

제어알고리즘 개선을 위한 3차원 반송 시스템 선형유도전동기의 동특성 해석

전수진, 이민명, 이종호
대전광역시 유성구 덕명동 한밭대학교 전기공학과

Dynamic Characteristics Analysis of 3D Conveyor System Linear Induction Motor for Control Algorithm Developments

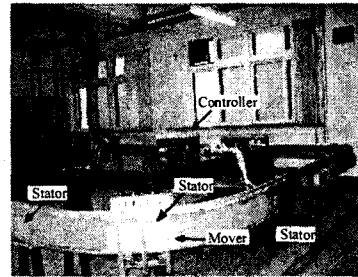
Su-Jin Jeon and Jung-Ho Lee

Dept. of Electrical Engineering, Hanbat National University., Dukmyung-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-719

Abstract - It is necessary to modify the state-of-the-art of speed control theory because of the phase asymmetry in the Linear Induction Motor (LIM) and for the constant speed control of mover using single vector control inverter system, it is important that primary stack is located in appropriated intervals in the 3D conveyer system using LIM.

The dynamic characteristic analysis method of the vector controlled LIM using coupled FEM and control algorithm taking into account the movement is proposed.

The focus of this paper is the analysis relative to selecting primary stack intervals in order to constant speed control in the 3D conveyer system using LIM.



〈그림 1〉 3D 반송 시스템

1. 서 론

선형유도전동기(LIM)는 직접 구동과 간단한 구조라는 장점 때문에 물류 반송, OA, FA를 비롯한 정밀기기 산업에 널리 이용되고 있으며 앞으로 그 응용범위는 더욱 확대될 것으로 기대된다.

특히 LIM을 자동 반송시스템에 응용한 경우 체인, 벨트 등을 이용한 기존 시스템에서 문제시되는 미끄러짐에 의한 가, 감속의 제한이 없으며 고속(최대 속도:5m/sec) 반송이 가능하고 롤러를 제외하고는 기계적인 가동부 및 접촉부가 존재하지 않아 무소음 반송 및 정밀한 위치 제어가 가능하다.

그리고 유지, 보수가 거의 필요치 않고 라인의 연장이나 변경이 매우 간단하다.

본 논문에서는 가벼운 물품을 운송하는 3차원 반송 시스템을 다룬다. 이 시스템은 그림1에서 나타난 것과 같이 수평, 수직, 커브 구간으로 구성된 3차원 순환 레일로서 약품, 문서 등을 캐리어(Carrier)로 운반하는 자동 반송 시스템이다.

또한 캐리어가 라니어 모터상에 있을 때만 통전되고 전원 케이블이나 리드선이 제거되었으므로 에너지 절감효과가 매우 높아 운전비가 저렴하고 고속화, 자동화(가, 감속 제어, 정밀위치 제어), 저가격화를 이루어 생산성 향상 및 국제 경쟁력 강화를 꾀할 수 있는 등의 여러 가지 장점으로 인하여 크게 각광을 받고 있다.

속도 제어의 원리로서 시작점의 리니어 모터는 원하는 방향으로 캐리어를 가속시키고 캐리어는 추진된 다음에는 관성으로 움직이며 캐리어의 속도는 레일과 롤러 사이의 마찰로 인해 감소되고 다음번째의 리니어 모터에서 다시 캐리어를 가속시킨다.

벡터 제어 인버터장치를 사용해 캐리어를 일정한 속도로 제어하기 위해서는 1차측을 적당한 간격으로 위치하는 것이 중요하다. 그러나 LIM은 모터의 구조 때문에 각 상의 상수들이 다르므로 회전기기 이론으로 움직이는 2차측의 정확한 속도 제어는 어렵다.

LIM의 벡터 제어를 위한 2가지 방법이 제시되었다. 첫 번째 방법은 pole-by-pole d-q modelling에 의한 각 상들의 비대칭을 고려한 d-q 등가회로법이다[1]. 두 번째 방법은 구속시험 및 등가무부하시험에 의한 비대칭 d-q 등가회로의 구성이다[2].

그러나 LIM 내부의 특성은 이러한 등가법에 의해 정확하게 예측할 수는 없다.

유한요소법은 비선형 특성과 동특성 해석법으로 등가회로법보다 더 중요시 되어 왔다. 제어 알고리즘과 수치해석법이 결합된 이러한 접근법들은 현재 많은 연구자들의 관심을 끌고 있다.[3]~[5]

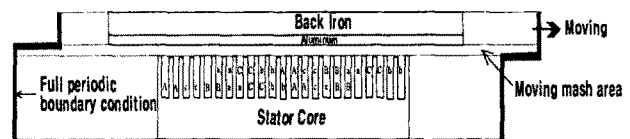
본 논문에서는 유한요소법(FEM)과 제어알고리즘이 결합된 기법을 이용한 3차원 반송시스템의 LIM의 동특성 해석법이 제안되었고, 일정한 속도로 제어하기 위해서 1차측 모터들의 적절한 간격이 선택 되어진다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림1은 3D 반송시스템 모형을 보여주며 그림2는 LIM의 2차원 해석모형을 나타낸다.

일정 속도제어를 위한 1차측의 간격 판단은 그림2와 같이 양쪽에 주기경계조건을 증감시켜가며 판단하였다.(2m, 1.6m, 1.2m, 0.8m, 0.6m, 0.4m)



〈그림 2〉 LIM의 해석 모델

2.2 해석 기법

2.2.1 운동을 고려한 유한요소 정식화

이동 좌표 시스템을 적용한 LIM의 자기 벡터포텐셜을 기술한 지배방정식은 다음과 같다[6].

$$\text{rot} \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} = \vec{J}_0 - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, σ 은 Russell and Norsworthy factor에 의한 횡방향 효과를 고려한 2차 등가 도전율이다[7]. 또한 회로 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[U] = [R][I] + [L_0] \frac{d}{dt} [I] + [E] \quad (2)$$

여기서, $[E]$: 권선의 유기기전력 $[U]$: 공급 전압
 $[L_0]$: 누설 인덕턴스 $[R]$: 고정자 저항
 $[I]$: 출력 전류

식(1)을 풀기 위해 Galerkin법을 사용하였다. 또한 식(1), (2)에서 후퇴 시간차분법을 사용하였으며, 식(1), (2)가 결합된 지배방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} [S] + \frac{[D]}{\Delta t} & -[N] \\ [N]^T & \frac{[L] + \Delta t [R]}{h_{eff}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [I] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [D] \\ \frac{[D]}{\Delta t} & [0] \\ -[N]^T & \frac{[L_0]}{h_{eff}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [I] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [0] \\ -\frac{\Delta t}{h_{eff}} [U] \end{bmatrix}_{t+\Delta t} \quad (3)$$

여기서, $[A]$: 자기 벡터 포텐셜 $[D]$: 와전류에 관계된 계수 행렬
 h_{eff} : 고정자의 적층폭

2.2.2 추력과 지속 산출

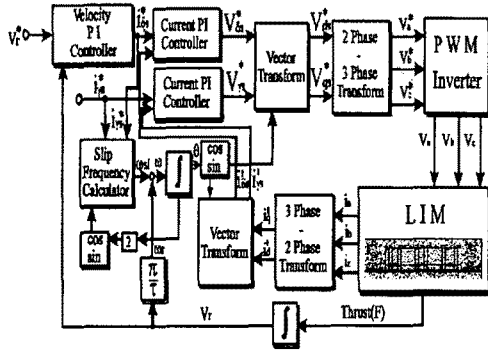
각각의 시간에 대해 LIM에 작용하는 추력 F_x 는 맥스웰응력법의 의해 구할 수 있다.

$$F_x = \int_{1/2\mu_0}^w [(B_x^2 - B_y^2)n_x + 2n_y B_x B_y] dl \quad (4)$$

여기서, n_x 와 n_y 는 단위 법선 벡터이고 w 는 1차축 적층폭이다. 유한요소 영역에서 매상매극의 쇠교자속은 다음과 같이 계산된다.

$$\lambda = N \int \vec{A} \cdot d\vec{S} = N(A_1 - A_2)w \quad (5)$$

여기서, w 는 1차축 적층폭이고 N 은 코일 턴수이며, A_1 과 A_2 는 슬롯의 벡터 포텐셜 평균값이다. 그림3은 해석 시스템의 블록선도이다.



〈그림 3〉 시스템의 블록선도

본 논문에서 제안된 해석 기법은 샘플링 타임을 10[μsec]로 사용하였으며, 벡터 제어기에서 램프 속도지령(max. 2.0 m/sec)을 적용하였다. 추력 지령전류는 i_{ds}^* 이고 자화 지령전류는 i_{qs}^* 이며, 정격 와트에서 i_{ds}^* 의 최대치는 6[A]이고 i_{qs}^* 는 2[A]이다.

동특성 해석에서 LIM의 속도는 다음 식에 의해 계산된다.

$$V_r = \int (F_x - F_l) / m \cdot dt, \omega_r = (\pi / \tau) \cdot V_r, \theta = \int (\omega_r + \omega_{s1}) \cdot dt \quad (6)$$

여기서, V_r , ω_r , ω_{s1} 은 각각 캐리어의 속도, 각속도, 슬립각속도이고 F_x , F_l 은 추력과 부하추력이며 τ 는 극간격이다.

2.3 시뮬레이션 결과 및 검토

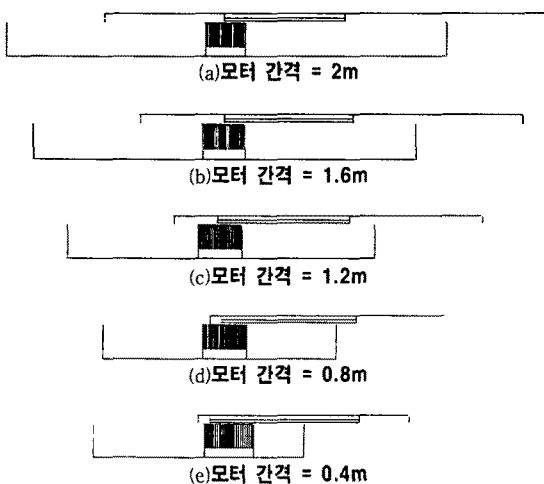
그림4는 일정 속도제어를 위한 적절한 모터 간격을 구하기 위해 다양한 주기경계조건 간격(2m, 1.6m, 1.2m, 0.8m, 0.6m, 0.4m)을 나타낸다.

그림5에 나타난 것처럼 모터 간격이 넓으면 응답속도가 매우 진동하는 것에 반해서 0.4m와 0.6m의 모터 간격에서의 응답속도는 일정한 지령속도 2m/sec와 거의 동일하다는 것을 알 수 있다.

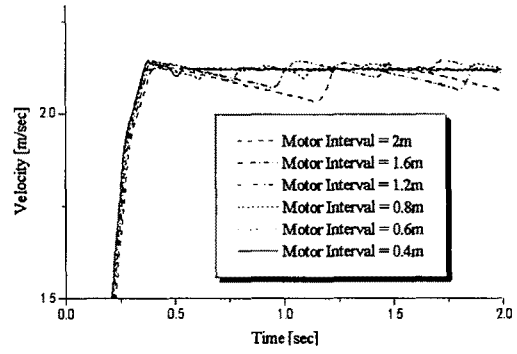
그림6은 왕복운동에서의 각각 1차축 간격들에 따른 응답속도 특성을 나타낸다. 0.4m에서의 응답속도는 지령속도와 거의 동일한 반면 모터 간격이 0.6m인 것은 왕복운동에서의 응답속도는 지연되었다.

그림5, 6에서의 응답들은 PID 제어기의 이득 조정에 관계가 없는 기동시 최대 추력에 대한 응답이라는 것을 주의해야 된다. 그러므로 0.4m의 모터간격은 3D 반송 장치의 일정속도 벡터제어 대해 최적 거리로 정의 된다.

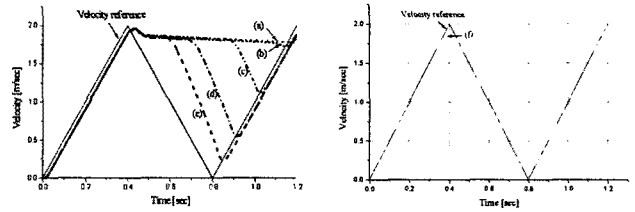
그림7은 제안된 해석 시스템 속도 제어에서의 추력전류, 자화전류 추력 응답을 나타낸 것이다.



〈그림 4〉 다양한 주기경계조건

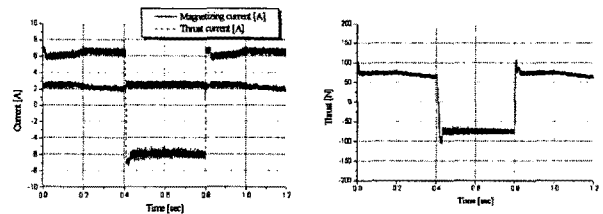


〈그림 5〉 정속도 명령에서의 속도 응답



(a) 모터 간격 = 2m (b) 모터 간격 = 1.6m (c) 모터 간격 = 1.2m (d) 모터 간격 = 0.8m (e) 모터 간격 = 0.6m

〈그림 6〉 왕복운동 명령에서의 속도 응답



〈그림 7〉 왕복운동 명령에서의 추력전류, 자화전류, 추력 응답 (모터 간격 = 0.4m)

3. 결 론

일정속도 제어 알고리즘의 개발을 위해 이동을 고려한 FEM과 제어 알고리즘이 결합된 기법을 이용한 3D 반송 시스템인 LIM의 동특성 해석법이 제안되었고, 정속도 제어를 위해 1차축 모터들의 적당한 이격거리가 선택되었다.

본 논문에서 제안된 기법은 LIM이 사용되는 시스템의 제어알고리즘 개발과 구성에 사용할 수 있다. 또한 MAGLEV, 반송 시스템, 엘리베이터 등과 같은 다른 기기들에도 사용될 수 있는 것으로 사료된다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] T. A. Lipo and T. A. Nondahl, "Pole-by-pole d-q model of a linear induction machine," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No. 2, 1979.
- [2] H. Sugimoto and M. Tomoe, "A vector control method of a linear induction motor with asymmetrical constants and its performance characteristics," *Trans. on IEE Japan*, Vol. 114-D, pp. 17-23, 1994.
- [3] D. H. Im and J. H. Lee, "Dynamic characteristics analysis of LIM's vector control using FEM," *Proceedings of LDIA'95*, pp. 307-310, 1995.
- [4] D. H. Im, and C. E. Kim, "Finite element force calculation of a linear induction motor taking account of the movement," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 30, No. 5, pp. 3495-3498, 1994.
- [5] J. H. Lee, D. S. Hyun, "Dynamic Characteristic Analysis of LIM Using Coupled FEM & Control algorithm," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 36, No. 7, pp 1876-1879, July 2000.
- [6] K. Muramatsu, T. Nakada, et al., "Comparison of coordinate system for eddy current analysis in moving conductors," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 28, no. 2, pp.1186-1189, 1992.
- [7] R. L. Raussell and K.M. Norsworthy, "Eddy current and wall losses in screened rotor induction motors," *Proc. of IEE*, vol. 105A, no. 2, pp. 163-175, 1958.