕턴스, 추력 상수와 역기전력 상수를 도출하였으며, 각각의 도출 파라미터를 실험과 비교하여 파라미터 산출의 타당성을 입증하였다. 또한, 도출한 파라미터를 이용하여 리니어 모터의 동특성 시뮬레이션을 수행하였으며, 동특성 실험 장비를 제작하여 시작기에 대한 실험을 통해 실제 시스템에서 발생하는 현상을 비교 분석 하였다.

2. 본 론

2.1 해석모델

여러 리니어 모터 중 영구 자석형 선형 동기 전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor : 이하 PMLSM)는 계자원으로 영구자석을 사용하는

선형 동기 전동기로서, 효율 및 추력 밀도가 높고 제어 성능이 우수하며 고속, 고효율이 가능하다는 장점을 가진다.

그림 1은 영구자석을 계자로 이용하여 직선운동을 하는 PMLSM 구조를 나타낸 것이다. PMLSM은 3상 권선을 시행한 전기자(또는 1차측 이라고도 한다)와 영구자석으로 이루어진 계자(또는 2차측 이라고도 한다)로 구성되어 있으며, 가동자를 어느 것으로 선택하느냐에 따라 단 1차형 PMLSM과 단 2차형 PMLSM으로 분류된다.

본 논문에서는 가동자를 1차측 권선으로 구성하여 권선에 의한 누설자속이 적으며 효율이 높은 단 1차형 PMLSM를 연구 모델로 선정하였다.

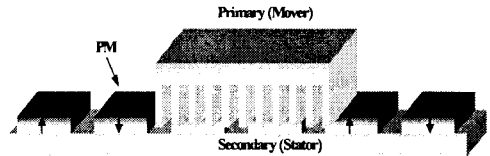


그림 1 단 1차형 PMLSM의 구조

2.2 부하외란에 따른 동특성 고찰

2.2.1 파라미터 산정

PMLSM의 동특성 해석을 위해 먼저 PMLSM의 저항, 인덕턴스, 역기전력, 추력상수 같은 파라미터값을 정확하게 계산하고, 실험을 통해 검증하는 것이 필요하다.

(1) 저항

저항은 일반적으로 등가적인 기법을 적용하여 값을 산정한다. 이것은 권선저항의 경우 제조회사에서 제공하는 값에 의해서 거의 규격화 되어 있으므로 정확한 길이와 단면적만 산출한다면 등가적인 계산에 의한 저항 산출치와 측정치가 거의 일치하기 때문이다.

$$R = \frac{l_c}{\sigma S} = \frac{2N \left(l_2 + \pi \frac{(d_c + w_c)}{2} \right)}{\sigma \pi a^2} \quad (1)$$

여기서, l_c 는 코일의 총 길이, S 는 도체 단면적, σ 는 구리의 도전율, a 는 도체반경을 나타낸다. 위의 수식으로 계산한 저항 값은 1.389[Ω] 이고, 실제로 측정 한 저항 값은 1.4[Ω] 이다.

(2) 인덕턴스

본 연구에서는 자기 에너지를 이용해 인덕턴스를 계산하는 에너지 섭동법을 이용하여 인덕턴스를 산정하였고, 이때, 상당 인덕턴스는 17.7[mH]로 계산되었다. 그림 2는 에너지 섭동법에 의한 인덕턴스 계산의 흐름도이다.

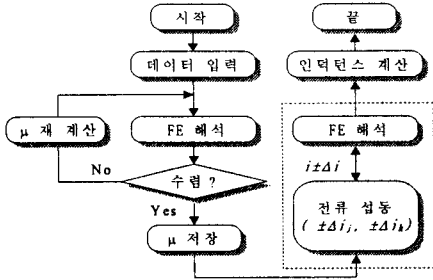


그림 2 에너지 섭동법에 의한 인덕턴스 계산



그림 3 퍼넬선라인과 자속밀도 분포도

(3) 역기전력 상수

PMLSM의 역기전력 상수는 유한요소 해석을 통하여 그 값을 계산할 수 있었는데 역기전력 상수 값은 33.4[V·s/m]로 계산되었다.

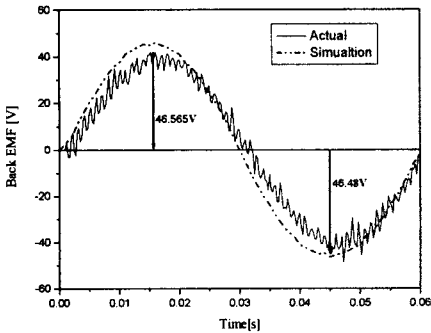


그림 3 역기전력

(4) 추력 상수

추력 상수는 PMLSM의 3 상에 DC 전류 소스를 인가하고 위치를 변화시키에 따라 부하각이 변화하는 특성을 나타낸다. 이 특성은 그림 4와 같이 나타난다. 동기기의 경우 인가되는 전류는 모두 토크분 전류로 사용된다. 그리고 부하각에 따라 발생하는 추력은 변화하게 되고 일반적으로 최대 토크를 발생시키는 부하각 90도에서 운전된다. 따라서 최대치를 인가된 전류로 나누게 되면 추력 상수가 되는 것이다. 이 모델에서는 정추력 계산시의 입력전류는 6.53[A]이고, 이때의 발생 추력의 최대치는 647.123[N]으로 계산되었다. 추력 상수는 아래의 식 (2)에 의하여 계산할 수 있다.

$$k_f = \frac{F}{i} \tag{2}$$

여기서, k_f 추력 상수, F 는 발생추력의 최대치, i 는 이때의 입력전류이다. 식 (2)를 이용하여 계산한 추력상수는 99.1[N/A]이다.

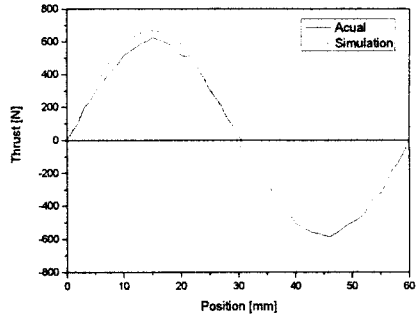


그림 4 정추력

2.3 PMLSM 모델링 및 시뮬레이션

PMLSM의 동특성 시뮬레이션을 위해서는 인덕턴스에 의한 역기전력을 고려한 전압방정식과 기계적 운동방정식의 모델링이 필요하다. 동기전동기는 계자가 직류 전원에 의해 여자되는 전자석형과 영구자석으로 자속을 만드는 영구자석형 동기기로 크게 나눌 수 있는데 영구자석형 동기기는 전자석형 동기기와 여자 방식만 다를 뿐 근본적인 제어 및 구동원리는 같다고 할 수 있다. [1] 또한, 직선운동을 구현하는 PMLSM도 회전형 전동기와 수학적 모델링은 동일하므로 기존의 회전형 동기기의 제어 이론 및 모델링 기법을 그대로 적용할 수 있다.

식(3)과 식(4)는 전압방정식과 운동방정식을 결합하여 나온 전류방정식과 속도방정식이다.

$$i(t) = \frac{M}{K_f} \frac{dv(t)}{dt} + \frac{D}{k_f} v(t) + \frac{F_l}{k_f} \tag{3}$$

$$v(t) = \frac{D}{(D-1)} A e^{m_1 t} + \frac{1}{(1-D)} A e^{m_2 t} - A \tag{4}$$

여기서

K_e : 역기전력상수, K_f : 추력상수

$v(t)$: 속도, $\frac{dv}{dt}$: 가속도

M : 이송부하, D : 마찰계수, F_l : 부하

$$A = \frac{k_f R - k_f V}{DR + k_f k_e}, B = \frac{DR}{LM} + \frac{k_f k_e}{LM}, C = \frac{D}{M} + \frac{R}{L}, D = \frac{m_2}{m_1}$$

$$m_1 = \frac{-C + \sqrt{C^2 - 4B}}{2}, m_2 = \frac{-C - \sqrt{C^2 - 4B}}{2}$$

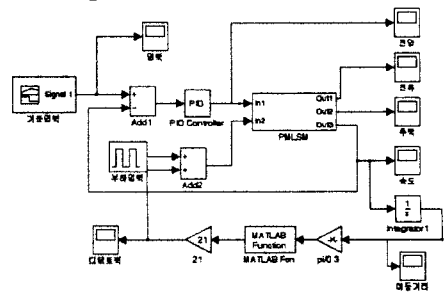


그림 5 PMLSM을 이용한 직선운동 시스템 모델링

그림 5는 MATLAB SIMULINK에서 앞에서 구한 파라미터와 수식을 이용하여 PMLSM을 이용한 직선운동 시스템을 모델링한 것이며, 표 1은 파라미터를 나타낸다.

표 1 PMLSM의 동특성 해석 파라미터

가속도[G]	2	속도[m/s]	2
추력상수[N/A]	99.1	역기전력상수[V·s/m]	33.4
저항[Ω]	1.4	인덕턴스[mH]	17.7
가동자 무게[kg]	40	마찰계수	0.1
병렬회로수	2	정격전류[Arms]	6.53

2.4 동특성 실험장비

그림 6의 동특성 실험장비는 PMLSM의 Stator를 슬라이딩베드 위에 고정시켰다. 이때 슬라이딩 베드는 LM 가이드 위에 장착되어 있어 마찰력을 최소화시키는 물론 이동이 가능하도록 하였다. 이 슬라이딩 베드를 로드셀(model: SBA-200L CAS)로 고정시킴으로서 PMLSM의 mover가 이동할 때 작용-반작용에 의하여 PMLSM의 stator에 가해지는 moving 추력을 로드셀과 로드셀에 연결된 실시간 증폭기를 이용하여 실측할 수 있도록 하였다. 한편, mover의 속도를 실측하기 위하여 리니어 스케일 1.0[m]를 장착하였다. 그리고 측정장비의 옆쪽에 위치한 양측식 리니어 모터를 이용하여 부하를 인가하였다. 이 측정 장비를 이용하여 PMLSM의 운전 시 부하의 외란이 발생할 때의 속도특성, 추력특성, 전류특성을 측정하였다.

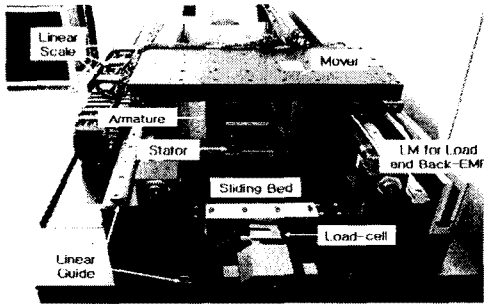


그림 6 동특성 실험 장비

2.5 동특성 실험 결과와 시뮬레이션 결과 비교

그림 7은 PMLSM 운전중 300[N]의 부하외란이 발생하였을 때의 속도특성을 비교한 것이다. 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교해 보면 부하가 인가된 시점에서 속도가 감소하고 다시 수렴하는 양상이 거의 일치함을 알 수 있다.

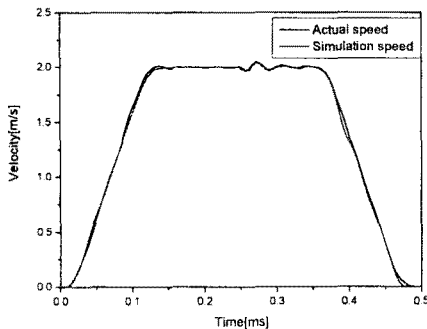


그림 7 속도특성

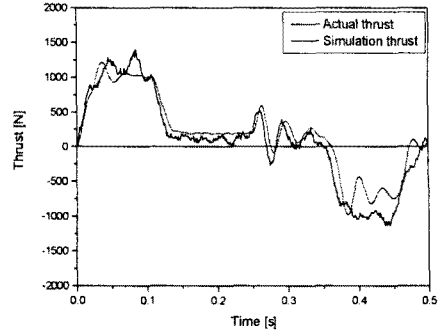


그림 8 추력특성

그림 8은 추력특성을 비교한 것이다. 부하외란으로 인해 속도가 감소하면 원래의 속도로 운전하기 위해 전류가 증가하게 되고, 증가한 전류에 의해 추력 또한 증가함을 알 수 있다. 전류의 파형은 추력의 파형과 동일한 양상을 보이는데 이는 영구자석을 계자로 사용하는 PMLSM의 특징으로 이와 같은 결과가 나오는 이유는 PMLSM의 입력전류는 영구자석을 계자로 사용하기 때문에 계자전류는 '0'이 되고, 모든 전류는 추력을 만드는데 사용되기 때문이다. 그리고 속도 특성에 비해 추력특성은 시뮬레이션 결과와 측정결과가 약간의 차이를 보이는데 이는 실제 시스템에 작용하는 진동, 그리고 실제 제어기의 PI Gain과 시뮬레이션의 PI Gain의 차이로 인한 오차로 사료된다.

3. 결 론

본 논문에서는 직선 시스템에 직선 추력을 직접 발생시키는 PMLSM의 부하 급변에 따른 동특성에 관한 연구를 수행하였다. 먼저, PMLSM의 동특성 해석을 위해서 PMLSM의 동특성 해석에 필요한 파라미터를 도출하였고, PMLSM의 수학적 모델링을 통해서 전류와 속도의 상태 방정식을 구할 수 있었다. 그리고 상태방정식을 이용하여 MATLAB simulink를 사용하여 부하 급변에 따른 PMLSM의 속도, 추력 그리고 전류 특성을 얻을 수 있었다. 이렇게 얻어진 시뮬레이션 결과와 동특성 측정장비를 사용하여 얻어진 측정 결과를 비교·검토해 본 결과 부하 급변시의 속도, 추력 그리고 전류 특성이 대동소이하여 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

PMLSM의 파라미터를 정확히 계산하고, 시스템을 정확하게 모델링 하였을 때 그 결과는 실제 PMLSM의 동특성과 거의 일치함을 확인함으로써 PMLSM의 시뮬레이션을 통해 실제 기기에서 일어나는 특성들을 예측 가능함을 확인할 수 있었다. 그리고 이번 연구에서 수행하지 못한 진동에 의한 영향과 부하의 크기가 클수록 뒤틀림 현상이 발생하는 문제를 해결함으로써 더욱 정확하고, 다양한 부하에 의한 동특성 연구가 이루어 질 것이라 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [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] 김규탁 외 "공심 코일형 리니어 DC 모터의 설계 및 동특성 해석", 대한 전기 학회 논문지 pp.165-171, 49B권, 3호 2000
- [3] 김규탁 외 "영구자석 선형동기전동기의 특성해석 및 위치 제어 시스템 구성", 대한 전기 학회 춘계학술대회 논문집 pp93-95, 2001